

Einfluss der haptischen Rückmeldung am Lenkrad auf das Fahrerverhalten bei automatischen Eingriffen in die Querführung

Inaugural-Dissertation

Zur Erlangung der Doktorwürde der

Fakultät für Humanwissenschaften

der

Julius-Maximilians-Universität Würzburg



vorgelegt von: Norbert Schneider

aus Bonn-Bad Godesberg

Würzburg 2017



Erstgutachter: Prof. Dr. Lynn Huestegge

Zweitgutachter: Prof. Dr. Wilfried Kunde

Tag des Kolloquiums: 22.06.2018

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Verbundprojekts UR:BAN am Interdisziplinären Zentrum für Verkehrswissenschaften (IZVW) der Universität Würzburg.

Mein Dank geht an Alexandra Neukum, die mir die Möglichkeit gegeben hat, diese Promotion am IZVW durchzuführen. Des Weiteren danke ich allen Kollegen des IZVW und des WIVW, insbesondere Dr. Thomas Stemmler, Dr. Thomas Lübbecke und Dr. Christian Purucker für die wertvollen Diskussionen und die fachliche Unterstützung bei der Entstehung dieser Arbeit. Mein besonderer Dank geht außerdem an alle wissenschaftlichen Hilfskräfte und Praktikanten, die diese Arbeit begleitet und unterstützt haben und die ich nun zum Teil zu meinen Kollegen zählen darf: Lukas Virsik, Dennis Befelein, Jürgen Pichen, Robert Tscharn und Fabian Unruh. Für die Unterstützung beim Probandenmanagement und die Betreuung des Fahrsimulators sowie die technische Umsetzung geht mein herzlicher Dank an Sonja Hoffman, Stefanie Schoch und Martin Grein. Weiterhin gilt mein Dank den Kollegen des Teilprojekts UR:BAN KON für die spannenden Diskussionen und Anregungen.

Mein besonderer Dank geht an Prof. Dr. Lynn-Huestegge, der sich trotz des fortgeschrittenen Stadiums der Arbeit die Betreuung mit großem Engagement übernommen hat. Vielen Dank für die vielen Anregungen und Ratschläge bei der Vollendung der Dissertation, die sehr wertvoll für mich waren und maßgeblich zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit beigetragen haben! Ebenso danke ich Prof. Dr. Wilfried Kunde und Prof. Dr. Jörn Hurtienne für die anregenden Diskussionen und dafür, dass sie sich freundlicherweise dazu bereit erklärt haben Teil des Promotionsgremiums zu sein.

Ich möchte außerdem meiner Familie danken, die mich immer unterstützt hat und immer für mich da war.

Mein größter Dank geht an Kristina, für deine unermüdliche Unterstützung und Motivation sowie für dein Verständnis während der Entstehung dieser Arbeit.

„Immer wieder muss man Wissen, das man sicher zu haben glaubt, aufgeben und es durch etwas Subtileres ersetzen. Um diesen Prozess geht es in der Wissenschaft, und er hört nie auf. Das heißt auch, dass Sie nicht alles was wir sagen, für der Weisheit letzter Schluss halten sollten [...]“

(Terry Pratchett, Ian Stewart & Jack Cohen, Die Gelehrten der Scheibenwelt, S. 55)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	10
2	Theorie.....	14
2.1	Fahrernormalverhalten in Gefahrensituationen.....	14
2.2	Fahrerverhalten in Folge von Eingriffen in die Querführung	18
2.2.1	Mögliche Akteure	19
2.2.2	Einflussfaktoren auf die Wahrnehmung von Lenkeingriffen	24
2.2.3	Nicht situationsgerechte Eingriffe in die Querführung	26
2.2.4	Situationsgerechte Eingriffe in die Querführung	30
2.2.5	Zusammenfassung: Fahrerverhalten in Folge von Eingriffen in die Querführung	38
2.3	Der Mensch als Regler: Fahrerverhaltensmodelle zur Beschreibung der Fahrer-Fahrzeug Interaktion.....	40
2.3.1	Verhaltensmodelle zur Beschreibung der Fahraufgabe.....	43
2.3.2	Die Querführung als visueller Kontrollprozess - Einfluss der visuellen Rückmeldung bei der Querführung.....	45
2.3.3	Die Querführung als sensomotorischer Kontrollprozess -Einfluss der propriozeptiven Rückmeldung bei der Querführung.....	48
3	Spezifizierung des Verhaltensmodells.....	51
3.1	Annahmen	54
3.1.1	Einfluss des Handlungsziels	54
3.1.2	Einfluss der haptischen Rückmeldung, der Eingriffscharakteristik und der Akteure....	55
3.1.3	Einfluss der visuellen Wahrnehmung.....	56
3.2	Zusammenfassung: Spezifizierung des Verhaltensmodells.....	57
4	Untersuchungsmethodik	62
4.1	Untersuchungsumgebung	62
4.2	Untersuchungsszenarien	63
4.3	Vorgehen bei der Analyse des Fahrerverhaltens	64
5	Studie I: Ermittlung der Lenkreaktionszeit ohne Ausweichunterstützung.....	67
5.1	Herleitung der Forschungsfragen.....	67
5.2	Forschungsfragen	70
5.3	Methodik	71
5.3.1	Stichprobe	71
5.3.2	Teststrecke und Stimuli	71

5.3.3	Versuchsablauf	72
5.3.4	Datenaufbereitung	73
5.4	Ergebnisse.....	73
5.4.1	Fehlerrate	73
5.4.2	Lenkreaktionszeit	74
5.5	Diskussion	75
5.5.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	75
5.5.2	Diskussion.....	75
5.5.3	Schlussfolgerung.....	77
6	Studie II: Einfluss der Eingriffscharakteristik auf das Fahrerverhalten	78
6.1	Herleitung der Forschungsfragen.....	78
6.2	Forschungsfragen	80
6.3	Methodik	82
6.3.1	Stichprobe	82
6.3.2	Gestaltung der Szenarien	82
6.3.3	Eingriffscharakteristik.....	83
6.3.4	Versuchsablauf	84
6.4	Ergebnisse.....	84
6.4.1	Nutzenfall	85
6.4.2	Fehlerfall.....	90
6.4.3	Lerneffekte und weitere Einflussfaktoren.....	95
6.5	Diskussion	104
6.5.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	104
6.5.2	Diskussion.....	106
6.5.3	Schlussfolgerung.....	109
7	Studie III: Einfluss von geregelten Ausweicheingriffen auf das Fahrerverhalten.....	110
7.1	Herleitung der Forschungsfragen.....	110
7.2	Forschungsfragen	111
7.3	Methodik	112
7.3.1	Stichprobe	112
7.3.2	Gestaltung der Szenarien	112
7.3.3	Eingriffscharakteristik.....	113
7.3.4	Versuchsablauf	114

7.4	Ergebnisse.....	114
7.4.1	Nutzenfall	115
7.4.2	Fehlerfall.....	119
7.4.3	Lerneffekte und weitere Einflussfaktoren.....	124
7.5	Diskussion	130
7.5.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	130
7.5.2	Diskussion.....	131
7.5.3	Schlussfolgerung.....	133
8	Studie IV: Einfluss vorgelagerter Warnungen auf das Fahrerverhalten	135
8.1	Herleitung der Forschungsfragen.....	135
8.2	Forschungsfragen	140
8.3	Methodik	141
8.3.1	Stichprobe	141
8.3.2	Gestaltung der Szenarien	141
8.3.3	Eingriffscharakteristik.....	142
8.3.4	Versuchsablauf	143
8.4	Ergebnisse.....	143
8.4.1	Nutzenfall	143
8.4.2	Fehlerfall.....	152
8.5	Diskussion.....	158
8.5.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	158
8.5.2	Diskussion.....	159
8.5.3	Schlussfolgerung.....	161
9	Studie V: Einfluss visueller Ablenkung auf das Fahrerverhalten	162
9.1	Herleitung der Forschungsfragen.....	162
9.2	Forschungsfragen	163
9.3	Methodik	164
9.3.1	Stichprobe	164
9.3.2	Gestaltung der Szenarien	165
9.3.3	Eingriffscharakteristik.....	165
9.3.4	Gestaltung der Nebenaufgabe	166
9.3.5	Versuchsablauf	166
9.4	Ergebnisse.....	168

9.4.1	Nutzenfall	168
9.4.2	Fehlerfall.....	178
9.5	Diskussion.....	185
9.5.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	185
9.5.2	Diskussion.....	185
9.5.3	Schlussfolgerung.....	186
10	Studie VI: Einfluss der Handhaltung auf das Fahrerverhalten	187
10.1	Herleitung der Forschungsfragen.....	187
10.2	Forschungsfragen	188
10.3	Methodik	188
10.3.1	Stichprobe	188
10.3.2	Gestaltung der Szenarien	189
10.3.3	Eingriffscharakteristik.....	189
10.3.4	Versuchsablauf	189
10.4	Ergebnisse.....	190
10.4.1	Nutzenfall	190
10.4.2	Fehlerfall.....	194
10.5	Diskussion.....	200
10.5.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	200
10.5.2	Diskussion.....	200
10.5.3	Schlussfolgerung.....	201
11	Studie VII: Explorative Studie zum Einfluss der haptischen Rückmeldung auf das Fahrerverhalten.....	202
11.1	Herleitung der Forschungsfragen.....	202
11.2	Forschungsfragen	204
11.3	Methodik	204
11.3.1	Gestaltung der Szenarien	204
11.3.2	Eingriffscharakteristik.....	205
11.3.3	Stichprobe	206
11.3.4	Versuchsablauf	206
11.4	Ergebnisse.....	206
11.4.1	Nutzenfall	207
11.4.2	Fehlerfall.....	208

11.5	Diskussion	211
11.5.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	211
11.5.2	Diskussion	212
11.5.3	Schlussfolgerung.....	213
12	Studienübergreifende Zusammenfassung und Diskussion	215
12.1	Einfluss des Handlungsziels	215
12.2	Einfluss der haptischen Rückmeldung, der Eingriffscharakteristik und der Aktoren.....	217
12.3	Einfluss der visuellen Rückmeldung	220
12.4	Gültigkeit des angenommenen Verhaltensmodells	221
12.5	Forschungsbedarf	224
12.5.1	Forschungsbedarf für den Anwendungsfall	224
12.5.2	Ansätze für die psychologische Grundlagenforschung	226
12.6	Praktische Bedeutsamkeit der Befunde	228
12.7	Schlussfolgerung.....	230
13	Einbettung der Arbeit.....	233
14	Literaturverzeichnis.....	234

Zusammenfassung

Studien zeigen, dass Fahrer in Notfallsituationen meistens eher bremsen als ausweichen, obwohl ausweichen möglicherweise die bessere Strategie zur Kollisionsvermeidung gewesen wäre. Um Fahrer besser bei der Kollisionsvermeidung zu unterstützen, wurden daher in den letzten Jahren Assistenzsysteme entwickelt, die den Fahrer nicht mehr nur bei Notbremsmanövern, sondern auch bei Notausweichmanövern durch einen automatischen Eingriff in die Querführung unterstützen sollen. Allerdings zeigte sich in mehreren Studien, dass das Verhalten der Fahrer die Wirksamkeit dieser Assistenten reduziert, insbesondere wenn der Eingriff des Assistenten über das Lenkrad rückgemeldet wurde.

In dieser Arbeit wurde davon ausgegangen, dass diese Reaktion der Fahrer eine Folge automatischer Korrekturprozesse innerhalb eines psychokybernetischen Regelkreises ist, an dem sensomotorische Regelprozesse zur Steuerung der Lenkradbewegung beteiligt sind. Dazu wurde ein Fahrerverhaltensmodell entwickelt, das den Einfluss der sensomotorischen Regelprozesse im Kontext der Fahraufgabe beschreibt. Auf Basis des Fahrerverhaltensmodells wird angenommen, dass unerwartete haptische Signale am Lenkrad auf Ebene der motorischen Regelung zunächst als Störung des ursprünglichen Handlungsziels interpretiert werden. Um die resultierenden Abweichungen zu korrigieren, wird auf sensomotorischer Ebene ein Korrekturprozess eingeleitet, der erst dann beendet wird, wenn der Fahrer die Möglichkeit hatte, die Situation visuell zu analysieren und sein Handlungsziel an die Situation anzupassen. Dies sollte sich im zeitlichen Verlauf der Fahrerreaktion am Lenkrad widerspiegeln und könnte eine Erklärung für die vom Fahrer verursachte Reduktion der Wirksamkeit sein.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, Anhaltspunkte für diese Annahme aufzuzeigen. Im Rahmen von sieben Experimenten wurden der Einfluss von Eingriffen mit haptischer Rückmeldung am Lenkrad und das resultierende Zusammenspiel von sensomotorischen und visuellen Kontrollprozessen untersucht. Alle Studien befassten sich mit Eingriffen in die Querführung, die den Fahrer potenziell bei Notausweichmanövern unterstützen könnten, und betrachteten sowohl Aspekte der Wirksamkeit als auch der Kontrollierbarkeit. Dabei wurde versucht, durch die Gestaltung des Eingriffs, einer gezielten Beeinflussung der Handlungsziele des Fahrers und einer Manipulation der Rückmeldung Unterschiede in der Reaktion des Fahrers auf unerwartete Eingriffe hervorzurufen. Die Lenkreaktionszeit und das Reaktionsmuster der Fahrer dienten hierbei als Indikatoren für die Leistungsfähigkeit der Fahrer, ihre Handlungsziele an die vorliegende Situation anzupassen.

Die Ergebnisse bestätigen die Relevanz der im Modell angenommenen sensomotorischen Kontrollprozesse und damit auch den Einfluss der haptischen Rückmeldung auf das Fahrerverhalten bei automatischen Eingriffen in die Querführung. Die beschriebene Betrachtung des zeitlichen Verlaufs des Lenkverhaltens ermöglicht zudem eine fundierte Evaluation der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion, um verschiedene Assistenzsysteme miteinander zu vergleichen. Darüber hinaus liefert die vorliegende Arbeit wertvolle Hinweise für die Gestaltung von Assistenzsystemen, die den Fahrer in Notfallsituationen mit automatischen Eingriffen in die Querführung unterstützen sollen. Insgesamt bietet die Integration sensomotorischer Kontrollprozesse in bestehende Fahrerverhaltensmodelle einen Erklärungsansatz für bestehende Probleme bei der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei automatischen Eingriffen in die Querführung, wodurch eine Lücke in der aktuellen verkehrspsychologischen Forschung geschlossen wurde.

Executive Summary

Several studies have shown that drivers tend to brake rather than making an evasive maneuver although an evasive maneuver might have been the best strategy to avoid a collision. To support the driver, assistant systems have been developed which do not only assist the driver in emergency braking but also in making an evasive maneuver by applying an automatic emergency steering and evasion intervention. However, research indicates that drivers reduce the effectiveness of steering and evasion assistants, especially when they are based on steer torque actuators. Consequently, this reaction reduces the collision avoidance potential of steering and evasion assistants.

It was assumed that this is a consequence of automatic adjustment processes of a psychocybernetic control loop which includes sensomotoric control loops to control steering movements. To explain the influence of the sensomotoric control loops in the context of the driving task, a driver behavior model has been developed. Based on this driver behavior model it was concluded that unexpected haptic signals at the steering wheel are interpreted as a disturbance of the current action goal. To correct the resulting deviations an automatic adjustment process is taking place on a sensomotoric level which ends only if the driver had the opportunity to analyze the situation and adjust his action goals. This should be reflected in the reaction pattern observed at the steering wheel and might be an explanation for the observed reduction of the collision avoidance potential.

The aim of this thesis was to provide evidence for this assumption. Therefore, seven experiments have been conducted to analyze the influence of interventions with haptic feedback at the steering wheel on the driver's reaction pattern and the resulting interaction of sensomotoric and visual control processes. All studies focused on interventions in the lateral movement which might assist the driver in making an emergency evasive maneuver and looked at effectiveness as well as controllability. It was tried to create differences in the reaction of the driver by influencing the action goals, implementing different intervention characteristics and manipulating the provided feedback. The steering reaction time and the reaction pattern were used as indicators for the performance of the driver to adjust his action goals to a given situation.

The results confirm the relevance of the assumed sensomotoric control processes and thereby also the influence of the haptic feedback on the driver behavior when being confronted with an automatic steering intervention. The described approach, to analyze the resulting steering reaction pattern, allows a substantiated evaluation of the driver-vehicle-interaction to compare diverse assistant systems. Furthermore, valuable information is provided for the design of future driver assistant systems, which assist the driver with steering interventions in emergency situations. Overall, the integration of sensomotoric control processes in present driver behavior models provides a first approach to solve existing problems of the driver-vehicle-interaction with automatic steering interventions and closes a gap in current research.

1 Einleitung

Menschliches Handeln ist in der Regel ein komplexes Zusammenspiel verschiedener Mechanismen und Prozesse. Damit wir durch unser Handeln die gewünschten Effekte in unserer Umwelt erzielen können, müssen diese Mechanismen und Prozesse korrekt ineinandergreifen. Das bedeutet auch, dass wir die richtigen Informationen zum richtigen Zeitpunkt für unser Handeln heranziehen. Dazu ist es einerseits erforderlich, dass wir unsere Umwelt und Veränderungen innerhalb dieser Umwelt wahrnehmen können. Andererseits müssen wir dazu in der Lage sein, Erfahrungen darüber zu sammeln, welche Auswirkungen unser Handeln hat um abschätzen zu können, welche Handlungen zu den gewünschten Ergebnissen führen. Erst diese beiden Aspekte erlauben ein zielgerichtetes Handeln. Erschwert wird dies dadurch, dass sich unsere Umwelt auch ohne unser Handeln ständig verändert, wodurch wir auch dazu in der Lage sein müssen, auf Veränderungen unserer Umwelt zu reagieren und unser Handeln entsprechend anzupassen.

Das Fahren im Straßenverkehr ist ein gutes Beispiel für die Notwendigkeit des Zusammenspiels dieser verschiedenen Prozesse und Mechanismen. Hier müssen Fahrerinnen/Fahrer¹ gleichzeitig mehrere Aufgaben übernehmen. So müssen sie entscheiden, wohin sie fahren möchten, lenken und Gas geben und gleichzeitig auf die Umgebung achten. Zusätzlich müssen sie je nach Situation innerhalb einer umgrenzten Zeitspanne auf Veränderungen in der Umgebung reagieren um beispielsweise Unfälle mit anderen Verkehrsteilnehmern zu vermeiden. Das verdeutlicht, dass das Fahren im Straßenverkehr mit hohen Anforderungen an den Fahrer verbunden ist. Der Fahrer übernimmt dabei komplexe Überwachungs- und Regelungsaufgaben, bei denen sowohl Prozesse der Informationsaufnahme und Informationsverarbeitung als auch der zur Verfügung stehende zeitliche Horizont eine wichtige Rolle spielen.

Eine besondere Herausforderung stellen unerwartet die eigene Fahrspur kreuzende Hindernisse dar, wie z. B. ausparkende oder querende Fahrzeuge, Fußgänger oder Radfahrer. So kann die zur Reaktion verbleibende Zeitspanne sehr klein sein, während die Relativgeschwindigkeit sehr hoch ist. Dies kann zur Folge haben, dass eine bevorstehende Kollision nicht mehr durch eine Bremsung vermieden werden kann. In diesen Situationen kann es daher – je nach den situationellen Begebenheiten - sinnvoll sein, die Kollision durch Ausweichen zu vermeiden. Ob Ausweichen von Vorteil ist und wie groß der zeitliche Gewinn ist (d.h. wie viel später im Vergleich zu einer Bremsung ausgewichen werden kann), hängt dabei sowohl von der Fahrzeuggeschwindigkeit als auch von dem erforderlichen Spurversatz ab. Der erforderliche Spurversatz definiert, wie weit ausgewichen werden muss, um die Kollision mit dem Hindernis zu vermeiden. Je größer der erforderliche Spurversatz, desto kleiner ist der Vorteil von Ausweichen gegenüber Bremsen bezogen auf die verbleibende Zeit bis zur Kollision (Time to Collision; vgl. hierzu auch Abbildung 1-1).

¹ Für eine bessere Lesbarkeit wird im Rahmen dieser Arbeit ab sofort auf die Nennung beider Geschlechter verzichtet. Wenn von einem Fahrer oder Fahrern gesprochen wird sind jedoch stets beide Geschlechter gemeint.

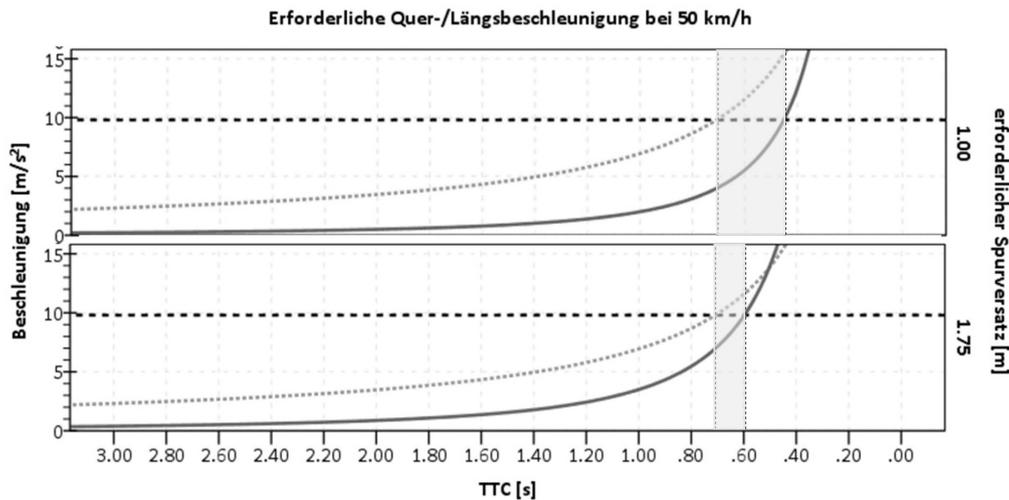


Abbildung 1-1: Berechnete, erforderliche Quer- (schwarze Linie) und Längsbeschleunigung (grau gestrichelte Linie) zur Vermeidung einer Kollision in Abhängigkeit von der Time to Collision (TTC) und dem erforderlichen Spurversatz bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h. Die grau-schraffierte Fläche kennzeichnet den Zeitbereich, in dem noch ausgewichen werden kann, obwohl eine Bremsung nicht mehr ausreichen würde um die Kollision zu vermeiden. Die schwarze Linie kennzeichnet den angenommenen physikalischen Grenzwert von 9.81 m/s^2 (1 g).

Verschiedene Studien konnten zeigen, dass Fahrer nicht immer die erfolgversprechendste Kollisionsvermeidungsstrategie wählen, da Fahrer in Gefahrensituationen eher bremsen als ausweichen (Adams, 1994; Adams, Flannagan & Sivak, 1995; Dozza, 2013; Malaterre, Ferrandez, Fleury & Lechner, 1988; Malaterre & Lechner, 1990). In den letzten Jahren wurden daher Assistenzsysteme entwickelt, die den Fahrer beim Ausweichen unterstützen sollen, sogenannte Notausweichassistenten (eng.: emergency steering and evasion assistants). Diese Assistenten greifen - je nach Umsetzung - aktiv in die Querführung des Fahrzeugs ein, um die bevorstehende Kollision zu vermeiden. Allerdings geben verschiedene Studien Hinweise darauf, dass Fahrer im Falle eines Eingriffs die Wirksamkeit von Notausweichassistenten durch ihr Verhalten reduzieren (vgl. Fricke et al., 2015b; Hesse et al., 2013; Schieben et al., 2014), insbesondere wenn der Eingriff mithilfe einer Lenkmomentüberlagerung erfolgt. Zwar wurden bereits verschiedene Maßnahmen untersucht (Hesse et al., 2013; Schieben et al., 2014; Sieber et al., 2015a; Sieber, Siedersberger, Siegel & Färber, 2015b), um dieses Verhalten zu reduzieren, allerdings existiert bisher kein Erklärungsansatz für das Verhalten der Fahrer.

Die Berücksichtigung verschiedener Prozesse und Mechanismen der menschlichen Verhaltenssteuerung könnten dazu beitragen, eine mögliche Erklärung für das gezeigte Fahrerverhalten zu finden. Einen Ansatz hierfür liefern bestehende Fahrerverhaltensmodelle sowie grundlegende Modelle der Verhaltenssteuerung. Mithilfe dieser Modelle können einerseits mögliche Probleme bei der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion aus Sicht der Psychologie identifiziert werden. Andererseits können anhand dieser Modelle Hypothesen formuliert werden, um beispielsweise den Einfluss verschiedener Gestaltungsmerkmale eines Notausweichassistenten auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion zu überprüfen. Finden sich Belege für diese Hypothesen können wiederum Rückschlüsse auf die Gültigkeit bereits bestehender Verhaltensmodelle gezogen werden. Zusätzlich kann überprüft werden inwiefern aus der Grundlagenforschung bekannte Effekte oder spezifische Mechanismen und Prozesse der Verhaltenssteuerung auch in komplexen Umgebungen bedeutsam sind.

Die folgenden Kapitel greifen verschiedene Themengebiete auf, die zur Erklärung des Problems, dass Fahrer die Wirksamkeit von Notausweichassistenten negativ beeinflussen, beitragen können. Hierzu wird zunächst das Verhalten von Fahrern ohne Unterstützung durch ein Assistenzsystem beschrieben (siehe Kapitel 2.1). Hierbei wird vor allem auf die Kollisionsvermeidungsstrategie der Fahrer eingegangen, sowie auf Faktoren, welche die Reaktionsstrategie beeinflussen. Auf Basis der Erkenntnisse wird ein möglicher Unterstützungsbedarf abgeleitet.

Anschließend werden unterschiedliche Unterstützungsmöglichkeiten vorgestellt, wobei näher auf Besonderheiten bei der Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug im Falle eines Eingriffs eingegangen wird (siehe Kapitel 2.2). Zusätzlich werden Vor- und Nachteile der verschiedenen Eingriffskonzepte diskutiert. Im Fokus steht dabei die Frage, welche Rückmeldung der Fahrer vom Fahrzeug erhält und inwiefern die gelieferte Rückmeldung konsistent mit der vom Fahrer geforderten Reaktion ist. Daraus können mögliche Probleme bei der Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug abgeleitet werden.

Des Weiteren werden Studienergebnisse zu fahrzeugseitigen Eingriffen in die Querführung zusammengefasst. Im Fokus stehen hierbei empirische Arbeiten, die sich mit der Reaktion der Fahrer auf fahrzeugseitige Eingriffe im Nutzen- und Fehlerfall befassen. Dabei wird deutlich, dass automatische Ausweicheingriffe nicht immer zum gewünschten Erfolg führen.

Mit dem Ziel, das Fahrerverhalten im Falle von fahrzeugseitigen Eingriffen besser zu verstehen und mögliche Ursachen für die oben geschilderte Problematik zu identifizieren, werden anschließend unterschiedliche psychokybernetische Modelle und bestehende Fahrerverhaltensmodelle vorgestellt. Im Fokus stehen Fahrerverhaltensmodelle zur Vorhersage des Lenkverhaltens (siehe Kapitel 2.3). Dabei wird insbesondere auf die Rolle der visuellen und der haptischen bzw. propriozeptiven Rückmeldung eingegangen.

Diese Fahrerverhaltensmodelle bilden die Basis für ein vereinfachtes Fahrerverhaltensmodell, das im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde (siehe Kapitel 3). Das Modell bildet zusammen mit den Erkenntnissen aus bisherigen Studien die Grundlage für Ableitung der Forschungsfragen, die im Rahmen dieser Arbeit überprüft werden.

Im Modell wird davon ausgegangen, dass visuelle und haptische Informationen unterschiedlich schnell verarbeitet werden können. Zudem wird angenommen, dass die visuellen und haptischen Informationen auf unterschiedlichen Ebenen der Verhaltenssteuerung anzusiedeln sind. Die bestehende Problematik, dass Fahrer die Wirksamkeit von automatischen Ausweicheingriffen reduzieren, könnte daher auf Probleme bei der Verhaltenssteuerung zurückzuführen sein, die wiederum auf unterschiedliche Verarbeitungszeiten der haptischen und der visuellen Rückmeldung zurückgeführt werden. Bezogen auf die beschriebene Problematik wird konkret angenommen, dass unerwartete haptische Signale am Lenkrad auf Ebene der motorischen Regelung zunächst als Störung des ursprünglichen Handlungsziels interpretiert werden. Um die resultierenden Abweichungen zu korrigieren, wird auf sensomotorischer Ebene ein Korrekturprozess eingeleitet, der erst dann beendet wird, wenn der Fahrer die Möglichkeit hatte, die Situation visuell zu analysieren und sein Handlungsziel an die Situation anzupassen. Da die visuellen Informationen langsamer verarbeitet werden als die haptischen Informationen sollte sich dies im zeitlichen Verlauf der Fahrerreaktion am Lenkrad widerspiegeln.

Um Belege für diese Annahmen zu finden, werden insgesamt sieben Studien vorgestellt, die sich mit einzelnen Aspekten des vorgestellten Modells befassen (siehe Kapitel 5-11). Im Fokus der Studien stand der Einfluss der haptischen Rückmeldung am Lenkrad auf die Reaktion des Fahrers, sowie der Einfluss der visuellen Rückmeldung.

Alle Studien befassten sich mit Eingriffen in die Querführung, die den Fahrer potenziell bei Notausweichmanövern unterstützen könnten. Durch die Gestaltung des Eingriffs, eine gezielte Beeinflussung der Handlungsziele des Fahrers und eine Manipulation der visuellen und haptischen Rückmeldung wurde versucht, Unterschiede in der Reaktion des Fahrers auf unerwartete Eingriffe hervorzurufen. Die Lenkreaktionszeit und das Reaktionsmuster der Fahrer dienen dabei als Indikatoren für die Annahme, dass visuelle und haptische Informationen unterschiedlich schnell verarbeitet werden.

Den Abschluss dieser Arbeit bildet eine Zusammenfassung und Diskussion der neu gewonnenen Erkenntnisse (siehe Kapitel 12). Im Vordergrund steht dabei die Eignung des vorgestellten Verhaltensmodells zur Vorhersage und Erklärung des beobachteten Verhaltens. Dabei wird detailliert auf den Einfluss der haptischen und der visuellen Rückmeldung eingegangen. Ergänzend werden die Ergebnisse im Hinblick auf Implikationen für die Entwicklung, Gestaltung und Testung von automatischen Eingriffen diskutiert.

2 Theorie

2.1 Fahrernormalverhalten in Gefahrensituationen

Bevor auf die Frage nach der Interaktion von Fahrer und Fahrzeug bei der Vermeidung von Unfällen eingegangen wird, sollte berücksichtigt werden, wie sich Fahrer üblicherweise in Gefahrensituationen verhalten. Je nach Situation können Fahrer entweder eine Gefahrenbremsung einleiten, versuchen dem Hindernis auszuweichen oder eine Kombination von Bremsen und Lenken einsetzen um eine Kollision zu verhindern. Es ist anzunehmen, dass die äußeren Umstände einen großen Einfluss auf das Fahrerverhalten haben. So macht Ausweichen auch aus objektiver Sicht vor allem dann Sinn, wenn der Abstand zum Hindernis gering, ausreichend Platz zum Ausweichen vorhanden und der erforderliche Querversatz nicht zu hoch ist. Im Folgenden werden daher Erkenntnisse bezüglich des Fahrerverhaltens in Gefahrensituationen zusammengefasst.

Bereits 1968 untersuchte Barrett in einem Fahrsimulator, wie sich Probanden verhalten, wenn ein Fußgänger plötzlich vor Ihnen die Fahrbahn betritt. Fünf von insgesamt elf Probanden (45 %) konnten dabei die Kollision mit dem Fußgänger nicht vermeiden. Dominierende Reaktion der Fahrer war dabei eine Bremsung. Die Bremsreaktionszeit scheint Einfluss darauf zu haben, ob die Fahrer die Kollision verhindern können oder nicht. Fahrer, die die Kollision verhindern konnten, bremsen im Mittel nach ca. 0.8 s und damit ca. 300 ms früher als Fahrer, die die Kollision nicht verhindern konnten (1.1 s). Nur ein Fahrer versuchte die Kollision erfolgreich durch Lenken zu verhindern. Barrett (1968) diskutiert, dass Bremsen möglicherweise auch in der realen Welt die dominierende Reaktion auf dieses Ereignis sein könnte. Zudem gibt er an, dass die Fahrer möglicherweise den Abstand zum Fußgänger falsch einschätzten und davon ausgingen, dass sie das Fahrzeug vorher zum Stillstand bringen können, oder dass der Fußgänger sich weiter bewegen würde (vgl. Barrett, 1968).

Mehrere Arbeiten, darunter experimentelle Studien, Analysen von Feldbeobachtungen und Literaturzusammenfassungen, bestätigten den Befund von Barrett (1968), dass Fahrer in Gefahrensituationen üblicherweise zunächst mit einer Bremsung reagieren (Adams, 1994; Dozza, 2013; Malaterre et al., 1988; Malaterre & Lechner, 1990; McGehee et al., 1999; Weber & Färber, 2015; Wiacek & Najm, 1999).

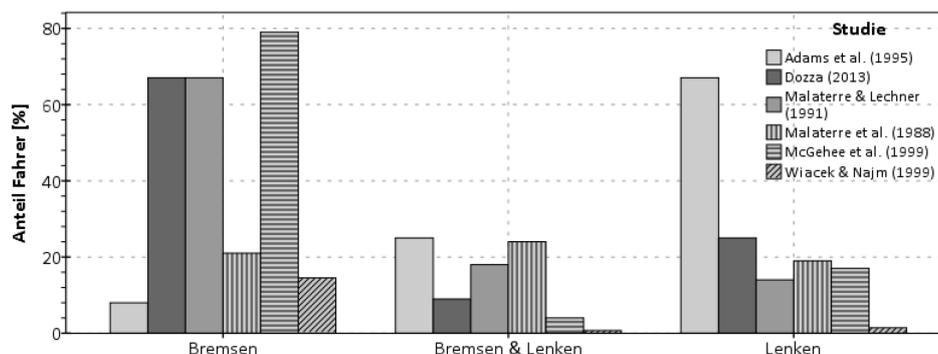


Abbildung 2-1: Anteil beobachteter Fahrerreaktionen in Gefahrensituationen.

Als mögliche Ursache dafür führt Adams (1994) an, dass Fahrer möglicherweise „[...] die Tendenz haben, unter allen Umständen innerhalb ihrer Fahrspur bleiben zu wollen“, „[...] nicht über alternative Manöver Bescheid wissen“ oder „[...] die Präferenz haben, eher die Schwere des Unfall zu reduzieren, als weitere Kollisionen in Folge des Ausweichens zu riskieren“ (vgl. Adams, 1994, S. 11 [sinngemäße Übersetzung des Autors]). Zu einer ähnlichen Schlussfolgerung kommen auch McGehee et al. (1999). Sie geben an, dass „[...] Fahrer, die in Unfälle verwickelt sind, sich gegen querdynamische Manöver sträuben und Bremsungen präferieren, um eine Kollision mit dem Hindernis zu vermeiden.“ (McGehee et al., 1999, S. 23 [sinngemäße Übersetzung des Autors]).

Allerdings gibt es auch Hinweise darauf, dass Fahrer in bestimmten Gefahrensituationen (s.u. für Details) häufiger ausweichen als bremsen oder zumindest eine Kombination aus Bremsen und Lenken zeigen (vgl. Adams et al., 1995; Lerner, 1993; Scanlon, Kusano & Gabler, 2015). Zusätzlich deuten Unfallanalysen an, dass Fahrer häufig keine Reaktion zeigen, die die Kollision verhindern könnte (vgl. Malaterre et al., 1988; Scanlon et al., 2015; Wiacek & Najm, 1999). In experimentellen Studien wird das Ausbleiben einer Reaktion jedoch nicht beobachtet. Dies ist möglicherweise ein Hinweis darauf, dass die in Unfälle verwickelten Fahrer möglicherweise abgelenkt waren und daher die Kollision nicht verhindern konnten. Bei der Interaktion mit einem Assistenzsystem, das den Fahrer bei der Unfallvermeidung unterstützt, könnte daher der Fahrerzustand (abgelenkt vs. aufmerksam) eine entscheidende Rolle spielen. Allerdings wird anhand der vorliegenden Studien nicht ersichtlich, ob eine Ablenkung des Fahrers, abgesehen von dem Ausbleiben einer Reaktion, zusätzlich einen Einfluss auf die Reaktionswahl der Fahrer hat.

Zeigt der Fahrer hingegen eine Vermeidungsreaktion, hängt die Reaktionswahl und die Reihenfolge der Lenk- und Bremsreaktionen möglicherweise von der gefahrenen Geschwindigkeit, dem räumlichen und zeitlichen Abstand zum Hindernis, sowie der Größe, Position und Bewegung des Hindernisses ab (Adams, 1994; Adams et al., 1995; Malaterre et al., 1988; Scanlon et al., 2015). Malaterre et al. (1988) berichten beispielsweise, dass die Entscheidung für ein Ausweichmanöver von verschiedenen situationellen Faktoren begünstigt wird. Dazu gehören:

- geringer Abstand zum Hindernis,
- Gewissheit über die Trajektorie des Hindernisses und
- gute Sichtbarkeit.

Weber und Färber (2015) sowie Malaterre und Lechner (1990) berichten ebenfalls, dass ein geringerer zeitlicher Abstand zum Hindernis zu einer Zunahme von Lenkreaktionen führt. So zeigen Malaterre und Lechner (1990), dass bei einer TTC von 2 s mehr Fahrer lenken oder eine Kombination aus Bremsen und Lenken zeigen, während Fahrer bei einer TTC von 2.4 oder 2.8 s häufiger bremsen. Dieser Effekt zeigt sich auch bei kleineren Zeitabständen im Bereich von 1.6 s bis 1.0 s (vgl. Weber & Färber, 2015). Malaterre et al. (1988) gehen davon aus, dass Fahrer, solange sich das Hindernis bewegt, zunächst bremsen und sich erst dann entscheiden auszuweichen, wenn sie realisieren, dass alleiniges Bremsen nicht mehr ausreicht um die Kollision zu vermeiden. Allerdings gibt es auch Hinweise darauf, dass Fahrer bereits bei einem größeren zeitlichen Abstand zum Hindernis häufiger lenken als bremsen. In der Studie von Lerner (1993) wird berichtet, dass 79 % der Fahrer ausweichen, wenn der zeitliche Abstand zum Hindernis 3.4 s beträgt. Dies lässt auf einen U-förmigen Zusammenhang schließen. Ist der Zeitabstand groß genug, reagieren Fahrer eher mit Lenken, da sie möglicherweise ausreichend Zeit haben die Situation zu analysieren und das Ausweichmanöver zu planen. Nimmt der zeitliche Abstand weiter ab, reagieren die Fahrer hingegen häufiger mit einer Bremsung.

Ist der zeitliche Abstand hingegen sehr klein, realisieren die Fahrer, dass die Kollision durch alleiniges Bremsen nicht mehr vermeidbar ist und beginnen mit einer Lenkreaktion (vgl. Abbildung 2-2).

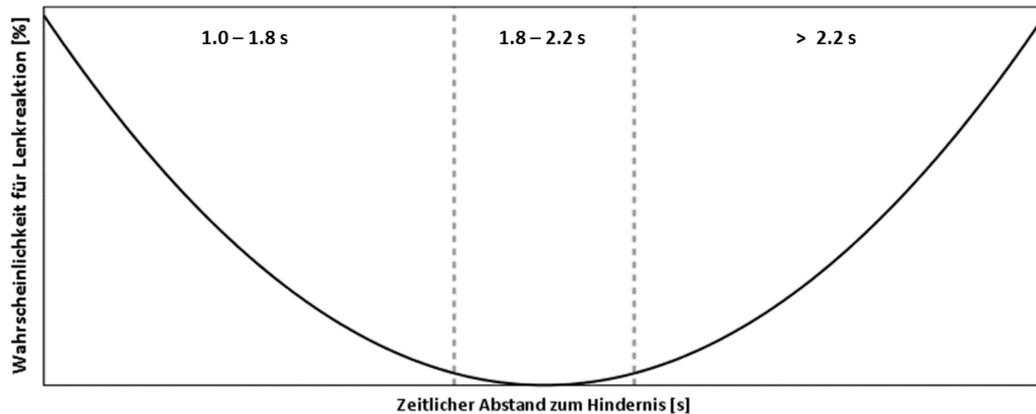


Abbildung 2-2. Veranschaulichung des angenommenen Zusammenhangs zwischen dem zeitlichen Abstand zum Hindernis und der Wahrscheinlichkeit für eine Lenkreaktion des Fahrers. Die Zahlenwerte liefern grobe Anhaltspunkte für Zeitbereiche und basieren auf den Arbeiten von Lerner (1993), McGehee et al. (1999) sowie Weber und Färber (2015).

Weichen Fahrer aus, lenken sie in der Regel in Bewegungsrichtung des Hindernisses (vgl. Malaterre & Lechner, 1990; Scanlon et al., 2015; Weber & Färber, 2015). Nur wenige Fahrer versuchen hinter dem Hindernis vorbei zu fahren (vgl. Malaterre & Lechner, 1990; Mazzae, Barickman, Scott Baldwin & Forkenbrock, 1999; Scanlon et al., 2015; Weber & Färber, 2015). Allerdings wird auch berichtet, dass Fahrer häufig zu spät mit der Lenkreaktion beginnen oder diese zu stark ausfällt. Durch die Kombination mit einer Bremsung kann dies zu einem Kontrollverlust über das Fahrzeug führen (vgl. Malaterre et al., 1988, S. 645).

Im Mittel erfolgt die Lenkreaktion zwischen 0.5 s und 0.9 s vor der Kollision mit dem Hindernis (vgl. Scanlon et al., 2015). Zeigen die Fahrer eine Bremsreaktion, erfolgt letztere üblicherweise ca. 0.5 s früher und wird im Mittel zwischen 0.5 s und 1.5 s vor der Kollision beobachtet (vgl. Dozza, 2013; Mazzae et al., 1999; Scanlon et al., 2015). Wird eine Kombination aus Lenken und Bremsen beobachtet, ist allerdings unklar, ob Fahrer zuerst bremsen und dann lenken oder umgekehrt. Während McGehee et al. (1999) berichten, dass Fahrer in der Regel zuerst bremsen und dann lenken, berichten Weber und Färber (2015) dass Fahrer überwiegend zuerst lenken und dann bremsen.

Die Reaktionszeit in Gefahrensituationen hängt dabei nicht nur von der Reaktionswahl, sondern auch von weiteren Einflussfaktoren, wie z. B. dem Fahrerzustand ab (vgl. Dozza, 2013; Mazzae et al., 1999; McGehee et al., 1999). Abgelenkte Fahrer reagieren im Mittel ca. 0.25 s langsamer als aufmerksame Fahrer. Zusätzlich scheint die Blickrichtung die Reaktion zu beeinflussen. Schaut der Fahrer zu Beginn der Situation nicht auf die Straße, reagiert er im Mittel ca. 0.6 s langsamer als Fahrer, die auf die Straße schauen (vgl. Dozza, 2013). Des Weiteren scheint die Kritikalität der Gefahrensituation die Lenkreaktionszeit zu beeinflussen. Hierbei wurde die Time-To-Intersection (TTI) herangezogen, welche definiert ist als die Zeit, die es dauert, bis der Fahrer die Kreuzung mit einer gleichbleibenden Geschwindigkeit erreicht (siehe McGehee et al., 1999, S. 41). Bei einer TTI von 2.5 s fällt die Lenkreaktionszeit im Mittel ca. 0.24 s kürzer aus als bei einer TTI von 3.0 s (vgl. McGehee et al., 1999). Bei Bremsungen scheinen Fahrer hingegen gleich schnell oder sogar schneller zu reagieren (vgl. McGehee et al., 1999).

Eine Analyse des Bremsverlaufs von Ising et al. (2012) zeigt allerdings, dass Fahrer ihre Bremsung im weiteren zeitlichen Verlauf anpassen. Innerhalb der ersten 0.3 s wird, unabhängig vom zeitlichen Abstand zum Hindernis, eine Verzögerung von ca. 0.4 g (entspricht ca. 4 m/s²) erreicht. Anschließend hängt die weitere Bremsreaktion jedoch vom zeitlichen Abstand zum Hindernis ab. Bei einem zeitlichen Abstand von 3 s bei Beginn der Situation benötigen die Fahrer im Mittel länger, um eine vergleichbare Verzögerung zu erreichen als bei einem zeitlichen Abstand von 2.5 s (vgl. Ising et al., 2012). Dies ist möglicherweise ein Indiz dafür, dass die erste Bremsreaktion in Gefahrensituationen reflexartig erfolgt, während die situationsangemessene Anpassung der Bremsreaktion erst im späteren Verlauf beginnt. Überträgt man diesen Befund auf die Lenkreaktionszeit könnte die im Vergleich zur Bremsung verzögerte Lenkreaktion dadurch zustande kommen, dass Fahrer länger benötigen um die Situation zu analysieren und ihr Lenkverhalten entsprechend anzupassen. Aus diesem Grund könnten Fahrer zunächst mit einer (hoch geübten) Bremsung beginnen, was ihnen mehr Zeit verschafft um die Situation zu analysieren, bevor sie mit einer Lenkreaktion beginnen. Dies könnte auch erklären, warum Fahrer dazu neigen zu bremsen, selbst wenn dies nicht die beste Strategie zur Kollisionsvermeidung ist. Zu einem ähnlichen Schluss kommen auch Malaterre et al. (1988):

“If one adds considerations such as the effects of stress and temporal constraints, one might assume that people do not rely on refined perceptual judgements for taking collision avoidance decisions, but tend to follow simplified strategies, resorting to braking as their initial reaction, except when the obstacle is very close and positioned laterally to their trajectory.” (Malaterre et al., 1988; S. 653)

Fasst man die Befunde zum Fahrerverhalten in Gefahrensituationen zusammen, ist anzunehmen, dass Fahrer:

- möglicherweise keine kollisionsvermeidenden Verhaltensweisen zeigen insbesondere dann, wenn sie abgelenkt sind.
- zunächst mit einer Bremsung beginnen, die ggf. im weiteren zeitlichen Verlauf angepasst wird.
- erst im Anschluss an die Bremsung eine Lenkreaktion zeigen, es sei denn der zeitliche Abstand zum Hindernis ist sehr klein.
- in der Regel in Bewegungsrichtung des Hindernisses ausweichen.

Dies verdeutlicht zum einen, dass eine Unterstützung durch ein Assistenzsystem dazu beitragen könnte, die Unfallzahlen zu verringern, indem Fahrer bei der Reaktionsauswahl und -ausführung unterstützt werden. Zum anderen wird jedoch auch deutlich, dass Fahrer in Gefahrensituationen dazu neigen, bestimmten Reaktionsmustern oder Handlungsstrategien zu folgen. Möglicherweise beeinflussen diese – je nach Gestaltung des Notausweichassistenten - auch die Interaktion mit einem Notausweichassistenten. Daher wird im Folgenden zunächst auf unterschiedliche Unterstützungsmöglichkeiten und ihre Besonderheiten bei der Interaktion mit dem Fahrer eingegangen.

2.2 Fahrerverhalten in Folge von Eingriffen in die Querführung

Wie im vorigen Kapitel beschrieben scheinen Fahrer in Gefahrensituationen nicht immer dazu in der Lage zu sein, Kollisionen zu verhindern. Dies scheint zum einen daran zu liegen, dass Fahrer nur in seltenen Fällen ein Ausweichmanöver in Betracht ziehen. Zum anderen gibt es Hinweise darauf, dass Fahrer in Fällen, in denen es zu einem Unfall kam, möglicherweise abgelenkt waren. Dies legt nahe, dass eine Unterstützung des Fahrers dazu beitragen könnte Unfälle zu vermeiden. Während fahrzeugseitige Eingriffe in die Längsführung zur Kollisionsvermeidung (sogenannte Notbremsassistenten) bereits in Serienfahrzeugen verfügbar sind, beschränken sich Eingriffe in die Querführung bisher überwiegend auf Komfortfunktionen, die den Fahrer bei der Spurführung oder Spurhaltung unterstützen. In den letzten Jahren zeigte sich jedoch eine deutliche Zunahme der Forschungsaktivitäten im Bereich der Entwicklung von Notausweichassistenten, was sich insbesondere an den Inhalten von Forschungsprojekten wie UR:BAN (Urbaner Raum: Benutzergerechte Assistenzsysteme und Netzmanagement; Manstetten et al., 2013), PRORETA (PRORETA, 2017) und *interactIVe (interactIVe - accident avoidance by active intervention for Intelligent Vehicles, 2017)* ablesen lässt. Diese Projekte hatten unter anderem zum Ziel Notausweichassistenten für verschiedene Anwendungsfälle zu entwickeln und zu erproben.

Die Forschungsarbeiten verdeutlichen, dass Eingriffe in die Querführung zur Kollisionsvermeidung eine große Herausforderung darstellen. Eingriffe in die Querführung können sowohl technisch als auch konzeptionell unterschiedlich gestaltet werden. Die Gestaltung des Eingriffs und die Wahl der Aktoren trägt maßgeblich dazu bei, in welcher Art und Weise der Fahrer Rückmeldung über den Eingriff erhält oder wie er den Eingriff beeinflussen kann. So kann der Fahrer Rückmeldung über den Eingriff beispielsweise direkt über das Lenkrad erhalten oder über die Fahrzeugbewegung und Fahrdynamik. Diese Aspekte könnten entscheidend dazu beitragen, wie sich ein Fahrer im Falle eines Eingriffs in die Querführung verhält.

Verschiedene Studien liefern bereits Anhaltspunkte für die optimale Gestaltung von Lenkeingriffen. So liegen bereits einige Befunde bezüglich der Wahrnehmbarkeit von Lenkeingriffen und möglicher Einflussfaktoren auf die Wahrnehmung vor. Des Weiteren wurde das Fahrerverhalten in Folge unerwarteter fehlerhafter Lenkeingriffe eingehend untersucht. Ziel dieser Studien war es, allgemeingültige Grenzwerte zu definieren, die sicherstellen, dass auch fehlerhafte Eingriffe in die Querführung von Fahrern sicher beherrscht werden können. Dabei wurde unter anderem eine Methodik zur Bestimmung von Reaktionszeiten des Fahrers im Falle von Lenkeingriffen entwickelt. Die umfangreichen Ergebnisse dieser Studien tragen entscheidend zum Verständnis des Fahrerverhaltens im Fall von Lenkeingriffen bei. Allerdings lassen sich aus der Untersuchung fehlerhafter Lenkeingriffe nur bedingt Rückschlüsse auf das Verhalten im Nutzenfall ziehen. Daher wurden in den vergangenen Jahren auch zunehmend Studien durchgeführt, die sich mit der Frage beschäftigen, ob ein automatischer Eingriff in die Querführung den Fahrer z. B. bei der Kollisionsvermeidung erfolgreich unterstützen kann.

Im Folgenden werden zunächst unterschiedliche Aktoren beschrieben, mit deren Hilfe ein Eingriff in die Querführung des Fahrers möglich ist. Der Fokus der Beschreibung liegt dabei auf der Interaktion der unterschiedlichen Aktoren mit dem Fahrer (siehe Kapitel 2.2.1). Anschließend werden Studien berichtet, die sich mit der Wahrnehmbarkeit von Lenkeingriffen und möglichen Einflussfaktoren

befassen (vgl. Kapitel 2.2.2). Darauffolgend werden Erkenntnisse zum Fahrerverhalten in Folge fehlerhafter Lenkeingriffe vorgestellt (siehe Kapitel 2.2.3). Abschließend werden mögliche Eingriffskonzepte dargestellt, die den Fahrer bei der Querführung in Gefahrensituationen unterstützen könnten, sowie exemplarische Befunde zum Fahrerverhalten im Nutzenfall (vgl. Kapitel 2.2.4).

2.2.1 Mögliche Aktoren

Um die Querführung des Fahrzeugs zu beeinflussen, kann auf unterschiedliche Aktoren im Fahrzeug zurückgegriffen werden. Je nach Akteur variiert dabei die Art und Weise, wie der Fahrer Rückmeldung über einen Eingriff in die Querführung erhält. So kann die Rückmeldung beispielsweise direkt über das Lenkrad erfolgen oder über die Fahrzeugbewegung und Fahrdynamik. Zusätzlich bestehen Unterschiede darin, wie sich beispielsweise eine Gegenlenkreaktion des Fahrers auf das Fahrzeugverhalten auswirkt. Insgesamt werden vier unterschiedliche Aktoren vorgestellt:

- Lenkmomentüberlagerung
- Überlagerungslenkung
- Steer by Wire
- Einseitiges Bremsen.

Im Folgenden wird kurz auf die einzelnen Aktoren und deren Besonderheiten eingegangen. Tabelle 2-1 fasst die unterschiedlichen Aktoren und deren erwartete Auswirkung auf das Rückmeldungsverhalten zusammen. Daraus wird ersichtlich, dass sich mithilfe unterschiedlicher Aktoren das Rückmeldungsverhalten gezielt beeinflussen lässt. Den größten Spielraum bietet dabei die Steer-by-Wire Aktorik, da sie beliebig umgesetzt werden kann.

Tabelle 2-1: Zusammenfassung unterschiedlicher Eingriffs- und Aktorenkonzepte und deren Auswirkung auf das Rückmeldeverhalten am Lenkrad.

		Rückmeldung am Lenkrad	
		Ja	Nein
Kopplung von Lenkrad und Fahrzeugreaktion	Ja	Lenkmomentüberlagerung Steer-by-Wire	Einseitiger Bremseneingriff Überlagerungslenkung Steer-by-Wire
	Nein	Steer-by-Wire	Steer-by-Wire

2.2.1.1 Lenkmomentüberlagerung

Mithilfe eines programmgesteuerten elektrohydraulischen oder elektromechanischen Motors kann die Lenkbewegung des Fahrers überlagert oder unterstützt werden. Ein typisches Beispiel dafür ist die EPS-Lenkung (EPS = Electric Power Steering). Die von einem Elektromotor erzeugte Kraft wird mittels eines Servogetriebes in die Zahnstange oder Lenksäule eingeleitet (Harrer & Pfeffer, 2013b). Im Falle eines Eingriffs in die Querführung kann mittels der EPS-Lenkung ein Lenkradmoment erzeugt werden, das im Wesentlichen durch Amplitude und Gradient definiert ist. Dieses Lenkradmoment kann vom Fahrer taktil und propriozeptiv wahrgenommen werden (vgl. Harrer & Pfeffer, 2013c) und liefert dem Fahrer eine schnelle und intuitive Rückmeldung über den Eingriff. Der Zusammenhang zwischen Lenkradbewegung und resultierender Fahrzeugbewegung wird durch die Lenkmomentüberlagerung nicht beeinflusst. Die Kopplung von Lenkrad- und Fahrzeugbewegungen bleibt daher während des gesamten Eingriffs bestehen. Dadurch kann der Fahrer Eingriffe jederzeit durch das Fixieren des Lenkrads oder durch Gegenlenkbewegungen übersteuern (siehe Abbildung 2-3).

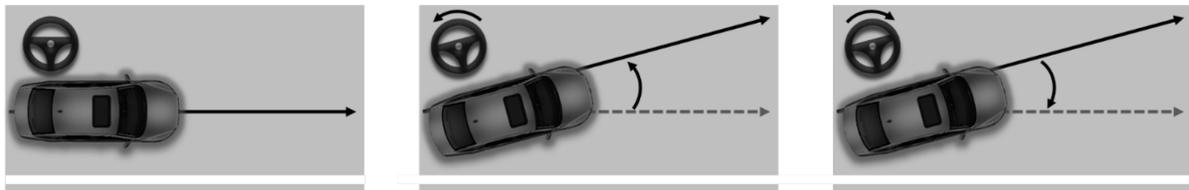


Abbildung 2-3: Zusammenhang zwischen Lenkrad- und Fahrzeugbewegung bei Eingriffen mittels einer Lenkmomentüberlagerung. Das erste Bild zeigt den Ausgangszustand vor Beginn des Eingriffs. Das zweite Bild zeigt den Einfluss auf Lenkrad- und Radlenkwinkel bzw. die Fahrzeugbewegung eines Eingriffs nach links. Das dritte Bild zeigt den Zusammenhang zwischen Lenkrad- und Radlenkwinkel bzw. der Fahrzeugbewegung in Folge einer Gegenlenkbewegung des Fahrers nach rechts.

Die EPS-Lenkung bietet den Vorteil, dass sie in Serienfahrzeugen weit verbreitet ist. So schätzen Harrer und Pfeffer (2013a), dass der Weltmarktanteil der EPS-Lenkung 2020 über 50% betragen wird. Andere Quellen berichten, dass der Marktanteil weltweit bereits 60% beträgt (vgl. Wuttke, 2015). Das Fahrerverhalten in Folge von Lenkmomentüberlagerungen wurde bereits intensiv untersucht (Neukum, 2010; Neukum, Paulig, Frömmig & Henze, 2010a; Schmidt, 2009; Schmidt, Kiss, Switkes & Gerdes, 2007; Switkes, 2006) und in einer Vielzahl einschlägiger Veröffentlichungen wurde die EPS-Lenkung eingesetzt, um automatische Eingriffe in die Querführung zur Kollisionsvermeidung zu untersuchen (Bräuchle, Flehming, Rosenstiel & Kropf, 2013; Fricke et al., 2015b; Gußner, Bürkle & Marberger, 2015; Hesse et al., 2013; Kleen & Schmidt, 2009; Schieben et al., 2014; Sieber et al., 2015a; Sieber et al., 2015b).

2.2.1.2 Überlagerungslenkung

Bei der Überlagerungslenkung kann die Lenkeingabe des Fahrers durch eine gezielte Lenkwinkelüberlagerung beeinflusst werden. Dazu wird der vorgegebene Lenkwinkel des Fahrers um einen Überlagerungswinkel ergänzt (siehe auch Harrer & Pfeffer, 2013e). Im Falle eines Eingriffs in die Querführung kann dadurch ein Radlenkwinkel erzeugt werden, ohne dass ein Lenkradwinkel erzeugt werden muss, allerdings muss der Fahrer die Lenkung zu Beginn des Eingriffs fixieren (vgl. Dang et al., 2012). Dies führt insbesondere zu Beginn des Eingriffs zu einer teilweisen Entkopplung von Lenkrad und Fahrzeugbewegung. Im weiteren Verlauf kann der Fahrer die Fahrzeugbewegung jedoch weiterhin durch eine Lenkbewegung beeinflussen. Dabei kann jedoch der Zusammenhang zwischen Lenkradwinkel und Radlenkwinkel variieren. Die Interaktion ist insbesondere bei unberechtigten Eingriffen kritisch zu sehen, da davon auszugehen ist, dass der Fahrer versuchen wird, das Lenkrad zu fixieren, bevor er mit einer Gegenlenkbewegung beginnt. Um den Eingriff zu unterbinden müsste er allerdings das Lenkrad loslassen. Zusätzlich kann in Folge des Eingriffs eine Schiefstellung des Lenkrads resultieren, die den Fahrer möglicherweise irritiert, da der Zusammenhang zwischen Lenkradbewegung und Fahrzeugbewegung während des Eingriffs verändert wird (vgl. Abbildung 2-4).

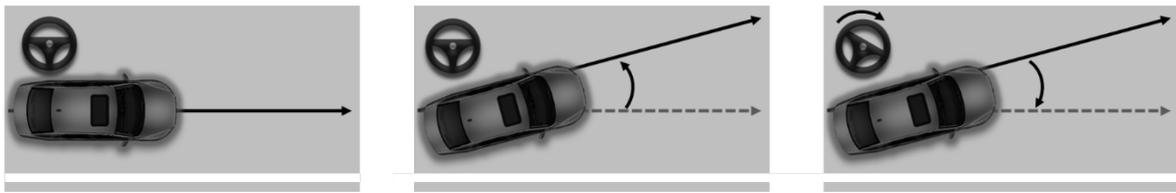


Abbildung 2-4: Zusammenhang zwischen Lenkrad- und Fahrzeugbewegung bei Eingriffen mittels einer Überlagerungslenkung. Das erste Bild zeigt den Ausgangszustand vor Beginn des Eingriffs. Das zweite Bild zeigt den Einfluss auf Lenkrad- und Radlenkwinkel bzw. die Fahrzeugbewegung eines Eingriffs nach links. Das dritte Bild zeigt den Zusammenhang zwischen Lenkrad- und Radlenkwinkel bzw. der Fahrzeugbewegung in Folge einer Gegenlenkbewegung des Fahrers nach rechts.

Insgesamt liefert die Überlagerungslenkung im Falle eines Eingriffs, anders als die Lenkmomentüberlagerung, mutmaßlich keine vergleichbar konsistente und für den Fahrer nachvollziehbare Rückmeldung am Lenkrad.

2.2.1.3 Steer by wire

Im Gegensatz zur Lenkmomentüberlagerung oder der Überlagerungslenkung benötigt Steer-by-wire nicht zwingend eine mechanische Verbindung zwischen Lenkrad und den gelenkten Rädern. Der Lenkbefehl wird von Sensoren am Lenkrad erfasst und elektronisch weitergeleitet. Steer-by-Wire-Konzepte ermöglichen durch die vollständige mechanische Entkopplung tiefgreifende Veränderungen der Lenkcharakteristik und bieten aktuell den größten Freiraum bei der Gestaltung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion (vgl. Abbildung 2-5).

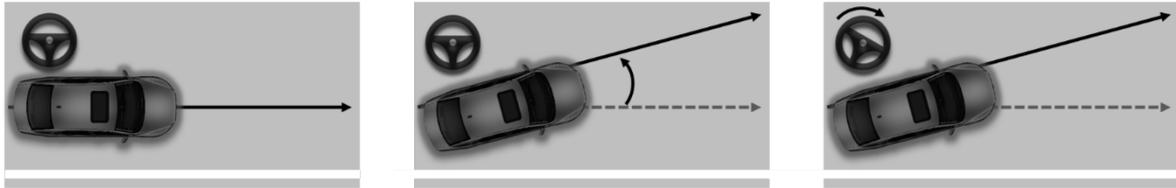


Abbildung 2-5: Möglicher Zusammenhang zwischen Lenkrad- und Fahrzeugbewegung bei Eingriffen mittels Steer-by-Wire. Dargestellt ist eine Variante mit vollständiger Entkopplung. Das erste Bild zeigt den Ausgangszustand vor Beginn des Eingriffs. Das zweite Bild zeigt den Einfluss auf Lenkrad- und Radlenkwinkel bzw. die Fahrzeugbewegung eines Eingriffs nach links. Das dritte Bild zeigt den Zusammenhang zwischen Lenkrad- und Radlenkwinkel bzw. der Fahrzeugbewegung in Folge einer Gegenlenkbewegung des Fahrers nach rechts.

So könnten mithilfe von Steer-by-Wire die Charakteristiken der Lenkmomentüberlagerung, Überlagerungslenkung oder des einseitigen Bremsens nachgebildet werden (vgl. Reimann, Brenner & Büring, 2012). Zusätzlich könnten spezifische Charakteristiken der zuvor genannten Aktoren kombiniert werden. Allerdings sind auch Konzepte denkbar, die dem Fahrer im Falle eines Eingriffs für eine bestimmte Zeit die Möglichkeit nehmen, die Querführung des Fahrzeugs zu beeinflussen (vgl. Ackermann & Bünte, 1997; Hesse et al., 2013; Itoh & Inagaki, 2014; Katzourakis et al., 2014; Schieben et al., 2014).

Im Gegensatz zu den anderen Aktoren wird Steer-by-wire allerdings bisher nur in Einzelfällen in Serienfahrzeugen, wie im Infiniti Q50 (Reichenbach, 2013) oder im Rahmen experimenteller Studien zu Notausweichassistenten (siehe Hesse et al., 2013; Itoh & Inagaki, 2014; Schieben et al., 2014) eingesetzt.

2.2.1.4 Einseitiges Bremsen

Neben der Änderung des Radlenkwinkels kann mithilfe definierter Bremsungen der linken oder rechten Räder des Fahrzeugs ebenfalls in die Querführung des Fahrzeugs eingegriffen werden. Dazu kann auf die Elektronische Stabilitätskontrolle (ESC) zurückgegriffen werden (vgl. Dang et al., 2012), welche gezielte Bremsungen einzelner Räder ermöglicht. Alternativ wird auch häufig die Bezeichnung Fahrdynamikregelung verwendet. Die genaue Bezeichnung kann allerdings je nach Fahrzeughersteller variieren. So bezeichnen sowohl BMW als auch Jaguar und Mazda die Fahrdynamikregelung als „Dynamic Stability Control“ (DSC), während die Daimler AG das System Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP) nennt und Toyota „Vehicle Stability Control“ (VSC). ESC ist in den USA seit 2011 (Blower, 2014) und in Europa seit Ende 2014 verpflichtend für alle Neufahrzeuge (vgl. Wikipedia, 2016). Bereits 2015 waren ca. 70% aller Fahrzeuge in Deutschland mit einer Fahrdynamikregelung ausgestattet (siehe DAT Group, 2016, S.10).

Durch einseitige Bremsenriffe kann die Querführung des Fahrzeugs ohne eine Beeinflussung des Lenkwinkels und im Gegensatz zur Lenkmoment- oder Überlagerungslenkung ohne eine unterstützende Reaktion des Fahrers gesteuert werden. Zusätzlich besteht für den Fahrer jederzeit die Möglichkeit dem Eingriff entgegen zu steuern (vgl. Abbildung 2-6).

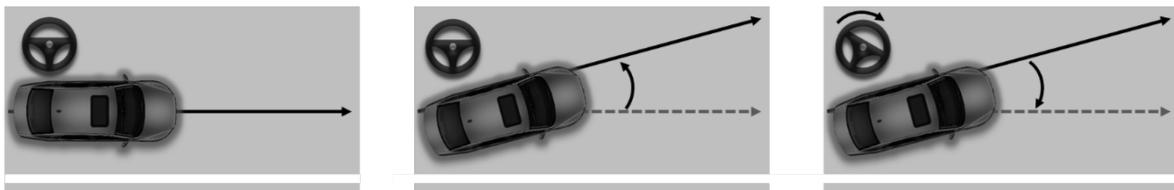


Abbildung 2-6: Zusammenhang zwischen Lenkrad- und Fahrzeugbewegung bei Eingriffen mittels einseitiger Bremsung. Das erste Bild zeigt den Ausgangszustand vor Beginn des Eingriffs. Das zweite Bild zeigt den Einfluss auf Lenkrad- und Radlenkwinkel bzw. die Fahrzeugbewegung eines Eingriffs nach links. Das dritte Bild zeigt den Zusammenhang zwischen Lenkrad- und Radlenkwinkel bzw. der Fahrzeugbewegung in Folge einer Gegenlenkbewegung des Fahrers nach rechts.

Der Fahrer erhält die Rückmeldung über den Eingriff im Wesentlichen visuell über die Änderung des Gierwinkels und kinäesthetisch über die resultierende Querbeschleunigung. Allerdings kann im Verlauf des Eingriffs der gewohnte Zusammenhang zwischen Lenkradwinkel und resultierender Fahrzeugbewegung ähnlich variieren wie bei der Überlagerungslenkung (vgl. Abschnitt 2.2.1.2).

Nachteile ergeben sich insbesondere aus der Reduktion der Geschwindigkeit in Folge des Eingriffs und der Einschränkung, dass sich einseitiges Bremsen nur für kurze Eingriffe eignet (vgl. Dang et al., 2012). Zusätzlich besteht die Möglichkeit, dass sich die Lenkeingabe des Fahrers und des Eingriffs überlagert, was – je nach Reaktion der Fahrer - zu einer unerwünschten Verstärkung oder Abschwächung des Eingriffs führen könnte. Zusätzlich wurde einseitiges Bremsen bisher nur in wenigen Studien (z. B. Sieber et al., 2015a; Sieber et al., 2015b) als automatischer Eingriff in die Querführung zur Kollisionsvermeidung eingesetzt.

2.2.2 Einflussfaktoren auf die Wahrnehmung von Lenkeingriffen

Eingriffe in die Querführung werden in der Literatur insbesondere im Zusammenhang mit haptischen Warnungen oder Lenkempfehlungen (z. B. im Fall eines bevorstehenden Spurverlassens) diskutiert. Gegenstand einschlägiger Studien sind häufig Fragen zur Wahrnehmbarkeit von Lenkeingriffen (z. B. bei Verwendung einer Lenkmomentüberlagerung), um Anhaltspunkte für die optimale Gestaltung von haptischen Warnungen oder Lenkempfehlungen zu erhalten.

Die Studien von Schumann (1994), Buschardt (2003) und Newberry, Griffin und Dowson (2007) greifen dazu auf Methoden der Psychophysik zurück, um Wahrnehmungs- und Unterschiedsschwellen von Lenkmomenten und Lenkmomentänderungen zu identifizieren. Des Weiteren wurde untersucht, wie sich verschiedene Einflussfaktoren wie beispielsweise das Ausgangslenkmoment, die Lenkbewegung und die Signalform des Lenkmoments, auf die Wahrnehmung auswirken. Ergänzt werden die Ergebnisse durch die Studien von Neukum et al. (2010a), die sowohl im Fahrsimulator als auch im Realfahrzeug die Wahrnehmbarkeit von Lenkmomentänderungen untersuchten.

Sowohl in den Studien von Schumann (1994) als auch von Buschardt (2003) wurde davon ausgegangen, dass bei geringem Ausgangslenkmoment kleine Lenkmomentänderungen deutlich wahrgenommen werden, während die gleichen Änderungen bei höherem Ausgangslenkmoment nicht mehr deutlich zu spüren sind (vgl. Neukum et al., 2010a).

Schumann (1994) ermittelte mithilfe der sogenannten adaptiven Methode die Wahrnehmbarkeit von Lenkmomentänderungen bei drei unterschiedlichen Ausgangslenkmomenten (0.76 Nm, 1.52 Nm und 2.28 Nm). Die Aufgabe der Probanden bestand darin, einen Zeiger auf dem Bildschirm mithilfe eines Lenkrads auf einem Target zu platzieren. Die Lenkmomentänderungen wurden während der Aufgabe für jeweils 500 ms dargeboten und waren in 0.1 Nm Schritten abgestuft. Im Mittel lagen die Wahrnehmungsschwellen zwischen 0.44 Nm und 0.58 Nm (50 %) sowie zwischen 0.57 Nm und 0.74 Nm (75 %; vgl. Schumann, 1994)². Die vermutete Gesetzmäßigkeit ließ sich jedoch nicht nachweisen, da die Wahrnehmungsschwellen bei höherem Ausgangslenkmoment nur geringfügig ansteigen. Schumann (1994) schließt daraus, dass das Ausgangslenkmoment in dem untersuchten Wertebereich zu vernachlässigen ist. Für die Gestaltung von gut wahrnehmbaren und nicht zu starken haptischen Signalen empfiehlt er Lenkmomentänderungen im Bereich von 1 Nm. Buschardt (2003) kommt auf Basis von eigenen Untersuchungen zu vergleichbaren Ergebnissen. Die von ihm ermittelten 50 % Wahrnehmungsschwellen liegen ebenfalls zwischen 0.4 Nm und 0.5 Nm. Um sicherzustellen, dass der Fahrer eine Änderung des Lenkmoments bemerkt, sind ihm zufolge Änderungen von mehr als 0.8 Nm erforderlich (vgl. Buschardt, 2003). Zusätzlich berichtet Buschardt (2003), dass „[...] Lenkmomentänderungen umso früher wahrgenommen werden, je schneller dieser Anstieg erfolgt“ (vgl. Buschardt, 2003, S. 157). Dazu variierte er bei unbewegtem Lenkrad die Übergangszeit zwischen 0.1 und 1 s. Beträgt die Übergangszeit nur 0.1 s, fallen die Wahrnehmungsschwellen geringer aus als bei einer Übergangszeit von 1 s. Dies deutet auf einen Einfluss der Anstiegsteilheit bzw. des Gradienten auf die Wahrnehmbarkeit einer Lenkmomentänderung hin.

² Schumann (1994) berichtet die Schwellenwerte in Newton (N). Die Umrechnung in Newtonmeter (Nm) erfolgte durch den Autor und ergibt sich aus dem Produkt des Radius des Lenkrads (0.19 m) und der berichteten Kraft in Newton.

Da die Studien von Schumann und Buschardt überwiegend in statischen Prüfständen mit stark vereinfachtem Aufbau durchgeführt wurden, stellt sich jedoch die Frage nach der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf reale Fahrsituationen im Fahrzeug (vgl. Neukum et al., 2010a). In der Arbeit von Neukum et al. (2010a) wurden daher sowohl in einem dynamischen Fahrsimulator als auch in einem Realfahrzeug die Wahrnehmbarkeit von Lenkmomenten und mögliche Einflussfaktoren untersucht. Gegenstand der Untersuchung waren Lenkmomentänderungen zwischen 0.5 und 4 Nm, die in 0.25 Nm-(Simulator) oder 1 Nm-(Realfahrzeug) Schritten abgestuft wurden. Zusätzlich wurde die Aufschaltdauer (200 ms vs. 500 ms), die Signalform (Sinus vs. Rechteck) die Fahraufgabe (Halteaufgabe vs. Geradeausfahrt) und das Ausgangslenkmoment (0 Nm, 1.5 Nm und 3 Nm) variiert. Die Halteaufgabe bestand darin, das Lenkrad möglichst in der Nullstellung zu halten. Dabei gab es keine visuelle Rückmeldung bezüglich einer möglichen Fahrzeugbewegung. Bei der Geradeausfahrt fuhren die Fahrer mit konstanter Geschwindigkeit auf einer Landstraße mit einer Fahrstreifenbreite von 2.5 m.

Die Ergebnisse der Simulatorstudie von Neukum et al. (2010a) zeigen, dass die Lenkmomentänderungen eher bemerkt werden, wenn bereits vor Beginn der Lenkmomentänderung ein von Null abweichendes Ausgangslenkmoment vorliegt. Des Weiteren bemerken Fahrer die Lenkmomentänderung früher, wenn die Aufschaltung länger andauert, wobei bei einer Geradeausfahrt höhere Lenkmomente erforderlich sind, um sicher bemerkt zu werden, als bei der Halteaufgabe. Während bei der Halteaufgabe eine Lenkmomentänderung von 0.75 Nm bereits von der Mehrheit der Fahrer erkannt wird, zeigt sich dies bei der Geradeausfahrt erst bei Lenkmomentänderungen von mehr als 1 Nm. Die Signalform beeinflusst die Bemerkbarkeit einer Lenkmomentänderung ebenfalls. Erfolgt die Aufschaltung in Form eines Rechtecks (sprunghafter Aufbau und Abfall) wird die Lenkmomentänderung eher bemerkt, als wenn sie in Form eines Sinus erfolgt (langsamerer Auf- und Abbau).

Neukum et al. (2010a) folgern daraus, dass

- die Amplitude der Lenkmomente 1.5 – 2 Nm betragen sollte, um eine sichere Bemerkbarkeit zu gewährleisten,
- höhere Amplituden erforderlich sein könnten, wenn die Aufschaltung sehr kurz und die Anstiegssteilheit gering ist.

Neben den Arbeiten von Buschardt (2003), Neukum et al. (2010a) und Schumann (1994) gibt es kaum Studien, die sich systematisch mit Einflussfaktoren auf die Wahrnehmung von Eingriffen in die Querführung befassen. Allerdings ist davon auszugehen, dass neben der haptischen Rückmeldung des Lenkmoments auch die visuelle und kinästhetische Rückmeldung an der Wahrnehmung von Eingriffen in die Querführung beteiligt sind. Hinweise darauf liefern unter anderem die Simulatorstudien von Wierwille, Casali und Repa (1983). Sie zeigen, dass die Reaktion auf plötzlich auftretende Seitenwinde ca. 0.12 s schneller stattfindet, wenn die visuelle Fahrzeugreaktion von einer physischen Bewegung begleitet wird. Bei rein visueller Darstellung der Fahrzeugreaktion betrug die Reaktionszeit der Fahrer im Mittel 0.56 s, bei Kombination mit einer physischen Bewegung des Fahrzeugs 0.44 s. Die Studien von Neukum und Krüger (2003), Neukum, Ufer, Paulig und Krüger (2008) sowie von Schmidt et al. (2007) zur Untersuchung von Lenkstörungen deuten allerdings darauf hin, dass die Reaktion des Fahrers deutlich schneller stattfindet. Bereits nach 150-250 ms lassen sich anhand des Lenkradwinkels Reaktionen beobachten (siehe hierzu auch Neukum et al., 2010a; S 13.).

Im Folgenden wird daher genauer auf das Verhalten von Fahrern bei fehlerhaften Eingriffen in die Querführung während einer Fahraufgabe eingegangen.

2.2.3 Nicht situationsgerechte Eingriffe in die Querführung

Neben Untersuchungen zu Einflussfaktoren auf die Wahrnehmung von Lenkeingriffen konzentriert sich ein Großteil der Studien auf das Verhalten von Fahrern im Falle von nicht situationsgerechten oder fehlerhaften Eingriffen in die Querführung (vgl. Kleen & Schmidt, 2009; Neukum, 2010; Neukum & Krüger, 2003; Neukum et al., 2009; Neukum et al., 2010a; Neukum et al., 2008; Schmidt, 2008; 2009; Schmidt et al., 2007; Schmidt, Kiss, Switkes & Gerdes, 2006; Switkes, Gerdes, Schmidt & Kiss, 2007).

Ein fehlerhafter Eingriff oder eine nicht situationsgerechte Auslösung liegt vor, wenn der Eingriff in einer bestimmten Situation nach objektiven Kriterien nicht angemessen ist (vgl. Weitzel, 2013). Dazu gehören beispielsweise falsche Alarmer (Eingriffe ohne das Vorhandensein eines entsprechenden Auslösers) oder Eingriffe in Situationen mit einem Auslöser, in denen der Eingriff zu einer Gefährdung anderer Verkehrsteilnehmer führen kann. Maßgeblich ist, dass in Folge des Eingriffs eine Gefährdung entsteht, die zu einer kritischen Situation führt. Im Falle eines Notausweichassistenten könnte das bedeuten, dass ein Eingriff erfolgt, obwohl kein Hindernis vorhanden ist und durch den Eingriff umliegende Verkehrsteilnehmer, beispielsweise auf dem Nachbarfahrstreifen, oder die Fahrer selbst gefährdet werden (vgl. Abbildung 2-7). In diesem Fall ist es wünschenswert, dass die Fahrer angemessene Übersteuerungsreaktionen zeigen und den Eingriff nicht zulassen. Zeigen die Fahrer in diesem Fall keine angemessenen Übersteuerungsreaktionen, könnte dies zu einer kritischen Situation führen.

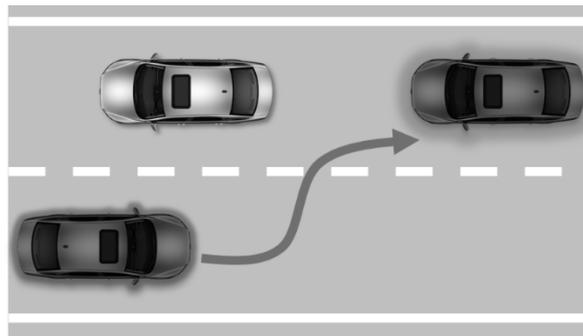


Abbildung 2-7: *Beispiel für einen nicht situationsgerechten Eingriff. Es erfolgt ein Eingriff obwohl kein Auslöser vorhanden ist. Durch den Eingriff wird das entgegenkommende Fahrzeug auf der Nachbarspur und der Fahrer selbst gefährdet.*

Ziel der oben genannten Studien war nicht primär die Gestaltung von haptischen Warnungen, sondern die Ermittlung maximal tolerierbarer Fehlergrößen um sicherzustellen, dass der Fahrer auch im Falle einer Fehlfunktion der Lenkaktorik (siehe hierzu auch Kapitel 2.2.1) dazu in der Lage ist, das Fahrzeug weiterhin sicher zu beherrschen. Im Rahmen dieser Studien wurde beobachtet, dass Fahrer im Falle unerwarteter Lenkeingriffe, z. B. in Folge eines rechteckförmigen Zusatzlenkmoments bei Geradeausfahrt, ein typisches Reaktionsmuster zeigen. Dieses Reaktionsmuster lässt sich anhand der Zeitverläufe des Handmoments, des Lenkradwinkels und der Lenkradwinkelgeschwindigkeit beschreiben (siehe z. B. Neukum, 2010; Neukum et al., 2010a; Schmidt et al., 2006). Bereits nach 80-120 ms wird eine Abweichung im Vergleich zu den Zeitverläufen bei freiem Lenkrad beobachtet, woraus sich Rückschlüsse auf die Fahrerreaktion und die Reaktionszeit ziehen lassen (vgl. Neukum, 2010). In der folgenden Abbildung aus Neukum (2010) ist dies exemplarisch dargestellt (siehe Abbildung 2-8). Bei der Betrachtung der Lenkradwinkelgeschwindigkeit und des Lenkradwinkels wird deutlich, dass der Aufbau des Lenkradwinkels bereits kurz nach Fehlerbeginn gedämpft wird.

Nach ca. 200 ms ist anhand der Lenkradwinkelgeschwindigkeit zu erkennen, dass der Fahrer mit der Kompensation des Fehlers beginnt, indem er den fehlerbedingten Lenkradwinkel zurücknimmt und eine Gegenlenkbewegung einleitet. Als Maß für die Reaktionszeit des Fahrers auf die nicht situationsgerechten Eingriffe wird daher häufig der Zeitpunkt des nach der Aufschaltung auftretenden ersten Lenkradwinkelextremwerts verwendet (vgl. Neukum et al., 2010a; Schmidt et al., 2007). Der eigentliche Beginn der Fahrerreaktion erfolgt jedoch früher und ist durch das Abbremsen des Lenkrads gekennzeichnet (vgl. Schmidt et al., 2007). Alternativ könnte daher auch der Zeitpunkt des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit herangezogen werden. Allerdings berichten Schmidt et al. (2007), dass sich dieser Punkt nicht einwandfrei identifizieren lässt (vgl. Schmidt et al., 2007, S.10). Eine Begründung für diese Annahme liegt allerdings nicht vor.

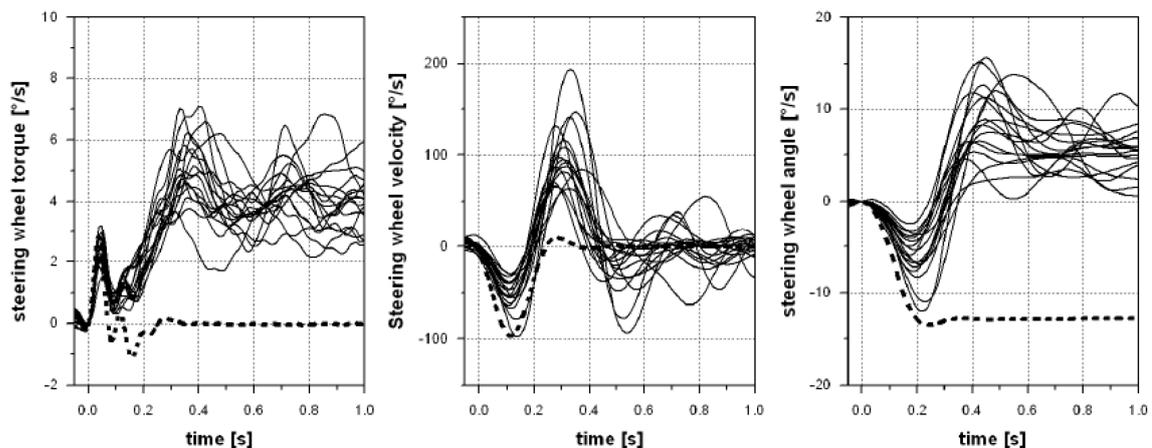


Abbildung 2-8. Zeitverläufe des Handmoments (links), der Lenkgeschwindigkeit (mitte) und des Lenkradwinkels (rechts) bei rechteckförmigen Aufschaltungen eines Lenkmoments von 4 Nm (aus: Neukum, 2010). Die gestrichelte Linie kennzeichnet Verlaufsdaten bei freiem Lenkrad.

Die von Schmidt et al. (2007) und Neukum et al. (2010a) beschriebene Methodik zur Ermittlung der Reaktionszeit ergänzt die Befunde zur Wahrnehmung von Lenkmomenten und liefert wichtige Hinweise auf die Reaktionssystematik der Fahrer. Mithilfe dieser Methodik konnte gezeigt werden, dass Fahrer schnelle Lenkmomentänderungen nicht nur schneller bemerken (vgl. Kapitel 2.2.1), sondern auch schneller darauf reagieren. Berichtet werden mittlere Reaktionszeitunterschiede im Bereich von 150-200 ms (Neukum et al., 2010a; Schmidt, 2009). Im Falle von rechteckförmigen Lenkmomenten mit schnellem Lenkmomentanstieg wird eine mittlere Reaktionszeit von ca. 200-240 ms beobachtet, während sie bei langsamen Lenkmomentanstiegen bei ca. 300-340 ms liegt (vgl. Neukum et al., 2010a, S. 45). Ein Einfluss der Amplitude des Lenkmoments konnte dabei nicht nachgewiesen werden (vgl. Neukum et al., 2010a, S. 52).

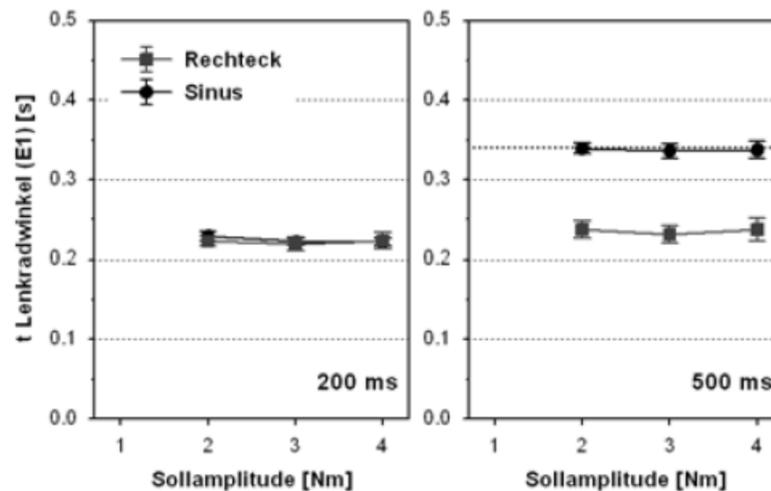


Abbildung 2-9. Zeitpunkt des ersten Lenkradwinkelmultiplicums nach Aufschaltung eines Zusatzlenkmultiplicums aus Neukum et al. (2010a). Bei einer Rechteck-Aufschaltung des Lenkmultiplicums (Rechteck) wurde das Lenkmultiplicum sprunghaft dargeboten. Bei einer Sinus-Aufschaltung (Sinus) wurde das Lenkmultiplicum in Form einer Sinushalbwellen dargeboten, woraus ein langsamerer Anstieg des Lenkmultiplicums resultierte. Die Grafik verdeutlicht, dass bei einer Sinus-Aufschaltung das Lenkradwinkelmultiplicum im Mittel später erreicht wird als bei einer Rechteck-Aufschaltung.

Neukum et al. (2010a) schlussfolgern daraus, dass die Reaktionsqualität des Fahrers von der Fehlerdauer abhängen könnte. Wird das Zusatzlenkmultiplicum bereits nach 300 ms (während der Kompensationsreaktion des Fahrers) zurückgenommen, sollten sich die Abnahme des Lenkmultiplicums und die Kompensationsreaktion des Fahrers überlagern (vgl. Neukum et al., 2010a, S. 106). In Folge dessen sollten stärkere Fahrer- und Fahrzeugreaktionen zu beobachten sein als bei kürzeren oder längeren Fehlerdauern vergleichbarer Stärke. Ein experimenteller Nachweis dieser Hypothese erfolgte im Rahmen der Studie nicht.

Aufgrund der schnellen und stereotypen motorischen Reaktion des Fahrers auf fehlerhafte Zusatzlenkmultiplicume (vgl. Neukum et al., 2010a; Schmidt, 2009) wird diese häufig als Reflex oder reflexartig bezeichnet (vgl. Neukum et al., 2010a, S.12). Allerdings konnten Neukum et al. (2010a) zeigen, dass die Reaktion des Fahrers von der gestellten Aufgabe beeinflusst wird. In der sogenannten Halteaufgabe, in der das Lenkrad auf Nullstellung gehalten werden sollte, wurden geringere Bewegungsgeschwindigkeiten beobachtet als bei einer Geradeausfahrt, bei der die fehlerbedingten Auswirkungen auf die Spurführung kompensiert werden müssen. Daraus schließen Neukum et al. (2010a), dass es sich bei der Reaktion des Fahrers um eine „[...] geregelte Bewegung handelt, die bereits auf die Kompensation der Störgröße bezogen ist. Diese zwischen den beiden Aufgaben bestehenden Unterschiede wären bei einer reflexhaften Reaktion nicht zu erwarten.“ (vgl. Neukum et al., 2010a, S.46).

Sowohl Neukum et al. (2010a) als auch Schmidt (2009) gehen davon aus, dass die beschriebenen Reaktionsmuster haptisch getriggert werden, d.h. in Folge der wahrnehmbaren Kraft- und Bewegungsänderungen am Lenkrad. Demnach sollten die Reaktionsmuster oder Reaktionszeiten bei nicht situationsgerechten Lenkeingriffen, die keine unmittelbare Kraft- oder Bewegungsänderung am Lenkrad verursachen, abweichen. Für nicht situationsgerechte Lenkeingriffe mittels einseitiger Bremsungen (siehe Neukum, Ufer & Schwab, 2010b) oder eines Steer-by-Wire-Systems liegen bisher jedoch keine Analysen bezüglich des zeitlichen Reaktionsmusters vor. Allerdings berichten Neukum und Krüger (2003) vergleichbare Reaktionsmuster und -zeiten (siehe auch Neukum et al., 2008; Wesp,

Schmidt, Fecher & Winner, 2008) bei fehlerhaften Lenkeingriffen einer Überlagerungslenkung (vgl. Kapitel 2.2.1.2). Dies ist mutmaßlich darauf zurückzuführen, dass zu Beginn des fehlerhaften Lenkeingriffs mittels einer Überlagerungslenkung ebenfalls ein schneller Lenkmomentanstieg zu beobachten ist (vgl. Neukum & Krüger, 2003, Neukum et al., 2008; Wesp et al., 2008).

Im Zusammenhang mit automatischen Ausweicheingriffen wurden neben der Wirksamkeit auch nicht situationsgerechte Eingriffe in die Querführung untersucht (z. B. Bräuchle et al., 2013; Fricke et al., 2015b; Hesse et al., 2013; Schieben et al., 2014; Sieber et al., 2015b). Neben nicht situationsgerechten Lenkeingriffen mittels Lenkmomentüberlagerung (vgl. Fricke et al., 2015a; Hesse et al., 2013; Schieben et al., 2014; Sieber et al., 2015a; Sieber et al., 2015b) wurden dabei auch Steer-by-Wire-Systeme (vgl. Hesse et al., 2013; Schieben et al., 2014) und differentielles Bremsen (vgl. Sieber et al., 2015a; Sieber et al., 2015b) untersucht. Fast alle Studien legen nahe, dass der Fahrer im Falle nicht situationsgerechter Eingriffe den Querversatz reduziert (vgl. Bräuchle et al., 2013; Fricke et al., 2015a; Hesse et al., 2013; Schieben et al., 2014; Sieber et al., 2015a; Sieber et al., 2015b). Allerdings wird im Gegensatz zu den Studien von Neukum et al. oder Schmidt et al. nicht genauer auf das Lenkverhalten der Fahrer eingegangen. Die Studien berichten überwiegend Maße zur Bewertung der Kontrollierbarkeit nicht situationsgerechter Lenkeingriffe, wie z. B. den maximalen Querversatz oder ein Verlassen der eigenen Fahrspur. Lediglich in den Studien von Bräuchle et al. (2013) und Fricke et al. (2015a) finden sich Anhaltspunkte über den Zeitbereich der Fahrerreaktion auf nicht situationsgerechte Eingriffe. So berichten Bräuchle et al. (2013), dass ein von ihnen entwickelter Klassifikationsalgorithmus erst ab einer Zeitspanne von 0.5 s nach Beginn des Eingriffs dazu in der Lage ist, aufgrund des Fahrerlenkverhaltens zu erkennen, dass es sich um einen fehlerhaften Eingriff handelt. Für die eigentliche Klassifikation wird eine Zeitspanne von 0.7 s benötigt (vgl. Bräuchle et al., 2013, S. 11). Dies könnte darauf hindeuten, dass bei situationsgerechten und nicht situationsgerechten Eingriffen mittels Lenkmomentüberlagerung zunächst ähnliche Verhaltensmuster beobachtet werden, die erst im späteren Verlauf beginnen, sich zu unterscheiden. Fricke et al. (2015a) berichten auf Basis einer Simulatorstudie, dass Fahrer nach Beginn eines nicht situationsgerechten Eingriffs im Mittel ca. 750 ms benötigen, um das Fahrzeug wieder unter Kontrolle zu bringen (vgl. Fricke et al., 2015a, S. 195).

In den Studien von Hesse et al. (2013) wurde zudem untersucht, wie sich zusätzliche haptische oder akustische Warnungen auf die Kontrollierbarkeit nicht situationsgerechter automatischer Lenkeingriffe mittels Lenkmomentüberlagerung auswirken (siehe auch Schieben et al., 2014). Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass vorgelagerte haptische Lenkempfehlungen zu einem geringeren Querversatz im Falle eines fehlerhaften Eingriffs führen. Eine akustische Warnung hatte hingegen keinen positiven Einfluss auf den resultierenden Querversatz (vgl. Hesse et al., 2013, S. 3). In Folgestudien mit zeitweise entkoppelter Lenkung waren die Fahrer nicht in der Lage, den Querversatz in Folge eines nicht situationsgerechten Eingriffs ausreichend zu reduzieren (vgl. Hesse et al., 2013). Auch hier wurde überprüft, ob sich vorgelagerte haptische Warnungen am Lenkrad auf die Kontrollierbarkeit auswirken. Zwar berichten Hesse et al. (2013) signifikante Unterschiede im resultierenden Querversatz, allerdings sind die Unterschiede gering und auch mit zusätzlichen Warnungen war kein Fahrer dazu in der Lage, den Querversatz ausreichend zu reduzieren (vgl. Hesse et al., 2013). Sieber et al. (2015b) untersuchten ebenfalls die Auswirkungen unterschiedlicher Eingriffsvarianten auf die Kontrollierbarkeit fehlerhafter Eingriffe im Realfahrzeug, darunter auch eine Variante, welche differentielles Bremsen mit einer adaptiven Lenkmomentüberlagerung kombiniert. Allerdings konnten sie keine statistisch bedeutsamen Unterschiede zwischen den verschiedenen

Eingriffsvarianten bezüglich des resultierenden Querversatzes oder anderer Maße identifizieren (vgl. Sieber et al., 2015b).

Insgesamt deuten die Ergebnisse darauf hin, dass Fahrer dazu in der Lage sind, den Querversatz in Folge nicht situationsgerechter Eingriffe zu reduzieren. Allerdings ist der resultierende Querversatz häufig noch so groß, dass ein Verlassen der eigenen Fahrspur nicht ausgeschlossen werden kann. Grundsätzlich scheint die Möglichkeit zu bestehen, die Kontrollierbarkeit fehlerhafter Eingriffe durch Vorwarnungen z. B. in Form haptischer Lenkempfehlungen zu erhöhen (vgl. Hesse et al., 2013). Allerdings gilt dies nicht zwingend für alle möglichen Akteure, auch wenn leichte Unterschiede bezüglich des resultierenden Querversatzes beobachtet wurden (vgl. Hesse et al., 2013). Eine genauere Betrachtung des zeitlichen Verlaufs des Lenkverhaltens, wie z. B. von Neukum et al. beschrieben, erfolgte in diesem Zusammenhang allerdings nicht. Eine detaillierte Betrachtung könnte jedoch helfen, die unterschiedlichen Auswirkungen verschiedener Eingriffsvarianten besser zu verstehen.

2.2.4 Situationsgerechte Eingriffe in die Querführung

Situationsgerechte Eingriffe sollen den Fahrer bei der Fahraufgabe unterstützen. Die Auslösung des Systemeingriffs erfolgt, wenn eine konkrete Gefahr oder Gefährdung vorliegt (z. B. drohendes Spurverlassen oder unmittelbar bevorstehende Kollision mit einem Hindernis).

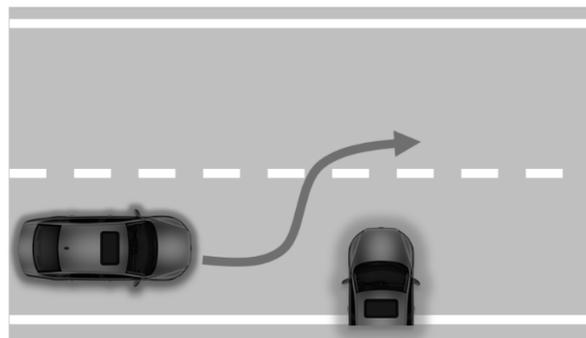


Abbildung 2-10: *Beispiel für einen situationsgerechten Eingriff eines Notausweichassistenten. Das querende Fahrzeug ist der Auslöser für den Eingriff. Durch den Eingriff soll die Kollision mit dem Fahrzeug vermieden werden.*

Im Gegensatz zu nicht situationsgerechten Lenkeingriffen kommt hinzu, dass der Eingriff anhand objektiver Kriterien zwar situationsgerecht erscheinen kann, aber nicht mit der Handlungsabsicht des Fahrers übereinstimmt, was ebenfalls – zumindest aus Sicht des Fahrers - zu einer nicht situationsgerechten Auslösung führen kann (vgl. Weitzel, 2013). Daher ist es sinnvoll, zwischen drei unterschiedlichen Arten von Eingriffen zu unterscheiden, die grundsätzlich unabhängig vom eingesetzten Akteur sind (siehe Kapitel 2.2.1):

- Gerichtete Lenkempfehlungen
- Eingriffe zur Unterstützung der Querregelung (fahrerinitiiert)
- Automatische Eingriffe (auch Eingriffe zur Spurhaltung)

Die Eingriffsarten unterscheiden sich darin, wie stark der Fahrer bei der Kollisionsvermeidung unterstützt wird. Daraus ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an den Fahrer und das

eingreifende Assistenzsystem, um eine Kollision erfolgreich und sicher vermeiden zu können. In den folgenden Abschnitten werden die drei Eingriffsarten beschrieben.

2.2.4.1 Gerichtete Lenkempfehlungen

Gerichtete Lenkempfehlungen sollen den Fahrer insbesondere bei der Reaktionswahl durch eine Vorgabe der erforderlichen Lenkrichtung unterstützen, um eine Kollision mit einem Hindernis zu vermeiden. Neben visuellen und akustischen Warnungen können auch gerichtete Lenkmomente (Kleen & Schmidt, 2009; Sieber et al., 2015a), Lenkradvibrationen (Beruscha, 2012; Beruscha et al., 2010) oder kurze einseitige Bremsengriffe (Sieber et al., 2015a) eingesetzt werden (siehe hierzu auch Kapitel 2.2.1.4). Während visuelle und akustische Warnungen andere Modalitäten ansprechen und sich nicht unmittelbar auf die Querführung auswirken, sollen gerichtete Lenkmomente bereits haptisch Informationen über die erforderliche Lenkreaktion am Lenkrad vermitteln. In manchen Studien wird in diesem Kontext der Begriff „*Motor Priming*“ (Navarro, Mars & Hoc, 2007; Schmidt, 2009) oder Handlungsempfehlung (Hoc et al., 2006) verwendet. Dabei wird angenommen, dass das haptische Signal am Lenkrad dem Fahrer bereits Informationen über die erforderliche Lenkreaktion vermitteln kann (z. B. aufgrund der Ähnlichkeit zu einer vom Fahrer initiierten Lenkbewegung) und dadurch die entsprechende Reaktion des Fahrers beschleunigt oder begünstigt. In der Grundlagenforschung wird bei „*Motor Priming*“ (hier auch *response priming* genannt) eine Kongruenz zwischen Prime und Zielreiz hinsichtlich der erforderlichen motorischen Reaktion vorausgesetzt (Kiesel, Kunde & Hoffmann, 2007). Das bedeutet, dass vorab präsentierte Stimuli die gleiche motorische Reaktion erfordern sollten, um die erforderliche motorische Reaktion bereits vorab aktivieren zu können und damit die eigentliche Reaktion zu beschleunigen. Diese Effekte treten in der Regel nur dann auf, wenn der vorab präsentierte Stimulus zuvor bekannt ist, die entsprechenden Reiz-Reaktionsmuster erlernt wurden und im Handlungskontext erwartet werden (Kiesel et al., 2007). Eine bewusste Verarbeitung der Stimuli ist hingegen nicht erforderlich. Allerdings ist es fraglich ob plötzliche, nicht vom Fahrer initiierte Bewegungen des Lenkrads immer die gleichen motorischen Reaktionen erfordern, da je nach Situation unterschiedliche Lenkreaktionen auf diese Lenkradbewegung notwendig sein könnten (vgl. Kapitel 2.2.1). Des Weiteren könnte es sein, dass der Stimulus in bestimmten Situationen (ohne vorherige Lernerfahrung) nicht erwartet wird und sich daher auch nicht wie gewünscht auf die Reaktion auswirken kann. Insgesamt ist der Begriff „*Motor Priming*“ in diesem Kontext daher unpassend, da unklar ist, ob die relevanten Wirkmechanismen vergleichbar sind. Demzufolge ist der Begriff Handlungsempfehlung oder Lenkempfehlung zu bevorzugen.

Schumann (1994) beschreibt zwei Hauptanwendungsgebiete für haptische Lenkempfehlungen:

- Zum einen können haptische Lenkempfehlungen genutzt werden, um dem Fahrer zusätzliche Informationen für den Kontrollprozess zur Verfügung zu stellen z. B. im Sinne eines „*redundancy gain*“ (vgl. Schumann, 1994, S.33). Als „*redundancy gain*“ beschreibt man den Effekt, dass ein zusätzlich dargebotenes Signal die Reaktion erheblich beschleunigen kann und die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass das Signal richtig verstanden wird (vgl. Mohr & Pulvermuller, 2002; Wickens, Lee, Liu & Becker, 2004). Dabei wird die relevante Information des Signals durch Form, Farbe und Position oder aber auch durch die Beteiligung anderer Sinnesmodalitäten, wie z. B. Haptik, mehrfach kodiert. Ein typisches Beispiel für „*redundancy-gain*“ ist beispielweise die Gestaltung einer Ampel, bei der die relevante Information sowohl durch die Farbe als auch durch die Position kodiert ist. Allerdings schränkt Schumann (1994) ein, dass diskrete haptische Signale aufgrund des niedrigen Informationsgehalts nur in

Verbindung mit anderen z. B. visuellen Warnungen eingesetzt werden sollten (vgl. Schumann, 1994, S. 109). Eine alleinige Darbietung einer haptischen Lenkempfehlung sollte daher nicht zu einem „*redundancy gain*“ führen.

- Zum anderen können haptische Lenkempfehlungen möglicherweise einen bereits bestehenden Kontrollprozess zur Erreichung eines Handlungsziels unterbrechen und den Fahrer zur Kontrolle der Handlungsausführung bewegen. Hierzu muss die Lenkempfehlung lediglich vom Fahrer wahrgenommen werden. Das bedeutet, dass bei der Gestaltung der Lenkempfehlung darauf geachtet werden muss, dass die Wahrnehmbarkeit der Lenkempfehlung gewährleistet ist (vgl. Kapitel 2.2.2).

Beide Beschreibungen erklären jedoch nicht, wie Lenkempfehlungen gestaltet sein müssen, um sicherzustellen, dass der Fahrer die gewünschte Lenkreaktion zeigt. In den Arbeiten der Autorengruppe Eggert, Ehrenpfordt & Kullack wurde die Hypothese vertreten, dass die Aufschaltung der Lenkempfehlung in Gegenrichtung zur erforderlichen Lenkbewegung erfolgen sollte (vgl. Kullack, Ehrenpfordt & Eggert, 2007; 2009). Grundlage für diese Hypothese sind die reflexartigen Reaktionen der Fahrer auf Zusatzlenkmomente (vgl. Kapitel 2.2.3). Die Frage, ob Fahrer Lenkempfehlungen in Richtung oder in Gegenrichtung zur erforderlichen Lenkbewegung bevorzugen, wurde von Neukum et al. (2010a) in Studien im Fahrsimulator und im Realfahrzeug aufgegriffen. Die Ergebnisse der Studien zeigen, dass Fahrer Eingriffe in Richtung der erforderlichen Lenkbewegung bevorzugen. Eingriffe entgegen der erforderlichen Lenkrichtung werden hingegen als „*nicht unterstützend*“ und „*störende Intervention*“ bewertet (vgl. Neukum et al., 2010a, S. 110).

Kleen und Schmidt (2009) testeten in einer Studie, ob kurze haptische Lenkempfehlungen (Dauer: 300 ms) mittels gerichteter Lenkmomente den Fahrer bei der Kollisionsvermeidung unterstützen können. Fahrer, die eine Lenkempfehlung erhielten, zeigten bei der Kollisionsvermeidung signifikant häufiger Lenkbewegungen als Fahrer, die keine Lenkempfehlung erhielten (vgl. Kleen & Schmidt, 2009; S.47). Zusätzlich wurden weniger Kollisionen beobachtet (vgl. Abbildung 2-11). Kleen und Schmidt (2009) schließen daraus: „*Der Einsatz von gerichteten haptischen Signalen scheint die Ausführung von Ausweichmanövern zu unterstützen und Handlungsalternativen bereitzustellen.*“ (vgl. Kleen & Schmidt, 2009; S. 48). Zusätzlich vermuten sie aufgrund der unveränderten Bremsreaktionszeiten im Fall einer Lenkempfehlung, dass die Lenkempfehlung „*weitgehend inferenzfrei*“ verarbeitet wird (Kleen & Schmidt, 2009, S. 49). Die genauen zeitlichen Abläufe der Fahrerreaktion, insbesondere der Lenkreaktion, werden jedoch nicht berichtet.

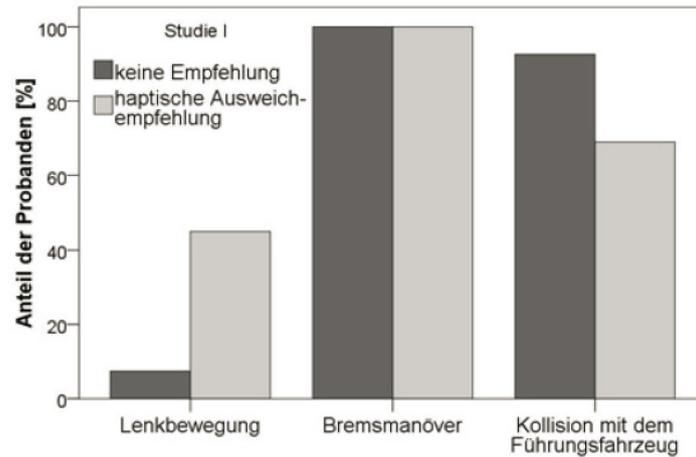


Abbildung 2-11. Beispielhafte Ergebnisse der Studie von Kleen und Schmidt (2009). Die Ergebnisse verdeutlichen, dass in Folge von einer haptischen Ausweichempfehlung deutlich mehr Fahrer eine Lenkbewegung zeigen und seltener mit dem Führungsfahrzeug kollidieren.

Die Ergebnisse der Studien von Neukum et al. (2010a) zu haptischen Lenkempfehlungen zur Kompensation von externen Störungen der Querführung (sogenannten Gierstörungen) geben jedoch Hinweise darauf, dass der Ablauf der Fahrerreaktion vom Zeitpunkt der Aufschaltung einer haptischen Lenkempfehlung beeinflusst wird. Das bedeutet, im Gegensatz zu der Annahme von Kleen und Schmidt, dass die Reaktion nicht zwingend interferenzfrei abläuft. Eine Reaktion des Fahrers auf die Gierstörung wurde ohne Lenkempfehlung ca. 300 ms nach Beginn der Gierstörung festgestellt (vgl. Neukum et al., 2010a, S. 89). Wurde zusätzlich eine Lenkempfehlung dargeboten, bevor der Fahrer typischerweise auf die Gierstörung reagiert, verzögerte dies die Reaktion des Fahrers. Dabei ähnelt die initiale Reaktion des Fahrers dem Verhalten bei fehlerhaften Eingriffen (vgl. Kapitel 2.2.3). Der Fahrer reagiert zunächst auf die Störung durch die Lenkempfehlung und korrigiert diese. Erst anschließend reagiert der Fahrer mit einer entsprechenden Lenkeingabe auf die Gierstörung (vgl. Neukum et al., 2010a). Aufgrund der im Vergleich zu Fahrten ohne Lenkempfehlung verzögerten Reaktion des Fahrers auf die Gierstörung könnte dies ein Hinweis auf eine mögliche Interferenz der Lenkempfehlung mit der anschließend geforderten Lenkreaktion sein. Das bedeutet, dass die motorische Reaktion auf die Lenkempfehlung dazu führt, dass die anschließende Lenkreaktion verzögert wird. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte sein, dass die Verarbeitung und Reaktion auf die Lenkempfehlung, sowie die Umsetzung einer Lenkbewegung zur Korrektur der Gierstörungen zwei unterschiedliche Aufgaben darstellen, die vom Fahrer nicht parallel bearbeitet werden können. In der Forschung wird in diesem Kontext häufig von „*dual task interference*“ (Doppelaufgabeninterferenz) gesprochen (Pashler, 1994; Wickens, 2002). Dabei wird beobachtet, dass zwei Aufgaben, die gleichzeitig oder schnell nacheinander ausgeführt werden, miteinander interferieren. In der Regel führt dies dazu, dass die Bearbeitung der zweiten Aufgabe verzögert wird. In der Forschung (vgl. Pashler, 1994, S.238) existieren verschiedene Annahmen, was die Ursache für diese Verzögerung ist, wie z. B.:

- ein Flaschenhals der menschlichen Informationsverarbeitung insbesondere bei der Handlungsauswahl und dem Abruf von relevanten Gedächtnisinformationen (Filtertheorien),
- beschränkte Möglichkeiten zur Vorbereitung und Aufrechterhaltung mehrerer Reiz-Reaktions-Schemata aufgrund limitierter Ressourcen (Ressourcentheorien),

- modalitätsspezifische Einschränkungen auf Ebene der Wahrnehmungsverarbeitung (multiple Ressourcen) und
- die Unfähigkeit bestimmte Reaktionsarten gleichzeitig auszuführen (cross talk, task similarity).

