

# Technische Universität München

Institut für Maschinen- und Fahrzeugtechnik

Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik

## **Fahrer-Fahrzeug-Interaktion einer automatisierten, kraftstoffeffizienten Fahrzeuglängsführung**

Dipl.-Medieninf. (Univ.) Sonja Angelika Hofauer

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen  
Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs**

genehmigten Dissertation.

|                          |   |
|--------------------------|---|
| Vorsitzende:             | Prof. Dr. rer. nat. Sonja Berensmeier   |
| Prüfer der Dissertation: | 1. Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp<br>2. Prof. Dr. rer. nat. habil. Heinrich Hußmann |

Die Dissertation wurde am 05.04.2017 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 22.08.2017 angenommen.



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München in Kooperation mit der MAN Truck & Bus AG in den Jahren 2012 bis 2016. Ich möchte mich bei allen bedanken, die mich auf diesem Weg begleitet und meine Arbeit auf vielfältige Weise unterstützt haben.

Ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp, für die Betreuung meiner Arbeit. Neben fachlichen Anregungen und Diskussionen schätze ich das von ihm entgegengebrachte Vertrauen und die von ihm gewährte Freiheit sehr. Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Heinrich Hußmann danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und die freundliche Übernahme des Koreferats. Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes danke ich Frau Prof. Dr. rer. nat. Berensmeier.

Bei der MAN Truck & Bus AG möchte ich mich ganz besonders bei Andreas Zimmermann für das entgegengebrachte Vertrauen und die Unterstützung dieser Arbeit bedanken. Ganz herzlichen Dank an Dr. Britta Michel für die vielen wertvollen Ratschläge und die fortwährende Unterstützung in den letzten Jahren. Ebenso möchte ich mich bei Dr. Sigrun Weise und Daniel Feldmeier bedanken.

Meinen Kollegen am FTM danke ich für die wunderschöne Zeit am Lehrstuhl. Natalie Richardson, Thomas Daun, Christopher Frank und Dr. Frank Diermeyer, ihr seid Wegbegleiter meiner Arbeit – vielen Dank für eure wertvolle Unterstützung und Hilfe. Meinen aktuellen und ehemaligen Kollegen danke ich für die vielen schönen Erinnerungen.

Mein besonderer Dank gilt den nichtwissenschaftlichen Mitarbeitern Gaby Weigand, Norina Jerg, Nina Julius, Günter Anthuber, Florian Biechl und Alex Suckow. Ihr standet mir stets mit Rat und Tat zur Seite und ward immer eine große Unterstützung und Hilfe. Für die vielen inspirierenden Diskussionen danke ich ganz besonders Patrick Stenner, Dr. Peter Burda und Dr. Stephan Matz.

Meinen kritischen Lektoren Dr. Britta Michel, Dr. Anna Karmann, Thomas Daun und Andreas Zimmermann danke ich für ihre Anregungen und ihr Feedback. Für die Rechtschreibkorrektur bedanke ich mich ganz herzlich bei meinem Vater, der leider den Abschluss dieser Arbeit nicht mehr erleben durfte. Spezieller Dank auch an meine Schwester, die mir fortwährend versuchte die deutsche Grammatik zu lehren.

All meinen Studentinnen und Studenten, die mit mir an diesem Projekt gearbeitet haben, gilt mein besonderer Dank. Ihr habt meine noch so verwegenen Ideen mit eurem Engagement großartig unterstützt. Auch meinen wissenschaftlichen Hilfskräften am Fahrsimulator danke ich für Ihren Einsatz. Durch euch bleiben die zahlreichen Stunden am Simulator in schöner Erinnerung.

Meiner Familie danke ich von ganzem Herzen, für die unglaubliche Unterstützung bei all meinen Vorhaben. Mein größter Dank gilt meinem Mann. Lieber Ralph, vielen Dank für deinen liebevollen Rückhalt, deine unendliche Unterstützung, Ausdauer und Geduld. Vielen Dank für alles!

Garching, März 2017

Sonja Angelika Hofauer

# Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Motivation</b> .....  | <b>1</b>  |
| 1.1      | Ansätze für kraftstoffeffizientes Fahren .....                           | 2         |
| 1.2      | Problemstellung und Zielsetzung .....                                    | 4         |
| <b>2</b> | <b>Stand der Wissenschaft</b> .....                                      | <b>6</b>  |
| 2.1      | <b>Grundlagen der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion</b> .....                  | <b>6</b>  |
| 2.1.1    | Modelle der Interaktionsgestaltung .....                                 | 6         |
| 2.1.2    | Fahrerseitige Aspekte der Fahrzeugführung .....                          | 8         |
| 2.1.3    | Normen und Gestaltungsrichtlinien .....                                  | 11        |
| 2.2      | <b>Fahrerassistenzsysteme mit steigendem Automatisierungsgrad</b> .....  | <b>13</b> |
| 2.2.1    | Nomenklatur der Automatisierungsstufen .....                             | 13        |
| 2.2.2    | Funktionsteilung zwischen Fahrer und FAS .....                           | 14        |
| 2.2.3    | Herausforderungen zunehmender Automatisierung .....                      | 14        |
| 2.3      | <b>Bewertung der Kontrollierbarkeit</b> .....                            | <b>19</b> |
| 2.3.1    | Vorgehen zur Kontrollierbarkeitsbewertung automatisierter FAS .....      | 20        |
| 2.3.2    | Relevante Studien zur Kontrollierbarkeitsbewertung.....                  | 21        |
| 2.3.3    | Systemunsicherheitsinformation (SUI) .....                               | 22        |
| 2.3.4    | Fazit zur Bewertung der Kontrollierbarkeit .....                         | 23        |
| 2.4      | <b>Klassifikation kraftstoffeffizienter Fahrerassistenzsysteme</b> ..... | <b>24</b> |
| 2.4.1    | Reaktive Regelung auf Vorderfahrzeuge .....                              | 25        |
| 2.4.2    | Prospektive Regelung auf Topographie .....                               | 25        |
| 2.4.3    | Prospektive Regelung auf statische Infrastrukturelemente.....            | 26        |
| 2.4.4    | Prospektive Regelung auf dynamische Infrastrukturelemente.....           | 28        |
| 2.4.5    | Prospektive Regelung auf Vorderfahrzeuge .....                           | 28        |
| 2.4.6    | Handlungsempfehlende FAS zur Kraftstoffeffizienz .....                   | 28        |
| 2.4.7    | Fazit zur Analyse kraftstoffeffizienter FAS .....                        | 28        |
| <b>3</b> | <b>Entwicklungsansatz und Methodik</b> .....                             | <b>30</b> |
| 3.1      | <b>Fazit zum Stand der Wissenschaft</b> .....                            | <b>30</b> |
| 3.1.1    | Systemspezifikation und Funktionsallokation .....                        | 30        |
| 3.1.2    | Anwendbarkeit bestehender HMI-Konzepte.....                              | 31        |
| 3.1.3    | Ableitung der Aufgabenstellung .....                                     | 31        |
| 3.2      | <b>Aufstellung der Forschungsfragen</b> .....                            | <b>32</b> |
| 3.2.1    | Arbeitsmodell zur Fahrer-FAS-Interaktion.....                            | 32        |

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| 3.2.2      | Themeneingrenzung.....   | 34        |
| 3.2.3      | Ableitung der Forschungsfragen.....  | 35        |
| <b>3.3</b> | <b>Makromethodik und Vorgehen.....</b>   | <b>35</b> |
| <b>4</b>   | <b>Explorative Anforderungsanalyse.....</b>  | <b>38</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Mikromethodik der Anforderungsanalyse.....</b>  | <b>38</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Qualitative, nutzerbasierte Anforderungsanalysen.....</b>                                     | <b>39</b> |
| 4.2.1      | Feldstudie bei Lkw-Mitfahrten.....   | 39        |
| 4.2.2      | Fokusgruppe zur Anforderungsdefinition.....  | 39        |
| <b>4.3</b> | <b>Kernergebnisse der analytischen Anforderungsdefinition.....</b>                               | <b>41</b> |
| 4.3.1      | Stakeholder-Analyse.....   | 41        |
| 4.3.2      | Aufgabenanalyse.....   | 42        |
| 4.3.3      | Situationsanalyse.....   | 43        |
| <b>4.4</b> | <b>Nutzerbasierte Fahrsimulatorstudie zur Anforderungsdefinition.....</b>                        | <b>45</b> |
| 4.4.1      | Hypothesen und Versuchsdesign.....   | 45        |
| 4.4.2      | Apparatus und Stichprobe.....  | 46        |
| 4.4.3      | Ergebnisse und Diskussion.....   | 47        |
| <b>4.5</b> | <b>Zusammenfassung der Anforderungen.....</b>  | <b>49</b> |
| <b>5</b>   | <b>HMI-Konzeptentwicklung und -evaluation.....</b>   | <b>50</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Mikromethodik der HMI-Konzeptentwicklung und -evaluation.....</b>                             | <b>50</b> |
| 5.1.1      | Methodik der analytischen Expertenstudien.....   | 51        |
| 5.1.2      | Methodik der formativen Fahrsimulatorstudie.....   | 52        |
| <b>5.2</b> | <b>Ergebnisse der analytischen Expertenstudien.....</b>  | <b>53</b> |
| 5.2.1      | Heuristische Walkthrough Analyse.....  | 53        |
| 5.2.2      | Validierungsstudie mittels Videoprototypen.....  | 54        |
| <b>5.3</b> | <b>Ergebnisse der formativen Fahrsimulatorstudie.....</b>  | <b>54</b> |
| 5.3.1      | Ableitung der Fragestellungen.....   | 54        |
| 5.3.2      | Auswahl der Messgrößen.....  | 56        |
| 5.3.3      | Apparatus und Stichprobe.....  | 57        |
| 5.3.4      | Zusammenfassung der Ergebnisse und Diskussion.....   | 57        |
| <b>5.4</b> | <b>Optimierung des Anzeigeconzepts.....</b>  | <b>62</b> |
| 5.4.1      | Erhöhung des Detaillierungsgrades.....   | 62        |
| 5.4.2      | Integration von Systemunsicherheitsinformation (SUI).....  | 63        |
| <b>6</b>   | <b>Summative Fahrsimulatorstudie zur nutzerzentrierten<br/>Kontrollierbarkeitsbewertung.....</b> | <b>65</b> |
| <b>6.1</b> | <b>Fragestellung und Zielsetzung.....</b>  | <b>65</b> |
| <b>6.2</b> | <b>Mikromethodik der Kontrollierbarkeitsbewertung.....</b>                                       | <b>66</b> |

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| 6.2.1      | Vorgehen zur Auswahl der Testszzenarien .....  | 66         |
| 6.2.2      | Auswahl der Messgrößen .....   | 67         |
| 6.2.3      | Vorgehen zur Kontrollierbarkeitsabschätzung.....   | 69         |
| <b>6.3</b> | <b>Experimentelles Design der Studie.....</b>  | <b>69</b>  |
| 6.3.1      | Testszzenarien und Versuchsstrecken .....  | 69         |
| 6.3.2      | Versuchsdesign .....   | 73         |
| 6.3.3      | Versuchsablauf.....  | 74         |
| 6.3.4      | Beschreibung der Stichprobe.....   | 74         |
| <b>6.4</b> | <b>Ergebnisse.....</b>   | <b>75</b>  |
| 6.4.1      | Einfluss von erstmaligem nicht situationsgerechtem Automationsverhalten auf die Gesamtbewertung (P-1) .....                  | 75         |
| 6.4.2      | Einfluss der SUI auf die Gesamtbewertung (P-2).....  | 77         |
| 6.4.3      | Kontrollierbarkeitsbewertung (P-3) mit SUI Einfluss (P-4) .....  | 79         |
| <b>6.5</b> | <b>Diskussion der Evaluationsergebnisse .....</b>  | <b>85</b>  |
| 6.5.1      | Diskussion des Einflusses von erstmaligem nicht situationsgerechtem Automationsverhalten auf die Gesamtbewertung (P-1) ..... | 85         |
| 6.5.2      | Diskussion des Einflusses der SUI auf die Gesamtbewertung (P-2) .....  | 86         |
| 6.5.3      | Diskussion der Kontrollierbarkeitsbewertung (P-3) mit Einfluss SUI (P-4)...  | 87         |
| 6.5.4      | Fazit .....  | 90         |
| 6.5.5      | Zusammenfassung der Erkenntnisse.....  | 92         |
| <b>7</b>   | <b>Diskussion und Ausblick .....</b>   | <b>94</b>  |
| 7.1        | Übertragbarkeit der Entwicklungsmethodik.....  | 94         |
| 7.2        | Kontrollierbarkeitsbewertung umfeldwahrnehmender, automatisierter FAS.....   | 94         |
| 7.3        | Übertragbarkeit auf höhere Automatisierungsstufen.....   | 96         |
| <b>8</b>   | <b>Zusammenfassung .....</b>   | <b>97</b>  |
|            | <b>Abbildungsverzeichnis.....</b>  | <b>99</b>  |
|            | <b>Tabellenverzeichnis.....</b>  | <b>104</b> |
|            | <b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>  | <b>105</b> |
|            | <b>Verwendete Formelzeichen.....</b>   | <b>107</b> |
|            | <b>Literaturverzeichnis.....</b>   | <b>108</b> |
|            | <b>Verzeichnis studentischer Arbeiten .....</b>  | <b>128</b> |
|            | <b>Verzeichnis eigener Veröffentlichungen im Kontext der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion .....</b>                               | <b>129</b> |
|            | <b>Anhang .....</b>  | <b>131</b> |

Um die Arbeit lesefreundlich zu gestalten, wurde auf eine durchgehend explizite Nennung beider Geschlechter verzichtet.

# 1 Motivation

Bei der Betrachtung der Gesamtbetriebskosten im Güterkraftverkehr stellen die Kraftstoffkosten einen der Hauptkostenfaktoren dar. So entfällt im nationalen Fernverkehr schwerer Lastkraftwagen (Lkw) ein Anteil von 26 % auf die Kraftstoffkosten (Abbildung 1-1) [Bun15d]. Vor dem Hintergrund eines kostengetriebenen Marktes haben Maßnahmen zur Kraftstoffeffizienz eine große ökonomische Bedeutung.

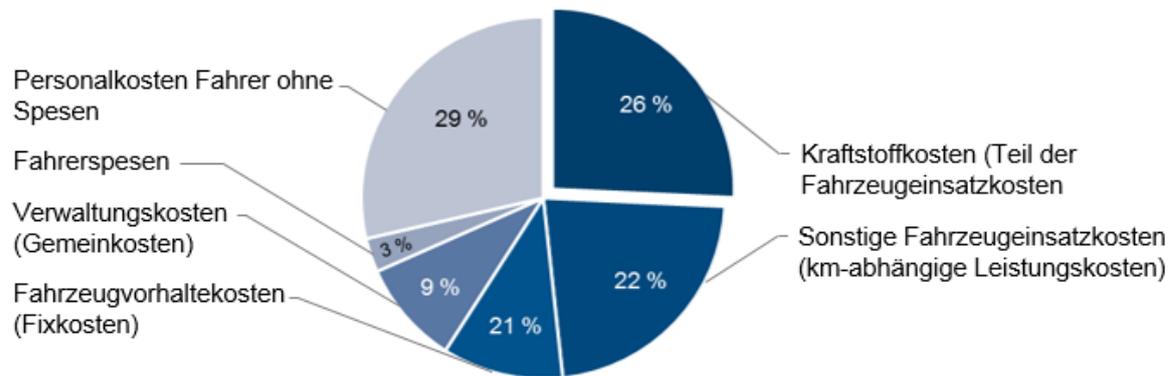


Abbildung 1-1: Kostenstruktur Güterkraftverkehr 2013 - nationaler Fernverkehr nach [Bun15d]

Neben der Wirtschaftlichkeit stellen Umweltaspekte eine hohe Relevanz dar. Wissenschaftliche Studien sehen mit hoher Wahrscheinlichkeit die Hauptursache für die beobachtete globale Erwärmung in den anthropogenen Treibhausgasemissionen [Bun14; Rah07, S. 38ff]. Zur Einschränkung weitreichender Folgen der globalen Erwärmung bedarf es einer deutlichen Reduktion dieser Emissionen. Den größten Anteil der Treibhausgase nimmt das vorrangig durch Verbrennung fossiler Energieträger hervorgerufene Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) mit derzeit 88 % ein [Umw16]. Umweltpolitisch wird von der deutschen Bundesregierung [Bun14] ein Minderungsziel der Treibhausgase von 80-95 % bis zum Jahr 2050 festgesetzt, gegenüber dem Referenzjahr von 1990. Auf internationaler Ebene wird das Abkommen von Paris im Rahmen des UN-Weltklimagipfels als wichtiger Schritt gewertet, das 2020 in Kraft treten und die nationalen Selbstverpflichtungen überwachen soll [Bun15a].

Auf den Transport-Sektor entfielen 2013 weltweit 22,9 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen (Abbildung 1-2) [IEA15, S. 69].

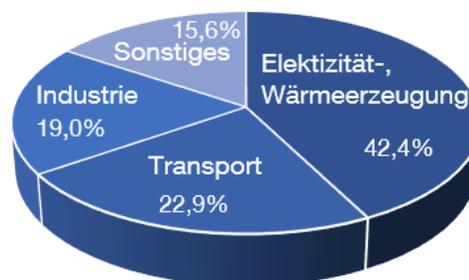


Abbildung 1-2: CO<sub>2</sub>-Emissionen 2013 nach Sektor auf Basis von [IEA15, S. 69]

Der Transport-Sektor ist der einzige Sektor, der seit 1990 die Emissionen nicht mindern konnte [Umw15]. Die Emissionen schwerer Lkw konnten in der Vergangenheit reduziert werden [Kop09, Moh12, S.8], was jedoch, aufgrund eines steigenden Güterverkehrsaufkommens auf der Straße, die Gesamtbilanz nicht entscheidend verbessern konnte [Sta15]. Zur Senkung der Emissionen schafft die Europäische Union (EU) 2009 einen verbindlichen

Rechtsrahmen, der den CO<sub>2</sub>-Ausstoß auf 95 g/km im Flottendurchschnitt für leichte Nutzfahrzeuge und Personenkraftwagen (Pkw) bis 2020 begrenzen soll [Eur09].

Die Treibhausgasemissionen schwerer Lkw betragen im Vergleich zu Pkw lediglich rund ein Fünftel (pro transportiertem Kilogramm pro Kilometer, Anhang A), dennoch können weitere Maßnahmen zur Reduktion von Kraftstoffverbrauch und Emissionen schwerer Lkw, aufgrund der vergleichsweise hohen Laufleistung, einen entscheidenden ökologischen und ökonomischen Beitrag leisten.

## **1.1 Ansätze für kraftstoffeffizientes Fahren**

Um die Wirtschaftlichkeit des Investitionsgutes „schweres Nutzfahrzeug“ vor dem Hintergrund einer Verringerung der Emissionen zu erhöhen, wird die Frage gestellt:

Wie kann kraftstoffeffizientes und somit emissionsreduziertes Fahren im schweren Lkw erreicht werden?

Hierzu lassen sich vier Ansätze differenzieren:

### **Verkehrsinfrastruktur und -führung**

Die Verkehrsinfrastruktur beeinflusst zu einem hohen Maß die Energieeffizienz des Verkehrs [Rot14, S. 362f]. Einen möglichen Ansatzpunkt zur Erhöhung der Kraftstoffeffizienz betreffen daher Verkehrsführung und -infrastruktur. Durch Optimierung der Infrastruktur, wie beispielsweise der Lichtsignalanlagensteuerung, kann der Verkehrsfluss erhöht, sowie Staubildung und die Anzahl der Stopps verringert werden [Bra08, S. 93]. Dies kann zu einem gleichmäßigeren Geschwindigkeitsverlauf mit weniger Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen führen. Des Weiteren kann auf Navigationsebene die Routenwahl hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs optimiert werden. Auf einer effizienten Route sollten Ortsdurchfahrten, große Steigungen und hohe Verkehrsdichte vermieden werden [Led14, S. 320]. Im Straßengüterverkehr lassen sich zudem Kraftstoffeffizienz und Umweltbilanz über eine Erhöhung der Transporteffizienz (Liter Diesel bzw. Gramm CO<sub>2</sub> pro Tonnenkilometer) durch optimierte Tourenplanung und Logistikstrategien steigern [Hil09; Sch14, S. 65].

### **Fahrzeugseitige Optimierung**

Eine zweite Möglichkeit ist die Optimierung von Gesamtfahrzeug und Komponenten, um die Fahrwiderstände zu reduzieren. So bietet insbesondere der Lkw viel Potential zur Effizienzsteigerung, was mitunter durch derzeitige gesetzliche Rahmenbedingungen oder hohe Zusatzkosten limitiert ist [Lie13, S. 17; Rad13, S. 7; Ter09, S. 1]. Beispielsweise ist die Minimierung von Luftwiderstand durch aerodynamischere Anpassungen an Zugmaschine und Auflieger zu nennen [Den12, S. 993f]. Weiterhin könnte die Aerodynamik durch Kamera-Monitor-Systeme an Stelle von klassischen Außenspiegeln verbessert werden [Zai15]. Der Rollwiderstand kann durch veränderte Gummimischungen und Strukturanpassungen an den Reifen sowie Leergewichtsreduktion durch Leichtbau verbessert werden [Den12]. Die Verbesserung des Motorwirkungsgrads durch Brennverfahrensoptimierung und die Reduzierung von Reibung im Triebstrang sind bereits weit vorangeschritten und lassen sich nur mit hohen Zusatzkosten weiter optimieren [Rad13, S. 7; Ter09, S. 1].

## Fahrschulungen

Eine vergleichsweise kostengünstige Methode, den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren, ist eine kraftstoffeffiziente Fahrstrategie über Fahrerhaltensänderungen zu bewirken [Bar10; Rad13, S. 7]. Kurzfristig lassen sich durch Fahrschulungen mittlere Kraftstoffeinsparungen von 5-15 % erreichen [For07]. Dieser positive Effekt kann sich teilweise langfristig nicht halten, weil die Fahrer nach einer gewissen Zeit in alte Verhaltensmuster zurückfallen können [Beu09]. Studien zeigen, dass sich das mögliche Einsparpotential mittelfristig auf 5 % reduziert und nach drei Jahren lediglich 2-3 % beträgt [For07]. Hier können handlungsempfehlende Fahrerassistenzsysteme (FAS) ansetzen, die dem Fahrer prospektiv oder retrospektiv durch Hinweise unterstützen [Hey14, S. 7ff; Hey15; Thi14, S. 258f]. Die Umsetzung der kraftstoffeffizienten Fahrstrategie bleibt abhängig vom Können und Wollen des Fahrers [Dau12; Dor03, S. 54f; Küs87].

## Automatisierung

Aus dem Einfluss der individuellen Fahrstrategie lässt sich eine vierte prinzipielle Möglichkeit ableiten: die Steigerung der Kraftstoffeffizienz durch ein kontinuierlich regelndes FAS.

Ein potentieller Vorteil kann ein dauerhaft hohes Einsparpotential sein [Dau13; Rad13, S. 7]. Unabhängig von den Wahrnehmungs-, Antizipations- und Regelungsfähigkeiten des Fahrers kann das FAS Geschwindigkeitstrajektorie und Betriebsstrategie optimieren und präzise umsetzen. Im Vergleich zu menschlichen Fähigkeiten können eine Vielzahl von Faktoren aufgrund hoher maschineller Datenverarbeitungskapazitäten zur Optimierung der Geschwindigkeitstrajektorie einbezogen werden. Zudem kann der Vorausschaubereich durch Nutzung von Datenkommunikation (Car2X) vergrößert werden.

Der Technologiefortschritt dient als Wegbereiter dieser automatisierten, kraftstoffeffizienten Fahrzeuglängsführung. Eine Roadmap zum automatisierten und kooperativen Fahren ist in Abbildung 1-3 aufgezeigt. Demnach sind Sensornetzwerke als Basis für Funktionen wie die automatisierte, kraftstoffeffiziente Längsführung in den nächsten 5-10 Jahren zu erwarten.

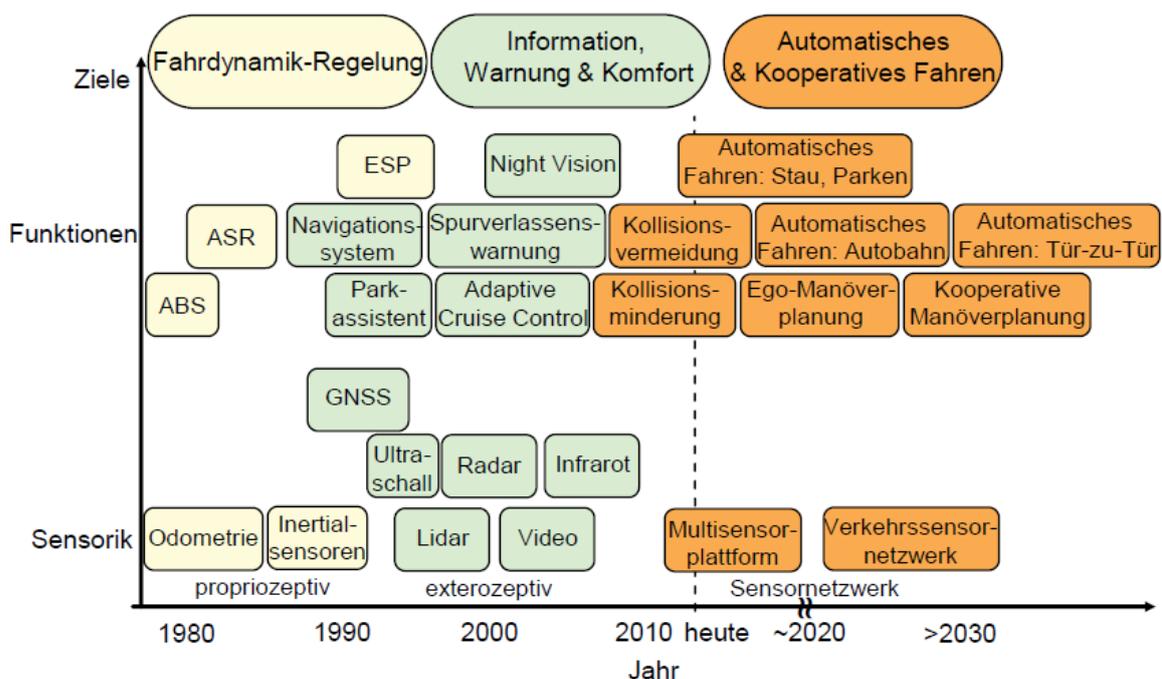


Abbildung 1-3: Roadmap zum automatisierten und kooperativen Fahren [Ben14, S. 8], übersetzt durch [Gna15, S. 42]

Neben dem Vorteil eines potentiell hohen Kraftstoffeffizienzpotentials müssen mögliche Probleme und Herausforderungen (Kap. 1.2) betrachtet werden.

## 1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Im Hinblick auf FAS mit steigendem Automatisierungsgrad postulieren [Gas15, S. 52]: „Von überragender Wichtigkeit ist der Forschungsbedarf zur Mensch-Maschine-Interaktion.“

Potentielle Probleme in der Interaktion zwischen dem Fahrer und der automatisierten, kraftstoffeffizienten Längsführung ergeben sich aus dem Informationsungleichgewicht. Dies soll mit einem Beispiel veranschaulicht werden:

Eine im Vergleich zu Pkw deutlich höhere Masse führt bei schweren Lkw infolge der höheren kinetischen Energie zu längeren Ausrollwegen, weil die Fahrwiderstände im Verhältnis zur Masse geringer sind. Abhängig von der Differenzgeschwindigkeit und dem Streckenverlauf befindet sich der Regelgrund (z. B. Tempolimit) meist nicht innerhalb des Sichtbereichs des Fahrers. Abbildung 1-4 skizziert die vorausschauende Regelung auf ein Tempolimit. So ist die Geschwindigkeitsänderung durch das FAS für den Fahrer bereits wahrnehmbar, wenn sich das Tempolimit noch nicht im Sichtbereich des Lkw-Fahrers befindet.

Probleme können sich durch mangelndes Vertrauen in das FAS ergeben. Durch unerwünschte Fahrereingriffe wird das Potential der Kraftstoffeffizienz reduziert. Während bei vorausschauender Regelung auf das noch nicht einsehbare Tempolimit die Fahrerakzeptanz und somit die Wirksamkeit eine große Herausforderung darstellt, ist dies im Sichtbereich des Regelobjekts die Kontrollierbarkeit. Hier muss der Fahrer als Überwacher des FAS die Informationen mit der Realität abgleichen. Sollte der Fahrer aufgrund seines zu hohen Vertrauens in das FAS die Überwachungstätigkeit vernachlässigen, kann ein nicht situationsgerechtes Verhalten des FAS die Sicherheit gefährden.

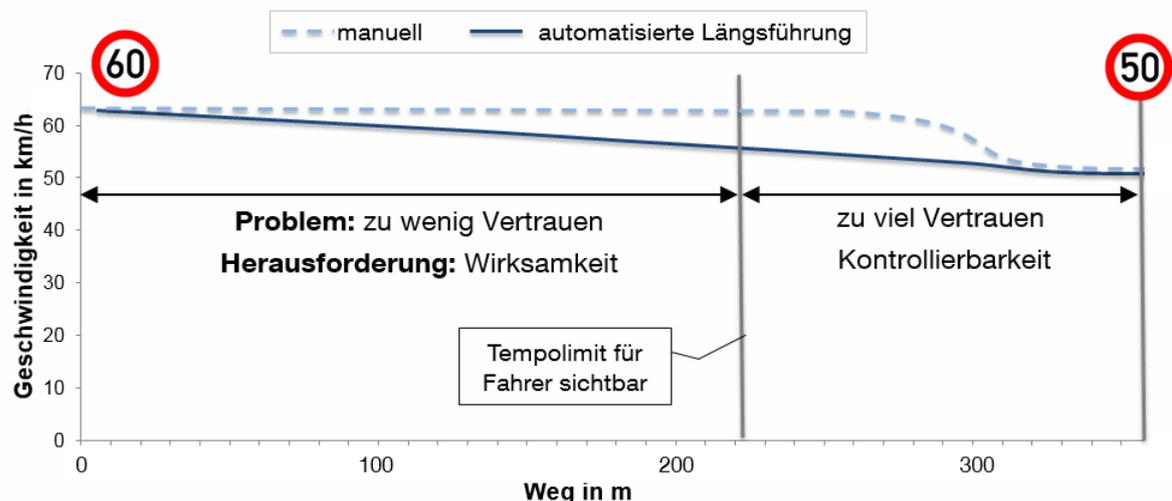


Abbildung 1-4: Annäherung an ein Tempolimit – Vergleich zwischen kraftstoffeffizienter Längsführung mit manueller Fahrt

Folglich ist die Gestaltung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion entscheidend, um das Informationsungleichgewicht zu verringern und so die Wirksamkeit und die Kontrollierbarkeit der automatisierten, kraftstoffeffizienten Fahrzeuglängsführung zu gewährleisten.

Dabei gilt es, die essentiell nötigen Informationen zu identifizieren und dem Lkw-Fahrer zum richtigen Zeitpunkt in einfacher Art und Weise zu präsentieren. Herausforderung ist hierbei, dass fehlende oder unzureichende Informationen die Wirksamkeit bzw. Kontrollierbarkeit

minimieren können, während zu viele oder unpassende Informationen einen negativen Effekt auf Akzeptanz und Gebrauchstauglichkeit haben können.

In dieser Arbeit wird zunächst der Stand der Wissenschaft zur Gestaltung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion skizziert, um eine optimale Anpassung an den Fahrer vornehmen zu können. Anschließend werden die Grundlagen der FAS mit steigendem Automatisierungsgrad aufgezeigt. Daraus lässt sich die Funktionsteilung zwischen FAS und Fahrer ableiten und Herausforderungen zunehmender Automatisierung bei der Gestaltung der Interaktion berücksichtigen.

Die Kontrollierbarkeit stellt bei übersteigertem Vertrauen eine zentrale Herausforderung dar. Deshalb wird der Stand der Wissenschaft zur Kontrollierbarkeitsbewertung analysiert, um ein Vorgehen für das hier betrachtete FAS zu erarbeiten.

Zur Ermittlung des Funktionsumfangs der automatisierten, kraftstoffeffizienten Längsführung, werden eine Klassifikation kraftstoffeffizienter FAS durchgeführt und bestehende HMI-Konzepte analysiert.

Ausgehend vom Fazit zum Stand der Wissenschaft werden die Forschungsfragen dieser Arbeit formuliert, sowie das Vorgehen zur Gestaltung und Bewertung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion für eine automatisierte, kraftstoffeffiziente Fahrzeuglängsführung abgeleitet.

## 2 Stand der Wissenschaft

In diesem Kapitel wird der Stand der Wissenschaft im Kontext der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion einer automatisierten, kraftstoffeffizienten Fahrzeuglängsführung aufgezeigt.

### 2.1 Grundlagen der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion

Um die Gestaltung der Interaktion optimal auf die Fähigkeiten des Fahrers anzupassen, werden folgende Aspekte analysiert: Modelle der Interaktionsgestaltung (2.1.1), fahrerseitige Aspekte der Fahrzeugführung (2.1.2) sowie relevante Normen und Gestaltungsrichtlinien (2.1.3). Hierzu wird teilweise auf Erkenntnisse der Mensch-Maschine-Interaktion sowie der Flugzeugführung zurückgegriffen, die auf die Fahrzeugführung anwendbar sind.

#### 2.1.1 Modelle der Interaktionsgestaltung

Um sich die Welt und ihr Verhalten zu erklären, kombinieren Menschen Wissen, Regeln und Fertigkeiten zu Modellen [Joh83, S. 415]. Die Mensch-Maschine-Interaktion versteht mentale Modelle als eine interne Vorstellung, die der Nutzer von einer Funktion oder einem System hat [But14, S. 49; Lin12, S. 9]. Mentale Modelle helfen, Sachverhalte aus der Umwelt zu verstehen, sowie Systemverhalten vorherzusagen und erlauben somit Handlungen planen und steuern zu können [Schl10, S. 375f]. Mentale Modelle sind subjektiv, unvollständig und instabil. Sie können durch Systemerleben und -feedback sowie durch menschliches Vergessen verändert werden [Nor83, S. 8]. Sie dienen als Basis für die Entwicklung von angemessenem Vertrauen [Kaz07, S. 342] und spielen eine Rolle bei der Lenkung von Aufmerksamkeit [Schl15, S. 77].

Neben dem mentalen Modell spielen in der Interaktionsgestaltung das präsentierte sowie das implementierte Modell eine Rolle. „Die Art und Weise, wie sich die Funktion eines Systems dem Nutzer darstellt, ist das präsentierte Modell“ [But14, S. 51], während das implementierte Modell die tatsächliche Funktionsweise des FAS abbildet. Wie in Abbildung 2-1 visualisiert, interagieren die Modelle: Die Gestaltung des präsentierten Modells erzeugt das mentale Modell des Nutzers [But14, S. 51]. Bei komplexen FAS sollte das präsentierte Modell das implementierte abstrahieren, um einen sicheren und einfachen Umgang zu ermöglichen.

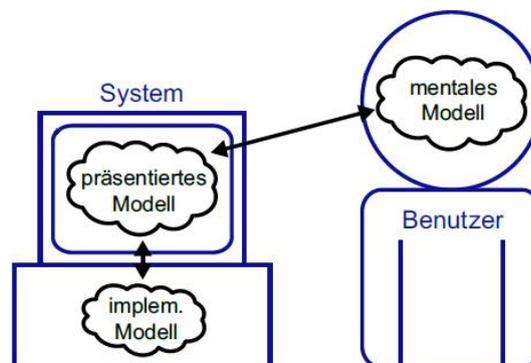


Abbildung 2-1: Mentales, präsentiertes und implementiertes Modell der Interaktionsgestaltung; Ausschnitt aus [But14, S. 51]

### 2.1.1.1 Systemtransparenz

Eine systemtransparente Gestaltung fördert den Aufbau korrekter mentaler Modelle: „Ein transparentes System funktioniert wie ein Automat mit leicht erkennbaren Zuständen, die der Benutzer in sein mentales Modell einordnen und als unmittelbares Ergebnis seiner Aktion verstehen kann“ [Fit79] nach [Wan93, S. 204]. Während die traditionelle Softwareergonomie Systemtransparenz als Systemeigenschaft ansieht [Maa95, S. 1ff], kann sie auch als Bewertungsmerkmal von Benutzerschnittstellen betrachtet werden [Wan93, S. 204].

Im Rahmen dieser Arbeit stellt Systemtransparenz aufgrund des subjektiven Charakters den Idealzustand und somit den Zielzustand in der Mensch-Maschine-Interaktion analog zu [Maa95, S. 1ff] dar. Demnach wird die Systemtransparenz als Grundforderung gesehen, um eine hohe Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit der automatisierten Längsführung zu erreichen.

### 2.1.1.2 Handlungsschritte der Mensch-Maschine-Interaktion

Die Interaktion zwischen Mensch und Maschine erfolgt über Schnittstellen, die in Anzeige und Bedienelemente unterschieden werden können [Bru15, S. 634ff]. Zielgerichtete Handlungen können in einzelne Handlungsschritte bzw. Aktionen unterteilt werden (Abbildung 2-2) [Nor86, S. 37f].

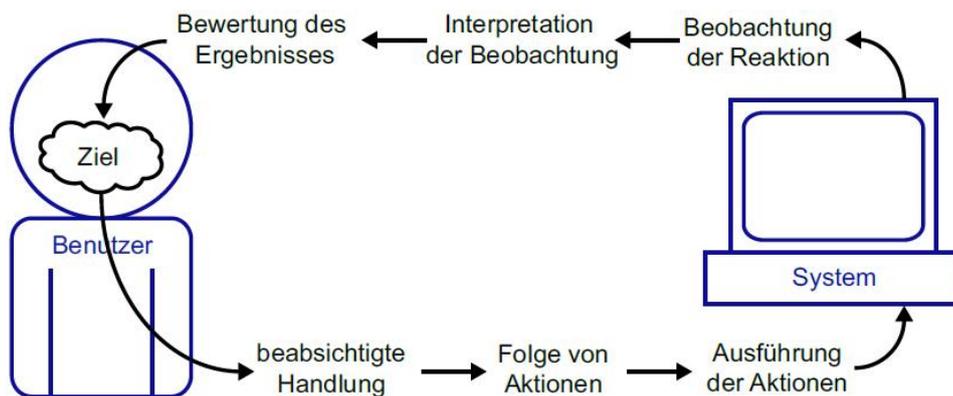


Abbildung 2-2: Schritte zur Ausführung zielgerichteter Handlungen; [Nor86, S. 37ff] adaptiert durch [But14, S. 54]

Zunächst entscheidet der Benutzer auf Basis seiner Zielvorstellung über die beabsichtigte Handlung, plant die Folge von Aktionen und führt diese aus, indem er über die Benutzerschnittstelle auf das System zugreift. Anschließend beobachtet er die Reaktionen des Systems, interpretiert seine Beobachtung und bewertet das Ergebnis anhand der Zielvorstellung. Das Modell ist als Kreislauf formuliert, denn nach dem Sollwert-Istwert Vergleich können weitere Handlungsschritte geplant oder die ursprüngliche Zieldefinition abgeändert werden.

Probleme können auf Seite des Benutzers in der Transformation der Ziele in die auszuführenden Handlungsschritte sowie in der Wahrnehmung oder Interpretation des Systemfeedbacks auftreten. Ersteres bezeichnet [Nor86, S. 38ff] als „Gulf of Execution“, letzteres als „Gulf of Evaluation“.

Diese grundlegenden Erkenntnisse können auf die Fahrzeugführung übertragen werden und dienen der Analyse der Interaktion zwischen Fahrer und automatisierter Fahrzeuglängsführung.

### 2.1.1.3 Fahrer-Fahrzeug-Umwelt-Regelkreis

Um den komplexen Vorgang der Fahrzeugführung abzubilden, existieren verschiedene Modelle [Abe01, S. 9; Bru15, S. 635; Bub15a, S. 15; Dor03, S. 16; Tim02, S. 128]. Ein vergleichsweise einfacher Ansatz wird durch das Fahrer-Fahrzeug-Umwelt-Regelkreismodell beschrieben (Abbildung 2-3).

Zur Erfüllung der Fahraufgabe nimmt der Fahrer Informationen aus Umwelt und Fahrzeug wahr. Nach Verarbeitung und Handlungsgenerierung kann der Fahrer mittels Bedienelementen, wie Lenkrad, Gas oder Bremspedal, auf das Fahrzeug einwirken. Diese Eingaben werden vom Fahrzeug in Quer- und Längsdynamik umgesetzt. Umweltparameter können als Störgrößen auf das Fahrzeugverhalten einwirken. Gleichzeitig können andere Verkehrsteilnehmer zu Handlungen und Fahrmanövern veranlasst werden. Das Ergebnis stellt die Fahrzeugtrajektorie dar. [Hua03, S. 75ff; Mui09, S. 5f]

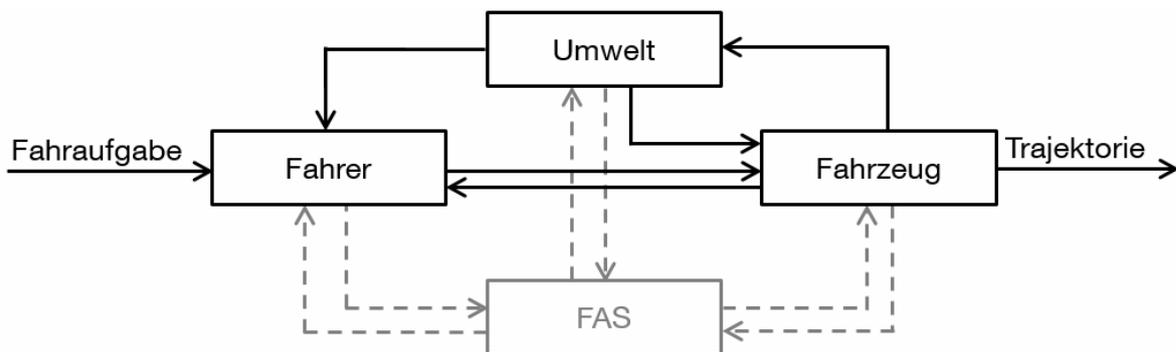


Abbildung 2-3: Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt mit FAS; in Anlehnung an [Dor03, S. 17; Mui09, S. 6]

Die Fahraufgabe kann in Anlehnung an die Flugzeugführung in drei hierarchische Ebenen aufgeteilt werden: Navigation, Führung und Stabilisierung [Don15, S. 19ff; Don78]. Während die Navigationsebene die Routenwahl beinhaltet, werden in der Führungsebene Sollgeschwindigkeit und Sollspur festgelegt, die auf Stabilisierungsebene mittels Bedienelementen eingeregelt werden [Hua03, S. 75].

FAS unterstützen den Fahrer bei der Erfüllung der Fahraufgabe und können auf allen drei Ebenen ansetzen. Wie in Abbildung 2-3 im Regelkreismodell gestrichelt dargestellt, können FAS mit Fahrer, Fahrzeug und Umwelt interagieren. FAS dienen der Erhöhung der Sicherheit, des Komforts und der Effizienz. Je nach Funktionsweise und Einsatzzweck werden informierende, warnende und regelnde Fahrerassistenzsysteme unterschieden, die für „normale“ und „abnormale“ Fahrsituationen (z. B. bei Verlassen des Kamm'schen Reibungskreises [Bra13, S. 672f]) ausgelegt sind [Dor03, S. 17ff; Gas15, S. 28ff].

### 2.1.2 Fahrerseitige Aspekte der Fahrzeugführung

„Das Ziel eines optimal funktionierenden Mensch-Maschine-Systems ist nur erreichbar, wenn die grundlegenden Fähigkeiten und Einschränkungen des Menschen bekannt sind und die bestmögliche Anpassung der Maschine an diese Eigenschaften vorgenommen wird“ [But14, S. 8].

Folglich wird der Fahrer als Mensch bei der Ausführung der informatorisch-reaktiven Tätigkeit der Fahrzeugführung analysiert [Abe15, S. 4; Schl10, S. 224ff]. Hierzu wird der menschliche Informationsverarbeitungsprozess (2.1.2.1) skizziert, bevor auf die Geschwindigkeitswahrnehmung (2.1.2.2) und Gefahrenkognition (2.1.2.3) bei der Fahrzeugführung eingegangen wird. Diese fahrerseitigen Aspekte bilden die Grundlage für die Auslegung der

Fahrer-Fahrzeug-Interaktion für eine automatisierte, kraftstoffeffiziente Fahrzeuglängsführung.

### 2.1.2.1 Menschlicher Informationsverarbeitungsprozess

Zur menschlichen Informationsverarbeitung existieren verschiedene Modellvorstellungen [Schl10, S. 286ff]. Kern dieser Arbeitsmodelle ist die Annahme, dass ein am Rezeptor eintreffendes Signal (Stimulus) zunächst in eine kognitive Repräsentation und anschließend in eine Reaktion des Menschen umgesetzt wird [Abe15, S. 4f]. Dabei lassen sich drei grundlegende Phasen unterscheiden: Informationsaufnahme, Informationsverarbeitung sowie Aktionsausführung [Bru15, S. 633ff; Bub15b, S. 68; Schl10, S. 287]. Die Phase der Informationsverarbeitung lässt sich weiter untergliedern in die Wahrnehmung bzw. Informationsanalyse sowie die Aktionsauswahl [Par00; Wic99]. Ein Informationsverarbeitungsmodell nach dem aufmerksamkeits-theoretischen Konzept zeigt Abbildung 2-4.

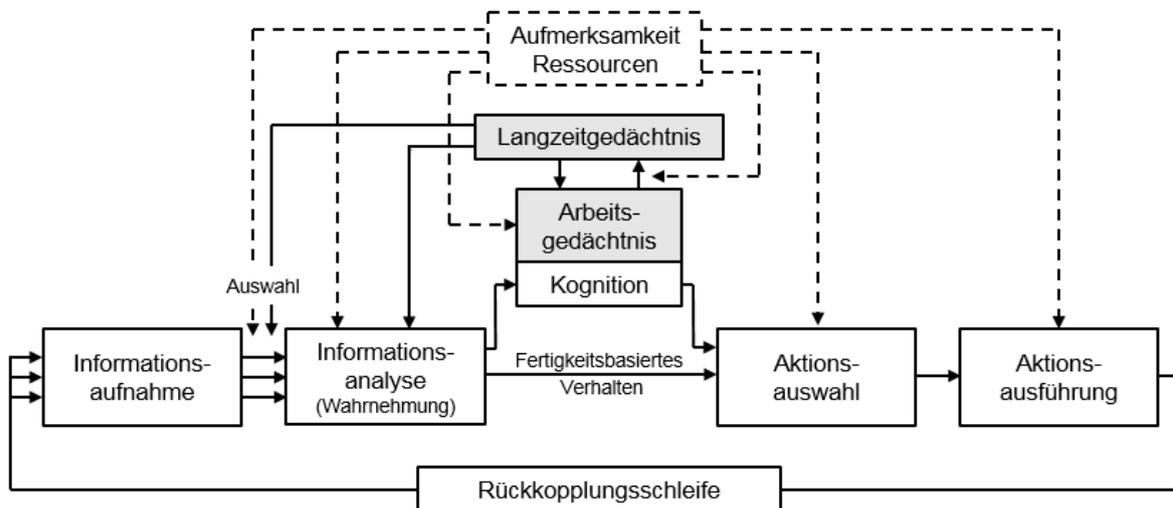


Abbildung 2-4: Menschlicher Informationsverarbeitungsprozess; nach [Schl10, S. 295; Wic99, S. 11]

#### Informationsaufnahme

Eintreffende Reize werden für die Fahrzeugführung über Exterosensoren (Reize aus Umwelt) und Propriosensoren (Lage und Lageänderung des Haltungs- und Bewegungsapparates) aufgenommen und in sensorischen Speichern kurzzeitig zwischengespeichert.

Für die Beschreibung der Funktionsweise menschlicher Sinnesorgane wird verwiesen auf [But14, S. 13ff; Gol11; Schl10, S. 313ff]. Die Zuordnung von Sinnesmodalitäten zu Anzeigarten findet sich in Anhang B.

#### Informationsanalyse- und Aktionsauswahl

Die Auswahl der weiterzuverarbeitenden Reize kann Bottom-Up durch das Hervorstechen der Reize (Signalentdeckungstheorie [Gol11, S. 419ff; Gol11, S. 419; Schl10, S. 300ff]) oder Top-Down über Aufmerksamkeitszuwendung auf Basis vorhandenen Wissens erfolgen [Chu05, S. 283; Gol11, S. 8f; Schl15, S. 76]. Unter der Wahrnehmung wird das „Auswählen, Ordnen und Interpretieren von Sinnesdaten“ [Mie05, S. 166] verstanden.

Im Bereich der Informationsverarbeitung kann die Entscheidungsfindung nach [Ras83] auf drei Ebenen ablaufen: fertigkeitbasiert, regelbasiert oder wissensbasiert (Abbildung 2-5). Auf welcher Verhaltensebene die Informationsverarbeitung stattfindet, ist nach [Schl10, S. 289ff] abhängig von der Art der auszuführenden Aufgabe, den persönlichen Eigenschaften, dem aktuellen Zustand sowie den Erfahrungen bezüglich der Anforderungen. Es wird

hierbei nach dem Grad der mentalen Beanspruchung unterschieden. Innerhalb jeder Ebene werden die einzelnen Verarbeitungsstufen sequentiell durchlaufen.

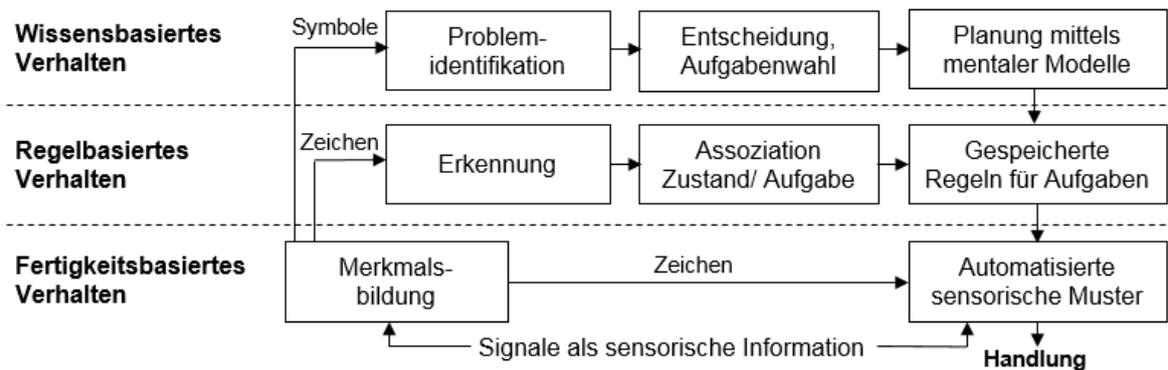


Abbildung 2-5 Ebenenmodell des menschlichen Verhaltens; in Anlehnung an [Ras83, S. 258; Schl10, S. 291; Züh12, S. 23]

### Aktionsausführung

Die Aktionsausführung (Abbildung 2-4) findet bei der Fahrzeuglängsführung durch motorische Aktivitäten statt. Diese können Bewegungen des Hand-Arm- und des Bein-Fuß-Systems sowie Blickbewegungen sein [Schw03, S. 5].

Über eine Rückkopplungsschleife können die Aktionen kontrolliert und nachjustiert werden, indem die Änderungen aus Umwelt und Fahrzeug wieder als Reize wahrgenommen und interpretiert werden.

#### 2.1.2.2 Geschwindigkeitswahrnehmung bei der Fahrzeugführung

Die menschliche Geschwindigkeitswahrnehmung im Fahrzeug ist für die Gestaltung und Bewertung der Interaktion mit einer kraftstoffeffizienten, automatisierten Fahrzeuglängsführung relevant.

Bei der Fahrzeugführung werden 90 % der benötigten Informationen über den visuellen Sinneskanal aufgenommen [Bhi71]. Die Fortbewegung kann im Fahrzeug visuell durch das Fließen der umgebenden optischen Anordnung (optischer Fluss) wahrgenommen werden [Sed05, S. 142ff]. So können Fahrgeschwindigkeitsänderungen durch „(...) zentrifugales Auseinanderfließen des optischen Flusses mit einer verbundenen Vergrößerung als Annähern sowie zentripetales Ineinanderfließen mit einer verbundenen Verkleinerung als Entfernen wahrgenommen werden“ [Mai13, S. 26]. Hierfür ist nicht das foveale, sondern das periphere Netzhautabbild von Bedeutung [Schl10, S. 335].

Als sekundäre Informationsquellen spielen die akustische, vestibuläre und kinästhetische Modalität bei der Fahrzeuglängsführung eine Rolle [Schw03, S. 4f]. Die Umweltfaktoren Schall und mechanische Schwingungen sind einerseits Störgrößen im Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt (2.1.1.3). Andererseits können sie direkt Rückmeldung zum Fahrprozess liefern [Bub15c, S. 472]. So können Informationen bezüglich Längs- und Querschleunigung vestibulär und haptisch sowie das Geschwindigkeitsniveau akustisch wahrgenommen werden [Schw03, S. 4f].

Für die Geschwindigkeitswahl bei der Fahrzeugführung ist auch die Abschätzung der Entfernung zu Objekten von Bedeutung [Gro00, S. 3ff]. Dies kann über monokulare Tiefenkriterien wie die Auswertung der Objektgröße bekannter Objekte geschehen [Schl10, S. 326f]. Zudem geben okulomotorische Tiefenkriterien wie die Informationen zur Konvergenzlage der beiden Augen sowie der Beanspruchung durch die Akkomodation der Linse Hinweise

über die Objektentfernung [Gro00, S. 4ff; Schl10, S. 329f]. Neben der Geschwindigkeitswahrnehmung und Entfernungsabschätzung ist die Gefahrenkognition des Fahrers entscheidend für eine sichere Fahrzeugführung.

### **2.1.2.3 Gefahrenkognition und Reaktionszeit**

Die Gefahrenkognition beinhaltet die Wahrnehmung und das Erkennen von Gefahren und deren Folgen [Lex00]. Die Gefahrenerkennungszeit beschreibt die Zeitspanne vom Wahrnehmen von Hinweisreizen eines potentiellen Hindernisses bis zum Erkennen als Gefahr [Rob03, S. 426]. Nach [Sch09, S. 56] werden hierbei die Stufen des Entdeckens, Lokalisierens und der Identifikation der Gefahr durchlaufen. Anschließend wird die Relevanz abgeschätzt und bewertet, bevor die Gefahrenantizipation stattfindet. Darunter wird die Prognose der Situationsentwicklung verstanden. Hierzu kann der Fahrer die aktuelle Situation mit dem Wissen über zuvor erlebte Situationen abgleichen [Gro00, S. 138]. Es folgt die Entscheidung über die Reaktion sowie die Umsetzzeit zur Reaktionsausführung (z. B. Fußumsetzung von Gas- auf Bremspedal). Die Reaktionszeit wird definiert als „(...) Zeitspanne zwischen dem Eintreten eines bestimmten Reizes und dem Beginn der ersten darauf gerichteten Handlung“ [Rob03, S. 426].

### **2.1.3 Normen und Gestaltungsrichtlinien**

Die Gebrauchstauglichkeit (engl. Usability) wird in der Norm ISO 9241-210:2011 [DIN11, S. 7] definiert als „Ausmaß, in dem ein System, ein Produkt oder eine Dienstleistung durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um festgelegte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen“.

Auf den Fahrzeugkontext angewandt wird unter „Produkt“ ein interaktives Fahrerassistenzsystem verstanden und unter „bestimmter Benutzer“ ein Fahrer mit spezifischen Fahrereigenschaften, wie Erfahrung, Alter oder Fahrstil. „Nutzungskontext“ beinhaltet den augenblicklichen Fahrerzustand (Müdigkeit, Stress) als auch die Verkehrssituation (Kreuzung, Stadtverkehr) [Bur08, S. 321ff]. Die „festgelegten Ziele“ können die primäre, sekundäre oder tertiäre Fahraufgabe betreffen. Während „effektiv“ eine möglichst genaue und vollständige Zielerreichung anstrebt, beschreibt „effizient“ den zur Zielerreichung eingesetzten Aufwand. Die Zufriedenheit ist eine subjektive Bewertung in Abhängigkeit der Akzeptanz und der Beeinträchtigungsfreiheit des Nutzers [Vil07, S. 6f]. Somit ist die Gebrauchstauglichkeit abhängig von dem Nutzungskontext und den Eigenschaften des Nutzers.

Zur Gestaltung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion existieren zahlreiche nationale und internationale Empfehlungen, Richtlinien und Normen. Zu unterscheiden sind allgemeingültige und für den Kontext der Fahraufgabe spezifische sowie abstrakte und detaillierte Richtlinien (Abbildung 2-6). Für inhaltliche Zusammenfassungen wird verwiesen auf [Bra15, S. 27ff; Ker11, S. 18ff; Kön15, S. 627ff; Nie02, S. 40ff].

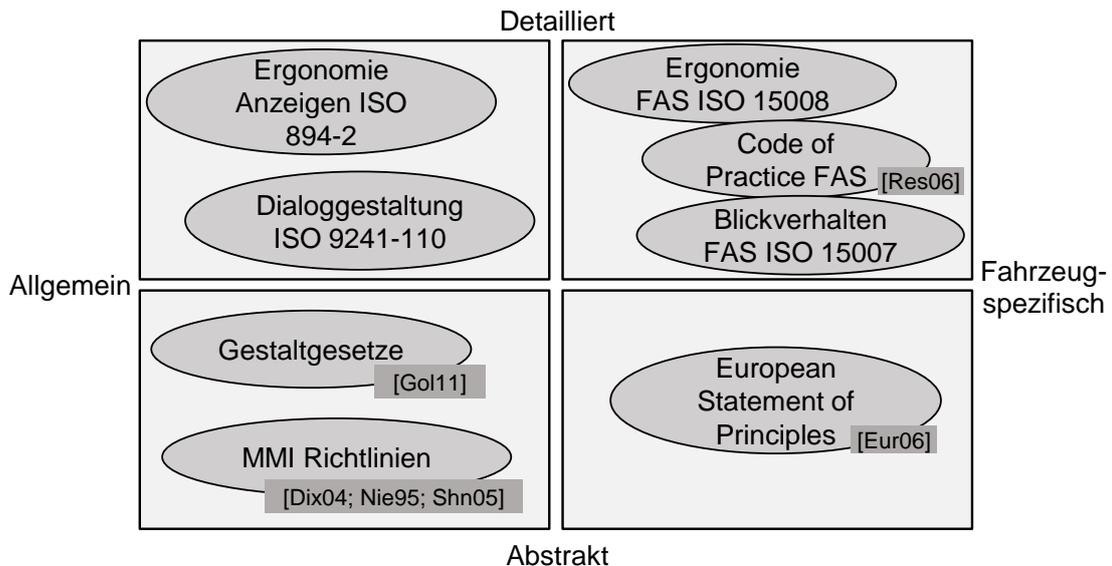


Abbildung 2-6: Klassifikation von Richtlinien zur Gestaltung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion

Die Aspekte, die für die Fahrer-Fahrzeug-Schnittstelle im Kontext einer automatisierten, kraftstoffeffizienten Fahrzeuglängsführung entscheidend sind, werden nachfolgend zusammengefasst:

- Nachvollziehbarkeit und Vorhersagbarkeit [DIN08; Dix04, S. 270f; Nie95; Nor02; Shn05, S. 74]:  
Der Fahrer sollte mittels Feedback das Systemverhalten nachvollziehen, verstehen und vorhersagen können. Dies ist abhängig von einer systemtransparenten Gestaltung (Abschnitt 2.1.1) und ist in [DIN08, S. 9ff] als Selbstbeschreibungsfähigkeit sowie Erwartungskonformität verankert.
- Lernförderlichkeit [DIN08, S. 12; Dix04, S. 261ff; Nie95]:  
Die Anzeige sollte intuitiv, konsistent und mittels bekannter Symbole und in Übereinstimmung mit der Realität gestaltet sein, um so beim Aufbau eines korrekten mentalen Modells zu unterstützen.
- Klares, auf das Wesentliche reduziertes Design [Gre08; Shn04, S. 74f]:  
Alle aktuell benötigten Informationen sollten einfach und klar visualisiert sein [Schl10, S. 375]. Dabei sollte die aufzubringende Gedächtnisleistung möglichst klein gehalten werden, was [Nie95] mit „recognition rather than recall“ beschreibt.
- Individualisierbarkeit [DIN08, S. 15ff; Dix04, S. 269f]:  
Das System sollte flexibel durch den Fahrer anpassbar sein, abhängig von dessen individuellen Bedürfnissen und Fahrereigenschaften.
- Steuerbarkeit [DIN08, S. 13f; Gre08; Nie95]:  
Die Kontrolle über Fahrerassistenzsysteme und damit die Möglichkeit der Übersteuerung liegt, nach den Plänen für die Überarbeitung des Art.8 Abs.5 des Wiener Übereinkommens [Eco14], beim Fahrer. Dies deckt sich auch mit Richtlinien der Benutzerschnittstellengestaltung „keep the user in control“ [Nie95].

## 2.2 Fahrerassistenzsysteme mit steigendem Automatisierungsgrad

„Mit Automatisierung und Automation wird der Prozess sowie sein Resultat bezeichnet, in dem Aufgaben (bzw. die daraus resultierenden Tätigkeiten), die vom Menschen ausgeführt wurden, an eine Maschine übergeben werden.“ [Hau02, S. 43]

Ermöglicht durch den technologischen Fortschritt, nehmen Funktionsumfang und -anzahl der FAS stetig zu, um Sicherheit, Energieeffizienz und Fahrkomfort zu erhöhen [Gie07, S. 19].

Zunächst wird auf die Nomenklatur der Automatisierungsstufen (2.2.1) eingegangen, bevor die Funktionsteilung zwischen Fahrer und FAS (2.2.2) sowie die Herausforderungen zunehmender Automatisierung (2.2.3) aufgezeigt werden.

### 2.2.1 Nomenklatur der Automatisierungsstufen

Zur Klassifikation automatisierter Systeme existiert eine Vielzahl an Systematiken [End99, S. 464ff; Fle08; Par00; She02, S. 61ff]. Dabei wird Automation nicht binär gesehen, sondern in einem Automationsspektrum beschrieben. So wird erstens unterschieden bezüglich des Aspekts, was automatisiert wird, und zweitens hinsichtlich des Ausmaßes an Automation [Par00].

Im Kontext der Fahrzeugführung kann die Automatisierung auf allen Ebenen der Fahrzeugführung ansetzen. Das Automationsspektrum der SAE-Norm [SAE14] reicht dabei von der Stufe 0 „Driver only“ bis 5 „Full Automation“ und ist in Tabelle 2-1 der deutschen BASt-Definition nach [Gas12; VDA14] gegenübergestellt.

Tabelle 2-1: Nomenklatur der Automatisierungsstufen nach [Gas12; SAE14; VDA14]

| Stufe | BASt, VDA         | SAE                    | Aufgabe des Fahrers nach Automatisierungsgrad  |
|-------|-------------------|------------------------|--|
| 5     | Fahrerlos         | Full Automation        | System führt dauerhaft Längs- und Querverführung in allen Verkehrssituationen aus. Kein Fahrer nötig.  |
| 4     | Vollautomatisiert | High Automation        | Das System übernimmt Quer- und Längsführung. Der Fahrer muss nicht dauerhaft überwachen und bei ausbleibender Fahrerübernahme kann das System selbständig in einen risikominimalen Zustand zurückkehren. |
| 3     | Hochautomatisiert | Conditional Automation | Das System übernimmt Quer- und Längsführung. Der Fahrer muss nicht dauerhaft überwachen, jedoch innerhalb einer gewissen Zeitspanne die Fahraufgabe wieder übernehmen können.                            |
| 2     | Teilautomatisiert | Partial Automation     | Das System übernimmt Quer- und Längsführung für gewissen Zeitraum in spezifischen Situationen. Der Fahrer muss das System dauerhaft überwachen.  |
| 1     | Assistiert        | Assisted               | Fahrer führt entweder Quer- oder Längsführung aus. Die jeweils andere Fahraufgabe übernimmt das System innerhalb gewisser Grenzen.   |
| 0     | Driver Only       | Driver Only            | Fahrer führt dauerhaft Längs- und Querverführung aus.  |

Automatisierungsgrad

Der Vorteil der BASt-Nomenklatur liegt darin, dass sie der rechtlichen Bewertung zugänglich ist [Gas12, S. 1]. So sind die Stufen 0 bis 2 (teilautomatisiert) aufgrund der dauerhaft vom Fahrer überwachten und jederzeit übersteuerbaren Systemgestaltung mit der deutschen Straßenverkehrsordnung in Einklang [Gas12, S. 5]. Gleichzeitig wird von [Dam13,

S. 45] kritisiert, dass sich die vorgestellte Nomenklatur nur auf umgebungserfassende Automationssysteme anwenden lässt. Eingreifende FAS ohne Umgebungserfassung (z. B. ESP) sowie rein informierende Systeme bleiben unberücksichtigt. Für die vorliegende Arbeit im Kontext einer automatisierten, umgebungserfassenden Längsführung kann die BAST-Definition angewendet werden.

