

Veröffentlichungen des Institutes  
für Straßen- und Eisenbahnwesen

Band 61

# **Auswirkungen der Wahrnehmung von Markierungskonstellationen auf das Fahrverhalten in Arbeitsstellen auf Bundesautobahnen**

Barbara Köhler



Barbara Köhler

**Auswirkungen der Wahrnehmung  
von Markierungskonstellationen auf  
das Fahrverhalten in Arbeitsstellen  
auf Bundesautobahnen**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

**Veröffentlichungen  
des Institutes für Straßen- und Eisenbahnwesen  
Band 61**

Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Ralf Roos

Eine Übersicht aller bisher in dieser Schriftenreihe erschienenen  
Bände finden Sie am Ende des Buches.

# **Auswirkungen der Wahrnehmung von Markierungskonstellationen auf das Fahrverhalten in Arbeitsstellen auf Bundesautobahnen**

von  
Barbara Köhler

Karlsruher Institut für Technologie  
Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen

Auswirkungen der Wahrnehmung von Markierungskonstellationen  
auf das Fahrverhalten in Arbeitsstellen auf Bundesautobahnen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der  
Ingenieurwissenschaften von der KIT-Fakultät für Bauingenieur-,  
Geo- und Umweltwissenschaften des Karlsruher Instituts für  
Technologie (KIT) genehmigte Dissertation

von Dipl.-Ing. Barbara Köhler aus Filderstadt-Bonlanden

Tag der mündlichen Prüfung: 21. Februar 2017

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Ralf Roos

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Psych. Barbara Deml

#### Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
KIT Scientific Publishing  
Straße am Forum 2  
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark  
of Karlsruhe Institute of Technology.  
Reprint using the book cover is not allowed.

[www.ksp.kit.edu](http://www.ksp.kit.edu)



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed  
under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License  
(CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons  
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2019 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 0344-970X

ISBN 978-3-7315-0703-1

DOI 10.5445/KSP/1000072550





# Vorwort

Der größte Teil des Straßenverkehrs wird in Deutschland auf dem sehr gut strukturierten Netz der Bundesfernstraßen abgewickelt. Gerade für diese Straßen ist aber für die nächsten Dekaden noch eine Steigerung des Verkehrsaufkommens, insbesondere bezogen auf den Schwerverkehr, prognostiziert, so dass vor allem bereits heute schon erheblich frequentierte Autobahnabschnitte zur Kapazitätserhöhung ausgebaut werden müssen. Darüber hinaus wurde in der Vergangenheit die systematische Erhaltung auch dieser wichtigen Straßen vernachlässigt, wodurch diesbezüglich ein erheblicher Nachholbedarf besteht. Beides führt in Zukunft zu erhöhter Bautätigkeit und damit einhergehend zu vermehrten Arbeitsstellen längerer Dauer vornehmlich auf den Autobahnen.

Solche Arbeitsstellen, insbesondere bei einer 4+0-Verkehrsführung, bilden aufgrund der Überleitung eines Richtungsverkehres auf die Gegenfahrbahn und der geringen Fahrstreifenbreite im gesamten Baustellenbereich verbunden mit einer Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit einen Engpass mit Kapazitätseinbußen, was auf hoch belasteten Autobahnabschnitten regelmäßig zu Stauereignissen führt. Zudem ist bekannt, dass es innerhalb von Arbeitsstellen vermehrt zu Unfällen kommt. Bei einem Unfall wird die Kapazität weiter eingeschränkt (im Extremfall Vollsperrung mindestens einer Fahrtrichtung), so dass die Staus Dimensionen annehmen, die volkswirtschaftlich nicht vertreten werden können. Insofern müssen erhebliche Anstrengungen unternommen werden, um die Verkehrssicherheit in Arbeitsstellen längerer Dauer zu erhöhen.

Sicherheitsanalysen zeigen, dass der Typ „Unfälle im Längsverkehr“ mit Abstand der häufigste Unfalltyp in Arbeitsstellen ist. Hierzu zählt insbesondere das seitliche Streifen eines Fahrzeugs (unabhängig von der Unfallfolge), was unmittelbar mit der lateralen Position der Fahrzeuge im Fahrstreifen zusammenhängt. Die Ursache für diese Unfälle, d.h. für kritische laterale Positionen von Fahrzeugen ist nicht bekannt. Es wird z.B. spekuliert, dass aufgrund der beengten Verhältnisse die Fahrzeugführer erhöhten Anforderungen ausgesetzt

sind, was zu mehr oder weniger starken Pendelbewegungen führt (u.a. zur Vergrößerung des Abstandes zu potenziellen Gefahrenstellen wie Fahrbahnrand, Trennwand oder Verkehr auf dem Nachbarfahrstreifen). Aber auch andere Ursachen sind denkbar.

Hier setzte Frau Dr. Köhler mit ihrer selbstbezogenen Forschung an: Sie vermutete aufgrund früherer Untersuchungen einen Zusammenhang zwischen der lateralen Position der Fahrzeuge und der Markierung innerhalb der Arbeitsstelle, die verschiedene (teilweise die Fahrer irritierende) Konstellationen annehmen kann, und wollte herausfinden, ob sich unterschiedliche Markierungskonstellationen tatsächlich auf das Fahrverhalten auswirken. Ihr Augenmerk lag dabei auf der Art der Markierung (durchgezogen / unterbrochen, Breit- / Schmalstrich), deren Farbe (gültige gelbe / ungültige weiße) und deren Lage im Querschnitt sowie zueinander.

Im Ergebnis konnte sie festhalten, dass die Autofahrer einerseits grundsätzlich nach rechts versetzt fahren und sie andererseits die weiße (dauerhafte) Markierung nicht nur wahrnehmen, sondern sich in hohem Maße (offenbar unbewusst) danach richten, auch wenn diese weiße Markierung in Arbeitsstellen, die gelb markiert sind, nicht gültig ist. Der letztgenannte Effekt ist besonders deutlich, wenn die weiße Markierung innerhalb eines gelb markierten Fahrstreifens und nicht weit entfernt von der gelben Markierung liegt. Damit konnte Frau Dr. Köhler nicht nur nachweisen, dass Markierungskonstellationen sehr wohl einen Einfluss auf das Fahrverhalten haben, sondern sie konnte auch aus den daraus resultierenden lateralen Positionen der Fahrzeuge kritische Situationen detektieren. Auch wenn es sich hierbei zunächst nur um qualitative Erkenntnisse handelt, so sind dies doch entscheidende Ansätze, um künftig die Verkehrssicherheit in Arbeitsstellen erhöhen zu können.

Mit dem von ihr vorgeschlagenen Modellansatz zur Quantifizierung der lateralen Position von Fahrzeugen bei definierten Randbedingungen in Arbeitsstellen und auf Basis der vorliegenden Arbeit wurde Frau Dr. Köhler an der Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) mit sehr gutem Erfolg zum Dr.-Ing. promoviert. An dieser Stelle gilt ein besonderer Dank Frau Kollegin Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Psych. Barbara Deml vom Institut für Arbeits-

wissenschaft und Betriebsorganisation des KIT für die Überlassung ihres Fahr-simulators zur Durchführung von Probandenfahrten sowie für die Übernahme des Korreferates zur Dissertation.

Karlsruhe, im August 2018

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Ralf Roos



# Kurzfassung

Diese Dissertation befasst sich mit der subjektiven Wahrnehmung und dem objektiven Fahr- und Blickverhalten in Abhängigkeit von der Markierungskonstellation in Arbeitsstellen längerer Dauer (AID) auf Bundesautobahnen (BAB). Gelbe Markierung zeigt in AID die geänderte Verkehrsführung an. Die dauerhaft weiße Markierung wird meist aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und des Bauablaufs nicht vor der Einrichtung von AID entfernt bzw. bereits unmittelbar nach dem Ende der Arbeiten auf die Fahrbahn aufgebracht. Dadurch entstehen Markierungskonstellationen aus gelber und weißer Markierung, die sich ungünstig auf das Fahrverhalten und dadurch auch auf die Verkehrssicherheit auswirken. Mit einem dreistufigen Untersuchungskonzept, bestehend aus einer Online-Befragung, Probandenfahrten mit einem Versuchsfahrzeug und mehreren Fahrsimulationen, wird die Wahrnehmung sowie das Fahr- und Blickverhalten in AID auf BAB analysiert.

In der Online-Befragung wird zwar angegeben, dass die Markierungskonstellation keinen Einfluss auf das Fahrverhalten hat, beim objektiv gemessenen Fahrverhalten wird jedoch ein Einfluss nachgewiesen: Liegt in der linken Hälfte des Fahrstreifens weiße ungültige Markierung, so wird weiter rechts gefahren. Weiße ungültige Markierung in der rechten Fahrstreifenhälfte führt dazu, dass weiter links gefahren wird. Je näher die weiße ungültige an der gelben gültigen Markierung liegt, desto größer ist deren Einfluss auf die Position im Fahrstreifen. Auch im Blickverhalten ist nachweisbar, dass die ungültige weiße Markierung häufiger fixiert wird als die gültige gelbe Markierung. Parallel zu unterschiedlichen Markierungskonstellationen wird auch die Wirkungsweise verschiedener für sich liegender Markierungen sowie von transportablen Schutzeinrichtungen erhoben.

Die gewonnenen Erkenntnisse sind in einem Modellansatz zusammengeführt, der es ermöglicht, in Abhängigkeit von den eingesetzten Arbeitselementen die Position im Fahrstreifen abzuschätzen. Es besteht aber weiterer Forschungsbedarf, um die genauen Einflussgrößen der Arbeitselemente bestimmen und quantifizieren zu können. Liegt das Modell mit den wesentlichen Kenngrößen vor, kann bereits vor Einrichtung einer AID die wahrscheinliche

durchschnittliche laterale Position der Fahrzeuge ermittelt werden. Damit können Gefährdungspotenziale durch ungünstiges Fahrverhalten minimiert und ein Beitrag zur Verkehrssicherheit geleistet werden.

# Abstract

This dissertation considers the subjective perception and objective driving- and viewing-behavior as a function of different road markings in long lasting construction zones (AID) on federal autobahn (BAB). Yellow markings in AID display the modified traffic guidance. The permanent white road markings are usually not removed due to economical factors as well as reasons regarding the construction process or reapplied right after the end of the construction process. As a result, road construction sites often feature a mixture of yellow and white road markings. This influences road behavior and therefore negatively impacts road safety. A three-staged study consisting of an online poll, experiment test drives with an experimental vehicle, and several tests in a driving simulator help analyze perception as well as driving- and viewing-behavior in AID on BAB.

Subjectively, different road markings do not have an influence on road behavior. Objectively measured, however, an influence can be proven. If there are invalid white road markings left in the lane, people drive further right. Invalid white road markings right in the lane makes people drive further left. The closer the invalid white markings are to the valid yellow markings, the bigger the influence on the driving position. It is also shown that the driver focuses more on the invalid white road markings than the valid yellow ones. Not only the influence of different road markings in combination with each other but also the influence of single road marking elements as well as portable road safety barriers are evaluated.

This gained knowledge is later adapted into a model approach. This helps determine the car position within the lane depending on the present elements within road construction zones. However, there is still need for further research to absolutely evaluate all independent variables of elements in road construction zones and their influence. With this model, it is possible to predict the most likely average driving position during the construction planning stage. Therefore, risk potential due to unfavorable road behavior can be identified and minimized which can contribute to road safety.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung .....</b>	<b>i</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>iii</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>ix</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>xiii</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>xv</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Veranlassung und Motivation .....	1
1.2 Zielsetzung und Forschungsfrage .....	2
1.3 Methodischer Aufbau der Untersuchung .....	3
<b>2 Stand von Wissenschaft &amp; Technik.....</b>	<b>7</b>
2.1 Wahrnehmung .....	7
2.1.1 Grundlagen .....	7
2.1.2 Relevanz im Straßenverkehr.....	9
2.1.3 Informationsaufnahme im Straßenverkehr .....	12
2.2 Visuelle Wahrnehmung .....	13
2.2.1 Das menschliche Auge .....	13
2.2.2 Informationsaufnahme der Augen .....	15
2.2.3 Verarbeitung von Information im Gehirn .....	17
2.2.4 Parameter des Blickverhaltens.....	19
2.2.5 Blickverhalten im Straßenverkehr .....	21
2.2.6 Wahrnehmung von Markierung.....	25
2.2.7 Straßenraumgestaltung und Blickverhalten .....	27
2.3 Erkenntnisse zur Wahrnehmung .....	29
2.4 AID auf Autobahnen.....	30
2.4.1 Relevante Entwurfparameter für Autobahnen.....	30
2.4.2 Markierung von Straßen .....	33
2.4.3 Regelwerk für AID .....	35
2.4.4 Markierung von Arbeitsstellen .....	38

2.4.5	Kritische Markierungskonstellationen.....	40
2.4.6	Markierungskonstellationen am Beispiel einer 4s+0 Verkehrsführung.....	41
2.5	Fahrverhalten.....	43
2.5.1	Untersuchungen zum Spurverhalten.....	43
2.5.2	Definition der lateralen Position.....	46
2.5.3	Bestimmung der Qualität der Querdynamik.....	47
2.6	Statistische Grundlagen.....	48
2.6.1	Allgemein.....	48
2.6.2	Deskriptive Statistik.....	48
2.6.3	Hypothesentest.....	50
2.7	Wesentliche Erkenntnisse zu Arbeitsstellen und zum Fahrverhalten.....	54
<b>3</b>	<b>Detektion kritischer Markierungskonstellationen in AID.....</b>	<b>55</b>
3.1	Allgemeines.....	55
3.2	Phase 1: Befragung zum Verhalten und zur Wahrnehmung von AID.....	56
3.2.1	Methodisches Vorgehen und Ergebnisse.....	56
3.2.2	Prüfen der Hypothesen.....	58
3.2.3	Zusammengefasste Ergebnisse Phase 1.....	62
3.3	Phase 2A: Untersuchung von Markierungskonstellationen im realen Verkehr.....	64
3.3.1	Aufbau und Ablauf der Untersuchung.....	64
3.3.2	Details zur Erhebung und Auswertung.....	66
3.3.3	Ergebnisse zum Blickverhalten.....	69
3.3.4	Ergebnisse zum Fahrverhalten.....	73
3.3.5	Zusammengefasste Ergebnisse Phase 2A.....	74
3.4	Phase 2B: Grundlegende Untersuchung von Markierungskonstellationen im Simulator.....	75
3.4.1	Aufbau und Ablauf der Untersuchung.....	75
3.4.2	Details der Simulation.....	77
3.4.3	Ergebnisse zum Fahrverhalten.....	81
3.4.4	Ergebnisse des Fahrverhaltens in Abhängigkeit von Lageplanelementen.....	85

---

3.4.5	Ergebnisse zum Blickverhalten .....	92
3.4.6	Zusammengefasste Ergebnisse Phase 2B .....	93
3.5	Phase 3: Untersuchung ausgewählter Markierungskonstellationen im Simulator .....	95
3.5.1	Aufbau und Ablauf der Untersuchung.....	95
3.5.2	Details der simulierten Querschnitte Phase 3 .....	97
3.5.3	Details der Blickbewegungsaufzeichnung.....	100
3.5.4	Ergebnisse zum Fahrverhalten.....	101
3.5.5	Ergebnisse des Fahrverhaltens in Abhängigkeit von Lageplanelementen .....	105
3.5.6	Ergebnisse zum Blickverhalten .....	111
3.5.7	Zusammengefasste Ergebnisse Phase 3.....	116
3.6	Wesentliche Ergebnisse und Erkenntnisse.....	117
<b>4</b>	<b>Modellansatz zur Bestimmung der lateralen Position in AID.....</b>	<b>121</b>
4.1	Einflussfaktoren auf die laterale Position .....	121
4.2	Konzept des Modells .....	122
4.3	Auswirkung von Straßenraumelementen auf die laterale Position	124
4.3.1	Aufbau der QE-Untersuchung .....	124
4.3.2	Ergebnisse der QE-Untersuchung .....	126
4.3.3	Zusammengefasste Ergebnisse der QE-Untersuchung .....	129
4.4	Fiktives Modell und Beispiele .....	129
4.5	Entwicklungspotenzial des Modells .....	133
<b>5</b>	<b>Fazit und Ausblick.....</b>	<b>137</b>
<b>6</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>143</b>
<b>7</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>153</b>



# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Methodischer Aufbau der Untersuchung .....	4
Abbildung 2.1:	Bottom-Up Informationsverarbeitung <i>hier</i> : Plötzlich auftauchendes Wild auf der Fahrbahn.....	9
Abbildung 2.2:	Kapazität der menschlichen Wahrnehmung (Durth 1974) .....	12
Abbildung 2.3:	Aufbau des Auges mit unterschiedlichen Sichtbereichen (Spektrum Akademischer Verlag 1998).....	14
Abbildung 2.4:	Monokulares Gesichtsfeld des linken Auges mit Grenzen der Farbwahrnehmung (Birbaumer & Schmidt 2010) .....	16
Abbildung 2.5:	Anteil der Fixationen auf Straßenelemente in Kurven (Cohen 1985).....	23
Abbildung 2.6:	Definition der Begriffe im Straßenquerschnitt .....	31
Abbildung 2.7:	Ausgewählte Regelquerschnitte (RQ) für Autobahnen (RAS-Q 1982, RAS-Q-96 1996, RAA 2008a).....	33
Abbildung 2.8:	Einfluss der Seiten- und Randstreifenbreiten auf die Markierungskonstellation einer 4s+0 Verkehrsführung innerhalb der AID.....	42
Abbildung 2.9:	Mögliche Markierungskonstellationen einer 4s+0 Verkehrsführung .....	43
Abbildung 2.10:	Definition laterale Position.....	46
Abbildung 2.11:	Spurhaltequalität bei unterschiedlich breiten Fahrstreifen (Reichart 2001 nach Bubb 2015) .....	48
Abbildung 3.1:	Altersverteilung Phase 1 im Vergleich mit Führerscheinbesitzern in Deutschland.....	57
Abbildung 3.2:	Hypothese 1: Weiße Fahrbahnbegrenzung (Z 295) innerhalb des Fahrstreifens.....	59
Abbildung 3.3:	Hypothese 2: Weiße Leitlinie (Z 340) innerhalb des Fahrstreifens.....	60

Abbildung 3.4:	Versuchsfahrzeug (links), Eye-Tracking System im Versuchsfahrzeug (rechts).....	64
Abbildung 3.5:	Untersuchte AID Abschnitte der BAB A5 (Phase 2A).....	65
Abbildung 3.6:	Alter und Geschlecht der Versuchspersonen (Phase 2A) ..	66
Abbildung 3.7:	Querschnitt AID BAB A5 (Phase 2A) .....	67
Abbildung 3.8:	Oberfläche des Video-Klicker-Tools .....	68
Abbildung 3.9:	Mittlere Fixationsdauern der AID BAB A5 (Phase 2A)....	69
Abbildung 3.10:	AOI-Auswertung AID BAB A5 FR Nord (Phase 2A) .....	70
Abbildung 3.11:	AOI Auswertung AID BAB A5 FR Süd (Phase 2A) .....	71
Abbildung 3.12:	Versuchsaufbau Fahrsimulator (Phase 2B) (links: Proband mit Eye-Tracker; rechts: Fahrsimulator mit Panoramaleinwand).....	75
Abbildung 3.13:	Simulierte AID Querschnitte (Phase 2B) .....	76
Abbildung 3.14:	Alter und Geschlecht der Versuchspersonen (Phase 2B) ..	77
Abbildung 3.15:	Krümmungsband und Höhenplan (Phase 2B) .....	78
Abbildung 3.16:	Querschnitt AID 1 (Phase 2B).....	79
Abbildung 3.17:	Querschnitt AID 2 (Phase 2B).....	80
Abbildung 3.18:	Querschnitt AID 3 (Phase 2B).....	80
Abbildung 3.19:	Modifiziertes Box-Whisker-Diagramm .....	83
Abbildung 3.20:	Modifiziertes Box-Whisker-Diagramm der lateralen Position (Phase 2B).....	84
Abbildung 3.21:	Gleitender Mittelwert der lateralen Position rFS (Phase 2B).....	86
Abbildung 3.22:	Mittlere laterale Position innerhalb einzelner Lageplanelemente rFS (Phase 2B) .....	87
Abbildung 3.23:	Gleitender Mittelwert der lateralen Position lFS (Phase 2B).....	89
Abbildung 3.24:	Mittlere laterale Position innerhalb einzelner Lageplanelemente lFS (Phase 2B) .....	90

---

Abbildung 3.25: Mittlere Fixationsdauer (links) und Verhältnis zwischen Fixations- und Saccadendauer (rechts) innerhalb der AID (Phase 2B) .....	92
Abbildung 3.26: Scanpfadlänge (links) und Index räumlicher Dichte (rechts) für AID (Phase 2B) .....	93
Abbildung 3.27: Simulierte AID Querschnitte (Phase 3) .....	95
Abbildung 3.28: Alter und Geschlecht der Versuchspersonen (Phase 3).....	96
Abbildung 3.29: Querschnitt AID 4, (Phase 3) .....	98
Abbildung 3.30: Querschnitt AID 5, (Phase 3) .....	99
Abbildung 3.31: Querschnitt AID 6, (Phase 3) .....	99
Abbildung 3.32: Querschnitt AID 7, (Phase 3) .....	100
Abbildung 3.33: AOI-Definition (Phase 3) .....	100
Abbildung 3.34: Modifiziertes Box-Whisker-Diagramm der lateralen Position (Phase 3).....	104
Abbildung 3.35: Gleitender Mittelwert der lateralen Position rFS (Phase 3) ohne Verkehr (hellere Farben) und mit Verkehr (dunklere Farben) .....	106
Abbildung 3.36: Mittlere laterale Position innerhalb einzelner Lageplanelemente, rFS (Phase 3).....	108
Abbildung 3.37: Gleitender Mittelwert der lateralen Position IFS, mit Verkehr (Phase 3).....	110
Abbildung 3.38: Mittlere laterale Position innerhalb einzelner Lageplanelemente, IFS (Phase 3).....	111
Abbildung 3.39: Mittlere Fixationsdauer (links) und Verhältnis zwischen Fixations- und Saccadendauer (rechts) innerhalb der AID (Phase 3) .....	112
Abbildung 3.40: Scanpfadlänge (links) und Index der räumlichen Dichte (rechts) (Phase 3).....	113
Abbildung 3.41: AOI-Auswertung für AID 4 und AID 5 auf den rFS (Phase 3).....	114

Abbildung 3.42: AOI-Auswertung für AID 6 und AID 7 auf den IFS (Phase 3).....	115
Abbildung 4.1: Einflussfaktoren zur Wahl der lateralen Position .....	121
Abbildung 4.2: Konzept des Federkraftmodells.....	122
Abbildung 4.3: Beispielhafte Einflussverläufe (qualitativ) für Markierung und TSE.....	123
Abbildung 4.4: Beispiel eines Abschnitts der QE-Untersuchung (qe21) .	125
Abbildung 4.5: Alter und Geschlecht der QE-Untersuchung .....	125
Abbildung 4.6: Modifiziertes Box-Whisker-Diagramm der lateralen Position (QE-Untersuchung) .....	128
Abbildung 4.7: Fiktive Modellrechnung (Nullfall) .....	131
Abbildung 4.8: Einflusskurve und Ergebnis des Modells: Fall Lkw auf dem rFS .....	133

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Zuordnung der Information im Straßenverkehr zur Art der Wahrnehmung (Tomaske & Fortmüller 2001).....	10
Tabelle 2.2:	Markierung als Verkehrszeichen gemäß StVO (StVO 2016) .....	34
Tabelle 2.3:	Mindestbreite der Behelfsfahrstreifen in Abhängigkeit von der Länge der AID (RSA-95, 2015) .....	37
Tabelle 2.4:	Kritische Vergleichswerte zur Hypothesenprüfung für den Vorzeichentest (Clauß et al. 1995) .....	51
Tabelle 2.5:	Kritische Vergleichswerte zur Hypothesenprüfung für den Friedman-Test (Clauß et al. 1995).....	53
Tabelle 2.6:	Interpretation der ermittelten Irrtumswahrscheinlichkeit ..	53
Tabelle 3.1:	Paarweiser Vorzeichentest Hypothese 1: Dauerhaft durchgezogene Markierung innerhalb des rFS (n = 749) ..	59
Tabelle 3.2:	Paarweiser Vorzeichentest Hypothese 2: Dauerhaft unterbrochene Markierung innerhalb des IFS (n = 745)....	60
Tabelle 3.3:	Vorzeichentest Hypothese 3: Unterschied paralleler Gelb- und Weißmarkierung (n = 741) .....	61
Tabelle 3.4:	Vorzeichentest Hypothese 4: Beeinflussung der Spurhaltung durch dauerhafte Markierung (n = 753).....	62
Tabelle 3.5:	Qualität der Längsdynamik und Spurhaltung nach Reichart 2001, Bubb 2015 (Phase 2B) .....	82
Tabelle 3.6:	Ergebnisse des t-Tests der lateralen Position in der Links- und Rechtskurve (t-Test) .....	91
Tabelle 3.7:	Ergebnisse des Wilcoxon-Tests der lateralen Position in der Links- und Rechtskurve .....	91
Tabelle 3.8:	Qualität der Längsdynamik und Spurhaltung auf dem rFS nach Reichart 2001, Bubb 2015 (Phase 3).....	102
Tabelle 3.9:	Qualität der Längsdynamik und Spurhaltung auf dem IFS nach Reichart 2001, Bubb 2015 (Phase 3).....	103

Tabelle 3.10:	Einfluss der ungültigen weißen Markierung auf die laterale Position in Kurven .....	119
Tabelle 4.1:	Ermittelte fiktive laterale Position.....	131

# Abkürzungsverzeichnis

AID	Arbeitsstellen längerer Dauer
AOI	Area/-s of Interest
ArbStättV	Arbeitsstättenverordnung
AS	Anschlussstelle
Ausn_FS	Ausnutzungsgrad des Fahrstreifens
b	Breite
BAB	Bundesautobahn
bef. Fl.	befestigte Fläche
DII/2	Regelplan DII/2 nach den RSA-95
DTV	durchschnittlicher täglicher Verkehr
EKA	Entwurfsklasse Autobahn
FB	Fahrbahn
FBM	Fahrbahnmarkierung
FBR	Fahrbahnrand
FDE	Flächendeckenerneuerung
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Fix	Fixation
FP	Fluchtpunkt
FR	Fahrtrichtung

frei	freier Verkehr
FS	Fahrstreifen
FSB	Fahrstreifenbreite
geb	gebundener Verkehr
H BVA	Hinweise für barrierefreie Verkehrsanlagen
HBS	Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen
HFS	Hauptfahrstreifen / rechter Fahrstreifen (rFS)
HVO	Hinweise zur Verkehrslenkung und optischen Orientierung durch Bepflanzung
ifab	Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation
ISE	Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen
KIT	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
kQ	konstanter Querschnitt
latP	laterale Position
IFS	linker Fahrstreifen / 1.Überholfahrstreifen (1ÜFS)
max	Maximum
min	Minimum
mind.	mindestens
ms	Millisekunden
mw	Mittelwert

nm	Nanometer
Q_Längsdyn	Qualität der Längsdynamik
Q_Spur	Qualität der Spurhaltung
q15	15%-Quantil
q85	85%-Quantil
QE	Querschnittselement
RAA	Richtlinien für die Anlage von Autobahnen
rFS	rechter Fahrstreifen / Hauptfahrstreifen (HFS)
RMS	Richtlinien für die Markierung von Straßen
RQ	Regelquerschnitt
RSA	Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen
Sac	Saccade
SE	Schutzeinrichtung
SQ	Sonderquerschnitt
std_abw	Standardabweichung
StVO	Straßenverkehrs-Ordnung
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
SV	Schwerverkehr
TSE	transportable Schutzeinrichtung
ÜFS	Überholfahrstreifen / linker Fahrstreifen (IFS)

VP Versuchsperson/-en

VwV-StVO Allgemeine Verwaltungsvorschriften zur Straßenverkehrs-  
Ordnung

# 1 Einleitung

## 1.1 Veranlassung und Motivation

Arbeitsstellen auf Bundesautobahnen (BAB) sind für Verkehrsteilnehmer eine Herausforderung. Durch die schmalen Fahrstreifen herrschen verschärfte Bedingungen. Die relevanten Elemente (arbeitsstellenspezifische Ausstattungselemente wie z. B. Baken, Schutzeinrichtung und Markierung) müssen wahrgenommen und die Fahrweise entsprechend angepasst werden. Kleinere Fahrfehler können innerhalb von Arbeitsstellen bereits zu einem Unfall führen.

Das Unfallrisiko innerhalb von Arbeitsstellen längerer Dauer (AID) reduziert sich mit zunehmender Länge der Arbeitsstelle. In den Ein- und Ausfahrten der Arbeitsstelle sowie in den Verschwenkungsbereichen ist das Unfallrisiko größer als auf der Strecke innerhalb der AID (Bakaba et al. 2012). Der Unfall im Längsverkehr ist mit Abstand der häufigste Unfalltyp, der innerhalb von AID auf BAB vorkommt (Anteil > 60 %). Eine mögliche Ursache kann neben beengten Platzverhältnissen auch die Markierungssituation sein, die z. B. nicht eindeutig ist oder vom Fahrzeugführer nicht eindeutig wahrgenommen wird.

Die geänderte Verkehrsführung wird in AID mit gelber vorübergehender Markierung angezeigt. Durch die Überlagerung der weißen dauerhaften mit der gelben vorübergehenden Markierung kommt es zu ungewohnten Markierungskonstellationen, die zu Unsicherheiten des Fahrzeugführers führen können und somit die Verkehrssicherheit negativ beeinflussen.

Es gibt unterschiedliche Ansätze, die Verkehrssicherheit zu erhöhen. Die Automobilindustrie beispielsweise verfolgt das Ziel, den Fahrzeugführer durch autonom fahrende Fahrzeuge zu ersetzen. Eine Herausforderung für die Technik autonom fahrender Fahrzeuge sind Arbeitsstellen. Fehlen Informationen (z. B. Markierung) oder existieren irreguläre Informationen (z. B. verschobene Baken, geänderte Verkehrszeichen), können die Sensoren diese Situationen noch nicht verarbeiten. Den sicheren Umgang mit solchen Situationen müssen autonom fahrende Fahrzeuge erst erlernen. Bis Fahrzeuge tatsächlich autonom

durch Arbeitsstellen fahren können, ist der Fahrzeugführer in komplexen Situationen, wie beispielweise innerhalb einer Arbeitsstelle, unersetzlich. Die Wahrnehmung und Handlung des Fahrzeugführers entscheidet dann über die Sicherheit im Straßenverkehr.

Der Mensch kann auf unzählige Kombinationen und Situationen fehlender und falscher Informationen mittels Erfahrung und Wissens sicher reagieren. Das Verhalten ist abhängig davon, wie die umgebende Welt wahrgenommen wird (Benesch & Krech 1992). Besonders auf mehrstreifigen Fahrbahnen (z. B. auf BAB) ist die eindeutige Wahrnehmung der mit weißer Markierung angezeigten Verkehrsführung für einen sicheren und funktionierenden Verkehrsablauf unverzichtbar.

In ihrer Untersuchung zeigten ZIMMERMANN ET AL. (2016) bereits qualitativ, dass sich die Fahrzeugposition im Fahrstreifen (laterale Position) in Abhängigkeit von der Markierungskonstellation aus gelber und weißer Markierung ändert. Ein Ergebnis für den linken Fahrstreifen ist, dass bei „geringeren Abständen zwischen Schutteinrichtung und Weißmarkierung (...) etwas höhere Anteile an dichter Vorbeifahrt auftreten“ als bei größeren Abständen (Zimmermann et al. 2016). Diese Ergebnisse sind lediglich aus dem Fahrverhalten abgeleitet. Die Wahrnehmung der Fahrzeugführer wurde nicht untersucht.

Aufgrund der zunehmend erforderlichen Erhaltungsmaßnahmen des immer älter werdenden deutschen BAB-Netzes wird die Anzahl an Baustellen in den nächsten Jahren noch zunehmen oder mindestens konstant bleiben. Insofern ist eine Untersuchung zur Wahrnehmung und zum Fahrverhalten in AID bei unterschiedlichen Markierungskonstellationen sehr relevant und kann einen Beitrag zur Verbesserung der Verkehrssicherheit in AID leisten.

## **1.2 Zielsetzung und Forschungsfrage**

Beobachtet man Fahrzeuge innerhalb einer AID auf BAB, so fällt vermehrt ein zur Fahrstreifenmitte versetztes Fahren auf. Dabei variiert der Versatz der einzelnen Fahrzeuge in Abhängigkeit des befahrenen Fahrstreifens und dessen Breite. Diesem Fahrverhalten innerhalb von AID und den möglichen Ursachen

wurde in der bisherigen Forschung wenig Aufmerksamkeit gewidmet. Bekannte Untersuchungen beschäftigen sich lediglich mit der lateralen Position (Versatz des Fahrzeugs zur Fahrstreifenmitte) auf Landstraßen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Einflussfaktoren (z. B. Markierung oder Verkehr) (Seydel 1969, Knoflacher 1976, Leutzbach et al. 1976, Leutzbach et al. 1981); bezogen auf das Fahrverhalten innerhalb von AID auf BAB in Abhängigkeit bestimmter weißer und gelber Markierung liegen bislang keine Erkenntnisse vor.

Mit dieser Arbeit soll herausgefunden werden, ob unterschiedliche Markierungskonstellationen innerhalb von AID auf BAB das Fahrverhalten beeinflussen. Hierzu soll neben dem Fahrverhalten auch die Wahrnehmung der Markierung analysiert werden. Da für diese Fragestellung noch keine Erkenntnisse vorliegen, ist zunächst eine geeignete Methode zu entwickeln, mit der das Fahrverhalten und die Wahrnehmung bei unterschiedlicher Markierungskonstellationen in AID erfasst und untersucht werden können. Es soll die zentrale Frage beantwortet werden:

Wie verhält sich die subjektive Wahrnehmung und das objektiven Fahr- und Blickverhalten innerhalb von AID in Abhängigkeit von der Markierungskonstellation?

## **1.3 Methodischer Aufbau der Untersuchung**

Diese zentrale Forschungsfrage wird mit einem mehrstufigen, multimethodischen Versuchskonzept bearbeitet (vgl. Abbildung 1.1). Phase 1 dient einer ersten Abgrenzung der Fragestellung und des weiteren Untersuchungsrahmens: In einer Online-Befragung sind systematisch aufbereitete Konstellationen von gelber und weißer Markierung (Skizzen) von den Teilnehmern subjektiv zu bewerten. Zusätzlich wird das Wissen über Verkehrsregeln bezüglich Markierung allgemein sowie innerhalb von AID abgefragt (vgl. Kapitel 3.2).

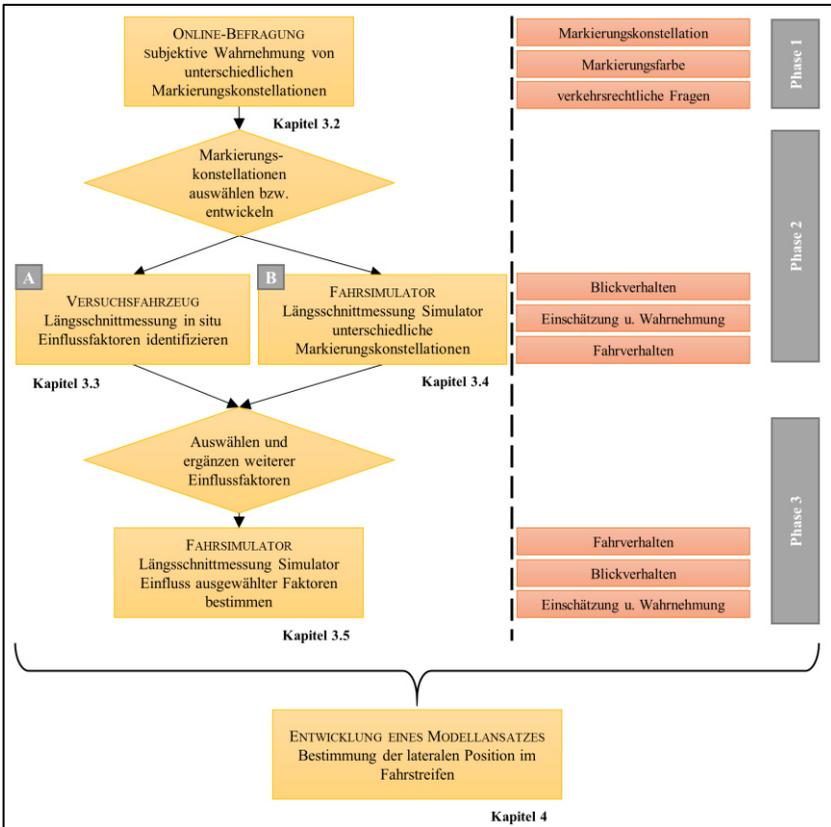


Abbildung 1.1: Methodischer Aufbau der Untersuchung

Die in der Befragung als besonders irritierend sowie die als nicht irritierend bewerteten Markierungskonstellationen werden weiter betrachtet. In Phase 2 werden diese Markierungskonstellationen mit einem Versuchsfahrzeug (vgl. Kapitel 3.3) und im Fahrsimulator (vgl. Kapitel 3.4) entlang eines Streckenabschnitts (Längsschnittmessung) weitergehend untersucht. Ziel der kombinierten Erhebung (Fahrsimulator und Versuchsfahrzeug in situ) ist zum einen, unter realen Bedingungen mit dem Versuchsfahrzeug mögliche Einflussfaktoren bezogen auf Wahrnehmung und Fahrverhalten zu identifizieren. Zum anderen werden im Simulator die Randbedingungen kontrolliert und

bewusst beschränkt, um den Einfluss der Markierung möglichst isoliert erheben zu können.

In Phase 3 (vgl. Kapitel 3.5) wird der Verkehr als weiterer Einflussfaktor in der Simulation ergänzt: Wie in Phase 2B werden auch in Phase 3 unterschiedliche AID mit verschiedenen Markierungskonstellationen und jetzt zusätzlich mit differenzierten Verkehrszuständen (mit Verkehr und ohne Verkehr) simuliert. Hierbei werden das Fahr- und Blickverhalten, sowie eine Einschätzung der Wahrnehmung der Probanden erhoben und analysiert.

Basierend auf den ersten Erkenntnissen dieser dreistufigen Untersuchungsmethode zur Wahrnehmung und zum Fahrverhalten in Abhängigkeit von unterschiedlichen Markierungskonstellationen wird ein Modellansatz für die Bestimmung der lateralen Position eines Fahrzeugs im Fahrstreifen bezogen auf die unterschiedliche Einrichtung von AID auf BAB entwickelt (vgl. Kapitel 4).



# 2 Stand von Wissenschaft & Technik

## 2.1 Wahrnehmung

### 2.1.1 Grundlagen

Täglich strömen Unmengen physikalischer Reize auf den Menschen ein, wovon die Sinnesorgane nur einen Bruchteil verarbeiten können. Der vom Seh-, Gehör-, Geschmacks-, Geruchs-, Tast-, Temperatur- und Schmerzsinne aufgenommene Reiz löst eine subjektive Empfindung aus, deren Intensität und Stärke vom jeweiligen Sinnesorgan abhängt. Jedes Sinnesorgan besitzt eine **Reizschwelle**, welche der Reiz aus der Umgebung überschreiten muss, um registriert zu werden. Das menschliche Auge als Beispiel kann Licht im Bereich von 400 bis 700 nm verarbeiten. Den „kleinsten, eben noch merklichen Unterschied zwischen zwei Reizen, die mit dem gleichen Sinnesorgan wahrgenommen werden“ wird von MIETZEL (1996) als **Unterschiedsschwelle** bezeichnet (Mietzel 1996). Sie kann für alle Sinnesorgane bestimmt werden.

Neben der Reizschwelle benötigen Sinnesorgane auch Zeit, um sich an veränderte Gegebenheiten anzupassen (**Gewöhnungszeit**) (Mietzel 1996). Manche Sinne haben sehr kurze Gewöhnungszeiten (z. B. Sehen oder Fühlen), wohingegen andere deutlich längere haben (z. B. Schmerzempfinden). Um die Adaptionszeit der Augen zu verkürzen bzw. zu unterstützen, werden Straßentunnel am Beginn und Ende heller beleuchtet. Den gleichen Hintergrund hat die Vorschrift, das Abblendlicht zu verwenden, um entgegenkommende Fahrzeuge nicht zu blenden und die Sinnesorgane des Fahrers zu stören. Sinn und Zweck ist eine höhere Leistungsfähigkeit der Sinnesorgane und somit ein sicherer Straßenverkehr. (Mietzel 1996)

STEIGERWALD (1991) beschreibt die **Wahrnehmung** als „[einen] psychophysiologischen Prozess. Sie entsteht nicht in den Sinnesorganen, sondern im Hirn“ (Steigerwald 1991). Das Auslösen einer Empfindung durch Reize aus

der Umwelt ist noch keine Wahrnehmung. Erst wenn das Gehirn diese Empfindung auf Grundlage bisheriger Erfahrungen verarbeitet und bewertet, spricht man von Wahrnehmung. So sind Farben eine subjektive Wahrnehmung, die auf der Interpretation unterschiedlicher Wellenlängen des Lichts in unserem Gehirn beruht. Wird ein aufgenommener Reiz kognitiv verarbeitet und anschließend mit vorhandenem Wissen verknüpft, so spricht man von **Erkennen**. HOBMAIR (2003) definiert das Erkennen mit dem „Erfassen eines Reizes in seiner Bedeutung“. (Steigerwald 1991, Hobmair 2003)

MIETZEL (1996) bezeichnet die Wahrnehmung als einen Prozess, der Informationen mit Hilfe der Sinnesorgane auswählt, ordnet und interpretiert. Um einzelne, wahrgenommene Reize zu Formen zusammenzufügen, müssen die von den Sinnesorganen ausgewählten Reize in sinnvolle Einheiten geordnet werden. Beim Lesen beispielsweise ordnen sich Einzelreize zu Buchstaben und Sätzen. Innerhalb des Wahrnehmungsfeldes werden die sinnvollen Form-Einheiten nach dem Prinzip der **Figur-Grund-Beziehung** geordnet. Beispielsweise hebt sich ein Buch optisch immer vom Schreibtisch oder helle von dunklen Flächen eines Bildes ab. Genauso hebt sich im Straßenumfeld die weiße Markierung von der dunklen Straßenoberfläche ab. Akustisch fällt es nicht schwer, den Gesang vom Orchester zu trennen und diese dennoch als ein zusammengehöriges Muster wahrzunehmen. (Mietzel 1996)

Die physikalische Welt sowie deren Veränderungen werden nicht naturgetreu durch die Sinneseindrücke abgebildet (Mietzel 1996). Auch HOBMAIR (2003) bestätigt, dass Menschen nicht auf die objektive Realität reagieren, sondern auf die subjektive Abbildung in ihrem Gehirn (Hobmair 2003). Das menschliche Verhalten ist somit abhängig vom subjektiven Erleben der jeweiligen Situationen, die durch physikalische Ereignisse (Reize) ausgelöst werden. Die Persönlichkeit jedes Einzelnen beeinflusst die Wahrnehmung sowie das Erleben einer Situation. Eine Generalisierung ist nicht möglich. (Hobmair 2003)

Zwei grundlegende Informationsverarbeitungen werden unterschieden: Gewinnung von Information aus sensorischem Input der Umwelt und die durch Vorwissen oder Erfahrung gesteuerte Informationsaufnahme. Der Ton einer Sirene, der plötzlich laut und unüberhörbar erklingt, wird reizgesteuert im Gehirn verarbeitet (**Bottom-Up**). Bei der **Top-Down**-Verarbeitung hingegen

wird durch Vorwissen, Motivation oder Erwartung die Informationsaufnahme angestoßen. Dinge, die unbekannt oder unerwartet sind, können nicht Top-Down verarbeitet werden. (Zimbardo et al. 2008; Mietzel 1996)

Plötzlich auftauchende Gegenstände oder Hindernisse im Straßenraum, wie beispielsweise ein Reh (vgl. Abbildung 2.1), werden aufgrund des Reizimpulses kognitiv aufgenommen (Bottom-Up). Die Information wird nicht aufgrund von Erfahrung oder Vorwissen verarbeitet, sondern aufgrund des unerwarteten Auftretens. Im Nahbereich einer rechts vor links geregelten Einmündung wird der erfahrene Fahrzeugführer seinen Blick aufgrund von Ausbildung, Vorwissen und Erfahrung nach rechts wenden. Die Informationsaufnahme erfolgt ausgehend vom Gehirn Top-Down.

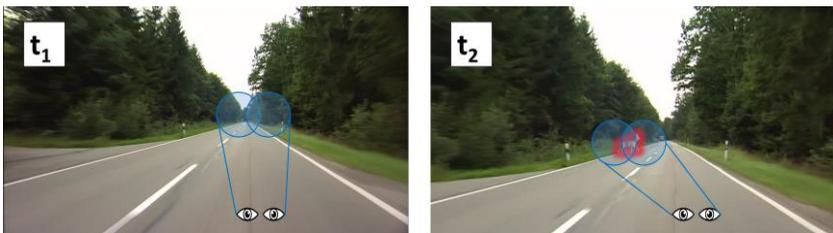


Abbildung 2.1: Bottom-Up Informationsverarbeitung *hier*: Plötzlich auftauchendes Wild auf der Fahrbahn

## 2.1.2 Relevanz im Straßenverkehr

Während der Fahrt kommt den menschlichen Sinnesorganen unterschiedlich viel Bedeutung zu. Die meisten Informationen und Reize aus der Umgebung werden beim Fahren visuell wahrgenommen. Nach Angaben in der Literatur bestimmt der Anteil der visuellen Wahrnehmung mindestens 90 bzw. 99 % des Gesamteindrucks der Umgebung (Rockwell 1971, Kayser et al. 1989). Weitere Informationen aus der Umgebung werden akustisch mit den Ohren, vestibulär mit dem Gleichgewichtssinn oder haptisch bzw. taktil mit den Händen wahrgenommen.

Die eigene Bewegung wird nach BERGER (1996) über die Sinnesorgane Auge, Ohr, Gleichgewicht und Mechanosomatik wahrgenommen. Unter Mechanosomatik versteht man die haptische (aktives Ertasten) und taktile (passives Wahrnehmen mechanischer Impulse z. B. Oberflächensensibilität) Wahrnehmung. Fremde Bewegung, z. B. vorbeifahrende Fahrzeuge, hört und sieht der sich in Ruhe befindende Betrachter. Lediglich die Augen nehmen Relativbewegung zur eigenen Bewegung wahr. (Berger 1996)

TOMASKE UND FORTMÜLLER (2001) ordnen die unterschiedlichen Informationen des Straßenverkehrs den Sinneskanälen zu, die diese aufnehmen (vgl. Tabelle 2.1). Das Auge ist in der Lage, beinahe jede der aufgeführten Informationen wahrzunehmen. Lediglich die eigene Beschleunigung und Geräusche können nicht mit den Augen detektiert werden. Die Giergeschwindigkeit bzw. -beschleunigung beschreibt die Geschwindigkeit bzw. Beschleunigung der Rotation um die eigene Achse. Der Neigungswinkel des Fahrzeugs, um die Längsachse wird mit dem Begriff Nicken beschrieben, um die Querachse mit Wanken. Mit Kräften in den Stellgliedern wird beispielsweise der Widerstand des Lenkrades beim Einschlagen beschrieben. (Tomaske & Fortmüller 2001)

Tabelle 2.1: Zuordnung der Information im Straßenverkehr zur Art der Wahrnehmung (Tomaske & Fortmüller 2001)

Informationen	Wahrnehmung			
	visuell	ves- tibulär	haptisch & taktil	akus- tisch
Spurabweichung	X			
Quer- / Giergeschwindigkeit	X			
Fahrgeschwindigkeit	X			X
Quer- / Längsbeschleunigung		X	X	
Gierbeschleunigung		X		
Neigungswinkel (Nicken, Wanken)	X	X		
Lenkwinkel	X			
Lenkmoment			X	
Winkel Fahrzeuglängsachse (Sollkurs)	X			
Kräfte in Stellgliedern			X	
Fahrgeräusche				X

Der Fahrzeugführer muss zum sicheren Führen seines Fahrzeugs die Umgebung möglichst schnell und vollständig wahrnehmen. Durch einen kontinuierlichen Informationsstrom hält er diesen Zustand stets aktuell. Die Wahrnehmung bildet die Grundlage für die bewusste Entscheidung kommender Handlungen. (Cohen 1987)

Kognitive und motorische Ressourcen begrenzen die Informationsverarbeitung der Fahrzeugführer. Mit steigender Komplexität der Fahraufgabe ist der Fahrzeugführer nicht mehr in der Lage, alle Informationen aufzunehmen und es wird unter den vorhandenen Informationen ausgewählt. Bei Aufgaben mit geringer Komplexität (z. B. Autobahnfahrt) kann der Fahrzeugführer einem Gespräch mit dem Beifahrer gut folgen. Wird die Situation zunehmend komplexer (z. B. innerstädtischer Verkehr) wird das Gespräch reduziert oder eventuell sogar ganz eingestellt. Um verkehrsrelevante Informationen zu vermitteln, empfehlen SCHLAG ET AL. (2002) den Verkehrsplanern, neben dem visuellen Sinnesorgan auch weitere Sinne verstärkt und gezielt zu nutzen. Die übermittelte Information soll der gewünschten Aufmerksamkeitszuwendung angepasst und abgestuft nach der Relevanz vermittelt werden. (Schlag et al. 2002)

Wie von SCHLAG ET AL. (2002) empfohlen, wird in der barrierefreien Straßenraumplanung das „2-Sinne-Prinzip“ angewendet, um mobilitätseingeschränkten Personen die nötigen Informationen über mindestens zwei der drei wichtigsten Sinneskanäle Sehen, Hören und Fühlen zu übertragen (H BVA, 2011). Mit profilierter Markierung oder sogenannte Rüttelstreifen (beispielsweise auf BAB zwischen Fahrbahn und Seitenstreifen) wird der Fahrzeugführer zusätzlich zur visuellen auch mit akustischer Information versorgt. Je mehr Sinne angesprochen werden, desto effektiver ist die Informationsverarbeitung. Der Spurhalteassistent im Fahrzeug z. B. gibt zusätzlich zur visuellen Wahrnehmung beim Überfahren der Markierung eine taktile Rückmeldung an den Fahrzeugführer durch das Vibrieren des Lenkrades.