In Grundlagenstudien wurde zudem beobachtet, dass der zeitliche Abstand zwischen den Stimuli, welche eine bestimmte Reaktion erfordern (d.h. abhängig vom Stimulus), einen Einfluss darauf haben, ob die beiden Aufgaben miteinander interferieren (vgl. Pashler, 1994; Telford, 1931). Je größer der zeitliche Abstand (stimulus onset asynchrony, kurz: SOA) zwischen den Stimuli ist, desto geringer ist die beobachtete Interferenz. Die erforderliche Zeitspanne variiert dabei je nach Aufgabe und Typ der verwendeten Stimuli und wird als Psychologische Refraktärperiode (kurz PRP) bezeichnet (vgl. Pashler, 1994). Basierend auf den Studien von Neukum et al. (2010a) lässt sich der relevante Zeitraum, in dem eine Interferenz beobachtet wird, auf ca. 250-300 ms vor Beginn der Fahrerreaktion einschränken. Erfolgt die Lenkempfehlung hingegen zu Beginn oder während der Fahrerreaktion, scheint dies die Handlungsausführung nicht zu beeinträchtigen (vgl. Neukum et al., 2010a, S. 110).

Insgesamt deuten die Befunde zu Lenkempfehlungen darauf hin, dass Lenkempfehlungen den Fahrer bei der Kollisionsvermeidung unterstützen können. Dabei scheint neben der Gestaltung der Lenkempfehlung auch der Zeitpunkt, zu dem die Lenkempfehlung dargeboten wird, das Verhalten des Fahrers zu beeinflussen. Entscheidend scheint dabei der Zeitpunkt der Lenkempfehlung relativ zum Handlungsbeginn des Fahrers zu sein. In einigen Studien wurden Lenkempfehlungen zudem mit fahrerinitiierten Ausweicheingriffen (vgl. Gußner et al., 2015) und automatischen Ausweicheingriffen (vgl. Hesse et al., 2013; Schieben et al., 2014) kombiniert. Auf die Ergebnisse wird in den folgenden Abschnitten eingegangen. Fahrerinitiierte Ausweicheingriffe unterstützen den Fahrer insbesondere bei der Handlungsausführung, während automatische Eingriffe auch dann wirksam sein sollten, wenn der Fahrer kein kollisionsvermeidendes Verhalten zeigt.

2.2.4.2 Fahrerinitiierte Ausweicheingriffe

Im Gegensatz zu Lenkempfehlungen oder automatischen Ausweicheingriffen wird bei fahrerinitiierten Ausweicheingriffen in der Regel nicht vom System entschieden, ob ein Ausweichmanöver durchgeführt werden soll oder nicht. Stattdessen wird abgewartet bis der Fahrer eine eindeutige Handlung oder Handlungsintention zeigt, die darauf schließen lässt, dass er ein Ausweichmanöver durchführen möchte (siehe Bräuchle et al., 2013; Gußner et al., 2015; Itoh, Horikome & Inagaki, 2013). Die Erkennung kann dabei sowohl auf Lenkbewegungen (vgl. Bräuchle et al., 2013; Gußner et al., 2015) als auch auf Bremsbetätigungen des Fahrers basieren (vgl. Itoh et al., 2013). Wird der Ausweicheingriff durch den Fahrer initiiert, kann das System den Fahrer entweder bei der Ausführung des Ausweichmanövers unterstützen oder korrigieren (vgl. Gußner et al., 2015). Ein möglicher Vorteil dieser Eingriffsstrategie ist, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten falscher Alarme verringert werden kann. Ein möglicher Nachteil ist, dass der Fahrer gegebenenfalls nicht das erforderliche Verhalten zeigt, um den Eingriff zu initiieren (vgl. Kapitel 2).

Gußner et al. (2015) konnten in einer Studie im Realfahrzeug zeigen, dass fahrerinitiierte Ausweicheingriffe mithilfe einer Lenkmomentüberlagerung (vgl. Kapitel 1.1.1.1) helfen, Kollisionen zu verhindern. Im Vergleich zu Fahrten ohne Unterstützung durch fahrerinitiierte Ausweicheingriffe wurden häufiger Kollisionen mit einem plötzlich auftauchenden Fußgänger vermieden (vgl. Abbildung 2-12).

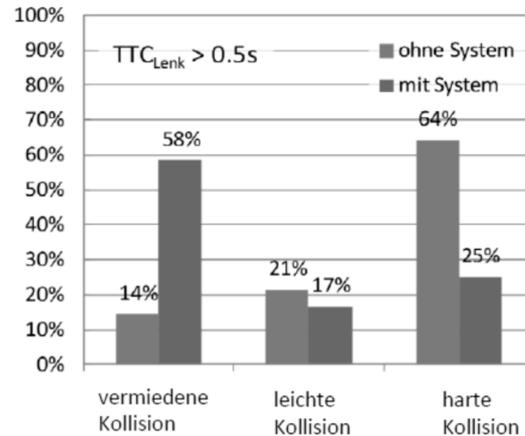


Abbildung 2-12. Ergebnisse zur Kollisionsvermeidungsrate aus der Studie von Gußner et al. (2015), S. 8.

Ähnliche Ergebnisse fanden auch Itoh et al. (2013) auf Basis einer Simulatorstudie. Sie berichten, dass die Anzahl der Kollisionen bei Fahrten mit Unterstützung durch einen fahrerinitiierten Ausweicheingriff im Vergleich zu Fahrten ohne Unterstützung deutlich reduziert wird (vgl. Itoh et al., 2013, S. 2093). Allerdings weisen sie auch darauf hin, dass nicht alle Fahrer ein kollisionsvermeidendes Verhalten zeigten (vgl. Itoh et al., 2013, S. 2094). Daraus schließen sie, dass ein Bedarf an automatischen Ausweicheingriffen bestehen könnte, insbesondere wenn die Fahrer keine kollisionsvermeidenden Verhaltensweisen zeigen (vgl. Itoh et al., 2013, S. 2095). Dies weist auf eine grundsätzliche Problematik fahrerinitiiertem Ausweicheingriffe hin, da Fahrer möglicherweise abgelenkt sein könnten und daher kein kollisionsvermeidendes Verhalten zeigen (vgl. Kapitel 2). In der Studie von Bräuchle et al. (2013) wird zusätzlich eine dem Eingriff vorgelagerte Lenkempfehlung eingesetzt. Dies könnte eine Lösung für das Problem darstellen, dass abgelenkte Fahrer kein kollisionsvermeidendes Verhalten zeigen. Allerdings werden von Bräuchle et al. (2013) keine Ergebnisse bezüglich der Wirksamkeit berichtet.

Insgesamt deuten die Studien darauf hin, dass fahrerinitiierte Ausweicheingriffe den Fahrer bei der Handlungsausführung unterstützen können. Dadurch könnten die von Malaterre et al. (1988) beschriebenen Probleme adressiert werden, dass Fahrer häufig zu stark lenken, was in Kombination mit einer Bremsung zu einem Kontrollverlust über das Fahrzeug führen könnte. Ist der Fahrer jedoch unaufmerksam oder zeigt kein kollisionsvermeidendes Verhalten, können fahrerinitiierte Ausweicheingriffe nicht helfen, Kollisionen zu verhindern. Automatische Ausweicheingriffe benötigen hingegen keine Reaktion des Fahrers und könnten möglicherweise auch in diesen Fällen helfen, Kollisionen zu verhindern.

2.2.4.3 Automatische Ausweicheingriffe

Automatische Ausweicheingriffe starten, sobald das System erkennt, dass eine Kollision mit einem Hindernis bevorsteht (z. B. Fricke et al., 2015a; Hesse et al., 2013; Schieben et al., 2014; Sieber et al., 2015a; Sieber et al., 2015b). Dabei übernimmt das Assistenzsystem kurzzeitig die Längs- und Querführung des Fahrzeugs und versucht mittels gezielter Eingriffe eine Kollision zu verhindern. Eine Ausweichreaktion des Fahrers ist dabei nicht erforderlich, allerdings muss der Fahrer den Ausweicheingriff – je nach Systemauslegung – zulassen.

In einer Simulatorstudie konnten Hesse et al. (2013) zeigen, dass automatische Ausweicheingriffe mittels Lenkmomentüberlagerung (vgl. Kapitel 1.1.1.1) den Fahrer bei der Kollisionsvermeidung unterstützen (siehe auch Schieben et al., 2014). Zwar wurden noch bei 70% der Fahrer Kollisionen beobachtet, allerdings war der mittlere Querversatz deutlich größer ($m = 1.52$ m) als bei Fahrern ohne automatische Ausweichunterstützung ($m = 0.19$ m). Zusätzlich konnten Hesse et al. (2013) zeigen, dass dem Eingriff vorgelagerte haptische Lenkempfehlungen oder akustische Warnungen die Anzahl an Kollisionen im Vergleich zu keiner Ausweichunterstützung signifikant verringern (vgl. Tabelle 2-2).

Tabelle 2-2. Ergebnisse der Simulatorstudie von Hesse et al. (2013).

	N_{gesamt}	Anzahl Kollisionen (%)	Mittlerer Querversatz [m]
ohne Ausweichunterstützung	10	10 (100%)	0.19
automatischer Ausweicheingriff	10	7 (70%)	1.52
haptische Lenkempfehlung + automatischer Ausweicheingriff	10	5 (50%)	1.83
akustische Warnung + automatischer Ausweicheingriff	10	6 (60%)	1.52

Allerdings kollidieren auch mit zusätzlicher vorgelagerter Warnung noch 50-60% der Fahrer mit dem Hindernis. Hesse et al. (2013) berichten, dass *„die Fahrer die Tendenz hatten, dem Eingriff entgegen zu steuern oder das Lenkrad festzuhalten, sodass die Eingriffe nicht so erfolgreich waren, wie sie hätten sein können“* (vgl. Hesse et al., 2013, S.3 [sinngemäße Übersetzung des Autors]).

Ähnliche Ergebnisse berichten Fricke et al. (2015a) auf Basis einer Simulatorstudie zu automatischen Ausweicheingriffen mittels einer Lenkmomentüberlagerung. Wurden Fahrer zum ersten Mal mit einem automatischen Ausweicheingriff konfrontiert, wurde in der Mehrheit der Fälle (90%, $N=40$) das Lenkrad festgehalten oder der Fahrer steuerte entgegen des Eingriffs (vgl. Fricke et al., 2015a, S. 195). Erlebten die Fahrer den Eingriff nochmals und wurden vorab instruiert, das Lenkrad im Falle des Eingriffs locker zu halten, wurde dieses Verhalten in weniger als der Hälfte der Fälle (45%, $N=40$) beobachtet (vgl. Fricke et al., 2015a). Aufgrund der Konfundierung der Faktoren Instruktion und Messzeitpunkt ist es jedoch nicht möglich zu identifizieren, ob die Instruktion, das wiederholte Erleben oder beides gemeinsam für die beobachtete Veränderung des Fahrerverhaltens verantwortlich ist. Fricke et al. (2015a) schließen hingegen daraus, dass das Wissen über einen möglichen Ausweicheingriff das Verhalten der Fahrer beeinflusst (vgl. Fricke et al., 2015a, S. 195).

Insgesamt deuten die Ergebnisse der Studien von Hesse et al., Schieben et al. und Fricke et al. darauf hin, dass Fahrer im Falle unerwarteter automatischer Ausweicheingriffe mittels Lenkmomentüberlagerung (vgl. Kapitel 1.1.1.1) dazu neigen, das Lenkrad festzuhalten oder den Ausweicheingriff durch Gegensteuern zu unterbinden. Da dieses Verhalten der Fahrer die Wirksamkeit der Ausweicheingriffe deutlich reduziert, untersuchten Hesse et al. (2013) in Folgestudien automatische Ausweicheingriffe mittels eines Steer-by-Wire-Systems im Vergleich zu Eingriffen mittels Lenkmomentüberlagerung im Realfahrzeug (vgl. auch Schieben et al., 2014). Dabei wurde der Fahrer zu Beginn des Eingriffs für eine Zeitspanne von 0.5 s von der Lenkung entkoppelt, sodass seine Lenkeingaben keinen Einfluss auf die Querverführung des Fahrzeugs hatten. Nach dieser Zeitspanne konnte der Fahrer die Lenkung wieder übernehmen. Durch die Entkopplung der Fahrereingaben

mittels Steer-by-Wire konnte in nahezu allen Fällen eine Kollision vermieden werden, während bei automatischen Ausweichengriffen mittels Lenkmomentüberlagerung die Kollisionen nicht vermieden wurden (vgl. Hesse et al., 2013., S. 5). Allerdings waren die Fahrer im Falle einer Entkopplung nicht dazu in der Lage, den Querversatz im Falle eines fehlerhaften Eingriffs ausreichend zu reduzieren (vgl. Hesse et al., 2013, siehe auch Kapitel 2.2.3). Durch die Entkopplung des Fahrers sind diese Ergebnisse wenig überraschend, allerdings schränkt die Studie den Zeitbereich für die Festhalte- oder Gegenlenkreaktionen der Fahrer ein. Aufgrund der Dauer der von Hesse et al. (2013) eingesetzten Entkopplung von 0.5 s ist zu erwarten, dass das Verhalten der Fahrer innerhalb dieser Zeitspanne für die Reduktion der Wirksamkeit automatischer Ausweichengriffe mittels Lenkmomentüberlagerung verantwortlich ist. Der Zeitbereich ähnelt damit den Zeitbereichen, die auch bei der Reaktion auf nicht situationsgerechte Lenkeingriffe mittels einer Lenkmomentüberlagerung beobachtet werden (vgl. Kapitel 2.2.3). Allerdings erfolgte in den Studien keine detaillierte Betrachtung der Reaktionssystematik und des zeitlichen Ablaufs der Reaktion der Fahrer auf automatische Ausweichengriffe mittels Lenkmomentüberlagerung. Eine genauere Analyse des zeitlichen Ablaufs könnte jedoch Aufschluss darüber geben, ob das Verhalten in diesen Situationen vergleichbar ist mit dem Verhalten im Falle nicht situationsgerechter Lenkeingriffe.

Sieber et al. (2015b) untersuchten ähnlich wie Hesse et al. (2013) drei verschiedene Varianten automatischer Ausweichengriffe im Realfahrzeug im Vergleich zu keiner Ausweichunterstützung. Die Eingriffsvarianten bestanden aus einer adaptiven Lenkmomentüberlagerung, die von einer Verzögerung des Fahrzeugs begleitet wurde, einer adaptiven Lenkmomentüberlagerung mit Warnton und begleitender Verzögerung sowie einer Variante, in der eine Lenkmomentüberlagerung mit differentiellen Bremsen und einem Warnton kombiniert wurde. Alle Eingriffsvarianten zeigten vergleichbare Ergebnisse bezüglich der Wirksamkeit (vgl. Sieber et al., 2015b). Die zusätzliche akustische Warnung oder die Kombination mit differentiellen Bremsen scheint jedoch die Qualität des Ausweichvorgangs zu verbessern, da früher ein sicherer Zustand erreicht wird und die Fahrer häufiger den angestrebten Querversatz erreichen (vgl. Sieber et al., 2015b S. 2045). Allerdings wurden im Gegensatz zu den Studien von Gußner et al., Hesse et al., Schieben et al. und Fricke et al. auch ohne Ausweichunterstützung keine Kollisionen mit dem Hindernis beobachtet (vgl. Sieber et al., 2015b). Die Autoren diskutieren, dass dies möglicherweise eine Folge der geringen TTC bei Beginn der Situation sein kann, oder der lateralen Bewegung des Hindernisses (siehe hierzu auch Kapitel 2.2). Zusätzlich weisen sie darauf hin, dass der erforderliche Querversatz in ihrer Studie gering war, was ebenfalls eine Ausweichreaktion der Fahrer begünstigen könnte (vgl. Sieber et al., 2015b, S. 2045). Der zur Kollisionsvermeidung erforderliche Querversatz betrug 0.6 m, während er in den Studien von Hesse et al. zwischen 1.2 m und 1.85 m lag (vgl. Hesse et al., 2013; Schieben et al., 2014; Sieber et al., 2015b). Das bedeutet, dass die bessere Wirksamkeit in den Studien von Sieber et al. möglicherweise auch eine Folge des geringeren Querversatzes sein kann. In den Studien von Gußner et al. und Fricke et al. finden sich keine Angaben zum erforderlichen Querversatz (vgl. Fricke et al., 2015a; Gußner et al., 2015). Dies deutet darauf hin, dass neben der Gestaltung automatischer Ausweichengriffe auch die Gestaltung der Prüfsituationen einen starken Einfluss auf das Fahrerverhalten haben kann. Bestätigt wird dies auch durch Ergebnisse der Studien von Sieber et al. zu Lenkempfehlungen, die zeigen, dass Fahrer ihr Verhalten bei einem teilweise belegten Gegenfahrstreifen anpassen (vgl. Sieber et al., 2015a).

Insgesamt deuten die Ergebnisse darauf hin, dass automatische Ausweichengriffe nicht zwingend die gewünschte Wirksamkeit erreichen. Ursache hierfür scheinen Verhaltensweisen des Fahrers zu sein, wie zum Beispiel das Abdämpfen oder Festhalten. Vorgelagerte Warnungen oder Lenkempfehlungen (vgl. Hesse et al., 2013; Schieben et al., 2014) sowie das Wissen über bevorstehende Ausweichengriffe

(vgl. Fricke et al., 2015a) scheinen die Wirksamkeit automatischer Ausweichengriffe zu erhöhen, allerdings wird auch in diesen Fällen noch ein Abdämpfen und Festhalten beobachtet. Eine Entkopplung des Fahrers mittels Steer-by-Wire erhöht zwar die Wirksamkeit, ist für den Fahrer im Falle eines unberechtigten Eingriffs jedoch nicht kontrollierbar (vgl. Hesse et al., 2013; Schieben et al., 2014). Zudem gibt es Hinweise darauf, dass die Situationsgestaltung das Fahrerverhalten und die Wirksamkeit beeinflusst (vgl. Sieber et al., 2015b).

2.2.5 Zusammenfassung: Fahrerverhalten in Folge von Eingriffen in die Querführung

Die Beschreibung des Fahrernormalverhaltens hat verdeutlicht, dass der Fahrer an unterschiedlichen Stellen der Handlungsplanung und Handlungsausführung bei der Kollisionsvermeidung unterstützt werden könnte. Insbesondere wenn der Fahrer abgelenkt ist, werden teilweise keine kollisionsvermeidenden Verhaltensweisen beobachtet (vgl. Abschnitt 2). Gerichtete Lenkempfehlungen mittels Lenkmomentüberlagerung haben das Potenzial, den Fahrer auf eine erforderliche Handlung hinzuweisen und können ihn möglicherweise bei der Reaktionswahl unterstützen. In der Literatur gibt es aber auch Hinweise darauf, dass haptische Lenkempfehlungen das folgende Lenkverhalten beeinflussen und verzögern können, was auf eine mögliche Interferenz bei der Handlungsausführung hinweist (vgl. Abschnitt 2.2.4.1). Fahrerinitiierte Eingriffe in die Querführung konzentrieren sich im Gegensatz zu Lenkempfehlungen stärker auf die Handlungsausführung. Der Fahrer muss hierbei ein kollisionsvermeidendes Verhalten (z. B. Lenken oder Bremsen) zeigen, um den Eingriff zu initiieren. Bleibt dieses Verhalten aus, erfolgt keine Unterstützung. In der Literatur finden sich daher auch Ansätze, fahrerinitiierte Lenkeingriffe mit Lenkempfehlungen oder Kollisionswarnungen zu kombinieren, um die Wirksamkeit zu erhöhen. Allerdings muss hierfür zusätzlich Zeit eingeplant werden, die in kritischen Situationen möglicherweise nicht zur Verfügung steht (vgl. Abschnitt 2.2.4.2). Automatische Ausweichengriffe berücksichtigen im Gegensatz zu Lenkempfehlungen und fahrerinitiierten Eingriffen - zumindest zu Beginn - nicht das menschliche Verhalten, sondern stellen die erfolgreiche Kollisionsvermeidung in den Vordergrund. Dabei fällt dem Fahrer eine andere Rolle zu, da er den automatischen Eingriff als berechtigten Eingriff erkennen und entsprechend zulassen muss. Allerdings finden sich in der Literatur Hinweise darauf, dass automatische Eingriffe nicht so wirksam ausfallen wie sie potenziell sein könnten, was möglicherweise an dem Reaktionsmuster der Fahrer auf unerwartete Eingriffe in die Querführung liegt. Zwar lässt sich die Wirksamkeit durch eine Entkopplung des Fahrers deutlich erhöhen, allerdings stellt sich hier die Frage nach der Kontrollierbarkeit fehlerhafter Eingriffe (vgl. Abschnitt 2.2.4.3). Technische Normen und die Gesetzeslage erfordern bisher einen Nachweis der Kontrollierbarkeit durch den Fahrer, daher muss ein Ausweichassistent möglichst beide Ziele erfüllen. Zum einen sollte er den Fahrer möglichst wirksam bei der Kollisionsvermeidung unterstützen und zum anderen sollte der Fahrer im Falle eines fehlerhaften Eingriffs dazu in der Lage sein, den Eingriff sicher zu übersteuern. Anhand der berichteten Studien wird deutlich, dass beide Ziele nicht ohne weiteres zu vereinen sind. Dennoch sollten bei der Untersuchung von Ausweichassistenten stets beide Aspekte, die Wirksamkeit berechtigter Eingriffe und die Kontrollierbarkeit fehlerhafter Eingriffe, berücksichtigt werden. Der Fokus liegt jedoch zunächst auf der Erhöhung der Wirksamkeit berechtigter Eingriffe, insbesondere von Eingriffen mittels Lenkmomentüberlagerung. Fasst man die Befunde zum Fahrernormalverhalten und zu Eingriffen in die Querführung zusammen, sind folgende Erklärungsansätze für die schlechte Wirksamkeit dieser Eingriffe denkbar:

- Die Fahrer erkennen Gefahrensituation nicht oder zu spät und/oder Fahrer interpretieren den Ausweicheingriff zunächst als fehlerhaften Lenkeingriff (bspw. in Folge einer Ablenkung)
- Die Fahrer bevorzugen andere kollisionsvermeidende Maßnahmen (z. B. Bremsen) und unterbinden daher den Ausweicheingriff (vgl. hierzu Kapitel 2)
- Die Fahrer ziehen Ausweichen nicht als mögliche Handlungsalternative in Betracht (vgl. hierzu Kapitel 2)

Die Ansätze beziehen sich vor allem auf die menschliche Informationsverarbeitung, das Wissen über mögliche Handlungsalternativen, die Handlungswahl und die Handlungsausführung. Allerdings ist anhand bisheriger Studien nicht zweifelsfrei zu klären, was genau für die geringe Wirksamkeit automatischer Lenkeingriffe verantwortlich ist. Eine detaillierte Betrachtung des Fahrerverhaltens könnte jedoch helfen, Aufschluss über die Ursachen zu liefern. Im Folgenden wird daher auf relevante Fahrerverhaltensmodelle eingegangen. Damit könnten mögliche Problembereiche bei der Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug abgeleitet werden, welche die Wirksamkeit und die Kontrollierbarkeit von Ausweichassistenten beeinträchtigen.

2.3 Der Mensch als Regler: Fahrerverhaltensmodelle zur Beschreibung der Fahrer-Fahrzeug Interaktion

Insbesondere in zeitkritischen Situationen, wie z. B. bei der Vermeidung von Kollisionen mit querenden Hindernissen, ist ein möglichst reibungsfreies Zusammenspiel zwischen Fahrer und Fahrzeug erforderlich. Für die optimale Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen, die den Fahrer in solchen Situationen unterstützen sollen, sind daher umfangreiche Kenntnisse über das Fahrerverhalten und die Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug erforderlich. Fahrerverhaltensmodelle beschreiben und strukturieren im Wesentlichen die Erkenntnisse über das Verhalten von Fahrern bei der Fahraufgabe (vgl. Donges, 2012). Dadurch bieten sie die Möglichkeit den Einfluss verschiedener Faktoren, wie z. B. die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen, auf das Fahrerverhalten abzuschätzen.

Hintergrund dieser Modelle sind im Wesentlichen die sogenannten „*psychokybernetischen Modelle*“. Der Begriff der Kybernetik (abgeleitet aus dem Griechischen Wort für Steuermann) wurde ursprünglich von Wiener und Rosenblueth geprägt, die damit einen Überbegriff für die Theorien zur Regelung und Kommunikation von Maschinen und Organismen schaffen wollten (vgl. Wiener, 1965, S.11). Psychokybernetische Modelle basieren auf der Annahme, dass für die erfolgreiche Interaktion von Maschinen oder Organismen mit der Umwelt Feedbackmechanismen erforderlich sind. Diese Feedbackmechanismen liefern der Maschine oder dem Organismus kontinuierlich Informationen und ermöglichen so einen Vergleich zwischen dem Regelziel (dem Sollwert) und dem aktuellen Status der Regelung (dem Istwert). Psychokybernetische Modelle der Verhaltensteuerung von Organismen stellen daher den Zusammenhang zwischen der Wahrnehmung und der Verhaltensausführung in den Vordergrund.

In der Psychologie wurden bereits im 19. Jahrhundert erste Theorien zur Erklärung der Verhaltenssteuerung entwickelt, die auf die Verbindung zwischen Wahrnehmung und Verhalten eingehen (vgl. Harleß, 1861; Herbart, 1825; James, 1891; Lotze, 1852). Die sogenannte *Ideomotorische Hypothese* (IMH) postuliert bidirektionale Verhaltens-Effekt-Beziehungen. Diese Verhaltens-Effekt-Beziehungen entstehen dadurch, dass der Mensch lernt, bestimmtes Verhalten mit Effekten in der Umwelt und den dazugehörigen Sinneswahrnehmungen (wie z. B. der propriozeptiven Wahrnehmung von Hand- oder Armbewegungen) zu assoziieren. Möchte er das Verhalten nun erneut ausführen, kann er sich an die entsprechenden Sinneswahrnehmungen erinnern und versuchen diese zu reproduzieren (vgl. Harleß, 1861; Herbart, 1825; James, 1891; Lotze, 1852). Das bedeutet, dass zunächst die Verbindung zwischen Verhalten und Effekt gelernt werden muss, bevor das Verhalten gezielt erzeugt werden kann. Zudem wird diese Verbindung stärker, je häufiger dieser Prozess wiederholt wird (vgl. Herbart, 1825). Die Theorie wird auch in der aktuellen Forschung aufgegriffen (Hoffman, 1993; Hommel, Müsseler, Aschersleben & Prinz, 2001; Kunde, 2001), wobei insbesondere die Rolle sensorischer Antizipationen (die in Folge der Handlung zu erwartenden Sinneseindrücke) auf die Ausführung von motorischem Verhalten im Vordergrund steht (vgl. Pfister & Janczyk, 2012).

Wie oben bereits beschrieben, ist anzunehmen, dass Interaktionen mit der Umwelt mit bestimmten Sinneseindrücken assoziiert sind. Ein Beispiel dafür sind Zielbewegungen des Arms oder der Hand. Die Bewegung des Armes oder der Hand führt zu einer Veränderung, die visuell erfasst werden kann (z. B. die Position des Arms). Zum anderen führt die Bewegung zu einer Veränderung der Muskellänge und Muskelspannung, was mittels der Propriozeption wahrgenommen werden kann.

Studien von Woodworth (1899) und Keele und Posner (1968) zeigen, dass das Ausblenden oder Ausbleiben visueller Informationen für eine kurze Zeitspanne keinen Einfluss auf die Genauigkeit der Bewegung hat. Daraus wurde auf zwei unterschiedliche Mechanismen geschlossen, die an der Bewegungsausführung und der Kontrolle der Handlungsausführung beteiligt sind (vgl. Adams, 1971; Desmurget & Grafton, 2000). Zunächst erfolgt die Steuerung der Bewegungsausführung anhand der körpereigenen propriozeptiven Wahrnehmung, welche als auch interozeptive Wahrnehmung (von lateinisch *inter* „inmitten von“ und *recipere* „aufnehmen“) bezeichnet wird. Anschließend findet eine Beteiligung der visuellen, exterozeptiven Wahrnehmung (von lateinisch *exter* „außen befindlich“ und *recipere* „aufnehmen“) statt, die sich auf die Wahrnehmung der Umwelt bezieht. Diese exterozeptive Wahrnehmung ist vor allem erforderlich, um den Erfolg der Handlungsausführung („knowledge of result“) zu überprüfen. Adams (1971) beschreibt diesen Ansatz zur Erklärung der Steuerung von Bewegungen als „closed-loop theory“. Der Begriff „closed-loop“ bezieht sich dabei im Wesentlichen auf die Möglichkeit Rückmeldung (Feedback) über den Erfolg der Handlungsausführung zu erhalten und steht im Gegensatz zu einer sogenannten „open-loop“ Steuerung. Der Begriff open-loop steht dabei für ein System, welches nicht über entsprechende Rückmeldungsmechanismen zur Überprüfung des Handlungserfolgs verfügt (vgl. Adams, 1971, S. 89).

Powers (1973a) greift die Idee, dass die Verhaltenssteuerung mithilfe von in hierarchisch strukturierten Regelstrukturen erfolgt, im Rahmen der *Perceptual Control Theory* (PCT) auf. Dabei geht er (ähnlich wie die Begründer der Ideomotorischen Hypothese) davon aus, dass Verhalten eine willkürliche Steuerung der Wahrnehmung ist. Das Ziel einer Handlung ist dabei stets das Erreichen eines bestimmten Handlungsziels, welches z. B. in Form der zu erwartenden Sinneseindrücke vorgegeben wird. Die Handlungsausführung erfolgt anschließend durch hierarchisch organisierte Regelstrukturen, welche zum Ziel haben, die Abweichung von dem Handlungs- bzw. Regelziel zu minimieren und den Erfolg der Handlungsausführung sicherzustellen. Sie unterscheiden sich vor allem durch die Geschwindigkeit mit der das relevante Feedback verarbeitet werden kann. Ein Beispiel hierfür sind auch hier zielgerichtete Hand- oder Armbewegungen unter Beteiligung der interozeptiven und exterozeptiven Wahrnehmung, wobei anzunehmen ist, dass exterozeptive Rückmeldungen langsamer verarbeitet werden als interozeptive (siehe hierzu auch Wargo, Kelley, Mitchell & Prosin, 1967). Powers (1973a) geht zudem davon aus, dass die Regelstrukturen durch Lernerfahrungen und Wiederholung zunehmend optimiert und „automatisiert“ werden, was auf einen Umstrukturierungsprozess zurückgeführt werden kann. Als Beispiel dafür führt er die sogenannte neuronale Plastizität an (vgl. Powers, 1973a, S.182). Neuronale Plastizität beschreibt die Fähigkeit des Nervensystems, sich zu restrukturieren, wie z. B. nach dem Verlust von Hirngewebe in Folge einer Verletzung. Andere Beispiele finden sich auch auf Ebene einzelner Synapsenverbindungen (Birbaumer & Schmidt, 2006b). Die wiederholte Reizdarbietung kann zu synaptischen Veränderungen führen, was eine Basis für verschiedene Lernvorgänge ist.

Diese Gedanken finden sich auch in komplexen Verhaltensmodellen, wie dem drei-Ebenen Modell von Rasmussen (1983) wider. Das Modell von Rasmussen wurde mit dem Ziel entwickelt, unterschiedliche Kategorien der Leistungsfähigkeit des Menschen bei zielgerichteten Handlungen zu beschreiben (vgl. Abbildung 2-13). Rasmussen (1983) geht davon aus, dass das menschliche Verhalten grundsätzlich zweckmäßig bzw. zielgerichtet ist („*The human behaviour is teleological by nature*“; Rasmussen, 1983, S. 257). Menschen richten ihr Handeln also auf ein Ziel aus und suchen die zur korrekten Handlungsausführung erforderlichen Informationen. Damit ist das Modell von Rasmussen ebenfalls den psychokybernetischen Modellen zuzuordnen. Zusätzlich postuliert er ähnlich wie Powers (1973a) hierarchische Regelstrukturen, welche für bestimmte Aspekte der Verhaltenssteuerung zuständig sind. Des Weiteren geht Rasmussen (1983) davon aus, dass eine direkte Rückmeldung über die

Handlungsausführung für erfolgreiches Handeln nicht zwingend erforderlich ist. Dies gilt allerdings nur, wenn bereits Lernerfahrung aus früheren Handlungsversuchen vorhanden ist. Als Beispiel führt Rasmussen dabei an, dass der Mensch bei der Bewegungsausführung nicht zwingend auf eine direkte Rückmeldung angewiesen ist. Eine direkte Rückmeldung ist nur notwendig, wenn eine akkurate Handlungsausführung angestrebt wird. Für komplexe Bewegungssequenzen ist die menschliche Wahrnehmung hingegen zu langsam, sodass die Anpassung auf einer Auswahl und Wiederherstellung von erfolgreichen Verhaltensmuster basiert (vgl. Rasmussen, 1983). Damit postuliert Rasmussen (1983) zusätzlich zu den Feedback-Strukturen eine Feedforward-Struktur, welche als „Open-Loop“ Anteil der Verhaltenssteuerung angesehen werden kann.

Insgesamt unterscheidet Rasmussen (1983) drei Ebenen des menschlichen Verhaltens:

- Knowledge based behaviour (wissensbasiertes Verhalten),
- Rule based behaviour (regelbasiertes Verhalten) und
- Skill based behaviour (fertigkeitbasiertes Verhalten).

Die drei Ebenen unterscheiden sich zum einen darin, ob es sich um bekannte oder unbekannte Situationen handelt. Ist die Situation unbekannt, erfordert sie wissensbasiertes Verhalten und eine gezielte Aufmerksamkeitszuwendung. Ist die Situation hingegen bekannt, kann sowohl regelbasiertes Verhalten als auch fertigkeitbasiertes Verhalten erforderlich sein. Regelbasiertes Verhalten unterscheidet von fertigkeitbasiertem Verhalten im Wesentlichen dadurch, dass der Fahrer die angewendete Regel benennen kann, während der Fahrer bei fertigkeitbasiertem Verhalten nicht beschreiben kann, wie er das Verhalten kontrolliert und welche Informationen dafür erforderlich sind. Damit liefert Rasmussen (1983) auch einen Hinweis darauf, welchem Teil des Langzeitgedächtnisses sich die verschiedenen Verhaltensebenen zuordnen lassen. Das wissens- und regelbasierte Verhalten lässt sich demnach eher dem expliziten (deklarativen) Teil des Langzeitgedächtnis zuordnen, während das fertigkeitbasierte Verhalten dem impliziten (prozeduralen) Teil zuzuordnen ist (für eine Übersicht über die Teilsysteme des Gedächtnisses siehe Myers, 2008 oder Birbaumer & Schmidt, 2006b).

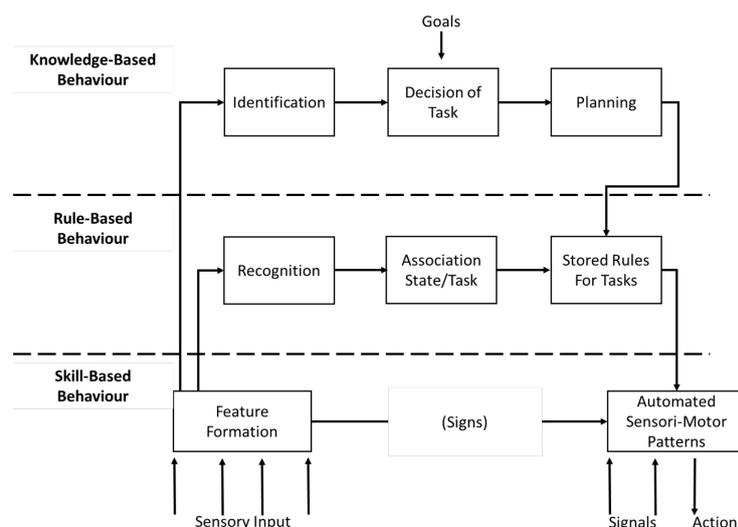


Abbildung 2-13. Modell der drei Verhaltensebenen für zielgerichtetes Handeln nach Rasmussen (1983)

Auch die Führung eines Fahrzeugs setzt sich aus verschiedenen Verhaltenskomponenten zusammen, die sich den drei Verhaltensebenen von Rasmussen (1983) zuordnen lassen. Die verschiedenen Verhaltenskomponenten sind dabei für unterschiedliche Teilaufgaben der Fahrzeugführung von Bedeutung. Im Folgenden wird daher näher auf Fahrerhaltensmodelle eingegangen, die einen Überblick darüber liefern, welche unterschiedlichen Verhaltenskomponenten bei der Fahraufgabe zu berücksichtigen sind. Im Fokus stehen dabei insbesondere Aspekte der Fahraufgabe und des Fahrerhaltens, die von Bedeutung für die Querführung des Fahrzeugs sind.

2.3.1 Verhaltensmodelle zur Beschreibung der Fahraufgabe

Die Fahraufgabe ist eine zielgerichtete komplexe Handlung, die sich aus verschiedenen Teilaufgaben zusammensetzt (vgl. McRuer, Allen, Weir & Klein, 1977; Schumann, 1994). Dazu gehören Entscheidungsaufgaben, wie z. B. die Routenwahl oder die Wahl der Fahrspur, aber auch die Handlungsausführung von Fahrmanövern sowie die Überwachung der Handlungsausführung.

In der Literatur hat sich eine Strukturierung der Teilaufgaben auf Basis ihrer Anforderungen durchgesetzt. Dies spiegelt sich in einer hierarchischen Struktur der Modelle wider (vgl. Donges, 1982; 2012; Janssen, 1979; Michon, 1985; Schumann, 1994). Insgesamt werden dabei drei Ebenen unterschieden, die je nach Autor als „*Navigationsebene*“, „*Bahnführungsebene*“ und „*Stabilisierungsebene*“ (vgl. Donges, 1982; Schumann, 1994) oder „*Strategic Level*“, „*Manoeuvring Level*“ oder „*Control Level*“ (vgl. Janssen, 1979; Michon, 1985) bezeichnet werden (siehe hierzu auch McRuer et al., 1977).

Die **Navigationsebene** oder „**strategic level**“ steht auf der obersten Ebene und beinhaltet allgemeine Pläne und Ziele des Fahrers. Dies umfasst Aufgaben wie die Routenwahl, Routenplanung und die Wegfindung während der Fahrt. Es wird angenommen, dass diese Aufgaben über einen langen Zeitraum andauern (vgl. Janssen, 1979) und komplexe mentale Prozesse beinhalten (vgl. Schumann, 1994), wie z. B. die Abschätzung von Risiken und Kosten oder des zeitlichen Fahrtablaufs (vgl. Donges, 1982; McRuer et al., 1977; Michon, 1985).

Die **Bahnführungsebene**, „**manoeuvring level**“ oder „**tactical level**“ beschreibt Aufgaben, die zeitlich begrenzt sind (vgl. Janssen, 1979) und bei denen die Handlungsmöglichkeiten des Fahrers durch situative Gegebenheiten, wie z. B. andere Verkehrsteilnehmer oder räumliche Beschränkungen, eingeschränkt sind (vgl. Donges, 1982; Janssen, 1979; Michon, 1985; Schumann, 1994). Für die erfolgreiche Bewältigung der Aufgaben sind daher umfassende Informationen über die Situation erforderlich (vgl. Donges, 1982). Zusätzlich werden die Handlungen des Fahrers von den allgemeinen Zielen und Plänen des Fahrers beeinflusst (vgl. Michon, 1985). Beispielhafte Aufgaben, die dieser Ebene zugeordnet werden, sind Überholen, Abbiegen und Folgefahren.

Die **Stabilisierungsebene** oder „**control level**“ steht auf der untersten Ebene und beinhaltet die direkte Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug (vgl. Schumann, 1994) sowie die Kontrolle der Handlungsausführung. Dadurch soll eine möglichst geringe Abweichung zwischen Führungs- und Regelgrößen erreicht werden (vgl. Donges, 1982). Des Weiteren wird angenommen, dass die Aufgaben mithilfe automatisierter Reaktionsmuster bearbeitet werden, wobei die Bearbeitungszeit Bruchteile von Sekunden beträgt (vgl. Janssen, 1979; Schumann, 1994).

Die einzelnen Ebenen sind dabei nicht unabhängig voneinander, sondern sind lose miteinander verbunden.

Zusätzlich erhält der Fahrer handlungsrelevante Informationen aus der Umwelt (vgl. Donges, 1982; Janssen, 1979), die gleichzeitig zur Kontrolle der Handlungsausführung genutzt werden (vgl. McRuer et al., 1977). Der Prozess des Fahrens und damit auch der Prozess der Querführung des Fahrzeugs spielt sich auf den unteren beiden Ebenen der Modelle von Donges und Janssen ab (vgl. Donges, 2012, S.19), wird jedoch von der übergeordneten Strategie- oder Navigationsebene beeinflusst. Beide Modelle nehmen an, dass der Fahrer sein geplantes Verhalten unter Einbeziehung von Informationen aus der Umwelt an situationelle Gegebenheiten anpasst. Donges (2012) geht weiterhin davon aus, dass die Führungsaufgabe darin besteht *„[...] die als sinnvoll erachteten Führungsgrößen wie Sollspur und Sollgeschwindigkeit abzuleiten und antizipatorisch im Sinn einer Steuerung (open loop control) einzugreifen, um günstige Vorbedingungen für möglichst geringe Abweichungen zwischen Führungs- und Istgrößen zu schaffen“* (vgl. Donges, 2012, S.19). Die Stabilisierungs- oder Kontrollebene ist seiner Aussage nach dafür verantwortlich *„[...] dass im geschlossenen Regelkreis (closed loop control) die Regelabweichungen stabilisiert und auf ein für den Fahrer annehmbares Maß kompensiert werden“* (vgl. Donges, 2012, S.19).

Die vorgestellten Modelle geben damit einen Überblick über die Struktur der Fahraufgabe, geben allerdings nur wenig Aufschluss darüber, wie der Fahrer die erforderlichen Informationen erhält und welche Informationen er insbesondere bei der Querführung des Fahrzeugs nutzt. In den folgenden Abschnitten wird daher verstärkt auf Modelle eingegangen, die beschreiben, welche Informationen der Fahrer zur Querführung des Fahrzeugs heranzieht und wie diese Informationen das Verhalten des Fahrers beeinflussen können.

2.3.2 Die Querführung als visueller Kontrollprozess - Einfluss der visuellen Rückmeldung bei der Querführung

In einer Vielzahl von Studien wurde gezeigt, dass visuelle Informationen ein essentieller Bestandteil der von Donges (2012) beschriebenen Regelkreise sind (vgl. auch Chatziastros, 2003; Donges, 1978; Godthelp, 1985; Hildreth, Beusmans, Boer & Royden, 2000; McLean & Hoffmann, 1973; McRuer et al., 1977; Riemersma, 1981; Salvucci & Gray, 2004; Salvucci & Liu, 2002; Wallis, Chatziastros & Bülthoff, 2002; Wallis, Chatziastros, Tresilian & Tomasevic, 2007). Dabei stellt sich die Frage, wie der Fahrer visuelle Informationen nutzt und welche visuellen Informationen für Querführung des Fahrzeugs entscheidend sind.

Ebenso wie Donges (2012) gehen McRuer et al. (1977) von einem offenen und einem geschlossenen Regelkreis aus (siehe hierzu auch Einleitung von Kapitel 2.3). Dabei steuert der Fahrer die Querführung anhand der visuellen Informationen über den weiteren Straßenverlauf (open loop control), während der geschlossene Regelkreis (closed loop control) genutzt wird, um auftretende Fehler zu minimieren (vgl. McRuer et al., 1977). Im Falle des offenen Regelkreises spielen visuelle Informationen insbesondere für die Auswahl des entsprechenden Manövers unter Berücksichtigung der situativen Randbedingungen eine Rolle. Hinweise darauf liefern verschiedenen Studien, bei denen die visuelle Rückmeldung während der Ausführung bestimmter Lenkmanöver gezielt beeinflusst wurde (vgl. Godthelp, 1985; Hildreth et al., 2000; Wallis et al., 2002). Dabei konnte gezeigt werden, dass eine zeitweilige Unterbrechung der visuellen Rückmeldung von bis zu 1.5 s nur einen geringen Einfluss auf die Querführung hat (vgl. Godthelp, 1985; Hildreth et al., 2000). Allerdings wurde auch gezeigt, dass selbst geübte Fahrer nicht dazu in der Lage sind, komplexe Manöver, wie z. B. einen Spurwechsel, ohne visuelle Rückmeldung erfolgreich durchzuführen (vgl. Wallis et al., 2002). Wallis et al. (2002) gehen daher davon aus, dass die Querführung eines Fahrzeugs aus einer Kombination von open loop und closed loop control besteht, wobei eine Lenkbewegung zunächst im Rahmen einer open loop control initiiert und anschließend visuell überprüft wird (vgl. auch Wallis et al., 2007). McRuer et al. (1977) gehen ebenfalls davon aus, dass open loop control bei der Querführung nur in Kombination mit closed loop control auftritt, wobei open loop control in der ersten Phase der Reaktion gezeigt wird (vgl. McRuer et al., 1977, S. 386). Zusätzlich geben McRuer et al., 1977 wichtige Hinweise darauf, welche visuellen Informationen an der closed loop control beteiligt sein könnten. Innerhalb des geschlossenen Regelkreises, der von McRuer et al. (1977) auch als „*compensatory control subsystem*“ bezeichnet wird (vgl. McRuer et al., 1977, S. 383), hängt die Steuerung der Bewegungsrichtung von Abweichungen der Fahrtrichtung (engl. Heading vgl. hierzu auch McLean & Hoffmann, 1973) und der Spurposition ab (siehe Abbildung 2-14 und Abbildung 2-15).

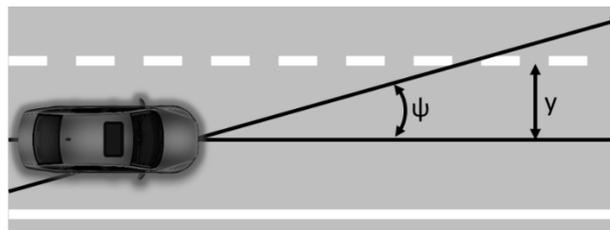


Abbildung 2-14: Einflussgrößen auf die Reaktion des Fahrers bei Störung der Querführung. Es wird angenommen, dass der Winkel der Fahrtrichtung des Fahrzeugs relativ zur Referenz ψ und die Spurposition des Fahrzeugs relativ zum Fahrstreifen y relevant für die Wahrnehmung von Störungen der Querführung und die Reaktion des Fahrers ist.

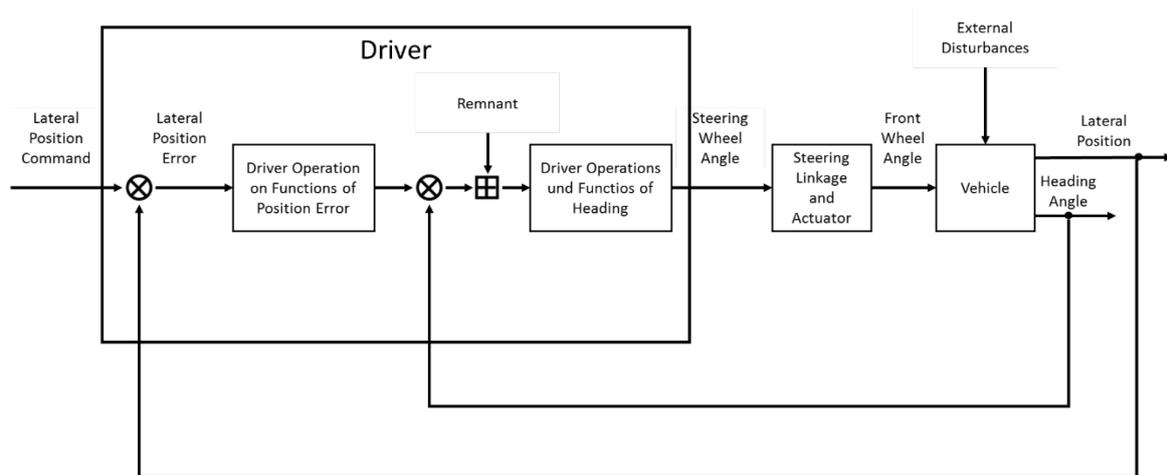


Abbildung 2-15: Modell des geschlossenen Regelkreises bei der Querführung des Fahrzeugs nach McRuer et al. (1977)

Mithilfe dieses Modells kann das Verhalten von Fahrern auf gerader Strecke beschrieben werden. Hierbei besteht die Hauptaufgabe des Fahrers darin, externe Störungen der Querführung auszugleichen (vgl. McRuer et al., 1977). Geht man davon aus, dass ein unerwarteter Eingriff in die Querführung eine externe Störung darstellt, bedeutet dies, dass die Reaktion des Fahrers von der wahrgenommenen Abweichung zur ursprünglich geplanten Fahrtrichtung und Spurposition abhängt. Dies setzt allerdings voraus, dass die Störung der Querführung zu einer für den Fahrer visuell wahrnehmbaren Abweichung der Fahrtrichtung und der Spurposition führt. Allerdings ist bisher noch nicht vollständig geklärt, wie der Fahrer diese Informationen erhält und ob der Fahrer möglicherweise nicht noch weitere visuelle Informationen heranzieht (vgl. hierzu auch McRuer et al., 1977; Wann & Land, 2000). Chatziastros (2003) kommt auf Basis von mehreren Untersuchungen zu dem Schluss, dass Lage und Orientierung der Seitenlinien die wichtigste Information für das Fahren darstellen (vgl. Chatziastros, 2003, S. 194). Allerdings konnte Chatziastros (2003) auch zeigen, dass der optische Fluss³ einen deutlichen Einfluss auf die wahrgenommene Fahrtrichtung (heading) des Fahrers hat und dass eine gezielte Manipulation des visuellen Flusses zu einem lateralen Versatz bei einer Fahraufgabe führen kann (vgl. Chatziastros, 2003).

Unabhängig von der Frage, welche visuellen Informationen der Fahrer tatsächlich für die Querführung des Fahrzeugs heranzieht, hat sich jedoch gezeigt, dass mithilfe der vorgeschlagenen Kombination aus open-loop und closed-loop control auf Basis der visuellen Wahrnehmung das Querführungsverhalten von Fahrern gut beschrieben werden kann. Damit ähnelt das beschriebene Modell stark den Modellen, die zur Beschreibung zielgerichteter Hand- oder Armbewegungen entwickelt wurden (z. B. Adams, 1971; Desmurget & Grafton, 2000). Auch hier wird von einem open-loop- und einem closed-loop-Anteil der Bewegungsteuerung ausgegangen. Die Bedeutung beider Regelanteile wurde auch hier in einer Vielzahl von Experimenten untersucht. Dabei wurde gezeigt, dass neben der visuellen Rückmeldung die Propriozeption einen wichtigen Beitrag zur erfolgreichen Bewegungsausführung liefert (vgl. Adams, 1971). Allerdings wird in den beschriebenen Fahrermodellen nicht näher auf die Rolle der propriozeptiven Wahrnehmung eingegangen. Verschiedene Studien geben jedoch Hinweise darauf,

³ Der Einfluss des optischen Flusses auf die visuelle Wahrnehmung wurde erstmals von Gibson beschrieben. Dabei ist die relative Bewegung zwischen Beobachter und der Umgebung von Bedeutung (vgl. Gibson, 1950; 1954)

dass der Fahrer diese Informationen auch zur Querführung des Fahrzeugs nutzt (vgl. Godthelp, 1985; Toffin, Reymond, Kemeny & Droulez, 2003) und dass eine Variation der haptischen Rückmeldung die Leistung des Fahrers beeinflussen kann. So konnte Godthelp (1985) zeigen, dass die Lenkgenauigkeit bei einer Querführungsaufgabe mit Rückmeldung einer Kraft am Lenkrad zunimmt. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen Toffin et al. (2003). In einer Simulatorstudie konnten sie zeigen, dass Fahrer ohne oder mit invertierter Rückmeldung einer Lenkkraft nicht dazu in der Lage sind, ihr Fahrzeug zu steuern (Toffin et al., 2003). Anhand dieser Ergebnisse ist davon auszugehen, dass die haptische Wahrnehmung eine wichtige Rolle bei der Querführung eines Fahrzeugs spielen kann. Dies könnte sich auch auf das Fahrerverhalten im Falle von unerwarteten Eingriffen in die Querführung auswirken, insbesondere bei Eingriffen mittels einer Lenkmomentüberlagerung. Diese führen zu einer Änderung der wahrgenommenen Kraft am Lenkrad. Möglicherweise wirkt sich diese wahrgenommene Krafteinwirkung ebenfalls auf das Verhalten der Fahrer aus. Daher wird im Folgenden näher auf Modelle eingegangen, die die propriozeptive bzw. haptische Wahrnehmung bei der Beschreibung des Fahrerverhaltens berücksichtigen.

2.3.3 Die Querführung als sensomotorischer Kontrollprozess -Einfluss der propriozeptiven Rückmeldung bei der Querführung

Auf Basis der vorgestellten Fahrerverhaltensmodelle ist anzunehmen, dass der Fahrer bei der Querführung als Regler innerhalb eines kybernetischen Regelkreises dargestellt werden kann (siehe Kapitel 2.3.1). Dabei beeinflusst die Strategie oder das gewählte Manöver die Ziele und Eigenschaften des Reglers. Die Rolle der visuellen Rückmeldung ist dabei offensichtlich und wurde in einer Vielzahl von Arbeiten hervorgehoben (vgl. Kapitel 2.3.2). Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass der Fahrer bei der Querführung ebenfalls auf weitere Informationen der propriozeptiven, taktilen, haptischen⁴, kinästhetischen und vestibulären Wahrnehmung zurückgreift (vgl. Buschardt, 2003; Harrer & Pfeffer, 2013c; Newberry et al., 2007; Pick & Cole, 2003; Pick, 2004; Schumann, 1994; Godthelp, 1985; Mehrabi, Sharif Razavian & McPhee, 2015; Schmidt, 2009; Toffin et al., 2003). Diese Informationen könnten entscheidend dazu beitragen, wie der Fahrer auf unerwartete Eingriffe eines Notausweichassistenten reagiert.

In der Literatur besteht Einigkeit darüber, dass die Vermittlung von Informationen mittels des Lenkmoments einen entscheidenden Einfluss auf die Wahrnehmung und das Lenkverhalten des Fahrers hat (vgl. Harrer & Pfeffer, 2013c; d; Mehrabi, Razavian & McPhee, 2013; Mehrabi et al., 2015; Pick & Cole, 2003; Pick, 2004; Pick & Cole, 2007; Schumann, 1994; Toffin et al., 2003). So sagen Harrer und Pfeffer (2013c): „Das Lenkradmoment ist neben den Fahrzeugreaktionen die wichtigste Größe zur Beeinflussung des Lenkgefühls eines Fahrzeugs“ (S. 33). Allerdings gibt es nur wenig Annahmen darüber, wie der Fahrer diese Information nutzt und welchen Einfluss sie auf das Verhalten des Fahrers hat (vgl. Pick, 2004).

Mit dem Ziel, die Rolle des Lenkmoments bei der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion besser zu verstehen, entwickelten Pick und Cole (2003) eine modellbasierte Annahme, bei der sensomotorische Regelungsprozesse innerhalb des Regelungsprozesses der Querführung berücksichtigt werden (siehe Abbildung 2-16). Grundlage dieses Modells sind adaptive Regelprozessmodelle, wie sie bereits von McRuer und Weir (1969) angenommen wurden (siehe auch McRuer et al., 1977; Michon, 1985; Reid, 1983). Ein ähnlicher Vorschlag wurde bereits von Hess (1978) und Hayhoe (1979) gemacht (siehe auch Reid, 1983). Vereinfacht wird dabei von einer hierarchischen Struktur zweier Regelkreise ausgegangen. Der äußere Regelkreis repräsentiert dabei den Regelungsprozess der Querführung, der primär auf der Interaktion des Fahrer-Fahrzeug-Systems mit der Umwelt basiert und z. B. anhand von visuellen Hinweisreizen angepasst werden kann (siehe Kapitel 2.3.2). Der innere Regelkreis repräsentiert hingegen einen sensomotorischen Regelungsprozess, der die Interaktion des Fahrers mit der Lenkung beschreibt.

⁴ Mit haptischer Wahrnehmung ist in der Regel eine Kombination aus propriozeptiver und taktiler Wahrnehmung gemeint (vgl. hierzu auch Buschardt, 2003).

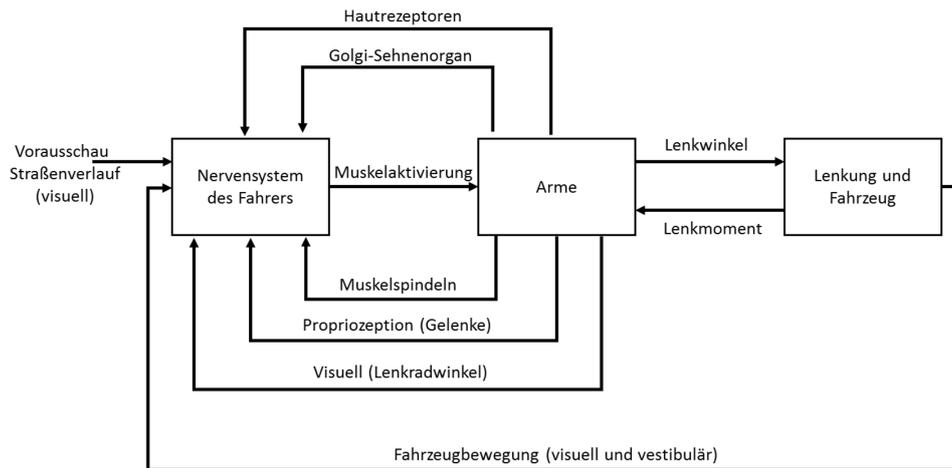


Abbildung 2-16. Modellhafte Annahme von Pick und Cole (2003) über die Beteiligung des neuromuskulären Systems beim Lenkvorgang (nach Pick & Cole, 2003).

Die Einbindung sensomotorischer Regelprozesse in das Verhaltensmodell, wie von Pick und Cole (2003) beschrieben, liefert damit eine Erklärungsgrundlage für die Rolle des Lenkmoments bei der Querführung. Auf Grundlage des Modells (vgl. Abbildung 2-16) kann davon ausgegangen werden, dass das resultierende Lenkmoment die Krafteinwirkung auf die Arme des Fahrers beeinflusst. Diese Krafteinwirkung beeinflusst wiederum Muskelänge und Muskelspannung in den beteiligten Muskeln. Die Veränderung der Muskelänge wird von den Muskelspindeln erfasst, während die Muskelspannung von den Golgi-Sehnenorganen erfasst wird. Weicht die Muskelänge und/oder die Muskelspannung in Folge eines Lenkmoments von der Vorgabe ab, führt dies zu einer Änderung der Muskelaktivierung mit dem Ziel, den ursprünglichen Zielwert wiederherzustellen. Stellt der Fahrer also einen bestimmten Lenkradwinkel her, um dem Verlauf der Straße zu folgen, resultiert dies in einer bestimmten Zielposition der beteiligten Körperglieder bzw. einer bestimmten Länge der beteiligten Muskeln. Wirkt nun ein Lenkmoment auf die Arme des Fahrers, sorgt dieser Regelprozess dafür, dass die ursprüngliche Lenkradposition so lange beibehalten wird, bis eine neue Lenkradposition vorgegeben wird.

Der beschriebene sensomotorische Regelprozess ähnelt damit dem Dehnungsreflex, der dafür sorgt, dass eine definierte Länge und/oder Spannung eines Muskels im Falle einer Störung beibehalten wird (siehe hierzu Birbaumer & Schmidt, 2006a; McMahan, 1984). Die Anpassung der Muskelaktivierung erfolgt – bei Vorgabe einer Zielposition – weitestgehend autonom. Das bedeutet, dass der sensomotorische Regelprozess zwar durch Vorgaben beeinflusst werden kann, aber dennoch einen eigenständigen Regelanteil besitzt. Die Vorgaben für diese Regelprozesse liefert mutmaßlich der visuelle Kontrollprozess der Querführung. Da das sensorische Feedback mit unterschiedlicher Verzögerung wahrgenommen und verarbeitet wird, abhängig davon, ob es sich um propriozeptive oder exterozeptive (z. B. visuell und vestibulär) Rückmeldungen handelt (vgl. hierzu auch Wargo et al., 1967), stützt dies die Annahme, dass es sich um hierarchisch strukturierte Regelkreise handelt. Dabei übernimmt der untergeordnete sensomotorische Regelkreis schnelle Korrekturaufgaben (siehe hierzu auch Powers, 1973a; b; 1978), während der visuelle Regelkreis für die Handlungsauswahl und die Kontrolle des Handlungserfolgs zuständig ist. Somit kann angenommen werden, dass der beschriebene sensomotorische Regelprozess ein weiterer Bestandteil der Kontroll- oder Stabilisierungsebene bei der Querführung ist (vgl. Donges, 1982; Janssen, 1979), der unterhalb des visuellen Regelprozesses anzusiedeln ist. Ist dies der Fall, könnten Verzögerungen bei der Reaktion auf berechnete Eingriffe beispielsweise die Folge unterschiedlicher Verarbeitungsgeschwindigkeiten der exterozeptiven und

propriozeptiven Wahrnehmung sein. Findet eine externe Störung des sensomotorischen Regelkreises statt (z. B. in Form eines Lenkmoments), erfolgt möglicherweise zunächst ein Stabilisierungsversuch auf sensomotorischer Ebene, bevor das Ergebnis des visuellen Kontrollprozesses berücksichtigt wird und eine Anpassung der Vorgabe für den sensomotorischen Regelprozess stattfindet.

In verschiedenen Arbeiten wird gezeigt, dass eine Berücksichtigung der beschriebenen sensomotorischen Regelprozesse und der speziellen Eigenschaften des neuromuskulären Systems dazu beitragen können, das Lenkverhalten von Fahrern besser zu modellieren (vgl. Pick & Cole, 2003; Pick, 2004; Pick & Cole, 2006; Pick & Cole, 2007). Einen ähnlichen Ansatz wie Pick und Cole verfolgten Mehrabi et al. (2015) (vgl. auch Mehrabi et al., 2013). Sie entwickelten ein Simulationsmodell mit drei hierarchisch strukturierten Ebenen, mit dessen Hilfe das Lenkverhalten von Fahrern z. B. in Folge von externen Lenkstörungen vorhergesagt werden soll. Ein ähnliches Erklärungsmodell mit drei hierarchisch strukturierten Ebenen wurde bereits 1973 von Powers vorgeschlagen (siehe hierzu auch Kapitel 2.3). Die Autoren gehen davon aus, dass der monosynaptische Dehnungsreflex einen wichtigen Anteil bei der Reaktion auf externe Störungen einnimmt. Mithilfe eines simulationsbasierten Ansatzes ermittelten sie, dass externe Störungen (in Form eines Lenkmomentimpulses) wahrscheinlich nicht vor 300 ms identifiziert werden. Diese Verzögerung der Reaktion des Fahrers beruht ihrer Aussage nach auf der Latenz der Informationsübertragung und -verarbeitung in den sensomotorischen Arealen des Gehirns (vgl. Mehrabi et al., 2015, S.13; siehe hierzu auch Wargo et al., 1967). Die von Mehrabi et al. (2015) ermittelte Latenz bis zur Reaktion des Fahrers (300 ms) entspricht damit annähernd den Ergebnissen der Studien zur Reaktionszeit auf fehlerhafte Lenkeingriffe (150-250 ms; vgl. Neukum & Krüger, 2003; Neukum et al., 2010a).

Insgesamt weist dies darauf hin, dass die für die Querführung eines Fahrzeugs erforderlichen motorischen Prozesse mit zielgerichteten menschlichen Bewegungen verglichen werden können. Dabei liefert der visuelle Regelkreis möglicherweise zunächst ein top-down gesteuertes Regelziel mittels eines feedforwards für den sensomotorischen Kontrollprozess. Anschließend wird auf sensomotorischer Ebene versucht, das Regelziel umzusetzen. Dies geschieht innerhalb eines in sich geschlossenen sensomotorischen Regelkreises. Dabei kann das Handlungsziel des Fahrers allerdings auch weiterhin durch top-down gesteuerte Regelziele beeinflusst werden, die aus dem visuellen Regelkreis resultieren. Berücksichtigt man diese Erkenntnisse zum Einfluss der sensomotorischen Regelung bei der Querführung sowie die hierarchische Struktur der Fahraufgabe, kann ein verallgemeinertes Modell aufgestellt werden, das ermöglicht, Vorhersagen über den Einfluss experimenteller Variationen zu erstellen. Im folgenden Abschnitt werden daher wichtige Erkenntnisse zusammengefasst und ein vereinfachtes Verhaltensmodell vorgestellt, das diese Erkenntnisse berücksichtigt.

3 Spezifizierung des Verhaltensmodells

Aus den beschriebenen Verhaltensmodellen kann abgeleitet werden, dass das Querführungsverhalten der Fahrer hierarchisch strukturiert ist. Das Verhalten lässt sich dabei verschiedenen Ebenen zuordnen, die für unterschiedliche Teilaufgaben der Querführung von Bedeutung sind. Zusätzlich unterscheiden sich die Ebenen dahingehend, wieviel Zeit der Fahrer zur Erledigung der zugehörigen Aufgaben benötigt und ob er bei der Entscheidung auf vorhandenes Wissen oder bestehende Reiz-Reaktions-Schemata zurückgreifen kann (vgl. Kapitel 2.3).

Auf den obersten Ebenen sind langfristige Regelprozesse angesiedelt, bei denen insbesondere die Situationsanalyse und die Handlungsentscheidung eine wichtige Rolle spielen (vgl. Kapitel 2.3.1). Im Hinblick auf Gefahrensituationen bedeutet dies, dass der Fahrer die Situation und die relevanten situativen Faktoren zunächst erkennen und bewerten muss, um sich für eine top-down gesteuerte Handlung wie z. B. Bremsen oder Ausweichen zu entscheiden. Daher wird vermutet, dass dieser Prozess sehr zeitintensiv ist (vgl. hierzu auch Janssen, 1979; Michon, 1985; Rasmussen, 1983), da der Fahrer zumindest theoretisch zunächst erkennen muss, ob der erforderliche Platz vorhanden ist und keine anderen Verkehrsteilnehmer gefährdet werden. Hierbei sind auch das Wissen und die Erfahrung des Fahrers von Bedeutung. Weiß der Fahrer nicht, dass Ausweichen in dieser Situation möglich wäre, kann er dies möglicherweise nicht bei der Entscheidung für eine Handlung berücksichtigen. Im Modell von Rasmussen (1983) ist dies der Ebene des wissensbasierten Verhaltens oder des regelbasierten Verhaltens zugeordnet, während es in den spezifischen Fahrerverhaltensmodellen der Bahnführungs- bzw. der taktischen Ebene des Fahrerverhaltens zugeordnet wird (vgl. Donges, 1982; Janssen, 1979; Michon, 1985). Aufgrund der Beschaffenheit der Fahraufgabe ist davon auszugehen, dass die visuelle Wahrnehmung bei der Handlungsentscheidung eine entscheidende Rolle hat, indem sie dem Fahrer die erforderlichen Informationen für die Reaktionswahl zur Verfügung stellt (vgl. Kapitel 2.3.2).

Entscheidet sich der Fahrer für eine Ausweichreaktion, erfolgt die Umsetzung und Kontrolle der Handlung unter Beteiligung der Stabilisierungs- oder Kontrollebene. Für die Ausführung der Lenkbewegung sind zusätzlich sensomotorische Kontroll- und Regelprozesse erforderlich, die von dem Handlungsziel des Fahrers beeinflusst werden. Innerhalb dieser sensomotorischen Kontroll- und Regelprozesse spielt die haptische Rückmeldung am Lenkrad möglicherweise eine entscheidende Rolle, da sie dem Fahrer zusätzlich zur visuellen Rückmeldung Informationen über die Handlungsausführung liefert (vgl. Kapitel 2.3.3). Damit sind die sensomotorischen Kontrollprozesse wahrscheinlich ein weiterer Bestandteil der Stabilisierungs- und Kontrollebene und können somit das Querführungsverhalten beeinflussen. Es wird angenommen, dass die Regelung auf dieser Ebene mithilfe bereits bestehender Reiz-Reaktions-Schemata erfolgt, was es dem Fahrer ermöglicht sehr schnell und ohne die Beteiligung der visuellen Rückmeldung auf Abweichungen von seinem Regelziel zu reagieren. Aufgrund der schnelleren Verarbeitung der Informationen, welche möglicherweise im Vergleich zur übergeordneten Ebene keine zusätzliche Aufmerksamkeitszuwendung erfordert, erfolgen die Reaktionen auf Störungen quasi-automatisch bzw. reflexartig. Das Regelziel wird dabei durch die übergeordnete Ebene vorgegeben, während die Überprüfung, ob das Regelziel erreicht wurde, innerhalb eines untergeordneten, geschlossenen Regelkreises erfolgt.

Im Falle eines vom Fahrer unerwarteten Eingriffs in die Querführung mit haptischer Rückmeldung am Lenkrad könnte dies dazu führen, dass die von der Erwartung des Fahrers abweichende Rückmeldung als Störung der Handlungsausführung wahrgenommen wird. Dabei ist, ähnlich wie bei Zielbewegungen der Hand, keine visuelle Rückmeldung erforderlich, da die Abweichung durch den Vergleich mit dem ursprünglichen Regelziel der sensomotorischen Regelung (Feedforward) festgestellt wird (vgl. Kapitel 2.3). In Folge dessen könnte der Fahrer zunächst reflexartig auf die haptische Rückmeldung am Lenkrad reagieren. Für die folgende Anpassung des Regelziels der sensomotorischen Regelung ist mutmaßlich die Beteiligung der visuellen Rückmeldung erforderlich. Hierbei muss der Fahrer die vorliegende Situation analysieren und darauf basierend entscheiden, welche Handlung er vornimmt (z. B. dem Lenkeingriff folgen und ausweichen oder den Lenkeingriff übersteuern), was mehr Zeit erfordert. Unter der Annahme, dass sowohl die visuelle als auch die motorische Regelung Teil einer hierarchischen Regelstruktur sind und parallel ablaufen, könnte dies zu widersprüchlichen Reaktionsmustern führen, bei denen der Fahrer zunächst versucht, einen Lenkeingriff zu übersteuern und erst später beginnt, diesen aufzunehmen. Ursache hierfür ist möglicherweise die geringere Verarbeitungsgeschwindigkeit der visuellen im Vergleich zu sensomotorischen Regelung.

Versucht man die angenommene hierarchische Struktur sowie die relevanten Regelkreise grafisch zu veranschaulichen, ergibt sich folgendes Modell (vgl. Abbildung 3-1).

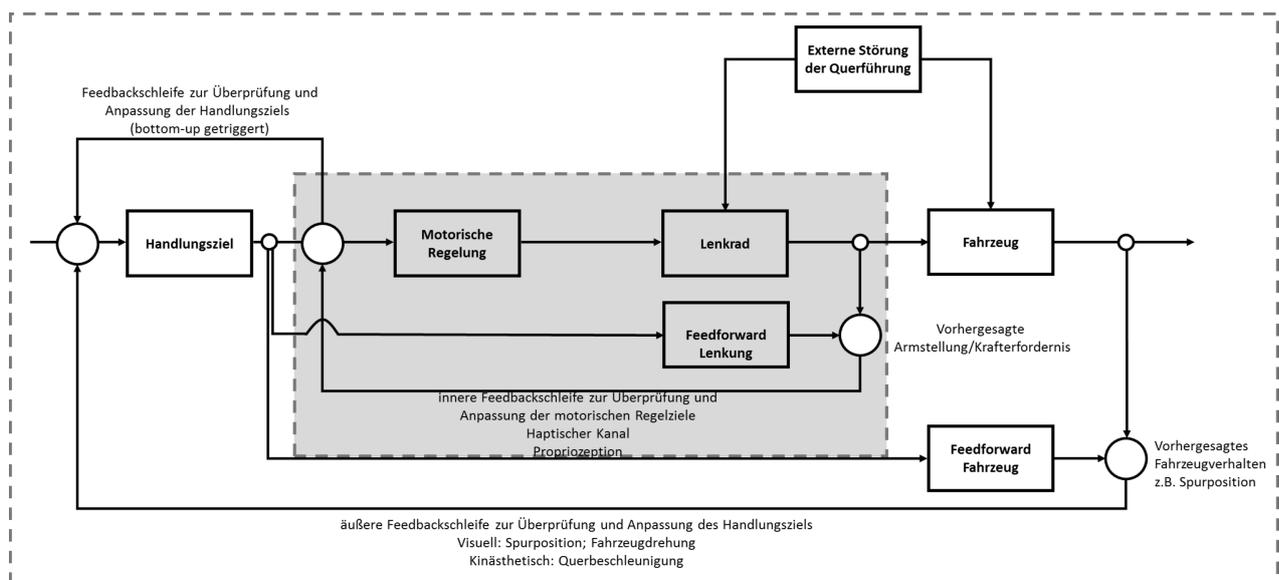


Abbildung 3-1: Modell der hierarchischen Struktur und der relevanten Regelkreise zur Beschreibung des Fahrerhaltens im Fall externer Störungen der Querführung. Der innere, sensomotorische Regelkreis (grau hinterlegt) ist der Stabilisierungs- und Kontrollebene zuzuordnen und kann sehr schnell, ohne die Beteiligung visueller Informationen, auf externe Störungen reagieren. Der äußere, primär visuelle Regelkreis ist der Wissens- bzw. regelbasierten Ebene zuzuordnen und erfordert mehr Zeit zur Analyse der Situation. Innerhalb des Modells wird die unterschiedliche Verarbeitungsgeschwindigkeit der beiden Regelkreise durch die Länge der beiden Feedbackschleifen dargestellt. Die hierarchische Struktur der beiden Regelkreise wird durch die Verschachtelung verdeutlicht.

Dabei wird die hierarchische Struktur durch die Einbettung des sensomotorischen in den visuellen Regelkreis verdeutlicht. Die unterschiedliche Verarbeitungszeit der beiden Regelkreise wird durch die Länge der dargestellten Feedbackschleifen veranschaulicht.

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass dieses Modell nur einen Ausschnitt der Fahraufgabe darstellt, der das Fahrerverhalten insbesondere im Fall eines externen Einflusses auf die Querführung vereinfacht beschreiben soll. Dazu enthält es Bestandteile, die sich sowohl der der Stabilisierungs- oder Kontrollebene zuordnen lassen, als auch der Bahnführungs- bzw. taktischen Ebene. Der innere, sensomotorische Regelkreis ist dabei vor allem der Stabilisierungs- und Kontrollebene zuzuordnen, während der äußere, visuelle Regelkreis eher der Bahnführungsebene oder taktischen Ebene zugeordnet werden kann (vgl. Abschnitt 2.3.1).

Im Folgenden werden die angenommenen Mechanismen des Kontrollprozesses und die Wechselwirkung des inneren und äußeren Regelkreises beispielhaft beschrieben.

Die Handlungsziele werden in Form eines Feedforwards der zu erwartenden Sinneseindrücke abgeleitet. Dabei bezieht sich das visuelle und kinästhetische Feedforward insbesondere auf Sinneseindrücke, die das erwartete Fahrzeugverhalten widerspiegeln (Feedforward Fahrzeug), wie z. B. die visuelle Wahrnehmung der Position des Fahrzeugs in der Fahrspur und der Fahrtrichtung (vgl. Abschnitt 2.3.2) oder die kinästhetische Wahrnehmung der resultierenden Querbewegung des Fahrzeugs. Das motorische Feedforward bezieht sich hingegen vorwiegend auf Sinneseindrücke, die das erwartete Verhalten des Lenkrads widerspiegeln (Feedforward Lenkung), wie z. B. die Propriozeption (vgl. Abschnitt 2.3.3). Wird die Querführung extern beeinflusst (z. B. in Form eines Ausweichingriffs), kann sich dieser Einfluss sowohl auf das Verhalten des Lenkrads auswirken, als auch auf das Verhalten des Fahrzeugs. Dies führt zu einer Abweichung der erwarteten Sinneseindrücke, was mittels verschiedener Feedbackschleifen zurückgemeldet wird. Aufgrund der mutmaßlich schnelleren Verarbeitung innerhalb des motorischen Regelkreises kann dies bereits zu einer motorischen Reaktion auf die Abweichung führen, bevor sich die Störung auf das Verhalten des Fahrzeugs auswirkt oder die entsprechenden visuellen Sinneseindrücke verarbeitet werden können (vgl. Abschnitt 2.3.3). Eine Anpassung des Handlungsziels kann jedoch nur erfolgen, wenn die Abweichung des Fahrzeugverhaltens visuell überprüft wurde, was mehr Zeit erfordert als die Verarbeitung der haptischen Informationen.

Im Folgenden werden anhand des Modells verschiedene Annahmen formuliert. Diese werden später im Rahmen verschiedener Studien aufgegriffen und überprüft.

3.1 Annahmen

3.1.1 Einfluss des Handlungsziels

Es wird angenommen, dass das Handlungsziel des Fahrers von der Bahnführungs- oder taktischen Ebene vorgegeben wird und in Form eines Feedforwards, sowohl im sensomotorischen als auch im visuellen Regelkreis, berücksichtigt wird (vgl. Kapitel 2.3). Daher spielt das Handlungsziel der Fahrer eine entscheidende Rolle für ihr Reaktionsmuster, da es die Zielgrößen für die Kontrollprozesse vorgibt. Das kann dazu führen, dass Eingriffe in die Querführung in Abhängigkeit der Situation unterschiedliche Handlungen vom Fahrer erfordern um das Handlungsziel zu erreichen. Im Folgenden werden dazu beispielhaft Situationen mit nicht situationsgerechten (unberechtigten) und situationsgerechten (berechtigten) Eingriffen beschrieben. Im Fokus steht dabei die Annahme, dass sich die sensomotorischen Kontrollprozesse in Abhängigkeit vom vorliegenden Handlungsziel sowohl positiv als auch negativ auf das Verhalten des Fahrers auswirken können.

Im Falle eines nicht situationsgerechten oder fehlerhaften Eingriffs in die Querführung wird erwartet, dass der Fahrer versucht, diese zu unterbinden, da die Situation keine Ausweichbewegung erfordert (vgl. Kapitel 2.2.3). Der Einfluss sensomotorischer Kontrollprozesse auf der Stabilisierungs- oder Kontrollebene ist in diesem Fall wahrscheinlich nicht von Nachteil, da das Handlungsziel des Fahrers mit der Reaktion der sensomotorischen Kontrollprozesse auf die wahrgenommene Abweichung übereinstimmen sollte. Dies führt mutmaßlich zu der in Studien beobachteten schnellen Reaktion des Fahrers auf fehlerhafte Eingriffe in die Querführung mittels einer Lenkmomentüberlagerung (vgl. Abschnitt Kapitel 2.2.3).

Im Falle eines situationsgerechten Eingriffs in die Querführung, der den Fahrer vor einer bevorstehenden Kollision schützen soll, wird erwartet, dass der Fahrer versucht, diesen Eingriff aufzunehmen. Hierbei könnte die schnellere Verarbeitung innerhalb des motorischen Regelkreises jedoch von Nachteil sein, da das übergeordnete Handlungsziel des Fahrers erst nach der Reaktion der sensomotorischen Kontrollprozesse angepasst wird. Dies könnte dazu führen, dass das Reaktionsmuster zumindest zu Beginn dem Reaktionsmuster im Falle eines unberechtigten Eingriffs ähnelt, was eine mögliche Erklärung für die schlechte Wirksamkeit berechtigter Eingriffe sein könnte (vgl. Kapitel 2.2.4). In Fällen, in denen die Fahrer ihr Handlungsziel bereits vor Beginn der Reaktion der sensomotorischen Kontrollprozesse anpassen konnten, sind hingegen keine oder zumindest abgeschwächte kompensatorischen Reaktionsmuster zu erwarten.

Die Betrachtung von sowohl situationsgerechten (berechtigten) als auch nicht situationsgerechten (fehlerhaften) Eingriffen erlaubt es daher, das übergeordnete Handlungsziel des Fahrers auf Bahnführungs- und taktischer Ebene zu beeinflussen. Durch den Vergleich kann untersucht werden, welchen Einfluss das übergeordnete Handlungsziel des Fahrers auf das Reaktionsmuster hat, oder ob es sich um automatisch ablaufende Prozesse handelt, die durch die haptische oder visuelle Rückmeldung ausgelöst werden. Zusätzlich können daraus sowohl Rückschlüsse auf die Wirksamkeit als auch die Kontrollierbarkeit der untersuchten Eingriffe gezogen werden.

Des Weiteren könnte versucht werden, das Handlungsziel des Fahrers vor Beginn des Eingriffs zu beeinflussen. Hierzu könnten beispielsweise Warnungen oder Lenkempfehlungen (vgl. Kapitel 2.2.4.1) eingesetzt werden, die den Fahrer bei der Reaktionswahl unterstützen.

Hat dies einen positiven Einfluss auf die Wirksamkeit berechtigter Eingriffe, ist dies ein Hinweis auf den Einfluss des übergeordneten Handlungsziels auf das Reaktionsmuster des Fahrers.

3.1.2 Einfluss der haptischen Rückmeldung, der Eingriffscharakteristik und der Aktoren

Die Wahl der Aktoren und die generelle Gestaltung der Eingriffe hat maßgeblich Einfluss auf die Rückmeldung, die der Fahrer im Falle eines Eingriffs erhält. Die Wahl des Aktors kann beeinflussen, welche Informationen der Fahrer über den Eingriff erhält (vgl. Kapitel 2.2.1). Eingriffe mittels einer Lenkmomentüberlagerung erzeugen beispielsweise ein eindeutiges haptisches Feedback am Lenkrad, während einseitige Bremsungen oder Eingriffe mittels Steer-by-Wire (je nach Auslegung der Steer-by-Wire-Funktionalität) dies nicht tun.

Durch verschiedene Eingriffscharakteristiken bei Eingriffen mit einer Lenkmomentüberlagerung kann die haptische Rückmeldung beispielsweise hinsichtlich der Stärke, Dauer oder der Aufbaugeschwindigkeit variiert werden (vgl. Kapitel 2.2.2 und 2.2.3). Zeigt sich hier ein maßgeblicher Einfluss auf das Reaktionsmuster der Fahrer, könnte dies ebenfalls ein Hinweis für die Rolle sensomotorischer Kontrollprozesse bei der Reaktion auf Eingriffe in die Querführung sein. Sich langsam aufbauende Eingriffe führen beispielsweise zu einer sich kontinuierlich ändernden haptischen Rückmeldung. Es wird angenommen, dass auch innerhalb der sensomotorischen Regelung eine kontinuierliche Anpassung erfolgt, um auf Änderungen reagieren zu können. Erst wenn der Aufbau des Lenkmoments abgeschlossen ist, ist keine Anpassung mehr erforderlich und die sensomotorische Regelung kann einen stabilen Zustand erreichen, bei der das sensomotorische Feedback nicht mehr von dem erwarteten Feedback abweicht. Möglicherweise interferiert diese kontinuierliche Anpassung der sensomotorischen Regelung mit der Anpassung des Handlungsziels und verzögert so die Reaktion des Fahrers auf berechtigte oder unberechtigte Eingriffe. Dies würde auf eine wechselseitige Interaktion untergeordneter und übergeordneter Regelungsprozesse hindeuten, wobei quasi-automatisch ablaufende sensomotorische Prozesse in Folge von unerwarteten Änderungen der haptischen Rückmeldung die top-down gesteuerte Verhaltensanpassung beeinflussen.

Zusätzlich könnten durch den Vergleich verschiedener Aktoren, wie z. B. Steer-by-Wire oder einseitiges Bremsen mit einer Lenkmomentüberlagerung, weitere Rückschlüsse auf den Einfluss der sensomotorischen Regelprozesse gezogen werden. Führen Eingriffe mit haptischer Rückmeldung zu schnelleren Reaktionen der Fahrer auf berechtigte und unberechtigte Eingriffe, deutet dies auf den Einfluss sensomotorischer Regelprozesse bei der Reaktion auf Eingriffe in die Querführung hin. Ursache hierfür ist möglicherweise eine schnellere Verarbeitung, da durch die Abweichung des erwarteten sensomotorischen Feedbacks auch ein top-down gesteuerter Kontrollprozess ausgelöst wird. Werden hingegen auch ohne haptische Rückmeldung der Eingriffe am Lenkrad ähnlich schnelle Reaktionen beobachtet, deutet dies darauf hin, dass andere Informationen, wie z. B. die visuelle Wahrnehmung, entscheidend für das Reaktionsmuster der Fahrer sind.

3.1.3 Einfluss der visuellen Wahrnehmung

Anhand des in dieser Arbeit vorgeschlagenen Verhaltensmodells kann davon ausgegangen werden, dass die visuelle Wahrnehmung entscheidend für die top-down gesteuerte Anpassung des Handlungsziels ist (siehe hierzu auch Abschnitt 2.3.2).

Erfolgt ein für den Fahrer unerwarteter, aber berechtigter Eingriff in die Querführung mit haptischer Rückmeldung, führt dies mutmaßlich zunächst zu einer haptisch getriggerten Gegenreaktion des Fahrers. Erst wenn der Fahrer die Gelegenheit hatte, die Situation zu analysieren, kann ein neues Handlungsziel vorgegeben und die haptisch getriggerte Gegenreaktion beendet werden. Wird die visuelle Rückmeldung jedoch verzögert, z. B. in Form einer visuellen Ablenkung des Fahrers, sollte dies zu einer Verzögerung bei der Handlungsentscheidung und damit auch zu einer Verzögerung bei der Fahrerreaktion führen. Dies sollte sich anhand des zeitlichen Lenkreaktionsmusters nachweisen lassen. Kann dies experimentell nachgewiesen werden, ist das ein Hinweis auf den Einfluss der visuellen Wahrnehmung für die Handlungsentscheidung des Fahrers.

Betrachtet man zusätzlich auch fehlerhafte Eingriffe, können daraus auch Rückschlüsse auf den Einfluss sensomotorischer Kontrollprozesse gezogen werden. Im Falle eines fehlerhaften Eingriffs sollte die visuelle Ablenkung keine Auswirkungen auf das Reaktionsmuster haben, da die initiale Gegenreaktion wahrscheinlich überwiegend durch die haptische Rückmeldung getriggert wird und keine Beteiligung visueller Kontrollprozesse erfordert.

3.2 Zusammenfassung: Spezifizierung des Verhaltensmodells

Anhand des in dieser Arbeit spezifizierten Verhaltensmodells wurden verschiedene Annahmen bezüglich der Auswirkungen von automatischen Eingriffen in die Querführung abgeleitet. Im Fokus steht dabei der Einfluss der haptischen Rückmeldung auf das Verhalten der Fahrer, welche bei Eingriffen mittels einer Lenkmomentüberlagerung auftritt. Im Rahmen dieser Arbeit soll überprüft werden, ob sich diese Annahmen bestätigen lassen. Dazu wird das zeitliche Muster des Lenkverhaltens der Fahrer in Folge von berechtigten und unberechtigten Eingriffen analysiert. Im folgenden Kapitel wird zunächst die allgemeine Untersuchungsmethodik beschrieben. Anschließend werden insgesamt sieben verschiedene Studien vorgestellt, mit denen die Annahmen exemplarisch überprüft wurden.

Studie I (Kapitel 5) befasst sich mit der Frage, wie lange Fahrer unter idealen Bedingungen benötigen um visuelle Informationen zu verarbeiten und eine Lenkreaktion zu initiieren. Die resultierenden Ergebnisse sollen insbesondere der Bestimmung der Verarbeitungsgeschwindigkeit des äußeren, visuellen Regelkreises im Verhaltensmodell dienen (siehe Abbildung 3-2). Das bedeutet, dass anhand dieser Studie abgeschätzt werden kann, wie lange es dauert, bis der Fahrer die Umweltreize wahrgenommen hat, eine Handlungsentscheidung trifft und beginnt die Handlung auszuführen. Damit liefert diese Studie eine wichtige Grundlage um abschätzen zu können, ob sich automatische Lenkeingriffe positiv oder negativ auf die Verarbeitungsgeschwindigkeit auswirken.

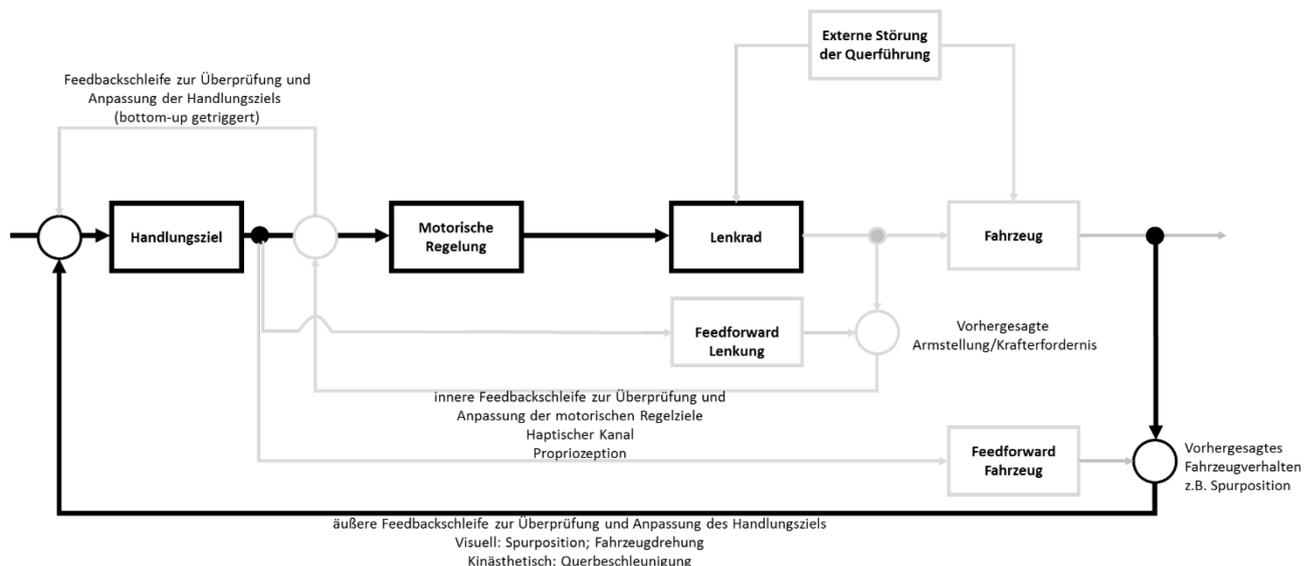


Abbildung 3-2: Der Fokus von Studie I liegt darauf zu ermitteln, wie lange der Fahrer benötigt, um allein anhand von visuellen Informationen sein Handlungsziel anzupassen und die geforderte Lenkreaktion zu initiieren. Im Fokus steht dabei die äußere, visuelle Feedbackschleife sowie die Anpassung des Handlungsziels und die Initiierung einer Lenkbewegung (hier schwarz hervorgehoben).

Studie II (Kapitel 6) beschäftigt sich mit der Frage, ob die Gestaltung einer diskreten haptischen Rückmeldung am Lenkrad einen Einfluss auf die Verarbeitungsgeschwindigkeit und das Reaktionsmuster der Fahrer hat. Konkret soll dabei überprüft werden, wie sich die Gestaltung einer gerichteten Lenkempfehlung in Fällen auswirkt, in denen eine Lenkreaktion erforderlich ist, im Vergleich mit der Auswirkung in Fällen, in denen keine Lenkreaktion erforderlich ist. Dadurch soll auch überprüft werden, ob der Fahrer dabei Informationen aus der Umwelt berücksichtigen und in Folge dessen seine Reaktionen anpassen kann. Ziel ist es, dadurch die Wechselwirkung zwischen dem angenommenen sensomotorischen und visuellen Regelkreis genauer zu untersuchen, wie zum Beispiel die Annahme, dass haptische Informationen schneller verarbeitet werden und ggf. automatisch ablaufende Reaktionsmuster triggern (siehe Abbildung 3-3).

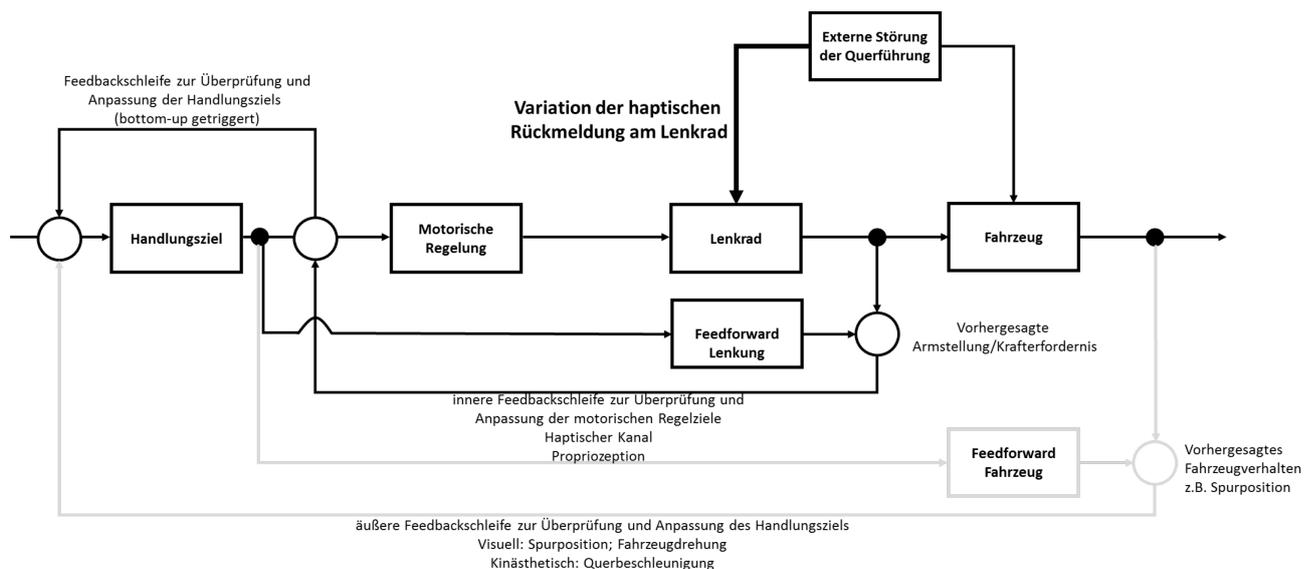


Abbildung 3-3: In Studie II wird die Art und Weise, wie sich der Eingriff am Lenkrad bemerkbar macht, durch die Gestaltung der haptischen Rückmeldung variiert. Dabei wird angenommen, dass der Eingriff eine externe Störung der Querführung darstellt, welche sich insbesondere auf den sensomotorischen Kontrollprozess auswirkt. Zusätzlich wird durch die Situationsgestaltung versucht das Handlungsziel des Fahrers zu beeinflussen. Dadurch soll überprüft werden, ob das Verhalten der Fahrer eine Folge automatisch getriggelter Reaktionsmuster ist oder durch übergeordnete Handlungsziele top-down beeinflusst werden kann. Die relevanten Bestandteile des Modells sind schwarz hervorgehoben.

Studie III (Kapitel 7) geht der Frage nach, ob unerwartete automatische Eingriffe in die Lenkung vergleichbare Auswirkungen haben wie gerichtete Lenkempfehlungen. Werden ähnliche Wechselwirkungen wie in Studie II beobachtet, wäre dies ein Hinweis darauf, dass Fahrer mehr Zeit benötigen um die Situation zu analysieren und ihr Handlungsziel an die vorliegende Situation anzupassen. Des Weiteren soll überprüft werden, wie sich das wiederholte Erleben auf das Reaktionsmuster der Fahrer auswirkt. Dadurch soll überprüft werden, ob Fahrer lernen können ihr Reaktionsmuster an die vorliegende Situation anzupassen oder ob es sich tatsächlich um automatisch ablaufende, haptisch getriggerte Reaktionsmuster handelt.

Mithilfe verschiedener Warnungen wird in Studie IV (Kapitel 8) versucht, den Fahrern mehr Zeit zur Analyse der Situation zu verschaffen. Dadurch soll einerseits überprüft werden, ob Fahrer die zusätzliche Zeit nutzen können um ihr Handlungsziel an die entsprechende Situation anzupassen.

Andererseits soll der Frage nachgegangen werden, ob haptische Warnungen möglicherweise zu einer Verzögerung der Handlungsentscheidung führen. Dies würde auf eine mögliche Interferenz zwischen der Reaktion auf die haptische Warnung und der erforderlichen Lenkreaktion zur Vermeidung einer Kollision hindeuten. Insgesamt soll dadurch genauer auf die Wechselwirkung zwischen den möglicherweise bottom-up getriggerten Reaktionsmustern und der top-down gesteuerten Anpassung des Handlungsziels eingegangen werden (siehe Abbildung 3-4).

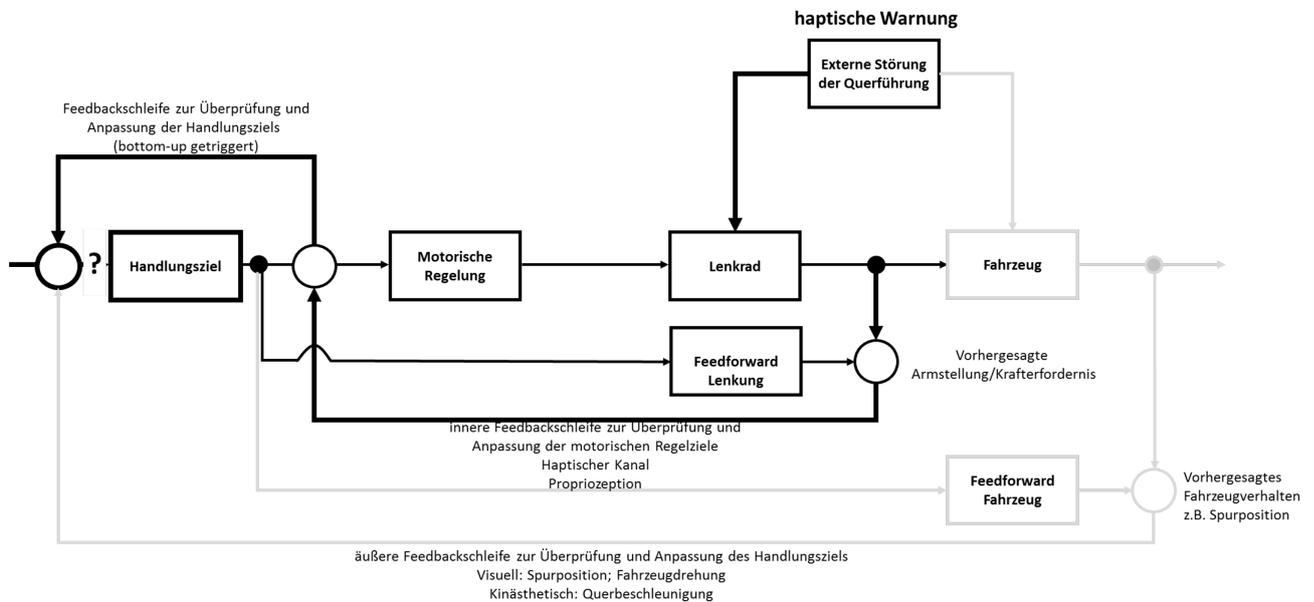


Abbildung 3-4: In Studie IV soll überprüft werden ob unterschiedliche, dem Eingriff vorgelagerte Warnungen den Fahrer bei der rechtzeitigen Anpassung des Handlungsziels unterstützen oder die Anpassung des Handlungsziels verzögern. Dabei wird angenommen, dass insbesondere haptische Warnungen als externe Störung der Querführung wahrgenommen werden. Mithilfe der Studie soll genauer auf die Auswirkungen der Warnungen auf den sensomotorischen Kontrollprozess sowie die Wechselwirkung zwischen den bottom-up getriggerten, automatisch ablaufenden Reaktionen und der top-down gesteuerten Anpassung des Handlungsziels eingegangen werden. Die relevanten Anteile des Verhaltensmodells sind schwarz hervorgehoben.

In Studie V (Kapitel 9) soll der Anteil des visuellen Regelkreises und der Anteil der sensomotorischen Kontrollprozesse an der Reaktion der Fahrer auf unerwartete, automatische Ausweichengriffe genauer betrachtet werden. Mithilfe einer visuellen Ablenkung des Fahrers wurde dazu eine Bedingung geschaffen, in welcher der Fahrer verzögert visuelle Rückmeldung über die Situation erhält (siehe Abbildung 3-5). Dadurch soll überprüft werden, welche Bedeutung die visuelle Regelung für das Auftreten bestimmter Reaktionsmuster hat oder ob diese durch die angenommenen sensomotorischen Kontrollprozesse zustande kommen. Des Weiteren soll überprüft werden, ob eine visuelle Ablenkung zu einer Verzögerung der Handlungsentscheidung des Fahrers führt.

|Spezifizierung des Verhaltensmodells

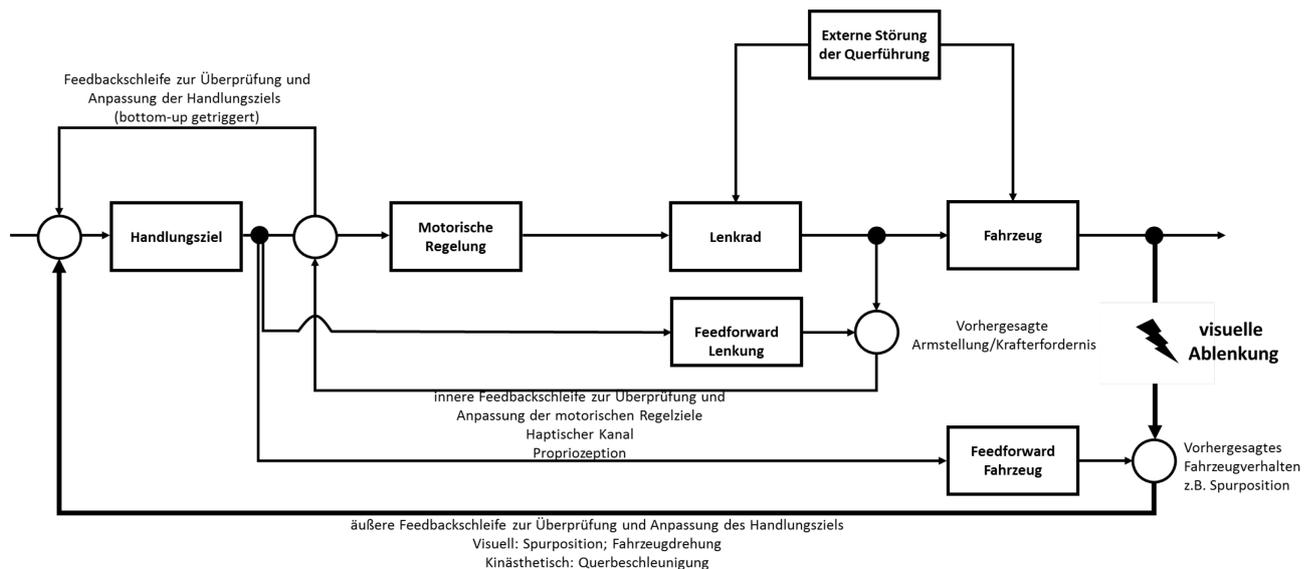


Abbildung 3-5: In Studie V soll durch eine visuelle Ablenkung des Fahrers die Verarbeitung visueller Informationen, welche zur Anpassung des Handlungsziels benötigt werden, verzögert werden (dargestellt durch die unterbrochene Feedbackschleife). Dadurch kann der Fahrer (mutmaßlich) zunächst nur auf Informationen der inneren Feedbackschleife zurückgreifen. Insgesamt soll dadurch verdeutlicht werden, welchen Einfluss insbesondere der visuelle Kontrollprozess auf das resultierende Verhalten des Fahrers im Falle eines Eingriffs in die Querführung hat.

Studie VI (Kapitel 10) ergänzt Studie V um die Frage, welche Auswirkungen die Handhaltung des Fahrers auf die auftretenden Reaktionsmuster hat. Durch den Vergleich zwischen einhändiger und zweihändiger Lenkradhaltung soll dabei überprüft werden, ob sich die in Studie V beobachteten Reaktionsmuster durch die Handhaltung oder die Wechselwirkung zwischen sensomotorischen und visuellen Kontrollprozessen erklären lassen.

In Studie VII (Kapitel 11) wird ein explorativer Ansatz vorgestellt, bei dem automatische Ausweichengriffe mit und ohne haptische Rückmeldung am Lenkrad realisiert wurden (siehe Abbildung 3-6). Durch den Vergleich der Reaktionsmuster sollen Hinweise darauf identifiziert werden, wie sich die angenommenen sensomotorischen Kontrollprozesse auswirken. Im Fokus steht dabei insbesondere die Frage, ob sie sich negativ oder positiv auf die Reaktionszeit der Fahrer auswirken. Finden sich keine Unterschiede im Reaktionsmuster wäre dies ein Hinweis darauf, dass der Einfluss der sensomotorischen Kontrollprozesse im Vergleich zum Einfluss der visuellen Kontrollprozesse deutlich geringer ausfällt.

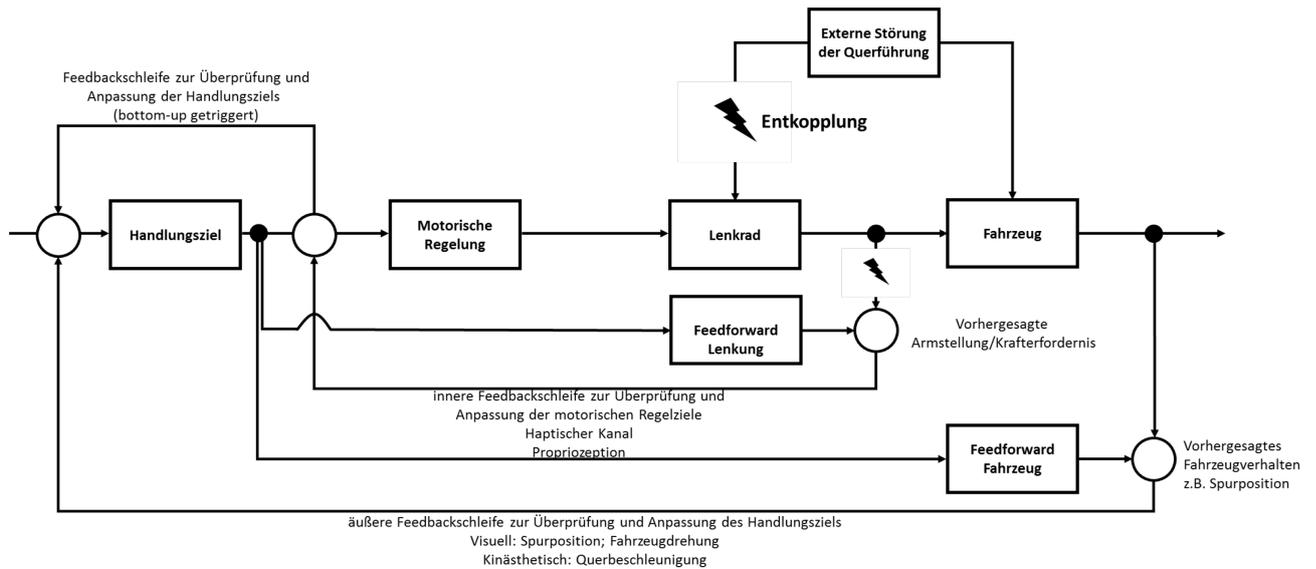


Abbildung 3-6: In Studie VII soll dem Fahrer durch die Entkopplung der Lenkung die Möglichkeit genommen werden, auf Informationen der inneren Feedbackschleife zurückzugreifen (dargestellt durch die Unterbrechungen). Dadurch kann der Fahrer nur auf Informationen des äußeren Regelkreises zurückgreifen, um die Störung zu identifizieren. Insgesamt soll dadurch überprüft werden, welchen Anteil insbesondere der sensomotorische Kontrollprozess auf das resultierende Verhalten des Fahrers im Falle eines Eingriffs in die Querführung hat.

Insgesamt soll damit jede der Studien Belege für die funktionalen Bestandteile des angenommenen Verhaltensmodells und deren Wechselwirkung liefern. Dabei steht insbesondere deren Einfluss für das resultierende Verhalten sowie deren Einfluss auf die Verarbeitungsgeschwindigkeit im Vordergrund.

Im folgenden Kapitel wird genauer auf die studienübergreifend eingesetzte Methodik eingegangen. Zusätzlich wird beschrieben, welche Kennwerte des Fahrerverhaltens herangezogen werden, um die oben getroffenen Annahmen überprüfen zu können.

4 Untersuchungsmethodik

Das folgende Kapitel umfasst die Beschreibung der in den Studien eingesetzten Untersuchungsumgebung (Kapitel 4.1) sowie die Beschreibung der studienübergreifend eingesetzten, relevanten Untersuchungsszenarien (Kapitel 4.2.) Zusätzlich wird auf das allgemeine Vorgehen bei der Datenanalyse eingegangen (Kapitel 4.3). Weitere studienspezifische Beschreibungen der eingesetzten Untersuchungsmethodik finden sich bei der Beschreibung der einzelnen Studien (Kapitel 5-11).

4.1 Untersuchungsumgebung

Für die vorliegende Arbeit und die berichteten Studien wurde der dynamische Fahrsimulator des Würzburger Instituts für Verkehrswissenschaften (WIVW GmbH) verwendet (siehe Abbildung 4-1). Der Simulator verfügt über eine abgeschlossene, vollständig instrumentierte Fahrerkabine und entspricht der eines serienfertigen Fahrzeugs mit Automatikgetriebe (BMW520i). Das Bewegungssystem verfügt über eine Stewart-Plattform mit 6 Freiheitsgraden und kann lineare Beschleunigungen bis 5 m/s^2 bzw. rotatorische bis $100^\circ/\text{s}^2$ darstellen. Es besteht aus sechs elektrischen Aktuatoren und drei passiven pneumatischen Aktuatoren. Für die realistische Darstellung des Lenkmoments sorgt ein auf der Basis eines Lenkmodells gesteuerter Servomotor von Sensowheel, mit dem maximal bis zu 8 Nm Lenkmoment dauerhaft gestellt werden können.

In der Simulatorkuppel ist eine sphärische Leinwand angebracht, die eine Frontsicht von 180° erlaubt. Die Projektion der Fahrszenarie auf die Leinwände erfolgt über drei LCD-Projektoren mit einer Auflösung von 1400×1050 Pixel, die in der Kuppel angebracht sind. Die Simulation ist mit einem 5.1. Soundsystem ausgestattet, das einen dreidimensionalen Höreindruck vermittelt und etwa die akustische Ortung von anderen Verkehrsteilnehmern ermöglicht.