### **2.2.2 Funktionsteilung zwischen Fahrer und FAS**

Nach [Wic04, S. 419f] wird Automation allgemein eingesetzt, um den Menschen von schwierigen, unangenehmen oder gefährlichen Aufgaben zu entlasten. Weitere Gründe sind Kosteneffizienz und technische Realisierbarkeit sowie die Steigerung der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems. Dabei können nicht nur motorische, sondern zunehmend auch sensorische und kognitive Aktivitäten automatisiert werden [She97, S. 102]. Im Kontext der Fahrzeugführung nennen [Sta96, S. 36ff] als Automatisierungsvorteile die Erhöhung des Wohlbefindens des Fahrers, die Steigerung der Verkehrssicherheit sowie ökonomische Vorteile.

Entscheidend ist dabei die Funktionsteilung („function allocation“) zwischen Mensch und Automation. [Fit51, S. 10] verglich bereits 1951 die Stärken zwischen Mensch und Maschine im Rahmen seiner MABA-MABA-Liste („Men are better at, Machines are better at“). Wenngleich diese Liste oft als statisch, veraltet und unzureichend kritisiert wird [Han93, S. 66ff; She02, S. 58ff], kann dieser Ansatz heute noch als Ausgangspunkt dienen [But14, S. 8; Win11].

Den Begriff der menschenzentrierten Automatisierung („human-centered automation“) machte [Bil97] bekannt. Mensch und Automation repräsentieren ein gemeinsames System und sollten als Teampartner gesehen werden [Dzi03, S. 698; Man08, S. 321; Sar97, S. 16]. Auf Basis einer Aufgabenanalyse [She02, S. 55ff] sollte die Aufgabenverteilung unter Berücksichtigung der jeweiligen Stärken durchgeführt werden. Zudem sollte der menschliche Operator in der Entscheidungs- und Regelschleife eingebunden bleiben und auch weiterhin die Kontrolle innehaben. Dabei sollten dem Operator alle nötigen Informationen zur Verfügung gestellt werden, um angemessenes Vertrauen zu fördern. [She05, S. 95]

Es sei hier angemerkt, dass diese Kriterien der menschenzentrierten Automation nicht unumstritten sind [She05, S. 95]. So unterscheidet [Hau02, S. 54f] zwischen sechs Allokationskriterien: Wirtschaftlichkeit, maximale Automation, Leistungsvergleich, menschengerechte Aufgaben, situationsangepasste Flexibilität und Verlässlichkeit. Diese Kriterien können einer menschenzentrierten, systemzentrierten oder technikzentrierten Sichtweise zugeordnet werden. Eine allgemein anerkannte Methode der Funktionsallokation existiert bislang nicht [She02, S. 58].

Als Realisierungskonzept der Funktionsteilung wird zwischen der parallelen („sharing mode“) und der sequentiellen („trading mode“) Aktionsausführung zwischen Mensch und Automation unterschieden [Kra98, S. 642; She02, S. 63ff].

Für eine kraftstoffeffiziente, automatisierte Fahrzeugführung werden Funktionsallokation und ein Realisierungskonzept der Funktionsteilung in Abschnitt 3.1.1 erarbeitet.

### **2.2.3 Herausforderungen zunehmender Automatisierung**

Allgemein existieren mitunter technische und nichttechnische Automationsgrenzen bei der Vollautomatisierung [Kra98]. Im Fahrzeugkontext sehen [Ben14, S. 8] vollautomatisiertes

Fahren von Tür-zu-Tür deutlich nach 2030. Hierbei betreffen nichttechnische Automationsgrenzen die rechtlichen Rahmenbedingungen [Gas12, S. 5], Aspekte der Wirtschaftlichkeit wie kostenintensive Anpassungen der Infrastruktur [Mat15a, S. 1160] oder die soziologische Akzeptanz [Hau02, S. 57]. Beispielsweise können automatisierte Fahrzeugsysteme bei Berufskraftfahrern aufgrund der Angst hinsichtlich sinkendem Ansehen und Bezahlung bis hin zu Arbeitsplatzverlust zu fehlender (soziologischer) Akzeptanz führen [Kol98, S. 38ff; Kra98, S. 459].

Technische Herausforderungen liegen im Erreichen bzw. Erweitern der Fähigkeiten eines aufmerksamen, menschlichen Fahrers [Mat15a, S. 1159]. Wobei die Leistungsfähigkeit des Menschen mit Unterstützung nutzerzentriert entwickelter FAS möglicherweise unterschätzt wird [Mat15a, S. 1159]. Daher existieren verschiedene Ansätze [Ben14, S. 11], Teilaspekte der Fahrzeugführung zu automatisieren, wobei der Fahrer noch als Rückfallebene zur Verfügung stehen muss. Für diese teilautomatisierten Fahrfunktionen soll durch die geplante Überarbeitung des Wiener Übereinkommens eine rechtliche Grundlage geschaffen werden [Lut14].

Eine entscheidende Rolle spielt in diesem Gesamtsystem der menschliche Fahrer [Bai83]. So wandelt sich seine Fahraufgabe durch die zunehmende Automatisierung von regelnden zu überwachenden Tätigkeiten [Kön15, S. 624].

Diese neue Rolle bezeichnet [She06, S. 1025] als *Supervisory Control*. Die Aufgabe des Menschen besteht „[...] zu planen, was die Automation machen soll, dies der Automation mitzuteilen, anschließend die Ausführung zu überwachen und immer dann einzugreifen, wenn die Automation die vorgegebenen Direktiven nicht erwartungsgemäß umsetzt“ [Man08, S. 311]. Dies setzt voraus, dass der Fahrer in seiner Rolle als permanenter Überwacher aufmerksam bleibt und bei Automationsfehlern situativ richtig eingreifen kann. Dem steht gegenüber, dass der Mensch generell für überwachende Tätigkeiten schlecht geeignet ist [End96, S. 164; She02, S. 12].

Folglich können sich aus der Flugzeugführung bekannte, negative Automationseffekte einstellen. Zusammenfassend beschreibt [Wic99, S. 544] diese mit der Abkopplung des Fahrers aus dem Regelkreis einhergehende Probleme als „out-of-the-loop unfamiliarity“.

Die nachfolgend erläuterten Aspekte betreffen das Systemverständnis (2.2.3.1), den Fahrerzustand (2.2.3.2), Vertrauen (2.2.3.3) sowie Langzeiteffekte (2.2.3.4) und Akzeptanz (2.2.3.5).

### **2.2.3.1 Systemverständnis**

Für den sicheren Umgang mit automatisierten Systemen müssen Benutzer ein vollständiges Systemverständnis mit Hilfe ihres mentalen Modells (2.1.1) aufbauen. Auf die Fahrzeugführung bezogen ist vor allem das Erkennen von Systemgrenzen und Systemfehlern komplexer FAS für den Fahrer herausfordernd [Nie09].

Neben dem Systemverständnis ist das korrekte Modus-Bewusstsein essentiell [Sar95; Sar97, S. 5ff]. So verhalten sich während freier Fahrt beispielsweise der klassische Tempomat (CC) und der abstandsgeregelte Tempomat (ACC) gleich. Bei der Folgefahrt gibt es dagegen im Aufgabenspektrum des Fahrers erhebliche Unterschiede: Während beim ACC die Abstandskontrolle das System übernimmt, ist dies beim CC die Aufgabe des Fahrers. Beide FAS werden teilweise in aktuellen Serienfahrzeugen über die gleiche Taste auf dem Multifunktionslenkrad aktiviert, was das korrekte Modus-Bewusstsein erschweren und zu Verwechslungen führen könnte.

### 2.2.3.2 Fahrerzustand

Durch die Herausnahme des Fahrers als aktiven Regler aus dem Regelkreis (2.1.1.3) können sich Vigilanzprobleme einstellen [End95a]. Mit sinkender Interaktionsfrequenz verringern sich die Aktivierung sowie die Leistungsfähigkeit [Dam13, S. 48]. Aufgrund der vermehrt überwachenden (monitiven) Tätigkeiten werden neue Anforderungen an die Aufmerksamkeit des Fahrers gestellt [Sar97, S. 3ff].

Damit ist das Konstrukt der Fahrerbeanspruchung verknüpft. Abbildung 2-7 zeigt den Zusammenhang zwischen Beanspruchung (*Workload*) sowie der Leistung (*Performance*) in Abhängigkeit der Anforderungen des Fahrers. Werden große Teile der Fahraufgabe durch das FAS ausgeführt, so kann dies zu hoher Beanspruchung aufgrund herabgesetzter Vigilanz im Normalbetrieb führen (*Bereich D*). Systemgrenzen und Situationen mit unerwartetem Systemverhalten, beispielsweise aufgrund eines fehlerhaften mentalen Modells, können Überbeanspruchung des Fahrers zur Folge haben (Abbildung 2-7, *Bereich B und C*) [Nor90; Sar97, S. 3ff].

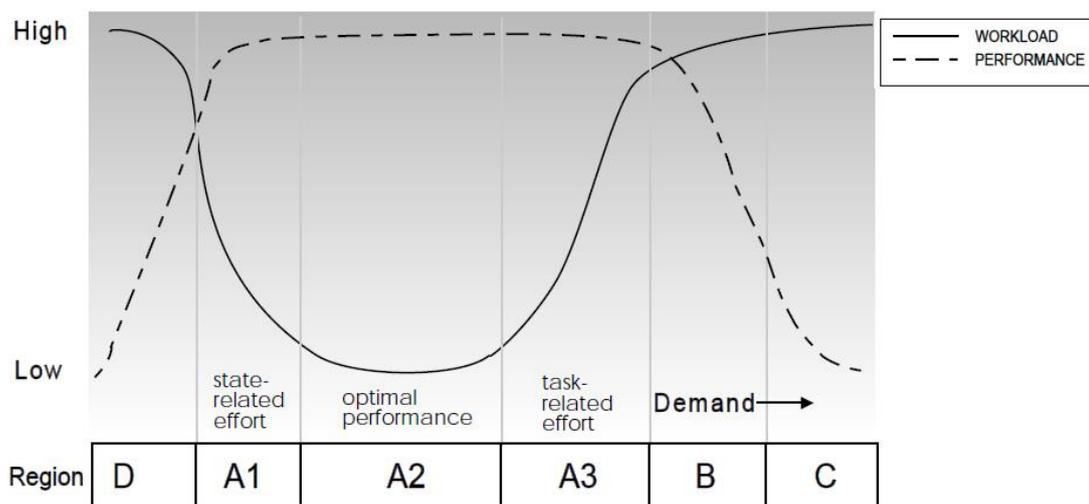


Abbildung 2-7: Beanspruchung (Workload) und Performance (Leistung) in Abhängigkeit der Anforderungen [Waa96, S. 24]

Zum frühzeitigen Erkennen von nicht situationsgerechtem Automationsverhalten ist zudem ein hohes Situationsbewusstsein essentiell. Obwohl das Konstrukt aus dem Bereich der Flugzeugführung stammt [End95a], sind diese Probleme auch bei der Fahrzeugführung bekannt [Bul02, S. 108ff].

[End95b, S. 34ff] unterscheidet drei Stufen des Situationsbewusstseins: „(...) the perception of the elements in the environment within a volume of time and space, the comprehension of their meaning, and the projection of their status in the near future.“ Die Stufen des Situationsbewusstseins zusammen mit den Einflussfaktoren im Entscheidungs- und Handlungsprozess sind in Abbildung 2-8 dargestellt. Ausreichendes Situationsbewusstsein setzt folglich voraus, dass der Nutzer relevante Informationen wahrnimmt (*Stufe 1*), diese Informationen versteht (*Stufe 2*) sowie die Situationsentwicklung antizipieren kann (*Stufe 3*).

Mangelndes Situationsbewusstsein im Umgang mit automatisierten Systemen kann verursacht werden durch systemseitige und fahrerseitige Faktoren wie hohe Systemkomplexität, mangelndes oder schlecht gestaltetes Systemfeedback, ein fehlerhaftes mentales Modell oder reduzierte Vigilanz aufgrund von Unterbeanspruchung.

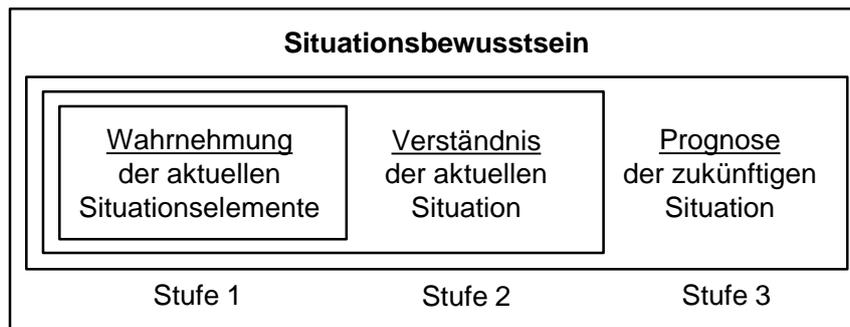


Abbildung 2-8: Modell des Situationsbewusstseins nach [End95b, S. 35; Schl10, S. 376]

### 2.2.3.3 Vertrauen in Automation

Vertrauen wird nach [Lee04, S. 51] definiert als „(...) the attitude that an agent will help achieve an individual's goal in a situation characterized by uncertainty and vulnerability.“ Demnach wird Vertrauen als Einstellung bzw. Erwartungshaltung gesehen [Rot67, S. 651]. Vertrauen wird als ein Faktor beschrieben, der die Entscheidung des Fahrers beeinflusst, ein automatisiertes System zu nutzen bzw. nicht zu nutzen [Dzi03; Lee04, S. 54; Mui87, S. 538].

Zu geringes Vertrauen (*mistrust*) führt zu Akzeptanzproblemen und Ablehnung [Bar98, S. 117; Mui87, S. 534; Par97, S. 238f], was die Effektivität des Gesamtsystems reduzieren kann. Ein im Hinblick auf die Systemfunktionalität übersteigertes Vertrauen (*overreliance* bzw. *complacency*) kann zu unzureichender Überwachung, höherer Risikobereitschaft und zu geringerem Verantwortungsgefühl führen [Bar98; Gam00; Lin12, S. 18; Luh00].

Vertrauen wächst durch positive Erfahrung, Beobachtbarkeit und Kontrollierbarkeit [Lee04; Mui87, S. 532]. Dabei unterscheidet [Gha12, S. 41] zwischen vertrauensfördernden Aspekten des Frontend (*surface features*), wie Informationsdarstellung oder Ästhetik, sowie des Backend (*depth features*), wie Automationsleistung oder Kontrollierbarkeit. Negative Erfahrungen durch nicht situationsgerechtes Automationsverhalten, das mittels mentaler Modelle nicht erklärbar ist, reduzieren das Vertrauen signifikant [Ant05, S. 10; Beg13, S. 47; Dzi03, S. 697]. Einmal verlorenes Vertrauen ist schwer wiederherzustellen [Mui87, S. 535]. Folglich sollten FAS und HMI so ausgelegt werden, dass der Aufbau von angemessenem Vertrauen (*calibrated trust*) gefördert wird.

### 2.2.3.4 Langzeiteffekte (Verhaltensadaption und Fertigskeitsverlust)

Durch die Automatisierung von ursprünglich manuell durchgeführten Tätigkeiten können grundlegende Strategien und Handlungsmuster verlernt werden, die der Nutzer in selten auftretenden Störfällen benötigt [Bai83, S. 775; End95a, S. 381].

Bei der Fahrzeugführung kann dies beispielsweise bei dynamischen Regelvorgängen auf der Stabilisierungsebene problematisch werden, die im Verhaltensmodell nach [Ras83] (Kap. 2.1.2.1) überwiegend fertigskeitsbasiert ablaufen [Lin12, S. 17]. Weiterhin zeigen Studien, dass bei Nutzung aktiver Längsführungssysteme (ACC, CC) die manuelle Geschwindigkeitsanpassung (z. B. wegen Tempolimits) 5 bis 20 Sekunden verzögert stattfindet [Nie09; Vol10, S. 35f]. Gleichzeitig wird auch von zunehmender maximaler Verzögerung berichtet [Bul03, S. 35].

### 2.2.3.5 Akzeptanz

Allgemein definiert [Dro89] Akzeptanz als die Bereitschaft etwas oder jemanden zu akzeptieren. Im Gegensatz zur soziologischen Akzeptanz als nichttechnische Automationsgrenze

(Kap. 2.2.3) soll nachfolgend die psychologische Akzeptanz betrachtet werden. Des Weiteren interessiert die Akzeptanz auf Individualebene [Kol98, S. 57ff] an der Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine. Nach [Kön15, S. 624] bestimmt die Qualität des Zusammenwirkens zwischen Fahrer und FAS die Akzeptanz.

Zur Darstellung der Akzeptanzdeterminanten existieren verschiedene Modelle. Im Umgang mit Automatisierung stellt [Gha12] in Anlehnung an das Technologieakzeptanzmodell (TAM: grau hinterlegt in Abbildung 2-9) von [Dav89] das Automations-Akzeptanz-Modell (AAM) auf.

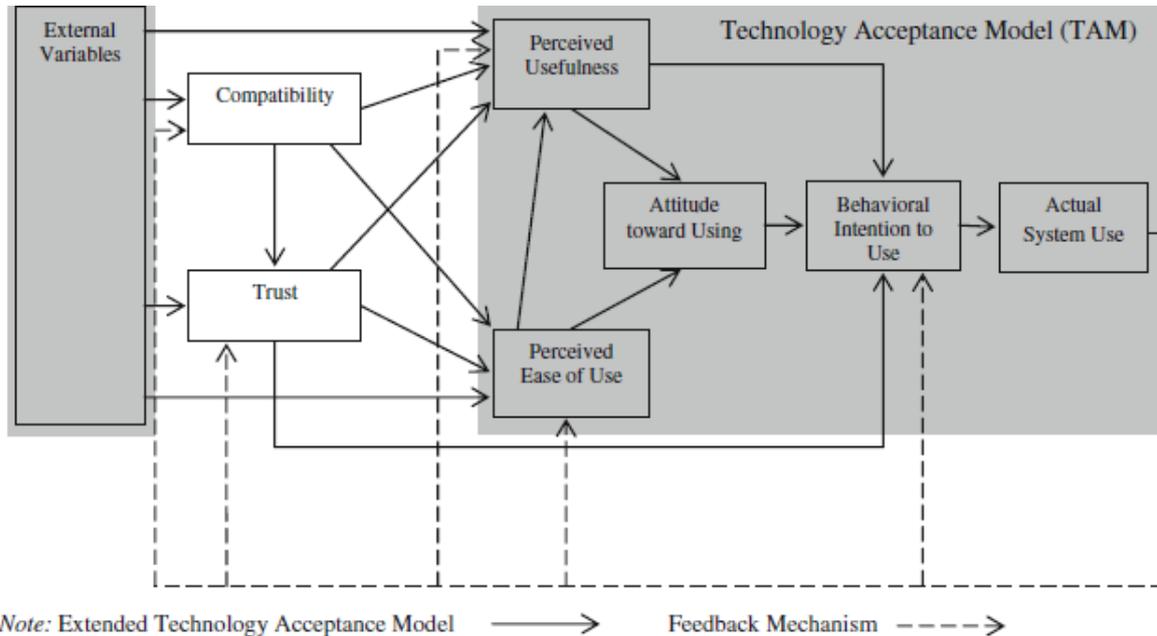


Abbildung 2-9: Automations-Akzeptanz-Modell nach [Gha12, S. 45], welches das Technologie-Akzeptanz-Modell nach [Dav89] (grau hinterlegt) erweitert

Kern des auf der Basis der "Theory of Reasoned Action" [Fis75] erstellten TAM sind die Aspekte der empfundenen Nützlichkeit (*Perceived Usefulness*) und Benutzerfreundlichkeit (*Perceived Ease of Use*). Dabei wirken externe Faktoren wie Systemfunktionalität und Benutzereigenschaften auf die empfundene Nützlichkeit und Benutzerfreundlichkeit. Diese beeinflussen wiederum die Einstellung gegenüber der Nutzung (*Attitude toward Using*) und die Nutzungsintention (*Behavioral Intention to Use*), was schlussendlich über die tatsächliche Systemnutzung (*Actual System Use*) entscheidet.

Für ein umfassenderes Framework, um die Akzeptanz im Umgang mit automatisierten Systemen zu erfassen, erweitert [Gha12, S. 43ff] das TAM um die Aspekte der Kompatibilität (*Compatibility*) und des Vertrauens (*Trust*). „Compatibility reflects the match among the operator, the technology, the task to perform, and the situation" [Kar06] nach [Gha12, S. 43].

Die Kompatibilität beeinflusst das Vertrauen (Kap. 2.2.3.3) des Fahrers. Beide Aspekte nehmen Einfluss auf die empfundene Nützlichkeit und Gebrauchstauglichkeit des automatisierten Systems. Zudem beeinflusst vorherige Systemerfahrung die Einstellung des Nutzers, was im AAM in Abbildung 2-9 mit den gestrichelten Pfeilen als Feedback-Mechanismus angedeutet ist.

Folglich führt eine hohe Akzeptanz zu hoher Systemnutzung, wodurch mit einer automatisierten Längsführung eine hohe Kraftstoffeffizienz erzielt werden kann. Bei der Gestaltung des FAS und der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion gilt es, die entscheidenden Akzeptanzdeterminanten Vertrauen und Kompatibilität zu berücksichtigen.

## 2.3 Bewertung der Kontrollierbarkeit

Die Kontrollierbarkeit bzw. Beherrschbarkeit von umweltwahrnehmenden FAS (Advanced Driver Assistance Systems, ADAS) wird nach [Res06, S. 5] definiert als „likelihood that the driver can cope with driving situations including ADAS-assisted driving, system limits and system failures“.

Dabei ist die Kontrollierbarkeit abhängig von den Möglichkeiten und Fertigkeiten des Fahrers, die Kritikalität einer Situation wahrzunehmen, die Entscheidung für eine angemessene Gegenmaßnahme zu treffen (z. B. Eingriff mittels Bremssystem) und die entsprechende Handlung auszuführen [Res06, S. 13].

Bereits in der Konzeptphase sollten die durch automatisierte Systeme entstehenden Gefahren abgeschätzt und die resultierenden Risiken klassifiziert werden, wie in der ISO Norm 26262-3 [ISO11] festgehalten. Das Risiko ( $R$ ) wird nach [Res06, S. A41] als Funktion von Eintrittshäufigkeit ( $f$ ) und Schadenshöhe ( $S$ ) gesehen:

$$R = F(f, S) \quad (2.1)$$

Da bis Automationsstufe 3 (Tabelle 2-1) der Fahrer als Rückfallebene automatisierter FAS dienen soll, ist bei der Analyse dessen Möglichkeit zur Schadensabwendung durch Systemeingriff zu berücksichtigen [Wei12a, S. 15]. Die Sicherheit kann dabei in vier Ebenen unterteilt werden: Systemsicherheit, Interaktionssicherheit, Verkehrssicherheit und Rechtssicherheit (Abbildung 2-10).



Abbildung 2-10: Betrachtungsebenen für die Sicherheit von Fahrerassistenzsystemen [Geo95, S. 38; Dor03, S. 18]

Diese Arbeit betrachtet die Ebene „Mensch-System/Fahrzeug“. Dabei bestimmt die Kontrollierbarkeit bzw. Beherrschbarkeit die Interaktionssicherheit des Gesamtsystems. Folglich sollte die Definition des Risikos (2.1) unter Berücksichtigung der Kontrollierbarkeit bzw. Beherrschbarkeit ( $C = \text{controllability}$ ) erweitert werden nach [ISO11, S. 18] als:

$$R = F(f, C, S) \quad (2.2)$$

Die Parameter der Risikofunktion interagieren dabei: Durch häufiges Auftreten von nicht situationsgerechtem Verhalten der Automation kann die Kontrollierbarkeit steigen, weil der Fahrer sein mentales Modell anpassen sowie Verhaltensmuster für den Systemeingriff entwickeln und trainieren kann. Auch die Ergebnisse aus einer Fahrsimulatorstudie zur automatisierten Fahrzeuglängsführung von [Nie09] stützen die Annahme, dass die Folgen von Systemfehlern umso schwerwiegender sind, je seltener sie stattfinden.

Die ISO Norm 26262-3 [ISO11, S. 1] ist der Ebene der Systemsicherheit (Abbildung 2-10) zuzuordnen und beschränkt sich auf Komponenten der Elektrik und Elektronik von Fahr-

zeugen bis zu einem zulässigen Gesamtgewicht von 3,5 Tonnen. Zudem ist bei umfeldwahrnehmenden FAS, aufgrund fehlerhafter Umfelderkennung und -interpretation, ein nicht situationsgerechtes Verhalten trotz korrekter technischer Funktion möglich, beispielsweise wenn Objekte falsch oder nicht erkannt werden [Wei12a, S. 17]. Dennoch können Aspekte dieser Norm für die Bewertung der Kontrollierbarkeit einer automatisierten, kraftstoffeffizienten Fahrzeuglängsführung schwerer Lkw angewandt werden. Auch haben sich über den europäischen Automobilverband (ACEA, Association des Constructeurs Européens d'Automobiles) Nutzfahrzeughersteller geeinigt, konform zu dieser Norm zu entwickeln [Teu12].

Weiterhin wird im Rahmen dieser Arbeit zwischen situationsgerechtem und nicht situationsgerechtem Verhalten der Automation unterschieden, weil es für die Interaktionssicherheit als ausreichend erachtet wird. Für detailliertere Unterscheidungen der Arten von Systemgrenzen sowie Definitionen von Systemfehlern wird verwiesen auf [Hör11, S. 20; Wei13, S. 3ff].

### 2.3.1 Vorgehen zur Kontrollierbarkeitsbewertung automatisierter FAS

Zur Bewertung der Kontrollierbarkeit schlägt [Res06, S. 13ff] drei grundlegende Möglichkeiten vor: Prüfungen durch das Entwicklerteam, interdisziplinäre Experteneinschätzungen sowie Untersuchungen mit normalgeübten Fahrern. Ein standardisiertes Verfahren zur Analyse und Quantifizierung der Kontrollierbarkeit liegt bislang nicht vor [Neu08a, S. 141; Wei13, S. 21].

In der Norm ISO 26262-3 [ISO11] soll auf Basis der abstrakten Funktionsbeschreibung die Risikobewertung durchgeführt werden, die anschließend in einer späteren Phase der Produktentwicklung validiert werden soll. Im Rahmen der Gefahren- und Risikoanalyse sollen zunächst kritische Situationen mit potentiellen Gefährdungen identifiziert werden. Das geforderte systematische Vorgehen wird in [ISO11] nicht spezifiziert, sondern nur auf allgemeine Methoden wie Checklistenverfahren, Feldstudien, Brainstorming oder die FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) verwiesen.

Die identifizierten, potentiell gefährlichen Situationen sollen im nächsten Schritt hinsichtlich der Auftretenshäufigkeit (*Exposure*), Schadensschwere (*Severity*) und Kontrollierbarkeit (*Controllability*) bewertet werden [ISO11]. Die Klassifizierung in vier Stufen ist für die Kontrollierbarkeit in Tabelle 2-1 dargestellt. Der letzte Schritt zur Bestimmung des entsprechenden Automotive Safety Integrity Level (ASIL) [ISO11, S. 8ff; Res06, S. A41ff] ist hauptsächlich für die Systemsicherheit und weniger für die Interaktionssicherheit relevant. So lässt sich aus der ASIL-Klasse die Anforderung an die Ausfallsicherheit von Hardwarekomponenten ableiten (z. B. Klasse D fordert eine Rate nicht erkannter Fehler  $\leq 10^{-8}$  pro Betriebsstunde) [Wei13, S. 15].

Tabelle 2-2: Einteilung der Kontrollierbarkeitsklassen von C0 bis C3 [ISO11, S. 9; Res06, S. A44]

| Klasse       | C0                            | C1  | C2                    | C3  |
|--------------|-------------------------------|---|-----------------------|---|
| Beschreibung | Im Allgemeinen kontrollierbar | Einfach kontrollierbar  | Normal kontrollierbar | Schwer zu kontrollieren oder unkontrollierbar |
| Definition   | Im Allgemeinen kontrollierbar | $\geq 99\%$   | $\geq 90\%$           | $< 90\%$                                      |
|              |                               | oder mehr der Fahrer bzw. der anderen Verkehrsteilnehmer sind normalerweise in der Lage die Gefährdung abzuwenden |                       |   |

Des Weiteren fordert [Res06, S. A50] die Festlegung von binären Kriterien zur Kontrollierbarkeitsbewertung, sogenannte Pass/Fail Kriterien. Dabei müssen die quantitativen bzw. qualitativen Messgrößen systemspezifisch gewählt werden. Vorschläge zur Auswahl dieser werden nicht genannt.

### 2.3.2 Relevante Studien zur Kontrollierbarkeitsbewertung

Aufgrund eines bislang fehlenden, standardisierten Vorgehens zur Kontrollierbarkeitsbewertung auf der Ebene „Mensch-System/Fahrzeug“ (Kap. 2.3.1), werden nachfolgend bereits durchgeführte Studien analysiert.

[Neu08a] beschreiben ein Vorgehen zur Kontrollierbarkeitsbewertung im Realverkehr an Systemgrenzen eines ACC-Systems anhand von subjektiven und objektiven Kontrollierbarkeitskriterien. In der Studie soll aufgezeigt werden, dass keine sicherheitskritischen Fahrsituationen an funktionalen Systemgrenzen entstehen und die „(...) Zuverlässigkeit des Gesamtsystems Fahrer-Fahrzeug erhalten bleibt“ [Neu08a, S. 146]. Als objektive Kriterien werden der Versuchsleitereingriff (entspricht dem Unfallkriterium) sowie objektive Leistungsgrößen in Form von TTC-Werten (Time-To-Collision, gemessen vom Zielobjektverlust bis zum Bremsengriff) und die maximale Längsverzögerung gewählt. Die Testsituation entspricht der Annäherung an ein stehendes Fahrzeug nach vorangegangenem Zielobjektverlust des FAS. Zur subjektiven Kontrollierbarkeitsbewertung wird eine zweistufige Skala eingesetzt.

Ergebnisse von [Neu08a] zeigen bei mehrfacher Konfrontation mit der Situation einen Lerneffekt, was sich in signifikant höheren TTC-Werten und geringeren Längsverzögerungen sowie geringer subjektiver Kritikalitätsbewertung widerspiegelt. Während die Situation nach dem Unfallkriterium für alle 48 Probanden beherrschbar ist, fällt die Kontrollierbarkeitseinschätzung anhand der subjektiven Beurteilung und objektiven Leistungsmessung deutlich kritischer aus. Nur ein Drittel der Probanden konnte sich das Systemverhalten erklären, während lediglich 18,8 % der Fahrer antizipieren konnte, dass bei Annäherung an ein stehendes Fahrzeug nach vorangegangenem Zielobjektverlust manuell gebremst werden muss.

Ein ähnliches Testszenario untersucht [Sta98, S. 1018f] im dynamischen Fahrsimulator. Während kein Unterschied hinsichtlich Fahrerbeanspruchung (gemessen mittels NASA-RTLX, [Har88]) zwischen manueller und ACC-Fahrt berichtet wird, kommt es bei 20 % der Probanden bei ACC-Fahrt und Annäherung an eine stehende Fahrzeugschlange zur Kollision.

Im normalen Straßenverkehr untersucht [Schm06] die Szenarien „Naheinscherer“, „stehendes Hindernis“ und „Systemausfall“ bei aktivem ACC-Stop&Go System. Als Messgrößen werden u. a. die maximale Längsverzögerung sowie die Zeitspanne bis zum Bremsengriff, Videodaten zur Analyse der Fahreremotion sowie Fragebogendaten zu einer nicht weiter spezifizierten Skala zur Bewertung der Akzeptanz- und Transparenz des Systems aufgenommen. Ein binäres Kriterium zur Kontrollierbarkeitsbewertung wird nicht aufgestellt. Es wird von keinem unkontrollierten oder verkehrsgefährdenden Manöver an den beschriebenen Systemgrenzen bzw. bei Systemausfall mit Übernahmegering berichtet.

Neben den beschriebenen kontinuierlich regelnden Längsführungssystemen gibt es Untersuchungen zu fehlerhaften Bremsengriffen von Notbremssystemen sowie Kontrollierbarkeitsstudien zu Querverführungssystemen (z. B. [Neu08b; Tön11]).

Des Weiteren gibt es Ansätze, mittels Fahrreaktionsmodellen die Kontrollierbarkeit abzuschätzen [Ebe10; Kem11; Stä10, S. 119ff; Wei13, S. 66ff]. Um die Kontrollierbarkeit weiter

zu erhöhen, könnte die Systemunsicherheitsinformation dem Fahrer kommuniziert werden. Studien hierzu werden im nächsten Abschnitt erläutert.

### 2.3.3 Systemunsicherheitsinformation (SUI)

Bei umfeldwahrnehmenden FAS können fehlerhafte, unvollständige oder ungenaue Umfeldinformationen zu nicht situationsgerechtem Verhalten führen. Der aus dem militärischen bzw. dem Bereich der Flugzeugführung stammende Ansatz [Ban98], die SUI zu kommunizieren, soll dem Operator ermöglichen, seine Erwartungen mit den Systemumfängen der Automation abzugleichen [Bel13, S. 1130].

Folglich soll die Präsentation von SUI im Fahrzeugkontext dem Fahrer die vorherrschenden Systemgrenzen verdeutlichen und den Aufbau eines korrekten mentalen Modells fördern [Bel13, S. 1130]. Ziel ist, die Systemtransparenz (Kap. 2.1.1.1) zu erhöhen und möglichen negativen Automationseffekten (Kap. 2.2.3) entgegenzuwirken.

Einer der ersten Ansätze, das Systemverhalten über grafische Anzeige zu visualisieren, um dem Fahrer die Fähigkeiten und Grenzen des ACC-Systems zu verdeutlichen, stammt von [Sep07]. Über geometrische Objekte werden TTC, Time Headway, Range Rate sowie Systemgrenzen visualisiert (Abbildung 2-11). Die Darstellung der SUI wird über einen Farbverlauf von leuchtendem Gelb zu Grau realisiert. Ergebnisse zeigen, dass die Anzeige keinen Vorteil bietet. Dies könnte der komplexen Darstellungsform geschuldet sein, oder der Tatsache, dass sich Farbverläufe für die Visualisierung des Verlässlichkeitsgrades der Automation nicht eignen [Sep07, S. 204].

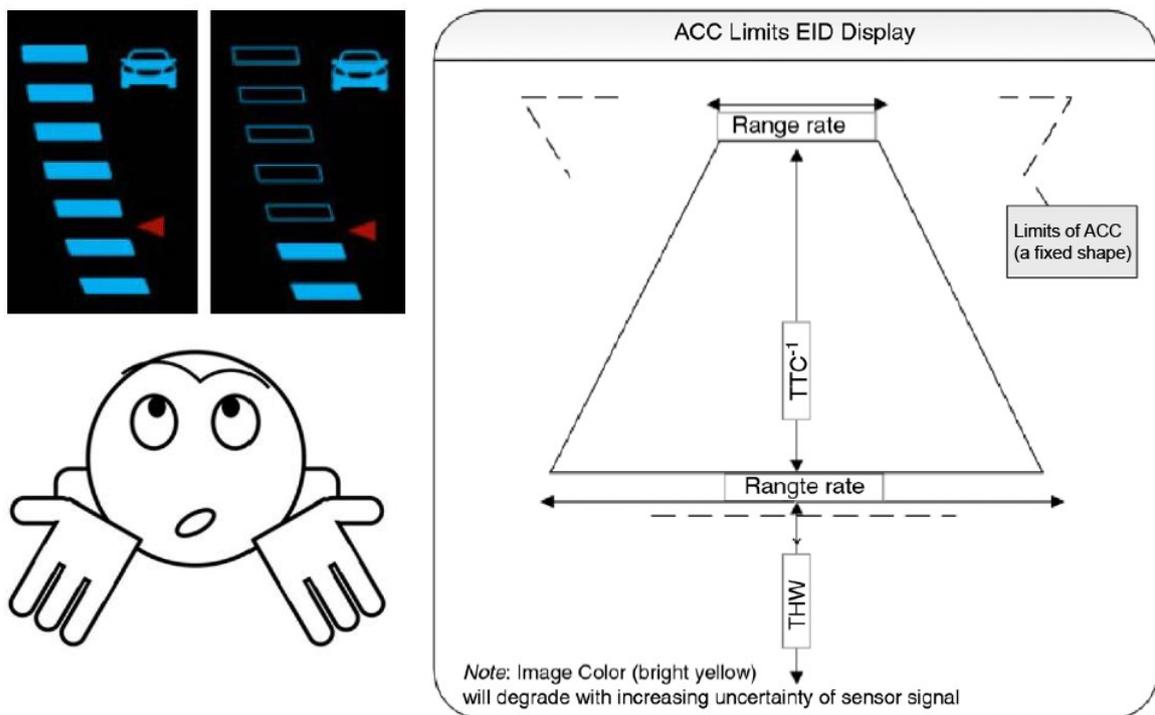


Abbildung 2-11: Grafische Repräsentation der Systemunsicherheit; oben links skalenbasiert [Hel13, S. 213], unten links mittels Gesichtsausdruck [Bel13, S. 1131] sowie des ACC-Systemverhaltens [Sep07, S. 194]

Eine weniger komplexe Darstellungsform der SUI untersucht [Bel13] im Rahmen einer Fahrsimulatorstudie. Die SUI des hochautomatisierten Systems wird mit einem schematisch dargestellten Gesicht mit unsicherem Gesichtsausdruck visualisiert (Abbildung 2-11). Es wird argumentiert, dass emotionale Gesichter schnell und ressourcenschonend wahrgenommen und verarbeitet werden können [Bel13, S. 1132]. Ergebnisse zeigen, dass die

SUI zu kürzeren Reaktionszeiten in kritischen Übernahme-situationen führen. Weiterhin wird von einem angemesseneren Vertrauen, einem gesteigerten Situationsbewusstsein sowie höheren Akzeptanzbewertungen berichtet [Bel13, S. 1130ff].

Zu ähnlichen Ergebnissen kommt [Hel13], der im Rahmen einer Fahrsimulatorstudie hochautomatisierte FAS untersucht. Die SUI wird in Form einer 7-stufigen, vertikalen Skala dargestellt (Abbildung 2-11). Sieben Balken entsprechen einer maximalen Systemzuverlässigkeit, unter zwei Stufen (mit einem roten Pfeil markiert) kann die Leistungsfähigkeit der Automation nicht mehr garantiert werden. Ergebnisse zeigen signifikant schnellere Übernahmezeiten durch SUI. Gleichzeitig wenden die Probanden mit SUI den Blick öfter von der Straße ab, was [Hel13] auf ein höheres Situationsbewusstsein zurückführt. Zudem geht die Präsentation von SUI mit einer geringeren Vertrauensbewertung einher. Dies kann mit den Ergebnissen von [Dzi03, S. 697] erklärt werden. Demnach werde ein System anfänglich als zuverlässig und glaubwürdig eingestuft, nach Erfahrung von Systemfehlern, die für den Operator nicht erklärbar sind, sinkt das Vertrauen stark. In diesem Fall zeigt ein Vertrauensverlust, dass die Fahrer mit SUI in der Lage sind, ihr Vertrauen in das hochautomatisierte FAS angemessen zu kalibrieren [Hel13, S. 216].

Bezogen auf Warnstrategien können häufige falsche Alarme dazu führen, dass auf diese nur verzögert oder überhaupt nicht reagiert wird, was als Cry-Wolf Effekt bezeichnet wird [Bre84]. Ob die Kommunikation von SUI dies minimieren und so die Kontrollierbarkeit erhöhen kann, untersucht [Hee12] in einer Fahrsimulatorstudie. Dabei wird ein dichotomes Warnkonzept mit einem dreistufigen Warnkonzept (keine Warnung, Likelihood-Alarm, Warnung) verglichen. Ergebnisse zeigen, dass sich Likelihood-Alarme weniger negativ auf das situative Vertrauen in die Automation auswirken als die dichotome Warnstrategie. Auch reagieren Fahrer in kritischen Situationen nach vorausgegangenen Likelihood-Alarmen tendenziell schneller als nach vorausgegangenen konventionellen Alarmen. Bezüglich des Unfallkriteriums zeigt sich allerdings kein Unterschied zwischen den Alarmstrategien.

Neben den beschriebenen Studien im Fahrzeugkontext existieren Studien zu kontextbezogenen (*context-aware*) Smartphone-Applikationen [Ant05; Dam11]. Ergebnisse zeigen hier höhere Vertrauensbewertungen und einfachere Handhabbarkeit durch Berücksichtigung von SUI.

Für das Unsicherheits-Management kontextbezogener Dienste schlagen [Dam11] ein dreistufiges Vorgehen im Umgang mit SUI vor: das Identifizieren von Quellen der SUI, die Messung der Unsicherheit sowie die Behandlung dieser durch redundante Sensorinformationen oder durch Kommunikation der SUI an den Nutzer. Die Messung der Unsicherheit wird in [Dam11] allerdings nur regelbasiert über binäre Werte vorgeschlagen, was für dynamische Verkehrssituationen nicht anwendbar ist.

Im Kontext automatisierter FAS können prädiktive Risikokarten für dynamische Verkehrssituationen erstellt werden, um die vorausliegende Fahrzeugtrajektorie zu planen [Dam14; Egg14]. Weitere Ansätze existieren, die SUI bei der Trajektorienbewertung [Ber12] sowie bei der Auslösung von Notbremsystemen zu berücksichtigen [Hou14; Lef13].

#### **2.3.4 Fazit zur Bewertung der Kontrollierbarkeit**

Bei umfeldwahrnehmenden und in die Fahrdynamik eingreifenden FAS mit hohem Funktionsumfang ist die Kontrollierbarkeitsbewertung von großer Wichtigkeit für die Interaktionssicherheit auf der Ebene „Mensch-System/Fahrzeug“.

Um die Kontrollierbarkeit dieser FAS bereits in der Konzeptphase abschätzen zu können, existiert bislang kein detailliertes Vorgehen. Lediglich allgemeine Leitlinien wie das FAS soll

„(...) die Sicherheit im Straßenverkehr erhöhen oder zumindest nicht beeinträchtigen“ [Eur06, S. 7] sowie grundsätzliche Bewertungsmöglichkeiten über das Entwicklerteam, multidisziplinäre Experten oder „unbedarfte“ Endnutzerstudien [Res06, S. 13ff] werden genannt.

Weiterer Forschungsbedarf besteht in einem Vorgehen zur Auswahl relevanter Testszenarien und Messgrößen sowie zur Aufstellung von Pass-Fail-Kriterien für die Kontrollierbarkeitsbewertung.

Auch sollte der Einfluss der Präsentation von SUI auf die Kontrollierbarkeitsbewertung untersucht werden. Erste Studien zeigen bei höheren Automatisierungsgraden schnellere Übernahmezeiten und ein angemesseneres Vertrauen (Kap. 2.3.2). Jedoch besteht weiterer Untersuchungsbedarf hinsichtlich einer intuitiven Visualisierung der SUI.

## 2.4 Klassifikation kraftstoffeffizienter Fahrerassistenzsysteme

Um den Funktionsumfang der zu betrachtenden automatisierten, kraftstoffeffizienten Längsführung zu definieren, wird eine Klassifikation bestehender kraftstoffeffizienter FAS erarbeitet. Anhand nachfolgend beschriebener Kriterien lässt sich der aktuelle Stand der Wissenschaft einordnen und zugehörige, veröffentlichte HMI-Konzepte analysieren. Sind keine Studien im Lkw bekannt, so wird auf den Pkw-Bereich zurückgegriffen.

Kontinuierlich regelnde FAS, die auf Stabilisierung- und Manöverebene zur Erhöhung der Kraftstoffeffizienz ansetzen, werden in dieser Arbeit hinsichtlich des Funktionsumfangs der Automatisierung sowie der Stufe des menschlichen Informationsverarbeitungsprozesses klassifiziert (Abbildung 2-12).

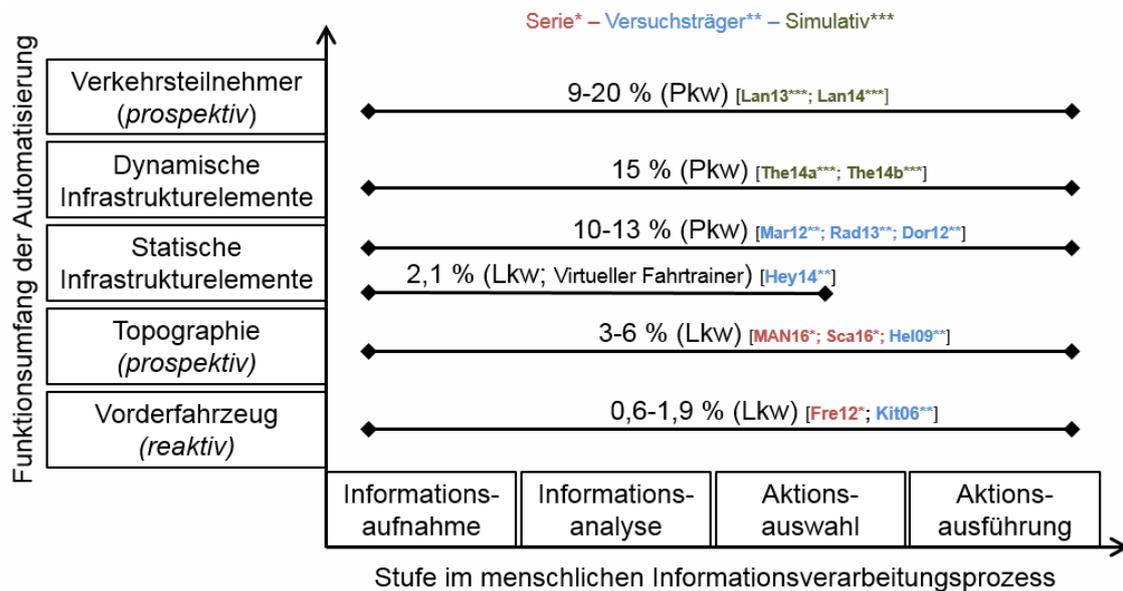


Abbildung 2-12: Klassifikation kraftstoffeffizienter FAS nach dem Funktionsumfang der Automatisierung (Vertikalachse) sowie der Stufe im Informationsverarbeitungsprozess (Horizontalachse)

Auf der Vertikalachse wird differenziert nach dem Funktionsumfang der Automatisierung. Genauer wird zwischen der Anzahl und Art an Umweltinformationen unterschieden, die für die Optimierung der Fahr- und Betriebsstrategie betrachtet werden. Dabei bauen die einzelnen Kategorien Vorderfahrzeug (reaktiv), Topographie, statische Infrastrukturelemente und dynamische Infrastrukturelemente aufeinander auf.

Auf der Horizontalachse wird zwischen den Stufen des menschlichen Informationsverarbeitungsprozesses (Kap. 2.1.2.1) untergliedert, die durch das FAS automatisiert werden. So

wird zwischen der Informationsaufnahme, -analyse, Aktionsauswahl und -ausführung unterschieden.

Exemplarisch zeigt Abbildung 2-12 klassifizierte Studien, wobei hinsichtlich des Vorgehens zur Ermittlung des Kraftstoffeffizienzpotentials differenziert wird: Simulativ, im Versuchsträger, bzw. im Seriensystem.

### 2.4.1 Reaktive Regelung auf Vorderfahrzeuge

Die erste Kategorie der Vertikalachse (Abbildung 2-12) entspricht mit reaktiver Regelung auf Vorderfahrzeuge einem ACC-System. Diese mit dem vorrangigen Ziel der Sicherheits- und Komfortsteigerung entwickelten FAS sind für Pkw seit 1999 auf dem Markt [Win03, S. 2]. Durch Einbezug des Vorderfahrzeugs in die Berechnung der Geschwindigkeitstrajektorie lassen sich im Lkw nach Berechnungen von [Kit06, S. 85] 0,64 % Kraftstoff einsparen.

### 2.4.2 Prospektive Regelung auf Topographie

Eine Weiterentwicklung ist der Einbezug der vorausliegenden Streckentopographie, um die kinetische Energie vor Kuppen und im anschließenden Gefälle zu nutzen. Hierbei können im Lkw Kraftstoffersparnisse von bis zu 3-6 % erzielt werden [Hel09; MAN16; Sca16]. Durch das Beschleunigen vor Steigungen lassen sich Zeitverlust und Schaltvorgänge reduzieren [Hel09]. Die auf dem Markt befindlichen Systeme unterscheiden sich in der Benutzerschnittstelle hinsichtlich der Einstellbarkeit des Geschwindigkeitsbandes sowie in der Anzeigendarstellung (Abbildung 2-13 und Abbildung 2-14).



Abbildung 2-13: Anzeige im Kombidisplay zur prospektiven Regelung auf Topographie von Scania; auf Basis von [Sca16]

Bei Scania [Sca16] kann neben der Setzgeschwindigkeit wie bei CC oder ACC die maximal zulässige Rollgeschwindigkeit im Gefälle vom Fahrer vorgegeben werden. Das Geschwindigkeitsband, innerhalb dessen das FAS die vom Fahrer vorgegebene Setzgeschwindigkeit variiert, ist nicht einstellbar. Weitere Informationseinheiten sind Status sowie die ACC-Abstandseinstellung.

Dagegen kann bei Daimler die obere und untere Geschwindigkeitstoleranz separat eingestellt werden [Grü12]. Eine Übersicht der identifizierten Informationseinheiten auf Basis von [Dai16] zeigt Abbildung 2-14.



Abbildung 2-14: Anzeige im Kombidisplay zur prospektiven Regelung auf Topographie Daimler; auf Basis von [Aya12]

Beim FAS „Efficient Cruise Control“ von MAN können vier Modi zur Einstellung der Hysterese ausgewählt werden. Zudem wird die Unter- bzw. Überschreitung der Setzgeschwindigkeit visualisiert (Abbildung 2-15).

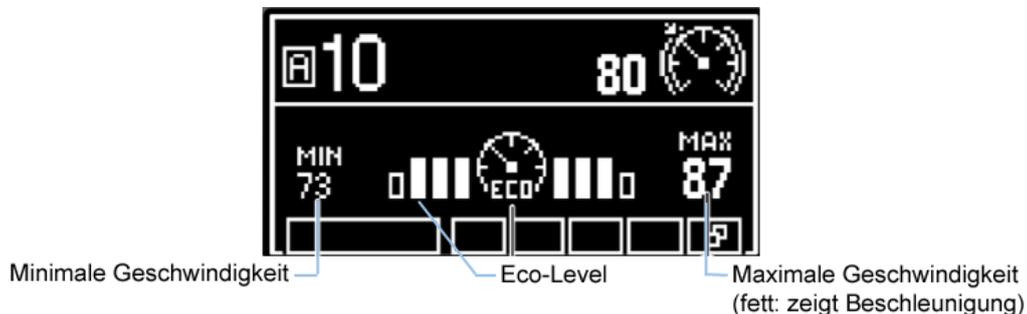


Abbildung 2-15: Anzeige im Kombidisplay zur prospektiven Regelung auf Topographie MAN; auf Basis einer internen Darstellung der MAN Truck & Bus AG

### 2.4.3 Prospektive Regelung auf statische Infrastrukturelemente

Als weiterer Entwicklungsschritt existieren Systeme, die neben Vorderfahrzeug und Topographie auch statische Infrastrukturelemente einbeziehen. Das in der Forschung befindliche System von Porsche „InnoDrive“ spricht von möglichen 10 % Kraftstoffersparnis bei vergleichbarer mittlerer Geschwindigkeit [Mar12].

Der in [Rad13, S. 81ff] beschriebene Rapid-Prototyping Ansatz enthält neben einer Datenbank mit prädiktiven Streckendaten auch einen Map-Matching-Algorithmus zur Erhöhung der Positionsgenauigkeit. Es wird ein Fahrschlauch erzeugt, der die Ober- und Untergrenzen des zulässigen Zustandsraums festlegt. Einschränkungen können z. B. die maximal tolerierte Längs- und Querschleunigung sein, die maximale Höchstgeschwindigkeit oder die maximale Längsverzögerung. Zur Berechnung der optimalen Fahrstrategie müssen die spezifischen Gesamtfahrzeug- und Verbrauchsparameter hinterlegt sein. Die Sollwerttrajektorie wird als Optimalsteuerungsproblem mittels deterministischer dynamischer Programmierung gelöst. Die so erhaltenen optimalen Verläufe der Fahrgeschwindigkeit, des

Gangs, des Kupplungsmoments und der Bremskraft werden an die Längsdynamikregelung weitergegeben. Ein HMI ist hierzu nicht veröffentlicht.

Ein ähnliches Forschungssystem von Volkswagen, „GreenDriving“, hat zum Ziel, Fahrkomfort und Effizienz zu erhöhen [Dor12]. Es wird berichtet von 13 % Kraftstoffersparnis bei 3 % Zeitmehraufwand auf einer ausgewählten Teststrecke. Das veröffentlichte HMI ist in der Mitte des Kombidisplays in den FAS-Bereich integriert (Abbildung 2-16). Es zeigt den spezifischen Regelgrund (z. B. Ortseinfahrt), die abstrakt dargestellte Entfernung (sich leerender Balken) sowie einen Icon-basierten Systemstatus. Zudem ist die vom Fahrer vorgegebene Setzgeschwindigkeit visualisiert.

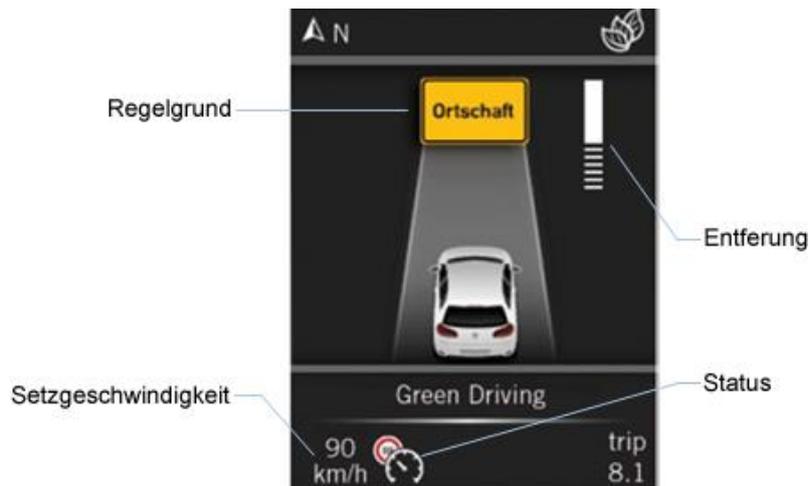


Abbildung 2-16: Anzeige zur prospektiven Regelung auf statische Infrastrukturelemente im Pkw von VW GreenDriving; auf Basis von [Dor12]

Weiterhin ist in der BMW 7er-Reihe seit 2015 der Speed Assist erhältlich [Kno16]. Kraftstoffersparungen durch das FAS sind bisher nicht veröffentlicht. Im HMI werden hierzu neben dem Status das aktuelle Tempolimit sowie das vorausliegende Tempolimit mit metrischer Entfernungsangabe angezeigt (Abbildung 2-17). Weiterhin ist im Rundinstrument die Geschwindigkeitsänderung grün hinterlegt.



Abbildung 2-17: Anzeige zur prospektiven Regelung auf statische Infrastrukturelemente im Pkw von BMW Speed Assist; auf Basis von [Kno16, S. 20]

Veröffentlichte Anzeigekonzepte im Lkw-Bereich sind bislang keine bekannt.

#### **2.4.4 Prospektive Regelung auf dynamische Infrastrukturelemente**

In der nächsten Kategorie der Vertikalachse (Abbildung 2-12) werden zusätzlich prädiktive Daten zu dynamischen Infrastrukturelementen berücksichtigt. Diese werden mittels Fahrzeug-zu-Fahrzeug (V2V) sowie Fahrzeug-zu-Infrastruktur (V2X) Kommunikation erfasst. So können aktuelle Verkehrsdaten und Informationen zu vorausliegenden bedarfsgesteuerten Lichtsignalanlagen, wie der aktuelle Signalstatus, die prognostizierte Schaltzeit und die prognostizierte Warteschlangenlänge, in die Optimierung der Geschwindigkeitstrajektorie einbezogen werden [The14a].

Prädiktive Daten zu Ampelphasen können über kostenintensive Ausstattung der Lichtsignalanlagen mit Kommunikationsmodulen [Bra09] oder über Berechnung auf Basis kollektiver Geodatenerfassung ermittelt werden [Bar14; Ste13]. Eine Darstellung der zugrundeliegenden Datenkommunikationstechnologien, welche die V2X-Vernetzung ermöglichen, gibt [Fuc15, S. 526ff].

Durch Vermeidung des Fahrzeugstillstandes lassen sich mit einem Passat CC Versuchsträger bis zu 15 % Kraftstoff bei der Lichtsignalanlagendurchfahrt einsparen [The14b]. Veröffentlichte Forschungssysteme dieser Kategorie im Lkw-Bereich sind bisher keine bekannt.

#### **2.4.5 Prospektive Regelung auf Vorderfahrzeuge**

Die Einführung der Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation zum Sensorinformationsaustausch sieht die Volkswagen AG ab dem Jahr 2025 [Fuc15, S. 539]. Veröffentlichte Forschungssysteme mit HMI-Konzepten sind keine bekannt. Für eine Übersicht simulationsbasierter Ansätze dieser kooperativen, abstandsgeregelten Tempomaten wird auf [Sut12, S. 111ff] sowie [Lan13; Lan14] verwiesen.

#### **2.4.6 Handlungsempfehlende FAS zur Kraftstoffeffizienz**

Zu Vergleichszwecken sind in obiger Klassifikation (Abbildung 2-12) handlungsempfehlende FAS eingeordnet, die im Informationsverarbeitungsprozess (Horizontalachse) den Fahrer auf den Stufen 1 bis maximal 3 unterstützen.

Die Handlungsanweisungen können dem Fahrer haptisch oder visuell kommuniziert werden [Bra15, S. 153; Göt15]. Im visuellen Fall ist zu unterscheiden, ob das FAS den Fahrer prospektiv durch präzise Handlungsvorschläge vor der Situation informiert (z. B. „Jetzt Fuß vom Gas“) oder ihm retrospektiv Feedback zum Fahrstil gibt [Hey14, S. 36ff].

Als Referenz kann der „Virtuelle Fahrtrainer“ von [Hey14, S. 67; Hey15] dienen, der prospektiv für Topographie und statische Infrastrukturelemente präzise, visuelle Handlungsvorschläge gibt und in einer Feldstudie im Mittel 2,1 % Kraftstoff einspart. Eine Übersicht kraftstoffeffizienter FAS mit manueller Handlungsausführung zeigen [Hey14, S. 7ff; Thi14, S. 258f].

#### **2.4.7 Fazit zur Analyse kraftstoffeffizienter FAS**

Bei handlungsempfehlenden FAS ist das Potential zur Kraftstoffersparnis abhängig von den Fahrerfähigkeiten und -fertigkeiten, die vorausliegende Fahrsituation zu antizipieren und eine kraftstoffoptimale Fahrstrategie zu wählen. Dieses Potential könnte durch eine Automatisierung der Fahrzeuglängsführung erhöht werden, weil fahrerspezifische Unsicherheitsfaktoren wie die Abhängigkeit vom Können und Wollen des Fahrers reduziert werden

[Dau13, S. 2385]. Zudem kann eine im Vergleich zur manuellen Ausführung präzisere Umsetzung der berechneten Geschwindigkeitstrajektorie in Kombination mit einer optimalen Motorbetriebsstrategie das Effizienzpotential weiter erhöhen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass mit steigendem Ausmaß an Automatisierung sowie der Abdeckung aller Stufen des menschlichen Informationsverarbeitungsprozesses das Potential der Kraftstoffeffizienz wächst.

## 3 Entwicklungsansatz und Methodik

Zunächst wird der Stand der Wissenschaft kritisch betrachtet (Kap. 3.1). Darauf aufbauend werden die Forschungsfragen formuliert (Kap. 3.2). Das Vorgehen und die eingesetzte Methodik zur Beantwortung der Forschungsfragen werden in Abschnitt 3.3 erläutert.

### 3.1 Fazit zum Stand der Wissenschaft

Die Analyse kraftstoffeffizienter FAS (Kap. 2.4) deutet an, dass das Potential der Kraftstoffeffizienz bei Abdeckung aller Stufen des menschlichen Informationsverarbeitungsprozesses mit steigendem Funktionsumfang der Automatisierung wächst.

Aus diesen Erkenntnissen kann die Systemspezifikation und Funktionsallokation für die automatisierte, kraftstoffeffiziente Längsführung abgeleitet werden (Kap. 3.1.1). Daraufhin lässt sich die Anwendbarkeit bestehender HMI-Konzepte analysieren (Kap. 3.1.2) und die Aufgabenstellung dieser Arbeit herleiten (Kap. 3.1.3).

#### 3.1.1 Systemspezifikation und Funktionsallokation

Zur Reduktion der Kraftstoffkosten als ein Hauptkostenfaktor der Gesamtbetriebskosten schwerer Lkw (Abbildung 1-1) sowie zur Einschränkung der Treibhausgasemissionen kann eine potentiell hohe Wirksamkeit erzielt werden bei kontinuierlicher Regelung auf:

- Vorderfahrzeuge (reaktiv)
- Topographie (prospektiv)
- Statische Infrastrukturelemente wie z. B. Tempolimits (prospektiv)
- Dynamische Infrastrukturelemente wie z. B. Lichtsignalanlagen (prospektiv)

Auf die prospektive Regelung auf Vorderfahrzeuge wird zunächst verzichtet, weil erst bei ausreichender Durchdringung an Car2X-fähigen Fahrzeugen ein dem Aufwand angemessenes Kraftstoffeffizienzpotential zu erwarten ist.

Auf Basis der genannten Umfelddaten lässt sich der Vorausschaubereich generieren und die optimale Geschwindigkeitstrajektorie ermitteln. Entscheidender Unterschied zu den im Lkw-Bereich vorgestellten topographiebasierten FAS (Kap. 2.4.2) ist die Regelung im gesamten Geschwindigkeitsbereich (0-89 km/h) mit dem Geschwindigkeitsvorschlag von der Automation. Weiterhin befindet sich der Regelgrund zunächst meist außerhalb des Sichtbereichs des Fahrers (Kap. 1.2).

Um möglichen negativen Automationseffekten (Kap. 2.2.3) entgegenzuwirken, sollte der Fahrer nicht vollständig als aktive, regelnde Komponente aus dem Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis (Kap. 2.1.1.3) genommen werden. Daher soll die Aufgabe des Fahrers in der manuellen Ausführung der Querführung sowie der permanenten Überwachung der Längsführung bestehen. Durch diese Aufgabenverteilung kann das FAS nach der Definition von [Gas12] dem assistierten Fahren (Stufe 1, Tabelle 2-1) zugeordnet werden. Dem Fahrer obliegt weiterhin die Hauptverantwortung für das Führen des Fahrzeugs [Lut14, S. 450].

Folglich wird die Fahrzeuglängsführung automatisiert, mit dem Ziel, die Kraftstoffeffizienz zu erhöhen. Nach [Hau02, S. 54] entspricht dies dem Allokationskriterium des Leistungsvergleichs zwischen Mensch und Maschine. Dieses Kriterium ist der technikzentrierten Sichtweise zugeordnet.