### 2.1.3 Informationsaufnahme im Straßenverkehr

Nicht alle der auf den Menschen einströmenden Informationen können verarbeitet werden. Die Informationsübertragung zwischen Umgebung und Fahrzeugführer beschreibt DURTH (1974) in einem vereinfachten Informationsflussmodell (Abbildung 2.2). Aus wahrnehmungspsychologischen Fachbeiträgen folgert DURTH (1974), dass auf den Fahrzeugführer  $10^{11}$  bit/sec Informationen einströmen. Unterbewusst werden davon  $3 \cdot 10^6$  bit/sec und bewusst 16 bit/sec verarbeitet. Wie bereits zuvor beschrieben, nehmen Verkehrsteilnehmer aufgrund persönlicher Erfahrungen und Empfindungen das Umfeld unterschiedlich wahr. Die Entscheidung, welche Information kognitiv verarbeitet wird, ist subjektiv. Folglich kann sich das Verhalten von Fahrzeugführern in einer identischen Situation unterscheiden. (Durth 1974)

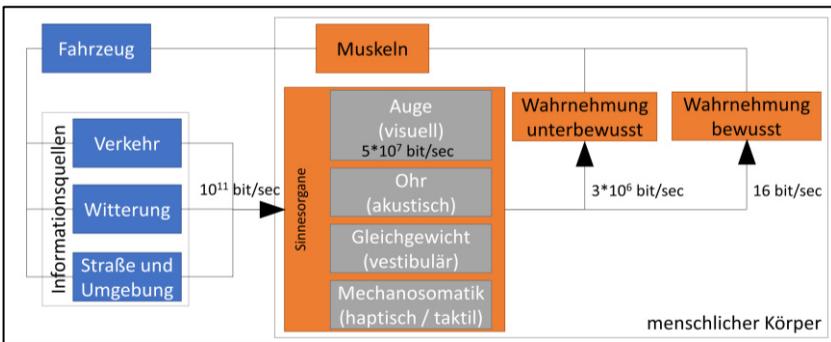


Abbildung 2.2: Kapazität der menschlichen Wahrnehmung (Durth 1974)

Die Aufnahmefähigkeit unseres Kurzzeitgedächtnisses ist beschränkt. Darüber ist man sich im Fachbereich Gedächtnisphilosophie einig (Durth 1974, Baddeley 2003, Saaty & Ozdemir 2003, Farrington 2011). Untersuchungen wie beispielhaft MILLER (1955) oder SAATY UND OZDEMIR (2003) zeigen, dass sieben plus minus zwei Informationseinheiten im Kurzzeitgedächtnis aufgenommen werden können (Miller 1955, Saaty & Ozdemir 2003). Die Zahl der aufnehmbaren Informationseinheiten wurde unter Laborbedingungen mit motivierten Versuchspersonen (VP) ermittelt. Unter Realbedingungen können unter anderem Müdigkeit, Motivation, Stimmung, Erfahrung und Expertise, Drogen wie

z. B. Alkohol die Informationsaufnahme beeinträchtigen. Weitere Untersuchungen geben an, dass lediglich drei bis vier Informationseinheiten aufgenommen werden können (Cowan 1998, Luck & Vogel 1998). Die volle Aufnahmefähigkeit des Kurzzeitgedächtnisses, unabhängig ob sieben oder vier Informationseinheiten, ist in der Realität nicht zu jedem Zeitpunkt für alle Fahrzeugführer im Straßenverkehr gegeben. Kognitive Überlastung kann den Lernprozess behindern, wodurch Fehler entstehen können und die Problemlösungsfähigkeit geschwächt wird (Sweller 1988).

## **2.2 Visuelle Wahrnehmung**

### **2.2.1 Das menschliche Auge**

Die wesentlichen Bestandteile des Auges sind in Abbildung 2.3 dargestellt. Die auf das Auge auftreffenden elektromagnetischen Wellen (Lichtstrahlen) werden durch die Schutzschicht (Hornhaut) in das Auge geleitet. Die Pupille stellt das Abbild der Umgebung mit Hilfe der Linse scharf und dreht es um  $180^\circ$ . Das gedrehte Abbild wird auf die an der Netzhaut befindlichen Rezeptoren projiziert. Die Rezeptoren (Zapfen und Stäbchen) verarbeiten die auftreffenden elektromagnetischen Wellen im Bereich von 380 bis 760 nm. Abhängig von der Wellenlänge werden unterschiedliche Farben und Intensitäten wahrgenommen. Radarwellen ( $10^7$  nm = 1 cm) oder Röntgenstrahlungen ( $0,1$  nm =  $10^{-8}$  cm) als Beispiel liegen außerhalb des wahrnehmbaren Bereichs. (Mietzel 1996)

Die für das Farbsehen verantwortlichen Zellen auf der Netzhaut sind die Zapfen. Sie befinden sich hauptsächlich im mittleren Bereich der Netzhaut. Neben den Zapfen gibt es noch Stäbchen, die hauptsächlich für das Sehen bei schlechten Lichtverhältnissen (z. B. Dämmerung und Nacht) verantwortlich sind. Die von den Zapfen und Stäbchen aufgenommenen Impulse werden an das Gehirn gesendet, welches die Information dann interpretiert und somit die Wahrnehmung steuert. (Mietzel 1996, Silverthorn et al. 2009, Zimbardo et al. 2008)

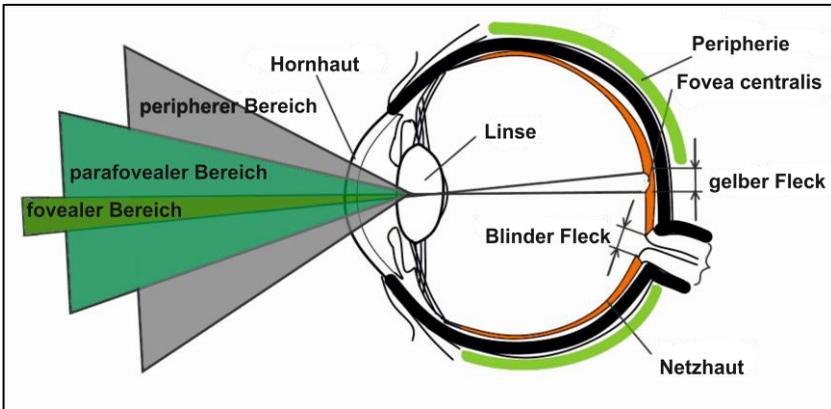


Abbildung 2.3: Aufbau des Auges mit unterschiedlichen Sichtbereichen (Spektrum Akademischer Verlag 1998)

Durch die unterschiedlich verteilten Zapfen und Stäbchen auf der Netzhaut entstehen unterschiedliche Bereiche des Sehens: das **foveale**, **parafoveale** und **periphere** Sehen (vgl. Abbildung 2.3). Der Bereich des fovealen Sehens (scharfes Sehen, Fovea Centralis, gelber Fleck) befindet sich im Schnittpunkt der zentralen Sehachse mit der Netzhaut. In diesem Bereich erfolgt die präzise und schnelle Informationsaufnahme. Im Bereich von  $2^\circ$  um die zentrale Sehachse sorgt eine große Anhäufung von Zapfen für ein scharfes Abbild der Umgebung auf der Netzhaut. In einer Entfernung von 100 m entspricht das einem Kreis von ca. 3,5 m Durchmesser. Außerhalb des fovealen Bereichs befindet sich der parafoveale Bereich (ca. 2 bis  $20^\circ$ ), in dem noch relativ scharf gesehen werden kann (Wierda & Aasman 1992). Außerhalb des parafovealen Bereichs befindet sich der periphere Bereich, der sich bis zur Grenze des Sichtfeldes ausdehnt. Im parafovealen und peripheren Bereich können lediglich Helligkeitsunterschiede und Bewegungen wahrgenommen werden. Dort, wo der Sehnerv auf die Netzhaut trifft, entsteht ein blinder Fleck, da sich hier weder Zapfen noch Stäbchen befinden. Die fehlende Information des blinden Flecks wird vom Gehirn kognitiv ergänzt. (Zimbardo et al. 2008)

Den Unterschied zwischen dem fovealen und peripheren Sehen beschreibt SCHLAG ET AL. (2002) mit der Informationsaufnahme. Das **foveale Sehen**

braucht eine aktive Zuwendung (Aufmerksamkeit) und stellt relativ zum peripheren Sehen einen langen Prozess dar. Mitlaufende Randinformationen können über den deutlich größeren Bereich des **peripheren Sehens** erfasst werden. Für das bewusste Erkennen ist eine zentrale Zuwendung nötig. Lokalisierungsprozesse sind somit kürzer als Identifikationsprozesse. (Schlag et al. 2002)

## 2.2.2 Informationsaufnahme der Augen

Durch die Bewegung der Augen und des Kopfes nimmt der Mensch visuell Informationen aus der Umgebung auf. Während des relativen Stillstands der Augen (**Fixation**) werden die aufgenommenen Impulse kognitiv verarbeitet: Es findet eine Informationsaufnahme statt. Im Bereich des peripheren Sehens wird während einer Fixation bereits das nächste Ziel identifiziert. Durch schnelle Bewegungen der Augen (**Saccaden**) wird der Bereich des fovealen Sehens auf das zuvor identifizierte Ziel gerichtet. Während der Saccaden ist das Sehvermögen signifikant geschwächt und es erfolgt keine weitere Stimulation der Augen. (Volkman 1962, Cohen 1985)

Um Informationen aufnehmen zu können, müssen die Fixationen eine gewisse Zeit andauern (Grüsser & Grüsser-Cornehls 2000, Underwood et al. 2002). Bei Fixationen kürzer als 100 ms ist keine Informationsverarbeitung möglich, da die Dauer für eine kognitive Verarbeitung zu gering ist. Nach Untersuchungen von SCHWEIGERT (2003) liegen die mittleren Fixationsdauern im Straßenverkehr bei 300 bis 400 ms. Die Fixation von Verkehrszeichen gibt SCHWEIGERT (2003) im Mittel mit 500 ms an, für die Fahrbahn ca. 580 ms. Die Saccaden, als zielgenaue Ausrichtung der Augen, dauern durchschnittlich zwischen 10 und 80 ms. (Schweigert 2003)

Der Bereich, der ohne Bewegung des Kopfes bei stillstehenden Augen sowohl peripher als auch foveal erfasst werden kann, wird als Sichtfeld oder **Gesichtsfeld** bezeichnet. Man differenziert zwischen monokularem Gesichtsfeld (ein Auge) und binokularem Gesichtsfeld (beide Augen). In Abbildung 2.4 ist das monokulare Gesichtsfeld des linken Auges mit den unterschiedlichen Farbwahrnehmungsgrenzen dargestellt. Das **nutzbare Sehfeld** definiert den Bereich des Sichtfeldes, aus dem der Hauptteil der Information aufgenommen

und kognitiv verarbeitet wird (Sanders 1970, Ball & Owsley 1993). Das **Blickfeld** entspricht dem Bereich, der mit bewegten Augen und fixiertem Kopf erfasst werden kann. Das Blickfeld ist gegenüber dem Gesichtsfeld um ca. 60° nach rechts und links sowie um 40° nach oben und unten erweitert. Bewegt man zusätzlich noch Kopf und Körper spricht man vom **Umblickfeld**. (Grüsser & Grüsser-Cornehls 1985, Birbaumer & Schmidt 2010)

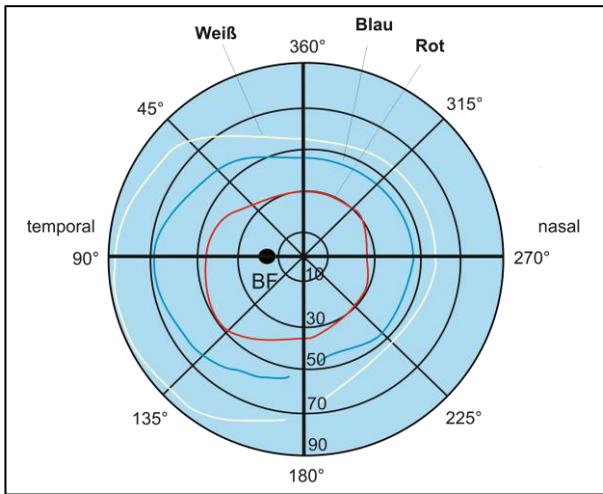


Abbildung 2.4: Monokulares Gesichtsfeld des linken Auges mit Grenzen der Farbwahrnehmung (Birbaumer & Schmidt 2010)

Das dreidimensionale Sehen wird durch das Zusammenspiel beider Augen ermöglicht. Überlagert man die beiden Sehachsen, so entsteht zum einen ein größeres Gesichtsfeld und Blickfeld und zum anderen können Entfernungen wahrgenommen werden. Der Konvergenzwinkel (Winkel, den die beiden Sehachsen miteinander bilden) wird vom Gehirn identifiziert und dadurch die Entfernung des fixierten Punktes ermittelt. Mit zunehmender Entfernung nähern sich die Sehachsen an (der Konvergenzwinkel wird spitzer). Ab einem Abstand von 6 m sehen wir praktisch monokular; die Sehachsen verlaufen nahezu parallel. Um auch in größerer Entfernung Abstände angeben zu können, nimmt das Gehirn Informationen von bekannten Gegenständen als Relation hinzu. (Birbaumer & Schmidt 2010)

### 2.2.3 Verarbeitung von Information im Gehirn

Grundlegende Voraussetzung für den Wahrnehmungsprozess ist, dass die Sinnesorgane die physikalischen Reize aus der Umwelt aufnehmen. Die physikalischen Reize werden in den Rezeptoren in Zellsignale umgewandelt. Aufgrund beschränkter Aufnahmekapazitäten der Rezeptoren können nicht alle Informationen der Umwelt verarbeitet werden (vgl. Kapitel 2.1); es erfolgt eine Selektion. Die selektierten Reize werden über die Nerven an die spezifischen Areale des Gehirns weitergeleitet (visueller Cortex), in denen diese verarbeitet werden. Basierend auf Erfahrungen, Emotionen und Einstellungen werden die weitergeleiteten Reize als Information identifiziert und somit wahrgenommen. (Zimbardo et al. 2008)

Das Gehirn blendet manche Reize aus, „... um nicht von Informationen überschwemmt zu werden“ (Silverthorn et al. 2009). Wenn die ausgeblendeten Reize plötzlich wichtig werden, können diese durch bewusstes Fokussieren wieder in den Vordergrund gerückt werden. Das Gehirn versucht dann, das eben Erlebte aus dem Unterbewusstsein abzurufen, um darauf zu reagieren. (Silverthorn et al. 2009)

Mit Hilfe von **Eye-Tracking-Systemen** werden Aussagen zur visuellen Wahrnehmung getroffen. Ein Eye-Tracking-System zeichnet die Bewegung der Pupillen auf und lässt in der Überlagerung mit dem Bild der Umgebung eine Analyse der fixierten Objekte zu. Es können nur Objekte, die eine bestimmte Zeit fixiert werden, kognitiv verarbeitet werden. Zu kurze oder zu lange Fixationen führen dazu, dass das fixierte Objekt, wenn auch durch die Augen erfasst, kognitiv nicht wahrgenommen wird. Eine hundertprozentige Aussage darüber, was wahrgenommen wird, ist allein aufgrund des Eye-Trackings nicht möglich. Um exaktere Aussagen zu treffen, ist es erforderlich, die Gehirnströme aufzuzeichnen. Das erfordert ein deutlich umfangreicheres Versuchsdesign.

COHEN (1977) untersuchte 1977 die Diskrepanz zwischen dem objektiven und subjektiven Erleben der Umgebung. In einer Studie sollten VP ein Bild so lange betrachten, bis sie es ihrer Meinung nach vollständig erfasst haben. Die Auswertung der Fixationspunkte der VP hat ergeben, dass nicht das ganze Bild fixiert wurde, sondern lediglich einzelne Stellen. Die fixierten Stellen waren

zwar ähnlich, allerdings nicht identisch. Die subjektive Wahrnehmung weicht also von der objektiven Erscheinung ab bzw. erfasst die objektive Erscheinung nicht vollständig. (Cohen 1977)

Die Aufmerksamkeit bestimmt, welche Objekte zur weiteren Verarbeitung ausgewählt werden. Einige Daten der Sinnesorgane geraten in den sogenannten Brennpunkt, wodurch andere in den Hintergrund rücken. Abhängig davon, wie stark die Aufmerksamkeit auf den Brennpunkt gerichtet wird, finden die Ereignisse im Hintergrund mehr oder weniger Beachtung. (Mietzel 1996)

HILLSTROM UND YANTIS (1994) geben an, dass Bewegung selbst noch keine Aufmerksamkeit auf sich zieht, wohingegen das Erscheinen von neuen Objekten im Zielbereich aufmerksamkeitserregend ist. Plötzlich auftauchende Gegenstände im Straßenraum sind aufmerksamkeitserregend, wohingegen kontinuierlich vorhanden Objekte, wie Markierung oder Schutzeinrichtung, eher weniger interessant sind, auch wenn sich diese aufgrund der einen Fortbewegung im Blickfeld nicht konstant an einer Stelle befinden. (Hillstrom & Yantis 1994)

YANTIS UND JONIDES (1996) bestätigen, dass die Aufmerksamkeit automatisch auf Objekte gelenkt wird, die neu in der Umgebung auftauchen. Neue Objekte erregen Aufmerksamkeit ohne dass sich die Leuchtdichte (Flächenhelligkeit) verändert. Ändert sich die Leuchtdichte ohne dass ein neues Objekt erscheint, erregt dies keine Aufmerksamkeit. (Yantis 1993, Yantis & Jonides 1996)

Objekte werden länger, öfter und früher fixiert, wenn diese anhand von Erfahrungen und Wissen nicht erwartet werden (Bottom-Up). Der Informationsgewinn eines unerwarteten Objekts ist in einem nach eigenen Erfahrungen bewerteten falschen Kontext deutlich höher (Loftus & Mackworth 1978). ZIMBARDO ET AL. (2008) bestätigt die Ergebnisse von LOFTUS UND MACKWORTH (1978). Die Zeit zur Identifikation von Objekten wird deutlich größer, wenn Objekte in einem Kontext auftreten, in denen man diese nicht erwartet. (Zimbardo et al. 2008)

Das gezielte Lenken der Aufmerksamkeit auf eine Situation oder eine Information erfolgt nach dem Top-Down Prinzip. Basierend auf Emotionen, Erfahrungen und Wissen wird der Prozess der Aufmerksamkeit vom Gehirn aktiv beeinflusst. (Mietzel 1996)

## 2.2.4 Parameter des Blickverhaltens

In der Forschung wird das Eye-Tracking sehr häufig eingesetzt, um Wahrnehmung und Gehirntätigkeit zu erfassen. Es gibt zwei unterschiedliche Eye-Tracking Systeme: Zum einen das head mounted System, das am Kopf des Probanden fixiert wird und somit die Augen des Probanden unabhängig von den Kopfbewegungen aufnimmt. Zum anderen das remote mounted Eye-Tracking System, welches stationär aufgebaut ist und die Blickbewegungen des Probanden innerhalb der Reichweite der Kameras aufzeichnet.

Für die Auswertung werden die Daten des linken Auges verwendet. Das linke Auge ist mit der linken Gehirnhälfte verbunden und koordiniert die rechte Körperhälfte. Da der Großteil der Bevölkerung rechtshändig ist, ist das linke Auge das repräsentativere. Zur Beschreibung des Blickverhaltens werden Parameter gewählt, die einerseits das Suchverhalten und andererseits die Informationsverarbeitung beschreiben. Die relevanten Parameter sind im Folgenden dargestellt:

### Index der räumlichen Dichte (Spatial density index)

Ein Maß für die Anzahl der verschiedenen angeblickten Punkte liefert der **Index der räumlichen Dichte** oder auch **Feldindex** genannt. Der visuell sichtbare Bereich wird in Raster von z. B. 10 x 10 mm unterteilt. Ausgewertet werden dann die Anzahl der Segmente, die mindestens eine Fixation enthalten, in Bezug zur Gesamtanzahl der Gittersegmente in einem definierten Zeitintervall (vgl. Formel 2.1).

$$Feldindex = \frac{\text{Anzahl der Segmente mit mind. einer Fixation}}{\text{Gesamtanzahl der Gittersegmente}} \quad \text{Formel 2.1}$$

Ein kleiner Wert für den Feldindex steht für eine gerichtete Suche: der Proband identifiziert sein Zielobjekt sofort und betrachtet lediglich einen kleinen Bereich des tatsächlich sichtbaren Feldes. Je kleiner der Feldindex ist, desto kleiner ist der Bereich der Aufmerksamkeit des Probanden. Der Feldindex gibt keine Auskunft über das Suchverhalten. (Hristov 2009)

### Scanpfadlänge

Das Suchverhalten der Probanden kann mit der Scanpfadlänge bewertet werden. Die Scanpfadlänge ist ebenfalls ein räumliches Maß und definiert die optimale Suche durch Verkleinerung der Saccadenamplitude, d.h. die Strecke die während der Saccaden von den Augen zurückgelegt wird reduziert. Es wird die Summe der Abstände zwischen den Fixationspunkten innerhalb eines definierten Zeitintervalls betrachtet.

$$\text{Scanpfadlänge} = \sum \text{Abstand zwischen Fixationspunkten} \quad \text{Formel 2.2}$$

Bei der Auswertung der Scanpfadlänge muss unterschieden werden, ob die Information weit auseinanderliegt und somit lange Scanpfade nötig sind oder ob die Information kompakt an einer Stelle vorhanden ist und kurze Scanpfade ausreichen. Lange Scanpfade deuten bei kompakter Information auf ein ineffizientes oder nicht effizientes Blickverhalten hin. Die Scanpfadlänge differenziert hier nicht zwischen Suchleistung und Informationsverarbeitung. Durch sinnvolle Gruppierung und optisch gute Gestaltung von Computeroberflächen können die Scanpfadlängen verkürzt und die Information besser aufgenommen werden (Goldberg & Kotval 1999). Auch im Straßenverkehr kann die Scanpfadlänge durch zentrale und kompakte Informationsvermittlung verkürzt werden.

### Mittlere Fixationsdauer

Ein Maß der visuellen Verarbeitung ist die durchschnittliche oder mittlere Fixationsdauer. Laut GOLDBERG UND KOTVAL (1999) sind die Fixationsdauern in komplexer und bedeutsamer Umgebung kürzer (Goldberg & Kotval 1999). SHINAR ET AL. (1977) geben an, dass die mittlere Fixationsdauer in Geraden

(0,6 sec) länger ausfällt als in Kurven (0,41 sec) (Shinar et al. 1977). Auch VICTOR (2005) stellt signifikant kleinere mittlere Fixationsdauern in Kurven als in Geraden fest. Allerdings nimmt bei den von VICTOR (2005) durchgeführten Realfahrten auf der BAB die mittlere Fixationsdauer mit dem Schwierigkeitsgrad der Nebenaufgabe zu (Victor 2005). Kürzere Fixationsdauern treten im Straßenverkehr laut SCHWEIGERT (2003) bei komplexeren Situation auf (Schweigert 2003).

### **Verhältnis Fixationen zu Saccaden (fixation/saccade ratio)**

Der Quotient der Fixationsdauer zu Saccadendauer setzt die Zeit, die zur Verarbeitung von Information benötigt wird, zur Zeit der visuellen Suche ins Verhältnis.

$$\text{Verhältnis} = \frac{\Sigma \text{ Dauer aller Fixationen}}{\Sigma \text{ Dauer aller Saccaden}} \quad \text{Formel 2.3}$$

Weist das Verhältnis einen hohen Wert auf, erfolgt eine intensive Verarbeitung und geringe Suchaktivität. Bei kleinen Werten verhält es sich genau umgekehrt.

### **Areas of Interest (AOI)**

Areas of Interest (AOI) sind definierte Bereiche, die für die zugrundeliegende Fragestellung relevant sind. Die Grenzen der AOI werden durch ein Polygon beschrieben, das bei der Auswertung der Eye-Tracking-Daten über den interessanten Bereich gelegt wird. Für die einzelnen AOI werden z. B. die Anzahl der Fixationen oder die mittlere Fixationsdauer bestimmt. Mit Hilfe von Markern, die für die Szenenkamera sichtbar in der Nähe der AOI platziert werden, können AOI automatisiert im Videobild erkannt werden. (Strohmaier 2014)

## **2.2.5 Blickverhalten im Straßenverkehr**

Die Qualität des Fahrverhaltens steht in enger Relation zum Blickfeld des Fahrers. Die Orientierung und Spurhaltung erfolgt, wie mehrere Studien bestätigen, durch das Anvisieren von einem Punkt im Nahbereich des Fahrzeugs und

einem Punkt, der ca. eine Sekunde später passiert wird. (Land & Horwood 1995, Neumann & Deml 2011)

Bereits Anfang der 1970er Jahre untersuchten MOURANT UND ROCKWELL (1970) das Blickverhalten von Fahrzeugführern. Mit zunehmender Vertrautheit und Erfahrung auf einer Strecke wird der betrachtete Bereich kleiner. Der unerfahrene oder fremde Fahrer muss Verkehrszeichen und den Straßenverlauf noch genau erfassen, wohingegen der mit der Strecke vertraute Fahrer seine Erfahrung und sein Vorwissen nutzen kann. (Mourant & Rockwell 1970)

In einer weiteren Untersuchung konnten MOURANT UND ROCKWELL (1972) nachweisen, dass erfahrene Fahrer ihre periphere Wahrnehmungsfähigkeit sehr gut ausgebildet haben und demnach ein Großteil der Wahrnehmung peripher erfolgt. Das periphere Sehvermögen ist nach COHEN (1987) ausreichend, wenn keine detaillierte Informationsaufnahme erfolgen muss und genügend Zeit zur Aufnahme vorhanden ist. Unter Zeitdruck (z. B. plötzlich bremsendes Vorderfahrzeug) muss das zentrale Sehen eingesetzt werden. Fahranfänger benötigen deutlich mehr Aufmerksamkeit, um das Fahrzeug zu kontrollieren und die sich ständig ändernde Umgebung zu erfassen. Sie nehmen den Großteil der Information über das foveale Sehen wahr. Ihr Blickverhalten ist somit durch viele Blicksprünge gekennzeichnet. (Cohen 1987, Mourant & Rockwell 1972)

SUMMALA ET AL. (1996) bestätigen mit ihren Untersuchungen die Ergebnisse von MOURANT UND ROCKWELL (1972), dass bei erfahrenen Fahrzeugführern die Spurhaltung größtenteils mit Hilfe des peripheren Sehens erfolgt. (Summala et al. 1996)

LAPPI ET AL. (2013) analysierten das Blickverhalten von Fahrzeugführern, um ein Modell zum Lenk- und Fahrverhalten aufzustellen. Das flexible Blickverhalten der Fahrzeugführer wird von mehreren Punkten beeinflusst, die sich alle auf das Lenk- und Fahrverhalten auswirken. Zukünftige Untersuchungen sollten daher nicht nur einzelne Punkte wie z. B. Fluchtpunkt oder Tangentialpunkt von Kurven betrachten, sondern vielmehr der Frage nachgehen, warum und wann einzelne Punkte fixiert werden. (Lappi et al. 2013)

## Gerade / Kurve

Durch die Krümmungsänderung stellt das Befahren von Kurven eine komplexere Aufgabe dar als das Befahren von Geraden. Im Bereich von Geraden streut der Blick deutlich mehr als in Kurven (Cohen 1985, Hristov 2009). Der größere Streubereich um den Fluchtpunkt deutet darauf hin, dass auf Geraden mehr nicht-verkehrsrelevante Objekte fixiert werden als im Kurvenbereich. Im Annäherungsbereich von Kurven sowie in der Kurve entfallen ca. 97 % aller Fixationen auf verkehrsrelevante Objekte. Die prozentuale Verteilung der Fixationen auf die verkehrsrelevanten Objekte ist in Abbildung 2.5 dargestellt. (Cohen 1985)

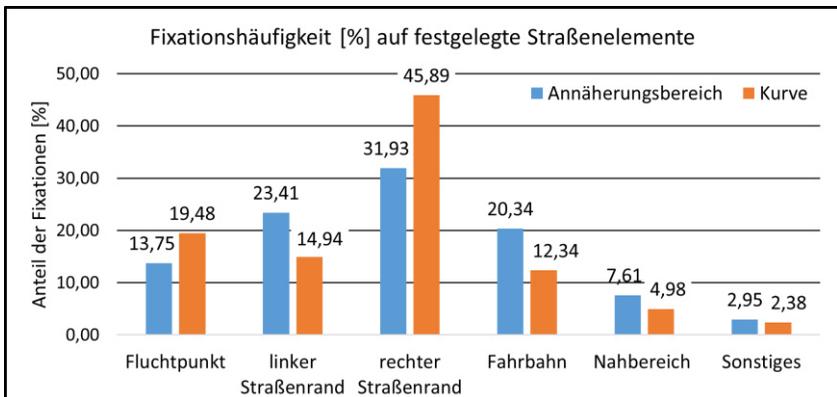


Abbildung 2.5: Anteil der Fixationen auf Straßenelemente in Kurven (Cohen 1985)

Mehrere Forschungen zum Blickverhalten in Kurven haben gezeigt, dass die Fahrzeugführer beim Annähern und Befahren einer Kurve ihren Blick zur Innenseite der Kurve richten (Land & Lee 1994, Kandil et al. 2009, 2010, Lehtonen et al. 2012, Lehtonen et al. 2013). Der Fluchtpunkt der Kurve, auch Tangentenpunkt genannt, stellt einen wichtigen Orientierungspunkt dar. Das Gehirn bevorzugt nach der Aussage von LAND UND LEE (1994) eine „do it where you look“ Strategie, was bedeutet, dass das Fahrzeug in die Richtung des fovealen Sehens gelenkt wird. Somit ist es für das Gehirn am angenehmsten, wenn Blickrichtung und Lenkradwinkel nahezu identisch sind (Land &

Lee 1994). HRISTOV (2009) und COHEN (1985) bestätigen für BAB und Landstraßen, dass sich in Kurven der Blick in der Nähe des optischen Fluchtpunktes konzentriert (Cohen 1985, Hristov 2009).

Für die Spurhaltung und Bahnführung ist bei der Kurvenfahrt auch die Fahrstreifen- und Fahrbahnbegrenzung von großer Bedeutung. Beim Befahren von Kurven wird hauptsächlich die Markierung oder der Fahrbahnrand der Kurveninnenseite fixiert. In Linkskurven wird überwiegend die Mittelmarkierung fixiert, sofern diese auf Landstraßen vorhanden ist. (Dietz 1998, Schulz 2012)

Die Sichtdistanz ist nach COHEN (1987) in Geraden größer als in Kurven. Gegenverkehr kann somit schnell detektiert werden und die Beanspruchung in Form von Reaktionsbereitschaft und Aufmerksamkeit ist eher gering. In Kurven gilt genau das Gegenteil: Reaktionsbereitschaft und Aufmerksamkeit sind hoch, um auf plötzlich auftauchenden Gegenverkehr schnell reagieren zu können. Hinzu kommt, dass die Fahraufgabe in Geraden keine besondere Herausforderung darstellt, Längs- und Querdynamik sind konstant und können beibehalten werden. In Kurven erfolgt stattdessen eine ständige Anpassung an den Radius. (Cohen 1987)

Den genauen Blickablauf und Blickpfad bei Gegenverkehr in Kurven untersuchte SCHULZ (2012). Kommt ein Fahrzeug in der Kurve entgegen, so prüft der Fahrzeugführer seine eigene Position im Fahrstreifen, indem er im Nahbereich auf die Fahrstreifenbegrenzung blickt. Nach Überprüfung der eigenen Position wird die Position des Gegenverkehrs durch eine Fixation geprüft. Die Leitlinie (Mittelmarkierung) stellt eine wichtige Hilfe zur Bestimmung des seitlichen Abstandes zum Gegenverkehr dar. Die Fahrzeugführer blicken bei Gegenverkehr fast ausschließlich im Nahbereich auf die Mittelmarkierung. Die Fixation wird nur von kurzen Fixationen des Gegenverkehrs unterbrochen. (Schulz 2012)

### **Autobahn**

Bei der Fahrt auf der Autobahn ist das Blickverhalten von Fixationen auf Elemente, die nicht zur Straße gehören, geprägt. Die Fahraufgabe ist auf der Au-

tobahn sehr einfach und die Überwachung des Vorfeldes kann durch das periphere Sehen erfolgen. Lenkfehler haben auf der Autobahn nur geringe Folgen, da die Fahrstreifen sehr breit sind und kleinere Fehler keine Auswirkung haben. Mit zunehmender Komplexität des Umfeldes muss das foveale Sehen eingesetzt werden, um die Information aufzunehmen. Bei Sichtweiten unter 350 m konnte HRISTOV (2009) in seiner Untersuchung zum Blickverhalten auf Autobahnen nachweisen, dass die Aufmerksamkeit und Konzentration des Blicks zunimmt. Der Blick beschränkt sich auf einen feststellbar engeren Bereich als bei größeren Sichtweiten. (Cohen 1987, Hristov 2009)

JECHLINGER (2008) gibt an, dass routinierte Fahrzeugführer beim Befahren der Autobahn hauptsächlich ein fernorientiertes Blickverhalten aufweisen. Durch einzelne gezielte Kontrollblicke werden die anderen Fahrzeuge auf den anderen Fahrstreifen beobachtet. Mit zunehmender Anzahl an Fahrzeugen nehmen die Fixationen sowie deren Dauern zu. Gleichzeitig erfolgt die Wahrnehmung nicht mehr peripher, sondern foveal oder parafoveal. Nähert sich der Fahrzeugführer einem Fahrzeug an, so wird dieses lange fixiert, um Geschwindigkeit und Fahrverhalten besser einschätzen zu können. (Jechlinger 2008)

Beim Spurwechsel bewegt der Fahrzeugführer seine Augen deutlich häufiger als bei der Fahrt auf einem Fahrstreifen. Durch die steigende Anzahl an Saccaden und kleinen Fixationsdauern reduziert sich die Zeit der Informationsaufnahme. Um die Entfernung zu den umgebenden Fahrzeugen erfassen zu können, sind zusätzlich lange Blickzuwendungen nötig. Die Aufmerksamkeit ist während des Spurwechsels an wenige Objekte gebunden. Unerwartete Handlungen anderer, die nicht im Fokus stehen, können meist nicht rechtzeitig wahrgenommen werden, woraus nach JECHLINGER (2008) eine erhöhte Unfallgefahr entsteht. (Jechlinger 2008)

## **2.2.6 Wahrnehmung von Markierung**

Der Vorteil von Markierung besteht laut KLEBELSBERG (1982) darin, dass Markierung sowohl im peripheren als auch im zentralen Blickfeld des Fahrers liegt. Als linienhafte Information bedarf Markierung keiner zentralen Zuwen-

„Sie erfordern daher vom Fahrer weniger willkürliche Aufmerksamkeitszuwendung und sind leichter in entsprechende motorische Reaktionen umzusetzen.“ (Klebelberg 1982)

Durch den Einsatz von Markierung können sich die Fahrzeugführer auf das vorausliegende Straßenumfeld konzentrieren und müssen ihren Fokus nicht auf den Nahbereich lenken, um die Aufgabe der Spurhaltung zu erfüllen. Markierung kann, wie COHEN (1987) angibt „das zentrale Sehen von der fokussierten Aufmerksamkeitszuwendung der Fahrzeugstabilisierung entlasten“ (Cohen 1987). DYCKERHOFF (1998) gibt an, dass Autofahrer durch schlechte Markierung und Missachtung von Grenzwerten für Markierung verunsichert und in ihrer Fahrweise beeinflusst werden (Dyckerhoff 1998).

Schlecht sichtbare Markierung auf Autobahnen erhöht die Fixationsentfernungen (45 m) deutlich gegenüber gut sichtbarer Markierung (25 m) (Dietz 1998). Fahrbahnmarkierung wird nach MESEBERG (1995) zur Orientierung im Nahbereich (10 bis 70 m) verwendet. Die Orientierung in der Ferne erfolgt mit Hilfe der Leitpfosten (Meseberg 1995). Da auf Autobahnen lediglich auf der rechten Fahrbahnseite Leitpfosten angebracht sind und diese auch in einiger Entfernung zum eigenen Fahrstreifen stehen, spielen sie auf BAB eine untergeordnete Rolle.

BERGER (1996) zieht Markierung grundsätzlich punktuellen Einzelinformationen (Verkehrszeichen) vor. Günstig ist ebenfalls eine Kombination aus Markierung und vertikalen Verkehrszeichen, die sich in ihrem Informationsgehalt ergänzen. (Berger 1996)

Das in den 90er Jahren übliche Problem der Erkennbarkeit von Markierung unter allen Witterungs- und Beleuchtungsverhältnissen wird heute mit profilierter Markierung kompensiert. Zur Verbesserung der optischen Führung bei Nässe wird der Einsatz von profilierter Markierung von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) empfohlen (FGSV 1990).

DIETZ (1998) nennt neben dem Kontrast auch die Breite und Farbe der Markierung, die für die Führungseigenschaften der Markierung ausschlaggebend sind. Um die Aufmerksamkeit der Fahrzeugführer in Arbeitsstellen zu steigern,

wird unter anderem gelbe Markierungsfarbe eingesetzt, die sich von dauerhaft weißer unterscheidet. BAKABA (2012) untersuchte die Verkehrssicherheit in Arbeitsstellen auf Autobahnen und identifiziert beschädigte, verschmutzte und teilweise gar nicht vorhandene Baustellenmarkierung als Ursache für die Verunsicherung von Verkehrsteilnehmern. Die Gefahr innerhalb der Arbeitsstellen könnte durch eine konsistente Führung deutlich verbessert werden. (Bakaba et al. 2012, Dietz 1998)

Bisher werden Markierungen in Arbeitsstellen retroreflektierend (Typ II Markierung) ausgeführt. Retroreflektierende bedeutet, dass das auftreffende Licht zur Lichtquelle zurückreflektiert wird. BAIER ET AL. (2006) untersuchten vertikale, fluoreszierende Verkehrszeichen in Arbeitsstellen. Fluoreszierender Markierung wird im Rahmen dieser Forschung eine ähnlich positive Wirkung zugeschrieben, allerdings nicht explizit untersucht. Möglicherweise kann eine verbesserte Wahrnehmung mit fluoreszierender Markierung erreicht werden. Die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von fluoreszierender Markierung in AID ist zu prüfen. (Baier et al. 2006)

Auch für Markierung wird empfohlen, mehrere Sinnesorgane anzusprechen. Rüttelmarkierung beispielsweise verbessert die Verkehrssicherheit nach BRÜHNING (1998) enorm. Auf Grundlage einer Unfalluntersuchung können durch profilierte Randmarkierung die Zahlen der Unfallopfer (25 % der Getöteten, 15 % der Schwerverletzten und 10 % der Leichtverletzten) auf BAB reduziert werden (Brühning 1998). Auch LERNER ET AL. (2009) geben an, dass Rüttelstreifen die Anzahl der Unfälle mit Abkommen nach rechts deutlich herabsetzen (43 %) (Lerner et al. 2009).

### **2.2.7 Straßenraumgestaltung und Blickverhalten**

Fahrzeugführer erwarten aufgrund ihrer Erfahrung einen Standard der Straßenraumgestaltung. Wenn aufgrund des Erscheinungsbildes ein anderer Straßenverlauf erwartet wird, als tatsächlich vorhanden ist, kann es zu kritischen Situationen im Straßenverkehr kommen. Der Fahrzeugführer erwartet beispielsweise die Autobahnausfahrt auf der rechten Seite der Fahrbahn und nicht auf der linken. (Helmert 2014)

In den Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA) werden Hinweise zur räumlichen Linienführung und somit dem Erscheinungsbild der Straße gegeben. Die Richtlinien haben das Ziel, den Entwurf und die Gestaltung von Autobahnen zu standardisieren, um eine möglichst selbsterklärende Straße zu erhalten. Beispielsweise wird mit Hilfe von Perspektivbildern aus Fahrerperspektive der Entwurf der Straße überprüft, um mögliche Sichtschatten zu verhindern und eine gute optische Führung zu erreichen. (RAA 2008a)

Laut LIPPOLD ET AL. (2015) können trotz richtliniengerechter Trassierung von BAB Defizite in der räumlichen Linienführung auftreten. Diese sind allerdings nicht sicherheitsrelevant. Einen Zusammenhang zwischen räumlicher Linienführung und Verkehrssicherheit sowie dem Fahrverhalten, wie er auf Landstraßen besteht, konnten LIPPOLD ET AL. auf BAB nicht nachweisen. (Lippold et al. 2015)

Die nach RAA geforderte optische Führung kann auf natürliche Weise mit Hilfe von Büschen, Bäumen, Dämmen oder anderen natürlichen Elementen unterstützt werden. Auch künstliche Elemente, wie z. B. Fahrbahnmarkierung oder Leit- und Schutzeinrichtungen, unterstützen neben ihrer regelnden Funktion die optische Führung (Durth 1974). Einzelne Bundesländer wie z. B. Brandenburg haben zusätzlich Hinweise zur optischen Gestaltung des Straßenraums als Handlungsempfehlungen für die Verbesserung optischer Mängel im Straßenraum entwickelt (HVO 2002).

BERGER (1996) empfiehlt, das Verhalten der Verkehrsteilnehmer durch einen auf die Leistungsfähigkeit abgestimmten Straßenentwurf in die richtige Richtung zu lenken. Statische Objekte, wie Markierung, Verkehrszeichen oder auch der Fahrbahnverlauf, stellen einen bedeutenden Teil der Information im Straßenraum dar. Sinnhafte statische Informationen werden akzeptiert, wohingegen die Einhaltung nicht sinnvoller und nicht überzeugender Informationen durch Überwachungen und Sanktionen erzwungen werden müssen. Durch eine eindeutige und sinnvolle Gestaltung des Straßenraums können Verkehrszeichen und Überwachungsaufwand eingespart werden. (Berger 1996)

Der Fahrzeugführer wählt seine Geschwindigkeit so, dass er die für sich optimale Dichte an Informationen erhält. Je monotoner die Strecke und je weiter

der Fahrzeugführer blicken kann, desto höher ist seine gewählte Geschwindigkeit. Er fährt so schnell, dass ihm die Informationsdichte angenehm ist. Die Anzahl der Objekte, die sich vor dem Hintergrund abheben (Blickfelddichte), beeinflussen demnach die Geschwindigkeit. Die Gestaltung des Seitenraums unterstützt die Fokussierung auf die Straße, das periphere Sehen und dadurch auch die Spurhaltung. (Ministerium für Stadtentwicklung, Wohnen und Verkehr, Abt. 5, Straßenwesen, Straßenverkehr 2004)

PFLEGER ET AL. (2004) entwickeln ein Markierungs- und Beschilderungskonzept, welches einen kontinuierlichen Informationsfluss im Zuge der Annäherung an eine Auffahrt (z. B. BAB Auffahrt) liefern. Eines der wichtigsten Elemente des Konzeptes sind die auf der Straße angebrachten blauen Piktogramme und Pfeile als Markierungsergänzung. (Pfleger et al. 2004)

Des Weiteren fanden PFLEGER ET AL. (2011) heraus, dass das Auge immer den Punkt mit dem stärksten Kontrast sucht. Bei einer Nachtfahrt ist das die stärkste Lichtquelle; also z. B. der Scheinwerfer des Gegenverkehrs. Oftmals wird dieser unwillkürlich fixiert, da er den hellsten Bereich im Sichtfeld darstellt (Pfleger 2011). Um die Verkehrsteilnehmer vor Blendung durch Scheinwerfer entgegenkommender Fahrzeuge zu schützen, empfehlen die RAA, Blendschutzeinrichtungen zu bauen (RAA 2008a).

Wichtig ist, die Aufmerksamkeit der Fahrzeugführer auf der Straße und dem Verkehr zu halten. Im Bundesfernstraßengesetz (FStrG) ist deshalb in § 9 (6) geregelt, dass außerorts keine Werbung in der Nähe von Straßen angebracht werden darf (FStrG 2008).

## 2.3 Erkenntnisse zur Wahrnehmung

Informationen im Straßenverkehr werden visuell, vestibulär, haptisch, taktil und akustisch aufgenommen. Aus der Umwelt können jedoch nicht alle Informationen wahrgenommen werden, da der Wahrnehmungsprozess nur eine begrenzte Kapazität aufweist. Die aufgenommene Information wird vom Gehirn entweder reizgesteuert (Bottom-Up) oder erwartungsgesteuert (Top-Down) verarbeitet. (Mietzel 1996, Zimbardo et al. 2008)

Für die Wahrnehmung im Straßenverkehr sind die Augen das wichtigste Sinnesorgan. Die visuelle Wahrnehmung ermöglicht eine nahezu vollständige Informationsaufnahme, lediglich Beschleunigungen und Geräusche können nicht registriert werden (Tomaske & Fortmüller 2001).