Als Außen- und Innenspiegel fungieren LCD-Displays. Zusätzlich sind zwei LCD-Displays für Navigations-, HMI- und sonstige Nebenaufgabenuntersuchungen sowie Bedienelemente für Assistenzsysteme integriert. Betrieben wird die Fahrsimulation über einen Rechnerverbund von insgesamt 15 PCs. Die einzelnen Rechner sind für unterschiedliche Komponenten der Simulation zuständig, etwa grafische Darstellung, Streckensystem, andere Verkehrsteilnehmer oder den Sound. Der Datenaustausch zwischen den Rechnern erfolgt über ein 1 GB Ethernet. Das System wird über das Softwarepaket SILAB der WIVW GmbH gesteuert. An einem Operator-Rechner werden Strecken geladen und der Ablauf der Simulation über das Netzwerk koordiniert. Dabei können während der Fahrt eines Probanden verschiedenste Fahrparameter wie Geschwindigkeit, Betätigung der Pedale oder Fahrspurabweichung vom Versuchsleiter überwacht und für eine spätere Auswertung mit einer Rate von 100 Hz aufgezeichnet werden.

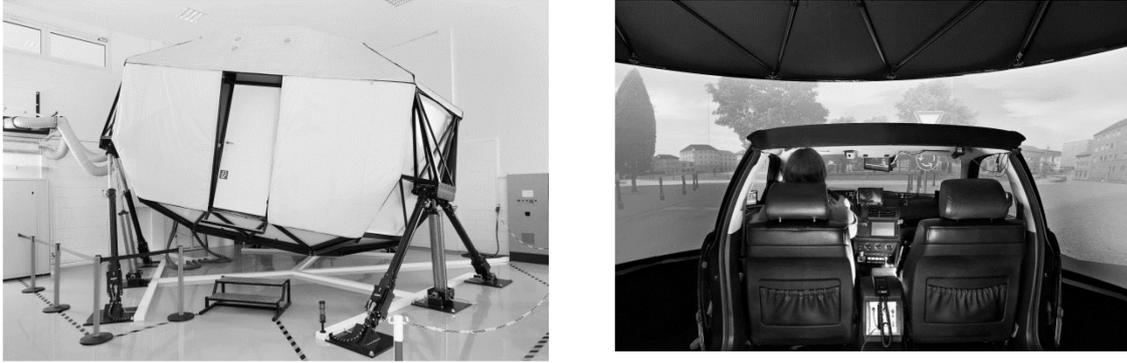


Abbildung 4-1: Außen- (links) und Innenansicht (rechts) des dynamischen Fahrsimulators der WIVW GmbH.

4.2 Untersuchungsszenarien

In Kapitel 3.1 wird angenommen, dass das Handlungsziel des Fahrers einen entscheidenden Einfluss auf das Reaktionsmuster in Folge von Eingriffen in die Querverführung haben kann. Eine einfache Möglichkeit zur Beeinflussung des Handlungsziels ist die Situationsgestaltung. Dabei wird zwischen berechtigten oder situationsgerechten (vgl. Kapitel 2.2.4) und nicht situationsgerechten bzw. fehlerhaften Eingriffen (vgl. Kapitel 2.2.3) unterschieden.

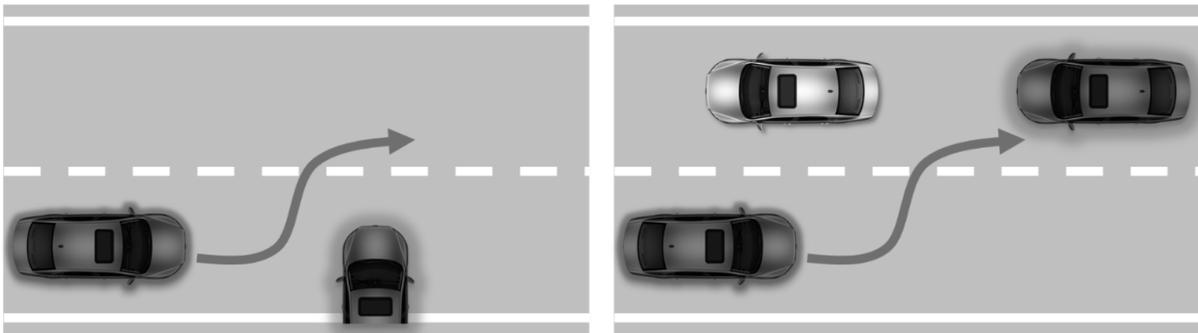


Abbildung 4-2: *Beispiel für einen situationsgerechten Eingriff eines Notausweichassistenten (links) und einen nicht situationsgerechten Eingriff (rechts). Im linken Bild ist das querende Fahrzeug der Auslöser für den Eingriff. Durch den Eingriff soll die Kollision mit dem Fahrzeug vermieden werden. Im rechten Bild erfolgt ein Eingriff obwohl kein Auslöser vorhanden ist. Durch den Eingriff werden das Fahrzeug auf der Nachbarspur und der Fahrer selbst gefährdet.*

Aus der Betrachtung von sowohl berechtigten als auch fehlerhaften Eingriffen können zusätzlich Rückschlüsse auf die Wirksamkeit als auch auf die Kontrollierbarkeit der untersuchten Eingriffsvarianten gezogen werden. Dies ist erforderlich, da bei der Gestaltung von Ausweichassistenten beide Aspekte berücksichtigt werden sollten. Die alleinige Erhöhung der Wirksamkeit oder Kontrollierbarkeit könnte sich jeweils nachteilig auf die andere auswirken. Die optimale Gestaltung eines Ausweichassistenten sollte daher sowohl die Wirksamkeit im Falle eines berechtigten Eingriffs als auch die Kontrollierbarkeit im Falle eines fehlerhaften Eingriffs berücksichtigen.

Im Rahmen der folgenden Studien wurden daher, sofern Eingriffe erfolgten, stets beide Varianten bei der Gestaltung der Untersuchungsszenarien berücksichtigt, um Rückschlüsse auf das Reaktionsmuster in Abhängigkeit vom Handlungsziel des Fahrers, die Wirksamkeit und die Kontrollierbarkeit ziehen zu können. Für die Studien wurden daher verschiedene Szenarien für die Untersuchung von berechtigten und fehlerhaften Eingriffen umgesetzt. Eine detaillierte Beschreibung der in den Studien eingesetzten Untersuchungsszenarien findet sich jeweils in der Beschreibung der Methodik unter der Überschrift „Gestaltung der Szenarien“.

4.3 Vorgehen bei der Analyse des Fahrerverhaltens

Das Vorgehen orientiert sich an den Arbeiten von Neukum et al. (2010a) sowie an den Arbeiten von Schmidt und Kollegen (Schmidt, 2009; Schmidt et al., 2007). Dabei werden die Lenksignale (Lenkradwinkel, Lenkradwinkelgeschwindigkeit) auf Extremwerte untersucht, die in Folge des Eingriffs mittels Lenkmomentüberlagerung beobachtet werden. Für die Analyse der Fahrreaktionen und der Reaktionszeiten wurden überwiegend zwei Indikatoren herangezogen.

Die Indikatoren sollen Aufschluss über den Beginn der haptisch getriggerten Kompensationsreaktion des Fahrers geben. Dazu wird das erste Lenkradwinkel- und Lenkradwinkelgeschwindigkeitsmaximum nach Beginn des Eingriffs bestimmt und der Zeitpunkt des Auftretens ermittelt (vgl. Abbildung 4-3). Da es sich bei der Lenkradwinkelgeschwindigkeit um einen vom Lenkradwinkel abgeleiteten Wert handelt, wurde das Ausgangssignal geglättet, um Artefakte und kleine Signalschwankungen zu minimieren. Die resultierenden Zeitpunkte dienen als Indikator für die Reaktionszeit des Fahrers. Die Maximalwerte von Lenkradwinkelgeschwindigkeit und Lenkradwinkel geben, im Vergleich mit dem Sollverlauf, zusätzlich Aufschluss darüber, wie die Fahrer den Eingriff beeinflussen (z. B. Verstärken oder Dämpfen).

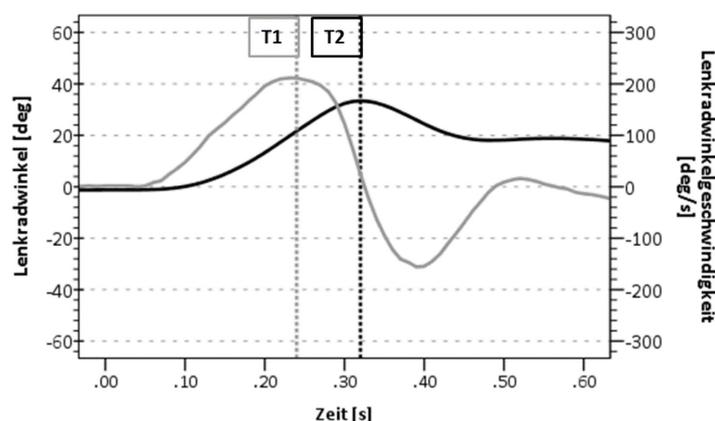


Abbildung 4-3. Beispielhafter Zeitverlauf von Lenkradwinkel (schwarz) und Lenkradwinkelgeschwindigkeit (grau) in Folge eines Eingriffs am Lenkrad. T1 kennzeichnet das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit, T2 das erste Lenkradwinkelmaximum in Folge des Eingriffs.

Ergänzend zu der Berechnung der genannten Indikatoren wurden die Fahrer auf Basis des gezeigten Lenkverhaltens post-hoc einer von drei Kategorien zugeordnet (vgl. Abbildung 4-4):

- Mitlenken
- Initiales Dämpfen
- Festhalten

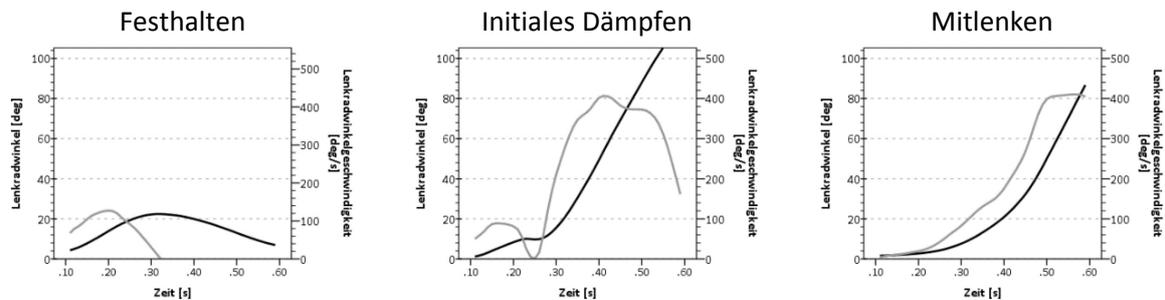


Abbildung 4-4. Beispielhafte Zeitverläufe für den Lenkradwinkel (schwarz) und die Lenkradwinkelgeschwindigkeit (grau) für die drei Reaktionsmuster Festhalten (links), Initiales Dämpfen (Mitte) und Mitlenken (rechts).

Im Folgenden wird genauer auf das Vorgehen bei der Kategorisierung eingegangen.

Festhalten Festhalter kennzeichnen sich dadurch, dass sie den Eingriff dauerhaft übersteuern oder abdämpfen und keine weiteren Lenkbewegungen zeigen, die auf eine Ausweichreaktion schließen lassen (vgl. Abbildung 4-4 links). Fahrer wurden als Festhalter klassifiziert, wenn sich innerhalb eines definierten Zeitbereichs nach Beginn des Eingriffs nur ein Lenkradwinkel- oder Lenkradwinkelgeschwindigkeitsmaximum identifizieren ließ und der maximale Lenkradwinkel kleiner 30° war.

Initiales Dämpfen Im Gegensatz dazu zeigen initiale Dämpfer nach der ersten Übersteuerungsreaktion weitere Lenkbewegungen, die darauf schließen lassen, dass der Fahrer den Eingriff aufnimmt oder dem Eingriff folgt. Dazu wurde überprüft, ob ein erneuter Wiederanstieg des Lenkradwinkels oder der Lenkradwinkelgeschwindigkeit auftrat. Um als initialer Dämpfer klassifiziert zu werden, musste der darauffolgende maximale Lenkradwinkel größer sein als 35° und das darauffolgende Lenkradwinkelgeschwindigkeitsmaximum mindestens 10% größer sein als das zuvor beobachtete. Diese beiden Kriterien wurden gewählt, um eine ausreichende Differenzierung zwischen der Kategorie Festhalten und Initiales Dämpfen zu ermöglichen. Treten nur geringfügige Unterschiede zwischen den Lenkradwinkelgeschwindigkeitsmaxima auf, kann dies auch darauf zurückzuführen sein, dass der Fahrer die erforderliche Kraft für die Übersteuerung des Eingriffs nicht konstant aufbringen kann. Anhand des Reaktionsmusters von initialen Dämpfern kann überprüft werden, wie lange es dauert, bis der Fahrer mit der Wiederaufnahme des Ausweichvorgangs beginnt. Diese Zeitspanne kann ein Indikator für die Dauer der Handlungsentscheidung des Fahrers sein und Hinweise auf mögliche Interferenzen liefern. Dazu wird der Zeitpunkt des erneuten Wiederanstiegs (nach Beginn der Kompensationsreaktion) der Lenkradwinkelgeschwindigkeit in Richtung der Ausweichbewegung als Indikator für die Mitlenkentscheidung herangezogen (vgl. Abbildung 4-4 Mitte).

Mitlenken Mitlenker unterscheiden sich von Fahrern, die als initiale Dämpfer klassifiziert wurden, dadurch, dass während des Ausweicheingriffs nur ein Lenkradwinkel- und Lenkradwinkelgeschwindigkeitsmaximum beobachtet wurde und der maximale Lenkradwinkel größer war als 35°. Als Mitlenker klassifizierte Fahrer folgen dem Eingriff mutmaßlich und zeigen keine eindeutige Übersteuerungsreaktion (vgl. Abbildung 4-4 rechts).

Die Klassifizierung der Fahrer entsprechend dieser Reaktionsmuster dient im Wesentlichen der genaueren Differenzierung des Fahrerverhaltens. Aufgrund der post-hoc entwickelten Klassifizierung wird die Aufteilung nicht bei der interferenzstatischen Analyse berücksichtigt, sondern lediglich explorativ analysiert.

5 Studie I: Ermittlung der Lenkreaktionszeit ohne Ausweichunterstützung

5.1 Herleitung der Forschungsfragen

Anhand des entwickelten Verhaltensmodells und auch auf Basis anderer Fahrerverhaltensmodelle, wie z. B. von Donges (1978; 2012), wird davon ausgegangen, dass Fahrer primär visuelle Informationen zur Steuerung des Fahrzeugs nutzen (vgl. Kapitel 2.3). Dabei stehen sie vor dem Problem, dass im Zweifel nicht nur eine Handlungsoption besteht, sondern viele verschiedene. In Folge dessen müssen sie zeitnah erkennen, welche Handlungen in Frage kommen und die korrekte Handlungsalternative auswählen. Insbesondere in Gefahrensituationen ist dies mit hohen Anforderungen an die Fahrer verbunden, da sie diese Aufgabe innerhalb kürzester Zeit erledigen müssen.

Bisher liegen jedoch kaum Befunde vor, wie viel Zeit Fahrer benötigen um die Situation zu analysieren und sich für eine entsprechende Handlung, wie z. B. Ausweichen, zu entscheiden. Die meisten Studien berichten den Beginn der Lenkreaktion in Abhängigkeit des zeitlichen oder räumlichen Abstands zum Hindernis (vgl. Kapitel 2). Daraus kann jedoch nicht abgeleitet werden, wieviel Zeit Fahrer benötigen um sich für eine Ausweichreaktion zu entscheiden, da diese Studien lediglich Hinweise darauf enthalten, wann Fahrer eine Ausweichreaktion als Handlungsalternative in Betracht ziehen.

Auch anhand der Studien zu automatischen Ausweicheingriffen kann bisher nicht abgeleitet werden, wieviel Zeit Fahrer benötigen, um sich für eine Ausweichreaktion zu entscheiden. Dies liegt zum einen daran, dass entsprechende Kennwerte, wie z. B. die Lenkreaktionszeit, nicht berichtet werden (vgl. Kapitel 2.2). Zum anderen erlauben diese Studien keine klare Trennung zwischen visuellen und haptischen bzw. propriozeptiven Anteilen bei der Reaktion der Fahrer auf Eingriffe in die Querführung. Das bedeutet, dass anhand der ermittelten Reaktionszeiten nicht darauf geschlossen werden kann, wie viel Zeit Fahrer zur Handlungsauswahl und Reaktionsinitiierung benötigen, wenn lediglich visuelle Informationen zur Verfügung stehen. Zur besseren Differenzierung ist daher eine möglichst isolierte und standardisierte Betrachtung der Reaktionszeiten erforderlich, um die Verarbeitungszeit der visuellen Kontrollprozesse besser abschätzen zu können.

Die psychologische Grundlagenforschung liefert hierbei einen wertvollen Beitrag, da sowohl Befunde als auch Methoden vorliegen, mit denen die Verarbeitungszeit visueller Kontrollprozesse bestimmt werden kann. So wurden in der Grundlagenforschung beispielsweise Laborstudien zur Untersuchung von Kompatibilitätseffekten durchgeführt, bei denen eine Lenkreaktion erforderlich war (vgl. Müsseler, Aschersleben, Arning & Proctor, 2009; Proctor, Wang & Pick, 2004; Wang, Proctor & Pick, 2003). In den Studien wurde unter anderem untersucht, ob räumliche Kompatibilitätseffekte zwischen der Position eines Stimulus und der erforderlichen Lenkrichtung beobachtet werden können. Dabei wurde beobachtet, dass signifikant schneller auf räumlich kompatible geometrische Stimuli reagiert wird als auf räumlich inkompatible geometrische Stimuli (vgl. Müsseler et al., 2009). Das bedeutet, dass die Probanden schneller reagierten, wenn sie auf einen Stimulus zusteuern sollten (Annähern) als davon weg (Vermeiden).

Dieser räumliche Kompatibilitätseffekt ist in der Grundlagenpsychologie als „*Simon-Effekt*“ bekannt und geht auf die Arbeiten von Simon und Rudell (1967) und Simon (1969) zurück. Generell versteht man unter dem Simon-Effekt Befundmuster, bei denen die Reaktionszeiten geringer ausfallen, wenn die Position der dargebotenen Reize und der Ort der auszuführenden Reaktion ähnlich ist (für eine Übersicht siehe Hommel, 2011). Dieses Befundmuster wird selbst dann beobachtet, wenn die Reizposition irrelevant für die Durchführung der Aufgabe ist. Simon (1969) beschrieb dieses Phänomen als „*reaction towards the source of stimulation*“ (Reaktion auf die Quelle der Stimulation [sinngemäße Übersetzung des Autors]). Eine mögliche Erklärung für die Funktionsweise des Simon-Effekts liefert die „*Theory of Event Coding*“ (TEC vgl. Hommel, 2011), welche eine Weiterentwicklung der Ideomotorischen Hypothese ist (vgl. Kapitel 2.3). Die TEC nimmt an, dass die Wahrnehmung von Ereignissen und die Planung von Handlungen auf kognitiver Ebene ähnlich repräsentiert werden. Konkret wird angenommen, dass intendierte Handlungen kognitiv in Form der zu erwartenden, sensorischen Folgen repräsentiert werden (vgl. Hommel, 2011; Hommel et al., 2001). Zusätzlich wird angenommen, dass eine bidirektionale Verbindung zwischen dem Verhalten und den Effekten in der Umwelt, bzw. sensorischen Konsequenzen, besteht. Daraus resultiert, dass die kognitive Repräsentation eines räumlich dargebotenen Stimulus ebenfalls zu einer Aktivierung der entsprechenden Reaktionen führen kann (Hommel, 2011), was die Reaktion beschleunigt.

In der Realität ist die Verbindung zwischen der (räumlichen) Position eines Stimulus und der geforderten Reaktion jedoch häufig komplexer. So ist in potenziellen Gefahrensituationen meist eine Ausweichreaktion weg vom Stimulus gefordert (Vermeiden). Daher lassen sich die Ergebnisse aus der Grundlagenforschung möglicherweise nicht ohne weiteres übertragen. Ergebnisse von Müsseler et al. (2009) deuten beispielweise darauf hin, dass sich dieser räumliche Kompatibilitätseffekt umdreht, wenn natürliche Stimuli verwendet werden, die potenzielle Gefahrensituationen darstellen (z. B. unachtsame Passanten). Zusätzlich wurde beobachtet, dass die Reaktion schneller ausfällt als bei geometrischen Stimuli. Müsseler et al. (2009) führen diese Effekte auf die Valenz der verwendeten Stimuli zurück. Das ist ein Hinweis darauf, dass auch hier bereits die Konsequenzen der Handlung berücksichtigt werden. Dabei werden Handlungen, welche zu positiven Handlungskonsequenzen (z. B. Vermeiden der Gefahr oder des Unfalls) führen, schneller ausgeführt als Handlungen mit negativen Handlungskonsequenzen. Dies könnte auch in Unfallvermeidungsszenarien relevant sein, da durch die Handlung negative Konsequenzen vermieden werden sollen. Allerdings kann nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass die oben genannten Kompatibilitätseffekte die Reaktionsgeschwindigkeit der Fahrer in potenziellen Gefahrensituationen beeinflussen. Daher sollten diese, sofern möglich, ebenfalls berücksichtigt werden.

Insgesamt ergaben die Studien aus der Grundlagenforschung mittlere Lenkreaktionszeiten im Bereich von 400-600 ms, was ein Hinweis auf die Verarbeitungszeit des äußeren visuellen Regelkreises im Falle eines aufmerksamen Fahrers sein könnte (vgl. Abbildung 5-1). In Bezug auf die berichteten Fahrerverhaltensmodelle von Donges (1982) oder Janssen (1979) könnte dies auch ein Indikator für die Verarbeitungszeit auf der Bahnführungs- und Navigationsebene sein. Damit grenzen die Studien den Zeitbereich von der Wahrnehmung bis hin zur Handlungsausführung ein, der unter idealen Bedingungen (ohne eine Ablenkung des Fahrers und bei eindeutiger Handlungsanweisung) für das Querführungsverhalten zu erwarten ist.

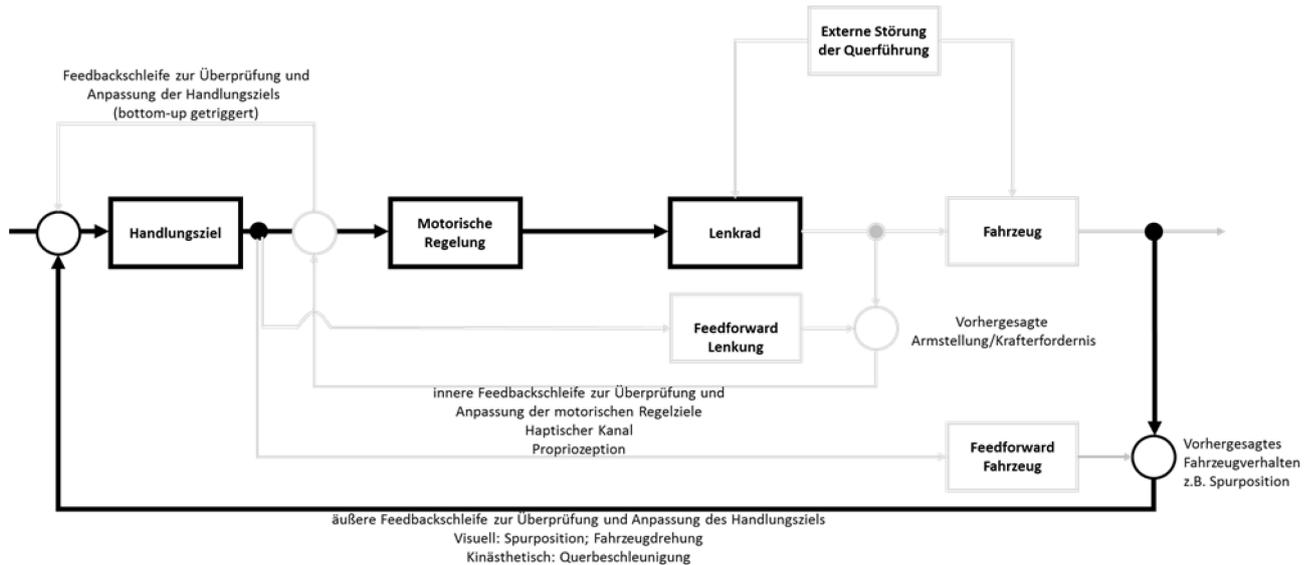


Abbildung 5-1. Modell der hierarchischen Struktur und der relevanten Regelkreise für die Beschreibung des Fahrerverhaltens im Fall externer Störungen der Querführung. Relevante Bestandteile des Verhaltensmodells, die mutmaßlich an der Anpassung des Handlungsziels beteiligt sind, wurden schwarz hervorgehoben. Anhand der berichteten Studien wird eine Verarbeitungsdauer von 400-600 ms erwartet.

Zusätzliche Hinweise aus der angewandten Forschung lassen sich der Simulatorstudie von Wierwille et al. (1983) entnehmen. Hierbei wurden in Folge einer externen Störung der Querführung bei rein visueller Darbietung der Fahrzeugreaktion Lenkreaktionszeiten von 0.56 s im Mittel beobachtet. Die ermittelte Reaktionszeit ist damit ebenfalls ein Hinweis auf die Verarbeitungszeit der visuellen Rückmeldung bei externen Störungen der Querführung (vgl. Kapitel 2.3.2).

Die oben genannten Befunde zur Lenkreaktionszeit könnten damit auch für die Gestaltung von Ausweichassistenten relevant sein. Da Ausweichassistenten – je nach Auslegung – auch unabhängig vom Fahrer in die Querführung eingreifen, könnte dies bedeuten, dass der Eingriff stattfindet, bevor der Fahrer die Situation wahrnehmen und sich für eine Handlung entscheiden konnte. Berücksichtigt man die Erkenntnis, dass Eingriffe, die vor Beginn der Fahrerreaktion durchgeführt werden, möglicherweise als fehlerhafte Eingriffe wahrgenommen werden (vgl. Neukum et al., 2010a), könnte dies eine mögliche Erklärung für die schlechte Wirksamkeit automatischer Eingriffe sein. Demzufolge würde der Fahrer möglicherweise mehr Zeit benötigen um die Situation visuell zu erfassen, seine Handlungsmöglichkeiten abzuwägen und sich für eine Handlung zu entscheiden, damit automatische Ausweineingriffe nicht unterdrückt werden.

Allerdings fanden die Studien zur Ermittlung der Lenkreaktionszeit überwiegend im Laborsetting statt und die Fahrer mussten nur gezielt auf einzelne Stimuli mit einer Lenkbewegung reagieren. Des Weiteren waren die Fahrer nicht kontinuierlich in eine Querführungsaufgabe eingebunden, wie es in der Realität der Fall wäre und die Lenkbewegung musste nicht als zielgerichtete Bewegung ausgeführt werden. Dies könnte die Übertragbarkeit der Ergebnisse einschränken.

Als Resultat dieser Überlegungen wurde die folgende Studie zur Ermittlung der Lenkreaktionszeit durchgeführt, deren Situationsgestaltung sowohl auf eine hohe experimentelle Standardisierung als auch auf den Anwendungsfall von Ausweichassistenten abzielt.

Dabei wurde die Erkenntnis berücksichtigt, dass Lenkreaktionen zur Kollisionsvermeidung bei einer TTC von weniger als 1.8 s wahrscheinlicher sind (vgl. Abschnitt 2). Zusätzlich wurde versucht, die Lenkreaktionszeit unter möglichst idealen Bedingungen zu ermitteln, um mögliche Verzögerungen z. B. in Folge einer Ablenkung des Fahrers oder Interferenzen durch alternative Reaktionsmuster, wie z. B. Bremsen, ausschließen zu können. Hick (1952) lieferte erstmals Hinweise darauf, dass ein Zusammenhang zwischen der Anzahl der Wahlmöglichkeiten bei einer Aufgabe und der Reaktionszeit besteht. Seine Ergebnisse lassen darauf schließen, dass eine Erhöhung der Anzahl der Wahlmöglichkeiten zwischen verschiedenen Reaktionsalternativen (wie z. B. Bremsen und Ausweichen) zu einer Erhöhung der Reaktionszeit führen könnte. Daher soll die Anzahl der Reaktionsalternativen gezielt eingeschränkt werden. Allerdings sollte auch überprüft werden, wie gut der Fahrer dazu in der Lage ist, aus verschiedenen Handlungsalternativen die korrekte auszuwählen. Wie bereits in Kapitel 2.1 beschrieben, wählen Fahrer häufig nicht die korrekte Reaktionsalternative zur Verhinderung von Kollisionen. Daher könnte eine genauere Betrachtung auch dazu beitragen mögliche Probleme auf Ebene der Handlungsauswahl zu identifizieren.

Im folgenden Abschnitt werden die oben genannten Aspekte nochmals kurz aufgegriffen und konkrete Forschungsfragen für die Studie abgeleitet.

5.2 Forschungsfragen

Die folgende Studie befasst sich mit der Frage, wie lange Fahrer unter idealen Bedingungen benötigen, um visuelle Informationen zu verarbeiten und eine Lenkreaktion zu initiieren. Die resultierenden Ergebnisse sollen insbesondere der Bestimmung der Verarbeitungsgeschwindigkeit des äußeren visuellen Regelkreises im Verhaltensmodell dienen (siehe Abbildung 3-2). Das bedeutet, dass anhand dieser Studie abgeschätzt werden können soll, wie lange es dauert, bis der Fahrer die Umweltreize wahrgenommen hat, eine Handlungsentscheidung trifft und beginnt, die Handlung auszuführen (vgl. Forschungsfrage 5-1).

Forschungsfrage 5-1: Wie viel Zeit benötigen Fahrer ab Sichtbarwerden der Stimuli bis zur Initiierung einer Lenkbewegung?

Damit liefert diese Studie eine wichtige Grundlage um abschätzen zu können, ob sich automatische Lenkeingriffe positiv oder negativ auf die Verarbeitungsgeschwindigkeit auswirken. Des Weiteren soll überprüft werden, ob aus der Grundlagenforschung bekannte Effekte einen Einfluss auf die Reaktionszeit haben. Dabei soll zum einen überprüft werden, ob die Art der geforderten Lenkreaktion einen Einfluss auf die Reaktionszeit hat (vgl. Forschungsfrage 5-2).

Forschungsfrage 5-2: Hat die Art der geforderten Reaktion (Annähern vs. Vermeiden) einen Einfluss auf die Reaktions- und Verarbeitungszeit?

Zum anderen soll überprüft werden, wie gut der Fahrer dazu in der Lage ist, aus zwei verschiedenen Reaktionsalternativen die korrekte auszuwählen und welchen Einfluss dies auf die Reaktionszeit der Fahrer hat (vgl. Forschungsfrage 5-3).

Forschungsfrage 5-3: Wie wirkt sich die Anzahl der Reaktionsalternativen auf die Reaktions- und Verarbeitungszeit aus?

5.3 Methodik

Die Untersuchung fand im dynamischen Simulator der WIVW GmbH statt (vgl. Kapitel 4.1). Dadurch sollte sichergestellt werden, dass die gestellte Fahraufgabe vergleichbar mit den Fahraufgaben der folgenden Studien ist, die ebenfalls im dynamischen Simulator durchgeführt wurden.

5.3.1 Stichprobe

Alle Teilnehmer/innen der Studie entstammten dem Testfahrerpanel der WIVW GmbH und waren durch ein standardisiertes Training an das Fahren im dynamischen Fahrsimulator gewöhnt. Insgesamt nahmen 20 Probanden/innen an der Studie teil (davon 10 weiblich). Das mittlere Alter betrug 34.8 Jahre (min = 22; max = 64). Die mittlere jährliche Fahrleistung lag bei 9864 km (sd = 9540 km). Für die Teilnahme an der Studie wurden die Fahrer/innen finanziell entschädigt.

5.3.2 Teststrecke und Stimuli

Insgesamt wurden vier unterschiedliche Teststrecken für die Studie eingesetzt: Eine Trainingstrecke, zwei Teststrecken mit je nur einem Stimulus (konstante Aufgabe) und eine Teststrecke, in der zwei Stimuli kombiniert wurden (Aufgabenwechsel). In der Bedingung konstante Aufgabe musste der Fahrer stets die gleiche Fahraufgabe (Annähern vs. Vermeiden) ausführen. In der Bedingung Aufgabenwechsel musste der Fahrer hingegen anhand der Stimuli entscheiden, welche der beiden Fahraufgaben (Annähern vs. Vermeiden) auszuführen ist. Jede Teststrecke bestand aus einer geraden Straße mit insgesamt drei Fahrspuren, wovon jede 3.5 m breit war. Als Stimuli wurden jeweils semitransparente gelbe Quadrate eingesetzt, die sich hinsichtlich der Rotation unterschieden. Eines wurde normal dargestellt, während das andere um 45° rotiert wurde (vgl. Abbildung 5-2). Die Stimuli erschienen bei einer TTC von 1.6 s in voller Größe, entweder auf der linken oder rechten Fahrspur und bewegten sich in Richtung der mittleren Fahrspur. Für die Untersuchung wurden bewusst neutrale, abstrakte Stimuli gewählt, um Valenzeffekte ausschließen zu können. Zusätzlich sollten Fahrer nicht dazu ermutigt werden, bewusst Kollisionen mit Verkehrsteilnehmern zu provozieren. Dafür wurde in Kauf genommen, dass die Versuchsanordnung weniger realistisch ausfällt.



Abbildung 5-2. Beispielhafte Darstellung des Aufbaus der Teststrecke und der beiden Stimuli. Die Stimuli erschienen bei einer TTC von 1.6 s und bewegten sich in Richtung der mittleren Fahrspur.

5.3.3 Versuchsablauf

Die Stichprobe wurde in zwei Gruppen aufgeteilt. Die eine Hälfte der Probanden wurde instruiert, beim Erscheinen eines Quadrats in dessen Richtung zu steuern (Annähern) und beim Erscheinen des auf der Spitze stehenden Quadrats (Raute) davon weg zu steuern (Vermeiden). Die andere Hälfte wurde instruiert, beim Erscheinen eines Quadrats davon weg zu steuern (Vermeiden) und beim Erscheinen des auf der Spitze stehenden Quadrats (Raute) in dessen Richtung zu steuern (Annähern). Die Instruktion erfolgte in beiden Gruppen schriftlich.

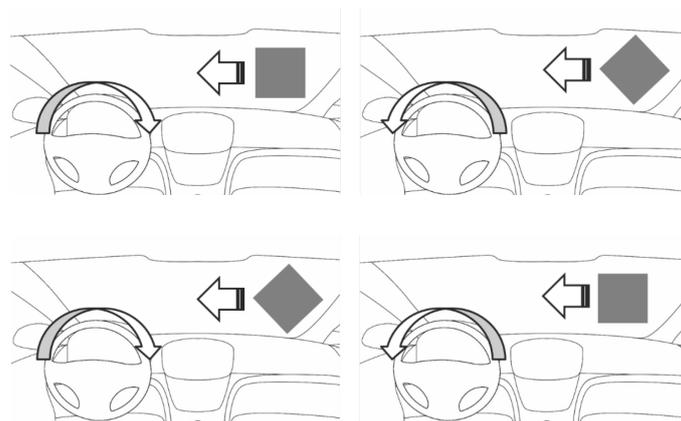


Abbildung 5-3. Veranschaulichung der erforderlichen Lenkreaktion in Abhängigkeit von der Instruktion. In der oberen Abbildung wird die Instruktion „Annähern Quadrat“ dargestellt, in der unteren die Instruktion „Annähern Raute“.

Um sicherzustellen, dass die Probanden die Instruktion verstanden hatten, absolvierten sie zunächst ein kurzes Training mithilfe der Trainingstrecke. Dazu wurde jeder Stimulus insgesamt sechs Mal dargeboten, davon drei Mal auf der linken Fahrspur und drei Mal auf der rechten Fahrspur. Die Abfolge der Stimuli und der Positionen war vorab festgelegt. Falls erforderlich, wurde die Instruktion mündlich wiederholt. Zusätzlich wurden die Probanden dazu angehalten, so schnell und so fehlerfrei wie möglich zu reagieren. Die Rückmeldung über die Anzahl korrekter und fehlerhafter Durchgänge erfolgte visuell in der Mittelkonsole.

Im Anschluss an das Training erhielten die Probanden die erste und die zweite Teststrecke in der Bedingung konstante Aufgabe. In den Teststrecken wurde der Stimulus insgesamt zehn Mal dargeboten (davon fünf Mal auf der linken und fünf Mal auf der rechten Spur). Die Abfolge war vorab festgelegt und entspricht damit einer Pseudorandomisierung. Vor dem Start wurden die Probanden nochmals an die Instruktion erinnert und darauf hingewiesen, dass sie so schnell und so fehlerfrei wie möglich reagieren sollen. Zusätzlich wurden die Probanden darüber informiert, welcher Stimulus erscheinen wird. Während der Fahrt erhielten die Fahrer zudem eine Rückmeldung über die Anzahl korrekter und fehlerhafter Durchgänge.

Um Reihenfolgeeffekte experimentell kontrollieren zu können, wurde die Abfolge der Teststrecken zwischen den Probanden ausbalanciert. Nach Abschluss der beiden Teststrecken mit der Bedingung konstante Aufgabe absolvierten die Probanden die Teststrecke in der Bedingung Aufgabenwechsel. Dabei wurde jeder Stimulus insgesamt drei Mal auf der linken und drei Mal auf der rechten Spur dargeboten. Die Abfolge der Stimuli und der Position war ebenfalls pseudorandomisiert.

Vor dem Start der Bedingung Aufgabewechsel wurden die Probanden darauf hingewiesen, dass im Folgenden beide Stimuli erscheinen werden und dass sie weiterhin so schnell und so fehlerfrei wie möglich reagieren sollen. Insgesamt dauerte der Ablauf ca. 30 min.

Tabelle 5-1: Versuchsplan der Studie. Between-Faktoren (B) wurden zwischen den Gruppen ausbalanciert. Within-Faktoren (W) wurden in pseudorandomisierter Reihenfolge (P) dargeboten.

Bedingung	Abfolge	Instruktion	Stimulus	Position
Training	1	Annähern, Vermeiden	Quadrat, Raute	links, rechts
konstante Aufgabe	2 u. 3	Annähern, Vermeiden (B)	Quadrat, Raute (B)	links, rechts (W, P)
Aufgabenwechsel	4	Annähern, Vermeiden (W, P)	Quadrat, Raute (W, P)	links, rechts (W, P)

B = Between-Faktor, W = Within-Faktor, P = pseudorandomisiert

5.3.4 Datenaufbereitung

Die Lenkreaktionszeit wurde auf Basis einer Analyse der Lenkradwinkelgeschwindigkeit berechnet. Als Indikator für den Lenkbeginn dient der Zeitpunkt, ab dem, nach Präsentation der Targets, eine Lenkradwinkelgeschwindigkeit von 40°/s überschritten wird. Anschließend wurde überprüft, ob die initiale Lenkrichtung mit der geforderten Lenkrichtung übereinstimmt. Abweichungen wurden als Fehler klassifiziert. Für die Analyse der Lenkreaktionszeiten wurden fehlerhafte Lenkreaktionen ausgeschlossen. Anhand der verbleibenden Lenkreaktionszeiten wurde die mittlere Lenkreaktionszeit in Abhängigkeit von der Instruktion und der Bedingung für jeden Fahrer ermittelt. Eine Unterscheidung nach dem Ort des Erscheinens (links vs. rechts) und den visuellen Stimuli erfolgte nicht, da eine deskriptive Betrachtung nicht auf einen Einfluss dieser Faktoren hindeutete.

5.4 Ergebnisse

Im Folgenden wird auf die Fehlerrate und die Lenkreaktionszeit eingegangen. Im Fokus stand die Frage, wie lange ein Fahrer benötigt, um eine Lenkreaktion auszuführen und ob diese Lenkreaktionszeit von Merkmalen der Fahraufgabe, wie z. B. der Instruktion „Annähern“ oder „Vermeiden“, abhängt.

5.4.1 Fehlerrate

In der Bedingung konstante Aufgabe waren bei der Instruktion „Annähern“ 1.5% ($N = 3$) der initialen Lenkreaktionen fehlerhaft und bei der Instruktion „Vermeiden“ 5% ($N = 10$). In der Bedingung Aufgabenwechsel waren bei der Instruktion „Annähern“ insgesamt 46.7% ($N = 56$) der initialen Lenkreaktionen fehlerhaft und bei der Instruktion „Vermeiden“ 45% ($N = 54$). Die fehlerhaften Lenkreaktionen wurden in den folgenden Auswertungen zur Ermittlung der Lenkreaktionszeit nicht berücksichtigt.

5.4.2 Lenkreaktionszeit

Im Mittel betragen die beobachteten Lenkreaktionszeiten zwischen 0.52 s und 0.53 s in der Bedingung konstante Aufgabe und 0.56 Sekunden in der Bedingung Aufgabenwechsel. Dies bedeutet, dass Fahrer in der Studie im Mittel etwas mehr als 0.5 Sekunden benötigten, um die Situation wahrzunehmen, eine passende Handlung auszuwählen und mit der Handlungsausführung zu beginnen (siehe Abbildung 5-4).

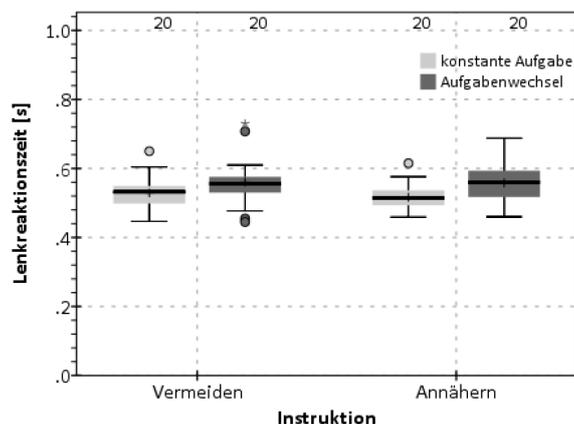


Abbildung 5-4. Boxplot der mittleren Lenkreaktionszeit [s] der Fahrer in Abhängigkeit von der Instruktion (Annähern vs. Vermeiden) und der Aufgabenbedingung (konstante Aufgabe vs. Aufgabenwechsel). Die horizontale schwarze Linie stellt den Median der Lenkreaktionszeit dar, das schwarze Plus den Mittelwert.

Minimal lagen die mittleren Lenkreaktionszeiten zwischen 0.45 s und 0.46 s, maximal wurden mittlere Lenkreaktionszeiten im Bereich von 0.62 s bis 0.73 s beobachtet. Eine Unterschiedsprüfung mithilfe einer Messwiederholungs-Varianzanalyse und den Within-Faktoren Instruktion und Bedingung ergab keinen statistisch signifikanten Effekt für den Faktor Instruktion ($F(1,19) = 0.488, p = .493$), aber einen signifikanten Effekt für den Faktor Bedingung ($F(1,19) = 16.106, p < .001, \eta^2 = .459$). Das bedeutet einerseits, dass die geforderte Handlung keinen Einfluss auf die Reaktionszeit hat (siehe Forschungsfrage 5-2). Andererseits deutet es darauf hin, dass die Fahrer bei mehreren Reaktionsalternativen oder in Folge des erforderlichen Wechsels der Reaktionsstrategie signifikant mehr Zeit benötigten, um mit der Lenkreaktion zu beginnen (siehe Forschungsfrage 5-3). Allerdings ist der Unterschied im Mittel sehr gering und liegt innerhalb der Streuung der beobachteten Lenkreaktionszeiten zwischen verschiedenen Fahrern (vgl. Tabelle 5-2).

Tabelle 5-2. Lenkreaktionszeit [s] in Abhängigkeit von der Instruktion (Annähern vs. Vermeiden) und der Aufgabenbedingung (konstante Aufgabe vs. Aufgabenwechsel).

Aufgabenbedingung	Instruktion	M	MIN	MAX	SD	N
konstante Aufgabe	Annähern	.53	.45	.65	.05	20
	Vermeiden	.52	.46	.62	.04	20
Aufgabenwechsel	Annähern	.56	.45	.73	.07	20
	Vermeiden	.56	.46	.69	.06	20

5.5 Diskussion

5.5.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Studie ergab mittlere Lenkreaktionszeiten im Bereich zwischen 0.5 Sekunden und 0.6 Sekunden. Ein Einfluss der Instruktion (Annähern vs. Vermeiden) konnte nicht festgestellt werden. Allerdings wurde ein signifikanter Einfluss des Faktors Bedingung (konstante Aufgabe vs. Aufgabenwechsel) festgestellt. Die mittlere Lenkreaktionszeit war in der Bedingung Aufgabenwechsel um ca. 40 ms höher als in der Bedingung konstante Aufgabe. Zusätzlich wurde eine hohe Fehlerrate (ca. 45%) in der Bedingung Aufgabenwechsel unabhängig von der Instruktion beobachtet.

5.5.2 Diskussion

Mithilfe der Studie sollte einerseits ermittelt werden, wie viel Zeit Fahrer unter optimalen Bedingungen benötigen um aufgrund von visuellen Umweltreizen eine Lenkbewegung zu initiieren (vgl. Forschungsfrage 5-1). Zusätzlich sollte überprüft werden, ob diese Zeitspanne von der Art der geforderten Reaktion (vgl. Forschungsfrage 5-2) oder von der Anzahl möglicher Handlungsalternativen beeinflusst wird (vgl. Forschungsfrage 5-3).

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Zeitspanne ca. 0.5 -0.6° Sekunden beträgt. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass vor allem die Anzahl möglicher Handlungsalternativen einen starken Einfluss auf das Fahrerverhalten hat, während die Art der geforderten Reaktion keinen Einfluss hatte.

Dabei ist vor allem der starke Einfluss der Anzahl möglicher Handlungsalternativen im Vergleich von der Bedingung konstante Aufgabe und der Bedingung Aufgabenwechsel auf die Fehlerrate auffällig. In der Bedingung konstante Aufgabe, in der der Fahrer nur eine Lenkreaktion zeigen musste, wurden nur wenige Falschreaktionen beobachtet. In der Bedingung Aufgabenwechsel zeigt sich jedoch ein deutlicher Anstieg der Fehlerrate unabhängig von der erforderlichen Reaktion. Dies zeigt, dass die Fahrer erhebliche Schwierigkeiten hatten, aus zwei möglichen Handlungen die richtige auszuwählen. Die Ursache hierfür ist unklar, da die Fahrer vorab Gelegenheit hatten, die entsprechenden Handlungen zu trainieren. Möglicherweise waren die eingesetzten Stimuli dafür verantwortlich, da die beiden geometrischen Strukturen sehr ähnlich aussahen. Folgestudien sollten daher auf eine bessere Differenzierbarkeit der Stimuli achten (z. B. durch andere Form- o. Farbgestaltung) und prüfen, ob sich die vorliegenden Befunde replizieren lassen. Würden trotz besserer Differenzierbarkeit der Stimuli ähnliche Ergebnisse beobachtet, könnte dies ein Hinweis darauf sein, dass es Fahrern innerhalb der kurzen Zeitspanne generell schwerfällt, auf plötzlich erscheinende Stimuli mit der richtigen Lenkbewegung zu reagieren.

Eine mögliche Ursache für die Probleme bei der Handlungswahl könnte zum einen die geforderte schnelle Entscheidung zwischen den beiden Reaktionsalternativen (Annähern vs. Vermeiden) oder der Wechsel des zu aktivierenden Reaktionsschemas sein. Ähnliche Effekte, wie den beschriebenen Anstieg der Reaktionszeit und eine Erhöhung der Fehlerrate, finden sich auch in der Grundlagenforschung zu Studien über Aufgabenwechsel (task switch) und werden als Wechselkosten bezeichnet (für eine Übersicht siehe Monsell, 2003). Dabei wird angenommen, dass beim

Aufgabenwechsel auch eine Rekonfiguration der beteiligten Kontrollprozesse erforderlich ist, was als „*task-set-reconfiguration*“ (TSR) bezeichnet wird (vgl. Monsell, 2003). Dieser Wechsel erfordert eine gewisse Zeitspanne, was im Falle eines Aufgabenwechsels zur Verzögerung der Reaktion führt. Die Ergebnisse der Studie in der Bedingung Aufgabenwechsel lassen sich daher möglicherweise auch auf Probleme bei der TSR zwischen den beiden Aufgaben Annähern und Vermeiden zurückführen. Dies hängt möglicherweise auch damit zusammen, dass für den Fahrer nicht vorhersehbar war, welche Aufgabe als nächstes gefordert wird. Dadurch müssen ggf. beide „*task-sets*“ alternierend aktiviert und inhibiert werden. In Folge dessen besteht die Möglichkeit, dass zum Zeitpunkt des Stimulus-Onsets das falsche *task-set* aktiviert ist und zunächst inhibiert werden muss, um das andere *task-set* zu aktivieren (Kiesel et al., 2010; Monsell, 2003). Alternativ lässt sich der Reaktionszeitunterschied auch auf die Aufgabenschwierigkeit zurückführen. Der beobachtete Unterschied entspricht annähernd den Reaktionszeitunterschieden, die bei Einfach- vs. Mehrfachwahlaufgaben beobachtet wurden (vgl. Sternberg, 1966; 1969). Allerdings ist dieser Unterschied in der Praxis eher vernachlässigbar, da er im Bereich der allgemeinen Streuung der Reaktionszeiten liegt.

Allerdings könnten die beschriebenen Effekte und Mechanismen erklären, warum Fahrer in Gefahrensituationen häufig nicht dazu in der Lage sind, die zur Kollisionsvermeidung erforderliche Reaktion auszuwählen und durchzuführen (vgl. Kapitel 2). In dieser Studie standen bei Erscheinen des Stimulus nur zwei Handlungsoptionen zur Wahl und die Fahrer mussten keinen Umgebungsverkehr beachten. Dennoch zeigt sich eine erhebliche Beeinträchtigung der Fahrerleistung. In der Realität müssen die Fahrer möglicherweise zwischen deutlich mehr Handlungsoptionen auswählen (z. B. Bremsen, Ausweichen nach links, Ausweichen nach rechts) und neben dem Hindernis auch andere Verkehrsteilnehmer beachten. Von diesem Standpunkt aus ist es nachvollziehbar, dass Fahrer unter Zeitdruck bevorzugt mit einer Bremsung reagieren (vgl. Kapitel 2), da diese Reaktion hoch geübt ist und nicht zwischen verschiedenen Handlungsoptionen entschieden werden muss.

Insgesamt stimmen die ermittelten Lenkreaktionszeiten weitgehend mit denen aus den Laborstudien überein (vgl. Müsseler et al., 2009; Proctor et al., 2004; Wang et al., 2003). Ein Einfluss der Instruktion (Annähern vs. Vermeiden), der auf räumliche Kompatibilitätseffekte hingewiesen hätte, konnte hingegen nicht beobachtet werden. Dies ist möglicherweise auf die Situationsgestaltung zurückzuführen, da die Hindernisse nicht nur links oder rechts vor dem Fahrer präsentiert wurden, sondern sich zusätzlich in Richtung der mittleren Fahrspur bewegten. Durch die Bewegung des Stimulus in Richtung der mittleren Fahrspur könnte auch die erwartete Endposition des Stimulus relevant sein, da vor allem die Endposition des Stimulus für die Handlung von Bedeutung ist. In diesem Fall könnten räumliche Kompatibilitätseffekte eher in Bezug auf die zu erwartende Endposition des Stimulus auftreten. Aktuelle Erklärungsansätze gehen davon aus, dass die zugehörigen Verhaltens-Effekt-Beziehungen eine bedeutende Rolle für die Entstehung von räumlichen Kompatibilitätseffekten spielen (vgl. Hommel, 2011). Dadurch kann darauf geschlossen werden, dass dies auch für dynamische Situationen gilt. Hierbei muss zusätzlich prädiziert werden, wie sich die Umwelt verändert, um dies für die Verhaltensteuerung zu berücksichtigen. Für die Überprüfung dieser Hypothese, sind allerdings weitere Studien erforderlich.

5.5.3 Schlussfolgerung

Fasst man die Ergebnisse zusammen, ist davon auszugehen, dass die Verarbeitungszeit des äußeren visuellen Regelkreises in Gefahrensituationen selbst unter idealen Bedingungen (d.h. ohne eine Ablenkung) und einer trainierten Lenkreaktion ca. 0.5 Sekunden beträgt. Das bedeutet, dass die Fahrer ab dem Zeitpunkt, ab dem das Hindernis für sie sichtbar ist, 0.5 Sekunden benötigen, um das Hindernis zu erkennen, die erforderliche Handlung auszuwählen und mit der Lenkreaktion zu beginnen. Damit liefert die vorliegende Studie einen Anhaltspunkt für die Dauer der visuellen Verarbeitung im Kontext einer Fahraufgabe.

Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass das Vorliegen mehrerer Handlungsoptionen bzw. „task-sets“ zu einer hohen Fehlerrate führt. Das bedeutet, dass der Fahrer möglicherweise zunächst die falsche Handlung auswählt, was zu einer Kollision mit dem Hindernis führen könnte. Dies ist auch ein potenzieller Erklärungsansatz für die Präferenz einer Bremsreaktion (vgl. Kapitel 2). Bei Ausweichreaktionen müssen Fahrer sich zunächst für eine Ausweichrichtung entscheiden. Zusätzlich müssen sie, um Sekundärkollisionen mit anderen Verkehrsteilnehmer zu vermeiden, überprüfen, ob die Ausweichtrajektorie frei von Hindernissen ist. Bei einer Bremsreaktion müssen Fahrer hingegen nicht zwischen verschiedenen Handlungsoptionen abwägen. Daher ist eine Lenkreaktion aufgrund der verschiedenen Handlungsoptionen (Mehrfachwahlaufgabe) möglicherweise fehleranfälliger als eine Bremsreaktion (Einfachwahlaufgabe) und wird deshalb vermieden.

Insofern die oben genannten Beobachtungen auch auf Fälle zutreffen, in denen ein automatischer Ausweichassistent eingreift, könnte dies bedeuten, dass die Fahrer zum Zeitpunkt des Eingriffs noch keine Handlungsentscheidung getroffen haben, selbst wenn sie nicht abgelenkt sind. Daher ist es wichtig zu überprüfen, ob und wann die Fahrer in Folge eines Lenkeingriffs eine Mitlenkreaktion zeigen. In den folgenden Studien zum Einfluss von Ausweicheingriffen liegt daher ein Fokus der Auswertung auf dem zeitlichen Reaktionsmuster der Fahrer, um Anhaltspunkte für den Zeitpunkt der Handlungsentscheidung zu erhalten (siehe Kapitel 4.3).

6 Studie II: Einfluss der Eingriffscharakteristik auf das Fahrerverhalten

6.1 Herleitung der Forschungsfragen

Wie bereits in Studie I beschrieben, gehen bisherige Fahrerverhaltensmodelle davon aus, dass Fahrer primär visuelle Informationen zur Steuerung des Fahrzeugs heranziehen. Die Verarbeitung dieser Informationen erfordert eine gewisse Zeitspanne, deren Dauer von verschiedenen Faktoren beeinflusst werden kann (vgl. Studie I). Automatische Eingriffe in die Querführung umgehen zwar das Problem, dass Fahrer zu spät oder gar nicht auf die Gefahrensituation reagieren (vgl. Kapitel 2.1), allerdings können die Fahrer mithilfe des Lenkrads nach wie vor die Querführung des Fahrzeugs beeinflussen. Je nach Wahl des Aktors (vgl. Kapitel 2.2.1) kann dies bereits bei Aufbau des Eingriffs relevant sein, was insbesondere bei Eingriffen mittels einer Lenkmomentüberlagerung zu Problemen führen kann. Das bedeutet, dass bereits ab Beginn des Eingriffs mit einer Interaktion des Fahrers gerechnet werden muss, welche im Zweifel dazu führen kann, dass die Wirksamkeit des automatischen Ausweicheingriffs reduziert wird. Daher sollte genauer überprüft werden, wie Fahrer auf (automatische) Eingriffe in die Querführung reagieren und welche Faktoren dabei beachtet werden müssen.

In der Anwendungsforschung wurden bereits einige Studien durchgeführt, die Hinweise darauf liefern, welche Faktoren die Reaktion des Fahrers im Falle eines Eingriffs in die Querführung beeinflussen können (vgl. Kapitel 2.2). Sowohl die Arbeiten von Buschardt (2003) als auch von Neukum et al. (2010a) liefern Anhaltspunkte dafür, dass das zeitliche Reaktionsmuster des Fahrers durch die Signalcharakteristik des Lenkmoments beeinflusst wird. Stärkere Lenkmomente werden häufiger bemerkt als schwächere und die Anstiegsgeschwindigkeit des Lenkmoments scheint die Reaktionszeit des Fahrers zu beeinflussen (vgl. Abschnitt 2.2.2). Dabei führt eine geringere Anstiegssteilheit des Lenkmoments bei höheren Amplituden zu größeren Reaktionszeiten (auf Basis des ersten Extremwerts des Lenkradwinkels), während eine höhere Anstiegssteilheit zu geringeren Reaktionszeiten führt. Neukum et al. (2010a) gehen davon aus, dass die Ursache hierfür der langsamere Aufbau der Gegenkräfte bei Aufschaltungen mit geringen Gradienten ist (vgl. Neukum et al., 2010a, S.106). Allerdings wurde der Einfluss des Anstiegsgradienten und der Amplitude des Lenkmoments bisher überwiegend im Zusammenhang mit fehlerhaften Eingriffen untersucht (siehe hierzu Neukum et al., 2010a; Schmidt, 2009). Eine Variation der Amplitude und des Anstiegsgradienten bei der Untersuchung berechtigter Eingriffe erfolgte bisher nicht. Daher ist unklar, wie sich die unterschiedliche Eingriffscharakteristik auf das Fahrerverhalten und die Wirksamkeit eines berechtigten Eingriffs auswirkt.

Im Falle eines berechtigten Eingriffs mit haptischer Rückmeldung besteht die Möglichkeit, dass der Fahrer sein Handlungsziel noch nicht an die bevorstehende Situation angepasst hat. Eine mögliche Ursache hierfür könnte die unterschiedliche Verarbeitungsgeschwindigkeit des äußeren, visuellen und des inneren, sensomotorischen Regelkreises sein.

Wie bereits in Kapitel 2.3 und Kapitel 3 beschrieben, benötigt der Fahrer möglicherweise mehr Zeit um die visuellen Informationen zu verarbeiten und eine Handlungsentscheidung zu treffen. Findet hingegen bereits vor der Handlungsentscheidung des Fahrers eine Reaktion auf die wahrgenommene Abweichung innerhalb des sensomotorischen Regelkreises statt, könnte dies das Verhalten des Fahrers beeinflussen. Dies könnte sich wie folgt äußern:

Grundsätzlich könnte der berechtigte Eingriff zunächst als Abweichung vom ursprünglichen Handlungsziel (Feedforward-Lenkung) interpretiert werden (vgl. Abbildung 6-1). In Folge dessen sollte das zu beobachtende Reaktionsmuster dem Reaktionsmuster fehlerhafter Eingriffe ähneln. Das äußert sich darin, dass die Fahrer den automatischen Lenkeingriff nicht aufgreifen, sondern unterdrücken.

Sind dabei insbesondere die sensomotorischen Regel- und Kontrollprozesse für die Reaktion der Fahrer von Bedeutung, sollte sich die Eingriffsgestaltung in Folge der unterschiedlichen haptischen Rückmeldung auch auf das Reaktionsmuster der Fahrer auswirken. Dementsprechend sollten auch bei berechtigten Eingriffen steile Anstiegsgradienten des Lenkmoments zu kürzeren Reaktionszeiten führen als weniger steile Anstiegsgradienten (vgl. Kapitel 2.2.3).

Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass sich die Amplitude des Eingriffs bei steilen Anstiegsgradienten bereits nach kurzer Zeit nicht mehr verändert. Bei flachen Anstiegsgradienten ändert sich die Stärke der Störung jedoch kontinuierlich über einen längeren Zeitraum. Dadurch ist möglicherweise eine kontinuierliche Anpassung der sensomotorischen Regelung erforderlich, die erst abgeschlossen ist, wenn der Eingriff seine maximale Amplitude erreicht hat. Wird der berechtigte Eingriff als Störung oder Abweichung des aktuellen Handlungs- oder Regelziels wahrgenommen, könnte dies dazu führen, dass die Fahrer länger mit der Kompensation des Fehlers beschäftigt sind. In Folge dessen wird möglicherweise auch die Handlungsentscheidung für eine Lenkreaktion, die den Lenkeingriff aufnimmt, oder die Handlungsausführung verzögert (vgl. hierzu auch Neukum et al., 2010a).

Begründet wird dies damit, dass die Verarbeitung der Lenkempfehlung und die Reaktion darauf, sowie die Umsetzung einer Lenkbewegung zur Korrektur der Gierstörungen zwei unterschiedliche Aufgaben darstellen, die vom Fahrer nicht parallel bearbeitet werden können. In Folge dessen kommt es zu einer Interferenz zwischen den beiden Aufgaben. In der Regel führt dies dazu, dass die Bearbeitung der zweiten Aufgabe verzögert wird (siehe hierzu auch Kapitel 2.2.4.1). Unter der Annahme, dass die haptisch getriggerte Kompensationsreaktion zuerst ausgelöst wird, bedeutet dies, dass die Handlungsentscheidung für eine Ausweichreaktion und die Handlungsausführung verzögert wird.

Dies gilt wahrscheinlich nur dann, wenn der Eingriff auf Ebene der sensomotorischen Regelung (Feedforward Lenkung) oder auf Ebene der visuellen Regelung (Feedforward Fahrzeug) als Störung bzw. Abweichung wahrgenommen wird. Wenn die Fahrer sich bei Beginn des Eingriffs bereits zu einer Mitlenkreaktion entschlossen haben, stellt der Eingriff möglicherweise keine Abweichung vom Handlungsziel dar. In diesem Fall sollte das Reaktionsmuster anders aussehen als bei fehlerhaften Eingriffen, da die Kompensationsreaktion verzögert wird oder vollständig ausbleibt.

Alternativ könnte der langsamere Aufbau des Lenkmoments, im Gegensatz zu einem schnellen Aufbau des Lenkmoments, nicht zu einer reflexartigen Gegenreaktion führen, was sich positiv auf den Nutzenfall auswirken würde. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass der langsamere Aufbau des Lenkmoments dazu führt, dass der Lenkeingriff später bemerkt wird, da die Wahrnehmungsschwelle später überschritten wird (vgl. Kapitel 2.2.2). Dadurch hätten die Fahrer mehr Zeit für die Informationsverarbeitung und könnten sich so bereits für eine Ausweichreaktion entscheiden, bevor die Abweichung festgestellt wird und die Kompensation des Lenkeingriffs einsetzt. In Folge dessen könnten Fahrer den berechtigten Eingriff eher aufnehmen.

Allerdings hätte dies wahrscheinlich auch negative Auswirkungen auf den Fehlerfall, da die Fahrer bei einem langsamen Aufbau des Lenkmoments später auf den unberechtigten Eingriff reagieren würden als bei einem schnellen Aufbau des Lenkmoments, da auch hier die Abweichung später bemerkt wird.

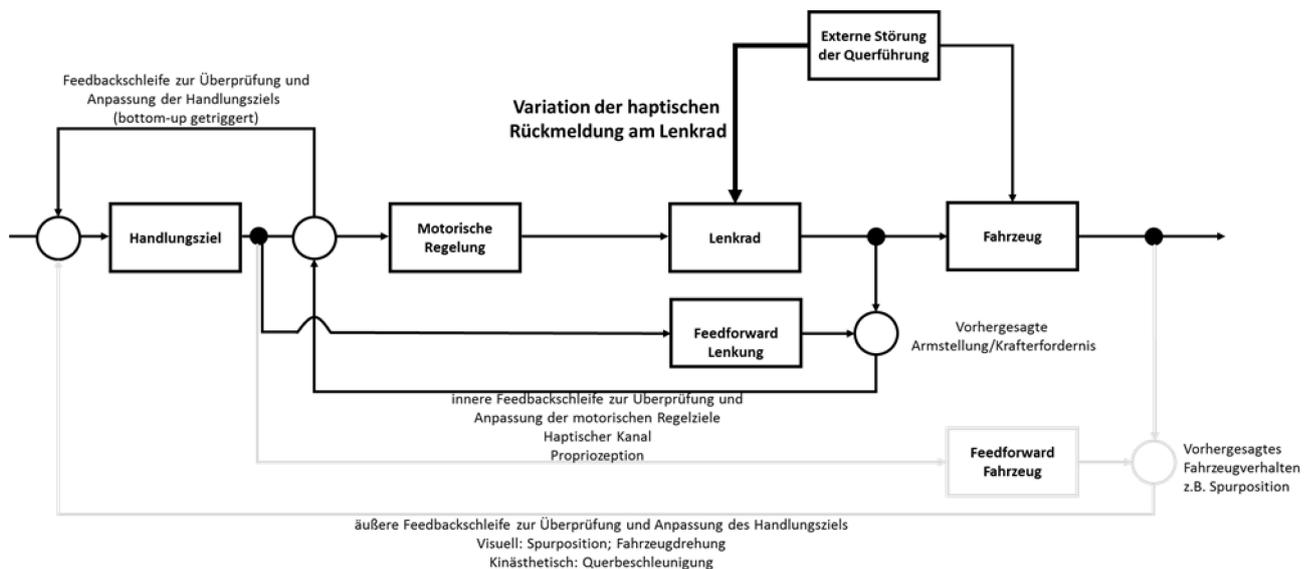


Abbildung 6-1. Modell der hierarchischen Struktur und der relevanten Regelkreise für die Beschreibung des Fahrerverhaltens im Fall externer Störungen der Querführung. Die geplante Variation der Eingriffscharakteristik sollte sich vor allem auf den sensomotorischen Kontrollprozess auswirken. Im Fokus der Studie stehende Bestandteile des Verhaltensmodells sind schwarz dargestellt.

Aus den bisherigen Ausführungen wird deutlich, dass die genauen Auswirkungen der Anstiegssteilheit des Lenkmoments auf die Wirksamkeit unklar sind. Wie zuvor dargestellt, könnte eine geringe Anstiegssteilheit des Lenkmoments sich sowohl positiv als auch negativ auf den Nutzen- und Fehlerfall auswirken.

Im folgenden Abschnitt werden anhand der oben genannten Aspekte konkrete Forschungsfragen und Hypothesen für den Anwendungsfall abgeleitet. Ziel der Forschungsfragen ist es, allgemeine Hinweise auf die Wechselwirkung zwischen dem angenommenen sensomotorischen und visuellen Regelkreis im Anwendungsfall zu erhalten. Diese offenen Forschungsfragen werden zum Teil durch Hypothesen ergänzt, mit deren Hilfe die zu erwartenden Auswirkungen auf das Fahrerverhalten beschrieben werden sollen.

6.2 Forschungsfragen

Die folgende Studie soll zum einen die Frage beantworten, welchen Einfluss eine haptische Rückmeldung am Lenkrad auf die Verarbeitungsgeschwindigkeit und das Reaktionsmuster der Fahrer hat. Dazu werden sowohl Situationen betrachtet, in denen eine Lenkreaktion erforderlich ist, als auch Situationen, in denen keine Lenkreaktion erforderlich ist. Da dies unterschiedliche Reaktionen der Fahrer erfordert, soll dadurch überprüft werden ob die Fahrer ihre Reaktion beeinflussen können oder ob automatisch ablaufende Prozesse für die Reaktion verantwortlich sind (vgl. Forschungsfrage 6-1).

Forschungsfrage 6-1: Können die Fahrer ihre Reaktion auf gerichtete Lenkempfehlungen mit haptischer Rückmeldung beim erstmaligen Erleben des Nutzenfalls gezielt beeinflussen?

Aufgrund des Einflusses der haptischen Rückmeldung wird allerdings vermutet, dass die Fahrer zunächst vergleichbare Reaktionsmuster wie im Fehlerfall zeigen (vgl. Forschungsfrage 6-2).

Forschungsfrage 6-2: Ist das beobachtete Reaktionsmuster der Fahrer bei erstmaligem Erleben der Lenkempfehlung vergleichbar mit dem Reaktionsmuster im Fehlerfall?

Des Weiteren soll genauer überprüft werden, wie sich die Gestaltung einer gerichteten Lenkempfehlung auf das Fahrerverhalten auswirkt (vgl. Forschungsfrage 6-3).

Forschungsfrage 6-3: Welchen Einfluss hat die Gestaltung der Lenkempfehlung auf das Reaktionsmuster der Fahrer?

Im Fokus steht dabei der Einfluss des Anstiegsgradienten des Lenkmoments auf die Reaktionszeit des Fahrers. Anhand der oben geführten Diskussion könnte ein flacher Anstieg des Lenkmoments im Nutzenfall zu einem der folgenden Effekte führen:

Hypothese 6-1: Im Nutzenfall führt ein flacher Anstieg des Lenkmoments zu einer schnelleren Aufnahme der gerichteten Lenkempfehlung.

Hypothese 6-2: Im Nutzenfall führt ein flacher Anstieg des Lenkmoments zu einer verzögerten Aufnahme des automatischen Ausweicheingriffs.

Belege für Hypothese 6-1 sollten sich darin äußern, dass die Wirksamkeit von Lenkempfehlungen mit einem flachen Anstieg des Lenkmoments höher ausfällt als die Wirksamkeit von Lenkempfehlungen mit einem steilen Anstieg des Lenkmoments. Dies sollte sich z. B. in der Häufigkeit der Kollisionen, der Häufigkeit der gezeigten Reaktionsmuster und der Größe des Spurversatzes widerspiegeln. So sollten weniger Fahrer die Lenkempfehlung unterdrücken und mehr Fahrer die Empfehlung aufnehmen. Gleichzeitig sollten die Kennwerte des Lenkverhaltens unterschiedlich ausfallen.

Werden jedoch gegenteilige Befunde beobachtet, die darauf hindeuten, dass ein steiler Anstieg des Lenkmoments zu weniger Kollisionen und einem häufigeren Aufgreifen der Lenkempfehlung führt, spricht dies eher für Hypothese 6-2.

Um bewerten zu können, ob das Reaktionsmuster der Fahrer im Nutzenfall mit dem Reaktionsmuster im Fehlerfall vergleichbar ist (siehe Forschungsfrage 6-2), muss zudem eine Betrachtung des Fehlerfalls erfolgen. Damit soll auch überprüft werden, ob die oben genannten Befunde zu unberechtigten Eingriffen im Fehler- und Nutzenfall repliziert werden können (vgl. Hypothese 6-3).

Hypothese 6-3: Im Fehler- und Nutzenfall führt ein flacher Anstieg des Lenkmoments (im Vergleich zu einem schnellen Anstieg des Lenkmoments) dazu, dass Indikatoren für die Kompensationsreaktion verzögert auftreten.

Dies sollte sich vor allem darin zeigen, dass das erste Maximum des Lenkradwinkels und der Lenkradwinkelgeschwindigkeit bei Lenkempfehlungen mit flachem Anstiegsgradienten später auftritt als bei Lenkempfehlungen mit steilem Anstiegsgradienten.

Des Weiteren soll überprüft werden, wie sich das wiederholte Erleben eines berechtigten Eingriffs auf das Reaktionsmuster der Fahrer auswirkt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Fahrer durch das wiederholte Erleben eine Beziehung zwischen dem haptischen Signal des automatischen Ausweicheingriffs und der geforderten Reaktion herstellen können. In Folge dessen sollten sie mit zunehmender Lernerfahrung besser dazu in der Lage sein, den Eingriff aufzunehmen (vgl. Hypothese 6-4).

Hypothese 6-4: Mit zunehmender Lernerfahrung wird die gerichtete Lenkempfehlung häufiger aufgenommen und seltener unterdrückt.

Zusätzlich sollen weitere Einflussfaktoren betrachtet werden, bei denen unklar ist, welchen Einfluss sie auf das Reaktionsmuster der Fahrer haben. Dazu gehört z. B. die maximale Amplitude des Lenkmoments und die Spurbelegung durch das Hindernis im Falle eines berechtigten Eingriffs und die Anzahl der freien Fahrspuren im Falle eines fehlerhaften Eingriffs. Dies spiegelt sich in den folgenden Forschungsfragen wider:

Forschungsfrage 6-4: Welchen Einfluss hat die maximale Amplitude des Lenkmoments auf das Lenkverhalten der Fahrer im Nutzenfall?

Forschungsfrage 6-5: Welchen Einfluss hat die Spurbelegung durch das Hindernis auf das Lenkverhalten der Fahrer im Nutzenfall?

Forschungsfrage 6-6: Welchen Einfluss hat der im Fehlerfall verfügbare Platz auf das Lenkverhalten der Fahrer?

6.3 Methodik

6.3.1 Stichprobe

Alle Teilnehmer der Studie entstammten dem Testfahrerpanel der WIVW GmbH und waren durch ein standardisiertes Training an das Fahren im dynamischen Fahrsimulator gewöhnt. Um die Abbruchquote aufgrund von „*Simulator Sickness*“ zu minimieren, wurden nur Fahrer mit einer als sehr gut eingestuften Verträglichkeit eingeladen. Insgesamt nahmen an der Studie $N = 32$ Fahrer teil (davon 16 weiblich). Da nicht explizit überprüft wurde, ob die Fahrer bereits an vergleichbaren Studien teilgenommen haben, kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Fahrer im Vorfeld der Studie bereits Erfahrungen mit automatischen Eingriffen gemacht haben. Das mittlere Alter der weiblichen Fahrer betrug $M = 40.1$ Jahre ($MIN = 21$, $MAX = 64$) und das der männlichen Fahrer $M = 42$ Jahre ($MIN = 21$, $MAX = 78$). Die selbst berichtete jährliche Fahrleistung betrug im Mittel 14781 km bei den männlichen Fahrern ($MIN = 2500$ km; $MAX = 40000$ km) und 14175 km bei den weiblichen Fahrern ($MIN = 800$ km; $MAX = 40000$ km).

6.3.2 Gestaltung der Szenarien

Für den Nutzenfall wurden städtische Szenarien mit Querverkehr, wie z. B. ausparkenden Fahrzeugen oder kreuzenden Fahrradfahrern, erstellt. Hierzu wurden insgesamt vier unterschiedliche Szenarien umgesetzt, in welchen der Konfliktpartner (PKW oder Radfahrer, vgl. Abbildung 7-1) an mehreren Stellen aus einer Sichtverdeckung auf den Fahrstreifen des Fahrers fuhr. Zusätzlich wurde variiert, wie weit der Konfliktpartner in den Fahrstreifen des Fahrers eindrang (1.75 m und 0.9 m). Da die Ausweichfunktion im Nutzenfall grundsätzlich nur initiiert werden soll, wenn das Manöver auch in Bezug auf Umgebungsverkehr als sicher bewertet werden kann, wurde der Nutzenfall nur auf Straßenquerschnitten mit zwei Fahrstreifen in Fahrtrichtung betrachtet. Die Breite der Fahrstreifen betrug 3.5 m. Die Aktivierung des Konfliktpartners erfolgte bei einer TTC von 1.4 s. Bei einer TTC von 1.2 s wurden die in Abschnitt 6.3.3 beschriebenen Lenkeingriffe ausgelöst. Im Fehlerfall wurde der Eingriff auf gerade Strecke ohne das Vorhandensein eines Konfliktpartners ausgelöst. Zusätzlich wurde

die Anzahl der Fahrstreifen in Fahrtrichtung variiert, sodass den Fahrern im Falle eines fehlerhaften Eingriffs entweder zwei Fahrstreifen in Fahrtrichtung zur Verfügung standen oder nur einer.



Abbildung 6-2: Umsetzung der Szenarien im Fahrsimulator. Dargestellt ist das Szenario Ausparken (links) und querender Radfahrer (rechts). Sowohl der PKW als auch der querende Radfahrer waren vor Beginn der Situation durch Sichthindernisse (z. B. parkende Fahrzeuge oder Büsche) verdeckt.

6.3.3 Eingriffscharakteristik

Für die Variation der Eingriffscharakteristik wurden drei unterschiedliche Eingriffsvarianten mit zwei unterschiedlichen Eingriffsstärken (4 Nm und 6 Nm) umgesetzt. Der Lenkmomentverlauf wurde im Falle eines berechtigten Lenkeingriffs bei einer TTC von 1.2 Sekunden zum Konfliktpartner eingespielt. Variiert wurden die Dauer der maximalen Amplitude (200 ms und 400 ms) sowie die Geschwindigkeit des Lenkmomentaufbaus. In Variante 1 und Variante 2 erfolgte der Aufbau des Lenkmoments rechteckförmig (unbegrenzter Gradient). In Variante 3 wurde das Lenkmoment linear über eine Dauer von 250 ms aufgebaut, was einem Gradienten von 16 Nm/s bei einer maximalen Amplitude von 4 Nm und einem Gradienten von 24 Nm/s bei einer maximalen Amplitude von 6 Nm entspricht. Die Geschwindigkeit des Lenkmomentabbaus war sowohl für den rechteckförmigen Aufbau als auch für den linearen Aufbau mit Gradienten identisch und entspricht der Aufbaugeschwindigkeit der jeweiligen Amplitude.

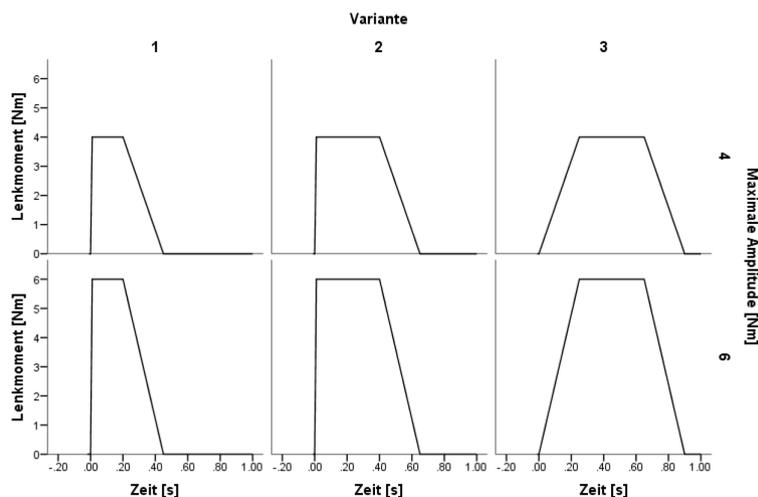


Abbildung 6-3: Zeitverlauf des Lenkmoments für die drei unterschiedlichen Eingriffsvarianten. Variante 1: Rechteckförmiger Anstieg des Lenkmoments, Dauer der max. Amplitude: 200ms; Variante 2: Rechteckförmiger Anstieg des Lenkmoments, Dauer der max. Amplitude: 400 ms,; Variante 3: Linearer Anstieg des Lenkmoments, Dauer des Lenkmomentaufbaus: 250 ms, Dauer der max. Amplitude: 400 ms. Die Dauer des Lenkmomentabbaus betrug in allen Varianten 250 ms.

6.3.4 Versuchsablauf

Die Studie bestand aus insgesamt drei Fahrten, die von allen Fahrern in der gleichen Reihenfolge absolviert wurden.

Im ersten Teil wurden die Fahrer einer von zwei Gruppen zugewiesen und erlebten erstmalig einen berechtigten Eingriff. Die eine Hälfte erhielt einen Lenkeingriff mit rechteckförmigem Anstieg des Lenkmoments (Eingriffsvariante 2), die andere einen Lenkeingriff mit linearem Anstieg (Eingriffsvariante 3). Die maximale Amplitude des Lenkmoments betrug 6 Nm. In beiden Gruppen erlebten die Fahrer den berechtigten Eingriff im gleichen Szenario.

Im zweiten Teil wurden die Fahrer wiederholt mit berechtigten Eingriffen konfrontiert. Dabei wurden die Eingriffsvariante (1-3), die Amplitude des Lenkmoments (4 Nm vs. 6 Nm), der Konfliktpartner (PKW vs. Radfahrer) und die Spurbelegung durch den Konfliktpartner (25% vs. 50%) variiert. Ziel dieser Fahrt war es zum einen, mögliche Lerneffekte bei wiederholtem Erleben von berechtigten Eingriffen zu analysieren und zum anderen Aufschluss über die unterschiedlichen Faktoren zu erhalten.

Im dritten Teil wurden die Fahrer mit dem Fehlerfall konfrontiert. Variiert wurden die Eingriffsvariante (2 und 3) sowie die Anzahl der Fahrstreifen in Fahrtrichtung.

Aus den in den vorausgehenden Abschnitten erläuterten Faktoren ergibt sich der in Tabelle 6-1 dargestellte Versuchsplan. Between-Faktoren (B) wurden zu gleichen Teilen auf die Probandengruppen verteilt, Within-Faktoren (W) wurden von allen Probanden durchfahren. Für die Abfolgen der Within-Faktoren wurden vier pseudorandomisierte (P) Abfolgen erstellt, um potenzielle Reihenfolgeeffekte zu vermeiden.

Tabelle 6-1: Versuchsplan der Studie. Between-Faktoren (B) wurden zwischen den Gruppen ausbalanciert. Within-Faktoren (W) wurden in pseudorandomisierter Reihenfolge (P) dargeboten.

Studienteil	Eingriffsvariante	Spurbelegung [%]	Konfliktpartner	Streckentyp
1	2, 3 (B)	50	PKW	Erstkontakt
2	1, 2, 3 (W, P)	25, 50 (W, P)	PKW, Fahrrad (W, P)	Nutzenfall
3	2,3 (W, P)	/	/	Fehlerfall

B = Between-Faktor, W = Within-Faktor, P = pseudorandomisiert

6.4 Ergebnisse

Die Ergebnisse werden im Folgenden getrennt nach Nutzen- und Fehlerfall berichtet.

Für den Nutzenfall werden zunächst Parameter und Indikatoren für die Wirksamkeit des berechtigten Eingriffs berichtet, um eine Vergleichbarkeit mit bereits vorliegenden Studien zu gewährleisten. Zusätzlich wird das Lenkverhalten des Fahrers anhand der in Kapitel 4.3 berichteten Vorgehensweise analysiert und beschrieben. Der Fokus der Analyse liegt auf dem Einfluss des Anstiegsgradienten des Lenkmoments im Falle eines berechtigten Eingriffs.

Für den Fehlerfall erfolgt ebenfalls eine Analyse und Beschreibung des Reaktionsmusters. Zusätzlich wird auf den resultierenden Querversatz eingegangen, um eine Vergleichbarkeit mit bereits vorliegenden Studien zu gewährleisten. Auch hier steht der Einfluss des Anstiegsgradienten im Fokus.

Abschließend auf wird auf weitere Einflussfaktoren, wie die Spurbelegung durch das Hindernis und die maximale Amplitude, sowie mögliche Lerneffekte in Folge eines wiederholten Erlebens berechtigter Eingriffe eingegangen.

6.4.1 Nutzenfall

Kollisionen Beide Eingriffsvarianten zeigen deskriptiv eine vergleichbare Wirksamkeit im Nutzenfall. Mit dem rechteckförmigen Aufbau des Lenkmoments konnten 56% ($n = 9$) der Fahrer eine Kollision nicht verhindern, mit dem linearen Aufbau des Lenkmoments 62% ($n = 10$). Anhand der Kollisionshäufigkeiten finden sich daher weder Belege für Hypothese 6-1 noch für Hypothese 6-2.

Reaktionsmuster Die Analyse der Reaktionsmuster (vgl. Kapitel 4.3) zeigt, dass bei rechteckförmiger Aufschaltung des Lenkmoments weniger Fahrer als Festhalter und mehr Fahrer als initiale Dämpfer klassifiziert wurden als bei linearer Aufschaltung des Lenkmoments (vgl. Abbildung 6-4). Bei rechteckförmiger Aufschaltung des Lenkmoments wurden 44% ($n = 7$) der Fahrer als Festhalter, 38% ($n = 6$) als initiale Dämpfer und 19% ($n = 3$) als Mitlenker klassifiziert. Bei linearer Aufschaltung wurden 63% ($n = 10$) als Festhalter, 25% ($n = 4$) als initiale Dämpfer und 13% ($n = 2$) als Mitlenker klassifiziert. Dies ist ein Indikator für die Gültigkeit von Hypothese 6-1, da Fahrer in Folge eines langsamen Lenkmomentaufbaus die Lenkempfehlung eher aufgreifen. Alle Fahrer, die als Festhalter klassifiziert wurden, konnten die Kollision mit dem Hindernis nicht vermeiden, während die meisten Fahrer, die als initiale Dämpfer oder Mitlenker klassifiziert wurden, die Kollision vermeiden konnten. Lediglich bei der rechteckförmigen Aufschaltung des Lenkmoments konnten zwei Fahrer, die als initialer Dämpfer und Mitlenker klassifiziert wurden, die Kollision nicht vermeiden. Bei rechteckförmigem Aufbau des Lenkmoments zeigten 87.5% ($N = 14$) der Fahrer eine Bremsreaktion, bei linearem Aufbau 93.75% ($N = 15$). Grundsätzlich deutet dies darauf hin, dass zumindest einige Fahrer dazu in der Lage sind, ihr Reaktionsmuster anzupassen (vgl. Forschungsfrage 6-1).

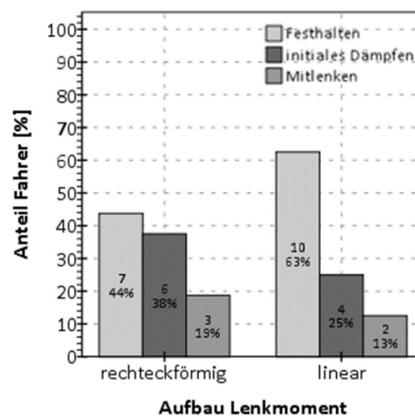


Abbildung 6-4. Häufigkeit der Reaktionsmuster Festhalten, initiales Dämpfen und Mitlenken im Nutzenfall für Eingriffe mit rechteckförmigem und linearem Aufbau des Lenkmoments.

Um einen möglichen Einfluss der Eingriffsvariante auf Kennwerte des Lenkverhaltens inferenzstatistisch zu prüfen, wurde eine multivariate Varianzanalyse mit den abhängigen Variablen maximaler Spurversatz, erstes Lenkradwinkelmaximum, Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums, erstes Lenkradwinkelgeschwindigkeitsmaximum und Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelgeschwindigkeitsmaximums berechnet.

Der Omnibus-Test ergab einen signifikanten Einfluss der Eingriffsvariante auf die abhängigen Variablen (Wilks Lambda, $F(5, 26) = 22.705$, $p < .001$, $\eta^2 = .814$). Die Ergebnisse der univariaten Varianzanalysen werden bei der folgenden Beschreibung der Kennwerte berichtet.

Maximaler Spurversatz Die univariate Varianzanalyse ergab keinen signifikanten Einfluss der Eingriffsvariante auf den maximalen Spurversatz ($F(1, 30) = .077$, $p = .783$, $\eta^2 = .003$). Der maximale Spurversatz in Ausweichrichtung fiel im Mittel vergleichbar aus ($M_{\text{rechteckförmig}} = 1.70$ m, $SD_{\text{rechteckförmig}} = 1.54$ m; $M_{\text{linear}} = 1.55$ m, $SD_{\text{linear}} = 1.48$ m). Auffällig ist bei beiden Eingriffsvarianten die hohe Streuung des maximalen Spurversatzes. Einzelne Fahrer zeigten nahezu keinen Spurversatz in Ausweichrichtung, während andere Fahrer einen Spurversatz von mehr als einer Fahrstreifenbreite (3.5 m) erzeugten. Die Aufteilung nach den drei Reaktionsmustern verdeutlicht den Einfluss des Fahrerverhaltens auf den maximalen Spurversatz (vgl. Abbildung 6-5). Wurde das Reaktionsmuster Festhalten identifiziert, fiel der maximale Spurversatz im Mittel (wie zu erwarten) deutlich geringer aus als bei den Reaktionsmustern initiales Dämpfen oder Mitlenken.

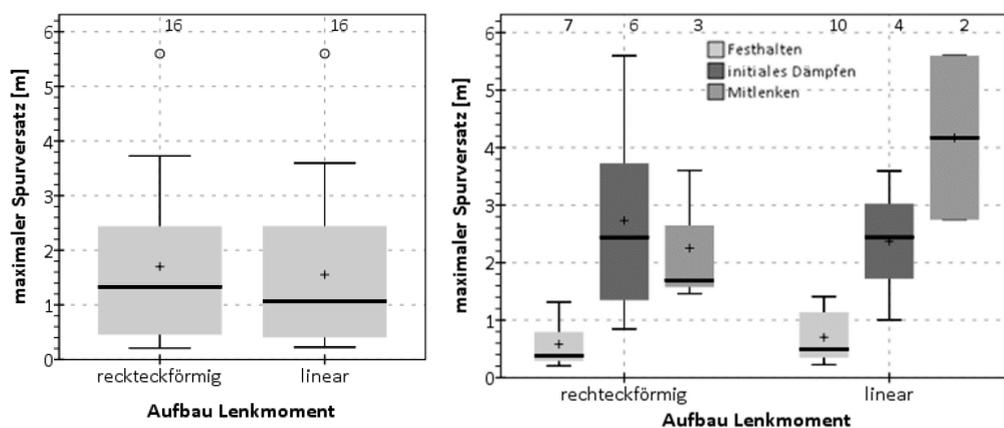


Abbildung 6-5. Maximaler Spurversatz [m] im Nutzenfall für Eingriffe mit rechteckförmigem und linearem Aufbau des Lenkmoments. Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Erstes Lenkradwinkelmaximum Die univariate Varianzanalyse ergab keinen signifikanten Einfluss der Eingriffsvariante auf das erste Lenkradwinkelmaximum ($F(1, 30) = .042$, $p = .838$, $\eta^2 = .001$). Das erste Maximum des Lenkradwinkels fiel für Eingriffe mit rechteckförmigem Aufbau des Lenkmoments deskriptiv etwas höher aus als für Eingriffe mit linearem Aufbau des Lenkmoments ($M_{\text{rechteckförmig}} = 48.87^\circ$, $SD_{\text{rechteckförmig}} = 52.39^\circ$; $M_{\text{linear}} = 44.66^\circ$, $SD_{\text{linear}} = 62.86^\circ$). Die Aufteilung nach den Reaktionsmustern verdeutlicht, dass bei der Verhaltensweise Festhalten eine sehr geringe Streuung beobachtet wird, während bei den Verhaltensweisen initiales Dämpfen und Mitlenken die Streuung deutlich größer ausfällt.

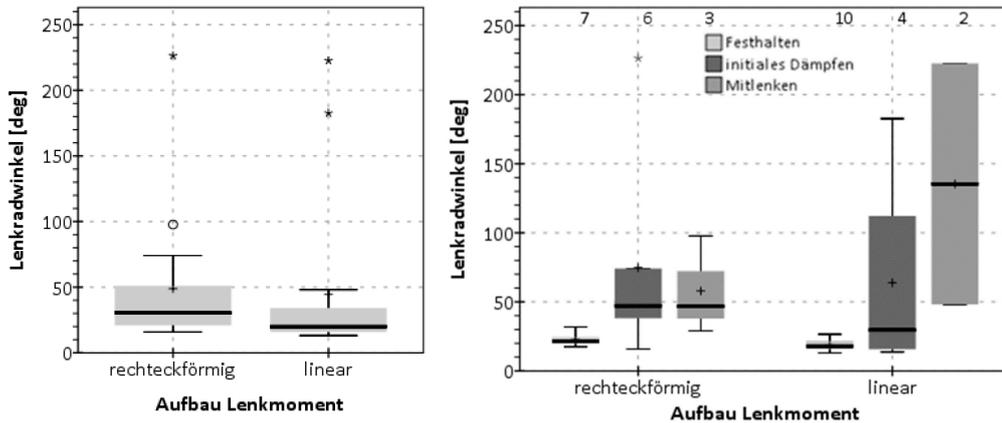


Abbildung 6-6. Erstes Maximum des Lenkradwinkels [deg] im Nutzenfall für Eingriffe mit rechteckförmigem und linearem Aufbau des Lenkmoments. Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Die univariate Varianzanalyse ergab keinen signifikanten Einfluss der Eingriffsvariante auf die Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums ($F(1, 30) = 2.524, p = .123, \eta^2 = .078$). Das erste Lenkradwinkelmaximum wurde bei einem rechteckförmigen Aufbau deskriptiv tendenziell früher erreicht als bei einem linearen Aufbau ($M_{\text{rechteckförmig}} = 0.43 \text{ s}, SD_{\text{rechteckförmig}} = 0.17 \text{ s}; M_{\text{linear}} = 0.54 \text{ s}, SD_{\text{linear}} = 0.19 \text{ s}$). Die Aufteilung nach den drei verschiedenen Reaktionsmustern verdeutlicht ebenfalls, dass der maximale Lenkradwinkel beim Reaktionsmuster Festhalten tendenziell früher erreicht wird als bei den Reaktionsmustern initiales Dämpfen oder Mitlenken. Diese Tendenz zeigt sich unabhängig davon, ob das Lenkmoment rechteckförmig oder linear aufgebaut wurde. Dies zeigt sich insbesondere beim Reaktionsmuster Festhalten. Bei den Reaktionsmustern initiales Dämpfen und Mitlenken ist die Varianz hingegen deutlich höher.

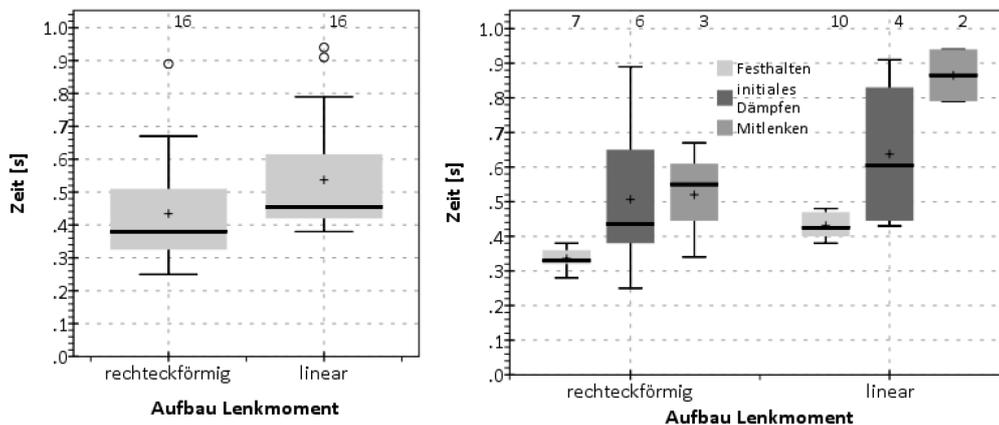


Abbildung 6-7. Dauer bis zum Erreichen des Lenkradwinkelmaximums [s] im Nutzenfall für Eingriffe mit rechteckförmigem und linearem Aufbau des Lenkmoments. Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit

Die univariate Varianzanalyse ergab keinen signifikanten Einfluss der Eingriffsvariante auf das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit ($F(1, 30) = .589, p = .449, \eta^2 = .019$).

Die univariate Varianzanalyse ergab

Allerdings fiel das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit bei Eingriffen mit rechteckförmiger Aufschaltung des Lenkmoments deskriptiv höher aus ($M_{\text{rechteckförmig}} = 175.08^\circ/\text{s}$, $SD_{\text{rechteckförmig}} = 57.26^\circ$; $M_{\text{linear}} = 142.63^\circ$, $SD_{\text{linear}} = 159.14^\circ$) als bei Eingriffen mit linearem Aufbau des Lenkmoments. Die Aufteilung nach den drei Reaktionsmustern verdeutlicht allerdings, dass sich die Lenkradwinkelgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Fahrerverhalten unterscheidet. Werden die Fahrer als Festhalter klassifiziert, wird eine geringere Lenkradwinkelgeschwindigkeit beobachtet als bei Fahrern, die als initiale Dämpfer oder Mitlenker klassifiziert werden. Die getrennte Betrachtung verstärkt tendenziell die Unterschiede zwischen den beiden Eingriffen. Dies zeigt sich insbesondere bei den Reaktionsmustern Festhalten und initiales Dämpfen. Hier wurden bei linearem Aufbau des Lenkmoments im Mittel geringere Lenkradwinkelgeschwindigkeiten beobachtet als bei rechteckigem Aufbau des Lenkmoments.

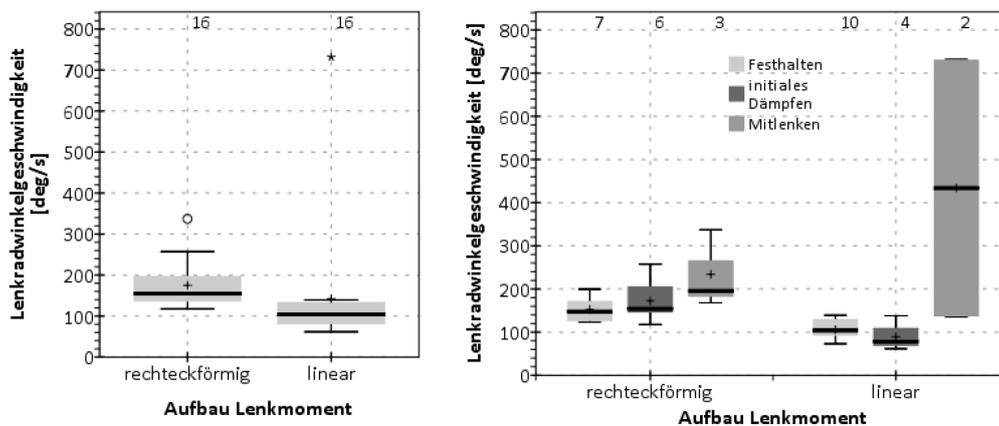


Abbildung 6-8. Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [deg/s] im Nutzenfall für Eingriffe mit rechteckförmigem und linearem Aufbau des Lenkmoments. Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Die univariaten Varianzanalysen ergaben einen signifikanten Einfluss der Eingriffsvariante auf die Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit ($F(1, 30) = 25.319$, $p < .001$, $\eta^2 = .458$). Wie erwartet (vgl. Hypothese 6-3) wurde das erste Maximum bei rechteckförmiger Aufschaltung des Lenkmoments signifikant früher erreicht als bei linearer Aufschaltung ($M_{\text{rechteckförmig}} = 0.22 \text{ s}$, $SD_{\text{rechteckförmig}} = 0.01 \text{ s}$; $M_{\text{linear}} = 0.37 \text{ s}$, $SD_{\text{linear}} = 0.12 \text{ s}$). Auffallend ist, dass im Fall des linearen Aufbaus des Lenkmoments das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit im Mittel erst deutlich nach Abschluss des Aufbaus der maximalen Amplitude (nach ca. 0.25 s) erreicht wurde. Die Aufteilung nach den Reaktionsmustern zeigt zusätzlich, dass der Zeitpunkt des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit bei rechteckförmigem Aufbau des Lenkmoments kaum durch das Fahrerverhalten beeinflusst wird. Beim linearen Aufbau zeigt sich hingegen, dass das Maximum beim Verhalten Mitlenken deutlich später erreicht wird.

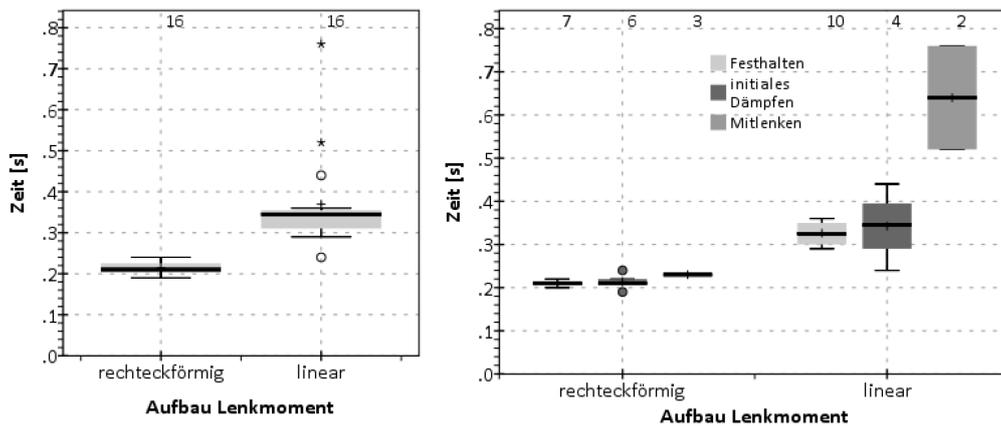


Abbildung 6-9. Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [s] im Nutzenfall für Eingriffe mit rechteckförmigem und linearem Aufbau des Lenkmoments. Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Zeitpunkt der Mitlenkentscheidung Um zu überprüfen, ob sich der Aufbau des Lenkmoments auf den Zeitpunkt der Mitlenkentscheidung auswirkt, wurde das Lenkerverhalten der Fahrer analysiert, die das Reaktionsmuster initialies Dämpfen zeigten. Die Ergebnisse spiegeln im Wesentlichen die Ergebnisse zur Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit wider. Bei rechteckigem Aufbau des Lenkmoments wird die Mitlenkentscheidung im Mittel tendenziell früher beobachtet als bei linearem Aufbau des Lenkmoments (vgl. Abbildung 6-10). Dies ist ein Hinweis darauf, dass ein langsamer Aufbau des Lenkmoments das Aufnehmen der der Lenkempfehlung verzögern kann (vgl. Hypothese 6-2).

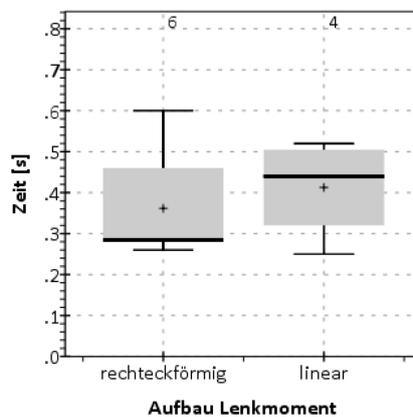


Abbildung 6-10. Zeitpunkt der Mitlenkentscheidung [s] für Eingriffe mit rechteckförmigem und linearem Aufbau des Lenkmoments. Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Zusätzlich wurde analysiert, wie lange die Fahrer benötigten, um sich nach dem initialen Dämpfen für ein Mitlenken zu entscheiden. Hierbei deutet sich an, dass die Fahrer bei rechteckigem Aufbau des Lenkmoments im Mittel länger benötigten, um eine Lenkreaktion zu zeigen, die auf eine Mitlenkentscheidung hindeutet, als Fahrer bei Eingriffen mit linearem Aufbau des Lenkmoments (vgl. Abbildung 6-11), was Hypothese 6-1 bestätigen würde. Insgesamt beträgt die Dauer zwischen initialer Dämpfung bis hin zur Wiederaufnahme der Lenkbewegung weniger als 0.2 s.

Bei linearem Aufbau des Lenkmoments benötigten die Fahrer im Mittel weniger als 0.1 s. Allerdings ist dieser Unterschied möglicherweise auf Ausreißer zurückzuführen, da sich die Mediane kaum unterscheiden (vgl. Abbildung 6-11).

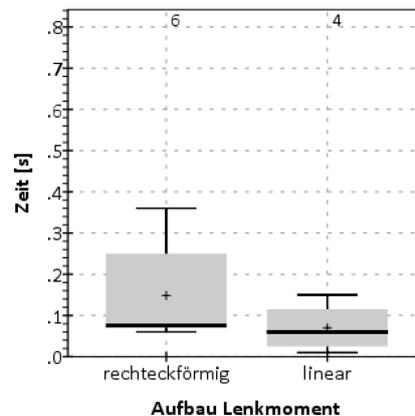


Abbildung 6-11. Dauer vom Beginn der initialen Dämpfung bis zur Mitlenkentscheidung [s] für Eingriffe mit rechteckförmigem und linearem Aufbau des Lenkmoments. Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

6.4.2 Fehlerfall

Reaktionsmuster Die Analyse der Reaktionsmuster deutet darauf hin, dass das Verhalten der Fahrer vor allem durch die Anzahl der Fahrstreifen in Fahrtrichtung beeinflusst wurde (vgl. Forschungsfrage 6-6). Stand den Fahrern im Fehlerfall nur ein Fahrstreifen in Fahrtrichtung zur Verfügung, wurden bei rechteckförmigem Aufbau des Lenkmoments 75% ($N = 24$) und bei linearem Aufbau 81% ($N = 26$) als Festhalter klassifiziert. Standen den Fahrern zwei Fahrstreifen zur Verfügung, wurden bei rechteckförmigem Aufbau des Lenkmoments 52% ($N = 16$) und bei linearem Aufbau 53% ($N = 17$) der Fahrer als Festhalter klassifiziert (vgl. Abbildung 6-12). In allen Bedingungen zeigte die Mehrheit der Fahrer in Folge des unberechtigten Eingriffs eine Bremsreaktion (vgl. Tabelle 6-2).

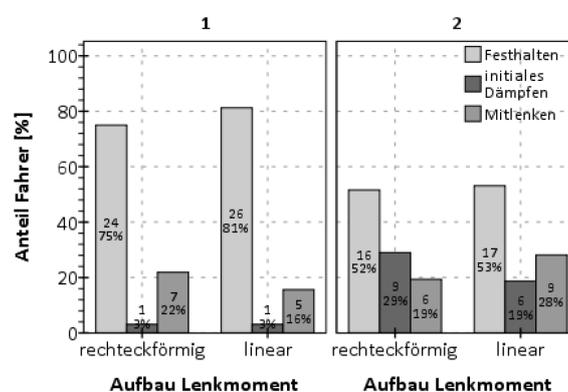


Abbildung 6-12. Häufigkeit der Reaktionsmuster Festhalten, initiales Dämpfen und Mitlenken im Fehlerfall mit einem (1) und zwei Fahrstreifen (2) in Fahrtrichtung getrennt nach Eingriffen mit rechteckförmigem und linearem Aufbau des Lenkmoments.

Tabelle 6-2. Bremshäufigkeiten in Abhängigkeit von der Anzahl der Fahrstreifen in Fahrtrichtung (1 vs. 2) und dem Aufbau des Lenkmoments (rechteckförmig vs. linear).

Fahrstreifen	Aufbau Lenkmoment	
	rechteckförmig	linear
1	66% (21)	50% (16)
2	56% (20)	59% (19)

Maximaler Spurversatz Eine Unterschiedsprüfung mithilfe einer Messwiederholungs-Varianzanalyse ergab einen statistisch signifikanten Einfluss der Faktoren Anzahl der Fahrstreifen ($F(1, 30) = 4.475, p = .043, \eta^2 = .130$) und Eingriffsvariante ($F(1, 30) = 28.654, p < .001, \eta^2 = .489$) auf den maximalen Spurversatz. Zusätzlich zeigte sich ein statistisch signifikanter Einfluss der Interaktion mit den Faktoren Fahrstreifen und Eingriffsvariante ($F(1, 30) = 8.813, p = .006, \eta^2 = .227$). Sowohl der rechteckförmige als auch der lineare Aufbau des Lenkmoments führten allerdings deskriptiv im Mittel zu einem vergleichbaren Spurversatz im Fehlerfall (vgl. Tabelle 6-3). Hingegen zeigt sich ein deutlicher Einfluss der Anzahl Fahrstreifen in Fahrtrichtung (vgl. Abbildung 6-13). Stand dem Fahrer im Fehlerfall nur ein Fahrstreifen in Fahrtrichtung zur Verfügung, fiel der maximale Spurversatz im Mittel deutlich geringer aus als bei Eingriffen, in denen den Fahrern zwei Fahrstreifen in Fahrtrichtung zur Verfügung standen. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Fahrer ihre Gegenreaktion an die vorhandenen Platzverhältnisse anpassten (vgl. Forschungsfrage 6-6). Der Vergleich des maximalen Spurversatzes in Abhängigkeit von den Reaktionsmustern zeigt, dass der maximale Spurversatz bei Fahrern, die das Verhalten Festhalten zeigten, im Mittel geringer ausfällt, als bei Fahrern, die das Verhalten initiales Dämpfen oder Mitlenken zeigten (vgl. Abbildung 6-13). Ein Einfluss der verschiedenen Aufbauformen des Lenkmoments ist allerdings auch hier nicht zu beobachten.

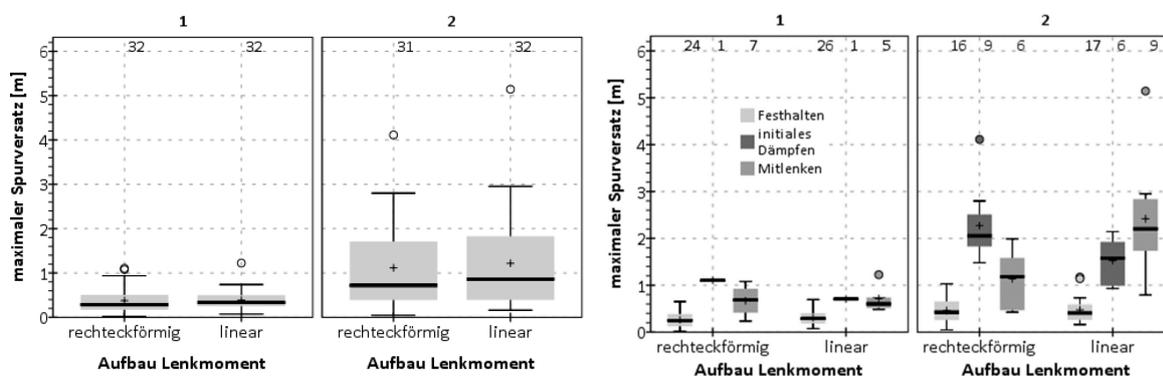


Abbildung 6-13. Maximaler Spurversatz [m] im Fehlerfall mit einem (1) oder zwei Fahrstreifen (2) in Fahrtrichtung für Eingriffe mit rechteckförmigem und linearem Aufbau des Lenkmoments. Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Tabelle 6-3. Maximaler Spurversatz [m] im Fehlerfall in Abhängigkeit von der Anzahl der verfügbaren Fahrstreifen in Fahrtrichtung (1 vs. 2) und dem Aufbau des Lenkmoments (rechteckförmig vs. linear).