Als Realisierungskonzept für die Funktionsteilung wird prinzipiell zwischen dem Sharing und Trading Konzept unterschieden (Kap. 2.2.2). Angewandt auf die automatisierte, kraftstoffeffiziente Fahrzeuglängsführung bedeutet dies: Die sensorischen und kognitiven Schritte des Informationsverarbeitungsprozesses (Kap. 2.1.2.1) sollen nach dem Sharing Mode vom überwachenden Fahrer und dem FAS parallel ausgeführt werden.

Der letzte Schritt im menschlichen Informationsverarbeitungsprozess, die motorische Aktionsausführung, findet nach dem Trading Prinzip statt. Bei aktivem FAS übernimmt die automatisierte Längsführung die Aktionsausführung. Der Fahrer kann jederzeit das aktive FAS über Eingriff mittels Gas- oder Bremssystem übersteuern. Daraufhin wird das FAS deaktiviert.

### 3.1.2 Anwendbarkeit bestehender HMI-Konzepte

Entscheidender Unterschied zwischen den HMI-Konzepten zur vorausschauenden Regelung auf Topographie (Kap. 2.4.2) für schwere Lkw ist der Geschwindigkeitsvorschlag vom FAS. Somit unterscheiden sich die Aufgaben des Fahrers bei der Interaktion mit der automatisierten Längsführung von der in [She06, S. 1025] als Supervisory Control bezeichneten Rolle (Kap. 2.2.3) in den ersten zwei Schritten (Tabelle 3-1). Die Geschwindigkeitstrajektorie wird vom FAS berechnet und kann bei Bedarf vom Fahrer angepasst werden. Die Überwachung der Aktionsausführung sowie die Eingriffsmöglichkeit bei nicht erwartungsgemäßer Umsetzung sind analog zur Supervisory Control.

Tabelle 3-1: Gegenüberstellung der überwachenden Tätigkeit für die automatisierte, kraftstoffeffiziente Längsführung und der Supervisory Control nach [She06, S. 1025] dt. nach [Man08, S. 311]

|   | Automatisierte Längsführung                    | Supervisory Control                    |
|---|--|--|
| 1 | Vorschlag des FAS verifizieren                 | Planen, was die Automation machen soll |
| 2 | Vorschlag des FAS ggf. anpassen                | Mitteilung an Automation               |
| 3 | Überwachung der Ausführung                     |  |
| 4 | Eingriff bei nicht erwartungsgemäßer Umsetzung |  |

Im Gegensatz zu den vorgestellten HMI-Konzepten zur vorausschauenden Regelung auf statische Infrastrukturelemente für Pkw (Kap. 2.4.3) ist das Informationsungleichgewicht zwischen Fahrer und FAS im Lkw höher (Kap. 1.2). Eine im Vergleich zum Pkw deutlich höhere Masse führt aufgrund der höheren kinetischen Energie und vergleichsweise geringerer Fahrwiderstände zu längeren Ausrollwegen. Bei einem vorausliegenden Ereignis mit niedrigerer Zielgeschwindigkeit liegt der Ausrollzeitpunkt der kraftstoffeffizienten Geschwindigkeitstrajektorie deutlich früher. Abhängig von der Differenzgeschwindigkeit und des Streckenverlaufs befindet sich der Regelgrund meist außerhalb des Sichtbereichs des Fahrers.

Daher lassen sich die in Abschnitt 2.4 beschriebenen HMI-Konzepte bestehender kraftstoffeffizienter FAS von Pkw auf die hier spezifizierte, automatisierte kraftstoffeffiziente Längsführung nicht übertragen. Gründe hierfür sind Unterschiede in der Systemspezifikation und Funktionsallokation, sowie die Lkw-spezifischen Besonderheiten [Kön15, S. 625].

### 3.1.3 Ableitung der Aufgabenstellung

Zahlreiche Untersuchungen zur Wirkung einer automatisierten Fahrzeuglängsführung in Bezug auf mögliche negative Automationseffekte existieren für FAS wie den abstandsge-regelten oder den topographiebasierten Tempomat (Kap. 2.4.1 und 2.4.2) [Gwe06; Pie07]. Vergleichbare Untersuchungen für komplexere Funktionen, die statische und dynamische

Infrastrukturelemente einbeziehen, sind im Lkw-Bereich derzeit nicht bekannt. Doch gerade bei diesen FAS mit höherem Funktionsumfang und komplexeren Systemgrenzen kann die Gestaltung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion ausschlaggebend für Sicherheit, Akzeptanz und Wirksamkeit sein.

Neben der Systemtransparenz ist die Kontrollierbarkeit entscheidend für eine zukünftige Systemeinführung. Wie in Abschnitt 2.3 dargestellt, liegt bislang kein standardisiertes Verfahren zur Analyse und Quantifizierung der Interaktionssicherheit vor [Neu08a, S. 141; Wei13, S. 21]. Die vom Response Konsortium [Res06] erarbeiteten Vorschläge zur Kontrollierbarkeitsbewertung sowie die darauf aufbauende ISO Norm 26262-3 [ISO11] fokussieren sich auf die Systemsicherheit (Abbildung 2-10). Gerade bei umfeldwahrnehmenden und in die Fahrdynamik eingreifenden FAS ist die Betrachtung der Interaktionssicherheit essentiell. Hier bedarf es weiterer Forschung, um zu bestätigen, dass das zukünftige FAS mindestens dem Sicherheitsniveau einer manuellen Fahrzeuglängsführung entspricht.

Desweiteren stellt sich aufgrund vorangegangener Studien zur Kommunikation der Systemunsicherheitsinformation (SUI) an den Fahrer (Kap. 2.3.3) die Frage, ob sich die SUI positiv auf die Systemtransparenz und Kontrollierbarkeit der automatisierten, kraftstoffeffizienten Längsführung auswirkt. Wegen des hohen Ausmaßes an Automatisierung und der resultierenden Komplexität des FAS lassen sich positive Effekte wie bei [Bel13; Hel13] vermuten. Jedoch ist hierfür eine einfache und intuitive Darstellung der SUI nötig. Es bedarf weiterer Forschung hinsichtlich der Darstellungsform der SUI sowie deren Auswirkungen bei der Nutzung einer automatisierten, kraftstoffeffizienten Fahrzeuglängsführung.

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein Vorgehen zur Kontrollierbarkeitsbewertung umfeldwahrnehmender und in die Fahrdynamik eingreifender FAS auf der Ebene „Mensch-System/Fahrzeug“ entwickelt und für die in Abschnitt 3.1.1 spezifizierte automatisierte, kraftstoffeffiziente Längsführung durchgeführt werden. Zunächst wird eine systemtransparente Gestaltung der Fahrer-Fahrzeug-Schnittstelle entwickelt, um auf deren Basis die Kontrollierbarkeitsbewertung durchführen zu können.

## **3.2 Aufstellung der Forschungsfragen**

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein Arbeitsmodell der Fahrer-FAS-Interaktion aufgestellt (Kap. 3.2.1), mit dessen Hilfe die Themeneingrenzung (Kap. 3.2.2) vorgenommen werden kann. Darauf aufbauend werden die Forschungsfragen dieser Arbeit formuliert (Kap. 3.2.3).

### **3.2.1 Arbeitsmodell zur Fahrer-FAS-Interaktion**

Umfeldwahrnehmende und in die Fahrdynamik eingreifende FAS lassen sich in das Fahrer-Fahrzeug-Umwelt Regelkreismodell integrieren (Abbildung 3-1; Kap. 2.1.1.3).

Das FAS interagiert über Anzeige- und Bedienelemente mit dem Fahrer sowie mit der Sensorik und Aktorik des Fahrzeugs. Über Car2X Kommunikation kann es zudem Informationen aus der Umwelt erhalten (und ggf. an die Umwelt abgeben).

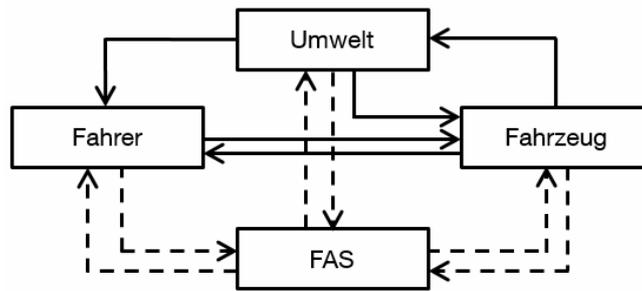


Abbildung 3-1: Das um FAS erweiterte Regelkreismodell der Fahrzeugführung; in Anlehnung an [Dor03, S. 17; Mui09, S. 6]

Weiterhin kann das FAS, in Anlehnung an das aus der Softwareentwicklung stammende „Model-View-Controller“ Prinzip [Bus13, S. 125ff], in drei hierarchische Abstraktionsebenen unterteilt werden: die Datenebene, die Funktionsebenen sowie die HMI-Ebene. Basierend auf dem objektorientierten Programmierparadigma der Kapselung [Lah09] kommuniziert jede Ebene des FAS nur mit der direkt darüber oder darunterliegenden. Die Implementierungsdetails bleiben verborgen. Daraus lässt sich ein konzeptionelles Arbeitsmodell der Fahrer-FAS-Interaktion aufstellen (Abbildung 3-2).

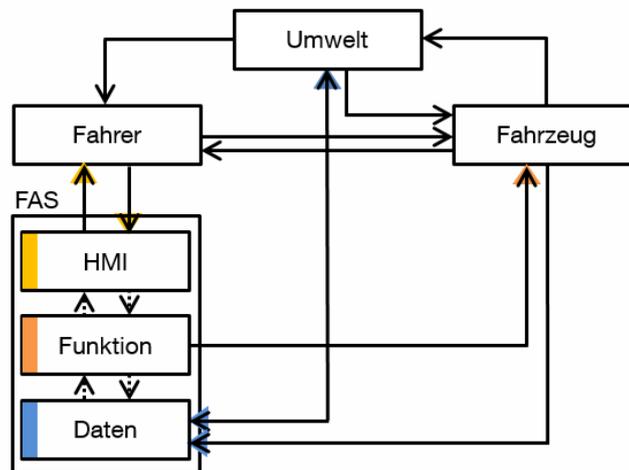


Abbildung 3-2: Das Arbeitsmodell zur Fahrer-FAS-Fahrzeug-Interaktion gliedert das FAS in drei Abstraktionsebenen: Daten, Funktion und HMI

Die unterste Ebene des FAS bildet die Daten-Ebene. Sie erhält Informationen von fahrzeuginternen und -externen Datenquellen. Dabei kommuniziert die Ebene mit Umwelt und Fahrzeug (-sensorik). Zur Erhöhung von Zuverlässigkeit und Genauigkeit kann auf dieser Ebene eine Sensordatenfusion durchgeführt werden [Alt10]. Folglich übernimmt die Daten-Ebene die Informationsaufnahme und -analyse im Informationsverarbeitungsprozess (Kap. 2.1.2.1). Zur Verbesserung der Modularität und Flexibilität ließe sich diese Ebene nochmals in Informationsaufnahme und -analyse untergliedern. Damit entspräche die Einteilung auch den Empfehlungen von [Dam11, S. 42]. Eine Zusammenfassung dieser Arbeitsschritte innerhalb der Daten-Ebene ist für die vorliegende Arbeit ausreichend detailliert.

Die Stufen der Aktionsauswahl und -ausführung nach der Klassifikation von Abschnitt 2.4 werden von der Funktions-Ebene übernommen. Diese berechnet mittels ausgewählter Algorithmen die optimale Fahrstrategie. Die notwendigen Schritte einer solchen Berechnung sind bspw. in [Rad13, S. 87ff] detailliert beschrieben. Allgemein kann auf Basis der aggregierten Informationen aus der Datenebene ein Vorausschaubereich generiert werden, der durch den Einbezug hinterlegter Randbedingungen einen Fahrschlauch mit zulässigen Geschwindigkeitstrajektorien ergibt. Auf dessen Basis kann mittels echtzeitfähiger Algorithmen

eine optimale Fahrstrategie ermittelt werden. Daraus lassen sich Sollwertvorgaben von optimalen Verläufen der Fahrgeschwindigkeit, des Gangs, des Kupplungsmoments und der Bremskraft berechnen. Zur Umsetzung der optimierten Fahrstrategie wird mit der Fahrzeug-aktorik interagiert. Diese regelt die Längsdynamik auf Basis der Sollwertvorgaben der Funktions-Ebene.

Die oberste Ebene stellt das HMI dar (Abbildung 3-2). Diese kann von der darunterliegenden Ebene Informationen hinsichtlich des Systemzustands sowie zu geplanten Manövern erhalten. Gleichzeitig sind die funktionsspezifischen Algorithmen gekapselt. Der Fahrer kann ausschließlich über die HMI-Ebene mit dem FAS interagieren. Die Aufgabe der HMI-Ebene ist es, das implementierte Modell (Kap. 2.1.1) der zugrundeliegenden Funktion zu kapseln. Um die Systemtransparenz zu fördern, sollen dem Fahrer die Informationen zur Funktion leicht verständlich präsentiert werden. Dies wurde in Abschnitt 2.1.1 als sogenanntes Präsentationsmodell bezeichnet. Auf dessen Basis kann der Fahrer sein subjektives, mentales Modell aufbauen, um das Systemverhalten nachvollziehen und antizipieren zu können. Prinzipiell kann die HMI-Ebene über die visuelle, akustische oder haptische Modalität mit dem Fahrer interagieren. Die Informationsabgabe an den Fahrer kann dabei über eine indirekte oder direkte Schnittstelle stattfinden [Tim02, S. 12]. Bezogen auf die automatisierte Längsführung können dem Fahrer die Informationen indirekt z.B. über Anzeigen im Kombidisplay vermittelt werden. Gleichzeitig kann der Fahrer direkt Informationen zur Fahrzeuglängsdynamik erhalten. Über die vestibuläre Wahrnehmung (Kap. 2.1.2.1) kann der Fahrer beispielsweise Beschleunigungsänderungen erfassen [Bru15, S. 637]. Zudem kann der Fahrer direkt über den akustischen Kanal durch Fahrgeräusche Informationen zum Geschwindigkeitsniveau erfassen (Kap. 2.1.2.2). Ebenso können Geschwindigkeitsänderungen direkt über den visuellen Kanal mit Hilfe des optischen Flusses ermittelt werden.

Der Fahrer kann über Bedienelemente der HMI-Ebene auf das FAS einwirken. Grundsätzlich können hierfür Gas- oder Bremspedal sowie Taster und Knöpfe bzw. eine Spracherkennung bereitgestellt werden. Die Benutzereingaben des Fahrers werden an die darunterliegende Funktions-Ebene weitergegeben. So kann beispielsweise das System aktiviert, deaktiviert oder übersteuert werden. Zudem könnten die Fahrereingaben bei der Ermittlung der vorausliegenden Geschwindigkeitstrajektorie berücksichtigt werden, um bspw. das Prinzip der Individualisierbarkeit zu ermöglichen (Kap. 2.1.3).

### **3.2.2 Themeneingrenzung**

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Interaktion zwischen dem Fahrer und der HMI-Ebene (Abbildung 3-2) des in 3.1.1 spezifizierten FAS. Die Implementierung der Funktions- und Daten-Ebene des FAS werden vorausgesetzt, sind jedoch nicht Inhalt dieser Arbeit. Für eine nutzerzentrierte Evaluation der HMI-Ebene erfolgt lediglich eine prototypische Umsetzung der darunterliegenden Ebenen.

Die HMI-Ebene lässt sich in Bedien- und Anzeigekonzept unterscheiden. Fokus dieser Arbeit ist die systemtransparente Gestaltung der Anzeige, um den in Abschnitt 2.1.1.2 beschriebenen „Gulf of Evaluation“ zu überbrücken.

### 3.2.3 Ableitung der Forschungsfragen

Aus dem Fazit zum Stand der Forschung (Kap. 3.1) lassen sich unter Berücksichtigung der Themeneingrenzung (Kap. 3.2.2) folgende Forschungsfragen ableiten:

- **F-1 Systemtransparenz:**  
Wie kann die HMI-Ebene des FAS systemtransparent gestaltet werden, so dass die Fahrerakzeptanz und Wirksamkeit der automatisierten, kraftstoffeffizienten Fahrzeuglängsführung hoch sind?

Bei Betrachtung des Arbeitsmodells zur Fahrer-FAS-Interaktion (Kap. 3.2.1) ist die Wirksamkeit zunächst abhängig von der Güte der Daten- und Funktions-Ebene. Gleichzeitig kann die Wirksamkeit durch unerwünschte Eingriffe des Fahrers reduziert werden. Der letztgenannte Aspekt soll in dieser Arbeit untersucht werden.

- **F-2 Kontrollierbarkeit:**  
Kann die Kontrollierbarkeit bei nicht situationsgerechtem Automationsverhalten mittels kontinuierlicher Informationen im HMI sichergestellt werden?

Hier soll die Interaktionssicherheit (Kap. 2.3) bei nicht situationsgerechtem Automationsverhalten analysiert werden. Es soll ein Vorgehen zur Kontrollierbarkeitsbewertung erarbeitet werden. Die Durchführung dieser soll auf Basis der kontinuierlich angezeigten Informationen des HMI erfolgen. Explizite Übernahmeaufforderungen können die Kontrollierbarkeit erhöhen, weshalb für eine Worst-Case-Abschätzung darauf verzichtet wird.

- **F-3 Systemunsicherheitsinformation:**  
Kann die Kontrollierbarkeit durch die Präsentation von Systemunsicherheitsinformation (SUI) verbessert werden?

Der Zusammenhang der hier formulierten Forschungsfragen ist in Abbildung 3-3 dargestellt. Eine systemtransparente Anzeige kann sich folglich auf die Kontrollierbarkeit des FAS auswirken. Des Weiteren kann die Präsentation von SUI einen Effekt auf die Systemtransparenz sowie die Kontrollierbarkeit haben.

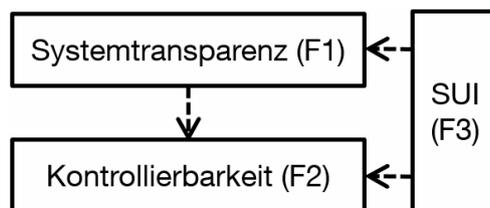


Abbildung 3-3: Zusammenhang der drei Forschungsfragen zur Systemtransparenz, Kontrollierbarkeit sowie Systemunsicherheitsinformation (SUI)

### 3.3 Makromethodik und Vorgehen

Die aufgestellte Forschungsfrage zur Systemtransparenz (F-1) betrifft im Produktentwicklungsprozess die Anforderungsanalyse und die Systementwurfsphase des klassischen V-Modells (Abbildung 3-4) [Bun15b]. Gleichzeitig zielen die Forschungsfragen zur Kontrollierbarkeit (F-2) und dem Effekt der SUI (F-3) auf den Nutzen des FAS im Feld ab. Dieser ist nach dem V-Modell nach [Sei15, S. 169] erst nach dem finalen Abnahmetest abschätzbar.

Um bereits in der frühen Konzeptphase [Mat15b, S. 9] Abschätzungen über die Kontrollierbarkeit des FAS treffen zu können, wird die Fahrsimulation in dieser Arbeit eingesetzt. Dabei wird ein nutzerzentrierter Entwicklungsansatz in Anlehnung an [DIN11, S. 15] gewählt. Nutzer können aufgrund des Wissens zum Nutzungskontext und der Vielfalt an möglichen

auftretenden Fahrsituationen wertvolle Erkenntnisse für die Beantwortung der Forschungsfragen liefern. Daher ist es wichtig, den Nutzerinput von Beginn an zu berücksichtigen und nicht erst im Evaluationsschritt zu integrieren [She02, S. 54]. Aufgrund individueller Unterschiede innerhalb der Nutzergruppe der Lkw Fahrer, sollte der Input von einem breiten Spektrum an Nutzern erfasst werden [She02, S. 6].

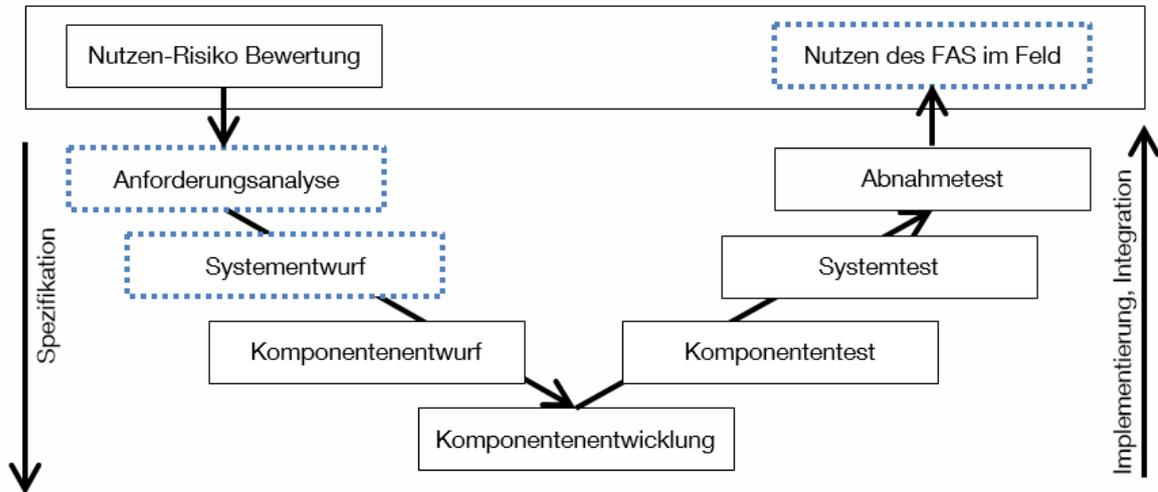


Abbildung 3-4: Modifiziertes V-Modell zur FAS-Entwicklung; nach [Sei15, S. 169]

Bei der Beschreibung der eingesetzten Methodik wird nachfolgend zwischen Makro- und Mikromethoden unterschieden. Die Makromethoden dienen der Strukturierung des gesamten Vorgehens, während die Mikromethoden die Bearbeitung der einzelnen Phase spezifizieren.

Die ausgewählte Makromethodik ist abgeleitet vom nutzerzentrierten Ansatz der DIN EN ISO 9241-210 [DIN11, S. 15], der sich in der Planungsphase des Automobilentwicklungsprozesses anwenden lässt [Ker11, S. 5; Oss16, S. 9]. Demnach sollen die Phasen der Spezifizierung des Nutzungskontexts, der Anforderungsermittlung, Konzeptentwicklung und Evaluation iterativ ablaufen (Abbildung 3-5). Automotive Besonderheiten sind im Nutzungskontext sowie bei der Auswahl der eingesetzten Tools und Methoden für die HMI-Konzeptentwicklung und Evaluation zu berücksichtigen [Ker11, S. 5f].

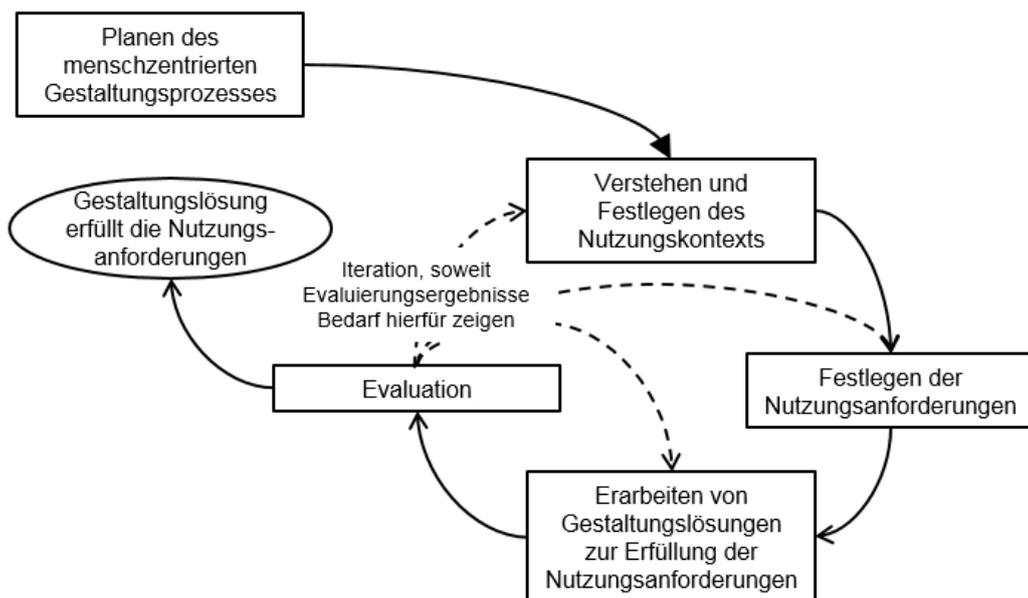


Abbildung 3-5: Nutzerzentrierter Entwicklungsprozess nach der Norm DIN EN ISO 9241-210 [DIN11, S. 15]

Die daraus abgeleitete Makromethodik dieser Arbeit ist in Abbildung 3-6 skizziert. Die aufgezeigten Entwicklungsschritte basieren auf Erkenntnissen zum Nutzungskontext. Zunächst werden die Anforderungen an die HMI-Ebene des FAS definiert (Kapitel 4). Im nachfolgenden Kapitel 5 wird die iterative Konzeptentwicklung und -evaluation dargestellt. Darauf aufbauend erfolgt die summative Evaluation mit dem Fokus der Kontrollierbarkeitsbewertung (Kapitel 6). Im weiteren Vorgehen dieser Arbeit werden die Ergebnisse und mögliche weitere Iterationsschritte diskutiert und ein Ausblick aufgezeigt (Kapitel 6.5.5). Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der Erkenntnisse (Kapitel 8).

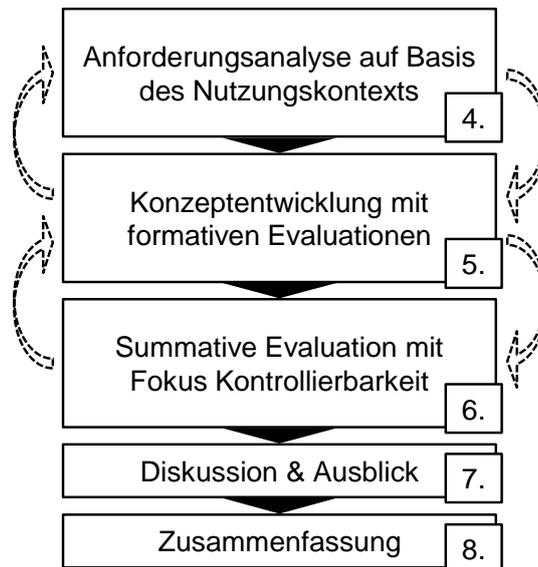


Abbildung 3-6: Übersicht der Makromethodik (in Anlehnung an [DIN11, S. 15]) mit Verweis auf das jeweilige Kapitel

Mögliche Mikromethoden für den nutzerzentrierten Ansatz werden in der DIN Norm 9241-210 [DIN11, S. 15] nicht genauer spezifiziert. Die Auswahl der einzelnen Methoden zur Anforderungsdefinition, Konzeptentwicklung und Evaluation wird im jeweiligen Kapitel erläutert.

Kern dieser Arbeit stellt die Entwicklung eines Vorgehens zur Kontrollierbarkeitsbewertung und die Durchführung dieser am Beispiel der automatisierten, kraftstoffeffizienten Längsführung (Kapitel 6) dar.

## 4 Explorative Anforderungsanalyse

„Nutzungsanforderungen bilden die Grundlage für die Gestaltung und Bewertung interaktiver Systeme zur Befriedigung der Erfordernisse der Benutzer“ [DIN11, S. 18]. Die explorative Anforderungsanalyse erweitert die Erkenntnisse zum Nutzungskontext und leitet Anforderungen für die Konzeptentwicklung und Messgrößen für die Evaluation der HMI-Ebene ab.

### 4.1 Mikromethodik der Anforderungsanalyse

Mittels Methodentriangulation [Fli11, S. 11f] wird die Anforderungsanalyse aus zwei Perspektiven durchgeführt. Die nutzerzentrierte Anforderungsanalyse (Bottom-Up-Ansatz) wird ergänzt um eine analytische Bestimmung der Anforderungen (Top-Down-Ansatz). Die ausgewählten Methoden bauen aufeinander auf (Abbildung 4-1).

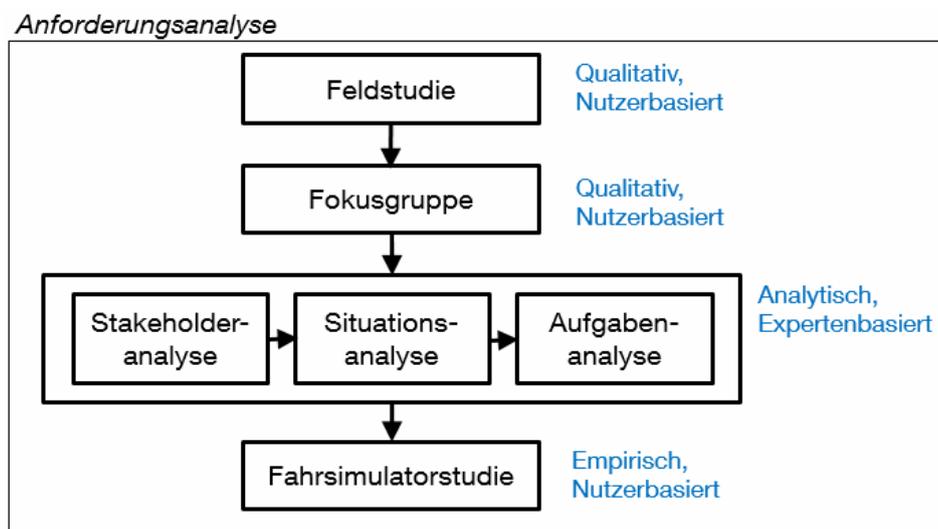


Abbildung 4-1: Übersicht der Mikromethodik zur Anforderungsanalyse

Um die Sichtweise der Lkw-Fahrer zu verstehen, werden eine Feldstudie mit Beobachtungen und kontextuellen Interviews bei Lkw-Mitfahrten sowie eine Fokusgruppen-Diskussion mit Berufskraftfahrern eingesetzt. Diese qualitativen Methoden können in der explorativen Phase eingesetzt werden, mit der „(...) Intention des Entdeckens von theoretisch Neuem“ [Bre10, S. 38]. Feldstudien haben den Vorteil, Erkenntnisse zum Nutzerverhalten im realen Nutzungskontext zu sammeln [Nie93, S. 207f]. Allerdings sind die Feldstudien auf Lkw-Mitfahrten im Verhältnis zur Anzahl erhaltener Meinungen zeit- und kostenintensiv.

Deshalb wird ergänzend eine Fokusgruppen-Studie mit Berufskraftfahrern durchgeführt. Der Diskussionsleitfaden für die Fokusgruppen-Studie basiert auf den Erkenntnissen der vorangegangenen Feldstudie. Fokusgruppen können eingesetzt werden, um Einstellung und Meinungen zukünftiger Nutzer zu einem neuen Produkt zu sammeln [Gre98, S. 9f]. Ziel einer Fokusgruppe ist es, Informationen zu erhalten hinsichtlich „(...) participants' views, attitudes, beliefs, responses, motivations and perceptions on a topic; ,why' people think or feel the way they do“ [Lit03, S. 18]. Vorteil der Fokusgruppen-Methode ist ein im Vergleich zu Interviews geringer Zeitbedarf pro Teilnehmer [Lit03, S. 17]. So können in kurzer Zeit verschiedene Nutzermeinungen gesammelt werden [Sta13, S. 500]. Zudem diskutieren die Teilnehmer im Gruppenkontext meist freier und offener [Sta13, S. 500].

Dennoch ist der Einsatz von Fokusgruppen nicht unumstritten [Saf10, S. 82]. So können die erhaltenen Daten durch Meinungsführer innerhalb der Teilnehmer oder durch suggestive Moderation verzerrt sein [Lit03, S. 21; Sta13, S. 500]. Die Ergebnisse sind mittels Transkription und Analyse aufwendig und zeitintensiv zu interpretieren [Lit03, S. 21; Sta13, S. 500]. Aufgrund der begrenzten Teilnehmerzahl der Fokusgruppe sind die Ergebnisse nicht verallgemeinerbar [Lit03, S. 21]. Es lassen sich jedoch Erkenntnisse für die nachfolgenden analytischen Untersuchungen ableiten. Diese werden eingesetzt, um ein umfassendes Verständnis hinsichtlich relevanter Interessengruppen, situativer Gegebenheiten sowie der monitiven Fahrtätigkeiten zu bekommen.

Ergänzend kommen analytische, expertenbasierte Methoden zum Einsatz, weil „der Nutzer nicht immer Recht hat“ [Nie93, S. 11f]. So divergieren die Nutzermeinungen bei Fragen der Gestaltung der Benutzerschnittstelle [Nie93, S. 12]. Zudem sind neuartige Systeme für die Nutzer schwer vorstellbar, solange sie keine praktische Systemerfahrung sammeln konnten [Nie93, S. 12; Schr11, S. 44].

Im letzten Schritt der Anforderungsanalyse wird eine Fahrsimulatorstudie mit Lkw-Fahrern durchgeführt, um konkrete Anforderungen zur Gestaltung der HMI-Ebene auf Basis der Systemerfahrung von einer repräsentativen Stichprobe zu erhalten. Die vorangegangenen nutzerzentrierten und analytischen Methoden dienen der Spezifizierung des Versuchsdesigns sowie der Einschränkung des möglichen Lösungsraums der quantitativen Fahrsimulatorstudie [Mor98, S. 368].

Vorteile der Fahrsimulation liegen neben der Einsatzmöglichkeit in frühen Konzeptphasen bei der gefahrlosen Untersuchung des FAS sowie bei einer hohen Kontrolle der Versuchsbedingungen [Bre15, S. 187f; Pie07, S. 252ff]. Durch Einsatz eines dynamischen Fahrsimulators mit Rundumsicht lassen sich Störeffekte durch begrenzte Bewegungs- und Sichtdarstellung reduzieren. Nachteile können im möglichen Auftreten von Simulatorkrankheit sowie in einer begrenzten Versuchsdauer liegen [Bre15, S. 187].

## **4.2 Qualitative, nutzerbasierte Anforderungsanalysen**

Die Ergebnisse der Feldstudie und Fokusgruppe werden nachfolgend skizziert. Für weitergehende Details wird verwiesen auf [Sto15a].

### **4.2.1 Feldstudie bei Lkw-Mitfahrten**

In der durchgeführten Feldstudie werden bei Lkw-Mitfahrten im Verteilerverkehr mittels Beobachtung („shadowing“ [Saf10, S. 86]) Informationen zum Fahrerverhalten in verschiedenen Fahrsituationen gesammelt und ein vorab erstellter Situationskatalog erweitert (Anhang C). Im zweiten Teil der Lkw-Mitfahrten werden mittels kontextueller Interviews („contextual inquiry“ [Saf10, S. 86]) unmittelbar nach der erlebten Fahrsituation Einstellungen und Meinungen zur automatisierten, kraftstoffeffizienten Längsführung sowie zum Informationsbedarf aus Fahrersicht erfragt [Sto15a]. Die Ergebnisse dieser Feldstudie dienen der Entwicklung des Diskussionsleitfadens für die nachfolgende Fokusgruppen-Studie.

### **4.2.2 Fokusgruppe zur Anforderungsdefinition**

Neben den sieben eingeladenen Berufskraftfahrern (Voraussetzung gültiger Führerschein Klasse C oder CE) nehmen ein Moderator und Co-Moderator sowie zwei Protokollanten an der Fokusgruppen-Studie teil [Sto15a]. Die zusammengefassten Ergebnisse der Inhaltsanalyse basieren auf Beobachtungsprotokoll und Transkript.

Nach der einleitenden Diskussion über persönliche Einstellungen zum kraftstoffeffizienten Fahren werden die Lkw-Fahrer in das kraftstoffeffiziente FAS eingewiesen (Moderationskript in [Hof16, S. Anhang A]). Das Verhalten des FAS wird in grafisch dargestellten Situationen erläutert und die wichtigsten Kernaspekte während der gesamten Studie an einer Stellwand aufgezeigt.

### **4.2.2.1 Generelle Einstellung zum kraftstoffeffizienten Fahren**

In der Fokusgruppen-Diskussion zeigt sich ein Unterschied zwischen der generellen Einstellung zu kraftstoffeffizientem Fahren und der tatsächlichen Umsetzung einer solchen Fahrstrategie. Zeitdruck, mangelnde Schulung oder das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer werden als hemmende Faktoren genannt. Auch der Fahrerzustand (Stress, Müdigkeit) kann kraftstoffeffizientes Fahren einschränken. Die Teilnehmer sehen im Gegensatz zu Landstraßen manuell ausgeführtes, kraftstoffeffizientes Fahren im urbanen Raum als zusätzliche Beanspruchung.

Eine abschließend durchgeführte Meta-Analyse zeigt, dass drei Probanden skeptisch gegenüber einer automatisierten Längsführung sind. Aufgrund ihrer langjährigen Erfahrung sehen sie Schwierigkeiten, dem System zu vertrauen, und bevorzugen Handlungsanweisungen zum kraftstoffeffizienten Fahren. Drei weitere Probanden sind unschlüssig, während ein Proband sich gerne Teile der Fahraufgabe abnehmen lässt und das FAS als Unterstützung für den Fahrer ansieht.

### **4.2.2.2 Gestaltung der Fahrer-Fahrzeug-Schnittstelle**

Essentiell nötige Informationen stellen aus Sicht der Lkw-Fahrer Systemzustand, Regelgrund sowie Entfernung zum Regelgrund dar. Ein Teilnehmer nennt zudem die neue Zielgeschwindigkeit, auf die das FAS regelt. Zeitangaben zu Phasenübergängen der Lichtsignalanlage oder das zukünftige Fahrverhalten werden aufgrund der automatisierten Längsführung nicht als essentiell gesehen. Die Informationsdarstellung sollte dezent, „kurz und bündig“ sowie nicht ablenkend gestaltet sein. Dazu eignen sich bekannte, intuitiv verständliche Symbole. Auf Text sollte verzichtet werden. Die visuelle Modalität wird bevorzugt. Eine akustische Informationsübermittlung wird als störend empfunden. Als Darstellungsort werden Kombidisplay, Sekundärdisplay und Head-Up Display genannt. Der Informationszeitpunkt wird kontrovers diskutiert. Die Fahrer benötigen die Informationen kurz bevor sie das Manöver des FAS detektieren. Jedoch sollten die Informationen nicht zu früh dargeboten werden. Grundsätzlich betonen die Teilnehmer die Wichtigkeit des HMI, wenn das FAS entgegen der Intuition des Fahrers handelt. Dies ist beispielsweise kurz vor einem Phasenübergang einer Lichtsignalanlage der Fall.

### **4.2.2.3 Nachvollziehbarkeit und Vertrauen**

Ein entscheidender Aspekt im Umgang mit dem FAS ist aus Fahrersicht die Nachvollziehbarkeit der Systemhandlungen. Fehlende Nachvollziehbarkeit führt nach Aussage der Lkw-Fahrer zu Frustration, sinkendem Vertrauen und somit zur Nichtnutzung des FAS. Das Vertrauen des Fahrers in das FAS kann (von einem anfänglich niedrigen Level) durch positives Systemerleben in verschiedenen Fahrsituationen wachsen. Zudem kann das anfängliche Vertrauen in ein neues FAS abhängig von Erfahrungen mit bereits existierenden FAS sein. Durch negative Erfahrungen mit dem System sinkt das Vertrauen stark. Aus Fahrersicht stellt das Vertrauen in ein FAS die Basis für Akzeptanz und somit einen Indikator für die Systemnutzung dar. Auf die Frage nach der Nützlichkeit eines FAS nennen die Lkw-Fahrer

Aspekte wie Kraftstoffeffizienz, Sicherheit, gefestigtes Vertrauen und Fahrkomfort. Ein Teilnehmer weist darauf hin, dass Nützlichkeit eines FAS nicht zwingend zu tatsächlicher Systemnutzung führt. So kann er ein FAS prinzipiell als nützlich ansehen, aber die entsprechende Funktion trotzdem lieber manuell ausführen wollen.

#### 4.2.2.4 Vorteile und mögliche Probleme im Umgang mit dem FAS

Die Lkw-Fahrer der Fokusgruppe sehen das FAS als Entlastung und Unterstützung vor allem auf unbekanntem Routen. Ein Teilnehmer nennt die „feinfühligere“ Regelung der Geschwindigkeit durch das FAS als einen Vorteil im Gegensatz zu Handlungsempfehlungen.

Mögliche Probleme im Umgang mit dem kraftstoffeffizienten FAS können hinsichtlich ihrer Ursache in „Fahrer“, „Systemauslegung“ und „andere Verkehrsteilnehmer“ kategorisiert werden (Abbildung 4-2). Hierzu werden die Aussagen der Teilnehmer zusammengefasst: Probleme durch den Fahrer selbst können durch fehlendes Wissen oder eine passive Interpretation der Fahrerrolle entstehen. Zudem kann eine interne Kontrollüberzeugung des Fahrers sowie mangelnde Usability zu fehlender Fahrerakzeptanz führen. Abhängig von der Systemauslegung können Probleme durch unverständliches Systemverhalten, geringe Zuverlässigkeit oder fehlende Anpassbarkeit entstehen. Auch ein großer Unterschied zwischen dem individuellen Fahrstil und dem Fahrstil der automatisierten Längsführung kann die Fahrerakzeptanz reduzieren. Einscherer sowie Überholmanöver durch andere Verkehrsteilnehmer werden als weitere Probleme angesprochen.

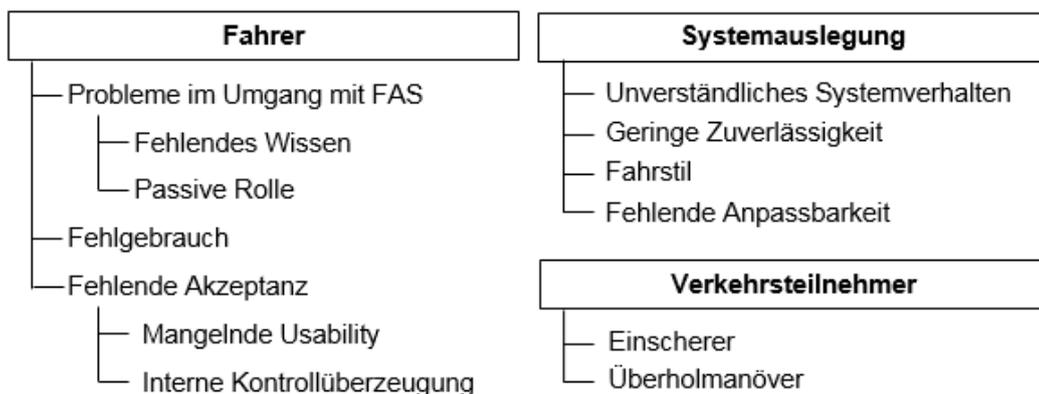


Abbildung 4-2: Mögliche Probleme aus Fahrersicht im Umgang mit dem kraftstoffeffizienten FAS nach [Sto15a]

### 4.3 Kerneergebnisse der analytischen Anforderungsdefinition

Die analytische Anforderungsdefinition gliedert sich, wie in der Mikromethodik (Kap. 4.1) erläutert, in Stakeholder-, Aufgaben-, und Situationsanalyse.

#### 4.3.1 Stakeholder-Analyse

Für das FAS zur kraftstoffeffizienten, automatisierten Fahrzeuglängsführung können als relevante Stakeholder Transportunternehmer, Berufskraftfahrer sowie Politik und Gesellschaft identifiziert werden.

Der Lkw stellt aus wirtschaftlicher Sicht ein Investitionsgut dar. Folglich muss die Anschaffung eines FAS aus Sicht der Transportunternehmer unternehmerisch sinnvoll sein, indem sich die Anschaffungskosten über verringerte Betriebskosten amortisieren lassen [Kit06,

S. 1f]. Neben den entscheidenden Aspekten der Wirtschaftlichkeit und Zeiteffizienz ist für Transportunternehmer die Kundenzufriedenheit wichtig.

Aus Sicht von Politik und Gesellschaft sind neben der Verkehrssicherheit Aspekte wie Emissionsreduktion, Ressourcenschonung und ein hoher Verkehrsfluss relevant.

Fahrern bedeutet neben dem Aspekt der Sicherheit ein angenehmes Arbeiten und Leben im Lkw viel. Bei Fahrern schwerer Lkw handelt es sich um Berufskraftfahrer mit regelmäßiger Weiterbildungspflicht [Dör15, S. 1012]. 98,3 % der Berufskraftfahrer sind männlich [Bun15c, S. 7]. Das Arbeitsumfeld ist geprägt von einem hohen Zeit- und Termindruck sowie langen [Loh14, S. 53] und vorrangig im Fernverkehr unregelmäßigen Arbeitszeiten [Bun15c, S. 10]. Dabei sind gesetzlich vorgeschriebene Lenk- und Ruhezeiten einzuhalten [Dör15, S. 1011]. Zusätzliche Beanspruchungen können sich durch die hohe Verkehrsdichte sowie die kontinuierliche, lange Fahrleistung ergeben [Dör15, S. 1014].

Des Weiteren verschiebt sich das Beanspruchungsprofil von Lkw-Fahrern zunehmend vom physiologischen in den mentalen Bereich [Eve09, S. 61]. Hintergrund dieser Entwicklung sind einerseits ergonomische und technische Verbesserungen bei gleichzeitig steigendem Anteil von Kontroll- und Steuerungsaufgaben durch zunehmende Informations- und Kommunikationstechnologie im Fahrzeug [Eve09, S. 61].

Die Berufsgruppe der Lkw-Fahrer weist eine schiefe Altersstruktur auf mit einem Anteil von 25,5 % an über 55 Jährigen [Bun15c, S. 7]. Bei der Auslegung der HMI-Ebene und Gestaltung der Interaktion gilt es, die veränderten Fähigkeiten älterer Fahrer im Informationsverarbeitungsprozess zu berücksichtigen [Abe15, S. 8ff]. Des Weiteren nutzt ein Lkw-Fahrer im Verteilerverkehr meist mehrere Lkw, was die Bedeutung eines intuitiv verständlichen HMI hervorhebt.

Die Erkenntnisse der Stakeholderanalyse bilden die Rahmenbedingungen für die Anforderungsdefinition und fließen in die HMI-Konzeptentwicklung und -evaluation (Kapitel 5) ein.

### 4.3.2 Aufgabenanalyse

Im Rahmen der Aufgabenanalyse sollen die nötigen Wahrnehmungs- und Entscheidungsprozesse des Fahrers zur Überwachung der automatisierten Längsführung untersucht werden. Die Aufgabenanalyse basiert auf den Erkenntnissen der Geschwindigkeitswahrnehmung (Kap. 2.1.2.2) sowie der Gefahrenkognition (Kap. 2.1.2.3).

Nach [Wic04, S. 39] dient die Aufgabenanalyse als „(...) a way of systematically describing human interaction with a system to understand how to match the demands of the system to human capabilities.“ Grundsätzlich muss zwischen Zielen, Funktionen und Aufgaben unterschieden werden [Wic04, S. 39]. Unter Zielen werden, neben der Kraftstoffeffizienz, Sicherheit und Fahrkomfort verstanden (Kap. 4.3.1). Die vom Fahrer auszuführende Funktion ist das permanente Überwachen der automatisierten Längsführung. Die hierfür nötigen Aufgaben lassen sich durch ein Aktivitätsdiagramm in der „Unified Modeling Language“ (UML) [Kec11, S. 256ff] modellieren (Abbildung 4-3).

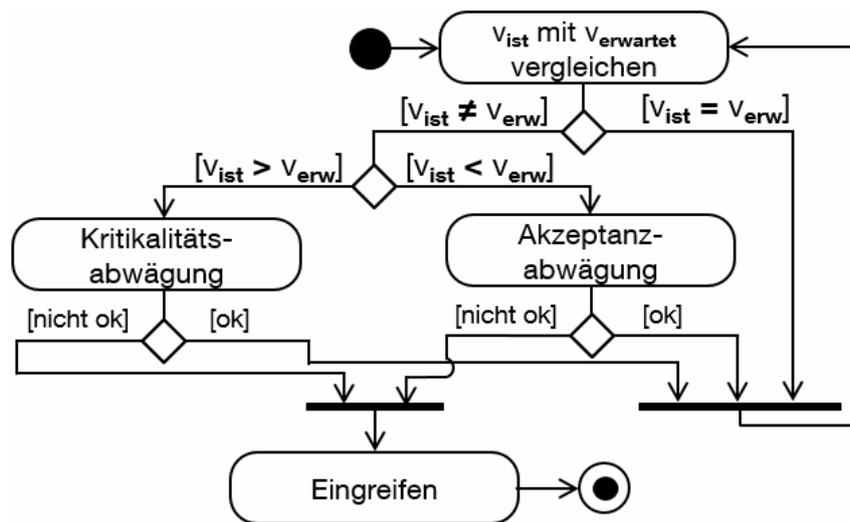


Abbildung 4-3: Aktivitätsdiagramm der Aufgaben des Fahrers bei der Überwachung der automatisierten, kraftstoffeffizienten Fahrzeuglängsführung

Nach der Aktivierung des FAS hat der überwachende Fahrer die Aufgabe, die vom FAS eingeregelter Ist-Geschwindigkeit ( $v_{ist}$ ) mit seiner erwarteten Geschwindigkeit ( $v_{erwartet}$ ) zu vergleichen. Während der Fahrer die Ist-Geschwindigkeit über verschiedene Sinnesmodalitäten wahrnehmen kann (Kap. 2.1.2.2), ermittelt er seine erwartete Geschwindigkeit auf Basis seines mentalen Modells sowie der zur Verfügung stehenden Informationen aus HMI-Ebene und Fahrsituation.

Stimmt die Ist-Geschwindigkeit mit der erwarteten Geschwindigkeit überein, so wiederholt der Fahrer diesen Vergleich für die vorausliegende Situation. Ist  $v_{ist}$  kleiner als  $v_{erwartet}$ , führt er eine Akzeptanzabwägung durch. In Abhängigkeit der individuellen Akzeptanzschwelle entscheidet sich der Fahrer entweder für einen Systemeingriff, der das FAS deaktiviert oder er beobachtet die Situation weiter, indem er einen weiteren Vergleich von  $v_{ist}$  und  $v_{erwartet}$  ausführt.

Sollte  $v_{ist}$  größer als  $v_{erwartet}$  sein, findet eine Kritikalitätsabwägung durch den Fahrer statt. Liegt die Differenzgeschwindigkeit oberhalb der individuellen, situationspezifischen Kritikalitätsschwelle des Fahrers, so greift er in das System ein. Befindet sich die Differenz dagegen (noch) unterhalb der Kritikalitätsschwelle, führt der Fahrer einen erneuten Vergleich zwischen  $v_{ist}$  und  $v_{erwartet}$  aus. Die individuelle Kritikalitätsschwelle kann abhängig sein von der persönlichen Risikoaffinität und dem Systemvertrauen. Beides kann wiederum abhängig sein von der vom Fahrer wahrgenommenen Fahrsituation.

Die Frequenz der Ausführung des Geschwindigkeitsvergleichs kann abhängen vom Fahrerzustand sowie dem situativen Vertrauen des Fahrers in das FAS.

Zusammenfassend ist der Systemeingriff bedingt durch die Häufigkeit des Geschwindigkeitsabgleichs sowie der individuellen Akzeptanz- und Kritikalitätsschwelle.

### 4.3.3 Situationsanalyse

Ziel der Situationsanalyse ist die Untersuchung des Situationsablaufs, um mögliche Probleme und Herausforderungen des Fahrers in Abhängigkeit verschiedener Situationsphasen zu ermitteln.

Für die Analyse wird eine Situation mit hohem Informationsungleichgewicht gewählt. Abbildung 4-4 zeigt die vorausschauende Regelung des FAS auf eine von Rot auf Grün wechselnde Lichtsignalanlage (LSA) im Vergleich zur manuellen Geschwindigkeitswahl.

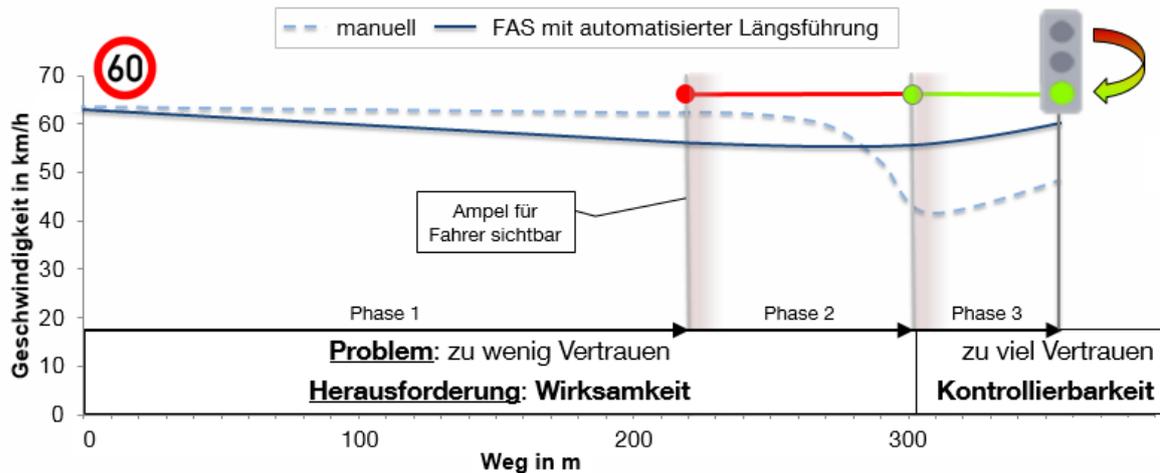


Abbildung 4-4: Phasenmodell des Situationsablaufs bei Regelung auf eine Lichtsignalanlage als dynamisches Infrastrukturelement [Sto16, S. 17]

In der gesamten Phase 1 befindet sich die LSA außerhalb des möglichen Sichtbereichs des Lkw-Fahrers. Zu Beginn dieser Phase leitet das FAS durch Ausrollen eine Geschwindigkeitsreduktion ein, um die Grüne-Welle zu erreichen. Diese Geschwindigkeitsänderung kann der Fahrer wahrnehmen (Kap. 2.1.2.2).

Folglich benötigt der Fahrer aufgrund des Informationsungleichgewichts Informationen durch das HMI, um das Verhalten des FAS plausibilisieren zu können.

Das Informationsungleichgewicht wird weiter verstärkt mit dem Beginn der Phase 2. Ab hier kann der Fahrer die rote Phase der LSA wahrnehmen. Der tatsächliche Wahrnehmungszeitpunkt ist abhängig vom augenblicklichem Fahrerzustand sowie der individuellen Wahrnehmungsfähigkeit. In Phase 2 regelt das FAS entgegen der Intuition des Fahrers, was von den Lkw-Fahrern der Fokusgruppe als besondere Schwierigkeit bezeichnet wurde.

Unter Anwendung der Aufgabenanalyse (Kap. 4.3.2) muss der Fahrer mit den Informationen aus der HMI-Ebene seine erwartete Geschwindigkeit ( $v_{\text{erwartet}}$ ) anpassen können, um einen Systemeingriff aufgrund der Akzeptanzabwägung zu verhindern.

Demnach stellt in Phase 1 und 2 die Wirksamkeit des FAS eine Herausforderung dar, weil unerwünschte Systemeingriffe das Potential der Kraftstoffeffizienz reduzieren. Probleme können durch mangelndes Vertrauen in das FAS sowie eine nicht angepasste, erwartete Geschwindigkeit ( $v_{\text{erwartet}}$ ) entstehen.

Erst zu Beginn der Phase 3 wechselt die Lichtsignalanlage auf die grüne Phase. Ab hier kann der Fahrer das Verhalten des FAS mit der Realität abgleichen. Folglich können in Phase 3 Probleme durch übersteigertes Vertrauen verursacht werden. Dieses kann zu unzureichender Überwachung, höherer Risikobereitschaft und zu geringem Verantwortungsgefühl führen [Bar98, S. 117]. Dadurch kann im Fall von nicht situationsgerechtem Verhalten des FAS die Kontrollierbarkeit und folglich die Sicherheit gefährdet sein.

Zusammenfassend lässt sich aufgrund des Informationsungleichgewichtes ein Informationsbedarf ableiten, der es dem Fahrer in Phase 1 und 2 ermöglicht, das Situationsverhalten zu antizipieren. Weiterhin sollen in Phase 3 einem übersteigerten Vertrauen und damit einhergehende Kontrollierbarkeitsproblemen entgegengewirkt werden.

Phase 1 und 2 stellen somit bei situationsgerechtem FAS-Verhalten eine Herausforderung dar, während in Phase 3 bei nicht situationsgerechtem Verhalten Probleme entstehen könnten.

Die Situationsanalyse zeigt den Informationsbedarf des Fahrers in den jeweiligen Situationsphasen. Die Informationen der HMI-Ebene ermöglichen die Überwachung des FAS, fördern angemessenes Vertrauen und erlauben eine aktivere Rolle des Fahrers.

## 4.4 Nutzerbasierte Fahrsimulatorstudie zur Anforderungsdefinition

Die empirische Ermittlung der essentiell nötigen Informationen der HMI-Ebene erfolgt durch eine Fahrsimulatorstudie mit Lkw-Fahrern.

### 4.4.1 Hypothesen und Versuchsdesign

Die Studie besteht aus einem empirischen und einem explorativen Teil. Für den empirischen Teil werden zwei unabhängige Variablen (UV) als Innersubjektfaktoren gewählt. Hiermit sollen die essentiell nötigen Informationseinheiten (UV-1) sowie der optimale Informationszeitpunkt (UV-2) ermittelt werden.

Das Innersubjekt-Versuchsdesign hat den Vorteil, dass alle Probanden alle Varianten kennenlernen und daraufhin bewerten können [Fie03, S. 97]. Zudem werden weniger Probanden benötigt.

Alle Probanden werden in die Funktion des Fahrsimulators sowie die kraftstoffeffiziente, automatisierte Längsführung eingewiesen. Zur einfachen Verständlichkeit wird der Begriff „intelligenter Tempomat“ gewählt.

#### Messgrößen

Die Messgrößen (abhängige Variablen, AV) werden aus den Ergebnissen der Fokusgruppe sowie der Situations- und Aufgabenanalyse abgeleitet, ergänzt um Erkenntnisse aus dem Stand der Wissenschaft (Kap. 2.1 und 2.2.3). So werden Nachvollziehbarkeit, Vorhersagbarkeit und Vertrauen als entscheidende Aspekte hinsichtlich der Systemakzeptanz und Kontrollierbarkeit ausgewählt. Die Konstrukte werden beispielsweise wie folgt als Aussagen formuliert: „Die Meldung hat mir geholfen nachzuvollziehen, was der intelligente Tempomat gerade macht“. Die Probanden sollen diese mit einer 5-stufigen Likert-Skala von -2 „trifft absolut nicht zu“ bis +2 „trifft absolut zu“ bewerten [Hof16, S. Anhang B]. Weil das Vertrauen allgemein stark mit dem gesamten FAS (Daten-, Funktions- und HMI-Ebene) wird diese Aussage zur Vertrauensbewertung bezogen auf die HMI-Ebene sowie allgemein formuliert.

#### Hypothesen

Die Ausprägungen der UVs werden aus den Erkenntnissen der Fokusgruppe abgeleitet. Die unabhängige Variable „Informationsgehalt“ (UV-1) ist dreistufig. Dabei variiert die Anzahl der Informationseinheiten zwischen einer (Systemstatus), drei (zusätzlich: Regelgrund und Entfernung) und fünf (zusätzlich: Fahrverhalten und Kraftstoffersparnis).

Zu Versuchszwecken werden die Informationseinheiten textuell dargestellt (Abbildung 4-5).



Abbildung 4-5: Zu Versuchszwecken textuell dargestellte Informationseinheiten im Informationsbereich des Kombidisplays (Links 1, Mitte 3 und Rechts 5)

Hierdurch können Störfaktoren durch die grafische Repräsentation der Information ausgeschlossen werden. Aus den Ergebnissen der Fokusgruppe lassen sich folgende Hypothesen formulieren (AVs sind zusammengefasst):

- **H-1: Vergleich mit weniger Informationseinheiten**  
Drei Informationseinheiten (Status, Regelgrund, Entfernung) werden besser bewertet hinsichtlich Nachvollziehbarkeit, Vorhersagbarkeit, Vertrauen sowie des Vertrauens durch die Meldung im Vergleich zu einer Informationseinheit (Status).
- **H-2: Vergleich mit mehr Informationseinheiten**  
Zwischen drei Informationseinheiten (Status, Regelgrund, Entfernung) und fünf Informationseinheiten (zusätzlich: Fahrzeugverhalten und Kraftstoffersparnis) besteht kein Unterschied in der Bewertung der Nachvollziehbarkeit, Vorhersagbarkeit, Vertrauen sowie des Vertrauens durch die Meldung.

Die unabhängige Variable „Informationszeitpunkt“ (UV-2) ist zweistufig. So wird zwischen einem frühen (5,5 s vor Beginn der Geschwindigkeitsänderung) und einem späten Informationszeitpunkt (mit Beginn der Geschwindigkeitsänderung) unterschieden. Hierzu lässt sich aus der Fokusgruppen-Studie die Hypothese wie folgt formulieren:

- **H-3: Vergleich des Informationszeitpunktes**  
Der frühe Informationszeitpunkt (5,5 s vor Geschwindigkeitsänderung) wird besser bewertet als der späte Zeitpunkt (gleichzeitig mit Geschwindigkeitsänderung) hinsichtlich Nachvollziehbarkeit, Vorhersagbarkeit, Vertrauen sowie des Vertrauens durch die Meldung.

Um sicherzustellen, dass die Probanden die Meldungszeitpunkte bewerten können, wird gleichzeitig mit der Anzeige ein dezenter Informationssound abgespielt.

Für den zweiten Teil der Studie („Kreativteil“) wird explorativ mit offenen und geschlossenen Fragen nach weiteren essentiell nötigen Informationseinheiten sowie Anzeigemodalität, -ort und Darstellungsform gefragt.

### 4.4.2 Apparatus und Stichprobe

Die Studie wird am dynamischen Fahrsimulator des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik, TUM durchgeführt [Neg07]. Die dynamische Fahrsimulation wird gewählt, sodass die Probanden eine haptische Rückmeldung zur automatisierten Längsführung wahrnehmen können (Kap. 2.1.2.2). Der Fahrsimulator besteht aus einer MAN TGS Serienfahrerkabine, einem Hexapod mit sechs Freiheitsgraden sowie einem horizontalen Sichtfeld von 210°. Die virtuelle Welt entsteht durch die Fahrsimulatorsoftware Silab [WIV14]. Die Sattelzugmaschine ist parametrisiert auf 340 kW mit Automatikgetriebe und einer Fahrzeugmasse von 40 t. Ein zuvor validiertes Längsdynamikmodell [Dau13; Süß13] wird im Versuch eingesetzt. Die automatisierte, kraftstoffeffiziente Längsführung ist prototypisch in C++ implementiert und in die Fahrsimulatorsoftware Silab integriert. Zur Darstellung der Informationseinheiten im Kombidisplay wird ein 12,3 Zoll TFT-Display eingesetzt (Abbildung 4-6).



Abbildung 4-6: Dynamischer Lkw Fahrsimulator (links) und Anzeigedarstellung im Kombidisplay (rechts)

Die implementierte Strecke besteht aus zwei baulich getrennten Richtungsfahrbahnen mit jeweils zwei Fahrstreifen. Sie bildet eine Hauptverkehrsachse in einer mittleren bis großen Stadt ab. Die Höchstgeschwindigkeit innerorts beträgt 60 km/h. Um bei möglichst hoher Vergleichbarkeit die Wiedererkennbarkeit der Situationen zu minimieren, werden Landschaftsgestaltung und Reihenfolge der Situationen zwischen den Fahrten variiert.