Um mit den Augen den Ort des Interesses zu sehen, müssen diese mit einer schnellen Bewegung (ca. 50 bis 80 ms) das Objekt in den Bereich des fovealen Sehens rücken (Saccade). Zur Informationsaufnahme befinden sich die Augen im relativen Stillstand (Fixation). Die Wahrnehmung des fixierten Objekts erfolgt nur, wenn die Fixation in einer bestimmten Zeitspanne liegt: Eine Fixation muss mindestens so lange andauern, dass das Gehirn die Information verarbeiten kann (ca. 100 ms) und maximal so lange, dass das Gehirn nicht unterfordert ist (ca. 2.000 ms). (Volkman 1962, Grüsser & Grüsser-Cornehls 2000, Underwood et al. 2002, Schweigert 2003)

Im Straßenverkehr werden unterschiedliche Punkte während der Autofahrt fixiert. In Kurven wird hauptsächlich die Kurveninnenseite und die dort vorhandene Markierung oder der Fahrbahnrand fixiert (Land & Lee 1994, Kandil et al. 2009, 2010, Lehtonen et al. 2012, Lehtonen et al. 2013). Die Orientierung und Spurhaltung in Geraden erfolgt mit Hilfe eines Nah- und Fernpunktes, die in unregelmäßigen Abständen bewusst fixiert werden. Die Markierung wird als konstante und linienhafte Information größtenteils über das periphere Sehen wahrgenommen. (Mourant & Rockwell 1972, Cohen 1987, Land & Horwood 1995, Neumann & Deml 2011)

## **2.4 AID auf Autobahnen**

### **2.4.1 Relevante Entwurfparameter für Autobahnen**

Die RAA regeln den Entwurf von anbaufreien, zweibahnigen mehrstreifigen Straßen, die überwiegend von schnellen Kraftfahrzeugen befahren werden. Auf Autobahnen gibt es keine kreuzenden, ein- oder abbiegenden Verkehrsströme, da alle Verkehrsströme planfrei geführt sind. Den Verbindungsfunktionen im Straßennetz (kontinental, großräumig oder überregional (RIN 2008b))

werden die Entwurfsklassen (EKA1 bis EKA3) zugeordnet. Innerhalb der Entwurfsklassen gibt es Regelquerschnitte, die die Breiten der Straßenquerschnitte festlegen. (RAA 2008a)

Die Regelquerschnitte (RQ) werden in Abhängigkeit von der EKA und der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV) gewählt. Der RQ einer BAB besteht aus zwei Fahrbahnen mit mehreren Fahrstreifen, den Seitenstreifen sowie Mittelstreifen und Banketten (vgl. Abbildung 2.6). Fahrstreifen (FS), die vorwiegend vom Schwerverkehr (SV) genutzt werden, sind in der Regel 3,75 m breit. Die vom SV weniger genutzten linken Fahrstreifen sind 3,50 m breit. Das Maß der Fahrstreifenbreite wird aus der zulässigen Fahrzeugbreite nach StVZO (2,55 m) und einem Bewegungsspielraum von 0,35 bis 0,60 m zusammengesetzt (StVZO 2016). Auf den 0,5 m breiten, nicht befahrenen Randstreifen wird die Fahrbahnrandmarkierung aufgebracht (vgl. Kapitel 2.4.2). Für die Verkehrssicherheit und den Betriebsdienst sind Seitenstreifen von mindestens 2,5 m Breite vorzusehen. Die Richtungsfahrbahnen sind durch dauerhafte Schutzzeine (SE) im Mittelstreifen voneinander getrennt. Innerhalb eines Netzabschnittes soll ein einheitlicher RQ gewählt werden. (RAA 2008a)

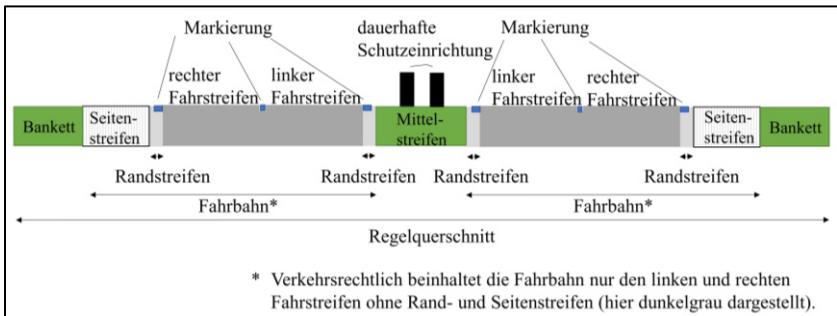


Abbildung 2.6: Definition der Begriffe im Straßenquerschnitt

Neben der Querschnittsgestaltung ist auch die Trassierung im Lage- und Höhenplan zu berücksichtigen. Die RAA fordern, dass die Radien der EKA im Einklang „... mit der Topografie und [den] umfeldprägenden Elementen ...“

stehen. Straßen der EKA1 A sollen mit einem Mindestradius von 900 m, Straßen der EKA1 B mit einem Mindestradius von 720 m trassiert werden. Kurze Zwischengeraden ( $L_G < 400$  m) wie auch zu lange Geraden ( $L_G > 2000$  m) sollten aufgrund einer harmonischen und stetigen Linienführung vermieden werden. Die Querneigung in Radien und Geraden beträgt mindestens 2,5 % und ist auf maximal 6,0 % beschränkt. (RAA 2008a)

In der Höhenplantrassierung werden die Vor- und Nachteile geringer und hoher Längsneigung diskutiert. Geringe Längsneigung verbessert Verkehrssicherheit sowie Verkehrsablauf und senkt die Betriebskosten, Straßennutzerkosten und Emissionen. Hohe Längsneigungen passen sich besser an bewegtes Gelände an, reduzieren somit die Eingriffe in die Umwelt und senken die Baukosten. Die Längsneigung der EKA1 ist nach den RAA (2008) auf maximal 4,5 % beschränkt. Eine minimale Längsneigung von 1 % ist aufgrund der Entwässerung in Verwindungsbereichen (Bereich zwischen zwei gegensinnigen Kurven) einzuhalten. (RAA 2008a)

Ein Großteil des bestehenden BAB-Netzes ist mit einem RQ der vorherigen Regelwerksgenerationen geplant und gebaut worden. In Abbildung 2.7 sind die für diese Arbeit relevanten RQ von Fernverkehrsautobahnen (jeweils nur eine Fahrbahn) dargestellt (RAS-Q 1982, RAS-Q-96 1996, RAA 2008a). Der grundlegende Aufbau der RQ ist über alle Regelwerksgenerationen sehr ähnlich, wodurch im Normalzustand keine großen Unterschiede im Verhalten der Verkehrsteilnehmer zu erwarten sind. Im Arbeitsstellenfall entsteht allerdings durch die Kombination der weißen und gelben Markierung in Abhängigkeit des RQ ein völlig anderes Markierungsmuster (vgl. auch Kapitel 2.4.6).

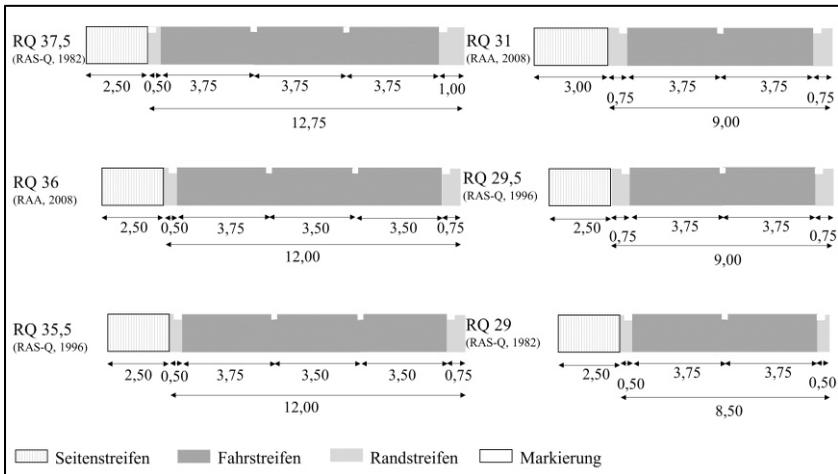


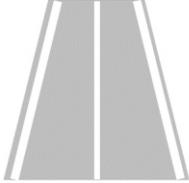
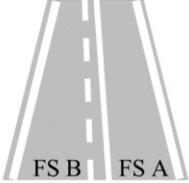
Abbildung 2.7: Ausgewählte Regelquerschnitte (RQ) für Autobahnen (RAS-Q 1982, RAS-Q-96 1996, RAA 2008a)

## 2.4.2 Markierung von Straßen

Markierungen von Straßen stellen gemäß Straßenverkehrsordnung (StVO) §39 (5) horizontale Verkehrszeichen dar. Längsmarkierung wird generell in weißer Farbe ausgeführt und kennzeichnet den Fahrbahnrand sowie die einzelnen Fahrstreifen. Gleichzeitig regelt Markierung als Verkehrszeichen die zulässigen Fahrfraktionen zwischen den Fahrstreifen. (StVO 2016)

In der StVO wird die Bedeutung von Markierung wie folgt beschrieben: §39 Abs. (5) StVO „Auch Markierungen und Radverkehrsführungsmarkierungen sind Verkehrszeichen. Sie sind grundsätzlich weiß. Nur als vorübergehend gültige Markierungen sind sie gelb; dann heben sie die weißen Markierungen auf“ (StVO 2016). In Anlage 2 zu § 41 Absatz 1 der StVO ist geregelt, dass eine Fahrstreifenbegrenzung oder Fahrbahnbegrenzung (Zeichen 295) „auch nicht teilweise überfahren“ werden darf. Die durchgezogene Fahrstreifen- oder Fahrbahnbegrenzung werden nicht zur Fahrbahn gezählt (StVO 2016). Die nach StVO zulässigen Markierungszeichen und Einsatzbereiche sind in Tabelle 2.2 abgebildet.

Tabelle 2.2: Markierung als Verkehrszeichen gemäß StVO (StVO 2016)

<p><b>Fahrstreifen- und Fahrbahnbegrenzung (Z 295)</b></p> 	<p><b>Einseitige Fahrstreifenbegrenzung (Z 296)</b></p> 	<p><b>Leitlinie (Z 340)</b></p> 
<p>Fahrstreifenbegrenzung und Fahrbahnbegrenzung (Z 295) als Vorschriftzeichen begrenzen die Fahrbahn bzw. den Fahrstreifen. Ein Überfahren ist hier nicht gestattet. Bei Trennung der Fahrbahnen muss rechts der Fahrstreifenbegrenzung gefahren werden.</p>	<p>Einseitige Fahrstreifenbegrenzungen (Z 296) sind den Vorschriftzeichen zugeordnet und werden in Verflechtungs- und Knotenpunktbereichen eingesetzt. Ein einseitiges Überfahren der Markierung ist hier gestattet (<i>hier</i>: von FS B auf FS A).</p>	<p>Die Leitlinie (Z 340) gehört zu den Richtzeichen und teilt die Fahrbahn in mehrere Fahrstreifen. Die Leitlinie darf von Fahrzeugführern überfahren werden.</p>

Gemäß der VwV-StVO ist die Straßenmarkierung nach den Richtlinien für die Markierung von Straßen (RMS) auszuführen (VwV-StVO, 2016). Die Richtlinien für die Markierung von Straßen (RMS) gliedern sich in zwei Teile: Teil 1 (RMS-1, 1993) regelt die Markierungszeichen und Teil 2 (RMS-2, 1980) legt deren einheitliche Anwendung im Straßenraum fest. Die RMS-1 fordern hohe Tagessichtbarkeit (Kontrast zur Fahrbahn), hohe Nachtsichtbarkeit (Retroreflexion), Griffbarkeit, gut erkennbare Geometrie (randscharf und völlig gleichmäßig) und Haltbarkeit, um die Funktionen der Regelung und Warnung sowie der optischen Führung des Verkehrs zu erfüllen (RMS-1, 1993). Die Abmessungen der Markierungszeichen (Strichbreiten, Strich-Lücke-Verhältnis) werden in den RMS-1 1993 geregelt. Autobahnquerschnitte werden mit Fahrbahnbegrenzungen, in Form eines durchgehenden Breitstrichs (30 cm) und Fahrstreifenbegrenzungen sowie Leitlinien mit einer Breite von

15 cm markiert. Das Strich-Lücke Verhältnis von 1 zu 2 entspricht auf BAB einem Strich von 6 m Länge und einer Lücke von 12 m. Aktuell befinden sich die RMS in der Überarbeitung, für die Streckenmarkierung auf BAB sind keine Änderungen zu erwarten.

Markierung soll den Verkehr eindeutig regeln, was bedeutet, dass keine Missverständnisse der Markierungskonstellation entstehen dürfen. Hierzu gibt die VwV-StVO zu §§ 39 bis 43 der StVO an, dass nach „...Erneuerung oder Änderung einer dauerhaften Markierung [...] die alte Markierung nicht mehr sichtbar sein [darf], wenn dadurch Zweifel über die Verkehrsregelung entstehen könnten“ (VwV-StVO, 2016). Die in der VwV-StVO benannten Zweifel über die Verkehrsregelung sind nicht weiter spezifiziert.

Über die Landesgrenzen hinaus begleitet Fahrbahnmarkierung die Verkehrsteilnehmer. Der Einsatz von Markierungsfarben ist national geregelt. Weiß als Farbe für die dauerhafte Markierung hat sich international durchgesetzt. Für vorübergehend gültige Markierung kommen in anderen Ländern andere Markierungsfarben zum Einsatz, z. B. werden in Österreich und den Niederlanden geänderte Verkehrsführungen orange markiert.

SCHÖNBORN (1982) animiert in seiner Veröffentlichung zu den RMS (1982), Markierung als kontinuierliche linienförmige Information behörden- und länderübergreifend auszudenken. Markierung ist eine gute Möglichkeit, mit geringem finanziellem Aufwand einen großen Beitrag für die Verkehrssicherheit zu leisten. Der Verkehr wird geregelt, Unfälle werden verhindert und der Verkehrsablauf wird verbessert. (Schönborn 1982)

### 2.4.3 Regelwerk für AID

Das relevante Regelwerk für Arbeitsstellen im Straßenraum sind die vom Bundesministerium für Verkehr herausgegebenen Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen (RSA-95). Gemeinsam mit der StVO regeln sie die Sicherung von Arbeitsstellen für innerörtliche Straßen (Teil B), Landstraßen (Teil C) und Autobahnen (Teil D). Arbeitsstellen sind Verkehrsflächen, die vorübergehend für Arbeiten an, neben oder über der Straße abgesperrt werden. Es wird zwischen AID und Arbeitsstellen kürzerer Dauer (AkD)

unterschieden: „Arbeitsstellen von längerer Dauer im Sinne dieser Richtlinien sind in der Regel alle Arbeitsstellen, die mindestens einen Kalendertag durchgehend und ortsfest aufrechterhalten werden.“ (RSA-95 2015)

Die RSA-95 „... dienen dem Schutz der Verkehrsteilnehmer (Verkehrsbe- reich) und der Arbeitskräfte sowie der Geräte und Maschinen in der Arbeits- stelle (Arbeitsbereich)“ (RSA-95 2015). Allerdings gelten die RSA-95 nur für die verkehrsrechtliche Sicherung von Arbeitsstellen. Der Gesundheits-, Arbeits- und Unfallschutz der Beschäftigten wird im aktuellen Entwurf der Technischen Regeln für Arbeitsstätten ASR A5.2 „Straßenbaustellen“ berück- sichtigt (ASR A5.2 2014). Die ASR A5.2 konkretisieren bisher bestehende Regeln der Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV 2010). In der gegenwärtigen Überarbeitung der RSA-95 wird eine Abstimmung der Schnittstellen sowie Begrifflichkeiten zwischen Arbeitsschutz (Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV)) und Verkehrssicherung (RSA, StVO) angestrebt, um sowohl für den fließenden Verkehr als auch für die Arbeiter auf der Baustelle einen aus- reichenden Schutz zu gewährleisten (Zimmermann & Schweiger 2016).

Innerhalb von Arbeitsstellen auf BAB wird der Verkehr auf der befestigten Straßenbreite oder auf zusätzlich provisorisch angebauten Behelfsfahrbahnen abgewickelt. Grundsätzlich soll die Anzahl der Fahrstreifen innerhalb der AID für einen möglichst störungsfreien Verkehrsfluss erhalten bleiben. In Ausnah- mefällen (z. B. geringe Verkehrsspitzen) kann die Anzahl der Fahrstreifen reduziert werden oder spezielle Verkehrsführungen mit Wechselverkehr auf einem Fahrstreifen zum Einsatz kommen (Hessen Mobil 2015). Gibt es meh- rere Möglichkeiten der Verkehrsführung, so ist aus Sicherheitsgründen und für einen ungehinderten Bauablauf kein einzelner Behelfsfahrstreifen neben der Arbeitsstelle zu führen (z. B. 4s+0 statt 3+1). Die Bezeichnung der Verkehrs- führung (4s+0 bzw. 3+1) setzt sich aus der Anzahl der Fahrstreifen auf den Richtungsfahrbahnen zusammen. Eine 4s+0 Verkehrsführung bedeutet, dass vier Fahrstreifen auf einer Fahrbahn verlaufen, eine 3+1 bedeutet, dass drei Fahrstreifen auf einer Fahrbahn verlaufen und eine auf der Parallelfahrbahn. Der angehängte Buchstabe „s“ zeigt an, dass der Verkehr unter Mitbenutzung des Seitenstreifens geführt wird und der Buchstabe „n“, dass die Fahrstreifen

einer Richtungsfahrbahn nicht von der AID betroffen sind. Richtungsfahrbahnen sind heutzutage aus Sicherheitsgründen auf BAB immer durch transportable Schutzeinrichtungen (TSE) getrennt, auch wenn diese nach den RSA-95 nicht zwingend erforderlich sind. (RSA-95 2015)

Die notwendige Breite der Behelfsfahrstreifen innerhalb der Arbeitsstelle wird in Abhängigkeit von der Länge der AID gewählt. In Tabelle 2.3 sind die geforderten Maße nach RSA-95 Teil D dargestellt. Aktuell befindet sich die RSA-95 in der Überarbeitung. Es ist vorgesehen, die Mindestregelbreite von Behelfsfahrstreifen von 2,50 auf 2,60 m zu erhöhen, da es kaum noch Fahrzeuge gibt, die eine Fahrzeugbreite von weniger oder gleich 2,00 m erfüllen. Das Land Hessen hat die geänderten Fahrstreifenbreiten bereits im Handbuch zum Baustellenmanagement aufgegriffen (Hessen Mobil 2016). Die zulässige Höchstgeschwindigkeit in AID beträgt in der Regel 80 km/h. Die Erhöhung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf 100 km/h kann erfolgen, wenn der linke Behelfsfahrstreifen mindestens 3,0 m und der rechte mindestens 3,5 m breit ist. (RSA-95 2015)

Tabelle 2.3: Mindestbreite der Behelfsfahrstreifen in Abhängigkeit von der Länge der AID (RSA-95, 2015)

Fahrzeugbreite	Länge der Arbeitsstelle [km]		
	bis zu 6	mehr als 6 bis 9	mehr als 9
Beschränkung auf bis zu 2 m (Z 264)	2,50 m (3,25 m) <sup>1</sup>	3,00 m (3,25 m) <sup>1</sup>	3,25 m
unbeschränkt	3,25 m (3,0 m) <sup>2 3</sup>		

<sup>1</sup> Bei einer Verkehrsführung mit nur 1 Behelfsfahrstreifen für eine Fahrtrichtung auf der Gegenfahrbahn; ggf. muss vorher ausgebaut oder vorbereitet werden (vgl. Verkehrsführungen 3+1, 2+0 und 4+2)

<sup>2</sup> Durch einen entsprechenden vorherigen Fahrbahnausbau bzw. eine Verbreiterung ist ein Behelfsfahrstreifen von 3,25 m, d.h. z.B. bei einer Verkehrsführung 4+0 ein Mindestfahrbahnbreite von 11,50 m, anzustreben.

<sup>3</sup> Im Bereich z.B. von Fertigmern darf die Fahrstreifenbreite zur Erhöhung der Sicherheit der in der Arbeitsstelle Tätigen vorübergehend und auf eine geringe Streckenlänge auf dieses Maß eingeeengt werden.

Bereits in den RAA wird der Arbeitsstellenfall berücksichtigt. Die RAA orientieren die Fahrbahnbreiten an der erforderlichen Breite für eine bestimmte Arbeitsstellenverkehrsführung. Für eine 4s+0 Verkehrsführung wird mindestens eine Breite von 12,0 m benötigt. Für eine 5+0 bzw. 5+1 Verkehrsführung 14,5 m und für eine 6+0 bzw. 6+1 17,0 m. Bei einem RQ 31 wird die für eine

4s+0-Verkehrsführung erforderliche befestigte Breite so ermöglicht, dass der 3,0 m breite Seitenstreifen neben dem 0,75 m breiten Randstreifen vorübergehend als Verkehrsfläche genutzt werden kann (vgl. Abbildung 2.8, S.42).

Für ein möglichst einheitliches Erscheinungsbild der Arbeitsstellen sind in den RSA-95 Regelpläne für unterschiedliche Verkehrsführungen enthalten. Diese regeln neben der Beschilderung auch die Markierung von Arbeitsstellen und geben eine Standardeinrichtung von Arbeitsstellen vor, die für die jeweilige verkehrsrechtliche Anordnung entsprechend anzupassen ist. Beispielhaft ist im Anhang 7.1 der Regelplan DII/2 dargestellt. Hier werden 4 Fahrstreifen auf einer Fahrbahn geführt. Die zwei Fahrstreifen, die auf ihrer ursprünglichen Richtungsfahrbahn verbleiben, werden verschwenkt, sodass Platz für die übergeleiteten Fahrstreifen entsteht. Übergeleitet bedeutet, dass die Fahrstreifen (hier: 2 Fahrstreifen) auf die Gegenfahrbahn geführt werden. Der Bereich der Überleitung ist aufgrund der nötigen Radienfolge und Querneigungswechsel gesondert zu berücksichtigen. Falls die Griffigkeit oder Kippsicherheit nicht bei allen Fahrbahnzuständen gewährleistet werden kann, muss die Geschwindigkeit herabgesetzt oder weitere Maßnahmen ergriffen werden (z. B. Verlegen der Überleitung in einen Verwindungsbereich mit geringerer Querneigung). (RSA-95 2015)

#### **2.4.4 Markierung von Arbeitsstellen**

In Deutschland wird gelbe Markierung eingesetzt, um die geänderte Verkehrsführung innerhalb von AID anzuzeigen. Die vorübergehende gelbe Markierung setzt die weiße dauerhafte außer Kraft (StVO 2016). Im Gegensatz zur weißen ist die gelbe vorübergehende Markierung dem angrenzenden Fahrstreifen zugeordnet. „Bei der Bildung eines Querschnitts mit Behelfsfahr- und -trennstreifen werden Leitlinien je mit halber Breite den beiden anliegenden Fahrstreifen, Fahrstreifenbegrenzungen [...] mit voller Breite dem jeweils anliegenden Fahrstreifen zugeordnet.“ (RSA-95 2015).

Für den Einsatz von gelber Markierung in Arbeitsstellen gilt ebenso wie für die weiße dauerhafte Markierung, dass diese keine Zweifel über die Verkehrsregelung erzeugen darf. Bei der Kombination weißer und gelber Markierung

können kreuzende, spitz zulaufende oder auch parallel verlaufende Markierungen Missverständnisse hervorrufen. Um diese Missverständnisse zu vermeiden, geben die RSA-95 an, dass vor allem bei „... Längsmarkierungen in Verschwenkungs-, Kreuzungs- und Einmündungsbereichen [...] mögliche Verkehrsbeeinträchtigungen mit besonderer Sorgfalt zu prüfen und ggf. geeignete Maßnahmen zu treffen sind.“ (RSA-95, 2015). Ebenfalls in den RSA-95 wird für den Umgang mit dauerhafter Markierung in AID angegeben, diese, sobald sie Anlass zu Missverständnissen bei den Verkehrsteilnehmern gibt, „... je nach Markierungsbild

- a) zu entfernen,
- b) abzudecken,
- c) in Gelb auszukreuzen oder
- d) in Gelb zu ergänzen.“ (RSA-95, 2015)

Die ZTV M (2013) gibt an, dass sowohl bei Tag als auch bei Nacht die gelbe vorübergehende Markierung „... mindestens ebenso auffällig und sichtbar sein [muss] wie die vor Ort vorhandenen weißen Markierungen“ (ZTV M 2013). Durch den unterschiedlichen Farbeindruck ist eine gleiche Auffälligkeit bereits gegeben, wenn die gelbe Markierung eine Klasse niedriger als die entsprechende weiße Markierung in Bezug auf den Leuchtdichtekoeffizienten gewählt wird. (ZTV M 2013)

Die Sicherheitswirkung und Sichtbarkeit von vorübergehender Markierung ist über die gesamte Dauer der Arbeitsstelle sicherzustellen. Um möglichst wenige Eingriffe in den Verkehrsablauf zur Instandsetzung der Markierung vornehmen zu müssen, ist eine gute Haltbarkeit erforderlich. In Arbeitsstellen kommt es durch die schmaleren Fahrstreifen zu einer höheren Beanspruchung der Markierung. Die unterschiedliche Beanspruchung wird bei der Auswahl der Fahrbahnmarkierung durch sogenannte Verkehrsklassen berücksichtigt. Abhängig von der Dauer der Arbeitsstelle muss die vorübergehende Markierung einer größeren Anzahl an Überrollungen standhalten und evtl. in einer höheren Verkehrsklasse ausgeführt werden. (ZTV M 2013)

Die Anzahl der Überrollungen und starke Schub- und Schlupfbelastungen haben einen Einfluss auf die Haltbarkeit der Markierung und sind in der aktuellen

Festlegung der Verkehrsklasse beachtet. Die Oberflächenstruktur der vorübergehenden Markierung hat ebenfalls einen großen Einfluss auf die Haltbarkeit, wird aber in aktuellen Prognosen noch nicht einkalkuliert. (Petry et al. 2010)

Nach der Einsatzzeit muss vorübergehende Markierung rückstandsfrei und ohne Beschädigung der Fahrbahn entfernt werden. Rückstandsfrei wird in den ZTV M (2013) definiert, „... , wenn der Flächenanteil der verbleibenden Farbreste 5 % statistisch verteilt über einen Meter ursprünglicher Markierungslänge nicht überschreitet“ (ZTV M 2013). Rückstände und Oberflächenveränderungen der Fahrbahn können zu Missverständnissen und Verkehrsbeeinflussungen führen und sind zu vermeiden. Der Untergrund, auf dem die Markierung aufgebracht wird, hat auch einen Einfluss auf die Entfernbareit. PETRY et al. (2010) empfehlen, den Untergrund in den Empfehlungen des Regelwerks zu berücksichtigen. (Petry et al. 2010)

## **2.4.5 Kritische Markierungskonstellationen**

Knappe Bauzeiten und wirtschaftlich optimierte Budgets sind mögliche Gründe dafür, dass auf bestehenden Fahrbahnen meist die gelbe Markierung aufgebracht wird, ohne die weiße Markierung zu entfernen. Das Land Hessen regelt das Aufbringen von dauerhafter Markierung auf neuer Fahrbahn wie folgt: „In der Regel ist nach Baumaßnahmen die endgültige Markierung sofort nach Fertigstellung der Fahrbahndecke aufzubringen, so dass nach der Baumaßnahme keine zusätzliche Verkehrssicherung zur Aufbringung der Markierung notwendig wird“ (Hessen Mobil 2016). Der ungünstige Fall, dass kontrastreiche, retroreflektierende, dauerhaft weiße parallel zur gelben Markierung liegt, wird dabei in Kauf genommen. Nationale Regelungen, wann es sinnvoll sein könnte, weiße Markierungen zu entfernen bzw. erst später aufzubringen, gibt es bislang nicht.

Eine genauere Betrachtung der Regelpläne für AID auf BAB (RSA-95 2015) ergibt, dass für Arbeitsstellen mit Überleitung (Teil D I) die Leitlinien der dauerhaften Markierung nicht dargestellt sind, wohingegen in Arbeitsstellen ohne Überleitung (Teil D II) die dauerhafte Markierung vollständig eingezeichnet ist. Weder im Allgemeinen Teil (Teil A) noch im Teil für Autobahnen (Teil D) sind Begründungen dafür zu finden. (RSA-95 2015)

DYCKERHOFF beschreibt Baustellen aus Sicht der Benutzer als eine Problemsituation, in der häufig die gute weiße Markierung gegenüber der schlechten gelben Markierung steht. Insbesondere bei Nacht kommt es hier immer wieder zu Problemen, da die Fahrstreifen für die Fahrzeugführer nicht eindeutig erkennbar sind. (Dyckerhoff 1998)

### **2.4.6 Markierungskonstellationen am Beispiel einer 4s+0 Verkehrsführung**

Das Netz der deutschen Fernautobahnen besteht aus unterschiedlichen Regel- und Sonderquerschnitten (SQ), bei denen einzelne Elemente z. B. andere Breiten aufweisen. Bei einer 4s+0 Verkehrsführung ergeben sich in der Arbeitsstelle, abhängig vom zugrundeliegenden RQ, unterschiedliche Markierungskonstellationen aus gelber und weißer Markierung. Unter der Annahme, dass die gesamte befestigte Breite im Arbeitsstellenfall genutzt wird, definiert die Breite von Seiten- und Randstreifen die Lage der gelben Markierung für die verschwenkten Fahrstreifen (vgl. Abbildung 2.8). Ist der Seitenstreifen beispielsweise 3,0 m und der Randstreifen 0,75 m breit, so liegt die weiße Fahrbahnbegrenzung im 1. Überholfahrstreifen (1ÜFS). Ist der Seitenstreifen lediglich 2,0 m breit und der Randstreifen nach wie vor 0,75 m, so liegt die weiße Fahrbahnbegrenzung im Hauptfahrstreifen (HFS). Die Behelfsfahrstreifenbreite bestimmt den Abstand zwischen der gelben Leitlinie und der weißen Fahrbahnbegrenzung (bspw. in Abbildung 2.8 3,25 m). Für den RQ 29,5 kann bei einer 4s+0 Verkehrsführung lediglich die Mindestbreite für den rechten Behelfsfahrstreifen von 3,0 m angenommen werden (vgl. Kapitel 2.4.3).

Auf der übergeleiteten Fahrbahn bestimmt die Randstreifenbreite den Abstand zwischen der weißen und gelben Fahrbahnbegrenzung. Generell liegt hier die gelbe Fahrbahnbegrenzung des übergeleiteten HFS nahe an der weißen nicht mehr gültigen Fahrbahnbegrenzung (vgl. Abbildung 2.8). Die weiße Fahrbahnbegrenzung am Mittelstreifen kann sowohl als Breitstrich als auch als Schmalstrich ausgeführt sein, was zusätzlich noch einen Einfluss auf die entstehende Markierungskonstellation hat. Entsprechend der größeren Verbreitung in der Praxis, wird im Folgenden die Fahrbahnbegrenzung am Mittelstreifen als Breitstrich dargestellt.

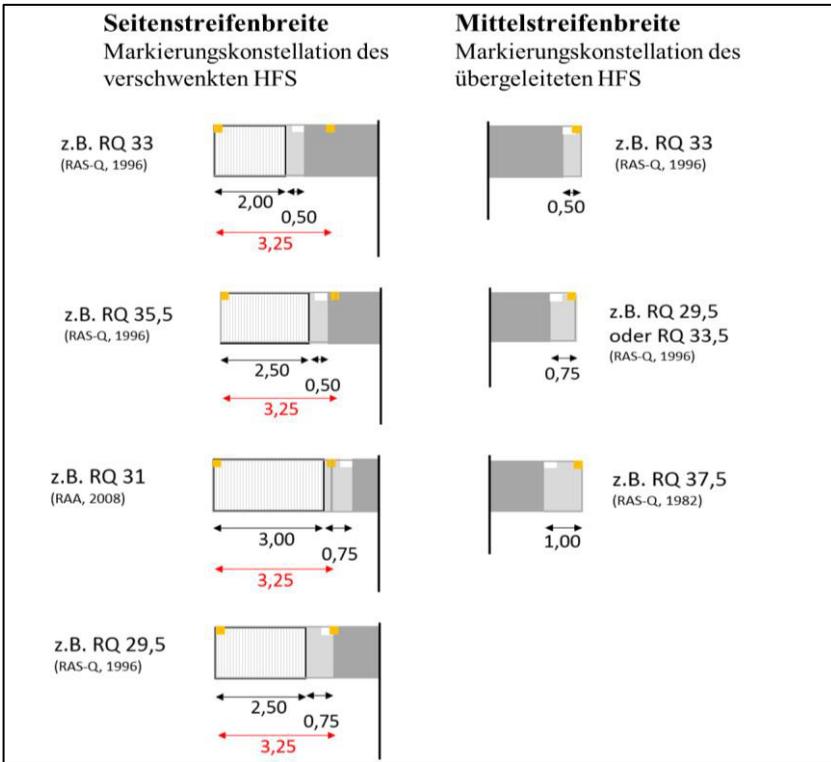


Abbildung 2.8: Einfluss der Seiten- und Randstreifenbreiten auf die Markierungskonstellation einer 4s+0 Verkehrsführung innerhalb der AID

Hat die Richtungsfahrbahn im Ausgangszustand drei Fahrstreifen, so kann in Abhängigkeit von der benötigten Breiten und Anzahl der Behelfsfahrstreifen die weiße Markierung des ursprünglich 2. Überholfahrstreifens (2.ÜFS) im Arbeitsstellenfall für die übergeleitete Fahrtrichtung genutzt werden (vgl. Abbildung 2.9). In Abbildung 2.9 ist beispielsweise für einen RQ 35,5 im ersten Fall (oben) die TSE direkt über der weißen Leitlinie aufgestellt. Hier kann für die übergeleitete Fahrtrichtung die weiße Markierung des 2.ÜFS verwendet werden. Die Fahrstreifenbreiten sind in beide Fahrrichtungen gleich breit, allerdings wird die Randstreifenbreite von 0,75 m nicht für mögliche breitere Behelfsfahrstreifen genutzt. Wenn die gesamte befestigte Fläche

gleichmäßig zwischen beiden Fahrtrichtungen aufgeteilt werden soll, muss die übergeleitete Fahrtrichtung ebenfalls gelb markiert werden (Abbildung 2.9 unten). In Abhängigkeit von Seiten- und Randstreifenbreiten ergibt sich dann die dargestellte Markierungskonstellation.

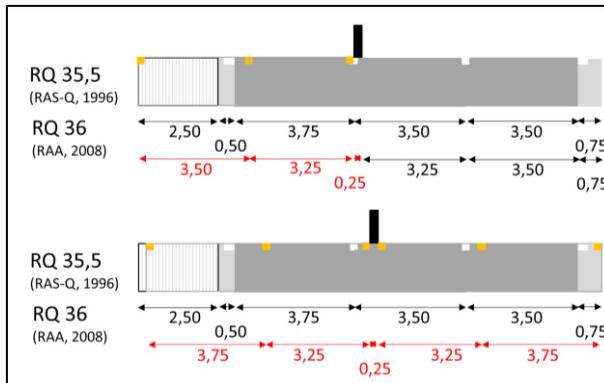


Abbildung 2.9: Mögliche Markierungskonstellationen einer 4s+0 Verkehrsführung

Bei den übergeleiteten Fahrstreifen tritt der Fall von nahe beieinanderliegender gelber und weißer Markierung auf dem rechten Fahrstreifen auf. Die Breite des Randstreifens bestimmt den Abstand zwischen gelber und weißer Markierung. Die Markierungskonstellation mit geringem Abstand zwischen gelber und weißer Markierung kommt bei den verschwenkten Fahrstreifen zwischen dem rechten und linken (oder mittleren Fahrstreifen) vor. Die Seitenstreifenbreite beeinflusst hier den Abstand zwischen der gelben und weißen Markierung.

## 2.5 Fahrverhalten

### 2.5.1 Untersuchungen zum Spurverhalten

LEUTZBACH ET AL. (1976) untersuchten das Verhalten von Kraftfahrzeugen auf einer zweistreifigen Landstraße im Querschnitt mit einer Fahrbahnbreite von 7,5 m. Frei fahrende Verkehrsteilnehmer sind von keinen weiteren Fahrzeugen umgeben. Sowohl frei fahrende Lkw als auch Pkw fahren mit zunehmender

Geschwindigkeit weiter links im Fahrstreifen (Pkw: > 100 km/h ca. 10 cm weiter links). (Leutzbach et al. 1976)

In einem weiterführenden Forschungsprojekt analysieren LEUTZBACH ET AL. (1981) das Spurverhalten von Fahrzeugen entlang eines Streckenabschnitts auf zwei unterschiedlichen Querschnitten (B2: Fahrbahnbreite 8,0 m B2s: Fahrbahn 8,0 m, Seitenstreifen 1,5 m). Das Spurverhalten der Fahrzeuge im Fahrstreifen (3,75 m) wird vom vorhandenen Straßenquerschnitt (Verkehrsraum) beeinflusst. Die umgekehrte Folgerung können LEUTZBACH ET AL. (1981) nicht belegen. Aus dem Fahrverhalten kann nicht auf einen notwendigen Straßenquerschnitt geschlossen werden. (Leutzbach et al. 1981)

KÄMPFE ET AL. (2005) stellen fest, dass auf breiten Straßen schneller gefahren wird als auf schmalen (Kämpfe et al. 2005). ZWIELICH ET AL. (2001) identifizieren die Fahrbahnbreite als quantitativ starken Einfluss auf das Spurverhalten. Auf einer Fahrbahn mit der Breite von 7,0 m wird 75 cm weiter links gefahren als auf einer 5,0 m breiten Fahrbahn. Es ist anzunehmen, dass die gleiche Markierung in beiden Fällen vorlag, auch wenn in den Ergebnissen nichts dazu beschrieben ist. (Zwielich et al. 2001)

Mehrere Untersuchungen haben ergeben, dass das Spurverhalten nicht nur von der Fahrstreifenbreite, sondern vielmehr auch vom umgebenden Verkehr abhängig ist (Lenz & Burger 1975, Leutzbach et al. 1976, Brilon & Döhler 1978, Reichart 2001, Zwielich et al. 2001). Fahrzeuge mit Gegenverkehr fahren weiter rechts (ca. 15 bis 25 cm) als frei fahrende Fahrzeuge (Lenz & Burger 1975, Leutzbach et al. 1976, Zwielich et al. 2001). Kolonnenfahrzeuge und frei fahrende Fahrzeuge fahren eher in der Fahrstreifenmitte bzw. tendenziell weiter links als Fahrzeuge mit Gegenverkehr (Lenz & Burger 1975, Leutzbach et al. 1976, Brilon & Döhler 1978, Reichart 2001).

BRILON UND DÖHLER (1987) sehen den Linksversatz von Kolonnenfahrzeugen darin begründet, dass die Fahrzeugführer durch einen leichten Linksversatz zum Vorderfahrzeug einen besseren Überblick über den Straßenabschnitt erhalten (Brilon & Döhler 1978). Sowohl LEUTZBACH ET AL. (1976) als auch BRILON UND DÖHLER (1987) geben an, dass „vorausfahrende Fahrzeuge [...] dem Fahrer eine Hilfestellung bei der Spurhaltung“ geben (Leutzbach et al.

1976, Brilon & Döhler 1978). Da ohne Begegnungsverkehr tendenziell weiter links gefahren wird, folgert REICHART (2001), dass Markierung nicht als strenge Grenze verstanden wird (Reichart 2001).

In den USA untersuchten MCKNIGHT ET AL. (1998) den Einfluss von unterschiedlicher Markierung (10,2 cm, 15,3 cm und 20,3 cm) auf die Spurhaltung. Fahrzeugführer fühlen sich nach Angaben von MCKNIGHT ET AL. (1998) wohler, wenn die vorhandene Markierung breiter ist. Auf die Fahrqualität hat die Markierungsbreite allerdings keinen Einfluss. Mit ausreichendem Kontrast hat schmale wie breite Markierung die gleiche Wirkung auf die Spurhaltequalität. Bei schlechtem Kontrast zwischen Markierung und Fahrbahnoberfläche verschlechtert sich die Spurhaltequalität bei schmaler Markierung (z. B. regenasse Fahrbahn bei Nacht). (McKnight et al. 1998)

In Deutschland untersuchten ZWIELICH ET AL. (2001) das Fahrverhalten in Abhängigkeit von der Straßenraumgestaltung. Mit vorhandener Fahrbahnrandmarkierung wird 23 bis 41 cm weiter rechts gefahren als ohne. Die Begrenzung des Fahrstreifens zum Gegenverkehr (Leitlinie) verlagert die gewählte Fahrspur wieder um 11 bis 28 cm nach links. (Zwiulich et al. 2001)

Auch Müdigkeit und Stress haben eine Auswirkung auf die Spurhaltung von Fahrzeugführern. Mit zunehmender Müdigkeit und Stress stellen RIEMERSMA ET AL. (1977) eine höhere Standardabweichung der lateralen Position sowie der Geschwindigkeit fest. Mit zunehmender Fahrdauer wird die Standardabweichung der lateralen Position größer. Nach einer Pause ist die Standardabweichung wieder deutlich kleiner und steigt mit zunehmender Fahrdauer erneut an. (Riemersma et al. 1977)

COOPER ET AL. (2013) untersuchten die Auswirkung der Augenbewegung und kognitiven Beanspruchung auf die laterale Position. Mit steigender kognitiver Beanspruchung nimmt die Variabilität der lateralen Position ab. Ein Zusammenhang zwischen der Änderung der Augenbewegung und der Variabilität der lateralen Position ist nicht nachweisbar. (Cooper et al. 2013)

Die hier zusammengetragenen Erkenntnisse zum Spurverhalten sind kritisch zu bewerten. Fahrerassistenzsysteme, breitere Fahrzeuge und weitere Neuerungen in der Fahrzeugtechnologie lassen erwarten, dass sich das Fahrverhalten im Laufe der Jahre verändert hat und die Ergebnisse nicht eins zu eins übertragbar sind. Teilautomatisiertes Fahren in Form von automatischem Lenken, Bremsen und Beschleunigen erfolgt heutzutage bereits für bestimmte Anwendungsfälle. Ein Beispiel ist der sogenannte Stauassistent, der das automatisierte Lenken, Beschleunigen und Bremsen in einem definierten Geschwindigkeitsbereich übernimmt. Der Stauassistent kommt bereits in mehreren Pkw-Modellen zum Einsatz. (Holzer 07.09.2016)

### 2.5.2 Definition der lateralen Position

Die laterale Position beschreibt die Abweichung des Fahrzeugs von der Fahrstreifenmitte. Mit einer Fahrstreifenbreite von 3,25 m und einer Fahrzeugbreite von 2,06 m verlässt das Fahrzeug ab einer lateralen Position von +/- 0,595 m den Fahrstreifen. Eine positive laterale Position beschreibt einen Versatz in Fahrtrichtung nach rechts, eine negative einen Versatz nach links (vgl. Abbildung 2.10).

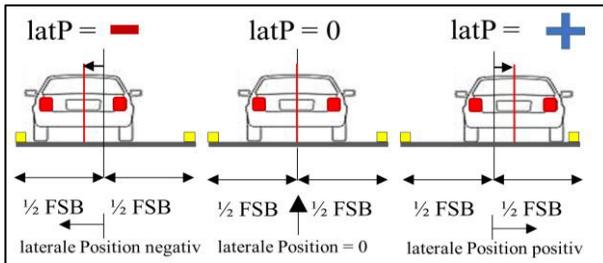


Abbildung 2.10: Definition laterale Position

### 2.5.3 Bestimmung der Qualität der Querdynamik

REICHART (2001) bestimmt die Qualität der Querdynamik auf geraden Strecken, indem er den Ausnutzungsgrad des seitlichen Bewegungsspielraums von Fahrzeugen im Fahrstreifen mit folgender Formel beschreibt:

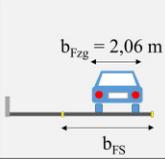
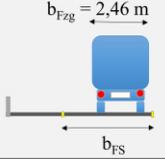
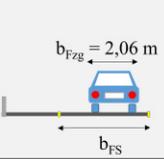
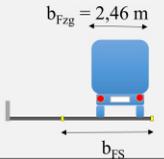
$$\kappa = \left| \frac{2 * latP}{b_{FS} - b_{Fzg}} \right| \quad \text{Formel 2.4}$$

mit  $\kappa$  Ausnutzungsgrad  
 $latP$  laterale Position  
 $b_{FS}$  Fahrstreifenbreite  
 $b_{Fzg}$  Fahrzeugbreite

Die Spurhaltequalität ( $Q$ ) ermittelt sich dann zu:

$$Q_S = 1 - \kappa \quad \text{Formel 2.5}$$

Die Spurhaltequalität muss umso größer sein, je schwieriger die Fahraufgabe ist. Fährt das Fahrzeug exakt in der Fahrstreifenmitte, so ist die Spurhaltequalität gleich 1,0. Bei gleicher lateraler Position nimmt die Qualität der Spurhaltung mit schmaleren Fahrstreifen ab. Mit zunehmender Qualität erhöht sich der Abstand zum parallel verlaufenden Verkehr. Abbildung 2.11 zeigt die Spurhaltequalität beispielhaft für unterschiedliche Fahrstreifenbreiten. (Reichart 2001)

	Fahrstreifenbreite $b_{FS} = 3,25 \text{ m}$		Fahrstreifenbreite $b_{FS} = 3,75 \text{ m}$	
Situation				
Ausnutzungsgrad $\kappa$ bei lat $P = 0,5 \text{ m}$	0,84	1,26 *	0,59	0,76
Spurhaltequalität $Q_S$	0,16	-0,26 **	0,41	0,24

\*  $\kappa > 1$  der eigene Fahrstreifen wird verlassen  
\*\*  $Q_S < 0$  der eigene Fahrstreifen wird verlassen

Abbildung 2.11: Spurhaltequalität bei unterschiedlich breiten Fahrstreifen (Reichart 2001 nach Bubb 2015)

## 2.6 Statistische Grundlagen

### 2.6.1 Allgemeines

Die statistische Auswertung der Daten wird mit Hilfe von Microsoft Excel 2013 und IBM SPSS Statistics 22 durchgeführt. Da in den einzelnen Untersuchungen unterschiedlich viele VP teilgenommen haben, wird die Anzahl der VP angegeben. Im Folgenden werden ausgewählte statistische Methoden vorgestellt, die für die Arbeit relevant sind. Für eine detaillierte Erläuterung siehe z. B. Clauß et al. 1995, Hartung et al. 2009, Hedderich & Sachs 2016.

### 2.6.2 Deskriptive Statistik

Die deskriptive Statistik ermöglicht es, empirisch erhobene Daten mit Hilfe von Grafiken und Diagrammen übersichtlich darzustellen. Es gibt zum einen Maße, die die zentrale Tendenz der Stichprobe beschreiben, wie Modalwert, Median und arithmetisches Mittel. Zum anderen gibt es Maße, die Aussagen über die Variabilität einer Stichprobe zulassen (Spannweite, Standardabweichung, Varianz und Quantile). Die Angaben und Formeln der deskriptiven Statistik sind HEDDERICH UND SACHS (2016) entnommen (Hedderich & Sachs 2016).

### Maße zentraler Tendenz

Der **Mittelwert**, auch **arithmetisches Mittel** ( $\bar{x}$ ) genannt, gibt den Durchschnitt aller  $n$  ermittelten Werte  $x_n$  an. Er dividiert die Summe aller Werte  $x_n$  durch die Anzahl der Werte ( $n$ ):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Formel 2.6}$$

Der **Modalwert** ( $\bar{x}_{\text{Mod}}$ ) ist der Wert oder die Merkmalsausprägung, die am häufigsten auftritt. Am besten lässt sich der Modalwert in einer Häufigkeitstabelle oder grafischen Darstellung ermitteln.

Der **Median** ( $\bar{x}_{\text{Med}}$  oder  $\tilde{x}$ ) beschreibt den mittleren Wert der Stichprobe. Genau 50 % der Werte liegen oberhalb und die restlichen 50 % unterhalb des Medians. Der Median entspricht dem 50 %-Quantil und hat den Vorteil, dass er nicht anfällig gegenüber Extremwerten oder Ausreißern ist.

### Maße der Variabilität

Je weiter Modalwert, Median und Mittelwert voneinander abweichen, desto unsymmetrischer ist die Verteilung. Ein weiteres Maß zur Abbildung der Variabilität ist die **Spannweite** oder **Range** ( $R$ ). Die Spannweite ist als die Differenz zwischen dem maximalen und minimalen Wert der Stichprobe definiert.

$$R = x_{\max} - x_{\min} \quad \text{Formel 2.7}$$

Die Streuung einer Stichprobe wird mit der **Standardabweichung** ( $s$ ) bzw. **Varianz** ( $s^2$ ) beschrieben. Die Standardabweichung beschreibt die Wurzel der quadratischen Abweichungen der einzelnen Messpunkte vom Mittelwert geteilt durch die Anzahl der Werte minus eins.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad \text{Formel 2.8}$$

Die Varianz stellt die quadrierte mittlere Abweichung dar.

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad \text{Formel 2.9}$$

### 2.6.3 Hypothesentest

Der **Vorzeichentest** von Dixon und Mood eignet sich, um einen Trend in zwei verbundenen Stichproben mit ordinal skalierten, stetigen Daten aufzuzeigen (Clauß et al. 1995, Hartung et al. 2009, Hedderich & Sachs 2016). Grundlage ist, dass die Datenreihen X und Y auf abhängigen Stichproben basieren und  $x_i$  und  $y_i$  miteinander vergleichbar sind. Die Differenz der Messreihen wird mit folgender Formel beschrieben

$$d_i = x_i - y_i \quad \text{Formel 2.10}$$

Der Test prüft, ob die Differenzen symmetrisch um den Median gleich Null verteilt sind. Es werden die Anzahl der positiven und negativen Differenzen der Variablen gezählt. Die Nullhypothese beschreibt den Fall, dass die negativen gleich den positiven Differenzen sind und somit die Anzahl der Differenzen symmetrisch um Null verteilt sind. Die Prüfgröße  $n_T$  wird wie folgt ermittelt:

$$n_T = \min \{n_+ ; n_-\} \quad \text{Formel 2.11}$$

mit  $n_+$  Anzahl der positiven Differenzen  
 $n_-$  Anzahl der negativen Differenzen

Für große Stichproben ( $n > 20$ ) kann die normalverteilte Prüfgröße Z wie folgt bestimmt werden (Hartung et al. 2009)

$$Z = \frac{2 * n_T - N}{\frac{1}{2} \sqrt{N}}$$

**Formel 2.12**

mit  $N = n_+ + n_-$

In Tabelle 2.4 sind die kritischen Vergleichswerte aufgezeigt, die zur Hypothesenprüfung der Phase 1 (Kapitel 3.2.2) eingesetzt werden. Der Vergleichswert  $u_\alpha$  beschreibt den Quantilwert der Standardnormalverteilung für das Signifikanzniveau  $\alpha$ . Mit geringerem Signifikanzniveau wird die Wahrscheinlichkeit, die Nullhypothese beizubehalten, größer bzw. die Hypothese zu verwerfen. Das Signifikanzniveau von 5 % wird im Weiteren als relevant betrachtet. Eine Prüfung des 1 % und 0,1 % Signifikanzniveaus wird zur Verdeutlichung der Relevanz der Ergebnisse hinzugezogen.