Anzahl Fahrstreifen	Aufbau Lenkmoment	M	MIN	MAX	SD	N
1	rechteckförmig	.38	.29	.02	1.10	32
	linear	.38	.33	.07	1.22	32
2	rechteckförmig	1.12	.72	.05	4.11	31
	linear	1.22	.86	.16	5.14	32

Erstes Lenkradwinkelmaximum Deskriptiv zeigt sich ein deutlicher Einfluss der Anzahl der Fahrstreifen in Fahrtrichtung auf das erste Lenkradwinkelmaximum im Fehlerfall (vgl. Abbildung 6-15). Eine Unterschiedsprüfung mithilfe einer Messwiederholungs-Varianzanalyse ergab einen signifikanten Einfluss der Faktoren Anzahl der Fahrstreifen ($F(1, 30) = 6.111, p = .019, \eta^2 = .169$) und Eingriffsvariante ($F(1, 30) = 16.838, p < .001, \eta^2 = .359$) auf den maximalen Lenkradwinkel. Zusätzlich ergab sich ein signifikanter Einfluss der Interaktion mit den Faktoren Fahrstreifen und Eingriffsvariante ($F(1, 30) = 4.786, p = .037, \eta^2 = .138$). Im Mittel fiel das erste Lenkradwinkelmaximum größer aus, wenn dem Fahrer im Falle eines unberechtigten Eingriffs zwei Fahrstreifen Fahrtrichtung zur Verfügung standen (vgl. Tabelle 6-4). Der Unterschied zwischen den beiden Eingriffsvarianten zeigt sich hingegen nur, wenn den Fahrern ein Fahrstreifen in Fahrtrichtung zur Verfügung stand. Hier fiel das erste Lenkradwinkelmaximum im Mittel größer aus, wenn der Aufbau des Lenkmoments rechteckförmig erfolgte. Die Betrachtung in Abhängigkeit der post-hoc identifizierten Reaktionsmuster deutet ebenfalls nicht auf einen Einfluss der Aufbauform des Lenkmoments hin.

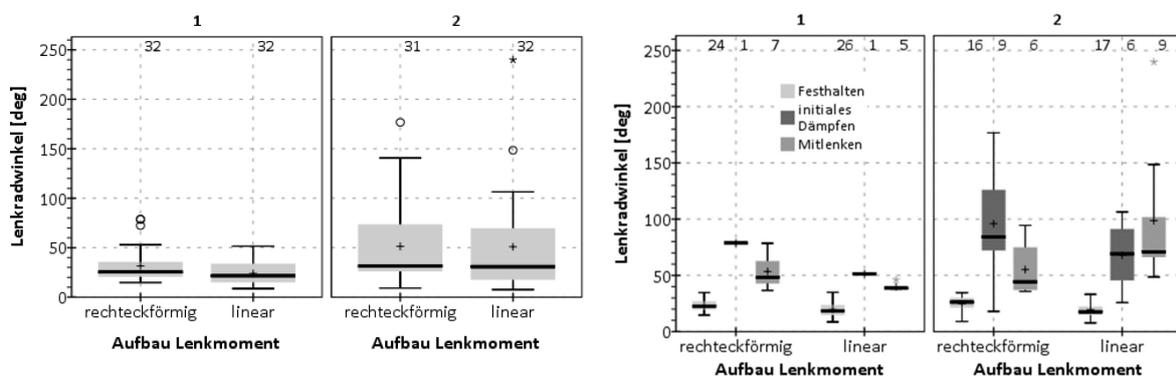


Abbildung 6-14. Erstes Maximum des Lenkradwinkels [deg] im Fehlerfall mit einem (1) oder zwei Fahrstreifen (2) getrennt nach Eingriffen mit rechteckförmigem und linearem Aufbau des Lenkmoments. Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Tabelle 6-4. Erstes Lenkradwinkelmaximum [deg] im Fehlerfall in Abhängigkeit von der Anzahl der verfügbaren Fahrstreifen in Fahrtrichtung (1 vs. 2) und dem Aufbau des Lenkmoments (rechteckförmig vs. linear).

Anzahl Fahrstreifen	Aufbau Lenkmoment	M	MIN	MAX	SD	N
1	rechteckförmig	31.64	14.73	78.78	17.52	32
	linear	23.88	8.64	51.50	11.23	32
2	rechteckförmig	51.37	9.02	176.77	40.81	31
	linear	50.88	7.68	239.80	49.02	32

Bei der Betrachtung des Zeitpunkts des ersten Lenkradwinkelmaximums zeigt sich deskriptiv vor allem ein Einfluss der Eingriffsvariante. Zusätzlich ist die Streuung der Werte bei zwei Fahrstreifen in Fahrtrichtung im Vergleich zu einem Fahrstreifen deutlich erhöht. Eine Unterschiedsprüfung mithilfe einer Messwiederholungs-Varianzanalyse ergab einen signifikanten Einfluss der Eingriffsvariante ($F(1, 30) = 31.714, p < .001, \eta^2 = .514$) auf den Zeitpunkt des maximalen Lenkradwinkels. Dabei wird das Lenkradwinkelmaximum schneller erreicht, wenn das Lenkmoment rechteckförmig aufgebaut wurde (vgl. Tabelle 6-5), was Hypothese 6-3 bestätigt. Die Anzahl der Fahrstreifen in Fahrtrichtung hatte hingegen keinen signifikanten Einfluss ($F(1, 30) = .221, p = .642, \eta^2 = .007$). Auf den Einfluss der Interaktion wird daher nicht eingegangen.

Die zusätzliche Aufteilung nach Reaktionsmustern deutet darauf hin, dass das erste Maximum des Lenkradwinkels früher erreicht wird, wenn das Reaktionsmuster Festhalten identifiziert wurde. Diese Tendenz zeigt sich unabhängig von der Anzahl der Fahrstreifen und der Eingriffsvariante. Bei den Reaktionsmustern initiales Dämpfen und Mitlenken wird das erste Lenkradwinkelmaximum hingegen später beobachtet (vgl. Abbildung 6-15 rechts). Der Einfluss der Aufbauform des Lenkmoments zeigt sich tendenziell über alle Reaktionsmuster hinweg.

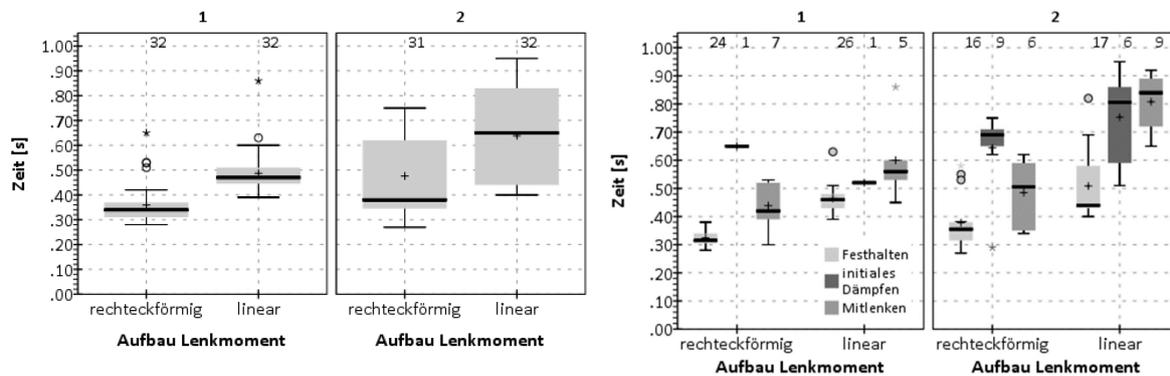


Abbildung 6-15. Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums [s] im Fehlerfall mit einem (1) oder zwei Fahrstreifen (2) getrennt nach Eingriffen mit rechteckförmigem und linearem Aufbau des Lenkmoments. Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Tabelle 6-5. Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums [s] im Fehlerfall in Abhängigkeit von der Anzahl der verfügbaren Fahrstreifen in Fahrtrichtung (1 vs. 2) und dem Aufbau des Lenkmoments (rechteckförmig vs. linear).

Anzahl Fahrstreifen	Aufbau Lenkmoment	M	MIN	MAX	SD	N
1	rechteckförmig	.36	.28	.65	.08	32
	linear	.49	.39	.86	.09	32
2	rechteckförmig	.48	.27	.75	.16	31
	linear	.64	.40	.95	.19	32

Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit Deskriptiv zeigt sich ein deutlicher Einfluss der Eingriffsvariante. Bei Eingriffen mit rechteckförmigem Lenkmomentaufbau werden im Mittel höhere Lenkradwinkelgeschwindigkeiten beobachtet als bei linearem Lenkmomentaufbau (vgl. Abbildung 6-17). Eine Unterschiedsprüfung mithilfe einer Messwiederholungs-Varianzanalyse ergab einen signifikanten Einfluss der Eingriffsvariante ($F(1, 30) = 9.203, p = .005, \eta^2 = .234$) auf das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit. Das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit fiel bei Eingriffen mit rechteckförmigem Aufbau des Lenkmoments im Mittel signifikant höher aus als bei Eingriffen mit linearem Aufbau des Lenkmoments (vgl. Abbildung 6-16 und Tabelle 6-6). Der Faktor Anzahl der Fahrstreifen hatte hingegen keinen signifikanten Einfluss ($F(1, 30) = .053, p = .820, \eta^2 = .053$).

Die zusätzliche Aufteilung nach den Reaktionsmustern deutet darauf hin, dass das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit vor allem bei dem Reaktionsmuster Mitlenken im Vergleich zu dem Reaktionsmuster Festhalten erhöht ist. Diese Tendenz ist unabhängig von der Anzahl der Fahrstreifen und der Eingriffsvariante (vgl. Abbildung 6-16 rechts).

|Studie II: Einfluss der Eingriffscharakteristik auf das Fahrerverhalten

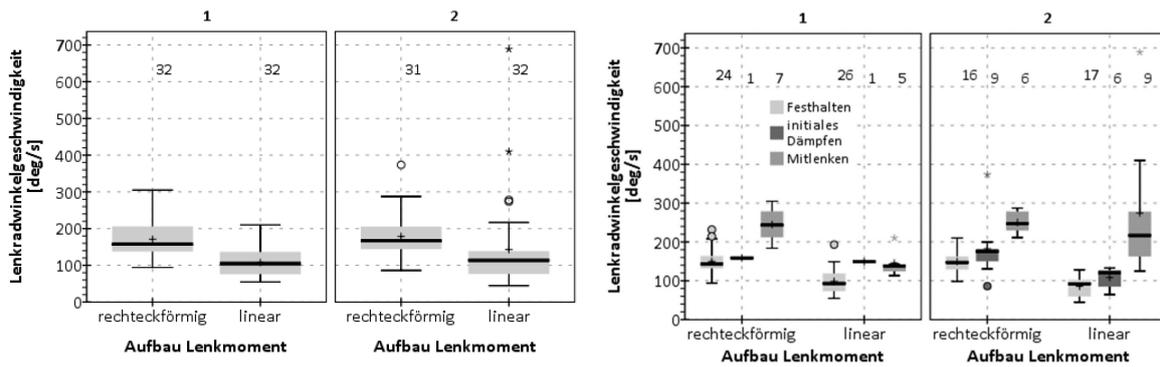


Abbildung 6-16. Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [deg/s] im Fehlerfall mit einem (1) oder zwei Fahrstreifen (2) getrennt nach Eingriffen mit rechteckförmigem und linearem Aufbau des Lenkmoments. Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Tabelle 6-6. Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [deg/s] im Fehlerfall in Abhängigkeit von der Anzahl der verfügbaren Fahrstreifen in Fahrtrichtung (1 vs. 2) und dem Aufbau des Lenkmoments (rechteckförmig vs. linear).

Anzahl Fahrstreifen	Aufbau Lenkmoment	M	MIN	MAX	SD	N
1	rechteckförmig	171.04	94.05	304.98	54.65	32
	linear	107.67	54.70	210.32	38.15	32
2	rechteckförmig	178.63	86.10	373.56	62.02	31
	linear	142.99	44.58	688.82	125.58	32

Bei der Betrachtung der Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit zeigt sich deskriptiv ein ähnliches Muster. Eine Unterschiedsprüfung mithilfe einer Messwiederholungs-Varianzanalyse ergab ebenfalls einen signifikanten Einfluss der Eingriffsvariante ($F(1, 30) = 6.552, p = .016, \eta^2 = .514$) auf die Dauer bis zum Erreichen der maximalen Lenkradwinkelgeschwindigkeit. Im Mittel wurde das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit bei Eingriffen mit rechteckförmigem Aufbau des Lenkmoments signifikant früher erreicht als bei Eingriffen mit linearem Aufbau des Lenkmoments (vgl. Abbildung 6-17 und Tabelle 6-7), was Hypothese 6-3 bestätigt. Der Faktor Anzahl der Fahrstreifen hatte hingegen keinen signifikanten Einfluss ($F(1, 30) = 2.148, p = .153, \eta^2 = .076$). Auf den Einfluss der Interaktion wird daher nicht eingegangen.

Die Aufteilung nach den Reaktionsmustern zeigt zusätzlich, dass die Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit bei rechteckförmigem Aufbau des Lenkmoments kaum durch das Fahrerverhalten beeinflusst wird. Bei linearem Aufbau des Lenkmoments zeigt sich hingegen, dass das erste Maximum tendenziell später beobachtet wird, wenn der Fahrer das Reaktionsmuster Mitlenken zeigt (vgl. Abbildung 6-17 rechts).

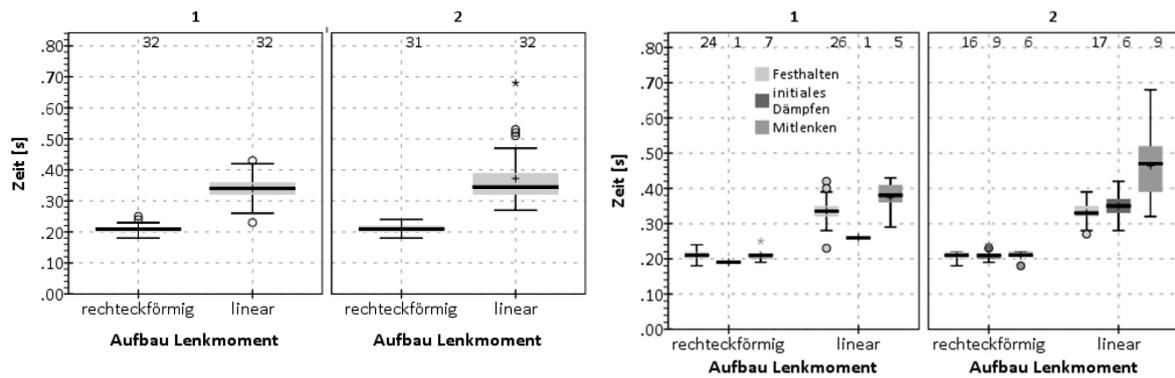


Abbildung 6-17. Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [s] im Fehlerfall mit einem (1) oder zwei Fahrstreifen (2) getrennt nach Eingriffen mit rechteckförmigem und linearem Aufbau des Lenkmoments. Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Tabelle 6-7. Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [s] im Fehlerfall in Abhängigkeit von der Anzahl der verfügbaren Fahrstreifen in Fahrtrichtung (1 vs. 2) und dem Aufbau des Lenkmoments (rechteckförmig vs. linear).

Anzahl Fahrstreifen	Aufbau Lenkmoment	M	MIN	MAX	SD	N
1	rechteckförmig	.21	.18	.25	.01	32
	linear	.34	.23	.43	.04	32
2	rechteckförmig	.21	.18	.24	.01	31
	linear	.37	.27	.68	.09	32

6.4.3 Lerneffekte und weitere Einflussfaktoren

Im Folgenden wird auf die Ergebnisse der Wiederholungsmessungen eingegangen. Der Fokus der Auswertung liegt hierbei auf dem Einfluss der Amplitude, des Gradienten und der Spurbelegung des Hindernisses auf das Verhalten der Fahrer. Zusätzlich soll überprüft werden, ob sich das Reaktionsmuster der Fahrer in Folge eines wiederholten Erlebens ändert, da dies auf einen möglichen Lerneffekt hindeuten könnte.

Kollisionen Deskriptiv zeigen Eingriffe mit rechteckförmigem oder linearem Aufbau des Lenkmoments eine vergleichbare Wirksamkeit. Allerdings deuten die Ergebnisse auf einen Einfluss der Spurbelegung und der Amplitude des Lenkmoments hin (vgl. Tabelle 6-8). Reichte der Konfliktpartner 25% (ca. 0.9 m) in den Fahrstreifen, konnte die Mehrheit der Fahrer eine Kollision erfolgreich verhindern, unabhängig von der Eingriffsvariante und der Amplitude des Lenkmoments. Reichte der Konfliktpartner hingegen 50% (ca. 1.75 m) in den Fahrstreifen, reduziert sich der Anteil der Fahrer, die eine Kollision verhindern konnten (vgl. Forschungsfrage 6-5). Zusätzlich zeigt sich ein Einfluss der Amplitude des Lenkmoments (vgl. Forschungsfrage 6-4). Bei einer maximalen Amplitude des Eingriffs von 6 Nm kollidierten weniger Fahrer mit dem Konfliktpartner als bei einer Amplitude von 4 Nm (vgl. Tabelle 6-8).

Tabelle 6-8. Kollisionshäufigkeiten in Abhängigkeit von der Spurbelegung (25% vs. 50%), dem Aufbau des Lenkmoments (rechteckförmig vs. linear) und der maximalen Amplitude (4 Nm vs. 6 Nm).

Spurbelegung	Aufbau Lenkmoment	maximale Amplitude	
		4 Nm	6 Nm
25%	rechteckförmig	0	3% (1)
	linear	3% (1)	9%(3)
50%	rechteckförmig	47% (15)	29% (9)
	linear	48% (15)	20% (3)

Reaktionsmuster Bei der Betrachtung der Häufigkeit der Reaktionsmuster zeigt sich kein eindeutiges Muster. Bei einer maximalen Amplitude von 4 Nm wurde bei Eingriffen mit rechteckförmiger Aufschaltung des Lenkmoments tendenziell häufiger das Reaktionsmuster Festhalten identifiziert als bei Eingriffen mit linearem Aufbau des Lenkmoments (vgl. Abbildung 6-18). Bei Eingriffen mit einer maximalen Amplitude von 6 Nm zeigt sich dies hingegen nicht. Allerdings wurde hier bei einer Spurbelegung von 25% bei beiden Eingriffsvarianten tendenziell häufiger das Reaktionsmuster Festhalten identifiziert als bei einer Spurbelegung von 50%, was darauf hindeutet, dass das Reaktionsmuster der Fahrer abhängig von der Spurbelegung ist (vgl. Forschungsfrage 6-5). In allen Bedingungen zeigte die Mehrheit der Fahrer zusätzlich eine Bremsreaktion. Der Anteil der Fahrer, die in der Situation eine Bremsreaktion zeigten, lag zwischen 87% und 97%.

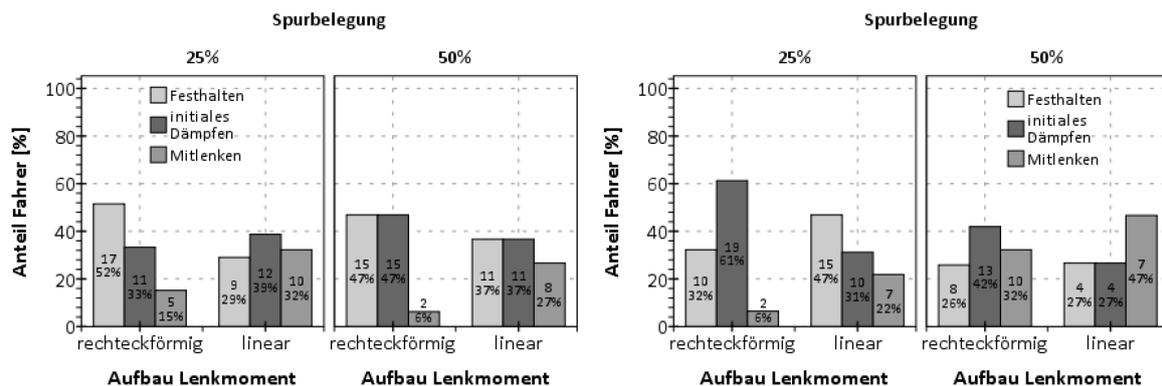


Abbildung 6-18. Häufigkeit der Reaktionsmuster Festhalten, initiales Dämpfen und Mitlenken im Nutzenfall für Eingriffe mit rechteckförmigem und linearem Aufbau des Lenkmoments bei einer maximalen Amplitude von 4 Nm (links) und 6 Nm (rechts).

Bei der Betrachtung der Häufigkeit der Reaktionsmuster über die verschiedenen Messungen hinweg wird beobachtet, dass der Anteil der Fahrer, welche das Reaktionsmuster Festhalten zeigten, über die Zeit abnimmt. Während zu Beginn ca. 60% der Fahrer das Reaktionsmuster Festhalten zeigten, sinkt dies im Verlauf der Messungen auf ca. 30%. Gleichzeitig steigt der Anteil der Reaktionsmuster initiales Dämpfen und Mitlenken (vgl. Abbildung 6-19). Dies bestätigt im Wesentlichen die Annahme, dass Fahrer mit zunehmender Lernerfahrung die Lenkempfehlung häufiger aufgreifen (vgl. Hypothese 6-4).

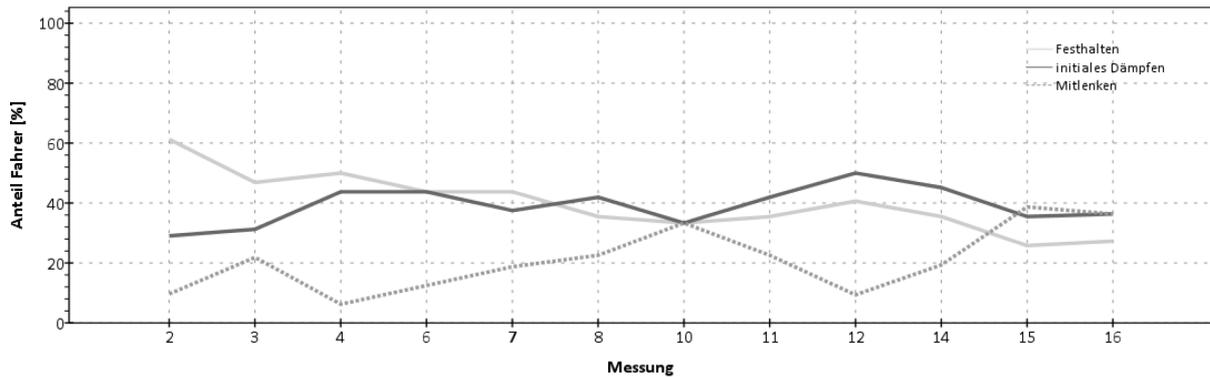


Abbildung 6-19. Häufigkeit der Reaktionsmuster Festhalten (hellgrau), initiales Dämpfen (dunkelgrau) und Mitlenken (grau gestrichelt) im Nutzenfall in Abhängigkeit vom Messzeitpunkt.

Insgesamt wurde bei 78.3% ($N = 65$) der beobachteten Kollisionen die Verhaltensweise Festhalten identifiziert, bei 9.6% ($N = 8$) die Verhaltensweise initiales Dämpfen und bei 10.8% ($N = 9$) die Verhaltensweise Mitlenken.

Tabelle 6-9. Anteil der gezeigten Reaktionsmuster (Festhalten, initiales Dämpfen und Mitlenken) in Abhängigkeit davon, ob eine Kollision beobachtet wurde oder nicht. Die Werte summieren sich nicht auf 100%, da zwei Fahrern anhand des beobachteten Lenkverhaltens keine der genannten Verhaltensweisen zugeordnet werden konnte.

Reaktionsmuster	Kollision	
	ja	nein
Festhalten	78.3% (65)	27.8% (78)
Initiales Dämpfen	9.6% (8)	47.3% (133)
Mitlenken	10.8% (9)	24.6% (69)

Um einen möglichen Einfluss der Eingriffsvariante, der Amplitude und der Spurbelegung auf Kennwerte des Lenkverhaltens inferenzstatistisch zu prüfen, wurde eine multivariate Messwiederholungsvarianzanalyse mit den abhängigen Variablen maximaler Spurversatz, erstes Lenkradwinkelmaximum, Zeitpunkt des ersten Lenkradwinkelmaximums, erstes Lenkradwinkelgeschwindigkeitsmaximum und Zeitpunkt des ersten Lenkradwinkelgeschwindigkeitsmaximums berechnet.

Der Faktor Konfliktpartner wurde nicht mit in die Analyse aufgenommen, da aufgrund des Versuchsplans nicht alle Faktorkombinationen vorlagen. Der Omnibus-Test ergab einen signifikanten Einfluss des Eingriffsvariante (Wilks Lambda, $F(5, 8) = 43,769$, $p < .001$, $\eta^2 = .965$). Die Amplitude (Wilks Lambda, $F(5, 8) = 3.558$, $p = .055$, $\eta^2 = .690$) und die Spurbelegung (Wilks Lambda, $F(5, 8) = 2.063$, $p = .173$, $\eta^2 = .563$) hatten hingegen, ebenso wie Interaktionen der Faktoren, keinen signifikanten Einfluss auf die abhängigen Variablen.

Auf die Ergebnisse der univariaten Varianzanalysen wird bei der Beschreibung der einzelnen Parameter eingegangen. Die Betrachtung in Abhängigkeit der drei Reaktionsmuster erfolgt deskriptiv zur Verdeutlichung des Einflusses der Fahrerreaktion auf die Kennwerte des Lenkverhaltens.

Maximaler Spurversatz Die univariaten Messwiederholungs-Varianzanalysen ergaben einen signifikanten Einfluss der Amplitude ($F(1, 12) = 5.663$, $p = .035$, $\eta^2 = .321$) und der Spurbelegung ($F(1,$

12) = 5.741, $p = .034$, $\eta^2 = .324$) auf den maximalen Spurversatz. Im Mittel fiel der maximale Spurversatz bei einer Amplitude von 6 Nm größer aus als bei einer Amplitude von 4 Nm (vgl. Abbildung 6-20). Zusätzlich fiel der maximale Spurversatz im Mittel signifikant höher aus, wenn das Hindernis den Fahrstreifen zu 50% belegte als wenn das Hindernis den Fahrstreifen zu 25% belegte. Die Eingriffsvariante hatte hingegen keinen signifikanten Einfluss auf den maximalen Spurversatz.

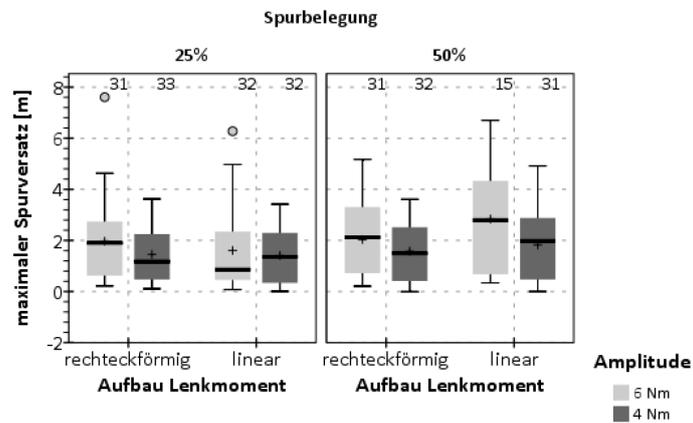


Abbildung 6-20. Maximaler Spurversatz [m] in Abhängigkeit von der Spurbelegung (25% vs. 50%), dem Aufbau des Lenkmoments (rechteckförmig vs. linear) und der maximalen Amplitude des Lenkmoments (4 Nm vs. 6 Nm). Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Die Betrachtung in Abhängigkeit des identifizierten Reaktionsmusters zeigt zusätzlich, dass das Reaktionsmuster Festhalten im Mittel zu einem deutlich geringeren Spurversatz führt als die Reaktionsmuster initiales Dämpfen und Festhalten (vgl. Abbildung 6-21). Gleichzeitig ist bei dem Reaktionsmuster Festhalten deskriptiv kein eindeutiger Einfluss der Amplitude oder der Spurbelegung erkennbar. Dieser zeigt sich vor allem bei den Reaktionsmustern initiales Dämpfen und Mitlenken. Ein eindeutiger Einfluss der Eingriffsvariante ist deskriptiv auch hier nicht erkennbar.

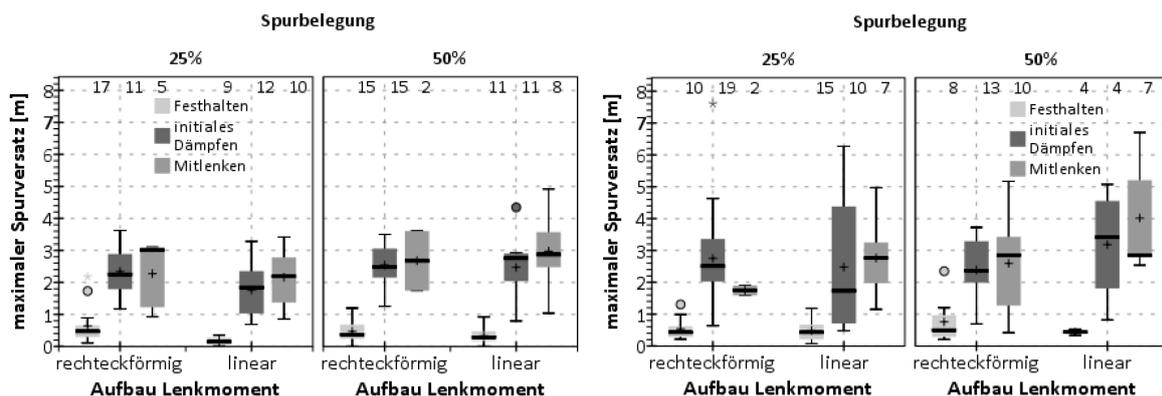


Abbildung 6-21. Maximaler Spurversatz [m] in Abhängigkeit von der Spurbelegung (25% vs. 50%), dem Aufbau des Lenkmoments (rechteckförmig vs. linear) und dem Reaktionsmuster für eine Amplitude von 4 Nm (links) und 6 Nm (rechts). Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Erstes Lenkradwinkelmaximum Bezüglich des ersten Lenkradwinkelmaximums und des Zeitpunkts wird eine starke Streuung beobachtet (vgl. Abbildung 6-24). Dies ist wahrscheinlich auf die verschiedenen Verhaltensweisen der Fahrer zurückzuführen.

Die univariaten Messwiederholungs-Varianzanalysen ergaben einen signifikanten Einfluss der Amplitude ($F(1, 12) = 11.348, p = .006, \eta^2 = .486$) und der Spurbelegung ($F(1, 12) = 5.968, p = .031, \eta^2 = .332$) auf das erste Lenkradwinkelmaximum.

Bei einer Amplitude von 6 Nm fiel das erste Lenkradwinkelmaximum im Mittel signifikant höher aus als bei einer Amplitude von 4 Nm. Zusätzlich fiel das erste Lenkradwinkelmaximum im Mittel höher aus, wenn die Spurbelegung durch den Konfliktpartner 50% der Fahrstreifenbreite betrug. Die Eingriffsvariante hatte hingegen keinen signifikanten Einfluss auf das erste Lenkradwinkelmaximum.

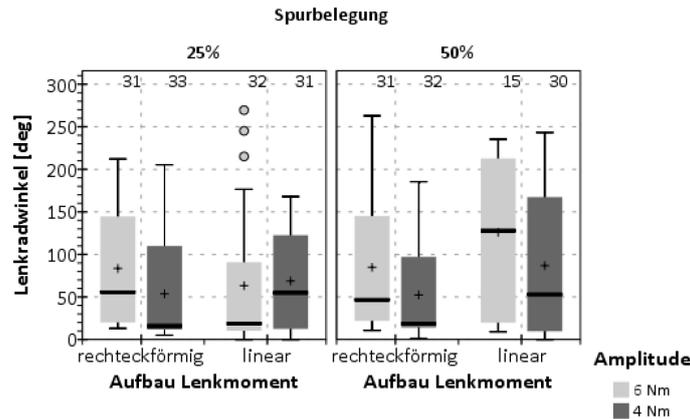


Abbildung 6-22. Erstes Lenkradwinkelmaximum [deg] in Abhängigkeit von der Spurbelegung (25% vs. 50%), dem Aufbau des Lenkmoments (rechteckförmig vs. linear) und der maximalen Amplitude des Lenkmoments (4 Nm vs. 6 Nm). Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Die deskriptive Betrachtung des ersten Lenkradwinkelmaximums in Abhängigkeit von den Reaktionsmustern bestätigt den Einfluss der Amplitude und der Spurbelegung auf das erste Lenkradwinkelmaximum (vgl. Abbildung 6-23). Zusätzlich wird deutlich, dass sich dieser Einfluss vor allem bei den Reaktionsmustern initiales Dämpfen und Mitlenken zeigt. Bei dem Reaktionsmuster Festhalten fiel das erste Lenkradwinkelmaximum in allen Bedingungen vergleichbar aus.

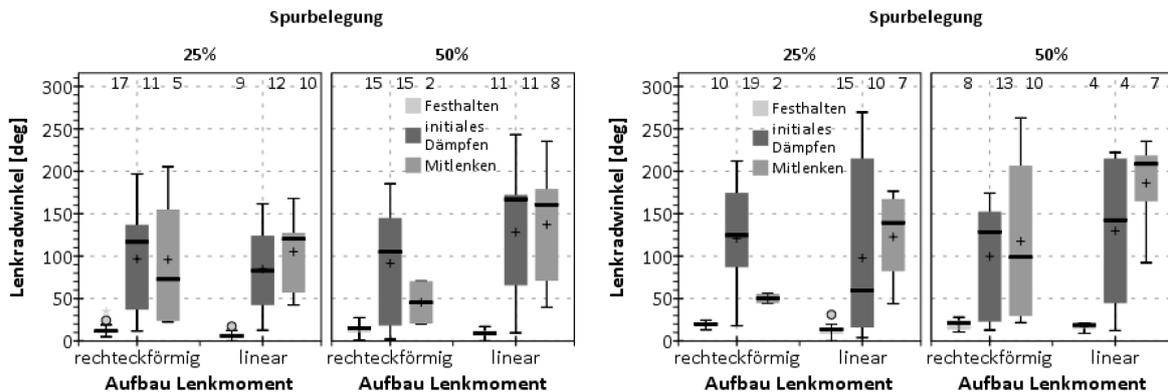


Abbildung 6-23. Erstes Lenkradwinkelmaximum [deg] in Abhängigkeit von der Spurbelegung (25% vs. 50%), dem Aufbau des Lenkmoments (rechteckförmig vs. linear) und dem Reaktionsmuster für eine Amplitude von 4 Nm (links) und 6 Nm (rechts). Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Lediglich bei der Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums zeigt sich ein ähnliches Muster wie im Erstkontakt. Im Mittel wurde das erste Lenkradwinkelmaximum signifikant später erreicht, wenn das Lenkmoment linear aufgebaut wurde ($F(1, 12) = 14.973, p = .002, \eta^2 = .555$). Die Amplitude und die Spurbelegung hatten hingegen keinen signifikanten Einfluss auf die Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums (vgl. Abbildung 6-24).

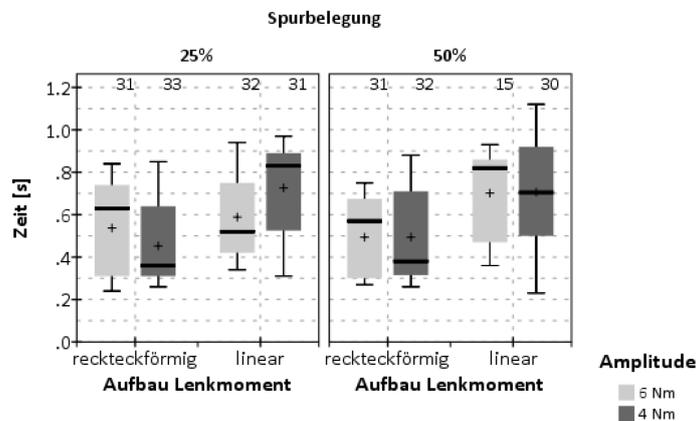


Abbildung 6-24. Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums [s] in Abhängigkeit von der Spurbelegung (25% vs. 50%), dem Aufbau des Lenkmoments (rechteckförmig vs. linear) und der maximalen Amplitude des Lenkmoments (4 Nm vs. 6 Nm). Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Die Aufteilung nach dem Reaktionsmuster (vgl. Abbildung 6-25) verdeutlicht, dass der Unterschied zwischen dem rechteckigen und linearen Aufbau des Lenkmoments bei der Verhaltensweise Festhalten deutlicher ausgeprägt ist. Dies ist wahrscheinlich vor allem auf die starke Streuung der Werte bei den Reaktionsmustern initiales Dämpfen und Mitlenken zurückzuführen. Bei einem rechteckförmigen Aufbau des Lenkmoments wird das erste Lenkradwinkelmaximum im Mittel zwischen 0.2 Sekunden und 0.4 Sekunden erreicht, bei linearem Aufbau des Lenkmoments zwischen 0.4 und 0.6 Sekunden. Bei den Reaktionsmustern initiales Dämpfen und Mitlenken wird das erste Lenkradwinkelmaximum im Mittel deutlich später erreicht, wobei sich auch hier tendenziell ein Unterschied in Abhängigkeit der Eingriffsvariante zeigt.

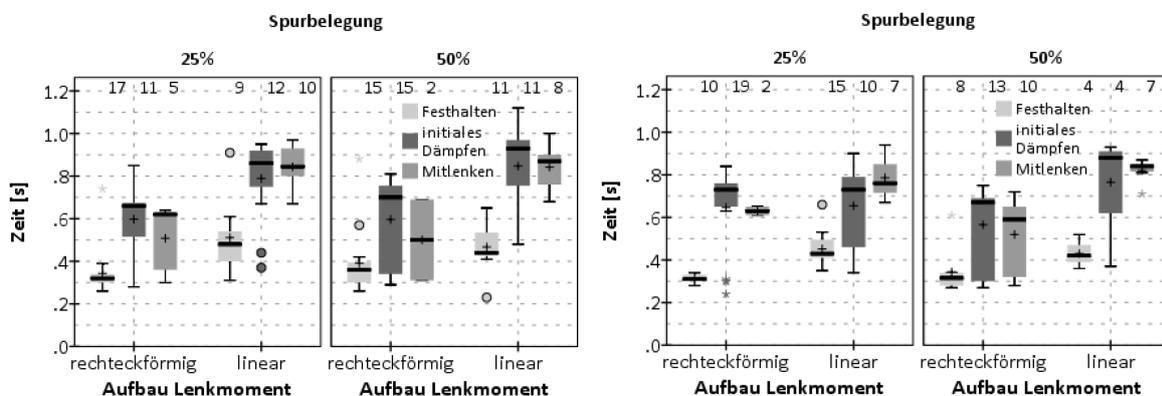


Abbildung 6-25. Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums [s] in Abhängigkeit von der Spurbelegung (25% vs. 50%), dem Aufbau des Lenkmoments (rechteckförmig vs. linear) und dem Reaktionsmuster für eine Amplitude von 4 Nm (links) und 6 Nm (rechts).

Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit

Die univariaten Messwiederholungs-

Varianzanalysen ergaben einen signifikanten Einfluss der Amplitude auf das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit ($F(1, 12) = 6.843, p = .023, \eta^2 = .363$). Im Mittel fiel das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit bei einer Amplitude von 6 Nm signifikant höher aus als bei einer Amplitude von 4 Nm. Die Eingriffsvariante und die Spurbelegung hatten keinen signifikanten Einfluss auf das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit. Im Gegensatz zum Erstkontakt fällt das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit bei rechteckförmigem Aufbau des Lenkmoments im Mittel nicht höher aus als bei linearem Aufbau (vgl. Abbildung 6-26). Allerdings zeigt sich auch hier eine deutliche Zunahme der Streuung, was wahrscheinlich auf die unterschiedlichen Reaktionsmuster der Fahrer zurückzuführen ist.

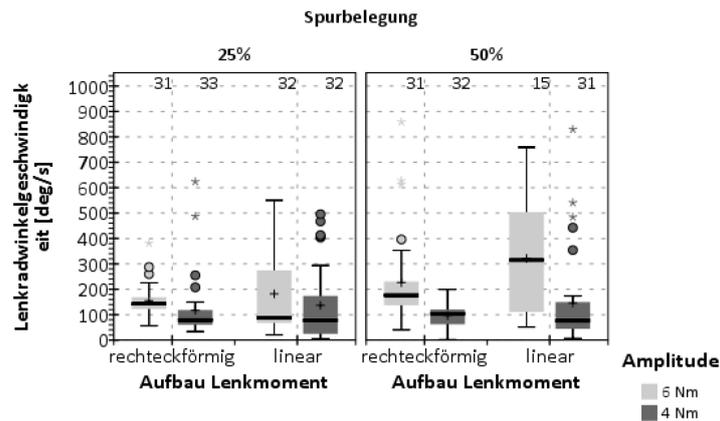


Abbildung 6-26. Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [deg/s] in Abhängigkeit von der Spurbelegung (25% vs. 50%), dem Aufbau des Lenkmoments (rechteckförmig vs. linear) und der maximalen Amplitude des Lenkmoments (4 Nm vs. 6 Nm). Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Die Betrachtung von dem ersten Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Reaktionsmuster zeigt hingegen ein zum Erstkontakt vergleichbares Reaktionsmuster. Bei linearem Aufbau des Lenkmoments fiel das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit tendenziell geringer aus als bei rechteckigem Aufbau des Lenkmoments (vgl. Abbildung 6-27). Der Effekt der Amplitude bleibt ebenfalls erhalten. Zusätzlich wird deutlich, dass das erste Lenkradwinkelmaximum bei dem Reaktionsmuster Mitlenken tendenziell höher ausfiel als bei den Reaktionsmustern Festhalten und initiales Dämpfen.

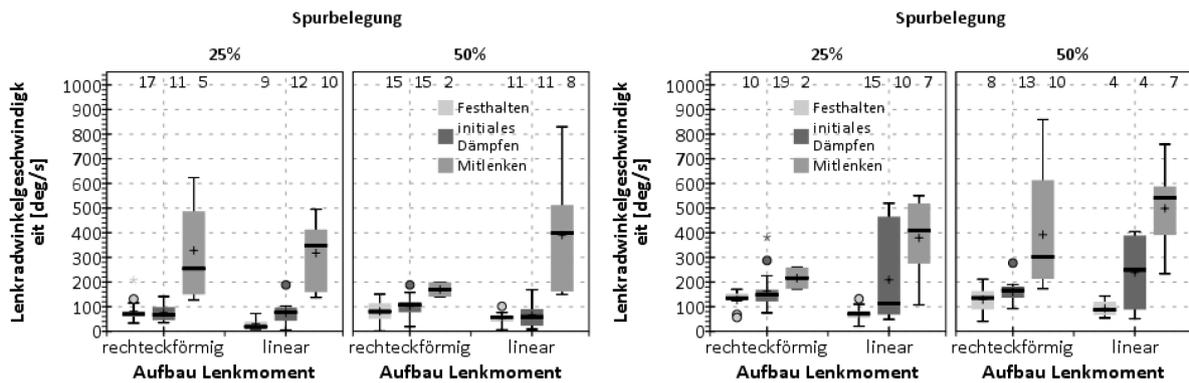


Abbildung 6-27. Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [deg/s] in Abhängigkeit von der Spurbelegung (25% vs. 50%), dem Aufbau des Lenkmoments (rechteckförmig vs. linear) und für eine Amplitude von 4 Nm (links) und 6 Nm (rechts). Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Die Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit unterscheidet sich ebenfalls in Abhängigkeit von dem Aufbau des Lenkmoments. Bei einem rechteckförmigen Aufbau des Lenkmoments wird das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit signifikant früher erreicht als bei einem linearen Aufbau des Lenkmoments ($F(1, 12) = 45.467, p < .001, \eta^2 = .791$). Die Amplitude und die Spurbelegung haben hingegen keinen signifikanten Einfluss auf die Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit (vgl. Abbildung 6-28).

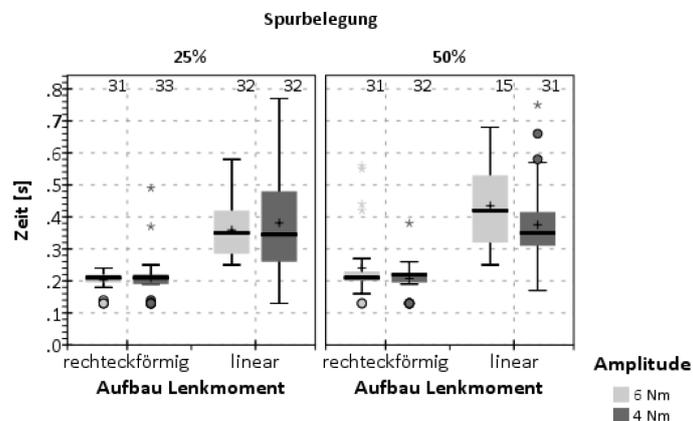


Abbildung 6-28. Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [s] in Abhängigkeit von der Spurbelegung (25% vs. 50%), dem Aufbau des Lenkmoments (rechteckförmig vs. linear) und der maximalen Amplitude des Lenkmoments (4 Nm vs. 6 Nm). Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Die Betrachtung in Abhängigkeit der Reaktionsmuster (vgl. Abbildung 6-29) deutet ebenfalls nicht auf einen Einfluss der Amplitude oder Spurbelegung hin. Der Einfluss der Eingriffsvariante bleibt hingegen bestehen und zeigt sich tendenziell über alle drei Reaktionsmuster hinweg.

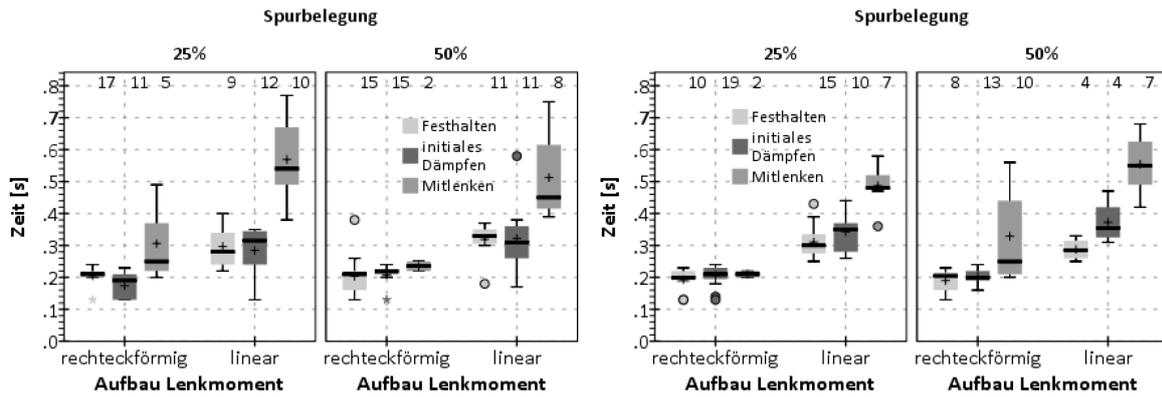


Abbildung 6-29. Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [s] in Abhängigkeit von der Spurbelegung (25% vs. 50%), dem Aufbau des Lenkmoments (rechteckförmig vs. linear) und dem Reaktionsmuster für eine Amplitude von 4 Nm (links) und 6 Nm (rechts). Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Zeitpunkt der Mitlenkentscheidung

Die explorative Betrachtung des Zeitpunkts der Mitlenkentscheidung spiegelt im Wesentlichen das Befundmuster zur Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit wieder. Eine Lenkreaktion, die nach der initialen Dämpfung auf eine Mitlenkentscheidung hindeutet, wird bei linearem Aufbau des Lenkmoments im Mittel später beobachtet als bei rechteckigem Aufbau des Lenkmoments (vgl. Abbildung 6-30). Dies zeigt sich unabhängig von der Spurbelegung und der maximalen Amplitude und bestätigt die Annahme, dass ein langsamer Aufbau des Lenkmoments die Handlungsentscheidung verzögern kann (vgl. Hypothese 6-2).

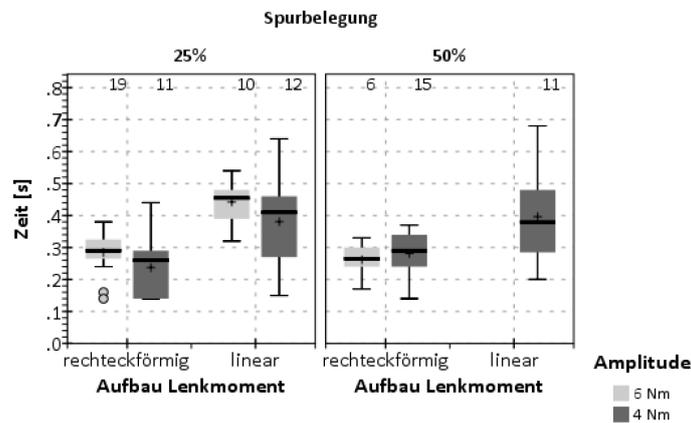


Abbildung 6-30. Zeitpunkt der Mitlenkentscheidung [s] für Fälle, in denen das Reaktionsmuster initiales Dämpfen identifiziert wurde, in Abhängigkeit von der Spurbelegung (25% vs. 50%), dem Aufbau des Lenkmoments (rechteckförmig vs. linear) und der maximalen Amplitude des Lenkmoments (4 Nm vs. 6 Nm). Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Die Betrachtung der Dauer von der initialen Dämpfung bis hin zur Wiederaufnahme der Lenkbewegung deutet allerdings nicht auf einen Einfluss der Eingriffscharakteristik, der Spurbelegung oder der Amplitude hin. Im Mittel dauert es weniger als 0,1 s, bis eine Wiederaufnahme der Lenkbewegung anhand des Lenkverhaltens zu erkennen ist.

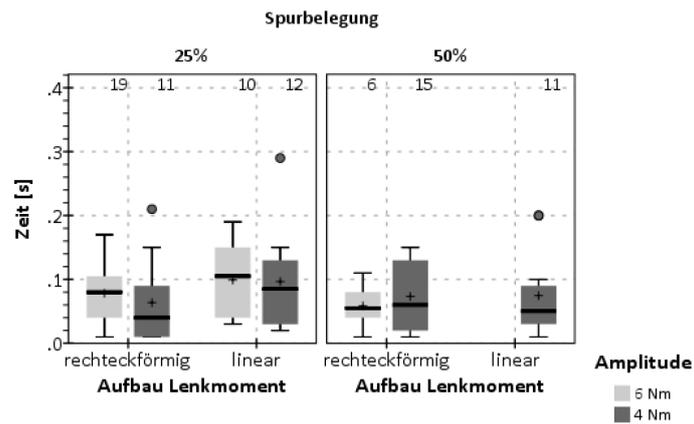


Abbildung 6-31. Dauer vom Beginn der initialen Dämpfung bis zur Mitlenkentscheidung [s] in Abhängigkeit von der Spurbelegung (25% vs. 50%), dem Aufbau des Lenkmoments (rechteckförmig vs. linear) und der maximalen Amplitude des Lenkmoments (4 Nm vs. 6 Nm). Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

6.5 Diskussion

6.5.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Nutzenfall konnten mit rechteckförmigem oder linearem Aufbau des Lenkmoments ähnlich viele Kollisionen vermieden werden. Fahrer, deren Reaktionsmuster als Festhalter klassifiziert wurde, konnten Kollisionen in der Regel nicht vermeiden, während Fahrer, deren Reaktionsmuster als initiales Dämpfen oder Mitlenken klassifiziert wurde, überwiegend dazu in der Lage waren, die Kollision zu vermeiden. Das beobachtete Lenkverhalten spiegelte im Wesentlichen die Eingriffscharakteristik wider. Bei Eingriffen mit rechteckförmigem Lenkmomentenaufbau wurden das erste Lenkradwinkelmaximum und das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit ca. 100 ms früher erreicht als bei Eingriffen mit einem linearen Aufbau des Lenkmoments. Dadurch verzögert sich im Vergleich zu einem rechteckförmigen Aufbau des Lenkmoments auch der Zeitpunkt der Mitlenkentscheidung (in Fällen, in denen das Reaktionsmuster initiales Dämpfen identifiziert wurde), was Hypothese 6-2 bestätigen würde. Allerdings deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Fahrer weniger Zeit zwischen Dämpfung und Wiederaufnahme der Lenkbewegung benötigten, was wiederum Hypothese 6-1 bestätigen würde.

Im Fehlerfall wurde ein starker Einfluss der Situationsgestaltung auf das Verhalten der Fahrer beobachtet. Stand nur ein Fahrstreifen in Fahrtrichtung zur Verfügung, zeigten mehr Fahrer das Reaktionsmuster Festhalten als wenn zwei Fahrstreifen in Fahrtrichtung zur Verfügung standen (Forschungsfrage 6-6). Dies wirkte sich auch auf den maximalen Spurversatz aus, so dass dieser geringer ausfiel, wenn den Fahrern nur ein Fahrstreifen in Fahrtrichtung zur Verfügung stand. Ebenso wie im Nutzenfall wurde das erste Lenkradwinkelmaximum in Folge eines rechteckförmigen Aufbaus des Lenkmoments früher beobachtet als in Folge eines linearen Aufbaus des Lenkmoments. Gleiches gilt für den Zeitpunkt des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit. Das bestätigt im Wesentlichen die Annahme, dass ein langsamer Aufbau des Lenkmoments zu einer Verzögerung der Kompensationsreaktion führt (vgl. Hypothese 6-3).

Wurden Fahrer wiederholt mit dem Nutzenfall konfrontiert, zeigt sich tendenziell eine Änderung im Reaktionsmuster der Fahrer. Zu Beginn wurde bei den meisten Fahrern das Reaktionsmuster Festhalten identifiziert, was darauf hindeutet, dass die Fahrer im Nutzenfall ähnlich auf die Lenkempfehlung reagieren wie im Fehlerfall (vgl. Forschungsfrage 6-2). Gegen Ende der Studie dominierten hingegen die Reaktionsmuster initiales Dämpfen und Mitlenken. Dies bestätigt im Wesentlichen die Annahme, dass die Fahrer mit zunehmender Lernerfahrung die Lenkempfehlung häufiger aufgreifen (Hypothese 6-4). Auch hier zeigte sich, dass die Mehrheit der Fahrer, die das Reaktionsmuster Festhalten zeigen, eine Kollision mit dem Hindernis nicht vermeiden konnte. Die Variation der Amplitude und der Spurbelegung wirkte sich zwar auf einzelne Kennwerte des Lenkverhaltens und auf die Wirksamkeit der Eingriffe aus, der zeitliche Ablauf der Reaktion wurde allerdings vor allem durch die Eingriffsvariante bzw. durch die Aufbaugeschwindigkeit des Lenkmoments beeinflusst. Das erste Lenkradwinkelmaximum oder das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit wurde bei linearem Aufbau des Lenkmoments später erreicht als bei rechteckigem Aufbau des Lenkmoments. Wie im Erstkontakt verzögert sich im Vergleich zu einem rechteckförmigen Aufbau des Lenkmoments dadurch auch der Zeitpunkt der Mitlenkentscheidung in Fällen, in denen das Reaktionsmuster initiales Dämpfen identifiziert wurde, was Hypothese 6-2 bestätigen würde. Allerdings benötigten die Fahrer im Gegensatz zum Erstkontakt in etwa gleich viel Zeit, um nach erfolgter Dämpfung mit der Wiederaufnahme der Lenkbewegung zu beginnen, was weder für Hypothese 6-1 noch für Hypothese 6-2 spricht.

In der folgenden Tabelle werden die in Abschnitt 6.2 getroffenen Hypothesen nochmals zusammenfassend dargestellt. Dabei wird gekennzeichnet ob die Hypothesen bestätigt werden können oder die Befundlage den Hypothesen widerspricht. Finden sich sowohl Belege, welche die Hypothese bestätigen als auch Belege, welche der Hypothese widersprechen wird darauf hingewiesen, dass die Befundlage uneindeutig ist.

Tabelle 6-10. Zusammenfassende Darstellung der Befundlage bezogen auf die Hypothesen.

Hypothese		
Hypothese 6-1:	Im Nutzenfall führt ein flacher Anstieg des Lenkmoments zu einer schnelleren Aufnahme der gerichteten Lenkempfehlung.	uneindeutige Befundlage
Hypothese 6-2:	Im Nutzenfall führt ein flacher Anstieg des Lenkmoments zu einer verzögerten Aufnahme des automatischen Ausweicheingriffs.	uneindeutige Befundlage
Hypothese 6-3:	Im Fehler- und Nutzenfall führt ein flacher Anstieg des Lenkmoments (im Vergleich zu einem schnellen Anstieg des Lenkmoments) dazu, dass Indikatoren für die Kompensationsreaktion verzögert auftreten.	bestätigt
Hypothese 6-4:	Mit zunehmender Lernerfahrung wird die gerichtete Lenkempfehlung häufiger aufgenommen und seltener unterdrückt.	bestätigt

6.5.2 Diskussion

Es wurde angenommen, dass Ausweicheingriffe mittels haptischer Eingriffe an der Lenkung auch im Nutzenfall möglicherweise zunächst als Störung der Querführung interpretiert werden. Dies sollte dazu führen, dass im Nutzenfall ähnliche Reaktionsmuster wie im Fehlerfall beobachtet werden (vgl. Forschungsfrage 6-2). Zusätzlich wurde angenommen, dass die Eingriffscharakteristik einen Einfluss auf das Reaktionsmuster der Fahrer hat, was ein möglicher Hinweis auf den Einfluss der beteiligten sensomotorischen Kontrollprozesse sein könnte (vgl. Forschungsfrage 6-3). Dazu wurden den Fahrern sowohl im Nutzen- als auch im Fehlerfall unterschiedliche Eingriffscharakteristiken dargeboten und deren Einfluss auf die Wirksamkeit berechtigter Eingriffe und die Kontrollierbarkeit fehlerhafter Eingriffe analysiert. Zusätzlich wurde anhand verschiedener Kennwerte des Lenkverhaltens detailliert auf das Reaktionsmuster und den zeitlichen Ablauf der Lenkreaktionen eingegangen, um weitere Hinweise auf den Einfluss der Eingriffscharakteristik zu erhalten.

Bei erstmaligem Erleben des Nutzenfalls konnte kein eindeutiger Einfluss der Eingriffscharakteristik auf die Wirksamkeit oder das Reaktionsmuster der Fahrer festgestellt werden. Unabhängig von der Anstiegssteilheit des Lenkmoments zeigten die Fahrer Verhaltensweisen, die darauf schließen lassen, dass sie den Eingriff nicht zuließen oder zumindest stark dämpften. Daraus resultierte, dass ein Teil der Fahrer die Kollision trotz Eingriff nicht verhindern konnte. Dies spiegelt die Befunde der Studien von Hesse et al. (2013) und Gußner et al. (2015) wider. Auch hier konnte ein Teil der Fahrer die Kollision mit dem Hindernis trotz Eingriff nicht verhindern (vgl. hierzu auch Fricke et al., 2015a; Schieben et al., 2014). Die Analyse des Lenkverhaltens der Fahrer im Nutzenfall bestätigt, dass das Reaktionsmuster einiger Fahrer mit dem Reaktionsmuster in Folge unberechtigter Eingriffe vergleichbar ist (vgl. Forschungsfrage 6-2). Allerdings gilt dies nicht für alle Fahrer. Ein Teil der Fahrer zeigte auch Reaktionsmuster, die darauf schließen lassen, dass sie den Eingriff aufnehmen konnten.

Die Analyse des Lenkverhaltens bestätigt zudem die Befunde von Neukum et al. (2010a) und Schmidt (2009). Bei geringerer Steilheit des Lenkmoments steigt die Reaktionszeit, die auf Basis des Lenkverhaltens der Fahrer ermittelt wird, um ca. 100 ms an. Allerdings beträgt die ermittelte Reaktionszeit in der vorliegenden Studie im Mittel ca. 100 ms mehr als von Neukum et al. (2010a) berichtet. Der Unterschied zeigt sich sowohl für Eingriffe mit schnellem Anstieg des Lenkmoments als auch für Eingriffe mit langsamem Anstieg des Lenkmoments. Daher wird vermutet, dass der Unterschied eine Folge der eingesetzten Untersuchungsumgebung ist und nicht eine Folge der Eingriffsgestaltung. In den Studien von Neukum und Schmidt wurden Fahrzeuge eingesetzt, während in der vorliegenden Studie ein dynamischer Fahrsimulator verwendet wurde, der gewissen Einschränkungen bezüglich der Rückmeldung von Quer- und Längsbeschleunigungen unterliegt. Bereits die Studie von Wierwille et al. (1983) konnte zeigen, dass die Reaktionszeit der Fahrer von der Rückmeldung der Fahrzeugreaktion beeinflusst wird. Dabei wurden Reaktionszeitunterschiede im Bereich von 120 ms ermittelt, was in etwa den beobachteten Unterschieden zwischen den Studien entspricht.

Grundsätzlich deuten die Unterschiede im zeitlichen Reaktionsmuster der Fahrer darauf hin, dass die Eingriffscharakteristik das Lenkverhalten entscheidend beeinflussen kann (vgl. Forschungsfrage 6-3). Auffällig ist das Lenkverhalten der Fahrer im Fehlerfall beim linearen Aufbau des Lenkmoments. Offensichtlich waren die Fahrer nicht dazu in der Lage, den Fehler zu übersteuern, bevor der Aufbau des Lenkmoments abgeschlossen war, da das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit erst deutlich nach 0.25 s beobachtet wurde.

Dies ist ein Hinweis darauf, dass zunächst ein stabiler Zustand der Störung erreicht werden muss, bevor der Fahrer seine Reaktion gezielt anpassen kann. Das bedeutet, dass der Fahrer damit beschäftigt ist, die sensomotorisch wahrgenommene Abweichung zu kompensieren. Dazu muss er zunächst die erforderliche Kraft aufbauen, um der Störung erfolgreich entgegen zu wirken. Aufgrund der sich ändernden Krafteinwirkung ist dies erst möglich, wenn der Aufbau des Lenkmoments vollständig abgeschlossen ist. Alternativ besteht die Möglichkeit, dass die Kompensation des Eingriffs die Handlungsentscheidung verzögert, da die erforderlichen (kognitiven) Kontrollstrukturen nicht beide Aufgaben parallel bearbeiten können. Dadurch wird die zweite Aufgabenbearbeitung solange verzögert, bis die erste Aufgabe erfolgreich bearbeitet wurde. In der Grundlagenforschung wird dies in der Regel als Doppelaufgabeninterferenz bezeichnet (vgl. Kapitel 2.2.4.1). Unabhängig von dem zugrundeliegenden Mechanismus führt dies im Nutzenfall zu einer verzögerten Handlungsentscheidung (vgl. Hypothese 6-2), was ein Hinweis darauf ist, dass aktive sensomotorische Kontrollprozesse mit der Handlungsausführung interferieren können. Allerdings hat sich dies nicht auf die Wirksamkeit der Eingriffe ausgewirkt, daher scheint der Einfluss insgesamt eher gering zu sein. Des Weiteren kann anhand der vorliegenden Studie nicht geklärt werden, ob die Reaktion aufgrund visueller Informationen getriggert wird (z. B. ein bestimmter Headingwinkel oder Spurversatz) oder wie angenommen durch die haptische Rückmeldung am Lenkrad. Ein langsamer Aufbau des Lenkmoments führt auch zu einem langsameren Aufbau des Spurversatzes. Daher kann nicht klar zwischen dem Einfluss der haptischen und visuellen Information getrennt werden. Dies wäre nur mit einer Steer-by-Wire-Umsetzung möglich, da diese eine unabhängige Manipulation beider Informationen ermöglicht.

Im Fehlerfall finden sich objektiv keine eindeutigen Hinweise auf einen Einfluss der Eingriffscharakteristik auf den maximalen Spurversatz als Indikator für die Kontrollierbarkeit. Trotz der Unterschiede im zeitlichen Reaktionsmuster ist der resultierende Spurversatz vergleichbar. Allerdings zeigt sich, dass die Gestaltung der Szenarien einen starken Einfluss auf die übergeordnete Reaktionsstrategie der Fahrer hat. Steht dem Fahrer im Fehlerfall weniger Platz zur Verfügung (ein Fahrstreifen in Fahrtrichtung), wird der Eingriff stärker unterdrückt als wenn dem Fahrer mehr Platz zur Verfügung steht (zwei Fahrstreifen in Fahrtrichtung) oder im Nutzenfall. Dies deutet darauf hin, dass die Situationsgestaltung tatsächlich die Reaktionsstrategie der Fahrer beeinflussen kann, was ein wichtiger Hinweis für die Gestaltung von Szenarien zur Untersuchung der Kontrollierbarkeit ist (vgl. Forschungsfrage 6-6). Steht dem Fahrer ausreichend Platz zur Verfügung, ist der Handlungsdruck in dem Szenario möglicherweise zu gering. Als Folge dessen könnte die Kontrollierbarkeit fehlerhafter Eingriffe möglicherweise zu konservativ bewertet werden. Interessanterweise hat die Gestaltung der Szenarien keinen bedeutsamen Effekt auf das zeitliche Reaktionsmuster der Fahrer. Dies deutet darauf hin, dass die Fahrer zwar ihre Strategie an die Umgebungsbedingungen anpassen können, die Umgebungsbedingungen aber nicht grundsätzlich einen Einfluss auf das zeitliche Reaktionsmuster haben.

Die in Folge des wiederholten Erlebens ermittelten Kennwerte sowie die beobachteten Reaktionsmuster verdeutlichen, dass die Fahrer ihr Reaktionsmuster wahrscheinlich anpassen können. Ein eindeutiger Einfluss der Eingriffscharakteristik wurde hingegen nicht beobachtet. Auf Basis der Ergebnisse kann daher nicht abgeleitet werden, ob ein langsamer oder ein schneller Aufbau des Lenkmoments für die Mitlenkentscheidung förderlich ist oder vom Fahrer besser aufgegriffen werden kann. Allerdings nahmen bei wiederholtem Erleben die Kollisionshäufigkeiten deutlich ab.

Gleichzeitig zeigt sich über den Verlauf der Messungen tendenziell eine Zunahme von Verhaltensweisen, die auf ein Aufgreifen des Eingriffs hindeuten. Dies liefert Hinweise darauf, dass die Fahrer durch wiederholtes Erleben der Situation lernen können, den Eingriff mit dem geforderten Verhalten zu assoziieren. Damit werden grundlegende Annahmen zur Verhaltenssteuerung, wie z. B. in dem Modell von Powers (1973a) oder der Ideomotorischen Hypothese bestätigt (vgl. Kapitel 2.3).

Allerdings gab es nach wie vor einen geringen Anteil von Fahrern, die den Eingriff nicht zuließen. Dafür gibt es zwei mögliche Erklärungen. Zum einen könnte es sein, dass die Dämpfung des Eingriffs immer dann zum Tragen kommt, wenn der Fahrer sich bei Beginn des Eingriffs noch nicht für eine Ausweichreaktion entscheiden konnte. In diesem Fall wird der Eingriff zunächst als Störung der Querführung wahrgenommen (vgl. hierzu auch Neukum et al., 2010a). Dabei führt die haptische Information zu einem automatisierten Reaktionsmuster, das dem sensomotorischen Regelkreis zugeordnet wird, welches erst unterbrochen wird, wenn der Fahrer seine Mitlenkentscheidung getroffen hat. Zum anderen besteht die Möglichkeit, dass manche Fahrer Ausweichen auch nach wiederholtem Erleben der Situation nicht als Handlungsoption in Betracht ziehen. Daher unterdrücken sie den Eingriff, weil sie nicht ausweichen wollen. Dies lässt sich auch anhand von Kommentaren der Probanden nachvollziehen. So gab ein Proband beispielsweise an, dass er grundsätzlich nicht ausweichen will, da er sich nicht ausreichend sicher ist, ob die Situation es zulässt. Möglicherweise ist dies auch auf negative Lernerfahrungen mit anderen Assistenzsystemen oder bestimmte Personenvariablen zurückzuführen. So besteht beispielsweise die Möglichkeit, dass die Fahrerfahrung (und damit auch mögliche Lernerfahrungen, die eine Ausweichreaktion begünstigen) das Verhalten des Fahrers im Falle eines Eingriffs beeinflusst. Alternativ könnten auch andere Personenvariablen, wie z. B. Risikobereitschaft, eine Rolle spielen. Für den Nachweis wären jedoch weitere Studien erforderlich, die die entsprechenden Personenvariablen mitberücksichtigen.

Insgesamt fällt auf, dass trotz wiederholtem Erleben des Eingriffs das Reaktionsmuster initiales Dämpfen am häufigsten auftritt. Dieses deutet zwar möglicherweise darauf hin, dass ein automatisierter Kontrollprozess beteiligt ist, allerdings ist dieses Reaktionsmuster möglicherweise auch auf die Eingriffsgestaltung zurückzuführen. In Folge der Eingriffe wurde der maximale Lenkradwinkel nicht limitiert. Dadurch waren die Fahrer gezwungen, den Eingriff abzdämpfen, um eine gezielte Ausweichtrajektorie fahren zu können. Daher kann anhand der vorliegenden Ergebnisse nicht eindeutig geklärt werden, ob das Reaktionsmuster der Fahrer Folge eines automatisierten sensomotorischen Regelprozesses ist oder eine Folge der Eingriffsgestaltung. Hinweise darauf, dass die Eingriffsgestaltung mitverantwortlich für das Reaktionsmuster der Fahrer ist, finden sich bei einer Spurbelegung von 25% und einer Amplitude von 6 Nm. Hier zeigte ein Großteil der Fahrer das Reaktionsmuster initiales Dämpfen. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass der Eingriff in der Situation als zu stark wahrgenommen und dadurch häufiger gedämpft wird als bei einer Spurbelegung von 50% oder bei Eingriffen mit einer geringeren Amplitude. Zukünftige Studien sollten daher überprüfen, ob die Reaktionsmuster auch in Folge von Eingriffen beobachtet werden, die nicht unbedingt ein Eingreifen des Fahrers im Nutzenfall erfordern um die Kollision mit dem Hindernis zu vermeiden und das Fahrzeug anschließend wieder kontrolliert in Fahrtrichtung auszurichten.

6.5.3 Schlussfolgerung

Im Hinblick auf das angenommene Verhaltensmodell finden sich erste Hinweise auf den Einfluss der sensomotorischen Kontrollprozesse. Die Ergebnisse der Studie liefern Indizien dafür, dass die Reaktion des Fahrers zunächst quasi-automatisch abläuft und auf die Kompensation des Lenkeingriffs ausgerichtet ist. Erst im späteren Verlauf finden sich Hinweise auf eine Anpassung in der Verhaltenssteuerung, die auf ein Aufgreifen des Lenkeingriffs bzw. der Lenkempfehlung hindeuten. Durch den Einfluss der Variation der Eingriffscharakteristik, welcher sich vor allem auf die haptische Rückmeldung auswirkt, wird vermutet, dass der erste Teil der Reaktion durch die angenommenen sensomotorischen Kontrollprozesse erklärt werden kann. Allerdings kann dies anhand der vorliegenden Ergebnisse nicht abschließend geklärt werden. Zusätzlich finden sich Hinweise darauf, dass die Fahrer bestehende Reiz-Reaktions-Muster durch wiederholtes Erleben anpassen können. Dies deutet auch darauf hin, dass das Handlungsziel des Fahrers für das Auftreten der gezeigten Reaktionsmuster bedeutsam ist. Des Weiteren könnten bereits bestehende Lernerfahrungen einen Einfluss haben. Grundlage hierfür ist, dass nicht in allen Fällen eine Kompensationsreaktion beobachtet wurde. Dies ist ein weiteres Indiz dafür, dass das Reaktionsmuster und damit auch die Abläufe der angenommenen sensomotorischen Kontrollprozesse durch das Handlungsziel des Fahrers beeinflusst werden.

Insgesamt liefert die Studie damit wertvolle Hinweise darauf, wie die Gestaltung von Lenkeingriffen mit haptischer Rückmeldung am Lenkrad das Fahrerverhalten beeinflusst. Grundsätzlich scheinen Fahrer erst dann eine koordinierte, dem Lenkeingriff entgegen gerichtete Reaktion einleiten zu können, wenn der Eingriff vollständig aufgebaut ist. Im Falle eines langsamen Aufbaus des Lenkmoments führt dies möglicherweise zu einer Verzögerung der Reaktion, was auf eine Interferenz zwischen der Kompensationsreaktion und der Handlungsentscheidung für eine Ausweichreaktion hindeutet. Für die Gestaltung von automatischen Ausweicheingriffen könnte dies von Nachteil sein, da eine Übersteuerungsreaktion der Fahrer im Falle eines unberechtigten Eingriffs erst später erkannt werden kann. Objektive Kriterien für die Wirksamkeit und die Kontrollierbarkeit, wie die Kollisionshäufigkeiten oder der maximale Spurversatz, deuten jedoch nicht auf eindeutigen Vor- oder Nachteil der beiden Eingriffscharakteristiken hin. Hier zeigt sich vor allem ein starker Einfluss der Situationsgestaltung. Im Fehlerfall unterscheiden sich die Reaktionsmuster der Fahrer deutlich, je nachdem wieviel Platz die Fahrer zur Verfügung haben. Studien mit Fokus auf die Kontrollierbarkeit sollten daher den verfügbaren Manöverraum beschränken. Zusätzlich sollten Lenkeingriffe optimalerweise so gestaltet werden, dass der maximale Lenkradwinkel und damit auch der maximale Spurversatz begrenzt wird. Ohne diese Maßnahme kann nicht ausgeschlossen werden, dass die dämpfenden Verhaltensweisen der Fahrer lediglich auf die Eingriffsgestaltung zurückzuführen sind. Aufgrund des zeitlichen Reaktionsmusters und der möglichen Interferenz mit der anschließenden Handlungsentscheidung bei einem langsamen Aufbau des Lenkmoments ist nach aktuellem Kenntnisstand ein schneller Aufbau des Lenkmoments zu bevorzugen.

7 Studie III: Einfluss von geregelten Ausweicheingriffen auf das Fahrerverhalten

7.1 Herleitung der Forschungsfragen

In der vorangegangenen Studie wurden Ausweicheingriffe ohne eine Limitierung des maximalen Lenkradwinkels getestet, wobei der Fokus auf dem Einfluss der Aufbaugeschwindigkeit des Lenkmoments lag. Die getesteten Eingriffe entsprechen damit im Wesentlichen gerichteten Lenkempfehlungen (vgl. Kapitel 2.2.4.1) und weniger einem gesteuerten Eingriff zur Kollisionsvermeidung. Zudem wurde der maximale Lenkradwinkel nicht limitiert, was möglicherweise dazu geführt hat, dass die Fahrer den Eingriff auch im Nutzenfall abdämpften oder festhielten, um den resultierenden Spurversatz zu begrenzen und den umliegenden Verkehr nicht zu gefährden (vgl. Kapitel 7.5). Dadurch könnte sich das Handlungsziel des Fahrers im Verlauf des Eingriffs ändern, was ebenfalls eine Erklärung für das dämpfende Verhalten der Fahrer in der vorangegangenen Studie sein könnte.

In der folgenden Studie sollen daher Lenkeingriffe mit einer einfachen Steuerung des Lenkradwinkels eingesetzt werden, um so den maximalen Lenkradwinkel und den resultierenden Spurversatz zu begrenzen. Ein vergleichbarer Ansatz wurde in der Studie von Kleen und Schmidt (2009) gewählt. In der Studie wurde der maximale Lenkradwinkel der Lenkempfehlung auf 10° begrenzt. Eine Vorgabe der Trajektorie erfolgte jedoch nicht (vgl. Kleen & Schmidt, 2009). Um den Nutzen des Eingriffs zu erhöhen, soll im Folgenden ein Eingriff realisiert werden, der den Fahrer auch ohne sein Zutun bei der Kollisionsvermeidung und der anschließenden Stabilisierung und Wiederausrichtung des Fahrzeugs unterstützt. Dadurch soll ausgeschlossen werden, dass sich das Handlungsziel des Fahrers im Verlauf des Eingriffs notwendigerweise auf die Dämpfung des Eingriffs verlagert.

Finden sich trotz dieser Anpassung des Eingriffs dämpfende Verhaltensweisen, bestätigt dies die Annahme, dass der Fahrer auch im Falle eines berechtigten Eingriffs sein Handlungsziel noch nicht an die bevorstehende Situation angepasst hat. Ursache hierfür ist möglicherweise die geringe Zeitspanne, die dem Fahrer vom Erscheinen des Hindernisses bis zum Beginn des Eingriffs zur Analyse der Situation zur Verfügung steht. In diesem Fall könnte der Eingriff auf sensomotorischer Ebene zunächst als Abweichung vom ursprünglichen Handlungsziel (Feedforward Lenkung) interpretiert werden, wie bereits in der vorherigen Studie angenommen (vgl. Kapitel 6). In Folge dessen wird erwartet, dass die Fahrer den Eingriff zumindest zu Beginn dämpfen oder das Lenkrad festhalten.

Zeigt sich bei wiederholtem Erleben des Eingriffs zusätzlich eine eindeutige Abnahme dämpfender Verhaltensweisen, könnte dies darauf hinweisen, dass die Fahrer lernen, dass der Eingriff sie bei der Kollisionsvermeidung unterstützt und keine Störung der Querführung darstellt, die sie kompensieren müssen. Dies würde darauf hindeuten, dass der angenommene sensomotorische Regelprozess nicht zwingend zu einer automatischen Gegenreaktion der Fahrer führen muss, sondern von dem Handlungsziel der Fahrer beeinflusst werden kann. Dies könnte ein Hinweis auf die hierarchische Struktur der Regelkreise sein (siehe hierzu auch Kapitel 2.3 und Kapitel 3).

Da unklar ist, wie weit ein Fahrer im Normalfall ausweichen würde, wurden zudem zwei unterschiedliche Eingriffe realisiert, die sich hinsichtlich des angestrebten Spurversatzes unterscheiden.

Dadurch soll verhindert werden, dass der Fahrer den Eingriff zusätzlich abdämpfen muss. Des Weiteren wurden unterschiedlich lange Eingriffe umgesetzt, die den Fahrer während der Stabilisierung des Fahrzeugs unterstützen sollen. Dadurch soll überprüft werden, ob eine anschließende Stabilisierung des Fahrzeugs erforderlich ist, um einen Kontrollverlust über das Fahrzeug im Nutzenfall zu verhindern (siehe hierzu Malaterre et al., 1988).

Im Folgenden werden die oben beschriebenen Annahmen nochmals zusammengefasst und im Rahmen von Forschungsfragen spezifiziert. Zusätzlich werden, entsprechend der getroffenen Annahmen, ergänzend Hypothesen bezüglich des im Anwendungsfall zu erwartenden Fahrerverhaltens und dessen Auswirkungen aufgestellt.

7.2 Forschungsfragen

Die folgende Studie geht der Frage nach, ob unerwartete automatische Eingriffe in die Lenkung vergleichbare Auswirkungen haben wie gerichtete Lenkempfehlungen (vgl. Forschungsfrage 7-1). Werden ähnliche Wechselwirkungen wie in Studie II beobachtet, wäre dies ein Hinweis darauf, dass Fahrer mehr Zeit benötigen, um die Situation zu analysieren und ihr Handlungsziel an die vorliegende Situation anzupassen (vgl. Forschungsfrage 7-2).

Forschungsfrage 7-1: Werden im Nutzenfall auch bei geregelten Ausweicheingriffen dämpfende Verhaltensweisen der Fahrer beobachtet?

Forschungsfrage 7-2: Sind die Fahrerreaktionen im Nutzenfall vergleichbar mit den Fahrerreaktionen im Fehlerfall?

Des Weiteren soll überprüft werden, wie sich das wiederholte Erleben von Eingriffen auf das Reaktionsmuster der Fahrer auswirkt. Dadurch soll überprüft werden, ob Fahrer lernen können, ihr Reaktionsmuster an die vorliegende Situation anzupassen oder ob es sich um automatisch ablaufende, haptisch getriggerte Reaktionsmuster handelt, die nicht vom Fahrer beeinflusst werden können (vgl. Forschungsfrage 7-3).

Forschungsfrage 7-3: Wie wirkt sich das wiederholte Erleben von geregelten Ausweicheingriffen auf das Fahrerverhalten im Nutzenfall aus?

Hypothese 7-1: Mit zunehmender Lernerfahrung werden geregelte Ausweicheingriffe häufiger aufgenommen und seltener unterdrückt.

Ergänzend soll weiterhin überprüft werden, inwiefern der Fahrer bei der Ausführung der Ausweichreaktion unterstützt werden muss, um abschätzen zu können, welche Form und Dauer der Unterstützung bevorzugt werden sollte (vgl. Forschungsfrage 7-4). Es wird jedoch nicht erwartet, dass diese Variation einen Einfluss auf die Wirksamkeit oder das Verhalten der Fahrer beim erstmaligen Erleben des Nutzenfalls hat. Begründet wird dies damit, dass die haptisch getriggerte Kompensationsreaktion der Fahrer wahrscheinlich auftritt, bevor die Unterschiede der Variation zum Tragen kommen.

Forschungsfrage 7-4: Inwiefern muss der Fahrer nach Beginn des Eingriffs bei der Stabilisierung des Fahrzeugs unterstützt werden und wie wirkt sich diese Unterstützung auf die Wirksamkeit und die Kontrollierbarkeit aus?

Zusätzlich soll analysiert werden, ob das Reaktionsmuster der Fahrer von dem angestrebten Spurversatz des Ausweicheingriffs beeinflusst wird. Dadurch soll überprüft werden, ob die Kompensationsreaktion der Fahrer möglicherweise eine Folge davon ist, dass die Fahrer weniger weit ausweichen möchten.

Forschungsfrage 7-5: Welchen Einfluss hat der angestrebte Spurversatz auf das Reaktionsmuster der Fahrer?

7.3 Methodik

7.3.1 Stichprobe

Alle Teilnehmer der Studie entstammten dem Testfahrerpanel der WIVW GmbH und waren durch ein standardisiertes Training an das Fahren im dynamischen Fahrsimulator gewöhnt. Um die Abbruchquote aufgrund von „*Simulator Sickness*“ zu minimieren, wurden nur Fahrer mit einer als sehr gut eingestuften Verträglichkeit eingeladen. Da nicht explizit überprüft wurde, ob die Fahrer bereits an vergleichbaren Studien teilgenommen haben, kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Fahrer im Vorfeld der Studie bereits Erfahrungen mit automatischen Eingriffen gemacht haben. Insgesamt nahmen an der Studie N=40 Fahrer teil (davon 17 weiblich). Das mittlere Alter der weiblichen Fahrer betrug $m = 46.6$ Jahre (min = 17, max = 72) und das der männlichen Fahrer $m = 42$ Jahre (min = 22, max = 76).

7.3.2 Gestaltung der Szenarien

Für den Nutzenfall wurden städtische Szenarien mit Querverkehr, also z. B. ausparkenden Fahrzeugen oder kreuzenden Fahrradfahrern erstellt. Hierzu wurden insgesamt vier unterschiedliche Szenarien umgesetzt, in welchen der querende/kreuzende Konfliktpartner (PKW oder Fahrrad; vgl. Abbildung 7-1) an mehreren Stellen aus einer Sichtverdeckung auf den Fahrstreifen des Fahrers fuhr. Im Nutzenfall wurde der Eingriff immer auf Straßenquerschnitten mit zwei Fahrstreifen Fahrtrichtung ausgelöst. Die Breite der Fahrstreifen betrug 3.5 m. Die Auslösung des Konfliktpartners erfolgte bei einer TTC von 1.4 s. Bei einer TTC von 1.2 s wurde der Lenkeingriff ausgelöst. Für den Fehlerfall wurde der Lenkeingriff ohne das Vorhandensein eines Konfliktpartners auf einem geraden Streckenabschnitt mit zwei Fahrstreifen ausgelöst. Die zeitliche Abfolge im Falle eines berechtigten Eingriffs und die grundlegende Gestaltung der Szenarien entspricht damit weitgehend der Studie zur Variation der Eingriffscharakteristik (vgl. Kapitel 6).



Abbildung 7-1: Umsetzung der Szenarien im Fahrsimulator. Ausparker/Querverkehr (links) und querender Radfahrer (rechts). Sowohl der PKW als auch der querende Radfahrer waren vor Beginn der Situation durch Sichthindernisse (z. B. parkende Fahrzeuge oder Büsche) verdeckt.

7.3.3 Eingriffscharakteristik

Als Ausgangspunkt für die Untersuchung wurde zunächst die Lenktrajektorie eines erfolgreichen Ausweichmanövers in einer kritischen Verkehrssituation mit plötzlich querendem Fahrzeug aufgezeichnet. Das Ausweichmanöver wurde hierbei so gestaltet, dass ein vollständiger Fahrstreifenwechsel (angestrebter Spurversatz ca. 3.5 m) inkl. Wiederausrichtung des Fahrzeugs auf dem Nachbarfahrstreifen erfolgte (vgl. Abbildung 7-2). Zusätzlich wurde auf Basis des eingefahrenen Spurwechsels eine Spurwechselsequenz für einen halben Spurwechsel (angestrebter Spurversatz ca. 1.75 m) errechnet. Der Lenkradwinkelverlauf wurde im Falle eines Lenkeingriffs bei einer TTC von 1.2 s zum Konfliktpartner über eine Lenkradwinkelschnittstelle eingespielt. Das maximale Lenkmoment zum Aufbau des Lenkradwinkels wurde auf 6 Nm beschränkt.

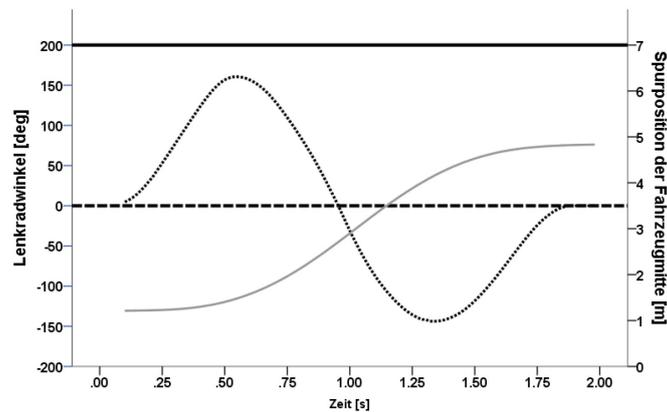


Abbildung 7-2: Exemplarischer Zeitverlauf des Lenkradwinkels (schwarz) und der Spurposition (grau) des umgesetzten Lenkeingriffs.

Weiterhin wurden für die Untersuchung auf Basis dieses Lenkeingriffs vier weitere Lenkradwinkelverläufe erstellt, die den Fahrer unterschiedlich lange bei der Kollisionsvermeidung unterstützen und dadurch zur Stabilisierung des Fahrzeugs beitragen sollen. Hierzu wurden anhand des ursprünglichen Lenkradwinkelverlaufs vier verschiedene Eingriffsvarianten definiert (siehe Abbildung 7-3):

- Erstes Lenkradwinkelmaximum (Eingriffsvariante 1)
- Erster Nulldurchgang (Eingriffsvariante 2)
- Zweites Lenkradwinkelmaximum (Eingriffsvariante 3)
- Zweiter Nulldurchgang (Eingriffsvariante 4)

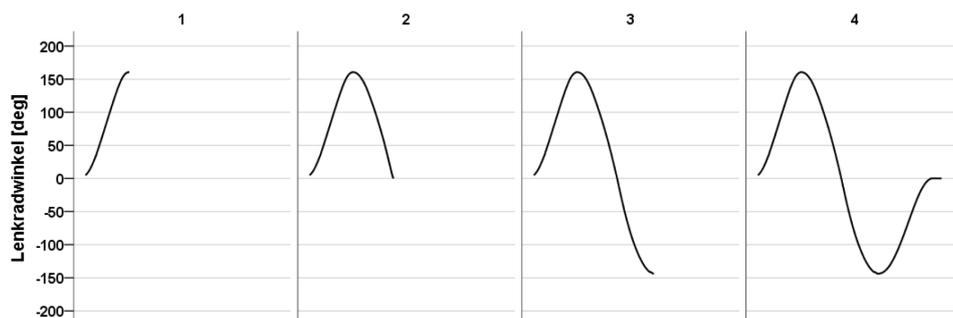


Abbildung 7-3. Zeitverlauf des Lenkradwinkels für die vier unterschiedlichen Eingriffsvarianten (1-4).

7.3.4 Versuchsablauf

Die Studie bestand aus insgesamt drei Teilen, die von allen Fahrern in der gleichen Reihenfolge absolviert wurden. Im ersten Teil wurden die Fahrer einer von zwei Gruppen zugewiesen und erlebten erstmalig einen berechtigten Eingriff. Die eine Hälfte erhielt Eingriffsvariante 1, die andere Eingriffsvariante 4. Diese beiden Eingriffsvarianten wurden gewählt, da sie die beiden Extreme darstellen. Bei Eingriffsvariante 1 wird der Fahrer lediglich beim Auslenken unterstützt. Bei Eingriffsvariante 4 wird der Fahrer sowohl beim Auslenken als auch beim anschließenden Wiederausrichten und Stabilisieren des Fahrzeugs unterstützt. Beide Gruppen erlebten den berechtigten Eingriff im gleichen Szenario. Im zweiten Teil wurden die Fahrer wiederholt mit berechtigten Eingriffen konfrontiert. Dabei wurde die Eingriffsvariante (1-4), der angestrebte Spurversatz (1.75 m vs. 3.5 m) und der Konfliktpartner (PKW vs. Radfahrer) variiert. Im dritten Teil wurden die Fahrer mit dem Fehlerfall konfrontiert. Variiert wurde die Eingriffsvariante (1 und 4) sowie die der angestrebte Spurversatz (1.75 m und 3.5 m).

Aus den in den vorausgehenden Abschnitten erläuterten Faktoren ergibt sich folgender Versuchsplan für die Studie (vgl. Tabelle 7-1). Between-Faktoren (B) wurden zu gleichen Teilen auf die Probandengruppen verteilt, Within-Faktoren (W) wurden von allen Probanden durchfahren. Für die Abfolgen der Within-Faktoren wurden acht pseudorandomisierte Abfolgen erstellt, um Reihenfolgeeffekte zu vermeiden. Aufgrund eines Fehlers bei der Erstellung der Reihenfolgen im Fehlerfall wurde der angestrebte Spurversatz bei 5 Fahrern nicht variiert, so dass bei Eingriffsvariante 4 die Anzahl der getesteten Fahrer pro Bedingung abweicht.

Tabelle 7-1: Versuchsplan der Studie zum Einfluss der geregelten Ausweichtrajektorie.

Studienteil	Eingriffsvariante	angestrebter Spurversatz	Konfliktpartner	Streckentyp
1	1, 4 (B)	3.5 m	PKW	Erstkontakt
2,	1, 2, 3, 4 (W, P)	1.75 m, 3.5 m (W, P)	PKW, Fahrrad (W, P)	Nutzenfall
3	1,4 (W, P)	1.75 m, 3.5 m (W, P)	/	Fehlerfall

B = Between-Faktor, W = Within-Faktor, P = pseudorandomisiert

7.4 Ergebnisse

Die Ergebnisse werden im Folgenden getrennt nach Nutzen- und Fehlerfall berichtet. Für den Nutzenfall werden zunächst Parameter und Indikatoren für die Wirksamkeit des berechtigten Eingriffs berichtet, um eine Vergleichbarkeit mit bereits vorliegenden Studien zu gewährleisten. Zusätzlich wurde das Lenkverhalten des Fahrers anhand der in Kapitel 4.3 berichteten Vorgehensweise analysiert und beschrieben.

Zusätzlich wird auf weitere Einflussfaktoren, wie bspw. die Ausweichweite sowie mögliche Lerneffekte in Folge eines wiederholten Erlebens berechtigter Eingriffe eingegangen um zu überprüfen, ob sich das Reaktionsmuster der Fahrer mit der Zeit ändert.

7.4.1 Nutzenfall

Kollisionen Beide Eingriffsvarianten zeigen deskriptiv eine vergleichbare Wirksamkeit. Mit Eingriffsvariante 1 konnten 75% ($N = 15$) der Fahrer die Kollision mit dem Hindernis nicht verhindern, mit Eingriffsvariante 4 80% ($N = 16$). Dies deutet darauf hin, dass hinsichtlich der Wirksamkeit kein Unterschied zwischen den Eingriffsvarianten besteht, die den Fahrer lediglich beim Einlenken unterstützen und den Varianten, die den Fahrer bei der vollständigen Ausweichtrajektorie unterstützen.

Reaktionsmuster Die deskriptive Betrachtung der Reaktionsmuster deutet darauf hin, dass bei Eingriffsvariante 1 weniger Fahrer als Festhalter und mehr Fahrer als initiale Dämpfer oder Mitlenker klassifiziert werden als bei Eingriffsvariante 4 (vgl. Abbildung 7-4). Bei Eingriffsvariante 1 wurde bei 50% ($N = 10$) der Fahrer das Reaktionsmuster Festhalten klassifiziert und bei je 25% ($N = 5$) die Reaktionsmuster initiales Dämpfen und Mitlenken. Bei Eingriffsvariante 4 wurde bei 75% ($N = 15$) der Fahrer das Reaktionsmuster Festhalten identifiziert, bei 15% ($N = 3$) das Reaktionsmuster initiales Dämpfen und bei 10% ($N = 3$) das Reaktionsmuster Mitlenken. Unabhängig von der Eingriffsvariante konnte keiner der Fahrer, bei denen das Reaktionsmuster Festhalten identifiziert wurde, die Kollision mit dem Hindernis verhindern. Bei Eingriffsvariante 1 konnten alle Fahrer, bei denen das Reaktionsmuster initiales Dämpfen klassifiziert wurde, die Kollision verhindern. Fahrer, bei denen die Verhaltensweise Mitlenken identifiziert wurde, konnten die Kollision hingegen nicht verhindern. Bei Eingriffsvariante 4 konnten je zwei Fahrer, bei denen die Verhaltensweise initiales Dämpfen und Mitlenken identifiziert wurde, die Kollision mit dem Hindernis verhindern. Bei Eingriffsvariante 1 zeigten 95% ($N = 19$) der Fahrer eine Bremsreaktion, bei Eingriffsvariante 4 100% ($N = 20$).

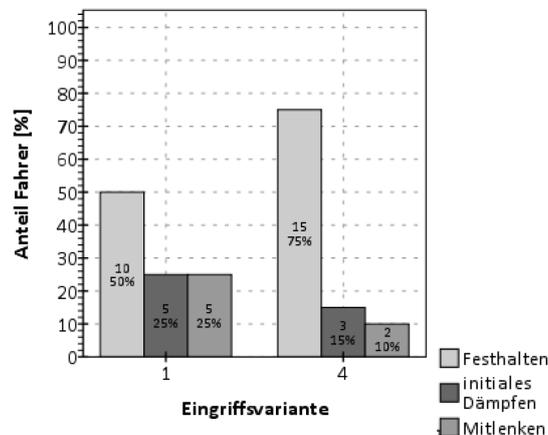


Abbildung 7-4. Häufigkeit der Reaktionsmuster Festhalten, initiales Dämpfen und Mitlenken im Nutzenfall für Eingriffe mit Eingriffsvariante 1, die Fahrer lediglich beim Einlenken unterstützt und Eingriffsvariante 4, die Fahrer bei der gesamten Ausweichtrajektorie unterstützt.

Um einen möglichen Einfluss der Eingriffsvariante auf Kennwerte des Lenkverhaltens inferenzstatistisch zu prüfen, wurde eine multivariate Varianzanalyse mit den abhängigen Variablen maximaler Spurversatz, erstes Lenkradwinkelmaximum, Zeitpunkt des ersten Lenkradwinkelmaximums, erstes Lenkradwinkelgeschwindigkeitsmaximum und Zeitpunkt des ersten Lenkradwinkelgeschwindigkeitsmaximums berechnet. Der Omnibus-Test ergab keinen signifikanten Einfluss der Eingriffsvariante auf die abhängigen Variablen (Wilks Lambda, $F(5, 34) = 0.384$, $p = .856$, $\eta^2 = .053$), daher werden die Ergebnisse der univariaten Varianzanalysen nicht berichtet.

Zur Veranschaulichung wird im Folgenden dennoch deskriptiv auf die Kennwerte des Lenkverhaltens eingegangen.

Maximaler Spurversatz Im Mittel liegt der beobachtete maximale Spurversatz unabhängig von der Eingriffsvariante deutlich unterhalb des vom Eingriff angestrebten Spurversatzes von ca. 3.5 m ($M_{\text{Eingriffsvariante 1}} = 1.17 \text{ m}$, $SD_{\text{Eingriffsvariante 1}} = 0.79 \text{ m}$; $M_{\text{Eingriffsvariante 2}} = 0.96 \text{ m}$, $SD_{\text{Eingriffsvariante 2}} = 0.75 \text{ m}$; vgl. Abbildung 7-5 links). Dies deutet darauf hin, dass die Fahrer den Eingriff abdämpften. Die Betrachtung in Abhängigkeit der Reaktionsmuster zeigt, dass der Spurversatz insbesondere bei dem Reaktionsmuster Festhalten deutlich reduziert ist. Bei Eingriffsvariante 1 zeigt sich zudem, dass der Spurversatz beim Reaktionsmuster initiales Dämpfen weniger stark reduziert wurde. Beim Reaktionsmuster Mitlenken liegt der beobachtete Spurversatz im Mittel hingegen auf dem gleichen Niveau wie beim Reaktionsmuster Festhalten. Dies deutet darauf hin, dass die Klassifikation hier möglicherweise fehlerhaft ist und die Fahrer lediglich einen größeren Lenkradwinkel zuließen. Bei Eingriffsvariante 4 deutet sich hingegen an, dass der Spurversatz beim Reaktionsmuster Mitlenken wie zu erwarten größer ausfällt (vgl. Abbildung 7-5 rechts).

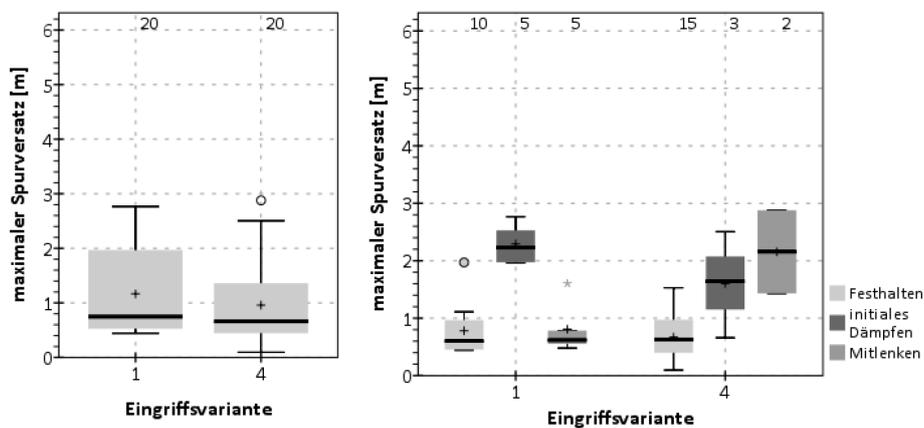


Abbildung 7-5. Maximaler Spurversatz [m] im Nutzenfall in Abhängigkeit von der Eingriffsvariante (1 vs. 4) und dem Reaktionsmuster (Festhalten, initiales Dämpfen, Mitlenken). Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Erstes Lenkradwinkelmaximum Im Mittel liegt das erste Lenkradwinkelmaximum unabhängig von der Eingriffsvariante deutlich unterhalb des vom Eingriff angestrebten Lenkradwinkels von ca. 150° (vgl. Abbildung 7-2), was darauf hindeutet, dass die Fahrer den Eingriff am Lenkrad überwiegend abdämpften. Lediglich in Einzelfällen wurden annähernd Werte im Bereich des angestrebten Lenkradwinkels erreicht (vgl. Abbildung 7-6 links). Bei Betrachtung in Abhängigkeit der Reaktionsmuster wird zudem deutlich, dass bei Eingriffsvariante 1 vor allem beim Reaktionsmuster initiales Dämpfen höhere Lenkradwinkel erreicht wurden, während bei Eingriffsvariante 4 vor allem beim Reaktionsmuster Mitlenken höhere Lenkradwinkel erzielt wurden (vgl. Abbildung 7-6 rechts).

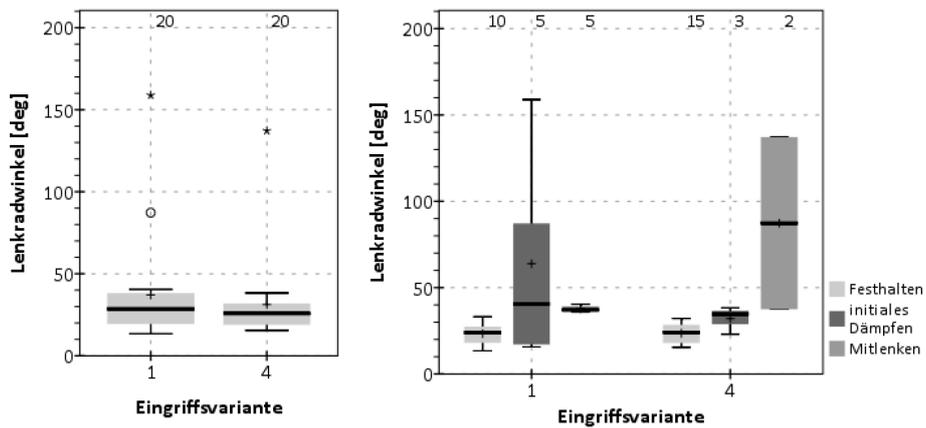


Abbildung 7-6. Erstes Lenkradwinkelmaximum [deg] im Nutzenfall in Abhängigkeit von der Eingriffsvariante (1 vs. 4) und dem Reaktionsmuster (Festhalten, initiales Dämpfen, Mitlenken). Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Das erste Lenkradwinkelmaximum wurde im Mittel nach ca. 0.4 Sekunden erreicht ($M_{\text{Eingriffsvariante 1}} = 0.38 \text{ s}$, $SD_{\text{Eingriffsvariante 1}} = 0.11 \text{ s}$; $M_{\text{Eingriffsvariante 2}} = 0.37 \text{ s}$, $SD_{\text{Eingriffsvariante 2}} = 0.10 \text{ s}$) und damit ca. 0.1 Sekunden bevor das Maximum des Lenkradwinkels in Folge des Eingriffs zu erwarten wäre (vgl. Abbildung 7-7). Dies deutet ebenfalls darauf hin, dass die Fahrer den berechtigten Eingriff dämpften. Die Betrachtung in Abhängigkeit der Reaktionsmuster weist tendenziell darauf hin, dass beim Reaktionsmuster Festhalten das Lenkradwinkelmaximum im Mittel früher erreicht wurde als bei den Reaktionsmustern initiales Dämpfen oder Mitlenken (vgl. Abbildung 7-7 rechts). In einigen Fällen wird das Lenkradwinkelmaximum hier deutlich später erreicht als in Folge des Eingriffs zu erwarten wäre (vgl. Abbildung 7-2). Dies ist möglicherweise ein Hinweis darauf, dass die Fahrer den Eingriff aufgenommen haben.

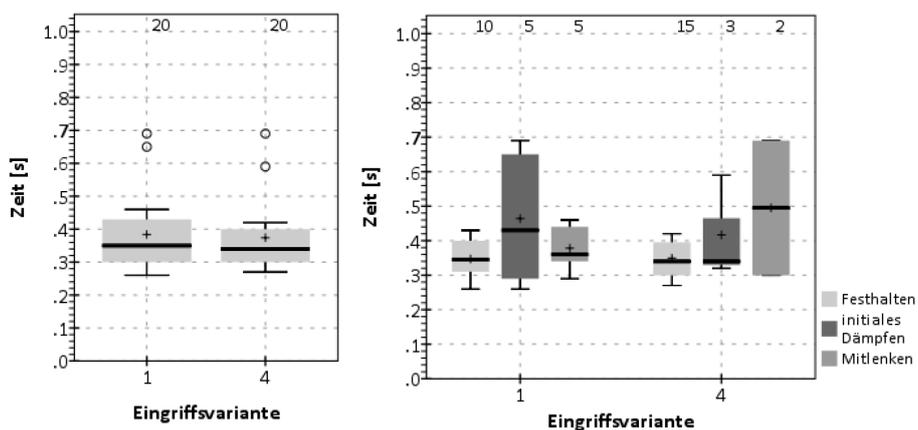


Abbildung 7-7. Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums [s] im Nutzenfall in Abhängigkeit von der Eingriffsvariante (1 vs. 4) und dem Reaktionsmuster (Festhalten, initiales Dämpfen, Mitlenken). Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit

Im Mittel unterscheidet sich das erste

Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Eingriffsvariante nicht (vgl. Abbildung 7-8 links).

Die Betrachtung in Abhängigkeit der Reaktionsmuster (vgl. Abbildung 7-8 rechts) zeigt, dass die beobachtete Lenkradwinkelgeschwindigkeit bei der Verhaltensweise Festhalten im Mittel wie erwartet am geringsten ausfällt. Bei Eingriffsvariante 1 ist zudem zu erkennen, dass bei den Verhaltensweisen initiales Dämpfen und Mitlenken im Mittel eine höhere Lenkradwinkelgeschwindigkeit erreicht wurde. Bei Eingriffsvariante 4 wird hingegen nur beim Reaktionsmuster Mitlenken eine erhöhte Lenkradwinkelgeschwindigkeit beobachtet, während sie bei den Reaktionsmustern Festhalten und initiales Dämpfen vergleichbar ausfällt.

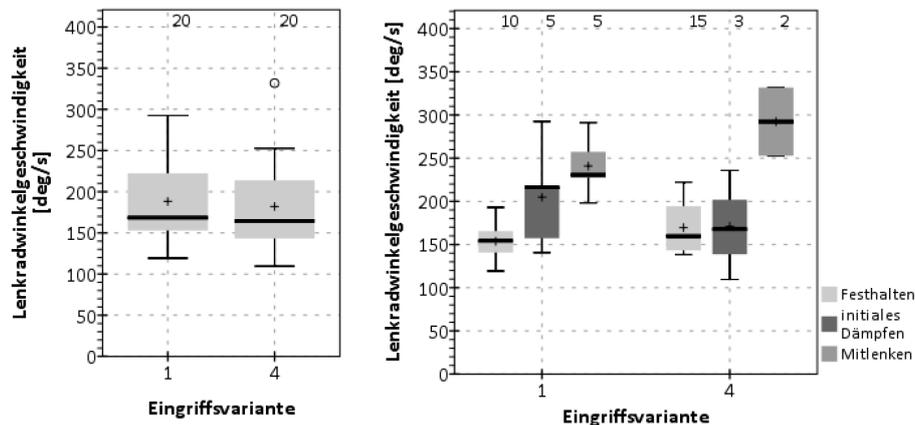


Abbildung 7-8. Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [deg/s] im Nutzenfall in Abhängigkeit von der Eingriffsvariante (1 vs. 4) und dem Reaktionsmuster (Festhalten, initiales Dämpfen, Mitlenken). Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit wird unabhängig von der Eingriffsvariante nach ca. 0.25 Sekunden erreicht ($M_{\text{Eingriffsvariante 1}} = 0.23 \text{ s}$, $SD_{\text{Eingriffsvariante 1}} = 0.04 \text{ s}$; $M_{\text{Eingriffsvariante 2}} = 0.24 \text{ s}$, $SD_{\text{Eingriffsvariante 2}} = 0.02 \text{ s}$). Damit wird das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit im Mittel ca. 30-40 ms erreicht, bevor es aufgrund der Eingriffsgestaltung zu erwarten wäre. Die Reaktionsmuster scheinen keinen Einfluss auf den Zeitpunkt des ersten Lenkradwinkelmaximums zu haben (vgl. Abbildung 7-9).

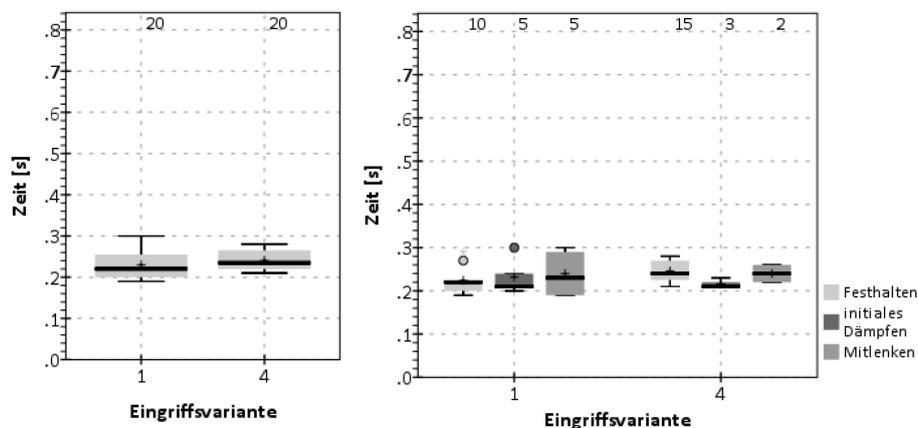


Abbildung 7-9. Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [s] im Nutzenfall in Abhängigkeit von der Eingriffsvariante (1 vs. 4) und dem Reaktionsmuster (Festhalten, initiales Dämpfen, Mitlenken). Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

7.4.2 Fehlerfall

Reaktionsmuster Die Eingriffsvariante und die Ausweichweite hatten deskriptiv keinen eindeutigen Einfluss auf das Reaktionsmuster der Fahrer im Fehlerfall. Auffällig ist, dass das Reaktionsmuster Festhalten trotz des unberechtigten Eingriffs vergleichsweise selten gezeigt wurde (12% - 27%), während das Reaktionsmuster initiales Dämpfen in ca. der Hälfte der Fälle auftrat (vgl. Abbildung 7-10). In allen Bedingungen zeigte die Mehrheit der Fahrer zusätzlich eine Bremsreaktion (vgl. Tabelle 7-2).

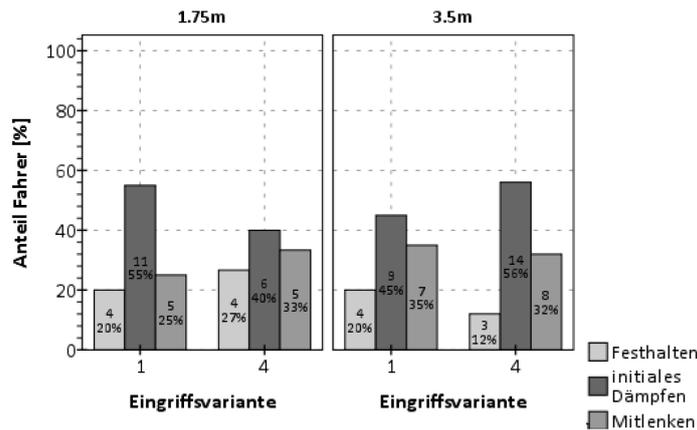


Abbildung 7-10. Häufigkeit der Reaktionsmuster Festhalten, initiales Dämpfen und Mitlenken im Fehlerfall in Abhängigkeit von der Eingriffsvariante (1 vs. 4) und der Ausweichweite (1.75 m vs. 3.5 m).

Tabelle 7-2. Bremshäufigkeiten in Abhängigkeit von der Eingriffsvariante (1 vs. 4) und der Ausweichweite (1.75 m vs. 3.5 m).