Aufgrund der Erkenntnisse aus Feldstudie und Fokusgruppe werden bewusst Situationen ausgewählt, in denen die automatisierte Längsführung entgegen der Intuition des Fahrers regelt. So werden Situationen mit Annäherung an eine Lichtsignalanlage mit Phasenübergang modelliert (von Grün auf Rot und umgekehrt). Zusätzlich wird die vorausschauende Regelung auf Tempolimits und Kuppe-Senke Situationen umgesetzt. Gemäß des iterativen Entwicklungsansatzes (Abschnitt 3.3) werden ausschließlich Situationen mit situationsgerechtem Verhalten des FAS untersucht. Die Betrachtung von nicht situationsgerechtem Automationsverhalten folgt in Kapitel 6.

An der Stichprobe nehmen 32 Probanden (31 männlich, 1 weiblich) zwischen 21 und 66 Jahren ( $M = 40,4$ ;  $SD = 11,0$ ) teil. Der Führerscheinbesitz (Klasse C bzw. CE) variiert zwischen einem und 48 Jahren ( $M = 17,3$ ;  $SD = 10,3$ ). Während 93,8 % der Probanden einen Tempomaten in ihrem meistgenutzten Lkw haben, trifft das für den abstandsgeregelten Tempomaten nur auf 28,1 % zu. Das Einsatzgebiet der Lkw-Fahrer variiert zwischen Fernverkehr, Verteilerverkehr und sonstigem Einsatz wie Werksverkehr und Fahrschule.

### 4.4.3 Ergebnisse und Diskussion

Alle Ergebnisse werden auf einem Signifikanzniveau von  $\alpha = .05$  berichtet [Bor10, S. 101]. Um bei mehreren paarweisen Vergleichen die Kumulation des  $\alpha$ -Fehlers zu vermeiden, wird das Signifikanzniveau mittels Bonferroni-Korrektur angepasst, indem es durch die Anzahl der Vergleiche geteilt wird [Bor10, S. 232; Cla99, S. 243].

Aufgrund einer Korrelationsanalyse können die abhängigen Variablen für die weitere Analyse auf „Nachvollziehbarkeit“ und „Vertrauen“ reduziert werden (Anhang C.2). Die Bewertungen der Probanden mittels einer 5-stufigen Likert-Skala bezogen auf die Anzahl der Informationseinheiten sind in Abbildung 4-7 dargestellt. Die Darstellungen weisen einen niedrigeren Median für eine Informationseinheit auf, während der Median für drei und fünf Informationen für Nachvollziehbarkeit und Vertrauen gleich ist.

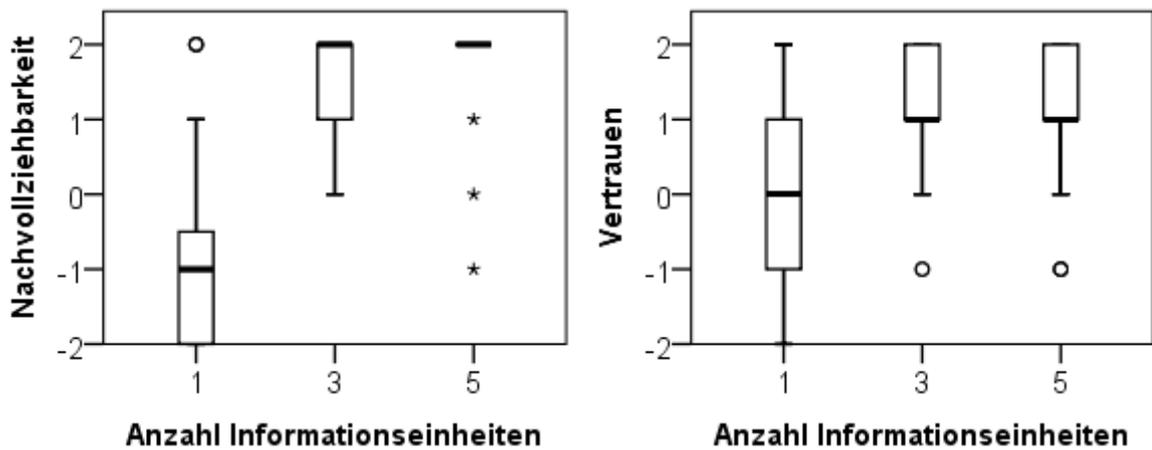


Abbildung 4-7: Bewertungen von Nachvollziehbarkeit (links) und Vertrauen (rechts) für den späten Informationszeitpunkt im Vergleich zwischen einer, drei und fünf Informationseinheiten (N=32)

Der Globalvergleich mittels Friedman-ANOVA zeigt, dass sowohl die Nachvollziehbarkeit ( $\chi^2(2) = 48.4, p < .001$ ), als auch das Vertrauen ( $\chi^2(2) = 17.8, p < .001$ ) signifikant von der Anzahl präsentierter Informationseinheiten beeinflusst werden.

Paarweise Vergleiche werden mittels Wilcoxon-Tests berechnet. Hierfür ist eine Bonferroni-Korrektur nötig [Bor10, S. 232]. Folglich werden alle Effekte auf Basis des Signifikanzniveaus von  $\alpha = .025$  berichtet. Sowohl Nachvollziehbarkeit ( $z = -4.81, p < .001, r = -.85$ ) als auch Vertrauen ( $z = -3.55, p < .001, r = -.63$ ) sind bei der Darstellung von drei Informationseinheiten signifikant höherer als bei einer Informationseinheit.

Für den Vergleich zwischen drei und fünf Informationseinheiten kann kein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden. Daraus kann abgeleitet werden, dass die drei präsentierten Informationseinheiten Status, Regelgrund und Entfernung aus Fahrersicht für Nachvollziehbarkeit und Vertrauen essentiell nötig sind. Weitere Informationseinheiten wie das zukünftige Fahrzeugverhalten oder die potentielle Kraftstoffersparnis können die Nachvollziehbarkeit oder das Vertrauen nicht weiter erhöhen. Somit können die, auf Basis der Fokusgruppen-Studie aufgestellten, Hypothesen H-1 und H-2 bestätigt werden.

Aufgrund dieser Ergebnisse wird für die Variante mit drei Informationseinheiten der frühe (5,5 s vor Geschwindigkeitsänderung durch FAS) mit dem späten Informationszeitpunkt (mit der Geschwindigkeitsänderung) verglichen (Abbildung 4-8). Für die Nachvollziehbarkeit liegt der Median für beide Informationszeitpunkte auf dem Wert +2 und damit auf der höchsten Stufe der Likert-Skala. Für das Vertrauen liegt er ebenfalls für beide Zeitpunkte hoch auf dem Wert +1.

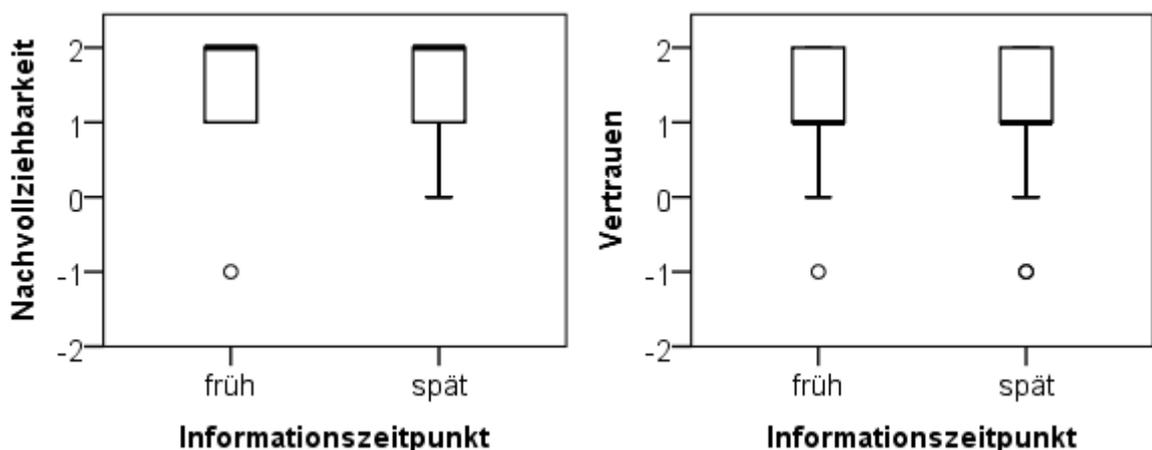


Abbildung 4-8: Bewertungen von Nachvollziehbarkeit (links) und Vertrauen (rechts) für drei Informationseinheiten im Vergleich zwischen frühem und spätem Informationszeitpunkt (N=32)

Der Wilcoxon-Test für abhängige Stichproben zeigt keinen signifikanten Unterschied zwischen dem frühen und späten Informationszeitpunkt für Nachvollziehbarkeit und Vertrauen. Somit muss Hypothese H-3 verworfen werden.

Folglich zeigt sich ein Unterschied zwischen den theoretischen Annahmen der Berufskraftfahrer in der Fokusgruppe und den Bewertungen der Fahrer nach dem Erleben des FAS im Simulator. Dies kann darin begründet sein, dass die Geschwindigkeitsänderungen des kraftstoffeffizienten FAS meist mit sehr geringen negativen Beschleunigungen geschehen. Zudem ist der Zeitpunkt der Geschwindigkeitsänderung aufgrund der hohen Masse von 40 t relativ früh. Deshalb könnte aufgrund des Erlebens der späte Informationszeitpunkt, mit der Anzeige der Informationseinheiten zum Einsetzen des Manövers, ausreichen. Der Unterschied zwischen den theoretischen Annahmen der Fahrer und Ihrer Bewertungen nach Systemerleben zeigt den Nutzen dieser Studie [Nie93, S. 11].

Um zu verifizieren, ob etwaige Informationseinheiten im Studiendesign nicht berücksichtigt wurden, aber trotzdem für die Lkw-Fahrer essentiell sind, wird eine offene Befragung nach allen Fahrten durchgeführt. Die Ergebnisse der 32 Probanden zeigen, dass keine weiteren Informationseinheiten von der Mehrheit der Befragten genannt werden.

Abschließend werden die Probanden mittels strukturiertem Interview bezüglich Modalität und Darstellungsform befragt. So bevorzugen die Probanden mehrheitlich die visuelle Modalität, wie in [Hof17] erläutert. Als Ausgabeort nennen 54 % der Lkw-Fahrer das Kombi-display, 39,4 % ein HUD und 6,1 % ein Sekundärdisplay. Hierbei ist anzumerken, dass das Erleben einer Variante im Fahrsimulator die abschließende Befragung beeinflussen könnte.

Weitere Störfaktoren könnten die gewählte textuelle Darstellung der Informationseinheiten oder der Informationssound sein. Eine weitere Limitation ist das Design der Fahrsituationen mit wenig Umgebungsverkehr. Diese Aspekte werden in der nachfolgenden Fahrsimulatorstudie zur formativen Konzeptevaluation berücksichtigt werden.

### **4.5 Zusammenfassung der Anforderungen**

Mittels der eingesetzten Methoden werden die Informationseinheiten Regelgrund, Entfernung und Status des FAS als essentiell nötig ermittelt.

Zudem zeigt die Aufgabenanalyse (Kap. 4.3.2), dass die Lkw-Fahrer für die Entscheidung über einen Eingriff die erwartete Geschwindigkeit mit der Ist-Geschwindigkeit des FAS vergleichen. Somit sollte die Kommunikation des Haupt-Regelgrundes ausreichen, sodass die Fahrer die Situation in Phase 1 und 2 (Situationsanalyse, 4.3.3) antizipieren können und ihre erwartete Geschwindigkeit entsprechend anpassen. Auf eine detaillierte Kommunikation aller, die Wahl der Geschwindigkeitstrajektorie beeinflussenden, Faktoren (z. B. Straßenbreite, -zustand oder Beladung) muss aufgrund der Gestaltungsrichtlinie „auf das Wesentliche reduziertes Design“ (Kap. 2.1.3) verzichtet werden. Folglich soll mit dem visualisierten (Haupt-)Regelgrund für die Fahrer eine Plausibilisierung der Geschwindigkeitswahl des FAS möglich sein. Ein Abgleich mit der Realität sollte anschließend in Phase 3 erfolgen.

Als Darstellungsform wird die rein visuelle Modalität von den Probanden bevorzugt. Sie sollte unaufdringlich und mittels bekannter Symbole erfolgen. Der Informationszeitpunkt zum Einsetzen der Regelung ist ausreichend.

Im nächsten Kapitel erfolgt die HMI-Konzeptentwicklung auf Basis der identifizierten Informationseinheiten. Inwieweit diese in vielfältigen Situationen ausreichen, die Situation zu antizipieren ist Gegenstand nachfolgender Evaluationen.

## 5 HMI-Konzeptentwicklung und -evaluation

Dieser Kapitel widmet sich der ersten Forschungsfrage zur systemtransparenten Gestaltung der HMI-Ebene, um eine hohe Wirksamkeit und Fahrerakzeptanz zu erreichen (Kap. 3.2.3).

Die HMI-Konzeptentwicklung basiert auf den Erkenntnissen der Anforderungsanalyse (Kap. 4) sowie auf relevanten Leitlinien und Normen zur Schnittstellengestaltung (Kap. 2.1.3). Nach der Darstellung der eingesetzten Mikromethodik (Kap. 5.1) werden die Ergebnisse der analytischen (Kap. 5.2) sowie der nutzerzentrierten (Kap. 5.3) Evaluationen aufgezeigt.

### 5.1 Mikromethodik der HMI-Konzeptentwicklung und -evaluation

Zur Konzeptentwicklung wird ein Szenario-basierter Ansatz eingesetzt. Grundsätzlich können Szenarien folgende Informationen beinhalten: „(...) actors, background information about them, and assumptions about their environment, their goals or objectives, and sequences of actions and events“ [Go04, S. 118].

Der Szenario-basierte Ansatz erlaubt es, bereits in einer frühen Konzeptphase einen Eindruck des HMIs im zukünftigen Nutzungskontext zu bekommen [Sta13, S. 505ff]. So können mögliche Probleme schnell und einfach identifiziert und das Konzept optimiert werden [Sta13, S. 505ff]. Mögliche Nachteile können unpräzise und unvollständige Szenarien sowie eine fragliche Reliabilität sein, falls relevante Szenarien nicht betrachtet werden [Sta13, S. 507]. Das Vorgehen zur Auswahl der hier eingesetzten Szenarien ist in Anhang C erläutert.

Für die HMI-Konzeptentwicklung werden verschiedene Mikromethoden angewandt. Die HMI-Konzepte werden iterativ erarbeitet, d. h. die kontinuierlich weiterentwickelten (evolutionären [Bud12, S. 39]) Prototypen werden verschiedenen Evaluationsmethoden unterzogen (Abbildung 5-1).

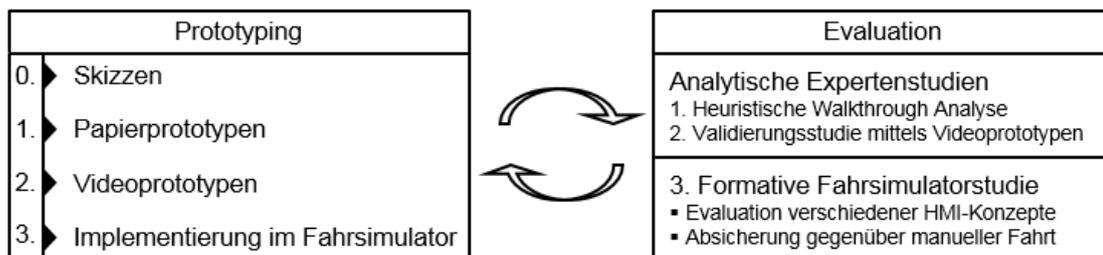


Abbildung 5-1: Übersicht der Mikromethodik zur HMI-Konzeptentwicklung und -evaluation

Prototypen lassen sich nach [Bea09, S. 122] definieren als "a concrete representation of a part or all of an interactive system. A prototype is a tangible artifact, not an abstract description that requires interpretation. Designers, as well as managers, developers, customers and end users, can use these artifacts to envision and reflect upon the final system."

Erste Konzeptentwürfe („Skizzen“ vgl. [Bux07, S. 111ff]) werden zu Papierprototypen weiterentwickelt. Während die Skizzen lediglich Ideen andeuten [But14, S. 124], legen Papierprototypen die HMI-Konzepte fest [Mos12, S. 166]. Diese lassen sich jedoch – weil aus Papier hergestellt – schnell und einfach anpassen. Die Papierprototypen werden für die erste analytische Expertenstudie, die heuristische Walkthrough Analyse, eingesetzt. Diese ist in Abschnitt 5.1.1 erläutert.

Die erzielten Erkenntnisse werden in die nachfolgenden Videoprototypen eingearbeitet, die in der zweiten analytischen Expertenstudie evaluiert werden (Kap. 5.1.1).

Auf Basis dieser Ergebnisse werden die HMI-Konzepte weiterentwickelt und als implementierte Prototypen für den Fahrsimulator optimiert (Kap. 5.1.2).

Folglich werden für die iterativ entwickelten Prototypen unterschiedliche Methoden der formativen Evaluation eingesetzt, um verschiedene Arten von Usability Problemen zu finden [Nie93, S. 226]. Die fortschreitende Reife des FAS sowie des zugehörigen HMI erlaubt den Einsatz von weiteren Methoden, welche die Interaktion im späteren Nutzungskontext simulieren können und den Probanden Systemerfahrung ermöglichen. Nachfolgend wird die eingesetzte Evaluationsmethodik der analytischen Expertenstudien sowie der formativen Fahrsimulatorstudie mit Lkw-Fahrern aufgezeigt.

### 5.1.1 Methodik der analytischen Expertenstudien

Zunächst wird auf analytische Expertenevaluationen zurückgegriffen. Diese sind ohne fertig implementierten Prototyp schnell und kostengünstig einsetzbar [But14, S. 132; Dix04, S. 319]. Zudem wird der mögliche Lösungsraum an HMI-Konzeptentwürfen eingeschränkt [Wic04, S. 58]. Weiterhin können Nutzer als „seltenes Gut“ für nachgelagerte Fragestellungen aufgespart werden [Dix04, S. 320; Nie93, S. 107].

#### 5.1.1.1 Heuristische Walkthrough Analyse

Im ersten Evaluationsschritt sollen mögliche Probleme im Anordnungsschema der Informationseinheiten im Gesamtkonzept identifiziert werden. Hinsichtlich der Darstellungsform sollen verschiedene Visualisierungsvarianten der einzelnen Informationseinheiten bewertet werden. Hierfür wird die Methode der heuristischen Walkthrough Analyse [Sta13, S. 486ff] auf Basis der Papierprototypen gewählt. Diese Methode stellt eine Kombination aus der „Cognitive Walkthrough“-Analyse sowie der heuristischen Evaluation dar [Mah10, S. 744].

Bei der heuristischen Evaluation bewertet eine kleine Gruppe von Evaluatoren die Benutzerschnittstelle auf Basis definierter Usability Prinzipien (den „Heuristiken“) [Nie93, S. 155]. Die schnelle und ressourcensparende Anwendbarkeit steht einer subjektiven und wenig strukturierten Art gegenüber: „both intra- and inter-analyst reliability for the technique [heuristic evaluation] are questionable, due to its unstructured nature“ [Sta13, S. 428ff].

Dagegen liegen der „Cognitive Walkthrough“ Methode kognitive Modelle (z. B. [Nor86; Pol90]) zu Grunde, auf deren Basis die Interaktion eines fiktiven Nutzers schrittweise analysiert und mögliche Probleme dokumentiert werden [But14, S. 133; Mah10, S. 742]. Dies führt zu einer detailreichen Analyse und zu hoher Komplexität [Mah10, S. 743f].

Die gewählte heuristische Walkthrough Analyse bietet mehr Struktur (und kann so mitunter die Reliabilität erhöhen) als eine heuristische Evaluation, bei geringerer Komplexität im Vergleich zur „Cognitive Walkthrough“-Analyse [Sea97, S. 213]. Sie wird wie folgt angewandt:

Die Evaluatoren werden angewiesen, ihre Gedankengänge auszusprechen („Think Aloud“ [Nie93, S. 195f]). Gleichzeitig macht ein neben dem Versuchsleiter anwesender Protokollant Notizen zu den genannten positiven und negativen Aspekten („Plus-Minus-Methode“ [Bek11, S. 15f]). Nach [Nie93, S. 156] sind für heuristische Evaluationen drei bis fünf Evaluatoren empfehlenswert. Für diese Studie wird ein multidisziplinäres Evaluationsteam aus Human Factors Entwicklern, Designern und Funktionsentwicklern gewählt, weshalb die Anzahl der Evaluatoren auf sieben erweitert wird.

Die Analyse wird auf Basis ausgewählter Szenarien aus der Fahrsimulatorstudie zur Anforderungsdefinition (Kap. 4.4) durchgeführt.

Die Erkenntnisse der heuristischen Walkthrough Analyse fasst Abschnitt 5.2.1 zusammen.

### **5.1.1.2 Validierungsstudie mittels Videoprototypen**

Die weiterentwickelten Konzeptentwürfe werden in einem nächsten Iterationsschritt als Videoprototypen umgesetzt. Diese haben den Vorteil, dass sich die zeitliche Dimension darstellen lässt [But14, S. 128].

Zielsetzung des zweiten Evaluationsschrittes ist die Analyse der HMI-Konzepte hinsichtlich konzeptioneller Schwachstellen im realen Nutzungskontext. Mittels Videoprototypen lassen sich die entwickelten HMI-Konzepte in reale Verkehrssituationen im zeitlichen Verlauf auf ihre Anwendbarkeit und intuitive Verständlichkeit prüfen.

Um den zukünftigen Nutzungskontext abzubilden, werden Videos aus Fahrerperspektive herangezogen. Diese bilden Fahrten auf Autobahn, Bundesstraße und stadtnahen Arterien auf reinen Kraftfahrzeugstraßen sowie mit Mischverkehr ab (Anhang D). Die auf Basis der heuristischen Walkthrough Analyse weiterentwickelten Prototypen werden digitalisiert und situationsspezifisch animiert.

Die Validierung findet durch Experten aus den Bereichen Human Factors und Funktionsentwicklung statt. Die Erkenntnisse der Validierungsstudie mittels Videoprototypen fasst Abschnitt 5.2.2 zusammen.

### **5.1.2 Methodik der formativen Fahrsimulatorstudie**

Die weiterentwickelten HMI-Konzepte werden schließlich in implementierte Prototypen überführt, die in Realfahrzeug und Fahrsimulation einsetzbar sind. Diese werden einem weiteren Evaluationsschritt unterzogen.

Nachteil der durchgeführten analytischen Expertenstudien ist, dass gefundene Probleme möglicherweise nicht die späterer Nutzer sind, „(...) sondern Artefakte der verwendeten Evaluationsmethode“ [But14, S. 132]. Aus Gründen der Validität sind folglich Probandenversuche mit späteren Nutzern anzustreben [Bre15, S. 185].

Deshalb werden die beschriebenen Expertenstudien ergänzt durch eine kostenintensivere Nutzerstudie mit Lkw-Fahrern. Um ausgewählte Situationen gezielt und reproduzierbar herbeiführen zu können, wird die Fahrsimulation gewählt [Bre15, S. 187f; Win12, S. 47f]. Zudem müssen Daten- und Funktionsebene (Kap. 3.2.1) der kraftstoffeffizienten, automatisierten Längsführung noch nicht fertig implementiert vorliegen, sondern können im Fahrsimulator prototypisch umgesetzt werden.

Allerdings kann die Übertragbarkeit der Erkenntnisse eingeschränkt sein [Bre15, S. 187f]. Zur Validität von Fahrsimulatorstudien liegen nach [Win12, S. 48] bisher unzureichende Erkenntnisse vor. Auch gibt es nach [Bla96, S. 52] nicht ausreichende Belege dafür, dass dynamische Fahrsimulatoren allgemein bessere Erkenntnisse liefern als statische Fahrsimulatoren, sondern dies abhängig vom Untersuchungsziel ist. Jedoch ist bekannt, dass die Meinung der Nutzer durch die „simulator fidelity“ beeinflusst werden kann [Win12, S. 48]. Um die automatisierte Längsführung für die Probanden haptisch erlebbar zu machen und zur Reduktion potentieller Störgrößen, wird ein dynamischer Fahrsimulator genutzt.

Nach den Ergebnissen der analytischen Expertenstudien (Kap. 5.2) werden die Erkenntnisse der formativen Fahrsimulatorstudie (Kap. 5.3) skizziert.

## 5.2 Ergebnisse der analytischen Expertenstudien

Nachfolgend werden die Ergebnisse der heuristischen Walkthrough Analyse (Kap. 5.2.1) sowie der Validierungsstudie mittels Videoprototypen (Kap. 5.2.2) zusammengefasst.

### 5.2.1 Heuristische Walkthrough Analyse

Um das zukünftige Fahrzeugverhalten transparent darzustellen, werden die in 4.4 ermittelten Informationseinheiten um die, vom FAS eingeregelter, Zielgeschwindigkeit ergänzt. Neben der Überbrückung eines möglichen „Gulf of Evaluation“ (Kap. 2.1.1.2) könnte diese Informationseinheit zur Individualisierung und Steuerbarkeit (Kap. 2.1.3) der neuen Zielgeschwindigkeit durch den Fahrer dienen.

Als Ergebnis hinsichtlich der Anordnung der Informationseinheiten können auf Basis der Bewertungen des multidisziplinären Expertenteams zwei Varianten unter Beachtung der Integrierbarkeit zukünftiger FAS festgehalten werden (Abbildung 5-2).

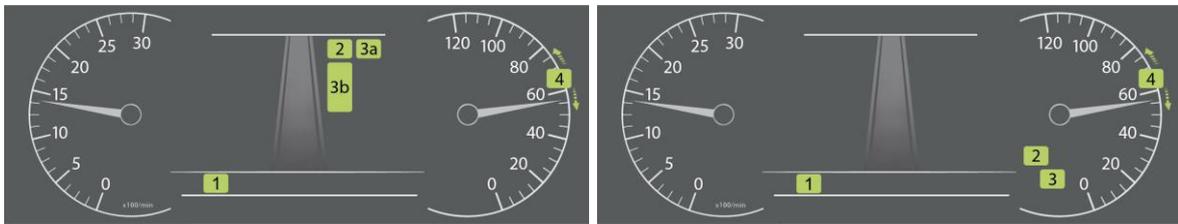


Abbildung 5-2: Links: erste Anordnungsvariante integrativ zum ACC Bereich; Rechts: zweite Anordnungsvariante in räumlicher Nähe der Ist-Geschwindigkeit; (1= Status; 2= Regelgrund; 3= Entfernung; 4= Zielgeschwindigkeit)

Die erste Anordnungsvariante (Abbildung 5-2, links) stellt die Informationseinheiten Regelgrund und Entfernung im zentralen Bereich des Kombidisplays neben den ACC Informationen dar („FAS-Bereich des Kombidisplays“). Diese Variante hat den Vorteil der logischen Erweiterung des ACC und somit der integrativen Darstellung in bestehende Konzepte. Die neue Zielgeschwindigkeit wird im Bereich des Rundinstruments der Ist-Geschwindigkeit integriert. So lassen sich Ist- und Zielgeschwindigkeit durch den Fahrer schnell abgleichen, was nach der Aufgabenanalyse der Überwachungstätigkeit (Kap. 4.3.2) vom Fahrer kontinuierlich durchgeführt werden sollte.

Die zweite Anordnungsvariante (Abbildung 5-2, rechts) visualisiert die drei Informationseinheiten (Regelgrund, Entfernung, Zielgeschwindigkeit) in räumlicher Nähe innerhalb des Rundinstruments der Geschwindigkeitsanzeige. Vorteil ist hierbei, dass längere Blickübergänge innerhalb des Kombidisplays zur Erfassung der einzelnen Informationseinheiten zur Bildung der erwarteten Geschwindigkeit (Kap. 4.3.2) vermieden werden.

Der Einsatz eines Head-Up-Display (HUD) wird von den Evaluatoren aufgrund der vorausschauenden Regelung als nicht zwingend notwendig betrachtet.

Für die Ergebnisdarstellung zur Visualisierung der Informationseinheiten wird auf [Hof16] verwiesen.

## 5.2.2 Validierungsstudie mittels Videoprototypen

Folgende Kernergebnisse der expertenbasierten Validierung mittels Videoprototypen fließen in die nächste Iterationsschleife:

- Speziell im Lkw sollte das Vorderfahrzeug, wie beim ACC, als kurzfristiger Regelgrund zusätzlich zum langfristig, vorausschauenden Regelgrund angezeigt werden. Dies verhindert einen häufigen, schnellen Wechsel bei der Anzeige von nur einem Regelobjekt, vor allem im urbanen Raum.
- Aufgrund der notwendigen Darstellung des Vorderfahrzeugs wird die integrative Darstellung im FAS-Bereich (Abbildung 5-2, links) für die iterative Weiterentwicklung ausgewählt.
- Die alleinige Anzeige des regelungsrelevanten Objektes sollte bei statischen Infrastrukturelementen ausreichen. Vor dem Regelobjekt befindliche, nicht regelungsrelevante, statische Infrastrukturelemente (z. B. Ortseinfahrt unmittelbar vor Tempolimit 30) werden nicht als essentiell notwendig angesehen. Hier kann das Prinzip des Minimalismus (Kap. 2.1.3) angewendet werden.
- Mehrere dynamische Infrastrukturelemente, die sich dicht hintereinander befinden, werden als Problemfeld hinsichtlich Fahrerverständnis identifiziert. Im Gegensatz zu statischen Infrastrukturelementen ist die Anzeige einer grünen Lichtsignalanlage, die sich unmittelbar vor einer nicht einsehbaren roten Lichtsignalanlage befindet, essentiell notwendig für das Systemverständnis.

## 5.3 Ergebnisse der formativen Fahrsimulatorstudie

„Sometimes displaying the same information in a different way results in a different human response“ [She02, S. 102].

Um diese Auswirkungen und Reaktionen des Fahrers in Abhängigkeit unterschiedlicher, visueller Darstellungen der HMI-Konzepte auf der Fahrt mit der automatisierten, kraftstoffeffizienten Längsführung zu untersuchen, wird eine formative Fahrsimulatorstudie durchgeführt. Diese basiert auf den Erkenntnissen der vorangegangenen analytischen Expertenstudien (Kap. 5.2). Die HMI-Konzepte aus den Videoprototypen werden weiterentwickelt und für den Fahrsimulator implementiert.

### 5.3.1 Ableitung der Fragestellungen

Die Fahrsimulatorstudie mit Lkw-Fahrern soll nutzerzentrierte Erkenntnisse zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage (Kap. 3.2.3) liefern: „Wie kann die HMI-Ebene gestaltet werden, sodass Wirksamkeit und Fahrerakzeptanz hoch sind?“.

Nach dem Phasenmodell aus der Situationsanalyse (Kap. 4.3.3) werden im Rahmen dieser Studie die Phasen 1 und 2 betrachtet (Abbildung 5-3). Hier kann mangelndes Vertrauen die Wirksamkeit aufgrund unerwünschter Systemeingriffe reduzieren.

Der Fokus der Studie liegt auf dem situationsgerechten Verhalten der automatisierten Längsführung. Die Auswirkungen von nicht situationsgerechtem Verhalten auf die Sicherheit sowie die Fahrerakzeptanz werden in Kapitel 6 betrachtet.

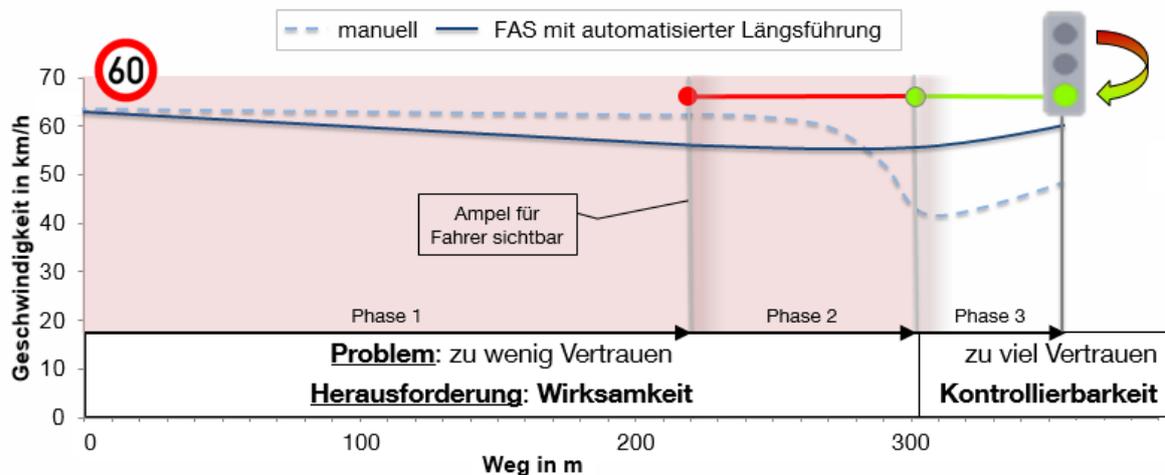


Abbildung 5-3: Fokus der formativen Fahrsimulatorstudie liegt auf Phase 1 und 2 (Situationsanalyse, 4.3.3)

Aus der ersten Forschungsfrage lassen sich folgende zwei Programmfragen [Bro15, S. 96] für die Studie ableiten:

- **P-1 Formativer Vergleich verschiedener Anzeigevarianten:**  
Gibt es Unterschiede in der Gesamtbewertung der HMI-Konzepte durch die Lkw-Fahrer?

Im Rahmen dieser Programmfrage (P-1) sollen mittels empirischer Studie offene Aspekte zur konzeptionellen Darstellungsform geklärt werden. Folglich soll eine Antwort auf die klassische Frage zur Anzeigengestaltung nach [Schm81, S. 352], dem „Wie?“, gegeben werden. Zur Ableitung der Hypothesen wird auf [Sto16, S. 18f] verwiesen.

- **P-2 Absicherung gegenüber manueller Fahrt:**  
Wie verhält sich die Fahrt mit automatisierter Längsführung im Vergleich zu einer manuellen Fahrt mit dem Appell zum kraftstoffeffizienten Fahren?

Diese Programmfrage (P-2) soll untersuchen, inwieweit die Automatisierungsziele zur Kraftstoffeffizienz erreicht und mögliche negative Automationseffekte (Kap. 2.2.3) vermieden werden können. Diese sind zudem als Grundforderung im European Statement of Principles [Eur06, S. 7] enthalten: Das FAS soll „(...) die Sicherheit im Straßenverkehr erhöhen oder zumindest nicht beeinträchtigen“.

Aus der zweiten Programmfrage (P-2) lassen sich folgende Hypothesen formulieren:

- **H-1 Wirksamkeit:**  
Die Fahrt mit der automatisierten Längsführung erzielt eine höhere Kraftstoffeffizienz im Vergleich zur manuellen Fahrt mit dem Appell zum kraftstoffeffizienten Fahren.
- **H-2 Fahrerbeanspruchung:**  
Die Fahrt mit der automatisierten Längsführung hat keinen negativen Effekt auf die Fahrerbeanspruchung im Vergleich zur manuellen Fahrt mit dem Appell zum kraftstoffeffizienten Fahren.

Die Hypothese H-2 soll mögliche negative Automationseffekte (Kap. 2.2.3) prüfen. Weil der Fahrer zwar Teile der Fahraufgabe abgibt, jedoch aufgrund der manuellen Querführung als aktiver Regler (Kap. 3.1.1) im Regelkreis (Kap. 2.1.1) enthalten bleibt, wird die Hypothese H-2 gerichtet formuliert.

Weiterhin ist nach dem Automations-Akzeptanzmodell nach [Gha12, S. 45] (Kap. 2.2.3.5) die Kompatibilität ein Einflussfaktor auf das Vertrauen und die Akzeptanz von automatisierten Systemen. Weil die Differenz zwischen manuellem Fahrstil und automatisierter Längsführung eine Störgröße darstellen könnte, werden diese mittels subjektiver Bewertung erfasst.

Daraus lassen sich folgende explorative Untersuchungsaspekte ableiten:

- Explorativer Vergleich der subjektiven Bewertung des Fahrstils zwischen manueller Fahrt und automatisierter Längsführung
- Explorative Untersuchung der Akzeptanz im Vergleich zu anderen kraftstoffeffizienten FAS
- Explorative Untersuchung des Vertrauens vor der Fahrt mit automatisierter Längsführung im Vergleich zur Bewertung unmittelbar nach der Fahrt

### 5.3.2 Auswahl der Messgrößen

Prinzipiell stehen verschiedene Arten von Messgrößen zur Verfügung [Kön15, S. 630f]: Daten aus der Beobachtung des Fahrzeugverhaltens wie längs- und querdynamische Größen sowie der Beobachtung des Fahrers, wie beispielsweise dessen Blickverhalten. Zudem können über die Befragung Meinungen und Einstellungen oder subjektive Bewertungen ermittelt werden. Eine weitere Möglichkeit stellen physiologische Daten dar. Es wird zwischen objektiv und subjektiv erfassbaren Daten differenziert [Bub15d, S. 621ff].

Für diese Evaluation werden die Messgrößen ausgehend von den Parametern der Gebrauchstauglichkeits-Definition (Effektivität, Effizienz, Zufriedenheit; 2.1.3) ausgewählt. Einen ähnlichen Ansatz zur Herleitung der Messgrößen verfolgt [Ham02, S. 51]. Die Auswahl der Messgrößen dieser Evaluation ist in [Sto16, S. 18f] aufgezeigt. Bei subjektiven Daten, die über Befragung erfasst werden, wird auf standardisierte Fragebögen zurückgegriffen, die sich für konzeptvergleichende Tests eignen [Bub15d, S. 620]. Zudem wird Triangulation innerhalb einer Methode [Fli11, S. 15] angewandt, indem verschiedene, auf einen Sachverhalt abzielende, Inhalte abgeprüft werden.

Die Effektivität ist definiert als „(...) Genauigkeit und Vollständigkeit, mit der Benutzer ein bestimmtes Ziel erreichen“ [DIN11, S. 5]. Weil in dieser Evaluation die Phase eins und zwei des Phasenmodells der Situationsanalyse (Kap. 4.3.3) untersucht wird, lässt sich dies über die Anzahl unerwünschter Nutzereingriffe bei situationsgerechtem Automationsverhalten erfassen. Ausschließlich für die zweite Programmfrage (P-2, 5.3.1) wird zur Untersuchung der Hypothese H-1 (Vergleich mit manueller Fahrt) der Kraftstoffverbrauch aufgezeichnet.

Die Effizienz ist definiert als „(...) Verhältnis zur Genauigkeit und Vollständigkeit eingesetzte[m] Aufwand, mit dem Benutzer ein bestimmtes Ziel erreichen“ [DIN11, S. 6] und kann über die Fahrerbeanspruchung ausgedrückt werden. Diese wird subjektiv mittels standardisiertem Fragebogen (NASA-RTLX [Har06, S. 906]) erfasst. Ergänzend wird als objektive Größe die Spurhaltegröße über die Standardabweichung der lateralen Position [Kna09, S. 6f] ermittelt.

Die Zufriedenheit als „(...) positive Einstellung gegenüber der Nutzung“ [DIN11, S. 7] wird mittels standardisierter Fragebögen zur Akzeptanzbewertung [Van97] erfasst. Zudem wird das Vertrauen eindimensional vor und nach der Fahrt mit dem FAS auf einer Skala von 0 bis 20 ermittelt.

Weil die Funktions-Ebene des FAS (Kap. 3.2.1) die Akzeptanz und das Vertrauen des Fahrers beeinflussen könnte, wird der persönliche Fahrstil und der Fahrstil der automatisierten Längsführung aus [Ste99] nach [Arn11, S. 97ff] subjektiv erfasst.

Der vollständige Fragebogen befindet sich in [Hof16, S. Anhang B].

### 5.3.3 Apparatus und Stichprobe

Die Studie wird am dynamischen Fahrsimulator des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der TUM durchgeführt. Dieser ist in Abschnitt 4.4.2 beschrieben. Die kraftstoffeffiziente, automatisierte Längsführung ist in die Fahrsimulatorsoftware Silab [WIV14] integriert und kann über das Multifunktionslenkrad aus dem Stillstand aktiviert werden. Der Fahrer kann das FAS über die Betätigung von Gas- oder Bremspedal übersteuern. Das FAS wird daraufhin deaktiviert und kann über das Multifunktionslenkrad während der Fahrt wieder aktiviert werden.

Die implementierten HMI-Prototypen decken den gesamten Funktionsumfang ab. Um den Fokus der Probanden auf die konzeptionellen Darstellungsformen zu lenken, ist die Detailgenauigkeit und das „Look and Feel“ der gesamten Anzeigen einfach und abstrakt gehalten.

Die programmierten Strecken haben zwei Fahrstreifen je Richtungsfahrbahn und bilden den urbanen Raum ab. Die Szenarien entstammen dem Szenarienkatalog (Anhang C.1) und enthalten die Regelung auf statische und dynamische Infrastrukturelemente sowie auf Vorderfahrzeuge (Anhang D).

An der Studie nehmen 36 Probanden (33 männlich, 3 weiblich) zwischen 23 und 73 Jahren ( $M = 43,1$ ;  $SD = 12,8$ ) teil. Teilnahmevoraussetzung ist ein Führerschein der Klasse C oder CE. Diesen besitzen die Probanden zwischen zwei und 47 Jahren ( $M = 19,0$ ;  $SD = 10,7$ ).

Während alle Probanden bereits im Pkw oder Lkw einen Tempomaten benutzt haben, trifft dies für den abstandsgeregelten Tempomaten nur auf 16 Probanden (44,4 %) zu.

### 5.3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse des formativen Vergleichs der Anzeigekonzepte (P-1), der Absicherung gegenüber manueller Fahrt (P-2) sowie der explorativen Untersuchungen werden nachfolgend zusammengefasst und diskutiert.

Alle Ergebnisse werden auf einem Signifikanzniveau von  $\alpha = .05$  berichtet [Bor10, S. 101].

#### 5.3.4.1 Ergebnisse zum Anzeigekonzeptvergleich (P-1)

Von allen Kombidisplay-Konzepten wird die Anzeige mit textueller Entfernungsdarstellung nach der persönlichen Präferenz der Probanden am besten bewertet (Abbildung 5-4) [Sto16, S. 19].

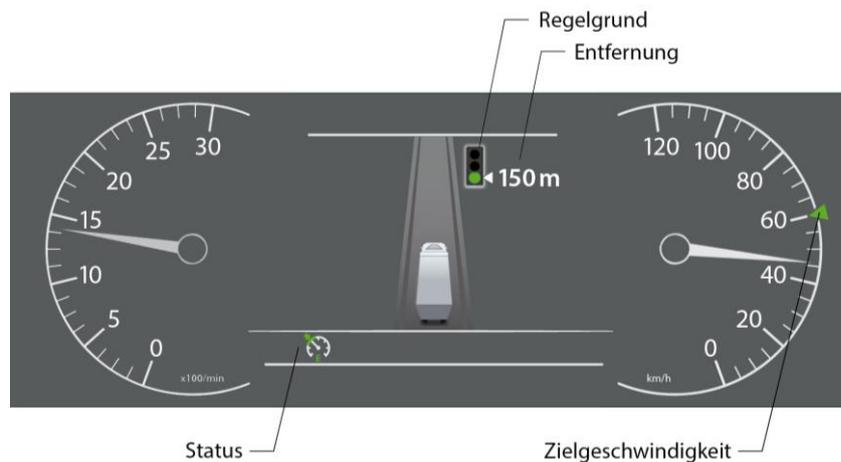


Abbildung 5-4: Anzeigekonzept im Kombidisplay mit den Informationseinheiten zu Regelgrund, textueller Entfernungsdarstellung, Zielgeschwindigkeit und Status (HMI A) [Sto16, S. 18]

Folglich werden die Untersuchungen zur zweiten Programmfrage auf Basis dieses Konzeptes dargestellt. Es wird nachfolgend als HMI A bezeichnet.

### 5.3.4.2 Absicherung gegenüber der manuellen Fahrt (P-2)

Für die Untersuchung wird ein Innersubjekt-Design verwendet. Jeder Proband fährt nach der Eingewöhnungsfahrt zunächst eine manuelle Fahrt mit dem Appell zum kraftstoffeffizienten Fahren. Im Anschluss findet eine kurze Einweisung in das FAS statt, bevor die systemunterstützte Fahrt beginnt.

#### Wirksamkeit (H-1)

In Abbildung 5-5 ist der Mittelwert (MW) des Kraftstoffverbrauchs für die manuelle Fahrt mit Appell zum kraftstoffeffizienten Fahren ( $MW = 54.8 \text{ l}/100\text{km}$ ) im Vergleich zur automatisierten, kraftstoffeffizienter Längsführung ( $MW = 40.8 \text{ l}/100\text{km}$ ) dargestellt.

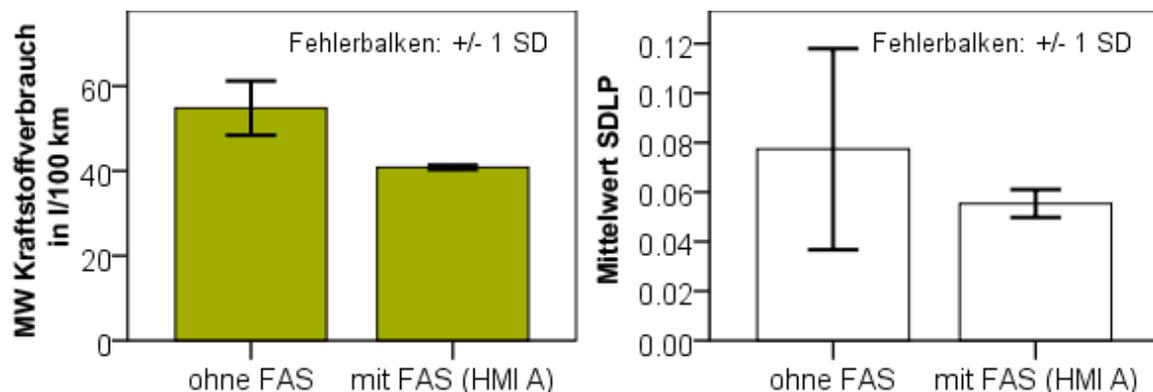


Abbildung 5-5: Vergleich zwischen manueller Fahrt und automatisierter Längsführung mit HMI-Konzept „A“ hinsichtlich Kraftstoffverbrauch (links) und der Standardabweichung der lateralen Position (SDLP; rechts)

Der aufgrund fehlender Normalverteilung eingesetzte, nicht-parametrische Wilcoxon-Test für abhängige Stichproben zeigt einen signifikanten Unterschied mit großem Effekt ( $z = -4.94, p < .001, r = -.87$ ). Der Kraftstoffverbrauch ist bei systemunterstützter Fahrt signifikant geringer als bei manueller Fahrt.

Jedoch sind die Werte zur Kraftstoffeinsparung (25,5 %) versuchsspezifisch und nicht verallgemeinerbar. Die Versuchsstrecke entspricht keinem repräsentativen Fahrzyklus. Situationen mit Effizienzpotential treten in der Versuchsstrecke häufiger als in Realität auf.

Dennoch lässt sich die prinzipielle Wirksamkeit des FAS nachweisen. Die in 5.3.1 formulierte gerichtete Hypothese (H-1) zur Wirksamkeit kann durch die Falsifizierung der zugrundeliegenden Nullhypothese angenommen werden [Ras10, S. 61ff].

Auf HMI-Ebene sollte die Anzahl der Fahrereingriffe in Phase 1 und 2 (Abbildung 5-3) vermieden werden. Über alle HMI-Konzepte wird in 4,1 % aller Fahrten eingegriffen [Sto16]. Für das hier betrachtete Konzept A liegen keine Eingriffe vor. Folglich kann gezeigt werden, dass ausreichendes Vertrauen gegeben ist, sodass keine Eingriffe aufgrund der Akzeptanzabwägung aus der Aufgabenanalyse (Kap. 4.3.2) zu verzeichnen sind. Allerdings haben die Probanden ausschließlich situationsgerechtes Automationsverhalten erfahren. Ob unerwünschte Eingriffe unmittelbar nach dem Erleben von nicht situationsgerechtem Verhalten auftreten, wird in der summativen Fahrsimulatorstudie (Kapitel 6) betrachtet.

### Fahrerbeanspruchung (H-2)

Nach [Kra98, S. 462] sollte bei der Einführung von Automatisierung die resultierende Arbeitsbelastung des Menschen im Gesamtsystem untersucht werden. Abbildung 5-6 zeigt die mittels NASA-RTLX [Har06, S. 906] subjektiv ermittelten Gesamtbeanspruchungswerte für die manuelle Fahrt mit Appell zum kraftstoffeffizienten Fahren ( $Mdn = 5.5$ ) im Vergleich zur Fahrt mit automatisierter Längsführung ( $Mdn = 4.8$ ). Zudem werden die einzelnen Dimensionen der Beanspruchung verglichen.

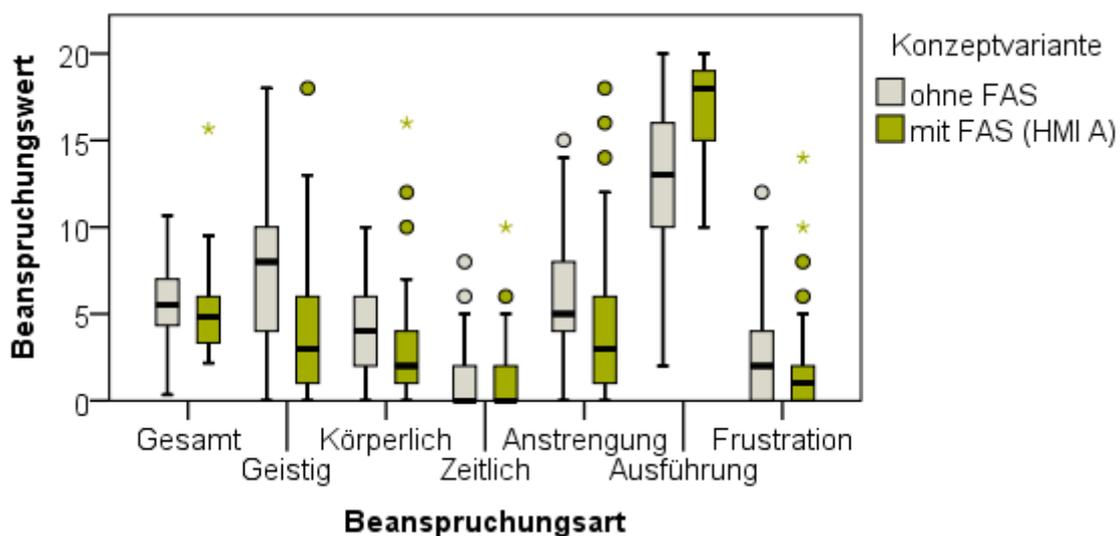


Abbildung 5-6: Vergleich der Beanspruchung in den Dimensionen des NASA-RTLX: Gesamtbeanspruchung, geistige-, körperliche- und zeitliche Anforderung, Anstrengung, Aufgabenausführung sowie Frustration

Der nicht-parametrische Wilcoxon Test zeigt keine signifikanten Unterschiede für die Gesamtbeanspruchung ( $z = -1.24, p = .22, r = -.25$ ). Das Gleiche gilt für die einzelnen Dimensionen der Beanspruchung. Folglich kann die Hypothese (H-2) zur Fahrerbeanspruchung für die subjektive Messgröße angenommen werden. Es lassen sich keine Anzeichen für eine Über- noch eine Unterbeanspruchung erkennen. Allerdings können aus diesen Erkenntnissen keine Langzeiteffekte abgeleitet werden.

Die Standardabweichung der lateralen Position (SDLP) lässt Rückschlüsse auf die Fahrerablenkung zu [Kna09, S. 7]. Zudem kann dieses Maß als leistungsbezogener Indikator zur Ermittlung der Fahrerbeanspruchung hinzugezogen werden [Sei13, S. 7]. Die SDLP gibt die Abweichung von der selbst gewählten „Ideallinie“ an. Die Gegenüberstellung findet sich in Abbildung 5-5 (rechts). Der aufgrund fehlender Normalverteilung eingesetzte Wilcoxon-

Test zeigt einen signifikanten Unterschied ( $z = -4.45, p < .001, r = -.79$ ). Die Spurhalte-güte ist bei systemunterstützter Fahrt ( $MW = .055$ ) signifikant höher als bei manueller Fahrt mit dem Appell zum kraftstoffeffizienten Fahren ( $MW = .077$ ).

Dies kann darin begründet sein, dass der Fahrer lediglich die Querführung manuell ausführen muss. Ein Störfaktor könnte jedoch in der leicht höheren mittleren Geschwindigkeit bei manueller Fahrt liegen, auf das dieses Maß reagieren kann [Kna09, S. 7]. Auch ist anzumerken, dass lediglich eine 6,3 km lange Fahrt betrachtet wird. Langzeiteffekte wie sinkende Vigilanz aufgrund verringerter motorischer Anforderungen (Kap. 2.2.3) können nicht betrachtet werden. Somit kann die Hypothese (H-2) angenommen werden.

### 5.3.4.3 Explorative Untersuchungen

Akzeptanz und Vertrauen in ein FAS können höher sein, wenn es einem dem Fahrer ähnlichen Fahrstil aufweist [The15, S. 28; Ver12]. So sollten bei der Evaluation von FAS Systemcharakteristika als Akzeptanzdeterminanten berücksichtigt werden [Van98, S. 36] nach [Arn11, S. 52].

Die Erfassung des Fahrstils erfolgt mittels Befragung durch sieben bipolare Wortpaare [Ste99] nach [Arn11, S. 97ff]. Zur Lkw-spezifischen Anpassung wird die einleitende Formulierung aus [Arn11, S. 97ff] verändert in: „Im Vergleich zu anderen Lkw-Fahrern fahre ich überwiegend...“. Zudem wird das Item „sportlich“ auf „dynamisch“ abgeändert (Abbildung 5-7).

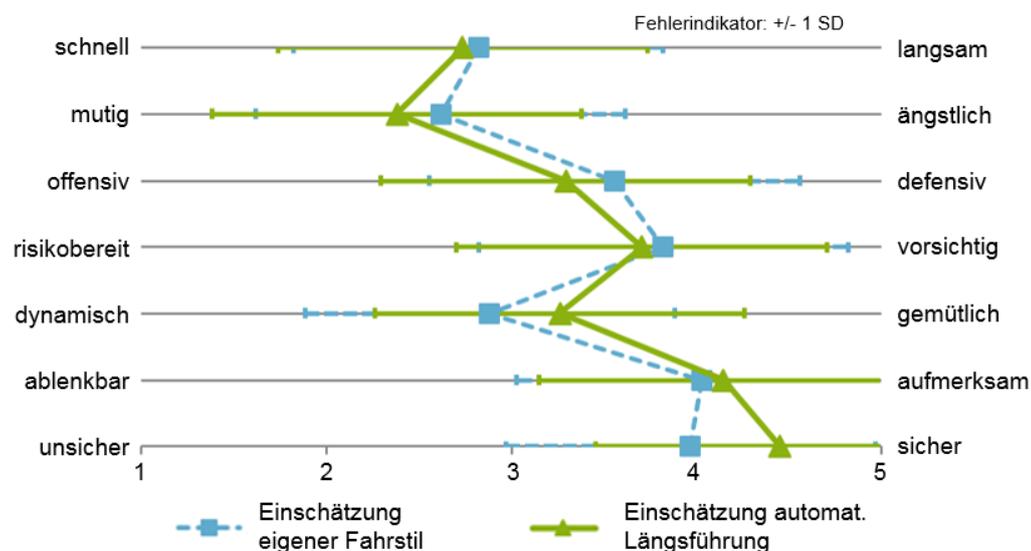


Abbildung 5-7: Subjektive Bewertung des persönlichen Fahrstils im Vergleich zur automatisierten, kraftstoffeffizienten Längsführung; Fehlerindikatoren zeigen +/- 1 SD

Auf Basis einer Reliabilitätsanalyse [Bor07, S. 196; Fie13, S. 705ff] werden zur Verbesserung der Skalengüte zwei Items (aufmerksam-ablenkbar; unsicher-sicher) ausgeschlossen. So kann sowohl für den manuellen Fahrstil als auch den Fahrstil der automatisierten Längsführung eine akzeptable Reliabilität (Cronbach's  $\alpha = .753$  bzw.  $\alpha = .775$ ) erzielt werden. [Arn11, S. 97ff] konnte durch Ausschluss derselben Items eine gute Reliabilität ( $\alpha = .84$ ) erreichen.

Der aufgrund gegebener Normalverteilung eingesetzte T-Test zeigt keine signifikanten Unterschiede zwischen dem manuellen Fahrstil im Vergleich zum Fahrstil der automatisierten Längsführung. Folglich lässt sich bei der Betrachtung von Akzeptanz und Vertrauen die Beeinflussung durch die Ausgestaltung der Funktions-Ebene (Kap. 3.2.1) reduzieren.

Interessant ist die Betrachtung des subjektiven Fahrstils im Vergleich zur objektiven Größe der mittleren Geschwindigkeit. Hinsichtlich dieser lässt sich ein signifikanter Unterschied zwischen der manuellen ( $MW = 13.2 \text{ m/s}$ ) und der Fahrt mit automatisierter Längsführung ( $MW = 12.7 \text{ m/s}$ ) nachweisen ( $z = -3.76, p < .001, r = -.66$ ). Diese Geschwindigkeitsdifferenz entsteht meist durch eine Überschreitung der vorgegebenen Höchstgeschwindigkeit bei manueller Fahrt.

Demzufolge kann die automatisierte Längsführung objektiv betrachtet die Kraftstoffeffizienz sowie, durch Einhaltung der erlaubten Höchstgeschwindigkeit, die Sicherheit erhöhen, während auf subjektiver Ebene keine Differenz der Fahrstile zwischen manueller und automatisierter Längsführung feststellbar ist.

### Akzeptanz

Die Ergebnisse der Akzeptanzbefragung nach [Van97] sind in Abbildung 5-8 im Vergleich zu einem kraftstoffeffizienten FAS (Virtueller Fahrtrainer, ViFa [Hey14; Hey15]) mit proaktiven Handlungsempfehlungen auf Topographie und statische Infrastrukturelemente dargestellt. Die automatisierte, kraftstoffeffiziente Längsführung mit HMI A (Abbildung 5-4) schneidet hinsichtlich der Dimension Zufriedenheit höher als die ViFa-Studien ab, kann aber bezüglich der Dimension Nützlichkeit nicht ganz an die Bewertung des ViFa-Realversuchs heranreichen. Dies könnte jedoch ein Artefakt der Versuchsumgebung (Realversuch vs. Simulator) sein, weil die ViFa-Bewertungen aus dem Realversuch höher als in der Fahr-simulatorumgebung ausfallen.

Aus dem Vergleich zeigt sich, dass die Automatisierung der Längsführung von den Lkw-Fahrern mit hoher Akzeptanz bewertet wird. Es stellt sich jedoch die Frage, wie sich nicht situationsgerechtes Automationsverhalten auf die Akzeptanzbewertung auswirkt (Kapitel 6).

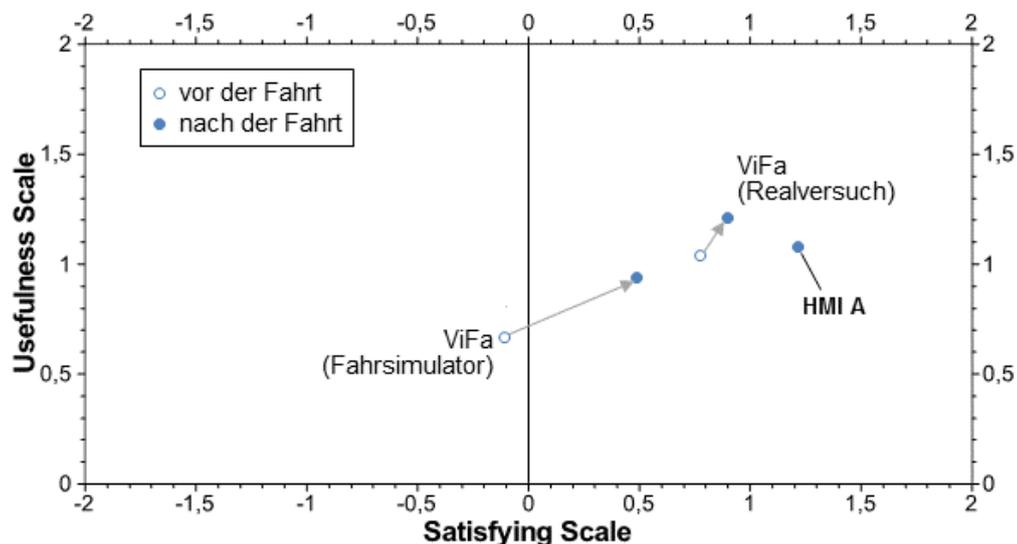


Abbildung 5-8: Akzeptanzbewertung nach [Van97] in den Dimensionen Zufriedenheit und Nützlichkeit im Vergleich zu proaktiven Handlungsempfehlungen zur Kraftstoffeffizienz (Virtueller Fahrtrainer, ViFa). Der Startpunkt der Pfeile entspricht der Einschätzung vor der Fahrt mit ViFa, die Pfeilspitze nach der Fahrt. Bei der automatisierten Längsführung (HMI A) wird nur die Beurteilung nach der Fahrt dargestellt; nach [Hey14, S. 71]

### Vertrauen

Vertrauen sollte nach [Ant05, S. 9f] als Kontinuum gesehen werden: ausgehend von einem a priori Vertrauen, bevor das System praktisch erfahren wird, über ein kurzfristiges Vertrauen, das nach dem ersten Systemerleben aufgebaut wird und langfristiges, das sich mit

kontinuierlicher Systemnutzung über einen längeren Zeitraum entwickelt. Das a priori Vertrauen kann durch vorab erhaltenen Informationen oder Erfahrungen mit ähnlichen Systemen beeinflusst werden [Dzi03, S. 715]. Im Rahmen dieser Studie wird das initiale (vor Fahrtbeginn) sowie das kurzzeitige Vertrauen (nach Fahrtende) auf einer eindimensionalen Skala abgefragt (Abbildung 5-9).

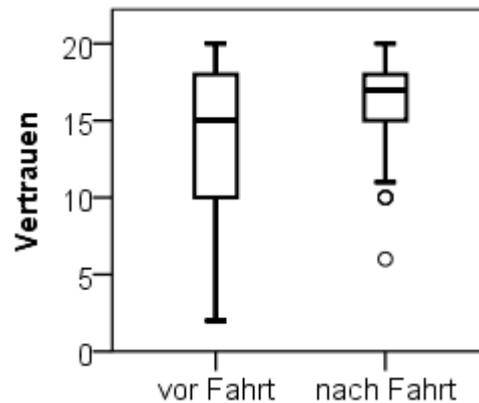


Abbildung 5-9: Subjektive Vertrauensbewertung (0 = niedrig, 20 = hoch) vor und nach der Fahrt mit FAS

Der nicht-parametrische Wilcoxon Test zeigt signifikante Unterschiede zwischen dem Vertrauen vor Fahrtbeginn und nach der Fahrt mit dem FAS ( $z = -3.35, p < .001, r = -.58$ ). So ist das Vertrauen nach der Fahrt ( $Mdn = 17$ ) signifikant höher als vor Fahrtbeginn ( $Mdn = 15$ ).

Die Ergebnisse unterstreichen, dass Vertrauen durch positive Systemerfahrung aufgebaut wird [Ant05, S. 10]. Weiterer Forschungsbedarf besteht in der Frage, wie sich das Erleben von nicht situationsgerechtem Verhalten auf das Vertrauen auswirkt (Kapitel 6).

## 5.4 Optimierung des Anzeigekonzepts

Auf Basis der Erkenntnisse aus der Fahrsimulatorstudie (Kap. 5.3) wird das bestbewertete Anzeigekonzept aus Abbildung 5-4 weiterentwickelt.