Tabelle 2.4: Kritische Vergleichswerte zur Hypothesenprüfung für den Vorzeichentest (Clauß et al. 1995)

Test	Signifikanzniveau $\alpha$	Vergleichswert
<b>Vorzeichentest</b>	5,0 %	$u_{0,05} = 1,960$
	1,0 %	$u_{0,01} = 2,573$
	0,1 %	$u_{0,001} = 3,295$

Da der Vorzeichentest stetig verteilte Daten voraussetzt, dürfen streng genommen keine Paare mit identischen Rangplätzen auftreten. Sind die Bindungen (Probanden beantworten untersuchten Variablen mit der identischen Bewertung) weniger als 10 % des Gesamtstichprobenumfangs ist die Anwendung des Stichprobentests weiterhin zulässig (Clauß et al. 1995). Nach Hartung et al. (2009) wird empfohlen die Anzahl der Nulldifferenzen gleichmäßig auf die Anzahl der positiven und negativen Differenzen zu verteilen. Bei ungerader Anzahl von Nulldifferenzen wird maximal ein Fall nicht berücksichtigt.

Zum Vergleich mehrere stetig verteilten, ordinal skalierten Variablen eignet sich der **Friedman-Test** (auch Rangvarianzanalyse genannt) (Clauß et al.

1995, Hartung et al. 2009). Ausgangssituation der Untersuchung ist, dass n VP unter l Bedingungen untersucht werden.

Mit der Nullhypothese wird der Fall beschrieben, dass zwischen den l Bedingungen keine Unterschiede bestehen (alle VP haben die gleichen Variablen gewählt, sodass die Verteilung der l gemessenen Variablen gleich ist). Es wird die Homogenität der Stichprobe geprüft. Hierfür werden innerhalb einer Zeile Rangplätze vergeben. Der kleinste Wert erhält den Rang 1, der größte Wert den Rang p. Die Rangplatzsumme  $R_j$  beschreibt die Summe der Rangplätze die vergeben wurden. Die Prüfgröße  $X_S^2$  gibt die Verteilung der Rangsummenplätze an und bestimmt sich wie folgt:

$$X_S^2 = \left[ \frac{12}{n * l * (l + 1)} \sum_{i=1}^l R_j^2 \right] - 3 * n * (l - 1) \quad \text{Formel 2.13}$$

Treten Bindungen auf, so werden sog. Bindungsgruppen gebildet ( $k_i$ ) und gemittelte Rangplätze vergeben. Die angepasste Prüfgröße bestimmt sich mit folgender Formel:

$$korr(X_S^2) = \frac{12 * (l - 1) \sum_{j=1}^l [R_i - n * \frac{l+1}{2}]^2}{n * l^3 \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^k t_{jm}^3} \quad \text{Formel 2.14}$$

mit  $k_j$  = Anzahl unterschiedlicher Werte (Bindungsgruppen in der i-ten Zeile)

$t_{jm}$  = Anzahl gleicher Rangplätze in der i-ten Zeile

Für den Friedman-Test sind in Tabelle 2.5 die Vergleichswerte dargestellt, mit denen die Hypothesen aus Kapitel 3.2.2 auf Signifikanz geprüft werden. Ist die ermittelte Prüfgröße größer als der kritische Vergleichswert, so ist ein signifikanter Unterschied vorhanden und die Nullhypothese, dass alle Probanden die gleiche Verteilung aufweisen, wird abgelehnt.

Tabelle 2.5: Kritische Vergleichswerte zur Hypothesenprüfung für den Friedman-Test (Claus et al. 1995)

Test	Signifikanzniveau $\alpha$	Vergleichswert
Friedman-Test	5,0 %	$X^2_{0,05;2} = 5,99$
	1,0 %	$X^2_{0,01;2} = 9,21$
	0,1 %	$X^2_{0,001;2} = 13,8$

Bei metrisch verteilten Daten wird der Hypothesentest mit dem t-Test durchgeführt. Der t-Test vergleicht die Mittelwerte und testet, ob die Unterschiede zufällige oder signifikante Unterschiede aufweisen. Voraussetzung für den t-Test sind normalverteilte Stichproben, was mit Hilfe des Kolmogorov-Smirnov-Tests überprüft wird. Für abhängige, normalverteilte Stichproben wird der t-Test für abhängige Stichproben durchgeführt. Liegen abhängige aber nicht normalverteilten Daten vor, wird der Wilcoxon-Test für den Mittelwertvergleich angewendet. (Hedderich & Sachs 2016)

Das Signifikanzniveau  $\alpha$  wird in Abhängigkeit von der ermittelten Irrtumswahrscheinlichkeit bestimmt und ist wie in Tabelle 2.6 dargestellt definiert. Es wird in dieser Arbeit eine Fehlerwahrscheinlichkeit von  $p = 0,05$  als Grenze der Signifikanz angenommen. Die Sicherheitswahrscheinlichkeit beträgt dadurch 95 %.

Tabelle 2.6: Interpretation der ermittelten Irrtumswahrscheinlichkeit

Irrtumswahrscheinlichkeit	Bedeutung
$p > 0,05$	nicht signifikant
$p \leq 0,05$ ( $\alpha = 5,0$ %)	signifikant
$p \leq 0,01$ ( $\alpha = 1,0$ %)	sehr signifikant
$p \leq 0,001$ ( $\alpha = 0,1$ %)	höchst signifikant

## **2.7 Wesentliche Erkenntnisse zu Arbeitsstellen und zum Fahrverhalten**

AID werden nach den RSA-95 (2015) geplant. Die geänderte Verkehrsführung wird durch gelbe Markierung angezeigt, die die dauerhafte weiße außer Kraft setzt (StVO 2016). In Abhängigkeit des zugrundeliegenden Fahrbahnquerschnitts und vor allem der Rand- und Seitenstreifenbreiten entstehen unterschiedliche Markierungskonstellationen. Bei Querschnitten mit Seitenstreifen ist die rechte Fahrbahnbegrenzung in der Nähe der gelben vorübergehenden Leitlinie vorhanden. Ebenfalls liegt bei der übergeleiteten Fahrtrichtung die ursprünglich linke Fahrstreifenbegrenzung nahe der gelben vorübergehenden Fahrbahnbegrenzung.

Verschiedene Untersuchungen zum Spurverhalten auf Landstraßen haben gezeigt, dass Fahrbahn- und Fahrstreifenbreite sowie die vorhandene Markierung einen Einfluss auf das Spurhalten haben (Leutzbach et al. 1981, McKnight et al. 1998, Reichart 2001). Um den Einfluss unterschiedlicher Markierungskonstellationen zu untersuchen, wird die Fahrbahn- und Fahrstreifenbreite in der folgenden Untersuchung konstant gehalten.

# 3 Detektion kritischer Markierungskonstellationen in AID

## 3.1 Allgemeines

Im Folgenden wird der Begriff AID für die untersuchten AID-Querschnitte mit unterschiedlichen Markierungskonstellationen verwendet. Alle dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf den Bereich des konstanten Querschnitts (kQ) innerhalb der AID. Innerhalb des kQ findet keine Veränderung der Fahrstreifenbreiten und der Markierungskonstellationen statt. Zulauf, Überleitungen und Verschwenkungen werden im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Das Geschwindigkeitsverhalten innerhalb der AID zeigt keine Unterschiede in Abhängigkeit von der Markierungskonstellation. Alle VP halten sich mit sehr geringer Abweichung ( $\Delta$  ca. 5 km/h) an die vorgegebene Geschwindigkeitsbegrenzung. Die mittleren Geschwindigkeiten sind im Weiteren angegeben, allerdings nicht näher erläutert.

Die statistischen Auswertungen und Hypothesentests in Phase 2B und Phase 3 sind sowohl für den Median als auch den Mittelwert durchgeführt und angegeben.

Im Anhang 7.14 sind zwei Übersichtsblätter (DIN A4 zum Ausklappen) mit allen untersuchten Querschnitten und Abkürzungen der AID abgedruckt. Um die Vergleiche und Interpretationen der Ergebnisse, insbesondere aufgrund der vielen Abkürzungen, zu erleichtern, können diese Übersichtsblätter verwendet werden.

## **3.2 Phase 1: Befragung zum Verhalten und zur Wahrnehmung von AID**

### **3.2.1 Methodisches Vorgehen und Ergebnisse**

Phase 1 wird in Form einer Online-Befragung durchgeführt (siehe auch Strauß 2015). Mit der Plattform SoSci Survey wird diese erstellt und ein Link zur Befragung generiert. Die aktive Stichprobenziehung erfolgt nach dem Schneeballverfahren, indem der Aufruf zur Teilnahme und Weiterleitung der Online-Befragung per E-Mail verschickt wird (Häder 2015).

Der Online-Fragebogen zur Wahrnehmung und subjektiven Bewertung von Markierungskonstellationen innerhalb von AID wird von 752 Personen komplett ausgefüllt. Das Kollektiv setzt sich aus 41,4 % Frauen und 58,6 % Männer zusammen. Im Vergleich zu den Führerscheinbesitzern in Deutschland ist sowohl die Gruppe der unter 30-jährigen als auch der 50- bis 59-jährigen überrepräsentiert (vgl. Abbildung 3.1) (ADAC 2010). Die maximale Abweichung der gezogenen Stichprobe von der Verteilung des ADAC liegt in der Altersgruppe 25 bis 29 Jahren vor. Diese Altersgruppe ist über das Internet am besten erreichbar. Gleichzeitig befindet sich das persönliche Umfeld des Untersuchenden in dieser Altersgruppe. Die Altersgruppe zwischen 50 und 59 Jahren ist die Generation der Eltern des Untersuchenden, die hier auch vermehrt teilgenommen hat. Weder Alter noch Geschlecht haben einen Einfluss auf die subjektive Bewertung der Markierungskonstellationen.

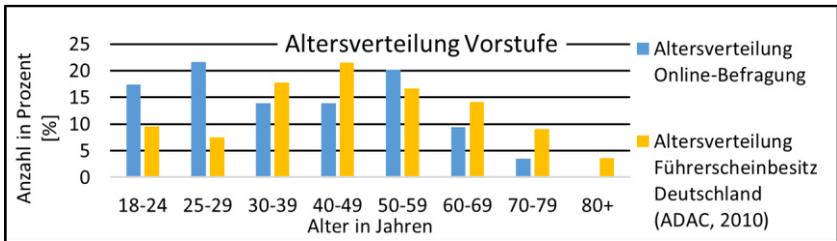


Abbildung 3.1: Altersverteilung Phase 1 im Vergleich mit Führerscheinbesitzern in Deutschland

Die Befragung gliedert sich in vier Teile und beginnt mit einleitenden Fragen, die auf das Thema Markierung in Arbeitsstellen hinführen. In Teil zwei wird mit Hilfe von Skizzen und Abbildungen die subjektive Bewertung und Wahrnehmung von unterschiedlichen Markierungskonstellationen in AID erfragt. Im dritten Teil wird das Wissen zum Straßenverkehrsrecht und zum Verhalten im Straßenverkehr ermittelt. Der vierte Teil erhebt sozialstatistische Kenngrößen der Teilnehmer. Der gesamte Fragebogen ist in Anhang 7.2 abgebildet.

Generell empfinden die Befragten Gelb als Farbe für vorübergehende Markierung sowie Weiß für dauerhafte Markierung als geeignet. Die Verkehrsregeln für Markierung sind dem Großteil der Befragten (> 90 %) bekannt.

Mehr als 90 % der Befragten geben an, dass Markierung zur Orientierung im Straßenverkehr geeignet ist. Vor allem im Bereich von Verschwenkungen und Überleitungen zu Beginn und Ende einer AID ist die Orientierung sehr wichtig. Hier weicht die Fahrbahn von der sonst gestreckten Linienführung auf BAB ab und Markierungen kreuzen sich oder laufen auseinander. Verschwenkungen und Überleitungen werden als nicht irritierend bewertet, wohingegen der kQ innerhalb einer AID mit paralleler gelber und weißer Markierung als irritierend bewertet wird. Für die weitere Untersuchung folgende Hypothesen formuliert:

1. Die Lage der dauerhaften **durchgezogenen** Markierung (weiß) beeinflusst die subjektive Wahrnehmung von paralleler Markierung (gelb).
2. Die Lage der dauerhaften **unterbrochenen** Markierung (weiß) beeinflusst die subjektive Wahrnehmung von paralleler Markierung (gelb).

3. Die **Strichart** (durchgezogen / unterbrochen) hat keinen Einfluss auf die subjektive Wahrnehmung von paralleler Gelb- und Weißmarkierung.
4. Der **Einfluss auf die Spurhaltung** ist unabhängig davon, ob sich die dauerhafte Markierung (weiß) links oder rechts im Fahrstreifen befindet.

Hypothese 1 und Hypothese 2 überprüfen beide die subjektive Bewertung parallel verlaufender Markierungen. Hypothese 2 bezieht sich auf den linken Fahrstreifen und die darin liegende unterbrochene Markierung (Leitlinie) und Hypothese 1 auf den rechten Fahrstreifen mit der darin liegenden durchgezogenen Markierung (Fahrbahnbegrenzung).

### 3.2.2 Prüfen der Hypothesen

Die Prüfung der Hypothesen erfolgt mit Hilfe des Vorzeichen- und Friedman-Tests (vgl. Kapitel 2.6.3). Die verwendeten kritischen Vergleichswerte in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Signifikanzniveaus sind in Tabelle 2.4 (S. 51) und Tabelle 2.5 (S. 53) dargestellt. Die Markierungskonstellationen in Hypothese 1 und Hypothese 2 werden von den Probanden mit einer fünfstufigen Skala von „sehr irritieren“ bis „überhaupt nicht irritierend“ bewertet.

#### 1. Die Lage der dauerhaften durchgezogenen Markierung beeinflusst die subjektive Wahrnehmung von paralleler Markierung.

Mit Hypothese 1 wird die Wahrnehmung der weißen durchgezogenen Markierung innerhalb des gelb markierten Fahrstreifens untersucht. Es wird unterschieden zwischen weißer Markierung im gelb markierten Fahrstreifen rechts (Fall A), mittig (Fall B) und links (Fall C) (Abbildung 3.2). Die Prüfgröße des Friedman-Test ergibt sich zu  $X^2_S = 324,42$  und liegt deutlich über den ermittelten Vergleichswerten von 13,8 (vgl. Tabelle 2.5). Es besteht ein **höchst signifikanter Unterschied**.

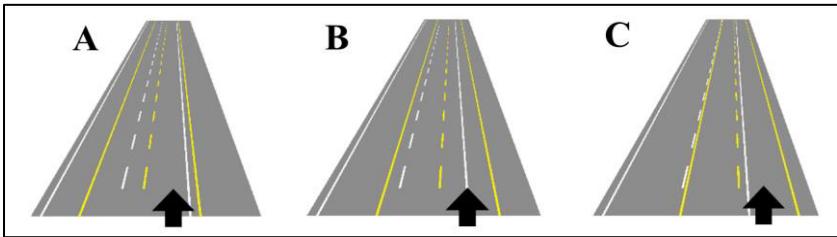


Abbildung 3.2: Hypothese 1: Weiße Fahrbahnbegrenzung (Z 295) innerhalb des Fahrstreifens

Um diesen Unterschied genauer zu bewerten, wird ein paarweiser Vorzeichen-test durchgeführt (vgl. Tabelle 3.1). Die auffälligste Konstellation wird gefunden, indem die Fälle A, B und C miteinander verglichen werden.

Tabelle 3.1: Paarweiser Vorzeichen-test Hypothese 1: Dauerhaft durchgezogene Markierung innerhalb des rFS (n = 749)

zu vergleichende Fälle	Differenz			Ermittelte Prüfgröße	Ermittelte Signifikanz
	Pos.	Neg.	Null		
Fall A mit B	155	112	485	$Z = -1,536$	$\alpha \geq 0,05$
Fall B mit C	63	363	323	$Z = -10,969$	$\alpha \leq 0,001$
Fall A mit C	56	334	359	$Z = -10,165$	$\alpha \leq 0,001$

Für den Vergleich zwischen Fall A und B liegt **kein signifikanter Unterschied vor**. Die rechtsseitige (Fall A) und mittige Lage (Fall B) der weißen Markierung wird kaum unterschiedlich bewertet. Der Vergleich von Fall C (links im FS) mit Fall A (rechts im FS) bzw. Fall C mit Fall B (mittig im FS) ergibt einen **höchst signifikanten Unterschied**. Die im Fahrstreifen links vorhandene Markierung (Fall C) wird weniger irritierend empfunden als die mittig oder rechtsseitig liegende Markierung.

## 2. Die Lage der dauerhaften unterbrochenen Markierung beeinflusst die subjektive Wahrnehmung von paralleler Markierung.

Auch in Hypothese 2 wird die subjektive Bewertung parallel verlaufender Markierung untersucht. Dazu wird die unterbrochene dauerhafte Markierung

(weiße Leitlinien) im linken Behelfsfahrfstreifen betrachtet. Die Probanden bewerten analog zu Hypothese 1 die in Abbildung 3.3 dargestellten drei Fälle (A bis C).

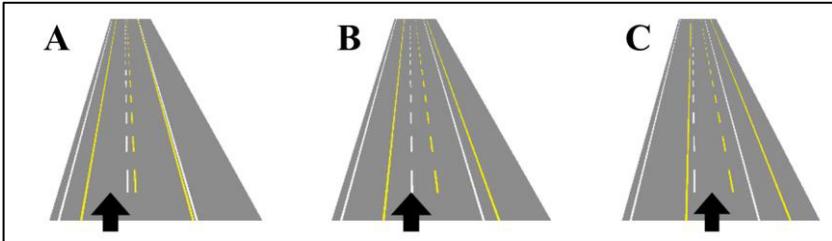


Abbildung 3.3: Hypothese 2: Weiße Leitlinie (Z 340) innerhalb des Fahrstreifens

Die Prüfgröße des Friedman-Tests ergibt sich zu  $X^2_5 = 111,289$  und liegt deutlich über den in Kapitel 2.6.3 ermittelten Vergleichsgrößen. Es liegt ein statistisch **höchst signifikanter Unterschied** vor. Für die Differenzierung zwischen den einzelnen Fällen wird ebenfalls der paarweise Vorzeichentest angewendet (Tabelle 3.2).

Tabelle 3.2: Paarweiser Vorzeichentest Hypothese 2: Dauerhaft unterbrochene Markierung innerhalb des IFS (n = 745)

zu vergleichende Fälle	Differenz			Ermittelte Prüfgröße	Ermittelte Signifikanz
	Pos.	Neg.	Null		
Fall A mit B	307	123	315	$Z = -6,746$	$\alpha \leq 0,001$
Fall B mit C	133	150	462	$Z = -0,623$	$\alpha \geq 0,05$
Fall A mit C	270	113	362	$Z = -5,752$	$\alpha \leq 0,001$

Zwischen Fall B und Fall C liegt **kein signifikanter Unterschied** vor; die ermittelte Prüfgröße ist betragsmäßig kleiner als die in Tabelle 2.4 ermittelte Vergleichsgröße von  $u_{0,05} = 1,960$  (Irrtumswahrscheinlichkeit 5 %). Zwischen Fall A (rechts im FS) und Fall B (mittig im FS) bzw. Fall A und Fall C (links im FS) liegt ein **höchst signifikanter Unterschied** vor, da hier die ermittelten

Prüfgrößen betragsmäßig über den ermittelten Vergleichswert für eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,1 % liegen ( $u_{0,001} = 3,295$ , Tabelle 2.4 S. 51).

Die mittige (Fall B) und links liegende weiße Markierung (Fall C) werden irritierender bewertet als die rechts liegende Markierung (Fall A). Hypothese 1 und Hypothese 2 stimmen inhaltlich überein: Weiße Markierung in der Nähe des Fahrbahnrandes wird irritierender bewertet als in der Fahrbahnmitte.

### 3. Die Strichart hat keinen Einfluss auf die subjektive Wahrnehmung von paralleler Gelb- und Weißmarkierung.

Mit Hypothese 3 wird geprüft, ob bei gleicher Lage im Fahrstreifen die unterschiedlichen Markierungsarten (durchgezogen oder unterbrochen) einen Einfluss auf die Wahrnehmung haben. Zur Prüfung wird eine neue Variable benötigt, die für jede VP durch den Median der Angaben der zugrundeliegenden Fragen von Hypothese 1 und Hypothese 2 gebildet wird. Somit ergeben sich für jeden Probanden zwei neue Variablen ( $SW_{\text{unterbrochen}}$  und  $SW_{\text{durchgezogen}}$ ), die zwei Verteilungen einer abhängigen Stichprobe darstellen und somit den Anforderungen des Vorzeichentests genügen. Das Ergebnis des Vorzeichentests ist in Tabelle 3.3 dargestellt.

Tabelle 3.3: Vorzeichentest Hypothese 3: Unterschied paralleler Gelb- und Weißmarkierung (n = 741)

zu vergleichende Fälle	Differenz			Ermittelte Prüfgröße	Ermittelte Signifikanz
	Pos.	Neg.	Null		
$SW_{\text{Unterbrochen}}$ mit $SW_{\text{Durchgezogen}}$	124	141	476	$Z = -0,624$	$\alpha \geq 0,05$

Der Vergleich der Prüfgröße mit dem Vergleichswert ergibt **keinen signifikanten Unterschied**. Somit wird die Hypothese angenommen. Die Markierungsart (durchgezogen oder unterbrochen) hat subjektiv keinen Einfluss auf die Wahrnehmung parallel verlaufender dauerhafter weißer und vorübergehender gelber Markierung.

#### 4. Die Beeinflussung der Spurhaltung ist unabhängig davon, ob sich die dauerhafte Markierung links oder rechts im Fahrstreifen befindet.

Hypothese 4 überprüft, ob die weiße Markierung im gelb markierten Fahrstreifen subjektiv die Spurhaltung beeinflusst. Die Befragten geben im Fragebogen an, ob sie im Fahrstreifen in Abhängigkeit der Markierung tendenziell weiter links oder rechts fahren. Es liegen zwei Verteilungen einer abhängigen Stichprobe vor, weshalb erneut der Vorzeichentest verwendet werden kann (vgl. Tabelle 3.4).

Tabelle 3.4: Vorzeichentest Hypothese 4: Beeinflussung der Spurhaltung durch dauerhafte Markierung (n = 753)

zu vergleichende Fälle	Differenz			Ermittelte Prüfgröße	Ermittelte Signifikanz
	Pos.	Neg.	Null		
Spurhaltung: weiße Markierung links vs. rechts im FS	76	128	549	$Z = -1,896$	$\alpha \geq 0,05$

Die Prüfgröße ist kleiner als die in Tabelle 2.4 (S. 51) ermittelten Vergleichsgrößen. Die Nullhypothese, dass die Spurhaltung unabhängig der Lage der weißen Markierung im Fahrstreifen ist, wird angenommen. Als Ergebnis ist festzuhalten, dass die Markierungskonstellation subjektiv keinen Einfluss auf die Spurhaltung hat.

### 3.2.3 Zusammengefasste Ergebnisse Phase 1

Weiß als Farbe für dauerhafte Markierung und gelb für vorübergehende Markierung ist nach den Ergebnissen der Befragung für die Orientierung im Straßenverkehr geeignet. Eine komplexe Markierungskonstellation aus gelb und weiß entsteht im Anfangsbereich der Arbeitsstellen durch das Verschwenken bzw. Überleiten der Fahrstreifen. Die Teilnehmer der Befragung bewerten die Markierung im Verschwenkungs- und Überleitungsbereich im Vergleich zum kQ innerhalb der AID als weniger irritierend. Möglicherweise ist die

Aufmerksamkeit im Anfangsbereich durch die Sondersituation Arbeitsstelle bereits geschärft, sodass die komplexere Konstellation keine Herausforderung darstellt. Innerhalb der Arbeitsstelle ist die Aufmerksamkeit aufgrund der Gewöhnung möglicherweise wieder geringer, sodass die parallel verlaufende gelbe und weiße Markierung als irritierend bewertet wird. Auch wenn einem Großteil der Befragten klar ist, dass die gelbe Markierung die weiße außer Kraft setzt, ist die weiße Markierung doch die Üblichere und wird somit nicht völlig ignoriert.

Nicht jede Markierungskonstellation innerhalb der Arbeitsstelle wird gleich empfunden (Hypothese 1 und Hypothese 2). Auf dem rechten gelb markierten Fahrstreifen geben die Befragten an, dass weiße Markierung rechts oder mittig irritierender ist als weiße Markierung links. Weiße Markierung innerhalb des gelb markierten linken Fahrstreifens wird links und mittig als irritierender bewertet. Beide Hypothesen lassen sich zusammenfassen: Je näher die dauerhafte Markierung der Fahrbahnbegrenzung des Behelfsfahrstreifens liegt, desto irritierender wird diese beurteilt.

Die Vermutung, dass unterschiedlich irritierende Markierung auch das selbst eingeschätzte Spurverhalten beeinflusst, wird nicht bestätigt. Subjektiv hat die Markierungskonstellation (Hypothese 4) keinen Einfluss auf das Spurverhalten. Die Beobachtung anderer Verkehrsteilnehmer im realen Verkehr lässt allerdings vermuten, dass sich das Spurverhalten aufgrund unterschiedlicher Markierungskonstellationen ändert.

Im Folgenden wird das Fahrverhalten beim Befahren systematisch unterschiedlicher Markierungskonstellationen aufgezeichnet und ausgewertet. Die subjektive Wahrnehmung, dass die Spurwahl unabhängig der Markierungskonstellation erfolgt, soll mit objektiv gemessenen Daten in Phase 2 weiter untersucht werden.

## 3.3 Phase 2A: Untersuchung von Markierungskonstellationen im realen Verkehr

### 3.3.1 Aufbau und Ablauf der Untersuchung

Das Fahrverhalten und die Wahrnehmung im realen Verkehr werden mit dem vom Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation (ifab) zur Verfügung gestellten Versuchsfahrzeug erhoben (siehe auch Bendrich 2015). Das Versuchsfahrzeug, ein VW Passat 2,0 TDI Variant, ist mit einem remote mounted Eye-Tracking System der Firma Smart Eye (SmartEye Pro 5.9) und einem Computer zur Aufzeichnung der Fahrzeugdaten ausgestattet (vgl. Abbildung 3.4). Das Eye-Tracking-System besteht aus fünf Kameras, die auf den Fahrzeugführer gerichtet sind und einer weiteren nach vorne gerichteten Szenenkamera (vgl. Abbildung 3.4 rechts).



Abbildung 3.4: Versuchsfahrzeug (links), Eye-Tracking System im Versuchsfahrzeug (rechts)

Die Eye-Tracking Daten werden in einer Frequenz von 60 Hz synchron mit den Fahrzeugdaten aufgezeichnet. Die Fahrzeugdaten werden mindestens mit 1 Hz, bei Änderungen eines Parameters mit maximal 60 Hz, gespeichert. Die Überlagerung der Aug- und Szenenkamera erfolgt mit 25 Hz innerhalb der Smart Eye Software SmartRecorder und ist nicht mit den aufgezeichneten Eye-Tracking Daten und Fahrzeugdaten synchronisiert. Die auf der Szenenkamera basierende Auswertung der AOI erfolgt daher unabhängig von der Auswertung der Eye-Tracking Daten, wie beispielweise der Anzahl und Dauer der Fixationen.

Aufgrund der für die Fragestellung günstigen Markierungskonstellation wird eine Arbeitsstelle auf der BAB A5 bei Bruchsal gewählt. In der Arbeitsstelle wird eine Flächendeckenerneuerung (FDE) zwischen den Anschlussstellen (AS) Bruchsal und Karlsruhe Nord ausgeführt. Der Verkehr wird mit einer 4s+0 Verkehrsführung auf der Fahrbahn in Richtung Süden geführt. Die Verkehrsführung ist an den Regelplan DII/2 der RSA-95 angelehnt (vgl. Anhang 7.1) (RSA-95 2015). In Abbildung 3.5 ist die AID in Fahrtrichtung Nord (FR Nord) (links) und in Fahrtrichtung Süd (FR Süd) (rechts) dargestellt.



FR Nord



FR Süd

Abbildung 3.5: Untersuchte AID Abschnitte der BAB A5 (Phase 2A)

Um möglichst gleiche Versuchsbedingungen für alle VP zu erreichen, wird die Untersuchung während der Sommerferienzeit 2015, wochentags, außerhalb der Spitzenstunden, bei Tageslicht durchgeführt. Das Verkehrsaufkommen war so stark, dass es im Vorfeld der AID zu Verkehrsbehinderungen kam.

Die BAB A5 gehört in diesem 6-streifigen Abschnitt mit einem DTV von über 100.000 Kfz/24h und einem SV-Anteil von ca. 15 % zu den zehn meist befahrenen BAB-Abschnitten in Baden-Württemberg (Ministerium für Verkehr und Infrastruktur BW 2015). Nach Angaben des Verkehrsmonitorings 2014 liegt die Verkehrsbelastung von 6 bis 18 Uhr bei 10.000 Kfz/h. Die Kapazität der Arbeitsstelle, die nach dem Verfahren des Leitfadens des Bundes ermittelt werden kann, liegt bei 6.780 Kfz/h (vgl. Anhang 7.3) (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2011).

Ein Großteil der Verkehrsbehinderungen vor der AID kann durch die nahe gelegene Betriebsumfahrt (ca. 800 m vor Beginn der Verschwenkung) mit einer Ausnahmegenehmigung umfahren werden. Bei Verkehrsbehinderungen innerhalb der Arbeitsstelle wird der Versuch nicht durchgeführt.

Zu Beginn des Versuchs wird die VP unterwiesen und mit dem Fahrzeug vertraut gemacht. Nach der Kalibrierung und Justierung der Messtechnik beginnt die Fahrt. Der Versuchsleiter begleitet die Fahrt auf der Rückbank und leitet die VP entlang der Versuchsstrecke. Vom Fond des Fahrzeugs aus dokumentiert und überwacht der Versuchsleiter die Messtechnik. Die AID wird zuerst in FR Nord und anschließend in FR Süd befahren. Nach der Rückkehr zum Ausgangspunkt (KIT) füllt die VP zum Abschluss einen Fragebogen aus.

Insgesamt nehmen 30 Personen an der Untersuchung teil. Aufgrund technischer Probleme der Datenaufzeichnung reduziert sich das untersuchte Kollektiv auf 24 Personen (vgl. Abbildung 3.6). Das Durchschnittsalter der Frauen liegt bei 31 Jahren, das der Männer bei 33 Jahren (Gesamtdurchschnittsalter: 32 Jahre). Der Median der Stichprobe liegt bei 27 Jahren. 80 % (19 Personen) besitzen einen eigenen Pkw. Die mittlere wöchentliche Fahrleistung beträgt 170 km/Woche. Davon werden 99 km/Woche auf der BAB zurückgelegt.

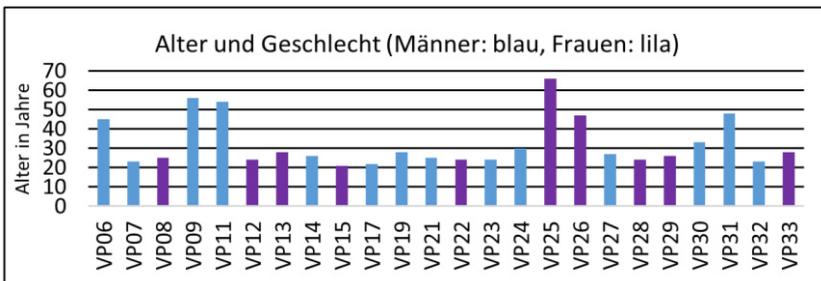


Abbildung 3.6: Alter und Geschlecht der Versuchspersonen (Phase 2A)

### 3.3.2 Details zur Erhebung und Auswertung

Die Länge des kQ innerhalb der AID auf der BAB A5 beträgt 3,63 km (km 606,72 bis km 610,35). Für die auf die Gegenfahrbahn übergeleiteten zwei Fahrstreifen (FR Nord) wird die dauerhaft weiße Markierung auch im Arbeitsstellenfall genutzt. In FR Süd werden die zwei Fahrstreifen verschwenkt und gelb markiert. Die weiße dauerhafte Markierung ist nicht entfernt worden, sodass in FR Süd eine Markierungskonstellation aus weiß und gelb vorliegt (vgl. Abbildung 3.5).

Die BAB A5 läuft im Netzabschnitt zwischen Karlsruhe und Walldorf im Oberrheingraben, wodurch keine großen Höhenunterschiede vorhanden sind. Die gestreckte und flache Trassierung ist mit derjenigen, die später im Fahr Simulator untersucht werden soll, vergleichbar (vgl. Kapitel 3.4, Phase 2B).

Die Fahrbahn ist 15 m breit und wird einem RQ 37 zugeordnet. Der Unterschied zum RQ 37,5 besteht in dem um 0,25 m schmalen Randstreifen auf der Seite des Mittelstreifens. In FR Nord wird der ursprünglich linke Fahrstreifen zum rechten Fahrstreifen und der mittlere Fahrstreifen wird mit einer Breite von 3,0 m als linker Fahrstreifen benutzt (vgl. Abbildung 3.7). Der linke Fahrstreifen in FR Süd wird ebenfalls mit einer Breite von 3,0 m ausgebildet. Der rechte Fahrstreifen in FR Süd ist gegenüber dem rechten Fahrstreifen in FR Nord um 0,25 m schmaler und insgesamt nur 3,5 m breit.

Die Fahrstreifenbreiten auf der BAB A5 sind für AID eher breit angelegt. Bezogen auf die späteren Versuche im Fahr Simulator ist anzumerken, dass der linke Fahrstreifen mit 3,0 m in beiden Fahrtrichtungen 25 cm schmaler ist als im Fahr Simulator (Phase 2B und Phase 3) und der rechte Fahrstreifen in FR Nord um 50 cm (3,75 m) und in FR Süd um 25 cm (3,50 m) breiter ist als im Fahr Simulator.

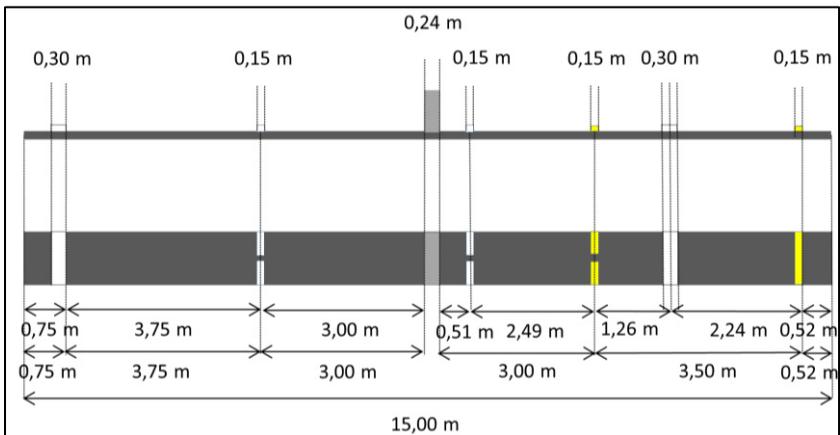


Abbildung 3.7: Querschnitt AID BAB A5 (Phase 2A)

Für die Auswertung der AOI werden die von der Szenenkamera aufgezeichneten Videos verwendet. Diese werden innerhalb der Smart Eye Software (SmartRecorder) automatisch mit den Fixationen überlagert und der Blick durch einen blauen Punkt im Video dargestellt. Die aufgezeichneten Videos werden auf die AID-Abschnitte in FR Nord und Süd beschnitten und manuell mit Hilfe des Video-Klicker-Tools ausgewertet (vgl. Abbildung 3.8). In der Oberfläche des Video-Klicker-Tools wird oben links das Videobild mit dem blauen Punkt, der den fixierten Bereich angibt, angezeigt. Rechts oben sind Icons implementiert, die die auszuwertenden AOI darstellen und beim Klicken einen definierten Code mit Zeitbezug in ein weiteres Tabellenblatt schreiben.

Neben den AOI werden weitere zusätzliche Informationen zum Verkehrszustand, der Witterung oder der umgebenden Fahrzeuge aus dem Video-Bild ausgewertet. Der Verkehrszustand wird über zwei Parameter erfasst: Zum einen wird geprüft, ob ein vorausfahrendes Fahrzeug (Abstand kleiner als 50 m) vorhanden ist, und zum anderen wird die Verkehrslage qualitativ in freien, gebundenen oder gestauten Verkehr eingeordnet. Freier Verkehr wird definiert als Situation, in der die VP sich nicht nach anderen Fahrzeugen richten muss und ihr Spur- und Geschwindigkeitsverhalten frei wählen kann. Gebundener Verkehr bedeutet, dass der Verkehr fließt, allerdings eine Anpassung an andere Verkehrsteilnehmer erfolgen muss. Wenn der Verkehr kurzzeitig oder länger zum Stillstand kommt, wird dies als Stau verstanden (FGSV 2012).

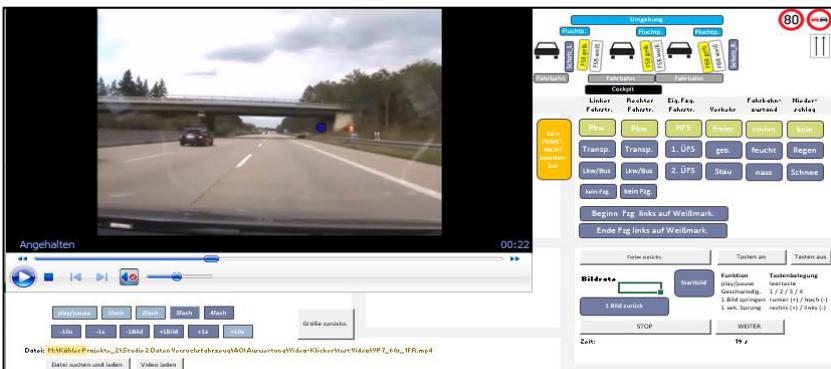


Abbildung 3.8: Oberfläche des Video-Klicker-Tools

Die Daten werden zwar nach Verkehrssituation frei, gebunden und Stau differenziert, allerdings ist zu berücksichtigen, dass in FR Nord generell mehr Verkehr herrscht. Weiter ist anzumerken, dass das Eye-Tracking System abhängig von der Kalibrierung unterschiedlich genaue Messwerte liefert. Mit zunehmender Entfernung zum Fahrzeug treten Abweichungen auf. Je weiter der Blickpunkt (blauer Punkt) entfernt ist, desto schwieriger ist es, diesen genau einem AOI zuzuweisen. Fixationen auf die Markierung können dann z. B. als Fixationen auf die Fahrbahn gewertet werden.

Aufgrund eines Übermittlungsfehlers in der Datenaufzeichnung wurden unter anderem die GPS-Koordinaten und der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug falsch bzw. gar nicht aufgezeichnet. Die Auswertung der Fahrdaten dieser Phase wird daher nicht weiter vertieft.

### 3.3.3 Ergebnisse zum Blickverhalten

Der Vergleich der Box-Plots der Fixationen im Bereich von 100 bis 2.500 ms für die FR Nord und Süd ergibt ein ähnliches Bild (vgl. Abbildung 3.9). Die längste Fixation ist für FR Süd etwas höher (624 ms) als für FR Nord (603 ms). Im Mittel sind die Fixationsdauern in FR Süd geringer als in FR Nord. Kürzere Fixationsdauer weisen auf komplexere Situationen hin (vgl. Kapitel 2.2.4).

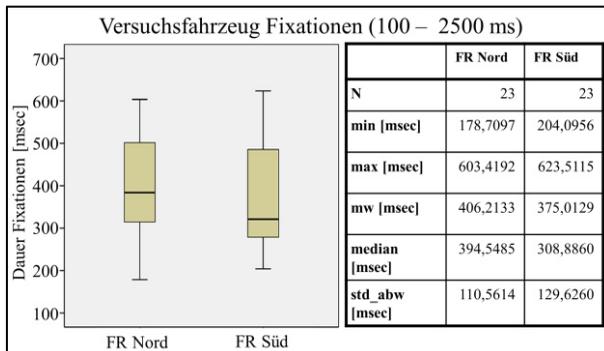


Abbildung 3.9: Mittlere Fixationsdauern der AID BAB A5 (Phase 2A)

Die Ergebnisse der AOI-Auswertung sind nach Fahrtrichtung (FR Süd / Nord), nach vorherrschenden Verkehrszustand (frei, gebunden und Stau) sowie dem befahrenen Fahrstreifen (HFS, 1ÜFS) differenziert und dargestellt.

### FR Nord

Der Fokus der Untersuchung liegt auf den unterschiedlichen Markierungskonstellationen. Die weiße gültige Fahrbahnmarkierung wird auf dem linken Fahrstreifen (1ÜFS) 3,89 % der Zeit fixiert und auf dem rechten Fahrstreifen (HFS) 4,28 % (vgl. Abbildung 3.10). Ein Vergleich der Verkehrszustände frei und gebunden zeigt, dass auf dem HFS die weiße Markierung im freien Verkehr mehr angeblickt wird (5,4 %) als im gebundenen (3,37 %). Auf dem 1ÜFS verhält es sich genau umgekehrt: Die weiße Markierung wird im gebundenen Verkehr mit 4,07 % häufiger fixiert als im freien Verkehr (2,88 %).

Im gebundenen Verkehr steigt der Anteil der Fixationen, die auf andere Verkehrsteilnehmer fallen, an. Je mehr Verkehr die VP umgibt, desto weniger wird die Umgebung angeblickt. Die VP konzentrieren sich zunehmend auf die vorausliegende Verkehrssituation. Der Gegenverkehr in FR Nord wird auf dem linken Fahrstreifen (1ÜFS) häufiger fokussiert als auf dem rechten (HFS).

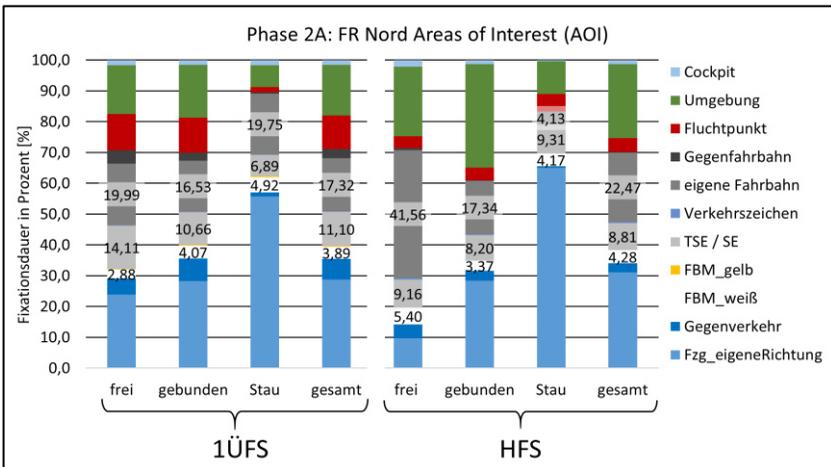


Abbildung 3.10: AOI-Auswertung AID BAB A5 FR Nord (Phase 2A)

## FR Süd

In FR Süd wird die Verkehrsführung durch gelbe vorübergehende Markierung angezeigt, die die weiße dauerhafte Markierung außer Kraft setzt. Die gelbe Markierung wird in allen Verkehrszuständen und unabhängig des Fahrstreifens weniger häufig fixiert als die ungültige weiße (vgl. Abbildung 3.11). Auf dem 1ÜFS wird die weiße Markierung im freien Verkehrszustand sogar knapp 10 % der Zeit angeblickt. Auf dem HFS wird die weiße Markierung im gebundenen Verkehr am häufigsten fixiert.

Die eigene Fahrbahn wird in FR Süd im freien Verkehr häufiger fixiert als im gebundenen. Im gebundenen Verkehr werden vermehrt die umgebenden Verkehrsteilnehmer angeblickt (vgl. Abbildung 3.11).

Es ist anzumerken, dass für den HFS im gebundenen Verkehr  $\frac{5}{8}$  der insgesamt 8 % der Blicke von einer VP erfolgen. In den anderen Verkehrszuständen, sowie auf dem 1ÜFS, ist auf einer breiteren Datenbasis ein ähnliches Verhältnis zu erkennen, weshalb die Daten als verwertbar bewertet werden. Die Ergebnisse sollten allerdings mit Hilfe weitere Forschungen überprüft werden.

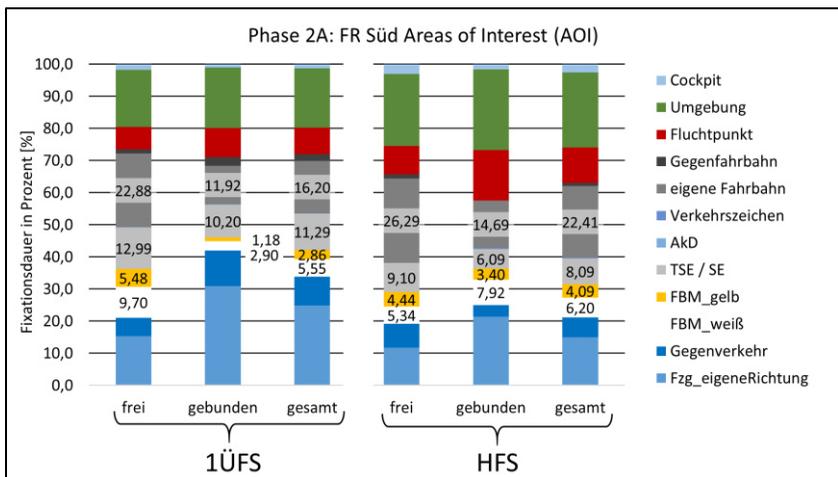


Abbildung 3.11: AOI Auswertung AID BAB A5 FR Süd (Phase 2A)

## Vergleich FR Nord und Süd

Ergebnis der AOI-Untersuchung ist, dass die Markierung weniger als 10 % der Zeit angeblickt wird. In FR Nord wird die Markierung 4 bis 5 %, in FR Süd ca. 10 % der Zeit fixiert, was darauf hindeutet, dass die Markierungskonstellation in FR Süd mehr Aufmerksamkeit erregt als in FR Nord. Die Fahraufgabe auf BAB ist durch die gestreckte Linienführung weniger anspruchsvoll als auf Landstraßen und bedarf daher weniger Orientierung an der Markierung. Erfahrene Fahrzeugführer nehmen die Markierung größtenteils peripher wahr und nur in komplexen Situationen wird diese fixiert (Jechlinger 2008, Hristov 2009). Die aus der Literatur ermittelten Fixationsanteile sind für Landstraßen und speziell die Kurvenfahrt meist höher und liegen bei ca. 20 % (Olson et al. 1989, Serafin 1993).

Andere Verkehrsteilnehmer werden in FR Nord im Vergleich zur FR Süd häufiger fixiert. In FR Süd wird der Verkehr in gleicher Richtung weniger häufig fixiert, der Gegenverkehr dafür häufiger als in FR Nord. Der Anteil der Umgebung und des Fluchtpunkts ist in FR Süd etwas höher als in FR Nord. Generell deutet der hohe Anteil des AOI Umgebung in FR Nord und Süd darauf hin, dass die Kapazitätsgrenze der Fahrer noch nicht erreicht ist. Für das sichere Führen des Fahrzeugs sind die Blicke in die Umgebung nur bedingt relevant.

Anhand der Ergebnisse des Fragebogens ist anzumerken, dass die Höhe der TSE und damit die Sichtverbindung zum Gegenverkehr relevant ist. Eine VP hat im Freitext angegeben, dass eine Sichtverbindung zum Gegenverkehr wichtig ist und eine andere VP genau das Gegenteil. Diese offene Fragestellung wird in dieser Arbeit nicht weiterverfolgt.