Ausweichweite	Eingriffsvariante	
	1	4
1.75 m	75% (15)	60% (9)
3.5 m	65% (13)	64% (16)

Um einen möglichen Einfluss der Eingriffsvariante und der Ausweichweite auf Kennwerte des Lenkverhaltens zu prüfen, wurde eine multivariate Varianzanalyse berechnet. Dabei wurde der Einfluss der Messwiederholung nicht berücksichtigt, was möglicherweise zu konservativeren Ergebnissen und einer Unterschätzung der Effektstärke führt. Dieses Vorgehen wurde gewählt, da aufgrund eines Fehlers in der Versuchsanordnung die Gruppengrößen unterschiedlich groß ausfielen. Der Omnibus-Test ergab keinen signifikanten Einfluss der Eingriffsvariante (Wilks Lambda, $F(5, 72) = 1.601, p = .171, \eta^2 = .100$) oder der Ausweichweite (Wilks Lambda, $F(5, 72) = 1.763, p = .131, \eta^2 = .109$) auf die abhängigen Variablen. Durch das konservative Vorgehen bei der inferenzstatistischen Auswertung des Omnibus Tests werden neben den deskriptiven Kennwerten ergänzend die Ergebnisse der univariaten Varianzanalysen berichtet.

Maximaler Spurversatz Die univariaten Varianzanalysen ergaben keinen statistisch signifikanten Effekt der Eingriffsvariante ($F(1, 76) = 0.144, p = .705, \eta^2 = .002$) oder der Ausweichweite ($F(1, 76) = 3.557, p = .063, \eta^2 = .045$) auf den maximalen Spurversatz. Im Mittel fiel der maximale Spurversatz bei einer Ausweichweite von 3.5 m jedoch geringfügig größer aus als bei einer Ausweichweite von 1.75 m (vgl. Tabelle 7-8).

Auffällig ist, dass der maximale Spurversatz bei einer Ausweichweite von 1.75 m im Mittel annähernd dem angestrebten Wert entsprach. Bei einer Ausweichweite von 3.5 m weicht der maximale Spurversatz deutlich stärker von dem Zielwert ab, was auf eine stärkere Dämpfung des Eingriffs hinweist (vgl. Abbildung 7-11 links). Ein eindeutiger Einfluss der Eingriffsvariante ist deskriptiv hingegen nicht erkennbar. Die Betrachtung in Abhängigkeit der Reaktionsmuster zeigt, dass der maximale Spurversatz in Folge des Reaktionsmusters Festhalten am geringsten ausfiel. Auch hier ist kein eindeutiger Einfluss der Eingriffsvariante erkennbar (vgl. Abbildung 7-11 rechts).

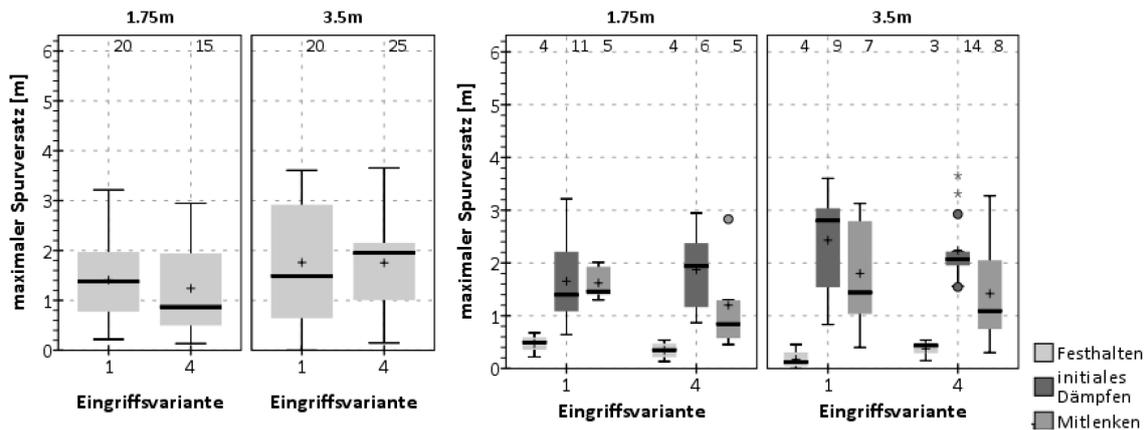


Abbildung 7-11. Maximaler Spurversatz [m] im Fehlerfall in Abhängigkeit von der Eingriffsvariante (1 vs. 4), der Ausweichweite (1.75 m vs. 3.5 m) und dem Reaktionsmuster. Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Tabelle 7-3. Maximaler Spurversatz [m] im Fehlerfall in Abhängigkeit von der Ausweichweite (1.75 m vs. 3.5 m) und der Eingriffsvariante (1 vs. 4).

Ausweichweite	Eingriffsvariante	M	MIN	MAX	SD	N
1.75 m	1	1.41	0.22	3.21	0.79	20
	4	1.24	0.24	2.95	0.95	15
3.5 m	1	1.76	0.00	3.60	1.26	20
	4	1.75	0.15	3.65	0.97	25

Erstes Lenkradwinkelmaximum Die univariaten Varianzanalysen ergaben keinen signifikanten Effekt der Eingriffsvariante ($F(1, 76) = 0.800, p = .374, \eta^2 = .010$) oder der Ausweichweite ($F(1, 76) = 3.881, p = .052, \eta^2 = .049$) auf das erste Lenkradwinkelmaximum. Im Mittel fiel das erste Lenkradwinkelmaximum bei einer Ausweichweite von 3.5 m jedoch geringfügig größer aus als bei einer Ausweichweite von 1.75 m (vgl. Tabelle 7-4). Ähnlich wie beim Spurversatz wurde bei einer Ausweichweite von 1.75 m im Mittel annähernd der vom Eingriff angestrebte maximale Lenkradwinkel von 75° erreicht, während bei einer Ausweichweite von 3.5 m der maximale Lenkradwinkel im Mittel deutlich unterhalb von 150° Grad blieb (vgl. Abbildung 7-12 links). Dies deutet ebenfalls auf eine stärkere Dämpfung des Eingriffs bei einer Ausweichweite von 3.5 m hin. Die Betrachtung in Abhängigkeit der Reaktionsmuster deutet darauf hin, dass das erste Lenkradwinkelmaximum beim Reaktionsmuster Festhalten in allen Bedingungen in etwa vergleichbar ausfiel (vgl. Abbildung 7-12 rechts). Unterschiede in Abhängigkeit der Ausweichweite zeigen sich deskriptiv vor allem bei den Reaktionsmustern initiales Dämpfen und Mitlenken.

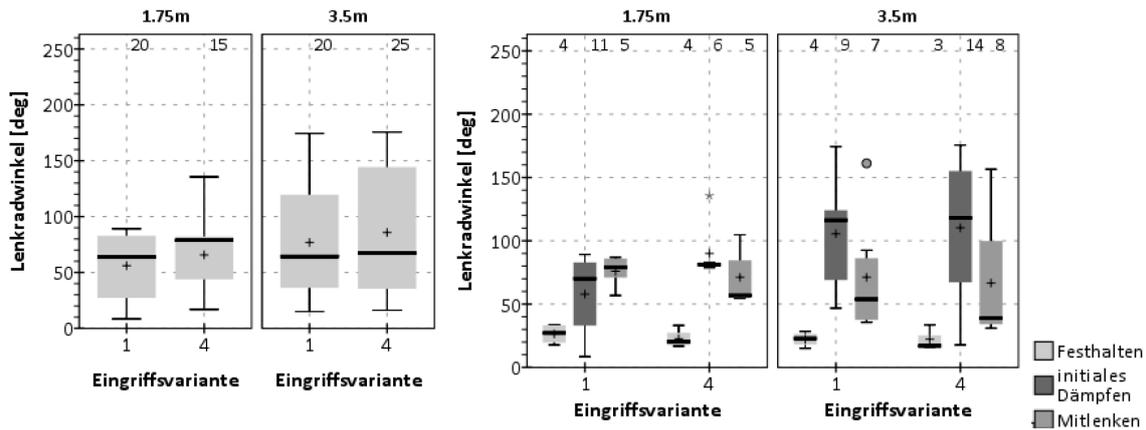


Abbildung 7-12. Erstes Lenkradwinkelmaximum [deg] im Fehlerfall in Abhängigkeit von der Eingriffsvariante (1 vs. 4), der Ausweichweite (1.75 m vs. 3.5 m) und dem Reaktionsmuster. Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Tabelle 7-4. Erstes Lenkradwinkelmaximum [deg] im Fehlerfall in Abhängigkeit von der Ausweichweite (1.75 m vs. 3.5 m) und der Eingriffsvariante (1 vs. 4).

Ausweichweite	Eingriffsvariante	M	MIN	MAX	SD	N
1.75 m	1	56.10	8.44	89.17	29.19	20
	4	65.75	16.88	354.29	33.63	15
3.5 m	1	76.88	15.00	174.39	50.43	20
	4	85.76	16.13	175.59	56.78	25

Das erste Maximum des Lenkradwinkels wurde in allen Bedingungen im Mittel nach 0.5 s erreicht (vgl. Abbildung 7-13 links). Die univariaten Varianzanalysen ergaben keinen signifikanten Einfluss der Eingriffsvariante ($F(1, 76) = 3.517, p = .065, \eta^2 = .044$) und keinen Einfluss der Ausweichweite auf den Zeitpunkt des ersten Lenkradwinkelmaximums ($F(1, 76) = 0.003, p = .958, \eta^2 = .000$). Vor allem bei einer Ausweichweite von 1.75 m zeigt sich deskriptiv, dass das erste Lenkradwinkelmaximum bei Eingriffsvariante 1 früher erreicht wurde als bei Eingriffsvariante 4. Bei einer Ausweichweite von 3.5 m sind deskriptiv hingegen keine Unterschiede zwischen den Eingriffsvarianten erkennbar (vgl. Tabelle 7-5). Insgesamt deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Fahrer vergleichsweise spät auf den unberechtigten Eingriff reagierten. Die Betrachtung in Abhängigkeit des gezeigten Reaktionsmusters liefert ebenfalls einen Hinweis darauf. Auch in Folge des Reaktionsmusters Festhalten wurde das erste Lenkradwinkelmaximum im Mittel zwischen 0.4 s und 0.5 s erreicht. Dies entspricht in etwa dem Zeitbereich, in dem in Folge der Eingriffsgestaltung der maximale Lenkradwinkel zu erwarten ist. Lediglich bei einer Ausweichweite von 3.5 m wurde das Lenkradwinkelmaximum im Mittel früher erreicht, wenn das Reaktionsmuster Festhalten identifiziert wurde, was auf eine stärkere Dämpfung bzw. Gegenreaktion der Fahrer hindeutet (vgl. Abbildung 7-13 rechts).

|Studie III: Einfluss von geregelten Ausweicheingriffen auf das Fahrerverhalten

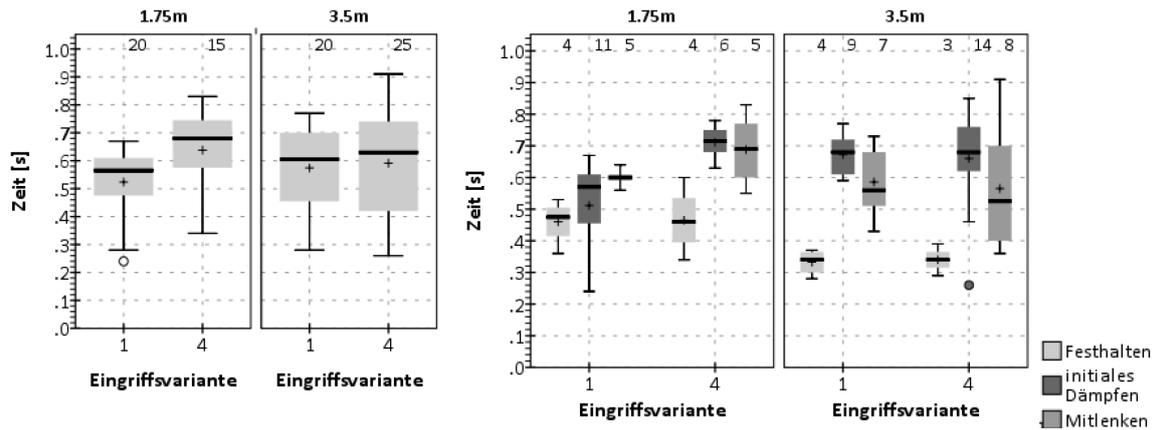


Abbildung 7-13. Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums [s] im Fehlerfall in Abhängigkeit von der Eingriffsvariante (1 vs. 4), der Ausweichweite (1.75 m vs. 3.5 m) und dem Reaktionsmuster. Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Tabelle 7-5. Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums [s] im Fehlerfall in Abhängigkeit von der Ausweichweite (1.75 m vs. 3.5 m) und der Eingriffsvariante (1 vs. 4).

Ausweichweite	Eingriffsvariante	M	MIN	MAX	SD	N
1.75 m	1	0.52	0.24	0.67	0.12	20
	4	0.64	0.34	0.83	0.14	15
3.5 m	1	0.57	0.28	0.43	0.15	20
	4	0.59	0.26	0.91	0.19	25

Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit Die univariaten Varianzanalysen ergaben keinen signifikanten Einfluss der Eingriffsvariante ($F(1, 76) = 0.035, p = .852, \eta^2 = .000$) und einen marginal signifikanten Einfluss der Ausweichweite ($F(1, 76) = 3.889, p = .052, \eta^2 = .049$) auf das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit. Im Mittel fiel das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit bei einer Ausweichweite von 3.5 m höher aus als bei einer Ausweichweite von 1.75 m (vgl. Tabelle 7-6).

Tabelle 7-6. Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [deg/s] im Fehlerfall in Abhängigkeit von der Ausweichweite (1.75 m vs. 3.5 m) und der Eingriffsvariante (1 vs. 4).

Ausweichweite	Eingriffsvariante	M	MIN	MAX	SD	N
1.75 m	1	165.20	75.59	354.29	73.14	20
	4	149.06	32.46	310.88	79.54	15
3.5 m	1	192.60	115.88	600.80	104.44	20
	4	201.17	106.99	500.72	91.40	25

Die Betrachtung in Abhängigkeit der gezeigten Reaktionsmuster (vgl. Abbildung 7-14) zeigt zudem, dass sich das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit bei einer Ausweichweite von 3.5 m kaum zwischen den Reaktionsmustern unterschied. Bei einer Ausweichweite von 1.75 m zeigt sich hingegen die zu erwartende Staffelung in Abhängigkeit der Reaktionsmuster. Das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit fiel beim Reaktionsmuster Festhalten und initiales Dämpfen tendenziell geringer aus als beim Reaktionsmuster Mitlenken.

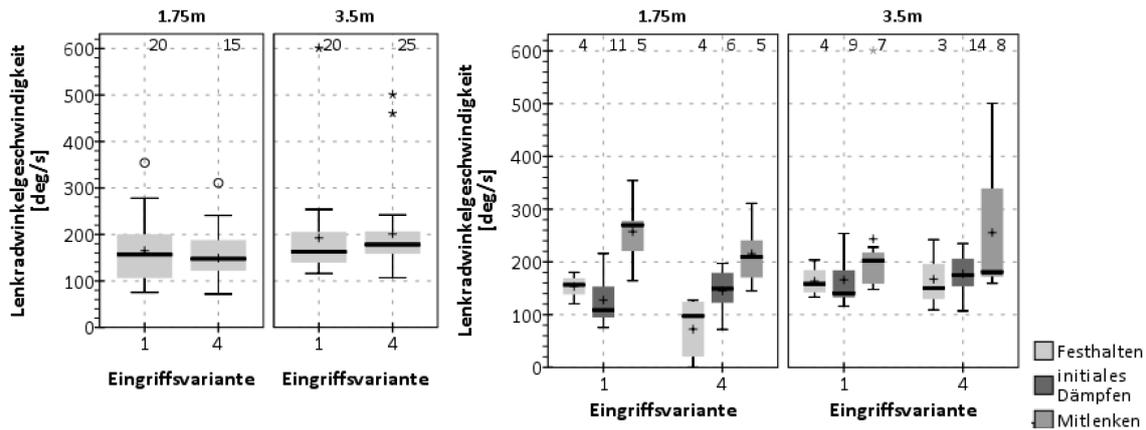


Abbildung 7-14. Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [deg/s] im Fehlerfall in Abhängigkeit von der Eingriffsvariante (1 vs. 4), der Ausweichweite (1.75 m vs. 3.5 m) und dem Reaktionsmuster. Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit wurde unabhängig von der Eingriffsvariante und der Ausweichweite zwischen 0.2 s und 0.3 s erreicht (vgl. Tabelle 7-7) und fällt damit in den Zeitbereich, in dem aufgrund der Eingriffsgestaltung das Maximum zu erwarten ist. Die univariaten Varianzanalysen ergaben keinen signifikanten Einfluss der Eingriffsvariante ($F(1, 76) = 0.042, p = .838, \eta^2 = .001$) oder Ausweichweite ($F(1, 76) = 0.237, p = .628, \eta^2 = .003$) auf die Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit (vgl. Abbildung 7-15 links). Die Betrachtung der Reaktionsmuster deutet allerdings darauf hin, dass insbesondere bei einer Ausweichweite von 3.5 m und den Reaktionsmustern Festhalten oder initiales Dämpfen das Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit teils früher erreicht wurde, als es aufgrund der Eingriffsgestaltung zu erwarten wäre (vgl. Abbildung 7-15 rechts).

Tabelle 7-7. Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [s] im Fehlerfall in Abhängigkeit von der Ausweichweite (1.75 m vs. 3.5 m) und der Eingriffsvariante (1 vs. 4).

Ausweichweite	Eingriffsvariante	M	MIN	MAX	SD	N
1.75 m	1	0.27	0.18	0.52	0.10	20
	4	0.25	0.13	0.37	0.07	15
3.5 m	1	0.25	0.16	0.43	0.07	20
	4	0.29	0.19	0.60	0.10	25

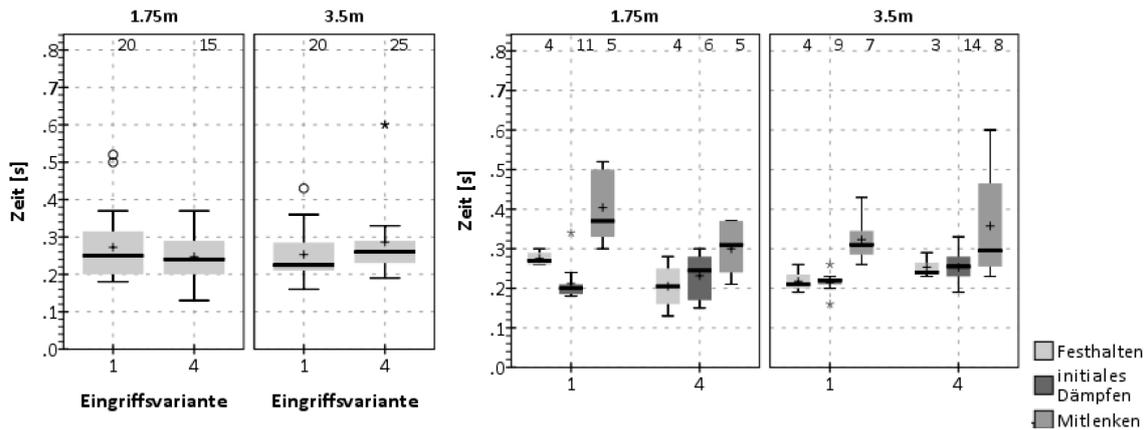


Abbildung 7-15. Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [s] im Fehlerfall in Abhängigkeit von der Eingriffsvariante (1 vs. 4), der Ausweichweite (1.75 m vs. 3.5 m) und dem Reaktionsmuster. Die horizontale Linie kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

7.4.3 Lerneffekte und weitere Einflussfaktoren

Im Folgenden wird auf die Ergebnisse der Wiederholungsmessungen eingegangen. Der Fokus der Auswertung liegt hierbei auf dem Einfluss der verschiedenen Eingriffsvarianten und der Ausweichweite auf das Verhalten der Fahrer. Zusätzlich soll überprüft werden, ob sich das Reaktionsmuster der Fahrer in Folge eines wiederholten Erlebens ändert, da dies auf einen möglichen Lerneffekt hindeuten könnte.

Kollisionen Deskriptiv sind zunächst keine systematischen Unterschiede bezüglich der Wirksamkeit in Abhängigkeit der verschiedenen Faktoren zu beobachten (vgl. Tabelle 7-8). Allerdings sind die Kollisionshäufigkeiten bei den Eingriffsvarianten 2 und 3 tendenziell höher als bei Eingriffsvarianten 1 und 4. Insgesamt sind die Kollisionshäufigkeiten bei wiederholtem Erleben des Nutzenfalls jedoch deutlich geringer als im Erstkontakt (vgl. Abschnitt 7.4.1). Dies bestätigt zumindest indirekt die Annahme, dass das wiederholte Erleben des Ausweicheingriffs dazu führt, dass dieser häufiger aufgegriffen wird (vgl. Hypothese 7-1).

Tabelle 7-8. Kollisionshäufigkeiten in Abhängigkeit von dem Konfliktpartner, der Ausweichweite (1.75 m vs 3.5 m) und der Eingriffsvariante (1 vs. 4).

Konfliktpartner	Ausweichweite	Eingriffsvariante			
		1	2	3	4
PKW	1.75 m	17.9% (7)	27.5% (11)	35% (14)	22.5% (9)
	3.5 m	23.1% (9)	27.5% (11)	32.5% (13)	17.5% (7)
Radfahrer	1.75 m	30% (12)	20% (8)	25% (10)	20% (8)
	3.5 m	20% (8)	35% (14)	25% (10)	22.5% (9)

Reaktionsmuster Die Betrachtung der Häufigkeit der gezeigten Reaktionsmuster deutet nicht auf einen Einfluss der Ausweichweite oder der Eingriffsvariante hin. Dominierendes Reaktionsmuster ist in allen Fällen initiales Dämpfen (vgl. Abbildung 7-16). Auf eine getrennte Betrachtung in Abhängigkeit des Konfliktpartners wurde an dieser Stelle verzichtet, da der Fokus auf dem Einfluss der unterschiedlichen Eingriffsvarianten liegt. Insgesamt zeigte die Mehrheit der Fahrer zusätzlich eine Bremsreaktion (vgl. Tabelle 7-9).

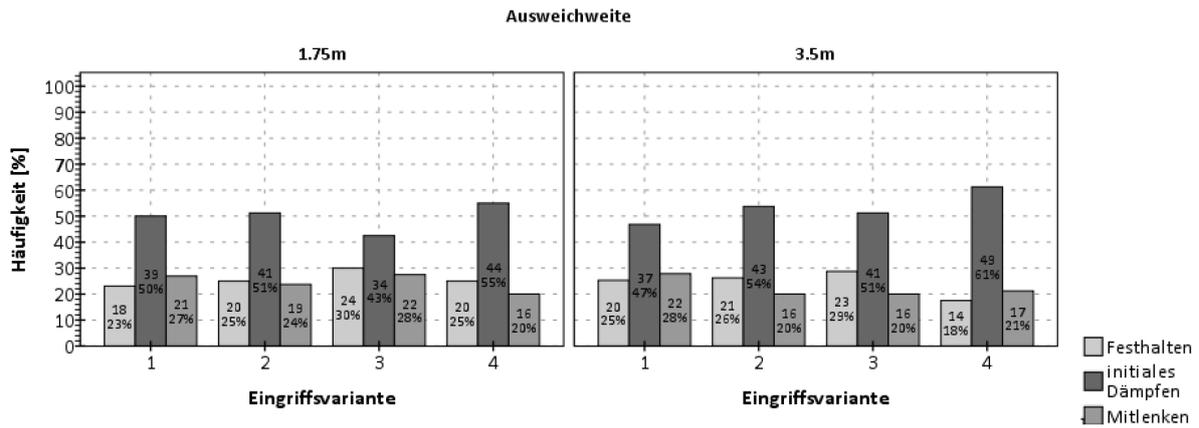


Abbildung 7-16. Häufigkeit der Reaktionsmuster Festhalten, initiales Dämpfen und Mitlenken im Nutzenfall in Abhängigkeit von der Eingriffsvariante (1, 2, 3, 4) und der Ausweichweite (1.75 m und 3.5 m).

Tabelle 7-9. Bremshäufigkeiten in Abhängigkeit von dem Konfliktpartner (PKW vs. Radfahrer), der Ausweichweite (1.75 m vs. 3.5 m und der Eingriffsvariante (1, 2, 3, 4).

Konfliktpartner	Ausweichweite	Eingriffsvariante			
		1	2	3	4
PKW	1.75 m	89.7% (35)	92.5% (37)	82.5% (33)	80% (32)
	3.5 m	89.7% (35)	87.5% (35)	85% (34)	85% (34)
Radfahrer	1.75 m	80% (32)	85% (34)	87.5% (35)	95% (38)
	3.5 m	82.5% (33)	87.5% (35)	75% (30)	85% (34)

Die Häufigkeit des Reaktionsmusters Festhalten nimmt während der ersten vier Messungen ab (vgl. Abbildung 7-17). Zu Beginn wird in über 40% der Fälle das Reaktionsmuster Festhalten identifiziert. Ab der vierten Messung wird dieses Reaktionsmuster nur noch in ca. 20% der Fälle identifiziert. Gleichzeitig steigt der Anteil des Reaktionsmusters initiales Dämpfen von ca. 40% auf nahezu 60%. Das Reaktionsmuster Mitlenken zeigt über den Verlauf der Messungen hinweg ebenfalls einen leichten Anstieg. Während zu Beginn der Messungen nur in ca. 10% der Fälle das Reaktionsmuster Mitlenken identifiziert wurde, steigt der Anteil im Verlauf der Messungen auf über 20%. Dies bestätigt zwar zum Teil die Annahme, dass das wiederholte Erleben des Ausweichengriffs dazu führt, dass dieser häufiger aufgegriffen wird (vgl. Hypothese 7-1), allerdings scheinen die Fahrer den Ausweichengriff zunächst immer noch zu dämpfen.

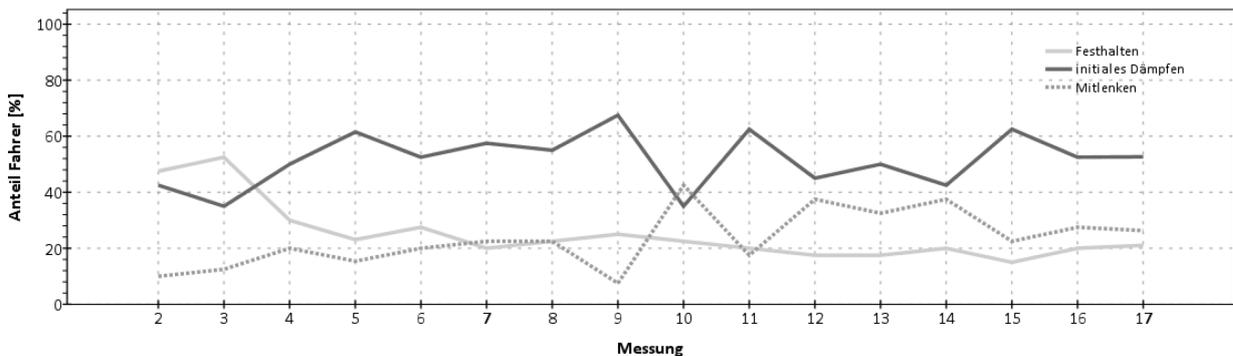


Abbildung 7-17. Häufigkeit der Reaktionsmuster Festhalten, initiales Dämpfen und Mitlenken im Nutzenfall in Abhängigkeit vom Messzeitpunkt.

Betrachtet man die Kollisionshäufigkeit in Abhängigkeit der Reaktionsmuster wird deutlich, dass das Reaktionsmuster Festhalten überwiegend für die beobachteten Kollisionen verantwortlich ist (vgl. Tabelle 7-10). Insgesamt wurde bei 77.5% ($N = 124$) der beobachteten Kollisionen die Verhaltensweise Festhalten identifiziert, bei 8.8% ($N = 14$) die Verhaltensweise initiales Dämpfen und bei 13.8% ($N = 22$) die Verhaltensweise Mitlenken.

Tabelle 7-10. Anteil der gezeigten Verhaltensweisen in Abhängigkeit davon, ob eine Kollision beobachtet wurde oder nicht. Die Werte summieren sich nicht auf 100%, da einem Fahrer anhand des beobachteten Lenkverhaltens keine der genannten Verhaltensweisen zugeordnet werden konnte.

Verhaltensweise	Kollision	
	ja	nein
Festhalten	77.5% (124)	7.5% (36)
Initiales Dämpfen	8.8% (14)	65.7% (314)
Mitlenken	13.8% (22)	26.6% (127)

Um einen möglichen Einfluss der Eingriffsvariante, der Ausweichweite und des Konfliktpartners auf Kennwerte des Lenkverhaltens inferenzstatistisch zu prüfen, wurde eine multivariate Messwiederholungsvarianzanalyse mit den abhängigen Variablen maximaler Spurversatz, erstes Lenkradwinkelmaximum, Zeitpunkt des ersten Lenkradwinkelmaximums, erstes Lenkradwinkelgeschwindigkeitsmaximum und Zeitpunkt des ersten Lenkradwinkelgeschwindigkeitsmaximums berechnet. Der Omnibus-Test ergab einen signifikanten Einfluss der Eingriffsvariante (Wilks Lambda, $F(5, 22) = 3.797, p = .002, \eta^2 = .721$), des Konfliktpartners (Wilks Lambda, $F(5, 32) = 15.277, p < .001, \eta^2 = .705$) und der Ausweichweite (Wilks Lambda, $F(5, 32) = 14.548, p < .001, \eta^2 = .694$) auf die abhängigen Variablen. Die Interaktionen der Faktoren hatten hingegen keinen signifikanten Einfluss auf die abhängigen Variablen. Auf die Ergebnisse der univariaten Varianzanalysen wird bei der Beschreibung der einzelnen Parameter eingegangen. Auf eine Aufteilung in Abhängigkeit der drei Reaktionsmuster wird an dieser Stelle verzichtet, da deskriptiv keine Unterschiede bezüglich der Häufigkeit der Reaktionsmuster zu beobachten waren.

Maximaler Spurversatz Die univariaten Varianzanalysen ergaben einen signifikanten Einfluss der Eingriffsvariante ($F(3, 108) = 10.899, p < .001, \eta^2 = .232$), des Konfliktpartners ($F(1, 36) = 22.420, p < .001, \eta^2 = .384$) und der Ausweichweite ($F(1, 36) = 36.629, p = .031, \eta^2 = .504$) auf den maximalen Spurversatz. Den stärksten Einfluss (gemessen an der Effektstärke) hatte hierbei der angestrebte Spurversatz. Wie erwartet führte der angestrebte Spurversatz von 3.5 m zu einem signifikant größeren Spurversatz als der angestrebte Spurversatz von 1.75 m ($M_{1.75\text{ m}} = 1.82\text{ m}, SD_{1.75\text{ m}} = 1.01\text{ m}; M_{3.5\text{ m}} = 2.20\text{ m}, SD_{3.5\text{ m}} = 1.24\text{ m}$; vgl. Abbildung 7-18 rechts). Auffällig ist, dass bei einem angestrebten Spurversatz von 1.75 m im Mittel nahezu der angestrebte Wert erreicht wurde, während bei einem angestrebten Spurversatz von 3,5 m im Mittel ein deutlich geringerer Wert erreicht wurde. Dies deutet auf eine stärkere Dämpfung des Eingriffs bei einem angestrebten Spurversatz von 3.5 m hin (vgl. Forschungsfrage 7-5). Zusätzlich wird deutlich, dass der maximale Spurversatz signifikant größer ausfiel, wenn der Konfliktpartner aus einem Radfahrer bestand ($M_{\text{PKW}} = 1.86\text{ m}, SD_{\text{PKW}} = 1.07\text{ m}; M_{\text{Radfahrer}} = 2.16\text{ m}, SD_{\text{Radfahrer}} = 1.20\text{ m}$; vgl. Abbildung 7-18 Mitte). Den geringsten Einfluss (gemessen an der Effektstärke) auf den Spurversatz hatte die Eingriffsvariante.

Im Mittel wurde bei Eingriffsvariante 1 der größte Spurversatz erzeugt ($M_{\text{Eingriffsvariante 1}} = 2.24 \text{ m}$, $SD_{\text{Eingriffsvariante 1}} = 1.30 \text{ m}$), während bei Eingriffsvariante 3 der Spurversatz im Mittel am geringsten ausfiel ($M_{\text{Eingriffsvariante 3}} = 1.82 \text{ m}$, $SD_{\text{Eingriffsvariante 3}} = 1.04 \text{ m}$; vgl. Abbildung 7-18 links). Insgesamt fielen die Unterschiede zwischen den Bedingungen bei allen Faktoren jedoch deutlich geringer aus als die Streuung zwischen den Fahrern. Die ist wahrscheinlich vor allem auf die unterschiedlichen Reaktionsmuster der Fahrer zurückzuführen.

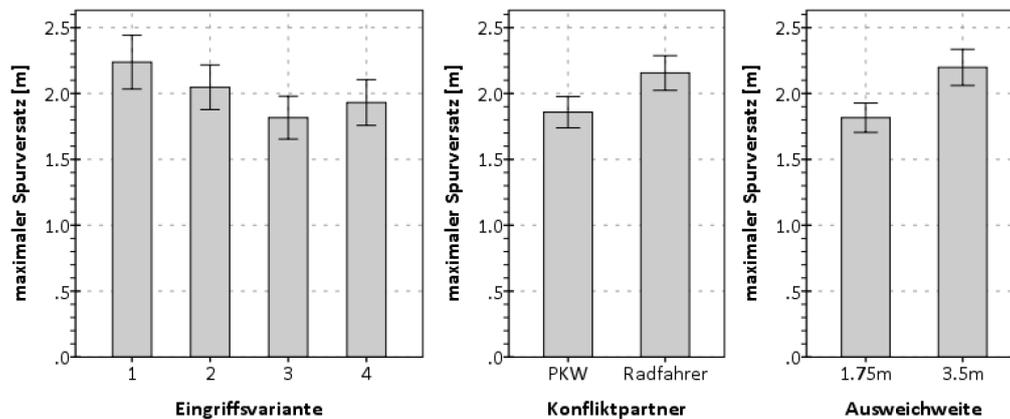


Abbildung 7-18. Mittlerer maximaler Spurversatz in Abhängigkeit von der Eingriffsvariante, dem Konfliktpartner (PKW vs. Radfahrer) und der Ausweichweite (1.75 m vs. 3.5 m). Die Fehlerbalken stellen das 95%-Konfidenzintervall dar.

Erstes Lenkradwinkelmaximum Die univariaten Varianzanalysen ergaben einen signifikanten Einfluss des Konfliktpartners ($F(1, 36) = 9.024$, $p = .005$, $\eta^2 = .200$) und der Ausweichweite ($F(1, 36) = 35.068$, $p < .001$, $\eta^2 = .493$) auf das erste Lenkradwinkelmaximum. Die Eingriffsvariante hatte hingegen keinen signifikanten Einfluss auf das erste Lenkradwinkelmaximum ($F(3, 108) = .478$, $p = .699$, $\eta^2 = .013$). Den stärksten Einfluss hat der angestrebte Spurversatz, der auch den maximalen Lenkradwinkel im Verlauf des Eingriffs vorgibt. Der beobachtete Unterschied spiegelt daher im Wesentlichen die experimentelle Variation wider. Im Mittel fiel das erste Lenkradwinkelmaximum signifikant höher aus, wenn der angestrebte Spurversatz 3.5 m betrug ($M_{1.75 \text{ m}} = 66.96^\circ$, $SD_{1.75 \text{ m}} = 48.19^\circ$; $M_{3.5 \text{ m}} = 90.21^\circ$, $SD_{3.5 \text{ m}} = 67.84^\circ$; vgl. Abbildung 7-19 rechts). In diesem Fall wurde ein maximaler Lenkradwinkel von 150° vorgegeben. Zusätzlich fiel das erste Lenkradwinkelmaximum im Mittel signifikant höher aus, wenn der Konfliktpartner aus einem PKW bestand ($M_{\text{PKW}} = 82.86^\circ$, $SD_{\text{PKW}} = 62.87^\circ$; $M_{\text{Radfahrer}} = 74.37^\circ$, $SD_{\text{Radfahrer}} = 56.67^\circ$; vgl. Abbildung 7-19 Mitte). Dies steht zunächst im Widerspruch zu den Ergebnissen des maximalen Spurversatzes.

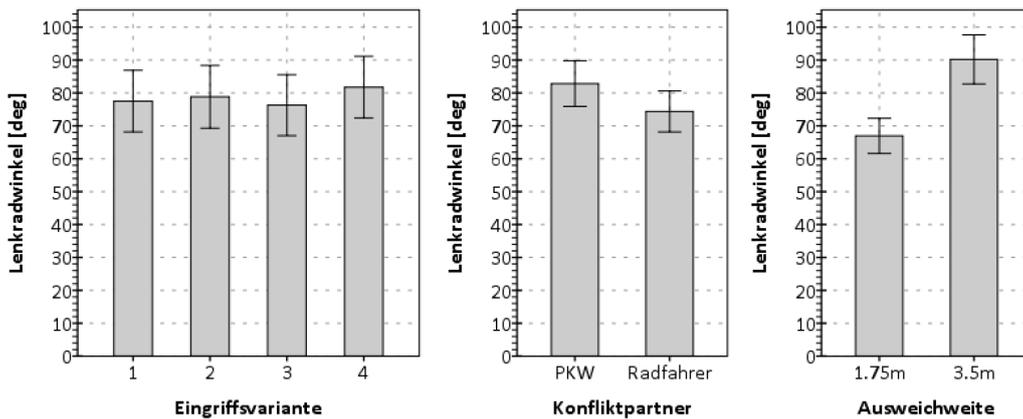


Abbildung 7-19. Mittelwert des ersten Lenkradwinkelmaximums in Abhängigkeit von der Eingriffsvariante, dem Konfliktpartner (PKW vs. Radfahrer) und der Ausweichweite (1.75 m vs. 3.5 m). Die Fehlerbalken stellen das 95%-Konfidenzintervall dar.

Die univariaten Varianzanalysen ergaben einen signifikanten Einfluss des Konfliktpartners ($F(1, 36) = 8.254, p = .007, \eta^2 = .187$) auf den Zeitpunkt des ersten Lenkradwinkelmaximums. Im Mittel wurde das erste Lenkradwinkelmaximum signifikant früher erreicht, wenn der Konfliktpartner aus einem PKW bestand ($M_{PKW} = 0.55 \text{ s}, SD_{PKW} = 0.20 \text{ s}; M_{Radfahrer} = 0.59 \text{ s}, SD_{Radfahrer} = 0.21 \text{ s};$ vgl. Abbildung 7-20 Mitte). Dies ist eine mögliche Erklärung dafür, warum der maximale Spurversatz beim Konfliktpartner Radfahrer trotz geringerem Lenkradwinkelmaximum größer ausfiel als beim Konfliktpartner PKW. Die Eingriffsvariante ($F(3, 108) = .693, p = .558, \eta^2 = .019$) und die Ausweichweite ($F(1, 36) = .306, p = .584, \eta^2 = .008$) hatten hingegen keinen signifikanten Einfluss auf den Zeitpunkt des ersten Lenkradwinkelmaximums. Im Mittel variiert die Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums hier nur geringfügig zwischen 0.56 s und 0.59 s (vgl. Abbildung 7-20).

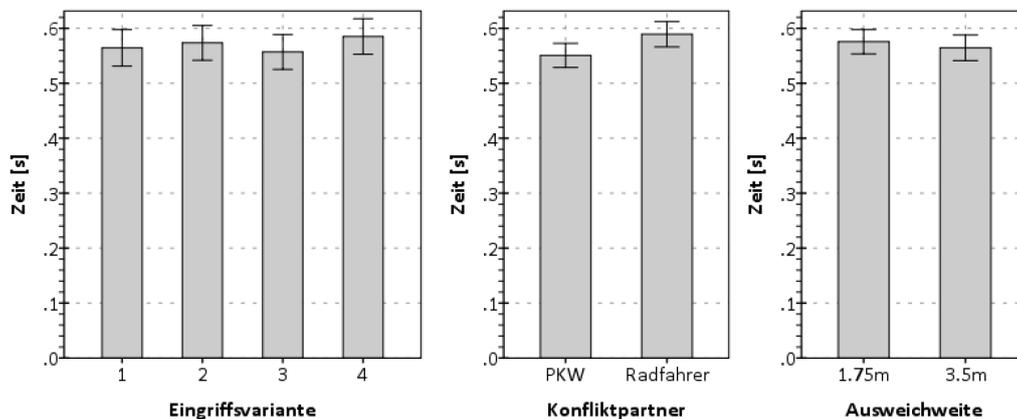


Abbildung 7-20. Mittlere Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums in Abhängigkeit von der Eingriffsvariante, dem Konfliktpartner (PKW vs. Radfahrer) und der Ausweichweite (1.75 m vs. 3.5 m). Die Fehlerbalken stellen das 95%-Konfidenzintervall dar.

Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit

Die univariaten Varianzanalysen ergaben einen signifikanten Einfluss des Konfliktpartners ($F(1, 36) = 10.408, p = .003, \eta^2 = .224$) und der Ausweichweite ($F(1, 36) = 10.095, p = .003, \eta^2 = .219$) auf das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit.

Im Mittel fiel das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit signifikant höher aus, wenn der Konfliktpartner aus einem PKW bestand ($M_{\text{PKW}} = 214.73 \text{ }^\circ/\text{s}$, $SD_{\text{PKW}} = 142.94 \text{ }^\circ/\text{s}$; $M_{\text{Radfahrer}} = 181.24 \text{ }^\circ/\text{s}$, $SD_{\text{Radfahrer}} = 99.04 \text{ }^\circ/\text{s}$; vgl. Abbildung 7-21 Mitte). Der Einfluss der Ausweichweite spiegelt auch hier im Wesentlichen die experimentelle Variation wider. Bei einer Ausweichweite von 3.5 m fiel das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit signifikant höher aus als bei einer Ausweichweite von 1.75 m ($M_{1.75 \text{ m}} = 180.47 \text{ }^\circ/\text{s}$, $SD_{1.75 \text{ m}} = 98.61 \text{ }^\circ/\text{s}$; $M_{3.5 \text{ m}} = 215.39 \text{ }^\circ/\text{s}$, $SD_{3.5 \text{ m}} = 142.95 \text{ }^\circ/\text{s}$; vgl. Abbildung 7-21, rechts). Die Eingriffsvariante hatte hingegen keinen signifikanten Einfluss ($F(3, 108) = .621$, $p = .603$, $\eta^2 = .017$) auf das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit (vgl. Abbildung 7-21 links).

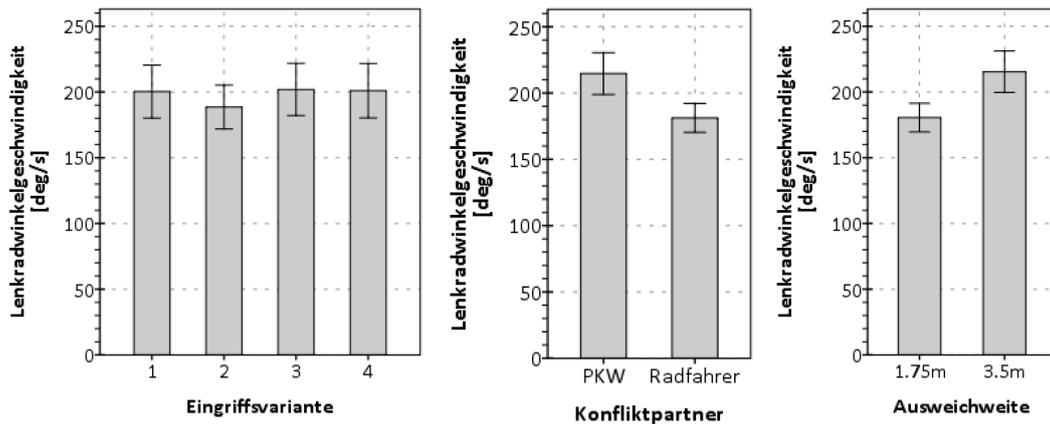


Abbildung 7-21. Mittelwert des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Eingriffsvariante, dem Konfliktpartner (PKW vs. Radfahrer) und der Ausweichweite (1.75 m). Die Fehlerbalken stellen das 95%-Konfidenzintervall dar.

Die univariaten Varianzanalysen ergaben keinen signifikanten Einfluss der Eingriffsvariante ($F(3, 108) = .433$, $p = .730$, $\eta^2 = .012$), des Konfliktpartners ($F(1, 36) = 119$, $p = .732$, $\eta^2 = .003$) und der Ausweichweite ($F(1, 36) = .981$, $p = .329$, $\eta^2 = .027$) auf die Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit. Im Mittel variierte die Dauer zwischen 0.27 s und 0.28 s.

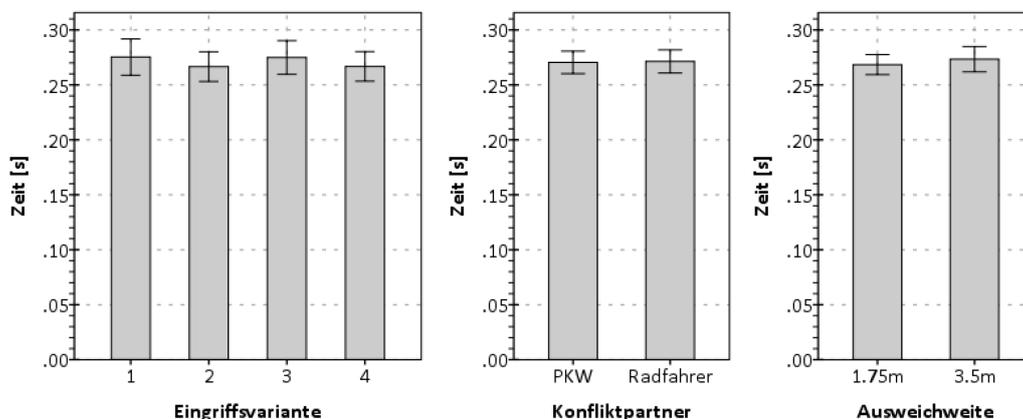


Abbildung 7-22. Mittlere Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums in Abhängigkeit von der Eingriffsvariante, dem Konfliktpartner (PKW vs. Radfahrer) und der Ausweichweite (1.75 m vs. 3.5 m). Die Fehlerbalken stellen das 95%-Konfidenzintervall dar.

7.5 Diskussion

7.5.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Erstkontakt mit einem berechtigten Eingriff war kein Einfluss der Eingriffsvariante auf die Wirksamkeit oder das Lenkerverhalten feststellbar. Unabhängig von der Eingriffsvariante war das dominierende Reaktionsmuster Festhalten. Fahrer, deren Reaktionsmuster post-hoc als Festhalter klassifiziert wurde, konnten Kollisionen in der Regel nicht vermeiden, während Fahrer, deren Reaktionsmuster als initiales Dämpfen oder Mitlenken klassifiziert wurde, überwiegend dazu in der Lage waren, die Kollision zu vermeiden.

Im Falle eines unberechtigten Eingriffs (Fehlerfall) war ebenfalls kein eindeutiger Einfluss der Eingriffsvariante feststellbar. Entgegen der Erwartung (aufgrund bisheriger Befunde) war das Reaktionsmuster Festhalten allerdings nicht das dominierende Reaktionsmuster der Fahrer. Damit zeigten die Fahrer hier nicht das gewünschte Verhalten, was sich auch auf den maximalen Spurversatz auswirkte. Dieser fiel im Fehlerfall im Mittel höher aus als im Nutzenfall (vgl. Forschungsfrage 7-2). Der angestrebte Spurversatz wirkte sich entsprechend der experimentellen Variation auf die Kennwerte des Lenkverhaltens und den maximalen Spurversatz aus. Ein angestrebter Spurversatz von 3.5 m führte im Mittel zu einem größeren Spurversatz und einem größeren Lenkradwinkel als ein angestrebter Spurversatz von 1.75 m. Auffällig ist jedoch, dass bei einer Ausweichweite von 1.75 m der Spurversatz und der Lenkradwinkel im Mittel näher an den Zielwerten des Eingriffs lagen als bei einer Ausweichweite von 3.5 m, wo eine stärkere Abweichung beobachtet wurde. Dies deutet darauf hin, dass Ausweicheingriffe mit einer Ausweichweite von 3.5 m stärker gedämpft wurden als Ausweicheingriffe mit einer Ausweichweite von 1.75 m (vgl. Forschungsfrage 7-5).

Auch im Falle eines wiederholten Erlebens des Nutzenfalls konnte nahezu kein Einfluss der Eingriffsvariante beobachtet werden. Tendenziell wurden jedoch bei Eingriffsvariante 2 und 3 häufiger Kollisionen beobachtet als bei Eingriffsvariante 1 und 4. Bei der Analyse des maximalen Spurversatzes konnte ebenfalls ein Einfluss der Eingriffsvariante nachgewiesen werden. Eingriffsvariante 3 führte im Mittel tendenziell zu einem geringeren maximalen Spurversatz als die anderen Eingriffsvarianten, insbesondere im Vergleich zu Eingriffsvariante 1. Insgesamt deuten die Ergebnisse darauf hin, dass eine Unterstützung des Fahrers bei der Stabilisierung des Fahrzeugs von Vorteil sein kann (vgl. Forschungsfrage 7-4). Gleichzeitig konnte ein Einfluss des angestrebten Spurversatzes auf die Kennwerte des Lenkverhaltens beobachtet werden, was im Wesentlichen die experimentelle Variation widerspiegelt. Auffällig dabei ist, dass bei einem angestrebten Spurversatz von 1.75 m der beobachtete maximale Spurversatz und der beobachtete maximale Lenkradwinkel im Mittel annähernd den Zielparametern des Eingriffs entsprechen, während diese bei einem angestrebten Spurversatz von 3.5 m darauf hindeuten, dass der Eingriff stärker gedämpft wurde (vgl. Forschungsfrage 7-5). Zusätzlich zeigt sich tendenziell eine Änderung des Reaktionsmusters der Fahrer über den Verlauf der Untersuchung hinweg. Zu Beginn der Untersuchung dominierte das Reaktionsmuster Festhalten, während im weiteren Verlauf der Untersuchung vor allem das Reaktionsmuster initiales Dämpfen dominierte. Dies deutet darauf hin, dass die Fahrer den Ausweicheingriff durch das wiederholte Erleben häufiger aufgreifen (vgl. Forschungsfrage 7-3), was Hypothese 7-1 bestätigt. Zusätzlich zeigt sich, dass die Kennwerte des Lenkverhaltens und das zeitliche Reaktionsmuster sich teilweise in Abhängigkeit des verwendeten Konfliktpartners unterschieden.

7.5.2 Diskussion

In der Studie wurden im Gegensatz zur vorangegangenen Studie geregelte Ausweichtrajektorien, die den maximalen Spurversatz und den maximalen Lenkradwinkel in Folge eines Lenkeingriffs beschränkten, untersucht. Dadurch sollte erreicht werden, dass für den Fahrer im Nutzenfall keine Notwendigkeit besteht, den Eingriff abzdämpfen oder zu unterdrücken. Auch ohne ein Eingreifen des Fahrers hätte mithilfe des Eingriffs eine Kollision mit dem Hindernis vermieden werden können. Damit wurde in dieser Studie eine vereinfachte Umsetzung eines automatischen Ausweicheingriffs getestet. Insgesamt sollte dadurch vermieden werden, dass die Notwendigkeit besteht, das Handlungsziel in Folge des Eingriffs erneut anzupassen (siehe hierzu auch Kapitel 6.5).

Es wurde angenommen, dass, falls sich trotz dieser Umsetzung im Nutzenfall weiterhin dämpfende Verhaltensweisen der Fahrer identifizieren lassen, dies ein Hinweis darauf ist, dass die Fahrer ihr Handlungsziel bei Beginn des Eingriffs noch nicht angepasst haben (vgl. Forschungsfrage 7-1). Damit wäre es auch ein Indiz dafür, dass das Verhalten des Fahrers zunächst, ähnlich wie im Fehlerfall, durch quasi-automatisch ablaufende sensomotorische Kontrollprozesse dominiert wird.

Wie bereits in der vorangegangenen Studie wurden die Fahrer zur Beantwortung dieser Frage sowohl im Nutzen- als auch im Fehlerfall mit den automatischen Ausweicheingriffen konfrontiert und deren Einfluss auf die Wirksamkeit berechtigter Eingriffe und die Kontrollierbarkeit fehlerhafter Eingriffe analysiert. Auch hier wurden das Reaktionsmuster und der zeitliche Ablauf der Lenkreaktionen anhand verschiedener Kennwerte detailliert analysiert. Zusätzlich wurde sowohl die Ausweichweite (vgl. Forschungsfrage 7-5) als auch die Dauer der Unterstützung bei der Wiederausrichtung des Fahrzeugs variiert (vgl. Forschungsfrage 7-4), um Hinweise darauf zu erhalten, welche Eingriffsgestaltung im Hinblick auf Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit zu bevorzugen ist.

Im Erstkontakt mit dem Nutzenfall konnte kein Einfluss der Eingriffsvariante auf die Wirksamkeit festgestellt werden. Dies wurde auch nicht erwartet (vgl. Forschungsfrage 7-4), da für die erfolgreiche Kollisionsvermeidung vor allem das erste Auslenken entscheidend ist, während die folgende Regelung vor allem der anschließenden Stabilisierung des Fahrzeugs dient. Unabhängig von der Eingriffsvariante war das dominierende Reaktionsmuster Festhalten, was in Folge dazu führte, dass die Mehrheit der Fahrer die Kollision mit dem Hindernis nicht vermeiden konnte. Dies ist insofern erstaunlich, da beide Eingriffe ohne Eingreifen des Fahrers die Kollision mit dem Hindernis hätten verhindern können. Damit spiegeln die Ergebnisse die Befunde der Studien von Hesse et al. (2013) zu automatisierten Ausweicheingriffen wider (vgl. hierzu auch Fricke et al., 2015b; Schieben et al., 2014) und zeigen zusätzlich, in welchen Zeitbereichen dämpfende Verhaltensweisen der Fahrer beobachtet werden können. Wie bereits in der vorangegangenen Studie ähneln die Zeitbereiche denen, die im Falle von unberechtigten Eingriffen in den Studien von Neukum et al. (2010a) und Schmidt (2009) beobachtet wurden (vgl. Forschungsfrage 7-2). Allerdings beträgt die ermittelte Reaktionszeit im Mittel ca. 100 ms mehr als in den Studien von Neukum und Schmidt. Eine mögliche Ursache hierfür könnten die Einschränkungen des eingesetzten Simulators bei der Darstellung der Quereschleunigung sein (vgl. Kapitel 6.5.2).

Insgesamt deuten die Befunde aus dem Nutzenfall jedoch darauf hin, dass die Fahrer im Falle eines unerwarteten berechtigten Eingriffs überwiegend wie auf einen unberechtigten Eingriff reagieren (siehe Forschungsfrage 7-1 und Forschungsfrage 7-2), was ein möglicher Hinweis auf die angenommenen quasi-automatischen Kontrollprozesse der sensomotorischen Regelung sein könnte. Die ermittelte Verarbeitungszeit der sensomotorischen Regelung beträgt dabei ca. 200-300 ms.

Allerdings waren einzelne Fahrer auch dazu in der Lage, den Eingriff aufzunehmen und erfolgreich auszuweichen. Dies ist ein Hinweis darauf, dass das Verhalten nicht automatisch getriggert wird, sondern auch von dem Handlungsziel der Fahrer beeinflusst werden kann. Allerdings ist unklar, warum dies nur bei einigen Fahrern der Fall war. Grundsätzlich sind zwei unterschiedliche Erklärungen denkbar. Zum einen könnten die Fahrer die Situation (visuell) schneller verarbeitet haben. Zum anderen hatten die Fahrer möglicherweise bereits Erfahrung mit ähnlichen Assistenzsystemen und konnten daher entsprechende Reiz-Reaktions-Schemata ausbilden, die zu einem Aufgreifen des Eingriffs führen (siehe hierzu auch Forschungsfrage 7-3).

Im Fehlerfall zeigten die Fahrer hingegen nicht die erwartete Reaktion. Obwohl objektiv keine Notwendigkeit bestand, ließen die Fahrer den Eingriff überwiegend zu oder griffen den Eingriff nach kurzer Dämpfung auf. Auffällig ist lediglich, dass die Fahrer den Spurversatz bei einem angestrebten Spurversatz von 3.5 m stärker reduzierten als bei einem angestrebten Spurversatz von 1.75 m. Ursache für das unerwartete Verhalten der Fahrer ist möglicherweise die Gestaltung der Szenarien im Falle eines unberechtigten Eingriffs. Dem Fahrer standen hierbei zwei Fahrstreifen in Fahrtrichtung zur Verfügung. Dadurch waren die Fahrer nicht gezwungen, den Eingriff zu unterdrücken. Bereits in der vorangegangenen Studie konnte gezeigt werden (vgl. Studie II), dass dies einen Einfluss auf das Reaktionsmuster der Fahrer hat. Zusätzlich wurden die Fahrer erst nach Erleben der Nutzenfälle mit dem Fehlerfall konfrontiert. Dies könnte dazu geführt haben, dass die Fahrer zu diesem Zeitpunkt bereits gelernt hatten, den Eingriff zuzulassen (vgl. Forschungsfrage 7-3). Insgesamt sind die Ergebnisse zum Fehlerfall daher wahrscheinlich wenig aussagekräftig.

Zusätzliche Hinweise für die Annahme, dass bereits vorhandene Lernerfahrungen relevant sein könnten, ergeben sich bei der Betrachtung der Ergebnisse bei wiederholtem Erleben des Nutzenfalls. Hierbei wurde deutlich, dass die Fahrer über den Verlauf der Messungen hinweg tendenziell seltener Reaktionsmuster zeigen, die auf ein Festhalten oder Übersteuern des Eingriffs hindeuten. Dies äußert sich auch in geringeren Kollisionshäufigkeiten im Vergleich zum Erstkontakt. Dies ist ein Indiz dafür, dass der Fahrer lernen kann, eine Verbindung zwischen dem haptischen Signal des Eingriffs und dem geforderten Verhalten herzustellen (vgl. Hypothese 7-1). In Folge dessen könnte das haptische Signal bereits die geforderte Lenkreaktion triggern, wie im Rahmen der Ideomotorischen Hypothese (IMH) oder in der Theory of Event Coding (TEC) von Hommel et al. (2001) angenommen (vgl. Kapitel 2.3). Insgesamt dominiert allerdings auch bei wiederholtem Erleben des Nutzenfalls das Reaktionsmuster initiales Dämpfen. Gleichzeitig zeigt sich jedoch auch, dass Fahrer den Spurversatz bei einer angestrebten Ausweichweite von 3.5 m stärker reduzieren, während bei einer angestrebten Ausweichweite von 1.75 m der maximale Spurversatz annähernd dem Zielwert entspricht. Dies deutet darauf hin, dass die präferierte Ausweichweite der Fahrer in den Szenarien mit 50% Spurbelegung in etwa 1.75 m entspricht. Dies könnte einerseits darauf hindeuten, dass das Verhalten nach wie vor zunächst durch die sensomotorischen Kontrollprozesse beeinflusst wird und lediglich das Handlungsziel schneller angepasst werden kann. Andererseits besteht die Möglichkeit, dass das Handlungsziel des Fahrers vom Ziel des Eingriffs abweicht und der Fahrer z. B. eine geringere Ausweichweite bevorzugt.

Da dieses Verhalten jedoch unabhängig von der angestrebten Ausweichweite auftritt, erklärt dies nicht, warum nahezu die Hälfte Fahrer das Reaktionsmuster initiales Dämpfen zeigt. Möglicherweise deutet dies darauf hin, dass die Fahrer mehr Zeit benötigten, um sich für ein Ausweichen zu entscheiden. In Folge dessen dämpften sie den Eingriff zunächst ab, um die Situation zu analysieren und eine Handlungsentscheidung zu treffen. Das würde darauf hindeuten, dass der visuelle Kontrollprozess auch durch die Lernerfahrung nicht deutlich beschleunigt werden kann.

Auffällig ist zudem, dass ca. ein Viertel der Fahrer trotz wiederholtem Erleben des Nutzenfalls das Reaktionsmuster Festhalten zeigte. Da grundsätzlich keine Reaktion der Fahrer erforderlich war, um die Kollision mit dem Hindernis zu vermeiden, deutet dies darauf hin, dass diese Fahrer Ausweichen nicht als Handlungsoption in Betracht ziehen. Die Ursache hierfür ist unklar (vgl. Kapitel 6.5.2).

Die unterschiedlichen Eingriffsvarianten hatten insgesamt nur einen geringen Einfluss. Allerdings finden sich Hinweise darauf, dass Eingriffsvarianten, die den Fahrer bei der Ausrichtung des Fahrzeugs unterstützen, sowohl Vor- als auch Nachteile haben können. Eingriffsvarianten mit Wiederausrichtung des Fahrzeugs (z. B. Eingriffsvariante 4) können helfen, den Spurversatz im Vergleich zu Varianten ohne Wiederausrichtung des Fahrzeugs zu begrenzen (Eingriffsvariante 1). Wird die Wiederausrichtung des Fahrzeugs jedoch zu einem ungünstigen Zeitpunkt abgebrochen, führt dies möglicherweise dazu, dass sich die Fahrer wieder an das Hindernis annähern. Hinweise darauf finden sich bei Eingriffsvariante 3, bei der der Spurversatz im Mittel am geringsten ausfiel. Gleichzeitig sind die Kollisionshäufigkeiten bei Eingriffsvarianten 2 und 3 im Vergleich zu Eingriffsvarianten 1 und 4 tendenziell erhöht. Dies deutet insgesamt darauf hin, dass die Dauer der Unterstützung und die anschließende Stabilisierung des Fahrzeugs durchaus bedeutsam ist um Kollisionen zu verhindern (vgl. Forschungsfrage 7-4).

7.5.3 Schlussfolgerung

Insgesamt deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die meisten Fahrer bei unerwarteten berechtigten Lenkeingriffen zunächst mit dämpfenden Verhaltensweisen reagieren, die auch im Falle eines unberechtigten Eingriffs zu beobachten sind. Lediglich ein kleiner Teil der Fahrer kann die Eingriffe unmittelbar aufnehmen. Dies deutet möglicherweise darauf hin, dass die Fahrer mehr Zeit benötigen, um sich für eine Ausweichreaktion zu entscheiden. In Folge dessen wird das Verhalten der Fahrer zunächst von automatisch ablaufenden Prozessen dominiert, welche schnell (innerhalb von 200-300 ms) auf die wahrgenommene Störung reagieren.

Berücksichtigt man die Ergebnisse aus Studie II, dass das initiale Reaktionsmuster der Fahrer zusätzlich durch die (haptische) Gestaltung des Eingriffs bestimmt wird, ist anzunehmen, dass das Verhalten eine Folge der sensomotorischen Kontrollprozesse ist. In Folge dessen scheinen Fahrer erst dann eine Lenkreaktion entgegen der Eingriffsrichtung zeigen, wenn die maximale Eingriffsstärke erreicht wurde.

Allerdings wird auch deutlich, dass sowohl die Situationsgestaltung innerhalb einer Prüfanordnung als auch das wiederholte Erleben von Eingriffen einen starken Einfluss auf das Reaktionsmuster der Fahrer haben kann. Dies verdeutlicht, dass Fahrer eine Verbindung zwischen dem Eingriff und dem geforderten Verhalten ausbilden können. Grundsätzlich ist es jedoch unwahrscheinlich, dass der Fahrer in der Realität häufig mit Ausweicheingriffen konfrontiert wird, da es sich um seltene Ereignisse handelt. Daher sollte in Studien darauf geachtet werden, dass der Fahrer nicht zu häufig mit berechtigten Lenkeingriffen zur Kollisionsvermeidung konfrontiert wird, um die Ergebnisse der Studien nicht durch das wiederholte Erleben der Eingriffe zu verfälschen. Dies gilt insbesondere dann, wenn in den Studien sowohl der Nutzen- als auch der Fehlerfall adressiert werden soll. Insbesondere im Fehlerfall könnte sich das Erlernen bestimmter Reiz-Reaktions-Schemata, die ggf. quasi-automatisch aktiviert werden, negativ auswirken.

Bezüglich der Gestaltung von Ausweicheingriffen scheinen Fahrer bei einer Spurbelegung des Hindernisses von 50% eine Ausweichweite von 1.75 m zu bevorzugen. Eingriffe, die das Fahrzeug in Folge des Eingriffs wieder vollständig ausrichten, scheinen insgesamt am besten geeignet zu sein, um den Fahrer bei der Kollisionsvermeidung zu unterstützen.

|Studie III: Einfluss von geregelten Ausweicheingriffen auf das Fahrerverhalten

In den folgenden Studien werden daher ausschließlich Ausweicheingriffe mit einer Ausweichweite von 1.75 m verwendet, die den Fahrer bei der Wiederausrichtung des Fahrzeugs unterstützen. Zusätzlich wird auf Wiederholungsmessungen verzichtet, da in der Realität nicht davon ausgegangen werden kann, dass der Fahrer einen automatischen Ausweicheingriff häufig erlebt.

In der folgenden Studie soll zudem untersucht werden, ob sich das Reaktionsmuster der Fahrer durch vorgelagerte Warnungen, die den Fahrer bei der Handlungsentscheidung unterstützen sollen, beeinflussen lässt. Dadurch soll unter anderem überprüft werden, ob der Fahrer lediglich mehr Zeit benötigt um sein Handlungsziel anzupassen oder ob die ggf. automatisch getriggerte Kompensationsreaktion mit der Handlungsentscheidung interferiert.

8 Studie IV: Einfluss vorgelagerter Warnungen auf das Fahrerverhalten

8.1 Herleitung der Forschungsfragen

In den vorangegangenen Studien konnte gezeigt werden, dass Fahrer eine bestimmte Zeitspanne benötigen, um sich für eine Lenkreaktion zu entscheiden (vgl. Studie I). Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass Fahrer selbst mithilfe automatischer Ausweicheingriffe überwiegend nicht dazu in der Lage waren, Kollisionen zu verhindern (vgl. Studie I und Studie II). Auf Basis dieser Befunde wird vermutet, dass die Fahrer möglicherweise mehr Zeit benötigen, um die Situation zu analysieren, bevor sie sich für eine Ausweichreaktion entscheiden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, dass die Fahrer Ausweichen häufig nicht als Handlungsalternative in Betracht ziehen (vgl. 2.1). Beides könnte für die schlechte Wirksamkeit automatischer Ausweicheingriffe im Nutzenfall verantwortlich sein. In der Anwendungsforschung finden sich einige Ansätze, die den Fahrern sowohl mehr Zeit verschaffen als auch die Handlungswahl unterstützen sollen (vgl. Kapitel 2.2.4).

In den Studien von Hesse et al. (2013) und Sieber et al. (2015b) wurde beispielsweise der Einfluss verschiedener Warnungen auf die Wirksamkeit berechtigter und die Kontrollierbarkeit fehlerhafter Eingriffe untersucht (siehe auch Schieben et al., 2014). Dadurch erhoffte man sich eine Verbesserung der Wirksamkeit im Fall eines berechtigten Eingriffs und eine Verbesserung der Kontrollierbarkeit im Fall eines fehlerhaften Eingriffs. Die Ergebnisse der Studien deuten darauf hin, dass dem Eingriff vorgelagerte haptische Warnungen (z. B. in Form von Lenkempfehlungen) einen positiven Einfluss auf die Wirksamkeit berechtigter Eingriffe und die Kontrollierbarkeit fehlerhafter Eingriffe haben können (vgl. Hesse et al., 2013; Schieben et al., 2014). Akustische Warnungen hatten jedoch keinen nachweisbaren positiven Einfluss im Falle eines berechtigten oder fehlerhaften Eingriffs (vgl. Hesse et al., 2013; Schieben et al., 2014; Sieber et al., 2015b).

Bereits Kleen und Schmidt (2009) konnten zeigen, dass haptische Lenkempfehlungen mittels einer gerichteten Lenkmomentüberlagerung die Häufigkeit von Lenkreaktionen bei der Kollisionsvermeidung erhöhen (vgl. Abschnitt 2.2.4). Allerdings wird in den genannten Studien nicht näher auf das zeitliche Reaktionsmuster der Fahrer eingegangen. Studien von Neukum et al. (2010a) liefern hingegen Hinweise darauf, dass haptische Lenkempfehlungen mit der Handlungsausführung der Fahrer interferieren können. Entscheidend scheint dabei der zeitliche Abstand zwischen der Lenkempfehlung und dem Handlungsbeginn der Fahrer zu sein. Wird die haptische Lenkempfehlung in einem Bereich von 250-300 ms vor Beginn der Fahrerreaktion dargeboten, kann dies möglicherweise die Handlungsausführung verzögern, was sich negativ auf den Nutzenfall auswirken könnte. Wird diese jedoch mit Beginn der Handlungsausführung dargeboten, hat das keine negativen Auswirkungen (vgl. Abschnitt 2.2.4). Erklärt wird dies damit, dass Fahrer auf die Lenkempfehlung zunächst wie auf einen fehlerhaften Eingriff reagieren und versuchen, diesen zu kompensieren (vgl. Neukum et al., 2010a). Da der zeitliche Abstand zwischen der Lenkempfehlung und dem Beginn des automatischen Ausweicheingriffs in der Studie von Hesse et al. (2013) mit 0.7 s deutlich größer war als in den Arbeiten von Neukum et al. (2010b), besteht die Möglichkeit, dass die Reaktion des Fahrers auf die Lenkempfehlung bereits abgeschlossen ist und daher nicht mehr mit den folgenden Handlungen interferiert. Gleichzeitig führte die frühe Warnung dazu, dass der Fahrer mehr Zeit hatte, die Situation zu analysieren.

In den vorangegangenen Studien (vgl. Kapitel 6-7) konnte gezeigt werden, dass Fahrer im Falle berechtigter Eingriffe selbst bei wiederholtem Erleben häufig dämpfende Verhaltensweisen zeigen. Als mögliche Ursache dafür wurde diskutiert, dass die Fahrer in der Situation nicht ausreichend Zeit hatten, die Situation zu erkennen und zu analysieren, bevor der Eingriff begann. Dem Eingriff vorgelagerte Warnungen, wie in der Studie von Hesse et al. (2013), könnten die Fahrer jedoch bereits vor Beginn des Eingriffs auf die Situation hinweisen, so dass die Fahrer mehr Zeit zur Verfügung haben, um die Situation zu analysieren und sich für eine Handlung zu entscheiden. Entscheidet sich der Fahrer für eine Ausweichreaktion, sollten die haptische Rückmeldung des Lenkrads und die wahrgenommene Bewegung des Lenkrads in Folge des Eingriffs mit dem Handlungsziel und der Erwartung auf sensomotorischer und visueller Ebene (Feedforward Lenkung und Feedforward Fahrzeug) übereinstimmen. Dadurch sollten in Folge des Lenkeingriffs keine dämpfenden Verhaltensweisen mehr beobachtet werden, was sich positiv auf die Wirksamkeit im Nutzenfall auswirken sollte.

Bezogen auf das Verhaltensmodell könnten dem Eingriff vorgelagerte Warnungen auf zwei unterschiedliche Arten wirken. Einerseits könnten sie dem Fahrer zusätzliche Informationen zur Verfügung stellen, die er bei seiner Reaktionswahl berücksichtigen kann. Andererseits könnten die Warnungen, insbesondere wenn es sich um haptische Warnungen handelt, die gleichen Kompensationsreaktionen auslösen wie unberechtigte Lenkeingriffe. Im Folgenden werden beide Ansätze diskutiert und entsprechende Hypothesen abgeleitet.

Ansatz 1 - Zusatzinformation Vorgelagerte Warnungen könnten die Fahrer frühzeitig auf den bevorstehenden Eingriff und die Gefahrensituation hinweisen (vgl. hierzu auch Kapitel 2.2.4.1). Damit steht den Fahrern mehr Zeit zur Verfügung, die Situation zu analysieren und eine entsprechende Handlung vorzubereiten. Gleichzeitig können gerichtete Lenkempfehlungen (z. B. in Form eines gerichteten Lenkmoments) auf mögliche Handlungsalternativen hinweisen und damit möglicherweise eine Lenkreaktion der Fahrer im Nutzenfall begünstigen. In der Literatur wird in diesem Kontext der Begriff „*motor priming*“ verwendet (vgl. Kleen & Schmidt, 2009; Schmidt, 2009). Die Autoren vermuten, dass vom System initiierte Bewegungen des Lenkrads korrespondierende motorische Reaktionen und Verhaltensweisen des Fahrers (wie z. B. eine Ausweichbewegung) bahnen können (vgl. Kleen & Schmidt, 2009, S. 45). Grundlage für diese Annahme sind Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung, die zeigen, dass vorab präsentierte Stimuli, welche die gleiche motorische Reaktion erfordern wie folgende Stimuli, die erforderliche motorische Reaktion bereits vorab aktivieren können und damit die eigentliche Reaktion beschleunigen (vgl. Kiesel et al., 2007). Allerdings werden diese sogenannten „*priming*“-Effekte nur beobachtet, wenn die erforderliche Handlung bekannt ist bzw. erlernt wurde und die Stimuli erwartet werden (vgl. Kiesel et al., 2007). Bei selten eingreifenden Systemen, wie einem Notausweichassistenten, ist dies wahrscheinlich nicht gegeben, da der Fahrer den Eingriff und die vorgelagerte Warnung nur selten erlebt und in der Situation wahrscheinlich auch nicht erwartet. Zusätzlich ist die gerichtete Lenkempfehlung, ohne eine entsprechende Lernerfahrung, nicht mit der entsprechenden Reaktion assoziiert. Daher ist es unwahrscheinlich, dass vorgelagerte Lenkempfehlungen in diesem Fall so wirken wie von Kleen und Schmidt (2009) oder Schmidt (2009) angenommen. Allerdings besteht nach wie vor die Möglichkeit, dass der Fahrer durch die gerichtete Lenkempfehlung auf mögliche Handlungsalternativen hingewiesen wird und diese Information bei der Reaktionswahl berücksichtigen kann, so dass eine Ausweichreaktion begünstigt wird. Dieses Phänomen ist sowohl in der Grundlagen- als auch in der Anwendungsforschung als „*redundancy gain*“ bekannt (vgl. Miller, 1982; Mordkoff & Yantis, 1991; Schumann, 1994) und kann auf unterschiedliche Arten erklärt werden (vgl. hierzu auch Kapitel 2.2.4.1).

Zum einen besteht die Möglichkeit, dass eine Sinnesmodalität schneller verarbeitet wird als die andere, was in Folge zu einer schnelleren Reaktion der Fahrer führt (vgl. Miller, 1982). Zum anderen werden die beiden Informationsquellen möglicherweise integriert, wodurch ebenfalls eine schnellere Reaktion ermöglicht wird (vgl. Miller, 1982).

Unabhängig von der tatsächlichen Wirkweise ist der Einfluss vorgelagerter Warnungen wahrscheinlich vor allem auf den oberen Ebenen, wie z. B. der Bahnführungsebene oder der taktischen Ebene, anzusiedeln (vgl. Kapitel 2.3.1). In beiden Fällen wird dabei insbesondere das Handlungsziel der Fahrer in Richtung einer Ausweichreaktion beeinflusst (Feedforward Lenkung und Feedforward Fahrzeug), was sich positiv auf die Wirksamkeit automatischer Ausweicheingriffe auswirken könnte (vgl. Abbildung 8-1). Verschaffen die Warnungen dem Fahrer vor allem mehr Zeit zur Analyse der Situation, könnte sich dies auch positiv auf die Kontrollierbarkeit fehlerhafter Lenkeingriffe auswirken. Dies wäre ein deutlicher Hinweis darauf, dass vorgelagerte Warnungen eher im Sinne eines „*redundancy gains*“ zu interpretieren sind. Wird hingegen eine bestimmte Reaktion begünstigt, wie z. B. von Kleen und Schmidt (2009) angenommen, könnte dies auch negative Auswirkungen auf die Kontrollierbarkeit haben, da die Fahrer möglicherweise dennoch eine Ausweichreaktion zeigen. Dies wäre möglicherweise ein Hinweis darauf, dass haptische Warnungen bestimmte Reaktionen „primen“ können, selbst wenn es sich um die falsche Reaktionsstrategie handelt.

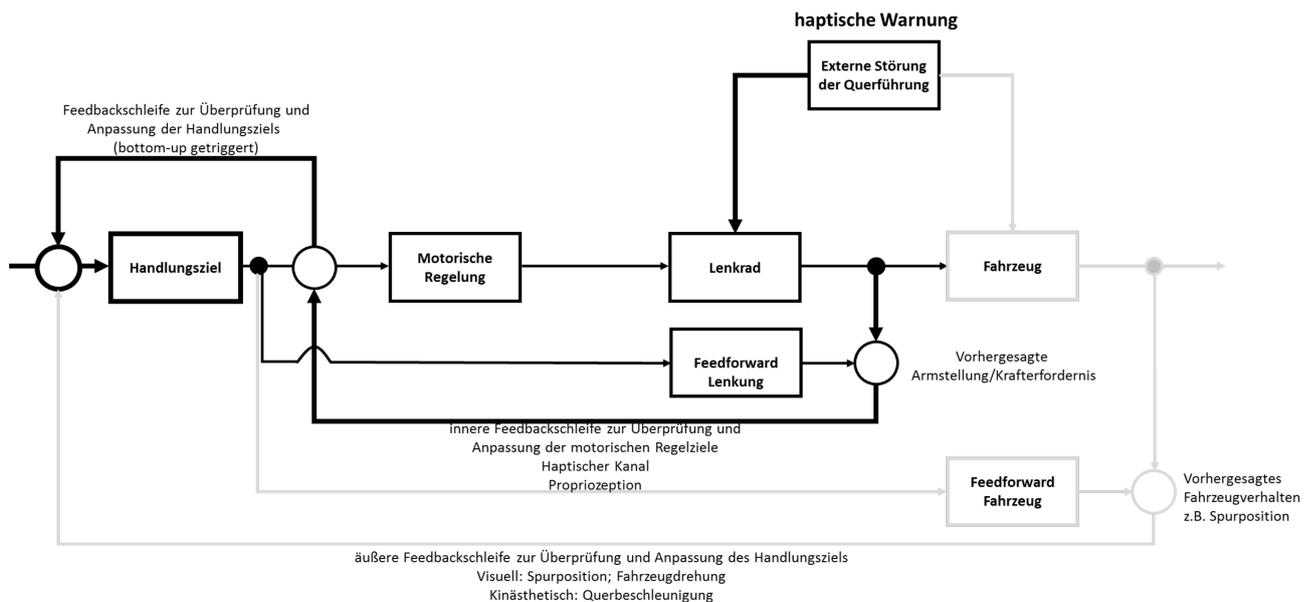


Abbildung 8-1. Im Fokus steht die Anpassung des Handlungsziels durch die vorgelagerte Warnung. In Folge dessen tritt im sensomotorischen Kontrollprozess bei Eingriffsbeginn keine Abweichung vom Regelziel auf, was im Nutzenfall zu einer schnelleren Ausweichreaktion führen sollte. Im Fehlerfall könnte das Regelziel ebenfalls bereits feststehen, was zu einer schnelleren Kompensationsreaktion führen sollte.

Ansatz 2 – Kompensationsreaktion Im Gegensatz dazu könnten insbesondere haptische Warnungen zunächst eine Kompensationsreaktion triggern, da sie auf Ebene der sensomotorischen Kontrollprozesse als Abweichung und damit als Störung der Querführung interpretiert werden. In Folge dessen könnte das Handlungsziel der Fahrer zunächst auf der Kompensation der wahrgenommenen Störung liegen. In diesem Fall sind auch bei berechtigten Lenkeingriffen ähnliche Reaktionsmuster wie im Falle eines fehlerhaften Eingriffs zu erwarten.

Dies könnte auch dazu führen, dass top-down gesteuerte Prozesse, wie die Entscheidung für eine Ausweichreaktion, so lange verzögert werden, bis die wahrgenommene Störung der Querführung in Folge der vorgelagerten Warnung korrigiert wurde. Hinweise darauf liefern unter anderem die Erkenntnisse von Neukum et al. (2010a). Die Autoren konnten zeigen, dass gerichtete Lenkempfehlungen, die vor Beginn der Handlungsausführung dargeboten werden, die eigentlich erforderliche Lenkreaktion verzögern können. Diese Verzögerung der Anpassung des Handlungsziels könnte die Wirksamkeit eines folgenden Ausweicheingriffs verringern. Ursache hierfür könnte, wie bereits in Studie II vermutet, eine Interferenz zwischen der Reaktion des Fahrers auf die (haptische) Warnung und der gewünschten Ausweichreaktion sein (siehe auch Kapitel 2.2.4.1).

Anhand der Ergebnisse von Neukum et al. (2010a) ist davon auszugehen, dass haptische Warnungen am Lenkrad, die 200-350 ms vor Beginn des Eingriffs dargeboten werden, ein Aufgreifen des Eingriffs verhindern könnten. Dies liegt möglicherweise daran, dass die Fahrer zu diesem Zeitpunkt noch mit der Kompensation der Warnung beschäftigt sind und den Eingriff daher nicht direkt aufnehmen können. Ist der zeitliche Abstand zwischen Beginn der Warnung und Beginn des Eingriffs jedoch größer, sollte die Verarbeitung (und möglicherweise die Kompensation) der Warnung bereits abgeschlossen sein. In Folge dessen sollten die Fahrer keine Schwierigkeiten haben, den folgenden Eingriff aufzugreifen. Dies deutet darauf hin, dass ähnliche Effekte zu beachten sind wie bei Studien aus der Grundlagenforschung zur Doppelaufgabeninterferenz (siehe auch Kapitel 2.2.4.1). Die anhand von Neukum et al. (2010a) beschriebene Zeitspanne von 200-350 ms ist damit ein Hinweis darauf, wie der zeitliche Abstand zwischen Warnung und Eingriff gestaltet werden sollte, um Interferenzeffekte zu vermeiden. Diese Annahmen gelten vor allem für die Wirksamkeit berechtigter Eingriffe im Nutzenfall. Für die Kontrollierbarkeit fehlerhafter Eingriffe lässt sich hingegen keine eindeutige Vorhersage treffen, da die automatisch getriggerten Reaktionen des Fahrers nicht im Konflikt mit dem Handlungsziel stehen.

Insgesamt wird angenommen, dass sich die beschriebenen Prozesse auf der Stabilisierungs- oder Kontrollebene der Querführung abspielen, wobei im Falle haptischer Lenkempfehlungen insbesondere die sensomotorischen Regelstrukturen relevant sind, da diese sehr schnell auf Störungen reagieren können (vgl. Abbildung 8-2).

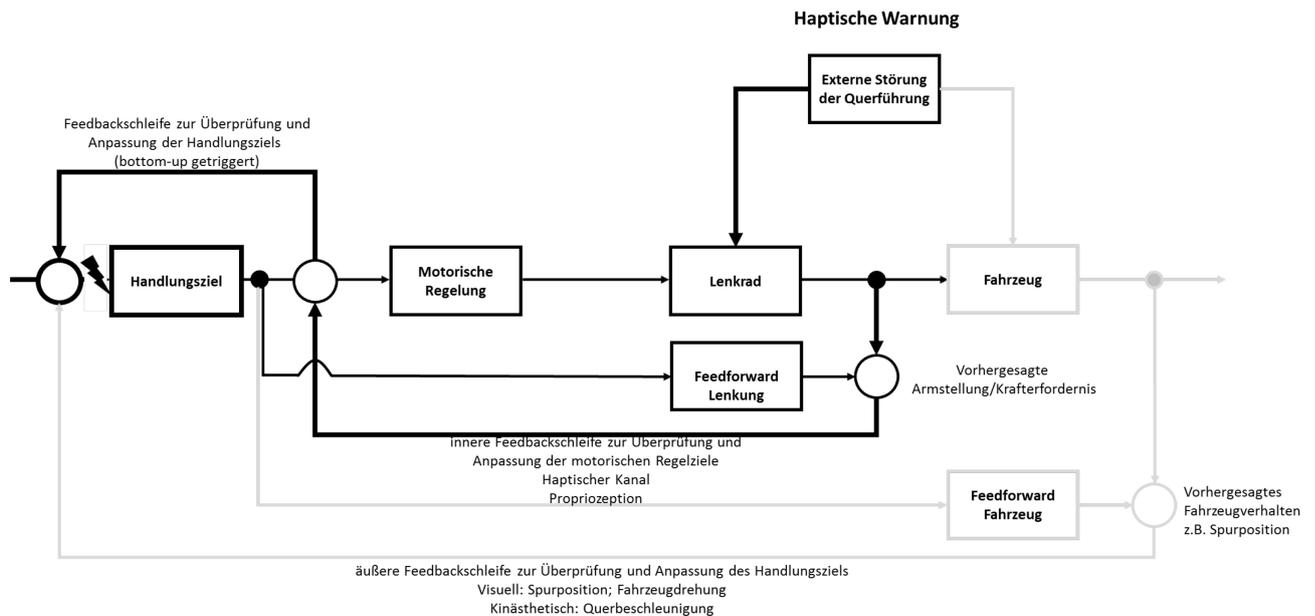


Abbildung 8-2. Im Fokus steht der sensomotorisch getriggerte Kontrollprozess zur Kompensation der wahrgenommenen Störung. Dieser dominiert möglicherweise die Reaktion der Fahrer und verzögert dadurch die Anpassung des Handlungsziels und die Ausweichreaktion im Nutzenfall. Im Fehlerfall werden keine Unterschiede erwartet.

In der folgenden Studie soll daher untersucht werden, wie sich dem Eingriff vorgelagerte haptische Lenkempfehlungen auf das Reaktionsmuster der Fahrer im Fall fehlerhafter und berechtigter Eingriffe auswirken. Dabei wird angenommen, dass der zeitliche Abstand zwischen der Lenkempfehlung und dem Beginn des Eingriffs einen entscheidenden Einfluss auf das Reaktionsmuster haben kann. Um den mutmaßlichen Einfluss sensomotorischer Kontrollprozesse hervorzuheben, werden zudem andere Warnungsmodalitäten berücksichtigt, die sich nicht auf die sensomotorischen Kontrollprozesse auswirken sollten. Hierzu bieten sich insbesondere akustische Warnungen an, da sie ähnlich schnell wie haptische Informationen verarbeitet werden (vgl. Ho, Tan & Spence, 2005; Spence, 2002). Da akustische Warnungen jedoch keine eindeutigen Handlungsinformationen enthalten (vgl. Campbell, Richard, Brown & McCallum, 2007), wurden zusätzlich kontaktanaloge visuelle Warnungen eingesetzt, die sich in Studien als besonders wirksam dabei erwiesen haben, Fahrer bei Ausweichreaktionen zu unterstützen (vgl. Weber, 2012; Weber et al., 2010). Um die Vergleichbarkeit mit haptischen Eingriffen zu gewährleisten, wurden zudem haptische Eingriffe mit der visuellen Warnung kombiniert.

Im Folgenden werden die oben beschriebenen Annahmen zunächst in offene Forschungsfragen überführt. Ergänzend werden aus diesen Annahmen, sofern möglich, spezifische Hypothesen bezüglich des zu erwartenden Fahrerverhaltens im Anwendungsfall abgeleitet.

8.2 Forschungsfragen

In dieser Studie soll der Frage nachgegangen werden, welchen Einfluss vorgelagerte Warnungen auf das Verhalten der Fahrer im Nutzen- und Fehlerfall haben (vgl. Forschungsfrage 8-1).

Forschungsfrage 8-1: Welchen Einfluss haben vorgelagerte Warnungen im Allgemeinen auf das Reaktionsmuster der Fahrer im Falle berechtigter und unberechtigter Ausweicheingriffe?

Daher soll überprüft werden, ob Fahrer die zusätzliche Zeit nutzen können, um ihr Handlungsziel an die entsprechende Situation anzupassen (vgl. Hypothese 8-1).

Hypothese 8-1: Vorgelagerte Warnungen erhöhen die Wirksamkeit und verbessern die Kontrollierbarkeit automatischer Ausweicheingriffe.

Im Nutzenfall sollte sich das vor allem darin zeigen, dass mit vorgelagerten Warnungen weniger Kollisionen auftreten als ohne. Zusätzlich sollten seltener Reaktionsmuster beobachtet werden, die auf eine Dämpfung des automatischen Ausweicheingriffs hindeuten. Im Fehlerfall sollte der resultierende Spurversatz hingegen geringer ausfallen und das Reaktionsmuster der Fahrer sollte eher auf eine Kompensationsreaktion oder Dämpfung des Ausweicheingriffs hindeuten.

Des Weiteren soll der Frage nachgegangen werden, ob haptische Warnungen möglicherweise generell zu einer Verzögerung der Handlungsentscheidung führen. Dies würde auf eine mögliche Interferenz zwischen der Reaktion auf die haptische Warnung und der erforderlichen Lenkreaktion zur Vermeidung einer Kollision hindeuten (vgl. Hypothese 8-2).

Hypothese 8-2: Vorgelagerte haptische Warnungen verringern die Wirksamkeit automatischer Ausweicheingriffe.

Dies sollte sich vor allem darin zeigen, dass in Folge haptischer Warnungen generell häufiger Kollisionen beobachtet werden als in Folge anderer Warnungen oder keiner Warnung. Zusätzlich sollte das Reaktionsmuster der Fahrer in Folge haptischer Warnungen häufiger auf eine dem Ausweicheingriff entgegen gerichtete Reaktion hindeuten.

Allerdings wird aufgrund der oben aufgeführten Befunde vermutet, dass der zeitliche Abstand zwischen Warnung und automatischem Ausweicheingriff einen Einfluss auf das Fahrerverhalten haben könnte (vgl. Forschungsfrage 8-2).

Forschungsfrage 8-2: Welchen Einfluss hat der zeitliche Abstand zwischen (haptischer) Warnung und automatischem Ausweicheingriff im Nutzen- und Fehlerfall?

Dabei wird angenommen, dass sich ein geringer zeitlicher Abstand zwischen Warnung und automatischem Eingriff nachteilig auf die Wirksamkeit auswirken könnte. Dies sollte sich insbesondere bei haptischen Warnungen zeigen (vgl. Hypothese 8-3).

Hypothese 8-3: Ein geringer zeitlicher Abstand zwischen (haptischer) Warnung und automatischem Ausweicheingriff verringert die Wirksamkeit und verzögert das Aufgreifen des automatischen Ausweicheingriffs.

Insgesamt sollen diese Fragestellungen und Hypothesen dazu beitragen, die Wechselwirkung zwischen den möglicherweise bottom-up getriggerten Reaktionsmustern und der top-down gesteuerten Anpassung des Handlungsziels in diesem konkreten Anwendungsfall besser zu verstehen.

8.3 Methodik

8.3.1 Stichprobe

Alle Teilnehmer der Studie entstammten dem Testfahrerpanel der WIVW GmbH und waren durch ein standardisiertes Training an das Fahren im dynamischen Fahrsimulator gewöhnt. Um die Abbruchquote aufgrund von „*Simulator Sickness*“ zu minimieren, wurden nur Fahrer mit einer als sehr gut eingestuften Verträglichkeit eingeladen. Zusätzlich wurde darauf geachtet, dass die Fahrer nicht bereits an vergleichbaren Studien zu automatischen Ausweicheingriffen teilgenommen haben um Lern- und Übertragungseffekte auszuschließen. Insgesamt nahmen an der Studie N=60 Fahrer teil (davon 33 weiblich). Das mittlere Alter der weiblichen Fahrer betrug $m = 45.5$ Jahre (min = 20, max = 73) und das der männlichen Fahrer $m = 44.5$ Jahre (min = 22, max = 77).

8.3.2 Gestaltung der Szenarien

Die Hindernisse im Nutzenfall bestanden bei der Hälfte der Probanden aus PKW und bei der anderen Hälfte aus Radfahrern und kreuzten die Ego-Fahrspur stets von rechts (siehe Abbildung 8-3). Die Hindernisse wurden angehalten, nachdem sie 1.75 m in den Fahrstreifen reichten, so dass 50% des Fahrstreifens durch das Hindernis belegt waren.



Abbildung 8-3. Szenarien für den Nutzenfall mit kreuzendem Radfahrer (links) und PKW (rechts). Die Abbildungen zeigen je einen Eingriff mit visueller Warnung zur Verdeutlichung der vom System gefahrenen Trajektorie. Beide Hindernisse waren zu Beginn der Situation durch Sichthindernisse verdeckt.

Im Falle des unberechtigten Systemeingriffs erfolgte der Eingriff auf einem geraden Streckenabschnitt mit einem Fahrstreifen in Richtung der Fahrtrichtung (siehe Abbildung 8-4).



Abbildung 8-4. Szenario für die Untersuchung des unberechtigten Systemeingriffs. Die Abbildung zeigt den fehlerhaften Eingriff mit visueller Warnung zur Verdeutlichung der Trajektorie des Fahrzeugs.

8.3.3 Eingriffscharakteristik

Der Systemeingriff wurde mittels einer Lenkradwinkel- und einer Lenkmomentschnittstelle implementiert und wurde bei einer TTC von ca. 1.2 s ausgelöst. Es wurde ein sinusförmiger Lenkradwinkelverlauf mit einem maximalen Lenkradwinkel von ca. 75-80° vorgegeben. Bei freihändiger Fahrt wurde so ein Spurversatz von ca. 1.75 m erzeugt und das Fahrzeug anschließend wieder parallel zur ursprünglichen Fahrtrichtung ausgerichtet. Das Lenkmoment betrug maximal 6 Nm. Insgesamt dauerte der gesamte Systemeingriff ca. 1.8 Sekunden. Die Umsetzung des Ausweicheingriffs entspricht damit der Eingriffsvariante 4 aus der Studie zum Einfluss der Ausweichtrajektorien (vgl. Abbildung 7-3). Insgesamt wurden sechs verschiedene Varianten erstellt, von denen fünf mit einer zusätzlichen Warnung kombiniert wurden. In einer Variante erfolgte der Systemeingriff ohne zusätzliche Warnung. Im Folgenden wird die Gestaltung der unterschiedlichen Warnungen beschrieben.

Haptische Warnung Die haptische Warnung oder Lenkimpuls (LI) bestand aus einem gerichteten Zusatzlenkmoment von 4 Nm Stärke und 300 ms Dauer. Sie wurde entweder bei einer TTC von 1.6 s oder bei einer TTC von 1.4 s, unmittelbar vor Beginn des Systemeingriffs, dargeboten.

Akustische Warnung Die akustische Warnung (Ton) bestand aus einem Ton mit einer Frequenz von 1200 Hz von 500 ms Dauer. Sie wurde bei einer TTC von 1.6 s dargeboten, um möglichst früh Fahreraufmerksamkeit zu erzielen. Um die Plausibilisierung der akustischen Warnung durch den Fahrer zu erleichtern, wurde sie stets in Kombination mit einer visuellen bzw. haptischen Warnung dargeboten.

Visuelle Warnung Die visuelle Warnung erfolgte durch die Einblendung eines Ausweichpfades im Head-Up-Display (im Folgenden: HUD). Diese erfolgte dreidimensional und kontaktanalog, d. h. dem Fahrer wurde die optimale Trajektorie auf die Straße projiziert und verblieb dort statisch, so als sei sie fester Bestandteil der Spurmarkierung. Lage und Ausprägung der Trajektorie waren so gewählt, dass diese in etwa der durch den automatischen Lenkeingriff angestrebten Ausweichbewegung entsprach. Zusätzlich wurde darauf geachtet, dass es zu keiner Verdeckung des Hindernisses durch das Warndreieck kam. Abbildung 8-3 und Abbildung 8-4 zeigen exemplarisch die Sicht aus Fahrerperspektive während eines Eingriffs mit visueller Warnung. Die visuelle Warnung wurde nur in Kombination mit einer haptischen oder akustischen Warnung verwendet.

Bremsruck Der Bremsruck (BR) bestand aus einer kurzen Verzögerung von 1.5 m/s² für 300 ms. Der Bremsruck wurde, ebenso wie die akustische Warnung, bei einer TTC von 1.6 s ausgelöst.

8.3.4 Versuchsablauf

Tabelle 8-1 zeigt einen Überblick über den in der vorliegenden Untersuchung realisierten Versuchsplan. Variiert wurden die Faktoren Vorwarnungsart und Zeitpunkt der Vorwarnung. Je 10 Fahrer wurden einer der folgenden Gruppen zugewiesen:

- Keine Warnung (oVW)
- Lenkimpuls bei einer TTC von 1.4 s (LI 1.4)
- Lenkimpuls bei einer TTC von 1.6 s (LI 1.6)
- Lenkimpuls und HUD bei einer TTC von 1.6 s (LI + HUD)
- Ton und HUD bei einer TTC von 1.6 s (Ton+HUD)
- Bremsruck bei einer TTC von 1.6 s (BR 1.6)

Die jeweiligen Gruppen erhielten im Nutzenfall und bei der Falschauslösung dieselbe Vorwarnung. Die Zuweisung der Probanden zu den verschiedenen Gruppen erfolgte randomisiert.

Tabelle 8-1: Versuchsplan der Studie zum Einfluss der vorgelagerten Warnungen.

Studienteil	Warnung	Konfliktpartner	Streckentyp
Nutzenfall	oW, LI 1.4, LI 1.6, LI+HUD, Ton+HUD, BR 1.6 (B)	PKW, Fahrrad (B)	Nutzenfall
Fehlerfall	oW, LI 1.4, LI 1.6, LI+HUD, Ton+HUD, BR 1.6 (B)		Fehlerfall

B = Between-Faktor, W = Within-Faktor

Die Probanden durchfuhren in fester Abfolge ein Szenario mit einem kreuzenden Hindernis und automatischem Lenkeingriff (Nutzenfall) und ein Szenario mit unberechtigtem Lenkeingriff (Fehlerfall). Zwischen diesen Testszenarien durchfuhren die Probanden zusätzlich eine Reihe von Füllszenarien. Der gesamte Versuchsablauf dauerte ca. 20 Minuten.

8.4 Ergebnisse

Die Ergebnisse werden getrennt nach Nutzen- und Fehlerfall berichtet. Im Nutzenfall wird zunächst auf die Wirksamkeit berechtigter Eingriffe eingegangen. Anschließend erfolgt eine Analyse und Beschreibung des beobachteten Reaktionsmusters auf Basis des in Kapitel 4.3 beschriebenen Vorgehens.

Im Fehlerfall erfolgt ebenfalls eine Analyse und Beschreibung des Reaktionsmusters der Fahrer. Dabei wird auch darauf eingegangen, ob haptische Warnungen möglicherweise einen Einfluss auf den Zeitpunkt der Mitlenkentscheidung haben.

8.4.1 Nutzenfall

Kollisionen Im Nutzenfall zeigt sich ein deutlicher Einfluss des Szenarios auf die Kollisionshäufigkeit. In dem Szenario PKW kollidierten insgesamt deutlich weniger Fahrer mit dem Hindernis als im Szenario Radfahrer. Zusätzlich zeigt sich tendenziell ein Einfluss der Warnungen.

Bei Eingriffen mit einem vorgelagerten haptischen Lenkimpuls bei einer TTC von 1.6 Sekunden (LI 1.6 und LI + HUD) werden in beiden Szenarien im Vergleich weniger Kollisionen beobachtet als bei den anderen Eingriffen. Wird der Lenkimpuls hingegen bei einer TTC von 1.4 Sekunden, also 0.2 Sekunden später dargeboten, kollidierten insbesondere im Szenario Radfahrer deutlich mehr Fahrer mit dem Hindernis (vgl. Tabelle 8-2). Unabhängig von der Warnung oder dem Szenario zeigten die meisten Fahrer eine Bremsreaktion (vgl. Tabelle 8-3). Damit kann Hypothese 8-1 nur eingeschränkt bestätigt werden, da nicht alle Warnungen die Wirksamkeit verbessern. Zudem wird deutlich, dass nicht alle haptischen Warnungen zu einer schlechteren Wirksamkeit führen, wodurch Hypothese 8-2 abgelehnt werden muss. Allerdings ist dies ein Hinweis darauf, dass ein geringer zeitlicher Abstand zwischen Warnung und automatischen Ausweichingriff die Wirksamkeit negativ beeinflussen kann, was Hypothese 8-3 bestätigt.

Tabelle 8-2. Kollisionshäufigkeiten in Abhängigkeit von den Warnungen (oVW, LI 1.4, LI 1.6, LI + HUD, Ton + HUD, BR 1.6) und dem Szenario (PKW vs. Radfahrer).

Szenario	Warnung					
	oVW	LI 1.4	LI 1.6	LI + HUD	Ton + HUD	BR 1.6
PKW	60% (3)	20% (1)	0	0	20% (1)	0
Radfahrer	75% (3)	100% (5)	0	20% (1)	40% (2)	80% (4)

Tabelle 8-3. Bremshäufigkeiten in Abhängigkeit von den Warnungen (oVW, LI 1.4, LI 1.6, LI + HUD, Ton + HUD, BR 1.6) und dem Szenario (PKW vs. Radfahrer).

Szenario	Warnung					
	oVW	LI 1.4	LI 1.6	LI + HUD	Ton + HUD	BR 1.6
PKW	100% (5)	100% (5)	100% (5)	100% (5)	100% (5)	60% (3)
Radfahrer	100% (4)	80% (4)	100% (5)	80% (4)	100% (5)	100% (5)

Im Folgenden wird zunächst auf die Häufigkeit der drei Reaktionsmuster in Abhängigkeit von den Warnungen eingegangen. Anschließend werden die Kennwerte des Lenkverhaltens berichtet. Zusätzlich wird explorativ überprüft, ob der Zeitpunkt des Wiederanstiegs der Lenkradwinkelgeschwindigkeit (als Indikator für eine Mitlenkentscheidung, wenn Fahrer das Verhalten initiales Dämpfen zeigen) von den Warnungen beeinflusst wird. Auf die Betrachtung der Kennwerte in Abhängigkeit des Reaktionsmusters wird aufgrund der geringen Fallzahlen und des starken Einflusses des Szenarios verzichtet.

Reaktionsmuster Die Betrachtung der Reaktionsmuster zeigt ebenfalls einen deutlichen Einfluss des Szenarios auf das Lenkverhalten. Im Szenario PKW wird nur in einem einzigen Fall das Reaktionsmuster Festhalten beobachtet, während es im Szenario Radfahrer deutlich häufiger auftrat (vgl. Tabelle 8-4). Die Warnungen hatten augenscheinlich ebenfalls einen Einfluss auf das gezeigte Lenkverhalten. Fahrer, die keine vorgelagerte Warnung erhielten (oVW) oder Fahrer, die einen Lenkimpuls bei einer TTC von 1.4 Sekunden erhielten, zeigten im Szenario Radfahrer tendenziell häufiger die Verhaltensweise Festhalten und im Szenario PKW die Verhaltensweise initiales Dämpfen. Bei Eingriffen in Folge der anderen Warnungen zeigten die Fahrer tendenziell häufiger die Reaktionsmuster initiales Dämpfen oder Mitlenken. Insgesamt zeigte die Mehrheit der Fahrer zusätzlich eine Bremsreaktion.

Lediglich wenn die Warnung aus einem Bremsimpuls bestand, wurden im Szenario Radfahrer im Vergleich zu den anderen Warnungen weniger Bremsungen beobachtet (vgl. Tabelle 8-5).

Tabelle 8-4. Häufigkeit der Reaktionsmuster in Abhängigkeit von den Warnungen (oVW, LI 1.4, LI 1.6, LI + HUD, Ton + HUD, BR 1.6) und dem Szenario (PKW vs. Radfahrer).

Szenario	Reaktionsmuster	Warnung					
		oVW	LI 1.4	LI 1.6	LI + HUD	Ton + HUD	BR 1.6
PKW	Festhalten					1 (20%)	
	Initiales Dämpfen	2 (40%)	4 (80%)	2 (40%)	1 (20%)	3 (60%)	
	Mitlenken	3 (60%)	1 (20%)	3 (60%)	4 (80%)	1 (20%)	5 (100%)
Radfahrer	Festhalten	3 (75%)	4 (80%)	2 (40%)	2 (40%)	2 (40%)	2 (40%)
	Initiales Dämpfen		1 (20%)	2 (40%)	1 (20%)	1 (20%)	1 (20%)
	Mitlenken	1 (25%)		1 (20%)	2 (40%)	2 (40%)	2 (40%)

Tabelle 8-5. Bremshäufigkeiten in Abhängigkeit von den Warnungen (oVW, LI 1.4, LI 1.6, LI + HUD, Ton + HUD, BR 1.6) und dem Szenario (PKW vs. Radfahrer).

Szenario	Warnung					
	oVW	LI 1.4	LI 1.6	LI + HUD	Ton + HUD	BR 1.6
PKW	100% (5)	100% (5)	100% (5)	100% (5)	100% (5)	60% (3)
Radfahrer	100% (4)	80% (4)	100% (5)	80% (4)	100% (5)	100% (4)

Insgesamt konnten 75% der Fahrer ($N = 12$), die als Festhalter klassifiziert wurden, die Kollision mit dem Hindernis nicht vermeiden. Wurden die Fahrer als initiale Dämpfer klassifiziert, konnten 17% ($N = 3$) die Kollision nicht verhindern und 20% ($N = 5$), wenn sie als Mitlenker klassifiziert wurden.

Um einen möglichen Einfluss der Warnungen und des Szenarios auf Kennwerte des Lenkverhaltens inferenzstatistisch zu prüfen, wurde eine multivariate Varianzanalyse berechnet. Der Omnibus-Test ergab einen signifikanten Einfluss des Szenarios (Wilks Lambda, $F(5, 43) = 11.221, p < .001, \eta^2 = .566$) und einen tendenziell signifikanten Einfluss der Warnungen (Wilks Lambda, $F(5, 161.24) = 1.438, p = .094, \eta^2 = .139$). Die Interaktion beider Faktoren wurde nicht signifikant. Die Ergebnisse der univariaten Varianzanalysen werden bei der Beschreibung der entsprechenden Kennwerte berichtet.

Maximaler Spurversatz Die univariaten Varianzanalysen ergaben einen signifikanten Einfluss des Szenarios auf den maximalen Spurversatz ($F(1, 47) = 54.488, p < .001, \eta^2 = .537$). Die Warnungen hatten hingegen keinen signifikanten Einfluss auf den maximalen Spurversatz ($F(1, 47) = 1.551, p = .193, \eta^2 = .142$). Im Szenario PKW lag der maximale Spurversatz im Mittel über alle Eingriffsvarianten hinweg über 1.75 m (vgl. Abbildung 8-5 und Tabelle 8-6). Damit wurde der durch den Ausweicheingriff vorgegebene Spurversatz von 1.75 m überschritten, was darauf hinweist, dass die Fahrer selbst aktiv auswichen. Im Szenario Radfahrer liegt der maximale Spurversatz im Mittel deutlich unter 1.75 m (vgl. Abbildung 8-5 und Tabelle 8-6), was darauf hindeutet, dass die Fahrer den Eingriff nicht vollständig zuließen. Lediglich bei Warnungen mit einem Lenkimpuls bei einer TTC von 1.6 s (LI 1.6 und LI + HUD) wird ein Spurversatz beobachtet, der im Bereich von dem Zielwert des Ausweicheingriffs oder darüber liegt (vgl. Abbildung 8-5).

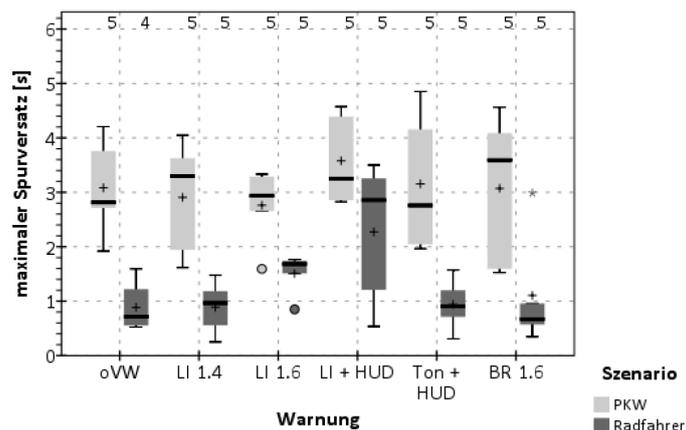


Abbildung 8-5. Maximaler Spurversatz [m] in Abhängigkeit von den Warnungen (oVW, LI 1.4, LI 1.6, LI + HUD, Ton + HUD, BR 1.6) und dem Szenario (PKW vs. Radfahrer). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Tabelle 8-6. Mittelwert und Standardabweichung des maximalen Spurversatzes [m] in Abhängigkeit von den Warnungen (oVW, LI 1.4, LI 1.6, LI + HUD, Ton + HUD, BR 1.6) und dem Szenario (PKW vs. Radfahrer).

Szenario	Warnung					
	oVW	LI 1.4	LI 1.6	LI + HUD	Ton + HUD	BR 1.6
PKW	3.08 (0.91)	2.91 (1.07)	2.76 (0.71)	3.58 (0.84)	3.16 (1.29)	3.07 (1.42)
Radfahrer	0.89 (0.49)	0.89 (0.49)	1.51 (0.38)	2.27 (1.32)	0.94 (0.48)	1.11 (1.07)

Erstes Lenkradwinkelmaximum Die univariaten Varianzanalysen ergaben einen signifikanten Einfluss des Szenarios auf das erste Lenkradwinkelmaximum ($F(1, 47) = 8.965, p = .004, \eta^2 = .160$). Im Szenario PKW werden im Mittel höhere Lenkradwinkelmaxima beobachtet als im Szenario Radfahrer (vgl. Abbildung 8-6 und Tabelle 8-7). Die Werte entsprechen im Mittel nahezu dem maximalen Lenkradwinkel des Systemeingriffs von ca. 75° (vgl. Tabelle 8-7), was darauf hindeutet, dass die Fahrer den Eingriff aufgenommen haben. Im Szenario Radfahrer deuten die beobachteten Lenkradwinkelmaxima überwiegend darauf hin, dass die Fahrer den Eingriff nicht vollständig zuließen. Ein signifikanter Einfluss der Warnung auf das erste Lenkradwinkelmaximum konnte nicht festgestellt werden ($F(1, 47) = 1.350, p = .260, \eta^2 = .126$).