### 5.4.1 Erhöhung des Detaillierungsgrades

Die abstrakte Visualisierung zur besseren Konzeptbewertung wird in eine Darstellung mit hohem Detailgrad überführt, wie in [Hof17] erläutert (Abbildung 5-10). Der Systemstatus wird, wie beim klassischen Geschwindigkeitsregelsystem, in Form eines Piktogramms dargestellt. Damit der Fahrer die Geschwindigkeitswahl des FAS nachvollziehen und die vorausliegende Situation antizipieren kann, werden weitere Informationen im FAS-Bereich visualisiert. Der Grund für die langfristige Geschwindigkeitswahl sowie dessen Entfernung werden veranschaulicht. Des Weiteren ist mitunter eine kurzfristige Geschwindigkeitsanpassung aufgrund des Vorderfahrzeugs nötig. Vor dem Lkw einscherende und zügig beschleunigende Vorderfahrzeuge können im urbanen Raum häufig auftreten. Deshalb wird das Vorderfahrzeug als kurzfristiger Regelgrund zusätzlich zum langfristigen Regelgrund in der FAS-Grafik angezeigt. Zudem wird dem Fahrer die neue Zielgeschwindigkeit kommuniziert, auf die das FAS regelt. Sie befindet sich integriert in der Anzeige zur aktuellen Geschwindigkeit. So ist ein schneller Vergleich zwischen Ist- und Sollgeschwindigkeit für den Fahrer möglich.



Abbildung 5-10: Optimiertes Anzeigeconcept mit hoher Detailgenauigkeit und hohem Funktionsumfang

Zur Erhöhung der Individualisierbarkeit und Steuerbarkeit (Kap. 2.1.3), als Ergebnis der Fokusgruppenstudie zur Anforderungsdefinition (Kap. 4.2.2.4), wird dem Fahrer innerhalb eines vordefinierten Bereichs die individuelle Einstellbarkeit der neuen Zielgeschwindigkeit ermöglicht. Dies ist mittels grünem Balken im Rundinstrument der Geschwindigkeitsanzeige angedeutet, wird jedoch in der summativen Fahrsimulatorstudie (Kap. 6) nicht weiter untersucht.

#### 5.4.2 Integration von Systemunsicherheitsinformation (SUI)

Die Visualisierung von SUI führt in vorangegangenen Studien (Kap. 2.3.3) zu angemessenem Vertrauen des Fahrers in das FAS. Diese Erkenntnisse konnten ebenfalls durch eine eigene Studie gestützt werden [Sto15b].

Allerdings zeigt sich, dass die Art der SUI-Visualisierung entscheidend ist. So konnte aufgrund einer sehr komplexen Darstellung bei [Sep07] kein positiver Effekt nachgewiesen werden (Kap. 2.3.3).

Zur Darstellung der SUI wird in der vorliegenden Arbeit ein Konzept auf Basis der Signalentdeckungstheorie der menschlichen Informationsverarbeitung (Kap. 2.1.2.1) entwickelt. Die menschliche Aufmerksamkeitssteuerung kann durch das Hervorstechen der weiterzuverarbeitenden Reize (Bottom-Up) erfolgen (Kap. 2.1.2.1).

Zur Lenkung der Fahreraufmerksamkeit auf den FAS Bereich des Kombidisplays, der die Informationseinheiten Entfernung und Regelgrund enthält, wird dieser bei steigender Systemunsicherheit rot umrandet (Abbildung 5-11). Die Anzahl (eins bis drei) und Strichdicke der roten Rahmen variiert in Abhängigkeit der Systemunsicherheit (Abbildung 5-12). Die Default-Visualisierung bei keiner bzw. sehr geringer SUI zeigt Abbildung 5-12 (links).

Die SUI wird dem Fahrer kontinuierlich angezeigt und gibt ihm so Rückmeldung zur Erhöhung der Systemtransparenz. In Anlehnung an die Teampartner-Metapher (Kap. 2.2.2) zwischen Fahrer und FAS kann die Visualisierung einer geringen SUI zur Entlastung des Fahrers bei der Überwachungstätigkeit führen, während eine hohe SUI die Aufmerksamkeit des Fahrers erhöhen soll.

Der rote Rahmen soll dazu führen, dass der Vergleich zwischen der erwarteten Geschwindigkeit des Fahrers und der eingeregelter Ist-Geschwindigkeit, wie in der Aufgabenanalyse (Kap. 4.3.2) dargestellt, in kurzen Intervallen erfolgt.



Abbildung 5-11: Kombidisplayanzeige mit Visualisierung der Systemunsicherheitsinformation (SUI) auf dritter (höchster) Stufe

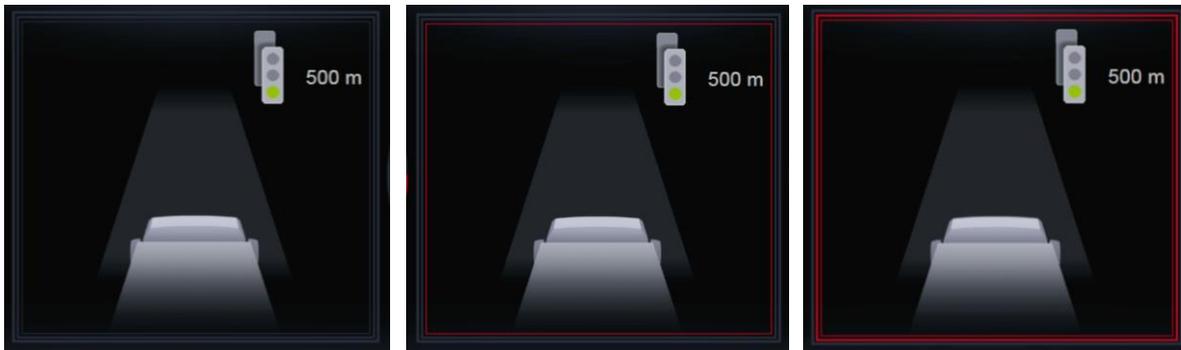


Abbildung 5-12: Visualisierung verschiedener Stufen der SUI; Links: Stufe 0 (= keine bzw. sehr gering); Mitte: Stufe 1; Rechts: Stufe 2

Inwieweit die entwickelte Darstellungsform der SUI die Systemtransparenz sowie die Kontrollierbarkeit der automatisierten, kraftstoffeffizienten Längsführung erhöhen kann, wird in Kapitel 6 untersucht. Für Hintergrundinformationen zur SUI wird verwiesen auf Anhang G.

## 6 Summative Fahrsimulatorstudie zur nutzerzentrierten Kontrollierbarkeitsbewertung

Das iterativ entwickelte Anzeigekonzept (Kap. 5.4) der HMI-Ebene (Kap. 3.2.1) wird im Rahmen einer Fahrsimulatorstudie summativ evaluiert. Der Fokus der Studie liegt auf der nutzerzentrierten Kontrollierbarkeitsbewertung.

### 6.1 Fragestellung und Zielsetzung

Bei nicht situationsgerechtem Automationsverhalten ist eine hohe Kontrollierbarkeit entscheidend für die Interaktionssicherheit des Gesamtsystems (Kap. 4.3.3). Das hier betrachtete FAS ist nach Definition der BAST (Kap. 2.2.1) dem assistierten Fahren zuzuordnen (Kap. 3.1.1). Demnach ist es die Aufgabe des Fahrers, das FAS permanent zu überwachen, weil das FAS nicht in der Lage ist, alle Grenzen seines Wirkbereichs selbständig zu erkennen. Die Überwachungstätigkeit, wie in der Aufgabenanalyse (Kap. 4.3.2) modelliert, ist bei komplexen FAS in einer Vielzahl unterschiedlicher Situationen für den Fahrer herausfordernd (Kap. 2.2.3). Probleme der „Supervisory Control“ (Kap. 2.2.3) zeigen sich in selten auftretenden, kritischen Situationen, die einen Eingriff des Fahrers erfordern [Nie09; Sar95, S. 14].

Um dies genauer zu analysieren, liegt der Untersuchungsschwerpunkt der summativen Studie auf der Phase 3 des Phasenmodells der Situationsanalyse (Kap. 4.3.3) bei nicht situationsgerechtem Verhalten der automatisierten Längsführung (Abbildung 6-1). Gleichzeitig soll der Effekt von zuvor erlebtem, nicht situationsgerechtem Automationsverhalten auf die Phase 1 und 2 in nachfolgenden Situationen untersucht werden.

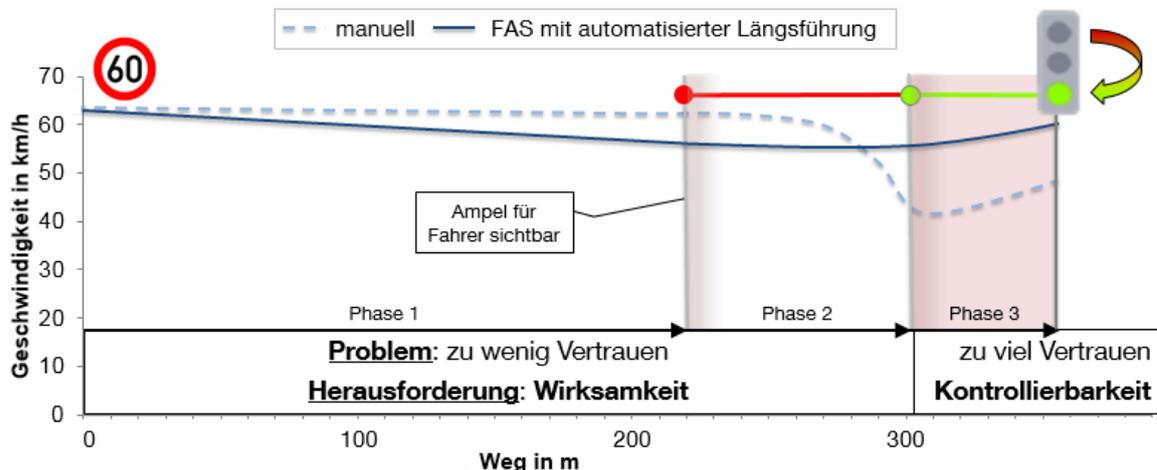


Abbildung 6-1: Untersuchungsschwerpunkt: Phase 3 nach dem Phasenmodell der Situationsanalyse (Kap. 4.3.3)

Aus den Forschungsfragen zwei und drei zur Kontrollierbarkeit sowie zum Effekt der Präsentation von SUI (Kap. 3.2) lassen sich folgende Programmfragen [Bro15, S. 96] der Studie ableiten:

- **P-1 Gesamtbewertung nach nicht situationsgerechtem Verhalten:**  
Verändert sich die Gesamtbewertung des FAS durch die Lkw-Fahrer, wenn diese zuvor erstmalig nicht situationsgerechtes Automationsverhalten erlebt haben?

- **P-2 Einfluss SUI auf Gesamtbewertung:**  
Hat die Präsentation der SUI einen Einfluss auf die Gesamtbewertung des FAS?
- **P-3 Kontrollierbarkeit:**  
Kann die Kontrollierbarkeit bei nicht situationsgerechtem Automationsverhalten mittels kontinuierlicher Informationen im HMI sichergestellt werden?
- **P-4 Einfluss SUI auf Kontrollierbarkeit:**  
Kann die Präsentation von SUI die Kontrollierbarkeit bei nicht situationsgerechtem Automationsverhalten erhöhen?

Diese Programmfragen sollen explorativ untersucht werden.

Nachfolgend wird die gewählte Mikromethodik (6.2) aufgezeigt, bevor das eingesetzte Versuchsdesign (6.3) sowie die erzielten Ergebnisse dargestellt (6.4) und diskutiert (6.5) werden.

## 6.2 Mikromethodik der Kontrollierbarkeitsbewertung

Die Kontrollierbarkeitsbewertung wird auf Basis einer Studie mit normalgeübten Lkw-Fahrern durchgeführt, um eine hohe Validität [Bor07, S. 53] zu erreichen. Zur Definition relevanter Testszenarien wird ein Vorgehen entwickelt, das die Auswahl auf Basis der Bewertungen eines multidisziplinären Expertenteams vornimmt.

Für die Studie wird ein dynamischer Fahrsimulator gewählt, um eine hohe externe Validität zu erzielen, bei gleichzeitiger Gefährdungsfreiheit der Probanden in kritischen Situationen sowie hoher Kontrolle der Versuchsbedingungen [Bre15, S. 187f; Win12, S. 47f].

Weiterhin wird die Kontrollierbarkeitsbewertung auf Basis eines „Worst-Case“-Ansatzes durchgeführt, d. h. die Kontrollierbarkeit soll ausschließlich auf Basis der kontinuierlichen Informationen der HMI-Ebene (Kap. 5.4) bewertet werden. Auf explizite Übernahmeaufforderungen mit hoher Saliens (akustisch oder visuell auffällig) wird verzichtet.

Nachfolgend wird das Vorgehen zur Auswahl der Testszenarien (Kap. 6.2.1) und Messgrößen (Kap. 6.2.2) erläutert sowie der Ansatz zur Kontrollierbarkeitsbewertung aufgezeigt (Kap. 6.2.3).

### 6.2.1 Vorgehen zur Auswahl der Testszenarien

Die Auswahl der Testszenarien sollte sich nach der Auftretenswahrscheinlichkeit im Straßenverkehr orientieren [Bre15, S. 186]. Zur Fokussierung der Studie lässt sich eine Reduktion auf kritische Situationen mit dem „Worst Case“-Ansatz begründen [Bre15, S. 186].

Zur Auswahl der Testszenarien wird ein Vorgehen entwickelt (Abbildung 6-2), das Aspekte der FMEA sowie der ISO Norm 26262 [ISO11] aufgreift. Das erarbeitete Vorgehen basiert auf einer Liste potentiell gefährlicher Situationen, die nach Situationsähnlichkeit gruppiert sind.

Im ersten Schritt werden die Szenarien gefiltert, die das FAS sicher als Systemgrenze erkennen kann, wie beispielsweise das Verlassen einer Vorfahrtsstraße. Im zweiten Schritt wird die Kritikalität bei manueller Fahrt bewertet, um Szenarien mit hoher manueller Kritikalität zu filtern. Dies geht einher mit der Empfehlung von [Neu13, S. 48] zur Kritikalitätswahl der Prüfsituation.

In den nächsten Schritten werden die Parameter der in Abschnitt 2.3 erläuterten Risikofunktion (Schadensausmaß, Häufigkeit, Kontrollierbarkeit) hinzugezogen. Nach der Bewertung des Schadensausmaßes werden Szenarien mit niedrigem Schadensausmaß herausgenommen. Anschließend wird die Kontrollierbarkeit abgeschätzt und Szenarien mit hoher angenommener Kontrollierbarkeit ausgeschlossen. Im letzten Schritt wird die Häufigkeit des Auftretens bewertet. Für die Probandenstudie werden Szenarien mit hoher und niedriger Häufigkeit berücksichtigt. Szenarien mit nicht situationsgerechtem Automationsverhalten und hoher Häufigkeit lassen sich mit dem Kriterium der Relevanz [Bre15, S. 186] begründen. Szenarien mit einer niedrigen Häufigkeit werden ausgewählt, weil diese schwieriger zu kontrollieren sein können, aufgrund der Tatsache, dass das mentale Modell sowie das zugehörige Verhaltensmuster nicht angepasst bzw. eingeübt sind (Kap. 2.3).

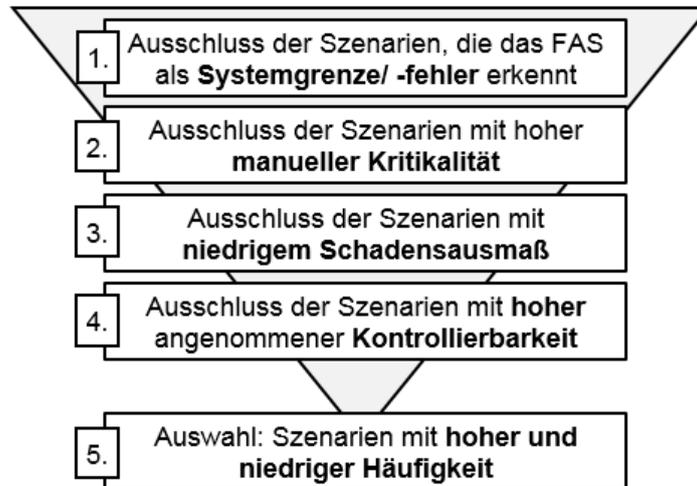


Abbildung 6-2: Vorgehen zur Auswahl der Szenarien für die Kontrollierbarkeitsbewertung

## 6.2.2 Auswahl der Messgrößen

Die Messgrößen zur Gesamtbewertung (6.2.2.1) und Kontrollierbarkeit (6.2.2.2) bei nicht situationsgerechtem Automationsverhalten werden nachfolgend dargestellt.

### 6.2.2.1 Messgrößen zur Gesamtbewertung (P-1 und P-2)

Für die Auswahl der Messgrößen zur Gesamtbewertung nach nicht situationsgerechtem Automationsverhalten wird auf die Gebrauchstauglichkeits-Definition aus der ISO Norm 9241-210 [DIN11, S. 7] zurückgegriffen. Die Ableitung der Messgrößen erfolgt wie in Abschnitt 5.3.2 erläutert und wird für die vorliegenden Programmfragen folgendermaßen angepasst:

- Die als „Grad der Zielerreichung“ definierte Effektivität wird über den Eingriffszeitpunkt des Fahrers bei nicht situationsgerechtem Automationsverhalten zur Übersteuerung des FAS erfasst.
- Für die Bewertung der Effizienz wird die subjektiv erfasste Fahrerbeanspruchung herangezogen.
- Zur Bewertung der Zufriedenheit als „positive Einstellung gegenüber der Nutzung“ wird die Usability-Bewertung aufgrund des höheren Detaillierungsgrades des HMIs hinzugefügt. Diese subjektive Größe wird mittels standardisiertem Fragebogen (System Usability Scale, SUS [Bro96, S. 191ff]) ermittelt. Die Messgrößen Vertrauen und Akzeptanz werden aus 5.3.2 übernommen.

Einen Überblick der eingesetzten Messgrößen zur Gesamtbewertung (P-1 und P-2) gibt Abbildung 6-3.

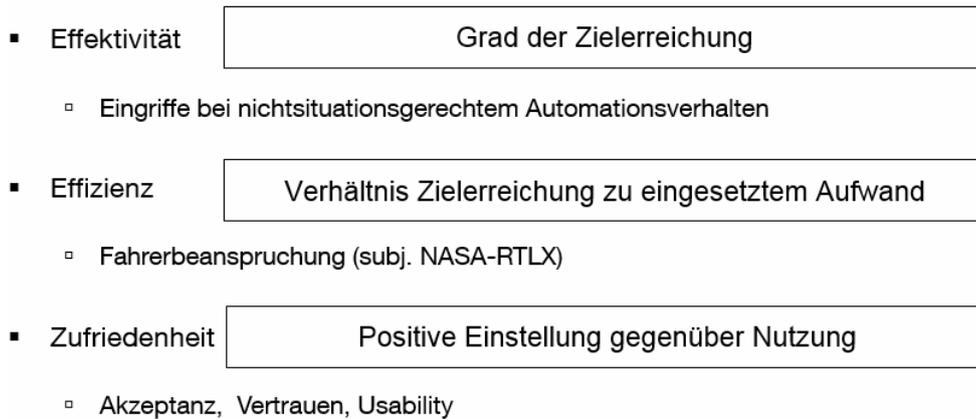


Abbildung 6-3: Übersicht der Messgrößen zur Gesamtbewertung (Programmfragen P-1 und P-2)

### 6.2.2.2 Messgrößen zur Kontrollierbarkeitsbewertung (P-3 und P-4)

Als Kriterien zur Kontrollierbarkeitsbewertung sollen mehrdimensionale, sich ergänzende Bewertungsgrößen herangezogen werden [Neu14]. Um eine Pass-Fail-Entscheidung treffen zu können, muss für das jeweilige Kriterium eine klare Definition der kritischen Grenze gewählt werden. Zudem ist zu beachten, dass Pass-Fail-Kriterien auf Basis subjektiver Urteilsbewertungen konservativere Entscheidungen hervorrufen können als die Verwendung des Unfallkriteriums [Neu08a].

Für die Programmfragen P-3 und P-4 werden folgende Messgrößen definiert:

- Subjektiv: Bewertung der Kritikalität der Fahrsituation nach [Neu08a, S. 144f; Neu08b]
- Objektiv: Fahrdaten zu Eingriffszeitpunkt und Geschwindigkeit sowie das Unfallkriterium

Für die subjektive Bewertung der Kritikalität der Fahrsituation wird eine hierarchisch aufgebaute Kategorienskala mit eindeutiger Toleranzschwelle nach [Neu08a, S. 144f; Neu08b] eingesetzt (Abbildung 6-4). Die Probanden werden in Skala und Toleranzschwelle ( $\geq$  Wert 7 „Gefährlichkeit“) eingewiesen und üben die Bewertung dieser während der Eingewöhnungsfahrt. Die Skala steht den Probanden auf dem Lenkrad angebracht permanent zur Verfügung.

|    |   |
|----|---|
| 10 | <b>Fahrzeug nicht mehr kontrollierbar</b> |
| 9  | <b>Gefährlichkeit</b>                     |
| 8  |   |
| 7  |   |
| 6  | <b>Störung des Fahrens</b>                |
| 5  |   |
| 4  |   |
| 3  | <b>Spürbarkeit</b>                        |
| 2  |   |
| 1  |   |
| 0  | <b>Nichts bemerkt</b>                     |

Abbildung 6-4: Eingesetzte Skala zur Bewertung der Kritikalität des nicht situationsgerechten Automationsverhaltens in Anlehnung an [Neu08a, S. 144]

Aufgrund der Bedeutung des Eingriffszeitpunkts in der Aufgabenanalyse (Kap. 4.3.2) zur Überwachung der automatisierten Längsführung wird diese als zentrale, objektive Größe gewählt. Die Definition einer klaren Grenze (Pass-Fail-Kriterium) ist situationsspezifisch und wird bei der Szenarienbeschreibung definiert (6.3.1). Auf die vom Eingriffszeitpunkt abgeleiteten Größen Geschwindigkeit oder Unfallkriterium wird situationsspezifisch zurückgegriffen (6.3.1).

### 6.2.3 Vorgehen zur Kontrollierbarkeitsabschätzung

Zur Bewertung der Kontrollierbarkeit wird ein mehrstufiges Vorgehen in Anlehnung an [Neu08b; Neu13, S. 52f] eingesetzt. Dieses wird gewählt, aufgrund der Kombination der subjektiven Urteile zur Kontrollierbarkeit mit objektiven Kenngrößen.

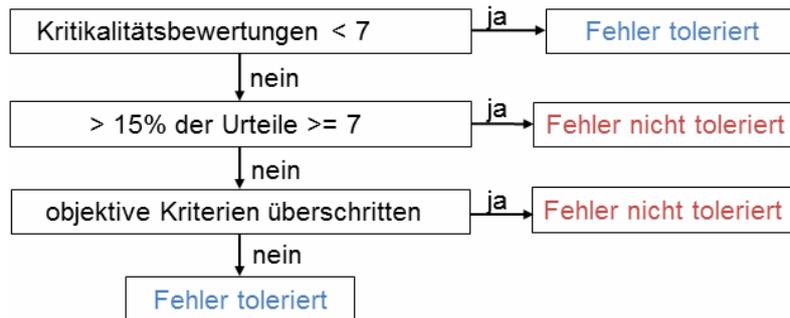


Abbildung 6-5: Vorgehen zur Kontrollierbarkeitsabschätzung in Anlehnung an [Neu13, S. 53]

Wie Abbildung 6-5 zeigt, werden zunächst die subjektiven Kritikalitätsbewertungen analysiert. Treten keine Urteile über der kritischen Toleranzschwelle ( $\geq$  Stufe 7 „Gefährlichkeit“; Abbildung 6-4) auf, so ist das nicht situationsgerechte Automationsverhalten tolerierbar.

Dieses ist nicht tolerierbar, sollten mehr als 15 % der Probandenurteile die Kritikalität über der Toleranzschwelle einschätzen.

Treten dagegen Urteile über der kritischen Schwelle bei weniger als 15 % der Probanden auf, ist die Analyse der objektiven Kriterien für die Kontrollierbarkeitsentscheidung ausschlaggebend.

Um dieses Vorgehen für die Anwendbarkeit auf die Programmfragen P-3 und P-4 zu prüfen, werden die definierten, multidimensionalen Messgrößen zur Kontrollierbarkeitsbewertung (6.2.2.2) in der Ergebnisdiskussion (6.5) miteinander verglichen.

## 6.3 Experimentelles Design der Studie

Nachfolgend werden die ausgewählten, potentiell kritischen Testszenarien, das Versuchsdesign, der Versuchsablauf sowie die Beschreibung der Stichprobe dieser Studie dargestellt.

### 6.3.1 Testszenarien und Versuchsstrecken

Die nach dem spezifizierten Vorgehen (6.2.1) ausgewählten Testszenarien lassen sich unterteilen hinsichtlich der nicht situationsgerechten Regelung des FAS auf statische (6.3.1.1) bzw. dynamische Infrastrukturelemente (6.3.1.2) sowie auf den Umgebungsverkehr (6.3.1.3). Detaillierte Geschwindigkeitsverläufe des Situationsablaufs mit Darstellung situationsspezifischer Parameter (frühestmöglicher Sichtkontakt etc.) finden sich in Anhang E.

### 6.3.1.1 Regelung auf statische Infrastrukturelemente

Als potentiell kritisches Szenario bei Regelung auf statische Infrastrukturelemente wird eine Geschwindigkeitsbegrenzung auf 30 km/h aufgrund einer Baustelle ausgewählt (Abbildung 6-6, Szenario A). Falls der Proband nicht eingreift, durchfährt die automatisierte Längsführung die temporäre Baustelle mit 50 km/h. Das darauffolgende Verkehrszeichen erlaubt eine zulässige Geschwindigkeit von 60 km/h und wird durch die HMI-Ebene wieder als erkannt dargestellt und auf Funktions-Ebene korrekt geregelt.

Dieses als „Tempolimit nicht erkannt“ bezeichnete Szenario ist 138 m lang. Auf ein Vorderfahrzeug wird in dieser Situation verzichtet, weil dies ein weiteres Regelobjekt darstellen würde.

Bei der Fahrt ohne SUI-Visualisierung erfolgt die Anzeige wie in Abbildung 6-6 (links) dargestellt. Bei der Fahrt mit SUI wird Stufe drei visualisiert (Abbildung 5-11). Folglich werden drei rote Rahmen zur Aufmerksamkeitssteuerung um den FAS-Bereich angezeigt (5.4.2).



Abbildung 6-6: Potentiell kritische Testszenarien bei Regelung auf statische Infrastrukturelemente; Szenario A „Tempolimit nicht erkannt“; Szenario B „Tempolimit aufgehoben nicht erkannt“

Um die Reaktion der Lkw-Fahrer in einer Situation geringer Kritikalität zu untersuchen, wird das Szenario „Tempolimit aufgehoben nicht erkannt“ hinzugenommen (Abbildung 6-6, Szenario B). Aufgrund von Straßenschäden wird die erlaubte Höchstgeschwindigkeit auf 40 km/h reduziert. Am Ende dieses Streckenabschnitts wird das Verkehrschild mit erlaubter Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h vom FAS nicht erkannt, weshalb auf Funktions-Ebene weiterhin auf 40 km/h geregelt wird und auf HMI-Ebene dem Fahrer dies so visualisiert wird. Auf der Strecke mit SUI wird die erste Stufe der Unsicherheit angezeigt (Abbildung 5-12, Mitte).

### 6.3.1.2 Regelung auf dynamische Infrastrukturelemente

Als Testszenarien für die nicht situationsgerechte Regelung auf dynamische Infrastrukturelemente werden zwei Szenarien mit von Grün auf Rot wechselnder LSA gewählt (Abbildung 6-7).

Im Szenario „LSA Rot nicht erkannt“ wird weiterhin auf die erlaubte Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h geregelt. Dies wird im HMI wie in Abbildung 6-7 (Szenario C) kommuniziert. Falls der Fahrer nicht eingreift, überfährt das FAS die LSA ungebremst. Für den Fahrer ist die LSA 183 m vorher einsehbar. Aufgrund ethischer Aspekte der Versuchsgestaltung wird kein Querverkehr eingesetzt, sodass ein Rotlichtverstoß zu keinem Unfall mit anderen Verkehrsteilnehmern führen würde.

Dagegen wird im Szenario „LSA falsch erkannt“ die LSA prinzipiell auf Daten-Ebene vom FAS erkannt, jedoch ist die Zuordnung der Signalphase fehlerhaft. Die Funktions-Ebene regelt auf eine grüne LSA und kommuniziert dies auf HMI-Ebene entsprechend an den Fahrer. Beim ersten Sichtkontakt des Fahrers (183 m vor LSA) ist die LSA Phase wie im HMI dargestellt Grün. 120 m vor der LSA schaltet diese von Grün auf Rot um. Falls kein Fahrereingriff erfolgt, überfährt der Lkw die LSA. Jedoch führt dies, wie beim Szenario „LSA nicht erkannt“, aus Berücksichtigung ethischer Aspekte zu keinem Unfall.

In beiden LSA Szenarien wird auf der Strecke mit SUI-Anzeige die dritte und somit höchste Stufe dargestellt (Abbildung 5-11).



Abbildung 6-7: Potentiell kritische Testszenarien bei Regelung auf dynamische Infrastrukturelemente; Szenario C: „LSA nicht erkannt“; Szenario D: „LSA falsch erkannt“

### 6.3.1.3 Regelung auf Umgebungsverkehr

Bei nicht situationsgerechter Regelung des FAS auf Umgebungsverkehr wird zwischen statischem und dynamischem Umgebungsverkehr unterschieden (Abbildung 6-8).



Abbildung 6-8: Potentiell kritische Testszenarien bei Regelung auf Umgebungsverkehr; Szenario E: hereinragendes, parkendes Fahrzeug; Szenario F: hereinragender, abbiegender Lkw

Im Szenario hereinragendes, „parkendes Fahrzeug“, ist der Fahrstreifen des Egofahrzeugs soweit eingeschränkt, dass ein Spurwechsel nötig ist. Dieser wird durch mitfließenden Verkehr auf dem linken Fahrstreifen erschwert. Das parkende Fahrzeug ist 242 m vorher frühestmöglich einsehbar.

Auf der Strecke mit Präsentation der SUI wird diese ab dem frühestmöglichen Sichtkontakt (242 m vorher) die zweite Stufe der Unsicherheit dargestellt (Abbildung 5-12, rechts).

Beim Szenario hereinragender, „abbiegender Lkw“ befindet sich eine Zugmaschine mit Sattelaufleger in einer Kreuzungssituation. Beim Linksabbiegevorgang schwenkt dieser aus und schränkt den Fahrstreifen des Egofahrzeugs ein, sodass ein Fahrereingriff nötig ist. Der bereits leicht mittig stehende Lkw ist theoretisch 215 m vorher für den Fahrer einsehbar. Der Abbiegevorgang des hereinragenden Sattelzugs wird in der Fahrsimulatorsoftware Silab [WIV14] streckenmeterbasiert ausgelöst. Bei Präsentation der SUI wird die dritte und folglich höchste Stufe der Unsicherheit 72 m vorher visualisiert (Abbildung 5-11).

In beiden Szenarien wird auf HMI-Ebene die Zielgeschwindigkeit sowie in Symbolform der aktuelle Regelgrund mit 60 km/h angezeigt.

### 6.3.1.4 Szenario mit fehlerhafter SUI-Anzeige

Um die Wirkung der SUI-Anzeige zu untersuchen, wird im Szenario „False-Positiv“ trotz korrektem Verhalten der automatisierten Längsführung die SUI visualisiert. 500 m vor einer Linkskurve mit Tempolimit 40 km/h beginnt die automatisierte Längsführung mit der vorausschauenden Regelung (Abbildung 6-9, links).

Der frühestmögliche Sichtkontakt des Fahrers auf das Verkehrsschild ist ca. 128 m vor dem Schild, während die SUI-Anzeige der Stufe eins bereits 300 m vorher dargestellt wird (Abbildung 6-9, rechts).

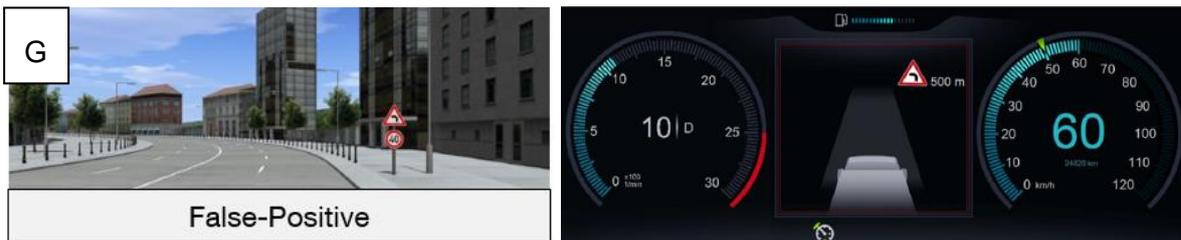


Abbildung 6-9: Links: Szenario G „False-Positive“ aus Fahrersicht; Rechts: Anzeige im Kombidisplay

### 6.3.1.5 Definition der situationsspezifischen Pass-Fail-Kriterien

Für die Regelung auf statische Infrastrukturelemente (Szenario A und B) wird die vom Eingriffszeitpunkt abgeleitete Messgröße der Geschwindigkeit als Pass-Fail-Kriterium definiert. Hierdurch ist die Vergleichbarkeit mit der manuellen Fahrt der Probanden möglich. So kann die Forderung aus dem „European Statement of Principles“ (ESOP) überprüft werden. „Es [das FAS] darf nicht schaden“, d. h. es soll die „(...) Sicherheit im Straßenverkehr erhöhen oder zumindest nicht beeinträchtigen“ [Eur06, S. 7].

Für die Szenarien mit Regelung auf dynamische Infrastrukturelemente (C und D) wird der Eingriffsort als Pass-Fail-Kriterium eingesetzt. Für die Definition der kritischen Grenze des Eingriffsortes ( $s$ ) erfolgt die Berechnung mit der Annahme einer konstanten Bremsverzögerung ( $a$ ) in Abhängigkeit der Ausgangsgeschwindigkeit ( $v$ ):

$$s = -\frac{v^2}{2a} \quad (6.1)$$

So ergibt sich für die Situationen mit roter LSA und einer Ausgangsgeschwindigkeit der automatisierten Längsführung von 16 m/s für die definierte maximale Bremsverzögerung ( $3 \text{ m/s}^2$ ) durch Einsatz der Formel (6.1) die kritische Grenze von 46,3 m vor der LSA. Als sekundäre Größe soll der, für die LSA Szenarien als Unfallkriterium definierte Rotlichtverstoß, ergänzend betrachtet werden.

Bei nicht automationsgerechter Regelung auf Umgebungsverkehr (Szenario E und F) kann der Fahrer durch einen vorausschauenden Spurwechsel ohne Übersteuerung des FAS das Szenario sicher bewältigen. Weil jedoch der Verkehr auf dem linken Fahrstreifen software-spezifisch zwischen den Versuchsfahrten nicht vergleichbar ist, kann ein Fahrereingriff in manchen Fällen unumgänglich sein. Deshalb wird die vom Eingriffszeitpunkt abgeleitete Größe des Unfallkriteriums gewählt.

Für das False-Positive Szenario (G) wird der Eingriffszeitpunkt explorativ untersucht.

### 6.3.1.6 Streckengestaltung

Um die Vergleichbarkeit zur formativen Evaluation zu fördern, werden dieselben Streckenparameter (zwei Fahrstreifen je Richtungsfahrbahn, Streckengeometrie, etc.) ausgewählt, wie in Abschnitt 5.3.3 beschrieben. Auch die Szenarien mit situationsgerechtem Automationsverhalten werden hierzu eingesetzt (Anhang D). Ebenfalls werden, um Reihenfolgeeffekte zu verringern, die Landschaftsgestaltung und die Reihenfolge der Szenarien innerhalb der Strecken variiert.

### 6.3.2 Versuchsdesign

Das Versuchsdesign beinhaltet sowohl Zwischensubjekt- als auch Innersubjektfaktoren (Abbildung 6-10). Der Zwischensubjektfaktor stellt die Einweisung in die SUI dar: Während die Hälfte der Probanden ausführlich in die SUI-Anzeige eingewiesen wird, erhält die zweite Hälfte vor der Fahrt keine Informationen.

|                        |                     | Innersubjektfaktor |                       |
|------------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|
| Zwischen-subjektfaktor | mit Einweisung SUI  | Baseline manuell   | 5 Messfahrten mit FAS |
|                        | ohne Einweisung SUI | Baseline manuell   | 5 Messfahrten mit FAS |

Abbildung 6-10: Versuchsdesign der Studie mit Inner- und Zwischensubjektfaktoren

Die Innersubjektfaktoren stellen die Systemzuverlässigkeit (mit/ ohne Systemfehler; P-1 und P-3), die SUI (mit/ ohne SUI; P-2 und P-4) sowie die Systemunterstützung (mit/ ohne FAS; P-3) dar. Den Ablauf der Messfahrten zeigt Abbildung 6-11.

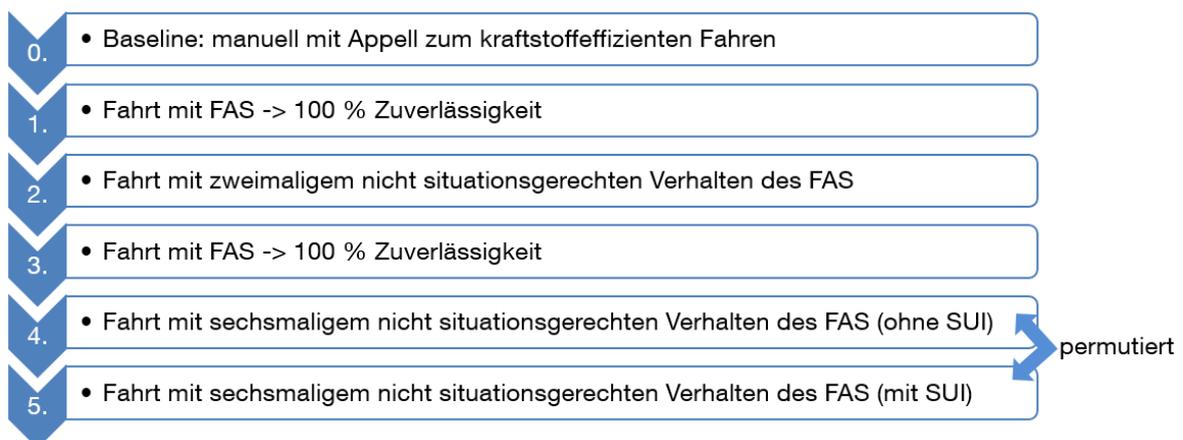


Abbildung 6-11: Reihenfolge der Messfahrten für die summative Fahrsimulatorstudie

Jeder Proband beginnt mit einer manuellen Messfahrt, bei der er die Anweisung erhält, kraftstoffeffizient zu fahren. Diese Fahrt dient als Baseline-Fahrt. Anschließend folgen fünf

Messfahrten mit automatisierter, kraftstoffeffizienter Längsführung. Die Fahrten unterscheiden sich im Grad der Systemzuverlässigkeit. Um Reihenfolgeeffekte zu verringern, werden Landschaftsgestaltung und Reihenfolge der Situationen innerhalb einer Strecke variiert.

In Fahrt eins und drei regelt das FAS durchgehend situationsgerecht. Auf der zweiten Fahrt mit FAS tritt nur in den Szenarien A und B nicht situationsgerechtes Automationsverhalten auf, während dies für die vierte und fünfte Fahrt mit FAS in den Szenarien A bis F der Fall ist. In allen anderen Situationen der ca. zehnminütigen Versuchsstrecke regelt das FAS immer situationsgerecht.

Die Strecken vier und fünf unterscheiden sich in der Visualisierung der SUI (Abbildung 5-11). Lediglich auf einer Strecke wird die SUI dargestellt. Zur Vermeidung von Reihenfolgeeffekten werden die Strecken permutiert. Die Hälfte der Probanden bekommt die SUI auf der vierten Fahrt angezeigt, während dies für die zweite Hälfte der Probanden auf der fünften Fahrt der Fall ist.

### **6.3.3 Versuchsaufbau**

Für die Durchführung der Studie wird der, in Abschnitt 5.3.3 beschriebene, dynamische Fahrsimulator sowie die prototypische Implementierung des FAS eingesetzt. Bei nicht situationsgerechtem Automationsverhalten werden die für korrektes Verhalten notwendigen Informationen auf Daten-Ebene (Kap. 3.2.1) entfernt.

Nach einer kurzen Einführung in die Simulationsumgebung erfolgt die Vorbefragung zu demographischen Aspekten, zur Einstellung hinsichtlich Kraftstoffeffizienz sowie zur Technikbereitschaft nach [Ney12]. Während der nachfolgenden Eingewöhnungsfahrt wird die Kritikalitätsbewertung von Szenarien mit der auf dem Lenkrad angebrachten Skala geübt.

Nach der manuellen Baseline-Fahrt wird die subjektive Fahrerbeanspruchung mittels NASA-RTLX [Har06, S. 906] erfasst. Anschließend werden alle Probanden in die automatisierte Längsführung und die Kombidisplaysanzeige (Abbildung 5-10) eingewiesen.

Vor Fahrtbeginn wird jeweils das Vertrauen des Fahrers gegenüber dem FAS eindimensional ermittelt. Nach jeder Messfahrt mit FAS werden alle subjektiven Messgrößen (6.2.2) abgefragt.

Eine Abschlussbefragung erfolgt nach allen Messfahrten zur Kritikalität der Testszenarien sowie zum Nutzen des FAS. Der vollständige Fragebogen befindet sich in [Hof16, S. Anhang C].

### **6.3.4 Beschreibung der Stichprobe**

Die Probanden werden über die Datenbank des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik rekrutiert. Teilnahmevoraussetzung ist ein gültiger Führerschein der Klasse C oder CE. Von den 36 teilnehmenden Probanden (33 männlich, 3 weiblich) können 34 gültige Datensätze genutzt werden.

Die Altersspanne der Probanden liegt zwischen 22 und 65 ( $M = 43,1$ ;  $SD = 10,4$ ) Jahren. Die Probanden besitzen ihren Lkw-Führerschein zwischen 3 und 40 Jahren ( $M = 19,6$ ;  $SD = 9,9$ ).

Während allen Probanden der Tempomat bekannt ist, sind lediglich 14 Probanden (41,2 %) zuvor einen abstandsgeregelten Tempomaten im Lkw gefahren.

Um das Problembewusstsein zu erfassen, wird nach der Einstellung zum kraftstoffeffizienten Fahren gefragt: 29 Probanden (85,3 %) ist dies wichtig oder sehr wichtig, während einem Probanden (2,9 %) dies unwichtig ist. Vier Teilnehmer (11,8 %) nehmen diesbezüglich eine neutrale Haltung ein.

## 6.4 Ergebnisse

Alle Ergebnisse zu den in 6.1 spezifizierten Programmfragen werden auf einem Signifikanzniveau von  $\alpha = .05$  berichtet [Bor10, S. 101]. Um bei mehreren paarweisen Vergleichen die Kumulation des  $\alpha$ -Fehlers zu vermeiden, wird das Signifikanzniveau mittels Bonferroni-Korrektur angepasst, indem es durch die Anzahl der Vergleiche geteilt wird [Bor10, S. 232; Cla99, S. 243].

### 6.4.1 Einfluss von erstmaligem nicht situationsgerechtem Automationsverhalten auf die Gesamtbewertung (P-1)

Zur explorativen Untersuchung der Programmfrage P-1 werden die Strecken eins, zwei und drei miteinander verglichen (Abbildung 6-11). Nur in Strecke zwei regelt die automatisierte Längsführung in zwei Situationen nicht situationsgerecht. Für die Gesamtbewertung werden die in 6.2.2.1 spezifizierten Messgrößen eingesetzt.

#### 6.4.1.1 Usability

Die mittels standardisiertem SUS Fragebogen [Bro96] ermittelten Usability Werte zeigt Abbildung 6-12. Das Erleben von erstmaligem, nicht situationsgerechtem Automationsverhalten hat einen signifikanten Einfluss auf die Usability-Bewertung, wie die Friedman-ANOVA zeigt ( $\chi^2(2) = 51.9, p < .001$ ).

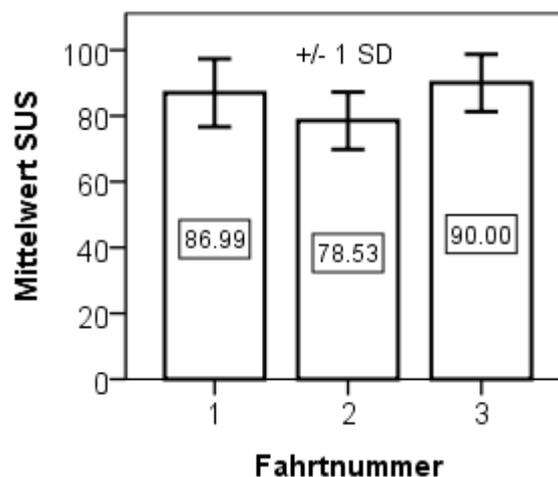


Abbildung 6-12: Vergleich der Usability Bewertung; auf Fahrt 2 treten zwei Systemfehler in Szenario A und B (6.3.1) auf; während Fahrt 1 und 3 regelt das FAS immer situationsgerecht

Die drei paarweisen Vergleiche werden, aufgrund fehlender Normalverteilung, mit Hilfe von Wilcoxon-Tests durchgeführt. Das Signifikanzniveau wird mittels Bonferroni-Korrektur auf  $\alpha = .017$  angepasst [Bor10, S. 232].

Nach dem erstmaligen Erleben von nicht situationsgerechtem Automationsverhalten wird die Usability signifikant schlechter bewertet, was der Vergleich zwischen der ersten und zweiten Fahrt offenbart ( $z = -4.71, p < .001, r = -.81$ ).

Jedoch zeigt sich kein länger anhaltender Effekt, sodass auf der unmittelbar nachfolgenden Fahrt (drei) ohne Systemfehler die Usability signifikant besser bewertet wird als auf der zweiten Fahrt ( $z = -5.11, p < .001, r = -.88$ ).

Auch steigt die Usability-Bewertung mit längerem Umgang mit dem FAS ohne Systemfehler an: Die Usability wird auf der dritten Fahrt mit FAS signifikant besser bewertet als auf der ersten Fahrt ( $z = -2.97, p = .003, r = -.51$ ).

Zur Einordnung der Usability-Bewertung mittels SUS [Bro96] wird die Klassifizierung nach [Ban09, S. 121] verwendet (Abbildung 6-13). Demnach liegt der SUS-Mittelwert nach der ersten und dritten Fahrt mit ausschließlich situationsgerechtem Verhalten im exzellenten Bereich. Trotz zwei Systemfehlern auf der zweiten Fahrt wird die Usability noch im guten, akzeptablen Bereich bewertet.

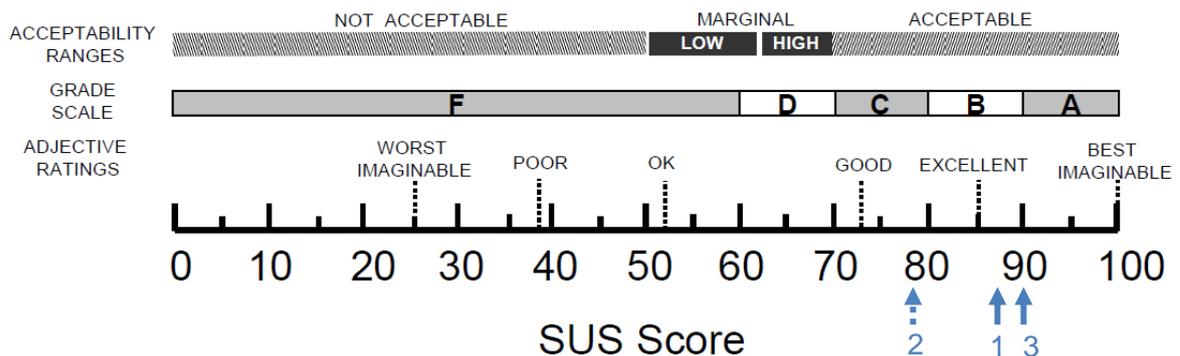


Abbildung 6-13: Einordnung der ermittelten SUS Werte nach [Ban09, S. 121]; die Pfeile sind mit der jeweiligen Fahrnummer beschriftet; der gestrichelte Pfeil (Fahrt 2) repräsentiert die Fahrt mit nicht situationsgerechtem Automationsverhalten

#### 6.4.1.2 Vertrauen in das FAS

Das Vertrauen wird auf einer eindimensionalen Skala von 0 (niedrig) bis 20 (hoch) erfasst (Abbildung 6-14).

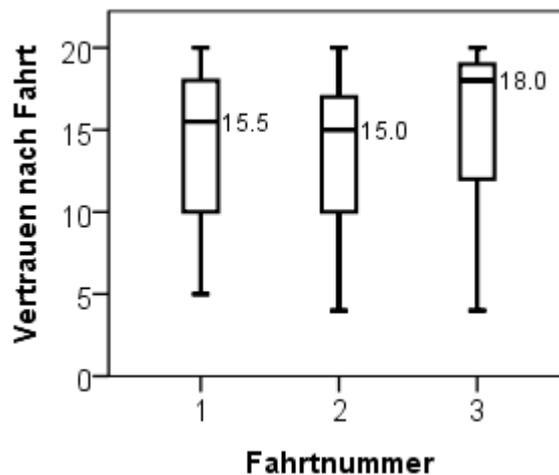


Abbildung 6-14: Vergleich der Vertrauensbewertung: auf Fahrt 2 treten zwei Systemfehler in Szenario A und B (6.3.1) auf; während Fahrt 1 und 3 regelt das FAS immer situationsgerecht

Der paarweise Vergleich mit Bonferroni-Korrektur ( $\alpha = .017$ ) zeigt keinen signifikanten Unterschied zwischen der ersten Fahrt ohne Systemfehler ( $Md = 15,5$ ) und der unmittelbar darauffolgenden zweiten Fahrt ( $Md = 15,0$ ) mit Systemfehlern ( $z = -1.06, p = .291, r = -.18$ ). Folglich verringert das Erleben von nicht situationsgerechtem Automationsverhalten die Vertrauensbewertung nicht.

Beim paarweisen Vergleich zwischen der zweiten Fahrt ( $Md = 15,0$ ) mit Systemfehlern und der dritten Fahrt ( $Md = 18,0$ ) ohne dieser kann ein signifikanter Unterschied mit großem Effekt nachgewiesen werden ( $z = -3.59, p = .001, r = -.58$ ). Daraus lässt sich ableiten, dass das Vertrauen der Fahrer mit längerer Interaktion mit dem FAS steigt, obwohl zuvor ein Systemfehler erlebt wurde.

Zwischen Fahrt eins ( $Mdn = 15,5$ ) und drei ( $Mdn = 18,0$ ) zeigt sich bei rein deskriptiver Betrachtung ein steigendes Vertrauen. Dieser Unterschied wird trotz mittlerer Effektstärke [Coh92] nicht signifikant ( $z = -2.09, p = .036, r = -.36$ ). Jedoch kann dies auf die notwendige Anpassung des Signifikanzniveaus zurückgeführt werden, um die Kumulation des  $\alpha$ -Fehlers der paarweisen Vergleiche zu verringern.

Somit kommt es nach dem Erleben von nicht situationsgerechtem Automationsverhalten zu keinem länger anhaltenden Vertrauensverlust in das FAS.

#### **6.4.1.3 Beanspruchung und Akzeptanz**

Hinsichtlich Beanspruchung ( $\chi^2(2) = 2.56, p = .278$ ) und Akzeptanz (in den Dimensionen Zufriedenheit  $\chi^2(2) = 1.78, p = .410$  und Nützlichkeit  $\chi^2(2) = 2.58, p = .276$ ) lassen sich mittels Friedman-ANOVA keine signifikanten Unterschiede nachweisen.

Daraus kann abgeleitet werden, dass das Erleben von nicht situationsgerechtem Automationsverhalten keinen Einfluss auf diese Messgrößen hat.

#### **6.4.1.4 Unerwünschte Fahrereingriffe nach nicht situationsgerechtem Automationsverhalten**

Für die Analyse von möglichen unerwünschten Fahrereingriffen nach Erleben von nicht situationsgerechtem Automationsverhalten werden dieselben Szenarien auf der darauffolgenden Fahrt analysiert. Sowohl im Szenarien „Tempolimit nicht erkannt“ als auch bei „Tempolimit aufgehoben nicht erkannt“ greift kein Proband in die automatisierte Längsführung ein.

Folglich hat das Erleben von nicht situationsgerechtem Automationsverhalten in den Szenarien A und B keinen Einfluss auf die individuelle Akzeptanzschwelle, wie in der Aufgabenanalyse in Abschnitt 4.3.2 dargestellt.

### **6.4.2 Einfluss der SUI auf die Gesamtbewertung (P-2)**

Um den Einfluss der SUI auf die Gesamtbewertung zu erfassen, wird die Fahrt mit visueller SUI mit der Fahrt ohne SUI verglichen. Beide Strecken enthalten in sechs Szenarien ein nicht situationsgerechtes Automationsverhalten. Die Fahrtreihenfolge ist zwischen den Probanden randomisiert.

Zunächst werden die Ergebnisse zum intuitiven Verständnis der SUI dargestellt, bevor der Effekt der SUI auf die in Abschnitt 6.2.2.1 spezifizierten Messgrößen aufgezeigt wird.

#### **6.4.2.1 Verständnis der SUI Visualisierung**

Die SUI ist in Form roter Rahmen um den FAS Bereich visualisiert. Mit steigender Unsicherheitsstufe nehmen Anzahl und Linienstärke der roten Rahmen zu (Kap. 5.4.2). Zur Untersuchung des intuitiven Verständnisses dieser Darstellungsform wird eine Gruppe der Probanden in die SUI Visualisierung eingewiesen, während die zweite Gruppe ohne vorherige Informationen zur SUI die Fahrt antritt.

Von den 17 Probanden, die ohne vorherige Einweisung die SUI in sieben Szenarien während der Fahrt angezeigt bekommen, können 13 (76,5 %) diese im Nachgang korrekt deuten. Jeweils zwei Probanden (11,8 %) können sich die Bedeutung des roten Rahmens nicht erklären bzw. deuten diesen falsch.

Die Untersuchung unerwünschter Systemeingriffe, die durch die Präsentation der SUI bei korrektem Automationsverhalten („False-Postive“ Szenario, 6.3.1.4) ausgelöst werden, gibt Hinweise auf negative Effekte der SUI.

Im „False-Postive“ Szenario greift kein Proband bei vorausschauender Regelung auf eine enge Kurve mit einem Tempolimit von 40 km/h ein. Kurz vor dem Hochbeschleunigen auf 60 km/h greift ein Proband (2,9 %), der eine Einweisung in die SUI erhalten hat, über das Gaspedal ein. Der Eingriff dieses Probanden kann mit seinem individuellen Fahrstil erklärt werden: Auf der manuellen Baseline-Fahrt hat dieser bereits während des Tempolimits auf 60 km/h beschleunigt.

#### 6.4.2.2 Einfluss der SUI auf Usability

Die SUS Mittelwerte werden zwischen der Fahrt mit und ohne SUI verglichen (Abbildung 6-15).

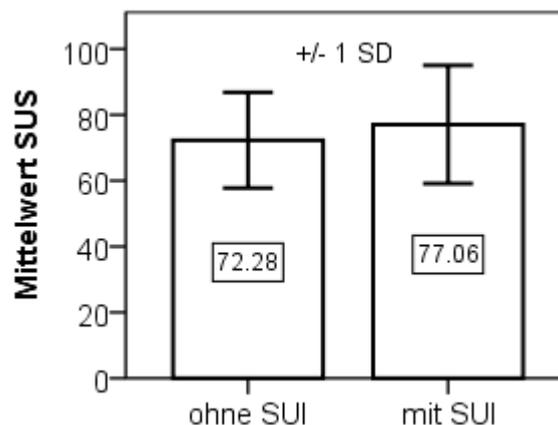


Abbildung 6-15: Vergleich der SUS-Mittelwerte zwischen der Fahrt mit und ohne SUI Visualisierung (N=34)

Bei Visualisierung der SUI wird die Usability signifikant höher bewertet als ohne SUI-Anzeige ( $z = -2.24, p = .025, r = -.38$ ).

Trotz nicht situationsgerechtem Automationsverhalten in sechs Situationen liegen die SUS-Werte sowohl für die Fahrt mit SUI ( $MW = 77,1$ ) als auch für die Fahrt ohne SUI ( $MW = 72,3$ ) im guten, akzeptablen Bereich [Ban09, S. 121].

#### 6.4.2.3 Einfluss der SUI auf Vertrauen in das FAS

Die Bewertung des Vertrauens wird verglichen zwischen der Visualisierung mit und ohne SUI (Abbildung 6-16).

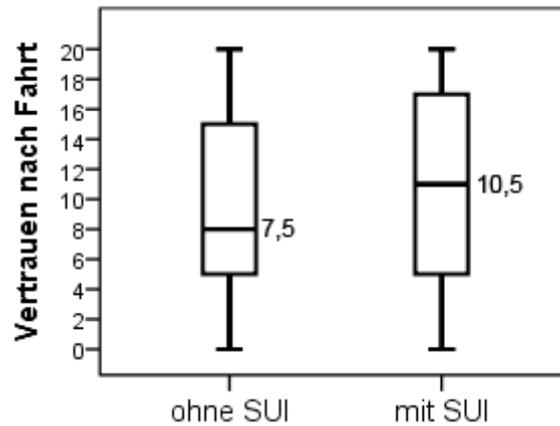


Abbildung 6-16: Vergleich der Vertrauensbewertung zwischen der Fahrt mit und ohne SUI Visualisierung

Das Vertrauen ist signifikant höher mit SUI-Anzeige, im Vergleich zu keiner SUI-Anzeige ( $z = -1.99, p = .046, r = -.34$ ).

#### 6.4.2.4 Einfluss der SUI auf Akzeptanz

Die Akzeptanz wird in den Dimensionen „Nützlichkeit“ und „Zufriedenheit“ erfasst [Van97]. Sowohl hinsichtlich der Nützlichkeit (*mit SUI Md = 1.0; ohne SUI Md = 0.8;  $z = -1.11, p = .267, r = -.19$* ) als auch der Zufriedenheit (*mit SUI Md = 0.8; ohne SUI Md = 0.9;  $z = -.109, p = .913, r = -.02$* ) zeigt sich kein signifikanter Unterschied zwischen mit und ohne SUI-Anzeige. Folglich kann abgeleitet werden, dass die Präsentation von SUI keinen Einfluss auf diese Messgrößen hat.

#### 6.4.2.5 Einfluss der SUI auf Beanspruchung

Für die Beanspruchung lässt sich zwischen der Fahrt mit ( $Mdn = 9.2$ ) und der Fahrt ohne ( $Mdn = 9.8$ ) Präsentation der SUI kein signifikanter Unterschied nachweisen ( $z = -.206, p = .837, r = -.04$ ). Daraus kann geschlossen werden, dass die Präsentation von SUI keinen Einfluss auf diese Messgröße hat.

### 6.4.3 Kontrollierbarkeitsbewertung (P-3) mit SUI Einfluss (P-4)

Die Kontrollierbarkeitsbewertung erfolgt situationsspezifisch nach dem in Abschnitt 6.2.3 spezifizierten Vorgehen. Für eine detaillierte Erläuterung der Fahrdatenaufbereitung aus der Fahr Simulatorsoftware Silab [WIV14] wird auf Anhang F verwiesen.

#### 6.4.3.1 Statische Infrastrukturelemente

Nicht situationsgerechtes Automationsverhalten tritt erstmalig in der zweiten Messfahrt mit FAS auf. In den zwei Szenarien „Tempolimit nicht erkannt“ und „Tempolimit aufgehoben nicht erkannt“ regelt das FAS fehlerhaft. Auf der vierten und fünften Messfahrt tritt der Systemfehler zum wiederholten Mal auf. Die letztgenannten unterscheiden sich darin, dass nur auf einer Fahrt die SUI präsentiert wird. Die Reihenfolge der Fahrt mit SUI ist permutiert, um Reihenfolgeeffekte zu reduzieren.

#### Kontrollierbarkeitsbewertung (P-3)

Im Szenario „Tempolimit aufgehoben nicht erkannt“ treten keine Kritikalitätswerte über der Toleranzschwelle auf (Tabelle 6-1). Folglich ist der Systemfehler tolerierbar.

Im Szenario „Tempolimit nicht erkannt“ bewerten vier Probanden ohne SUI-Anzeige bzw. drei Probanden mit SUI-Anzeige die subjektive Kritikalität über der Toleranzschwelle (Tabelle 6-1).

Tabelle 6-1: Statische Infrastrukturelemente - Anteil subj. Kritikalitätswerte über Toleranzschwelle

| Kritikalitätswerte $\geq 7$         | Ohne SUI (Wdh.) | Mit SUI (Wdh.) | Ohne SUI (Erstkontakt) |
|-------------------------------------|-----------------|----------------|------------------------|
| Tempolimit nicht erkannt            | 4/ 34 (11,8 %)  | 3/ 34 (8,8 %)  | 4/ 34 (11,8 %)         |
| Tempolimit aufgehoben nicht erkannt | 0/ 34 (0 %)     | 0/ 34 (0 %)    | 0/ 34 (0 %)            |

Wegen der subjektiven Kritikalitätsurteile über der Toleranzschwelle ( $\geq 7$ ) werden für die Kontrollierbarkeitsentscheidung im Szenario „Tempolimit nicht erkannt“ die objektiven Messgrößen hinzugezogen.

Hierzu wird die Geschwindigkeit im Vergleich zur manuellen Baseline-Fahrt ausgewertet. Aufgrund der Instruktion der Probanden möglichst kraftstoffeffizient und somit vorausschauend zu fahren, wird die Geschwindigkeit 50 m vor Erreichen des Verkehrsschildes analysiert. Dieses ist ca. 130 m vor Beginn des Tempolimits frühestmöglich einsehbar, was bei hoher Fahreraufmerksamkeit und optimalen physischen Voraussetzungen (Sehfähigkeit) eine Reaktionszeit von 4,8 s erlaubt (bis zum Auswertepunkt, aufgrund der Ausgangsgeschwindigkeit von 16,67 m/s).

Die Geschwindigkeitsverteilung 50 m vor dem Verkehrsschild mit Tempolimit 30 km/h zeigt Abbildung 6-17. Aufgrund der drei nötigen paarweisen Vergleiche wird das Signifikanzniveau mittels Bonferroni-Korrektur auf  $\alpha = .017$  angepasst.

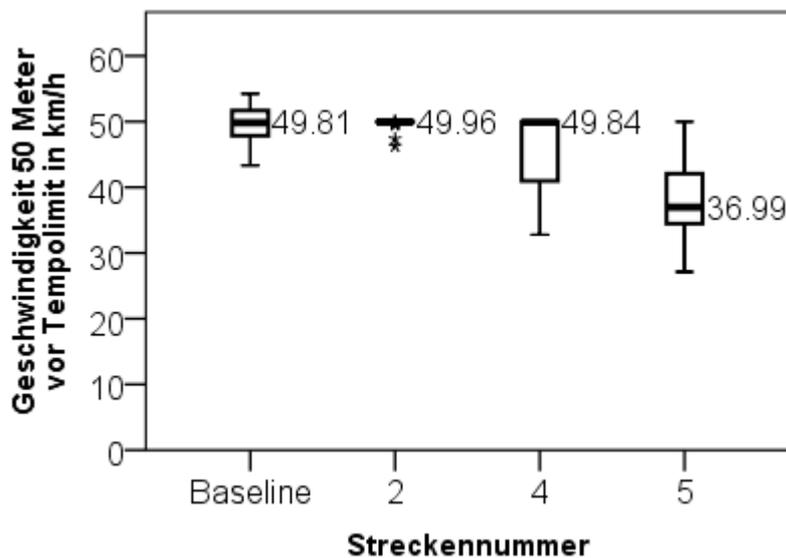


Abbildung 6-17: Vergleich der Geschwindigkeit 50 m vor dem Verkehrsschild mit Tempolimit 30 km/h

Beim erstmaligen Erleben des Systemfehlers ist die Geschwindigkeit 50 Meter vor Beginn des Tempolimits nicht signifikant höher als auf der manuellen Baselinefahrt ( $z = -.300, p = .765, r = -.05$ ).