Die Fahrbahn wird in beiden Fahrtrichtungen auf dem 1ÜFS weniger häufig fixiert als auf dem HFS. Wie die Markierung, wird auch die Fahrbahn im freien Verkehrszustand häufiger angeblickt als im gebundenen. Die Fahrbahn hat in FR Nord und Süd Flickstellen, da die FDE noch nicht durchgeführt wurde. Insgesamt 4 VP (16,7 %) geben an, dass die Flickstellen optisch und haptisch irritierend sind. Bei den Blickdaten ist daher zu berücksichtigen, dass die Fahrbahn aufgrund der Flickstellen, vor allem im gebundenen Verkehr, vermutlich häufiger fixiert wurde als eine einheitliche Oberfläche.

### 3.3.4 Ergebnisse zum Fahrverhalten

Das Fahrverhalten in situ wird anhand der vorausfahrenden Fahrzeuge während der Fahrt mit dem Versuchsfahrzeug ausgewertet. Aus dem Video der Szenenkamera werden für alle Fahrten an drei definierten Stellen je Fahrtrichtung innerhalb der AID Bilder exportiert. Die Bilder, auf denen ein vorausfahrendes Fahrzeug auf dem linken Fahrstreifen erkennbar ist, werden für die weitere Auswertung verwendet. In FR Nord werden 47 und in FR Süd 34 der jeweils 51 exportierten Bilder je Fahrtrichtung ausgewertet. Alle ausgewerteten Bilder und Ergebnisse sind im Anhang 7.4 und 7.5 abgebildet.

Die Bilder, auf denen ein vorausfahrendes Fahrzeug auf dem linken Fahrstreifen zu erkennen ist, werden von fünf Personen bewertet. Die Position des vorausfahrenden Fahrzeugs auf dem linken Fahrstreifen wird dreistufig in links, mittig oder rechts eingeordnet. Der Modalwert über alle fünf Angaben ergibt die ausgewertete Position im Fahrstreifen.

In FR Nord fahren rund  $\frac{3}{4}$  aller ausgewertete Fahrzeuge mittig auf dem linken Fahrstreifen. Auch im Fall, dass ein Lkw auf dem rechten Fahrstreifen überholt wird, ändert sich die laterale Position im Fahrstreifen nicht. Lediglich 20 % der Probanden fahren rechts im Fahrstreifen, der geringste Teil fährt links. Die TSE als Begrenzung des linken Fahrbahnrandes wirkt scheinbar abstoßend.

Rund 70 % der in FR Süd auf dem linken Fahrstreifen fahrenden Fahrzeuge fahren rechts. Die weiße ungültige Leitlinie in der Nähe der TSE wird lediglich einmal überfahren. Der rechte Fahrstreifen wird mehrfach von den auf dem linken Fahrstreifen fahrenden Fahrzeugen mitbenutzt. Während des Überholvorgangs, unabhängig ob Lkw oder Pkw, verschiebt sich die laterale Position in die Fahrstreifenmitte.

Bereits diese qualitative Auswertung des Fahrverhaltens zeigt Unterschiede zwischen den beiden Fahrtrichtungen FR Nord und FR Süd auf, die sich durch die vorliegende Markierungskonstellation begründen lassen. Die weiße Markierung in FR Süd bewirkt, dass die Fahrzeuge rechts im Fahrstreifen fahren bzw. diesen teilweise sogar verlassen. Nur während des Überholvorgangs verlagert sich die Position im Fahrstreifen zur Fahrstreifenmitte hin.

### 3.3.5 Zusammengefasste Ergebnisse Phase 2A

Die eindeutige, weniger komplexe weiße Markierungskonstellation (FR Nord) wird in der untersuchten AID auf der BAB A5 von den VP seltener (5 %) fixiert als die gelb/weiße Markierungskonstellation (10 %) (FR Süd). Am Fahrverhalten auf dem linken Fahrstreifen ist erkennbar, dass in FR Nord eher mittig und in FR Süd rechts im Fahrstreifen gefahren wird.

Die Auswertung der AOI, bezogen auf die Fahrstreifen und den Verkehrszustand, weist in FR Nord (ausschließlich weiße Markierung) keinen großen Unterschied auf. In FR Süd (gelb und weiß) hingegen wird die Markierung im freien Verkehrszustand häufiger fixiert als im gebundenen Verkehr. Auf dem linken Fahrstreifen (FR Süd) wird die Markierung häufiger angeblickt als auf dem rechten. So liegt das Verhältnis der Fixationsdauer auf die Markierung zwischen gebundenem und freiem Verkehr für den linken Fahrstreifen bei  $\frac{1}{3}$  und für den rechten Fahrstreifen bei  $\frac{2}{3}$ .

Liegt die Markierungskonstellation aus gelb und weiß vor (FR Süd), wird sowohl auf dem rechten als auch auf dem linken Fahrstreifen die weiße ungültige Markierung häufiger fixiert als die gültige gelbe. Bei der Bewertung ist zu bedenken, dass der linke Fahrstreifen nur einseitig von einer gelben Markierung begrenzt wird, wohingegen der rechte Fahrstreifen eine gelbe Leitlinie und eine Fahrstreifenbegrenzung aufweist. Die ungültige weiße Markierung zieht mehr Aufmerksamkeit auf sich als die gültige gelbe.

Aus Phase 1 (vgl. Kapitel 3.2) ist bekannt, dass die Markierungskonstellationen innerhalb von AID unterschiedlich irritierend bewertet werden. Anhand der ausgewerteten Blickdaten ist die Markierungskonstellation in FR Süd als weniger eindeutig zu beurteilen, da die Markierung häufiger fixiert wird und dies nur in komplexen Situationen erfolgt. Obwohl die Markierung zwar häufiger fixiert wird und demnach eher im Aufmerksamkeitsbereich liegt, ist das Fahrverhalten in FR Süd kritischer zu bewerten, da ein Großteil der VP rechts im Fahrstreifen fährt bzw. diesen sogar nach rechts verlässt.

## 3.4 Phase 2B: Grundlegende Untersuchung von Markierungskonstellationen im Simulator

### 3.4.1 Aufbau und Ablauf der Untersuchung

Phase 2 wird mit dem Fahrsimulator sowie einem head mounted Eye-Tracker des ifab des KIT durchgeführt (siehe auch Rousiamanis 2015). Der statische Fahrsimulator besteht aus einem Fahrzeugelement eines VW Golf VI, welcher vor einer Panoramaleinwand aufgebaut ist (vgl. Abbildung 3.12). Der Golf ist mit automatischem Getriebe ausgestattet, sodass die VP lediglich Gas und Bremse betätigen müssen. Das Fahrzeug besitzt keinen Blinker und die Geschwindigkeit wird als Head-Up Display angezeigt. Als Simulations- und Aufzeichnungssoftware wird SILAB 5.0 des Würzburger Institutes für Verkehrswissenschaften (WIVW) eingesetzt.

Die Blickbewegungen des Probanden werden mit dem Eye-Tracker Dikabilis Professional aufgezeichnet. Der Eye-Tracker wird am Kopf des Probanden fixiert und zeichnet die Blickbewegungen des rechten und linken Auges auf (Aufzeichnungsfrequenz 60 Hz). Die Szenerie wird mit einer in Blickrichtung des Probanden gerichteten Kamera (Aufzeichnungsfrequenz 60 Hz) erfasst.



Abbildung 3.12: Versuchsaufbau Fahrsimulator (Phase 2B)

(links: Proband mit Eye-Tracker; rechts: Fahrsimulator mit Panoramaleinwand)

Es werden AID mit 4 Behelfsfahrstreifen und einer 4s+0 Verkehrsführung nach den Regelplänen DII/2a und DII/2b (vgl. Anhang 7.1) der RSA-95 untersucht (RSA-95 2015). Die Probanden befahren die in Abbildung 3.13 dargestellten Arbeitsstellen. Alle simulierten AID werden auf der baufeldabgewandten verschwenkten Fahrbahn befahren und besitzen den gleichen Verschwenkungs- und Rückverschwenkungsbereich. Die simulierte Umgebung der AID ist ebenfalls identisch und nur die Markierungskonstellation der AID variiert. Ohne ungültige weiße Markierung stellt Fall AID 1 den angenommenen Idealfall dar. Die Ausgangs-Querschnitte der BAB, die AID 2 und AID 3 zugrunde liegen, variieren nur in der Breite des Seitenstreifens. Genaue Abmessungen und Details zur Querschnittsgestaltung sind in Kapitel 3.4.2 enthalten.

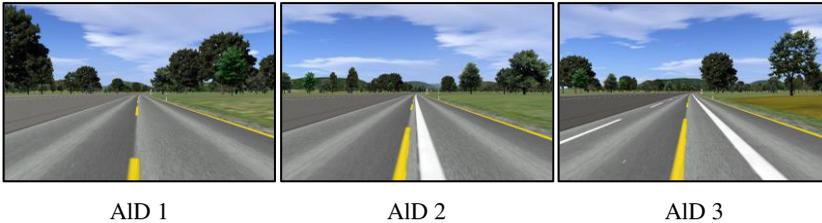


Abbildung 3.13: Simulierte AID Querschnitte (Phase 2B)

Die Simulation gliedert sich in drei Teile: Eine 20-minütige Gewöhnungsfahrt zu Beginn (Stürzel 2015), gefolgt von der Simulation der Arbeitsstellen und einem Fragebogen zur Wahrnehmung. Innerhalb der 45-minütigen Simulation werden die in Abbildung 3.13 dargestellten Arbeitsstellen auf dem rechten (rFS) und linken Fahrstreifen (IFS) befahren. AID 1 wird nicht auf dem linken Fahrstreifen befahren. Alle fünf Varianten (AID 1r, AID 2r, AID 2l, AID 3r, AID 3l) werden von jeder VP zweimal in variierender Reihenfolge befahren. Die VP wird im Zulauf der AID (2 km vor Verschwenkungsbeginn) aufgefordert, den jeweils nach Versuchsplan entsprechenden Fahrstreifen zu benutzen. Die Reihenfolge der von den einzelnen VP befahrenen Arbeitsstellen ist im Anhang 7.6 dargestellt.

Insgesamt haben 21 Probanden an der Untersuchung teilgenommen (vgl. Abbildung 3.14). Aufgrund von Unwohlsein, der Angabe, dass die Simulation

nicht realistisch gewirkt habe, sowie deutlich zu hohen Geschwindigkeiten in den AID ( $mw\_v > 120$  km/h) werden die Daten von drei VP ausgeschlossen. Es verbleiben die Daten von 4 Frauen und 14 Männern für die Auswertung. Das Durchschnittsalter der ausgewerteten Probanden beträgt 39 Jahre (Frauen 35 Jahre, Männer 39 Jahre), wobei der Median mit 30 Jahren deutlich unter dem Durchschnitt liegt. Im Mittel fahren die Probanden 363 km/Woche. Rund 75 % (16 Probanden) besitzen einen eigenen Pkw.

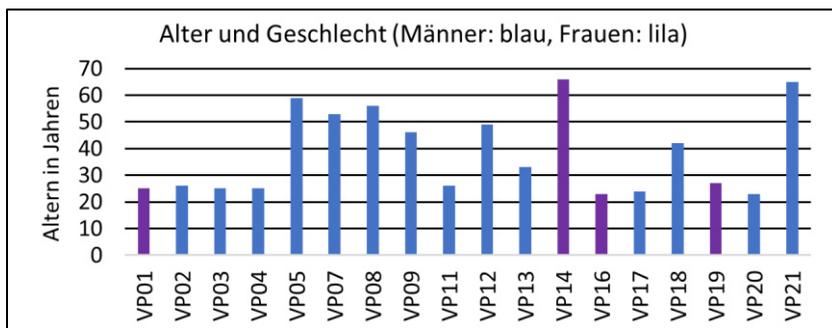


Abbildung 3.14: Alter und Geschlecht der Versuchspersonen (Phase 2B)

### 3.4.2 Details der Simulation

Die Länge des kQ innerhalb der AID ist für alle simulierten Arbeitsstellen 2,0 km lang. Um die Beeinflussung durch andere Verkehrsteilnehmer auszuschließen, werden in der Simulation keine weiteren Fahrzeuge dargestellt. Die VP werden im Vorfeld darauf hingewiesen, sodass es aufgrund dieser Tatsache nicht zu Verwirrung oder unsicherem Verhalten kommt.

In Höhen- und Lageplan wird eine einfache Trassierung gewählt, wodurch Einflüsse aus Krümmungswechseln oder anspruchsvoller Linienführung minimiert werden. Das Ziel ist eine realistische, gestreckte Linienführung mit Kurven und Geraden. Der Höhenplan wird nicht mit den nach Regelwerk geforderten Längsneigungen ausgestattet, da das Brems- und Beschleunigungsverhalten des Simulators im Bereich größerer Neigung gewöhnungsbedürftig ist. In Bereichen mit einer Längsneigung von ungleich 0 % rollt der

Fahr Simulator, sobald die VP von der Bremse geht. Zusätzlich werden im Fahr- simulator keine Flieh- und Querkräfte simuliert, sodass hier keine Rückmel- dung über die Neigung der Straße erfolgt. Mit großer Längsneigung steigt die Wahrscheinlichkeit der Simulator Sickness. Simulator Sickness beschreibt ein Unwohlsein der Probanden während der Fahrt mit dem Simulator. Der Körper erwartet aufgrund der visuellen Wahrnehmung auf ihn wirkende Kräfte, jedoch spürt er keine. Der Höhenplan und das Krümmungsband sind für alle AID iden- tisch und in Abbildung 3.15 dargestellt.

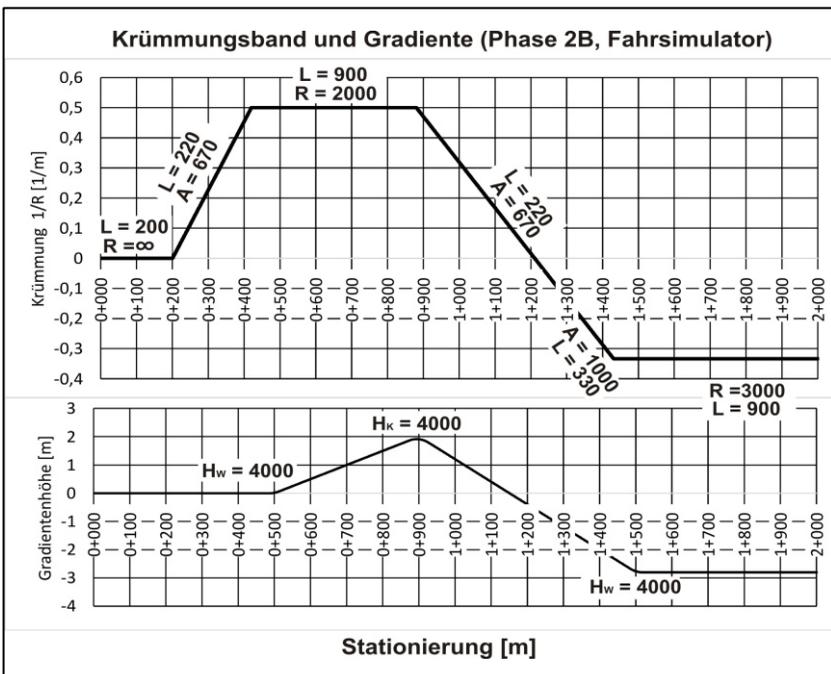


Abbildung 3.15: Krümmungsband und Höhenplan (Phase 2B)

Die Fahrstreifenbreiten werden sowohl für den linken als auch den rechten Fahrstreifen innerhalb der AID mit 3,25 m festgelegt. Durch die gleichen Fahrstreifenbreiten ist ein direkter Vergleich zwischen rechtem und linkem Fahrstreifen möglich. Für reale AID sind diese Maße die Ausnahme, da aufgrund

der beengten Platzverhältnisse die Fahrstreifen meist unterschiedlich breit ausgeführt werden. Eine übliche 4s+0 Verkehrsführung wird mit einer Breite des linken Fahrstreifens von 2,5 bis 3,0 m und des rechten Fahrstreifen von 3,25 m ausgeführt. Bei einer Fahrstreifenbreite von 2,5 m wird die zulässige Fahrzeugbreite auf 2,0 m begrenzt.

Für die Markierungsbreite (gelb) werden autobahntypische 15 cm gewählt. Die simulierte TSE besitzt eine Breite von 20 cm, etwas weniger als in der Praxis (ca. 25 cm). Die weiße Fahrbahnbegrenzung auf BAB wird mit 30 cm simuliert und liegt im Querschnitt AID 2 und AID 3 auf dem rechten Fahrstreifen.

Querschnitt AID 1 (Abbildung 3.16) hat lediglich gelbe Markierung und wird als Idealfall für den späteren Vergleich verwendet. Die VP erhalten in der AID 1 nur gültige Informationen aus der Markierungskonstellation. AID 1 wird nur auf dem rechten Fahrstreifen befahren unter der Annahme, dass AID 11 und AID 21 die gleichen Ergebnisse liefern. Beide AID besitzen innerhalb des befahrenen Fahrstreifens keine zusätzliche weiße Markierung (vgl. Abbildung 3.16 und Abbildung 3.17).

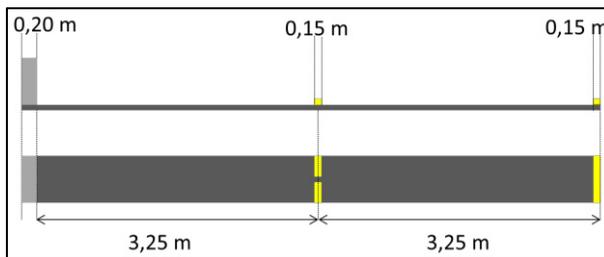


Abbildung 3.16: Querschnitt AID 1 (Phase 2B)

Für den Querschnitt AID 2 wird die gelbe Markierung der AID 1 um die in Abbildung 3.17 dargestellte weiße Markierung ergänzt. Der BAB-Querschnitt, der AID 2 zugrunde liegt, hat einen Seitenstreifen von 2,50 m und einen Randstreifen von 0,75 m. Diese Markierungskonstellation (AID 2) kann beispielsweise bei einem RQ 29,5 (RAS-Q 1996) oder einem neuen RQ 36 (RAA 2008a) mit einem breiteren Randstreifen vorkommen.

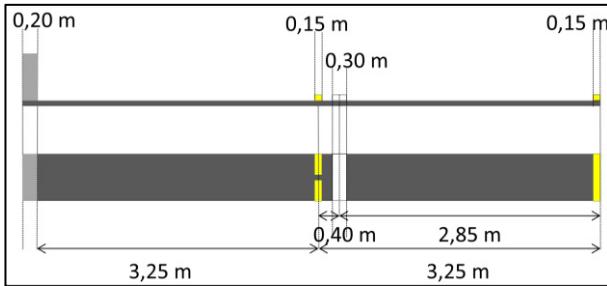


Abbildung 3.17: Querschnitt AID 2 (Phase 2B)

Die Markierungskonstellation des Querschnitts AID 3 (Abbildung 3.18) hat neben der gültigen gelben Markierung sowohl im linken als auch im rechten Fahrstreifen zusätzlich weiße Markierung. Der zugrundeliegende BAB-Querschnitt besitzt Rand- und Seitenstreifen mit einer Breite von zusammen 2,25 m. Bei beengten Platzverhältnissen oder Sonderquerschnitten kann diese Markierungskonstellation auftreten. Die Markierungskonstellation der AID 3 ist ähnlich der Markierungskonstellation des linken Fahrstreifens in FR Süd der Phase 2A (vgl. Kapitel 3.3.2).

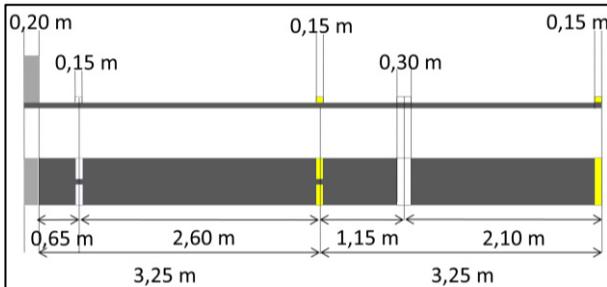


Abbildung 3.18: Querschnitt AID 3 (Phase 2B)

### 3.4.3 Ergebnisse zum Fahrverhalten

Die direkten Auswirkungen der Markierungskonstellation auf das Fahrverhalten lassen sich am besten an der lateralen Position ablesen. Die Qualität der Spurhaltung (Q\_Spur) sowie die Ausnutzung des Fahrstreifens (Ausn\_FS) nach REICHART (2001) sind im Bewertungsmaß der Spurhaltung in Tabelle 3.5 dargestellt. Je größer der Wert der Spurhaltequalität ist, desto eher wird in der Fahrstreifenmitte gefahren (vgl. Kapitel 2.5.3). Mit einer Spiegelbreite des Fahrstimulators von 2,06 m und einer Fahrstreifenbreite von 3,25 m ergeben sich die Spurhaltemaße im Bereich von 0,24 bis 0,68. Die Auswertung zeigt deutlich, dass die Spurhaltequalität auf dem rechten Fahrstreifen höher ist als auf dem linken.

Alle untersuchten AID weisen einen grundsätzlichen Versatz der lateralen Position nach rechts auf, weshalb die Spurhaltequalität absolut betrachtet gering ist (vgl. Kapitel 2.5.3). Um den Rechtsversatz zu berücksichtigen, wird zusätzlich die Spurhaltequalität, bezogen auf die mittlere laterale Position der AID 1r, bestimmt (vgl. Tabelle 3.5). Die Spurhaltequalität bezogen auf AID 1r ist für die auf dem linken Fahrstreifen befahrenen AID sehr gering (0,54 bzw. 0,60). Das bedeutet, dass die Abweichung der lateralen Position der auf dem linken Fahrstreifen befahrenen AID von der lateralen Position der AID 1r groß ist. Für die auf dem rechten Fahrstreifen befahrene AID ist die Spurhaltequalität bezogen auf die laterale Position der AID 1r mit 0,85 bis 0,9 deutlich höher. Die VP fahren näher an der lateralen Position der AID 1r. Die gewählte laterale Position auf dem linken Fahrstreifen liegt deutlich weiter von der Fahrstreifenmitte entfernt als auf dem rechten Fahrstreifen. Am weitesten von der Fahrstreifenmitte entfernt ist die laterale Position der VP in der AID 2l. Die weiße Fahrbahnrandbegrenzung auf dem rechten Fahrstreifen ist der einzige Unterschied zu den anderen AID. Anscheinend beeinflusst die weiße Fahrbahnrandbegrenzung die laterale Position auf dem linken Fahrstreifen in der Form, dass weiter rechts gefahren wird.

Generell sind Fahrzeugführer nicht in der Lage, ihr Fahrzeug konstant in einer Position im Fahrstreifen zu halten. Um das Fahrzeug so gut als möglich in der gewünschten Position zu halten, werden Korrekturbewegungen ausgeführt, die

sich in einer Pendelbewegung im Fahrstreifen bemerkbar machen. Die Pendelbewegungen für eine AID können durch den Mittelwert der Standardabweichung (std\_abw (mw)) beschrieben werden (vgl. Tabelle 3.5). Die Standardabweichungen sind für alle AID ähnlich und befinden sich im Bereich von 14 bis 17 cm. Die Pendelbewegungen sind auf dem linken Fahrstreifen **nicht signifikant** ( $U = -1,1 / p = 0,271$ ) größer als auf dem rechten Fahrstreifen.

Tabelle 3.5: Qualität der Längsdynamik und Spurhaltung nach Reichart 2001, Bubb 2015 (Phase 2B)

AID Kenn- werte	AID 1r	AID 2r	AID 3r	AID 2l	AID 3l
					
mw_v [km/h]	84,2607	84,2973	83,5603	83,1135	83,0733
mw_latP [m]	0,2211	0,2527	0,1869	0,4617	0,3684
std_abw (mw) [m]	0,1582	0,1584	0,1387	0,1546	0,1659
Ausn_FS (κ) [-]	0,3716	0,4246	0,3141	0,7760	0,6192
Q_Spur (Qs) [-]	0,6284	0,5754	0,6859	0,2240	0,3808
Ausn_FS [-] (bezog. latP_1r)	-	0,1315	0,1077	0,4601	0,4052
Q_Spur [-] (bezog. latP_1r)	-	0,8685	0,8923	0,5399	0,5948

Zur Beurteilung der lateralen Position in Bezug zum Fahrstreifen wird ein modifiziertes Box-Whisker-Diagramm erstellt (vgl. Abbildung 3.19). Im Unterschied zum Standardfall wird nicht das 25 und 75 %-Quantil dargestellt, sondern in Anlehnung an die für den Straßenentwurf relevante v85 das 15 und 85 %-Quantil. Die v85 beschreibt die Geschwindigkeit, die von 85 % der unbehindert fahrenden Fahrzeuge auf freier Strecke nicht überschritten wird (RAS-L 1995). Die Box stellt den Bereich dar, der von 70 % der Probanden befahren wird.

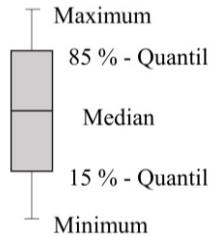


Abbildung 3.19: Modifiziertes Box-Whisker-Diagramm

Die modifizierten Box-Whisker-Diagramme der in Phase 2B untersuchten Markierungskonstellationen sind in Abbildung 3.20 dargestellt. Die rote Linie kennzeichnet die Fahrstreifenbegrenzung (durchgezogen) bzw. die Leitlinie (gestrichelt). Bei einer simulierten Fahrstreifenbreite von 3,25 m und einer Spiegelbreite des Golf VI von 2,06 m wird der Fahrstreifen bei einer lateralen Position von 0,595 m verlassen.

Wie bereits an den Mittelwerten abzulesen war, ist hier statistisch nachweisbar, dass die VP auf dem linken Fahrstreifen **signifikant** weiter rechts fahren als auf dem rechten Fahrstreifen (Mittelwert:  $t(35) = 5,612 / p = 0,000$ ; Median:  $t(35) = 5,543 / p = 0,000$ ). Gleichzeitig wird auf dem linken Fahrstreifen weniger Fläche der Fahrbahn genutzt, d.h. die Fahrspuren liegen näher beieinander. Im Mittelwert- und Medianvergleich ist die laterale Position AID 3r **signifikant** weiter links als in AID 1r (Mittelwert:  $t(35) = -2,805 / p = 0,008$ ; Median:  $t(35) = -3,145 / p = 0,003$ ) und AID 2r (Mittelwert:  $t(35) = -3,948 / p = 0,000$ ; Median:  $t(35) = -3,987 / p = 0,000$ ).

Mehr als 15 % der VP verlassen den linken Fahrstreifen in AID 2l nach rechts, bei AID 3l sind es etwas weniger als 15 % (vgl. Anhang 7.7). Sobald die VP den linken Fahrstreifen nach rechts verlassen, kann es zu Konflikten mit parallel fahrenden Fahrzeugen kommen. Der rechte Fahrstreifen wird nicht nach links verlassen, sodass hier keine potenziell kritische Situation mit dem parallel verlaufenden Verkehr nachweisbar ist.

Beim Vergleich der Befahrung des linken und rechten Fahrstreifens ist auffällig, dass auf dem linken Fahrstreifen die Differenz der Quantile (Größe der

Box) kleiner ist als auf dem rechten (vgl. Anhang 7.7). Auf dem linken Fahrstreifen ist der Bereich, in dem 70 % aller Fahrspuren liegen, 29 cm (AID 2l) bzw. 38 cm (AID 3l) groß. Für den rechten Fahrstreifen ist der Bereich um 8 bis 17 cm größer. Möglicherweise ist die Konzentration auf die Fahraufgabe auf dem linken Fahrstreifen höher als auf dem rechten. Aus der Realität sind die VP gewohnt, auf dem linken Fahrstreifen ihre Spur exakter halten zu müssen als auf dem rechten.

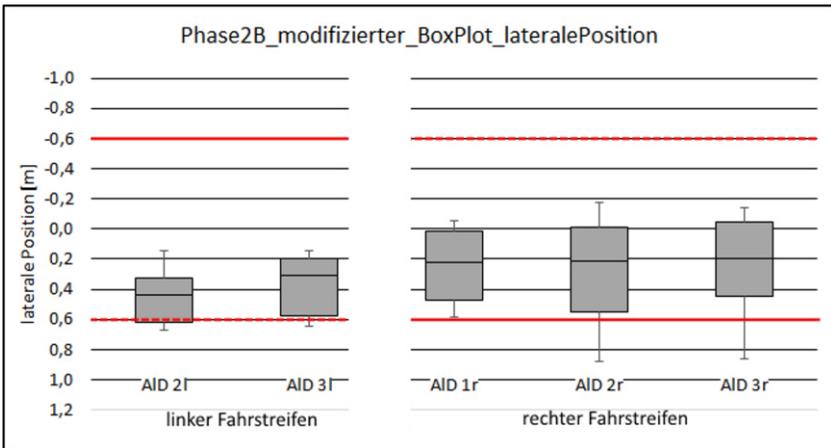


Abbildung 3.20: Modifiziertes Box-Whisker-Diagramm der lateralen Position (Phase 2B)

Die Markierungskonstellationen AID 2r und AID 3r sind scheinbar besonders ungünstig, da hier teilweise der Fahrstreifen nach rechts verlassen wird, was ein Verlassen der Fahrbahn bedeutet. Bei AID 3r fahren 50 % der VP sogar weiter links als bei AID 1r. Die weiße Markierung, die nahe der Fahrstreifenmitte liegt, hat daher keinen oder leicht positiven Einfluss.

Im Nachhinein betrachtet ist der Sonnenstand in der Simulation ungünstig gewählt. Die TSE wirft in der Simulation einen Schatten auf den linken Fahrstreifen, der nur schlecht von der eigentlichen TSE zu unterscheiden ist. Möglicherweise fahren die Fahrzeugführer aufgrund des Schattenwurfs und der massiven TSE aus Beton auf dem linken Fahrstreifen deutlich weiter rechts als

auf dem rechten Fahrstreifen. Das Rechtsfahren führt in der Simulation zu keiner Konfliktsituation, da kein Verkehr in der AID simuliert ist. Aufgrund des Rechtsfahrgebotes in Deutschland fahren vermutlich die wenigsten VP auf dem linken Fahrstreifen, wenn der rechte Fahrstreifen gänzlich frei ist. Möglicherweise nutzen einige VP auch bewusst beide Fahrstreifen, wenn keine anderen Verkehrsteilnehmer vorhanden sind.

### **3.4.4 Ergebnisse des Fahrverhaltens in Abhängigkeit von Lageplanelementen**

Um spezielle Einflüsse entlang der Strecke zu identifizieren wird der Verlauf der lateralen Position betrachtet. Hierfür wird die Strecke innerhalb der AID in 10 m-Intervalle unterteilt und der gleitende Median bestimmt. In Abbildung 3.21 sind die in 10 m-Intervallen geglätteten lateralen Positionen auf dem rechten Fahrstreifen und in Abbildung 3.23 die auf dem linken Fahrstreifen dargestellt. Die Mediane sind als durchgezogene Linien gekennzeichnet. Die 15 %-Quantile sind mit gestrichelten und die 85 %-Quantile mit gepunkteten Linien in der entsprechenden Farbe dargestellt. Die roten Linien kennzeichnen die Fahrstreifenbegrenzung.

Zusätzlich wird der Median der einzelnen Lageplanelemente bestimmt, um Einflüsse aus der Geometrie noch besser zu erkennen (vgl. Abbildung 3.22 und Abbildung 3.24). In der linken Abbildungshälfte ist jeweils die mittlere laterale Position in der AID (Draufsicht) und rechts in Diagrammform dargestellt. Die weißen und gelben dünnen Linien stellen in der Draufsicht die jeweilige Markierungskonstellation dar. Die hellblaue Linie kennzeichnet die Fahrstreifenmitte. Der Median der lateralen Position ist mit einer roten Linie in der Mitte der Fahrzeuge (Rechtecke) abgebildet. Die angrenzenden helleren, kleinen Rechtecke auf der linken und rechten Seite entsprechen dem 15 %- bzw. 85 %-Quantil.

#### **Rechter Fahrstreifen:**

Die geglätteten Verläufe der lateralen Position auf dem rechten Fahrstreifen sind sehr ähnlich (vgl. Abbildung 3.21). Das 85 %-Quantil verläuft bis Station 1+005 für alle AID innerhalb des eigenen FS. In der 2. Hälfte der AID 2r (ab

Station 1+005) verläuft das 85 %-Quantil immer wieder außerhalb des Fahrstreifens. Das bedeutet, dass mehr als 15 % der Probanden die Grenze des Fahrstreifens überfahren. Innerhalb der Gerade, der Rechts- und Linkskurve verläuft der Median der lateralen Position inhomogener als im ersten Bereich des Krümmungswechsels.

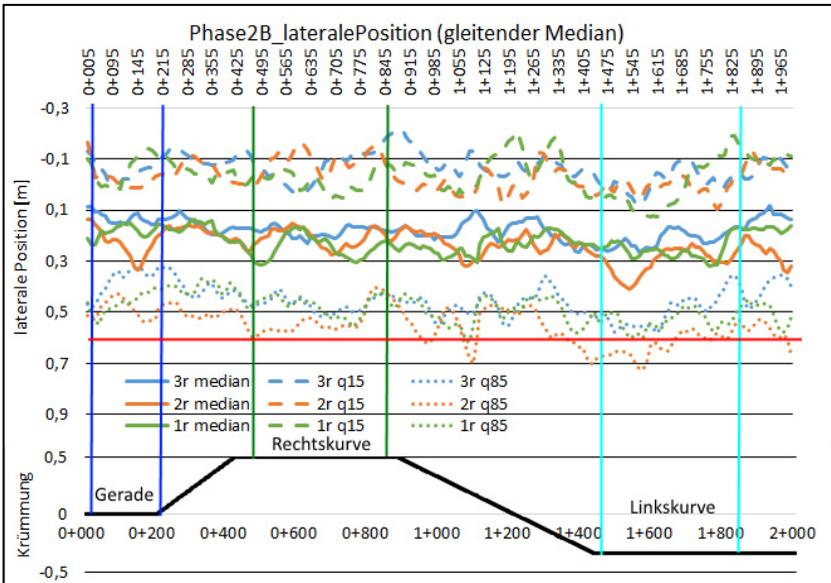


Abbildung 3.21: Gleitender Mittelwert der lateralen Position rFS (Phase 2B)

Während der Kurvenfahrt orientieren sich die Fahrzeugführer an der Markierung oder dem Fahrbahnrand in der Kurveninnenseite (Land & Lee 1994, Kandil et al. 2009, 2010, Lehtonen et al. 2012, Lehtonen et al. 2013). Demnach erfolgt die Orientierung in Rechtskurven in Arbeitsstellen auf BAB auf dem rechten Fahrstreifen an der gelben Fahrbahnbegrenzung und in Linkskurven an der gelben Leitlinie. Die mittleren lateralen Positionen aller auf dem rechten Fahrstreifen befahrenen AID weichen in der Rechtskurve nicht weiter voneinander ab, da in der rechten Fahrstreifenhälfte keine ungünstige weiße Markierung vorhanden ist. Statistisch ist **kein signifikanter** Zusammenhang zwischen den lateralen Positionen auf dem rechten Fahrstreifen in der Rechtskurve

nachweisbar. Weder zwischen AID 1r und AID 2r (Mittelwert:  $t(35) = -0,296 / p = 0,769$ ; Median:  $t(35) = -0,565 / p = 0,576$ ) noch zwischen AID 2r und AID 3r (Mittelwert:  $t(35) = -1,099 / p = 0,279$ ; Median:  $t(35) = -0,788 / p = 0,436$ ). Auch zwischen AID 1r und AID 3r besteht **kein signifikanter** Zusammenhang (Mittelwert:  $t(35) = -1,557 / p = 0,129$ ; Median:  $t(35) = -1,467 / p = 0,151$ ).

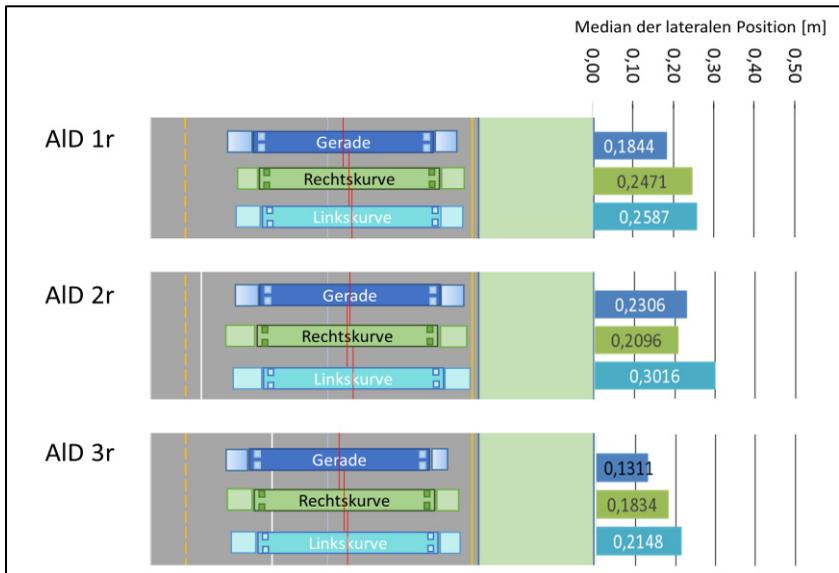


Abbildung 3.22: Mittlere laterale Position innerhalb einzelner Lageplanelemente rFS (Phase 2B)

Werden die AID auf dem rechten Fahrstreifen in einer Linkskurve befahren, befinden sich in der Kurveninnenseite (Fahrbahnmitte) unterschiedliche Markierungskonstellationen aus weißer und gelber Markierung. Der Abstand der gelben und weißen Markierungskanten beträgt bei AID 2r 17,5 cm und bei AID 3r 92,5 cm (vgl. Abbildung 3.17 und Abbildung 3.18). AID 1r hat zur gelben Leitlinie keine zusätzliche weiße Markierung. Der Median der mittleren lateralen Position in der Linkskurve verschiebt sich ausgehend von AID 3r über AID 1r hin zu AID 2r immer weiter nach rechts in Richtung des Fahrbahnrandes (vgl. Abbildung 3.22).

Der Unterschied zwischen den Medianen der AID 2r und AID 1r in der Linkskurve beträgt ca. 5 cm und ist statistisch **nicht signifikant**. (Median:  $t(35) = 1,312 / p = 0,198$ ). Innerhalb der AID 3r wird grundsätzlich eher mittig gefahren. Der Median der lateralen Position der AID 3r liegt **signifikant** weiter links als der AID 2r (Median:  $t(35) = -2,689 / p = 0,011$ ) und **nicht signifikant** weiter links als der AID 1r (Median:  $t(35) = -1,670 / p = 0,104$ ). Der relativ große Abstand zwischen gelber und weißer Markierung in AID 3r (0,925 m) führt dazu, dass die VP die Position ihres Fahrzeugs mittiger im Fahrstreifen wählen.

In allen AID der Phase 2B ist in der rechten Fahrstreifenhälfte keine ungültige weiße Markierung vorhanden. Zur Orientierung in der Rechtskurve wird daher in allen AID die gelbe Fahrbahnbegrenzung verwendet. Die Mediane der lateralen Position der AID sind sehr ähnlich (vgl. Abbildung 3.22). In der AID 1r ist ausschließlich gelbe gültige Markierung vorhanden. Die laterale Position der Linkskurve entspricht daher in etwas der der Rechtskurve. Liegt in der linken Hälfte des rechten Fahrstreifens ungültige weiße Markierung (AID 2r und AID 3r), so fahren die VP in der Linkskurve weiter rechts als in der Rechtskurve. Scheinbar wird die weiße ungültige und nicht die gelbe gültige Markierung zur Orientierung verwendet. In der AID 3r ist dieses Fahrverhalten schwächer ausgeprägt. Möglicherweise erfolgt die Orientierung aufgrund des größeren Abstands zwischen der gelben gültigen und weißen ungültigen Markierung nicht ausschließlich an der weißen ungültigen Markierung.

#### **Linker Fahrstreifen:**

Auf dem linken Fahrstreifen verläuft das 85 %-Quantil für AID 2l und AID 3l außerhalb des eigenen Fahrstreifens. Daraus wird deutlich, dass mehr als 15 % der Probanden zusätzlich den rechts parallel verlaufenden Fahrstreifen nutzen (vgl. Abbildung 3.23). Da in der Simulation kein Verkehr auf dem rechten Fahrstreifen vorhanden ist, hat das Abkommen keine direkten Folgen. Die TSE als Fahrbahnbegrenzung auf der linken Fahrstreifenseite hingegen stellt ein starres und unumgängliches Hindernis dar. Der Verlauf der Kurven verändert sich bei Station 0+205 plötzlich, was darin begründet liegt, dass einige Aufzeichnungen von SILAB erst mit einer Verzögerung von ca. 200 m gestartet werden. Gleichzeitig findet hier der Krümmungswechsel von einer Geraden in

eine Rechtskurve statt, was zu vermehrten Richtungsänderungen führen kann. Innerhalb der Rechtskurve liegt die laterale Position der AID 31 und AID 21 deutlich weiter auseinander als innerhalb der Linkskurve.

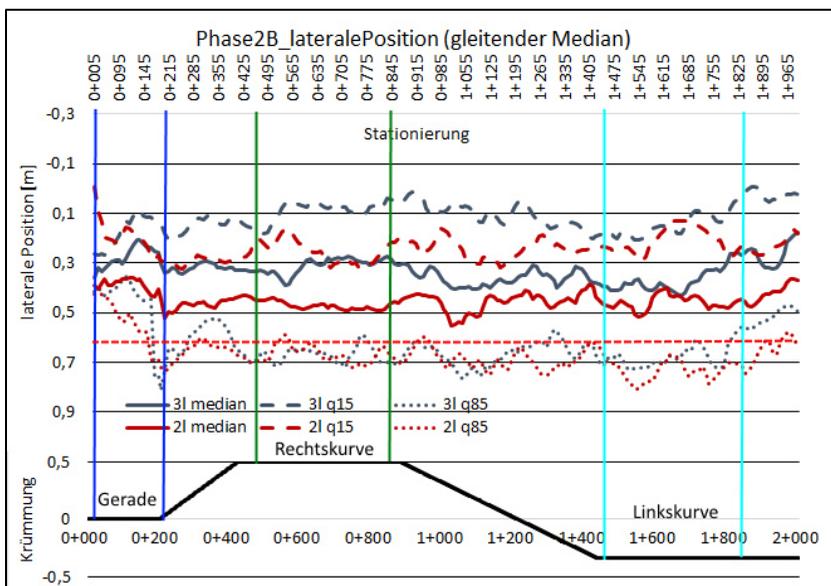


Abbildung 3.23: Gleitender Mittelwert der lateralen Position IFS (Phase 2B)

Die Orientierung erfolgt in der Rechtskurve an der gelben Leitlinie und in der Linkskurve an der TSE oder einer evtl. vorhandenen Fahrbahnbegrenzung. Der Unterschied der mittleren lateralen Position der AID 21 und AID 31 ist in der Rechtskurve mit ca. 15 cm etwa doppelt so groß als auf dem rechten Fahrstreifen (vgl. Abbildung 3.24). Prinzipiell ist hier in der rechten Hälfte des linken Fahrstreifens nur die gelbe Leitlinie zur Orientierung verfügbar. Im Querschnitt AID 21 liegt parallel zur gelben Leitlinie auf dem rechten Fahrstreifen die ursprüngliche Fahrbahnbegrenzung (vgl. Abbildung 3.17). Für den **sehr signifikanten** Unterschied der mittleren lateralen Positionen zwischen AID 21 und AID 31 von mehr als 15 cm kann nur diese Markierungskonstellation verantwortlich sein (Mittelwert:  $U = -3,315 / p = 0,001$ , Median:  $U = -3,142 / p = 0,002$ ).

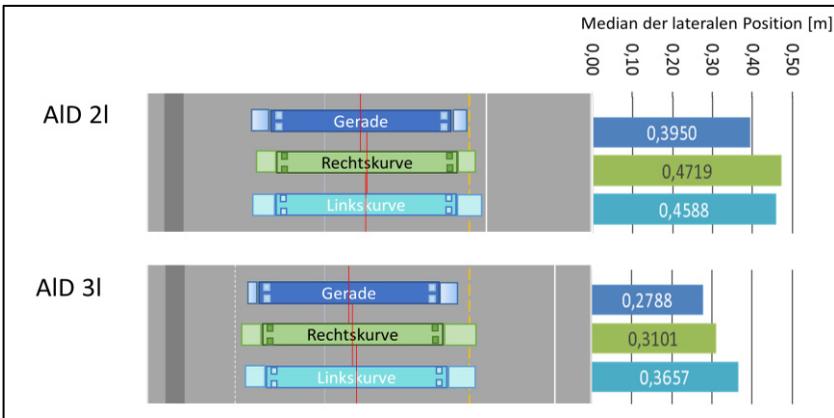


Abbildung 3.24: Mittlere laterale Position innerhalb einzelner Lageplanelemente IFS (Phase 2B)

In Abbildung 3.24 ist für AID 2I erkennbar, dass das 85 %-Quantil für alle Lageplanelemente immer links der weißen Markierung liegt. Der Abstand der Markierungskanten innerhalb der AID 2I (Leitlinien zu weißen Fahrstreifenbegrenzung auf dem rechten Fahrstreifen) beträgt 17,5 cm und ist scheinbar die Erklärung für den Unterschied der lateralen Position von AID 2I zu AID 3I.

Die in der Linkskurve auf dem linken Fahrstreifen festgestellten Unterschiede zwischen AID 3I und AID 2I von ca. 10 cm sind statistisch **signifikant** (Mittelwert:  $U = -2,859$ ,  $p = 0,004$  / Median:  $U = -2,199$ ,  $p = 0,028$ ). Somit wird in AID 2I signifikant weiter rechts gefahren als in AID 3I. Aufgrund der Markierungssituation im eigenen Fahrstreifen ist das nicht zu begründen, da in AID 2I keine zusätzliche weiße Markierung im Fahrstreifen vorhanden ist. Allerdings ist auf dem rechten Fahrstreifen der AID 2r, eine weiße breite Fahrbahnbegrenzung nahe der Leitlinie vorhanden. Diese Fahrbahnbegrenzung beeinflusst offenbar die Fahrweise in der Form, dass in der Rechtskurve deutlich weiter rechts gefahren wird.

Auch in der Linkskurve wird in AID 2I deutlich weiter rechts gefahren als in der Linkskurve der AID 3I, obwohl im Querschnitt AID 3I in der linken Fahrstreifenhälfte die weiße Leitlinie vorhanden ist. Eine mögliche Erklärung ist, dass der Kontrast zwischen TSE und Fahrbahn zu gering ist und die VP sich

auch in der Linkskurve an der weißen Markierung orientieren. Für AID 3l ist erkennbar, dass die laterale Position der Linkskurve etwas weiter rechts liegt als in der Rechtskurve. Die weiße Leitlinie in der linken Fahrstreifenhälfte wird hier möglicherweise als Orientierung genutzt und somit kommt der Versatz von ca. 5 cm zustande.

Wie bereits aus den Beobachtungen im realen Verkehr und den qualitativen Auswertungen der vorausfahrenden Fahrzeuge des Versuchsfahrzeugs kann hier ebenfalls festgestellt werden, dass die weiße Markierung von kaum einer VP überfahren wird. Mit zunehmend schmalere Fahrstreifen wird dieses Verhalten kritischer, wenn die weiße Markierung so liegt, dass die Fahrzeugführer den parallel verlaufenden Fahrstreifen mitnutzen.

Die erkennbaren Unterschiede der lateralen Positionen der Links- und Rechtskurve sind statistisch nicht nachweisbar. Für alle AID, bis auf AID 2r, sind die Unterschiede **nicht signifikant** (vgl. Tabelle 3.6, Tabelle 3.7).

Tabelle 3.6: Ergebnisse des t-Tests der lateralen Position in der Links- und Rechtskurve (t-Test)

AID	n	Mittelwert		Median	
		t	p	t	p
AID 1r	35	1,299	0,202	1,698	0,098
AID 2r	35	3,277	0,002	3,040	0,004
AID 3r	35	1,363	0,181	1,152	0,257
AID 2l	35	0,012	0,991	-	-

Tabelle 3.7: Ergebnisse des Wilcoxon-Tests der lateralen Position in der Links- und Rechtskurve

AID	Mittelwert			Median		
	U	p	r	U	p	r
AID 2l	-	-	-	-0,110	0,912	0,496
AID 3l	-1,257	0,209	0,545	-1,571	0,116	0,552

### 3.4.5 Ergebnisse zum Blickverhalten

Die Mittelwerte der Fixationsdauern innerhalb der untersuchten AID sind sehr ähnlich (vgl. Abbildung 3.25). Die maximale Differenz besteht zwischen AID 1r und AID 3r mit 30,6 ms. Weder zwischen den einzelnen Markierungskonstellationen noch zwischen den befahrenen Fahrstreifen (linker und rechter Fahrstreifen) lassen sich Unterschiede feststellen. Bei der Auswertung des Verhältnisses Fixationsdauer zu Saccadendauer weist AID 3l das größte Verhältnis und somit den geringsten Suchaufwand auf. Das Verhältnis nimmt von AID 1r über AID 2r zu AID 3r stetig zu. Die Suchaktivität nimmt daher mit komplexeren Markierungskonstellationen ab und es erfolgt eine intensivere Informationsaufnahme.