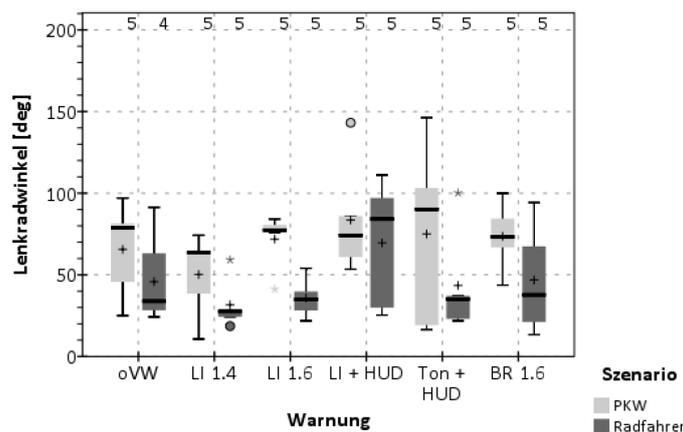


Abbildung 8-6. Erstes Lenkradwinkelmaximum [deg] in Abhängigkeit von den Warnungen (oVW, LI 1.4, LI 1.6, LI + HUD, Ton + HUD, BR 1.6) und dem Szenario (PKW vs. Radfahrer). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Tabelle 8-7. Mittelwert und Standardabweichung des ersten Lenkradwinkelmaximums [deg] in Abhängigkeit von den Warnungen (oVW, LI 1.4, LI 1.6, LI + HUD, Ton + HUD, BR 1.6) und dem Szenario (PKW vs. Radfahrer).

Szenario	Warnung					
	oVW	LI 1.4	LI 1.6	LI + HUD	Ton + HUD	BR 1.6
PKW	65.60 (29.40)	50.21 (25.73)	71.90 (17.42)	83.53 (35.58)	75.04 (56.24)	73.62 (20.95)
Radfahrer	45.79 (30.68)	31.59 (15.92)	35.78 (12.26)	69.52 (39.47)	43.48 (32.45)	46.80 (33.69)

Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums Die univariaten Varianzanalysen ergaben einen signifikanten Einfluss des Szenarios auf die Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums ($F(1, 47) = 11.536, p = .001, \eta^2 = .197$). Im Szenario PKW wird das Lenkradwinkelmaximum im Mittel nach ca. 0.6 Sekunden erreicht, im Szenario Radfahrer nach ca. 0.4 Sekunden (vgl. Tabelle 8-8). Dies deutet ebenfalls darauf hin, dass die Fahrer im Szenario Radfahrer den Systemeingriff nicht vollständig zuließen oder schneller reagierten. Es wurde kein signifikanter Einfluss der Warnung festgestellt ($F(1, 47) = 1.115, p = .365, \eta^2 = .106$). Auch deskriptiv sind keine eindeutigen Unterschiede erkennbar (vgl. Abbildung 8-7).

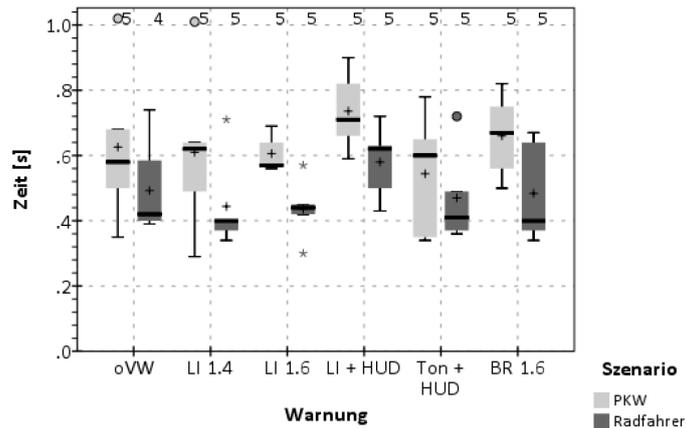


Abbildung 8-7. Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums [s] in Abhängigkeit von den Warnungen (oVW, LI 1.4, LI 1.6, LI + HUD, Ton + HUD, BR 1.6) und dem Szenario (PKW vs. Radfahrer). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Tabelle 8-8. Mittelwert und Standardabweichung der Dauer bis zum Erreichen [s] des ersten Lenkradwinkelmaximums in Abhängigkeit von den Warnungen (oVW, LI 1.4, LI 1.6, LI + HUD, Ton + HUD, BR 1.6) und dem Szenario (PKW vs. Radfahrer).

Szenario	Warnung					
	oVW	LI 1.4	LI 1.6	LI + HUD	Ton + HUD	BR 1.6
PKW	0.63 (0.25)	0.61 (0.26)	0.61 (0.06)	0.74 (0.12)	0.54 (0.19)	0.66 (0.13)
Radfahrer	0.49 (0.17)	0.44 (0.15)	0.44 (0.10)	0.58 (0.11)	0.47 (0.15)	0.48 (0.16)

Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit Die univariaten Varianzanalysen ergaben einen signifikanten Einfluss der Warnungen auf das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit ($F(1, 47) = 2.437, p = .048, \eta^2 = .206$). Bestand die Warnung aus einem haptischen Lenkimpuls bei einer TTC von 1.4 Sekunden, wurde im Mittel eine deutlich geringere Lenkradwinkelgeschwindigkeit erreicht (vgl. Abbildung 8-8 und Tabelle 8-9). Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass Fahrer den Systemeingriff in Folge dieser Warnung stärker dämpften als in Folge der anderen Warnungen oder bei keiner Warnung. Post-Hoc Paarvergleiche mittels Bonferroni-Korrektur ergaben allerdings nur einen signifikanten Unterschied zwischen der Warnung LI 1.4 und der Warnung LI 1.6 ($p = .043$). Das Szenario hatte keinen signifikanten Einfluss auf das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit ($F(1, 47) = 0.915, p = .344, \eta^2 = .019$). Auch deskriptiv zeigt sich im Mittel kein eindeutiger Einfluss des Szenarios auf die maximale Lenkradwinkelgeschwindigkeit.

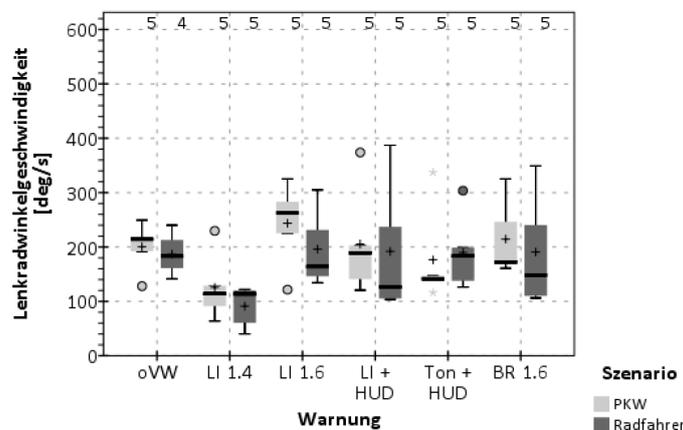


Abbildung 8-8. Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [deg/s] in Abhängigkeit von den Warnungen (oVW, LI 1.4, LI 1.6, LI + HUD, Ton + HUD, BR 1.6) und dem Szenario (PKW vs. Radfahrer). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Tabelle 8-9. Mittelwert und Standardabweichung des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [deg/s] in Abhängigkeit von den Warnungen (oVW, LI 1.4, LI 1.6, LI + HUD, Ton + HUD, BR 1.6) und dem Szenario (PKW vs. Radfahrer).

Szenario	Warnung					
	oVW	LI 1.4	LI 1.6	LI + HUD	Ton + HUD	BR 1.6
PKW	200.40 (45.32)	125.49 (63.19)	243.54 (77.21)	205.38 (100.09)	176.31 (90.70)	214.51 (70.87)
Radfahrer	186.93 (40.50)	91.30 (38.30)	196.14 (71.42)	191.95 (122.21)	189.99 (70.38)	190.76 (103.72)

Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit

Bezüglich des Zeitpunkts, an dem die maximale Lenkradwinkelgeschwindigkeit erreicht wurde, ist kein Einfluss der Warnungen ($F(1, 47) = 0.780, p = .569, \eta^2 = .077$) oder des Szenarios ($F(1, 47) = 0.434, p = .513, \eta^2 = .009$) feststellbar. Deskriptiv auffällig ist die Warnung Ton + HUD. Hier fällt die Streuung geringer aus als bei den anderen Warnungen (vgl. Abbildung 8-9). Zusätzlich wurde das Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit tendenziell früher erreicht als bei den anderen Warnungen. Die Unterschiede liegen allerdings im Bereich der Streuung (vgl. Tabelle 8-10).

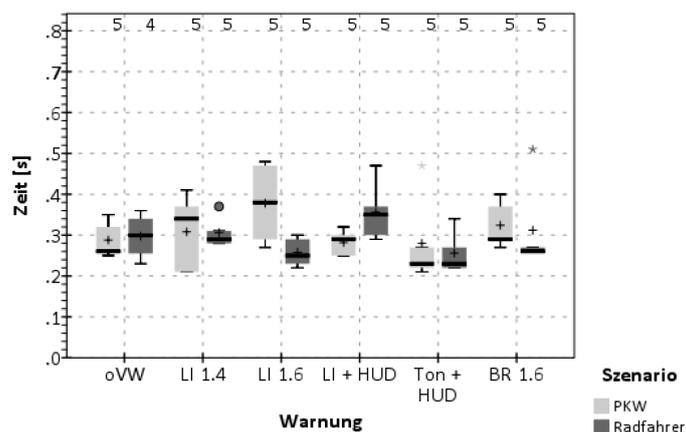


Abbildung 8-9. Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [s] in Abhängigkeit von den Warnungen (oVW, LI 1.4, LI 1.6, LI + HUD, Ton + HUD, BR 1.6) und dem Szenario (PKW vs. Radfahrer). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Tabelle 8-10. Mittelwert und Standardabweichung der Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [s] in Abhängigkeit von den Warnungen (oVW, LI 1.4, LI 1.6, LI + HUD, Ton + HUD, BR 1.6) und dem Szenario (PKW vs. Radfahrer).

Szenario	Warnung					
	oVW	LI 1.4	LI 1.6	LI + HUD	Ton + HUD	BR 1.6
PKW	0.29 (0.04)	0.31 (0.09)	0.38 (0.10)	0.28 (0.03)	0.28 (0.11)	0.32 (0.06)
Radfahrer	0.30 (0.06)	0.31 (0.04)	0.26 (0.04)	0.36 (0.07)	0.26 (0.05)	0.31 (0.11)

Wiederanstieg der Lenkradwinkelgeschwindigkeit Aufgrund der geringen Fallzahlen wurde an dieser Stelle auf die Trennung zwischen den Szenarien verzichtet. Die deskriptive Betrachtung deutet darauf hin, dass die Mitlenkentscheidung bei Eingriffen mit einer Warnung im Form eines Lenkimpulses bei einer TTC von 1.4 Sekunden tendenziell verzögert ist (vgl. Abbildung 8-10 und Abbildung 8-11). Im Mittel dauert es 0.17 Sekunden, bis ein erneuter Anstieg der Lenkradwinkelgeschwindigkeit beobachtet wird ($SD_{LI\ 1.4} = 0.05$), während dies bei den anderen Warnungen im Mittel halb so lange dauert ($M_{oVW} = 0.08$, $SD_{oVW} = 0.06$; $M_{LI\ 1.6} = .10$, $SD_{LI\ 1.6} = 0.11$; $M_{LI + HUD} = 0.07$, $SD_{LI + HUD} = 0.01$; $M_{Ton + HUD} = 0.11$, $SD_{Ton + HUD} = 0.04$; $M_{BR} = 0.14$). Wegen der geringen Fallzahlen ist dieser Befund jedoch nicht belastbar, sodass Hypothese 8-3 nicht direkt bestätigt werden kann.

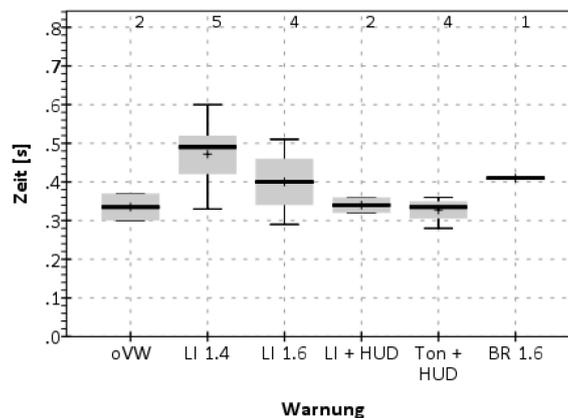


Abbildung 8-10. Erster Wiederanstieg der Lenkradwinkelgeschwindigkeit in Folge des Reaktionsmusters initiales Dämpfen in Abhängigkeit von den Warnungen (oVW, LI 1.4, LI 1.6, LI + HUD, Ton + HUD, BR 1.6). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

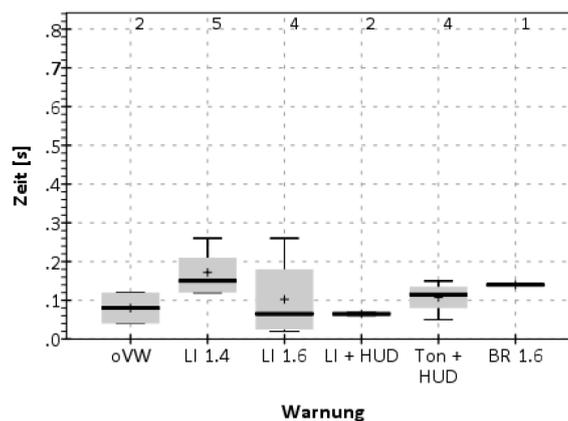


Abbildung 8-11. Dauer bis zum Wiederanstieg [s] in Abhängigkeit von den Warnungen (oVW, LI 1.4, LI 1.6, LI + HUD, Ton + HUD, BR 1.6). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

8.4.2 Fehlerfall

Reaktionsmuster Die Betrachtung der Häufigkeit der gezeigten Reaktionsmuster deutet auf einen Einfluss der Warnungen auf das Lenkverhalten hin. Mit Warnung zeigten tendenziell mehr Fahrer das Reaktionsmuster Mitlenken als ohne Warnung (oVW). Dies gilt insbesondere für die Warnungen LI 1.6, LI + HUD und BR. Einzige Ausnahme ist die Warnung LI 1.4. Hier ähnelt das beobachtete Lenkverhalten der Fahrer dem eines Eingriffs ohne Warnung (oVW). Insgesamt deutet dies darauf hin, dass die Warnungen überwiegend keinen positiven Einfluss auf das Lenkverhalten der Fahrer im Fehlerfall haben (vgl. Abbildung 8-12). Insgesamt zeigte die Mehrheit der Fahrer zusätzlich eine Bremsreaktion. Auffällig ist, dass der Anteil der Fahrer, der eine Bremsreaktion zeigte, bei der Warnung mit einem Bremsimpuls (BR 1.6) am geringsten ausfiel (vgl. Tabelle 8-11).

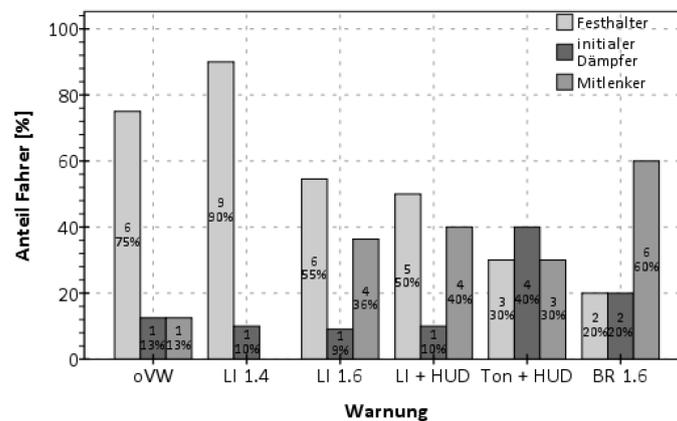


Abbildung 8-12. Häufigkeit der Reaktionsmuster Festhalten, initiales Dämpfen und Mitlenken im Fehlerfall in Abhängigkeit von den Warnungen (oVW, LI 1.4, LI 1.6, LI + HUD, Ton + HUD, BR 1.6).

Tabelle 8-11. Bremshäufigkeiten im Fehlerfall in Abhängigkeit von den Warnungen (oVW, LI 1.4, LI 1.6, LI + HUD, Ton + HUD, BR 1.6).

Warnung					
oVW	LI 1.4	LI 1.6	LI + HUD	Ton + HUD	BR 1.6
75% (6)	60% (6)	64% (7)	80% (8)	100% (10)	50% (5)

Um einen möglichen Einfluss der Warnungen und des Szenarios auf Kennwerte des Lenkverhaltens inferenzstatistisch zu prüfen, wurde eine multivariate Varianzanalyse berechnet. Der Omnibus-Test ergab einen signifikanten Einfluss der Warnungen (Wilks Lambda, $F(25, 183,529) = 2.321, p < .001, \eta^2 = .185$). Im Folgenden wird zunächst auf die Häufigkeit der drei Reaktionsmuster in Abhängigkeit von der Eingriffsvariante eingegangen. Anschließend werden die Kennwerte des Lenkverhaltens und die Ergebnisse der univariaten Varianzanalysen berichtet.

Maximaler Spurversatz Nahezu alle Fahrer reduzierten den Spurversatz im Fehlerfall unabhängig von der Warnung, so dass der maximale Spurversatz im Mittel in allen Bedingungen kleiner war als der vom System angestrebte Spurversatz (vgl. Abbildung 8-13). Tendenziell fiel der maximale Spurversatz mit Warnungen größer aus als ohne, obwohl der Einfluss der Warnungen nicht signifikant ist ($F(5, 53) = 1.557, p = .118, \eta^2 = .128$). Eine Ausnahme bildet hierbei die Warnung LI 1.4. Hier ist der maximale Querversatz vergleichbar mit Eingriffen ohne Warnung (vgl. Tabelle 8-12). Ein explorativer Post-Hoc Paarvergleich mithilfe einer Bonferroni-Korrektur ergab allerdings keine signifikanten Unterschiede zwischen den Warnungen.

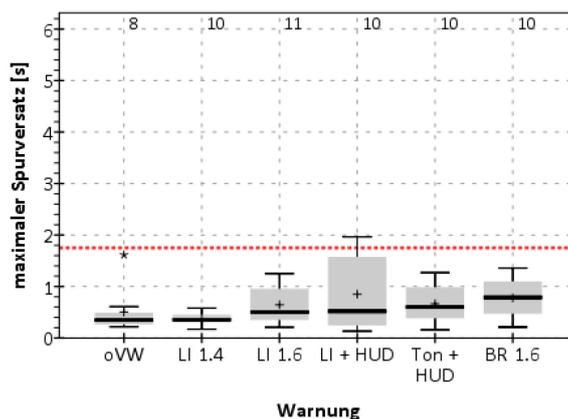


Abbildung 8-13. Maximaler Spurversatz [m] in Abhängigkeit von der Warnung (oVW, LI 1.4, LI 1.6, LI + HUD, Ton + HUD, BR 1.6) im Fehlerfall. Die gestrichelte Linie kennzeichnet den vom System angestrebten Spurversatz von 1.75 m. Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Tabelle 8-12. Mittelwert und Standardabweichung des maximalen Spurversatzes [m] in Abhängigkeit von der Warnung (oVW, LI 1.4, LI 1.6, LI + HUD, Ton + HUD, BR 1.6) im Fehlerfall.

Warnung					
oVW	LI 1.4	LI 1.6	LI + HUD	Ton + HUD	BR 1.6
0.51 (0.46)	0.37 (0.12)	0.65 (0.39)	0.85 (0.72)	0.67 (0.35)	0.78 (0.39)

Erstes Lenkradwinkelmaximum Die univariaten Varianzanalysen ergaben einen signifikanten Einfluss der Warnungen auf das erste Lenkradwinkelmaximum ($F(5, 53) = 3.235, p = .013, \eta^2 = .234$). Das erste Lenkradwinkelmaximum fiel bei Eingriffen ohne Warnung oder mit der Warnung LI 1.4 im Mittel tendenziell geringer aus als bei den anderen Warnungen (vgl. Abbildung 8-14). Die Werte liegen im Mittel deutlich unterhalb des maximalen Lenkradwinkels des Systemeingriffs ($\sim 75^\circ$), was darauf hindeutet, dass die Fahrer den Eingriff übersteuert haben (vgl. Tabelle 8-13). Bei den anderen Warnungen werden hingegen vereinzelt auch Werte im Bereich des maximalen Lenkradwinkels des Systemeingriffs beobachtet, was darauf hindeutet, dass die Fahrer den Systemeingriff nicht vollständig unterdrückt haben. Ein post-hoc Paarvergleich mit einer Bonferroni-Korrektur ergab einen signifikanten Unterschied zwischen den Warnungen LI 1.4 und Ton + HUD ($p = .048$) sowie zwischen LI 1.4 und BR 1.6 ($p = .014$).

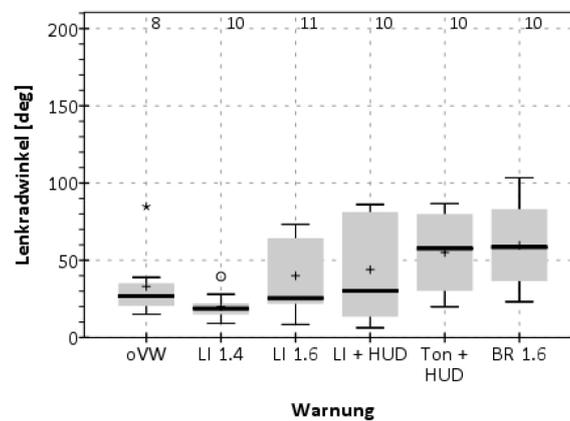


Abbildung 8-14. Erstes Lenkradwinkelmaximum [deg] in Abhängigkeit von der Warnung (oVW, LI 1.4, LI 1.6, LI + HUD, Ton + HUD, BR 1.6) im Fehlerfall. Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusssymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Tabelle 8-13. Mittelwert und Standardabweichung des ersten Lenkradwinkelmaximums [deg] in Abhängigkeit von der Warnung (oVW, LI 1.4, LI 1.6, LI + HUD, Ton + HUD, BR 1.6) im Fehlerfall.

Warnung					
oVW	LI 1.4	LI 1.6	LI + HUD	Ton + HUD	BR 1.6
33.06 (22.26)	20.12 (8.59)	39.94 (24.17)	43.96 (34.80)	55.01 (27.40)	59.60 (26.09)

Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums Die univariaten Varianzanalysen ergaben keinen statistisch signifikanten Einfluss der Warnungen auf die Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums ($F(1, 47) = 2.380, p = .051, \eta^2 = .183$). Tendenziell wurde das erste Lenkradwinkelmaximum im Mittel bei keiner Warnung oder der Warnung LI 1.4 früher erreicht als bei den anderen Warnungen (vgl. Tabelle 8-14). Der Unterschied ist jedoch sehr gering und liegt im Bereich der beobachteten Streuung. Ein post-hoc Paarvergleich mit einer Bonferroni-Korrektur ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen den Warnungen.

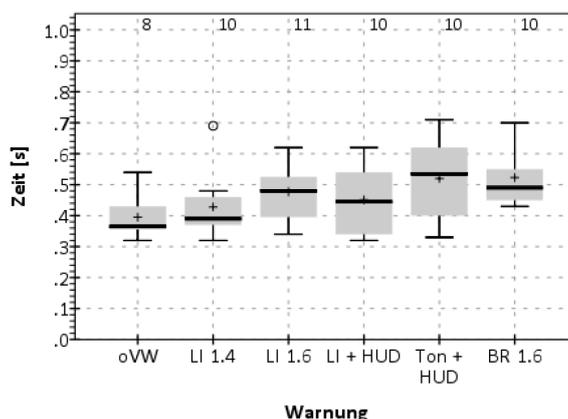


Abbildung 8-15. Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums [s] in Abhängigkeit von der Warnung (oVW, LI 1.4, LI 1.6, LI + HUD, Ton + HUD, BR 1.6) im Fehlerfall. Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Tabelle 8-14. Mittelwert und Standardabweichung der Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums [s] in Abhängigkeit von der Warnung (oVW, LI 1.4, LI 1.6, LI + HUD, Ton + HUD, BR 1.6) im Fehlerfall.

Warnung					
oVW	LI 1.4	LI 1.6	LI + HUD	Ton + HUD	BR 1.6
0.40 (0.07)	0.37 (0.12)	0.48 (0.09)	0.45 (0.10)	0.52 (0.12)	0.52 (0.10)

Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit Die univariaten Varianzanalysen ergaben einen signifikanten Einfluss der Warnungen auf das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit ($F(1, 47) = 4.020, p = .004, \eta^2 = .275$). Das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit fiel bei Eingriffen ohne Warnung oder mit der Warnung LI 1.4 im Mittel tendenziell geringer aus als bei den anderen Warnungen oder keiner Warnung (vgl. Abbildung 8-16). Dies deutet darauf hin, dass die Fahrer den Aufbau des Systemeingriffs bei der Warnung LI 1.4 stärker gedämpft haben als bei den anderen Warnungen. Ein post-hoc Paarvergleich mit einer Bonferroni-Korrektur ergab einen signifikanten Unterschied zwischen den Warnungen LI 1.6, LI + HUD, Ton + HUD und BR und der Warnung LI 1.4 ($p_{LI\ 1.6} = .015, p_{LI + HUD} = .019, p_{Ton + HUD} = .015, p_{BR} = .007$).

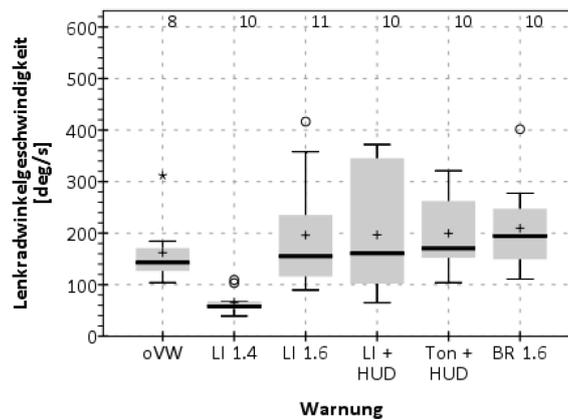


Abbildung 8-16. Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [deg/s] in Abhängigkeit von der Warnung (oVW, LI 1.4, LI 1.6, LI + HUD, Ton + HUD, BR 1.6) im Fehlerfall. Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer

Tabelle 8-15. Mittelwert und Standardabweichung des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [deg/s] in Abhängigkeit von der Warnung (oVW, LI 1.4, LI 1.6, LI + HUD, Ton + HUD, BR 1.6) im Fehlerfall.

Warnung					
oVW	LI 1.4	LI 1.6	LI + HUD	Ton + HUD	BR 1.6
162.07 (65.04)	65.16 (23.15)	196.17 (108.77)	196.70 (117.51)	199.69 (75.34)	209.49 (85.16)

Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit

Die univariaten Varianzanalysen ergaben einen signifikanten Einfluss der Warnungen auf die Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit ($F(1, 47) = 4.020, p = .004, \eta^2 = .275$). Allerdings hatten die Warnungen keinen signifikanten Einfluss darauf, wann das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit erreicht wurde.

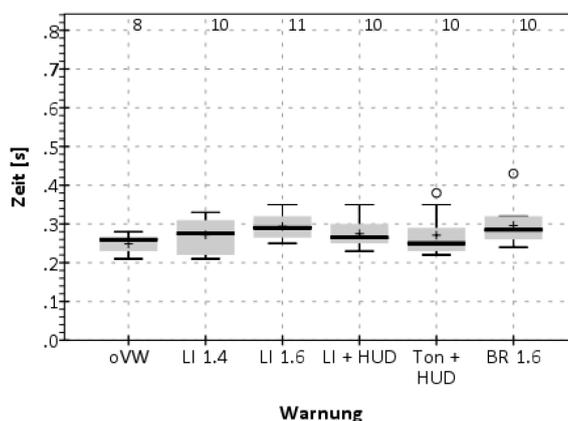


Abbildung 8-17. Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [s] in Abhängigkeit von der Warnung (oVW, LI 1.4, LI 1.6, LI + HUD, Ton + HUD, BR 1.6) im Fehlerfall. Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer

Tabelle 8-16. Mittelwert und Standardabweichung der Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [s] in Abhängigkeit von der Warnung (oVW, LI 1.4, LI 1.6, LI + HUD, Ton + HUD, BR 1.6) im Fehlerfall.

Warnung					
oVW	LI 1.4	LI 1.6	LI + HUD	Ton + HUD	BR 1.6
0.25 (0.02)	0.27 (0.05)	0.29 (0.03)	0.27 (0.05)	0.27 (0.05)	0.30 (0.05)

8.5 Diskussion

8.5.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Nutzenfall zeigte sich sowohl ein starker Einfluss des Szenarios als auch der unterschiedlichen Warnungen auf die Wirksamkeit. Im Szenario PKW kollidierten insgesamt nur wenige Fahrer mit dem Hindernis. Der Spurversatz und die Kennwerte des Lenkverhaltens deuten darauf hin, dass die Fahrer in diesem Szenario den Eingriff überwiegend aufnahmen und teilweise verstärkten. Gleichzeitig schienen insbesondere haptische Warnungen mit einem zeitlichen Abstand von 0.4 s zu Beginn des Eingriffs die Wirksamkeit positiv zu beeinflussen, was sich vor allem im Szenario Radfahrer zeigte. Dies spiegelte sich auch in den Kennwerten des Lenkverhaltens wider und bestätigt zumindest zum Teil die Vermutung, dass Warnungen die Wirksamkeit automatischer Ausweicheingriffe erhöhen können (vgl. Hypothese 8-1). Im Gegensatz dazu schien sich eine haptische Warnung mit einem zeitlichen Abstand von 0.2 s zum Beginn des Eingriffs nicht positiv auszuwirken. Die explorative Analyse der Mitlenkentscheidung deutete zudem darauf hin, dass die Mitlenkentscheidung in Folge der haptischen Warnung bei einem zeitlichen Abstand von 0.2 s möglicherweise verzögert wurde. Insgesamt deutet dies darauf hin, dass vor allem der zeitliche Abstand zwischen der haptischen Warnung und dem Beginn des automatischen Ausweingriffs relevant ist (vgl. Forschungsfrage 8-2).

Im Fehlerfall wurde deutlich, dass Warnungen das Reaktionsmuster der Fahrer tendenziell negativ beeinflussten. Mit Warnung zeigten die Fahrer seltener die Verhaltensweise Festhalten, was im Widerspruch zu Hypothese 8-1 steht. Eine Ausnahme stellte die haptische Warnung mit einem zeitlichen Abstand 0.2 s zum Beginn des Eingriffs dar. Hier dominierte, ebenso wie bei einem Eingriff ohne vorgelagerte Warnung, das Reaktionsmuster Festhalten. Die Analyse des Lenkverhaltens deutete ebenfalls auf einen negativen Einfluss der Warnungen auf die Kontrollierbarkeit hin, mit Ausnahme der haptischen Warnung mit einem zeitlichen Abstand von 0.2 s. Dennoch fiel der maximale Spurversatz überwiegend geringer aus als in Folge des Eingriffs zu erwarten war, was unabhängig von der eingesetzten Warnung auf eine Dämpfung des unberechtigten Eingriffs hindeutet.

In der folgenden Tabelle werden die in Abschnitt 8.2 getroffenen Hypothesen nochmals zusammenfassend dargestellt. Dabei wird gekennzeichnet ob die Hypothesen bestätigt werden können oder die Befundlage den Hypothesen widerspricht. Finden sich sowohl Belege, welche die Hypothese bestätigen als auch Belege, welche der Hypothese widersprechen wird darauf hingewiesen, dass die Befundlage uneindeutig ist.

Tabelle 8-17. Zusammenfassende Darstellung der Befundlage bezogen auf die Hypothesen.

Hypothese		
Hypothese 8-1:	Vorgelagerte Warnungen erhöhen die Wirksamkeit und verbessern die Kontrollierbarkeit automatischer Ausweicheingriffe.	Wirksamkeit: bestätigt Kontrollierbarkeit: uneindeutig
Hypothese 8-2:	Vorgelagerte haptische Warnungen verringern die Wirksamkeit automatischer Ausweicheingriffe.	abgelehnt (vgl. Hypothese 8-3)
Hypothese 8-3:	Ein geringer zeitlicher Abstand zwischen (haptischer) Warnung und automatischem Ausweicheingriff verringert die Wirksamkeit und verzögert das Aufgreifen des automatischen Ausweicheingriffs.	bestätigt

8.5.2 Diskussion

Es wurde angenommen, dass dem Eingriff vorgelagerte Warnungen die Wirksamkeit berechtigter Ausweicheingriffe erhöhen können (vgl. Hypothese 8-1). Zusätzlich wurde angenommen, dass der zeitliche Abstand zwischen vorgelagerten haptischen Warnungen und dem folgenden Lenkeingriff möglicherweise einen zusätzlichen Einfluss auf die Wirksamkeit berechtigter Ausweicheingriffe hat (Hypothese 8-3). Grundlage hierfür waren Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung zur sogenannten Doppelaufgabeninterferenz sowie Erkenntnisse aus der Anwendungsforschung von Neukum et al. (2010a). Dazu wurden Fahrern automatische Ausweicheingriffe mit und ohne vorgelagerte Warnung sowohl im Nutzen- als auch im Fehlerfall dargeboten. Wie bereits in den zwei vorhergehenden Studien wurden das Reaktionsmuster und der zeitliche Ablauf der Lenkreaktionen anhand verschiedener Kennwerte detailliert analysiert, um Hinweise darauf zu erhalten, wie sich die vorgelagerten Warnungen auf das Lenkverhalten der Fahrer auswirken.

Im Nutzenfall zeigte sich entgegen der Erwartung ein starker Einfluss des Untersuchungsszenarios auf die Wirksamkeit der Ausweicheingriffe. Im Szenario PKW konnten deutlich mehr Fahrer die Kollision mit dem Hindernis vermeiden als in dem Szenario Radfahrer. Eine genauere Betrachtung der Szenariengestaltung liefert eine mögliche Erklärung für diesen Unterschied. Im Szenario PKW passierten die Fahrer kurz vor Erreichen des querenden PKW eine Baustelle, so dass sich die Fahrer möglicherweise sicher waren, dass die Nachbarfahrspur nicht belegt war. Möglicherweise hat dies die Ausweichreaktion der Fahrer begünstigt. Allerdings war der Nachbarfahrstreifen auch im Szenario Radfahrer nicht belegt, so dass die Fahrer auch hier gefahrlos hätten ausweichen können. Eine andere Möglichkeit ist, dass der Radfahrer durch die kleinere Silhouette schlechter wahrnehmbar war als der PKW.

Allerdings zeigt sich trotz des starken Einflusses des Szenarios ein Einfluss der vorgelagerten Warnungen. Tendenziell konnten mit vorgelagerter Warnung mehr Fahrer die Kollision mit dem Hindernis vermeiden als ohne. Besonders stark zeigt sich dies, wenn die vorgelagerte Warnung aus einem haptischen Lenkimpuls bestand, der 0.4 s vor Beginn des Eingriffs dargeboten wurde (LI 1.6). Wurde der haptische Lenkimpuls hingegen 0.2 s vor Beginn des Eingriffs dargeboten (LI 1.4), zeigt sich keine Verbesserung der Wirksamkeit im Vergleich zu keiner Warnung.

Zusätzlich liefert die Betrachtung des Zeitpunkts der Mitlenkentscheidung einen Hinweis darauf, dass der haptische Lenkimpuls die Mitlenkentscheidung verzögern könnte, wenn er 0.2 s vor Beginn des Eingriffs dargeboten wird. Allerdings basiert dieses Ergebnis nur auf den Daten weniger Fahrer und ist daher nicht belastbar. Dennoch liefern die Ergebnisse Hinweise darauf, dass auch bei der Ausführung einer Querführungsaufgabe ähnliche Effekte wie in der Grundlagenforschung zur Doppelaufgabeninterferenz beobachtet werden können. Interessanterweise ist dabei auch der zeitliche Abstand vergleichbar. So werden auch in der Grundlagenforschung stärkere Interferenzeffekte bei einem zeitlichen Abstand von 0.2 s im Vergleich zu einem zeitlichen Abstand von 0.4 s beobachtet (vgl. Pashler, 1994, S.222).

Im Vergleich zu den vorherigen beiden Studien fällt zudem auf, dass der Anteil der Fahrer, die das Reaktionsmuster initiales Dämpfen zeigen, insgesamt geringer ausfiel. Dies ist möglicherweise ein Hinweis darauf, dass die Mitlenkentscheidung mehr Zeit benötigt als den Fahrern in den vorigen Studien zur Verfügung stand. Insgesamt standen dem Fahrer ca. 0.4-0.6 s von der Situationsauslösung bis Beginn des Eingriffs zur Verfügung. Berücksichtigt man die Ergebnisse aus der ersten Studie, könnte dies bedeuten, dass die Fahrer bei Beginn des Eingriffs bereits eine Handlungsentscheidung getroffen hatten, was erklärt, warum insgesamt weniger dämpfende Verhaltensweisen zu beobachten sind. Dies erklärt möglicherweise auch die Unterschiede zwischen den beiden haptischen Warnungen. Während bei einem zeitlichen Abstand von 0.4 s zwischen Warnung und Eingriff die Möglichkeit besteht, dass der Fahrer die Situation bereits visuell analysiert und sein Handlungsziel angepasst hat, reicht die Zeit bei einem zeitlichen Abstand von 0.2 s noch nicht aus. Damit ist dies eine mögliche Alternativklärung zu den oben beschriebenen Interferenzeffekten.

Im Fehlerfall führten dem Ausweicheingriff vorgelagerte Warnungen überwiegend zu einer Verschlechterung der Kontrollierbarkeit (vgl. Forschungsfrage 8-1). Dies zeigt sich für alle Warnungen, außer für den späten haptischen Lenkimpuls (LI 1.4). Zwar reduzierten nahezu alle Fahrer den Spurversatz deutlich, allerdings deutet das Lenkverhalten der Fahrer darauf hin, dass die Fahrer den unberechtigten Eingriff mit Warnung schlechter kontrollieren können als ohne. Die gilt nicht nur für vorgelagerte Warnungen mit frühem Lenkimpuls (LI 1.6 und LI + HUD), sondern auch für visuell-akustische Warnungen (Ton +HUD) oder Bremsimpulse (BR 1.6). Dies ist unerwartet, da den Fahrern durch die Warnung mehr Zeit zur Verfügung stehen sollte, um die Situation zu analysieren und eine entsprechende Handlung vorzubereiten (vgl. Forschungsfrage 8-1). Damit sollten die Fahrer auch dazu in der Lage gewesen sein zu erkennen, dass ein unberechtigter Eingriff vorliegt. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte sein, dass die vorgelagerten Warnungen den Fahrer ablenken und dadurch seine Reaktion verzögern. Alternativ besteht die Möglichkeit, dass die vorgelagerten Warnungen auch im Fehlerfall die Verhaltensbereitschaft für eine Ausweichreaktion verstärkt haben, was die Annahme von Kleen und Schmidt (2009) bestätigen würde. Ein weiterer Erklärungsansatz wäre, dass die Fahrer sich auf die Warnung verlassen haben und den folgenden Eingriff daher zunächst zugelassen haben, bevor sie erkannten, dass sie sich damit in Gefahr bringen. Dies könnte eine Folge der Untersuchungsanordnung sein, da der Fehlerfall nach Erleben des Nutzenfalls präsentiert wurde. Um dies auszuschließen müsste eine Studie durchgeführt werden, die sich ausschließlich auf den Fehlerfall konzentriert. Dadurch könnten mögliche Übertragungseffekte zwischen Nutzen- und Fehlerfall vermieden werden. Allerdings erklärt dies nicht den Vorteil des späten Lenkimpulses (LI 1.4) gegenüber den anderen Warnungen. Dies lässt sich möglicherweise dadurch erklären, dass der Sprung des Lenkmoments bei Beginn des Eingriffs geringer ausfällt als bei den anderen Warnungen. Der Lenkimpuls ist bei Beginn des Eingriffs noch nicht abgebaut, dadurch liegt bei Beginn des Eingriffs bereits ein Lenkmoment von 4 Nm an, das in Folge des Eingriffs auf 6 Nm erhöht wird.

Dagegen spricht allerdings, dass die Fahrer unberechtigte Eingriffe ohne vorgelagerte Warnung auch besser kontrollieren können. Ebenso wie bei den anderen vorgelagerten Warnungen findet hier bei Beginn des Eingriffs ein Sprung von 0 Nm auf 6 Nm statt. Allerdings müsste auch hier eine Studie konzipiert werden, die diesen Effekt isoliert betrachtet.

8.5.3 Schlussfolgerung

Im Hinblick auf das angenommene Verhaltensmodell konnten weitere Hinweise auf mögliche Unterschiede der beiden Kontrollprozesse identifiziert werden. Die Ergebnisse bestätigen insbesondere die Vermutung, dass die haptischen Informationen schneller verarbeitet werden als die visuellen Informationen. Zusätzlich finden sich, ähnlich wie in Studie II, Hinweise darauf, dass die haptisch getriggerten Kompensationsreaktionen mit der Anpassung des Handlungsziels interferieren können. Dies deutet auf eine Wechselwirkung zwischen dem sensomotorischen Kontrollprozess und übergeordneten Kontrollprozessen hin. Welche Prozesse und Mechanismen daran beteiligt sind, ist anhand des vorliegenden Erkenntnisstandes nicht vollständig nachvollziehbar.

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse zudem, dass es schwierig ist eine Warnung zu gestalten, die sich sowohl im Nutzen- als auch im Fehlerfall positiv auf das Fahrerverhalten auswirkt. Zwar konnten die Ergebnisse von Hesse et al. (2013) bestätigt werden, die zeigen, dass dem Eingriff vorgelagerte Warnungen die Wirksamkeit im Nutzenfall verbessern können (vgl. auch Schieben et al., 2014). Allerdings scheint dies bei haptischen Warnungen von dem zeitlichen Abstand zwischen Warnung und Eingriff abzuhängen. Ist der zeitliche Abstand zwischen Warnung und Eingriff kleiner als 0.4 s, wird die Wirksamkeit möglicherweise nicht verbessert. Entspricht der zeitliche Abstand zwischen haptischer Warnung und Eingriff hingegen mindestens 0.4 s, könnte die haptische Warnung zu einer Verbesserung der Wirksamkeit führen. Allerdings konnte, abgesehen von dem späten Lenkimpuls (LI 1.4), kein positiver Einfluss der vorgelagerten Warnungen auf die Kontrollierbarkeit nachgewiesen werden. Der positive Einfluss des späten Lenkimpulses im Fehlerfall und der negative Einfluss im Nutzenfall sind möglicherweise darauf zurückzuführen, dass die Fahrer bei Beginn des Eingriffs gerade mit der Kompensation der Warnung beginnen. Dadurch wirkt sich der Eingriff insgesamt weniger stark auf die Querverführung aus, was sich positiv für den Fehlerfall, aber negativ auf den Nutzenfall auswirkt. Zusätzlich deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die sensomotorischen Prozesse nicht immer automatisch getriggert werden, wenn ein Eingriff mit haptischer Rückmeldung am Lenkrad beginnt. Liegt bei Beginn des Eingriffs ein entsprechendes Handlungsziel vor, können die Fahrer den Eingriff möglicherweise eher aufnehmen.

Der positive Einfluss des frühen haptischen Lenkimpulses (LI 1.6) auf die Wirksamkeit des Lenkeingriffs kann möglicherweise auch dadurch erklärt werden, dass bereits die Warnung zu einem Querversatz des Fahrzeugs führt. Allerdings gilt dies auch für den späten haptischen Lenkimpuls. Um zu überprüfen, ob der Einfluss tatsächlich nur auf den Lenkimpuls zurückzuführen ist, könnte die haptische Warnung von der Querverführung mittels Steer-by-Wire entkoppelt werden. Findet sich trotz der Entkopplung ein positiver Einfluss des frühen haptischen Lenkimpulses auf die Wirksamkeit des Lenkeingriffs und ein negativer Einfluss des späten Lenkimpulses, würde dies bestätigen, dass haptische Eingriffe am Lenkrad die Handlungsentscheidung des Fahrers verzögern können, was auf eine Interferenz hinweisen würde.

Insgesamt lag der Fokus der bisherigen Studien auf dem Einfluss der haptischen Rückmeldung. Mit der folgenden Studie soll hingegen stärker auf den Einfluss der visuellen Rückmeldung eingegangen werden. Dabei soll untersucht werden, ob die visuelle Rückmeldung für das Zustandekommen bestimmter Reaktionsmuster erforderlich ist.

9 Studie V: Einfluss visueller Ablenkung auf das Fahrerverhalten

9.1 Herleitung der Forschungsfragen

In bisherigen Studien zur Untersuchung automatischer Ausweicheingriffe wurden überwiegend aufmerksame Fahrer berücksichtigt (vgl. Bräuchle et al., 2013; Fricke et al., 2015b; Gußner et al., 2015; Hesse et al., 2013; Schieben et al., 2014). Allerdings ist davon auszugehen, dass automatische Ausweicheingriffe insbesondere dann erforderlich sind, wenn der Fahrer abgelenkt ist, da abgelenkte Fahrer teilweise nicht mehr dazu in der Lage sind, auf die Gefahrensituation zu reagieren (vgl. Abschnitt 2). Studien zum Fahrerverhalten ohne eine Unterstützung durch einen Ausweicheingriff zeigen, dass die Reaktion abgelenkter Fahrer im Mittel ca. 0.25 s langsamer erfolgt, als die Reaktion aufmerksamer Fahrer. Einen besonders starken Einfluss hat dabei die Blickabwendung. In Folge einer Blickabwendung reagierten Fahrer im Mittel 0.6 s langsamer (vgl. Dozza, 2013). Bisher ist allerdings unklar, welche Reaktionsmuster eines abgelenkten Fahrers im Falle eines automatischen Ausweicheingriffs zu erwarten sind. Einerseits könnten automatische Ausweicheingriffe oder Lenkempfehlungen die Reaktion des Fahrers beschleunigen, da sie den Fahrer auf die bevorstehende Gefahrensituation aufmerksam machen. Andererseits könnte die Ablenkung des Fahrers auch zu Falschreaktionen führen.

Im Hinblick auf das vorgeschlagene Modell ist insbesondere die Blickabwendung oder visuelle Ablenkung des Fahrers von Interesse. Diese nimmt dem Fahrer die Möglichkeit, auf einen essentiellen Bestandteil der Informationen des äußeren Regelkreises zurückzugreifen, die sich auf die Fahrzeugreaktion beziehen und damit den Abgleich zwischen der Erwartung des Fahrers und den eintretenden Effekten verhindern. Gleichzeitig sollten dem Fahrer bei visueller Ablenkung jedoch nach wie vor alle Informationen des inneren Regelkreises zur Verfügung stehen, die sich auf die Reaktionen des Lenkrads beziehen (sofern der Fahrer mindestens eine Hand am Lenkrad hat). Ist der innere Regelkreis mit den sensomotorischen Kontrollprozessen von Bedeutung für die Reaktionsmuster des Fahrers, sollten keine Unterschiede im Vergleich zu aufmerksamen Fahrern beobachtet werden. Ist hingegen der äußere Regelkreis von Bedeutung für die Reaktionsmuster der Fahrer, werden Unterschiede im Reaktionsmuster erwartet.

Im Nutzenfall sollte sich dies wie folgt äußern: Spielt der innere Regelkreis eine bedeutende Rolle für das initiale Reaktionsmuster des Fahrers, sollten die Reaktionsmuster den Reaktionsmustern in Folge eines fehlerhaften Eingriffs ähneln, da der Fahrer keine Gelegenheit hatte, die Situation zu erfassen und sein Handlungsziel anzupassen. Die Reaktion des Fahrers wäre in diesem Fall überwiegend durch die auf Ebene der sensomotorischen Regelung festgestellte Abweichung getriggert. Zusätzlich sollte die Entscheidung des Fahrers, den automatischen Eingriff aufzugreifen, verzögert sein, da der abgelenkte Fahrer die Situation erst betrachten und analysieren muss, um sich für eine Handlungsoption zu entscheiden (vgl. Abbildung 9-1). Im Fehlerfall werden hingegen keine Unterschiede im Reaktionsmuster zwischen aufmerksamen und abgelenkten Fahrern erwartet. Dies wird damit begründet, dass für die initiale Reaktion auf einen fehlerhaften Eingriff keine visuelle Information erforderlich ist, da die haptische Rückmeldung am Lenkrad bereits zu einer Kompensationsreaktion der Fahrer führt. Die folgende top-down gesteuerte Handlungsentscheidung des Fahrers nach Analyse der Situation würde in diesem Fall die sensomotorisch getriggerte Kompensationsreaktion bestätigen. Eine dem Eingriff vorgelagerte Warnung (siehe hierzu auch Kapitel

8) könnte allerdings dazu führen, dass die Fahrer früher die Gelegenheit haben, sich der Situation zuzuwenden. Dadurch könnten sie die Situation früher analysieren und eine Handlungsentscheidung treffen. Ist dies der Fall, sollten unterschiedliche Reaktionsmuster zwischen Eingriffen mit und ohne vorgelagerte Warnung beobachtet werden.

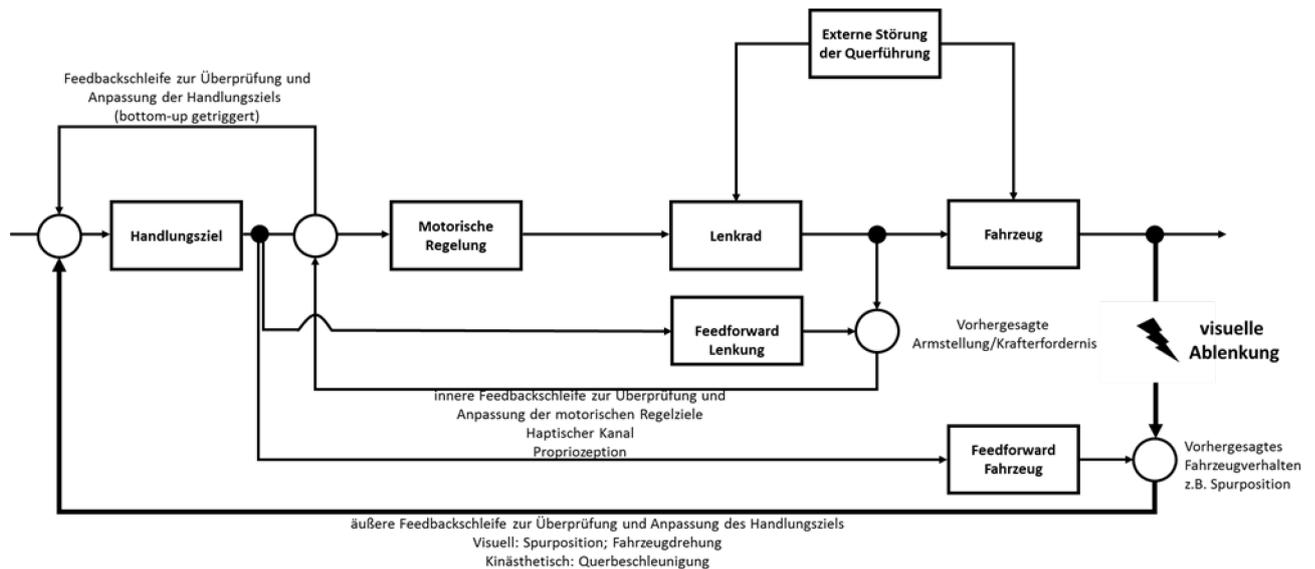


Abbildung 9-1. Die visuelle Ablenkung sollte sich vor allem auf den äußeren visuellen Regelkreis (schwarz hervorgehoben) auswirken und die visuelle Rückmeldung verzögern. Dies führt zu einer langsameren Anpassung des Handlungsziele als ohne visuelle Ablenkung und damit zu einer verzögerten Reaktion der Fahrer.

In der folgenden Studie wurden daher visuell abgelenkte Fahrer untersucht, die entweder eine dem Eingriff vorgelagerte, visuell-akustische Warnung erhielten oder nicht. Zusätzlich erfolgt ein Vergleich des Reaktionsmusters zwischen visuell abgelenkten und aufmerksamen Fahrern. Als Referenz für aufmerksame Fahrer werden die Ergebnisse der Studie zum Einfluss der vorgelagerten Warnungen herangezogen.

Im folgenden Kapitel werden die entsprechenden Forschungsfragen nochmals zusammengefasst und auf Basis der oben geführten Diskussion spezifische Hypothesen aufgestellt.

9.2 Forschungsfragen

In der folgenden Studie soll der Frage nachgegangen werden, welchen Anteil der visuelle Regelkreis und welchen Anteil die sensomotorischen Kontrollprozesse an der Reaktion der Fahrer auf unerwartete, automatische Ausweicheingriffe haben. Mithilfe einer visuellen Ablenkung des Fahrers wurde dazu eine Bedingung geschaffen, in welcher der Fahrer verzögert visuelle Rückmeldung über die Situation erhält. Dadurch soll überprüft werden, welche Bedeutung die visuelle Regelung für das Auftreten bestimmter Reaktionsmuster hat oder ob diese durch die angenommenen sensomotorischen Kontrollprozesse zustande kommen (vgl. Forschungsfrage 9-1).

Forschungsfrage 9-1: Welchen Einfluss hat die Verfügbarkeit der visuellen Rückmeldung auf das Reaktionsmuster der Fahrer im Nutzen- und Fehlerfall?

Konkret wird erwartet, dass die visuelle Ablenkung zu einer Verzögerung der Handlungsentscheidung des Fahrers im Nutzenfall führt, was sich auch nachteilig auf die Wirksamkeit auswirken könnte (vgl. Hypothese 9-1).

Hypothese 9-1: Die visuelle Ablenkung verzögert die Handlungsentscheidung des Fahrers im Nutzenfall und führt zu einer geringeren Wirksamkeit.

Dies sollte sich darin äußern, dass mit visueller Ablenkung häufiger Kollisionen beobachtet werden als ohne visuelle Ablenkung. Zusätzlich sollten mit visueller Ablenkung häufiger Reaktionsmuster beobachtet werden, die auf eine Dämpfung des automatischen Ausweicheingriffs hindeuten. Zudem sollte der Wiederanstieg der Lenkradwinkelgeschwindigkeit, als Indikator für die Mitlenkentscheidung, später erfolgen.

Gleichzeitig wird angenommen, dass die visuelle Ablenkung keinen Einfluss auf das Reaktionsmuster der Fahrer im Fehlerfall hat, da dem Fahrer weiterhin Informationen aus dem sensomotorischen Regelkreis zur Verfügung stehen (vgl. Hypothese 9-2). Dies sollte sich vor allem darin zeigen, dass die Kennwerte des Lenkverhaltens keine Unterschiede aufweisen.

Hypothese 9-2: Die visuelle Ablenkung hat keinen Einfluss auf das initiale Reaktionsmuster der Fahrer im Fehlerfall.

Zusätzlich soll die Frage beantwortet werden, wie sich eine vorgelagerte Warnung bei einer visuellen Ablenkung des Fahrers auswirken (vgl. Forschungsfrage 9-2).

Forschungsfrage 9-2: Welchen Einfluss haben Warnungen, wenn die Verfügbarkeit der visuellen Rückmeldung eingeschränkt wird?

Dabei wird vermutet, dass die vorgelagerte Warnung die Wirksamkeit automatischer Ausweicheingriffe im Falle einer visuellen Ablenkung erhöht, da sie dem Fahrer zusätzliche Zeit verschafft, um die Situation zu analysieren, bevor der automatische Ausweicheingriff beginnt (vgl. Hypothese 9-3).

Hypothese 9-3: Die vorgelagerte Warnung erhöht die Wirksamkeit automatischer Ausweicheingriffe im Falle einer visuellen Ablenkung.

Dies sollte sich in der Anzahl der Kollisionen, den Kennwerten des Lenkverhaltens und in dem Reaktionsmuster der Fahrer widerspiegeln. Das bedeutet, dass mit zusätzlicher Warnung bei visueller Ablenkung weniger Kollisionen beobachtet werden sollten als ohne zusätzliche Warnung. Zusätzlich sollten visuell abgelenkte Fahrer mit Warnung häufiger Reaktionsmuster zeigen, die auf ein Aufgreifen des automatischen Lenkeingriffs hindeuten, als visuell abgelenkte Fahrer, die keine Warnung erhalten.

9.3 Methodik

9.3.1 Stichprobe

Alle Teilnehmer der Studie entstammten dem Testfahrerpanel der WIVW GmbH und waren durch ein standardisiertes Training an das Fahren im dynamischen Fahrsimulator gewöhnt. Um die Abbruchquote aufgrund von „*Simulator Sickness*“ zu minimieren, wurden nur Fahrer mit einer als sehr gut eingestuften Verträglichkeit eingeladen. Zusätzlich wurde darauf geachtet, dass die Fahrer nicht bereits an vergleichbaren Studien zu automatischen Ausweicheingriffen teilgenommen haben.

Insgesamt nahmen an der Studie $N = 32$ Fahrer teil (davon 19 weiblich). Das mittlere Alter der weiblichen Fahrer betrug $m = 44.63$ Jahre ($min = 19$, $max = 73$) und das der männlichen Fahrer $m = 48.23$ Jahre ($min = 28$, $max = 75$).

Als Referenz für aufmerksame Fahrer dienen die in der Studie zum Einfluss von Vorwarnungen erhobenen Fahrer, welche die gleiche Warnung erhielten (vgl. Kapitel 8).

9.3.2 Gestaltung der Szenarien

Die Hindernisse im Nutzenfall bestanden bei der Hälfte der Probanden aus PKW und bei der anderen Hälfte aus Radfahrern und kreuzten die Fahrspur des Fahrers stets von rechts (siehe Abbildung 8-3). Die Hindernisse wurden angehalten, wenn sie 1.75 m in den Fahrstreifen reichten, so dass 50% des Fahrstreifens durch das Hindernis belegt waren.



Abbildung 9-2. Szenarien für den Nutzenfall mit kreuzendem Radfahrer (links) und PKW (rechts).

Im Falle des unberechtigten Systemeingriffs erfolgte der Eingriff auf einem geraden Streckenabschnitt mit einem Fahrstreifen in Richtung der Fahrtrichtung (siehe Abbildung 8-4).



Abbildung 9-3. Szenario für die Untersuchung des unberechtigten Systemeingriffs.

9.3.3 Eingriffscharakteristik

Der Systemeingriff wurde mittels einer Lenkradwinkel- und einer Lenkmomentschnittstelle implementiert und wurde im Nutzenfall bei einer TTC von ca. 1.2 s ausgelöst. Es wurde ein sinusförmiger Lenkradwinkelverlauf mit einem maximalen Lenkradwinkel von ca. 75-80° vorgegeben.

Bei freihändiger Fahrt wurde so ein Spurversatz von ca. 1.75 m erzeugt und das Fahrzeug anschließend wieder parallel zur ursprünglichen Fahrtrichtung ausgerichtet. Das Lenkmoment betrug maximal 6 Nm. Insgesamt dauerte der Systemeingriff ca. 1.8 Sekunden. Die Umsetzung des Ausweicheingriffs entspricht damit der Eingriffsvariante 4 aus der Studie zum Einfluss der Ausweichtrajektorien (vgl. Abbildung 7-3).

9.3.4 Gestaltung der Nebenaufgabe

Zur Ablenkung der Fahrer wurde eine einfache visuelle Suchaufgabe im unteren Bereich der Mittelkonsole implementiert. Die Nebenaufgabe dauerte ca. 20 s und wurde an definierten Streckenabschnitten ausgelöst. Die Auslösung erfolgte stets auf geraden Streckenabschnitten. Die Aufgabe des Fahrers bestand darin, eine Taste zu drücken, sobald eine Ziffer auf dem Display erschien. Dazu sollten die Fahrer bei Beginn der Nebenaufgabe die rechte Hand vom Lenkrad nehmen und auf die Taste legen, so dass sie während der Durchführung der Nebenaufgabe nur eine Hand am Lenkrad hatten. Als Distraktor wurde eine zufällige Sequenz verschiedener Buchstaben angezeigt. Die Fahrer wurden instruiert, die Nebenaufgabe so gut wie möglich zu erfüllen. Um den Fahrer zusätzlich zu motivieren, wurde die Anzahl korrekter und falscher Antworten rückgemeldet.



Abbildung 9-4: Umsetzung der Nebenaufgabe im dynamischen Simulator. Links ist ein Distraktor dargestellt, rechts ein Target. Die Probanden wurden instruiert, die weiß markierte Taste zu betätigen, sobald eine Ziffer auf dem Display erschien. Rechts unterhalb der Buchstaben/Ziffern wurde die Anzahl korrekter und falscher Antworten rückgemeldet.

9.3.5 Versuchsablauf

Die Probanden durchfahren in fester Abfolge ein Szenario mit einem kreuzenden Hindernis und automatischem Lenkeingriff (Nutzenfall) und ein Szenario mit unberechtigtem Lenkeingriff (Fehlerfall). Zwischen diesen Testszenarios durchfahren die Probanden zusätzlich eine Reihe von Füllszenarios, um die Vorhersehbarkeit der Eingriffe und damit verbundene Erwartungseffekte zu minimieren. Die Nebenaufgabe wurde wiederholt auf geraden Strecken innerhalb der Füllszenarios angeboten.

Im Nutzen- und Fehlerfall wurde die Nebenaufgabe stets ca. 10 s vor der Prüfsituation gestartet, um sicherzustellen, dass sich der Fahrer der Nebenaufgabe widmet. Die Hindernisse im Nutzenfall bestanden bei der Hälfte der Probanden aus PKW und bei der anderen Hälfte aus Radfahrern und kreuzten die Ego-Fahrspur stets von rechts.

Insgesamt wurden zwei Gruppen gebildet. Die erste Gruppe erhielt keine vorgelagerte Warnung vor dem Systemeingriff (oVW). Die zweite Gruppe erhielt eine Kombination aus visueller und akustischer Warnung (Ton + HUD). Der resultierende Versuchsplan ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 9-1: Versuchsplan und Fahrtabfolge der Studie zum Einfluss der visuellen Ablenkung.

Studienteil	Warnung	Konfliktpartner	Streckentyp
1	oVW, Ton + HUD (B)	PKW, Fahrrad (B)	Nutzenfall
2,		PKW, Fahrrad (B)	
3	oVW, Ton + HUD (B)		Fehlerfall

B = Between-Faktor, W = Within-Faktor, P = pseudorandomisiert

Als Referenz für aufmerksame Fahrer dienen die in der Studie zum Einfluss von Vorwarnungen erhobenen Fahrer, welche die gleiche Warnung erhielten (vgl. Kapitel 8).

9.4 Ergebnisse

Die Ergebnisse werden getrennt nach Nutzen- und Fehlerfall berichtet. Im Nutzenfall wird zunächst auf die Wirksamkeit des berechtigten Eingriffs eingegangen. Anschließend wurde das beobachtete Reaktionsmuster auf Basis der in Kapitel 4.3 beschriebenen Vorgehensweise analysiert. Im Fehlerfall wird ebenfalls auf das Reaktionsmuster der Fahrer eingegangen. Von besonderem Interesse war der Vergleich von abgelenkten zu aufmerksamen Fahrern. Da in der vorliegenden Studie nur abgelenkte Fahrer untersucht wurden, wird auf Ergebnisse der vorangegangenen Studie zum Einfluss von Warnungen zurückgegriffen (vgl. Kapitel 8), in denen die Fahrer nicht abgelenkt wurden. Anhand des Vergleichs soll überprüft werden, ob sich eine visuelle Ablenkung möglicherweise auf den Zeitpunkt der Mitlenkentscheidung auswirkt.

9.4.1 Nutzenfall

Kollisionen Der Einfluss der Ablenkung auf die Wirksamkeit der Eingriffe ist nicht eindeutig. Ohne vorgelagerte Warnung (oVW) kollidierten sowohl im Szenario PKW als auch im Szenario Radfahrer weniger Fahrer mit dem Hindernis, wenn sie abgelenkt waren (vgl. Aufgrund der unklaren Befundlage kann Hypothese 9-3 daher weder bestätigt noch abgelehnt werden.

Tabelle 9-2). Erhielten die Fahrer hingegen eine vorgelagerte akustisch-visuelle Warnung (Ton + HUD) wurden in Folge der Ablenkung im Szenario PKW häufiger Kollisionen mit dem Hindernis beobachtet (62.5%) als wenn die Fahrer aufmerksam waren (20%). Im Szenario Radfahrer ist kein Einfluss der Ablenkung zu erkennen. Sowohl abgelenkte Fahrer (38%) als auch aufmerksame Fahrer (40%) kollidierten in etwa gleich häufig mit dem Hindernis. Aufgrund der unklaren Befundlage kann Hypothese 9-3 daher weder bestätigt noch abgelehnt werden.

Tabelle 9-2. Kollisionshäufigkeiten in Abhängigkeit von der Eingriffsvariante (oVW vs. Ton + HUD), dem Fahrertzustand (aufmerksam vs. abgelenkt) und dem Szenario (PKW vs. Radfahrer).

Szenario	Warnung			
	oVW		Ton + HUD	
	aufmerksam	abgelenkt	aufmerksam	abgelenkt
PKW	60% (3)	12.5% (1)	20% (1)	62.5% (5)
Radfahrer	75% (3)	50% (4)	40% (2)	38% (3)

Insgesamt zeigte die Mehrheit der Fahrer eine Bremsreaktion. Allerdings zeigten abgelenkte Fahrer tendenziell seltener eine Bremsreaktion als aufmerksame Fahrer (vgl. Tabelle 9-3).

Tabelle 9-3. Bremshäufigkeiten in Abhängigkeit von der Eingriffsvariante (oVW vs. Ton + HUD), dem Fahrertzustand (aufmerksam vs. abgelenkt) und dem Szenario (PKW vs. Radfahrer).

Szenario	Warnung			
	oVW		Ton + HUD	
	aufmerksam	abgelenkt	aufmerksam	abgelenkt
PKW	100% (5)	75% (6)	100% (5)	100% (8)
Radfahrer	100% (4)	100% (8)	100% (5)	75% (6)

Reaktionsmuster Im Szenario PKW (vgl. Abbildung 9-5 links) zeigen sich in der Bedingung ohne vorgelagerte Warnung (oVW) nur geringe Unterschiede zwischen aufmerksamen und abgelenkten Fahrern. Aufmerksame Fahrer zeigten häufiger das Reaktionsmuster Mitlenken (60%) als abgelenkte Fahrer (38%). Mit visuell-akustischer Warnung (Ton + HUD) zeigten abgelenkte Fahrer hingegen häufiger das Reaktionsmuster Mitlenken (38%) als aufmerksame Fahrer (20%). Im Szenario Radfahrer (vgl. Abbildung 9-5 rechts) zeigte in der Bedingung ohne Warnung (oVW) die Hälfte der aufmerksamen Fahrer das Reaktionsmuster Festhalten und die andere Hälfte das Reaktionsmuster Mitlenken. Bei abgelenkten Fahrern wurde in der Hälfte der Fälle das Reaktionsmuster initiales Dämpfen und in der anderen Hälfte ebenfalls das Reaktionsmuster Mitlenken beobachtet. Mit visuell-akustischer Warnung (Ton + HUD) zeigten abgelenkte Fahrer hingegen häufiger das Reaktionsmuster Mitlenken (63%) als aufmerksame Fahrer (40%). Zusätzlich zeigten aufmerksame Fahrer häufiger das Reaktionsmuster Festhalten (vgl. Forschungsfrage 9-1).

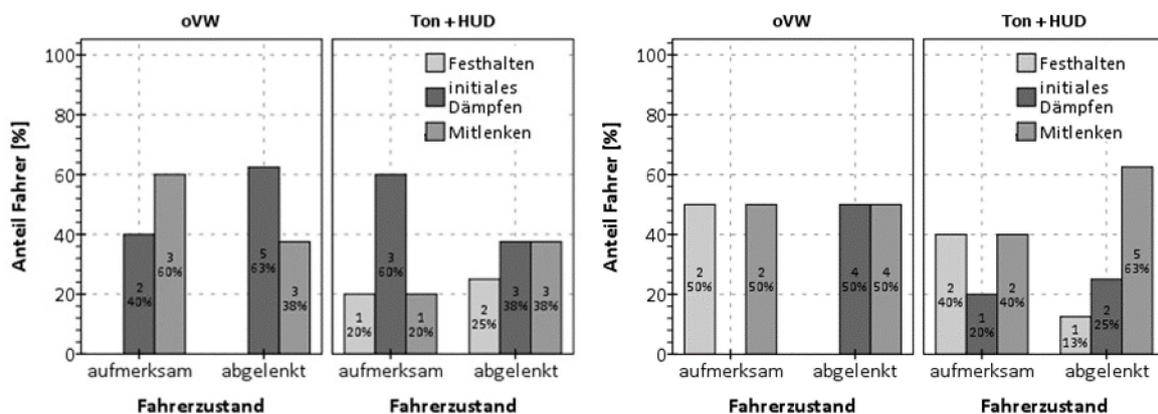


Abbildung 9-5. Häufigkeit der Reaktionsmuster Festhalten, initiales Dämpfen und Mitlenken im Nutzenfall in Abhängigkeit von Fahrerzustand (aufmerksam vs. abgelenkt) und Warnung (oVW vs. Ton + HUD) für das Szenario PKW (links) und Radfahrer (rechts).

Um einen möglichen Einfluss der Ablenkung, der Warnung und des Szenarios auf Kennwerte des Lenkerverhaltens inferenzstatistisch zu prüfen, wurde eine multivariate Varianzanalyse berechnet. Der Omnibus-Test ergab einen signifikanten Einfluss des Szenarios (Wilks Lambda, $F(5, 39) = 6.426$, $p < .001$, $\eta^2 = .452$) und der Ablenkung (Wilks Lambda, $F(5, 39) = 3.522$, $p = .010$, $\eta^2 = .311$). Der Einfluss der Warnung war hingegen nicht signifikant. (Wilks Lambda, $F(5, 39) = 1.644$, $p = .171$, $\eta^2 = .174$). Zusätzlich ergab sich ein signifikanter Einfluss der Interaktion von Szenario und Ablenkung (Wilks Lambda, $F(5, 39) = 4.453$, $p = .003$, $\eta^2 = .363$). Auf die Ergebnisse der univariaten Varianzanalysen wird bei der Beschreibung der einzelnen Kennwerte eingegangen.

Maximaler Spurversatz Die unvariierten Varianzanalysen ergaben einen signifikanten Einfluss des Szenarios ($F(1, 43) = 23.434, p < .001, \eta^2 = .353$) und der Ablenkung ($F(1, 43) = 7.047, p = .011, \eta^2 = .141$) auf den maximalen Spurversatz. Zusätzlich ergab sich ein signifikanter Einfluss der Interaktion von Szenario und Ablenkung ($F(1, 43) = 21.240, p < .001, \eta^2 = .331$). Im Mittel fiel der maximale Spurversatz im Szenario PKW signifikant höher aus als im Szenario Radfahrer (vgl. Tabelle 9-4). Dies zeigt sich vor allem bei aufmerksamen Fahrern. Auffällig ist hierbei, dass der erreichte Spurversatz im Mittel größer ausfiel als vom Systemeingriff angestrebt (ca. 1.75 m). Zusätzlich erreichten aufmerksame Fahrer im Szenario PKW einen größeren Spurversatz als abgelenkte Fahrer (vgl. Abbildung 9-6 und Tabelle 9-4). Im Szenario Radfahrer dreht sich dieses Verhältnis hingegen um. Hier erreichten abgelenkte Fahrer im Mittel einen größeren Spurversatz als aufmerksame Fahrer (vgl. Abbildung 9-6 und Tabelle 9-4).

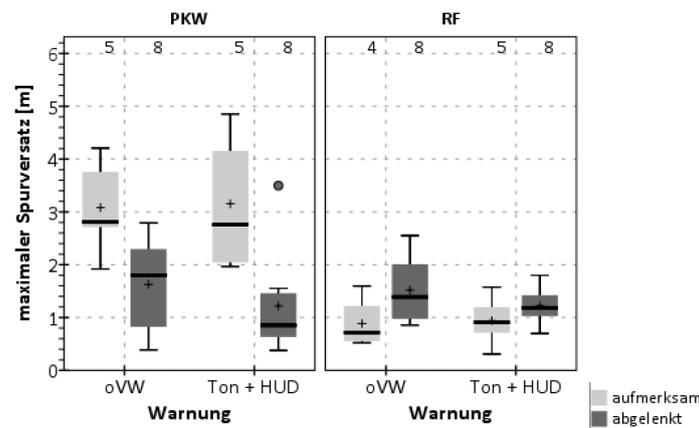


Abbildung 9-6. Maximaler Spurversatz [m] in Abhängigkeit von Warnung (oVW vs. Ton + HUD), Fahrertzustand (aufmerksam vs. abgelenkt) und Szenario (PKW vs. Radfahrer). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Tabelle 9-4. Mittelwert und Standardabweichung des maximalen Spurversatzes [m] in Abhängigkeit von Warnung (oVW vs. Ton + HUD), Fahrertzustand (aufmerksam vs. abgelenkt) und Szenario (PKW vs. Radfahrer).

Szenario	Warnung			
	oVW		Ton + HUD	
	aufmerksam	abgelenkt	aufmerksam	abgelenkt
PKW	3.08 (0.91)	1.63 (0.88)	3.16 (1.29)	1.22 (1.00)
Radfahrer	0.89 (0.49)	1.52 (0.64)	0.94 (0.48)	1.22 (0.34)

Die Betrachtung in Abhängigkeit der Reaktionsmuster (vgl. Abbildung 9-7) deutet darauf hin, dass aufmerksame Fahrer tendenziell einen größeren Spurversatz als abgelenkte Fahrer erzeugten, wenn die Reaktionsmuster initiales Dämpfen oder Mitlenken identifiziert wurden. Diese Tendenz zeigt sich unabhängig davon, ob die Fahrer eine vorgelagerte Warnung erhielten oder nicht. Wurde hingegen das Reaktionsmuster Festhalten identifiziert, sind kaum Unterschiede zwischen aufmerksamen und abgelenkten Fahrern zu beobachten.

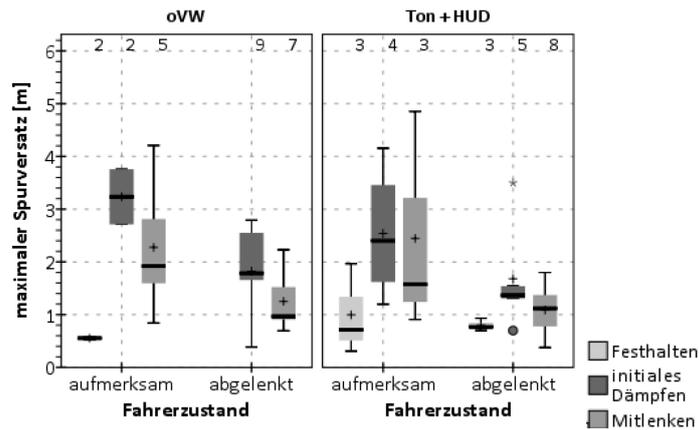


Abbildung 9-7. Maximaler Spurversatz [m] in Abhängigkeit von Fahrerzustand (aufmerksam vs. abgelenkt), Reaktionsmuster (Festhalten, initiales Dämpfen, Mitlenken) und Warnung (oVW vs. Ton + HUD). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Erstes Lenkradwinkelmaximum Die univariaten Varianzanalysen ergaben keinen signifikanten Einfluss des Szenarios ($F(1, 43) = .515, p = .477, \eta^2 = .012$), der Ablenkung ($F(1, 43) = 2.377, p = .130, \eta^2 = .052$) oder der Warnung ($F(1, 43) = .010, p = .922, \eta^2 = .00$) auf das erste Lenkradwinkelmaximum. Allerdings ergab sich ein signifikanter Einfluss der Interaktion der Faktoren Szenario und Ablenkung ($F(1, 43) = 5.438, p = .024, \eta^2 = .112$). Deskriptiv zeigt sich hingegen, dass aufmerksame Fahrer im Szenario PKW im Mittel einen größeren Lenkradwinkel erreichten als abgelenkte Fahrer. Zusätzlich wurden im Szenario PKW von aufmerksamen Fahrern im Mittel tendenziell größere Lenkradwinkel erreicht als im Szenario Radfahrer (vgl. Abbildung 9-8 und Tabelle 9-5). Im Szenario Radfahrer erreichten abgelenkte Fahrer im Mittel tendenziell einen größeren Lenkradwinkel als aufmerksame Fahrer. Damit dreht sich das Verhältnis von aufmerksamen und abgelenkten Fahrern in Abhängigkeit des Szenarios um. Insgesamt fällt auf, dass der erreichte Lenkradwinkel im Mittel überwiegend unterhalb des vom Eingriff angestrebten Lenkradwinkels von ca. 75° liegt. Lediglich die aufmerksamen Fahrer im Szenario PKW erreichten im Mittel in etwa den angestrebten Wert (vgl. Tabelle 9-5).

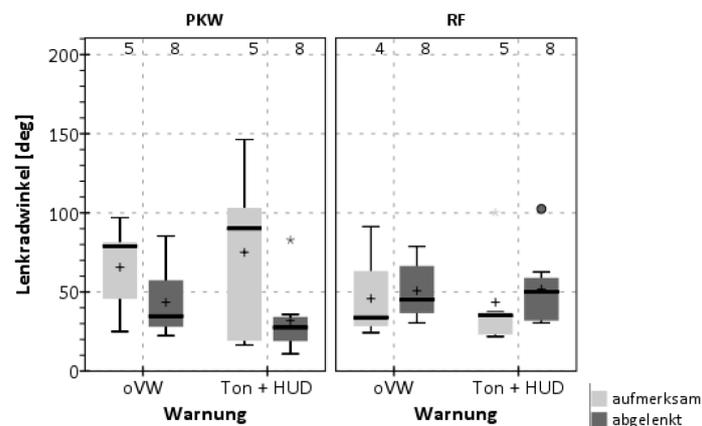


Abbildung 9-8. Erstes Lenkradwinkelmaximum [deg] in Abhängigkeit von Warnung (oVW vs. Ton + HUD), Fahrerzustand (aufmerksam vs. abgelenkt) und Szenario (PKW vs. Radfahrer). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Tabelle 9-5. Mittelwert und Standardabweichung des ersten Lenkradwinkelmaximums [deg] in Abhängigkeit von Warnung (oVW vs. Ton + HUD), Fahrertzustand (aufmerksam vs. abgelenkt) und Szenario (PKW vs. Radfahrer).

Szenario	Warnung			
	oVW		Ton + HUD	
	aufmerksam	abgelenkt	aufmerksam	abgelenkt
PKW	65.60 (29.40)	43.48 (21.69)	75.04 (56.24)	31.90 (22.24)
Radfahrer	45.79 (30.68)	50.72 (17.97)	43.48 (32.45)	51.86 (23.93)

Die Betrachtung in Abhängigkeit der Reaktionsmuster (vgl. Abbildung 9-9) deutet darauf hin, dass aufmerksame Fahrer tendenziell einen größeren Lenkradwinkel erreichten, wenn die Reaktionsmuster initiales Dämpfen oder Mitlenken identifiziert wurden. Bei dem Reaktionsmuster Festhalten sind hingegen kaum Unterschiede zwischen aufmerksamen und abgelenkten Fahrern zu beobachten.

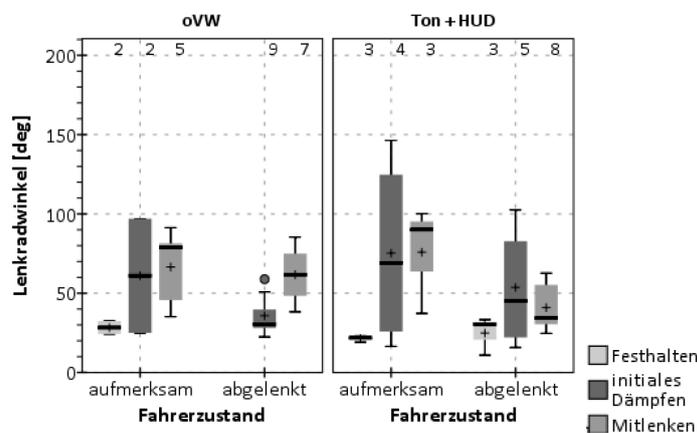


Abbildung 9-9. Erstes Lenkradwinkelmaximum [deg] in Abhängigkeit von Fahrertzustand (aufmerksam vs. abgelenkt), Reaktionsmuster (Festhalten, initiales Dämpfen, Mitlenken) und Warnung (oVW vs. Ton + HUD). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Die univariaten Varianzanalysen ergaben keinen signifikanten Einfluss des Szenarios ($F(1, 43) = .022, p = .883, \eta^2 = .001$), der Ablenkung ($F(1, 43) = 3.310, p = .076, \eta^2 = .071$) oder der Warnung ($F(1, 43) = .989, p = .326, \eta^2 = .022$) auf die Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums. Allerdings ergab sich ein signifikanter Einfluss der Interaktion der Faktoren Szenario und Fahrertzustand ($F(1, 43) = 4.364, p = .043, \eta^2 = .092$). Deskriptiv erreichten aufmerksame Fahrer im Szenario PKW das erste Lenkradwinkelmaximum im Mittel später als abgelenkte Fahrer (vgl. Abbildung 9-10 und Tabelle 9-6). Zusätzlich erreichten aufmerksame Fahrer im Szenario PKW das erste Lenkradwinkelmaximum später als es aufgrund der Eingriffsgestaltung zu erwarten war (ca. 0.5 s). Im Szenario Radfahrer besteht im Mittel hingegen kein Unterschied zwischen aufmerksamen und abgelenkten Fahrern (vgl. Abbildung 9-10 und Tabelle 9-6). Auffällig ist zudem, dass das erste Lenkradwinkelmaximum im Mittel in etwa in dem Zeitbereich beobachtet wurde, in dem es aufgrund der Eingriffsgestaltung zu erwarten war (ca. 0.5 s). Dies zeigt sich unabhängig von der Ablenkungsbedingung und ob eine Warnung eingesetzt wurde oder nicht.

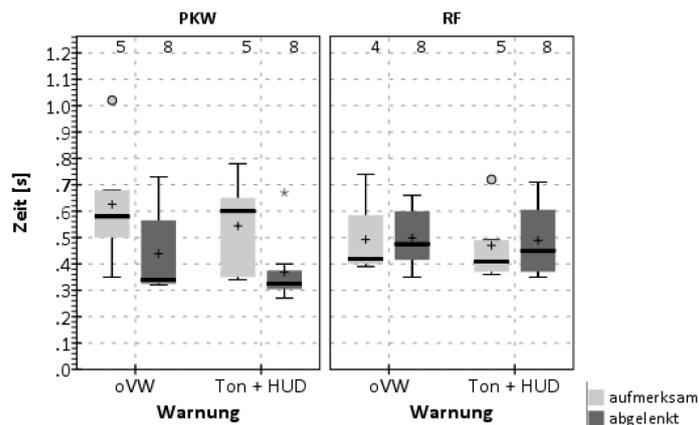


Abbildung 9-10. Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums [s] in Abhängigkeit von Warnung (oVW vs. Ton + HUD), Fahrerzustand (aufmerksam vs. abgelenkt) und Szenario (PKW vs. Radfahrer). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Tabelle 9-6. Mittelwert und Standardabweichung der Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums [s] in Abhängigkeit von Warnung (oVW vs. Ton + HUD), Fahrerzustand (aufmerksam vs. abgelenkt) und Szenario (PKW vs. Radfahrer).

Szenario	Warnung			
	oVW		Ton + HUD	
	aufmerksam	abgelenkt	aufmerksam	abgelenkt
PKW	0.63 (0.25)	0.44 (0.16)	0.54 (0.19)	0.37 (0.13)
Radfahrer	0.49 (0.14)	0.50 (0.11)	0.47 (0.15)	0.49 (0.14)

Die Betrachtung in Abhängigkeit der Reaktionsmuster (vgl. Abbildung 9-11) deutet darauf hin, dass die Unterschiede zwischen aufmerksamen und abgelenkten Fahrern vor allem bei den Reaktionsmustern initiales Dämpfen und Mitlenken zu finden sind. Beim Reaktionsmuster Festhalten zeigen sich hingegen keine eindeutigen Unterschiede zwischen aufmerksamen und abgelenkten Fahrern, unabhängig davon, ob eine vorgelagerte Warnung dargeboten wurde oder nicht.

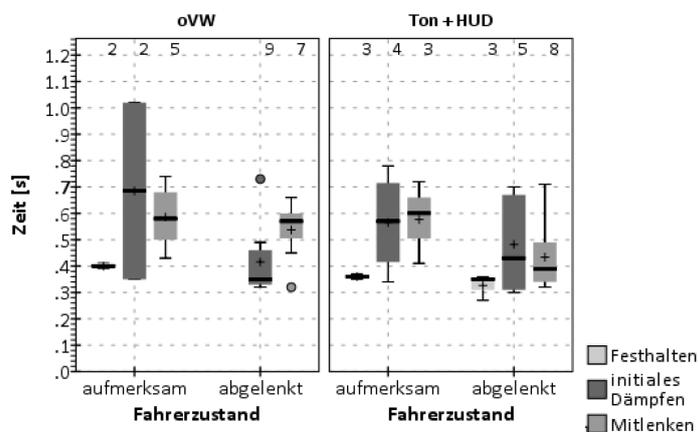


Abbildung 9-11. Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums [s] in Abhängigkeit von Fahrerzustand (aufmerksam vs. abgelenkt), Reaktionsmuster (Festhalten, initiales Dämpfen, Mitlenken) und Warnung (oVW vs. Ton + HUD). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit Die univariaten Varianzanalysen ergaben keinen signifikanten Einfluss des Szenarios ($F(1, 43) = 2.955, p = .093, \eta^2 = .064$), der Ablenkung ($F(1, 43) = 2.146, p = .150, \eta^2 = .048$) oder der Warnung ($F(1, 43) = 1.958, p = .169, \eta^2 = .044$) auf das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit. Der Einfluss der Interaktion zwischen Szenario und Ablenkung wurde ebenfalls nicht signifikant ($F(1, 43) = 2.933, p = .094, \eta^2 = .064$). Deskriptiv zeigt sich im Szenario Radfahrer (vgl. Abbildung 9-12), dass abgelenkte Fahrer im Mittel tendenziell eine höhere Lenkradwinkelgeschwindigkeit erreichten als aufmerksame Fahrer (vgl. Tabelle 9-7). Im Szenario PKW sind hingegen keine Unterschiede zu beobachten.

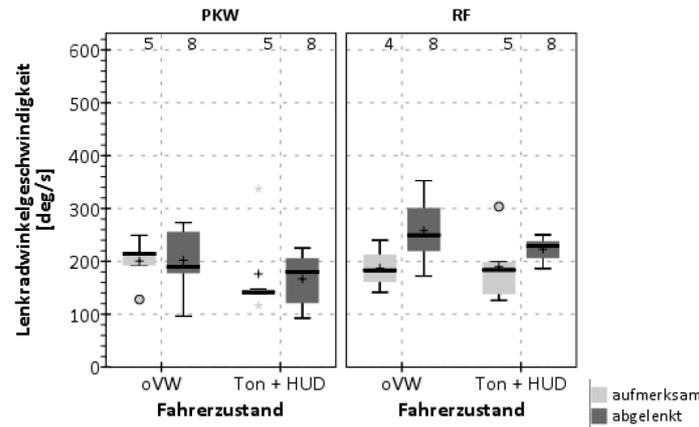


Abbildung 9-12. Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [deg/s] in Abhängigkeit von Warnung (oVW vs. Ton + HUD), Fahrerszustand (aufmerksam vs. abgelenkt) und Szenario (PKW vs. Radfahrer). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Tabelle 9-7. Mittelwert und Standardabweichung des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [deg/s] in Abhängigkeit von Warnung (oVW vs. Ton + HUD), Fahrerszustand (aufmerksam vs. abgelenkt) und Szenario (PKW vs. Radfahrer).

Szenario	Warnung			
	oVW		Ton + HUD	
	aufmerksam	abgelenkt	aufmerksam	abgelenkt
PKW	200.40 (45.32)	201.99 (58.78)	176.31 (90.70)	166.61 (49.88)
Radfahrer	186.93 (40.50)	258.10 (59.96)	189.99 (70.38)	222.88 (23.93)

Die Betrachtung in Abhängigkeit der Reaktionsmuster (vgl. Abbildung 9-13) deutet darauf hin, dass abgelenkte Fahrer vor allem bei den Reaktionsmustern initiales Dämpfen und Mitlenken eine höhere Lenkradwinkelgeschwindigkeit erreichten als aufmerksame Fahrer.

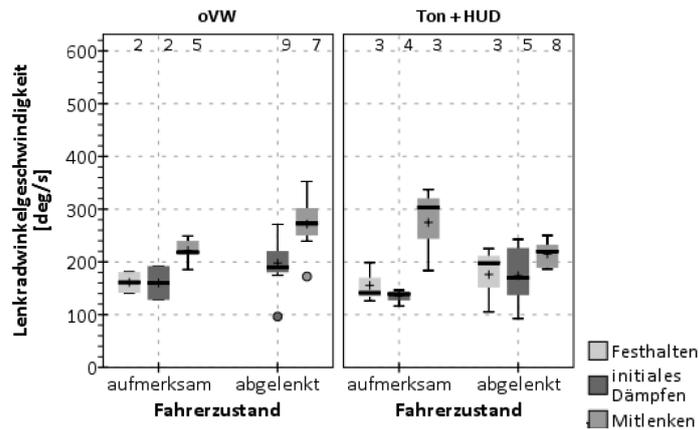


Abbildung 9-13. Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [deg/s] in Abhängigkeit von Fahrerzustand (aufmerksam vs. abgelenkt), Reaktionsmuster (Festhalten, initiales Dämpfen, Mitlenken) und Warnung (oVW vs. Ton + HUD). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums Die univariaten Varianzanalysen ergaben keinen signifikanten Einfluss des Szenarios ($F(1, 43) = .237, p = .629, \eta^2 = .005$), der Ablenkung ($F(1, 43) = 1.365, p = .249, \eta^2 = .031$) oder der Warnung ($F(1, 43) = 1.106, p = .299, \eta^2 = .025$) auf das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit. Der Einfluss der Interaktion zwischen Szenario und Ablenkung wurde ebenfalls nicht signifikant ($F(1, 43) = .938, p = .338, \eta^2 = .021$). Im Mittel wurde das erste Lenkradwinkelmaximum unabhängig von Szenario, Fahrerzustand oder Warnung zwischen 0.25 s und 0.3 s erreicht (vgl. Abbildung 9-14 und Tabelle 9-8). Damit fällt es in den Zeitbereich, in dem aufgrund der Eingriffsgestaltung die maximale Lenkradwinkelgeschwindigkeit zu erwarten ist (ca. 0.27 s).

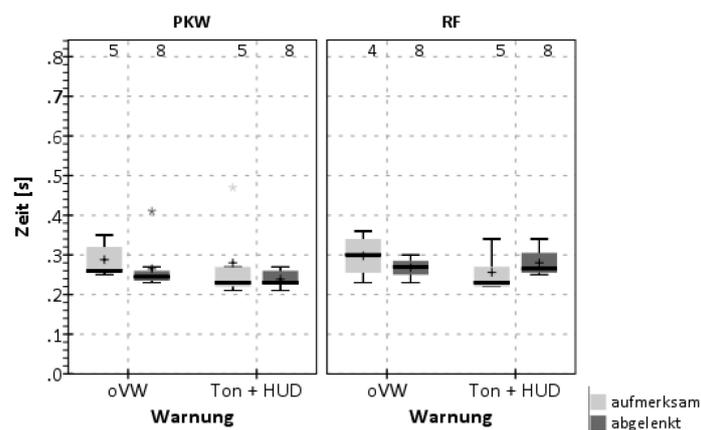


Abbildung 9-14. Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [s] in Abhängigkeit von Warnung (oVW vs. Ton + HUD), Fahrerzustand (aufmerksam vs. abgelenkt) und Szenario (PKW vs. Radfahrer). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Tabelle 9-8. Mittelwert und Standardabweichung der Dauer bis zum Erreichen ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [s] in Abhängigkeit von Warnung (oVW vs. Ton + HUD), Fahrertzustand (aufmerksam vs. abgelenkt) und Szenario (PKW vs. Radfahrer).

Szenario	Warnung			
	oVW		Ton + HUD	
	aufmerksam	abgelenkt	aufmerksam	abgelenkt
PKW	0.29 (0.04)	0.27 (0.06)	0.28 (0.11)	0.24 (0.02)
Radfahrer	0.30 (0.06)	0.27 (0.02)	0.26 (0.38)	0.28 (0.03)

Die Betrachtung in Abhängigkeit der Reaktionsmuster (vgl. Abbildung 9-15) deutet ebenfalls nicht auf einen Einfluss des Szenarios, des Fahrertzustands oder der Warnung hin. Allerdings zeigt sich tendenziell, dass das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit von aufmerksamen Fahrern, die das Verhaltensmuster Mitlenken zeigten, später erreicht wurde als von abgelenkten Fahrern.

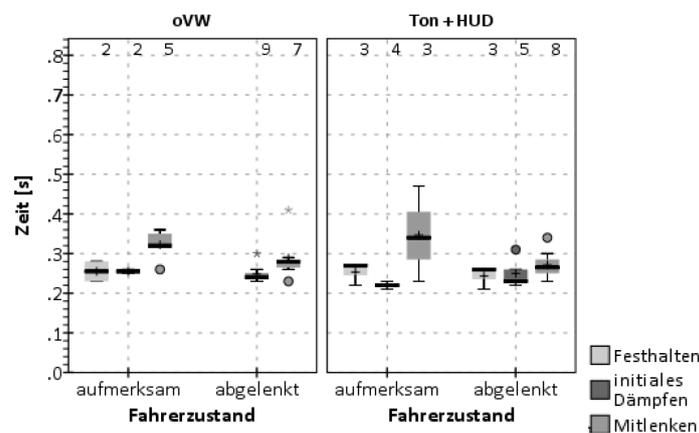


Abbildung 9-15. Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [s] in Abhängigkeit von Fahrerzustand (aufmerksam vs. abgelenkt), Reaktionsmuster (Festhalten, initiales Dämpfen, Mitlenken) und Warnung (oVW vs. Ton + HUD). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Zeitpunkt der Mitlenkentscheidung

Für die Analyse der Mitlenkentscheidung wurden nur Fahrer berücksichtigt, bei denen das Reaktionsmuster initiales Dämpfen identifiziert wurde. Aufgrund der geringen Fallzahlen wurden die Daten aus den beiden Szenarien zusammengefasst (vgl. Abbildung 9-16 links). Um den Einfluss des Szenarios zu verdeutlichen, sind die Daten dennoch getrennt nach den Szenarien dargestellt (vgl. Abbildung 9-16 rechts). Auf eine inferenzstatische Analyse wurde wegen der geringen Fallzahlen ebenfalls verzichtet.

Deskriptiv finden sich Hinweise darauf, dass abgelenkte Fahrer später eine Mitlenkentscheidung zeigten als aufmerksame Fahrer (vgl. Abbildung 9-16). Dies zeigt sich sowohl für Eingriffe ohne vorgelagerte Warnung ($M_{\text{aufmerksam}} = 0.34 \text{ s}$, $SD_{\text{aufmerksam}} = 0.05 \text{ s}$; $M_{\text{abgelenkt}} = 0.42 \text{ s}$, $SD_{\text{abgelenkt}} = 0.06 \text{ s}$) als auch für Eingriffe mit vorgelagerter visuell-akustischer Warnung ($M_{\text{aufmerksam}} = 0.33 \text{ s}$, $SD_{\text{aufmerksam}} = 0.03 \text{ s}$; $M_{\text{abgelenkt}} = 0.41 \text{ s}$, $SD_{\text{abgelenkt}} = 0.11 \text{ s}$). Allerdings sind die Unterschiede sehr gering und möglicherweise durch die Daten aus dem Szenario Radfahrer verzerrt. Da diese Tendenz allerdings auch im Szenario PKW zu beobachten ist, könnte dies möglicherweise Hinweis auf die verzögerte Mitlenkentscheidung abgelenkter Fahrer im Nutzenfall sein (vgl. Hypothese 9-1).

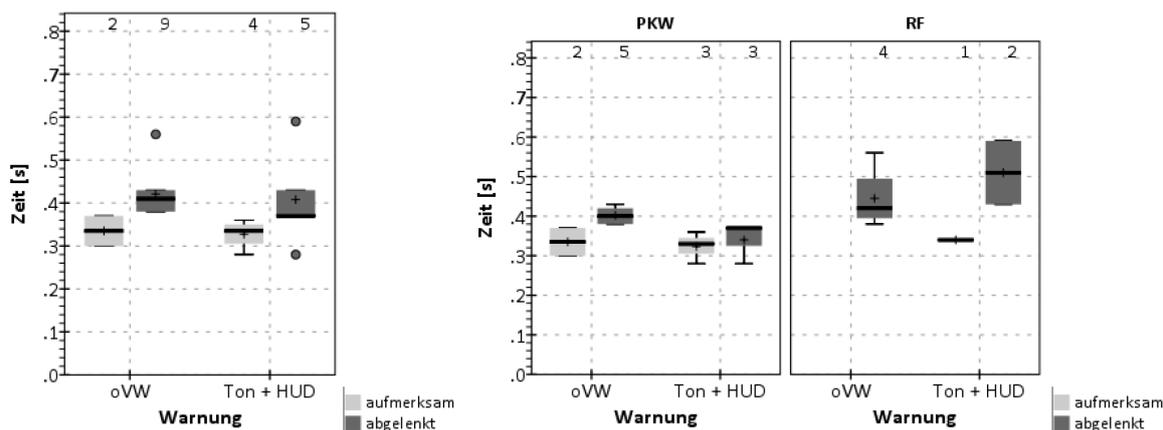


Abbildung 9-16. Zeitpunkt der Mitlenkentscheidung [s] in Abhängigkeit von Warnung (oVW vs. Ton + HUD), Fahrertzustand (aufmerksam vs. abgelenkt) und Szenario (PKW vs. Radfahrer). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

9.4.2 Fehlerfall

Reaktionsmuster Aufmerksame Fahrer zeigten im Fehlerfall häufiger das Reaktionsmuster Festhalten als abgelenkte Fahrer, unabhängig davon, ob der Eingriff mit (Ton + HUD) oder ohne vorgelagerte Warnung (oVW) dargeboten wurde (vgl. Abbildung 9-17). Das Reaktionsmuster Festhalten zeigten ohne vorgelagerte Warnung (oVW) 75% der aufmerksamen Fahrer und 13% der abgelenkten Fahrer. Mit vorgelagerter Warnung (Ton + HUD) ist der Unterschied geringer, allerdings zeigten aufmerksame Fahrer auch hier häufiger das Reaktionsmuster Festhalten (30%) als abgelenkte Fahrer (19%). Zudem fällt auf, dass bei abgelenkten Fahrern ein hoher Anteil des Reaktionsmusters Mitlenken vorliegt, unabhängig davon, ob eine vorgelagerte Warnung dargeboten wurde oder nicht. Aufmerksame Fahrer zeigten in der Mehrheit der Fälle eine zusätzliche Bremsreaktion (oVW: 75%; Ton + HUD: 100%). Abgelenkte Fahrer zeigten tendenziell seltener eine Bremsreaktion als aufmerksame Fahrer (oVW: 80%; Ton + HUD: 87.5%).

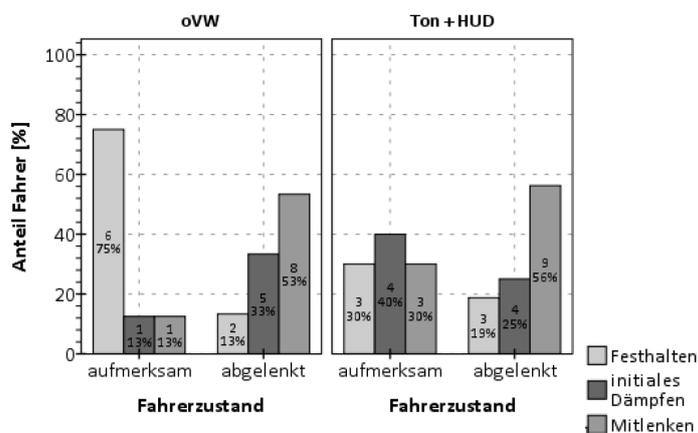


Abbildung 9-17. Häufigkeit der Reaktionsmuster Festhalten, initiales Dämpfen und Mitlenken im Fehlerfall in Abhängigkeit von Fahrertzustand (aufmerksam vs. abgelenkt) und Warnung (oVW vs. Ton + HUD).

Um den Einfluss der Ablenkung und der vorgelagerten Warnung auf die Kennwerte des Lenkverhaltens inferenzstatistisch zu überprüfen, wurde eine multivariate Varianzanalyse berechnet. Der Omnibus-Test ergab einen signifikanten Einfluss der Ablenkung (Wilks Lambda, $F(5, 41) = 2.916$, $p = .024$, $\eta^2 = .262$). Der Einfluss der Warnung war nicht signifikant (Wilks Lambda, $F(5, 41) = 0.755$, $p = .587$, $\eta^2 = .084$). Auf die Ergebnisse der univariaten Varianzanalysen wird bei der Beschreibung der einzelnen Kennwerte eingegangen.

Maximaler Spurversatz Die univariaten Varianzanalysen ergaben keinen signifikanten Einfluss der Warnung ($F(1, 45) = 0.543$, $p = .465$, $\eta^2 = .012$) oder der Ablenkung ($F(1, 45) = 0.543$, $p = .465$, $\eta^2 = .012$) auf den maximalen Spurversatz. Die Interaktion der beiden Faktoren hatte ebenfalls keinen signifikanten Einfluss. Deskriptiv zeigt sich, dass abgelenkte Fahrer in der Bedingung ohne vorgelagerte Warnung (oVW) im Mittel ($M_{\text{abgelenkt}} = 0.73$ m, $SD_{\text{abgelenkt}} = 0.42$ m) einen größeren Spurversatz erzeugten als aufmerksame Fahrer ($M_{\text{aufmerksam}} = 0.51$ m, $SD_{\text{aufmerksam}} = 0.46$ m). Mit vorgelagerter visuell-akustischer Warnung (Ton + HUD) ist deskriptiv kein Unterschied zwischen aufmerksamen ($M_{\text{aufmerksam}} = 0.67$ m, $SD_{\text{aufmerksam}} = 0.35$ m) und abgelenkten ($M_{\text{abgelenkt}} = 0.76$ m, $SD_{\text{abgelenkt}} = 0.52$ m) Fahrern zu erkennen (vgl. Abbildung 9-18). In allen Bedingungen fiel der maximale Spurversatz jedoch geringer aus als vom Eingriff angestrebt (ca. 1.75 m).

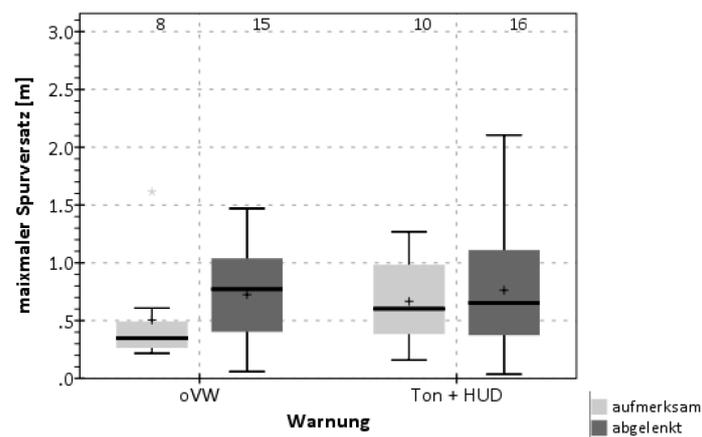


Abbildung 9-18. Maximaler Spurversatz [m] in Abhängigkeit von Fahrertzustand (aufmerksam vs. abgelenkt) und Warnung (oVW vs. Ton + HUD) im Fehlerfall. Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Die Betrachtung in Abhängigkeit der gezeigten Reaktionsmuster deutet darauf hin, dass die Unterschiede zwischen abgelenkten und aufmerksamen Fahrern vor allem in Folge des Reaktionsmusters initiales Dämpfen auftraten (vgl. Abbildung 9-19). Bei den Reaktionsmustern Festhalten und Mitlenken waren hingegen keine eindeutigen Unterschiede zwischen aufmerksamen und abgelenkten Fahren zu beobachten.

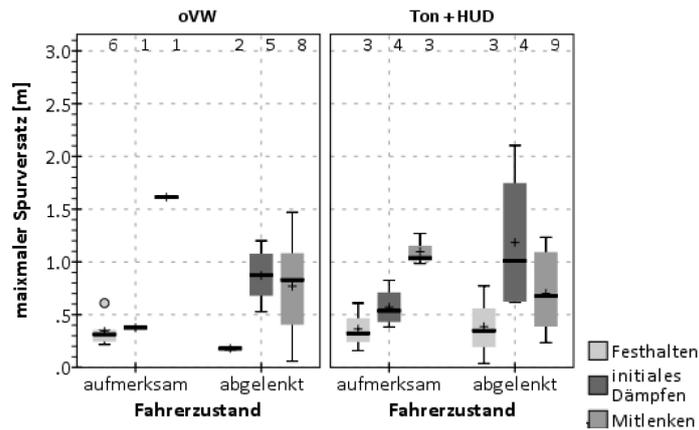


Abbildung 9-19. Maximaler Spurversatz [m] in Abhängigkeit von Fahrerzustand (aufmerksam vs. abgelenkt) und Warnung (oVW vs. Ton + HUD) und Reaktionsmuster (Festhalten, initiales Dämpfen, Mitlenken). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Erstes Lenkradwinkelmaximum Die univariaten Varianzanalysen ergaben keinen signifikanten Einfluss der Warnung ($F(1, 45) = 1.116, p = .296, \eta^2 = .024$) oder der Ablenkung ($F(1, 45) = 1.288, p = .262, \eta^2 = .028$) auf das erste Lenkradwinkelmaximum. Allerdings ergab sich ein signifikanter Einfluss der Interaktion beider Faktoren ($F(1, 45) = 4.511, p = .039, \eta^2 = .091$). Im Mittel fiel das erste Lenkradwinkelmaximum bei aufmerksamen Fahrern in der Bedingung ohne vorgelagerte Warnung (oVW) geringer aus als bei abgelenkten Fahrern ($M_{\text{aufmerksam}} = 33.06, SD_{\text{aufmerksam}} = 22.26; M_{\text{abgelenkt}} = 55.55, SD_{\text{abgelenkt}} = 20.76$). In der Bedingung mit vorgelagerter visuell-akustischer Warnung (Ton + HUD) zeigte sich dieser Unterschied hingegen nicht ($M_{\text{aufmerksam}} = 55.01, SD_{\text{aufmerksam}} = 27.40; M_{\text{abgelenkt}} = 48.18, SD_{\text{abgelenkt}} = 23.02$), wie in Abbildung 9-20 zu sehen ist. In allen Bedingungen fiel das erste Lenkradwinkelmaximum geringer aus als in Folge des Systemeingriffs zu erwarten gewesen wäre (ca. 75°).

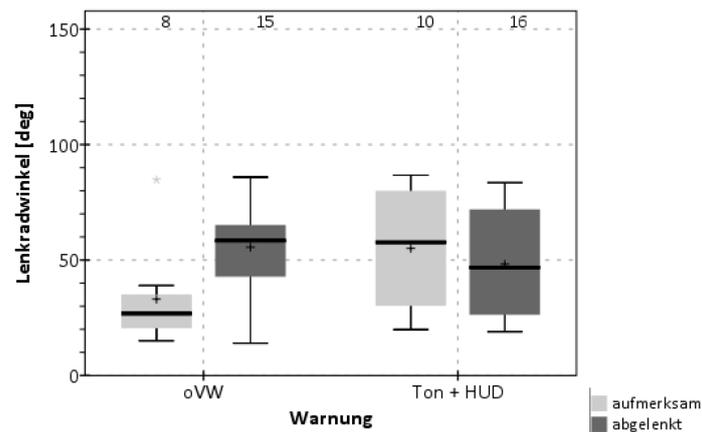


Abbildung 9-20. Erstes Lenkradwinkelmaximum [deg] in Abhängigkeit von Fahrerzustand (aufmerksam vs. abgelenkt) und Warnung (oVW vs. Ton + HUD) im Fehlerfall. Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Die Betrachtung in Abhängigkeit der gezeigten Reaktionsmuster (vgl. Abbildung 9-21) liefert allerdings keine weiteren Hinweise, worauf der Unterschied zwischen aufmerksamen und abgelenkten Fahrern zurückzuführen ist. Möglicherweise ist der Unterschied eine Folge davon, dass bei aufmerksamen Fahrern in der Bedingung ohne vorgelagerte Warnung (oVW) die Reaktionsmuster initiales Dämpfen und Mitlenken deutlich seltener beobachtet wurden als bei abgelenkten Fahrern oder in der Bedingung mit vorgelagerter visuell-akustischer Warnung (Ton + HUD).

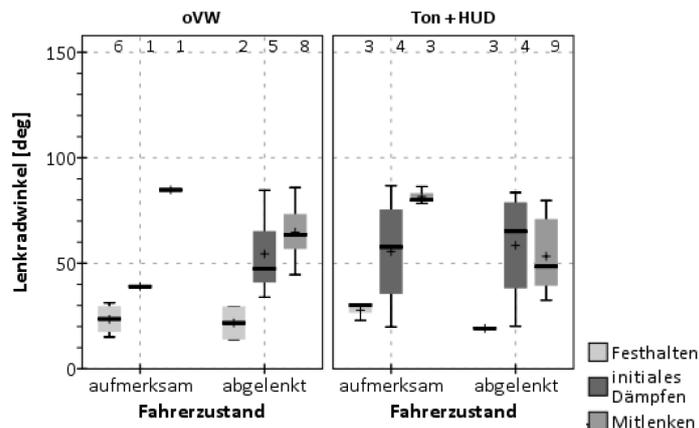


Abbildung 9-21. Erstes Lenkradwinkelmaximum [deg] in Abhängigkeit von Fahrerzustand (aufmerksam vs. abgelenkt), Warnung (oVW vs. Ton + HUD) und Reaktionsmuster (Festhalten, initiales Dämpfen, Mitlenken). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Deskriptiv wurde das erste Lenkradwinkelmaximum in der Bedingung ohne vorgelagerte Warnung (oVW) bei aufmerksamen Fahrern früher beobachtet als bei abgelenkten Fahrern ($M_{\text{aufmerksam}} = 0.40 \text{ s}$, $SD_{\text{aufmerksam}} = 0.07 \text{ s}$; $M_{\text{abgelenkt}} = 0.48 \text{ s}$, $SD_{\text{abgelenkt}} = 0.11 \text{ s}$), was im Widerspruch zu Hypothese 9-2 steht. In der Bedingung mit vorgelagerter visuell-akustischer Warnung (Ton + HUD) ist deskriptiv kein eindeutiger Unterschied zu erkennen ($M_{\text{aufmerksam}} = 0.52 \text{ s}$, $SD_{\text{aufmerksam}} = 0.12 \text{ s}$; $M_{\text{abgelenkt}} = 0.48 \text{ s}$, $SD_{\text{abgelenkt}} = 0.12 \text{ s}$). Die univariaten Varianzanalysen ergaben keinen signifikanten Einfluss der Warnung ($F(1, 45) = 3.825$, $p = .057$, $\eta^2 = .078$) oder des Fahrerzustands ($F(1, 45) = 0.537$, $p = .468$, $\eta^2 = .012$) auf die Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums. Tendenziell wurde das erste Lenkradwinkelmaximum ohne vorgelagerte Warnung früher erreicht als mit vorgelagerter visuell-akustischer Warnung. Insgesamt zeigt sich, dass aufmerksame Fahrer ohne vorgelagerte Warnung das Lenkradwinkelmaximum tendenziell früher erreichten, als es in Folge der Eingriffsgestaltung zu erwarten gewesen wäre (ca. 0.5 s). Bei abgelenkten Fahrern und in der Bedingung mit vorgelagerter visuell-akustischer Warnung wurde das Lenkradwinkelmaximum hingegen in etwa zu dem Zeitpunkt erreicht, an dem es aufgrund der Eingriffsgestaltung zu erwarten war. Dies steht im Widerspruch zu Hypothese 9-2.