Beim wiederholten Auftreten des Systemfehlers (Strecke 4) ist die Geschwindigkeit signifikant geringer als bei manueller Fahrt mit mittlerem bis großem Effekt ( $z = -2.66, p = .008, r = -.46$ ). Dieser Effekt ist noch größer, wenn auf der Fahrt beim wiederholten Auftreten des Systemfehlers (Strecke 5) die SUI präsentiert wird ( $z = -4.95, p < .001, r = -.85$ ).

Folglich ist auf Basis des Vergleichs zur manuellen Fahrt der Systemfehler im Szenario „Tempolimit nicht erkannt“ tolerierbar, weil keine signifikant höheren Geschwindigkeiten auftreten.

#### **Einfluss der SUI auf Kontrollierbarkeit (P-4)**

Der Einfluss der SUI auf die Kontrollierbarkeit wird lediglich für das Szenario „Tempolimit nicht erkannt“ analysiert, weil hier subjektive Kritikalitätsbewertungen über der Toleranzschwelle ( $\geq 7$ ) auftreten.

Hierbei ist zu beachten, dass sowohl die Präsentation der SUI als auch das wiederholte Auftreten einen Effekt auf die Messgrößen haben könnte. Diese beiden Aspekte werden nachfolgend getrennt analysiert.

Aufgrund des Versuchsdesigns lässt sich der Einfluss der SUI im Szenario B („Tempolimit nicht erkannt“) nur zwischen den Fahrten mit wiederholtem Erleben des Systemfehlers vergleichen.

Hinsichtlich der subjektiven Kritikalitätsurteile (Abbildung 6-18) lässt sich kein Unterschied zwischen der Fahrt mit SUI und ohne SUI nachweisen ( $z = -.656, p = .512, r = -.11$ ). Diesen subjektiven Urteilen stehen die objektiven Fahrdaten gegenüber.

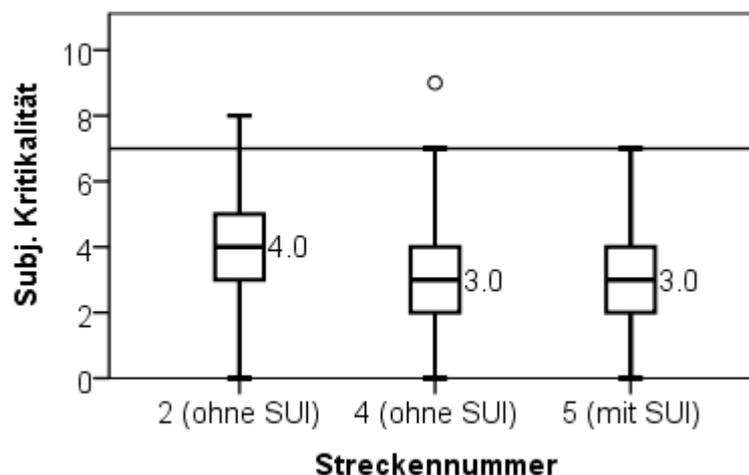


Abbildung 6-18: Subjektive Kritikalitätsbewertung nach nicht situationsgerechtem Automationsverhalten im Szenario „Tempolimit nicht erkannt“ (6.3.1); Strecke 2 stellt den Erstkontakt dar, während in Strecke 4 (ohne SUI) und Strecke 5 (mit SUI) der Fehler zum wiederholten Mal auftritt

Der Eingriffszeitpunkt (Abbildung 6-19) ist bei Präsentation der SUI signifikant früher als ohne SUI ( $t(22) = -1.75, p = .047, d = .50$ ).

Auch die für die Kontrollierbarkeitsbewertung verwendete Geschwindigkeit ist 50 m vor Beginn des Tempolimits (Abbildung 6-17) bei Präsentation der SUI signifikant niedriger als ohne SUI-Anzeige ( $z = -4.47, p < .001, r = -.77$ ).

Folglich führt die SUI-Anzeige im Szenario B („Tempolimit nicht erkannt“) objektiv zu einem früheren Eingriff in das FAS, einer frühzeitigeren Anpassung der Geschwindigkeit und somit zu einer höheren Kontrollierbarkeit.

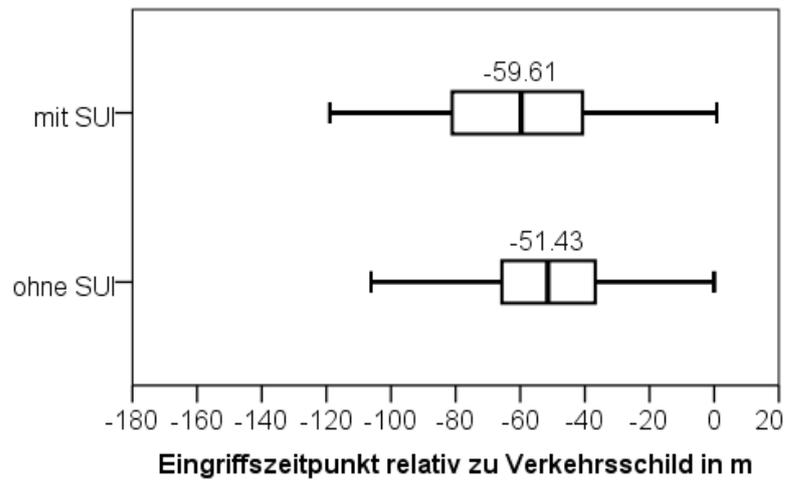


Abbildung 6-19: Einfluss der SUI auf Kontrollierbarkeit – Szenario „Tempolimit nicht erkannt“

Es lässt sich zudem für die betrachteten subjektiven und objektiven Messgrößen der Wiederholungs-Effekt analysieren (Vergleich Strecke zwei mit vier bzw. fünf).

Hinsichtlich der subjektiven Kritikalitätsbewertung ohne SUI-Anzeige zeigt sich nach wiederholtem Erleben des Systemfehlers ( $Mdn = 3.0$ ) im Vergleich zum Erstkontakt ( $Mdn = 4.0$ ) kein signifikanter Unterschied ( $z = -1.81, p = .070, r = -.31$ ). Die mittelgroße Effektstärke [Coh92] deutet jedoch an, dass dieser Effekt bei größerer Stichprobe (als  $N=34$ ) signifikant werden könnte.

Wird beim wiederholten Auftreten des Systemfehlers die SUI visualisiert ( $Mdn = 3.0$ ), so zeigt sich eine signifikant niedrigere subjektive Kritikalitätsbewertung als beim Erstkontakt ohne SUI ( $z = -2.20, p = .028, r = -.38$ ).

Im Vergleich zum Erstkontakt ist die Geschwindigkeit 50 m vor dem Tempolimit bei wiederholtem Erleben des Systemfehlers signifikant geringer ( $z = -2.92, p = .004, r = -.50$ ). Dieser Effekt ist noch größer, wenn beim wiederholten Erleben des Systemfehlers die SUI präsentiert wird ( $z = -4.83, p < .001, r = -.83$ ).

### 6.4.3.2 Dynamische Infrastrukturelemente

Nicht situationsgerechtes Automationsverhalten bei Regelung auf dynamische Infrastrukturelemente tritt auf den Strecken vier (mit SUI) und fünf (ohne SUI) auf. Die Fahrreihenfolge der Strecken wird permutiert, sodass die Hälfte der Probanden ihre vierte Fahrt mit SUI absolvieren, während dies für die andere Hälfte auf der fünften Fahrt der Fall ist (6.3.3).

#### Kontrollierbarkeitsbewertung (P-3)

Sowohl für das Szenario „LSA nicht erkannt“ als auch für „LSA falsch erkannt“ (Kap. 6.3.1) liegen mehr als 15 % der Probandenurteile über der Toleranzschwelle (Tabelle 6-2).

Tabelle 6-2: Dynamische Infrastrukturelemente - Anteil subj. Kritikalitätswerte über Toleranzschwelle

| Kritikalitätswerte $\geq 7$ | Ohne SUI (Strecke 4) | Mit SUI (Strecke 5) |
|-----------------------------|----------------------|---------------------|
| LSA nicht erkannt           | 16/ 34 (47,1 %)      | 13/ 33 (39,4 %)     |
| LSA falsch erkannt          | 22/ 34 (64,7 %)      | 15/ 34 (44,1 %)     |

Folglich ist das nicht situationsgerechte Automationsverhalten nicht tolerierbar. Jedoch stehen diesen subjektiven Daten die objektiven Eingriffszeitpunkte gegenüber.

Diese liegen für das Szenario „LSA nicht erkannt“ alle vor dem definierten Schwellwert von 46,3 m vor der LSA (Kap. 6.2.2.2), womit mittels konstanter Verzögerung von  $-3,0 \text{ m/s}^2$  der

Lkw vor der roten LSA zum Stillstand kommt (Abbildung 6-20). Jedoch greift jeweils ein Proband nicht ein und überfährt die rote LSA. Auf Nachfrage begründen sie ihr Verhalten, dass sie schauen wollten, was passieren wird.

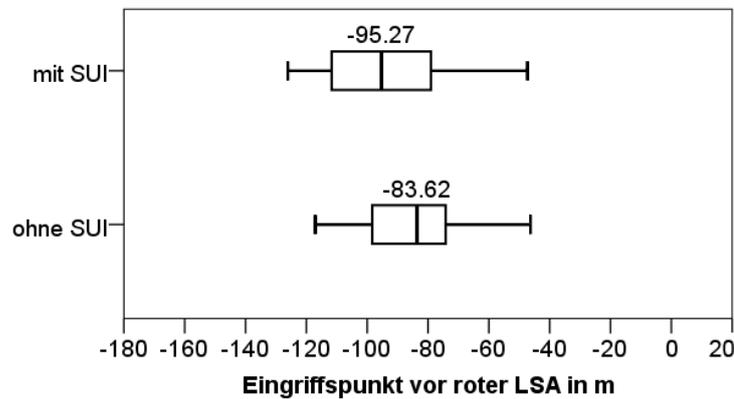


Abbildung 6-20: Eingriffszeitpunkt der Probanden auf der Fahrt mit SUI im Vergleich zu ohne SUI für das Szenario „LSA nicht erkannt“

Die hohen subjektiven Kritikalitätswerte können bei Betrachtung des als Unfallkriterium definierten Rotlichtverstoßes erklärt werden. Trotz des, bis auf die Ausnahme jeweils eines Probanden, frühzeitigen Eingriffszeitpunkts ist nach dem Unfallkriterium bei jeweils sieben Probanden ein Rotlichtverstoß feststellbar. Mögliche Erklärungen werden hierzu in Abschnitt 6.5 diskutiert.

Für das Szenario „LSA falsch erkannt“ ist der Eingriffszeitpunkt für die Fahrt mit SUI-Anzeige vergleichbar mit „LSA nicht erkannt“. Dagegen erfolgt der Eingriff ohne SUI-Anzeige deutlich später (Abbildung 6-21). Während ohne SUI acht Probanden den Schwellenwert für eine ausreichende, konstante Verzögerung von  $-3\text{m/s}^2$  überschreiten, trifft dies mit Präsentation der SUI auf zwei Probanden zu. Trotz der Überschreitung des Schwellenwertes wäre ein Stillstand vor der roten LSA mit einer Verzögerung von  $-5.7\text{m/s}^2$  möglich gewesen. Wie in der Situation „LSA nicht erkannt“ übersteuert jeweils ein Proband das FAS nicht.

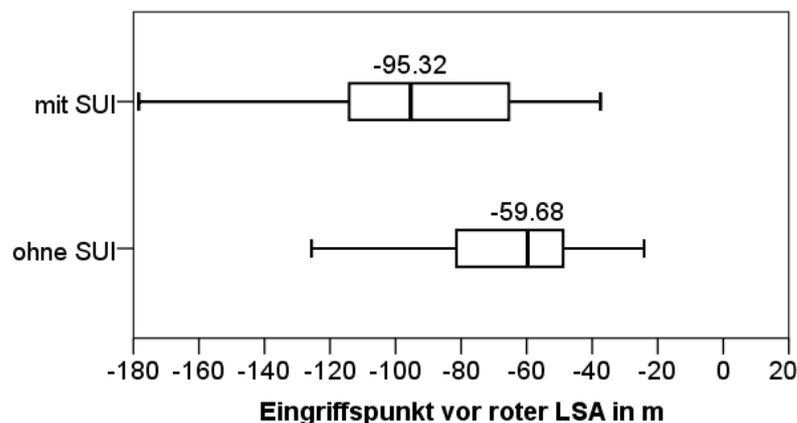


Abbildung 6-21: Eingriffszeitpunkt Szenario „LSA falsch erkannt“ im Vergleich zwischen mit und ohne SUI

Die Anzahl der als Unfallkriterium betrachteten Rotlichtverstoße zeigt für die Fahrt mit SUI 10 (29,4 %) im Vergleich zu 20 (60,6 %) ohne visualisierter SUI.

Folglich ist das nicht situationsgerechte Automationsverhalten in beiden Szenarien sowohl auf Basis der subjektiven Urteile (nach dem in 6.2.3 spezifizierten Vorgehen) als auch hinsichtlich des Unfallkriteriums nicht tolerierbar.

Diesen Ergebnissen steht der Eingriffszeitpunkt der Probanden gegenüber. Bis auf jeweils eine Ausnahme, die sich durch höheres Sicherheitsgefühl im Fahrsimulator begründen

lässt, übersteuern alle Probanden das FAS, sodass sie (mit einer maximalen Verzögerung von  $5.7\text{m/s}^2$ ) vor der LSA zum Stillstand gekommen wären. Für Erklärungsansätze wird auf die Diskussion (Kap. 6.5.3.1) verwiesen.

#### **Einfluss der SUI auf Kontrollierbarkeit (P-4)**

Für das Szenario „LSA nicht erkannt“ ist die subjektive Kritikalitätsbewertung mit SUI-Anzeige ( $Mdn = 5.0$ ) signifikant niedriger als ohne SUI-Anzeige ( $Mdn = 6.0; z = -2.30, p = .022, r = -.39$ ). Für das Szenario „LSA falsch erkannt“ ist dieser Effekt noch größer (ohne SUI  $Mdn = 9.0$ ; mit SUI  $Mdn = 6.0; z = -3.33, p = .001, r = -.57$ ).

Für die interferenzstatistische Auswertung hinsichtlich des Effekts der SUI auf die objektiven Fahrdaten kann der einseitige T-Test eingesetzt werden.

Mit SUI greifen die Probanden im Szenario „LSA nicht erkannt“ signifikant früher in das FAS ein als ohne SUI-Anzeige ( $t(28) = -1.78, p = .043, d = .34$ ). Dieser Effekt ist für das Szenario „LSA falsch erkannt“ noch größer ( $t(29) = -3.91, p < .001, d = .81$ ).

Somit führt die Präsentation der SUI in beiden Szenarien mit dynamischen Infrastrukturelementen zu einem früheren Eingriff und geringerer subjektiver Kritikalitätsbewertung. Trotz höherer Kontrollierbarkeit ist das nicht situationsgerechte Verhalten in den betrachteten Szenarien (C und D) auch mit SUI-Anzeige nicht tolerierbar.

Auffällig ist, dass mit Präsentation der SUI fünf Probanden vor dem Phasenwechsel auf Rot im Szenario „LSA nicht erkannt“ das FAS übersteuern. Im Szenario „LSA falsch erkannt“ übersteuern sechs Probanden das FAS vorzeitig mit SUI-Anzeige und sogar ein Proband ohne SUI. Für mögliche Erklärungen wird auf die Diskussion (Kap. 6.5.3.1) verwiesen.

#### **6.4.3.3 Umgebungsverkehr**

Nicht situationsgerechtes Automationsverhalten bei Regelung auf Umgebungsverkehr, der die Fahrstreifenbreite einschränkt, tritt auf den Strecken vier (ohne SUI) und fünf (mit SUI) auf. Diese Situationen sind zudem in der manuellen Baseline-Fahrt enthalten.

#### **Kontrollierbarkeitsbewertung (P-3)**

Für das Szenario E, in dem ein parkendes Fahrzeug die Fahrstreifenbreite einschränkt, liegen weniger als 15 % der Probandenurteile über der Toleranzschwelle, während dies für das Szenario F „abbiegender Lkw“ mehr als 15 % sind (Tabelle 6-3).

Daher ist das nicht situationsgerechte Automationsverhalten für das Szenario „abbiegender Lkw“ nicht tolerierbar.

Einhergehend mit den hohen subjektiven Kritikalitätsurteilen greift im Szenario „abbiegender Lkw“ jeweils derselbe Proband nicht ein, was zu einem Unfall führt.

Tabelle 6-3: Umgebungsverkehr - Anteil subj. Kritikalitätswerte über Kritikalitätsschwelle

| Kritikalitätswerte $\geq 7$ | Ohne SUI (Strecke 4) | Mit SUI (Strecke 5) | Baseline manuell |
|-----------------------------|----------------------|---------------------|------------------|
| Parkendes Fzg               | 2/ 34 (5,9 %)        | 4/ 34 (11,8 %)      | 0/ 34 (0 %)      |
| Abbiegender Lkw             | 10/ 34 (29,4 %)      | 11/ 34 (32,4 %)     | 0/ 34 (0 %)      |

Aufgrund der subjektiven Kritikalitätsbewertung ( $< 15\%$  über Toleranzschwelle) wird zur Kontrollierbarkeitsentscheidung für das Szenario „parkendes Fahrzeug“ das objektive Unfallkriterium hinzugezogen: Auf beiden Fahrten (mit und ohne SUI) tritt kein Unfall auf, weshalb das nicht situationsgerechte Automationsverhalten tolerierbar ist.

Folglich ist im Szenario „abbiegender Lkw“ sowohl hinsichtlich der subjektiven Urteile als auch auf Basis des Unfallkriteriums das nicht situationsgerechte Automationsverhalten nicht tolerierbar, während dies im Szenario „parkendes Fahrzeug“ trotz hoher Kritikalitätswerte noch tolerierbar ist.

#### **Einfluss der SUI auf Kontrollierbarkeit (P-4)**

Bei der subjektiven Kritikalitätsbewertung zeigt sich für das Szenario „parkendes Fahrzeug“ kein signifikanter Unterschied zwischen mit ( $Mdn = 2.0$ ) und ohne SUI-Anzeige ( $Mdn = 2.0$ ). Dies ist ebenso der Fall für das Szenario „abbiegender Lkw“ (*ohne SUI*  $Mdn = 4.0$ ; *mit SUI*  $Mdn = 4.5$ ).

Somit hat die SUI keinen Effekt auf die Kontrollierbarkeit für die betrachteten Szenarien bei Regelung auf Umgebungsverkehr (parkendes Fahrzeug, abbiegender Lkw).

## **6.5 Diskussion der Evaluationsergebnisse**

Nachfolgend werden die Ergebnisse zu den in Abschnitt 6.1 spezifizierten Programmfragen diskutiert und ein abschließendes Fazit gezogen.

### **6.5.1 Diskussion des Einflusses von erstmaligem nicht situationsgerechtem Automationsverhalten auf die Gesamtbewertung (P-1)**

Das erstmalige Erleben von nicht situationsgerechtem Verhalten der automatisierten Längsführung zeigt keinen länger anhaltenden, negativen Effekt auf die Gesamtbewertung. Zwar sinkt die Usability-Bewertung signifikant nach der Fahrt mit zwei Systemfehlern, sie steigt jedoch unmittelbar auf der nachfolgenden Fahrt ohne Systemfehler signifikant über den Wert der ersten Fahrt ohne Systemfehler an.

Hinsichtlich der Bewertung von Vertrauen und Akzeptanz kann kein signifikanter Rückgang nach der Fahrt mit zwei Systemfehlern im Vergleich zur ersten Fahrt ohne Systemfehler nachgewiesen werden. Diese Erkenntnis geht einher mit [Beg13, S. 55]: „Actually occurring system failures do not affect trust and acceptance in a negative way if they are known beforehand“. Nach [Lee04] ist die fehlende Vorhersagbarkeit entscheidend für den negativen Einfluss, nicht die Schwere des Systemfehlers. Aufgrund der vorausschauenden Regelung und der langen Ausrollwege haben die Probanden für die Wahrnehmung und die Entscheidung über den Systemeingriff ein ausreichendes Zeitbudget zur Verfügung. Zudem kann abgeleitet werden, dass die kontinuierlich dargestellten Informationseinheiten im Kombidisplay ausreichen, um, wie in der Aufgabenanalyse modelliert (Kap. 4.3.2), die Entscheidung über den Systemeingriff zu treffen.

Im direkten Vergleich der Vertrauensbewertung vor und nach jeder Fahrt (Abbildung 6-22), steigt das Vertrauen signifikant nach positiver Systemerfahrung und sinkt signifikant nach negativer Systemerfahrung. Diese Erkenntnisse gehen einher mit anderen Studien [Ant05, S. 10; Lee04; Mui87, S. 532] sowie den Ergebnissen aus der Fokusgruppe mit Lkw-Fahrern (Kap. 4.2.2.3).

Entgegen der Aussagen von [Mui87, S. 535], dass einmal verlorenes Vertrauen in ein System schwer wieder aufzubauen ist, zeigen die Ergebnisse zur ersten Programmfrage (P-1), dass das Vertrauen auf der unmittelbar darauffolgenden Fahrt wieder steigt (Abbildung 6-22).

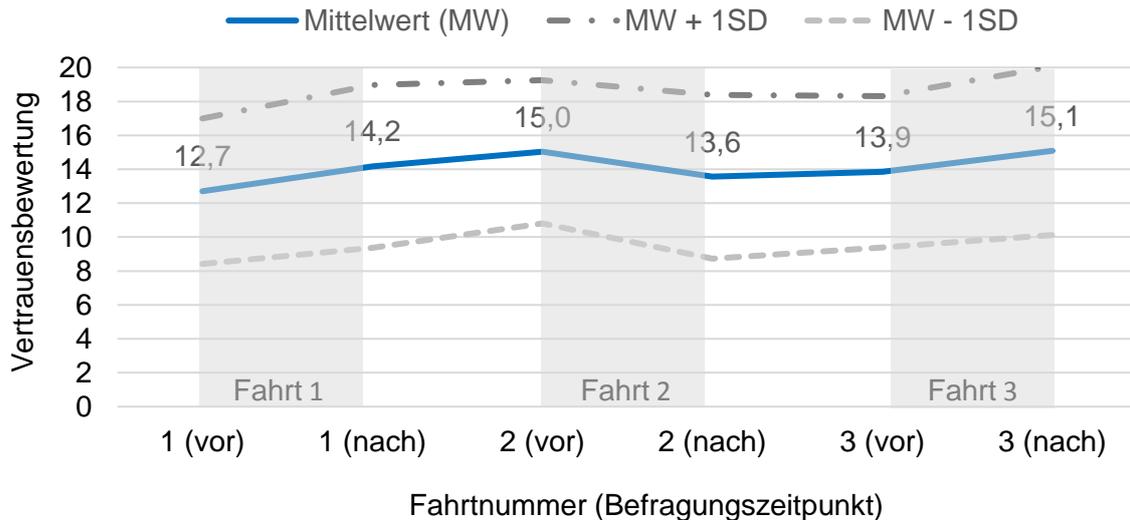


Abbildung 6-22: Vertrauensbewertung jeweils vor und nach jeder Fahrt (die Fahrten sind grau hinterlegt)

Weiterhin führen die Systemfehler nicht zu einer höheren Fahrerbeanspruchung: Zwischen den Fahrten mit 100 % Systemzuverlässigkeit und der Fahrt mit zwei Systemfehlern ist kein signifikanter Unterschied in der subjektiven Fahrerbeanspruchung nachweisbar.

Die Herausforderung in der ersten Phase der Situationsanalyse (Kap. 4.3.3) ist die Wirksamkeit des FAS, welche durch fehlendes Vertrauen und folglich unerwünschte Systemeingriffe reduziert werden könnte. Hier führt das erstmalige Erleben von zwei Systemfehlern zu keiner Reduktion der Wirksamkeit, weil auf der nachfolgenden Fahrt kein Proband beim Erkennen derselben Situation frühzeitig eingreift. Daraus kann geschlossen werden, dass die Probanden das Systemverhalten aufgrund der Informationen der HMI-Ebene ausreichend beobachten können und nicht längerfristig die Systemfähigkeit in derselben Situation mit zuvor erlebtem Systemfehler anzweifeln.

Somit kann für die erste Programmfrage festgehalten werden, dass für die untersuchten Szenarien A und B (Kap. 6.3.1) das erstmalige Erleben von nicht situationsgerechtem Automationsverhalten keinen länger anhaltenden negativen Effekt auf die untersuchten Messgrößen zur Gesamtbewertung hat.

Limitation dieser Studie ist, dass lediglich zwei statische Szenarien untersucht werden. So ist das als temporäre Baustelle ausgestaltete Szenario A „Tempolimit nicht erkannt“ relativ unkritisch implementiert, indem die Fahrstreifenbreite trotz Warnbaken nicht eingeschränkt ist und sich auch keine Bauarbeiter unmittelbar neben dem Fahrstreifen befinden. Hier ist offen, ob eine kritischere Gestaltung der Szenarien einen länger anhaltenden, negativen Effekt haben könnte.

### 6.5.2 Diskussion des Einflusses der SUI auf die Gesamtbewertung (P-2)

Die Ergebnisse zur intuitiven Verständlichkeit der SUI-Visualisierung zeigen, dass die große Mehrheit der Probanden (76,5 %) bereits nach einer zehnmütigen Versuchsfahrt die Bedeutung der SUI-Anzeige ohne vorherige Einweisung korrekt erklären kann. Durch längeren Kontakt mit dem FAS, wie bei Berufskraftfahrern gegeben, lässt sich aufgrund der kontinuierlichen Darstellung der SUI die intuitive Erlernbarkeit dieser Informationseinheit annehmen.

Die Messgrößen Usability und Vertrauen, die sensibel auf das nicht situationsgerechte Verhalten reagieren (Kap. 6.4.1), sinken durch die Präsentation der SUI weniger stark ab als ohne SUI-Anzeige. Diese Erkenntnisse gehen einher mit [Bel13, S. 1136f], der den Effekt der SUI bei hochautomatisierter Fahrt untersucht.

Die durch einen Rahmen um den FAS-Bereich kontinuierlich visualisierte SUI führt im Untersuchungskontext dieser Arbeit zu höherer Beobachtbarkeit, größerer Systemtransparenz und einem besseren Systemverständnis der Probanden. Gleichzeitig wird durch die Darstellung einer weiteren Informationseinheit die Fahrerbeanspruchung nicht erhöht.

Folglich hat die SUI-Anzeige einen positiven Effekt auf die Messgrößen zur Gesamtbewertung.

### **6.5.3 Diskussion der Kontrollierbarkeitsbewertung (P-3) mit Einfluss SUI (P-4)**

Die Diskussion der dritten Programmfrage zur Kontrollierbarkeitsbewertung sowie der vierten Programmfrage zum Einfluss der SUI auf die Kontrollierbarkeit wird nachfolgend für die Testszenarien zur Regelung auf statische und dynamische Infrastrukturelemente sowie auf Umgebungsverkehr durchgeführt.

#### **6.5.3.1 Statische Infrastrukturelemente – Diskussion Kontrollierbarkeit (P-3)**

Auf Basis der subjektiven Kritikalitätsurteile ist das nicht situationsgerechte Automationsverhalten im Szenario „Tempolimit aufgehoben nicht erkannt“ tolerierbar.

Für die Kontrollierbarkeitsentscheidung im Szenario „Tempolimit nicht erkannt“, wird aufgrund der subjektiven Kritikalitätswerte (<15 % über der Toleranzschwelle) die vom Eingriffszeitpunkt abgeleitete, objektive Größe der Geschwindigkeit hinzugezogen.

Bei Erstkontakt mit dem Systemfehler tritt keine signifikant höhere Geschwindigkeit im Vergleich zur Baseline-Fahrt auf. Bei wiederholtem Erleben des Systemfehlers ist die Geschwindigkeit sogar signifikant geringer als bei manueller Fahrt (mit und ohne SUI).

Folglich ist die Forderung des ESOP erfüllt: das FAS soll die „(...) Sicherheit im Straßenverkehr erhöhen oder zumindest nicht beeinträchtigen“ [Eur06, S. 7].

Auffällig ist die hohe mittlere Geschwindigkeit auf der manuellen Baseline-Fahrt (Abbildung 6-23). So liegt der Geschwindigkeitsbereich der 34 Probanden zu Beginn des Tempolimits zwischen 30,1 km/h und 53,8 km/h ( $MW = 42,3 \text{ km/h}$ ;  $SD = 7,1 \text{ km/h}$ ). Dies kann auf die wenig dringliche Gestaltung des Szenarios zurückgeführt werden: die temporäre Baustelle mit einem Tempolimit von 30 km/h hat zwar Warnbaken neben dem Fahrstreifen, dessen Breite ist jedoch nicht eingeschränkt (Kap. 6.3.1.1). Zudem befinden sich auch keine Bauarbeiter unmittelbar neben dem Fahrstreifen.

Nach [Dam13, S. 54] muss „[n]eben den Faktoren, die die tatsächliche Fähigkeit zum Eingreifen limitieren, (...) auch die subjektiv empfundene Dringlichkeit eines Eingriffs berücksichtigt werden.“ Demnach spielt der Eingriffswille und nicht nur die Eingriffsfähigkeit eine Rolle. Folglich hätte durch eine dringlichere Gestaltung die Geschwindigkeit der manuellen Baseline-Fahrt verringert und die Anzahl der Eingriffe der Systemfahrten erhöht werden können. Hier greifen auf der zweiten Strecke beim erstmaligen Erleben des Systemfehlers 13 Probanden nicht in das FAS ein, während es bei wiederholtem Erleben ohne SUI fünf und mit SUI vier sind.

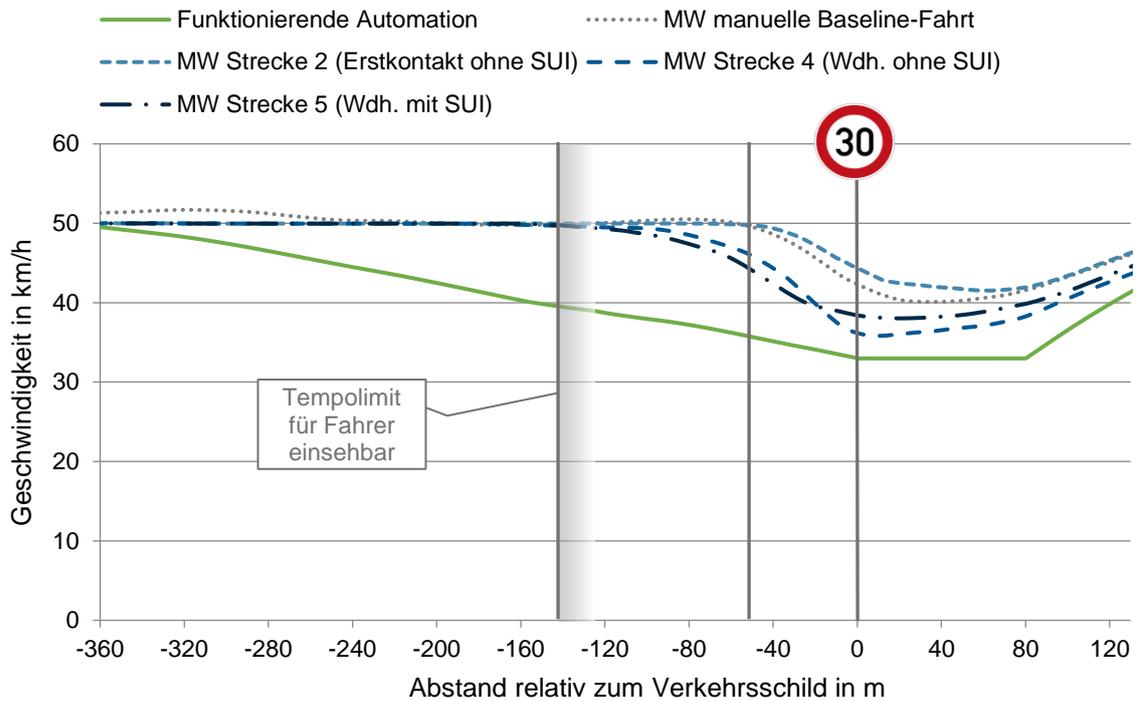


Abbildung 6-23: Vergleich der Geschwindigkeitsverläufe – Szenario „Tempolimit nicht erkannt“

Im Gegensatz zu CC- und ACC-Studien von [Nie09; Vol10, S. 35f], in denen die manuellen Geschwindigkeitsanpassungen bei aktiven Längsführungssystemen um fünf bis 20 Sekunden verzögert stattfindet (Kap. 2.2.3.4), tritt dieser Effekt nicht auf. Die kontinuierlich dargestellten Informationen der HMI-Ebene in Verbindung mit einem hohen Zeitbudget aufgrund der vorausschauenden Regelung erzielen eine vergleichbare (Erstkontakt) bzw. frühere (Wiederholung mit/ ohne SUI) Geschwindigkeitsanpassung durch den Systemeingriff.

Folglich hat das wiederholte Erleben einen positiven Effekt auf die Sicherheit, während das erstmalige Erleben des Systemfehlers in beiden Szenarien kontrollierbar ist.

Eine Limitation ist die wenig dringliche Gestaltung des Szenarios „Tempolimit nicht erkannt“. Auch kann aufgrund der kurzen Versuchsdauer (fünf ca. zehninminütige Fahrten) keine Aussage über Langzeiteffekte getroffen werden.

### 6.5.3.2 Statische Infrastrukturelemente – Diskussion Einfluss SUI (P-4)

Die SUI führt im Szenario „Tempolimit nicht erkannt“ auch bei wiederholtem Auftreten des Systemfehlers zu früheren Eingriffen des Fahrers und einer frühzeitigen Geschwindigkeitsanpassung im Vergleich zur Fahrt ohne SUI. Zudem sind geringere maximale Bremsverzögerungen feststellbar.

Dieser positive Effekt der SUI kann einerseits durch höhere Beobachtbarkeit des Systemverhaltens aufgrund höherer Systemtransparenz erklärt werden. Andererseits kann die Gestaltung der SUI-Anzeige (rote Rahmen, 5.4.2) zu höherer Aufmerksamkeit und somit einem häufigeren Abgleich zwischen der erwarteten und der Ist-Geschwindigkeit, wie in der Aufgabenanalyse (Kap. 4.3.2) modelliert, führen.

Auffällig ist, dass bei wiederholtem Systemfehler, wie in Abbildung 6-23 dargestellt, die Geschwindigkeit mit SUI-Anzeige zwar frühzeitiger angepasst wird, jedoch zu Beginn des Tempolimits signifikant höher als ohne SUI ist.

Folglich liegt die Geschwindigkeit mit SUI während des Tempolimits näher an der manuellen Baseline-Fahrt. Die Probanden werden aufgrund der SUI weniger überrascht, haben

ein größeres Zeitbudget und können vorausschauender handeln. Es ist anzunehmen, dass die Geschwindigkeit mit SUI bei kritischerer Szenariogestaltung (engerer Fahrstreifen in Baustelle, anwesende Bauarbeiter) geringer wäre.

Einschränkung aufgrund des Versuchsdesigns ist, dass der Effekt der SUI in diesem Szenario nur bei wiederholtem Systemfehler analysierbar ist. Bei Erstkontakt mit dem Systemfehler ist anzunehmen, dass der positive Effekt der SUI auf die Kontrollierbarkeit noch größer ausfällt, aufgrund der höheren Systemtransparenz. Zur Verifikation dieser Hypothese besteht weiterer Untersuchungsbedarf.

### **6.5.3.3 Dynamische Infrastrukturelemente – Diskussion Kontrollierbarkeit (P-3)**

Die zwei betrachteten Szenarien („LSA nicht erkannt“ und „LSA falsch erkannt“) zur Regelung auf dynamische Infrastrukturelemente sind sowohl hinsichtlich der subjektiven Kritikalitätsurteile als auch auf Basis des Unfallkriteriums (Rotlichtverstoß) nicht kontrollierbar.

Die Gestaltung beider Szenarien ist jedoch sehr kritisch: Der Phasenwechsel der LSA von Grün auf Rot geschieht erst 120 m vor der LSA. So bleiben den Probanden bis zur definierten Schwelle (Stillstand vor LSA mit  $-3 \text{ m/s}^2$  Verzögerung, 6.3.1.5) eine Reaktionszeit von 4,4 s.

Auffällig ist, dass der Eingriffszeitpunkt bei allen Probanden (mit Ausnahme von jeweils einem Probanden, aufgrund des höheren Sicherheitsgefühls im Fahrsimulator) im Szenario „LSA nicht erkannt“ vor der definierten Schwelle liegt. Folglich übersteuern die Probanden das FAS rechtzeitig. Dies geht einher mit Studien aus der Unfallursachenforschung: „(...) der Fahrer reagiert in einer kritischen Situation zwar schnell aber zu zaghaft“ [Bre12, S. 59].

Weiterhin übersteuern Probanden das FAS bereits vor dem Phasenwechsel der LSA und damit in Phase 1 bzw. 2 (Situationsanalyse, 4.3.3) vor der Verifikationsmöglichkeit mit der Realität. Im Szenario „LSA nicht erkannt“ sind dies mit SUI-Anzeige fünf Probanden, während dies im Szenario „LSA falsch erkannt“ mit SUI-Anzeige sechs und ohne SUI fünf sind. Daraus lässt sich ein Vertrauensverlust ableiten, sodass die Probanden bereits frühzeitig übernehmen. Dieser Effekt kann durch die Häufung der Systemfehler (sechs Fehler auf einer zehnminütigen Fahrt) verursacht und durch die hohe Kritikalitätsbewertung der LSA-Situationen verstärkt werden.

Zudem ist die Leuchtstärke der LSA-Phase im Fahrsimulator nicht höher als die Pixel der Umgebung. Daher kann die Erkennbarkeit der LSA Phase im Vergleich zum realen Straßenverkehr schwieriger sein. Diese Unsicherheit könnte den Vertrauensverlust verstärken, was zu einer vorzeitigen Übernahme führt.

Hier könnte eine Studie im Realfahrzeug auf dem Testgelände weitere Erkenntnisse liefern, inwiefern die Simulationsumgebung als Störeffekt Einfluss nimmt.

Die Untersuchung der beiden LSA-Szenarien zielt auf eine Worst-Case-Abschätzung der Kontrollierbarkeit auf Basis der kontinuierlich dargestellten Informationseinheiten im Kombidisplay ab. Auch aufgrund der kritischen Parametrierung ist das nicht situationsgerechte Verhalten in beiden Szenarien nicht tolerierbar.

Eine veränderte Fahrstrategie auf Funktions-Ebene, die dem Fahrer ein größeres Zeitbudget für die Entscheidung und Aktionsauswahl erlaubt, könnte hier Abhilfe schaffen. Weiterhin könnte eine auffälliger Gestaltung des HMI in Form einer expliziten (akustischen) Übernahmeaufforderung die Kontrollierbarkeit erhöhen.

#### **6.5.3.4 Dynamische Infrastrukturelemente – Diskussion Einfluss SUI (P-4)**

Die Präsentation der SUI führt in beiden Szenarien (C und D) zu einem signifikant früheren Eingriff der Fahrer. Somit hat die SUI einen positiven Effekt auf die Kontrollierbarkeit bei nicht situationsgerechtem Automationsverhalten. Dies lässt sich durch eine höhere Beobachtbarkeit und folglich höhere Systemtransparenz begründet. Zudem kann die SUI bei der Kritikalitätsabwägung (Aufgabenanalyse, 4.3.2) als Aufmerksamkeitsfaktor sowie als Eingriffs-Bestätigung dienen.

Trotz der höheren Kontrollierbarkeit durch die SUI-Anzeige ist das nicht situationsgerechte Automationsverhalten aufgrund der kritischen Parametrierung der Szenarien und teilweise zu zaghafter Verzögerung der Probanden nicht tolerierbar.

#### **6.5.3.5 Umgebungsverkehr – Diskussion Kontrollierbarkeit (P-3)**

Im Szenario „parkendes Fahrzeug“ ist dieses für die Probanden rund 240 m vorher einsehbar. Aufgrund des großen Zeitbudgets sowie ggf. aufgrund bekannter Verhaltensmuster durch ACC-Nutzung ist das nicht situationsgerechte Verhalten tolerierbar.

Ohne SUI-Anzeige übersteuern neun Probanden das FAS mittels Bremspedal, während mit SUI-Anzeige dies lediglich fünf sind. Die restlichen Probanden lösen das Szenario kraftstoffeffizienter, indem Sie eine Lücke im Umgebungsverkehr für einen Spurwechsel auf den linken Fahrstreifen nutzen.

Für das Szenario „abbiegender Lkw“ steht den Probanden ein geringes Zeitbudget für die Entscheidung und Aktionsauswahl zur Verfügung. Dies könnte die hohen subjektiven Kritikalitätsurteile begründen. Aufgrund dessen ist das nicht situationsgerechte Automationsverhalten nicht tolerierbar. Auf Basis des objektiven Unfallkriteriums greift sowohl mit als auch ohne SUI-Anzeige derselbe Proband nicht ein. Hier zeigt sich, dass Kontrollierbarkeitsentscheidungen auf Basis von subjektiven Daten konservativer ausfallen. Der fehlende Eingriff des einen Probanden ist wieder auf höheres Sicherheitsgefühl im Fahrsimulator zurückzuführen.

Zudem ist zu beachten, dass im Vergleich zu Realfahrzeugstudien Einschätzungen mittels Fahrsimulation konservativer ausfallen können [Neu14, S. 125].

#### **6.5.3.6 Umgebungsverkehr – Diskussion Einfluss SUI (P-4)**

In beiden Szenarien (E und F, 6.3.1.3) zeigt sich kein Effekt durch die SUI-Anzeige.

Für das Szenario „parkende Fahrzeug“ kann dies mit der Kontrollierbarkeit aufgrund des hohen Zeitbudgets sowie ggf. auf Basis bekannter Verhaltensmuster durch ACC-Nutzung erklärt werden.

Dagegen wird im Szenario „abbiegender Lkw“ aufgrund der Daten-Ebene (Kap. 3.2.1) die SUI-Anzeige erst ca. 70 m vorher ausgegeben. Folglich kann die SUI im Gegensatz zur frühzeitigen Anzeige in den Szenarien A bis D zu keiner höheren Kontrollierbarkeit führen.

Daraus lässt sich ableiten, dass die SUI-Anzeige vor allem durch die Erhöhung des Zeitbudgets bei vorausschauender Visualisierung einen positiven Effekt auf die Kontrollierbarkeit hat.

### **6.5.4 Fazit**

In der Abschlussbefragung zur Systemakzeptanz antworten 94,1 % (32/34) der Probanden, dass sie die automatisierte, kraftstoffeffiziente Längsführung in ihrem Lkw nutzen würden.

Zwei Probanden, die das FAS nicht nutzen würden, begründen dies mit fehlendem Vertrauen, vor allem bei Regelung auf dynamische Infrastrukturelemente.

Hier zeigt sich im Vergleich zur Fokusgruppe mit Lkw-Fahrern (Kap. 4.2.2), dass sich das Systemerleben positiv auf die Akzeptanz auswirkt, obwohl mitunter nicht situationsgerechtes Automationsverhalten erfahren wurde.

Nach allen Messfahrten werden die Probanden gebeten, die erlebten Szenarien mit nicht situationsgerechtem Verhalten hinsichtlich ihrer Kritikalität in eine Rangreihenfolge zu bringen (Abbildung 6-24, Transformation der Punktezahl in Anhang H).

Während das nicht situationsgerechte Automationsverhalten in den drei mit höchsten Kritikalitätswerten bewerteten Szenarien (C, D und F) nicht tolerierbar ist, so ist dies für die drei weniger kritisch bewerteten Szenarien (A, B und E) tolerierbar.

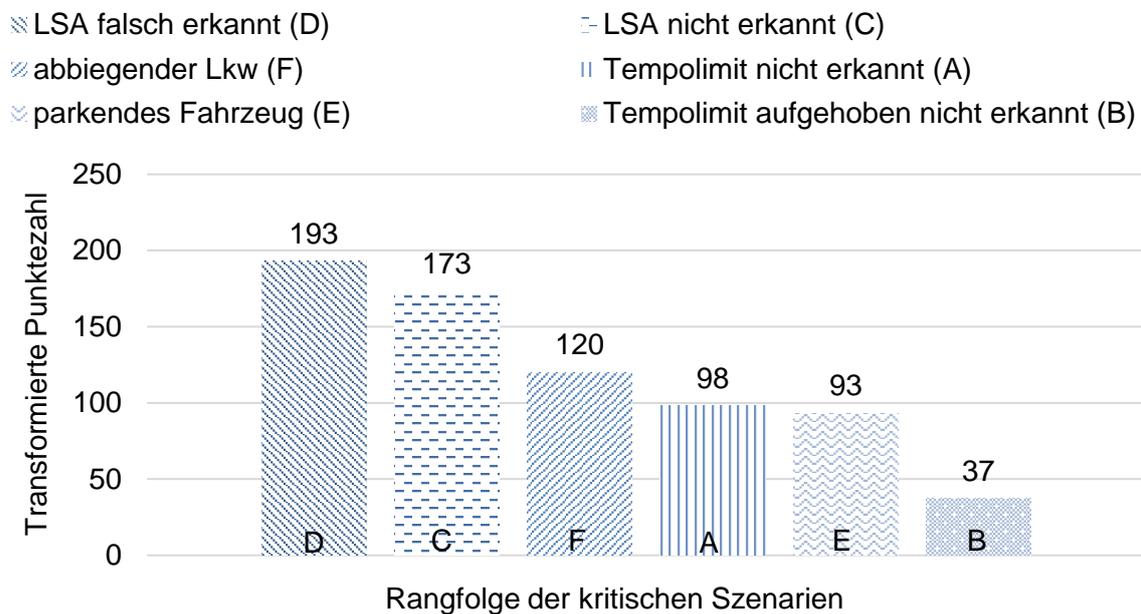


Abbildung 6-24: Transformierte Darstellung der Rangfolge der kritischen Situationen (N=34); eine hohe Punktezahl korrespondiert mit einer hohen Kritikalitätsbewertung (Anhang H)

Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass die Präsentation der SUI in Form aufmerksamkeitsgenerierender, roter Rahmen die Systemtransparenz erhöht und die Kontrollierbarkeit fördert. So kann der in Abbildung 6-25 dargestellt Zusammenhang der drei Forschungsfragen (Kap. 3.2.3) bestätigt werden.

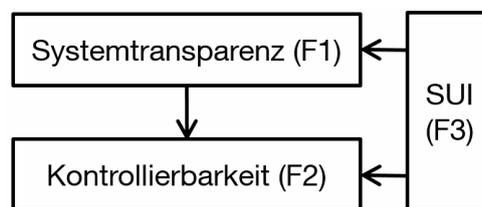


Abbildung 6-25: Erkenntnisse zum Zusammenhang der drei Forschungsfragen zur Systemtransparenz, Kontrollierbarkeit sowie Systemunsicherheitsinformation (SUI)

Durch das erarbeitete Vorgehen zur Auswahl der Testszenarien (Kap. 6.2.1) konnten Szenarien unterschiedlicher Kritikalität eingesetzt werden. Der von [Neu08a; Neu08b] genutzte Ansatz mehrdimensionaler Messgrößen konnte für die vorliegende Fragestellung übertra-

gen werden. Zudem hat sich eine hohe Übereinstimmung der subjektiven Urteile im Vergleich zu den von der Aufgabenanalyse (Kap. 4.3.2) abgeleiteten objektiven Messgrößen gezeigt.

Es kann hinsichtlich der Kontrollierbarkeitsentscheidung lediglich eine Aussage für die hier eingesetzte Parametrierung der Szenarien (erster Sichtkontakt, Differenzgeschwindigkeiten, etc.) getroffen werden. Jedoch können in der Realität vielfältige Ausprägungen der Szenarien auftreten. Über eine Worst-Case-Argumentation lässt sich für die tolerierbaren Systemfehler die Kontrollierbarkeit in weniger kritischen Szenarioausprägungen annehmen. Inwiefern weiterführende Ansätze eine Kontrollierbarkeitsbewertung für verschiedene Ausprägungen eines Testszenarios treffen können, wird im Ausblick diskutiert (7.2).

Eine weitere Limitation der summativen Fahrsimulatorstudie ist die ausschließliche Betrachtung von Kurzzeiteffekten. Zwar kann nicht situationsgerechtes Automationsverhalten bei nur kurzer Systemerfahrung schwieriger zu kontrollieren sein, jedoch sollten Langzeit- und Gewöhnungseffekte in zukünftigen Studien betrachtet werden. Dabei sollten auch mögliche Effekte auf die Kontrollierbarkeit wie Nebenaufgaben oder unterschiedliche Fahrerzustände (z. B. eine verringerte Vigilanz aufgrund langer Arbeitszeiten oder Stress durch Termindruck) berücksichtigt werden.

Inwiefern ein möglicherweise höheres Sicherheitsgefühl im Fahrsimulator einen Störeffekt darstellt, kann über eine Realfahrzeugstudie auf dem Testgelände ermittelt werden.

Weiterer Forschungsbedarf besteht in der Frage, ob die Visualisierung der Informationseinheiten im kontaktanalogen HUD die Kontrollierbarkeit erhöhen kann.

### 6.5.5 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Es lassen sich folgende Erkenntnisse hinsichtlich der in Abschnitt 6.1 definierten Programmfragen festhalten:

- **P-1 Gesamtbewertung nach nicht situationsgerechtem Verhalten:**  
Das Erleben von nicht situationsgerechtem Automationsverhalten führt in den betrachteten Szenarien zu keinem länger anhaltenden, negativen Effekt hinsichtlich Usability und Vertrauen in das FAS.
- **P-2 Einfluss SUI auf Gesamtbewertung:**  
Die Präsentation der SUI erhöht Usability und Vertrauen in das FAS signifikant.
- **P-3 Kontrollierbarkeit:**  
Das nicht situationsgerechte Automationsverhalten bei Regelung auf statische Infrastrukturelemente sowie statischen Umgebungsverkehr ist für die betrachteten Szenarien kontrollierbar. Dagegen sind die Szenarien mit Regelung auf dynamische Infrastrukturelemente für die untersuchte, kritische Parametrierung nicht kontrollierbar. Das Gleiche gilt für die Regelung auf dynamischen Umgebungsverkehr.
- **P-4 Einfluss SUI auf Kontrollierbarkeit:**  
Die Präsentation der SUI hat bei Regelung auf statische und dynamische Infrastrukturelemente einen positiven Effekt auf die Kontrollierbarkeit und führt zu einem signifikant früheren Eingriffszeitpunkt. Allerdings sind auch mit SUI-Anzeige die kritisch parametrisierten Szenarien mit dynamischen Infrastrukturelementen nicht für alle Probanden kontrollierbar.

Auf Basis dieser Erkenntnisse lässt sich die Implementierung einer automatisierten, kraftstoffeffizienten Längsführung mit Regelung auf statische Infrastrukturelemente empfehlen.

Dagegen sind bei Regelung auf dynamische Infrastrukturelemente zur Sicherstellung der Kontrollierbarkeit Anpassungen auf Funktions- bzw. HMI-Ebene nötig. Ansätze hierfür sind in Abschnitt 6.5.3.3 skizziert. Folglich sind für dynamische Infrastrukturelemente nach dem nutzerzentrierten Entwicklungsprozess (Kap. 3.3) weitere Iterationen nötig.

## 7 Diskussion und Ausblick

Zunächst wird die Übertragbarkeit der eingesetzten Entwicklungsmethodik analysiert. Anschließend wird die Kontrollierbarkeitsbewertung kontinuierlich regelnder FAS diskutiert und ein Ausblick zur Erfassung verschiedener Parametrierungen der Testszenarien gegeben. Das Kapitel schließt mit einem Ausblick zur Übertragbarkeit auf höhere Automatisierungsgrade.

### 7.1 Übertragbarkeit der Entwicklungsmethodik

Während sich die Makromethodik an den nutzerzentrierten Ansatz der DIN EN ISO 9241-210 [DIN11] anlehnt, werden für die Mikromethodik anwendungsspezifische Prototyping- und Evaluationsmethoden gewählt. Die Übertragbarkeit der Entwicklungsmethodik kann für vergleichbare Anwendungsfälle empfohlen werden, die folgende Voraussetzungen erfüllen sollten:

- Die Zielsetzung ist eine frühe Abschätzung von Nutzen und Kontrollierbarkeit im späteren Nutzungskontext.
- Der Anwendungszeitpunkt liegt in der frühen Konzeptphase eines neuartigen FAS ohne Erfahrungswerte oder bestehende Marktdurchdringung.
- Der Fokus liegt auf der Interaktion zwischen Fahrer und FAS.
- Die Ausgestaltung der Funktions- und Daten-Ebene des FAS ist noch nicht abgeschlossen bzw. findet parallel statt.

### 7.2 Kontrollierbarkeitsbewertung umfeldwahrnehmender, automatisierter FAS

Bei umfelderfassenden und -interpretierenden FAS, die kontinuierlich regelnd in die Fahrzeugführung eingreifen, ist nicht situationsgerechtes Verhalten bei technisch korrekter Funktion möglich [Wei12a, S. 17]. Dieser Aspekt wird in der ISO Norm 26262 nicht explizit erwähnt.

Hierzu wurde im Rahmen der summativen Evaluation ein Vorgehen entwickelt, um relevante Testszenarien mit nicht situationsgerechtem Automationsverhalten zu ermitteln und deren Kontrollierbarkeit mit unbedarften Nutzern zu evaluieren. Jedoch müsste theoretisch jede denkbare, in Realität vorzufindende Szenarioausprägung bewertet und bei Änderungen auf Funktions-Ebene des FAS (Kap. 3.2.1) ggf. wiederholt werden.

Zur Abstimmung der dynamischen Eigenschaften eines Fahrzeugs bzw. FAS auf die Fähigkeiten des Fahrers existiert eine Vielzahl von Modellierungsansätzen, wie in [Bub15e, S. 222ff] zusammenfassend dargestellt. So versuchen regelungstechnische Modelle, „(...) [die] Ergebnisse neurophysiologischer Forschung in technische Analogien umzusetzen und daraus eine regelungstechnische Struktur des menschlichen Informationsverarbeitungskanals aufzubauen“.

Während sich fertigkeitbasiertes Verhalten der Stabilisierungsebene (Kap. 2.1.2.1) mit Hilfe regelungstechnischer Modelle abbilden lässt [Bub15e, S. 222ff; Jür07], können Entscheidungen über Handlungsalternativen, wie bei Überwachung der automatisierten Längsführung notwendig (Aufgabenanalyse, 4.3.2), damit nicht abgebildet werden.

Hier könnte der Aufbau eines kognitiven Fahrermodells für die Überwachungstätigkeit der automatisierten Längsführung Abhilfe schaffen. Kognitive Menschmodelle versuchen, eine Vorhersage über des Verhalten des Menschen bei der informationstechnischen Interaktion mit Maschinen zu ermöglichen [Bub15e, S. 222ff].

Eine Übersicht über kognitive Modellierungsansätze gibt [Pla10, S. 138ff]. Diese basieren meist auf sog. kognitiven Architekturen, die nach [And07, S. 7] definiert sind als "(...) a specification of the structure of the brain at a level of abstraction that explains how it achieves the function of the mind". Vorteil von kognitiven Modellen, die auf bestehenden kognitiven Architekturen basieren, ist, dass diese psychologisch valide sein sollten [Pla10, S. 139].

Für die hier betrachtete automatisierte Längsführung sollten die in Abbildung 7-1 gestrichelt dargestellten Aktionen durch das kognitive Fahrermodell abbildbar sein.

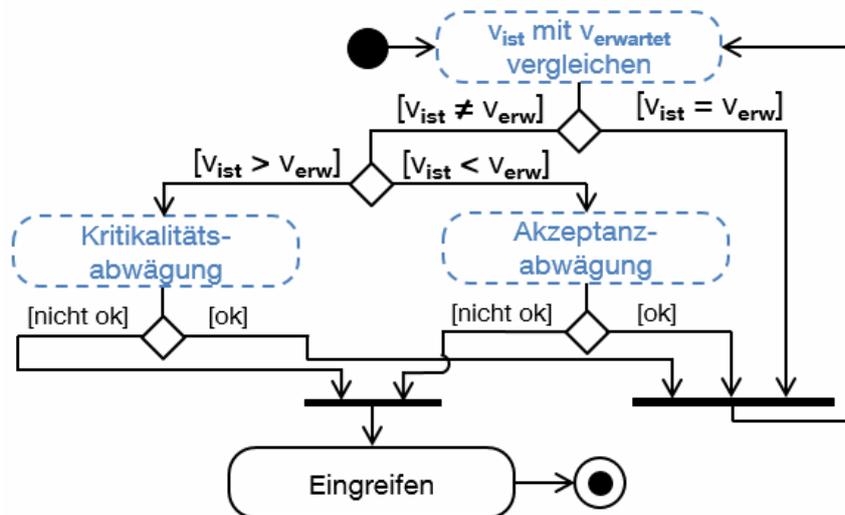


Abbildung 7-1: Aktivitätsdiagramm der Überwachungstätigkeit aus Abschnitt 4.3.2; gestrichelte Aufgaben sollten durch das kognitive Fahrermodell abgebildet werden

So sollte der Vergleich zwischen der Ist-Geschwindigkeit ( $v_{ist}$ ) und der erwarteten Geschwindigkeit des Fahrers ( $v_{erwartet}$ ) modelliert werden. Hierbei sollte die Frequenz dieses Vergleichs als Parameter im Modell variierbar sein. So lassen sich verschiedene Fahrerzustände (Level an Aufmerksamkeit bzw. Ablenkung, Beanspruchung etc.) simulieren.

Weiterhin sollten die Kritikalitäts- und Akzeptanzabwägung durch das Modell abgebildet werden (Abbildung 7-1). Mögliche Einflussfaktoren könnten hierbei das Vertrauen sowie das mentale Modell des Fahrers sein, die ebenfalls als einstellbare Parameter in das kognitive Fahrermodell integriert werden könnten, um verschiedene Ausprägungen simulieren zu können.

Folglich könnten mittels kognitiver Modellierung erstellte Fahrermodelle bei der Kontrollierbarkeitsbewertung umfeldwahnehmender und kontinuierlich regelnder FAS unterstützen. So könnte eine große Zahl unterschiedlicher Szenarien sowie Szenarioausprägungen zunächst simulativ bewertet werden, um die Anzahl der Tests im Probandenversuch zu reduzieren. Um eine hohe externe Validität zu gewährleisten, könnten im nachgelagerten Evaluationsschritt einzelne, kritische Szenarioausprägungen abgesichert werden, indem sie nach dem Vorgehen aus Abschnitt 6.2.3 mit unbedarften Nutzern evaluiert werden.

Weiterer Forschungsbedarf besteht im Aufbau eines validen kognitiven Fahrermodells für die Überwachungstätigkeit. Dieser Ansatz zielt auf eine Erhöhung der in Abschnitt 2.3 beschriebenen Interaktionssicherheit bei gleichzeitiger Kosteneffizienz.

### 7.3 Übertragbarkeit auf höhere Automatisierungsstufen

Der Fokus der hier eingesetzten nutzerzentrierten Entwicklung liegt auf der Ermittlung des Informationsbedarfs des Fahrers bei der Überwachung der automatisierten Längsführung, um daraufhin die HMI-Ebene einfach und intuitiv gestalten zu können. Zielsetzung ist eine hohe Systemtransparenz, um ein angemessenes Vertrauen sowie ein hohes Systemverständnis zu fördern.

Während der Fahrer bei der Interaktion mit der automatisierten Längsführung noch einen aktiven Anteil im Regelkreis (Kap. 2.1.1.3) hat, ist dies bei der nächsten Automatisierungsstufe, dem teilautomatisierten Fahren, nicht mehr gegeben (Kap. 2.2.1). Gleichzeitig muss der Fahrer die Längs- und Querführung permanent überwachen [Gas12, S. 3]. Folglich sind, bezogen auf die Fahrzeuglängsführung, die Aufgaben des Fahrers identisch wie in der in Abschnitt 4.3.2 erarbeiteten Aufgabenanalyse.

Allerdings können die, in Abschnitt 2.2.3 beschriebenen, negativen Automationseffekte verstärkt auftreten, weil der Fahrer nur noch überwachende Aufgaben und keine regelnden Aufgaben mehr besitzt. [Bai83] bezeichnet dies als „Ironie der Automatisierung“: „(...) the automatic control system has been put in because it can do the job better than the operator, but yet the operator is being asked to monitor that it is working effectively“ [Bai83, S. 776].

Zudem ist beim teilautomatisierten Fahren im Lkw-Bereich der Kaufanreiz solcher FAS aus Sicht der Spediteure fraglich (Stakeholderanalyse, Kap. 4.3.1).

Der Unterschied zum hochautomatisierten Fahren ist, dass die permanente Überwachungsaufgabe wegfällt. So muss der Fahrer lediglich innerhalb einer gewissen Zeitspanne die Fahraufgabe wieder übernehmen können [Gas12, S. 3]. Folglich kann sich der Fahrer zumindest zeitweise fahrfremden Tätigkeiten widmen, wie dies beispielsweise in [Ric15] aufgezeigt wird. Entscheidender Unterschied im Vergleich zur hier betrachteten automatisierten Längsführung ist, dass der Fahrer sich während der hochautomatisierten Phasen über den aktuellen Systemzustand informieren kann, aber nicht muss.

Inwieweit die hier ermittelten Informationseinheiten während hochautomatisierter Phasen die Systemtransparenz erhöhen und so zu schnelleren und situativ passenden Fahrerübernahmen führen, ist zukünftiger Forschungsbedarf.

## 8 Zusammenfassung

Um die Interaktionssicherheit zwischen Fahrer, FAS und Fahrzeug bereits in einer frühen Konzeptphase zu berücksichtigen, wird ein Vorgehen zur nutzerzentrierten Kontrollierbarkeitsbewertung entwickelt. Dieses wird am Beispiel der automatisierten, kraftstoffeffizienten Fahrzeuglängsführung durchgeführt.

Die Automatisierung der Längsführung wird eingesetzt, um unabhängig vom Können, Wissen und Wollen des Fahrers kraftstoffeffizientes und emissionsreduziertes Fahren für schwere Lkw zu ermöglichen. Jedoch entsteht durch die vorausschauende Regelung, basierend auf Umfelddaten (Car2X), ein hohes Informationsungleichgewicht zwischen FAS und Fahrer.

Daraus ergeben sich zwei Problemfelder: Während sich der Regelgrund noch außerhalb des Sichtbereichs des Fahrers befindet, kann fehlendes Systemverständnis zu Akzeptanzverlust und ungewollten Fahrereingriffen führen, welche das Potential der Kraftstoffeffizienz reduzieren. Das zweite Problemfeld betrifft die Interaktionssicherheit. Mangelndes Systemverständnis und übersteigertes Vertrauen kann zur Vernachlässigung der Überwachungsaufgabe führen, was bei nicht situationsgerechtem Verhalten der automatisierten Längsführung die Kontrollierbarkeit und somit die Sicherheit gefährdet.

Die Analyse des Standes der Wissenschaft zeigt, dass für diese umfeldwahrnehmenden und kontinuierlich in die Fahrdynamik eingreifenden FAS mit hohem Funktionsumfang bislang kein detailliertes Vorgehen zur Kontrollierbarkeitsbewertung existiert.

Weiterhin lässt sich aus dem Stand der Wissenschaft zu kraftstoffeffizienten FAS eine Klassifikation erarbeiten, aus der sich Funktionsumfang und -allokation für die hier betrachtete automatisierten, kraftstoffeffizienten Längsführung ableiten lassen. Eine vorausschauende Regelung auf statische und dynamische Infrastrukturelemente sowie Umgebungsverkehr könnte ein hohes Kraftstoffeffizienzpotential erzielen. Bestehende HMI-Konzepte lassen sich aufgrund eines geringeren Funktionsumfangs sowie wegen Lkw-Spezifika nicht übertragen.

Daraus ergibt sich die Zielsetzung dieser Arbeit: Die Gestaltung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion für die automatisierte, kraftstoffeffiziente Längsführung. Zunächst werden systemtransparente HMI-Konzepte nutzerzentriert entwickelt und formativ evaluiert, auf deren Basis die Kontrollierbarkeitsbewertung durchgeführt wird. Zudem wird untersucht, inwiefern die Präsentation von Systemunsicherheitsinformationen (SUI) die Kontrollierbarkeit des FAS positiv beeinflussen kann.