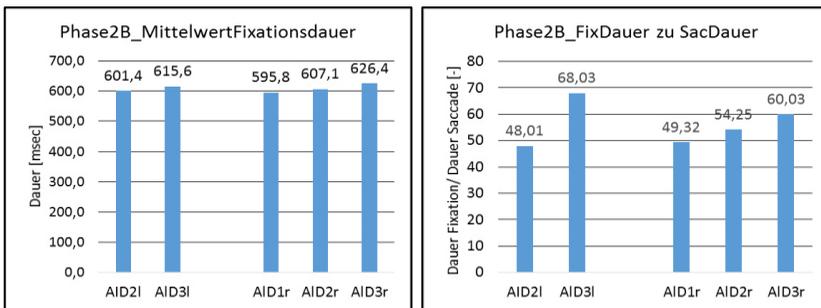


Abbildung 3.25: Mittlere Fixationsdauer (links) und Verhältnis zwischen Fixations- und Saccadendauer (rechts) innerhalb der AID (Phase 2B)

Die benötigte Information zum sicheren Führen des Fahrzeugs liegt kompakt auf der vorausliegenden Straße. Andere Verkehrsteilnehmer, das Wechseln der Spur oder eine Beobachtung der Umgebung sind in dieser Simulation nicht integriert. AID 2l gefolgt von AID 2r weisen das ineffizienteste Blickverhalten auf, da der Scanpfad im Vergleich zu den andern AID deutlich länger ist. Da die Markierung die einzige Variation zwischen den Arbeitsstellen ist, kann gefolgert werden, dass die Markierungskonstellation der AID 2 für die VP am wenigsten eindeutig ist. Innerhalb von AID 3l fokussieren sich alle Blicke auf einen kompakten Bereich, was somit auf das effektivste Blickverhalten hinweist.

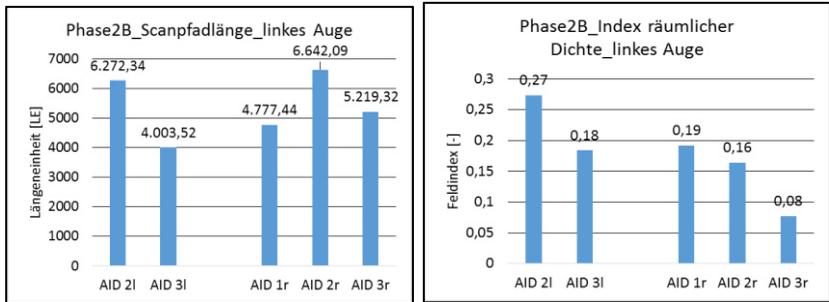


Abbildung 3.26: Scanpfadlänge (links) und Index räumlicher Dichte (rechts) für AID (Phase 2B)

Für den rechten Fahrstreifen ist auffällig, dass der Index der räumlichen Dichte (Feldindex) von AID 1r über AID 2r bis zu AID 3r immer kleiner wird. Das bedeutet, dass der Aufmerksamkeitsbereich sich immer mehr auf einen Bereich konzentriert. In AID 3r liegt der Fokus zentral auf der Straße und es wird wenig in der Umgebung umhergeblickt. Auf dem linken Fahrstreifen ist das Feld der Fixationen größer als auf dem rechten Fahrstreifen. Eine mögliche Erklärung ist, dass die VP hier gewohnt sind auch eher auf den Verkehr auf dem rechten Fahrstreifen zu achten.

Bei der Aufzeichnung der Blickdaten wird das Weitwinkelobjektiv für die Szenenkamera eingesetzt, um einen größeren Bereich auswerten zu können. Es ist keine Auswertung der AOI mit der Software D-Lab 3.0 möglich, da die Verzerrung durch den Objektivwechsel in der Software nicht berücksichtigt wird. Aus den reinen Blickparametern lassen sich wenig Rückschlüsse auf die Wahrnehmung der Markierung ziehen, weshalb die Auswertung der AOI für die weitere Forschung im Fokus stehen sollte.

### 3.4.6 Zusammengefasste Ergebnisse Phase 2B

Unabhängig der Markierungskonstellation und dem Fahrstreifen fahren die VP im Fahrsimulator rechts der Fahrstreifenmitte. Auf dem rechten Fahrstreifen wird dadurch der Sicherheitsabstand zu parallel auf dem linken Fahrstreifen fahrenden Fahrzeugen größer. Für Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen wird der Sicherheitsabstand zu parallel auf dem rechten Fahrstreifen fahrenden Fahrzeugen allerdings kleiner. Wird, wie es hier der Fall

ist, auf beiden Fahrstreifen mit Rechtsversatz gefahren, so entsteht auf den ersten Blick keine kritische Situation (Verlassen der Fahrbahn nach rechts ausgeschlossen). Allerdings wird der Rechtsversatz bei schmaler werdenden Fahrstreifen, unaufmerksamen Fahrzeugführern oder einzelnen weiter links fahrenden Fahrzeugen schnell kritisch. Die Fahrstreifenbreite beträgt in dieser Untersuchung immer 3,25 m.

Je näher die weiße Markierung an der gelben liegt, desto größer ist die Abweichung zur Fahrstreifenmitte (lateralen Position). Im Querschnitt der AID 2 liegen die weiße und gelbe Markierung am engsten beieinander. Sowohl für den linken als auch für den rechten Fahrstreifen ist die gewählte Position im Fahrstreifen im Vergleich am weitesten von der Fahrstreifenmitte entfernt.

Die beim Untersuchungsaufbau getroffene Annahme, dass die lateralen Positionen von AID 2l mit AID 1l identisch sein müssten, da in beiden Fällen keine weiße Markierung im linken Fahrstreifen vorhanden ist, wird verworfen. Es ist anzunehmen, dass die weiße Markierung auf dem rechten Fahrstreifen innerhalb der AID 2 auch einen Einfluss auf das Fahrverhalten auf dem linken Fahrstreifen hat. In der nächsten Phase (Phase 3) ist daher geplant, den linken Fahrstreifen einer ausschließlich einfarbig markierten AID zu untersuchen.

Die gewählte laterale Position innerhalb der AID ist, bezogen auf die Lageplanelemente Kurve und Gerade, unterschiedlich. Fahrzeugführer orientieren sich, wie bereits mehrfach belegt, an der Kurveninnenseite (Land & Lee 1994, Kandil et al. 2009, 2010, Lehtonen et al. 2012, Lehtonen et al. 2013). Liegt in der Kurveninnenseite nahe der gültigen gelben Markierung eine weiße, so wird diese teilweise zur Orientierung genutzt. In AID 2r beispielsweise wird im Mittel in der Linkskurve 8 cm weiter rechts gefahren als in der Rechtskurve. AID 1r müsste demnach eine konstante laterale Position in der Gerade und den beiden Kurven haben. Da dies nicht der Fall ist, wird dies in Phase 3 nochmals näher untersucht. Kritische Situationen entstehen, wenn weiße und gelbe Markierung in der Kurveninnenseite nahe beieinanderliegen.

In Phase 2B wurden AID auf Autobahnquerschnitten mit Seitenstreifen und daraus resultierenden Markierungskonstellationen untersucht, die einen Rechtsversatz im Fahrstreifen fördern. Um zu verifizieren, ob wirklich die Markierungskonstellation für den generellen Rechtsversatz verantwortlich ist, werden in Phase 3 zusätzlich Autobahnquerschnitte ohne Seitenstreifen analysiert. Diese müssten theoretisch einen Linksversatz fördern.

## 3.5 Phase 3: Untersuchung ausgewählter Markierungskonstellationen im Simulator

### 3.5.1 Aufbau und Ablauf der Untersuchung

Aufbauend auf den Ergebnissen der Phasen 1 und 2 wird in Phase 3 eine weitere Fahrsimulation durchgeführt (siehe auch Backes 2016). Anmerkungen der VP, dass die AID im Fahr Simulator (Phase 2B) nicht real gewirkt habe, werden in Phase 3 durch das Einbinden weiterer Verkehrsteilnehmer sowie eine umfangreiche Gewöhnung (siehe auch Fuchs 2016) berücksichtigt. Zusätzlich kann durch das kontrollierte Verhalten der simulierten Verkehrsteilnehmer das Fahr- und Wahrnehmungsverhalten in spezifischen Verkehrssituationen erfasst und die Wirkung der Markierungskonstellation auf dem linken Fahrstreifen näher am Verhalten in der Realität untersucht werden. Eine offene Fragestellung aus der Voruntersuchung sollte ebenfalls beantwortet werden: Wie verändert sich das Fahrverhalten, wenn die weiße Markierung im rechten gelb markierten Fahrstreifen in der Nähe des Fahrbahnrandes aufgebracht ist? Die untersuchten Querschnitte sind in Abbildung 3.27 und die genauen Abmessungen in Kapitel 3.5.2 dargestellt.

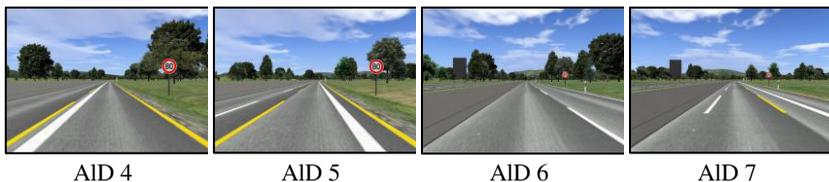


Abbildung 3.27: Simulierte AID Querschnitte (Phase 3)

Erneut konnte der Fahrsimulator und das Eye-Tracking System Dikabilis Professional des ifab des KIT genutzt werden (vgl. Kapitel 3.3.1). Der Versuch ist, wie bereits die Simulation in Phase 2B, in drei Abschnitte gegliedert: Gewöhnung (Fuchs 2016), Simulation der AID und abschließender Fragebogen. Die Gewöhnung an den Fahrsimulator dauert abhängig der VP 10 bis 30 min. Die Simulation der AID wird im Unterschied zur Phase 2B mit kurzen Unterbrechungen durchgeführt, um die VP zu befragen. So werden Anmerkungen, die ansonsten bis zum Ende der Simulation beim Ausfüllen des Fragebogens bereits wieder vergessen wären, abgefragt. Die gesamte Simulation der AID dauert ca. 40 bis 45 min. Nach jeweils zwei Arbeitsstellen leitet das Navigationssystem die VP auf einen Parkplatz, auf dem ein kurzer Fragebogen ausgefüllt wird, bevor die Fahrt fortgesetzt wird. Immer zwei AID bilden einen Abschnitt. In den jeweiligen Abschnitten werden die AID alternierend befahren.

Insgesamt haben 40 VP an der Untersuchung teilgenommen. Drei VP brechen aufgrund von Unwohlsein ab und eine VP wird bei der Auswertung nicht berücksichtigt (besitzt keinen Führerschein). Als Untersuchungskollektiv bleiben 24 Männer (Durchschnittsalter 30 Jahre) und 12 Frauen (Durchschnittsalter 29 Jahre) (vgl. Abbildung 3.28). Der mittlere Wert (Median) der Stichprobe liegt bei 25 Jahren. Insgesamt 16 VP haben dauerhaft Zugriff auf einen Pkw. Die Fahrleistung der VP beträgt in der Woche ca. 122 km, wovon 58 km auf der BAB zurückgelegt werden.

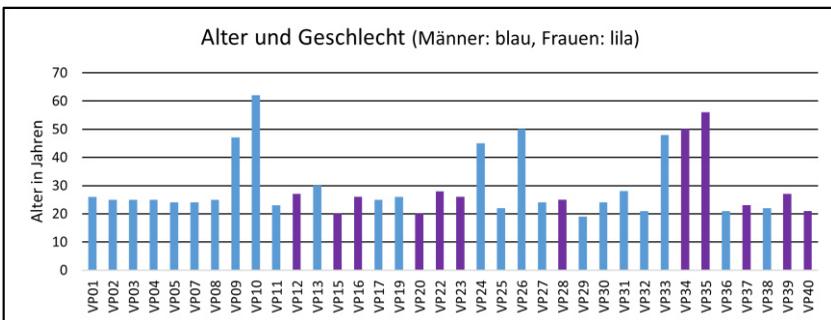


Abbildung 3.28: Alter und Geschlecht der Versuchspersonen (Phase 3)

### 3.5.2 Details der simulierten Querschnitte Phase 3

Die Gestaltung der AID erfolgt, wie bereits in Phase 2B, nach dem Regelplan DII/2 (vgl. Anhang 7.1). Um die Simulation aus Phase 2B mit Phase 3 vergleichen zu können, werden möglichst viele Details, wie z. B. Krümmungsband, Gradiente, Einrichtung der Arbeitsstelle, simulierte Umgebung etc., identisch gewählt. Die Details sind bereits in Kapitel 3.3.2 näher erläutert.

In Phase 3 werden zwei unterschiedliche Verkehrszustände simuliert: ohne Verkehr und mit Verkehr. Ohne Verkehr bedeutet, dass in der AID lediglich ein Fahrzeug im Abstand von 350 m nach dem eigenen Fahrzeug zu sehen ist. Aufgrund des großen Abstands wird eine Beeinflussung der Fahrweise durch das nachfolgende Fahrzeug ausgeschlossen. Außerhalb der Arbeitsstelle auf der BAB werden einzelnen Fahrzeuge in der Gegenrichtung simuliert. Der Verkehrszustand ohne Verkehr ist somit direkt vergleichbar mit dem Versuchsaufbau in Phase 2B. Mit Verkehr bedeutet, dass innerhalb der AID auf dem parallel verlaufenden Fahrstreifen ein Fahrzeugpulk simuliert wird. Die Geschwindigkeitsdifferenz des Fahrzeugpulks beträgt 10 km/h. Das bedeutet, wenn die VP auf dem rechten Fahrstreifen mit den vorgeschriebenen 80 km/h durch die AID fährt, bewegt sich der Fahrzeugpulk auf dem linken Fahrstreifen mit einer Geschwindigkeit von 90 km/h. Äquivalent gilt für das Befahren des linken Fahrstreifens durch die VP, dass der Fahrzeugpulk auf dem rechten Fahrstreifen 70 km/h fährt. Zusätzlich wird ein vorausfahrendes und nachfolgendes Fahrzeug mit 80 km/h simuliert. Der Abstand zum Vorderfahrzeug wird individuell gewählt. Das Nachfolgefahrgewehg passt sich der Geschwindigkeit der VP an.

Es werden vier unterschiedliche Querschnitte simuliert. Die auf dem rechten Fahrstreifen befahrenen Querschnitte AID 4 und AID 5 werden mit und ohne Verkehr befahren. Da der linke Fahrstreifen aufgrund des Rechtsfahrgebotes nur während des Überholvorgangs genutzt werden sollte, werden die auf dem linken Fahrstreifen zu befahrenden Querschnitte (AID 6 und AID 7) ausschließlich mit Verkehr untersucht. In Teil 1 der Simulation werden AID 4 und AID 5 auf dem rechten Fahrstreifen ohne Verkehr befahren. Nach einem kurzen Stopp auf dem Parkplatz werden in Teil 2 die gleichen AID ebenfalls auf

dem rechten Fahrstreifen mit Verkehr befahren. Teil 3 beinhaltet die Fahrt auf dem linken Fahrstreifen von AID 6 und AID 7 mit Verkehr. Der genaue Versuchsplan ist im Anhang 7.8 abgebildet.

Querschnitt AID 4 ist identisch mit AID 2 (Phase 2B). Querschnitt AID 4 (dargestellt in Abbildung 3.29) wird auf dem rechten Fahrstreifen befahren; einmal ohne (AID 4r) und einmal mit Verkehr (AID 4r\_V). Diese Markierungskonstellation tritt bei einer auf den Seitenstreifen verschwenkten Fahrbahn auf. In Abhängigkeit der Seitenstreifenbreite und der Lage der Markierung im Randstreifen kann sich die Lage der weißen Markierung verschieben.

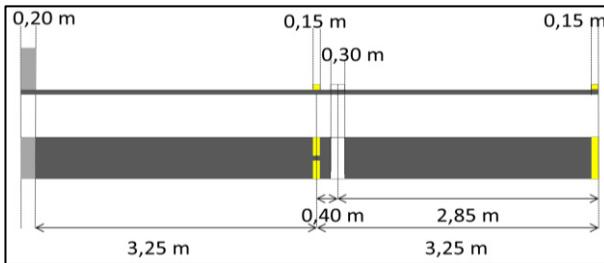


Abbildung 3.29: Querschnitt AID 4, (Phase 3)

Als Pendant zu AID 4 (weiße Markierung links im gelb markierten Fahrstreifen) wird AID 5 gewählt (vgl. Abbildung 3.30). Hier liegt die weiße Fahrbahnbegrenzung rechts im gültigen gelb markierten Fahrstreifen. Der zugrundeliegende BAB-Querschnitt besitzt lediglich einen breiten Randstreifen (1,1 m). Dieser Querschnitt ist üblich, wenn nachträglich ein Fahrstreifen an den bestehenden Querschnitt angebaut wird. AID 5 wird analog zu AID 4 nur auf dem rechten Fahrstreifen befahren und zwar mit (AID 5r\_V) als auch ohne Verkehr (AID 5r).

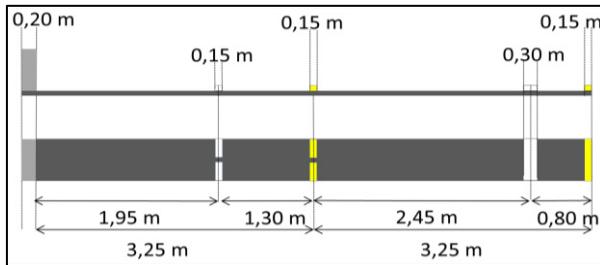


Abbildung 3.30: Querschnitt AID 5, (Phase 3)

Die Querschnitte AID 6 und AID 7 werden von den VP auf dem linken Fahrstreifen mit Verkehr befahren (vgl. Abbildung 3.31 und Abbildung 3.32). AID 6 ist angelehnt an AID 1 ohne ungültige Markierung im Fahrstreifen. Die Markierungsfarbe ist hier weiß statt gelb. Die Markierungskonstellation (nur weiße) ist identisch mit dem untersuchten BAB Abschnitt auf der A5 in FR Nord (Phase 2A). Die Fahrstreifenbreiten sind für den linken Fahrstreifen 0,25 m breiter und für den rechten Fahrstreifen 0,5 m schmäler als auf der A5 in Phase 2A.

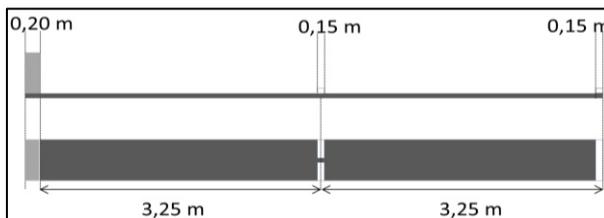


Abbildung 3.31: Querschnitt AID 6, (Phase 3)

Haben Querschnitte einen schmalen Seitenstreifen von 2,0 m, ist die Markierungskonstellation innerhalb der Arbeitsstelle ähnlich der AID 7 (vgl. Abbildung 3.32). In den RAA sind die RQ der Stadtautobahnen (EKA 3) mit einem Seitenstreifen von 2,0 m ausgestattet (vgl. RQ 38,5, RQ 31,5 und RQ 25) (RAA 2008a). Querschnitte, die standardmäßig nach altem Regelwerk (RAS-Q-82, RAS-Q-96) einen Seitenstreifen von 2,0 m besitzen, sind der RQ 26 und der RQ 33 (RAS-Q 1982; RAS-Q-96 1996).

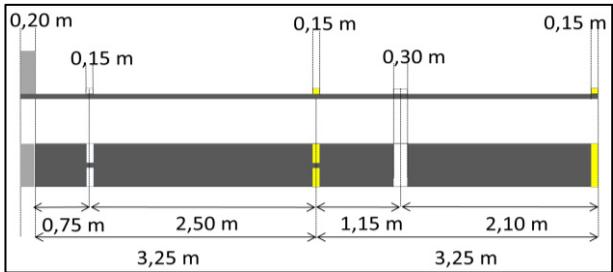


Abbildung 3.32: Querschnitt AID 7, (Phase 3)

### 3.5.3 Details der Blickbewegungsaufzeichnung

Für die Aufzeichnung und Auswertung der Blickdaten wird die Software D-Lab 3.01 verwendet. Vor Versuchsbeginn im Fahrsimulator werden Marker auf der Leinwand platziert. Diese Marker ermöglichen nach der Aufzeichnung der Blickdaten eine automatische Berechnung der Blickparameter bezogen auf die manuell definierten AOI. In Abbildung 3.33 sind die Marker, die aufgrund von Winkel und Lichtverhältnissen in dem aktuell dargestellten Bild von der Software erkannt werden, mit roten Quadraten markiert. Nach der Datenaufzeichnung werden die AOI definiert (vgl. farblich dargestellte Flächen Abbildung 3.33). Das aktive AOI (rechter Fahrstreifen) ist farblich hinterlegt. Bei allen anderen, inaktiven AOI sind nur die Begrenzungen zu sehen. Das rote Fadenkreuz ist der aktuelle Blickpunkt.

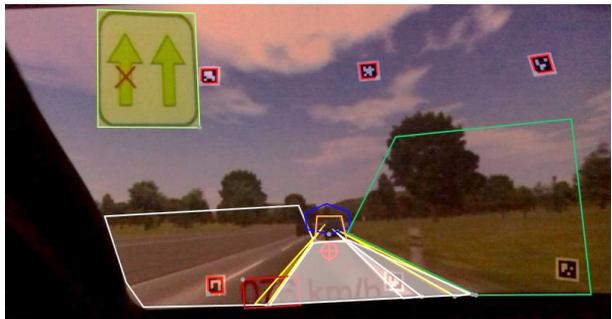


Abbildung 3.33: AOI-Definition (Phase 3)

Abbildung 3.33 zeigt, dass nicht die gesamte Fläche des sichtbaren Bereichs mit AOI belegt ist. Wenn der Blick außerhalb der definierten AOI-Bereiche fällt, wird dieser in der AOI-Auswertung nicht berücksichtigt. Die Summe der prozentualen Verteilung der Blicke ergibt nicht 100 %, da sich die einzelnen AOI teilweise überlagern, z. B. AOI Fluchtpunkt (blau) und AOI vorausfahrendes Fahrzeug (orange) oder die Fahrstreifen mit der Markierung.

### 3.5.4 Ergebnisse zum Fahrverhalten

Auch in Phase 3 weisen alle befahrenen AID im Mittel einen Versatz nach rechts auf. Auf dem rechten Fahrstreifen der AID 5r wird am weitesten links gefahren. Die ermittelte Spurhaltequalität der vier simulierten AID, die auf dem rechten Fahrstreifen befahren wurden, liegt zwischen 0,37 und 0,72. Diese Werte liegen unterhalb der ermittelten Spurhaltequalitäten in Phase 2B. AID 5r besitzt mit 0,76 die größte Spurhaltequalität. Innerhalb dieses Querschnitts wird folglich am ehesten in der Fahrstreifenmitte gefahren (vgl. Tabelle 3.8). Innerhalb der anderen AID wird deutlich rechts der Fahrstreifenmitte gefahren.

Die mittlere laterale Position der AID 4r liegt mit 27 cm nur 2 cm weiter rechts als die laterale Position der AID 2r (Phase 2B). Die Spurhaltequalität in Bezug auf die laterale Position der AID 1r (Phase 2B) aller in Phase 3 untersuchten AID liegt im Bereich zwischen 73 und 92 % (vgl. Tabelle 3.8). Die auf die AID 1r bezogene Spurhaltequalität von AID 4r weicht von der Spurhaltequalität des identischen Querschnitts AID 2r nur um 3 % ab. Die Ergebnisse sind somit vergleichbar.

Tabelle 3.8: Qualität der Längsdynamik und Spurhaltung auf dem rFS nach Reichart 2001, Bubb 2015 (Phase 3)

AID	AID 4r	AID 5r	AID 4r_V	AID 5r_V
Kennwerte				
mw_v [km/h]	80,0697	79,4840	79,2230	79,1374
mw_latP [m]	0,2689	0,1612	0,3694	0,3272
std_abw (mw) [m]	0,1713	0,1879	0,1427	0,1367
Ausn_FS ( $\kappa$ ) [-]	0,4563	0,2352	0,6381	0,5604
Q_Spur ( $Q_s$ ) [-]	0,5437	0,7648	0,3619	0,4396
Ausn_FS [-] (bezog. latP_1r)	0,0847	0,1364	0,2665	0,1888
Q_Spur [-] (bezog. latP_1r)	0,9153	0,8636	0,7335	0,8112

Die Standardabweichung der lateralen Position, und somit die Pendelbewegung im Fahrstreifen, sind bei den AID mit Verkehr (AID 4r\_V, AID 5r\_V) **signifikant** kleiner als bei den AID ohne Verkehr (AID 4r, AID 5r) (AID 4r / AID 4r\_V:  $U = -3,032 / p = 0,002 / r = 0,705$ ; AID 5r / AID 5r\_V:  $U = -3,692 / p = 0,000 / r = 0,440$ ). Der parallel verlaufende Verkehr führt scheinbar dazu, dass die Fahrzeugposition beim Abweichen der Wunschposition im Fahrstreifen schneller korrigiert wird.

Die Spurhaltequalität für den linken Fahrstreifen liegt bei 0,50 (AID 7l\_V) und 0,61 (AID 6l\_V), bezogen auf AID 1r sogar bei 0,87 bzw. 0,98 (vgl. Tabelle 3.9). In AID 6l\_V wird tendenziell eher in der Fahrstreifenmitte gefahren als in AID 7l\_V. Innerhalb der AID\_6l\_V ist keine zusätzliche Markierung aufgebracht, es ist allein die gültige weiße Markierung vorhanden. Der parallel fahrende Fahrzeugpulk führt erstaunlicherweise nicht dazu, dass die Fahrstreifenmitte nach links überfahren wird. Die mittleren lateralen Positionen mit 22 cm (AID 6l\_V) und 27 cm (AID 7l\_V) sind ähnlich der lateralen Position der AID 1r (Phase 2B).

Tabelle 3.9: Qualität der Längsdynamik und Spurhaltung auf dem IFS nach Reichart 2001, Bubb 2015 (Phase 3)

AID	AID 6l_V 	AID 7l_V 
Kenn- werte		
mw_v [km/h]	79,6797	79,5144
mw_latP [m]	0,2221	0,2798
std_abw (mw) [m]	0,1656	0,1803
Ausn_FS [-]	0,3889	0,5014
Q_Spur [-]	0,6111	0,4986
Ausn_FS [-] (bezog. latP_1r)	0,0173	0,1298
Q_Spur [-] (bezog. latP_1r)	0,9827	0,8702

Wie bereits in Phase 2B wird auch in Phase 3 ein modifiziertes Box-Whisker-Diagramm entwickelt (vgl. Abbildung 3.34). Das Maximum der lateralen Position liegt für alle AID außerhalb des eigenen Fahrstreifens. Für den rechten Fahrstreifen bedeutet das ein Verlassen der Fahrbahn, was zu kritischen Fahr-situationen und evtl. sogar zu Unfällen führen kann. Der rechte Fahrstreifen wird mit Ausnahme der AID 5r nicht nach links verlassen, sondern immer nach rechts (vgl. Anhang 7.9).

Der einzige Unterschied zwischen den AID 4r und AID 5r ist die Markierungskonstellation, die dazu führt, dass in AID 4r weiter rechts gefahren wird als in AID 5r. Das Verhalten lässt sich statistisch **signifikant** anhand des Medians und des Mittelwerts der lateralen Position abbilden (Mittelwert:  $t(35) = -3,592$  /  $p = 0,001$  /  $r = 0,641$ ; Median:  $U = -3,189$  /  $p = 0,001$  /  $r = 0,632$ ). Auch mit Verkehr (AID 4r\_V und AID 5r\_V) ist der Einfluss noch **signifikant**, allerdings etwas weniger deutlich (Mittelwert:  $t(35) = -2,297$  /  $p = 0,028$  /  $r = 0,679$ ; Median:  $U = -2,215$  /  $p = 0,027$  /  $r = 0,646$ ).

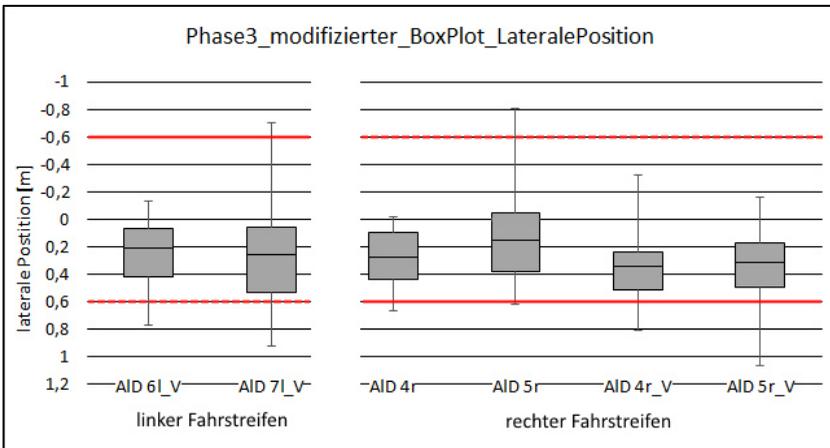


Abbildung 3.34: Modifiziertes Box-Whisker-Diagramm der lateralen Position (Phase 3)

Der Unterschied ohne und mit Verkehr wird in der Ausdehnung der in Abbildung 3.34 dargestellten Boxen deutlich. Vergleicht man AID 4r mit AID 4r\_V und AID 5r mit AID 5r\_V, so erkennt man, dass die Boxen mit Verkehr kleiner werden und die gewählten lateralen Positionen weiter rechts liegen. Die statistische Überprüfung hat ergeben, dass die Fahrzeuge mit Verkehr **signifikant** weiter rechts fahren. Sowohl für AID4r und AID 4r\_V (Mittelwert:  $t(35) = 5,505 / p = 0,000 / r = 0,750$ ; Median:  $t(35) = 5,358 / p = 0,000 / r = 0,705$ ) als auch für AID 5r und AID 5r\_V (Mittelwert:  $t(35) = 4,0602 / p = 0,000 / r = 0,477$ ; Median:  $U = 4,148 / p = 0,000 / r = 0,470$ ) ergibt sich ein **signifikanter** Zusammenhang. Der Verkehr auf dem linken Fahrstreifen führt dazu, dass die VP weiter rechts im eigenen Fahrstreifen fahren.

Markierungskonstellationen aus gelb und weiß werden subjektiv irritierend wahrgenommen (Phase 1). Die weiße Leitlinie, die zusätzlich zur gelben Markierung in AID 7l\_V vorhanden ist, führt dazu, dass weiter rechts gefahren wird als in AID 6l\_V (nur weiße Markierung). Statistisch lässt sich allerdings **kein signifikanter** Zusammenhang nachweisen (Mittelwert:  $t(35) = 1,659 / p = 0,106 / r = 0,559$ ; Median:  $t(35) = 1,671 / p = 0,104 / r = 0,588$ ). Aufgrund des Versuchsaufbaus kann nur die Markierungskonstellation dafür die Ursache sein. Verglichen mit Phase 2B ist die mittlere laterale Position auf dem linken

Fahrstreifen in Phase 3 weiter links. Anzumerken ist, dass in Phase 3, im Gegensatz zu Phase 2B, Verkehr simuliert wird. Allerdings wird, trotz eines dauerhaft vorhandenen Fahrzeugpulk auf dem rechten Fahrstreifen, der linke Fahrstreifen teilweise nach rechts verlassen (vgl. Abbildung 3.34).

### **3.5.5 Ergebnisse des Fahrverhaltens in Abhängigkeit von Lageplanelementen**

#### **Rechter Fahrstreifen**

In Abbildung 3.35 ist der gleitende Median für AID 4r und AID 5r ohne (gelb und hellblau) und mit Verkehr (orange und dunkelblau) dargestellt. Im Verlauf der lateralen Position entlang der Strecke von AID 4r und AID 5r lassen sich zwei Bereiche erkennen: Bis Station 0+900 verläuft die laterale Position im Bereich zwischen der Fahrstreifenmitte und 20 cm rechts davon. Zwischen Station 1+000 und ca. 1+800 liegt die mittlere laterale Position 20 cm weiter rechts im Bereich von 20 bis 40 cm rechts der Fahrstreifenmitte. Überlagert man die laterale Position mit dem Krümmungsband, so liegt die Änderung der lateralen Position zu Beginn des Krümmungswechsels von einer Rechts- in eine Linkskurve. Im Verlauf der mittleren lateralen Position innerhalb AID 4r und AID 5r ist die Änderung in Form eines Knicks bei Station 0+950 am deutlichsten erkennbar.

Die Fahrbahn wird am Ende der AID wieder nach links zurückverschwenkt. Der Knick im Verlauf der lateralen Position gegen Ende der AID deutet darauf hin, dass die Verschwenkung bereits visuell wahrgenommen und der Lenkwinkel bereits leicht geändert wird (Abbildung 3.35 Station 1+805).

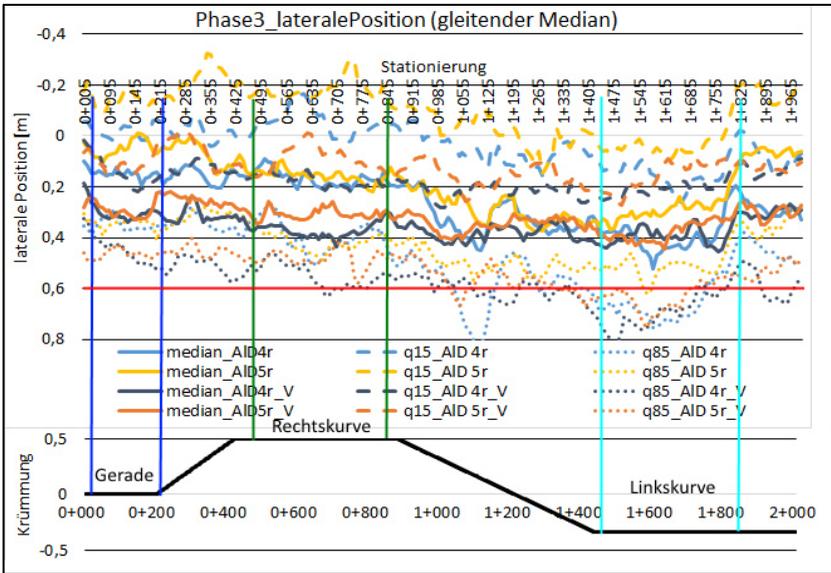


Abbildung 3.35: Gleitender Mittelwert der lateralen Position rFS (Phase 3) ohne Verkehr (hellere Farben) und mit Verkehr (dunklere Farben)

Die hier gewählte BAB Trassierung hat eine geringe Krümmung ( $1/R \leq 0,0005$ ). Diese ist im Vergleich zu Kurven mit kleineren Radien nicht so offensichtlich zu erkennen. Unter der Annahme, dass die Fahrzeugführer bestrebt sind, möglichst mittig im Fahrstreifen zu fahren, müsste die laterale Position der Rechtskurve gleich die der Linkskurve sein. Wenn keine störende weiße Markierung vorhanden ist (AID 6l\_V) ist dies auch annähernd der Fall (vgl. Abbildung 3.38). Bereits in Abbildung 3.35 (S. 106) sind Tendenzen und Unterschiede zwischen den einzelnen Lageplanelementen zu erkennen. Beim Vergleich der abschnittswisen Mediane wird der Unterschied deutlicher. In Abbildung 3.36 und Abbildung 3.38 (S. 111) sind nach dem gleichen Schema wie für Phase 2B (Kapitel 3.4.4) die mittleren lateralen Positionen der einzelnen Krümmungsbereiche dargestellt.

Nochmals deutlicher als in der AID 2r der Phase 2B wird in der AID 4r (entspricht der Markierungskonstellation der AID 2r) in der Linkskurve statistisch **signifikant** weiter rechts gefahren als in der Rechtskurve

(Mittelwert:  $t(35) = 5,798$  /  $p = 0,000$  /  $r = 0,570$ ; Median:  $t(35) = 5,557$  /  $p = 0,000$  /  $r = 0,523$ ). Die weiße Markierung in der Nähe der gelben gültigen Leitlinie wird vermutlich zur Orientierung verwendet, sodass ein Versatz der lateralen Position von über 20 cm nach rechts im Vergleich zur Geraden entsteht. Die laterale Position der Geraden entspricht in etwa der lateralen Position in der Rechtskurve. In der rechten Fahrstreifenhälfte ist auch keine störende weiße Markierung vorhanden.

Die Markierungskonstellation der AID 5r sollte theoretisch in der Rechtskurve einen Linksversatz fördern. Der Median der lateralen Position liegt allerdings mit 15 cm ähnlich weit in der rechten Fahrstreifenhälfte wie bei AID 4r. Der statistische Nachweis zeigt, wie auch für AID 4r, dass in der Linkskurve **signifikant** weiter rechts gefahren wird als in der Rechtskurve (Mittelwert:  $t(35) = 3,672$  /  $p = 0,001$  /  $r = 0,721$ ; Median:  $t(35) = 3,586$  /  $p = 0,001$  /  $r = 0,709$ ). Die laterale Position der Geraden ist im Vergleich zu den anderen AID auffällig nahe an der Fahrstreifenmitte. Möglicherweise wird die weiße Markierung in der Geraden zur Orientierung verwendet und fördert somit einen Linksversatz bzw. eine fahrestreifenmittige Fahrweise. Für die Orientierung in der Kurve ist der Abstand zwischen gültiger gelber und ungültiger weißer Fahrstreifenbegrenzung offensichtlich zu groß.

In den simulierten AID mit Verkehr ist der Unterschied zwischen den einzelnen Lageplanelementen deutlich geringer. Der auf dem linken Fahrstreifen vorhandene Verkehr führt dazu, dass generell weiter rechts gefahren wird. In AID 4r\_V wird nun auch in der Linkskurve deutlich weiter rechts gefahren als ohne Verkehr. Mit Verkehr besteht **kein signifikanter Zusammenhang** mehr zwischen der lateralen Position der Links- und Rechtskurve innerhalb der AID 4r\_V (Mittelwert:  $U = -1,351$  /  $p = 0,177$  /  $r = 0,619$ ; Median:  $U = -0,848$  /  $p = 0,396$  /  $r = 0,502$ ). Auch für AID 5r\_V kann für den in Abbildung 3.36 dargestellten Median **kein signifikanter Zusammenhang** hergesetelt werden (Median:  $t(35) = -1,443$  /  $p = 0,158$  /  $r = 0,580$ ). Für den zusätzlich getesteten Mittelwert kann nachgewiesen werden, dass in der Rechtskurve **signifikant** weiter rechts gefahren wird als in der Linkskurve (Mittelwert:  $t(35) = 3,335$  /  $p = 0,002$  /  $r = 0,665$ ).

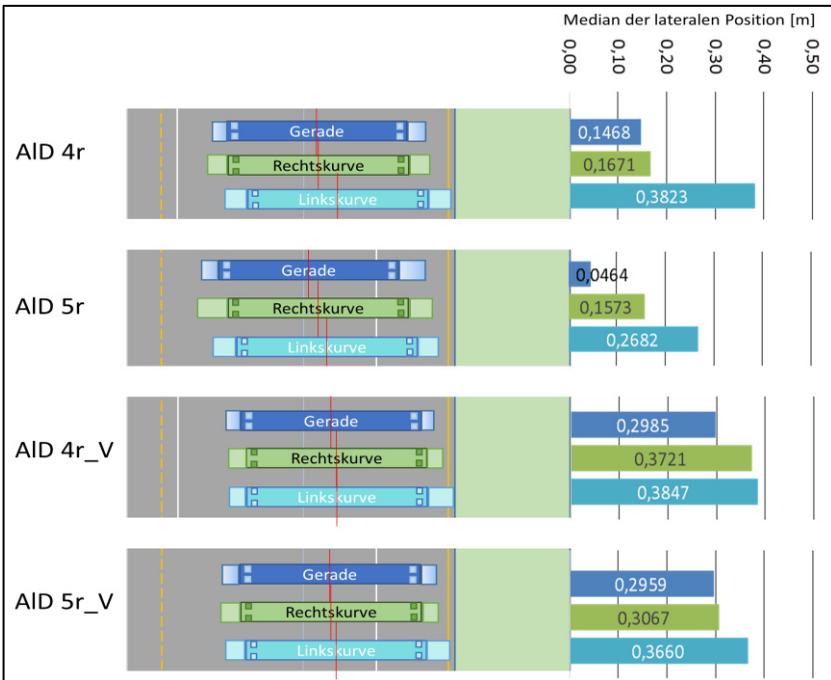


Abbildung 3.36: Mittlere laterale Position innerhalb einzelner Lageplanelemente, rFS (Phase 3)

Vergleicht man die einzelnen Lageplanelemente der unterschiedlichen AID so zeigt sich, dass die VP in der Linkskurve der AID 4r statistisch **signifikant** weiter rechts fahren als in der AID 5r (Mittelwert:  $t(35) = -3,539 / p = 0,001 / r = 0,545$ ; Median:  $t(35) = -3,196 / p = 0,003 / r = 0,470$ ). Somit hat die Markierungskonstellation, als einziger variierter Faktor, einen signifikanten Einfluss auf die laterale Position der AID 4r. Mit Verkehr ist der Unterschied zwar optisch erkennbar (vgl. Abbildung 3.36), allerdings besteht kein statistisch nachweisbarer Zusammenhang. Die laterale Position der AID 4r\_V verläuft in der Linkskurve **nicht signifikant** weiter rechts als die der AID 5r\_V (Mittelwert:  $t(35) = 0,990 / p = 0,329 / r = 0,532$ ; Median:  $U = -0,801 / p = 0,423 / r = 0,532$ ).

Für die Rechtskurve unterscheiden sich die lateralen Positionen der AID 5r und AID 4r **nicht signifikant** (Mittelwert:  $t(35) = -1,931 / p = 0,062 / r = 0,567$ ;

Median:  $t(35) = -1,782 / p = 0,083 / r = 0,566$ ). Allerdings ist ein statistisch **signifikanter** Zusammenhang für AID 5r\_V und AID 4r\_V nachweisbar (Mittelwert:  $t(35) = -2,892 / p = 0,007 / r = 0,513$ ; Median:  $t(35) = -2,950 / p = 0,006 / r = 0,484$ ). In AID 4r\_V wird in der Rechtskurve signifikant weiter rechts gefahren als in AID 5r\_V.

### Linker Fahrstreifen

Sowohl in der AID 6l\_V als auch in der AID 7l\_V wird generell rechts der Fahrstreifenmitte gefahren. Der Verlauf der lateralen Position der AID 6l\_V und AID 7l\_V ist, bis auf den Bereich der Linkskurve, ähnlich und bewegt sich in einem Bereich von ca. 20 cm (vgl. Abbildung 3.37). Dies bestätigt auch der statistische Test: Die laterale Position der AID 7l\_V ist **nicht signifikant** weiter rechts als die der AID 6l\_V (Mittelwert:  $t(35) = 1,659 / p = 0,106 / r = 0,559$ ; Median:  $t(35) = 1,671 / p = 0,104 / r = 0,548$ ).

Bereits im Verlauf der lateralen Position in Abbildung 3.37 ist erkennbar, dass in der zweiten Hälfte der AID 7l\_V weiter rechts gefahren wird als in der Ersten. Auch die Auswertung der Mediane bezüglich der Lageplanelemente zeigt einen Versatz zwischen Rechts- und Linkskurve (vgl. Abbildung 3.38). Statistisch lässt sich dieser ebenfalls belegen: Zwischen Rechts- und Linkskurve besteht ein **signifikanter** Unterschied innerhalb der AID 7l\_V (Mittelwert:  $t(35) = 2,845 / p = 0,007 / r = 0,712$ ; Median:  $t(35) = 2,594 / p = 0,014 / r = 0,694$ ). Wie bereits aus dem Verlauf (vgl. Abbildung 3.37) und der Mediane der einzelnen Lageplanelemente (vgl. Abbildung 3.38) der lateralen Position zu erwarten, ist der Unterschied zwischen Rechts- und Linkskurve für AID 6l\_V statistisch **nicht signifikant** (Mittelwert:  $t(35) = 1,069 / p = 0,292 / r = 0,559$ ; Median:  $t(35) = 1,077 / p = 0,289 / r = 0,555$ ).

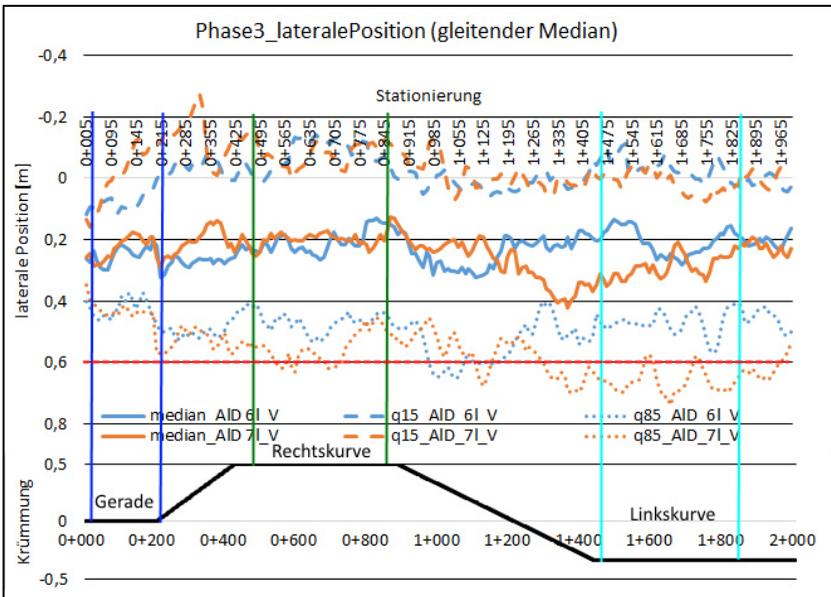


Abbildung 3.37: Gleitender Mittelwert der lateralen Position IFS, mit Verkehr (Phase 3)

Zwischen AID 61\_V und AID 71\_V besteht innerhalb der Rechtskurve **kein signifikanter** Unterschied. Die laterale Position der AID 61\_V und AID 71\_V ist nahezu identisch (Mittelwert:  $t(35) = -1,122 / p = 0,269 / r = 0,379$ ; Median:  $t(35) = -0,927 / p = 0,360 / r = 0,379$ ). In der Linkskurve hingegen liegt die laterale Position der AID 71\_V statistisch **signifikant** weiter rechts als die der AID 61\_V (Mittelwert:  $t(35) = 2,865 / p = 0,007 / r = 0,541$ ; Median:  $t(35) = 2,615 / p = 0,013 / r = 0,565$ ) (vgl. Abbildung 3.38). Die zusätzlich weiße Markierung der AID 71\_V hat offenbar vor allem in der Linkskurve einen kritischen Einfluss.

Die Differenzen zwischen den lateralen Positionen innerhalb der Lageplan-elemente sind auf dem linken Fahrstreifen der AID deutlich geringer als auf dem rechten. Die geringen Unterschiede der lateralen Position innerhalb AID 61\_V (nur weiße Markierung) bestätigen, dass die Fahrzeugführer anstreben, die gleiche laterale Position unabhängig der Krümmung der Straße zu halten.