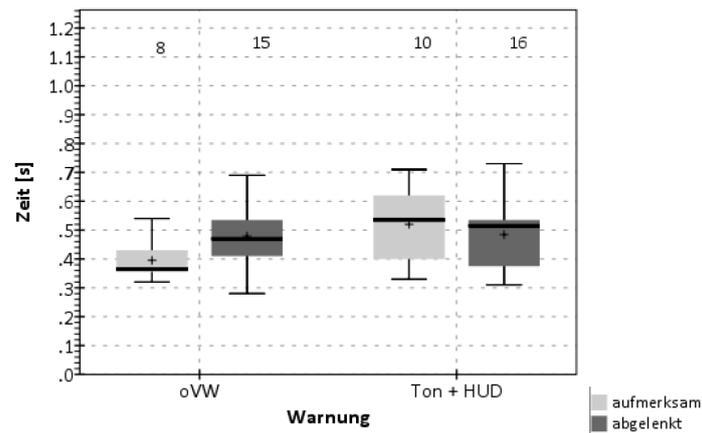


Abbildung 9-22. Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums [s] in Abhängigkeit von Fahrertzustand (aufmerksam vs. abgelenkt) und Warnung (oVW vs. Ton + HUD) im Fehlerfall. Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Die Betrachtung in Abhängigkeit der gezeigten Reaktionsmuster verdeutlicht den Einfluss der vorgelagerten Warnung (vgl. Abbildung 9-23). Vor allem bei den Reaktionsmustern Festhalten und initiales Dämpfen wurde das erste Lenkradwinkelmaximum mit vorgelagerter visuell-akustischer Warnung (Ton + HUD) tendenziell später erreicht als ohne vorgelagerte Warnung (oVW). Ein Einfluss des Fahrertzustands ist nicht zu erkennen.

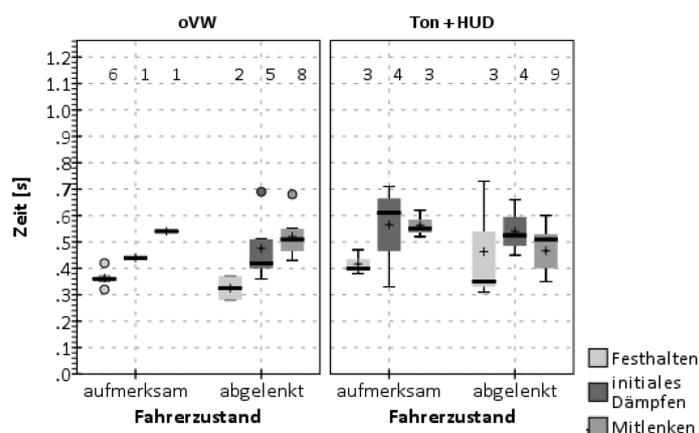


Abbildung 9-23. Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums [s] in Abhängigkeit von Fahrertzustand (aufmerksam vs. abgelenkt) und Warnung (oVW vs. Ton + HUD) und Reaktionsmuster (Festhalten, initiales Dämpfen, Mitlenken). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit Die univariaten Varianzanalysen ergaben einen signifikanten Einfluss der Ablenkung auf das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit ($F(1, 45) = 8.786, p = .005, \eta^2 = .163$). Die Warnung hatte hingegen keinen signifikanten Einfluss ($F(1, 45) = .060, p = .807, \eta^2 = .001$). Im Mittel fiel das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit bei abgelenkten Fahrern höher aus als bei aufmerksamen Fahrern (vgl. Abbildung 9-24).

Dieser Effekt ist in der Bedingung ohne vorgelagerte Warnung tendenziell stärker ausgeprägt ($M_{\text{aufmerksam}} = 162.07 \text{ }^\circ/\text{s}$, $SD_{\text{aufmerksam}} = 65.04 \text{ }^\circ/\text{s}$; $M_{\text{abgelenkt}} = 257.12 \text{ }^\circ/\text{s}$, $SD_{\text{abgelenkt}} = 65.32 \text{ }^\circ/\text{s}$) als mit vorgelagerter visuell-akustischer Warnung ($M_{\text{aufmerksam}} = 199.69 \text{ }^\circ/\text{s}$, $SD_{\text{aufmerksam}} = 75.34 \text{ }^\circ/\text{s}$; $M_{\text{abgelenkt}} = 229.89 \text{ }^\circ/\text{s}$, $SD_{\text{abgelenkt}} = 75.92 \text{ }^\circ/\text{s}$).

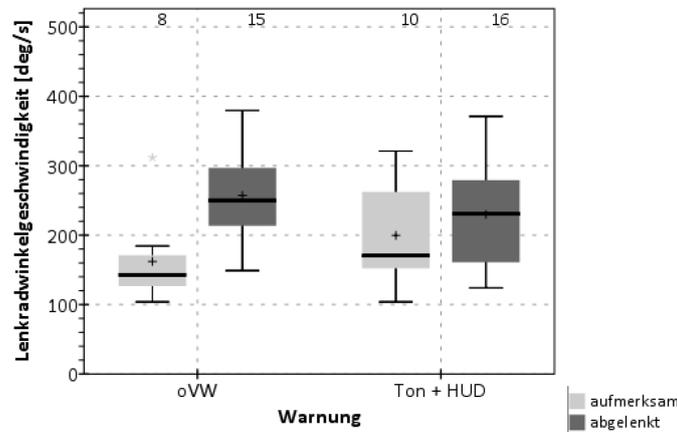


Abbildung 9-24. Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [deg/s] in Abhängigkeit von Fahrertzustand (aufmerksam vs. abgelenkt) und Warnung (oVW vs. Ton + HUD) im Fehlerfall. Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Die Betrachtung in Abhängigkeit der gezeigten Reaktionsmuster (vgl. Abbildung 9-25) deutet ebenfalls darauf hin, dass das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit bei aufmerksamen Fahrern höher ausfiel als bei abgelenkten Fahrern. In der Bedingung ohne vorgelagerte Warnung (oVW) zeigt sich dies auch beim Reaktionsmuster Festhalten. In der Bedingung mit vorgelagerter visuell-akustischer Warnung zeigt sich dies vor allem bei dem Reaktionsmuster initiales Dämpfen.

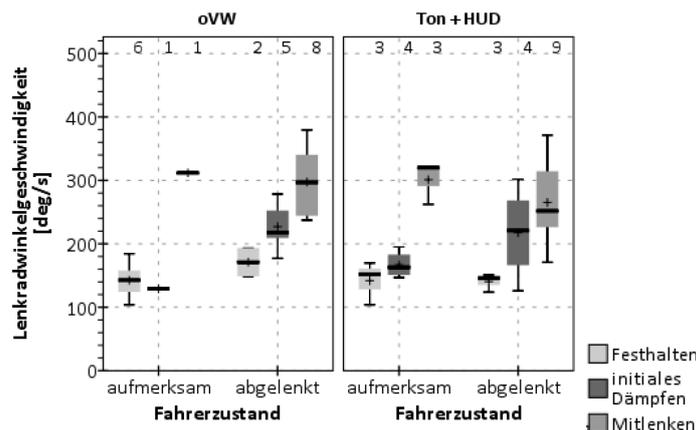


Abbildung 9-25. Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [deg/s] in Abhängigkeit von Fahrertzustand (aufmerksam vs. abgelenkt) und Warnung (oVW vs. Ton + HUD) und Reaktionsmuster (Festhalten, initiales Dämpfen, Mitlenken). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Die univariaten Varianzanalysen ergaben keinen signifikanten Einfluss des Fahrertzustands ($F(1, 45) = 3.496$, $p = .068$, $\eta^2 = .072$) oder der Warnung ($F(1, 45) = .015$, $p = .904$, $\eta^2 = .00$) auf die Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit.

Deskriptiv zeigt sich hingegen tendenziell ein Einfluss des Fahrerzustands (vgl. Abbildung 9-26). Das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit wurde in der Bedingung ohne vorgelagerte Warnung (oVW) von aufmerksamen Fahrern im Mittel tendenziell früher erreicht als von abgelenkten Fahrern ($M_{\text{aufmerksam}} = 0.25 \text{ s}$, $SD_{\text{aufmerksam}} = 0.02 \text{ s}$; $M_{\text{abgelenkt}} = 0.30 \text{ s}$, $SD_{\text{abgelenkt}} = 0.06 \text{ s}$). In der Bedingung mit vorgelagerter visuell-akustischer Warnung (Ton + HUD) ist hingegen kein eindeutiger Unterschied zu erkennen ($M_{\text{aufmerksam}} = 0.27 \text{ s}$, $SD_{\text{aufmerksam}} = 0.05 \text{ s}$; $M_{\text{abgelenkt}} = 0.27 \text{ s}$, $SD_{\text{abgelenkt}} = 0.03 \text{ s}$).

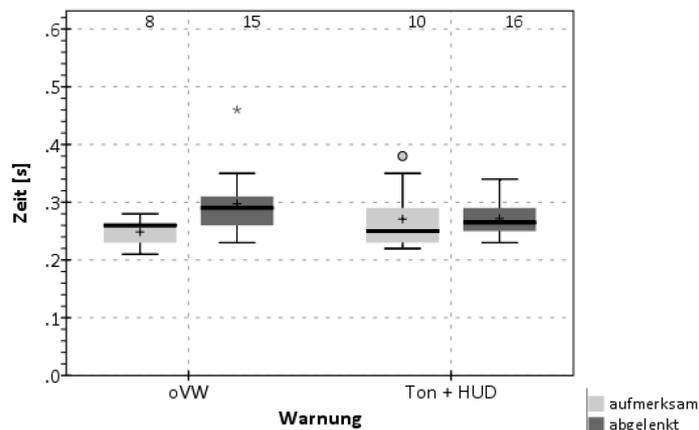


Abbildung 9-26. Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [s] in Abhängigkeit von Fahrerzustand (aufmerksam vs. abgelenkt) und Warnung (oVW vs. Ton + HUD) im Fehlerfall. Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Die Betrachtung in Abhängigkeit der gezeigten Reaktionsmuster (vgl. Abbildung 9-27) deutet darauf hin, dass der Unterschied in der Bedingung ohne vorgelagerte Warnung vor allem auf das Reaktionsmuster Mitlenken zurückzuführen ist. Bei dem Reaktionsmuster Festhalten sind im Mittel hingegen keine eindeutigen Unterschiede zwischen aufmerksamen und abgelenkten Fahrern zu beobachten, was tendenziell Hypothese 9-2 bestätigt.

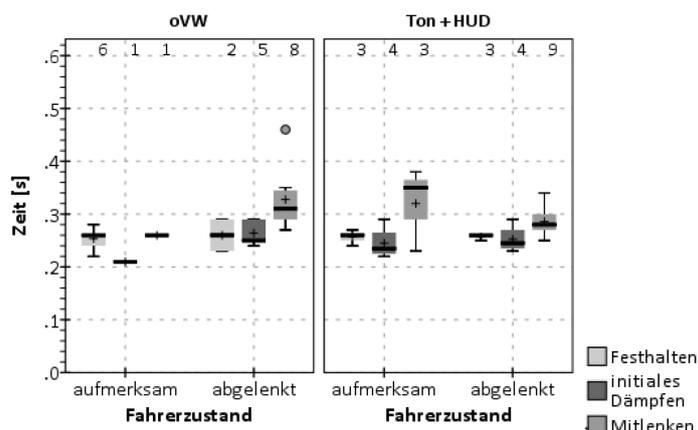


Abbildung 9-27. Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [s] in Abhängigkeit von Fahrerzustand (aufmerksam vs. abgelenkt) und Warnung (oVW vs. Ton + HUD) und Reaktionsmuster (Festhalten, initiales Dämpfen, Mitlenken). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

9.5 Diskussion

9.5.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Nutzenfall ergab sich kein eindeutiges Muster. Im Szenario PKW konnten aufmerksame Fahrer die Kollision mit dem Hindernis häufiger vermeiden als abgelenkte Fahrer. Im Szenario Radfahrer dreht sich dieses Verhältnis hingegen um. Dies zeigt sich auch bei der Betrachtung weiterer Kennwerte des Fahrerverhaltens, wie z. B. dem Spurversatz oder dem Lenkradwinkel. Insgesamt deuten die Ergebnisse auf einen starken Einfluss des Untersuchungsszenarios hin. Der Einfluss der Ablenkung ist hingegen sehr gering, sodass Hypothese 9-1 nicht bestätigt werden kann. Allerdings liefert die deskriptive Analyse des Zeitpunkts der Mitlenkentscheidung Hinweise darauf, dass abgelenkte Fahrer die Mitlenkentscheidung ca. 50-100 ms später treffen als aufmerksame Fahrer. Aufgrund der geringen Fallzahlen ist dieses Ergebnis jedoch nicht belastbar, würde jedoch Hypothese 9-1 bestätigen.

Im Fehlerfall deuten die Ergebnisse darauf hin, dass abgelenkte Fahrer den unberechtigten Systemeingriff tendenziell schlechter kontrollieren können als aufmerksame Fahrer. Dies zeigte sich vor allem darin, dass abgelenkte Fahrer im Fehlerfall tendenziell einen höheren Spurversatz erzeugten als aufmerksame Fahrer. Dies spiegelt sich auch im Lenkerverhalten wider. Beispielsweise wurden bei abgelenkten Fahrern tendenziell häufiger die Reaktionsmuster initiales Dämpfen und Mitlenken identifiziert als bei aufmerksamen Fahrern. Dies liegt wahrscheinlich vor allem an den Unterschieden in der Lenkradwinkelgeschwindigkeit. Allerdings ist kein eindeutiger Einfluss des Fahrerzustands auf den zeitlichen Ablauf der Fahrerreaktion zu beobachten. Aufgrund der Befunde können jedoch weder Hypothese 9-2 noch Hypothese 9-3 eindeutig bestätigt oder widerlegt werden.

In der folgenden Tabelle werden die in Abschnitt 9.2 getroffenen Hypothesen nochmals zusammenfassend dargestellt. Dabei wird gekennzeichnet ob die Hypothesen bestätigt werden können oder die Befundlage den Hypothesen widerspricht. Finden sich sowohl Belege, welche die Hypothese bestätigen als auch Belege, welche der Hypothese widersprechen wird darauf hingewiesen, dass die Befundlage uneindeutig ist.

Tabelle 9-9. Zusammenfassende Darstellung der Befundlage bezogen auf die Hypothesen.

Hypothese		
Hypothese 9-1:	Die visuelle Ablenkung verzögert die Handlungsentscheidung des Fahrers im Nutzenfall und führt zu einer geringeren Wirksamkeit.	Befunde nicht belastbar
Hypothese 9-2:	Die visuelle Ablenkung hat keinen Einfluss auf das initiale Reaktionsmuster der Fahrer im Fehlerfall.	uneindeutig
Hypothese 9-2:	Die visuelle Ablenkung hat keinen Einfluss auf das initiale Reaktionsmuster der Fahrer im Fehlerfall.	uneindeutig

9.5.2 Diskussion

Mithilfe der visuellen Ablenkung des Fahrers wurde versucht, gezielt Einfluss auf die Verarbeitungsgeschwindigkeit des visuellen Regelkreises auszuüben. Damit sollte überprüft werden, ob das initiale Reaktionsmuster primär eine Folge sensomotorischer Kontrollprozesse ist oder ob es durch visuelle Kontrollprozesse zu erklären ist.

Für den Nutzenfall wurde erwartet, dass es bei einer visuellen Ablenkung der Fahrer länger dauert, bis der Lenkeingriff aufgenommen wird (vgl. Hypothese 9-1). Zusätzlich sollte die initiale Reaktion im Falle einer Ablenkung auf eine Dämpfung oder ein Festhalten des Eingriffs hinweisen. Im Fehlerfall wurde erwartet, dass keine Unterschiede im Reaktionsmuster zwischen aufmerksamen und abgelenkten Fahrern bestehen (vgl. Hypothese 9-2). Da angenommen wird, dass die Reaktion der Fahrer vor allem eine Folge der sensomotorischen Kontrollprozesse ist, sollte sich die visuelle Ablenkung nicht auf das Reaktionsmuster der Fahrer im Fehlerfall auswirken.

Im Nutzenfall zeigte sich kein eindeutiges Reaktionsmuster in Abhängigkeit des Fahrerzustands. Im Szenario PKW wirkte sich die visuelle Ablenkung überwiegend wie erwartet aus. Das Lenkverhalten der abgelenkten Fahrer deutet darauf hin, dass die abgelenkten Fahrer den Eingriff stärker abdämpften als aufmerksame Fahrer, was sich auch auf die Wirksamkeit auswirkte. Abgelenkte Fahrer kollidierten tendenziell häufiger mit dem Hindernis als aufmerksame Fahrer. Allerdings ändert sich dieses Verhältnis im Szenario Radfahrer. Insgesamt zeigt sich ein starker Einfluss des Untersuchungsszenarios auf das Reaktionsmuster der Fahrer, daher kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Unterschiede zwischen abgelenkten und aufmerksamen Fahrern eine Folge der unterschiedlichen Gestaltung der Untersuchungsszenarien sind. Dennoch findet sich bei der Analyse des Zeitpunkts der Mitlenkentscheidung ein Hinweis, der die Annahme bestätigt, dass die visuelle Ablenkung die Handlungsentscheidung verzögert (Hypothese 9-1): Abgelenkte Fahrer, die das Reaktionsmuster initiales Dämpfen zeigten, brauchten länger, um die Lenkbewegung wieder aufzugreifen, als nicht abgelenkte Fahrer. Aufgrund der geringen Fallzahlen und des starken Einflusses der Untersuchungsszenarien kann jedoch nicht mit Sicherheit davon ausgegangen werden.

Auch im Fehlerfall fielen die Unterschiede zwischen abgelenkten und aufmerksamen Fahrer nicht wie erwartet aus. Insgesamt wird deutlich, dass abgelenkte Fahrer häufiger als Mitlenker klassifiziert wurden als aufmerksame Fahrer. Bezogen auf die Annahme, dass die Reaktion des Fahrers haptisch getriggert wird, würde das bedeuten, dass unberechtigte Eingriffe nicht automatisch zu einer haptisch getriggerten Gegenreaktion der Fahrer führen, sondern dass hierzu auch visuelle Informationen erforderlich sind. Damit wäre der sensomotorische Kontrollprozess nicht so bedeutsam für die initiale Reaktion der Fahrer wie bisher angenommen. Allerdings ist zu beachten, dass die abgelenkten Fahrer in Folge der Nebenaufgabe nur eine Hand am Lenkrad hatten. Möglicherweise sind die Unterschiede daher sowohl eine Folge der Handhaltung als auch des Vorgehens bei der Klassifikation. Fällt die Dämpfung bei einhändiger Handhaltung insgesamt geringer aus, obwohl das zeitliche Reaktionsmuster unverändert bleibt, könnte sich das vor allem auf die Lenkradwinkelgeschwindigkeit und damit auch auf den resultierenden Lenkradwinkel und den Spurversatz auswirken. Dies wird durch die verwendete Klassifikation nicht berücksichtigt. Möglicherweise wäre hier auch eine Anpassung der Klassifikation erforderlich. In dieser Studie wurde allerdings darauf verzichtet, da es die Vergleichbarkeit der Ergebnisse erschweren würde. Anhand der vorliegenden Ergebnisse kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass die Handhaltung mitverantwortlich für die beobachteten Unterschiede ist.

9.5.3 Schlussfolgerung

Anhand der vorliegenden Ergebnisse kann nicht zwischen dem Einfluss der Handhaltung und dem Einfluss der Ablenkung unterschieden werden. Um den Einfluss der Ablenkung besser einschätzen zu können (vgl. Forschungsfrage 9-1), ist es erforderlich zu untersuchen, wie sich die Handhaltung der Fahrer auf das Reaktionsmuster der Fahrer auswirkt. Dazu wird im Folgenden eine Studie berichtet, bei der Handhaltung der Fahrer gezielt manipuliert wurde.

10 Studie VI: Einfluss der Handhaltung auf das Fahrerverhalten

10.1 Herleitung der Forschungsfragen

In der vorangegangenen Studie zur visuellen Ablenkung (vgl. Kapitel 9) wurden zum Teil Unterschiede in den Kennwerten des Lenkverhaltens beobachtet. Aufgrund der Umsetzung der Nebenaufgabe hatten die Fahrer in der Ablenkungsbedingung jedoch nur eine Hand am Lenkrad, während die Fahrer in den anderen Studien stets instruiert wurden, das Lenkrad mit beiden Händen zu bedienen.

In der Literatur finden sich bisher keine Angaben über die Auswirkungen der Handhaltung auf die Kennwerte des Lenkverhaltens in Folge eines automatischen Ausweicheingriffs. Zusätzlich lässt sich anhand der Studien nicht nachvollziehen, wie die Fahrer bezüglich der Handhaltung instruiert wurden oder wie die Fahrer das Lenkrad bedienen (vgl. Bräuchle et al., 2013; Fricke et al., 2015b; Gußner et al., 2015; Hesse et al., 2013; Kleen & Schmidt, 2009; Schieben et al., 2014). Auf Basis der Aussage von Neukum et al. (2009), dass sich die einhändige Lenkradhaltung als kritischste Variante für die Bewertung der Kontrollierbarkeit erwies, kann jedoch angenommen werden, dass die Lenkradhaltung deutliche Auswirkungen auf das Lenkverhalten der Fahrer in Folge von Eingriffen in die Querführung hat (vgl. Neukum et al., 2009). Das einhändige Fahren stellt dabei eine vertretbare „*worst-case*“-Bedingung für die Bewertung der Kontrollierbarkeit von unberechtigten Eingriffen dar. Grundsätzlich wären die Auswirkungen unberechtigter Eingriffe deutlich gravierender, wenn der Fahrer keine Hände am Lenkrad hat, allerdings wird in der Regel davon ausgegangen, dass Fahrer zur Steuerung des Fahrzeugs zumindest eine Hand am Lenkrad haben. Haben die Fahrer keine Hand am Lenkrad, kann sich der Eingriff so lange ungehindert auswirken, bis die Fahrer wieder ans Lenkrad greifen. Haben die Fahrer hingegen beide Hände am Lenkrad, haben sie die besten Voraussetzungen um auf unberechtigten Eingriffe zu reagieren. Damit betrifft die Aussage von Neukum et al. (2009) insbesondere die Bewertung der Kontrollierbarkeit von unberechtigten Eingriffen in die Querführung. Allerdings lassen sich diese Annahmen auch auf den Nutzenfall übertragen. Haben die Fahrer keine Hände am Lenkrad, könnte sich der Eingriff vollständig aufbauen, sodass die Wirksamkeit (im Falle eines Eingriffs mit einer Lenkmomentüberlagerung) nicht reduziert werden sollte. Haben die Fahrer hingegen beide Hände am Lenkrad, reagieren sie möglicherweise schneller oder bringen am Lenkrad höhere Kräfte auf, was sich nachteilig auf die Wirksamkeit des Eingriffs auswirken könnte. Die einhändige Handhaltung entspricht damit einem Kompromiss zwischen den beiden anderen Alternativen. Dabei besteht nach wie vor die Möglichkeit, dass die Fahrer auf den automatischen Ausweicheingriff reagieren. Gleichzeitig können sie möglicherweise nicht die gleichen Kräfte aufbringen, wie wenn sie das Lenkrad mit beiden Händen bedienen.

In der folgenden Studie soll daher untersucht werden, wie sich die Handhaltung (einhändig vs. zweihändig) auf die Kennwerte des Lenkverhaltens in Folge von berechtigten und unberechtigten Eingriffen in die Querführung auswirkt. Werden ähnliche Unterschiede wie in Studie V beobachtet, ist dies möglicherweise eine Erklärung für die beobachteten Unterschiede der Kennwerte in der Studie zur visuellen Ablenkung. Werden keine oder andersartige Unterschiede beobachtet, würde dies darauf hindeuten, dass die visuelle Ablenkung für die Unterschiede verantwortlich ist.

Im folgenden Kapitel werden die Annahmen in Forschungsfragen überführt und Hypothesen bezüglich der zu erwartenden Auswirkungen im Anwendungsfall aufgestellt.

10.2 Forschungsfragen

Die folgende Studie soll ergänzend zu Studie V die Frage beantworten, welche Auswirkungen die Handhaltung des Fahrers auf die auftretenden Reaktionsmuster hat (vgl. Forschungsfrage 10-1). Durch den Vergleich zwischen einhändiger und zweihändiger Lenkradhaltung soll dabei überprüft werden, ob sich die in Studie V beobachteten Befundmuster durch die Handhaltung oder die Wechselwirkung zwischen sensomotorischen und visuellen Kontrollprozessen erklären lassen.

Forschungsfrage 10-1: Welchen Einfluss hat die Handhaltung auf die Kennwerte und den zeitlichen Verlauf des Lenkverhaltens im Nutzen- und Fehlerfall?

Dazu werden zwei unterschiedliche Hypothesen aufgestellt. Zum einen wird vermutet, dass die einhändige Handhaltung die Kennwerte des Lenkverhaltens in ähnlicher Weise beeinflusst, wie im Falle der visuellen Ablenkung in Studie V (vgl. Hypothese 10-1). Das sollte auch dazu führen, dass mit einhändiger Handhaltung häufiger das Reaktionsmuster Mitlenken oder initiales Dämpfen beobachtet wird.

Hypothese 10-1: Die Handhaltung beeinflusst die Kennwerte des Lenkverhaltens im Nutzen- und Fehlerfall in ähnlicher Weise wie die visuelle Ablenkungsbedingung in Studie V.

Allerdings wird zusätzlich vermutet, dass die Handhaltung keinen Einfluss auf den zeitlichen Verlauf des Reaktionsmusters hat (vgl. Hypothese 10-2). Das bedeutet, dass der Zeitpunkt, an dem die Maxima von Lenkradwinkel und Lenkradwinkelgeschwindigkeit beobachtet werden, nicht von der Handhaltung beeinflusst wird.

Hypothese 10-2: Die Handhaltung hat keinen Einfluss auf den zeitlichen Verlauf des Lenkverhaltens im Nutzen- und Fehlerfall.

Auf Basis der Befunde soll abschließend die Frage beantwortet werden, ob der Einfluss der Handhaltung als Erklärung für die in Studie V beobachteten Unterschiede im Lenkverhalten herangezogen werden kann oder ob die visuelle Ablenkung dafür verantwortlich ist (vgl. Forschungsfrage 10-2).

Forschungsfrage 10-2: Kann der Einfluss der Handhaltung zusätzlich als Erklärung für die in Studie V beobachteten Unterschiede im Lenkverhalten herangezogen werden?

10.3 Methodik

10.3.1 Stichprobe

Alle Teilnehmer/innen der Studie entstammten dem Testfahrerpanel der WIVW GmbH und waren durch ein standardisiertes Training an das Fahren im dynamischen Fahrsimulator gewöhnt. Zusätzlich wurde darauf geachtet, dass die Fahrer nicht bereits an vergleichbaren Studien zu automatischen Ausweicheingriffen teilgenommen haben um Lern- und Übertragungseffekte auszuschließen. Insgesamt nahmen 20 Probanden/innen an der Studie teil (davon 10 weiblich). Das mittlere Alter betrug 34.8 Jahre ($min = 22$; $max = 64$). Die mittlere jährliche Fahrleistung lag bei 9864 km ($sd = 9540$ km). Für die Teilnahme an der Studie wurden die Fahrer/innen finanziell entschädigt.

10.3.2 Gestaltung der Szenarien

Die Versuchsstrecke bestand aus fünf Testszenarien und mehreren Füllszenarien. Ein Szenario wurde zur Untersuchung des Nutzenfalls implementiert, die verbleibenden vier Szenarien dienten der Untersuchung des Fehlerfalls. Im Nutzenfall fuhr ein Radfahrer von rechts hinter einer Verdeckung auf den Fahrstreifen des Fahrers und hielt an, nachdem er ca. 1.75 m in den Fahrstreifen hineinragte (vgl. Abbildung 10-1). Der Radfahrer wurde bei einer TTC von 1.6 Sekunden aktiviert. Der Lenkeingriff wurde bei einer TTC von 1.2 Sekunden gestartet. Im Fehlerfall wurde der Eingriff an einer vordefinierten Position auf einem geraden Streckenabschnitt ausgelöst, ohne dass ein Hindernis vorhanden war. Um den Handlungsdruck für den Fahrer zu erhöhen, kamen dem Fahrer auf der Gegensepur einige Fahrzeuge entgegen (vgl. Abbildung 10-1). Die Breite der Fahrstreifen betrug in beiden Fällen 3.5 m.



Abbildung 10-1. Szenario für den Nutzenfall (links) und ein beispielhaftes Szenario für den Fehlerfall (rechts). Im Nutzenfall konnten die Fahrer ungehindert auf den Nachbarstreifen ausweichen, ohne andere Verkehrsteilnehmer zu gefährden. Im Fehlerfall mussten die Fahrer aktiv ein Verlassen der eigenen Fahrspur verhindern um sich selbst und den Gegenverkehr nicht zu gefährden.

10.3.3 Eingriffscharakteristik

Der Systemeingriff wurde mittels einer Lenkradwinkel- und einer Lenkmomentschnittstelle implementiert und wurde im Nutzenfall bei einer TTC von ca. 1.2 s ausgelöst. Es wurde ein sinusförmiger Lenkradwinkelverlauf mit einem maximalen Lenkradwinkel von ca. 75-80° vorgegeben. Bei freihändiger Fahrt wurde so ein Spurversatz von ca. 1.75 m erzeugt und das Fahrzeug anschließend wieder parallel zur ursprünglichen Fahrtrichtung ausgerichtet. Das Lenkmoment betrug maximal 6 Nm. Insgesamt dauerte der Systemeingriff ca. 1.8 Sekunden. Die Umsetzung des Ausweicheingriffs entspricht damit der Eingriffsvariante 4 aus der Studie zum Einfluss der Ausweichtrajektorien.

10.3.4 Versuchsablauf

Zu Beginn der Studie wurden die Fahrer zufällig einer von zwei Gruppen zugewiesen. Die eine Gruppe wurde instruiert, das Lenkrad nur mit einer Hand zu bedienen, die andere Gruppe wurde instruiert, das Lenkrad mit beiden Händen zu bedienen (vgl. Tabelle 10-1). Im Anschluss durchfuhren die Fahrer zunächst einige Füllszenarien in städtischer Umgebung. Der Versuchsleiter überwachte die Fahrer per Video und erinnerte sie, falls nötig, an die Instruktion der Handhaltung. Nach ca. 5 Minuten Fahrzeit erlebten die Fahrer den Nutzenfall. Die Fahrer wurden gebeten, die Situation zu beschreiben. Anschließend wurde die Fahrt fortgesetzt.

Nach weiteren Füllszenarien erlebten die Fahrer den ersten Fehlerfall, gefolgt von weiteren Füllszenarien und dem zweiten Fehlerfall. Nach Erleben des zweiten Fehlerfalls wurden die Probanden gebeten, die Handhaltung zu wechseln. Fahrer, die das Lenkrad bisher mit einer Hand bedienen sollten, wurden gebeten, nun beide Hände zu verwenden. Fahrer, die bisher beide Hände benutzen durften, wurden gebeten, das Lenkrad ab sofort nur noch mit einer Hand zu bedienen. Anschließend folgten weitere Füllszenarien sowie der dritte und vierte Fehlerfall. Insgesamt dauerte die Studie ca. 30 Minuten.

Tabelle 10-1: Versuchsplan und Fahrtabfolge der Studie zum Einfluss der Handhaltung.

Studienteil	Handhaltung	Konfliktpartner	Streckentyp
1	einhandig, zueihändig (B)	PKW, Fahrrad (B)	Nutzenfall
2	einhandig, zueihändig (W)		Fehlerfall

B = Between-Faktor, W = Within-Faktor, P = pseudorandomisiert

10.4 Ergebnisse

Die Ergebnisse werden getrennt nach Nutzen- und Fehlerfall berichtet. Im Nutzenfall wird zunächst auf den Einfluss der Handhaltung auf die Wirksamkeit berechtigter Eingriffe eingegangen. Zusätzlich wurde das Reaktionsmuster der Fahrer anhand der in Kapitel 4.3 beschriebenen Vorgehensweise analysiert. Im Fehlerfall wird ebenfalls auf den Einfluss der Handhaltung auf das Reaktionsmuster der Fahrer eingegangen. Im Fokus steht die Frage, wie die Handhaltung das Reaktionsmuster beeinflusst.

10.4.1 Nutzenfall

Kollisionen Fahrer, die instruiert wurden, einhandig zu fahren, kollidierten seltener mit dem Hindernis als Fahrer, die instruiert wurden, zueihändig zu fahren (einhandig: 60%, $N = 6$; zueihändig: 90%, $N = 9$).

Reaktionsmuster Es zeigt sich (vgl. Abbildung 10-2), dass bei Fahrern, die instruiert wurden, das Lenkrad einhandig zu bedienen, häufiger die Verhaltensweise Mitlenken beobachtet wird (60%, $N = 6$) als bei Fahrern, die instruiert wurden, das Lenkrad zueihändig zu bedienen (40%, $N = 4$), was eine Annahme im Rahmen von Hypothese 10-1 bestätigt. Allerdings konnten in beiden Fällen die meisten Fahrer, die das Reaktionsmuster Mitlenken zeigten, eine Kollision nicht verhindern. Bei einhandiger Bedienung des Lenkrads kollidierten 67% ($N = 4$) und bei zueihändiger Bedienung des Lenkrads 100% ($N = 4$) der Fahrer mit dem Hindernis, auch wenn sie das Reaktionsmuster Mitlenken zeigten.

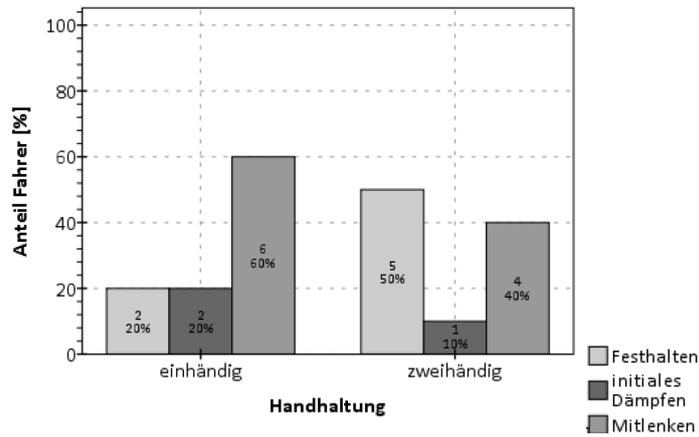


Abbildung 10-2. Häufigkeit der Reaktionsmuster Festhalten, initiales Dämpfen und Mitlenken im Nutzenfall in Abhängigkeit von der Handhaltung (einhändig vs. zweihändig).

Um einen möglichen Einfluss der Handhaltung auf Kennwerte des Lenkverhaltens inferenzstatistisch zu prüfen, wurde eine multivariate Varianzanalyse mit den abhängigen Variablen maximaler Spurversatz, erstes Lenkradwinkelmaximum, Zeitpunkt des ersten Lenkradwinkelmaximums, erstes Lenkradwinkelgeschwindigkeitsmaximum und Zeitpunkt des ersten Lenkradwinkelgeschwindigkeitsmaximums berechnet. Der Omnibus-Test ergab einen signifikanten Einfluss der Handhaltung auf die abhängigen Variablen (Wilks Lambda, $F(5, 14) = 4.386, p = .013, \eta^2 = .610$). Im Folgenden wird zunächst auf die Häufigkeit der drei Reaktionsmuster in Abhängigkeit der Handhaltung eingegangen. Anschließend werden die unterschiedlichen Kennwerte des Lenkverhaltens berichtet.

Maximaler Spurversatz Die Handhaltung hatte keinen signifikanten Einfluss auf den maximalen Spurversatz ($F(1, 18) = 0.984, p = .334, \eta^2 = .052$). Die deskriptive Betrachtung des maximalen Spurversatzes in Abhängigkeit von der Handhaltung und des Reaktionsmusters zeigt, dass der Unterschied zwischen Fahrern, die die Verhaltensweise Festhalten zeigten und Fahrern, die die Verhaltensweise Mitlenken zeigten, im Mittel sehr gering ist. Lediglich Fahrer, denen das Reaktionsmuster initiales Dämpfen zugeordnet wurde, erzeugten einen deutlich höheren Spurversatz (vgl. Abbildung 10-3 rechts). Ein eindeutiger Einfluss der Handhaltung ist auch hier nicht zu erkennen.

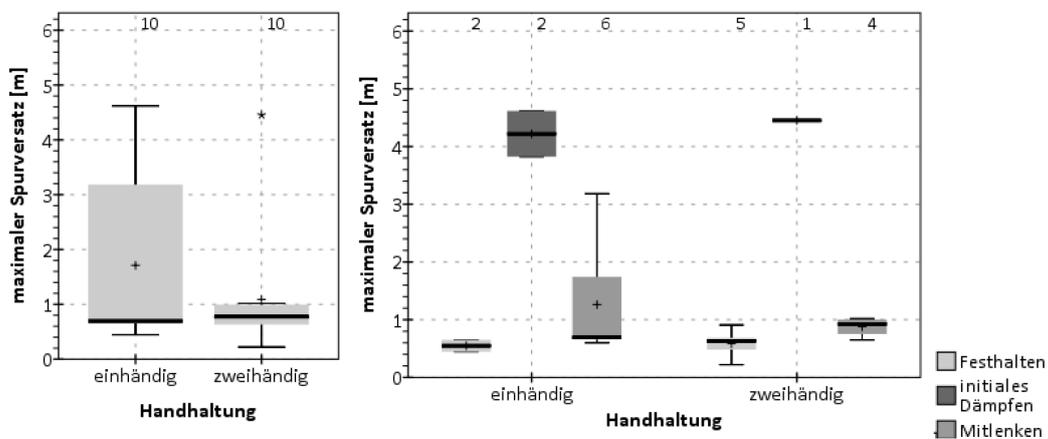


Abbildung 10-3. Maximaler Spurversatz im Nutzenfall in Abhängigkeit von der Handhaltung (links) und in Abhängigkeit von Handhaltung und Reaktionsmuster (rechts). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusssymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Erstes Lenkradwinkelmaximum

Die univariaten Varianzanalysen ergaben einen signifikanten Einfluss der Handhaltung auf das erste Lenkradwinkelmaximum ($F(1, 18) = 5.512, p = .031, \eta^2 = .234$). Im Mittel fiel das erste Lenkradwinkelmaximum bei einhändiger Bedienung des Lenkrads etwa doppelt so hoch aus ($M_{\text{einhändig}} = 60.33^\circ, SD_{\text{einhändig}} = 38.95$) wie bei zweihändiger Bedienung des Lenkrads ($M_{\text{zweihändig}} = 29.30^\circ, SD_{\text{zweihändig}} = 15.14$). Dieser Unterschied bleibt tendenziell auch bei der Analyse in Abhängigkeit des Reaktionsmusters bestehen (vgl. Abbildung 10-4). Insgesamt deuten die Werte jedoch darauf hin, dass die Mehrzahl der Fahrer den Systemeingriff nicht vollständig zuließ. Allerdings ist die Abweichung vom maximalen Lenkradwinkel des Systemeingriffs ($\sim 75^\circ$) bei einhändiger Handhaltung geringer als bei zweihändiger Handhaltung. Das deutet darauf hin, dass der Eingriff bei zweihändiger Bedienung stärker gedämpft wird (vgl. Forschungsfrage 10-1).

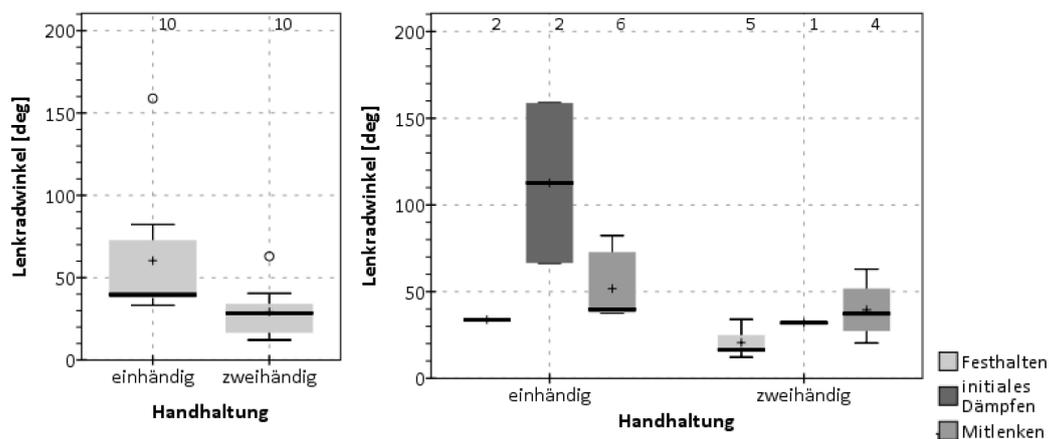


Abbildung 10-4. Erstes Lenkradwinkelmaximum in Abhängigkeit von der Handhaltung (links) und in Abhängigkeit von Handhaltung und Reaktionsmuster (rechts). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums

Die Handhaltung hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums ($F(1, 18) = 0.357, p = .558, \eta^2 = .019$). Auch deskriptiv unterscheidet sich die Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums in Abhängigkeit von der Handhaltung nicht ($M_{\text{einhändig}} = 0.51 \text{ s}, SD_{\text{einhändig}} = 0.21$; $M_{\text{zweihändig}} = 0.46 \text{ s}, SD_{\text{zweihändig}} = 0.12$). Die Werte liegen in etwa in dem Zeitbereich, in dem in Folge des Eingriffs der maximale Lenkradwinkel zu erwarten ist. Auch die Betrachtung in Abhängigkeit des Reaktionsmusters liefert keinen eindeutigen Hinweis auf den Einfluss der Handhaltung (vgl. Abbildung 10-5). Dies deutet darauf hin, dass die Handhaltung am Lenkrad keinen Einfluss auf das zeitliche Muster hat und bestätigt damit die Annahmen im Rahmen von Hypothese 10-2.

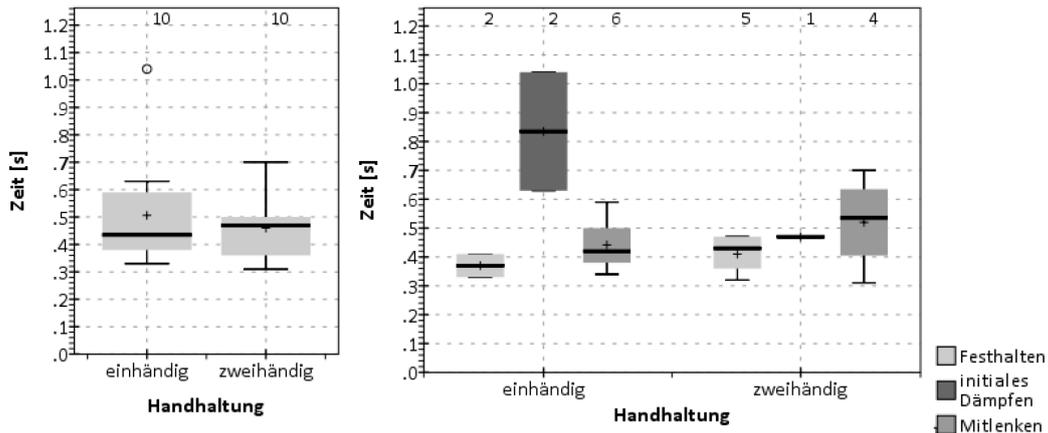


Abbildung 10-5. Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums in Abhängigkeit von der Handhaltung (links) und in Abhängigkeit von Handhaltung und Reaktionsmuster (rechts). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit

Die univariaten Varianzanalysen

ergaben einen signifikanten Einfluss der Handhaltung auf das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit ($F(1, 18) = 11.376, p = .003, \eta^2 = .387$). Das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit zeigt, ähnlich wie das erste Lenkradwinkelmaximum, einen deutlichen Unterschied zwischen einhändiger und zweihändiger Bedienung des Lenkrads (vgl. Abbildung 10-6 links). Im Mittel fiel die Lenkradwinkelgeschwindigkeit bei einhändiger Bedienung des Lenkrads höher aus ($M_{\text{einhändig}} = 224.50^\circ/s, SD_{\text{einhändig}} = 40.29$) als bei zweihändiger Bedienung ($M_{\text{zweihändig}} = 152.55^\circ/s, SD_{\text{zweihändig}} = 54.11$). Dieser Unterschied bleibt tendenziell auch bei der Betrachtung in Abhängigkeit vom Reaktionsmuster bestehen. Zusätzlich zeigt sich hier tendenziell ein Unterschied in Abhängigkeit vom Reaktionsmuster. Die Verhaltensweise Festhalten führte im Vergleich zur Verhaltensweise Mitlenken zu einer geringeren Lenkradwinkelgeschwindigkeit (vgl. Abbildung 10-6 rechts). Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass insbesondere der Aufbau des Systemeingriffs bei zweihändiger Bedienung des Lenkrads stärker gedämpft wurde als bei einhändiger Bedienung. Dies bestätigt die im Rahmen von Hypothese 10-1 getroffene Annahme, dass die Handhaltung die Kennwerte des Lenkerverhaltens beeinflusst.

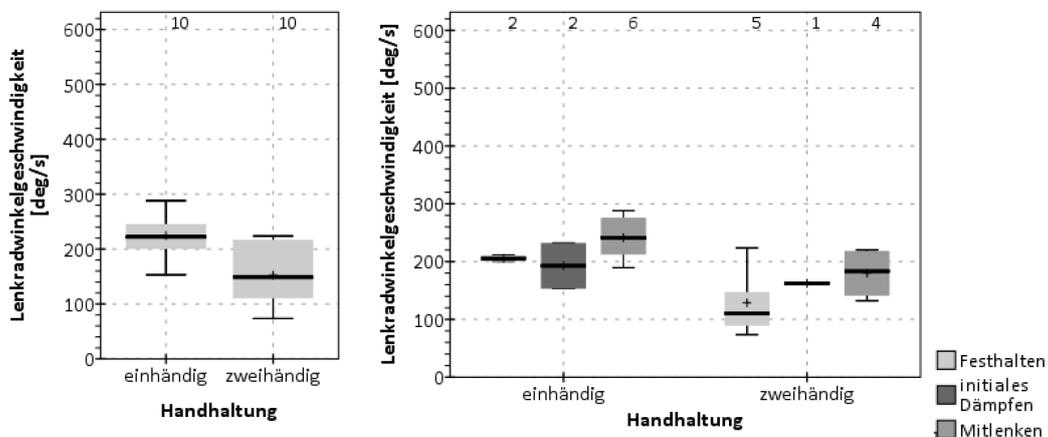


Abbildung 10-6. Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Handhaltung (links) und in Abhängigkeit von Handhaltung und Reaktionsmuster (rechts). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums Die Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit unterscheidet sich in Abhängigkeit von der Handhaltung im Mittel nicht signifikant ($F(1, 18) = 0.085, p = .775, \eta^2 = .005$). In beiden Fällen wird das Maximum nach ca. 0.3 Sekunden erreicht ($M_{\text{einhändig}} = 0.28 \text{ s}, SD_{\text{einhändig}} = 0.06$; $M_{\text{zweihändig}} = 0.27 \text{ s}, SD_{\text{zweihändig}} = 0.02$; vgl. Abbildung 10-7 links). Damit fällt das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit in den Zeitbereich, in dem es aufgrund der Eingriffsgestaltung zu erwarten ist (ca. 0.27 s). Auch die Betrachtung in Abhängigkeit des Reaktionsmusters liefert keinen Hinweis auf den Einfluss der Handhaltung (vgl. Abbildung 10-7 rechts). Dies deutet darauf hin, dass das zeitliche Muster des Lenkverhaltens nicht von der Handhaltung beeinflusst wurde. Das heißt, die Dämpfung begann in beiden Fällen zum gleichen Zeitpunkt, fiel bei einhändiger Bedienung des Lenkrads jedoch schwächer aus als bei zweihändiger Bedienung, was die Annahmen im Rahmen von Hypothese 10-2 bestätigt.

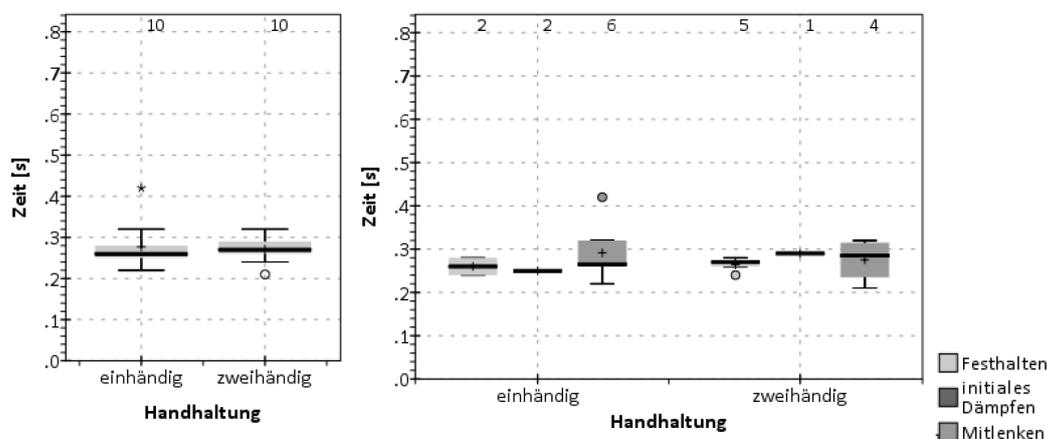


Abbildung 10-7. Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit im Fehlerfall in Abhängigkeit von der Handhaltung (links) und in Abhängigkeit von Handhaltung und Reaktionsmuster (rechts). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

10.4.2 Fehlerfall

Reaktionsmuster Die Analyse der Reaktionsmuster zeigt, dass in Fällen, in denen Fahrer instruiert wurden das Lenkrad einhändig zu bedienen, häufiger die Verhaltensweise Mitlenken beobachtet wird (68%, $N = 27$) als bei Fahrern, die instruiert wurden das Lenkrad zweihändig zu bedienen (31%, $N = 12$). Gleichzeitig wird bei einhändiger Handhaltung das Reaktionsmuster Festhalten seltener beobachtet (25%, $N = 10$) als bei zweihändiger Handhaltung (56%, $N = 22$). Das Reaktionsmuster initiales Dämpfen wird nur in wenigen Fällen erkannt (vgl. Abbildung 10-8). Damit wird ebenfalls die Annahme im Rahmen Hypothese 10-1 bestätigt, dass die einhändige Handhaltung dazu führt, dass häufiger das Reaktionsmuster Mitlenken beobachtet wird.

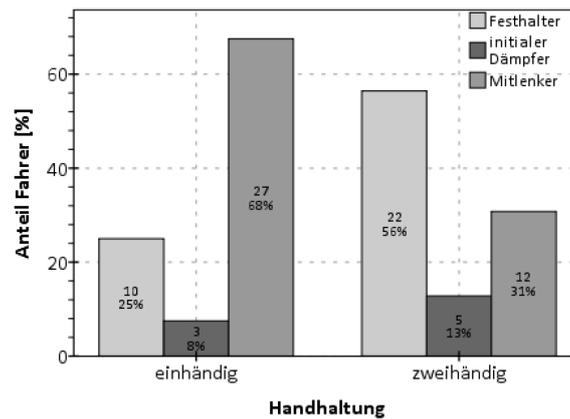


Abbildung 10-8. Häufigkeit der Reaktionsmuster Festhalten, initiales Dämpfen und Mitlenken im Fehlerfall in Abhängigkeit von der Handhaltung.

Um einen möglichen Einfluss der Handhaltung auf Kennwerte des Lenkverhaltens inferenzstatistisch zu prüfen, wurde eine multivariate Messwiederholungs-Varianzanalyse mit den abhängigen Variablen maximaler Spurversatz, erstes Lenkradwinkelmaximum, Zeitpunkt des ersten Lenkradwinkelmaximums, erstes Lenkradwinkelgeschwindigkeitsmaximum und Zeitpunkt des ersten Lenkradwinkelgeschwindigkeitsmaximums berechnet. Dazu wurden die beiden Messwerte pro Bedingung gemittelt. Der Omnibus-Test ergab einen signifikanten Einfluss der Handhaltung auf die abhängigen Variablen (Wilks Lambda, $F(5, 15) = 13.840$, $p < .001$, $\eta^2 = .822$). Im Folgenden wird zunächst auf die Häufigkeit der drei Reaktionsmuster in Abhängigkeit der Handhaltung eingegangen. Anschließend werden die unterschiedlichen Kennwerte des Lenkverhaltens und die Ergebnisse der univariaten Varianzanalysen berichtet.

Maximaler Spurversatz Die univariaten Varianzanalysen ergaben einen signifikanten Einfluss der Handhaltung auf den maximalen Spurversatz ($F(1, 19) = 11.346$, $p = .003$, $\eta^2 = .374$). Bei einhändiger Handhaltung wurde in Folge des unberechtigten Eingriffs im Mittel ein höherer Spurversatz beobachtet als bei zweihändiger Handhaltung ($M_{\text{einhändig}} = 0.60$ m, $SD_{\text{einhändig}} = 0.38$ m; $M_{\text{zweihändig}} = 0.40$ m, $SD_{\text{zweihändig}} = 0.29$ m; vgl. Abbildung 10-9). Alle Fahrer reduzierten den Spurversatz in Folge des unberechtigten Eingriffs, so dass der maximale Spurversatz in allen Fällen unterhalb des angestrebten Spurversatzes von 1.75 m blieb. Bei der Betrachtung in Abhängigkeit der klassifizierten Reaktionsmuster wird deutlich, dass der Spurversatz bei der Verhaltensweise Festhalten, wie zu erwarten, im Mittel geringer ausfiel als bei den Verhaltensweisen initiales Dämpfen oder Mitlenken. Zusätzlich wird deutlich, dass der maximale Spurversatz sich im Mittel für die Verhaltensweisen Festhalten und Mitlenken kaum zwischen einhändiger und zweihändiger Handhaltung unterscheidet.

|Studie VI: Einfluss der Handhaltung auf das Fahrerverhalten

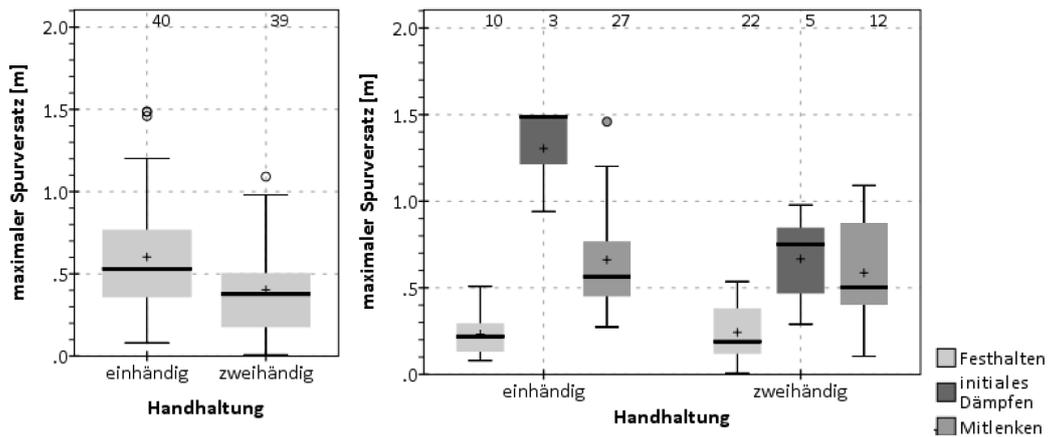


Abbildung 10-9. Maximaler Spurversatz [m] im Fehlerfall in Abhängigkeit von der Handhaltung (links) und in Abhängigkeit von Handhaltung und Reaktionsmuster (rechts). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Erstes Lenkradwinkelmaximum

Die univariaten Varianzanalysen ergaben einen signifikanten Einfluss der Handhaltung auf das erste Lenkradwinkelmaximum ($F(1, 19) = 17.432, p = .001, \eta^2 = .478$). Das erste Maximum des Lenkradwinkels fiel bei einhändiger Bedienung des Lenkrads im Mittel signifikant höher aus als bei zweihändiger Bedienung des Lenkrads ($M_{\text{einhändig}} = 48.99^\circ, SD_{\text{einhändig}} = 20.52^\circ; M_{\text{zweihändig}} = 34.49^\circ, SD_{\text{zweihändig}} = 18.45^\circ$; vgl. Abbildung 10-10). Im Mittel liegen die Werte unterhalb des vom Eingriff angestrebten maximalen Lenkradwinkels von ca. 75° . Es wird vermutet, dass die Unterschiede in Abhängigkeit von der Verhaltensweise im Wesentlichen durch das Vorgehen bei der Klassifizierung erzeugt werden. Daher wird an dieser Stelle auf eine Interpretation verzichtet.

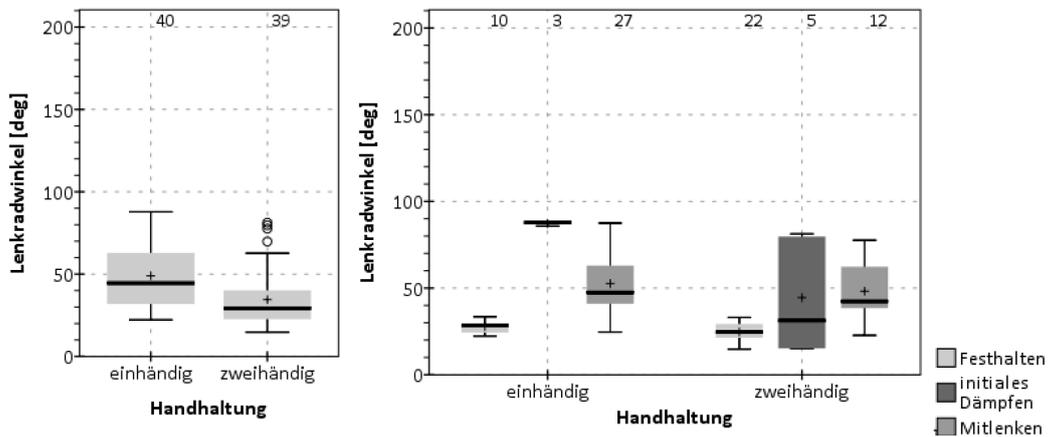


Abbildung 10-10. Erstes Lenkradwinkelmaximum im Fehlerfall in Abhängigkeit von der Handhaltung (links) und in Abhängigkeit von der Handhaltung und des Reaktionsmusters (rechts). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums Die Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums unterscheidet sich in Abhängigkeit von der Handhaltung im Mittel nicht ($F(1, 19) = 0.365, p = .553, \eta^2 = .019$; vgl. Abbildung 10-11). Das deutet darauf hin, dass die Fahrer unabhängig von der Handhaltung in etwa gleich lang benötigten, um den Eingriff zu dämpfen und zu übersteuern. Im Mittel wurde das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit unabhängig von der Handhaltung nach ca. 0.45 Sekunden erreicht ($M_{\text{einhändig}} = 0.44 \text{ s}, SD_{\text{einhändig}} = 0.08 \text{ s}; M_{\text{zweihändig}} = .45 \text{ s}, SD_{\text{zweihändig}} = 0.12 \text{ s}$), was die Annahmen im Rahmen von Hypothese 10-2 bestätigt. Die zusätzliche Aufteilung nach den drei Reaktionsmustern deutet darauf hin, dass das erste Maximum des Lenkradwinkels früher erreicht wird, wenn das Reaktionsmuster Festhalten identifiziert wurde. Diese Tendenz zeigt sich unabhängig von der Handhaltung.

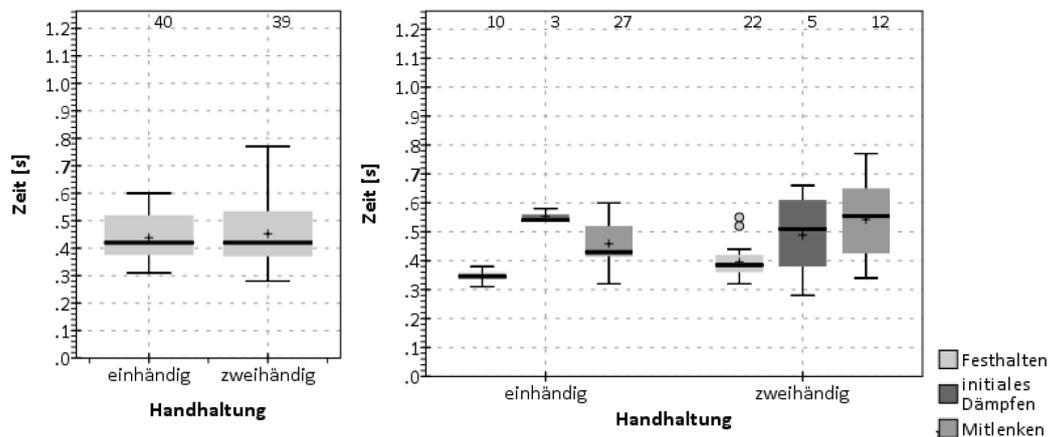


Abbildung 10-11. Dauer bis zum Erreichen des ersten Lenkradwinkelmaximums im Fehlerfall in Abhängigkeit von der Handhaltung (links) und in Abhängigkeit von Handhaltung und Reaktionsmuster (rechts). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusssymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit

Die univariaten Varianzanalysen ergaben einen signifikanten Einfluss der Handhaltung auf das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit ($F(1, 19) = 42.7096, p < .001, \eta^2 = .692$), was die Annahmen im Rahmen von Hypothese 10-1 bestätigt. Das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit fiel bei einhändiger Bedienung des Lenkrads im Mittel signifikant höher aus als bei zweihändiger Bedienung des Lenkrads ($M_{\text{einhändig}} = 221.75 \text{ }^\circ/\text{s}, SD_{\text{einhändig}} = 46.23 \text{ }^\circ/\text{s}; M_{\text{zweihändig}} = 154.38 \text{ }^\circ/\text{s}, SD_{\text{zweihändig}} = 40.12 \text{ }^\circ/\text{s}$; vgl. Abbildung 10-12). Die Betrachtung in Abhängigkeit der Reaktionsmuster deutet zudem darauf hin, dass das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit bei der Verhaltensweise Festhalten im Mittel geringer ausfiel als bei den Verhaltensweisen initiales Dämpfen oder Mitlenken (vgl. Abbildung 10-12).

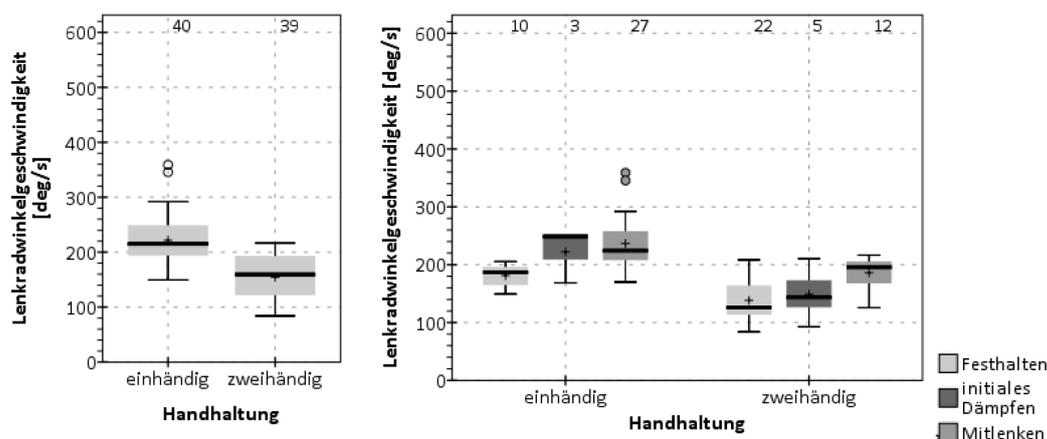


Abbildung 10-12. Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit im Fehlerfall in Abhängigkeit von der Handhaltung (links) und in Abhängigkeit von Handhaltung und Reaktionsmuster (rechts). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plusymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit

Die Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit unterscheidet sich nicht signifikant zwischen einhändiger und zweihändiger Handhaltung ($F(1, 19) = 0.956, p = .341, \eta^2 = .048$; vgl. Abbildung 10-13). Das deutet darauf hin, dass die Fahrer unabhängig von der Handhaltung etwa gleich lang benötigen, um mit der Dämpfung des unberechtigten Eingriffs zu beginnen, was die Annahmen im Rahmen von Hypothese 10-2 bestätigt. Die Aufteilung nach den drei verschiedenen Reaktionsmustern zeigt zusätzlich, dass der Zeitpunkt des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit kaum durch das beobachtete Fahrerverhalten beeinflusst wird (vgl. Abbildung 10-13). Im Mittel wurde das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit unabhängig von der Handhaltung nach 0.27 Sekunden erreicht ($M_{\text{einhändig}} = 0.27 \text{ s}, SD_{\text{einhändig}} = 0.04 \text{ s}; M_{\text{zweihändig}} = .27 \text{ s}, SD_{\text{zweihändig}} = 0.04 \text{ s}$). Damit fällt es in dem Zeitbereich, in dem es aufgrund der Eingriffsgestaltung zu erwarten ist.

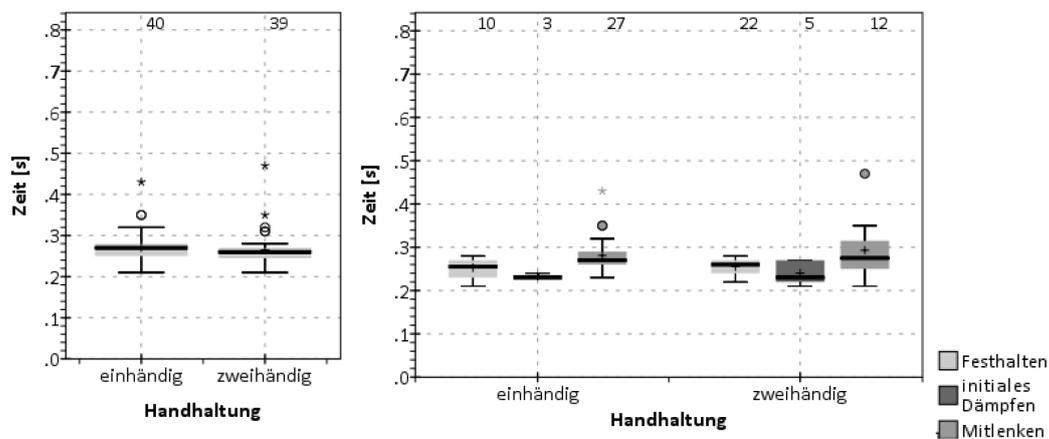


Abbildung 10-13. Dauer bis zum Erreichen des ersten Maximums der Lenkradwinkelgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Handhaltung (links) und in Abhängigkeit von Handhaltung und Reaktionsmuster (rechts). Die horizontale Linie innerhalb der Balken kennzeichnet den Median, das Plussymbol den Mittelwert. Kreis- und Sternsymbole kennzeichnen Ausreißer.

10.5 Diskussion

10.5.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Nutzenfall kollidierten Fahrer, die instruiert wurden, das Lenkrad einhändig zu bedienen, seltener mit dem Hindernis als Fahrer, die instruiert wurden, das Lenkrad zweihändig zu bedienen. Gleichzeitig wurde bei einhändiger Haltung des Lenkrads häufiger das Reaktionsmuster Mitlenken beobachtet als bei zweihändiger Haltung des Lenkrads, was im Rahmen von Hypothese 10-1 erwartet wurde. Der maximale Spurversatz, das erste Lenkradwinkelmaximum und das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit fallen bei einhändiger Haltung des Lenkrads ebenfalls höher aus als bei zweihändiger Haltung des Lenkrads. Der zeitliche Ablauf der Fahrerreaktion unterschied sich allerdings nicht, was die Annahmen von Hypothese 10-2 bestätigt.

Im Fehlerfall wurde ein vergleichbares Muster wie im Nutzenfall beobachtet. Der maximale Spurversatz, das erste Lenkradwinkelmaximum und das erste Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit fiel bei einhändiger Haltung des Lenkrads größer aus als bei zweihändiger Haltung des Lenkrads. Der zeitliche Ablauf der Reaktion unterschied sich allerdings ebenfalls nicht.

In der folgenden Tabelle werden die in Abschnitt 10.2 getroffenen Hypothesen nochmals zusammenfassend dargestellt. Dabei wird gekennzeichnet ob die Hypothesen bestätigt werden können oder die Befundlage den Hypothesen widerspricht. Finden sich sowohl Belege, welche die Hypothese bestätigen als auch Belege, welche der Hypothese widersprechen wird darauf hingewiesen, dass die Befundlage uneindeutig ist.

Tabelle 10-2. Zusammenfassende Darstellung der Befundlage bezogen auf die Hypothesen.

Hypothese		
Hypothese 10-1:	Die Handhaltung beeinflusst die Kennwerte des Lenkverhaltens im Nutzen- und Fehlerfall in ähnlicher Weise wie die visuelle Ablenkungsbedingung in Studie V.	bestätigt
Hypothese 10-2:	Die Handhaltung hat keinen Einfluss auf den zeitlichen Verlauf des Lenkverhaltens im Nutzen- und Fehlerfall.	bestätigt

10.5.2 Diskussion

Mit der Studie sollte der Frage nachgegangen werden, wie sich die Handhaltung auf das Reaktionsmuster der Fahrer in Folge berechtigter und unberechtigter Lenkeingriffe auswirkt (vgl. Forschungsfrage 10-1). Die Ergebnisse sollen dadurch helfen einzuschätzen, welchen Einfluss die visuelle Ablenkung der Fahrer auf das Reaktionsmuster hat (vgl. Kapitel 9).

Die beobachteten Unterschiede beim ersten Lenkradwinkelmaximum und dem ersten Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit deuten darauf hin, dass Lenkeingriffe bei zweihändiger Haltung des Lenkrads stärker gedämpft werden als bei einhändiger Handhaltung (vgl. Hypothese 10-1). Dies zeigt sich sowohl im Nutzen- als auch im Fehlerfall. Der zeitliche Verlauf der Fahrerreaktion wird jedoch nicht durch die Handhaltung beeinflusst (vgl. Hypothese 10-2).

Insgesamt deuten die Befunde darauf hin, dass es wichtig ist, den Einfluss der Handhaltung bei Studien zu Lenkeingriffen mittels einer Lenkmomentüberlagerung zu berücksichtigen, da diese sich auf das Reaktionsmuster der Fahrer auswirken kann. Bezogen auf die Ergebnisse der vorigen Studie zum Einfluss der Ablenkung (vgl. Kapitel 9) deuten die Befunde darauf hin, dass die beobachteten Unterschiede vor allem eine Folge der Handhaltung sind (vgl. Forschungsfrage 10-2). Lediglich die Unterschiede im zeitlichen Verlauf der Fahrerreaktion in der Bedingung ohne vorgelagerte Warnung können damit nicht erklärt werden.

Um den Einfluss der Handhaltung zu erklären, sind folgende Ansätze denkbar: Zum einen könnte die passive Dämpfung eine große Rolle spielen. Das bedeutet, dass die Unterschiede nicht durch das aktive Eingreifen der Fahrer, sondern durch die passive Dämpfung der Gliedmaßen verursacht werden. Zum anderen könnte die Möglichkeit bestehen, dass die Fahrer mit einer Hand aufgrund der Kräfteerfordernisse entweder nicht dazu in der Lage sind, den Lenkeingriff zu unterdrücken, oder länger brauchen, um die erforderliche Kraft aufzubauen. Hierzu wäre eine weitere Studie erforderlich, die untersucht, welche Kräfte am Lenkrad der Fahrer mit einer Hand halten kann und welche nicht.

10.5.3 Schlussfolgerung

Insgesamt deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Handhaltung einen entscheidenden Einfluss auf das Reaktionsmuster der Fahrer hat. Allerdings können die Befunde der vorangegangenen Studie nicht vollständig durch den Einfluss der Handhaltung erklärt werden. Dadurch ist nicht auszuschließen, dass sich die visuelle Ablenkung auch auf die Reaktionsmuster der Fahrer im Fall eines unberechtigten Eingriffs auswirkt. Zusätzlich liefert die Studie wichtige methodische Erkenntnisse zum Einfluss der Handhaltung. Tendenziell besteht die Möglichkeit, dass die Handhaltung sowohl die Wirksamkeit als auch die Kontrollierbarkeit von Lenkeingriffen beeinflusst. Wird in Studien nicht angegeben, welche Handhaltung zum Zeitpunkt des Eingriffs vorlag, erschwert dies die Vergleichbarkeit der Studienergebnisse. Im Nutzenfall könnte dies – je nach Handhaltung - zu einer Überschätzung oder Unterschätzung der Wirksamkeit führen. Dies gilt auch für die Kontrollierbarkeit unberechtigter Eingriffe. Die meisten Studien zu Lenkeingriffen berichten allerdings weder wie die Fahrer instruiert wurden, das Lenkrad zu halten, noch, wie die Fahrer das Lenkrad zum Zeitpunkt des Eingriffs hielten (siehe Bräuchle et al., 2013; Fricke et al., 2015b; Gußner et al., 2015; Hesse et al., 2013; Itoh et al., 2013; Schieben et al., 2014). Zur besseren Vergleichbarkeit der Studienergebnisse sollte daher bei zukünftigen Studien auf die experimentelle Kontrolle der Handhaltung geachtet werden.

11 Studie VII: Explorative Studie zum Einfluss der haptischen Rückmeldung auf das Fahrerverhalten

11.1 Herleitung der Forschungsfragen

Im Rahmen bisheriger Untersuchungen wurden überwiegend Ausweichsysteme mit gekoppelter Lenkung untersucht (vgl. Bräuchle et al., 2013; Fricke et al., 2015b; Gußner et al., 2015; Hesse et al., 2013; Kleen & Schmidt, 2009; Schieben et al., 2014). Diese Systeme nutzen in der Regel eine Überlagerung des Lenkmoments, um die erforderliche Lenkbewegung zu erzeugen. Dabei ist der resultierende Gierwinkel des Fahrzeugs unmittelbar abhängig vom Lenkradwinkel (vgl. Abschnitt 1.1.1.1). Neben diesen Systemen könnten allerdings auch andere Eingriffsformen zum Ausweichen genutzt werden, bei denen der Gierwinkel des Fahrzeugs nicht unmittelbar vom Lenkradwinkel abhängt. Darunter fallen beispielsweise einseitige Bremsengriffe oder Steer-by-Wire-Technologien (vgl. Abschnitt 2.2.1.3). Durch diese Eingriffsformen könnte das Potenzial von Ausweichsystemen im Nutzenfall erhöht werden, da sie im Gegensatz zu Eingriffsformen mit vollständig gekoppelter Lenkung nicht durch das Dämpfungsverhalten der Fahrer beeinflusst werden. Einen Hinweis darauf liefern die Untersuchungen von Hesse et al. (2013), in denen gezeigt wurde, dass durch eine kurzzeitige vollständige Entkopplung der Lenkeingaben der Fahrer von der Fahrzeugbewegung die Kollisionsrate deutlich reduziert wird. Allerdings weisen die Autoren ebenfalls darauf hin, dass diese kurzzeitige Entkopplung im Falle eines unberechtigten Systemeingriffs für Fahrer nicht kontrollierbar ist, da ein Überschreiten des eigenen Fahrstreifens, selbst unter Verwendung eines Abbruchkriteriums, meist nicht verhindert werden kann (vgl. Hesse et al., 2013; Schieben et al., 2014). Daher ist anzunehmen, dass für die Beherrschbarkeit dieser Eingriffsformen eine schnelle Erkennung der Fahrerintention erforderlich ist (vgl. hierzu auch Bräuchle et al., 2013). Bisher ist allerdings unklar, wie sich die Verwendung einer Entkopplung der Lenkung auf das Reaktionsmuster der Fahrer und insbesondere auf die Reaktionsgeschwindigkeit auswirkt.

Durch die Entkopplung der Lenkung von der Fahrzeugbewegung wird dem Fahrer die Möglichkeit genommen, die Störung der Querführung am Lenkrad wahrzunehmen (vgl. Abbildung 11-1). Dies könnte zu einer verzögerten Fahrerreaktion auf unberechtigte Eingriffe führen. Dies würde darauf hindeuten, dass die haptische Rückmeldung insgesamt zu einer schnelleren Reaktion und Informationsverarbeitung führt. Dadurch würde z. B. die Annahme bestätigt, dass haptisches Feedback am Lenkrad dem Fahrer zusätzliche Informationen für den Kontrollprozess zur Verfügung stellt oder dazu führen kann, einen bereits bestehenden Kontrollprozess zur Erreichung eines Handlungsziels zu unterbrechen und den Fahrer zur Kontrolle der Handlungsausführung zu bewegen (vgl. Schumann, 1994 und Kapitel 2.2.4.1). Ursache hierfür könnten Kontrollprozesse des inneren sensomotorischen Regelkreises und die Wechselwirkung mit den übergeordneten Kontrollprozessen sein. Dabei wird die wahrgenommene Abweichung vom Regelziel bereits auf der Ebene der sensomotorischen Regelung registriert und an übergeordnete Kontrollebenen zurückgemeldet. Ist dies der Fall, wäre dies ein Indiz dafür, dass die Informationen innerhalb des sensomotorischen Kontrollprozesses schneller verarbeitet werden als innerhalb des visuellen Kontrollprozesses.

Zum anderen könnte die Entkopplung aber auch zu einer schnelleren Reaktion der Fahrer führen. Dies würde bedeuten, dass die haptische Rückmeldung am Lenkrad in Folge eines Lenkeingriffs die Handlungsentscheidung und Handlungsausführung verzögert. Somit würde dies einen Hinweis darauf liefern, dass die haptische Rückmeldung in Folge des Lenkeingriffs mit der Handlungsentscheidung der Fahrer interferiert. Ursache hierfür könnte sein, dass die haptisch getriggerte Kompensationsreaktion und die Handlungsentscheidung für eine Ausweichreaktion zwei unterschiedliche Aufgaben darstellen, die nicht parallel bearbeitet werden können (vgl. hierzu auch Kapitel 2.2.4.1). In der Grundlagenforschung wird die gleichzeitige Koordination mehrerer Modalitäten, die zur Erfüllung verschiedener Aufgabenanforderungen erforderlich ist, auch als „*crossmodal action*“ bezeichnet (vgl. Huestegge & Hazeltine, 2011; Huestegge & Koch, 2010). In Studien aus diesem Bereich konnte gezeigt werden, dass sowohl die Blickzuwendung als auch die manuelle Reaktion verzögert werden, wenn diese gleichzeitig ausgeführt werden sollen (vgl. Hodgson, Müller & O’leary, 1999; Huestegge & Koch, 2009). Führt die Entkopplung also zu einer schnelleren Reaktion des Fahrers auf den automatischen Ausweichingriff, wäre dies ein Hinweis darauf, dass die erforderliche multimodale Koordination zu einer Verzögerung der Reaktion des Fahrers führen kann. Hinweise auf mögliche Interferenzeffekte in der Anwendungsforschung lieferten unter anderem Neukum et al. (2010a). Ihre Ergebnisse deuten darauf hin, dass haptische Signale am Lenkrad die Handlungsentscheidung verzögern können (siehe hierzu auch Kapitel 2.2.4.1).

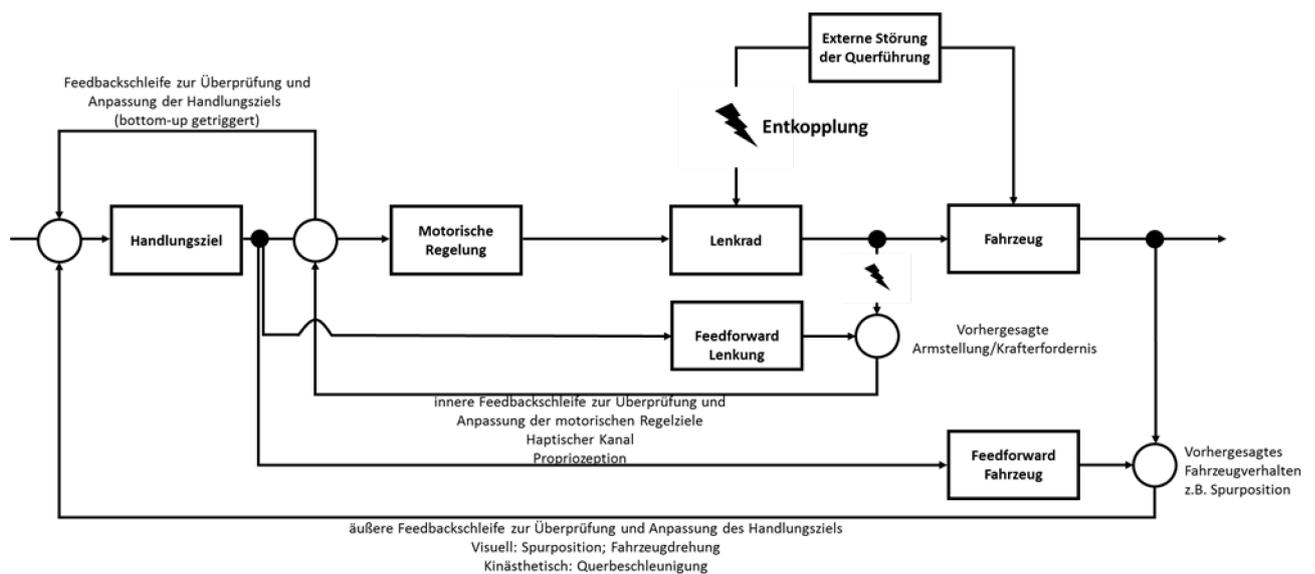


Abbildung 11-1. Im Falle einer Entkopplung erhält die innere Feedbackschleife keine Informationen, da die Störung keinen Einfluss auf das Lenkrad ausübt (veranschaulicht durch die Unterbrechung und das Blitzsymbol). Dadurch kann der Fahrer nur auf Informationen des äußeren Regelkreises zurückgreifen, um die Störung zu identifizieren.

Im folgenden Kapitel werden diese Annahmen in Forschungsfragen für die Studie überführt. Zusätzlich werden spezifische Hypothesen bezüglich der zu erwartenden Auswirkungen auf das Fahrerverhalten im Anwendungsfall aufgestellt.

11.2 Forschungsfragen

In der folgenden Studie sollen Fahrer mit entkoppelten Eingriffen konfrontiert werden. Damit soll die Frage beantwortet werden, welchen Einfluss die haptische Rückmeldung und die sensomotorische Regelung bei der Reaktion der Fahrer auf automatische Ausweicheingriffe im Nutzen- und Fehlerfall haben (vgl. Forschungsfrage 11-1).

Forschungsfrage 11-1: Welchen Einfluss hat die Entkopplung von Lenkrad und Fahrzeugbewegung (bzw. das Ausbleiben der haptischen Rückmeldung am Lenkrad) auf das Reaktionsmuster der Fahrer im Nutzen- und Fehlerfall?

Einerseits soll überprüft werden, ob die haptische Rückmeldung und damit auch die sensomotorischen Kontrollprozesse für die Reduktion der Wirksamkeit von automatischen Ausweicheingriffen verantwortlich sind. Ist dies der Fall, sollte eine Entkopplung von Lenkrad und Fahrzeugbewegung (aufgrund des Ausbleibens des haptischen Feedbacks) die Wirksamkeit von berechtigten Ausweicheingriffen erhöhen (vgl. Hypothese 11-1).

Hypothese 11-1: Die Entkopplung von Lenkung und Fahrzeugbewegung erhöht die Wirksamkeit von automatischen Ausweicheingriffen im Nutzenfall.

Dies sollte sich darin äußern, dass mit einer Entkopplung weniger Kollisionen beobachtet werden als ohne Entkopplung. Zusätzlich sollten keine oder nur wenige Lenkreaktionen beobachtet werden, die dem automatischen Ausweicheingriff entgegen gerichtet sind.

Andererseits soll überprüft werden, ob das Ausbleiben der haptischen Rückmeldung die Reaktion der Fahrer im Fehlerfall verzögert (vgl. Hypothese 11-2).

Hypothese 11-2: Die Entkopplung von Lenkung und Fahrzeugbewegung führt aufgrund der fehlenden haptischen Rückmeldung zu einer langsameren Reaktion im Fehlerfall.

Dies sollte sich darin zeigen, dass die Fahrer mit entkoppelter Lenkung erst später eine eindeutige, dem automatischen Ausweicheingriff entgegen gerichtete Lenkreaktion zeigen.

11.3 Methodik

11.3.1 Gestaltung der Szenarien

Die Hindernisse im Nutzenfall bestanden bei der Hälfte der Probanden aus PKW und bei der anderen Hälfte aus Radfahrern und kreuzten die Ego-Fahrspur stets von rechts (siehe Abbildung 11-2). Die Hindernisse wurden angehalten, nachdem sie 1.75 m in den Fahrstreifen reichten, so dass 50% des Fahrstreifens durch das Hindernis belegt waren. Die Szenarien sind eine Abwandlung der Szenarien aus der Untersuchung zum Einfluss der vorgelagerten Warnungen (vgl. Kapitel 8).



Abbildung 11-2. Szenarien für den Nutzenfall mit kreuzendem Radfahrer (links) und PKW (rechts).

Im Falle des unberechtigten Systemeingriffs erfolgte der Eingriff auf einem geraden Streckenabschnitt mit einem Fahrstreifen in Richtung der Fahrtrichtung (siehe Abbildung 11-3).



Abbildung 11-3. Szenario für die Untersuchung des unberechtigten Systemeingriffs.

11.3.2 Eingriffscharakteristik

Für die Untersuchung wurde eine Entkopplung der Lenkung im Simulator umgesetzt. Dabei wurde der für den Ausweicheingriff erforderliche Lenkwinkel direkt als Radlenkwinkel umgesetzt. Dadurch entsteht in Folge des Ausweicheingriffs keine Reaktion am Lenkrad des Fahrers. Der Fahrer hatte jedoch jederzeit die Möglichkeit, den Eingriff durch eigenes Lenken zu verstärken oder dem Eingriff entgegen zu wirken. Dies wurde dadurch erreicht, dass der vom Fahrer erzeugte Lenkwinkel zu dem vom System erzeugten Lenkwinkel addiert oder subtrahiert wurde.

Im Rahmen von internen Voruntersuchungen wurde dabei festgestellt, dass sich lange Eingriffsdauern (>1 s) nicht für die Untersuchung eignen, da sich ab diesem Zeitpunkt der Systemeingriff und die Fahrereingaben überlagern. Bei unberechtigten Eingriffen führte dies insbesondere am Ende des Ausweicheingriffs zu unerwünschten Lenkreaktionen. Im Rahmen der Untersuchung wurden daher nur kurze Ausweicheingriffe mit einer maximalen Dauer von 500 ms verwendet. Grundlage dafür war die in der Studie zum Einfluss der Ausweichtrajektorien ermittelte Eingriffsvariante 1 (vgl. Kapitel 7).

11.3.3 Stichprobe

Alle Teilnehmer/innen der Studie entstammten dem Testfahrerpanel der WIVW GmbH und waren durch ein standardisiertes Training an das Fahren im dynamischen Fahrsimulator gewöhnt. Insgesamt nahmen 28 Probanden/innen an der Studie teil (davon 14 weiblich). Zusätzlich wurde darauf geachtet, dass die Fahrer nicht bereits an vergleichbaren Studien zu automatischen Ausweicheingriffen teilgenommen haben um Lern- und Übertragungseffekte auszuschließen. Aufgrund von Simulator Sickness musste ein Fahrer den Versuch vorzeitig abbrechen, so dass insgesamt 27 Probanden für die Auswertung berücksichtigt wurden. Das mittlere Alter der weiblichen Fahrer betrug 40.14 Jahre (*min* = 21; *max* = 59), das der männlichen Fahrer 38.62 Jahre (*min* = 21, *max* = 76).

11.3.4 Versuchsablauf

Durch den explorativen Charakter der Studie wurde zunächst keine experimentelle Variation eingeführt. Im Verlauf der Studie wurde jedoch entschieden, die Breite des Fahrstreifens im Falle der unberechtigten Systemauslösung auf 2.75 m zu reduzieren, um zu überprüfen, ob sich die Breite des Fahrstreifens auf die Reaktion und das Verhalten der Fahrer auswirkt. Dadurch ergeben sich zwei experimentelle Gruppen: N=17 Fahrer erlebten den unberechtigten Systemeingriff bei einer Fahrstreifenbreite von 3.5 m und N=10 Fahrer erlebten den unberechtigten Systemeingriff bei einer Fahrstreifenbreite von 2.75 m.

Zum Vergleich mit gekoppelten Eingriffen werden die Fahrer der Baselinebedingung (N=8) aus der Studie zum Einfluss der Vorwarnung herangezogen (vgl. Kapitel 8). Die Fahrstreifenbreite im Fehlerfall betrug hier 3.5 m.

Die Probanden durchfuhren in fester Abfolge ein Szenario mit einem kreuzenden Hindernis und automatischem Lenkeingriff (Nutzenfall) und ein Szenario mit unberechtigtem Lenkeingriff (Fehlerfall). Zwischen diesen Testszenarien durchfuhren die Probanden zusätzlich eine Reihe von Füllszenarien, um die Vorhersehbarkeit der Eingriffe und damit verbundene Erwartungseffekte zu minimieren. Die Hindernisse im Nutzenfall bestanden bei der Hälfte der Probanden aus einem PKW und bei der anderen Hälfte aus einem Radfahrer. Sowohl der PKW als auch der Radfahrer kreuzten die Fahrspur stets von rechts. Die Hindernisse wurden angehalten, nachdem sie 1.75 m in den Fahrstreifen reichten, so dass 50% des Fahrstreifens durch das Hindernis belegt waren. Der gesamte Versuchsablauf dauerte ca. 20 Minuten.

11.4 Ergebnisse

Aufgrund der fehlenden Rückmeldung des Eingriffs am Lenkrad kann für die Analyse der entkoppelten Eingriffe nicht auf das in Kapitel 4.3 beschriebene Verfahren zurückgegriffen werden. Anstelle dieses Verfahrens wurde überprüft, ob die Fahrer eine Lenkreaktion mit oder entgegen der Eingriffsrichtung zeigten. Im Fehlerfall wurde zusätzlich überprüft, wann eine Gegenlenkreaktion der Fahrer zu beobachten war. Hierzu wurde betrachtet, wann das erste Mal ein eindeutig negative Lenkradwinkelgeschwindigkeit beobachtet wurde. Um einen Einfluss des Analysevorgehens auf die Ergebnisse zu vermeiden, wurde das gleiche Verfahren für die Analyse der gekoppelten Eingriffe eingesetzt.

11.4.1 Nutzenfall

Kollisionen Im Szenario PKW kollidierten mit gekoppelter Lenkung 60% ($N = 3$) und mit entkoppelter Lenkung 21.4% ($N = 3$) der Fahrer mit dem Hindernis. Im Szenario Radfahrer kollidierten mit gekoppelter Lenkung 75% ($N = 3$) und mit entkoppelter Lenkung 15.4% ($N = 2$). Dies bestätigt die Annahme, dass die Entkopplung der Lenkung die Wirksamkeit von automatischen Ausweicheingriffen erhöht (vgl. Hypothese 11-1).

Reaktionsmuster Im Szenario PKW zeigten insgesamt 50% ($N = 7$) der Fahrer eine Mitlenkreaktion vor Ende des Eingriffs nach ca. 0.5 Sekunden. Zwei Fahrer zeigten eine Lenkreaktion in Ausweichrichtung vor Beginn des Systemeingriffs. Im Szenario Radfahrer zeigte hingegen keiner der Fahrer eine Mitlenkreaktion vor Ende des Eingriffs. Erst im Anschluss sind Reaktionen zu beobachten, die auf eine Lenkreaktion der Fahrer hindeuten (vgl. Abbildung 11-4). Mit gekoppelter Lenkung zeigten im Szenario PKW 60% der Fahrer ($N = 3$) ein Lenkreaktionsmuster, das auf ein Mitlenken hindeutet. Die restlichen 40% ($N = 2$) zeigten das Lenkreaktionsmuster initiales Dämpfen, was darauf hinweist, dass der systemseitige Lenkeingriff zunächst gedämpft wurde, im weiteren Verlauf jedoch wieder aufgegriffen wurde. Im Szenario Radfahrer zeigte nur ein Fahrer ein Lenkreaktionsmuster, das auf ein Mitlenken hindeutet. Die restlichen 75% zeigten das Reaktionsmuster Festhalten, was auf ein starkes Dämpfen oder Unterdrücken des systemseitigen Eingriffs hinweist (vgl. Kapitel 8.4.1). Insgesamt zeigt sich damit bei gekoppelten und entkoppelten Eingriffen ein vergleichbarer Einfluss des Szenarios auf das Reaktionsmuster der Fahrer. Im Szenario PKW wurde sowohl bei gekoppelten als auch bei entkoppelten Eingriffen häufiger ein Mitlenken beobachtet als im Szenario Radfahrer.

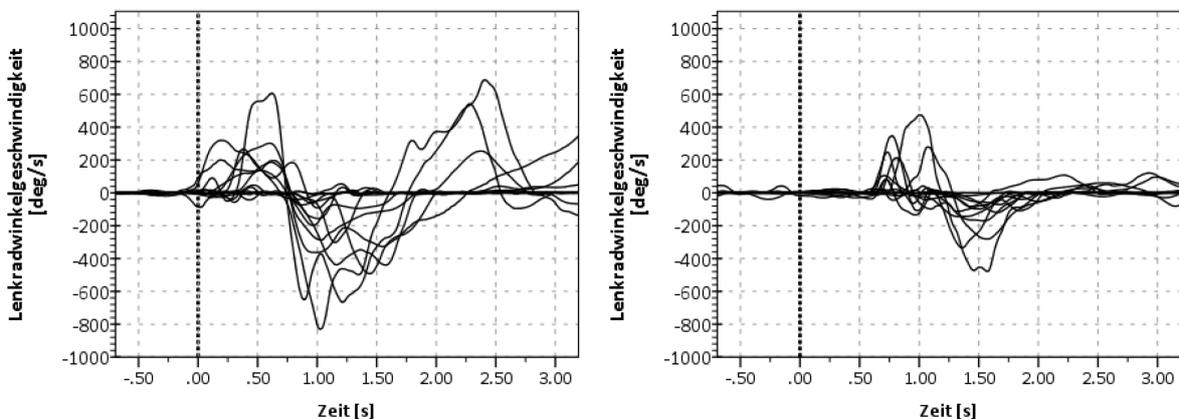


Abbildung 11-4. Zeitverlauf der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [deg/s] im Szenario PKW (links) und Radfahrer (rechts) für Eingriffe mit entkoppelter Lenkung. Die senkrechte Linie kennzeichnet den Eingriffsbeginn.

Maximaler Spurversatz Im Szenario PKW wurde im Mittel unabhängig von der Gestaltung des Eingriffs ein höherer Spurversatz erreicht als im Szenario Radfahrer. Zusätzlich hängt der Einfluss der Gestaltung des Lenkeingriffs vom Szenario ab (vgl. Abbildung 11-5). Im Szenario PKW fiel der maximale Spurversatz bei entkoppelten Eingriffen im Mittel geringer aus als bei gekoppelten Eingriffen. Auffällig ist, dass der maximale Spurversatz bei gekoppelten Eingriffen deutlich höher ausfiel als vom Systemeingriff angestrebt (ca. 1.75 m). Bei entkoppelten Eingriffen wurde im Mittel in etwa der angestrebte Spurversatz erreicht (vgl. Tabelle 11-1). Im Szenario Radfahrer wurde im Mittel bei gekoppelten Eingriffen ein geringerer maximaler Spurversatz erreicht als bei entkoppelten Eingriffen.

Zudem fällt auf, dass der maximale Spurversatz bei gekoppelten Eingriffen im Mittel deutlich geringer ausfiel als angestrebt. Bei entkoppelten Eingriffen weicht der maximale Spurversatz weniger stark vom angestrebten Spurversatz ab, was aufgrund der Eingriffsgestaltung und der beobachteten Reaktionsmuster auch zu erwarten war (vgl. Tabelle 11-1). Wegen des explorativen Ansatzes der Studie und den unterschiedlichen Fallzahlen wurde an dieser Stelle auf eine inferenzstatische Auswertung verzichtet.

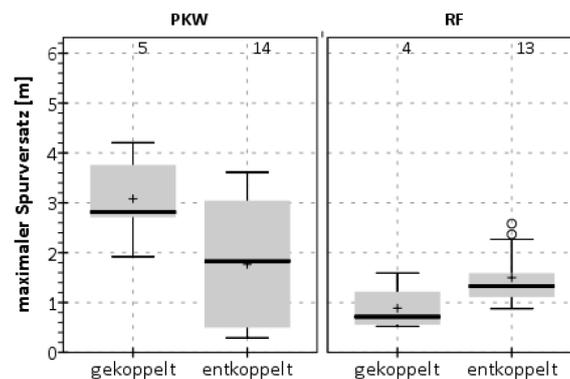


Abbildung 11-5. Maximaler Spurversatz [m] im Nutzenfall in Abhängigkeit von der Gestaltung des Eingriffs (gekoppelt vs. entkoppelt) und dem Szenario (PKW vs. Radfahrer).

Tabelle 11-1. Maximaler Spurversatz [m] in Abhängigkeit von der Gestaltung des Eingriffs (gekoppelt vs. entkoppelt) und dem Szenario (PKW vs. Radfahrer).

Szenario	Eingriffsgestaltung	M	MIN	MAX	SD	N
PKW	gekoppelt	3.08	1.92	4.21	.91	5
	entkoppelt	1.77	.29	3.61	1.29	14
Radfahrer	gekoppelt	.89	.52	1.59	.49	4
	entkoppelt	1.50	.88	2.58	.56	13

11.4.2 Fehlerfall

Reaktionsmuster Mit entkoppelter Lenkung zeigten nur wenige Fahrer vor Ende des Eingriffs (ca. 0.5 s nach Beginn des Eingriffs) eine eindeutige Lenkreaktion entgegen der Eingriffsrichtung. Bei gekoppelter Lenkung werden hingegen bereits vor 0.5 s Lenkreaktionen entgegen der Eingriffsrichtung beobachtet (vgl. Abbildung 11-6). Allerdings zeigten nahezu alle Fahrer eine Gegenlenkreaktion in Folge eines entkoppelten Eingriffs. Mit gekoppeltem Eingriff wurde zumindest in einem Fall eine eindeutige Mitlenkreaktion beobachtet (vgl. hierzu auch Kapitel 8.4.2). Bei entkoppelten Eingriffen wurde hingegen bei keinem Fahrer ein deutlicher Anstieg der Lenkradwinkelgeschwindigkeit beobachtet, weshalb nicht von einer Mitlenkreaktion ausgegangen wird (vgl. Abbildung 11-6).

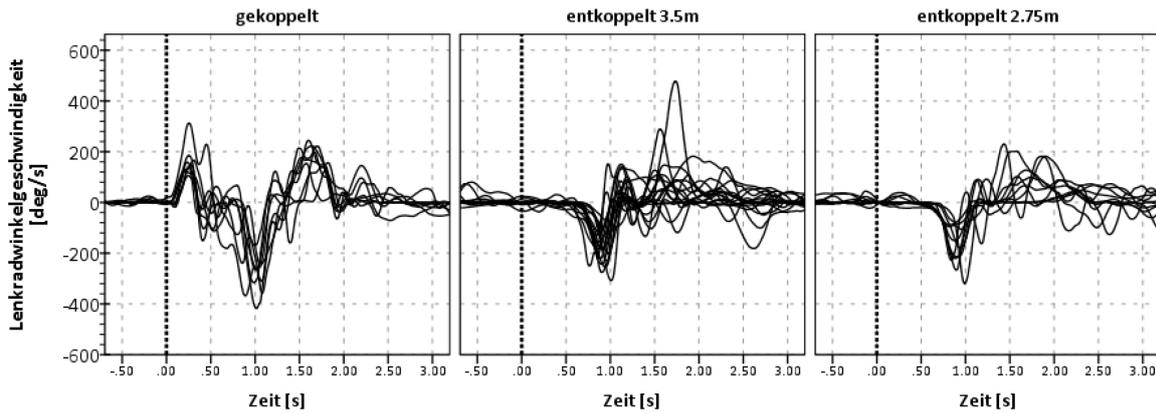


Abbildung 11-6. Zeitverlauf der Lenkradwinkelgeschwindigkeit [deg/s] in Abhängigkeit von der Gestaltung des Eingriffs (gekoppelt vs. entkoppelt) und der verfügbaren Fahrstreifenbreite (3.5 m vs. 2.75 m). Die senkrechte Linie kennzeichnet den Eingriffsbeginn.

Im Mittel erfolgte bei gekoppelten Eingriffen die Gegenlenkreaktion nach 0.4 s und damit ca. 0.2 s früher als bei entkoppelten Eingriffen (vgl. Abbildung 11-7 und Tabelle 11-2), was die Annahmen im Rahmen von Hypothese 11-2 bestätigt. Deskriptiv scheint die Variation der Fahrstreifenbreite in Fahrtrichtung ebenfalls den Zeitpunkt der Gegenreaktion beeinflusst zu haben. Allerdings ist der Unterschied im Mittel mit 0.04 s sehr gering (vgl. Tabelle 11-2).

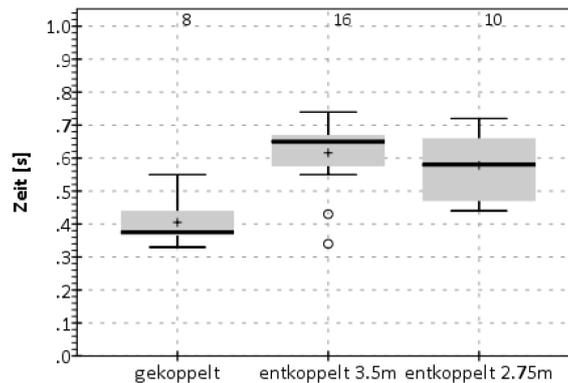


Abbildung 11-7. Zeitpunkt der Gegenlenkreaktion [s] in Abhängigkeit von der Eingriffsgestaltung (gekoppelt vs. entkoppelt) und der Fahrstreifenbreite (3.5 m vs. 2.75 m).

Tabelle 11-2. Zeitpunkt der Gegenlenkreaktion [s] im Fehlerfall in Abhängigkeit von der Gestaltung des Eingriffs (gekoppelt vs. entkoppelt) und der verfügbaren Fahrstreifenbreite (3.5 m vs. 2.75 m).

Eingriffsgestaltung	M	MIN	MAX	SD	N
gekoppelt	0.40	0.33	0.55	0.07	8
entkoppelt 3.5 m	0.62	0.34	0.74	0.11	16
entkoppelt 2.75 m	0.58	0.44	0.72	0.10	10

Maximaler Spurversatz Der maximale Spurversatz fiel bei gekoppelten Eingriffen im Mittel geringer aus als bei entkoppelten Eingriffen (vgl. Abbildung 11-8). Abgesehen von wenigen Einzelfällen fiel der maximale Spurversatz jedoch in allen Bedingungen geringer aus als der vom Systemeingriff angestrebte Spurversatz (ca. 1.75 m). Im Mittel wurde in Folge der Eingriffe ein maximaler Spurversatz zwischen 0.51 m und 0.75 m beobachtet (vgl. Tabelle 11-3) Ein eindeutiger Einfluss der Fahrstreifenbreite auf den maximalen Spurversatz bei entkoppelten Eingriffen ist deskriptiv nicht zu erkennen. Aufgrund des explorativen Charakters der Studie und der unterschiedlichen Fallzahlen wurde auch hier auf eine inferenzstatistische Analyse der Kennwerte verzichtet.

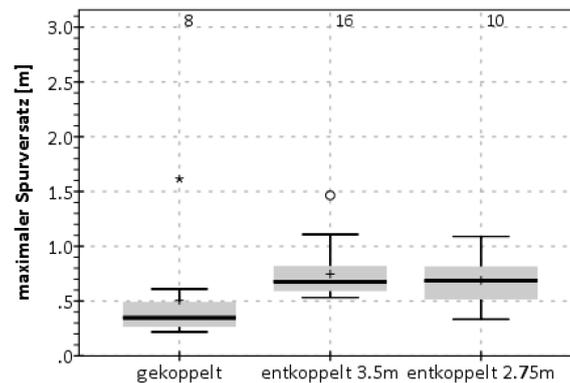


Abbildung 11-8. Maximaler Spurversatz [m] im Fehlerfall in Abhängigkeit von der Gestaltung des Eingriffs (gekoppelt vs. entkoppelt) und der verfügbaren Fahrstreifenbreite in Fahrtrichtung (3.5 m vs. 2.75 m). Der vom Systemeingriff angestrebte Spurversatz betrug 1.75 m.

Tabelle 11-3. Maximaler Spurversatz [m] im Fehlerfall in Abhängigkeit von der Gestaltung des Eingriffs (gekoppelt vs. entkoppelt) und der verfügbaren Fahrstreifenbreite in Fahrtrichtung (3.5 m vs. 2.75 m).

Eingriffsgestaltung	M	MIN	MAX	SD	N
gekoppelt	0.51	0.22	1.61	0.46	8
Entkoppelt 3.5 m	0.75	0.53	1.46	0.24	16
Entkoppelt 2.75 m	0.69	0.33	1.09	0.23	10

11.5 Diskussion

11.5.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Nutzenfall konnten bei Eingriffen mit entkoppelter Lenkung wie erwartet häufiger Kollisionen verhindert werden als bei Eingriffen mit gekoppelter Lenkung (vgl. Hypothese 11-1). Unabhängig davon, ob die Fahrer einen Eingriff mit gekoppelter und entkoppelter Lenkung erlebten, wurden Reaktionsmuster beobachtet, die auf ein Mitlenken hindeuten. Allerdings zeigte sich ein starker Einfluss des Szenarios. Im Szenario PKW zeigten deutlich mehr Fahrer eine Mitlenkreaktion als im Szenario Radfahrer.

Im Fehlerfall konnte gezeigt werden, dass Fahrer bei gekoppelten Eingriffen früher eine dem Eingriff entgegen gerichtete Lenkreaktion aufweisen als bei entkoppelten Eingriffen, was im Wesentlichen Hypothese 11-2 bestätigt. Der zeitliche Unterschied betrug im Mittel ca. 0.2 s. Der maximale Spurversatz fiel im Fehlerfall in Folge von Eingriffen mit entkoppelter Lenkung größer aus als in Folge von Eingriffen mit gekoppelter Lenkung.

In der folgenden Tabelle werden die in Abschnitt 11.2 getroffenen Hypothesen nochmals zusammenfassend dargestellt. Dabei wird gekennzeichnet ob die Hypothesen bestätigt werden können oder die Befundlage den Hypothesen widerspricht. Finden sich sowohl Belege, welche die Hypothese bestätigen als auch Belege, welche der Hypothese widersprechen wird darauf hingewiesen, dass die Befundlage uneindeutig ist.

Tabelle 11-4. Zusammenfassende Darstellung der Befundlage bezogen auf die Hypothesen.

Hypothese		
Hypothese 11-1:	Die Entkopplung von Lenkung und Fahrzeugbewegung erhöht die Wirksamkeit von automatischen Ausweicheingriffen im Nutzenfall.	bestätigt
Hypothese 11-2:	Die Entkopplung von Lenkung und Fahrzeugbewegung führt aufgrund der fehlenden haptischen Rückmeldung zu einer langsameren Reaktion im Fehlerfall.	bestätigt

11.5.2 Diskussion

Mithilfe dieser Studie sollte überprüft werden, welchen Einfluss eine Entkopplung der Lenkung und das resultierende Ausbleiben der haptischen Rückmeldung im Anwendungsfall haben (vgl. Forschungsfrage 11-1).

Im Nutzenfall führten entkoppelte Eingriffe in die Querführung wie erwartet zu einer besseren Wirksamkeit als entkoppelte Eingriffe mittels einer Lenkmomentüberlagerung (vgl. Hypothese 11-1). Dies bestätigt im Wesentlichen die Befunde von Hesse et al. (2013) und Schieben et al. (2014). Ursache hierfür scheinen vor allem die dämpfenden Verhaltensweisen der Fahrer bei gekoppelten Eingriffen zu sein. Dies zeigt sich besonders deutlich im Szenario Radfahrer. Hier wurden mit entkoppeltem Lenkeingriff deutlich weniger Kollisionen beobachtet als mit gekoppeltem Lenkeingriff, obwohl auch beim entkoppelten Eingriff keiner der Fahrer eine Mitlenkreaktion zeigte.

Die Unterschiede zwischen den Untersuchungsszenarien PKW und Radfahrer deuten zusätzlich darauf hin, dass dämpfende Verhaltensweisen vor allem dann beobachtet werden, wenn der Fahrer sich bei Beginn des Eingriffs oder im weiteren Verlauf nicht für ein Ausweichen entscheidet. Im Szenario PKW werden mit gekoppelter Lenkung insgesamt weniger dämpfende Verhaltensweisen beobachtet als im Szenario Radfahrer. Gleichzeitig wurde im Szenario PKW auch bei entkoppelten Eingriffen häufiger ein Aufgreifen des Ausweicheingriffs beobachtet als im Szenario Radfahrer. Ein Vergleich des Zeitpunkts der Mitlenkentscheidung war leider nicht möglich, so dass keine Aussage darüber getroffen werden kann, ob Lenkeingriffe mit gekoppelter Lenkung die Handlungsentscheidung im Nutzenfall beschleunigen oder verzögern. Das unterschiedliche Verhalten der Fahrer ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass der PKW insgesamt besser wahrnehmbar war als der Radfahrer. So war der PKW in der Simulation (wie in der Realität) größer als der Radfahrer. Zusätzlich hob sich der PKW möglicherweise durch die Farbgestaltung besser vom Hintergrund ab als der Radfahrer. Ein Einfluss der zeitlichen Situationsgestaltung kann hingegen ausgeschlossen werden, da beide Fahrzeuge zum gleichen Zeitpunkt ausgelöst wurden (siehe Kapitel 11.3.1). Alternativ besteht die Möglichkeit, dass die Fahrer aufgrund der Gestaltung der Szenarien eher mit einem ausparkenden Fahrzeug rechneten als mit einem kreuzenden Radfahrer.