Die für das Systemverständnis essentiell nötigen Informationseinheiten werden identifiziert und mittels intuitiv verständlicher Symbole im HMI visualisiert. Weiterhin wird auf Basis der Signalentdeckungstheorie eine Darstellung der SUI entwickelt, deren aufmerksamkeitsgenerierende rote Rahmen mit zunehmender Unsicherheitsstufe eine steigende Salienz aufweisen.

Um die Kontrollierbarkeitsbewertung in der frühen Konzeptphase mit hoher externer Validität durchzuführen, wird im Rahmen dieser Arbeit ein Vorgehen entwickelt. Zunächst werden relevante Testszenarien in einem mehrstufigen Prozess auf Basis von Experteneinschätzungen ausgewählt. Die Testszenarien sollen eine geringe Kritikalität bei manueller Fahrt, eine hohes potentiell Schadensausmaß sowie eine hohe oder niedrige Auftretenshäufigkeit im Realverkehr aufweisen. Ausgehend von einer Aufgabenanalyse der Überwachungstätigkeit des Fahrers, werden objektive Messgrößen abgeleitet, Pass-Fail-Kriterien spezifiziert und mit einer subjektiven Kritikalitätsbewertung kombiniert.

Die, nach diesem Vorgehen im dynamischen Lkw-Fahrsimulator durchgeführte, Kontrollierbarkeitsbewertung der automatisierten, kraftstoffeffizienten Längsführung zeigt, dass die betrachteten Szenarien mit Regelung auf statische Infrastrukturelemente als kontrollierbar eingestuft werden können. Dagegen werden die kritisch parametrisierten Szenarien mit Regelung auf dynamische Infrastrukturelemente als nicht kontrollierbar bewertet.

Die Visualisierung der SUI ist für die Fahrer intuitiv verständlich, erhöht die Systemtransparenz und führt bei nicht situationsgerechtem Verhalten vor statischen und dynamischen Infrastrukturelementen zu signifikant früheren Fahrereingriffen. Dennoch ist das nicht situationsgerechte Automationsverhalten mit SUI-Anzeige vor den kritisch parametrisierten, dynamischen Infrastrukturelementen nicht für alle Probanden kontrollierbar.

Mit dem entwickelten Vorgehen lassen sich Kontrollierbarkeitseinschätzungen für die untersuchten Szenarien treffen sowie Rückschlüsse auf die Funktions-Ebene und Daten-Ebene des FAS ableiten. Allerdings können lediglich Aussagen für die betrachtete Parametrierung der Szenarien getroffen werden bzw. mittels Worst-Case-Ansatz auf weniger kritische Szenarien übertragen werden. In Realität können jedoch vielfältige Szenariosausprägungen auftreten.

Um hierfür bereits in der frühen Konzeptphase Erkenntnisse zur Interaktionssicherheit zu erhalten, wird im Ausblick ein Ansatz zur kognitiven Modellierung der Überwachungstätigkeit skizziert. So ließen sich vielfältige Szenarien zunächst simulativ analysieren und nur kritische Szenarien im zweiten Schritt nach dem hier entwickelten Vorgehen nutzerzentriert bewertet werden. Die Modellierung der Überwachungstätigkeit stellt zukünftigen Forschungsbedarf dar.

Weiterhin sollte untersucht werden, inwieweit sich die identifizierten Informationseinheiten auch für höhere Automatisierungsgrade eignen, um in Übernahmesituationen eine kurze und situativ passende Fahrerreaktion auszulösen.

## Abbildungsverzeichnis

|                 |   |    |
|-----------------|---|----|
| Abbildung 1-1:  | Kostenstruktur Güterkraftverkehr 2013 - nationaler Fernverkehr nach [Bun15d].....   | 1  |
| Abbildung 1-2:  | CO <sub>2</sub> -Emissionen 2013 nach Sektor auf Basis von [IEA15, S. 69] .....   | 1  |
| Abbildung 1-3:  | Roadmap zum automatisierten und kooperativen Fahren [Ben14, S. 8], übersetzt durch [Gna15, S. 42] .....   | 3  |
| Abbildung 1-4:  | Annäherung an ein Tempolimit – Vergleich zwischen kraftstoffeffizienter Längsführung mit manueller Fahrt .....  | 4  |
| Abbildung 2-1:  | Mentales, präsentiertes und implementiertes Modell der Interaktionsgestaltung; Ausschnitt aus [But14, S. 51] .....  | 6  |
| Abbildung 2-2:  | Schritte zur Ausführung zielgerichteter Handlungen; [Nor86, S. 37ff] adaptiert durch [But14, S. 54] .....   | 7  |
| Abbildung 2-3:  | Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt mit FAS; in Anlehnung an [Dor03, S. 17; Mui09, S. 6] .....  | 8  |
| Abbildung 2-4:  | Menschlicher Informationsverarbeitungsprozess; nach [Schl10, S. 295; Wic99, S. 11].....   | 9  |
| Abbildung 2-5   | Ebenenmodell des menschlichen Verhaltens; in Anlehnung an [Ras83, S. 258; Schl10, S. 291; Züh12, S. 23] .....   | 10 |
| Abbildung 2-6:  | Klassifikation von Richtlinien zur Gestaltung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion .....   | 12 |
| Abbildung 2-7:  | Beanspruchung (Workload) und Performance (Leistung) in Abhängigkeit der Anforderungen [Waa96, S. 24].....   | 16 |
| Abbildung 2-8:  | Modell des Situationsbewusstseins nach [End95b, S. 35; Schl10, S. 376].....   | 17 |
| Abbildung 2-9:  | Automations-Akzeptanz-Modell nach [Gha12, S. 45], welches das Technologie-Akzeptanz-Modell nach [Dav89] (grau hinterlegt) erweitert .....   | 18 |
| Abbildung 2-10: | Betrachtungsebenen für die Sicherheit von Fahrerassistenzsystemen [Geo95, S. 38; Dor03, S. 18] .....  | 19 |
| Abbildung 2-11: | Grafische Repräsentation der Systemunsicherheit; oben links skalenbasiert [Hel13, S. 213], unten links mittels Gesichtsausdruck [Bel13, S. 1131] sowie des ACC-Systemverhaltens [Sep07, S. 194].. | 22 |
| Abbildung 2-12: | Klassifikation kraftstoffeffizienter FAS nach dem Funktionsumfang der Automatisierung (Vertikalachse) sowie der Stufe im Informationsverarbeitungsprozess (Horizontalachse) .....                 | 24 |
| Abbildung 2-13: | Anzeige im Kombidisplay zur prospektiven Regelung auf Topographie von Scania; auf Basis von [Sca16] .....   | 25 |
| Abbildung 2-14: | Anzeige im Kombidisplay zur prospektiven Regelung auf Topographie Daimler; auf Basis von [Aya12].....   | 26 |

|                 |  |    |
|-----------------|--|----|
| Abbildung 2-15: | Anzeige im Kombidisplay zur prospektiven Regelung auf Topographie MAN; auf Basis einer internen Darstellung der MAN Truck & Bus AG .....   | 26 |
| Abbildung 2-16: | Anzeige zur prospektiven Regelung auf statische Infrastrukturelemente im Pkw von VW GreenDriving; auf Basis von [Dor12] .....  | 27 |
| Abbildung 2-17: | Anzeige zur prospektiven Regelung auf statische Infrastrukturelemente im Pkw von BMW Speed Assist; auf Basis von [Kno16, S. 20] .....  | 27 |
| Abbildung 3-1:  | Das um FAS erweiterte Regelkreismodell der Fahrzeugführung; in Anlehnung an [Dor03, S. 17; Mui09, S. 6] .....  | 33 |
| Abbildung 3-2:  | Das Arbeitsmodell zur Fahrer-FAS-Fahrzeug-Interaktion gliedert das FAS in drei Abstraktionsebenen: Daten, Funktion und HMI .....   | 33 |
| Abbildung 3-3:  | Zusammenhang der drei Forschungsfragen zur Systemtransparenz, Kontrollierbarkeit sowie Systemunsicherheitsinformation (SUI) .....  | 35 |
| Abbildung 3-4:  | Modifiziertes V-Modell zur FAS-Entwicklung; nach [Sei15, S. 169].....  | 36 |
| Abbildung 3-5:  | Nutzerzentrierter Entwicklungsprozess nach der Norm DIN EN ISO 9241-210 [DIN11, S. 15].....  | 36 |
| Abbildung 3-6:  | Übersicht der Makromethodik (in Anlehnung an [DIN11, S. 15]) mit Verweis auf das jeweilige Kapitel .....   | 37 |
| Abbildung 4-1:  | Übersicht der Mikromethodik zur Anforderungsanalyse.....   | 38 |
| Abbildung 4-2:  | Mögliche Probleme aus Fahrersicht im Umgang mit dem kraftstoffeffizienten FAS nach [Sto15a].....   | 41 |
| Abbildung 4-3:  | Aktivitätsdiagramm der Aufgaben des Fahrer bei der Überwachung der automatisierten, kraftstoffeffizienten Fahrzeuglängsführung.....  | 43 |
| Abbildung 4-4:  | Phasenmodell des Situationsablaufs bei Regelung auf eine Lichtsignalanlage als dynamisches Infrastrukturelement [Sto16, S. 17] .....   | 44 |
| Abbildung 4-5:  | Zu Versuchszwecken textuell dargestellte Informationseinheiten im Informationsbereich des Kombidisplays (Links 1, Mitte 3 und Rechts 5).....   | 45 |
| Abbildung 4-6:  | Dynamischer Lkw Fahrsimulator (links) und Anzeigedarstellung im Kombidisplay (rechts).....   | 47 |
| Abbildung 4-7:  | Bewertungen von Nachvollziehbarkeit (links) und Vertrauen (rechts) für den späten Informationszeitpunkt im Vergleich zwischen einer, drei und fünf Informationseinheiten (N=32)..... | 48 |
| Abbildung 4-8:  | Bewertungen von Nachvollziehbarkeit (links) und Vertrauen (rechts) für drei Informationseinheiten im Vergleich zwischen frühem und spätem Informationszeitpunkt (N=32).....          | 48 |
| Abbildung 5-1:  | Übersicht der Mikromethodik zur HMI-Konzeptentwicklung und -evaluation.....  | 50 |
| Abbildung 5-2:  | Links: erste Anordnungsvariante integrativ zum ACC Bereich; Rechts: zweite Anordnungsvariante in räumlicher Nähe der Ist-  |    |

|                 |   |    |
|-----------------|---|----|
|                 | Geschwindigkeit; (1= Status; 2= Regelgrund; 3= Entfernung; 4= Zielgeschwindigkeit).....   | 53 |
| Abbildung 5-3:  | Fokus der formativen Fahrsimulatorstudie liegt auf Phase 1 und 2 (Situationsanalyse, 4.3.3).....  | 55 |
| Abbildung 5-4:  | Anzeigeconcept im Kombidisplay mit den Informationseinheiten zu Regelgrund, textueller Entfernungsdarstellung, Zielgeschwindigkeit und Status (HMI A) [Sto16, S. 18] .....  | 58 |
| Abbildung 5-5:  | Vergleich zwischen manueller Fahrt und automatisierter Längsführung mit HMI-Konzept „A“ hinsichtlich Kraftstoffverbrauch (links) und der Standardabweichung der lateralen Position (SDLP; rechts).....  | 58 |
| Abbildung 5-6:  | Vergleich der Beanspruchung in den Dimensionen des NASA-RTLX: Gesamtbeanspruchung, geistige-, körperliche- und zeitliche Anforderung, Anstrengung, Aufgabenausführung sowie Frustration...59  | 59 |
| Abbildung 5-7:  | Subjektive Bewertung des persönlichen Fahrstils im Vergleich zur automatisierten, kraftstoffeffizienten Längsführung; Fehlerindikatoren zeigen +/- 1 SD .....   | 60 |
| Abbildung 5-8:  | Akzeptanzbewertung nach [Van97] in den Dimensionen Zufriedenheit und Nützlichkeit im Vergleich zu proaktiven Handlungsempfehlungen zur Kraftstoffeffizienz (Virtueller Fahrtrainer, ViFa). Der Startpunkt der Pfeile entspricht der Einschätzung vor der Fahrt mit ViFa, die Pfeilspitze nach der Fahrt. Bei der automatisierten Längsführung (HMI A) wird nur die Beurteilung nach der Fahrt dargestellt; nach [Hey14, S. 71]..... | 61 |
| Abbildung 5-9:  | Subjektive Vertrauensbewertung (0 = niedrig, 20 = hoch) vor und nach der Fahrt mit FAS .....  | 62 |
| Abbildung 5-10: | Optimiertes Anzeigeconcept mit hoher Detailgenauigkeit und hohem Funktionsumfang.....   | 63 |
| Abbildung 5-11: | Kombidisplayanzeige mit Visualisierung der Systemunsicherheitsinformation (SUI) auf dritter (höchster) Stufe.....   | 64 |
| Abbildung 5-12: | Visualisierung verschiedener Stufen der SUI; Links: Stufe 0 (= keine bzw. sehr gering); Mitte: Stufe 1; Rechts: Stufe 2 .....   | 64 |
| Abbildung 6-1:  | Untersuchungsschwerpunkt: Phase 3 nach dem Phasenmodell der Situationsanalyse (Kap. 4.3.3).....   | 65 |
| Abbildung 6-2:  | Vorgehen zur Auswahl der Szenarien für die Kontrollierbarkeitsbewertung .....   | 67 |
| Abbildung 6-3:  | Übersicht der Messgrößen zur Gesamtbewertung (Programmfragen P-1 und P-2).....  | 68 |
| Abbildung 6-4:  | Eingesetzte Skala zur Bewertung der Kritikalität des nicht situationsgerechten Automationsverhaltens in Anlehnung an [Neu08a, S. 144] .....   | 68 |
| Abbildung 6-5:  | Vorgehen zur Kontrollierbarkeitsabschätzung in Anlehnung an [Neu13, S. 53] .....  | 69 |

|                 |   |    |
|-----------------|---|----|
| Abbildung 6-6:  | Potentiell kritische Testszenarien bei Regelung auf statische Infrastrukturelemente; Szenario A „Tempolimit nicht erkannt“; Szenario B „Tempolimit aufgehoben nicht erkannt“ .....  | 70 |
| Abbildung 6-7:  | Potentiell kritische Testszenarien bei Regelung auf dynamische Infrastrukturelemente; Szenario C: „LSA nicht erkannt“; Szenario D: „LSA falsch erkannt“ .....   | 71 |
| Abbildung 6-8:  | Potentiell kritische Testszenarien bei Regelung auf Umgebungsverkehr; Szenario E: hereinragendes, parkendes Fahrzeug; Szenario F: hereinragender, abbiegender Lkw .....   | 71 |
| Abbildung 6-9:  | Links: Szenario G „False-Positive“ aus Fahrersicht; Rechts: Anzeige im Kombidisplay .....   | 72 |
| Abbildung 6-10: | Versuchsdesign der Studie mit Inner- und Zwischensubjektfaktoren ..   | 73 |
| Abbildung 6-11: | Reihenfolge der Messfahrten für die summative Fahrsimulatorstudie .....   | 73 |
| Abbildung 6-12: | Vergleich der Usability Bewertung; auf Fahrt 2 treten zwei Systemfehler in Szenario A und B (6.3.1) auf; während Fahrt 1 und 3 regelt das FAS immer situationsgerecht .....   | 75 |
| Abbildung 6-13: | Einordnung der ermittelten SUS Werte nach [Ban09, S. 121]; die Pfeile sind mit der jeweiligen Fahrtnummer beschriftet; der gestrichelte Pfeil (Fahrt 2) repräsentiert die Fahrt mit nicht situationsgerechtem Automationsverhalten .....  | 76 |
| Abbildung 6-14: | Vergleich der Vertrauensbewertung: auf Fahrt 2 treten zwei Systemfehler in Szenario A und B (6.3.1) auf; während Fahrt 1 und 3 regelt das FAS immer situationsgerecht .....   | 76 |
| Abbildung 6-15: | Vergleich der SUS-Mittelwerte zwischen der Fahrt mit und ohne SUI Visualisierung (N=34).....  | 78 |
| Abbildung 6-16: | Vergleich der Vertrauensbewertung zwischen der Fahrt mit und ohne SUI Visualisierung .....  | 79 |
| Abbildung 6-17: | Vergleich der Geschwindigkeit 50 m vor dem Verkehrsschild mit Tempolimit 30 km/h.....   | 80 |
| Abbildung 6-18: | Subjektive Kritikalitätsbewertung nach nicht situationsgerechtem Automationsverhalten im Szenario „Tempolimit nicht erkannt“ (6.3.1); Strecke 2 stellt den Erstkontakt dar, während in Strecke 4 (ohne SUI) und Strecke 5 (mit SUI) der Fehler zum wiederholten Mal auftritt..... | 81 |
| Abbildung 6-19: | Einfluss der SUI auf Kontrollierbarkeit – Szenario „Tempolimit nicht erkannt“ .....   | 82 |
| Abbildung 6-20: | Eingriffszeitpunkt der Probanden auf der Fahrt mit SUI im Vergleich zu ohne SUI für das Szenario „LSA nicht erkannt“ .....  | 83 |
| Abbildung 6-21: | Eingriffszeitpunkt Szenario „LSA falsch erkannt“ im Vergleich zwischen mit und ohne SUI .....   | 83 |
| Abbildung 6-22: | Vertrauensbewertung jeweils vor und nach jeder Fahrt (die Fahrten sind grau hinterlegt).....  | 86 |

|                 |   |    |
|-----------------|---|----|
| Abbildung 6-23: | Vergleich der Geschwindigkeitsverläufe – Szenario „Tempolimit nicht erkannt“ .....  | 88 |
| Abbildung 6-24: | Transformierte Darstellung der Rangfolge der kritischen Situationen (N=34); eine hohe Punktezahl korrespondiert mit einer hohen Kritikalitätsbewertung (Anhang H) ..... | 91 |
| Abbildung 6-25: | Erkenntnisse zum Zusammenhang der drei Forschungsfragen zur Systemtransparenz, Kontrollierbarkeit sowie Systemunsicherheitsinformation (SUI).....                       | 91 |
| Abbildung 7-1:  | Aktivitätsdiagramm der Überwachungstätigkeit aus Abschnitt 4.3.2; gestrichelte Aufgaben sollten durch das kognitive Fahrermodell abgebildet werden.....                 | 95 |

## Tabellenverzeichnis

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| Tabelle 2-1: | Nomenklatur der Automatisierungsstufen nach [Gas12; SAE14; VDA14].....  | 13 |
| Tabelle 2-2: | Einteilung der Kontrollierbarkeitsklassen von C0 bis C3 [ISO11, S. 9; Res06, S. A44].....   | 20 |
| Tabelle 3-1: | Gegenüberstellung der überwachenden Tätigkeit für die automatisierte, kraftstoffeffiziente Längsführung und der Supervisory Control nach [She06, S. 1025] dt. nach [Man08, S. 311]..... | 31 |
| Tabelle 6-1: | Statische Infrastrukturelemente - Anteil subj. Kritikalitätswerte über Toleranzschwelle .....   | 80 |
| Tabelle 6-2: | Dynamische Infrastrukturelemente - Anteil subj. Kritikalitätswerte über Toleranzschwelle .....  | 82 |
| Tabelle 6-3: | Umgebungsverkehr - Anteil subj. Kritikalitätswerte über Kritikalitätsschwelle .....   | 84 |

## Abkürzungsverzeichnis

|                 |   |
|-----------------|---|
| AAM             | Automations-Akzeptanz-Modell  |
| ABS             | Antiblockiersystem  |
| ACC             | Adaptive Cruise Control, dt. abstandsgeregelter Tempomat  |
| ACEA            | Association des Constructeurs Européens d'Automobiles, dt. Europäischer Automobilverband  |
| ADAS            | Advanced Driver Assistance System, umfeldwahrnehmendes und in die Fahrdynamik eingreifendes Fahrerassistenzsystem,                      |
| ASIL            | Automotive Safety Integrity Level   |
| ASR             | Antischlupfregelung   |
| AV              | Abhängige Variable  |
| BASt            | Bundesanstalt für Straßenwesen  |
| Car2X           | Car-to-X Communication  |
| CC              | Cruise Control, dt. Tempomat  |
| CO <sub>2</sub> | Kohlenstoffdioxid   |
| ESOP            | European Statement of Principles on HMI for In-Vehicle Information and Communication Systems  |
| ESP             | Elektronisches Stabilitäts-Programm   |
| EU              | Europäische Union   |
| FAS             | Fahrerassistenzsystem   |
| FMEA            | Failure Mode and Effect Analysis  |
| GNSS            | Global Navigation Satellite System  |
| HMI             | Human-Machine-Interface, dt. Mensch-Maschine-Schnittstelle  |
| HUD             | Head-Up-Display   |
| LSA             | Lichtsignalanlage   |
| Lkw             | Lastkraftwagen  |
| Mdn             | Median  |
| M(W)            | Mittelwert (arithmetisches Mittel)  |
| NASA-RTLX       | National Aeronautics and Space Administration – Raw Task Load Index (standardisierter Fragebogen zur subjektiven Beanspruchungsmessung) |
| Pkw             | Personenkraftwagen  |
| SD              | Standardabweichung  |
| SUI             | Systemunsicherheitsinformation  |
| SUS             | System Usability Scale, Fragebogen zur Ermittlung der Usability   |
| TAM             | Technologieakzeptanzmodell  |
| TTC             | Time-To-Collision   |

|      |                                  |
|------|----------------------------------|
| UML  | Unified Modeling Language        |
| UV   | Unabhängige Variable             |
| ViFa | Virtueller Fahrtrainer           |
| V2V  | Vehicle-to-Vehicle Communication |

## Verwendete Formelzeichen

| Formelzeichen | Beschreibung                          |
|---------------|---------------------------------------|
| C             | Kontrollierbarkeit                    |
| f             | Häufigkeit                            |
| R             | Risiko                                |
| S             | Schadensschwere                       |
| $v_{ist}$     | Ist-Geschwindigkeit des Fahrzeugs     |
| $v_{erw}$     | Erwartete Geschwindigkeit des Fahrers |

## Literaturverzeichnis

- [Abe01]: ABENDROTH, Bettina: *Gestaltungspotentiale für ein PKW-Abstandsregelsystem unter Berücksichtigung verschiedener Fahrertypen*. Stuttgart: Schriftenreihe Ergonomie, 2001
- [Abe15]: ABENDROTH, Bettina; BRUDER, Ralph: Die Leistungsfähigkeit des Menschen für die Fahrzeugführung. In: HAKULI, Stephan; LOTZ, Felix; SINGER, Christina (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 3-15
- [Alp03]: ALPERN, Micah; MINARDO, Katie: Developing a car gesture interface for use as a secondary task. In: COCKTON, Gilbert; KORHONEN, Panu (Hrsg.): *CHI '03 extended abstracts*, 2003, S. 932
- [Alt10]: ALTENDORFER, Richard; WIRKERT, Sebastian; HEINRICHS-BARTSCHER, Sascha: *Sensor Fusion as an Enabling Technology for Safety-critical Driver Assistance Systems*. In: *SAE International Journal of Passenger Cars - Electronic and Electrical Systems* 3 (2010), Nr. 2, S. 183-192
- [And07]: ANDERSON, John R.: *How can the human mind occur in the physical universe?* Oxford, New York: Oxford University Press, 2007
- [Ant05]: ANTIFAKOS, Stavros; KERN, Nicky; SCHIELE, Bernt; SCHWANINGER, Adrian: Towards improving trust in context-aware systems by displaying system confidence. In: ACM (Hrsg.): *Proceedings of the 7<sup>th</sup> international conference on Human computer interaction with mobile devices & services*. New York, 2005, S. 9-14
- [Arn11]: ARNDT, Stephanie: *Evaluierung der Akzeptanz von Fahrerassistenzsystemen: Prüfung eines Modells zur Vorhersage des Kaufverhaltens von Endkunden*. 1. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2011
- [Aud15]: Audi AG: *Audi Q7 Prädiktiver Effizienzassistent*. URL <http://www.audi-technology-portal.de/de/elektrik-elektronik/fahrerassistenzsysteme/audi-q7-praedikti-ver-effizienzassistent> – Überprüfungsdatum 2016-10-04
- [Aya12]: AYAPANA, Erick: *New Mercedes-Benz Cruise Control System uses GPS to shift gears, save fuel*. URL <http://www.motortrend.com/news/new-mercedes-benz-cruise-control-system-uses-gps-to-shift-gears-save-fuel-205047/> – Überprüfungsdatum 2016-06-20
- [Bai83]: BAINBRIDGE, Lianne: *Ironies of automation*. In: *Automatica* 19 (1983), Nr. 6, S. 775-779
- [Ban09]: BANGOR, A.; KORTUM, P.; MILLER, J.: *Determining What Individual SUS Scores Mean: Adding an Adjective Rating Scale*. In: *Journal of Usability Studies* 4 (2009), Nr. 3, S. 114-123
- [Ban98]: BANBURY, S.; SELCON, S.; ENDSLEY, M.; GORTON, T.; TATLOCK, K.: *Being Certain About Uncertainty: How the Representation of System Reliability Affects Pilot Decision Making*. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 42 (1998), Nr. 1, S. 36-39

- [Bar10]: BARKENBUS, Jack N.: *Eco-driving: An overlooked climate change initiative*. In: *Energy Policy* 38 (2010), Nr. 2, S. 762-769
- [Bar14]: BARTHAUER, Mirko; FRIEDRICH, Bernhard: *Evaluation of a Signal State Prediction Algorithm for Car to Infrastructure Applications*. In: *Transportation Research Procedia* 3 (2014), S. 982-991
- [Bar98]: BARFIELD, Woodrow; DINGUS, Thomas A.: *Human factors in intelligent transportation systems*. Mahwah, N.J.: Lawrence Erlbaum Associates, 1998
- [Bea09]: BEAUDOUIN-LAFON, Michel; MACKAY, Wendy E.: Prototyping Tools and Techniques. In: SEARS, A.; JACKO, J. A. (Hrsg.): *Human-Computer Interaction: Development Process*: CRC Press, 2009, S. 121-144
- [Beg13]: BEGGIATO, Matthias; KREMS, Josef F.: *The evolution of mental model, trust and acceptance of adaptive cruise control in relation to initial information*. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 18 (2013), S. 47-57
- [Bek11]: BEKAVAC, B.; SCHNEIDER, R.; SCHWEIBENZ, W.: *Benutzerorientierte Bibliotheken im Web: Usability-Methoden, Umsetzung und Trends*: De Gruyter, 2011
- [Bel13]: BELLER, J.; HEESSEN, M.; VOLLRATH, M.: *Improving the Driver-Automation Interaction: An Approach Using Automation Uncertainty*. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 55 (2013), Nr. 6, S. 1130-1141
- [Ben14]: BENGLER, Klaus; DIETMAYER, Klaus; FARBER, Berthold; MAURER, Markus; STILLER, Christoph; WINNER, Hermann: *Three Decades of Driver Assistance Systems: Review and Future Perspectives*. In: *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 6 (2014), Nr. 4, S. 6-22
- [Ber12]: BERTHELOT, Adam; TAMKE, Andreas; DANG, Thao; BREUEL, Gabi: Stochastic situation assessment in advanced driver assistance system for complex multi-objects traffic situations. In: *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2012)*, 2012, S. 1180-1185
- [Beu09]: BEUSEN, Bart; BROEKX, Steven; DENYS, Tobias; BECKX, Carolien; DEGRAEUWE, Bart; GIJSBERS, Maarten; SCHEEPERS, Kristof; GOVAERTS, Leen; TORFS, Rudi; PANIS, Luc Int: *Using on-board logging devices to study the longer-term impact of an eco-driving course*. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 14 (2009), Nr. 7, S. 514-520
- [Bhi71]: BHISE, V. D.; ROCKWELL, T. H.: *Role of peripheral vision and time-sharing in driving*. In: *Proceedings: American Association for Automotive Medicine Annual Conference* 15 (1971), S. 320-341. URL <http://dx.doi.org/>
- [Bil97]: BILLINGS, C. E.: *Aviation Automation: The search for a human-centered approach*. Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, 1997
- [Bla96]: BLANA, Evi: *Driving simulator validation studies: A literature review*. In: *Institute of Transport Studies, University of Leeds Working Paper* 480 (1996)
- [Bor07]: BORTZ, J.; DÖRING, N.: *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler: Limitierte Sonderausgabe*: Springer Berlin Heidelberg, 2007

- [Bor10]: BORTZ, Jürgen; SCHUSTER, Christof: *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*: Springer Berlin Heidelberg, 2010
- [Bra08]: BRAUN, Robert: *Ein echtzeitfähiger Evolutionärer Algorithmus zur netzweiten Optimierung der Lichtsignalanlagensteuerung*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Verkehrstechnik. Dissertation (2008)
- [Bra09]: BRAUN, Robert; BUSCH, Fritz; KEMPER, Carsten; HILDEBRANDT, Robert; WEICHENMEIER, Florian; MENIG, Cornelius; PAULUS, Ingrid; PREßLEIN-LEHLE, Renate: *TRAVOLUTION-Netzweite Optimierung der Lichtsignalsteuerung und LSA-Fahrzeug-Kommunikation*. In: *Straßenverkehrstechnik* 53 (2009), S. 365-374
- [Bra13]: BRAESS, Hans-Hermann: *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 7. Aufl: SEIFFERT, Ulrich (Hrsg.). Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013
- [Bra15]: BRAUMANN, Arvid: *Anzeige- und Bedienkonzepte im Elektrofahrzeug - abgeleitete Gestaltungsregeln durch einen menschenzentrierten Entwicklungsansatz*. Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik. Dissertation (2015)
- [Bre10]: BREUER, Franz: Wissenschaftstheoretische Grundlagen qualitativer Methodik in der Psychologie. In: MEY, Günter; MRUCK, Katja (Hrsg.): *Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2010
- [Bre12]: BREUER, Jörg: Bewertungsverfahren von Fahrerassistenzsystemen. In: WINNER, Hermann; HAKULI, Stephan; WOLF, Gabriele (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden: Vieweg Teubner Verlag, 2012, S. 55-68
- [Bre15]: BREUER, Jörg; HUGO, Christoph von; MÜCKE, Stephan; TATTERSALL, Simon: Nutzerorientierte Bewertungsverfahren von Fahrerassistenzsystemen. In: HAKULI, Stephan; LOTZ, Felix; SINGER, Christina (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 183-196
- [Bre84]: BREZNITZ, Shlomo: *Cry wolf: The psychology of false alarms*. Hillsdale, N.J.: Lawrence Erlbaum Associates, 1984
- [Bro15]: BROSIUS, H. B.; HAAS, A.; KOSCHEL, F.: *Methoden der empirischen Kommunikationsforschung: Eine Einführung*: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2015
- [Bro96]: BROOKE, John: SUS: a "quick and dirty" usability scale. In: JORDAN, Patrick W.; THOMAS, B.; McClelland I. L.; WEERDMEESTER, B. (Hrsg.): *Usability evaluation in industry*. London, Bristol: Taylor & Francis, 1996, S. 189-194
- [Bru15]: BRUDER, Ralph; DIDIER, Muriel: Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen. In: HAKULI, Stephan; LOTZ, Felix; SINGER, Christina (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 633-645
- [Bub15a]: BUBB, Heiner (Hrsg.); BENGLER, Klaus (Hrsg.); GRÜNEN, Rainer E. (Hrsg.); VOLLRATH, Mark (Hrsg.): *Automobilergonomie*: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015
- [Bub15b]: BUBB, Heiner; VOLLRATH, Mark; REINPRECHT, Klaus; ERHARD, Mayer; KÖRBER, Moritz: Der Mensch als Fahrer. In: BUBB, Heiner; BENGLER, Klaus; GRÜNEN,

- Rainer E.; VOLLRATH, Mark (Hrsg.): *Automobilergonomie*: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 67-162
- [Bub15c]: BUBB, Heiner: Gestaltung der Konditionssicherheit. In: BUBB, Heiner; BENGLER, Klaus; GRÜNEN, Rainer E.; VOLLRATH, Mark (Hrsg.): *Automobilergonomie*: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 472-523
- [Bub15d]: BUBB, Heiner; BENGLER, Klaus; LANGE, Christian; ARINGER, Carmen; TRÜBSWETTER, Nicole; CONTI, Antonia; ZIMMERMANN, Markus: Messmethoden. In: BUBB, Heiner; BENGLER, Klaus; GRÜNEN, Rainer E.; VOLLRATH, Mark (Hrsg.): *Automobilergonomie*: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 617-662
- [Bub15e]: BUBB, Heiner: Menschmodelle. In: BUBB, Heiner; BENGLER, Klaus; GRÜNEN, Rainer E.; VOLLRATH, Mark (Hrsg.): *Automobilergonomie*: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 221-258
- [Bud12]: BUDDE, R.; KAUTZ, K.; KUHLENKAMP, K.; ZÜLLIGHOVEN, H.: *Prototyping: An Approach to Evolutionary System Development*: Springer Berlin Heidelberg, 2012
- [Bul02]: BULD, Susanne; KRÜGER, Hans-Peter; HOFFMANN, S.; KAUSSNER, A.; TIETZE, R.; TOTZKE, I.: *Wirkungen von Assistenz und Automation auf Fahrerzustand und Fahrsicherheit: Veröffentlichter Abschlussbericht Projekt EMPHASIS Effort-Management und Performance-Handling in sicherheitsrelevanten Situationen* (2002)
- [Bul03]: BULD, Susanne; KRÜGER, Hans-Peter: *Die Auswirkung von Teilautomation auf das Fahrverhalten: DGLR-Bericht 2003-4: Entscheidungsunterstützung für die Fahrzeug- und Prozessführung* (2003)
- [Bun14]: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und REaktorsicherheit: *Internationale Klimapolitik*. URL <http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/internationale-klimapolitik/> – Überprüfungsdatum 2016-02-09
- [Bun15a]: Bundesregierung Deutschland: *Neuer Klimavertrag beschlossen: UN-Gipfel in Paris*. URL <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2015/12/2015-12-12-klimaabkommen.html> – Überprüfungsdatum 2016-02-09
- [Bun15b]: Bundesministerium des Inneren, Abteilung IT: *Das V-Modell XT*. URL [http://www.cio.bund.de/Web/DE/Architekturen-und-Standards/V-Modell-XT/vmodell\\_xt\\_node.html](http://www.cio.bund.de/Web/DE/Architekturen-und-Standards/V-Modell-XT/vmodell_xt_node.html) – Überprüfungsdatum 2016-07-18
- [Bun15c]: Bundesamt für Güterverkehr: *Marktbeobachtung Güterverkehr: Auswertung der Arbeitsbedingungen in Güterverkehr und Logistik 2015-I -Fahrerberufe*. URL [https://www.bag.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Marktbeobachtung/Turnusberichte\\_Arbeitsbedingungen/SB\\_5D\\_%202015\\_Fahrerberufe.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bag.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Marktbeobachtung/Turnusberichte_Arbeitsbedingungen/SB_5D_%202015_Fahrerberufe.pdf?__blob=publicationFile) – Überprüfungsdatum 2016-02-17
- [Bun15d]: Bundesverband Güterkraftverkehr: *Kostenentwicklung im Güterkraftverkehr. Kostenstruktur: nationaler Fernverkehr 2013*. URL [http://www.bgl-ev.de/web/initiativen/kosten\\_kalkulator.htm?v=2#form](http://www.bgl-ev.de/web/initiativen/kosten_kalkulator.htm?v=2#form) – Überprüfungsdatum 2015-06-10
- [Bur08]: BURMESTER, Michael; GRAF, Ralf; HELLBRÜCK, Jürgen; MEROTH, Ansgar: Usability — Der Mensch im Fahrzeug. In: MEROTH, Ansgar; TOLG, Boris (Hrsg.): *Infotainmentsysteme im Kraftfahrzeug: Grundlagen, Komponenten, Systeme*

- und Anwendungen; mit 15 Tabellen.* Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag GWV Fachverlage GmbH, 2008, S. 321-355
- [Bus13]: BUSCHMANN, Frank; MEUNIER, Regine; ROHNERT, Hans; SOMMERLAD, Peter; STAL, Michael: *Pattern-Oriented Software Architecture, Volume 1, A System of Patterns.* 1. Aufl. New York, NY: John Wiley & Sons, 2013
- [But14]: BUTZ, Andreas: *Mensch-Maschine-Interaktion.* München: Oldenbourg, 2014
- [Bux07]: BUXTON, William: *Sketching user experiences: Getting the design right and the right design.* Amsterdam, Boston: Elsevier/Morgan Kaufmann, 2007
- [Chu05]: CHUN, Marvin M.; WOLFE, Jeremy M.: Visual Attention. In: GOLDSTEIN, E. Bruce (Hrsg.): *Blackwell Handbook of Sensation and Perception.* Oxford, UK, Malden, Mass., USA: Blackwell, 2005, S. 272-310
- [Cla99]: CLAUSS, Günter; FINZE, Falk-Rüdiger; PARTZSCH, Lothar: *Statistik für Soziologen, Pädagogen, Psychologen und Mediziner: Grundlagen.* 3., überarb. Auflage. Thun und Frankfurt am Main: Harri Deutsch, 1999
- [Coh92]: COHEN, Jacob: *Statistical power analysis.* In: *Current directions in psychological science* 1 (1992), Nr. 3, S. 98-101
- [Dai16]: Daimler AG: *Interaktive Betriebsanleitung.* URL [http://moba.i.daimler.com/baix/trucks/actros/de\\_DE/index.html#././trucks/actros/de\\_DE/manual/subchapter\\_11\\_81.shtml:ID\\_6620f334a46f43f3351f191542487ae1](http://moba.i.daimler.com/baix/trucks/actros/de_DE/index.html#././trucks/actros/de_DE/manual/subchapter_11_81.shtml:ID_6620f334a46f43f3351f191542487ae1) – Überprüfungsdatum 2016-09-18
- [Dam11]: DAMIÁN-REYES, Pedro; FAVELA, Jesús; CONTRERAS-CASTILLO, Juan: *Uncertainty Management in Context-Aware Applications: Increasing Usability and User Trust.* In: *Wireless Personal Communications* 56 (2011), Nr. 1, S. 37-53
- [Dam13]: DAMBÖCK, Daniel: *Automationseffekte im Fahrzeug – von der Reaktion zur Übernahme.* Technische Universität München, Lehrstuhl für Ergonomie. Dissertation (2013)
- [Dam14]: DAMEROW, Florian; EGGERT, Julian: Predictive risk maps. In: *2014 IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, S. 703-710
- [Dau12]: DAUN, Thomas J.; LIENKAMP, Markus: *Spielend Fahren: Gamification-Konzept für Fahrerassistenzsysteme.* In: *VDI-Berichte* 2179 (2012), Nr. 20126, S. 269-282
- [Dau13]: DAUN, Thomas J.; BRAUN, Daniel G.; FRANK, Christopher; HAUG, Stephan; LIENKAMP, Markus: Evaluation of driving behavior and the efficacy of a predictive eco-driving assistance system for heavy commercial vehicles in a driving simulator experiment. In: *2013 16<sup>th</sup> International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems - (ITSC 2013)*, 2013, S. 2379-2386
- [Dav89]: DAVIS, Fred D.; BAGOZZI, Richard P.; WARSHAW, Paul R.: *User acceptance of computer technology: a comparison of two theoretical models.* In: *Management science* 35 (1989), Nr. 8, S. 982-1003
- [Den12]: DENIMAL, Philippe; SCHALLER, Karl Viktor; SASSE, Uwe; TIETZE, Roy; SÜSSMANN, Alexander: *Konzept zur Erhöhten Transporteffizienz für 40-Tonner.* In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 114 (2012), Nr. 12, S. 992-997

- [DIN08] DIN EN ISO. Schutzrecht 9241-110:2008: *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung (9241-110:2008)*
- [DIN11] DIN EN ISO. Schutzrecht 9241-210: *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme (ISO 9241-210:2010)*
- [Dix04]: DIX, Alan: *Human-Computer Interaction*. 3. Aufl. Harlow, England, New York: Pearson/Prentice-Hall, 2004
- [Don15]: DONGES, Edmund: Fahrerhaltensmodelle. In: HAKULI, Stephan; LOTZ, Felix; SINGER, Christina (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 17-26
- [Don78]: DONGES, Edmund: *Ein regelungstechnisches Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug*. In: *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* 24 (1978), Nr. 3
- [Dor03]: DORRER, Claus: *Effizienzbestimmung von Fahrweisen und Fahrerassistenz zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs unter Nutzung telematischer Informationen*. Renningen: Expert-Verlag, 2003 (Bd. 24)
- [Dor12]: DORNIEDEN, Bernd; JUNGE, Lutz; PASCHEKA, Patrick: *Vorausschauende Energieeffiziente Fahrzeuglängsregelung*. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 114 (2012), Nr. 3, S. 230-235
- [Dör15]: DÖRNER, Karlheinz; SCHWERTBERGER, Walter; HIPPE, Eberhard: *Bahnführungsassistenz für Nutzfahrzeuge*. In: HAKULI, Stephan; LOTZ, Felix; SINGER, Christina (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015
- [Dro89]: DROSDOWSKI, Günther: *Duden „Etymologie“: Herkunftswörterbuch der deutschen Sprache*: Dudenverlag, 1989
- [Dzi03]: DZINDOLET, Mary T.; PETERSON, Scott A.; POMRANKY, Regina A.; PIERCE, Linda G.; BECK, Hall P.: *The role of trust in automation reliance*. In: *International Journal of Human-Computer Studies* 58 (2003), Nr. 6, S. 697-718
- [Ebe10]: EBEL, S.; WILHELM, U.; GRIMM, A.; SAILER, U.: *Ganzheitliche Absicherung von Fahrerassistenzsystemen in Anlehnung an ISO 26262*. In: *VDI-Berichte* (2010), Nr. 2104
- [Eco14]: Economic and Social Council, United Nations: *Report of the sixty-eighth session of the Working Party on Road Traffic Safety*. URL <http://www.un-ece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2014/wp1/ECE-TRANS-WP1-145e.pdf> – Überprüfungsdatum 2016-07-18
- [Egg14]: EGGERT, Julian: Predictive risk estimation for intelligent ADAS functions. In: IEEE ITSC (Hrsg.): *2014 IEEE 17<sup>th</sup> International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2014, S. 711-718
- [End95a]: ENDSLEY, Mica R.; KIRIS, Esin O.: *The Out-of-the-Loop Performance Problem and Level of Control in Automation*. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 37 (1995), Nr. 2, S. 381-394

- [End95b]: ENDSLEY, Mica R.: *Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems*. In: *Human Factors The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 37 (1995), Nr. 1, S. 32-64
- [End96]: ENDSLEY, Mica R.: Automation and situation awareness. In: *Automation and human performance: Theory and applications*. Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum, 1996, S. 163-181
- [End99]: ENDSLEY, Mica R.; Kaber, David, B.: *Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task*. In: *Ergonomics* 42 (1999), Nr. 3, S. 462-492
- [Eur06]: Europäische Kommission: *European Statement of Principles on HMI for In-Vehicle Information and Communication Systems*. URL <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008H0653&from=EN> – Überprüfungsdatum 2016-07-18
- [Eur09]: Europäische Kommission: *Verordnung (EG) Nr. 443/2009 Des Europäischen Parlaments und des Rats: vom 23. April 2009*. URL <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02009R0443-20130508&from=EN> – Überprüfungsdatum 2016-06-03
- [Eve09]: EVERS, Claudia: *Auswirkungen von Belastungen und Stress auf das Verkehrsverhalten von Lkw-Fahrern*. Bonn, Friedrich-Wilhelms-Universität, Philosophische Fakultät. Dissertation (2009)
- [Fie03]: FIELD, Andy P.; HOLE, Graham: *How to design and report experiments*. London, Thousand Oaks: Sage, 2003
- [Fie13]: FIELD, Andy P.: *Discovering statistics using IBM SPSS statistics*. 4. Aufl. Los Angeles: Sage, 2013
- [Fis75]: FISHBEIN, Martin; AJZEN, Icek: *Belief, Attitude, Intention, and Behaviour: An Introduction to Theory and Research* (1975)
- [Fit51]: FITTS, Paul M.: *Human engineering for an effective air-navigation and traffic-control system*: National Research Council, 1951
- [Fit79]: FITTER, Mike: *Towards more "natural" interactive systems*. In: *International Journal of Man-Machine Studies* 11 (1979), Nr. 3, S. 339-350
- [Fle08]: FLEMISCH, F.; KELSCH, J.; LÖPER, C.; SCHIEBEN, A.: Automation spectrum, inner / outer compatibility and other potentially useful human factors concepts for assistance and automation. In: WAARD, D. de; FLEMISCH, F.; LORENZ, B. (Hrsg.): *Human factors for assistance and automation*. Maastricht: Shaker Publishing, 2008, S. 1-16
- [Fli11]: FLICK, Uwe: *Triangulation: Eine Einführung*. 3. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften/ Springer Fachmedien, 2011 (12)
- [For07]: FORUM, International Transport: *Workshop on Ecodriving: Findings and Messages for Policy Makers*. URL <http://www.internationaltransportforum.org/Proceedings/ecodriving/EcoConclus.pdf> – Überprüfungsdatum 2016-02-16
- [Fre12]: Freek Faber; Eline Jonkers; Martijn van Noort; Mohamed Benmimoun; Andreas Pütz; Barbara Metz; Guillaume Saint Pierre; Dan Gustafson; Lucas Malta: *Final results: impacts on traffic efficiency and environment: euroFOT*

- Deliverable 6.5 and 6.6. URL <http://www.eurofot-ip.eu/> – Überprüfungsdatum 2015-02-25
- [Fuc15]: FUCHS, Hendrik; HOFMANN, Frank; LÖHR, Hans; SCHAAF, Gunther: Car-2-X. In: HAKULI, Stephan; LOTZ, Felix; SINGER, Christina (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 525-540
- [Gam00]: GAMBETTA, Diego: *Trust: Making and Breaking Cooperative Relations*. 2000
- [Gas12]: GASSER, Tom M.: *Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung: Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe*. Bremerhaven, 2012
- [Gas15]: GASSER, Tom M.; SEECK, Andre; SMITH, Bryant W.: Rahmenbedingungen für die Fahrerassistenzsystementwicklung. In: HAKULI, Stephan; LOTZ, Felix; SINGER, Christina (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 27-54
- [Gei90]: GEISER, Georg: *Mensch-Maschine-Kommunikation*: Oldenbourg Verlag, 1990
- [Geo95]: GEORGIEFF, Peter: *Informationstechnik zur Fahrerunterstützung im Strassenverkehr: Technikfolgen-Abschätzung zur Sicherheit in der Informationstechnik: Abschlussbericht*. Köln: Bundesanzeiger, 1995 (Bd. 6)
- [Gha12]: GHAZIZADEH, Mahtab; LEE, John D.; BOYLE, Linda Ng: *Extending the Technology Acceptance Model to assess automation*. In: *Cognition, Technology & Work* 14 (2012), Nr. 1, S. 39-49
- [Gie07]: GIETELINK, Olaf: *Design and Validation of Advanced Driver Assistance Systems*. Delft, TU Delft. Dissertation (2007)
- [Gna15]: GNATZIG, Sebastian: *Trajektorienbasierte Teleoperation von Straßenfahrzeugen auf Basis eines Shared-Control-Ansatzes*. TU München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik. Dissertation (2015)
- [Go04]: GO, Kentaro; CARROLL, John M.: Scenario-Based Task Analysis. In: DIAPER, Dan.; STANTON, Neville A. (Hrsg.): *The Handbook of Task Analysis for Human-Computer Interaction*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum, 2004, S. 117-134
- [Gol11]: GOLDSTEIN, Eugen Bruce: *Wahrnehmungspsychologie: Der Grundkurs*. 7. Aufl. Heidelberg: Spektrum, Akademischer Verlag, 2011
- [Göt15]: GÖTZE, Martin; RUFF, Franz; BENGLER, Klaus: *Optimal Information Output in Urban Traffic Scenarios: An Evaluation of Different HMI Concepts*. In: *Procedia Manufacturing* 3 (2015), S. 739-746
- [Gre08]: GREEN, Paul; LEVISON, William; PAELKE, Gretchen; SERAFIN, Colleen: *Suggested Human Factors Design Guidelines for Driver Information Systems*. URL [http://www.umich.edu/~driving/guidelines/UMTRI\\_Guidelines.pdf](http://www.umich.edu/~driving/guidelines/UMTRI_Guidelines.pdf). – Aktualisierungsdatum: 2016-07-18
- [Gre98]: GREENBAUM, Thomas L.: *The handbook for focus group research*: Sage, 1998
- [Gro00]: GROEGER, John A.: *Understanding driving: Applying cognitive psychology to a complex everyday task*. East Sussex, Philadelphia: Psychology Press; Taylor & Francis, 2000

- [Grü12]: GRÜNIG, Georg: *Fahrer bleibt Chef: Daimlers GPS-gestützter Tempomat funktioniert fein und lässt dem Fahrer Autonomie*. URL <http://www.trucker.de/fahrer-bleibt-chef-1142820.html> – Überprüfungsdatum 2016-09-18
- [Gwe06]: GWEHENBERGER, J.; SCHWERTBERGER, Walter; DASCHNER, D.: *Wirkungspotenziale von Adaptive Cruise Control und Lane Guard System bei schweren Nutzfahrzeugen. Teile 1 und 2*. In: *VERKEHRSUNFALL UND FAHRZEUGTECHNIK* 4 (2006), 10&11
- [Ham02]: HAMACHER, Nico; KRAISS, Karl-Friedrich; MARRENBACH, Jörg: *Einsatz formaler Methoden zur Evaluierung der Gebrauchsfähigkeit interaktiver Geräte (Utilization of Formal Methods for the Usability Evaluation of Interactive Devices)*. In: *It-Information Technology, Methoden und innovative Anwendungen der Informatik und Informationstechnik* 44 (2002), 1/2002, S. 49
- [Han93]: HANCOCK, P. A.: *On The Future Of Hybrid Human-Machine Systems*. In: WISE, John A.; HOPKIN, V. David; STAGER, Paul (Hrsg.): *Verification and validation of complex systems: Human factors issues*. Berlin: Springer-Verlag, 1993 (vol. 110), S. 61-85
- [Har06]: HART, Sandra G.: *Nasa-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later*. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 50 (2006), Nr. 9, S. 904-908
- [Har88]: HART, Sandra G.; STAVELAND, Lowell E.: *Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research*, Bd. 52. In: HANCOCK, Peter A.; MESHKATI, Najmedin (Hrsg.): *Human mental workload*. Amsterdam, New York, New York, N.Y., U.S.A.: North-Holland; Sole distributors for the U.S.A. and Canada, Elsevier Science Pub. Co, 1988 (52), S. 139-183
- [Hau02]: HAUß, Yorck; TIMPE, Klaus-Peter: *Automatisierung und Unterstützung im Mensch-Maschine-System*. In: TIMPE, Klaus-Peter; BAGGEN, Robert (Hrsg.): *Mensch-Maschine-Systemtechnik: Konzepte, Modellierung, Gestaltung, Evaluation*. 2. Aufl. Düsseldorf: Symposion, 2002, S. 41-62
- [Hee12]: HEESEN, Matthias; BAUMANN, Martin: *Rückmeldung von Automations(un)sicherheit als Möglichkeit zur Verbesserung der Kontrollierbarkeit von Automationsfehlern bei hoch- bzw. teilautomatisiertem Fahren*. In: Uni-DAS e.V. (Hrsg.): *8. Workshop Fahrerassistenzsysteme: FAS2012*, 2012, S. 97-106
- [Hel09]: HELLSTRÖM, Erik; IVARSSON, Maria; ÅSLUND, Jan; NIELSEN, Lars: *Look-ahead control for heavy trucks to minimize trip time and fuel consumption*. In: *Control Engineering Practice* 17 (2009), Nr. 2, S. 245-254
- [Hel13]: HELLDIN, Tove; FALKMAN, Göran; RIVEIRO, Maria; DAVIDSSON, Staffan: *Presenting system uncertainty in automotive UIs for supporting trust calibration in autonomous driving*, Bd. 5. In: TERKEN, Jaques (Hrsg.): *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular and Interactive Vehicular Applications (AutomotiveUI '13)*. New York, NY: ACM, 2013, S. 210-217
- [Hey12]: HEYES, Daniel; HIPPE, Eberhard; ZIMMERMANN, Andreas; RAUDSZUS, Dominik; RÖMERSPERGER, Xaver; LIENKAMP, Markus: *Systematische Bewertung des Fahrereinflusses auf die Transporteffizienz von Nutzfahrzeugen (Vortrag 5. Tagung Fahrerassistenz: Schwerpunkt Vernetzung; 15.-16.05.2012)*. München. URL <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1142097/1142097.pdf>

- [Hey14]: HEYES, Daniel; DAUN, Thomas J.; ZIMMERMANN, Andreas; LIENKAMP, Markus: *Verbundprojekt: ViFa – Virtueller Fahrtrainer Entwicklung eines virtuellen Fahrtrainers zur Unterstützung einer verbrauchs- und verschleißoptimierten Fahrweise: Schlussbericht*. URL <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1222591-1222591.pdf>. – Aktualisierungsdatum: 2016-10-08
- [Hey15]: HEYES, Daniel; DAUN, Thomas J.; ZIMMERMANN, Andreas; LIENKAMP, Markus: *The Virtual Driving Coach - design and preliminary testing of a predictive eco-driving assistance system for heavy-duty vehicles*. In: *European Transport Research Review* 7 (2015), Nr. 3
- [Hil09]: HILLESHEIM, Daniel; SCHYGULLA, Michael; BERG, Uwe; ZÖBEL, Dieter: Fahrerinformations- und assistenzsystem zur energieeffizienten Planung und Durchführung von Gütertransporten mit Nutzfahrzeugen, VDI-Berichte, 2068. In: VDI (Hrsg.): *10. Internationale Fachtagung Nutzfahrzeuge: Mit Fachausstellung und Omnibusforum*. Neu-Ulm, 27. und 28. Mai 2009 Düsseldorf, 2009, S. 97-107
- [Hof16]: HOF AUER, Sonja; KARMANN, Anna; ZIMMERMANN, Andreas: *Verbundprojekt UR: BAN – Benutzergerechte Assistenzsysteme und Netzmanagement Teilprojekt Mensch-Maschine-Interaktion (MMI): Abschlussbericht der MAN Truck & Bus AG*, 2016
- [Hof17]: HOF AUER, Sonja; MICHEL, Britta; WEISE, Sigrun; KARMANN, Anna; DIERMEYER, Frank; STEPHAN, A.; DRÜKE, Julia; SEMMLER, Carsten; BENDEWALD, L.: *HMI Strategy - Lateral and longitudinal control*. In: BENGLER, Klaus; HOFFMANN, Silja; MANSTETTEN, Dietrich; NEUKUM, Alexandra; DRÜKE, Julia (Hrsg.): *UR: BAN Human Factors in Traffic*: Springer, 2017 (in press)
- [Hör11]: Hörwick, Markus, A.: *Sicherheitskonzept für hochautomatisierte Fahrerassistenzsysteme*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik. Dissertation (2011)
- [Hou14]: HOUENOU, Adam; BONNIFAIT, Philippe; CHERFAOUI, Veronique: *Risk assessment for Collision Avoidance Systems*. In: *2014 IEEE 17<sup>th</sup> International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2014, S. 386-391
- [Hua03]: HUANG, Pei-shih: *Regelkonzepte zur Fahrzeugführung unter Einbeziehung der Bedienelementeigenschaften*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Ergonomie. Dissertation (2003)
- [IEA15]: IEA International Energy Agency: *CO2 Emissions from Fuel Combustion: Highlights*. URL <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO2EmissionsFromFuelCombustionHighlights2015.pdf> – Überprüfungsdatum 2016-06-03
- [ISO11]: ISO 26262-3:2011: *Road vehicles - Functional safety - Part 3: Concept Phase (2011)*
- [Joh83]: JOHNSON-LAIRD, P. N.: *Mental models: Towards a cognitive science of language, inference, and consciousness*. Cambridge: Harvard University Press, 1983 (6)
- [Jür07]: JÜRGENSOHN, Thomas: *Control Theory Models of the Driver*. In: CACCIABUE, C. (Hrsg.): *Modelling Driver Behaviour in Automotive Environments: Critical*

- Issues in Driver Interactions with Intelligent Transport Systems*: Springer London, 2007, S. 277-292
- [Kar06]: KARAHANNA, Elena; AGARWAL, Ritu; ANGST, Corey M.: *Reconceptualizing compatibility beliefs in technology acceptance research*. In: *MIS Quarterly* (2006), S. 781-804
- [Kaz07]: KAZI, Tarannum A.; STANTON, Neville A.; WALKER, Guy H.; YOUNG, Mark S.: *'Designer driving: drivers' conceptual models and level of trust in adaptive cruise control*. In: *International Journal of Vehicle Design* 45 (2007), Nr. 3, S. 339-360
- [Kec11]: KECHER, Christoph: *UML 2: Das umfassende Handbuch*. 4. Aufl. Bonn: Galileo Press, 2011
- [Kem11]: KEMMANN, Soeren; TRAPP, Mario: SAHARA -A Systematic Approach for Hazard Analysis and Risk Assessment. In: SAE (Hrsg.): *World Congress & Exhibition*. Warrendale, PA, United States: SAE International, 2011
- [Ker11]: KERN, Dagmar: *Supporting the Development Process of Multimodal and Natural Automotive User Interfaces*. Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften. Dissertation (2011)
- [Kit06]: KITTERER, Hartmut: *Längsdynamische Fahrerassistenz im Nutzfahrzeug*. Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Fakultät für Maschinenwesen. Dissertation (2006)
- [Kna09]: KNAPPE, Gwendolin; KEINATH, Andreas; MEINECKE, Cristina: *Empfehlungen für die Bestimmung der Spurhaltegüte im Kontext der Fahrsimulation*. URL [http://www.mmi-interaktiv.de/uploads/media/02-Knappe\\_et\\_al.pdf](http://www.mmi-interaktiv.de/uploads/media/02-Knappe_et_al.pdf). – Aktualisierungsdatum: 2016-07-18
- [Kno16]: KNOBEL, Christian; PÖLTENSTEIN, Axel; KNOLLER, Stefan: *Vorausschauende EfficientDynamics-Funktionen*. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 118 (2016), Nr. 4, S. 16-21
- [Kol98]: KOLLMANN, Tobias: *Akzeptanz innovativer Nutzungsgüter und -systeme: Konsequenzen für die Einführung von Telekommunikations- und Multimediasystemen*. Wiesbaden: Gabler, 1998 (239)
- [Kön15]: KÖNIG, Winfried: *Nutzergerechte Entwicklung der Mensch-Maschine- Interaktion von Fahrerassistenzsystemen*. In: HAKULI, Stephan; LOTZ, Felix; SINGER, Christina (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 621-632
- [Kop09]: KOPP, Stephan; SCHÖNHERR, Stephan ; KOOS, Holger: *Design und Aerodynamik bei Nutzfahrzeugen*. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 111 (2009), 7-8, S. 512–517
- [Kra98]: KRAISS, Karl-Friedrich: *Benutzergerechte Automatisierung – Grundlagen und Realisierungskonzepte*. In: *at - Automatisierungstechnik* 46 (1998), Nr. 10
- [Küs87]: KÜSTER, Ursula; REITER, Karl: *Technikwissen und Fahrverhalten junger Fahrer - Eine empirische Studie*. In: *Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung* (1987), Nr. 160

- [Lah09]: LAHRES, Bernhard; RAÝMAN, Gregor: *Objektorientierte Programmierung: Das umfassende Handbuch*. 2. Aufl. Bonn: Galileo Press, 2009
- [Lan13]: LANG, Dominik; STANGER, Thomas; DEL RE, Luigi: Opportunities on Fuel Economy Utilizing V2V Based Drive Systems. In: *SAE 2013 World Congress*.
- [Lan14]: LANG, Dominik; STANGER, Thomas; SCHMIED, Roman; RE, Luigi del: Predictive Cooperative Adaptive Cruise Control: Fuel Consumption Benefits and Implementability, Bd. 455. In: WASCHL, Harald; KOLMANOVSKY, Ilya; STEINBUCH, Maarten; DEL RE, Luigi (Hrsg.): *Optimization and Optimal Control in Automotive Systems*. Cham: Springer International Publishing, 2014, S. 163-178
- [Led14]: LEDERER, Matthias: Energieeffizientes Fahren. In: LIEBL, Johannes; LEDERER, Matthias; ROHDE-BRANDENBURGER, Klaus; BIERMANN, Jan-Welm; ROTH, Martin; SCHÄFER, Heinz (Hrsg.): *Energiemanagement im Kraftfahrzeug: Optimierung von CO2-Emissionen und Verbrauch konventioneller und elektrifizierter Automobile*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 307-321
- [Lee04]: LEE, John D.; SEE, Katrina A.: *Trust in Automation: Designing for Appropriate Reliance*. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 46 (2004), Nr. 1, S. 50-80
- [Lef13]: LEFEVRE, Stephanie; BAJCSY, Ruzena; LAUGIER, Christian: Probabilistic decision making for collision avoidance systems: Postponing decisions. In: *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2013)*, 2013, S. 4370-4375
- [Lex00]: Lexikon der Psychologie: *Gefahrenkognition*. URL <http://www.spektrum.de/lexikon/psychologie/gefahrenkognition/5582> – Überprüfungsdatum 2016-01-13
- [Lie13]: LIENKAMP, Markus: *Aufbruch zu einer neuen Form der Mobilität*. In: *ATZextra* 18 (2013), Nr. 13, S. 16-19
- [Lin12]: LINDBERG, Thomas: *Entwicklung einer ABK-Metapher für gruppierte Fahrerassistenzsysteme*. TU Dresden, Fakultät für Verkehrswesen und Machinensysteme. Dissertation (2012)
- [Lit03]: LITOSELLITI, Lia: *Using Focus Groups in Research*. London: Continuum, 2003
- [Loh14]: LOHRE, Dirk; BERNECKER, Tobias; STOCK, Wilfried; DÜSELDORFF, Karl: *ZF-Zukunftsstudie Fernfahrer 2.0: Der Mensch im Transport- und Logistikmarkt*. URL <http://www.zf-zukunftsstudie.de/downloads/downloads-2014/> – Überprüfungsdatum 2015-06-10
- [Luh00]: LUHMANN, Niklas: Familiarity, Confidence, Trust: Problems and Alternatives. In: GAMBETTA, Diego (Hrsg.): *Trust: Making and Breaking Cooperative Relations*, 2000, S. 94-107
- [Lut14]: LUTZ, Lennart: *Die bevorstehende Änderung des Wiener Übereinkommens über den Straßenverkehr: Eine Hürde auf dem Weg zu (teil-) autonomen Fahrzeugen ist genommen!* In: *ADAC DAR - Deutsches Autorecht* 84 (2014), S. 446-450
- [Maa95]: MAAß, Susanne: *Transparenz-eine zentrale Software-ergonomische Forderung*: Universität Hamburg, Fachbereich Informatik, 1995

- [Mah10]: MAHATODY, Thomas; SAGAR, Mouldi; KOLSKI, Christophe: *State of the Art on the Cognitive Walkthrough Method, Its Variants and Evolutions*. In: *International Journal of Human-Computer Interaction* 26 (2010), Nr. 8, S. 741-785
- [Mai13]: MAIER, Enrico: *Aufmerksamkeitsunabhängige Informationsübertragung in Mensch-Maschine-Systemen*. Berlin, TU Berlin. Dissertation (2013)
- [Man08]: MANZEY, Dietrich: Systemgestaltung und Automatisierung. In: BADKE-SCHAUB, Petra; HOFINGER, Gesine; LAUCHE, Kristina (Hrsg.): *Human Factors*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008, S. 307-324
- [MAN16]: MAN Truck & Bus: *GPS-gesteuerter Tempomat*. URL <http://www.truck.man.eu/ch/de/faszination-und-technik/technologie-und-kompetenz/technik/gps-gesteuerter-tempomat/GPS-gesteuerter-Tempomat.html> – Überprüfungsdatum 2016-02-04
- [Mar12]: MARKSCHLÄGER, Philip; WAHL, Hans-Georg; WEBERBAUER, Frank; LEDERER, Matthias: *Assistenzsystem für Mehr Kraftstoffeffizienz*. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 114 (2012), Nr. 11, S. 850-855
- [Mat15a]: MATTHAEI, Richard; RESCHKA, Andreas; RIEKEN, Jens; DIERKES, Frank; ULBRICH, Simon; WINKLE, Thomas; MAURER, Markus: *Autonomes Fahren*. In: HAKULI, Stephan; LOTZ, Felix; SINGER, Christina (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 1139-1166
- [Mat15b]: MATZ, Stephan: *Nutzerorientierte Fahrzeugkonzeptoptimierung in einer multimodalen Verkehrsumgebung*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik. Dissertation (2015)
- [Mie05]: MIETZEL, Gerd: *Wege in die Psychologie*: Klett-Cotta, 2005
- [Mor98]: MORGAN, D. L.: *Practical Strategies for Combining Qualitative and Quantitative Methods: Applications to Health Research*. In: *Qualitative Health Research* 8 (1998), Nr. 3, S. 362-376
- [Mos12]: MOSER, C.: *User Experience Design: Mit erlebniszentrierter Softwareentwicklung zu Produkten, die begeistern*: Springer Berlin Heidelberg, 2012
- [Mui09]: MUIGG, Andreas: *Implizites Workloadmanagement - Konzept einer zeitlich-situativen Informationsfilterung im Automobil*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation. Dissertation (2009)
- [Mui87]: MUIR, Bonnie M.: *Trust between humans and machines, and the design of decision aids*. In: *International Journal of Man-Machine Studies* 27 (1987), 5-6, S. 527-539
- [Neg07]: NEGELE, Hans-Jürgen: *Anwendungsgerechte Konzipierung von Fahrsimulatoren für die Fahrzeugentwicklung*. Technische Universität München. Dissertation (2007)
- [Neu08a]: NEUKUM, A.; LÜBBEKE, T.; KRÜGER, Hans-Peter; Mayser, C. Steinle, J.: *ACC-Stop&Go: Fahrerverhalten an funktionalen Systemgrenzen*. In: MAURER, Markus; STILLER, Christoph (Hrsg.): *8. Workshop Fahrerassistenzsysteme*, 2008, S. 141-150
- [Neu08b] NEUKUM, A.; UFER, E.; PAULIG, J.; KRÜGER, H.-P.: *Controllability of superposition steering system failures*. steering.tech 2008. Garching, 31.3.-1.4.2008.