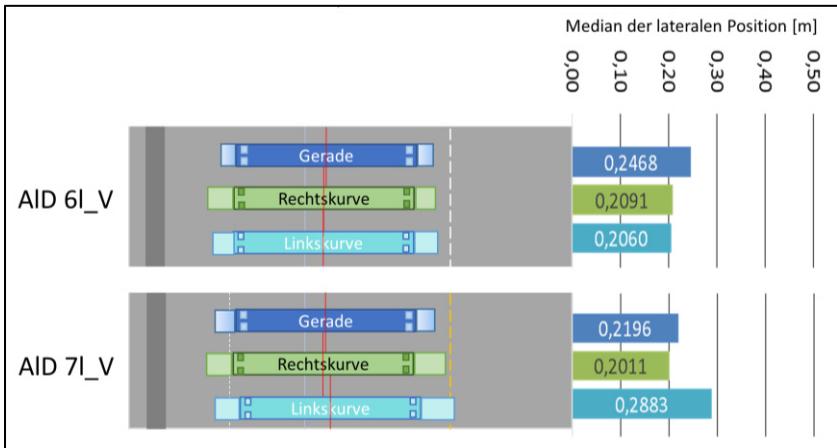


Abbildung 3.38: Mittlere laterale Position innerhalb einzelner Lageplanelemente, IFS (Phase 3)

### 3.5.6 Ergebnisse zum Blickverhalten

Anhand der mittleren Fixationsdauern ist kein großer Unterschied zwischen den einzelnen Arbeitsstellen festzustellen (vgl. Abbildung 3.39). AID 4r, AID 5r und AID 5r\_V haben alle sehr ähnliche mittlere Fixationsdauern ( $\Delta \leq 10$  ms). AID 4r\_V weicht von denen auf dem rechten Fahrstreifen befahrenen AID mit einer mittleren Fixationsdauer von 701,3 ms am deutlichsten ab. Für AID 5r und AID 5r\_V ist die mittlere Fixationsdauer identisch und daher offensichtlich unabhängig vom Verkehr. Das Delta der mittleren Fixationsdauern zwischen AID 4r und AID 4r\_V beträgt 32 ms.

Für den linken Fahrstreifen ist die Differenz der mittleren Fixationsdauer am größten: Innerhalb der AID 6l\_V ist die mittlere Fixationsdauer mit 635,3 ms um 81,6 ms kürzer als in AID 7l\_V. Mit lediglich weißer Markierung hat AID 6l\_V die deutlich unauffälligeren Markierungskonstellation. Kürzere Fixationen weisen auf eine komplexere Umgebung und Fahraufgabe hin (vgl. Kapitel 2.2.4). Aufgrund der Ergebnisse ist AID 6l\_V als komplexere Baustelle zu bewerten, obwohl die Markierungskonstellation innerhalb AID 6l\_V im Vergleich zu AID 7l\_V eindeutiger und weniger komplex ist.

Das Verhältnis zwischen der Fixations- und Saccadendauer zeigt deutlichere Unterschiede als die mittlere Fixationsdauer auf (vgl. Abbildung 3.39). Mit Verkehr nimmt die Suchaktivität ab; das Verhältnis von Fixationsdauer zu Saccadendauer wird kleiner. Innerhalb der AID 6l\_V ist die Suchaktivität hoch. Dies bestätigt auch die kürzeste mittlere Fixationsdauer innerhalb AID 6l\_V.

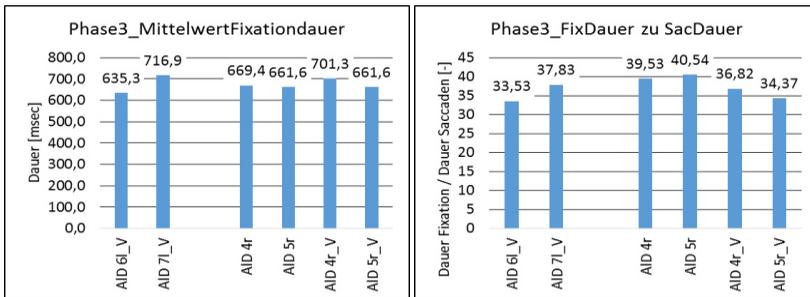


Abbildung 3.39: Mittlere Fixationsdauer (links) und Verhältnis zwischen Fixations- und Saccadendauer (rechts) innerhalb der AID (Phase 3)

Alle AID mit Verkehr haben eine ähnliche Scanpfadlänge ( $\Delta \leq 473$  LE) (vgl. Abbildung 3.40). Ausnahme ist AID 4r\_V, die den längsten Scanpfad mit 2.957,31 LE besitzt. AID 4r und AID 5r weisen eine ähnliche Scanpfadlänge auf, sodass hieraus keine Schlüsse auf die unterschiedliche Markierungskonstellation gezogen werden können. AID 6l\_V hat eine geringere Scanpfadlänge und steht somit entgegen der zuvor ermittelten Ergebnisse, die eine hohe Suchaktivität bedeuten. Komplexere Situationen mit hoher Suchaktivität werden durch lange Scanpfadlängen beschrieben.

Der Index der räumlichen Dichte (vgl. Abbildung 3.40) gibt an, wie groß der fixierte Bereich im Vergleich zum Umblickfeld bzw. zum erfassten Szenenbild der Kamera ist. Unabhängig von der Markierungskonstellation ist der Index der räumlichen Dichte für alle AID mit Verkehr ähnlich (0,13 bzw. 0,14). Ein direktes Muster in Bezug auf die Markierungskonstellationen ist nicht ableitbar.

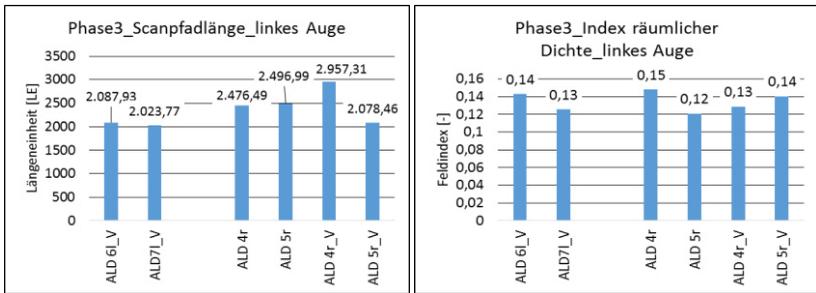


Abbildung 3.40: Scanpfadlänge (links) und Index der räumlichen Dichte (rechts) (Phase 3)

Neben den Blickparametern wurden auch die AOI ausgewertet. Die Ergebnisse der AOI-Auswertung der auf dem rechten Fahrstreifen befahrenen AID sind in Abbildung 3.41 dargestellt. Die abgebildeten Prozentsätze entsprechen dem Mittelwert aller VP für die jeweilige AID.

Auf dem rechten Fahrstreifen wird das rechte Umfeld ohne Verkehr fast doppelt so häufig angeblickt wie mit Verkehr. Der Fokus der VP verlagert sich deutlich erkennbar vom Umfeld auf die Straße und den Verkehr, sobald andere Verkehrsteilnehmer vorhanden sind. Die Markierung wird ohne Verkehr in AID 4r knapp 10 % und in AID 5r nur ca. 5 % der Zeit fixiert. Vergleicht man diese Ergebnisse mit den AID 4r\_V und AID 5r\_V, so nimmt lediglich der Anteil der Fixationen für die gelbe Markierung ab. Die weiße Markierung wird gleich häufig fixiert wie ohne Verkehr. Generell orientieren sich die VP auf dem rechten Fahrstreifen an der Markierung in der linken Fahrstreifenhälfte. Die weiße Markierung in der rechten Fahrstreifenhälfte (AID 5r bzw. AID 5r\_V) wird so gut wie nie fixiert.

Der Fluchtpunkt wird sehr häufig fixiert. Auch mit Verkehr ist der Anteil des AOI Fluchtpunktes sehr hoch, da sich die AOI vorausfahrendes Fahrzeug und Fluchtpunkt überlagern. Durch die Überlagerung kommt eine Gesamtprozentzahl größer als 100 % zustande. Für die AID 4r\_V und AID 5r\_V ist daher der Anteil der Fixationen, die auf den Fluchtpunkt entfallen, mindestens um einen Teil der Fixationen, die auf das vorausfahrende Fahrzeug entfallen, zu reduzieren.

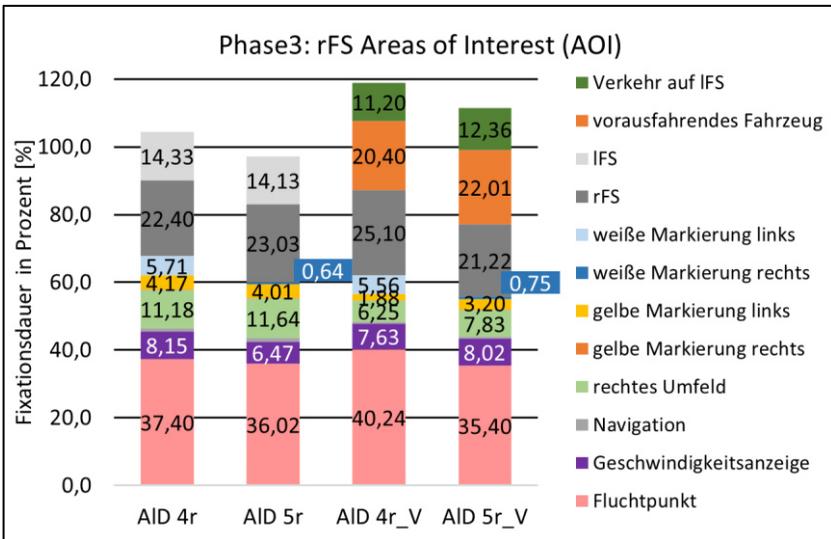


Abbildung 3.41: AOI-Auswertung für AID 4 und AID 5 auf den rFS (Phase 3)

Auch auf dem linken Fahrstreifen wird der Fluchtpunkt ca. 1/3 der Zeit fixiert, allerdings ist der Anteil etwas geringer als auf dem rechten Fahrstreifen mit Verkehr. Auch für den linken Fahrstreifen überlagern sich die AOI Fluchtpunkt und vorausfahrendes Fahrzeug.

Der Querschnitt AID 6l\_V besteht nur aus weißer Markierung, die weniger als 1 % der Zeit fixiert wird. Im Vergleich zum Anteil, in dem die gelbe Markierung auf dem rechten Fahrstreifen fixiert wird, ist das deutlich weniger. Der rechte Fahrstreifen hat auf beiden Seiten Markierung. Der linke Fahrstreifen hat im Fall von AID 6l\_V auf der rechten Seite eine Leitlinie. Auf der linken Seite begrenzt die TSE den Fahrstreifen. Die TSE (6,7 %) wird häufiger angeblickt als die Markierung (0,28 %). Die VP orientieren sich demnach eher an der TSE als an der Markierung.

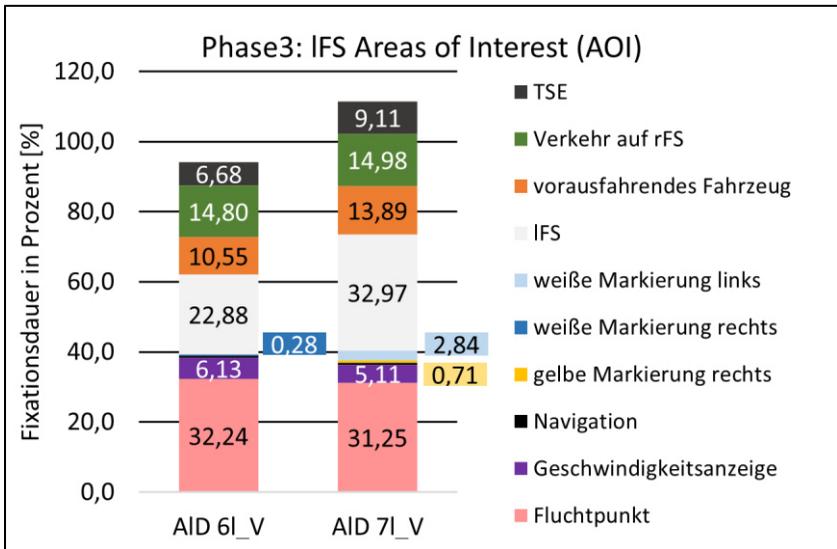


Abbildung 3.42: AOI-Auswertung für AID 6 und AID 7 auf den IFS (Phase 3)

Der linke Fahrstreifen wird im Fall von AID 7l\_V rund 10 % häufiger angesehen als innerhalb der AID 6l\_V. AID 7l\_V unterscheidet sich nur durch die Markierungskonstellation, die hier mit gelber und weißer Markierung vorliegt. Die weiße Markierung links im Fahrstreifen wird 2,84 % der Zeit fixiert, die gelbe lediglich 0,71 %.

Der parallel auf dem rechten Fahrstreifen fahrende Verkehr wird mit knapp 15 % etwas weniger häufig fixiert als der parallel laufende Verkehr auf dem linken Fahrstreifen bei einer Fahrt auf dem rechten Fahrstreifen. Möglicherweise gehen die Fahrzeugführer aufgrund ihrer Erfahrung davon aus, dass der linke Fahrstreifen schmaler ist und orientieren ihren Fahrstil am parallel-laufenden Verkehr. Ein weiterer Grund für die Beobachtung könnte sein, dass auf dem linken Fahrstreifen schneller gefahren wird. Falls ein Fahrzeug den Fahrstreifen von rechts nach links wechselt müssen die Geschwindigkeit und das Fahrverhalten angepasst werden.

### 3.5.7 Zusammengefasste Ergebnisse Phase 3

Die Markierungskonstellation hat einen nachweisbaren Einfluss auf die laterale Position. Liegt die weiße Markierung in der linken Fahrstreifenhälfte (AID 4r), fahren die VP weiter rechts als wenn die weiße Markierung in der rechten Fahrstreifenhälfte liegt (AID 5r). In Bezug zur Fahrstreifenmitte wird allerdings in beiden Fällen eher rechts gefahren. Die Aufmerksamkeit der VP richtet sich auf dem rechten Fahrstreifen auf die gelbe Leitlinie. Die gelbe Fahrbahnrandmarkierung wird nahezu nie angeblickt. Im Fall AID 4r wird zusätzlich die vorhandene weiße Markierung fixiert. Die gelbe und weiße Markierung in der rechten Fahrstreifenhälfte werden sehr selten angeblickt ( $< 1\%$ ).

Mit Verkehr auf dem linken Fahrstreifen wird auf dem rechten Fahrstreifen weiter rechts gefahren als ohne Verkehr. Zusätzlich werden die Pendelbewegungen im Fahrstreifen mit Verkehr geringer, was sich durch die geringere Standardabweichung der lateralen Position zeigt. Auch in den Blickbewegungen ist erkennbar, dass der Markierung mit Verkehr weniger Bedeutung zukommt und vermehrt andere Verkehrsteilnehmer fixiert werden.

Es kann bestätigt werden, dass, wie in Kapitel 2.2.5 beschrieben, sich die Fahrzeugführer an der Innenseite der Kurven orientieren. In Linkskurven wird weiter rechts gefahren, wenn parallel zur gelben Leitlinie noch eine ungültige weiße Markierung im Fahrstreifen liegt (AID 4r). Dasselbe sollte theoretisch auch für Rechtskurven gelten. In der hier durchgeführten Simulation ist dies nur bedingt nachweisbar, dass weiter links gefahren, wenn die weiße Markierung nahe am rechten Fahrstreifenrand liegt (AID 5r). Ohne Verkehr ist dieser Effekt deutlicher erkennbar als mit.

Der ausstehende Nachweis, dass für den linken Fahrstreifen die laterale Position der Rechtskurve gleich der Linkskurve ist, wenn keine zusätzliche ungültige Markierung aufgebracht ist, ist geglückt (vgl. AID 6l\_V). Auch auf dem linken Fahrstreifen führt die im Fahrstreifen links liegende weiße Markierung dazu, dass in der Linkskurve deutlich weiter rechts gefahren

wird als in der Rechtskurve (AID 71\_V). Die laterale Position der AID 71\_V in der Rechtskurve ist nahezu identisch der Geraden. Im Vergleich der lateralen Position in der Geraden und der Rechtskurve der AID 71\_V ist die laterale Position in der Linkskurve um ein Delta von 8 cm nach rechts versetzt.

Die weiße ungültige Markierung im linken Fahrstreifen (AID 71\_V) wird von weniger als 50 % der VP überfahren. Die VP nutzen ca. 1,0 m der ihnen zur Verfügung stehenden Fahrstreifenbreite nicht. Mit ausreichend breiten Fahrstreifen hat der Versatz zur Fahrstreifenmitte keine Auswirkung, allerdings nimmt die Problematik mit zunehmend schmalere Fahrstreifen zu.

### 3.6 Wesentliche Ergebnisse und Erkenntnisse

Generell wird die weiße und gelbe Markierungsfarbe als geeignet empfunden, um die Verkehrsführung anzuzeigen. In AID wird parallele gelbe und weiße Markierung als irritierender bewertet als sich kreuzende oder spitz zulaufende Markierung (Überleitung oder Verschwenkung). Am irritierendsten wird die weiße ungültige Markierung in der Nähe der gelben Fahrbahnbegrenzung bewertet.

Unterschiedliche Markierungskonstellationen werden unterschiedlich irritierend bewertet, haben aber nach der subjektiven Einschätzung keinerlei Einfluss auf das Fahrverhalten. Das qualitativ bewertete reale Fahrverhalten innerhalb von AID mit verschiedenen Markierungskonstellationen weist allerdings deutliche Unterschiede auf: Auf dem linken Fahrstreifen fahren die Fahrzeuge mit ungültiger weißer Markierung in der linken Fahrstreifenhälfte deutlich weiter rechts als ohne.

Das aufgezeichnete Fahrverhalten im Fahr Simulator konkretisiert diese Ergebnisse: Liegt die weiße Fahrbahnmarkierung in der rechten Hälfte des Fahrstreifens, wird weiter links gefahren als wenn die Markierung in der linken Hälfte des Fahrstreifens liegt. Neben der Markierung im eigenen Fahrstreifen ist auch die weiße Markierung auf den parallel verlaufenden Fahrstreifen, die nahe an der gelben Markierung liegt, relevant. Die Unterschiede der lateralen Position

werden mit nahe zusammenliegender weißer und gelber Markierung größer. Möglicherweise reduziert die weiße Markierung in der Nähe der Fahrstreifenbegrenzung den Fahrstreifen optisch in seiner Breite und verleitet die VP dazu, den parallel verlaufenden Fahrstreifen mitzunutzen.

Ein kontinuierlicher Verkehrsstrom auf dem parallel verlaufenden Fahrstreifen führt auf dem rechten Fahrstreifen dazu, dass die Pendelbewegungen im Fahrstreifen kleiner werden und der Rechtsversatz (weg vom parallel verlaufenden Verkehr) größer wird. Auf dem linken Fahrstreifen ist trotz des parallel verlaufenden Verkehrs auf dem rechten Fahrstreifen ein Rechtsversatz erkennbar. Die Pendelbewegungen reduzieren sich nicht. Die weiße Leitlinie in der Nähe der TSE wird sowohl in der Simulation als auch in der Realität trotz Verkehr auf dem rechten Fahrstreifen kaum überfahren.

Markierung wird peripher wahrgenommen und nur in kritischen Fällen fixiert (vgl. Kapitel 2.2.6). Im Blickverhalten innerhalb der AID ist der Trend erkennbar, dass die VP häufiger die ungültige weiße Markierung fixieren als die gültige gelbe. Weiß ist die gängige Markierungsfarbe und kommt im Straßenumfeld deutlich häufiger vor als gelbe. Möglicherweise zieht daher die weiße Markierung auch innerhalb der AID die Aufmerksamkeit der VP auf sich. Die Fahrzeugführer wissen, dass die weiße Markierung außer Kraft gesetzt ist, orientieren sich scheinbar dennoch stärker an ihr. In Rechts- und Linkskurve unterscheidet sich die laterale Position, wenn zusätzlich zur gelben auch ungültige weiße Markierung im Fahrstreifen vorhanden ist. Liegt keine ungültige weiße Markierung in der gelb markierten AID, so entspricht die laterale Position der Geraden in etwa der der Rechts- und Linkskurve.

Die Orientierung in Kurven erfolgt, wie mehrfach in der Literatur belegt, an der Kurveninnenseite. Ist in der Kurveninnenseite im eigenen Fahrstreifen zusätzlich zur gelben eine ungültige weiße Markierung vorhanden, verschiebt sich die laterale Position zur Kurvenaußenseite hin. In Rechtskurven wird dann weiter links gefahren und in Linkskurven weiter rechts. Auch die Markierung auf dem parallel verlaufenden Fahrstreifen hat einen Einfluss, wenn diese nahe an der eigenen Fahrstreifenbegrenzung bzw. Leitlinie liegt. Diese wirkt sich in Rechtskurven dadurch aus, dass weiter rechts bzw. in Linkskurven weiter links gefahren wird. Der Median der lateralen Position in Abhängigkeit von der

Markierungskonstellation und des durchfahrenen Lageplanelementes ist für alle untersuchten AID in Anhang 7.10 dargestellt.

Durch die von der Fahrstreifenmitte abweichende laterale Position entstehen in Abhängigkeit des befahrenen Fahrstreifens unterschiedlich kritische Situationen (vgl. Tabelle 3.10). Liegt eine AID beispielsweise in einer Linkskurve, so sollte ungültige weiße Markierung in der linken Fahrstreifenhälfte entfernt werden, um zu verhindern, dass der Fahrstreifen nach rechts verlassen wird.

Unabhängig davon, welcher Fahrstreifen befahren wird, wird innerhalb der AID rechts im Fahrstreifen gefahren. Solange auf beiden Fahrstreifen mit Rechtsversatz gefahren wird und ausreichend Sicherheitsabstand verbleibt, entsteht keine kritische Situation. Mit zunehmend schmalere Fahrstreifenbreiten werden die Sicherheitsräume kleiner und der Versatz zur Fahrstreifenmitte wird zunehmend problematisch. Der Überholfahrstreifen ist grundsätzlich als kritisch zu bewerten, da dieser meist sehr viel schmaler ausgeführt ist und schneller befahren wird. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf, um differenziertere und detailliertere Aussagen treffen zu können.

Tabelle 3.10: Einfluss der ungültigen weißen Markierung auf die laterale Position in Kurven

Lageplanelement weiße Markierung	Rechtskurve	Linkskurve
linke FS-hälfte	kein eindeutiger Einfluss erkennbar	laterale Position tendenziell <b>weiter rechts</b> <b>rFS:</b> Gefahr, die Fahrbahn zu verlassen <b>IFS:</b> rFS wird u.U. mitbenutzt → Konflikt mit parallelen Fzg
rechte FS-hälfte	laterale Position tendenziell <b>weiter links</b> <b>rFS:</b> IFS wird u.U. mitbenutzt → Konflikt mit parallelen Fzg <b>IFS:</b> Gefahr eines Anpralls an TSE	kein eindeutiger Einfluss erkennbar



# 4 Modellansatz zur Bestimmung der lateralen Position in AID

## 4.1 Einflussfaktoren auf die laterale Position

Aus den vorangegangenen Untersuchungen der Wahrnehmung unterschiedlicher Markierungskonstellationen ist erkennbar, dass unterschiedliche Faktoren (z. B. Verkehr, weiße und gelbe Markierung) einen Einfluss auf die gewählte laterale Position haben. In Abbildung 4.1 sind die bisher identifizierten Einflussgrößen aufgelistet. Die genaue Wirkungsweise der Einflussfaktoren auf die gewählte laterale Position ist noch nicht bekannt. Aus den vorherigen Untersuchungen kann die Wirkung einzelner Einflussfaktoren lediglich grob abgeschätzt werden.



Abbildung 4.1: Einflussfaktoren zur Wahl der lateralen Position

Im Folgenden wird ein Modellansatz für die Abhängigkeit der lateralen Position im Fahrstreifen von unterschiedlichen Einflussfaktoren beschrieben und beispielhaft aufgezeigt. Weiterer Forschungsbedarf besteht, um den genauen Einflussverlauf der einzelnen Elemente sowie dessen Größen und eventuelle Abhängigkeiten auf die laterale Position zu identifizieren.

## 4.2 Konzept des Modells

Ein wichtiger Bestandteil des autonomen Fahrens ist die Trajektorienplanung. Unterschiedliche Planungsverfahren wurden hierzu entwickelt, so auch das Elastic Bands Verfahren von BRAND UND SATTEL (2005). Ein elastisches Band aus mechanischen Federn simuliert den Pfad des Fahrzeugs. Die Federn stellen dabei die Wirkung der äußeren Kräfte des Straßenraums auf das Fahrzeug dar. (Brandt & Sattel 2005)

Das entwickelte Konzept des Modells zum Fahrverhalten in AID ist an dieses Elastic Bands Modell angelehnt. Der Grundgedanke ist, dass das Fahrzeug durch Federn auf der Fahrbahn gehalten wird (vgl. Abbildung 4.2). Die Straßenraumelemente haben jeweils spezifische Federn, deren Einfluss in Form einer Kurve ( $c(x)$ ) beschrieben wird.

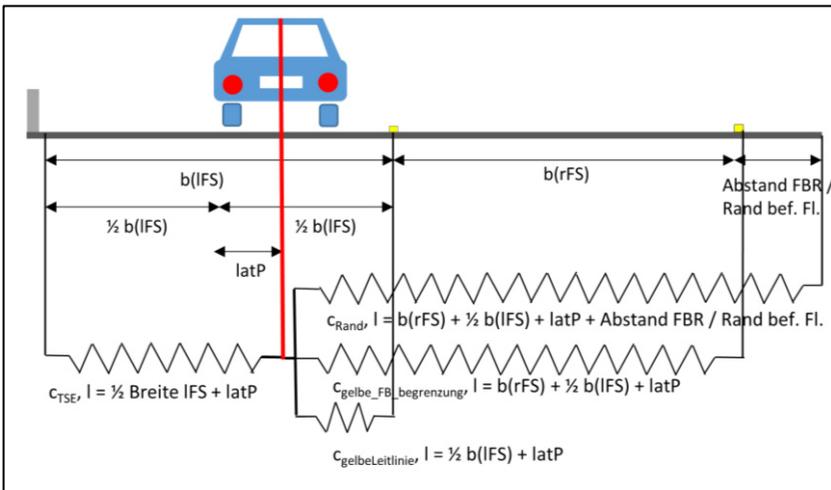


Abbildung 4.2: Konzept des Federkraftmodells

Die einzelnen Elemente wirken mehr oder weniger abstoßend in Abhängigkeit davon, wie weit die Feder ausgelenkt ist. Mit zunehmendem Abstand des Fahrzeugs zum Element wird der Einfluss geringer bzw. wirkt die Federn weniger abstoßend. Durch die mehr oder weniger abstoßende Wirkung der einzelnen

Straßenraumelemente wird das Fahrzeug auf der Straße in einer bestimmten Position gehalten. Durch das Hinzufügen bzw. Wegnehmen einzelner Elemente (z. B. weiße Markierung) verändert sich die Position des Fahrzeugs im Querschnitt.

Der Verlauf der einzelnen Einflusskurven ( $c(x)$ ) beschreibt die abstoßende Wirkung in Abhängigkeit von der Position  $x$  im Fahrstreifen. Um einen realen Straßenquerschnitt mit mehreren Elementen abbilden zu können, ist es nötig, die einzelnen Einflüsse zu kennen. Im Rahmen dieser Arbeit war es nicht möglich, diese mit zufriedenstellender Genauigkeit zu ermitteln, da hierzu weitere Untersuchungen erforderlich sind. Einzelne Einflüsse können aber aus den bisherigen Erkenntnissen abgeschätzt werden. Anhand dieser wird im Folgenden das Modell erläutert. Beispielhaft zeigt Abbildung 4.3 einen 3,25 m breiten Querschnitt mit den Einflusskurven der TSE links und der Markierung rechts.

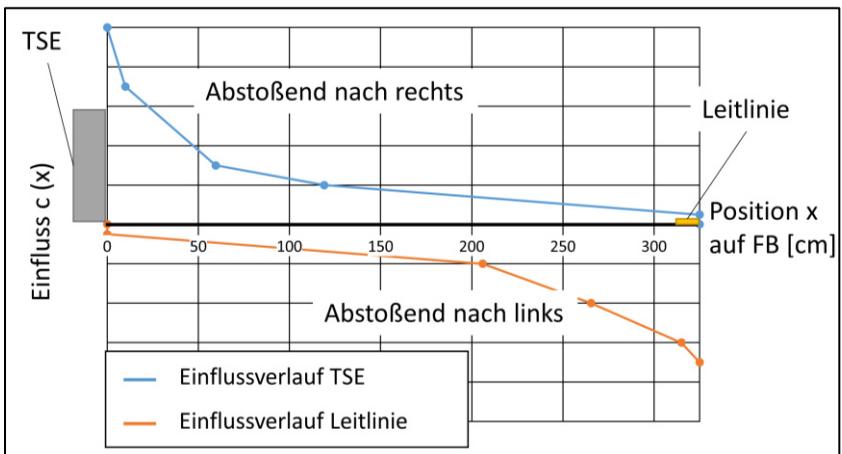


Abbildung 4.3: Beispielhafte Einflussverläufe (qualitativ) für Markierung und TSE

Die TSE als feststehendes Hindernis hat basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen aus Kapitel 3 einen größeren Einfluss ( $c_{TSE}$ ) auf das Fahrverhalten als die angrenzende Leitlinie ( $c_{gelbeLeitlinie}$ ). Die Feder der TSE muss daher mindestens im Nahbereich der Wand steifer sein als die der Leitlinie. Mit zunehmender Entfernung wird der Einfluss der Elemente geringer. Ziel des Modells

ist es, mit Hilfe der im Querschnitt enthaltenen Elemente, die Position der Fahrzeuge im Fahrstreifen auch für Fälle bzw. Elementkombinationen abschätzen zu können, die nicht konkret untersucht worden sind. Die Position des Fahrzeugs wird sich dort einpendeln, wo die Summenkurve der einzelnen Elemente ihren Nulldurchgang besitzt.

Der Versuchsaufbau zur Ermittlung der genauen Einflusskurven bzw. Federkonstanten und deren Nulllage muss zuerst in einem unrealistischen Querschnitt getestet werden. Der Einfluss anderer Elemente auf die zu ermittelnde Federkonstante wird dadurch verhindert. Auf einer sehr breiten Asphaltfläche werden zwei Querschnittselemente simuliert, zwischen denen sich die VP einordnen sollen. Durch die gewählte laterale Position auf der abgegrenzten Fahrfläche ist es möglich, die Elemente hinsichtlich ihrer abstoßenden Wirkung einzuordnen.

Ziel ist es, aus den ersten Untersuchungen Erkenntnisse zu gewinnen und daraus ein Modellansatz zu entwickeln, der als Basis für weitere Forschung genutzt werden kann. Für statistisch belastbare Unterschiede muss das Untersuchungskollektiv entsprechend groß sein.

## **4.3 Auswirkung von Straßenraumelementen auf die laterale Position**

### **4.3.1 Aufbau der QE-Untersuchung**

Erste Daten für den Modellansatz wurden im Fahrsimulator des ifab gewonnen (siehe auch Lange 2016). Es wird der systematische Zusammenhang zwischen Querschnittselementen der Arbeitsstelle (QE) (*hier*: TSE, Fahrbahnrand, Markierung) und gewählter lateraler Position untersucht. Auf einer sehr breiten Asphaltfläche (16,25 m) wird durch zwei Querschnittselemente eine Fahrfläche abgegrenzt. In den meisten Fällen wird die Fahrfläche durch eine Fahrbahnbegrenzung oder TSE beschränkt. Vereinzelt wird die Begrenzung der Fahrfläche in Form einer Leitlinie ausgeführt. In Abbildung 4.4 ist beispielsweise der Querschnitt qe21 mit gelber und weißer Fahrbahnbegrenzung dargestellt.

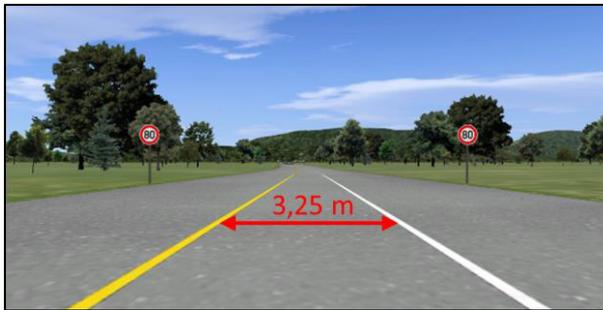


Abbildung 4.4: Beispiel eines Abschnitts der QE-Untersuchung (qe21)

Die VP haben die Aufgabe, sich zwischen den Elementen einzuordnen und die vorgeschriebene Geschwindigkeit von 80 km/h möglichst genau zu halten. Eine Versuchsstrecke setzt sich aus einem kurzen Anfangsstück (200 m) und sechs alternierend, aufeinanderfolgenden Querschnitten mit einer Länge von 1.000 m zusammen. Insgesamt 15 VP, davon 5 Frauen und 10 Männer, nehmen an der Versuchsreihe (QE-Untersuchung) teil. Es handelt sich um eine homogene studentische Stichprobe mit dem Durchschnittsalter von 25 Jahren (vgl. Abbildung 4.5).

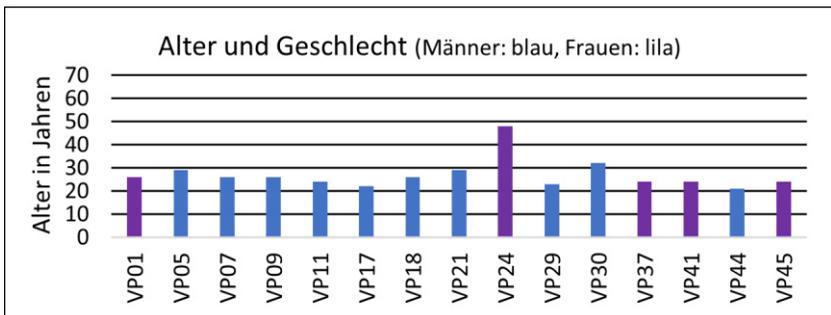


Abbildung 4.5: Alter und Geschlecht der QE-Untersuchung

Insgesamt wird das Fahrverhalten in 12 Querschnitte analysiert. Innerhalb der Querschnitte werden die Elemente weiße und gelbe Fahrbahnbegrenzung, Leitlinie, weiße breite Fahrbahnbegrenzung und TSE unterschiedlich kombiniert (vgl. Anhang 7.11). Die untersuchten Querschnitte werden mit „qe“ und

zwei Ziffern abgekürzt (z. B. qe11). Die Ziffern stehen jeweils für das linke (Zehner) und rechte (Einser) Querschnittselement. Die verwendete Codierung ist die Folgende:

- 1 Fahrbahnbegrenzung Breite 15 cm (weiß)
- 2 Fahrbahnbegrenzung Breite 15 cm (gelb)
- 3 Fahrbahnbegrenzung Breite 30 cm (weiß)
- 4 Leitlinie Breite 15 cm (gelb)
- 5 TSE Breite x Höhe 20 x 80 cm (Beton)

Der Querschnitt qe11 hat beispielsweise beidseitig eine weiße schmale Fahrbahnbegrenzung. Der genaue Versuchsplan für die einzelnen VP ist in Anhang 7.12 dargestellt.

Ziel der QE-Untersuchung ist ein Vergleich der Einflüsse der untersuchten Querschnittselemente. Die VP ordnen sich zwischen den unterschiedlichen Querschnittselementen im Fahrstreifen ein. Dies ermöglicht eine Aussage, welches Querschnittselement stark oder weniger stark abstoßend auf den Verkehrsteilnehmer wirkt. Es besteht weiterer Forschungsbedarf, um eine quantitative und statistisch belastbare Aussage der unterschiedlich stark abstoßenden Wirkung zu erhalten.

### 4.3.2 Ergebnisse der QE-Untersuchung

Bei der QE-Untersuchung wird, wie bei den vorausgegangenen Fahrstudien, tendenziell rechts im Fahrstreifen gefahren. Der Median der Mittelwerte der lateralen Position liegt bei allen untersuchten Querschnitten innerhalb der rechten Fahrstreifenhälfte (vgl. Abbildung 4.6).

Der Unterschied der lateralen Position zwischen einem weiß (qe11) und gelb (qe22) markierten Fahrstreifen ist mit 5 cm eher gering (vgl. Abbildung 4.6). Die Streuung kann beschrieben werden durch den Bereich des Fahrstreifens, der von 70 % der VP im Mittel befahren wird. Dieser unterscheidet sich zwischen qe11 und qe22 deutlich. Der Bereich, der von 70 % der VP im Mittel befahren wird, liegt für beide Querschnitte in der rechten Fahrstreifenhälfte. Allerdings ist der Bereich für qe22 doppelt so groß wie in qe11. Die größeren

Unterschiede der lateralen Position in qe22 sind möglicherweise in der schwächer abstoßenden Wirkung der gelben Fahrbahnbegrenzung begründet. Eine genaue Aussage, welche Markierung einen stärkeren Einfluss auf die VP hat, ist auch unter Berücksichtigung der Querschnitte qe21 und qe12 nicht möglich. Die Tendenz ist aber erkennbar, dass sich die laterale Position hin zur gelben Fahrbahnbegrenzung verschiebt.

Der Median des Querschnitts qe33, mit beidseitig breiter weißer Fahrbahnbegrenzung, ist mit einem Delta von weniger als 1,0 cm zu qe11 als ähnlich zu bewerten (vgl. Abbildung 4.6). Die Spannweite der Box sowie die Standardabweichung sind ebenfalls vergleichbar (vgl. Anhang 7.13). Zieht man zum Vergleich noch q23 und q32 hinzu, so hat die breite Fahrbahnbegrenzung eine schwächer abstoßende Wirkung als die gelbe Fahrbahnbegrenzung. Der Median verschiebt sich in Richtung der breiten Fahrbahnbegrenzung.

Neben der breiten weißen Fahrbahnbegrenzung (3) wird auch die gelbe Leitlinie (5) untersucht. Zwischen dem Median von qe52 und qe25 ist ein deutlicher Unterschied erkennbar ( $\Delta = 27,9$  cm) (vgl. Anhang 7.13). Die laterale Position ist tendenziell in Richtung der gelben Leitlinie verschoben. Allerdings ist anzumerken, dass die laterale Position beider Querschnitte in der rechten Fahrstreifenhälfte liegt. Die Spannweite ist bei q52 deutlich geringer als bei q25. Zudem wird die Leitlinie im Querschnitt q25 von ca. 50 % der VP im Mittel überfahren.

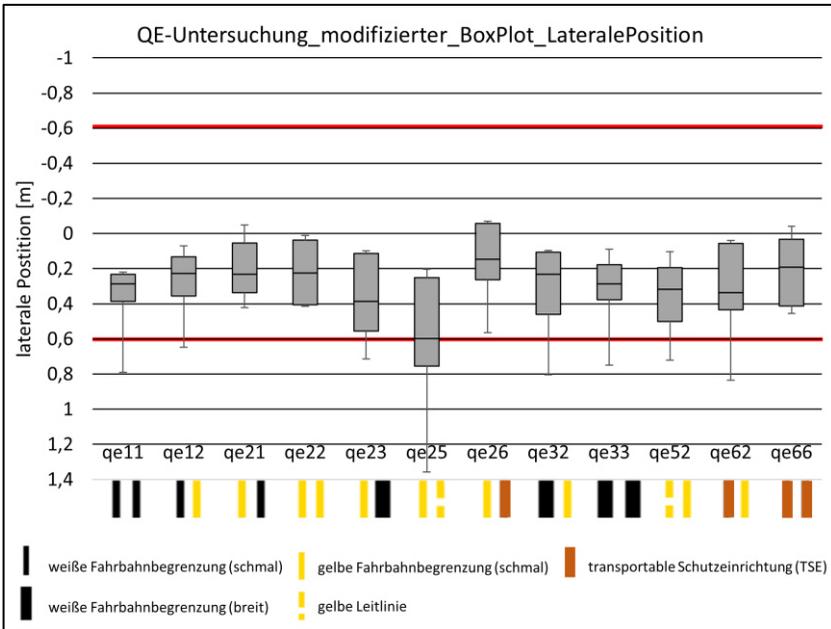


Abbildung 4.6: Modifiziertes Box-Whisker-Diagramm der lateralen Position (QE-Untersuchung)

Die innerhalb von Arbeitsstellen eingesetzte TSE stellt, im Gegensatz zur Markierung, ein tatsächliches Hindernis dar. Anhand der gewählten lateralen Position ist erkennbar, dass die TSE einen Einfluss auf die Wahl der Fahrspur hat. Ist der Querschnitt beidseitig mit einer TSE begrenzt (qe66), so befindet sich die Mitte der gewählten lateralen Positionen bei 19,2 cm rechts der Fahrstreifenmitte. Der Median des qe66 liegt von allen Querschnitten am nächsten an der Fahrstreifenmitte. Die gewählten Fahrspuren liegen erstaunlich weit auseinander. Vor allem im Vergleich mit z. B. q33 oder qe11 ist die Spannweite als groß zu bewerten. Bei einer einseitigen TSE verschiebt sich der Median der lateralen Position um 5 cm nach links (qe26) bzw. um 15 cm nach rechts (qe62). Somit kann angenommen werden, dass die VP die Fahrspur weiter entfernt von der TSE wählt.

### 4.3.3 Zusammengefasste Ergebnisse der QE-Untersuchung

Ist die Fahrfläche auf beiden Seiten mit weißer Fahrbahnbegrenzung markiert, so ist ein nahezu gleicher Rechtsversatz von 28 cm festzustellen. Im Falle gelber schmaler Fahrbahnbegrenzung verschiebt sich die laterale Position um ca. 5 cm weiter in Richtung Fahrstreifenmitte. Gegenüber diesen Situationen mit beidseitig gleicher Markierung lassen sich aus Konstellationen mit unterschiedlichen Markierungsarten bzw. -farben stärker bzw. schwächer abstoßende Kräfte ableiten.

So weisen gelbe Leitlinien vor allem rechts die geringsten abstoßenden Kräfte auf. Verkehrsrechtlich darf eine Leitlinie überfahren werden, was möglicherweise die geringe abstoßende Wirkung weiter bestärkt. Die größten abstoßenden Kräfte gehen von der TSE aus. Diese stellt im Gegensatz zur Markierung ein bauliches Hindernis dar. Weiße Fahrbahnbegrenzung wirkt als rechte Begrenzung der Fahrfläche etwas mehr abstoßend als die gelbe.

Die breite weiße Fahrbahnbegrenzung wirkt auf die VP nur schwach abstoßend; die laterale Position verschiebt sich in Richtung der breiten Fahrbahnbegrenzung. Es besteht weiterer Forschungsbedarf, um zu erklären, warum die weiße breite Fahrbahnbegrenzung eine geringer abstoßende Wirkung hat als die weiße schmale.

Bei unterschiedlichen Gestaltungen der linken und rechten Begrenzung stellen sich fast immer nur Verschiebungen nach rechts ein. Eine Verschiebung des Medians in die linke Fahrbahnhälfte erfolgt für keine untersuchte Elementkombination.

## 4.4 Fiktives Modell und Beispiele

Basierend auf den bisher gewonnenen Erkenntnissen und Ergebnissen wird ein fiktives Modell für den linken Fahrstreifen aufgestellt. Der Nullfall beschreibt einen AID-Querschnitt mit ausschließlich gelber Markierung. Die Breite des

linken und rechten Fahrstreifens wird mit 3,25 m festgesetzt (linker Fahrstreifen:  $0 \leq x < 325$ , rechter Fahrstreifen:  $325 \leq x < 650$ ). Es sind keine anderen Verkehrsteilnehmer vorhanden. In Abbildung 4.7 sind die Einflussverläufe der Straßenraumelemente TSE, Leitlinie, Rand der befestigten Fläche sowie Fahrbahnbegrenzung abgebildet.

Der Einfluss der Elemente ( $c(x)$ ) wird qualitativ durch den Wertebereich  $[-10; 10]$  abgebildet. Als größten Einfluss mit einer abstoßenden Wirkung nach rechts ( $c(x)$  positiv) wird die TSE direkt an der Fahrstreifengrenze definiert ( $c_{TSE}(0) = 10$ ). Die Leitlinie hat eine geringere absolute abstoßende Wirkung als die TSE und hat ihr absolutes Maximum bei  $c_{Leitlinie}(325) = -7$ . Für den linken Fahrstreifen hat die Leitlinie eine abstoßende Wirkung nach links (negativ) und für den rechten Fahrstreifen nach rechts (positiv). Der Rand der befestigten Fläche ist ebenfalls eine feste, bauliche Grenze und hat somit auch eine maximale abstoßende Wirkung von  $c_{Rand\_bef\_Fl}(650) = -10$ . Die Fahrbahnbegrenzung auf der rechten Seite der Fahrbahn hat einen geringeren Einfluss ( $c_{FBbegrenzung}(650) = 3,5$ ), da das Überfahren, unter der Voraussetzung, dass der Rand der befestigten Fläche weiter entfernt ist, meist nur geringe Folgen hat (vgl. Abbildung 4.7).

Die Stützstellen der Kurven der fiktiven Federkonstanten ( $x$ ) sowie deren zugehörigen Wirkung ( $c(x)$ ) werden anhand der aus den empirischen Untersuchungen gewonnenen Ergebnissen sowie den logischen Zusammenhängen gebildet. Das Maximum der Kurven und damit die erste Stützstelle liegt jeweils an der Position des Elements im Querschnitt (z.B.  $\max c_{TSE} \rightarrow x = 0$ ). Die nächste Stützstelle liegt 25 cm davon entfernt, was dem nach RSA-95 geforderten Sicherheitsabstand eines Behelfsfahrstreifens entspricht (RSA-95 2015, Abs. 2.4 (9)). Stützstelle drei beschreibt den Abstand der Kante des Fahrzeugs vom Element, wenn das Fahrzeug exakt in der Mitte des Fahrstreifens fährt, und Stützstelle vier, wenn das Fahrzeug gerade noch innerhalb des Fahrstreifens am entferntesten Punkt zum betrachteten Element fährt. Als letzte definierte Stützstelle wird die Breite des Fahrstreifens gewählt, bevor dann die Kurve mit der identischen Steigung bis auf  $c(x) = 0$  geführt wird.

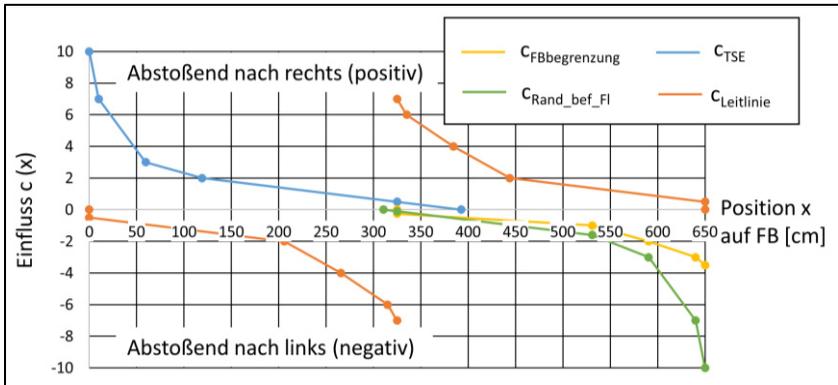


Abbildung 4.7: Fiktive Modellrechnung (Nullfall)

Die Nulllage des Modells wird in der Fahrstreifenmitte definiert, da sich dort die sicherste bzw. unkritischste Situation bezogen auf die Verkehrssicherheit befindet. Wenn das Fahrzeug in der Mitte des Fahrstreifens fährt, hat es den größtmöglichen Sicherheitsabstand zur TSE und anderen Fahrzeugen.

Es werden im Folgenden drei Fälle betrachtet: Der Fall, dass auf dem rechten Fahrstreifen ein Lkw fährt, der Fall, dass eine ungültige weiße Markierung in der linken Hälfte des linken Fahrstreifens liegt sowie die Kombination aus den beiden Fällen mit einem Lkw auf dem rechten Fahrstreifen und der ungültigen weißen Markierung im linken Fahrstreifen. Das Ergebnis des Modells ist die laterale Position des Fahrzeugs im linken Fahrstreifen, die durch die unterschiedlichen Elemente in der Arbeitsstelle bestimmt werden. In Tabelle 4.1 sind die Ergebnisse (laterale Positionen) dargestellt.

Tabelle 4.1: Ermittelte fiktive laterale Position

betrachteter Fall	Nulldurchgang der Summenkurve [cm]	latP [m] (vgl. Kapitel 2.5.2)
Ausgangssituation / Nulllage	162,5	0,000
Überholen eines Lkws	146,8	-0,157
weiße Leitlinie im IFS	190,9	0,284
Überholen eines Lkws mit zusätzlicher weißer Leitlinie im IFS	168,3	0,058

Fährt ein Lkw auf dem rechten Fahrstreifen, so verschiebt sich die laterale Position nach links. Im Fall, dass eine weiße ungültige Markierung in der linken Fahrstreifenhälfte vorhanden ist, liegt die laterale Position deutlich weiter rechts im Fahrstreifen. Kombiniert man die beiden Fälle und es kommt zusätzlich zur weißen Markierung ein Lkw auf dem rechten Fahrstreifen hinzu, so verschiebt sich die laterale Position wieder nach links, allerdings nicht über die Nulllage hinweg. Der Einfluss der weißen Markierung wirkt somit der abstoßenden Wirkung des Lkw entgegen und führt dazu, dass die laterale Position weiterhin in der rechten Fahrstreifenhälfte verbleibt.