Im Fehlerfall zeigte sich ein weiterer Unterschied zwischen gekoppelten und entkoppelten Eingriffen. Bei entkoppelten Eingriffen brauchten die Fahrer im Mittel deutlich länger, um eine dem Lenkeingriff entgegen gerichtete Lenkreaktion zu zeigen als bei gekoppelten Eingriffen. Dies führt im Vergleich zu gekoppelten Eingriffen auch zu einem deutlich größeren Spurversatz in Folge des unberechtigten Eingriffs. Damit wird ein möglicher Erklärungsansatz für die Befunde von Hesse et al. (2013) und Schieben et al. (2014) geliefert. Demnach ist die schlechtere Kontrollierbarkeit entkoppelter Eingriffe auch auf die verzögerte Reaktion der Fahrer zurückzuführen (vgl. Hypothese 11-2). Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass die haptisch getriggerten sensomotorischen Kontrollprozesse zu einer schnelleren Wahrnehmung und damit auch zu einer schnelleren Reaktion des Fahrers auf die unberechtigten Eingriffe führen. Damit würde die Vermutung von Schumann (1994) bestätigt, dass haptische Informationen am Lenkrad bestehende Kontrollprozesse unterbrechen können oder dem Fahrer in Sinne eines „*redundancy gain*“ zusätzliche Informationen für den Kontrollprozess der Querführungsaufgabe zur Verfügung stellen, auf die er zurückgreifen kann (vgl. hierzu auch Kapitel 2.2.4.1). Erklärt wird dies dadurch, dass bereits auf Ebene der sensomotorischen Regelung eine Abweichung vom ursprünglichen Regelziel festgestellt wird. In Folge dessen wird bereits auf der sensomotorischen Ebene versucht, diese Abweichung zu kompensieren. Zusätzlich führt die auf Ebene

der sensomotorischen Regelung registrierte Abweichung zu einer bottom-up getriggerten visuellen Überprüfung. Ermöglicht wird dies durch die schnellere Verarbeitung der haptischen im Vergleich zu den visuellen Informationen (siehe hierzu auch Kapitel 2.3).

Allerdings stehen die Befunde möglicherweise im Widerspruch zu den Arbeiten von Neukum und Kollegen. In den Studien wurden bei Eingriffen mittels einseitigen Bremsungen (vgl. Kapitel 2.2.1.4) oder einer Lenkradwinkelüberlagerung vergleichbare Reaktionszeiten wie bei Eingriffen mittels einer Lenkmomentüberlagerung beobachtet (vgl. Neukum & Krüger, 2003; Neukum et al., 2010a; Neukum et al., 2010b). Grundsätzlich sollte der Zusammenhang zwischen Lenkrad- und Fahrzeugbewegung bei Eingriffen mittels einseitiger Bremsungen oder einer Lenkradwinkelüberlagerung ähnlich sein wie bei den entkoppelten Eingriffen in dieser Studie. Allerdings resultiert in Folge dieser Eingriffe meist ein für den Fahrer spürbares Lenkmoment (vgl. Dang et al., 2012; Neukum & Krüger, 2003). Dieses Lenkmoment ist möglicherweise die Ursache für die vergleichbaren Reaktionszeiten. Ist dieses Lenkmoment ausreichend stark, sollte es die gleichen Prozesse auslösen wie bereits oben beschrieben. Allerdings kann auch nicht ausgeschlossen werden, dass die Unterschiede eine Folge der Untersuchungsumgebung sind, da der eingesetzte Simulator die resultierende Querschleunigung nur eingeschränkt darstellen kann. Bisher wurde nicht detailliert untersucht, welchen Einfluss die Wahrnehmung der Querschleunigung auf das Querführungsverhalten des Fahrers und seine Reaktionszeiten auf fehlerhafte Eingriffe in die Querführung hat. Allerdings gibt die Studie von Wierwille et al. (1983) Hinweise darauf, dass die zusätzliche Darstellung von Fahrzeugbeschleunigungen zu einer schnelleren Reaktion auf externe Störungen der Querführung führt. Daher wäre eine Replikation dieser Studie im Realfahrzeug erforderlich, um einen Einfluss der Untersuchungsumgebung ausschließen zu können.

Zusätzlich fällt auf, dass die Reaktion der Fahrer tendenziell schneller ausfällt, wenn die Fahrstreifenbreite geringer ist. Dies deutet zusätzlich auf einen Einfluss des visuellen Kontrollprozesses auf die Reaktionsgeschwindigkeit der Fahrer hin. In den Studien von Keele und Posner (1968) konnte gezeigt werden, dass visuelle Informationen bereits nach 190-260 ms (ab Beginn der Zielbewegung) bei der Bewegungsausführung berücksichtigt werden können. Daher kann nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass der Fahrer bereits früher auf Informationen der visuellen Regelung zurückgreifen kann als bisher angenommen.

11.5.3 Schlussfolgerung

Die Ergebnisse der explorativen Studie deuten darauf hin, dass die haptische Rückmeldung am Lenkrad die Reaktion auf unberechtigte Eingriffe beschleunigen kann. Dies spricht für einen Einfluss der sensomotorischen Kontrollprozesse bei der Querführung des Fahrzeugs und bei der Reaktion auf automatischen Ausweicheingriffe. Zusätzlich deutet dieser Befund darauf hin, dass die Informationen innerhalb des sensomotorischen Kontrollprozesses schneller verarbeitet werden als innerhalb des visuellen Kontrollprozesses.

Im Nutzenfall konnte auf Basis der Reaktionsmuster zudem kein Hinweis auf eine Interferenz mit der Handlungsentscheidung identifiziert werden. Die Ergebnisse deuten eher darauf hin, dass Lenkeingriffe mit haptischer Rückmeldung am Lenkrad immer dann gedämpft werden, wenn der Fahrer sich noch nicht für ein Ausweichen entscheiden konnte. Dies ist ein möglicher Hinweis darauf, dass die Kompensationsreaktion immer dann getriggert wird, wenn kein Handlungsziel für eine entsprechende Lenkreaktion vorliegt.

Diese Kompensationsreaktion wird erst dann abgebrochen, wenn der Fahrer sein Handlungsziel anpassen konnte und Handlungsziel mit dem Ziel des Ausweicheingriffs korrespondiert. Auch dies deutet darauf hin, dass Informationen innerhalb des sensomotorischen Kontrollprozesses schneller verarbeitet werden als innerhalb des visuellen Kontrollprozesses.

Grundsätzlich bestätigen die Befunde daher die Annahme, dass sich das Verhalten der Fahrer mithilfe zweier Kontrollprozesse erklären lässt, die unterschiedlich schnell arbeiten (vgl. Kapitel 2.3 und Kapitel 3). Der innere sensomotorische Kontrollprozess kann Informationen dabei schneller verarbeiten als der äußere visuelle Kontrollprozess, was die schnellere Reaktion im Falle eines Eingriffs mit gekoppelter Lenkung erklärt. Dabei ist der innere Kontrollprozess vor allem für die Umsetzung der motorischen Handlung zuständig, während der äußere die Kontrolle des Handlungserfolgs und die Anpassung der übergeordneten Handlungsziele übernimmt.

Im Falle eines automatischen Ausweicheingriffs mit gekoppelter Lenkung führt die schnellere Verarbeitung der haptischen Informationen auf Ebene der sensomotorischen Regelung möglicherweise zu einer reflexartigen, haptisch getriggerten Reaktion des Fahrers. Zusätzlich führt die auf Ebene der sensomotorischen Regelung registrierte Abweichung vom Handlungs-/Regelziel zu einer bottom-up getriggerten visuellen Überprüfung. Im Falle eines entkoppelten Eingriffs wird auf sensomotorischer Ebene hingegen keine Abweichung registriert. Daher kann der Fahrer die Abweichung von seinem Handlungsziel nur visuell erfassen, was aufgrund der unterschiedlichen Verarbeitungszeit zu einer langsameren Reaktion führt. Die Ergebnisse dieser Studie deuten darauf hin, dass der Unterschied in der Verarbeitungszeit zwischen den beiden Kontrollprozessen ca. 200 ms beträgt.

12 Studienübergreifende Zusammenfassung und Diskussion

Im Folgenden werden die Befunde der verschiedenen Studien zusammengefasst und bezogen auf die in Kapitel 3.1 getroffenen Annahmen, die anhand des vorgeschlagenen Verhaltensmodells erstellt wurden, diskutiert. Daraus sollen Hinweise für die Gültigkeit des vorgeschlagenen Verhaltensmodells abgeleitet werden. Zusätzlich wird diskutiert, zu welchen Fragestellungen weiterer Forschungsbedarf besteht und welche Bedeutsamkeit die Befunde für die (Grundlagen-)Forschung und die Anwendung in der Praxis haben.

12.1 Einfluss des Handlungsziels

Es wurde angenommen, dass das Handlungsziel des Fahrers von der Bahnführungs- oder taktischen Ebene vorgegeben wird und in Form eines Feedforwards, sowohl im sensomotorischen als auch im visuellen Regelkreis, berücksichtigt wird (vgl. Kapitel 3.1.1). Externe Eingriffe in die Querführung führen demzufolge zu einer Abweichung von den zu erwartenden Sinneseindrücken, woraus folgt, dass die Fahrer versuchen, die Abweichung zu kompensieren. Dies sollte sich vor allem in Situationen zeigen, in denen kein Hindernis (Fehlerfall bzw. unberechtigter Eingriff) vorhanden ist. In Situationen, in denen hingegen ein Hindernis vorhanden ist (Nutzenfall bzw. berechtigter Eingriff), sollte demzufolge keine Kompensation beobachtet werden. Allerdings wurde auch erwartet, dass in Situationen mit einem Hindernis ebenfalls kompensatorische Reaktionen zu beobachten sind, wenn die Fahrer ihr Handlungsziel nicht an die Erfordernisse der Situation anpassen konnten, bevor die Kompensationsreaktion beginnt. Als Ursache hierfür wurden unterschiedliche Verarbeitungsgeschwindigkeiten der beteiligten Regelkreise vermutet. In Fällen, in denen die Fahrer die Situation bereits verarbeitet und ihr Handlungsziel angepasst haben, sollten sich hingegen keine kompensatorischen Verhaltensweisen im Reaktionsmuster der Fahrer wiederfinden. Erklärt wird dies dadurch, dass durch die Anpassung des Handlungsziels auf übergeordneter Ebene auch eine Anpassung des Regelziels auf sensomotorischer Ebene erfolgt. In Folge dessen sollten die quasi-automatisch ablaufenden Kompensationsreaktionen nicht mehr auftreten oder zumindest unterdrückt werden.

Nahezu alle Studien zeigten, dass das Handlungsziel des Fahrers einen starken Einfluss auf das Reaktionsmuster hat. Dies zeigte sich vor allem beim Vergleich des Nutzen- und des Fehlerfalls. Entschied sich der Fahrer für ein Ausweichen, beeinflusste dies nicht nur die Kennwerte des Lenkverhaltens, wie z. B. den Lenkradwinkel und die Lenkradwinkelgeschwindigkeit, sondern auch den zeitlichen Verlauf der Reaktion auf systeminitiierte Eingriffe. In Folge wurden die Maxima von Lenkradwinkel und Lenkradwinkelgeschwindigkeit teilweise später beobachtet als sie aufgrund der Eingriffsgestaltung zu erwarten wären. Das ist ein Indiz dafür, dass die Reaktion und das zeitliche Reaktionsmuster des Fahrers nicht nur eine Folge der Eingriffsgestaltung sind, sondern auch durch das Handlungsziel des Fahrers beeinflusst werden können. Wäre das nicht der Fall, hätten in Abhängigkeit der Eingriffsgestaltung sowohl im Nutzen- als auch im Fehlerfall stereotypische Reaktionsmuster beobachtet werden sollen, was auf einen automatisch ablaufenden Prozess hingedeutet hätte.

Allerdings zeigt sich auch, dass die Fahrer wahrscheinlich mehr Zeit benötigen, um ihr Handlungsziel anzupassen, als ihnen in den Studien zur Verfügung stand.

In der Studie I (vgl. Kapitel 5) konnte gezeigt werden, dass Fahrer ohne Eingriff ca. 0.4- 0.6 s benötigten, um die Situation zu analysieren und eine entsprechende Lenkbewegung zu initiieren. In den anderen Studien stand den Fahrern zwischen Erscheinen des Hindernisses und Beginn des Eingriffs teilweise nur eine Zeitspanne von 0.2 s zur Verfügung, was wahrscheinlich nicht ausreichte, um die Situation zu analysieren und sich für eine Reaktion zu entscheiden (vgl. Kapitel 6). Insbesondere bei erstmaligem Erleben eines Ausweicheingriffs zeigte sich eine starke Dominanz stereotypischer Reaktionsmuster, die auf eine Kompensationsreaktion des Fahrers hindeuten. Auslöser hierfür sind wahrscheinlich durch die haptische Rückmeldung getriggerte automatisch ablaufende Prozesse der sensomotorischen Regelung, die dann zum Tragen kommen, wenn die Fahrer ihr Handlungsziel bei Beginn des Eingriffs noch nicht angepasst haben. Dies ist insbesondere für die Praxis relevant, da in der Realität nicht davon ausgegangen werden kann, dass der Fahrer den automatischen Eingriff innerhalb einer überschaubaren Zeitspanne mehrfach erlebt.

Allerdings wird auch deutlich, dass Fahrer möglicherweise lernen können, berechnete Ausweicheingriffe als solche zu erkennen, wenn sie wiederholt mit Ausweicheingriffen konfrontiert werden (vgl. Studie II und Studie III). Bei mehrmaligem Erleben eines Ausweicheingriffs zeigte sich im zeitlichen Verlauf eine Zunahme von Verhaltensweisen, die auf ein Aufgreifen der Lenkeingriffe hindeuten. Dies ist ein Indiz dafür, dass bestehende Reaktionsmuster durch Lernen beeinflusst werden können. Das bedeutet, dass der Fahrer durch entsprechendes Training lernen könnte, den automatischen Ausweicheingriff aufzugreifen. Allerdings ist fraglich, ob dies zielführend ist, da es möglicherweise auch dazu führen könnte, dass andere Störungen, wie z. B. Seitenwind, ebenfalls nicht mehr von den Fahrern kompensiert werden.

Zukünftige Studien sollten daher auch berücksichtigen, ob das wiederholte Erleben von systeminitiierten Eingriffen in die Querführung die Reaktion von Fahrern auf Störungen der Querführung beeinträchtigt und ob die Gestaltung der Eingriffe eine eindeutige Differenzierung zwischen Störungen und Eingriffen erlaubt. Es wird jedoch angenommen, dass der Lerneinfluss eher bei häufig in die Querführung eingreifenden Systemen relevant ist. Bei mutmaßlich selten eingreifenden Systemen, wie Notausweichassistenten, ist nicht von einem Lernprozess auszugehen, da der Fahrer den Eingriff nur selten erlebt. Bezogen auf die psychokybernetischen Modelle zur Verhaltenssteuerung bedeutet das, dass der Fahrer keine Beziehung zwischen dem Stimulus (dem Eingriff) und dem geforderten Verhalten (Ausweichen) herstellen kann. Das ist insbesondere für die Bewertung der Wirksamkeit von Notausweichassistenten relevant, da in der Praxis nicht davon auszugehen ist, dass Fahrer den automatischen Eingriff mehrfach hintereinander erleben. In Folge dessen sollte sich die Bewertung dieser Systeme auf das erstmalige Erleben beziehen und nicht auf Wiederholungen. Allerdings könnte überprüft werden, ob sich die Vertrautheit mit ähnlichen, häufig eingreifenden Systemen, wie z. B. Spurführungssystemen, auf das Reaktionsmuster der Fahrer auswirkt. Grundlage hierfür ist, dass der Fahrer durch andere Assistenzsysteme bereits Lernerfahrungen mit Eingriffen des Fahrzeugs in die Querführung sammeln konnte, was sich möglicherweise auch auf sein Verhalten im Falle eines automatischen Ausweicheingriffs auswirkt.

Dem Eingriff vorgelagerte Warnungen können möglicherweise unterstützend eingesetzt werden, um sicherzustellen, dass der Fahrer bei Beginn des Eingriffs sein Handlungsziel bereits angepasst hat; allerdings zeigt sich dies nur im Nutzenfall. Im Fehlerfall hatten die untersuchten Warnungen überwiegend keinen positiven Einfluss (vgl. Studie IV). Es wird angenommen, dass der zeitliche Abstand zwischen Warnung und Beginn des Eingriffs mindestens 0.4 s betragen muss, damit der Fahrer ausreichend Zeit hat, um sein Handlungsziel anzupassen. Auf Grundlage der Ergebnisse von Studie I (vgl. Kapitel 5) wird davon ausgegangen, dass der Fahrer möglicherweise sogar noch mehr Zeit

zwischen Warnung und Eingriff benötigten könnte und die Zeitspanne zwischen Warnung und Beginn des Eingriffs entsprechend größer ausfallen sollte (≥ 0.6 s). Um das Potenzial von vorgelagerten Warnungen besser einschätzen zu können, sind jedoch weitere Studien erforderlich. Dabei sollte die Zeitspanne zwischen Warnung und Eingriff gezielt variiert werden, um genauer einzugrenzen, welcher Abstand zu bevorzugen ist. Zusätzlich sollte überprüft werden, ob in Abhängigkeit der verschiedenen Warnmodalitäten möglicherweise unterschiedliche Zeitspannen zwischen Warnung und Eingriff beachtet werden müssen. Einen Anhaltspunkt hierfür liefern Befunde zur sogenannten „*crossmodal action*“ aus der Grundlagenforschung. Hierbei konnte gezeigt werden, dass die gleichzeitige Koordination mehrerer Modalitäten zur Erfüllung bestimmter Aufgabenanforderungen die Reaktionsausführung verzögern kann (vgl. Huestegge & Hazeltine, 2011; Huestegge & Koch, 2010). Des Weiteren könnten allgemeine Befunde zur Doppelaufgabeninterferenz berücksichtigt werden, wie zum Beispiel die sogenannte Psychologische Refraktärperiode (PRP). Die PRP bezeichnet den Effekt, dass eine bestimmte Zeitspanne zwischen der Darbietung zweier Stimuli erforderlich ist, um die entsprechenden Reaktionen verzögerungsfrei durchführen zu können (vgl. Pashler, 1994). Möglicherweise sind die in der vorliegenden Arbeit beobachteten Reaktionsmuster auf vergleichbare Prozesse und Mechanismen zurückzuführen. Berücksichtigt man diese bei der Gestaltung von Ausweichassistenten, könnten Probleme bei der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion minimiert werden.

Im Hinblick auf die bestehende Problematik, nämlich, dass unklar ist, welches Handlungsziel der Fahrer bei Beginn der automatischen Ausweicheingriffe verfolgt, könnten fahrerinitiierte Ausweicheingriffe eine mögliche Lösung darstellen (vgl. Kapitel 2.2.4.2). Da diese allerdings nicht wirksam sind, wenn der Fahrer Ausweichen nicht als Handlungsoption in Betracht zieht, sollte überprüft werden, inwiefern vorgelagerte Warnungen oder Lenkempfehlungen die Wirksamkeit verbessern können, wenn die Fahrer Ausweichen tatsächlich als Handlungsoption in Betracht ziehen (vgl. hierzu auch Gußner et al., 2015). Hierbei können die vorliegenden Erkenntnisse bezüglich der erforderlichen Zeitspanne zur Anpassung des Handlungsziels berücksichtigt werden. Allerdings sollte dabei auch eine Überprüfung der Kontrollierbarkeit erfolgen, da die Möglichkeit besteht, dass Fahrer sich „blind“ auf die Warnung oder Lenkempfehlung verlassen, oder deren Gestaltung zu Lenkreaktionen führt, die eine Initiierung des Ausweicheingriffs begünstigen (vgl. Studie IV).

12.2 Einfluss der haptischen Rückmeldung, der Eingriffscharakteristik und der Aktoren

Anhand des Modells wurde angenommen, dass das Vorhandensein und die Gestaltung der haptischen Rückmeldung in Folge eines Eingriffs die Reaktion der Fahrer beeinflusst (vgl. Kapitel 3.1.2). Ursache hierfür ist mutmaßlich die Beteiligung sensomotorischer Kontrollprozesse bei der Steuerung des Fahrzeugs, ähnlich wie bei der Kontrolle von Zielbewegungen (siehe Kapitel 2.3). Diese werden durch die unerwartete haptische Rückmeldung am Lenkrad im Falle eines Eingriffs beeinflusst, da es zu einer Abweichung zwischen den erwarteten und tatsächlichen Sinneseindrücken kommt. Die Ergebnisse der Studien weisen darauf hin, dass die Eingriffscharakteristik und damit auch die haptische Rückmeldung wie angenommen einen entscheidenden Einfluss auf das Fahrerverhalten hat. Dies zeigt sich sowohl in Folge einer Variation der Eingriffscharakteristik (vgl. Studie II) als auch beim Vergleich von Eingriffen mit und ohne Rückmeldung am Lenkrad (vgl. Studie VII).

Grundsätzlich hängen die Kennwerte und der zeitliche Verlauf des Lenkverhaltens von der Eingriffscharakteristik und damit auch von der Gestaltung der haptischen Rückmeldung ab. Dies zeigt

sich sowohl im Nutzen- als auch im Fehlerfall. Damit werden die Befunde von Neukum et al. (2010a) und Schmidt (2009) bestätigt und es konnte ergänzend gezeigt werden, dass dies auch im Nutzenfall gilt. Auffällig dabei ist, dass Fahrerreaktionen in der Regel erst dann beobachtet werden, wenn der Eingriff seine maximale Eingriffsstärke erreicht hat. Wird die Eingriffsstärke schnell aufgebaut, können die Fahrer anscheinend schneller auf den Eingriff reagieren. Wird die Eingriffsstärke hingegen langsam über einen längeren Zeitraum aufgebaut, können die Fahrer erst später auf den Eingriff reagieren. Diese Verzögerung der Fahrerreaktion ist ein deutlicher Hinweis auf den Einfluss der angenommenen sensomotorischen Kontrollprozesse bei der Verhaltensausführung und wird wie folgt erklärt: Im Falle eines langsamen Aufbaus des Lenkmoments findet eine kontinuierliche Änderung des Störungsbildes statt. Diese kontinuierliche Änderung der Störung erfordert wahrscheinlich eine kontinuierliche Anpassung der sensomotorischen Regelung, bis ein stabiler Regelzustand erreicht wird. Erst wenn dieser stabile Zustand erreicht ist, kann eine gezielte Lenkreaktion initiiert werden, da die erforderlichen Kräfte für die Ausführung der Lenkbewegung erst ab diesem Zeitpunkt korrekt eingeschätzt werden können. Das könnte bedeuten, dass für die Verhaltensausführung nicht nur Informationen des visuellen Regelkreises sondern auch des sensomotorischen Regelkreises herangezogen werden. In Folge dessen können untergeordnete Kontrollprozesse die Handlungsausführung verzögern, wenn auf dieser Ebene nicht ausreichend Informationen für die Handlungsausführung bereitgestellt werden können. Für die Gestaltung von automatischen Ausweicheingriffen könnte ein langsamer Aufbau des Lenkmoments daher von Nachteil sein, da eine Übersteuerungsreaktion der Fahrer im Falle eines unberechtigten Eingriffs erst später erkannt werden kann. Objektive Kriterien für die Wirksamkeit und die Kontrollierbarkeit, wie die Kollisionshäufigkeiten oder der maximale Spurversatz, deuten jedoch nicht auf eindeutigen Vor- oder Nachteil der beiden Eingriffscharakteristiken hin. Möglicherweise ist die Zeitspanne zu kurz, um sich auf die Wirksamkeit oder Kontrollierbarkeit der untersuchten Ausweicheingriffe auszuwirken. Alternativ könnten die Unterschiede allerdings auch dadurch erklärt werden, dass es für die Fahrer insgesamt schwieriger ist, Eingriffe mit einem langsamen Aufbau des Lenkmoments zu bemerken. Zum einen wird durch den langsamen Aufbau des Lenkmoments die Bemerkbarkeitsschwelle möglicherweise später erreicht (vgl. hierzu Kapitel 2.2.2), zum anderen ist der Eingriff schlechter von anderen Einflüssen (wie z. B. Spurrillen) zu unterscheiden (vgl. hierzu auch Switkes et al., 2007).

Zusätzlich wird deutlich, dass sich die Kopplung zwischen Fahrzeug- und Lenkradbewegung bei Eingriffen mittels einer Lenkmomentüberlagerung nicht nur negativ auswirkt. Die Ergebnisse von Studie VII (vgl. Kapitel 11) deuten darauf hin, dass die haptische Rückmeldung die Reaktion der Fahrer auf unberechtigte Lenkeingriffe beschleunigen kann, was sich auch positiv auf die Kontrollierbarkeit auswirkt. Dies kann zwei Ursachen haben. Zum einen könnte die haptische Rückmeldung des Eingriffs am Lenkrad, wie bereits beschrieben, haptisch getriggerte Kontrollprozesse auf Ebene der sensomotorischen Regelung initiieren, die die Fahrer dazu bringen, schneller auf Lenkeingriffe zu reagieren. Zum anderen stehen dem Fahrer insgesamt mehr Informationen zur Verfügung, was die Reaktion ebenfalls beschleunigen könnte (vgl. Schumann, 1994). Grundsätzlich lassen sich diese beiden Erklärungsansätze nicht voneinander trennen, da beide dem Phänomen des „*redundancy gain*“ zugeschrieben werden können (vgl. Miller, 1982; Mordkoff & Yantis, 1991; Schumann, 1994). Die erste Annahme entspricht dabei den sogenannten „*race models*“. Hierbei wird angenommen, dass die schnellere Verarbeitung eines Sinneskanals zur schnelleren Reaktion führt.

Die zweite Annahme entspricht den sogenannten „*coactivation models*“. Hierbei wird angenommen, dass die Integration der Informationen zu einer schnelleren Aktivierung und damit zu einer schnelleren Reaktion führt (vgl. Miller, 1982; Mordkoff & Yantis, 1991).

Interessanterweise benötigten die Fahrer in Studie VII im Fehlerfall ohne haptische Rückmeldung im Mittel etwa gleich viel Zeit (0.5 -0.6 s) bis zur Initiierung einer Gegenlenkbewegung wie Fahrer, die ohne Lenkunterstützung eine Ausweichreaktion zeigen sollen (vgl. Studie I). Dies ist möglicherweise ein Indikator für die grundlegende Verarbeitungszeit des Fahrers bei der Umsetzung von gezielten Lenkbewegungen, wenn lediglich visuelle Informationen zur Verfügung stehen.

Zusammengefasst bedeutet dies, dass die Eingriffscharakteristik und die haptische Rückmeldung am Lenkrad einen entscheidenden Einfluss auf die Fahrreaktion haben. Neben dem bereits beschriebenen „*redundancy gain*“, der sich insbesondere bei der Reaktion auf unberechtigte Eingriffe auszuwirken scheint, ist dies möglicherweise auch eine Folge erlernter Reiz-Reaktions-Schemata. Diese Reaktions-Schemata sind hierarchisch untergeordneten Ebenen der Verhaltenssteuerung zuzuordnen (vgl. hierzu auch Powers, 1973a; Rasmussen, 1983), wie z. B. der Stabilisierungs- und Kontrollebene in den Verhaltensmodellen von Donges (2012) und Janssen (1979). Im normalen Straßenverkehr stellen äußere Einflüsse, die sich auf die haptische Rückmeldung am Lenkrad auswirken, meist Störungen dar (wie z. B. Spurrillen, Seitenwind o. ä.), die der Fahrer kompensieren muss. Dies äußert sich wahrscheinlich zunächst in quasi-automatisch ablaufenden Kontrollprozessen, die durch die plötzliche Änderung der Krafteinwirkung am Lenkrad hervorgerufen werden. In Folge von berechtigten Eingriffen muss dieses erlernte Verhalten überregelt werden, indem ein neues Handlungsziel vorgegeben wird, was eine Beteiligung höherer Ebenen der Handlungskontrolle und damit mehr Zeit erfordert (siehe hierzu auch Janssen, 1979; Michon, 1985; Rasmussen, 1983). Ist dies der Fall, sollten sich die Reiz-Reaktions-Schemata durch Lernen beeinflussen lassen, was in den Studien zum Teil auch gezeigt werden konnte. Dies bestätigt die hierarchische Struktur des angenommenen Verhaltensmodells und damit auch die Annahme, dass das Reaktionsmuster innerhalb der Kontrollebenen durch das übergeordnete Handlungsziel beeinflusst werden kann. Gleichzeitig bestätigt es damit auch die hierarchische Struktur anderer Verhaltensmodelle, wie zum Beispiel von Donges (2012), Michon (1985) und Janssen (1979) oder die Annahmen von Powers (1973a), dass das Verhalten durch hierarchisch strukturierte Regelkreise gesteuert wird (vgl. Kapitel 2.3).

Auf Grundlage der bisherigen Erkenntnisse und dem aktuellen Kenntnisstand sind Lenkeingriffe mit einem schnellen Aufbau des Lenkmoments zu bevorzugen, da sie die Handlungsentscheidung nicht unnötig verzögern. Bezüglich der Wirksamkeit schneiden entkoppelte Eingriffe ohne Rückmeldung am Lenkrad zwar besser ab als gekoppelte Eingriffe, allerdings sind sie schlechter kontrollierbar. Mithilfe einer Steer-by-Wire-Umsetzung (vgl. Kapitel 2.2.1.3) könnten möglicherweise die Vorteile beider Eingriffsvarianten kombiniert werden. Dazu sollte bei entkoppelten Eingriffen, die aktuell keine haptische Rückmeldung am Lenkrad erzeugen, überprüft werden, ob sich eine (entkoppelte) haptische Rückmeldung des Lenkeingriffs positiv auf das Fahrerverhalten im Nutzen- und Fehlerfall auswirkt. Grundsätzlich gilt dies möglicherweise auch für andere Aktoren, wie die Überlagerungslenkung oder einseitige Bremseingriffe (vgl. Kapitel 2.2.1). Dabei sollten auch die Erkenntnisse zum zeitlichen Ablauf der Fahrreaktion berücksichtigt werden. Zusätzlich sollte überprüft werden, wie Fahrer auf Eingriffe mittels anderer Aktoren reagieren und welche Faktoren hierbei für die Reaktion der Fahrer entscheidend sind. Eine gezielte Analyse des Lenkverhaltens der Fahrer kann dabei Aufschluss über mögliche Vor- und Nachteile der verschiedenen Aktoren liefern und erlaubt damit einen besseren Vergleich verschiedener Eingriffskonzepte. Bisherige Studien (z. B. Hesse et al., 2013; Schieben et al., 2014; Sieber et al., 2015a; Sieber et al., 2015b) liefern dazu keine eindeutigen Erkenntnisse, da die Ergebnisse aufgrund unterschiedlicher Untersuchungsanordnungen und Vorgehen bei der Datenanalyse nicht vergleichbar sind (vgl. Kapitel 2.2.4.3).

12.3 Einfluss der visuellen Rückmeldung

Es wurde angenommen, dass die visuelle Regelung zur Anpassung des übergeordneten Handlungsziels auf Ebene der Bahnführung bzw. auf der taktischen Ebene erforderlich ist. Zusätzlich wurde vermutet, dass die visuelle Rückmeldung insgesamt langsamer verarbeitet wird als die haptische Rückmeldung (vgl. Kapitel 2.3.3). Dies sollte dazu führen, dass Fahrer zunächst dämpfende Verhaltensweisen zeigen und sich erst später für eine Ausweichreaktion entscheiden. Um Hinweise auf den Einfluss der visuellen Rückmeldung zu erhalten, wurde in Studie I zunächst ermittelt, wie lange Fahrer ohne eine Ausweichunterstützung benötigen, bis sie eine entsprechende Lenkreaktion zeigen (vgl. Kapitel 5). Dies dient als Indikator für die Verarbeitungszeit des visuellen Kontrollprozesses. Die Studie ergab, dass Fahrer ca. 0.4 s-0.6 s benötigen, um nach Erscheinen des Hinweisreizes eine Lenkreaktion zu initiieren, was in etwa den Befunden vorheriger Studien entspricht (vgl. Jurecki, 2016; Müsseler et al., 2009; Proctor et al., 2004; Wang et al., 2003). Allerdings gibt dies nur Aufschluss über die Verarbeitungszeit im Nutzenfall. Über die Verarbeitungszeit im Fehlerfall können auf Basis der vorliegenden Ergebnisse keine Aussagen getroffen werden.

Zusätzlich wurde in Studie V durch eine visuelle Ablenkung gezielt versucht, den visuellen Kontrollprozess zu verzögern (vgl. Kapitel 9). Dabei wurde erwartet, dass sich die Verzögerung durch die visuelle Ablenkung vor allem auf das Lenkverhalten im Nutzenfall auswirken sollte. Im Fehlerfall sollte sich hingegen kein Einfluss der visuellen Ablenkung auf das Lenkverhalten zeigen, da angenommen wurde, dass die Fahrer aufgrund der haptischen Rückmeldung nicht auf eine visuelle Rückmeldung angewiesen sind, um die entsprechende Handlung auszuführen und den Lenkeingriff zu unterdrücken. Im Nutzenfall finden sich Hinweise darauf, dass die visuelle Ablenkung möglicherweise die Handlungsentscheidung verzögert. Abgelenkte Fahrer, die das Reaktionsmuster initiales Dämpfen zeigten, brauchten ca. 0.1 s länger um den Lenkeingriff wiederaufzunehmen als aufmerksame Fahrer. Allerdings ist anhand der Ergebnisse nicht eindeutig zu belegen, dass dies eine Folge der visuellen Ablenkung ist. Gleiches gilt für das Verhalten im Fehlerfall. Zwar zeigten auch die abgelenkten Fahrer ähnliche Reaktionen auf unberechtigte Eingriffe wie aufmerksame Fahrer, allerdings gab es auch Hinweise darauf, dass die Reaktion auf unberechtigte Eingriffe möglicherweise verzögert ist. Dieser Unterschied war nicht nur auf den Einfluss der Handhaltung zurückzuführen (vgl. Studie VI), daher kann nicht ausgeschlossen werden, dass die visuelle Rückmeldung auch bei unberechtigten Eingriffen von Bedeutung ist. Zukünftige Studien sollten daher darauf achten, dass die Handhaltung sowohl bei abgelenkten als auch bei aufmerksamen Fahrern vergleichbar ist.

Insgesamt scheinen die Ergebnisse aber überwiegend die angenommene Rolle der visuellen Rückmeldung zu bestätigen. Wahrscheinlich muss jedoch noch genauer zwischen dem Einfluss der haptischen und visuellen Rückmeldung unterschieden werden, um den Einfluss dieser Modalitäten auf die Reaktionszeit des Fahrers besser abschätzen zu können. Zusätzlich sollte der Einfluss der vestibulären Rückmeldung genauer überprüft werden, da diese möglicherweise ebenfalls von Bedeutung für die Reaktion der Fahrer ist. Anhand der Befunde von Wierwille et al. (1983) wird erwartet, dass die Rückmeldung von physikalischen Bewegungen des Fahrzeugs vor allem die Reaktion der Fahrer auf unberechtigte Eingriffe beschleunigen könnte. Um die Gültigkeit des Verhaltensmodells zu überprüfen, sind daher weitere Studien erforderlich. Beispielsweise kann nicht ausgeschlossen werden, dass der visuelle Kontrollprozess eine stärkere Rolle bei den quasi-automatisch ablaufenden Prozessen einnimmt, die insbesondere bei der Reaktion auf unberechtigte Eingriffe relevant sind. Hinweise darauf liefern auch Studien aus der Grundlagenforschung, bei denen eine minimale Verarbeitungszeit visueller Informationen von 190-260 ms ermittelt wurde (Keele & Posner, 1968).

Allerdings betrifft dies vor allem die Anpassung der Handlungsausführung. Für die eigentliche Reaktionsinitiierung wird möglicherweise mehr Zeit benötigt.

Die Bedeutung der visuellen und haptischen Rückmeldung sollte daher in Studien überprüft werden, bei denen eine getrennte, gleichzeitige Manipulation der visuellen und haptischen Rückmeldung erfolgt. Hierzu könnten auch andere Methoden zur Kontrolle der visuellen Rückmeldung eingesetzt werden wie z. B. eine Okklusion, bei der dem Fahrer durch technische Maßnahmen die Möglichkeit genommen wird, visuelle Informationen zu erhalten. Dadurch könnte gezielter als durch die Bearbeitung einer einfachen Nebenaufgabe beeinflusst werden, ab wann dem Fahrer visuelle Informationen zur Verfügung stehen.

12.4 Gültigkeit des angenommenen Verhaltensmodells

Das angenommene Verhaltensmodell diente vor allem der Ableitung von Vorhersagen bezüglich des zu erwartenden Fahrerverhaltens in Folge von Lenkeingriffen mit haptischer Rückmeldung am Lenkrad. Dazu wurde angenommen, dass die sensomotorische Regelung ein wichtiger Bestandteil des Fahrerverhaltens ist. Insgesamt deuten die Ergebnisse überwiegend darauf hin, dass das angenommene Verhaltensmodell Vorhersagen ermöglicht, die experimentell bestätigt werden können. Damit stellt das Verhaltensmodell eine gute Ausgangsbasis dar, um den Einfluss verschiedener Faktoren bei der Gestaltung von Ausweicheingriffen vorherzusagen, was so bisher nicht möglich war.

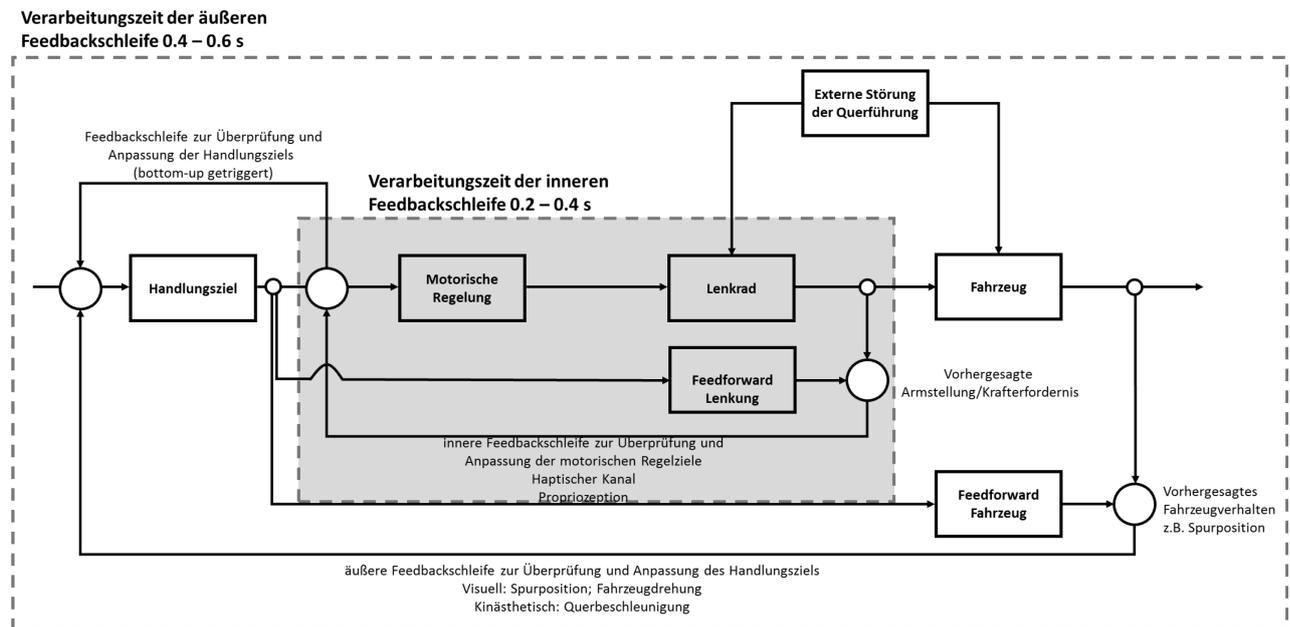


Abbildung 12-1: Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine Verarbeitungszeit von 0.2 s-0.4 s für den inneren und eine Verarbeitungszeit von 0.4 s-0.6 s für den äußeren Regelkreis ermittelt.

Fasst man die Ergebnisse der Studien zusammen, lässt sich das Verhaltensmodell zudem weiter spezifizieren. So lässt sich die Verarbeitungszeit des äußeren visuellen Regelkreises und des inneren sensomotorischen Regelkreises einschränken. Auf Basis der Ergebnisse wird davon ausgegangen, dass die Verarbeitungszeit des visuellen Regelkreises mindestens 0.4 s beträgt (vgl. Abbildung 12-1).

Dies gilt sowohl für den Nutzen- als auch für den Fehlerfall. Die Verarbeitungszeit des sensomotorischen Regelkreises scheint stark von der Signalgestaltung abzuhängen. Greift man zusätzlich auf die Befunde der Studien von Neukum et al. (2010a) zurück, lässt sich die Verarbeitungszeit auf ca. 200-350 ms einschränken. Grundsätzlich sind hier zwar auch schnellere Reaktionen denkbar (vgl. Neukum et al., 2010a), allerdings lässt sich dies anhand des Lenkverhaltens in den vorliegenden Studien nicht nachweisen.

Möglicherweise könnte hier die Elektromyographie detailliertere Ergebnisse liefern, da sie die direkte Beobachtung von Muskelreaktionen erlaubt (vgl. hierzu auch Pick & Cole, 2003; Pick, 2004; Pick & Cole, 2006). Zusätzlich könnte auch versucht werden, mithilfe der Elektroenzephalografie (EEG) die Bedeutung und die Verarbeitungsgeschwindigkeit der Regelkreise weiter einzugrenzen, indem ereigniskorrelierte Potentiale (EKP) herangezogen werden, die Rückschlüsse auf die visuelle Verarbeitung oder generelle Elemente der Verhaltenssteuerung zulassen. Allerdings ist unklar, ob der zusätzliche Erkenntnisgewinn den erforderlichen Aufwand im Kontext der in dieser Arbeit vorgestellten Fragestellung rechtfertigen kann.

Des Weiteren wurde deutlich, dass das Modell möglicherweise um eine Lernkomponente ergänzt werden muss. Zwei Studien liefern Hinweise darauf, dass das Reaktionsmuster der Fahrer sich durch wiederholtes Erleben beeinflussen lässt (vgl. Studie II und Studie III). Der Einfluss des Lernens wird bisher nur indirekt durch die Einbettung eines übergeordneten Handlungsziels berücksichtigt, welches z. B. auf Ebene der Bahnführung generiert wird. Eine stärkere Einbettung der Lernkomponente innerhalb des Modells würde jedoch deren Einfluss verdeutlichen. Daraus können wiederum methodische Rückschlüsse gezogen werden, welche für die Gestaltung von Studien und die Ableitung von Fragestellungen relevant sind. Dies betrifft insbesondere die Annahme, dass allgemeingültige Aussagen aktuell nur aufgrund des erstmaligen Erlebens getroffen werden können. Grundlage für diese Erkenntnis ist die Annahme, dass in der Realität nicht von einem Lernprozess ausgegangen werden kann, da automatische Ausweichingriffe nur selten erlebt werden.

Dennoch bestätigt der Nachweis, dass der Fahrer dazu in der Lage ist sein Reaktionsmuster durch wiederholtes Erleben anzupassen, indirekt die angenommene hierarchische Struktur des vorgeschlagenen Verhaltensmodells oder die hierarchische Struktur und die bidirektionalen Verbindungen zwischen den verschiedenen Kontrollebenen der Fahrerverhaltensmodelle von Donges (2012), Janssen (1979) und Michon (1985). So konnte beispielsweise gezeigt werden, dass sensomotorische Kontrollprozesse, die der Stabilisierungs- oder Kontrollebene zuzuordnen sind, einen Einfluss auf die Handlungswahl und -ausführung haben können, die wiederum der Bahnführungsebene bzw. die taktische Ebene der Fahrerverhaltensmodelle zuzuordnen sind. Zusätzlich können die Fahrer durch wiederholtes Erleben der automatischen Eingriffe eine Beziehung zwischen dem haptischen Signal und der geforderten Handlung herstellen. In Folge dessen findet eine Anpassung des Reaktionsmusters statt, wodurch häufiger ein Aufgreifen des automatischen Ausweichingriffs beobachtet wird. Es wird angenommen, dass der zugrundeliegende Lernprozess mit denen im Rahmen der Ideomotorischen Hypothese oder der Perceptual Control Theory von Powers (1973a) beschriebenen Mechanismen und Prozessen vergleichbar ist (vgl. Kapitel 2.3). Die Einbindung der Lernkomponente sollte sich daher an den entsprechenden Theorien orientieren. Einen weiteren Ansatzpunkt liefert auch das Modell von Rasmussen (1983). Hierbei wäre davon auszugehen, dass für die Verhaltensaushwahl zunächst die Ebene des wissensbasierten Verhaltens erforderlich ist. Durch mehrmaliges Erleben können entsprechende (Handlungs-) Regeln abgeleitet werden, wodurch die Verhaltensaushwahl auf Ebene des regelbasierten Verhaltens und in Folge dessen schneller stattfinden kann.

Insgesamt wird dadurch deutlich, dass eine losgelöste Betrachtung einzelner Ebenen der Verhaltensaufführung das Verhalten der Fahrer möglicherweise nur unzureichend beschreiben kann. Das vorgeschlagene Verhaltensmodell liefert hierzu vor allem eine Spezifizierung bestehender Verhaltensmodelle bezüglich der Auswirkungen externer Störungen der Querführung (vgl. hierzu auch Kapitel 2.3). Allerdings können die Ergebnisse aber auch durch allgemeinere Verhaltensmodelle wie das von Rasmussen (1983) oder Powers (1973a) erklärt werden. Hier würden die beobachteten quasi-automatischen Kontrollprozesse, die mutmaßlich für die dämpfenden Verhaltensweisen verantwortlich sind, hoch trainierten Verhaltensmustern entsprechen, die auf einer untergeordneten Ebene der Verhaltensaufführung angesiedelt sind. Die Entscheidung für ein Ausweichen wäre hingegen entweder der Ebene des regelbasierten oder der Ebene des wissensbasierten Verhaltens zuzuordnen, was auch den Unterschied bezüglich der Verarbeitungszeit erklären kann.

Dies zeigt, dass auch bei komplexen Verhaltensweisen, wie der Steuerung eines Fahrzeugs, grundlegende Mechanismen der Verhaltenssteuerung bedeutsam sind und sich mit den entsprechenden Methoden auch im Anwendungsbereich messen lassen. Verhaltensmodelle helfen dabei, das Verhalten der Fahrer besser zu verstehen und liefern mögliche Erklärungsansätze für bestimmte Verhaltensweisen. Dies ermöglicht auch eine bessere Bewertung bereits vorliegender Befunde. Zusätzlich lassen sich anhand der Verhaltensmodelle gezielt Annahmen ableiten, die experimentell überprüft werden können. Die vorliegende Arbeit ist daher als Beispiel dafür zu sehen, dass die Entwicklung spezifischer Verhaltensmodelle unter Berücksichtigung von Erkenntnissen der Grundlagenforschung auch in angewandten Themenbereichen relevant ist. Im Kontext der Fragestellung dieser Arbeit betrifft das insbesondere Erkenntnisse zu sensomotorischen Kontrollprozessen, wie z. B. dem Dehnungsreflex, oder der Verhaltenssteuerung bei motorischen Zielbewegungen (vgl. Kapitel 2.3.3).

12.5 Forschungsbedarf

Im Folgenden wird zunächst auf verschiedene Punkt eingegangen, bei denen weitere Forschung erforderlich ist, um konkrete Aussagen für den Anwendungsfall treffen zu können (siehe Kapitel 12.5.1). Anschließend wird darauf eingegangen, welche Ansätze die vorliegende Arbeit für die Beantwortung von Fragestellungen aus der psychologischen Grundlagenforschung liefern könnte (siehe Kapitel 12.5.2).

12.5.1 Forschungsbedarf für den Anwendungsfall

Der Fokus der vorliegenden Arbeit lag vor allem auf dem Einfluss der haptischen Rückmeldung im Hinblick auf das angenommene Verhaltensmodell. Allerdings sind noch einige Aspekte ungeklärt, wie z. B. der Einfluss der kinästhetischen Rückmeldung oder anderer Stimuli, die den Fahrer möglicherweise auf einen bevorstehenden Eingriff vorbereiten können.

Beispielsweise ist aktuell offen, warum Fahrer in der Studie von Neukum und Krüger (2003) ähnlich schnell auf unberechtigte Eingriffe in die Querführung reagieren können wie bei Eingriffen mit einer Lenkmomentüberlagerung, obwohl die Überlagerungslenkung zu keiner eindeutigen haptischen Rückmeldung am Lenkrad führt. Dies bedeutet entweder, dass der visuelle Kontrollprozess schneller auf Störungen der Querführung reagieren kann als angenommen, oder der Fahrer kann in diesen Fällen auf andere Sinnesmodalitäten zurückgreifen, um die Störung der Querführung zu erkennen. Um den Einfluss und die Bedeutung der verschiedenen Sinnesmodalitäten bei der Reaktion auf automatische Eingriffe in die Querführung besser zu verstehen, sind daher weitere Studien erforderlich, die klar zwischen dem Einfluss der verschiedenen Modalitäten trennen können. Hierbei sind auch die unterschiedlichen Aktoren von Interesse, wie z. B. einseitige Bremsengriffe, da sich die Rückmeldungen, die die Fahrer erhalten, auch in Abhängigkeit der eingesetzten Aktoren unterscheiden. Steer-by-Wire-Konzepte bieten eine sehr gute Möglichkeit, diese Fragestellung zu untersuchen, da frei variiert werden kann, welche Rückmeldung der Fahrer erhält und wie die Bewegung des Lenkrads mit der Fahrzeugbewegung zusammenhängt. Dadurch könnten einerseits die unterschiedlichen Aktoren sowie deren spezifische Vor- und Nachteile nachgebildet werden. Andererseits könnten verschiedene Merkmale der Aktoren kombiniert werden, um die aktorspezifischen Nachteile zu kompensieren, ohne jedoch auf die jeweiligen Vorteile zu verzichten. Eine Möglichkeit wäre hierbei, dass Lenkrad und Fahrzeugbewegung entkoppelt werden, die haptische Rückmeldung am Lenkrad aber vergleichbar ausgelegt wird wie bei einer Lenkmomentüberlagerung. Dadurch entfällt die negative Auswirkung der reflexähnlichen Reaktion auf den resultierenden Spurversatz. Gleichzeitig kann der Fahrer jedoch möglicherweise schneller auf fehlerhafte Eingriffe reagieren als bei einer vollständigen Entkopplung. Dadurch könnte auch näher untersucht werden, ob die haptische Rückmeldung eher Vorteile im Sinne eines „*redundancy gain*“ mit sich bringt oder eher Nachteile durch eine mögliche Verzögerung der Handlungsausführung in Folge einer Interferenz.

Offen ist aktuell auch, ob Fahrer lernen können, Ausweicheingriffe ausreichend von anderen Störungen der Querführung, wie z. B. Spurrillen, Seitenwind oder Reifenschäden, zu unterscheiden. Interessant wäre hierbei, wie viele Lerndurchgänge erforderlich sind, damit der Fahrer dazu in der Lage ist, berechtigte Systemeingriffe als solche zu erkennen.

Des Weiteren ist unklar, ob das wiederholte Erleben von systeminitiierten Eingriffen in die Querführung die Reaktion der Fahrer auf Störungen beeinträchtigt. Hierzu sind weitere Studien erforderlich, die klären müssen, wie sich das wiederholte Erleben von berechtigten Systemeingriffen auf das Reaktionsmuster der Fahrer bei tatsächlichen Störungen der Querführung auswirkt und welchen Einfluss die Gestaltung der Systemeingriffe darauf hat (vgl. hierzu auch Switkes et al., 2007). Sofern das wiederholte Erleben eines berechtigten Eingriffs zu einer Ausbildung eines Reiz-Reaktions-Schemas führt (vgl. Kleen & Schmidt, 2009; Schmidt, 2009), wodurch Ausweichreaktionen des Fahrers begünstigt werden, sollte zudem überprüft werden, wie sich dies auf die Kontrollierbarkeit unberechtigter Systemeingriffe auswirken könnte. Hierbei könnten auch Erkenntnisse zum Priming (vgl. Kiesel et al., 2007) berücksichtigt werden. Dadurch könnte überprüft werden, ob bestehende Lernerfahrungen zu einer Bahnung bestimmter Reaktionen (wie z. B. dem Aufgreifen eines automatischen Ausweicheingriffs) führen und ob die haptische Rückmeldung am Lenkrad dafür ausreicht oder ob zusätzliche, eindeutigere Stimuli dafür benötigt werden. Würden sich entsprechende Effekte aufzeigen lassen, wäre dies ein möglicher Hinweis darauf, dass die entsprechenden Kontrollprozesse durch Lernerfahrungen optimiert und automatisiert werden können. Damit wäre dies auch ein Hinweis auf die Gültigkeit der Perceptual Control Theory von Powers (1973a). Gleichzeitig würde es auf mögliche Gefahren hindeuten, auf die bei der Gestaltung von entsprechenden Systemen zu achten ist, da sich ein ungeprüftes Aufnehmen eines automatischen Ausweicheingriffs nachteilig auf die Kontrollierbarkeit auswirken würde.

Des Weiteren gibt es Hinweise darauf, dass ein gewisser Anteil von Fahrern auch nach mehrmaligem Erleben eines berechtigten Eingriffs Ausweichen nichts als Handlungsoption in Betracht zieht und den Eingriff daher bewusst unterdrückt. In den vorliegenden Studien lag der Anteil bei ca. 20%. Bisher ist unklar, was die Fahrer dazu veranlasst hat. Möglicherweise spielen hierbei zusätzlich unterschiedliche Lernerfahrungen oder auch Persönlichkeitsaspekte der Fahrer eine Rolle. Das bedeutet einerseits, dass die Lernerfahrung mitberücksichtigt werden muss, um das Verhalten sinnvoll interpretieren zu können und andererseits, dass bestimmte Persönlichkeitseigenschaften einen Einfluss auf das Fahrerverhalten haben könnten. Dies wird bisher nur unzureichend in dem vorgeschlagenen Verhaltensmodell berücksichtigt. Zukünftige Studien könnten daher gezielt bereits bestehende Lernerfahrungen oder Persönlichkeitseigenschaften erfassen und prüfen, inwiefern sich dies auf das Verhalten der Fahrer auswirkt.

Des Weiteren sollte genauer untersucht werden, was passiert, wenn das Handlungsziel des Fahrers mit dem Handlungsziel des Systemeingriffs übereinstimmt. In dieser Arbeit wurde davon ausgegangen, dass dies nicht zu einer Abweichung von den erwarteten Sinneseindrücken führt. Allerdings könnte auch bei der Ausführung der Lenkbewegung eine Abweichung auftreten. Aktuell ist unklar, wie sich dies auf das Reaktionsmuster der Fahrer auswirken könnte. Zusätzlich sollte überprüft werden, ob der Fahrer den Eingriff in diesem Fall überhaupt bewusst wahrnimmt. Studien in der Grundlagenforschung haben gezeigt, dass sensorische Informationen abgeschwächt werden, wenn der Fahrer durch seine Handlung möglicherweise selbst die Ursache dieser Information sein könnte (vgl. Blakemore, Wolpert & Frith, 2000a; Blakemore et al., 2000b; Weller, Schwarz, Kunde & Pfister, 2017). Insbesondere entkoppelte Eingriffe bieten hier eine interessante Möglichkeit, diesen Einfluss zu untersuchen, da klar zwischen dem Anteil der Fahrerreaktion und dem Anteil des Eingriffs unterschieden werden kann. Je nach zeitlichem Abstand zwischen Beginn des Eingriffs und Beginn der Fahrerreaktion könnte die Möglichkeit bestehen, dass der Fahrer nicht benennen kann, ob er für den Ausweichvorgang verantwortlich ist oder das Fahrzeugs. Dies gilt möglicherweise auch bei Eingriffen mit haptischer Rückmeldung.

In diesem Fall könnte es sein, dass die oben genannten Effekte dafür verantwortlich sind, dass die Fahrer den Eingriff trotz starker Kräfte am Lenkrad nicht bemerken. Dies wäre eine mögliche Erklärung für die Befunde von Bräuchle et al. (2013), dass lediglich 20% der Fahrer den Lenkeingriff des Fahrzeugs bemerkten. Hierbei sollte darauf geachtet werden, dass die Handlungsintention oder die Reaktion des Fahrers eindeutig identifiziert oder manipuliert werden kann. Für die Identifikation der Handlungsintention könnten neben der berichteten Analyseverfahren andere Verfahren eingesetzt werden, wie beispielsweise das EEG.

Ein weiterer Ansatz, der die beschriebenen Probleme umgehen könnte, wäre der Einsatz von fahrerinitiierten Ausweicheingriffen. Da der Eingriff erst erfolgt, wenn der Fahrer sich für ein Ausweichen entschlossen hat, sollten Konflikte vermieden werden, die dadurch zustande kommen, dass das Handlungsziel vom Fahrer nicht dem Handlungsziel des automatischen Ausweichassistenten entspricht. Allerdings bleibt dabei das ursprüngliche Problem bestehen, dass Fahrer in Gefahrensituationen nur selten eine Ausweichreaktion zeigen (vgl. Kapitel 2.1). Die vorliegende Arbeit deutet darauf hin, dass das Potenzial von fahrerinitiierten Ausweicheingriffen auch durch vorgelagerte Warnungen verbessert werden könnte. Die vorliegenden Ergebnisse könnten als Basis für weitere Arbeiten herangezogen werden, bei denen der Einfluss verschiedener Warnungen und Warnmodalitäten untersucht wird. Dadurch könnte einerseits genauer überprüft werden, wie sich die verschiedenen Warnungen auf die Prozesse der Verhaltenssteuerung auswirken und wieviel Zeit der Fahrer von der Warnung bis hin zur Reaktionsinitiierung benötigt. Andererseits könnte überprüft werden, inwiefern bestimmte Warnungen tatsächlich zu einer Verzögerung bei der Reaktionsinitiierung führen. Hierbei sollte auch überprüft werden, wie spezifische Erkenntnisse der Grundlagenforschung zur Verhaltenssteuerung berücksichtigt werden können, um bessere Vorhersagen bezüglich der Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug treffen zu können. Ansatzpunkte hierfür sind beispielsweise die Erkenntnisse zur Doppelaufgabeninterferenz und crossmodal action, da sie sowohl auf die Wechselwirkung verschiedener Aufgaben, die gleichzeitig oder schnell nacheinander ausgeführt werden, eingehen, als auch auf die Wechselwirkung verschiedener an der Aufgabenausführung beteiligter Modalitäten.

12.5.2 Ansätze für die psychologische Grundlagenforschung

Angewandte Fragestellungen, wie in der vorliegenden Arbeit, bieten auch die Möglichkeit zu überprüfen, ob in der Grundlagenforschung beschriebene Effekte auch praktisch bedeutsam sind. Dadurch könnten Annahmen über die Wechselwirkung verschiedener Effekte überprüft werden, wie zum Beispiel dem „*redundancy gain*“, räumlichen Kompatibilitätseffekten und möglichen Interferenzeffekten. Als Ergebnis könnten einerseits neue Empfehlungen bezüglich der Gestaltung der Interaktion zwischen Systemen und dem Menschen ausgesprochen werden. Andererseits könnte die Übertragung dieser Fragestellungen auf den Anwendungsbereich auch helfen abzuschätzen, inwiefern diese Effekte auch in der Praxis bedeutsam sind und ob sich die Erkenntnisse auch auf weniger kontrollierte Umgebungen übertragen lassen, bei denen möglicherweise auch mit einer Wechselwirkung verschiedener Effekte gerechnet werden muss. Das könnte auch dazu beitragen zu klären, ob es eine Priorisierung bestimmter Prozesse und Mechanismen bei der Verhaltenssteuerung gibt und wie diese aussieht.

Das abgeleitete Verhaltensmodell ermöglicht zudem erstmals einen Erklärungsansatz für den Einfluss der haptischen Rückmeldung bei systeminitiierten Eingriffen in die Querführung. Dadurch kann die Interaktion zwischen Fahrer und Assistenzsystemen, die in die Querführung eingreifen, genauer beschrieben werden. Damit liefert die vorliegende Arbeit auch Ansätze, um zu überprüfen, inwiefern sich eine Störung der (manuellen) Handlungsausführung von außen auf die Verhaltenssteuerung auswirkt. Bisher werden in psychologischen Grundlagenforschung überwiegend visuelle und akustische Stimuli sowie Distraktoren verwendet. In dieser Arbeit wurden jedoch zusätzlich zu den visuellen Stimuli haptische Stimuli verwendet, die für die Handlungsausführung relevant sind. Daraus könnten Untersuchungsumgebungen abgeleitet werden, mit denen verschiedene Prozesse und Mechanismen der Verhaltenssteuerung genauer untersucht werden können. Dies gilt auch für die Gestaltung von handlungsrelevanten Stimuli. In der Grundlagenforschung werden meist kurze binäre Stimuli verwendet. Die in dieser Arbeit vorliegenden Studien deuten hingegen auch darauf hin, dass dynamische Stimuli, die sich z. B. im Laufe der Zeit hinsichtlich ihrer Intensität oder Position verändern, einen zusätzlichen Einfluss auf die Verhaltenssteuerung haben könnten (vgl. Studie I und Studie II). Anhand der vorliegenden Arbeit wird davon ausgegangen, dass dies insbesondere bei Fragestellungen zur Doppelaufgabeninterferenz relevant sein könnte. So wurden beispielsweise Effekte beobachtet, die sich auch anhand entsprechender Theorien aus diesen Themengebieten erklären lassen könnten. Im Speziellen könnten dabei Befunde zur Psychologische Refraktärperiode (vgl. Pashler, 1994) oder crossmodal action (vgl. Huestegge & Hazeltine, 2011; Huestegge & Koch, 2009) relevant sein. Die PRP beschreibt den Effekt, dass in Folge der Darbietung zweier aufeinander folgender Stimuli die Handlungsausführung in Abhängigkeit des zeitlichen Abstands zwischen den Stimuli verzögert wird. Befunde zu crossmodal action deuten zudem darauf hin, dass die gleichzeitige Koordination mehrerer Modalitäten die Reaktionsausführung verzögern kann, insbesondere wenn bei der Koordination der Modalitäten die räumliche Zuordnung eine Rolle spielt. Somit liefert die vorliegende Arbeit auch einen Ansatzpunkt um zu hinterfragen, ob entsprechende Effekte auch in der Praxis bedeutsam sind und ob sich diese Effekte generalisieren lassen.

Des Weiteren könnte die vorliegende Arbeit einen Ansatz liefern, um zu überprüfen, inwiefern bestimmte Persönlichkeitseigenschaften einen Einfluss auf die Reaktionswahl haben. Dies wäre auch im Hinblick auf Erforschung von Persönlichkeitseigenschaften interessant, da diese Studie damit Anhaltspunkte für ein Untersuchungsdesign zur Identifikation bestimmter Persönlichkeitseigenschaften liefern könnte. Aufgrund des Studiendesigns der vorliegenden Arbeit, bei dem in der Regel die Inhibition oder die Aktivierung bestimmter Verhaltensweisen gefordert war, könnte dies daher insbesondere zur Erforschung von Persönlichkeitseigenschaften herangezogen werden, bei denen diese beiden Prozesse entscheidend sind. Hierzu muss allerdings zunächst überprüft werden, ob sich ein Einfluss bestimmter Persönlichkeitseigenschaften nachweisen lässt.

12.6 Praktische Bedeutsamkeit der Befunde

Es konnte gezeigt werden, dass eine gezielte Betrachtung des Lenkverhaltens Aufschluss über mögliche Ursachen für die schlechte Wirksamkeit automatischer Ausweicheingriffe mittels einer Lenkmomentüberlagerung liefern kann. Dazu wurde auf Basis der Arbeiten von Neukum et al. (2010a) und Schmidt und Kollegen (Schmidt, 2009; Schmidt et al., 2007) eine Analysemethode entwickelt und studienübergreifend bei der Auswertung eingesetzt (vgl. Kapitel 4.3). Von der beschriebenen Analysemethode könnten beispielsweise Algorithmen abgeleitet werden, die die Handlungsintention des Fahrers bereits während des Eingriffs erkennen und anhand dieser entscheiden, ob der Eingriff fortgeführt wird oder nicht (siehe hierzu auch Bräuchle et al., 2013). Die Ergebnisse der vorliegenden Studien helfen zudem einzugrenzen, ab wann eine Übersteuerung frühestens erkannt werden kann. Bei einem sprunghaften Aufbau des Lenkmoments ist aktuell davon auszugehen, dass erst ab einer Zeitspanne von ca. 0.4 - 0.6 s sicher identifiziert werden kann, ob der Fahrer dem Lenkeingriff folgen möchte oder nicht. Zwar zeigen Fahrer, welche den Eingriff unterdrücken, bereits deutlich früher eindeutige Reaktionsmuster, die auf eine Übersteuerung hindeuten, allerdings würde damit möglicherweise die Wirksamkeit berechtigter Eingriffe reduziert, da einige Fahrer sich erst im Verlauf des Eingriffs für ein Mitlenken entscheiden (Reaktionsmuster Initiales Dämpfen). Sollen diese Fahrer berücksichtigt werden, muss entsprechend lange gewartet werden, bevor entschieden werden kann, ob die Fahrer den Eingriff aufnehmen oder übersteuern möchten.

Zusätzlich ergänzt die vorliegende Arbeit bestehende Fahrerverhaltensmodelle mit Fokus auf die Querführung. Anhand des vorgestellten Modells können Vorhersagen bezüglich der Auswirkungen verschiedener Ausweicheingriffe getroffen werden (vgl. Kapitel 3). Dabei können die Erkenntnisse der einzelnen Studien berücksichtigt werden, um abzuschätzen, wie sich bestimmte Eingriffsgestaltungen auf das Fahrerverhalten auswirken könnten. Dies betrifft insbesondere die zu erwartende Reaktionszeit der Fahrer auf unberechtigte Eingriffe in die Querführung. Eine Einbettung dieser Ergebnisse in simulationsbasierte Ansätze (vgl. hierzu Mehrabi et al., 2013; Mehrabi et al., 2015) könnte zu einer besseren Vorhersage des Fahrerverhaltens führen. Zusätzlich könnten anhand der identifizierten Zeitbereiche einfache Simulationen durchgeführt werden, um abzuschätzen, welcher Querversatz in Folge eines unberechtigten Eingriffs zu erwarten ist.

Des Weiteren konnten methodische Aspekte identifiziert werden, die bei der Durchführung von Studien zur Überprüfung der Wirksamkeit oder der Kontrollierbarkeit berücksichtigt werden sollten. Dies betrifft zum einen die Handhaltung des Fahrers, da sich diese auf die Kennwerte des Lenkverhaltens und damit möglicherweise auch auf die Wirksamkeit und die Kontrollierbarkeit von Lenkeingriffen auswirkt. Zwar finden sich bereits in den Arbeiten von Neukum et al. (2009) Hinweise darauf, dass die Handhaltung möglicherweise einen Einfluss auf die Kontrollierbarkeit oder Wirksamkeit hat, allerdings wurden dazu keine Ergebnisse berichtet. Zum anderen betrifft es die Gestaltung von Szenarien zur Untersuchung der Kontrollierbarkeit. Hier konnte gezeigt werden, dass die Fahrer ihre Reaktion im Zweifel an die vorhandenen Platzverhältnisse anpassen, was dazu führen könnte, dass die Kontrollierbarkeit unberechtigter Eingriffe geringer ausfällt. Um belastbare Ergebnisse zu erzielen, sollte daher auf eine sinnvolle Beschränkung der Platzverhältnisse geachtet werden. Dies erhöht den Handlungsdruck für den Fahrer und führt möglicherweise zu schnelleren Reaktionen, was sich positiv auf die Kontrollierbarkeitsbewertung unberechtigter Eingriffe auswirken könnte.

Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass bei mehrmaligem Erleben von Ausweicheingriffen mit Lerneffekten zu rechnen ist. Da die im Fokus stehenden Systeme nur selten eingreifen werden, ist allerdings davon auszugehen, dass die Fahrer vorab keine Möglichkeit haben, das Systemverhalten kennen zu lernen. Für eine realistische Abschätzung der Wirksamkeit sollten Wiederholungsmessungen daher vermieden oder die möglichen Lerneffekte berücksichtigt werden. Durch die Beachtung dieser Aspekte könnte die Vergleichbarkeit zukünftiger Studien verbessert werden, was auch die Interpretation der Ergebnisse von zukünftigen Studien erleichtern würde.

12.7 Schlussfolgerung

Die vorliegende Arbeit verdeutlicht, dass verschiedene Aspekte für die Reduzierung der Wirksamkeit von automatischen Ausweicheingriffen mittels einer Lenkmomentüberlagerung verantwortlich sind. Wie bereits bei der Beschreibung des Fahrerverhaltens ohne Unterstützung durch Ausweicheingriffe deutlich wurde, stehen dabei Probleme bei der Reaktionswahl und Handlungsausführung im Vordergrund. Allerdings gibt es auch Hinweise darauf, dass die Eingriffsgestaltung einen Einfluss auf das Fahrerverhalten hat. Hierbei spielen mutmaßlich auch erlernte Reiz-Reaktions-Schemata eine Rolle, die zu einer schnellen reflexähnlichen Gegenreaktion der Fahrer auf automatische Ausweicheingriffe führen, insbesondere, wenn diese von einer haptischen Rückmeldung am Lenkrad begleitet werden.

Damit bestätigt die vorliegende Arbeit überwiegend die im Vorfeld getroffenen Annahmen. Zum einen konnte gezeigt werden, dass die Fahrer sehr schnell auf die haptischen Informationen am Lenkrad reagieren. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass haptischen Informationen zu einer schnelleren Reaktion der Fahrer führen, was als Indiz dafür interpretiert wird, dass die haptischen Informationen schneller verarbeitet werden als die visuellen. Auf Basis der Ergebnisse wird davon ausgegangen, dass bei automatischen Ausweicheingriffen mittels einer Lenkmomentüberlagerung das Kompensationsverhalten der Fahrer durch eine reflexähnliche Reaktion verstärkt wird, die entweder durch die von der Erwartung abweichende sensomotorische Rückmeldung am Lenkrad ausgelöst wird oder durch die abweichende Fahrzeugreaktion. Diese Reaktion lässt sich zwischen 0.2 s und 0.4 s nach Beginn des Lenkeingriffs anhand des Lenkverhaltens erkennen und dient als Indikator für die Verarbeitungsdauer des inneren sensomotorischen Regelkreises (vgl. Abbildung 12-2). In Folge dieser Reaktion wird der Eingriff zunächst gedämpft. Erst im weiteren Verlauf scheint der Fahrer sich für oder gegen eine Ausweichreaktion zu entscheiden. Das deutet auch darauf hin, dass Fahrer bei automatischen Ausweicheingriffen nicht immer ausreichend Zeit haben, um die Situation zu analysieren und sich für eine Ausweichreaktion zu entscheiden. Das führt wahrscheinlich ebenfalls dazu, dass der Eingriff zunächst als Störung wahrgenommen wird und die Fahrer versuchen, diese Störung zu kompensieren. Um die Situation zu analysieren und sich für eine Handlung zu entscheiden, scheinen die Fahrer im Rahmen dieser Arbeit zwischen 0.4 s und 0.6 s zu benötigen, was als Indikator für die Verarbeitungszeit des äußeren (primär visuellen) Regelkreises herangezogen wird (vgl. Abbildung 12-2). Ist die Zeitspanne zwischen Sichtbarwerden oder Erkennen des Hindernisses und dem Beginn des Eingriffs zu klein, kann dies dazu führen, dass auch berechtigte Eingriffe unterdrückt werden.

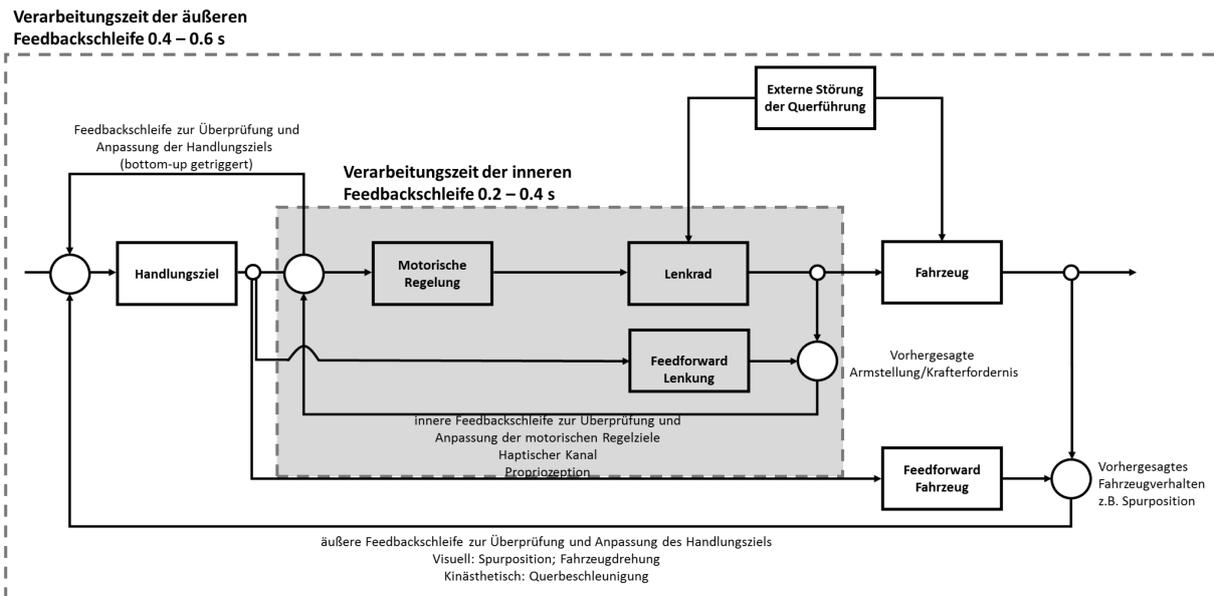


Abbildung 12-2: Modell der hierarchischen Struktur und der relevanten Regelkreise zur Beschreibung des Fahrerhaltens im Fall externer Störungen der Querführung. Der innere, sensomotorische Regelkreis (grau hinterlegt), ist der Stabilisierungs- und Kontrollebene zuzuordnen und kann sehr schnell, ohne die Beteiligung visueller Informationen, auf externe Störungen reagieren. Der äußere, primär visuelle Regelkreis ist der Wissens- bzw. regelbasierten Ebene zuzuordnen und erfordert mehr Zeit zur Analyse der Situation. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine Verarbeitungszeit von 0,2 s-0,4 s für den inneren und eine Verarbeitungszeit von 0,4 s-0,6 s für den äußeren Regelkreis ermittelt.

Je nach Eingriffsgestaltung kann die haptische Rückmeldung am Lenkrad zudem dazu führen, dass die Handlungsentscheidung verzögert wird. Dies hängt anscheinend davon ab, wie lange es dauert, bis in Folge des Eingriffs ein stabiler Regelzustand erreicht wird. Das bedeutet, dass Ausweichingriffe, bei denen sich die haptische Rückmeldung kontinuierlich ändert, die Handlungsentscheidung verzögern können. Inwiefern dies für die Wirksamkeit von automatischen Ausweichingriffen relevant ist, kann anhand der vorliegenden Ergebnisse allerdings nicht abgeschätzt werden. Damit liefert die vorliegende Arbeit einen Hinweis darauf, dass manuelle Reaktionen visuell gesteuerte Kontrollprozesse verzögern können, was auf eine mögliche Interferenz hindeutet. Dieser Befund ist auch ein Indiz für die zusätzliche Feedbackschleife, welche zu einer bottom-up getriggerten Anpassung des Handlungsziels führen kann (vgl. Abbildung 12-2).

Auf Basis dieser Erkenntnisse wird deutlich, dass es keine einfache Lösung für den bestehenden Zielkonflikt zwischen der Wirksamkeit berechtigter Eingriffe auf der einen Seite und der Kontrollierbarkeit fehlerhafter Eingriffe auf der anderen Seite zu geben scheint. Fahrerinitiierte Ausweichingriffe könnten zwar das Problem umgehen, dass der Fahrer sich bei Beginn des Eingriffs noch nicht für eine Ausweichreaktion entschieden hat. Allerdings bleibt dabei das ursprüngliche Problem bestehen, dass Fahrer nur selten eine Ausweichreaktion in Betracht ziehen.

Die angewandte Methodik zur Analyse des Fahrerhaltens, welche sich auf den zeitlichen Verlauf und die Kategorisierung des Lenkverhaltens konzentriert, hat entscheidend dazu beigetragen, dass Indikatoren identifiziert werden konnten, welche Rückschlüsse auf die Verhaltenssteuerung des Fahrers zulassen.

Damit liefert die vorliegende Arbeit auch einen Ansatz dafür, Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung zur Verhaltenssteuerung im Anwendungsfall zu überprüfen. Die beobachteten Effekte lassen darauf schließen, dass bestimmte Effekte, die bereits aus der Grundlagenforschung bekannt sind, auch in diesem Anwendungskontext relevant sein könnten.

Des Weiteren ergeben sich anhand der vorliegenden Arbeit wichtige methodische Hinweise, die bei der Untersuchung der Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit von automatischen Ausweicheingriffen berücksichtigt werden sollten. So wird beispielsweise deutlich, dass die Lernerfahrung des Fahrers berücksichtigt werden muss. Dabei ist insbesondere das erstmaligen Erleben eines automatischen Ausweicheingriffs relevant, da in der Praxis nicht davon ausgegangen werden kann, dass ein Fahrer den Eingriff mehrfach nacheinander erlebt und entsprechende Lernerfahrungen macht, die dazu führen, dass er eine Beziehung zwischen dem haptischen Signal und der geforderten Reaktion herstellen kann.

Insgesamt liefert die vorliegende Arbeit damit einen psychologischen, auf Basis psychokybernetischer Modelle entwickelten Erklärungsansatz für das beobachtete Fahrerverhalten und den Einfluss der haptischen Rückmeldung bei systeminitiierten Eingriffen in die Querführung. Dabei wird einerseits deutlich, wie wichtig ein funktionierendes Zusammenspiel der verschiedenen Prozesse und Mechanismen ist, um in komplexen Umgebungen erfolgreich handeln zu können. Andererseits zeigt sich auch, dass der Mensch unter bestimmten Umständen durchaus dazu in der Lage ist, sein Verhalten innerhalb kürzester Zeit flexibel an veränderte Bedingungen anzupassen.

Durch die Berücksichtigung der verschiedenen Wahrnehmungsprozesse und grundlegenden Mechanismen der Verhaltenssteuerung kann anhand des entwickelten Verhaltensmodells einerseits die Interaktion zwischen Fahrer und Assistenzsystemen, die in die Querführung eingreifen, genauer beschrieben werden. Dies ist insbesondere für Entwicklung von Lösungsansätzen bei Interaktionsproblemen in der Praxis relevant. Andererseits erlaubt das Verhaltensmodell sowie die entwickelte Methodik eine Verbindung zwischen der Grundlagen- und der angewandten Forschung, da bereits aus der Grundlagenforschung bekannte Prozesse oder Mechanismen der Verhaltenssteuerung in einer praxisnahen Aufgabenumgebung überprüft werden können. Zusätzlich könnten auch Effekte aus der Anwendungsforschung, wie zum Beispiel die Flexibilität des menschlichen Handelns in komplexen Umgebungen, in der Grundlagenforschung berücksichtigt werden.

Zukünftige Studien sollten jedoch überprüfen, ob das vorgeschlagene Modell auch in einem anderen Kontext, wie z. B. im Realfahrzeug, verlässliche Vorhersagen ermöglicht oder ob weitere Anpassungen, wie die Integration weiterer Sinnesmodalitäten, erforderlich sind.

13 Einbettung der Arbeit

Diese Arbeit entstand im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Verbundprojekts UR:BAN am Interdisziplinären Zentrum für Verkehrswissenschaften (IZVW) der Universität Würzburg.

Der Autor dieser Arbeit war hauptverantwortlich für die Leitung und Bearbeitung aller berichteten Studien. Zusätzlich zu internen Projektberichten erfolgten mehrere Beiträge im Rahmen von projektinternen Workshops und Tagungen sowie anderweitige Veröffentlichungen, die im Folgenden genannt sind. Für die vorliegende Arbeit wurden die Studien mit anderem Fokus neu ausgewertet und dargestellt.

Interne Projektberichte:

- Schneider, N. (2016). Einfluss alternativer Ausweichsysteme. In A. Neukum (Hrsg.), Bericht zum Arbeitspaket 3000: Determinanten der Kontrollierbarkeit und ihre Gestaltung (S. 154-160): UR:BAN KON.
- Schneider, N. (2016). Einfluss der Ablenkung im Falle unberechtigter Ausweicheingriffe. In A. Neukum (Hrsg.), Bericht zum Arbeitspaket 3000: Determinanten der Kontrollierbarkeit und ihre Gestaltung (S. 73-82): UR:BAN KON.
- Schneider, N., Befelein, D. & Neukum, A. (2016). Einfluss von Vorwarnungen im dynamischen Simulator. In A. Neukum (Hrsg.), Bericht zum Arbeitspaket 3000: Determinanten der Kontrollierbarkeit und ihre Gestaltung (S. 140-153): UR:BAN KON.
- Schneider, N., Purucker, C. & Neukum, A. (2014). Studie II: Lenkeingriffe in Ausweichsituationen. In A. Neukum (Hrsg.), Bericht zum Arbeitspaket 2000: Empirische Darstellung (S. 56-87): UR:BAN KON.

Konferenzbeiträge:

- Schneider, N. & Neukum, A. (2016). Einfluss der Systemgestaltung von Ausweichassistenten auf die Kontrollierbarkeit. UR:BAN Konferenz, Garching, Deutschland.18.-19.02.
- Schneider, N., Purucker, C. & Neukum, A. (2015). Comparison of Steering Interventions in Time-critical Scenarios. *Procedia Manufacturing*, 3, 3107-3114.

Veröffentlichungen:

- Auerswald, R., Frey, A., & Schneider, N. (2017). Integrating Different Kinds of Driver Distraction in Controllability Validations. In K. Bengler, S. Hoffmann, D. Manstetten, A. Neukum, & J. Drücke (Hrsg.), UR:BAN Human Factors in Traffic Approaches for Safe Efficient and Stressfree Urban Traffic. Wiesbaden, Germany: Springer Vieweg.
- Schneider, N., Berg, G., Paradies, S., Zahn, P., Huesmann, A., & Neukum, A. (2017). Designing Emergency Steering and Evasion Assist to Enhance Safety in Use and Controllability. In K. Bengler, S. Hoffmann, D. Manstetten, A. Neukum, & J. Drücke (Hrsg.), UR:BAN Human Factors in Traffic Approaches for Safe Efficient and Stressfree Urban Traffic. Wiesbaden, Germany: Springer Vieweg.

14 Literaturverzeichnis

- Ackermann, J. & Bünte, T. (1997). Automatic car steering control bridges over the driver reaction time. *Kybernetika*, 33(1), 61-74.
- Adams, J. A. (1971). A Closed-Loop Theory of Motor Learning. *Journal of Motor Behavior*, 3(2), 111-150.
- Adams, L. D. (1994). *Review of the literature on obstacle avoidance maneuvers: braking vs. steering*. Report No. UMTRI-94-19. University of Michigan Transportation Research Institute. <http://www.todaystrucking.com/images/BrakeVsSteeringUMTRI86649.0001.001.pdf>
- Adams, L. D., Flannagan, M. J. & Sivak, M. (1995). *Obstacle avoidance maneuvers in an automobile simulator*. Report No. UMTRI-95-3. <http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/1102/88518.0001.001.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Barrett, G. V. (1968). Feasibility of Studying Driver Reaction to Sudden Pedestrian Emergencies in an Automobile Simulator. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 10(1), 19-26.
- Beruscha, F. (2012). *Nutzerorientierte Gestaltung haptischer Signale in der Lenkung: Zum Einsatz direktonaler Lenkradvibrationen in Fahrerassistenzsystemen*. veröffentlichte Dissertation, TU Ilmenau. <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn:nbn:de:gbv:ilm1-2012000234>
- Beruscha, F., Wang, L., Augsburg, K., Wandke, H. & Bosch, R. (2010). Do drivers steer toward or away from lateral directional vibrations at the steering wheel. In C. Brusque (Hrsg.), *Proceedings of the European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems*. 2, S. 227-236. Lyon: HUMANIST.
- Birbaumer, N. & Schmidt, F. R. (2006a). Bewegung und Handlung. In N. Birbaumer & F. R. Schmidt (Eds.), *Biologische Psychologie*. 6. ed., S. 255-295. Berlin: Springer.
- Birbaumer, N. & Schmidt, F. R. (2006b). Lernen und Gedächtnis. In N. Birbaumer & F. R. Schmidt (Eds.), *Biologische Psychologie*. 6. ed., S. 593-638. Berlin: Springer.
- Blakemore, S.-J., Wolpert, D. & Frith, C. (2000a). Why can't you tickle yourself? *NeuroReport*, 11(11), R11-R16.
- Blakemore, S. J., Smith, J., Steel, R., Johnstone, E. C. & Frith, C. D. (2000b). The perception of self-produced sensory stimuli in patients with auditory hallucinations and passivity experiences: evidence for a breakdown in self-monitoring. *Psychological Medicine*, 30(5), 1131-1139.
- Blower, D. (2014). *Assessment of the effectiveness of advanced collision avoidance technologies*. Ann Arbor, Michigan: University of Michigan. <http://hdl.handle.net/2027.42/102534>
- Bräuchle, C., Flehming, F., Rosenstiel, W. & Kropf, T. (2013). Das Fahrerverhalten als Indikator für Fehlauflösungen von aktiven Kollisionsvermeidungsmanövern. *VDI-Berichte*, 2205, 3-14.
- Buschardt, B. (2003). *Synthetische Lenkmomente*. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Campbell, J. L., Richard, C. M., Brown, J. L. & McCallum, M. (2007). Crash warning system interfaces: human factors insights and lessons learned. *Final Report DOT HS 810, 697*.

- Chatziastros, A. (2003). *Visuelle Kontrolle der Lokomotion*. Universität Gießen, Gießen.
<http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2004/1643>
- Dang, T., Desens, J., Franke, U., Gavrilu, D., Schäfers, L. & Ziegler, W. (2012). Steering and Evasion Assist. In A. Eskandarian (Hrsg.), *Handbook of Intelligent Vehicles*. S. 759-782. London: Springer
- DAT Group. (2016). *DAT Report 2016*. DAT Group. https://www.dat.de/fileadmin/user_upload/DAT-Report_2016.pdf
- Desmurget, M. & Grafton, S. (2000). Forward modeling allows feedback control for fast reaching movements. *Trends in cognitive sciences*, 4(11), 423-431.
- Donges, E. (1978). A Two-Level Model of Driver Steering Behavior. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 20(6), 691-707.
- Donges, E. (1982). Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. *Automobil-Industrie*, 82(2), 183-190.
- Donges, E. (2012). Fahrerverhaltensmodelle. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Eds.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. S. 15-23. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Dozza, M. (2013). What factors influence drivers' response time for evasive maneuvers in real traffic? *Accident Analysis & Prevention*, 58, 299-308.
- Fricke, N., Griesche, S., Hesse, T., Schieben, A. & Baumann, M. (2015a). Driver behavior following an automatic steering intervention. *Accident Analysis & Prevention*, 83, 190–196.
- Fricke, N., Griesche, S., Schieben, A., Hesse, T. & Baumann, M. (2015b). Driver behavior following an automatic steering intervention. *Accident Analysis & Prevention*, 83, 190-196.
- Gibson, J. J. (1950). The perception of the visual world.
- Gibson, J. J. (1954). The visual perception of objective motion and subjective movement. *Psychological Review*, 61(5), 304.
- Godthelp, J. (1985). Precognitive control: open- and closed-loop steering in a lane-change manoeuvre. *Ergonomics*, 28(10), 1419-1438.
- Gußner, T., Bürkle, L. & Marberger, C. (2015). *Erweiterung aktiver Fußgängerschutzsysteme durch eine fahrerinitiierte Ausweichunterstützung*. 10. Uni-DAS e.V. Workshop Fahrerassistenzsysteme. Walting.
- Harleß, E. (1861). Der Apparat des Willens. *Zeitschrift für Philosophie und philosophische Kritik*, 38, 50-73.
- Harrer, M. & Pfeffer, P. (2013a). Ausblick – Zukunft der Lenkung. In P. Pfeffer & M. Harrer (Eds.), *Lenkungshandbuch*. S. 473-478. Wiesbaden: Springer Fachmedien
- Harrer, M. & Pfeffer, P. (2013b). Elektromechanische Lenksysteme (EPS). In P. Pfeffer & M. Harrer (Eds.), *Lenkungshandbuch*. S. 347-408. Wiesbaden: Springer Fachmedien
- Harrer, M. & Pfeffer, P. (2013c). Grundlegendes zum Lenkvorgang. In P. Pfeffer & M. Harrer (Eds.), *Lenkungshandbuch: Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen*. S. 21-42. Wiesbaden: Springer Fachmedien

- Harrer, M. & Pfeffer, P. (2013d). Lenkgefühl, Interaktion. In P. Pfeffer & M. Harrer (Eds.), *Lenkungsbandbuch*. S. 125-144. Wiesbaden: Springer Fachmedien
- Harrer, M. & Pfeffer, P. (2013e). Überlagerungslenkung. In P. Pfeffer & M. Harrer (Eds.), *Lenkungsbandbuch*. S. 409-430. Wiesbaden: Springer Fachmedien
- Hayhoe, G. F. (1979). A Driver Model Based on the Cerebellar Model Articulation Controller. *Vehicle System Dynamics*, 8(1), 49-72.
- Herbart, J. F. (1825). *Psychologie als Wissenschaft, neu gegründet auf Erfahrung, Metaphysik und Mathematik. Zweiter analytischer Teil*. Königsberg: August Wilhelm Unzer.
- Hess, R. A. (1978). Dual-Loop Model of the Human Controller. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1(4), 254-260.
- Hesse, T., Schieben, A., Heesen, M., Dziennus, M., Griesche, S. & Köster, F. (2013). *Interaction design for automation initiated steering manoeuvres for collision avoidance*. 6. Tagung Fahrerassistenz. München.
- Hick, W. E. (1952). On the rate of gain of information. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 4, 11-26.
- Hildreth, E. C., Beusmans, J. M. H., Boer, E. R. & Royden, C. S. (2000). From vision to action: Experiments and models of steering control during driving. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26(3), 1106-1132.
- Ho, C., Tan, H. Z. & Spence, C. (2005). Using spatial vibrotactile cues to direct visual attention in driving scenes. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 8(6), 397-412.
- Hoc, J.-M., Mars, F., Milleville-Pennel, I., Jolly, É., Netto, M. & Blosseville, J.-M. (2006). Human-machine cooperation in car driving for lateral safety: Delegation and mutual control. *Le travail humain*, 69(2), 153-182.
- Hodgson, T. L., Müller, H. J. & O'leary, M. J. (1999). Attentional localization prior to simple and directed manual responses. *Perception & Psychophysics*, 61(2), 308-321.
- Hoffman, J. (1993). *Vorhersage und Erkenntnis: Die Funktion von Antizipationen in der menschlichen Verhaltenssteuerung und Wahrnehmung*. Göttingen: Hogrefe.
- Hommel, B. (2011). The Simon effect as tool and heuristic. *Acta Psychologica*, 136(2), 189-202.
- Hommel, B., Müsseler, J., Aschersleben, G. & Prinz, W. (2001). The theory of event coding (TEC): A framework for perception and action planning. *Behavioural and Brain Sciences*, 24, 849-878.
- Huestegge, L. & Hazeltine, E. (2011). Crossmodal action: modality matters. *Psychological Research*(75), 445-451.
- Huestegge, L. & Koch, I. (2009). Dual-task crosstalk between saccades and manual responses. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 35(2), 352.
- Huestegge, L. & Koch, I. (2010). Crossmodal action selection: Evidence from dual-task compatibility. *Memory and Cognition*(38), 493-501.
- interactiVe - accident avoidance by active intervention for Intelligent Vehicles*. (2017). Retrieved 26.05.2017, from <http://www.interactive-ip.eu/>

- Ising, K. W., Droll, J. A., Kroeker, S. G., D'Addario, P. M. & Goulet, J.-F. (2012). Driver-Related Delay in Emergency Braking Response to a Laterally Incurring Hazard. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 56(1), 705-709.
- Itoh, M., Horikome, T. & Inagaki, T. (2013). Effectiveness and driver acceptance of a semi-autonomous forward obstacle collision avoidance system. *Applied Ergonomics*, 44(5), 756-763.
- Itoh, M. & Inagaki, T. (2014). Design and evaluation of steering protection for avoiding collisions during a lane change. *Ergonomics*, 57(3), 361–373.
- James, W. (1891). *The Principles of Psychology (Vol. 2)*. London: McMillan and Co, LTD. (orig. 1890).
- Janssen, W. (1979). *Routeplanning en-geleiding: een literatuurstudie*. Report IZF 1979 C-13. Soestberg: Institute for Perception TNO.
- Jurecki, R. S. (2016). An analysis of collision avoidance manoeuvres in emergency traffic situations. *Archiwum Motoryzacji*, 72(2), 73–93.
- Katzourakis, D. I., de Winter, J. C. F., Alirezaei, M., Corno, M. & Happee, R. (2014). Road-Departure Prevention in an Emergency Obstacle Avoidance Situation. *Systems, Man, and Cybernetics: Systems, IEEE Transactions on*, 44(5), 621-629.
- Keele, S. W. & Posner, M. I. (1968). Processing of visual feedback in rapid movements. *Journal of experimental psychology*, 77(1), 155.
- Kiesel, A., Kunde, W. & Hoffmann, J. (2007). Mechanisms of subliminal response priming. *Advances in Cognitive Psychology*, 3(1-2), 307-315.
- Kiesel, A., Steinhauser, M., Wendt, M. et al. (2010). Control and interference in task switching—A review. *Psychological Bulletin*, 136(5), 849-874.
- Kleen, A. & Schmidt, G. (2009). Haptische Ausweichempfehlungen in Kollisionssituationen: Effektivität und Aspekte der Kontrollierbarkeit. In *Tagungsband 8. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme*. S. 44–49. Berlin.
- Kullack, A., Ehrenpfordt, I. & Eggert, F. (2007). ReflektAS - Ein verhaltensbasiertes Assistenzsystem zur Querführung. In TU B. Zentrum Mensch-Maschine Systeme (Hrsg.), *8. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme*. S. 208–213. Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin.
- Kullack, A., Ehrenpfordt, I. & Eggert, F. (2009). ReflektAS - Ein verhaltensbasiertes Assistenzsystem zur Querführung. In A. Lichtenstein, C. Stößel & C. Clemens (Eds.), *8. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme*. S. 208–213. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Kunde, W. (2001). Response-effect compatibility in manual choice reaction tasks. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27(2), 387-394.
- Lerner, N. D. (1993). Brake Perception-Reaction Times of Older and Younger Drivers. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 37(2), 206-210.
- Lotze, R. H. (1852). *Medizinische Psychologie oder Physiologie der Seele*. Leipzig: Weidmann'sche Buchhandlung.
- Malaterre, G., Ferrandez, F., Fleury, D. & Lechner, D. (1988). Decision making in emergency situations. *Ergonomics*, 31(4), 643-655.

- Malaterre, G. & Lechner, D. (1990). Emergency manoeuvres at junctions using a driving simulator. In M. Koshi (Hrsg.), *Transportation and traffic theory : proceedings of the Eleventh International Symposium on Transportation and Traffic Theory, held July 18-20, 1990 in Yokohama, Japan*. S. 213-232. New York: Elsevier.
- Manstetten, D., Bengler, K., Busch, F. et al. (2013). "UR:BAN MV" – a German project focusing on human factors to increase traffic safety in urban areas. In *Proceedings of the 20th ITS World Congress*. Tokyo.
- Mazzae, E., Barickman, F., Scott Baldwin, G. & Forkenbrock, G. (1999). Driver Crash Avoidance Behavior with ABS in an Intersection Incursion Scenario on Dry Versus Wet Pavement. *SAE Technical Paper 1999-01-1288*.
- McGehee, D. V., Mazzae, E. N., Baldwin, G. et al. (1999). *Examination of Drivers' Collision Avoidance Behavior Using Conventional and Antilock Brake Systems on the Iowa Driving Simulator*. Washington D.C.: University of Iowa
- Human Factors Research Program/Public Policy Center.
- McLean, J. R. & Hoffmann, E. R. (1973). The Effects of Restricted Preview on Driver Steering Control and Performance. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 15(4), 421-430.
- McMahon, T. A. (1984). *Muscles, reflexes, and locomotion*. New Jersey: Princeton University Press.
- McRuer, D. & Weir, D. H. (1969). Theory of Manual Vehicular Control. *Ergonomics*, 12(4), 599-633.
- McRuer, D. T., Allen, R. W., Weir, D. H. & Klein, R. H. (1977). New Results in Driver Steering Control Models. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 19(4), 381-397.
- Mehrabi, N., Razavian, R. S. & McPhee, J. (2013). *A Three-Dimensional Musculoskeletal Driver Model to Study Steering Tasks*. ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference.
- Mehrabi, N., Sharif Razavian, R. & McPhee, J. (2015). Steering disturbance rejection using a physics-based neuromusculoskeletal driver model. *Vehicle System Dynamics*, 53(10), 1393-1415.
- Michon, J. (1985). A Critical View of Driver Behavior Models: What Do We Know, What Should We Do? In L. Evans & R. Schwing (Eds.), *Human Behavior and Traffic Safety*. S. 485-524: Springer US.
- Miller, J. (1982). Divided attention: Evidence for coactivation with redundant signals. *Cognitive Psychology*, 14(2), 247-279.
- Mohr, B. & Pulvermuller, F. (2002). Redundancy gains and costs in cognitive processing: effects of short stimulus onset asynchronies. *Journal of Experimental Psychology Learning Memory and Cognition*, 28(6), 1200-1223.
- Monsell, S. (2003). Task switching. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(3), 134-140.
- Mordkoff, J. T. & Yantis, S. (1991). An interactive race model of divided attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 17(2), 520-538.
- Müsseler, J., Aschersleben, G., Arning, K. & Proctor, R. W. (2009). Reversed effects of spatial compatibility in natural scenes. *The American Journal of Psychology*, 122(3), 325-336.

- Myers, D. G. (2008). Gedächtnis. In *Psychologie*. 2nd ed., S. 380-426. Heidelberg: Springer Medizin Verlag.
- Navarro, J., Mars, F. & Hoc, J.-M. (2007). Lateral Control Assistance for Car Drivers: A Comparison of Motor Priming and Warning Systems. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 49(5), 950-960.
- Neukum, A. (2010). *Controllability of erroneous steering torque interventions: driver reactions and influencing factors*. chassis. tech plus, 1st international Munich chassis symposium. Munich.
- Neukum, A. & Krüger, H. (2003). Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen–
Untersuchungsmethodik und Bewertungskriterien. *VDI-Berichte*, 1791, 297-318.
- Neukum, A., Leonhard, A., Lübbecke, T. et al. (2009). Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei fehlerhaften Eingriffen eines EPS- Lenksystems. *VDI-Berichte*, 2085, 107-124.
- Neukum, A., Paulig, J., Frömmig, L. & Henze, R. (2010a). Untersuchung zur Wahrnehmung von Lenkmomenten bei Pkw. *FAT-Schriftenreihe*(222).
- Neukum, A., Ufer, E., Paulig, J. & Kruger, H. (2008). Controllability of superposition steering system failures, *Steering tech*.
- Neukum, A., Ufer, E. & Schwab, M. (2010b). Kontrollierbarkeit potenzieller Fehleingriffe des elektronischen Stabilitätsprogramms (ESP). In Ika (Hrsg.), *7. Tag des Fahrwerks 2010*. S. 108–123.
- Newberry, A. C., Griffin, M. J. & Dowson, M. (2007). Driver perception of steering feel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 221(4), 405-415.
- Pashler, H. (1994). Dual-task interference in simple tasks: data and theory. *Psychological bulletin*, 116(2), 220.
- Pfister, R. & Janczyk, M. (2012). Harleß' Apparatus of Will: 150 years later. *Psychological Research*, 76(5), 561-565.
- Pick, A. & Cole, D. (2003). Neuromuscular dynamics and the vehicle steering task. *The Dynamics of Vehicles on Roads and on Tracks*, 41, 182-191.
- Pick, A. J. (2004). *Neuromuscular Dynamics and the Vehicle Steering Task*. Dissertation, Cambridge University.
http://www2.eng.cam.ac.uk/~dj13/vehicledynamics/downloads/Pick_PhDthesis_Dec04.pdf
- Pick, A. J. & Cole, D. J. (2006). Neuromuscular dynamics in the driver–vehicle system. *Vehicle System Dynamics*, 44(sup1), 624-631.
- Pick, A. J. & Cole, D. J. (2007). Dynamic properties of a driver's arms holding a steering wheel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 221(12), 1475-1486.
- Powers, W. T. (1973a). *Behavior: The Control of Perception* 2 ed. New Canaan, Connecticut: Benchmark Publications Inc.
- Powers, W. T. (1973b). Feedback: Beyond behaviorism. *Science*, 179(4071), 351-356.

- Powers, W. T. (1978). Quantitative analysis of purposive systems: Some spadework at the foundations of scientific psychology. *Psychological Review*, 85(5), 417-435.
- Proctor, R., Wang, D.-Y. & Pick, D. (2004). Stimulus-response compatibility with wheel-rotation responses: Will an incompatible response coding be used when a compatible coding is possible? *Psychonomic Bulletin & Review*, 11(5), 841-847.
- PRORETA. (2017). Retrieved 26.05.2017, from <http://www.proreta.tu-darmstadt.de/proreta/index.de.jsp>
- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*(3), 257-266.
- Reichenbach, M. (2013, 10.10.2013). *Infiniti Q50: mit Steer-by-Wire in das Premiumsegment*. Retrieved 20.05.2016, from <https://www.springerprofessional.de/automobil---motoren/infiniti-q50-mit-steer-by-wire-in-das-premiumsegment/6585162>
- Reid, L. D. (1983). A survey of recent driver steering behavior models suited to accident studies. *Accident Analysis & Prevention*, 15(1), 23-40.
- Reimann, G., Brenner, P. & Buring, H. (2012). Lenkstellensysteme. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Eds.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. S. 287-312. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Riemersma, J. B. J. (1981). Visual control during straight road driving. *Acta Psychologica*, 48(1-3), 215-225.
- Salvucci, D. D. & Gray, R. (2004). A two-point visual control model of steering. *Perception-London*, 33(10), 1233-1248.
- Salvucci, D. D. & Liu, A. (2002). The time course of a lane change: Driver control and eye-movement behavior. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 5(2), 123-132.
- Scanlon, J. M., Kusano, K. D. & Gabler, H. C. (2015). Analysis of Driver Evasive Maneuvering Prior to Intersection Crashes Using Event Data Recorders. *Traffic Injury Prevention*, 16(sup2), S182-S189.
- Schieben, A., Griesche, S., Hesse, T., Fricke, N. & Baumann, M. (2014). Evaluation of three different interaction designs for an automatic steering intervention. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 27, Part B, 238-251.
- Schmidt, G. (2008). Applying the Response Code of Practice for Evaluation of Driver Assistance Systems: How the Age of the Driver influences Perception of Steering Torque Signals. In C. Brusque (Hrsg.), *Proceedings of European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems*. S. 229-237. Lyon: Humanist Publications.
- Schmidt, G. (2009). *Haptische Signale in der Lenkung: Controllability zusätzlicher Lenkmomente*. Dissertation, TU Braunschweig. http://rzbl04.biblio.etc.tu-bs.de:8080/docportal/servlets/MCRFileNodeServlet/DocPortal_derivate_00007645/schmidtg_dissertation.pdf
- Schmidt, G., Kiss, M., Switkes, J. & Gerdes, C. (2007). Auswirkungen haptischer Signale in der Lenkung auf das Fahrer-Fahrzeug System. *AAET*.

- Schmidt, G., Kiss, M., Switkes, J. P. & Gerdes, J. C. (2006). *Auswirkung zusätzlicher Lenkmomente auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion: Auswirkung zusätzlicher Lenkmomente auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion*. 22. VDI/VW Gemeinschaftstagung - Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme. Wolfsburg.
- Schumann, J. (1994). *On the use of discrete proprioceptive-tactile warning signals during manual control: the steering wheel as an active control device*. Münster: Waxmann.
- Sieber, M., Schneider, M., Siegel, A., Siedersberger, K.-H. & Färber, B. (2015a). Wirksamkeit von Ausweichempfehlungen in Kombination mit Teilbremsung beim Notausweichen. In C. C. Stiller, K. Bengler, K. Dietmayer, L. Eckstein, B. Färber, M. Maurer & H. Winner (Eds.), *10. Workshop Fahrerassistenzsysteme - FAS 2015*. S. 39–49. Darmstadt: Uni-DAS e.V.
- Sieber, M., Siedersberger, K.-H., Siegel, A. & Färber, B. (2015b). Automatic Emergency Steering with Distracted Drivers: Effects of Intervention Design. In *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*. S. 2040–2045. Los Alamitos, California: IEEE Conference Publishing Services.
- Simon, J. R. (1969). Reactions toward the source of stimulation. *Journal of Experimental Psychology*, *81*(1), 174-176.
- Simon, J. R. & Rudell, A. P. (1967). Auditory S-R compatibility: The effect of an irrelevant cue on information processing. *Journal of Applied Psychology*, *51*(3), 300-304.
- Spence, C. (2002). Multisensory attention and tactile information-processing. *Behavioural Brain Research*, *135*(1–2), 57-64.
- Sternberg, S. (1966). High-speed scanning in human memory. *Science*, *153*(3736), 652-654.
- Sternberg, S. (1969). Memory-scanning: Mental processes revealed by reaction-time experiments. *American scientist*, *57*(4), 421-457.
- Switkes, J. P. (2006). *Handwheel Force Feedback With Lanekeeping Assistance: Combined Dynamics, Stability and Bounding* Dissertation, Stanford University.
https://ddl.stanford.edu/sites/default/files/2006_Thesis_Switkes_Handwheel_Force_Feedback_with_Lanekeeping_Assistance.pdf
- Switkes, J. P., Gerdes, J. C., Schmidt, G. F. & Kiss, M. (2007). Driver response to steering torque disturbances: A user study on assisted lanekeeping. In G. Shaver (Hrsg.), *5th IFAC Symposium in Advances in Automotive Control*.
- Telford, C. W. (1931). The refractory phase of voluntary and associative responses. *Journal of Experimental Psychology*, *14*(1), 1-36.
- Toffin, D., Reymond, G., Kemeny, A. & Droulez, J. (2003). *Influence of steering wheel torque feedback in a dynamic driving simulator*. Proceedings of the driving simulation conference, north america, dearborn, usa.
- Wallis, G., Chatziastros, A. & Bülthoff, H. (2002). An Unexpected Role for Visual Feedback in Vehicle Steering Control. *Current Biology*, *12*(4), 295-299.
- Wallis, G., Chatziastros, A., Tresilian, J. & Tomasevic, N. (2007). The role of visual and nonvisual feedback in a vehicle steering task. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *33*(5), 1127-1144.

- Wang, D. D., Proctor, R. W. & Pick, D. F. (2003). Stimulus-response compatibility effects for warning signals and steering responses. In *Proceedings of the Second International Driving Symposium. Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*. S. 226-230.
- Wann, J. & Land, M. (2000). Steering with or without the flow: is the retrieval of heading necessary? *Trends in cognitive sciences*, 4(8), 319-324.
- Wargo, M. J., Kelley, C. R., Mitchell, M. B. & Prosin, D. J. (1967). *Human Operator Response Speed, Frequency, and Flexibility: A Review, Analysis, and Device Demonstration*. NASA CR-874. National Aeronautics and Space Administration.
<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19670026543.pdf>
- Weber, D. (2012). Untersuchung des Potenzials einer Brems-Ausweich-Assistenz, *Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik* (Vol. 13). Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.
- Weber, D., Henn, R., Uhler, W., Marberger, C., Hoffmann, S. & Gauterin, F. (2010). Untersuchung des Fahrerhaltens auf visuelle Ausweichanzeigen im kontaktanalogen Head-Up-Display/Examination of driving behaviour on visual evasion displays in a contact-analogous head-up-display valuation. *VDI-Berichte*(2104).
- Weber, S. & Färber, B. (2015). Driver reactions in critical crossing situations. In *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*. S. 444–449. Los Alamitos, California: IEEE Conference Publishing Services.
- Weitzel, D. A. (2013). *Objektive Bewertung der Kontrollierbarkeit nicht situationsgerechter Reaktionen umfeldsensorbasierter Fahrerassistenzsysteme*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.
- Weller, L., Schwarz, K. A., Kunde, W. & Pfister, R. (2017). Was it me? – Filling the interval between action and effects increases agency but not sensory attenuation. *Biological Psychology*, 123, 241-249.
- Wesp, A., Schmidt, D., Fecher, N. & Winner, H. (2008). Vehicle motion in case of failure if superposition steering systems. In A. T. Z. A. Zeitschrift (Hrsg.), *Steering.tech 2008*.
- Wiacek, C. J. & Najm, W. G. (1999). *Driver/vehicle characteristics in rear-end precrash scenarios based on the General Estimates System (GES)*. SAE Technical Paper.
- Wickens, C. D. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3(2), 159-177.
- Wickens, C. D., Lee, J., Liu, Y. & Becker, S. G. (2004). *An Introduction to Human Factors Engineering* 2nd ed. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Wiener, N. (1965). *Cybernetics or control and communciation in the animal and the machine* 2nd ed. Cambridge, Massachusetts: M.I.T. Press.
- Wierwille, W. W., Casali, J. G. & Repa, B. S. (1983). Driver Steering Reaction Time to Abrupt-Onset Crosswinds, as Measured In a Moving-Base Driving Simulator. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 25(1), 103-116.
- Wikipedia. (2016, 30.04.2016). *Fahrdynamikregelung* --- Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Retrieved 20.05.2016, from <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Fahrdynamikregelung&oldid=153652269>

Woodworth, R. (1899). Accuracy of voluntary movement. *The Psychological Review: Monograph Supplements*, 3(2).

Wuttke, W. (2015). *Nexteer bringt die Lenkung auf Kurs*. Retrieved 20.05.2016, from <https://www.auto-medienportal.net/artikel/detail/33126>