- [Neu13]: NEUKUM, Alexandra: *KONTrollierbarkeit - Systematik und Status quo der Methodik: Teilprojekt URBAN - Bericht zum Arbeitspaket 1000: Problembereiche und methodische Zugänge*. Unveröffentlichter Forschungsbericht. Würzburg (2013)
- [Neu14]: NEUKUM, Alexandra; NAUJOKS, Frederik; KAPPES, Stefan; WEY, Torsten: Kontrollierbarkeit unerwarteter Eingriffe eines Bremsassistentensystems aus Perspektive des Folgeverkehrs, Bd. 115. In: Uni-DAS e.V. (Hrsg.): *Tagungsband des 9. Workshops Fahrerassistenzsysteme (FAS2014)*, 2014, S. 115-126
- [Ney12]: NEYER, Franz J.; FELBER, Juliane; GEBHARDT, Claudia: *Entwicklung und Validierung einer Kurzskaala zur Erfassung von Technikbereitschaft*. In: *Diagnostica* 58 (2012), Nr. 2, S. 87-99
- [Nie02]: NIEDERMAIER, Franz Bernhard: *Entwicklung und Bewertung eines Rapid-Prototyping Ansatzes zur multimodalen Mensch-Maschine-Interaktion im Kraftfahrzeug*. Technische Universität München, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik. Dissertation (2002)
- [Nie09]: NIEDERÉE, Ute; VOLLRATH, Mark: *Systemausfälle bei Längsführungsassistenten – Sind bessere Systeme schlechter?* In: *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 22: Mensch-Maschine-Systeme* 29 (2009), S. 38-43
- [Nie93]: NIELSEN, Jakob: *Usability Engineering*. San Diego, London: Academic Press, 1993
- [Nie95]: NIELSEN, Jakob: *10 Usability Heuristics for User Interface Design*. URL <http://www.nngroup.com/articles/ten-usability-heuristics/> – Überprüfungsdatum 2016-07-18
- [Nor02]: NORMAN, Donald A.: *The design of everyday things*. 1. Aufl. New York: Basic Books, 2002
- [Nor83]: NORMAN, Donald A.: Some Observations on Mental Models. In: GENTNER, D.; STEVENS, A. (Hrsg.): *Mental Models*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 1983, S. 7-14
- [Nor86]: NORMAN, Donald A.: Cognitive Engineering. In: NORMAN, Donald A.; DRAPER, Stephen W. (Hrsg.): *User centered system design: New perspectives on human-computer interaction*. Hillsdale, N.J.: L. Erlbaum Associates, 1986, S. 31-61
- [Nor90]: NORMAN, D. A.: *The 'Problem' with Automation: Inappropriate Feedback and Interaction, not 'Over-Automation'*. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 327 (1990), Nr. 1241, S. 585-593
- [Oss16]: OSSWALD, Sebastian: *Approach and Method for Estimating the Development Effort of Automotive HMI Prototypes*. Technische Universität München. Dissertation (2016)
- [Par00]: PARASURAMAN, R.; SHERIDAN, T. B.; WICKENS, C. D.: *A model for types and levels of human interaction with automation*. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans* 30 (2000), Nr. 3, S. 286-297
- [Par97]: PARASURAMAN, Raja; RILEY, Victor: *Humans and Automation: Use, Misuse, Disuse, Abuse*. In: *Human Factors (Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society)* 39 (1997), Nr. 2, S. 230-253

- [Pie07]: PIETSCH, R.; HEISSING, B.; MOHRA, H.; KRUCKL, W.: *Der Einsatz eines LKW-Fahrsimulators in der Nutzfahrzeugentwicklung: Betrachtung am Beispiel des Fahrerassistenzsystems ACC Stop and Go*. In: *VDI-Berichte 1986* (2007), S. 247
- [Pla10]: PLAVSIC, Marina: *Analysis and Modeling of Driver Behavior for Assistance Systems at Road Intersections*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Ergonomie (2010)
- [Pol90]: POLSON, Peter G.; LEWIS, Clayton H.: *Theory-based design for easily learned interfaces*. In: *Human-Computer Interaction 5* (1990), 2-3, S. 191-220
- [Rad13]: RADKE, Tobias: *Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien*. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Fakultät für Maschinenwesen (2013)
- [Rah07]: RAHMSTORF, Stefan; SCHELLNHUBER, Hans-Joachim: *Der Klimawandel: Diagnose, Prognose, Therapie*. 4. Aufl. München: Beck, 2007
- [Ras10]: RASCH, Björn; HOFMANN, Wilhelm; FRIESE, Malte; NAUMANN, Ewald: *Quantitative Methoden*: Springer Berlin Heidelberg, 2010
- [Ras83]: RASMUSSEN, Jens: *Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models*. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics SMC-13* (1983), Nr. 3, S. 257-266
- [Res06]: RESPONSE Consortium: *Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS: Response 3 a PReVENT Project*. URL [https://www.acea.be/uploads/publications/20090831\\_Code\\_of\\_Practice\\_ADAS.pdf](https://www.acea.be/uploads/publications/20090831_Code_of_Practice_ADAS.pdf) – Überprüfungsdatum 2016-01-27
- [Ric15]: RICHARDSON, Natalie Tara; SINNING, Michael; FRIES, Michael; STOCKERT, Sonja; LIENKAMP, Markus: *Highly automated truck driving: how can drivers safely perform sport exercises on the go?* In: BURNETT, Gary; GABBARD, Joe; GREEN, Paul; OSSWALD, Sebastian (Hrsg.): *Adjunct Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*. New York, USA: ACM, 2015, S. 84-87
- [Rob03]: Robert Bosch GmbH: *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*. 25. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2003
- [Rot14]: ROTH, Martin: *Betriebsstrategie*. In: LIEBL, Johannes; LEDERER, Matthias; ROHDE-BRANDENBURGER, Klaus; BIERMANN, Jan-Welm; ROTH, Martin; SCHÄFER, Heinz (Hrsg.): *Energiemanagement im Kraftfahrzeug: Optimierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und Verbrauch konventioneller und elektrifizierter Automobile*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 323-366
- [Rot67]: ROTTER, Julian B.: *A new scale for the measurement of interpersonal trust*. In: *Journal of Personality 35* (1967), Nr. 4, S. 651-665
- [SAE14]: SAE International: *Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems: Surface Vehicle Information Report*
- [Saf10]: SAFFER, Dan: *Designing for interaction: Creating innovative applications and devices*. 2. Aufl. Berkeley, CA, London: New Riders; Pearson Education, 2010

- [Sar95]: SARTER, Nadine B.; WOODS, David D.: *How in the World Did We Ever Get into That Mode? Mode Error and Awareness in Supervisory Control*. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 37 (1995), Nr. 1, S. 5-19
- [Sar97]: SARTER, N. B.; WOODS, D. D.; BILLINGS, C. E.: Automation Surprises. In: SALVENDY, Gavriel (Hrsg.): *Handbook of human factors and ergonomics*. 2. Aufl. New York: Wiley, 1997, S. 1-25
- [Sca16]: Scania: *Scania Active Prediction*. URL <http://www.scania.de/trucks/safety-driver-support/driver-support-systems/active-prediction/> – Überprüfungsdatum 2016-02-04
- [Sch09]: SCHLAG, Bernhard; PETERMANN, Ina; WELLER, Gert; SCHULZE, Christoph: Visuelle Wahrnehmung und Informationsaufnahme im Straßenverkehr. In: SCHLAG, Bernhard; PETERMANN, Ina; WELLER, Gert; SCHULZE, Christoph (Hrsg.): *Mehr Licht — mehr Sicht — mehr Sicherheit?* Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2009, S. 15-58
- [Sch14]: SCHÖTTLE, Markus: *Nutzfahrzeugtrends Effizienz im Lkw und Bus*. In: *ATZelektronik* 9 (2014), Nr. 4, S. 62-65
- [Schl10]: SCHLICK, Christopher; BRUDER, Ralph; LUCZAK, Holger: *Arbeitswissenschaft*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010
- [Schl15]: SCHLAG, Bernhard; WELLER, Gert: Verhaltenswissenschaftliche Aspekte von Fahrerassistenzsystemen. In: HAKULI, Stephan; LOTZ, Felix; SINGER, Christina (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 71-83
- [Schm06]: SCHMITT, J.; FÄRBER, B.; MAURER, Markus; BREU, A.: Menschliches und technisches Verhalten an den Systemgrenzen eines FAS. In: VDI-Berichte (Hrsg.): *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme: Tagung Wolfsburg, 12. u. 13. Oktober 2006*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2006, S. 563-579
- [Schm81]: SCHMIDTKE, Heinz: *Lehrbuch der Ergonomie*. 2. Aufl.: Hanser, 1981
- [Schr11]: SCHROVEN, Frank: *Probabilistische Situationsanalyse für eine adaptive automatisierte Fahrzeuglängsführung*. Technische Universität Braunschweig, Fakultät für Maschinenbau. Dissertation (2011)
- [Schw03]: SCHWEIGERT, Manfred: *Fahrerblickverhalten und Nebenaufgaben*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Ergonomie. Dissertation (2003)
- [Sea97]: SEARS, Andrew: *Heuristic Walkthroughs: Finding the Problems Without the Noise*. In: *International Journal of Human-Computer Interaction* 9 (1997), Nr. 3, S. 213-234
- [Sed05]: SEDGWICK, H. A.: Visual Space Perception. In: GOLDSTEIN, E. Bruce (Hrsg.): *Blackwell Handbook of Sensation and Perception*. Oxford, UK, Malden, Mass., USA: Blackwell, 2005, S. 128-167
- [Sei13]: SEITZ, Maria: *Informationsmanagement im Nutzfahrzeug*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik. Dissertation (2013)
- [Sei15]: SEINIGER, Patrick; WEITZEL, Alexander: Testverfahren für Verbraucherschutz und Gesetzgebung. In: HAKULI, Stephan; LOTZ, Felix; SINGER, Christina

- (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 167-182
- [Sep07]: SEPPELT, Bobbie D.; LEE, John D.: *Making adaptive cruise control (ACC) limits visible*. In: *International Journal of Human-Computer Studies* 65 (2007), Nr. 3, S. 192-205
- [She02]: SHERIDAN, Thomas B.: *Humans and automation: System design and research issues*. Santa Monica, CA, USA: Human Factors and Ergonomics Society, 2002 (3)
- [She05]: SHERIDAN, Thomas B.; PARASURAMAN, Raja: *Human-Automation Interaction*. In: *Reviews of Human Factors and Ergonomics* 1 (2005), Nr. 1, S. 89-129
- [She06]: SHERIDAN, T. B.: Supervisory Control. In: SALVENDY, Gavriel (Hrsg.): *Handbook of Human Factors and Ergonomics*. 3. Aufl. Hoboken, N.J.: John Wiley, 2006, S. 1025-1051
- [She97]: SHERIDAN, Thomas B.: Task Analysis, Task Allocation and Supervisory Control. In: HELANDER, Martin; LANDAUER, Thomas K.; PRABHU, Prasad V. (Hrsg.): *Handbook of human-computer interaction*. 2. Aufl. Amsterdam, New York: Elsevier, 1997, S. 87-105
- [Shn04]: SHNEIDERMAN, Ben: *Designing for fun*. In: *interactions* 11 (2004), Nr. 5, S. 48
- [Shn05]: SHNEIDERMAN, Ben; PLAISANT, Catherine: *Designing the user interface: Strategies for effective human-computer interaction*. 4. Aufl. Boston: Addison-Wesley, 2005
- [Stä10]: STÄNDER, Tobias: *Eine modellbasierte Methode zur Objektivierung der Risikoanalyse nach ISO 26262*. Technische Universität Braunschweig, Fakultät für Maschinenbau. Dissertation (2010)
- [Sta13]: STANTON, Neville A.: *Human factors methods: A practical guide for engineering and design*. 2. Aufl: Ashgate Publishing, 2013
- [Sta16a]: Statistisches Bundesamt: *Mittelwerte von Körpergröße, -gewicht und BMI bei Männern in Deutschland nach Altersgruppe im Jahr 2011*. URL <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/260920/umfrage/mittelwerte-von-groesse-gewicht-und-bmi-bei-maennern-nach-alter/> – Überprüfungsdatum 2016-09-17
- [Sta16b]: Statistisches Bundesamt: *Mittelwerte von Körpergröße, -gewicht und BMI bei Frauen in Deutschland nach Altersgruppe im Jahr 2011*. URL <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/260916/umfrage/mittelwerte-von-groesse-gewicht-und-bmi-bei-frauen-nach-alter/>. – Aktualisierungsdatum: 2016-09-17
- [Sta16c]: Statistisches Bundesamt: *Güterverkehr 2015: Erneut Rekordwert beim Transportaufkommen*. Pressemitteilung vom 16. Februar 2016 - 50/16. URL [https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2016/02/PD16\\_050\\_463.html](https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2016/02/PD16_050_463.html) – Überprüfungsdatum 19.11.16
- [Sta96]: STANTON, Neville A.; MARSDEN, Philip: *From fly-by-wire to drive-by-wire: Safety implications of automation in vehicles*. In: *Safety Science* 24 (1996), Nr. 1, S. 35-49
- [Sta98]: STANTON, Neville A.; YOUNG, Mark S.: *Vehicle automation and driving performance*. In: *Ergonomics* 41 (1998), Nr. 7, S. 1014-1028

- [Ste13]: STEINER, Daniel; HARTLIEB, Erich: Automatische Ampelphasenberechnung durch kollektive Geodatenerfassung für die Prädiktion der optimalen Geschwindigkeit zum Durchfahren der Grünphase. In: STROBL, Josef; BLASCHKE, Thomas; GRIESEBNER, Gerald; ZAGEL, Bernhard (Hrsg.): *Angewandte Geoinformatik 2013: Beiträge zum 25. AGIT-Symposium Salzburg*. Berlin, Offenbach: Wichmann Verlag, 2013
- [Ste99]: STERN, Jan; SCHLAG, Bernhard: Akzeptanz verkehrssicherheitsfördernder Maßnahmen bei jungen Fahrern. In: SCHLAG, Bernhard (Hrsg.): *Empirische Verkehrspsychologie*: Pabst Science Publishers, 1999, S. 245-266
- [Sto15a]: STOCKERT, Sonja; WEISE, Sigrun; MICHEL, Britta; ZIMMERMANN, Andreas; LIENKAMP, Markus: Automated fuel efficient longitudinal control for commercial vehicles - Requirements for the Human-Machine-Interface. In: ATZlive Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH (Hrsg.): *1<sup>st</sup> International ATZ-Conference on Driver Assistance Systems*, 2015
- [Sto15b]: STOCKERT, Sonja; RICHARDSON, Natalie Tara; LIENKAMP, Markus: *Driving in an Increasingly Automated World – Approaches to Improve the Driver-Automation Interaction*. In: *Procedia Manufacturing* 3 (2015), S. 2889-2896
- [Sto16]: STOCKERT, Sonja; ZIMMERMANN, Andreas; LIENKAMP, Markus: *Mensch-Maschine-Interaktion für eine kraftstoffeffiziente, automatisierte Fahrzeuglängsführung*. In: *ATZextra Assistenzsysteme in Nutzfahrzeugen* 10 (2016), Nr. 71, S. 16-19
- [Süß13]: SÜßMANN, A.; SCHABERT, A.; LIENKAMP, Markus: Analyse von kundenspezifischen Verbrauchseinsparpotentialen durch Aerodynamik-, Rollwiderstands- und Leichtbaumaßnahmen. In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.): *12. Internationale Fachtagung Nutzfahrzeuge 2013 - Truck, Bus, Van, Trailer*, 2013
- [Sut12]: SUTHAPUTCHAKUN, Chakkaphong; SUN, Zhili; DIANATI, Mehrdad: *Applications of vehicular communications for reducing fuel consumption and CO2 emission: the state of the art and research challenges*. In: *IEEE Communications Magazine* 50 (2012), Nr. 12, S. 108-115
- [Ter09]: TERWEN, Stephan: *Vorausschauende Längsregelung schwerer lastkraftwagen*. Universität Karlsruhe, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik. Dissertation (2009)
- [Teu12]: TEUCHERT, Stefan: *ISO 26262 - Fluch oder Segen?* In: *ATZelektronik* (2012), Nr. 6, S. 410-415
- [The14a]: THEMANN, Philipp; ZLOCKI, Adrian; ECKSTEIN, Lutz: *Energieeffiziente Fahrzeuglängsführung durch V2X-Kommunikation*. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 116 (2014), 7-8, S. 62-67
- [The14b]: THEMANN, P.; KRAJEWSKI, R.; ECKSTEIN, L.: Discrete dynamic optimization in automated driving systems to improve energy efficiency in cooperative networks. In: *2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2014, S. 370-375
- [The15]: THEMANN, Philipp; ZLOCKI, Adrian; ECKSTEIN, Lutz: *Energieeffiziente Fahrzeuglängsführung durch V2X-Kommunikation*. In: SIEBENPFEIFFER, Wolfgang (Hrsg.): *Fahrerassistenzsysteme und Effiziente Antriebe*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 27-33

- [Thi14]: THIJSSSEN, R.; HOFMAN, T.; HAM, J.: *Ecodriving acceptance: An experimental study on anticipation behavior of truck drivers*. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 22 (2014), Nr. 0, S. 249-260
- [Tim02]: TIMPE, Klaus-Peter (Hrsg.); BAGGEN, Robert (Hrsg.): *Mensch-Maschine-Systemtechnik: Konzepte, Modellierung, Gestaltung, Evaluation*. 2. Aufl. Düsseldorf: Symposion, 2002
- [TIS13] TISCHLER, Karin: *Informationsfusion für die kooperative Umfeldwahrnehmung vernetzter Fahrzeuge*. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Dissertation (2013)
- [Tön11]: TÖNERT, L.; FARID, M.; BENGLER, K.; SCHNELLER, R.: *Wahrnehmungs- und Verhaltensleistung des Fahrers bei einem Fahrzeug-Abdrift mit teil-automatisierter Querführung in unterschiedlich kritischen Fahrsituationen: Methodischer Ansatz für die Absicherung der Beherrschbarkeit hochautomatisierter Systeme*. In: VDI (Hrsg.): *Der Fahrer im 21. Jahrhundert Fahrer, Fahrerunterstützung und Bedienbarkeit*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2011 (2134), S. 155-168
- [Umw12]: Umweltbundesamt: *Daten zum Verkehr*. URL <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4364.pdf> – Überprüfungsdatum 2016-09-17
- [Umw15]: Umweltbundesamt: *Daten zur Umwelt zeigen: Verkehr beim Klimaschutz noch nicht auf Kurs*. URL <http://www.umweltbundesamt.de/presse/presseinformationen/daten-zur-umwelt-zeigen-verkehr-beim-klimaschutz>. - Aktualisierungsdatum: 2016-02-09
- [Umw16]: Umweltbundesamt: *Treibhausgas-Emissionen in Deutschland: Treibhausgas-Emissionen nach Kategorie*. URL <http://www.umweltbundesamt.de/daten/klimawandel/treibhausgas-emissionen-in-deutschland>. - Aktualisierungsdatum: 2016-04-25 - Überprüfungsdatum 06.03.16
- [Van97]: Van Der Laan, Jinke D.; HEINO, Adriaan; WAARD, Dick de: *A simple procedure for the assessment of acceptance of advanced transport telematics*. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 5 (1997), Nr. 1, S. 1-10
- [Van98]: Van Der Laan, Jinke D.: *Acceptance of automatic violation-registration systems*. University of Groningen. Dissertation (1998)
- [VDA14]: VDA - Verband der Automobilindustrie: *Automatisiertes Fahren*. URL <https://www.vda.de/de/themen/innovation-und-technik/automatisiertes-fahren/automatisiertes-fahren.html> - Überprüfungsdatum 21.01.16
- [Ver12]: Verberne, F. M. F.; HAM, J.; MIDDEN, C. J. H.: *Trust in Smart Systems: Sharing Driving Goals and Giving Information to Increase Trustworthiness and Acceptability of Smart Systems in Cars*. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 54 (2012), Nr. 5, S. 799-810
- [Vil07]: VILIMEK, Roman: *Gestaltungsaspekte multimodaler Interaktion im Fahrzeug: Ein Beitrag aus ingenieurspsychologischer Perspektive*. Universität Regensburg, Philosophische Fakultät II (Psychologie, Pädagogik, Sportwissenschaft). Dissertation (2007)
- [Vol10]: VOLLRATH, Mark; BRIEST, Susanne; OELTZE, Katharina: *Auswirkungen des Fahrens mit Tempomat und ACC auf das Fahrerverhalten*. In: *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Fahrzeugtechnik* (2010)

- [Waa96]: WAARD, Dick de: *The measurement of drivers' mental workload*: Groningen University, Traffic Research Center Netherlands, 1996
- [Wan93]: WANDMACHER, Jens: *Software-Ergonomie*: Walter de Gruyter, 1993
- [Wei12a]: WEITZEL, Alexander; WINNER, Hermann: Ansatz zur Kontrollierbarkeitsbewertung von Fahrerassistenzsystemen vor dem Hintergrund der ISO 26262. In: Uni-DAS e.V. (Hrsg.): *8. Workshop Fahrerassistenzsysteme*, 2012, S. 15-25
- [Wei12b]: WEIßGERBER, T.; DAMBÖCK, D.; KIENLE, M.; BENGLER, K.: *Erprobung einer kontaktanalogen Anzeige für Fahrerassistenzsysteme beim hochautomatisierten Fahren*. URL <http://mediatum.ub.tum.de/doc/1142100/1142100.pdf>
- [Wei13]: WEITZEL, Dirk Alexander: *Objektive Bewertung der Kontrollierbarkeit nicht situationsgerechter Reaktionen umfeldsensorbasierter Fahrerassistenzsysteme*. Darmstadt, TU Darmstadt, Fachbereich Maschinenbau. Dissertation (32013)
- [Wic04]: WICKENS, Christopher D.; GORDON, Sallie E.; LIU, Yili: *An introduction to human factors engineering*. 2<sup>nd</sup> ed. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Prentice Hall, 2004
- [Wic99]: WICKENS, Christopher D.; HOLLANDS, Justin G.: *Engineering psychology and human performance*. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1999
- [Win03]: WINNER, Hermann: Die lange Entwicklung von ACC. In: *Stiller, Christoph; Maurer, Markus: Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS 2003, Freundeskreis Mess- und Regelungstechnik Karlsruhe eV, Karlsruhe, 2003*
- [Win11]: Winter de , J. C. F.; DODOU, D.: *Why the Fitts list has persisted throughout the history of function allocation*. In: *Cognition, Technology & Work* 16 (2011), Nr. 1, S. 1-11
- [Win12]: WINTER, de J.; VAN LEEUWEN, P.; HAPPEE, R.: Advantages and Disadvantages of Driving Simulators: A Discussion. In: *Proceedings of Measuring Behavior 2012*. Utrecht, The Netherlands, August 28-31, 2012, 2012, S. 47-50
- [WIV14]: WIVW: *Driving Simulation and SILAB*. URL <http://www.wivw.de/en/silab>
- [Zai15]: ZAINDL, Albert; ZIMMERMANN, Andreas; DÖRNER, Karlheinz; KOHRS, Christian: *Kamera-Monitor-System als Spiegelersatz beim Nutzfahrzeug*. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 117 (2015), Nr. 5, S. 28-33
- [Züh12]: ZÜHLKE, Detlef: *Nutzergerechte Entwicklung von Mensch-Maschine-Systemen: Useware-Engineering für technische Systeme*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012

## Verzeichnis studentischer Arbeiten

Während der Anfertigung dieser Dissertation entstanden unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung der Autorin die nachfolgend aufgeführten studentischen Arbeiten, in welchen verschiedene Fragestellungen zur Fahrer-Fahrzeug-Interaktion einer automatisierten, kraftstoffeffizienten Fahrzeuglängsführung untersucht werden. Entstandene Ergebnisse sind teilweise in das vorliegende Dokument eingeflossen. Vielen Dank an die Bearbeiterinnen und Bearbeiter für Ihre Unterstützung im Rahmen dieses Forschungsprojektes.

- [Bac13]: Bacher, Michael: *Analyse und Konzeptentwicklung automatisierter Fahrerassistenzsysteme - Funktion, HMI und juristische Aspekte*. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität, München, 2013
- [Bac15]: Bacher, Michael: *Durchführung und statistische Auswertung einer Fahrsimulatorstudie zur formativen Evaluation von HMI-Konzepten*. Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität, München, 2015
- [Ben15]: Bentz, Janis: *Wirkung einer automatisierten, kraftstoffeffizienten Fahrzeuglängsführung auf den rückwärtigen Verkehr*. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität, München, 2015
- [Bun13]: Bundschuh, Linus: *Versuchsplanung und Konzeption einer Fahrsimulatorstudie*. Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität, München, 2013
- [Hol14]: Holländer, Kai: *Entwicklung und Implementierung von interaktiven HMI-Konzepten im dynamischen LKW-Fahrsimulator*. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität, München, 2014
- [Kre13]: Kreuzer, Florian: *Mensch-Maschine-Interaktions-Konzepte zur vorausschauenden Fahrzeugsteuerung im LKW*. Masterarbeit, Studiengang Elektronische Medien, Medientechnik, Hochschule der Medien, Stuttgart, 2013
- [LeC15]: Le Cong, Viet Anh: *Probandenstudie zur automatisierten Fahrzeuglängsführung - Auswertung von Fahr- und Blickdaten*. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität, München, 2015
- [Nob14]: Nobis, Felix: *Entwicklung und Implementierung eines automatischen Spurhalte- und Spurwechselassistenten im Lkw-Fahrsimulator*. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität, München, 2014
- [Ric14]: Richardson, Natalie: *Konzeption und Evaluation systemtransparenter Anzeigekonzepte in Abhängigkeit des Automatisierungsgrades*. Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität, München, 2014
- [Sto15]: Stoll, Tanja: *Systemtransparenz an funktionalen Systemgrenzen - Vorbereitung, Durchführung und Auswertung einer Studie am dynamischen LKW-Fahrsimulator*. Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität, München, 2015
- [Wis14]: Wischniowski, Julian: *Entwicklung einer kraftstoffeffizienten, automatisierten Längsführung im dynamischen LKW-Fahrsimulator*. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität, München, 2014

## Verzeichnis eigener Veröffentlichungen im Kontext der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion

- [Sto15a]: STOCKERT, Sonja; WEISE, Sigrun; MICHEL, Britta; ZIMMERMANN, Andreas; LIENKAMP, Markus: Automated fuel efficient longitudinal control for commercial vehicles - Requirements for the Human-Machine-Interface. In: ATZlive Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH (Hrsg.): *1st International ATZ-Conference on Driver Assistance Systems*, 2015
- [Sto15b]: STOCKERT, Sonja; RICHARDSON, Natalie Tara; LIENKAMP, Markus: *Driving in an Increasingly Automated World – Approaches to Improve the Driver-automation Interaction*. In: *Procedia Manufacturing* 3 (2015), S. 2889-2896
- [Ric15]: RICHARDSON, Natalie Tara; SINNING, Michael; FRIES, Michael; STOCKERT, Sonja; LIENKAMP, Markus: Highly automated truck driving: how can drivers safely perform sport exercises on the go? In: BURNETT, Gary; GABBARD, Joe; GREEN, Paul; OSSWALD, Sebastian (Hrsg.): *Adjunct Proceedings of the 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*. New York, USA: ACM, 2015, S. 84-87
- [Sto16]: STOCKERT, Sonja; ZIMMERMANN, Andreas; LIENKAMP, Markus: *Mensch-Maschine-Interaktion für eine kraftstoffeffiziente, automatisierte Fahrzeuglängsführung*. In: *ATZextra Assistenzsysteme in Nutzfahrzeugen* 10 (2016), Nr. 71, S. 16-19
- [Hof16]: HOF AUER, Sonja; KARMANN, Anna; ZIMMERMANN, Andreas: *Verbundprojekt UR:BAN – Benutzergerechte Assistenzsysteme und Netzmanagement Teilprojekt Mensch-Maschine-Interaktion (MMI): Abschlussbericht der MAN Truck & Bus AG*, 2016
- [Hof17]: HOF AUER, Sonja; MICHEL, Britta; WEISE, Sigrun; KARMANN, Anna; DIERMEYER, Frank; STEPHAN, Amelie; DRÜKE, Julia; SEMMLER, Carsten; BENDEWALD, Lars: *HMI-Strategy – Lateral and Longitudinal Control*. In: BENGLER, Klaus; DRÜKE, Julia; HOFMANN, Silija; MANSTETTEN, Dietrich; NEUKUM, Alexandra (Hrsg.): *UR:BAN Human Factors in Traffic - Approaches for Safe, Efficient and Stress-free Urban Traffic*. (in press, vsl. 2017). Wiesbaden, Springer Vieweg

### Öffentliche Vorträge

- STOCKERT, Sonja; WEISE, Sigrun; MICHEL, Britta; ZIMMERMANN, Andreas; LIENKAMP, Markus: Automated fuel efficient longitudinal control for commercial vehicles - Requirements for the Human-Machine-Interface. *1st International ATZ-Conference on Driver Assistance Systems*, 29.04.2015, Frankfurt
- STOCKERT, Sonja; RICHARDSON, Natalie Tara; LIENKAMP, Markus: *Driving in an Increasingly Automated World – Approaches to Improve the Driver-automation Interaction*. *6<sup>th</sup> Applied Human Factors in Transportation Conference (AHFE)*, 31.07.2015, Las Vegas, USA
- STOCKERT, Sonja; ZIMMERMANN, Andreas; LIENKAMP, Markus: *Driver's information needs while supervising an automated longitudinal vehicle control*. *7<sup>th</sup> Applied Human Factors in Transportation Conference (AHFE)*, 03.08.2016, Orlando, USA

- HOFAUER, Sonja; ZIMMERMANN, Andreas; LIENKAMP, Markus: *Herausforderungen der Mensch-Maschine-Interaktion einer automatisierten, kraftstoffeffizienten Längsführung. VDI Tagung E/E im Nutzfahrzeug, 19.10.2016, Baden-Baden*

## **Anhang**

|  |     |
|--|-----|
| Anhang A: Berechnungen zu Treibhausgasemissionen .....                           | 132 |
| Anhang B: Sinnesmodalitäten .....  | 133 |
| Anhang C: Anforderungsanalyse .....  | 134 |
| Anhang D: HMI-Konzeptentwicklung und -evaluation.....                            | 136 |
| Anhang E: Parametrierung der Szenarien zur Kontrollierbarkeitsbewertung .....    | 138 |
| Anhang F: Fahrdatenaufbereitung und Datensynchronisation.....                    | 140 |
| Anhang G: Systemunsicherheitsinformation (SUI) .....                             | 141 |
| Anhang H: Berechnung der transformierten Punktezahl aus der Rangreihenfolge..... | 142 |

## Anhang A: Berechnungen zu Treibhausgasemissionen

Nach dem Umweltbundesamt [Umw12, S. 14] liegen die Emissionen von Treibhausgasen (hierbei werden Kohlendioxid, Methan und Distickstoffoxid betrachtet) für schwere Lkw (ab 3,5 Tonnen inklusive Sattel- und Lastzüge) bei 97,5 Gramm pro Tonnenkilometer im Bezugsjahr 2010.

Für Pkw werden 142,3 Gramm Emissionen pro Personenkilometer ausgestoßen, unter der Annahme von einer Auslastung von 1,5 Personen pro Pkw (im Bezugsjahr 2010) [Umw12].

Mittels der nachfolgenden Formel wird der Vergleich unter Annahme eines mit fünf Personen besetzten Pkw auf der Basis eines transportierten Kilogramms pro Kilometer berechnet.

Als Masse einer Person werden 78 kg angenommen. Dies stellt den Mittelwert aus dem mittleren Körpergewicht von Männern (85,2 kg) und Frauen (70,7 kg) in Deutschland dar [Sta16b; Sta16a].

$$\text{Treibhausemissionen (Pkw)} = \frac{142,3 \left[\frac{\text{g}}{\text{Pkm}}\right] * 1,5}{\text{Personenmasse} [\text{kg}] * 5} = 0,55 \text{ [g/ kgkm]}$$

$$\text{Treibhausemissionen (Lkw)} = 0,0975 \text{ [g/ kgkm]}$$

Folglich stoßen schwere Lkw lediglich 17,8 % der Treibhausgasemissionen beim Transport von einem kg pro km aus, als ein mit fünf Personen besetzter Pkw.

## Anhang B: Sinnesmodalitäten

Der aus der Physiologie stammende Begriff „Modalität“ bedeutet nach [Vil07, S. 8] die Wahrnehmung über einen bestimmten Sinneskanal. Im Kontext der Mensch-Maschine-Interaktion werden die Begriffe „Wahrnehmungsmodalität“, „Sinnesmodalität“ und „Ausgabe-modalität“ für die Beschreibung der involvierten menschlichen Sinnesleistung sowie zur Darstellung der maschinellen Ausgabe verwendet. Für die Fahrzeugführung kann zwischen optischen, akustischen und haptischen Anzeigen unterschieden werden, welche die visuelle, auditive und taktile bzw. kinästhetische Sinnesmodalität des Fahrers ansprechen (Tabelle B.1).

Tabelle B.1: Zusammenhang zwischen Sinnesorganen (bzw. Sinne des Menschen), Sinnesmodalitäten und Anzeigearten für die Fahrzeugführung; nach [Gei90, S. 61; Vil07, S. 9]

| Sinnesorgane, bzw. Sinne | Sinnesmodalität       | Anzeigeart    |
|--------------------------|-----------------------|---------------|
| Sehsinn                  | visuell               | optisch       |
| Hörsinn                  | auditiv               | akustisch     |
| Geruchssinn              | olfaktorisch          | ---           |
| Geschmackssinn           | gustatorisch          | ---           |
| Gleichgewichtssinn       | vestibulär            | ---           |
| Drucksinn                | Hautsinn,<br>Tastsinn | taktil        |
| Berührungssinn           |                       |               |
| Vibrationssinn           |                       |               |
| Temperatursinn           |                       |               |
| Schmerzsinn              |                       |               |
| Stellungssinn            | Proprio-<br>zeptoren  | kinästhetisch |
| Kraftsinn                |                       |               |
|                          |                       | haptisch      |



Die paarweisen Vergleiche mittels Wilcoxon-Test zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Messgrößen „Nachvollziehbarkeit“ und „Vorhersagbarkeit“ (Tabelle C.1). Folglich werden die nachfolgenden Analysen (Abschnitt 4.4.3) ausschließlich für die Messgröße „Nachvollziehbarkeit“ durchgeführt, auf die Größe „Vorhersagbarkeit“ wird verzichtet. Hierdurch wird die Anzahl der abhängigen Variablen und folglich die Zahl nötiger Analysen reduziert.

Tabelle C.1: Ergebnisse der paarweise Vergleiche der Messgrößen „Nachvollziehbarkeit“ und „Vorhersagbarkeit“ mittels Wilcoxon-Test für abhängige Stichproben ( $\alpha = .0167$ ).

| Anzahl Informationseinheiten | Ergebnisse Wilcoxon-Test            | Stichprobengröße |
|------------------------------|-------------------------------------|------------------|
| Eine Informationseinheit     | ( $z = -1.47, p = .142, r = -.26$ ) | N=32             |
| Drei Informationseinheiten   | ( $z = -1.00, p = .317, r = -.18$ ) | N=32             |
| Fünf Informationseinheiten   | ( $z = -.184, p = .854, r = -.03$ ) | N=31             |

Für die Messgrößen „Vertrauen“ und „Vertrauen durch Meldung“ ist der deskriptive Vergleich in Abbildung C.2 dargestellt.

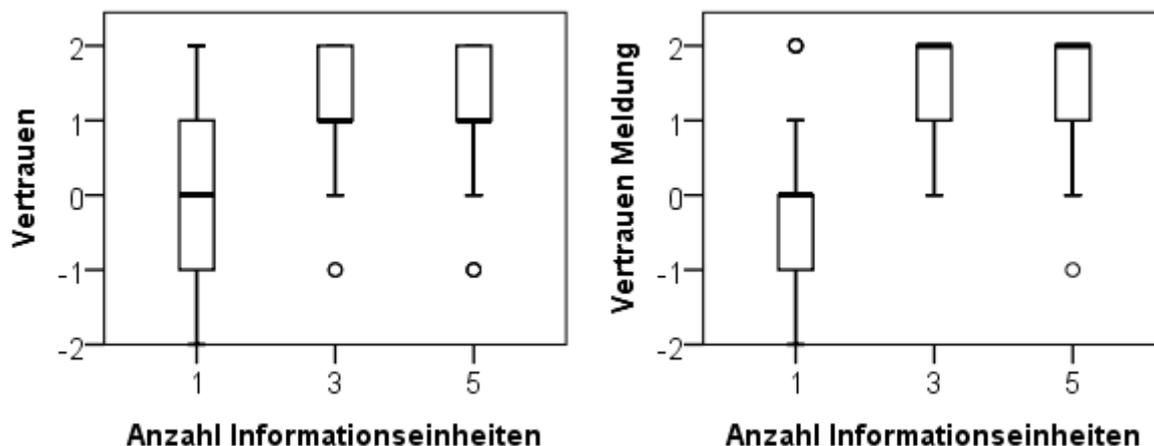


Abbildung C.2: Vergleich der Bewertungen zwischen „Vertrauen“ (links) und „Vertrauen durch Meldung“ (rechts) für eine, drei und fünf Informationseinheiten

Die paarweisen Vergleiche mittels Wilcoxon-Tests zeigen für drei und fünf Informationseinheiten keine signifikanten Unterschiede zwischen der Messgröße „Vertrauen“ und „Vertrauen durch Meldung“ (Tabelle C.2). Für eine Informationseinheit ist das (allgemeine) „Vertrauen“ in das FAS signifikant höher als das „Vertrauen durch Meldung“. Bereits für drei Informationseinheiten zeigt sich kein signifikanter Unterschied mehr. Auch nimmt die Effektgröße mit zunehmender Anzahl präsentierter Informationseinheiten ab.

Tabelle C.2: Ergebnisse der paarweise Vergleiche der Messgrößen „Vertrauen“ und „Vertrauen durch Meldung“ mittels Wilcoxon-Test für abhängige Stichproben ( $\alpha = .0167$ ).

| Anzahl Informationseinheiten | Ergebnisse Wilcoxon-Test            | Stichprobengröße |
|------------------------------|-------------------------------------|------------------|
| Eine Informationseinheit     | ( $z = -2.86, p = .004, r = -.51$ ) | N=32             |
| Drei Informationseinheiten   | ( $z = -2.07, p = .039, r = -.37$ ) | N=32             |
| Fünf Informationseinheiten   | ( $z = -1.44, p = .150, r = -.26$ ) | N=31             |

Auch hier wird aufgrund der hohen Übereinstimmung die Anzahl der abhängigen Variablen reduziert, indem für die nachfolgenden Untersuchungen (Abschnitt 4.4.3) ausschließlich die Größe „Vertrauen“ in das FAS betrachtet wird.

## Anhang D: HMI-Konzeptentwicklung und -evaluation

### D.1 Streckenbeschreibung der Validierungsstudie mittels Videoprototypen

Wie in [Hof16, S. 12] beschrieben, werden für die Videoprototypen Fahrsituationen mit mehreren Fahrstreifen je Fahrtrichtung auf reinen Kraftfahrzeugstraßen sowie im urbanen Raum aufgenommen. Die für die Videoaufnahme gefahrene Strecke befindet sich im Norden Münchens und deckt die Autobahn A99, die Bundesstraße B13 sowie den Frankfurter und Mittleren Ring Münchens ab (Abbildung D.1).

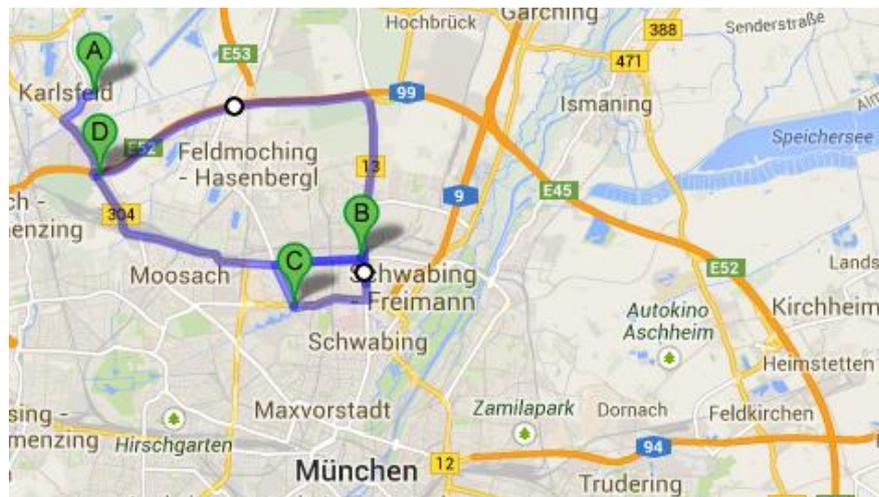


Abbildung D.1: Streckenbasis für die Videoprototypen mit jeweils mehreren Richtungsfahrbahnen; Kartendarstellung mit Google Maps

### D.2 Beschreibung der eingesetzten Szenarien der formativen Fahrsimulatorstudie

Die implementierte Strecke hat durchgehend zwei Fahrstreifen je Fahrtrichtung und deckt Landstraßen und große innerstädtische Straßen ab. Die erlaubte maximale Höchstgeschwindigkeit beträgt 60 km/h. Eine Übersicht der einzelnen Szenarien ist in Tabelle D.1 dargestellt. Eine grafische Visualisierung der Szenarien zeigt Abbildung D.2, wobei die Landschaftsgestaltung zur Reduktion von Reihenfolgeeffekten zwischen den Fahrten variiert wird, ebenso wie die Reihenfolge der Szenarien.

Tabelle D.1: Übersicht der eingesetzten Szenarien der formativen Fahrsimulatorstudie

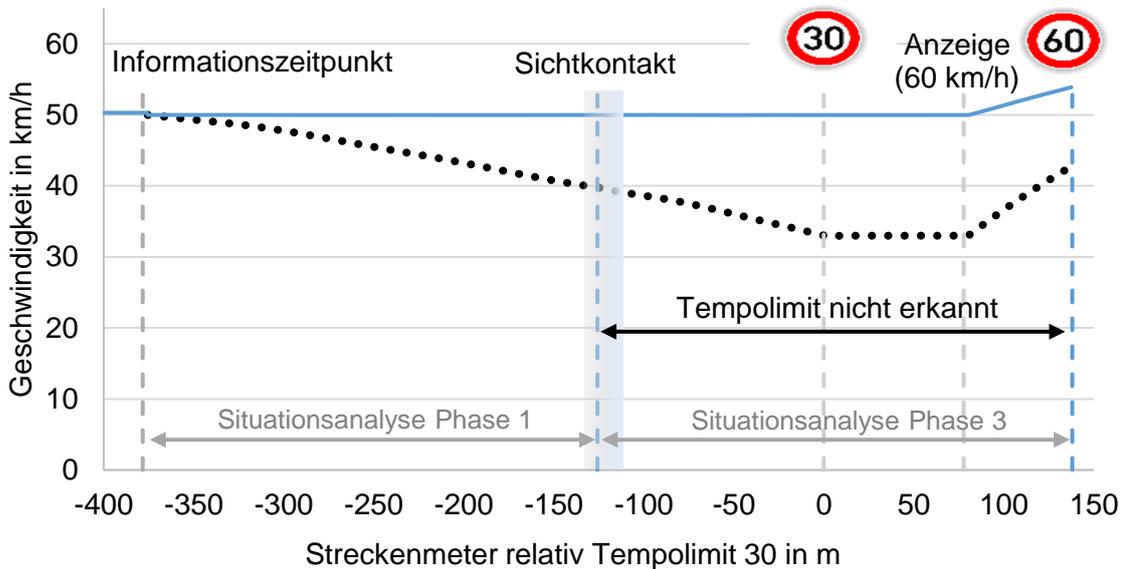
| Szenario                   | Kurzbeschreibung  |
|----------------------------|---|
| Freies Beschleunigen       | Aus dem Stillstand auf 60 km/h beschleunigen  |
| Tempolimit 40 km/h         | Geschwindigkeitsanpassung auf 40 km/h aufgrund Straßenschäden                         |
| LSA wird Grün              | Kurz vor Erreichen einer roten LSA schaltet diese auf Grün                            |
| Ortseinfahrt               | Geschwindigkeitsanpassung auf 50 km/h   |
| Baustelle                  | Geschwindigkeitsanpassung auf 30 km/h   |
| Vorderfahrzeug             | Geschwindigkeitsanpassung auf ein regelungsrelevantes Vorderfahrzeug                  |
| LSA wird Rot               | LSA Phasenübergang von Grün auf Rot, Geschwindigkeitsanpassung bis Stillstand vor LSA |
| Enge Kurve                 | Geschwindigkeitsanpassung auf 43 km/h   |
| LSA Rot mit Vorderfahrzeug | Geschwindigkeitsanpassung bis Stillstand hinter Vorderfahrzeug vor LSA                |



Abbildung D.2: Grafische Übersicht der eingesetzten Szenarien

## Anhang E: Parametrierung der Szenarien zur Kontrollierbarkeitsbewertung

Die Parametrierung der Szenarien bei Regelung auf statische und dynamische Infrastrukturelemente sind grafisch visualisiert. Zudem ist die Einordnung in die Phasen der Situationsanalyse, wie in Abschnitt 4.3.3 beschreiben, dargestellt. Abbildung E.1 zeigt die Parametrierung des Szenarios „Tempolimit nicht erkannt“.



- ..... Situationsgerechtes Verhalten der automatisierten Längsführung
- Nicht situationsgerechtes Verhalten der automatisierten Längsführung

Abbildung E.1: Parametrierung des Szenarios A „Tempolimit nicht erkannt“

Abbildung E.2 skizziert die Parametrierung des Szenarios „Tempolimit aufgehoben nicht erkannt“.

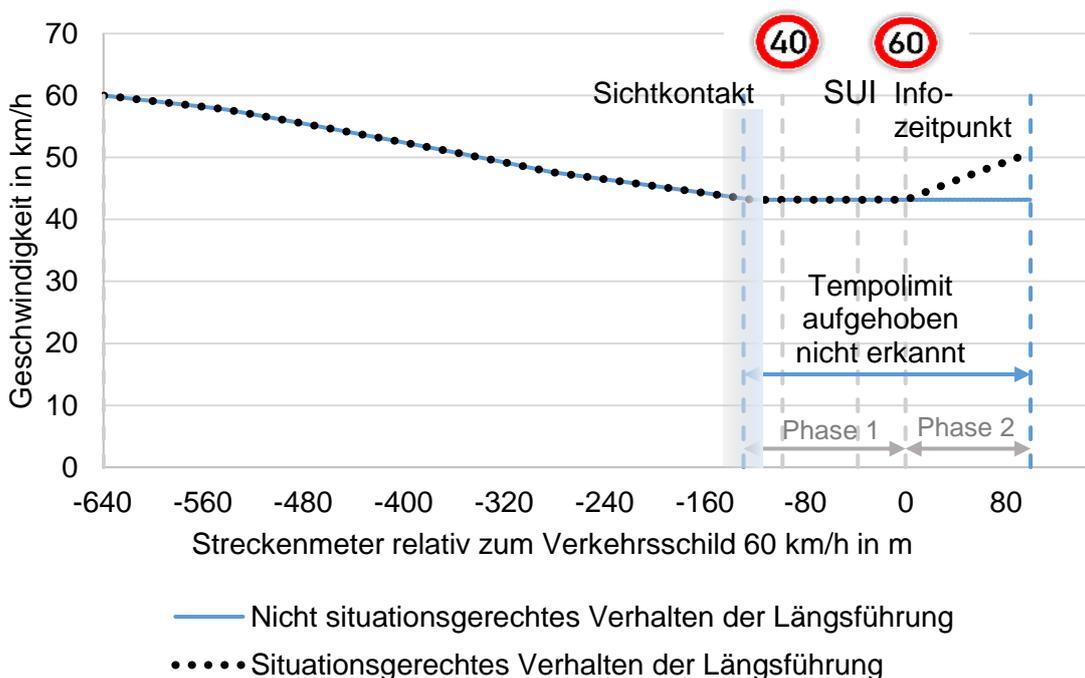


Abbildung E.2: Parametrierung des Szenarios B „Tempolimit aufgehoben nicht erkannt“

Die Szenarien „LSA nicht erkannt“ und „LSA falsch erkannt“ unterscheiden sich in der Daten-Ebene und damit der HMI-Ebene des FAS. Die Parametrierung ist jedoch vergleichbar, weshalb diese für beide Szenarien in Abbildung E.3 enthalten ist.

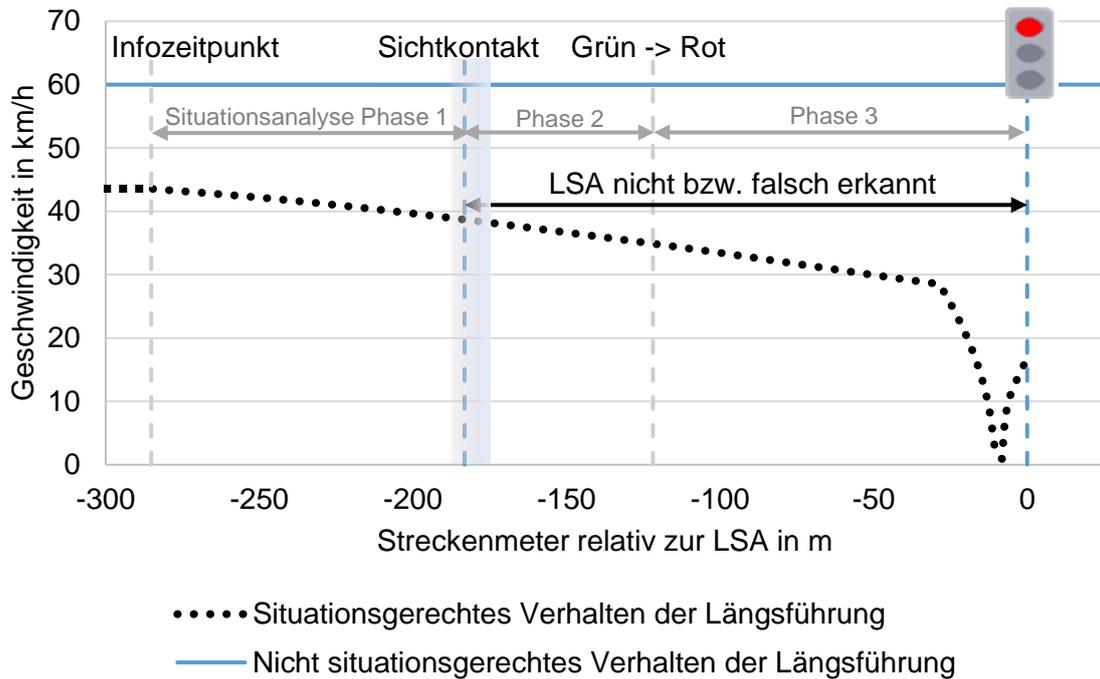


Abbildung E.3: Parametrierung der Szenarien C und D „LSA nicht erkannt“ sowie „LSA falsch erkannt“

Um mögliche negative Effekte der SUI Präsentation zu analysieren, wird diese im Szenario „False-Positive“ bei korrekt funktionierender Automation visualisiert (SUI Stufe 1). Die Parametrierung dieses Szenarios zeigt Abbildung E.4.

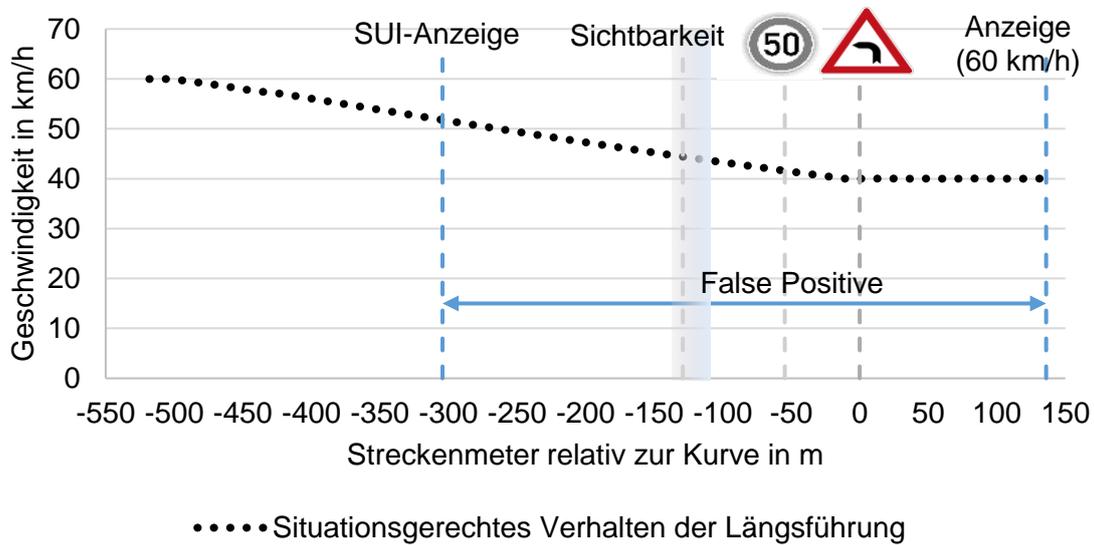


Abbildung E.4: Parametrierung des Szenarios G „False-Positive“

## Anhang F: Fahrdatenaufbereitung und Datensynchronisation

Für die Messfahrten der Probanden liegen die Fahrdaten nur in Abhängigkeit des tatsächlich gefahrenen Streckenmeters vor. Alle Objekte der Strecke (Verkehrsschild, LSA, etc.) liegen jedoch auf Basis des Streckenmeters einer Idealspur vor. In Abhängigkeit der Spurhaltegüte des Probanden sowie der Streckengeometrie wächst die Differenz dieser Werte im Streckenverlauf. Zur Synchronisation dieser Werte wird das, in Abbildung F.1 dargestellte, Vorgehen eingesetzt.

Die Synchronisation basiert auf einer Referenzfahrt, auf der sowohl der tatsächlich gefahrene Streckenmeter sowie die dazugehörigen Werte der Idealspur aufgezeichnet werden. Anschließend werden mittels linearer Interpolation alle relevanten Streckendaten (Beginn, Ende Szenario, erster Sichtkontakt, Objektdaten, etc.) vom Streckenmeter der Idealspur zum tatsächlich gefahrenen Streckenmeter der Referenzfahrt umgerechnet. Im zweiten Schritt werden auf Basis von Synchronisationspunkten im Streckenverlauf („Hedgehogs“) alle relevanten Streckendaten der Referenzfahrt auf den tatsächlich gefahrenen Streckenmeter jedes Probanden umgerechnet. Dies geschieht, indem die Abweichung am nächstgelegenen Synchronisationspunkt auf den jeweiligen Wert aufaddiert wird.

Durch dieses Vorgehen kann eine Genauigkeit von unter 0,5 m erreicht werden.

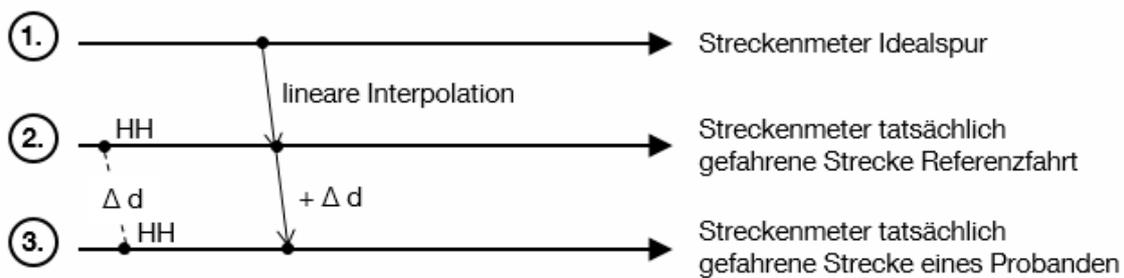


Abbildung F.1: Übersicht zur Datensynchronisation

## Anhang G: Systemunsicherheitsinformation (SUI)

Zwar liegt der Fokus vorliegender Arbeit auf der Interaktion zwischen Fahrer und HMI-Ebene des FAS (Abschnitt 3.2.2), um das Themenfeld der SUI greifbarer darzustellen, werden nachfolgend Informationen zur Ermittlung dieser skizziert.

Die Funktionsebene der automatisierten, kraftstoffeffizienten Längsführung setzt auf der Daten-Ebene auf, die wiederum Informationen aus unterschiedlichen Datenquellen erhält (Abbildung H.1).

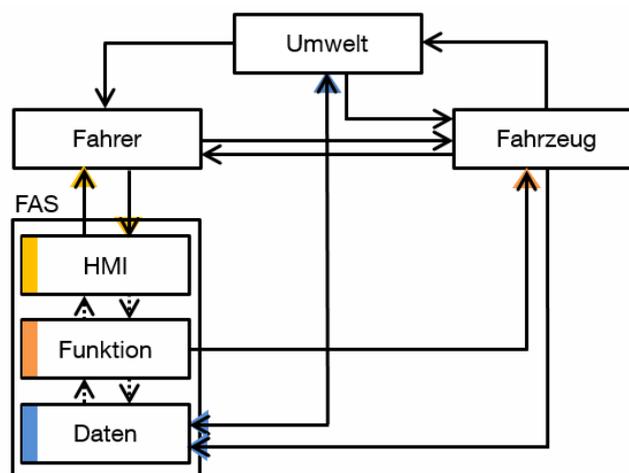


Abbildung H.1: Das Arbeitsmodell zur Fahrer-FAS-Fahrzeug-Interaktion gliedert das FAS in drei Abstraktionsebenen: Daten, Funktion und HMI

Eingehende Informationen der Daten-Ebene werden von Fahrzeuginternen und -externen Datenquellen bezogen. Neben der Informationsaufnahme wird die -analyse durchgeführt [Dam11, S.42]. Daten der Fahrzeugsensorik können u. a. durch die Entdeckungs- und Falschalarmwahrscheinlichkeit sowie der Genauigkeit charakterisiert werden [Tis13, S. 49ff], woraus ein Unsicherheitsfaktor der zugrundeliegenden Informationen resultiert. Das Gleiche gilt für Informationen aus fahrzeugexternen Quellen (Umwelt). Diese können neben der Messunsicherheit auch mit einer zeitlichen Unsicherheit behaftet sein.

Zur Reduktion der Unsicherheiten können redundante sowie inhaltlich komplementäre Informationen [Tis13, S. 14] eingesetzt werden. Auch nimmt die Genauigkeit und Verlässlichkeit der Information i.d.R. mit sinkender Entfernung zum Objekt zu. Beispielsweise ist dies bei der Signalphasenprädiktion von bedarfsgesteuerten Ampeln der Fall. Zusätzlich können weitere Informationen z. B. von bildgebender Sensorik zur Validierung temporärer Geschwindigkeitsbegrenzungen hinzugezogen werden. Für weitergehende Informationen zum Umgang mit Unsicherheiten in der Datenfusion wird verwiesen auf [Tis13, S.61ff].

Zur Erreichung eines hohen Kraftstoffeffizienzpotentials ist jedoch eine vorausschauende und daher frühzeitige Regelung nötig. Um auf Systemabwürfe v. a. in frühen Zeitpunkten der Regelung auf vorausliegende Objekte zu verzichten, kann auf Funktions-Ebene ein (minimaler) Toleranzbereich definiert werden. Innerhalb dessen kann anstelle einer sofortigen Übernahmeaufforderung des FAS (mit resultierendem Cry-Wolf-Effekt, Abschnitt 2.3.3) die Kommunikation der SUI an den Fahrer erfolgen, um eine höhere Aufmerksamkeit der Überwachungstätigkeit zu erzielen.

## Anhang H: Berechnung der transformierten Punktezahl aus der Rangreihenfolge

Nach allen Messfahrten werden die Probanden im Rahmen der Abschlussbefragung gebeten, die erlebten Szenarien hinsichtlich Ihrer Kritikalität in eine Rangreihenfolge zu bringen. Den Lkw-Fahrern liegen hierzu die Szenarien als Screenshot aus der Fahrerperspektive zur Verfügung. Die Ergebnisse der Rangreihenfolge werden mittels Punktesystem transformiert: der erste Platz (höchste Kritikalität) wird mit sechs Punkten gewertet, während der sechste Platz (niedrigste Kritikalität) mit einem Punkt in die Gesamtpunktezahl einfließt. Dies ist durch die Gleichung C.1 beschrieben, wobei  $i$  für den jeweiligen Rang und  $x_i$  für die Anzahl der Nennungen pro Rang steht:

$$\text{Transformierte Punktezahl} = \sum_{i=1}^6 x_i * 7 - i \quad (\text{C.1})$$

Eine Übersicht der Nennungen pro Rang für jedes Szenario zeigt Tabelle G.1.

Tabelle G.1: Rangreihenfolge der Szenarien hinsichtlich Kritikalitätseinschätzung – Übersicht der Nennungen pro Rang

| Szenario                               | #Rang<br>1 | #Rang<br>2 | #Rang<br>3 | #Rang<br>4 | #Rang<br>5 | #Rang<br>6 | Transformierte<br>Punktezahl |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------------------------|
| A: Tempolimit nicht erkannt            | 0          | 1          | 12         | 4          | 16         | 1          | 98                           |
| B: Tempolimit aufgehoben nicht erkannt | 0          | 0          | 0          | 1          | 1          | 32         | 37                           |
| C: LSA Rot nicht erkannt               | 10         | 19         | 3          | 2          | 0          | 0          | 173                          |
| D: LSA falsch erkannt                  | 23         | 11         | 0          | 0          | 0          | 0          | 193                          |
| E: parkendes Fahrzeug                  | 0          | 0          | 6          | 14         | 13         | 1          | 93                           |
| F: abbiegender Lkw                     | 1          | 3          | 13         | 13         | 4          | 0          | 120                          |