Beispielhaft ist in Abbildung 4.8 für den linken Fahrstreifen der Fall dargestellt, dass ein Lkw (rechter Fahrstreifen) überholt wird. Das obere Diagramm zeigt die einzelnen Federn und deren Einflusskurven ( $c(x)$ ). Der untersuchte Fall ist schematisch im unteren Diagramm gemeinsam mit der Summenkurve ( $F(x)$ ) dargestellt. Der Nulldurchgang der Summenkurve beschreibt die laterale Position des Fahrzeugs auf dem linken Fahrstreifen.

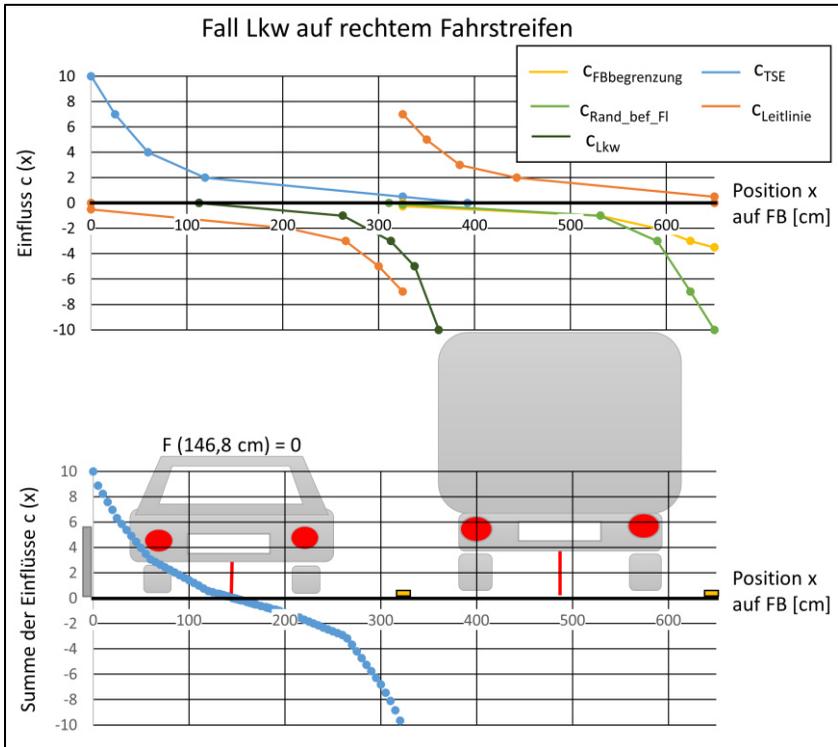


Abbildung 4.8: Einflusskurve und Ergebnis des Modells: Fall Lkw auf dem rFS

## 4.5 Entwicklungspotenzial des Modells

Das Modell liefert mit den fiktiven Größen und Federkonstanten plausible Ergebnisse, die die Erkenntnisse der unterschiedlichen Phasen bestätigen. Für den Fall, dass eine weiße Leitlinie im linken Fahrstreifen liegt, stimmen die Ergebnisse des Modells mit den Erkenntnissen der AID 71\_V aus Kapitel 3.5.4 überein. Da der linke Fahrstreifen nur zum Überholen anderer Verkehrsteilnehmer genutzt wird, ist ein Vergleich der Simulationsergebnisse mit Verkehr sinnvoll. Mit Verkehr wird auf dem linken Fahrstreifen tendenziell weiter links gefahren. Liegt im Querschnitt zusätzlich eine ungültige weiße Markierung in der linken Fahrstreifenhälfte, so verschiebt sich die laterale Position weniger

weit nach links bzw. im Vergleich zur lateralen Position mit Verkehr und ohne Markierung nach rechts.

Im hier dargestellten Modellansatz sind noch nicht alle Faktoren berücksichtigt: Die Federkonstanten der TSE beispielsweise muss noch um einen Faktor ergänzt werden, der die Höhe und den farblichen Kontrast zur Fahrbahn berücksichtigt. Die Fahrbahnbreite ist in den bisherigen Untersuchungen immer konstant gehalten. Dieser Einfluss muss ebenfalls weiter erforscht werden.

In den bisherigen Untersuchungen wird nur zwischen der Verkehrssituation mit und ohne Verkehr unterschieden. Zwischen den zu überholenden Verkehrsteilnehmern wird nicht näher differenziert. Aus den Bildauswertungen der Phase 2A geht hervor, dass die laterale Position im Fall einer Markierungskonstellation aus weiß und gelb (FR Süd) während des Überholvorgangs weniger weiter rechts ist als im Fall einer eindeutigen weißen Markierungskonstellation. Auch hier besteht weiterer Forschungsbedarf, um den Unterschied im Fahrverhalten bezogen auf das zu überholende Fahrzeug zu klären.

Das Fahrverhalten im Fahrsimulator zeigt einen generellen Rechtsversatz im Fahrstreifen. Die zusätzliche Auswertung der vorausfahrenden Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen in Phase 2 ergibt, dass in situ mit ausschließlich weißer Markierung meist mittig im Fahrstreifen gefahren wird. Es sind allerdings genauere Messungen der lateralen Position nötig, um dieses Fahrverhalten endgültig zu bestätigen. Die Erkenntnisse basieren lediglich auf einer qualitativen Einschätzung der Fahrzeugposition im Fahrstreifen. Die Nulllage des Modells ist bisher an der verkehrlich sichersten Stelle, der Fahrstreifenmitte, definiert. Möglicherweise ist die Nulllage den neuen Erkenntnissen anzupassen. Wichtig wäre, das Modell möglichst nahe an die Realität und das reale Fahrverhalten in AID anzupassen, um eine verlässliche Vorhersage der lateralen Position zur Verbesserung der Verkehrssicherheit zu erreichen.

Eine weitere Erkenntnis der in Kapitel 1 dargestellten Untersuchungen ist, dass die laterale Position in Abhängigkeit von der Krümmung des Streckenverlaufs unterschiedlich ist. So ist die laterale Position in Rechtskurven beispielsweise weiter links, wenn in der Nähe der gelb markierten rechten Fahrstreifengrenze eine weiße ungültige Markierung liegt. Die unterschiedlichen Lageplan-

elemente mit unterschiedlichen Krümmungen sind im bisherigen Modellansatz nicht berücksichtigt.

Um nicht jede einzelne Markierungskonstellation aus gelber und weißer Markierung untersuchen zu müssen, ist es wichtig, die unterschiedlichen Querschnittselemente und deren Einfluss zu vergleichen. Die QE-Untersuchung zeigt bereits erste Tendenzen der gewählten lateralen Position in Abhängigkeit von den eingesetzten Querschnittselementen.



## 5 Fazit und Ausblick

Um die subjektive Wahrnehmung und das objektive Fahr- und Blickverhalten in AID in Abhängigkeit von der Markierungskonstellation zu analysieren und besser verstehen zu können, wurden in dieser Arbeit verschiedene Versuche mit variierenden Randbedingungen durchgeführt. Hierzu wurde ein mehrstufiges Untersuchungskonzept mit unterschiedlichen Erhebungsmethoden erarbeitet. Die Grundlage bildete eine Literaturrecherche sowie eine Befragung, in der subjektiv irritierende Situationen identifiziert wurden. Darauf aufbauend wurden Erhebungen im Fahrsimulator und im Versuchsfahrzeug durchgeführt, um das objektive Fahrverhalten zu untersuchen. Der Nachweis gelang: Das Fahrverhalten unterscheidet sich tatsächlich in Abhängigkeit von der Markierungskonstellation innerhalb einer AID.

Wie bereits zu Beginn der Arbeit beschrieben entscheidet die Wahrnehmung und Handlung der Fahrzeugführer über die Sicherheit im Straßenverkehr. Diese Arbeit bietet einen ersten Einstieg und wesentliche Grundlagen, um AID in Zukunft sicherer gestalten zu können. Längsverkehrsunfälle, die durch das Abkommen vom eigenen Fahrsteifen entstehen, können durch den bewussten Umgang mit Markierungskonstellationen aus gelber und weißer Markierung reduziert werden. Erste Erkenntnisse zum Einfluss unterschiedlicher Markierungskonstellationen auf das Fahrverhalten sind nunmehr vorhanden. Es wird davon ausgegangen, dass mit einer ausgeweiteten, umfangreichen und nicht nur auf die Markierung beschränkten Forschungsarbeit die Erkenntnisse konkretisiert und darauf aufbauend die Sicherheit von AID weiter verbessert werden kann.

Das bisherige Versuchskonzept erscheint für weitergehende Untersuchungen grundsätzlich geeignet und ist auf eine Reihe möglicher relevanter Einflussfaktoren erweiterbar. Der Fokus der vorliegenden Arbeit lag auf den unterschiedlichen Markierungskonstellationen, die möglichst isoliert betrachtet und mit zunehmendem Detailierungsgrad der Untersuchung auch mit anderen Einflüssen (z. B. Verkehr) kombiniert wurden.

Die ersten beispielhaften Modellrechnungen sind vielversprechend: Das in den Untersuchungen erfasste Fahrverhalten sowie die erkennbaren Tendenzen können mit dem Modellansatz abgebildet werden. Der modulare Aufbau des Modells ermöglicht es, auf die unterschiedlichen Einrichtungen der AID zu reagieren bzw. die wahrscheinliche durchschnittliche laterale Position für unterschiedlich eingerichtete AID zu bestimmen. Weitere Arbeitselemente, wie beispielweise Baken oder andere Formen von TSE, können hinzugefügt werden. In Abhängigkeit von der Ausstattung der AID kann das Modell abschätzen, wo der Fahrzeugführer im Fahrstreifen am wahrscheinlichsten fahren wird. Im Vorfeld der Einrichtung einer AID könnte dann geprüft werden, ob mit der gewählten Ausstattung, Markierung, Querschnitt etc. und vor allem der Überlagerung mit der bestehenden Markierung dem geforderten Sicherheitsstandard entsprochen wird und mögliche Gefährdungspotenziale, hervorgerufen durch ein ungünstiges Fahrverhalten, minimiert sind.

### **Forschungsfrage**

Die in der Einleitung formulierte Forschungsfrage, wie sich die subjektive Wahrnehmung und das objektive Fahr- und Blickverhalten innerhalb von AID in Abhängigkeit von der Markierungskonstellation verhält, kann wie folgt beantwortet werden:

Weißer dauerhafte Markierung innerhalb des gelb markierten Fahrstreifens beeinflusst nach Einschätzung der befragten Personen (subjektiv) die Wahl der lateralen Position nicht. Anhand der Untersuchungen konnte allerdings nachgewiesen werden, dass sich diese Einschätzung im Fahrverhalten nicht wieder spiegelt. Vielmehr verändert sich die laterale Position im Fahrstreifen in Abhängigkeit von der Markierungskonstellation; d.h. objektiv hat die Markierungskonstellation einen nachweisbaren Einfluss auf die gewählte laterale Position.

In allen untersuchten AID, unabhängig von der Markierungskonstellation, fahren die VP im Fahrstreifen nach rechts versetzt. Der generelle Rechtsversatz ist möglicherweise darin begründet, dass die Fahrzeugführer eine mittige Position im Fahrstreifen anstreben und die Mitte nicht genau einschätzen können,

da sie links im Fahrzeug sitzen. Eine gleiche Untersuchung in einem Land mit Linksverkehr könnte diese These bestätigen oder widerlegen.

Je näher eine weiße dauerhafte Markierung an einer gelben (Fahrbahnbegrenzung oder Leitlinie) liegt, desto größer ist ihr Einfluss auf die laterale Position. Liegt die weiße ungültige Markierung in der rechten Fahrstreifenhälfte neben einer Leitlinie oder einer Fahrbahnbegrenzung, so verschiebt sich die laterale Position nach links. Genauso gilt es umgekehrt: Liegt die weiße ungültige Markierung in der linken Fahrstreifenhälfte, verschiebt sich die laterale Position nach rechts.

Die laterale Position ist in Rechtskurven nachweisbar weiter links als in Linkskurven, wenn die weiße dauerhafte Markierung rechts im gelb markierten Fahrstreifen liegt. Äquivalent ist dieser Zusammenhang auch für Linkskurven nachweisbar.

Markierung wird von erfahrenen Fahrern nach Angaben der Literatur meist peripher wahrgenommen. Nur in kritischen und unklaren Situationen wird Markierung bewusst zur Unterstützung der Spurhaltung fixiert. Generell wurde die Markierung während der Versuchsfahrten wenig fixiert (5 bis 10 % der Gesamtfixationsdauer). Anhand der mittleren Fixationsdauer oder der Anzahl der Fixationen ist kein Unterschied des Blickverhaltens innerhalb der AID mit unterschiedlichen Markierungskonstellationen erkennbar.

Die Auswertung der AOI zeigt allerdings Unterschiede: Ist innerhalb der gelb markierten Fahrstreifen weiße dauerhafte Markierung vorhanden, so wird diese vor allem innerhalb der linken Fahrstreifenhälfte häufiger fixiert als die gültige gelbe. Mit Verkehr wird die Markierung allgemein weniger häufig fixiert. Weiße Markierung ist die im Straßenraum gängige und zieht scheinbar auch in den Arbeitsstellen mehr Aufmerksamkeit auf sich als die gültige gelbe.

### **Ausblick**

Das gewählte Versuchskonzept soll bei weitergehenden Forschungen um einen einheitlichen Fragebogen, der alle Untersuchungen begleitet, erweitert werden. Hierzu wäre z. B. ein Fragebogen zur subjektiven Wahrnehmung innerhalb der Arbeitsstellen, der Einschätzung des eigenen Fahrverhaltens sowie der Fahr-

erfahrung zu entwickeln und zu validieren. Ein Vergleich der einzelnen Stichproben untereinander sowie einer Einordnung der jeweils gezogenen Stichprobe in ein größeres Kollektiv wäre somit möglich.

Die Fahrstreifenbreite wurde bei den durchgeführten empirischen Untersuchungen konstant gehalten, hat aber einen Einfluss auf das Fahrverhalten. Für ein umfassendes Versuchsprogramm erscheint daher eine Variation der Fahrstreifen- und Fahrbahnbreite sinnvoll. Der Verkehr als zusätzlicher Einflussfaktor auf das Fahrverhalten erfordert eine detailliertere Betrachtung. Der Einfluss des zu überholenden Fahrzeugs (Größe, Breite) ist beispielsweise bisher noch nicht berücksichtigt.

In den Kommentaren der Fragebögen wurde immer wieder das Element der TSE genannt, das auf der einen Seite positiv als Schutz wahrgenommen wird und auf der anderen Seite negativ als Hindernis bzw. Barriere abstoßend wirkt. Die TSE scheint einen großen Einfluss auf die laterale Position zu haben. Die Höhe und Farbe der TSE, die in der vorliegenden Arbeit konstant gehalten wurde, könnte hierbei eine wesentliche Rolle spielen und sollte durch entsprechende Versuche analysiert werden.

Neben Höhe und Breite der TSE hat vermutlich auch der Abstand zum Fahrbahnrand einen Einfluss. Der Abstand zwischen dem Rand der befestigten Fläche zum verkehrsrechtlichen Fahrbahnrand (Fahrbahnbegrenzung) sowie zwischen Schutzeinrichtung im Mittelstreifen und Fahrbahnrand haben ebenfalls eine Auswirkung auf die laterale Position im Fahrstreifen. Es besteht auch hier weiterer Forschungsbedarf, um den genauen Einfluss dieser unterschiedlichen Abstände in Erfahrung zu bringen.

Im Weiteren erscheint es sinnvoll, das Fahrverhalten innerhalb von AID bei sich kreuzender oder spitz zulaufender Markierung zu untersuchen, um auszuschließen, dass diese ein besonderes Risiko für die Verkehrssicherheit darstellen. Die durchgeführten Untersuchungen beschränken sich bewusst auf den Bereich des kQ mit paralleler Markierungskonstellation innerhalb der Arbeitsstelle. Eine Erweiterung des Untersuchungsbereichs insbesondere auf die Überleitung und Verschwenkung erfordert vermutlich aufgrund der Quer-

neigung und daraus entstehenden Fliehkräften gänzlich andere Grundfragestellungen, die getrennt betrachtet werden sollten.

Die Wahrnehmung der Markierung wird anhand des Blickverhaltens abgeleitet, welches in dieser Arbeit mit einem Eye-Tracker aufgezeichnet wurde. Markierung wird allerdings größtenteils peripher wahrgenommen. Das Eye-Tracking System erfasst lediglich das foveale Sehen, weshalb keine endgültigen und vollständigen Aussagen zur Wahrnehmung unterschiedlicher Markierungskonstellationen getroffen werden können. Für weitere Forschung ist daher kritisch zu prüfen, in wie fern Blickerfassungssysteme eingesetzt werden können. Eine Aufzeichnung der Gehirnströme, um festzustellen welche Objekte aus dem Bereich des peripheren Sehens auch tatsächlich kognitiv verarbeitet werden, ist sehr aufwändig und vermutlich nicht lohnenswert.

Es ist davon auszugehen, dass auch die Qualität der Markierung und deren Erkennbarkeit einen erheblichen Einfluss auf das Fahrverhalten haben (neue Markierung oder abgefahrene bis hin zu Phantommarkierung, profilierter Markierung oder Farbe der Fahrbahnoberfläche). Auch hierzu liegen noch keine hinreichenden Erkenntnisse vor. Allerdings ist anzumerken, dass weder im Simulator noch in der Realität Konstellationen mit diesen Randbedingungen unter vertretbarem Aufwand systematisch betrachtet werden können. Daher sollte der Fokus zunächst auf andere offene Fragen gelegt werden, die einfacher abgebildet werden können.

Es wird vermutet, dass die Ergebnisse bezogen auf kritische Fahrsituationen bei ungünstigen Witterungsbedingungen (z. B. Regen) sich noch weiter zuspitzen. So können z. B. Fahrzeuge bei schlechten Sichtbedingungen langsamer fahren und sich vermehrt auf die Markierung konzentrieren. Ist in diesem Fall die weiße Markierung gut oder evtl. besser sichtbar als die gültige gelbe, so hat die weiße ungültige Markierung einen noch größeren Einfluss.



## 6 Literatur

- ALLGEMEINER DEUTSCHER AUTOMOBIL-CLUB E.V. (Hrsg.) (2010): Mobilität in Deutschland: Ausgewählte Ergebnisse, München. URL [https://www.adac.de/\\_mmm/pdf/statistik\\_mobilitaet\\_in\\_deutschland\\_0111\\_46603.pdf](https://www.adac.de/_mmm/pdf/statistik_mobilitaet_in_deutschland_0111_46603.pdf), 18.10.2016.
- BACKES, M. (2016): Untersuchung kritischer Markierungskonstellationen in Arbeitsstellen auf Bundesautobahnen, Karlsruhe (unveröffentlicht).
- BADDELEY, A. (2003): Working memory: looking back and looking forward. *Nature reviews. Neuroscience* 4: 829–839.
- BAIER, M. M., D. KEMPER, O. BAUR & B. STEINAUER (2006): Sicherheitswirkung von fluoreszierenden Materialien bei Leiteinrichtungen in Arbeitsstellen, Bd. 945. *Wirtschaftsverlag NW Verlag für Neue Wissenschaft, Bremerhaven*.
- BAKABA, J. E., M. ENKE, A. HEINE, C. LIPPOLD, R. MAIER, J. ORTLEPP & R. SCHULZ (2012): Untersuchung der Verkehrssicherheit im Bereich von Baustellen auf Bundesautobahnen, Bd. 04. *UDV, Berlin*.
- BALL, K. K. & C. OWSLEY (1993): The Useful Field of View Test: A new technique for evaluating age-related declines in visual function. *Journal of the American Optometric Association* 64: 71–79.
- BENDRICH, C. (2015): Analyse des Blickverhaltens in Arbeitsstellen längerer Dauer auf Autobahnen, Karlsruhe (unveröffentlicht).
- BENESCH, H. & D. KRECH (1992): *Grundlagen der Psychologie*. Psychologie-Verl.-Union, Weinheim.
- BERGER, W. J. (1996): Informationsaufnahme im Straßenverkehr: Grundlagen und Konsequenzen für die verkehrliche Praxis, Band 78.
- BIRBAUMER, N. & R. F. SCHMIDT (2010): *Biologische Psychologie*. 7. Aufl. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- BRANDT, T. & T. SATTEL (2005): Path Planning for Automotive Collision Avoidance based on Elastic Bands in: *INTERNATIONAL FEDERATION OF AUTOMATIC CONTROL (Hrsg.): 16th Triennial World Congress, Prague 2005*.
- BRILON, W. & M. DÖHLER (1978): Spurverhalten auf zweispurigen Landstraßen mit Gegenverkehr. *Straßenverkehrstechnik* 22. Jahrgang: 79–82.

- BRÜHNING, E. (1998): Mehr Sicherheit durch Fahrbahnmarkierung. S. 28–32 in: FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESSEN (Hrsg.): Fahrbahnmarkierung: FGSV-Kolloquium am 28. und 29. Mai 1998 in Darmstadt, 002/61. FGSV Verlag, Köln.
- BUBB, H. (2015): Das Regelkreisparadigma der Ergonomie. S. 27–65 in: H. BUBB, K. BENGLER, R. E. GRÜNEN & M. VOLLRATH (Hrsg.): Automobilergonomie. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR ARBEIT UND SOZIALES (2010): Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV).
- BUNDESMINISTERIUM FÜR ARBEIT UND SOZIALES (2014): Entwurf: Technische Regeln für Arbeitsstätten ASR A5.2: Anforderungen an Arbeitsplätze und Verkehrswege auf Baustellen im Grenzbereich zum Straßenverkehr.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR (2015): Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen: (RSA). 1995. Aufl. Kirschbaum, Bonn.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG (2011): Leitfaden zum Arbeitsstellenmanagement auf Bundesautobahnen.
- BURMANN, M., R. HEB, K. HÜHNERMANN & J. JAHNKE (2016): Straßenverkehrsrecht: Kommentar ; mit StVO und StVG, den wichtigsten Vorschriften der StVZO und der FeV, dem Verkehrsstraf- und Ordnungswidrigkeitenrecht, dem Schadensersatzrecht des BGB und dem Versicherungsrecht, der Bußgeldkatalog-Verordnung und Verwaltungsvorschriften sowie einer systematischen Einführung. 24. Aufl. C.H. Beck; Beck-Online, München, München.
- CLAUB, G., F.-R. FINZE & L. PARTZSCH (1995): Statistik für Soziologen, Pädagogen, Psychologen und Mediziner. 2. Aufl. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main.
- COHEN, A. S. (1977): Is the duration of an eye fixation a sufficient criterion referring to information input? *Perceptual and motor skills* 45: 766.
- COHEN, A. S. (1985): Visuelle Informationsaufnahme während der Fahrzeugsteuerung in Abhängigkeit der Umweltmerkmale und der Fahrpraxis. *Schweizerische Zeitschrift für Psychologie und ihre Anwendung* Band 44: 249–288.
- COHEN, A. S. (1987): Blickverhalten und Informationsaufnahme von Kraftfahrern, Bd. 168, Bergisch Gladbach.

- COOPER, J. M., N. MEDEIROS-WARD & D. L. STRAYER (2013): The Impact of Eye Movements and Cognitive Workload on Lateral Position Variability in Driving. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 55: 1001–1014.
- COWAN, N. (1998): Visual and auditory working memory capacity. *Trends in Cognitive Sciences* 2: 77–78.
- DIETZ, S. (1998): Anforderungen für die Sichtbarkeit von Fahrbahnmarkierungen auf Autobahnen. S. 547–554 in: DEUTSCHE LICHTTECHNISCHE GESELLSCHAFT E.V. (Hrsg.): 13. Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaft Deutschlands, Bd. 13., Berlin.
- DURTH, W. (1974): Ein Beitrag zur Erweiterung des Modells für Fahrer, Fahrzeug und Straße in der Straßenplanung, Bonn.
- DYCKERHOFF, E. (1998): Fahrbahnmarkierung in Deutschland aus Sicht der Benutzer. S. 8–13 in: FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRABEN- UND VERKEHRSWESEN (Hrsg.): Fahrbahnmarkierung: FGSV-Kolloquium am 28. und 29. Mai 1998 in Darmstadt, 002/61. FGSV Verlag, Köln.
- FARRINGTON, J. (2011): Seven plus or minus two. *Performance Improvement Quarterly* 23: 113–116.
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRABEN- UND VERKEHRSWESEN (1980): Richtlinien für die Markierung von Straßen: Teil 2 Anwendung von Fahrbahnmarkierung RMS-2. 1995. Aufl., 330/2. FGSV Verlag, Köln.
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRABEN- UND VERKEHRSWESEN (1982): Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS): Teil: Querschnitte (RAS-Q), Bd. 295. FGSV Verlag, Köln.
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRABEN- UND VERKEHRSWESEN (1990): Hinweis für die Anwendung von Fahrbahnmarkierungen mit erhöhter Nachtsichtbarkeit bei Nässe, Bd. 353. FGSV Verlag, Köln.
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRABEN- UND VERKEHRSWESEN (1993): Richtlinien für die Markierung von Straßen RMS: Teil 1 Abmessungen und geometrische Anordnung von Markierungszeichen RMS-1, 330/1. FGSV Verlag, Köln.
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRABEN- UND VERKEHRSWESEN (1995): Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS): Teil: Linienführung (RAS-L), Bd. 296. FGSV Verlag, Köln.

- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN (1996): Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS): Teil: Querschnitte (RAS-Q 96), Bd. 295. FGSV Verlag, Köln.
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN (2008a): Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA). 2008. Aufl., Bd. 202. FGSV Verlag, Köln.
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN (2008b): Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (RIN). 2008. Aufl., Bd. 121. FGSV Verlag, Köln.
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN (2011): Hinweise für barrierefreie Verkehrsanlagen: H BVA. 2011. Aufl., Bd. 212. FGSV Verlag, Köln.
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN (2012): Begriffsbestimmungen: Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb. 2012. Aufl., Bd. 220. FGSV Verlag, Köln.
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN (2013): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Markierungen auf Straßen: ZTV M 13. 2013. Aufl., Bd. 341. FGSV Verlag, Köln.
- FUCHS, A. (2016): Weiterentwicklung und Validierung eines modularen Trainings zur Gewöhnung an die Fahrsimulation.
- GOLDBERG, J. H. & X. P. KOTVAL (1999): Computer interface evaluation using eye movements: Methods and constructs. *International Journal of Industrial Ergonomics* 24: 631–645.
- GRÜSSER, O.-J. & U. GRÜSSER-CORNEHLS (1985): Physiologie des Sehens. S. 174–241 in: R. F. SCHMIDT (Hrsg.): *Grundriß der Sinnesphysiologie*. Springer Verlag, Heidelberg.
- GRÜSSER, O.-J. & U. GRÜSSER-CORNEHLS (2000): Gesichtssinn und Okulomotorik. S. 278–315 in: R. F. SCHMIDT (Hrsg.): *Physiologie des Menschen: Mit Pathophysiologie ; mit herausnehmbaren Repetitorium*. 28. Aufl. Springer, Heidelberg.
- HÄDER, M. (2015): *Empirische Sozialforschung*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- HARTUNG, J., B. ELPELT & K.-H. KLÖSENER (2009): *Statistik: Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. 15. Aufl. Oldenbourg, München.

- HEDDERICH, J. & L. SACHS (2016): *Angewandte Statistik: Methodensammlung mit R*. 15. Aufl. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- HELMERS, G. (2014): *Nordic Human Factors Guideline: Explanatory model for road user behaviour Implications for the design of road and traffic Environment*.
- HESSEN MOBIL (2015): *Hessischer Verkehrszeichenplan-Katalog für Arbeitsstellen längerer Dauer (HE VZP-Katalog)*.
- HESSEN MOBIL (2016): *Baustellenmanagementhandbuch*. 2. Aufl.
- HILLSTROM, A. P. & S. YANTIS (1994): Visual motion and attentional capture. *Perception & Psychophysics* 55: 399–411.
- HOBMAIR, H. (2003): *Psychologie*. 3. Aufl. Bildungsverl. EINS, Troisdorf.
- HOLZER, H. (07.09.2016): *Autonom ist nicht gleich autonom*. Zeit Online.
- HRISTOV, B. (2009): *Untersuchung des Blickverhaltens von Kraftfahrern auf Autobahnen*. 1. Aufl., H. 8. TU, Lehrstuhl Gestaltung von Straßenverkehrsanlagen, Dresden.
- JECHLINGER, C. (2008): *Optische Führung und Navigation in Abhängigkeit von Straßenanlage und Verkehr*. S. 25–28 in: *EUROPÄISCHE VEREINIGUNG FÜR UNFALLFORSCHUNG UND UNFALLANALYSEN - LÄNDERGRUPPE ÖSTERREICH* (Hrsg.): *Aktuelle Wahrnehmung und Informationsfehler im Straßenverkehr: Kurzfassung zu den Fachvorträgen*.
- KÄMPFE, B., B. SCHLAG & G. WELLER (2005): *Streckencharakteristik und Fahrfehler*. *Straßenverkehrstechnik* 49. Jahrgang: 564–571.
- KANDIL, F. I., A. ROTTER & M. LAPPE (2009): *Driving is smoother and more stable when using the tangent point*. *Journal of Vision* 9: 11.1-11.
- KANDIL, F. I., A. ROTTER & M. LAPPE (2010): *Car drivers attend to different gaze targets when negotiating closed vs. open bends*. *Journal of Vision* 10: 24.1-11.
- KAYSER, H. J., A. F. SANDERS, M. HEB, W. A. C. SPIJKERS & A. BARTMANN (1989): *Das Wahrnehmungsverhalten des Kraftfahrers in Abhängigkeit von der gefahrenen Geschwindigkeit und der Straßenraumgestaltung*, Bd. 557, Bonn-Bad Godesberg.
- KLEBELSBERG, D. (1982): *Verkehrspsychologie*. Springer, Berlin.
- KNOFLACHER, H. (1976): *Beitrag zum Seitenabstandverhalten auf Freilandstraßen*. *Straßenverkehrstechnik* 20. Jahrgang: 4–8.

- LAND, M. & J. HORWOOD (1995): Which parts of the road guide steering? *Nature* 377: 339–340.
- LAND, M. F. & D. N. LEE (1994): Where we look when we steer. *Nature* 369: 742–744.
- LANGE, L. (2016): Einfluss unterschiedlicher Querschnittelemente auf die Spurhaltung in Arbeitsstellen längerer Dauer auf Autobahnen, Karlsruhe (unveröffentlicht).
- LAPPI, O., E. LEHTONEN, J. PEKKANEN & T. ITKONEN (2013): Beyond the tangent point: Gaze targets in naturalistic driving. *Journal of Vision* 13: 11.
- LEHTONEN, E., O. LAPPI, H. KOTKANEN & H. SUMMALA (2013): Look-ahead fixations in curve driving. *Ergonomics* 56: 34–44.
- LEHTONEN, E., O. LAPPI & H. SUMMALA (2012): Anticipatory eye movements when approaching a curve on a rural road depend on working memory load. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 15: 369–377.
- LENZ, K.-H. & W. BURGER (1975): Spurverhalten von Kraftfahrzeugen auf einer zweispurigen Landstraße. *Straße+Autobahn* 26.: 419–424.
- LERNER, M., A. HEGEWALD, U. LÖHE & H. VELLING (2009): Sicherheitswirkung von eingefrästen Rüttelstreifen entlang der BAB A24, V 177. *Wirtschaftsverlag NW Verlag für Neue Wissenschaft, Bergisch Gladbach*.
- LEUTZBACH, W., W. BRILON, DÖHLER & RINGLER (1976): Spurverhalten auf zweispurigen Landstraßen mit Gegenverkehr (Pilot-Study), Karlsruhe.
- LEUTZBACH, W., W. MAIER & M. DÖHLER (1981): Untersuchung des Spurverhaltens von Kraftfahrzeugen auf Landstraßen durch Verfolgungsfahrten. *Straße+Autobahn* 32.: 301–305.
- LIPPOLD, C., J. ZÖSCH & M. ZIMMERMANN (2015): Räumliche Linienführung von Autobahnen: Entwurf Schlussbericht.
- LOFTUS, G. R. & N. H. MACKWORTH (1978): Cognitive Determinations of Fixation Location During Picture Viewing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 565–572.
- LUCK, S. & E. VOGEL (1998): Response from Luck and Vogel. *Trends in Cognitive Sciences* 2: 78–79.
- MCKNIGHT, A. S., A. J. MCKNIGHT & A. S. TIPPETTS (1998): The effect of lane line width and contrast upon lanekeeping. *Accident Analysis & Prevention* 30: 617–624.

- MESEBERG, H.-H. (1995): Helle oder breite Markierung?: Sparmaßnahmen bei Fahrbahnmarkierung. Straße+Autobahn 46. Jahrgang: 288–294.
- MIETZEL, G. (1996): Wege in die Psychologie. 8. Aufl. Klett-Cotta, Stuttgart.
- MILLER, G. A. (1955): The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on Our Capacity for Processing Information. *Psychological review* 101: 343–352.
- MINISTERIUM FÜR STADTENTWICKLUNG, WOHNEN UND VERKEHR, ABT. 5, STRABENWESEN, STRABENVERKEHR (2002): Hinweise zur Verkehrslenkung und optischen Orientierung durch Bepflanzung (HVO): an Bundes- und Landesstraßen (außerorts) im Land Brandenburg.
- MINISTERIUM FÜR STADTENTWICKLUNG, WOHNEN UND VERKEHR, ABT. 5, STRABENWESEN, STRABENVERKEHR (2004): Straßenplanung und Straßenbau mit Human Factors: Ein Leitfaden.
- MINISTERIUM FÜR VERKEHR UND INFRASTRUKTUR BW (2015): Verkehrsmonitoring 2014: Fortschreibung für Bundesautobahnen in Baden-Württemberg. URL [http://www.svz-bw.de/fileadmin/verkehrszaehlung/vm/BW\\_VM\\_2014\\_A.pdf](http://www.svz-bw.de/fileadmin/verkehrszaehlung/vm/BW_VM_2014_A.pdf), 25.08.2016.
- MOURANT, R. R. & T. H. ROCKWELL (1970): Mapping Eye-Movement Patterns to the Visual Scene in Driving: An Exploratory Study. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* Vol. 12: 81–87.
- MOURANT, R. R. & T. H. ROCKWELL (1972): Strategies of Visual Search by Novice and Experienced Drivers. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* Vol. 14: 325–335.
- MÜLLER, H., G. SCHULZ & M. BENDER (Hrsg.) (2008): Bundesfernstraßengesetz (FStrG): Mit Autobahnmautgesetz ; Kommentar. Beck, München.
- NEUMANN, H. & B. DEML (2011): The Two-Point Visual Control Model of Steering - New Empirical Evidence. S. 493–502 in: D. HUTCHISON, T. KANADE, J. KITTLER, J. M. KLEINBERG, F. MATTERN, J. C. MITCHELL, M. NAOR, O. NIERSTRASZ, C. PANDU RANGAN, B. STEFFEN, M. SUDAN, D. TERZOPOULOS, D. TYGAR, M. Y. VARDI, G. WEIKUM & V. G. DUFFY (Hrsg.): *Digital Human Modeling*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- OLSON, P. L., D. S. BATTLE & T. AKOI (1989): Driver eye fixations under different operating Conditions, UMTR-89-3.

- PETRY, I., D. KEMPER & B. STEINAUER (2010): Vorübergehende Markierung in Arbeitsstellen längerer Dauer - Überprüfung von Prüfverfahren und Anforderungen an die Haltbarkeit. *Straßenverkehrstechnik* 54. Jahrgang: 642–646.
- PFLEGER, E. (2011): Licht - Ablenkungen und Störungen der Navigation. S. 13–17 in: *EUROPÄISCHE VEREINIGUNG FÜR UNFALLFORSCHUNG UND UNFALLANALYSEN - LÄNDERGRUPPE ÖSTERREICH* (Hrsg.): *Blendung - Erschwernisse für die Gefahrenerkennung*.
- PFLEGER, E., M. OTTERSBOCK, F. MATIASEK, S. MAYRHOFER, R. HAIDER, H. GLASER, P. SIMLINGER & T. VAVRINEK (2004): Herstellung eines Designs zur Verbesserung der Verkehrsführung bei Autobahn- und Schnellstraßen- und Bundesstraßenfahrten, Heft 538, Wien.
- REICHART, G. (2001): Menschliche Zuverlässigkeit beim Führen von Kraftfahrzeugen, Bd. 7. VDI-Verlag, Düsseldorf.
- RIEMERSMA, J. B. J., P. W. BIESTA & C. WILDERVANCK (1977): Fatigue and Stress Due to Prolonged Driving and Changing Task Demands in: : 1977 International Automotive Engineering Congress and Exposition. SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States.
- ROCKWELL, T. H. (1971): Visual Acquisition of Information in Driving Through Eye-Movement Techniques: An Overview. S. 67–86 in: P. F. WALLER (Hrsg.): *Mushrooming Technology: New Directions in Highway Safety*.
- ROUSIAMANIS, N. (2015): Einfluss der Fixationsdauer von Fahrbahnmarkierung auf das Fahrverhalten auf Bundesautobahnen, Karlsruhe (unveröffentlicht).
- SAATY, T. L. & M. S. OZDEMIR (2003): Why the magic number seven plus or minus two. *Mathematical and Computer Modelling* 38: 233–244.
- SANDERS, A. F. (1970): Some aspects of the selective process in the functional visual field. *Ergonomics* 13: 101–117.
- SCHLAG, B., R. HEGER, M. M. BAIER & B. STEINAUER (2002): Empfehlungen zur Berücksichtigung physiologischer und psychologischer Fähigkeiten und Grenzen der Kraftfahrer bei der Straßenplanung in Brandenburg: 1. Stufe: Systematisierung und Evaluation vorhandener Erkenntnisse.

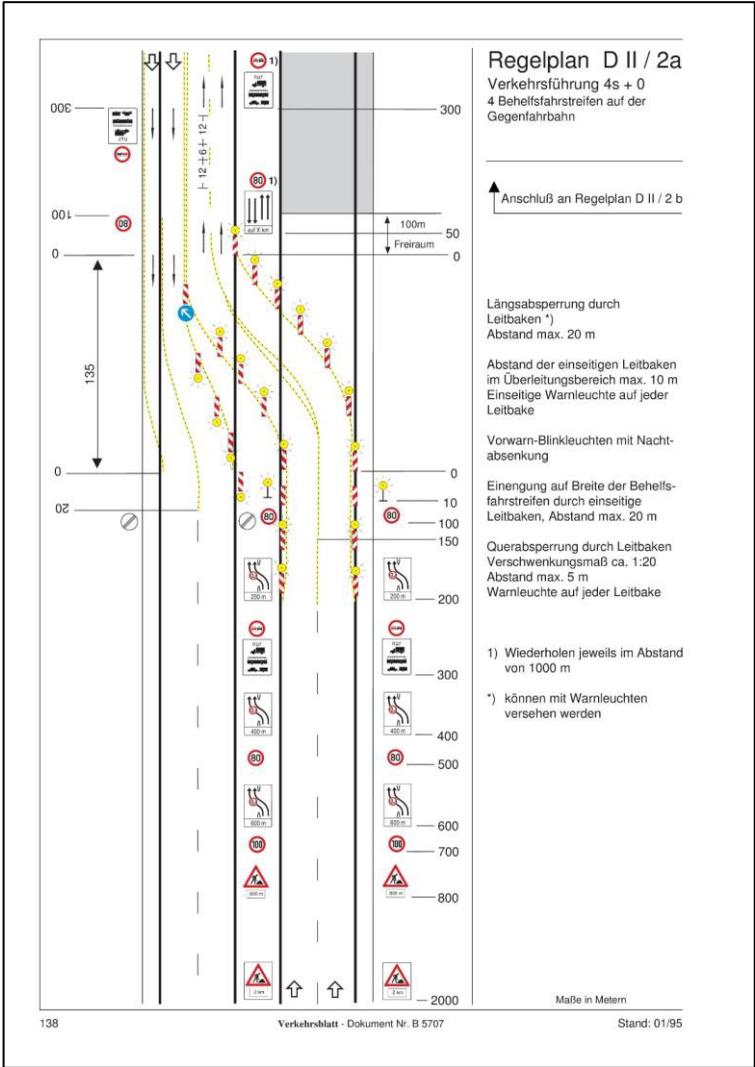
- SCHÖNBORN, H. (1982): Die Richtlinie für die Markierung von Straßen (RMS): Eine Zwischenbilanz zwei Jahre nach ihrer Veröffentlichung. *Straßenverkehrstechnik* 113–120.
- SCHULZ, R. (2012): Blickverhalten und Orientierung von Kraftfahrern auf Landstraßen. 1. Aufl., H. 10. TU, Lehrstuhl Gestaltung von Straßenverkehrsanlagen, Dresden.
- SCHWEIGERT, M. (2003): Fahrerblickverhalten und Nebenaufgaben.
- SERAFIN, C. (1993): Preliminary Examination of Driver Eye Fixations on Rural Roads: Insight into Safe Driving Behaviour, UMTRI-93-29.
- SEYDEL, U. (1969): Die Beeinflussung des Fahrverhaltens durch Leit- und Randlinien auf Freilandstraßen. Kleine Fachbuchreihe des Kuratoriums für Verkehrssicherheit 9–20.
- SHINAR, D., E. MCDOWELL & T. H. ROCKWELL (1977): Eye Movement in Curve Negotiation. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 63–71.
- SILVERTHORN, D. U., C. BIELE, M. NIEHAUS, J. WISSMANN, U. LOOS & W.-M. WEBER (2009): *Physiologie*. 4. Aufl. Pearson Studium, München.
- SPEKTRUM AKADEMISCHER VERLAG (1998): *Auge: Lexikon der Physik*. URL <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/auge/978>, 19.09.2016.
- STEIGERWALD, F. (1991): *Psychologie, Soziologie und Pädagogik*, Bd. 11. Haus und Gross, Völklingen.
- STRAUß, G. (2015): Untersuchung zur subjektiven Wahrnehmung von Markierung in Arbeitsstellen, Karlsruhe (unveröffentlicht).
- STROHMAIER, S. (2014): Visuelle Analyse von Eyetracking-Experimenten mit einer Vielzahl von Areas of Interest, Stuttgart.
- STÜRZEL, T. (2015): Entwicklung, Umsetzung und Evaluation eines Trainings zur Gewöhnung an die Fahrsimulation, Karlsruhe (unveröffentlicht).
- SUMMALA, H., T. NIEMINEN & M. PUNTO (1996): Maintaining Lane Position with Peripheral Vision during In-Vehicle Tasks. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 38: 442–451.
- SWELLER, J. (1988): Cognitive load during problem solving: Effects on learning. *Cognitive Science* 12: 257–285.
- TOMASKE, W. & T. FORTMÜLLER (2001): Der Einfluss von Wahrnehmungsschwellwerten auf die Auslegung von Bewegungssystemen in der Fahrsi-

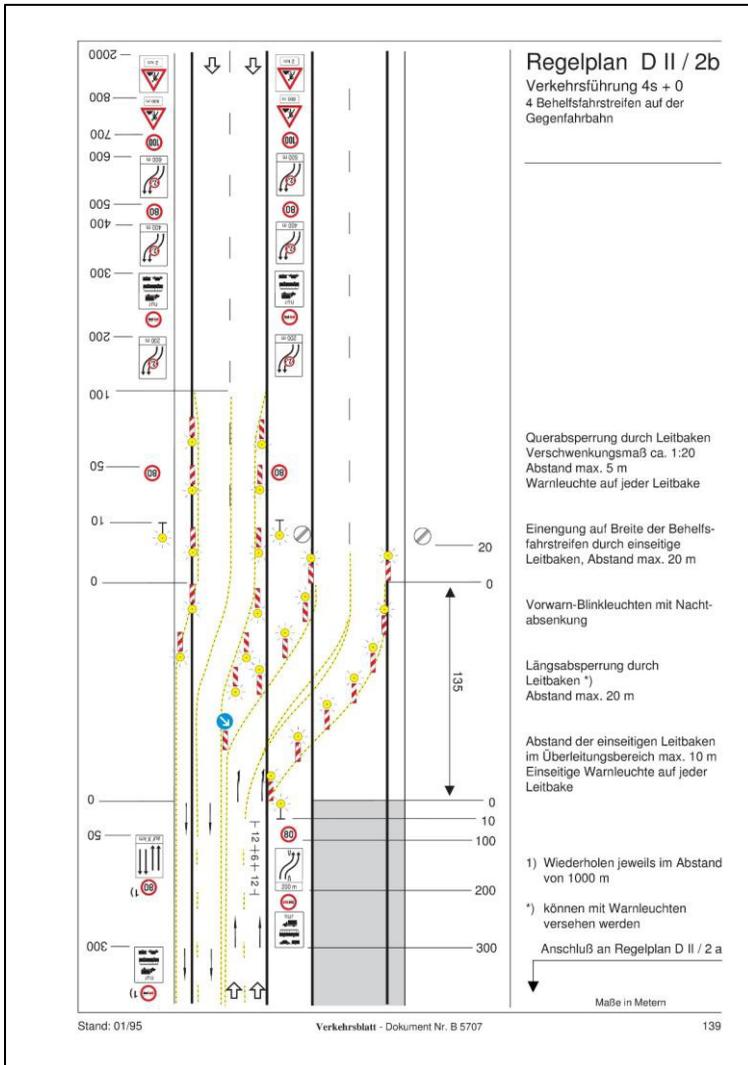
- mulation. Anhang: S. 1-22 in: K.-P. GÄRTNER & M. GRANDT (Hrsg.): Human Factors bei der Entwicklung von Fahrzeugen: 43. Fachausschusssitzung Anthropotechnik der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt e.V.: 23. und 24. Oktober 2001, 2001-06, Bonn.
- UNDERWOOD, G., P. CHAPMAN, K. BOWDEN & D. CRUNDALL (2002): Visual search while driving: Skill and awareness during inspection of the scene. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 5: 87–97.
- VICTOR, T. (2005): Keeping eye and mind on the road, Bd. 9. *Acta Universitatis Upsaliensis*, Uppsala.
- VOLKMANN, F. C. (1962): Vision during Voluntary Saccadic Eye Movements. *J. Opt. Soc. Am.* 52: 571.
- WIERDA, M. & J. AASMAN (1992): Seeing and driving: Computation, algorithms and implementation, 91-06. Traffic Research Centre VSC University of Groningen, Haren.
- YANTIS, S. (1993): Stimulus-driven attentional capture and attentional control settings. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 19: 676–681.
- YANTIS, S. & J. JONIDES (1996): Attentional capture by abrupt onsets: New perceptual objects or visual masking? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 22: 1505–1513.
- ZIMBARDO, P. G., R. J. GERRIG, R. GRAF, D. MALLETT, M. NAGLER & B. RICKER (2008): *Psychologie*. 18. Aufl. Pearson Studium, München, Boston [u.a.].
- ZIMMERMANN, M., S. B. RIFFEL, R. ROOS, B. CHLOND & C. WEIB (2016): Verbesserung des Verkehrsablaufs und der Verkehrssicherheit in Arbeitsstellen längerer Dauer auf Autobahnen durch neuartige Methoden: Schlussbericht.
- ZIMMERMANN, M. & S. SCHWEIGER (2016): Betriebsdienst auf minderbreiten Querschnitten - Anforderungen gemäß RSA und ASR A5.2. *Straße+Autobahn* 67. Jahrgang: 547–552.
- ZWIELICH, F., K. REKER & J. FLACH (2001): Fahrerhaltensbeobachtungen auf Landstraßen am Beispiel von Baumalleen: Eine Untersuchung mit dem Fahrzeug zur Interaktionsforschung Straßenverkehr, Bd. 124. *Wirtschaftsverlag NW Verlag für Neue Wissenschaft*, Bremerhaven.

# 7 Anhang

7.1	Regelplan DII/2 (RSA-95 2015).....	154
7.2	Online-Fragebogen Phase 1 .....	156
7.3	Kapazitätsberechnung der AID auf der BAB A5 Phase 2A.....	174
7.4	Übersicht der Ergebnisse zum Fahrverhalten Phase 2A .....	175
7.5	Ausgewertete Bilder Phase 2A .....	176
7.5.1	Fahrtrichtung Nord .....	176
7.5.2	Fahrtrichtung Süd .....	184
7.6	Versuchsplan Fahrsimulator Phase 2B .....	190
7.7	Detailwerte laterale Position Phase 2B .....	191
7.8	Versuchsplan Fahrsimulator Phase 3 .....	192
7.9	Detailwerte laterale Position Phase 3.....	194
7.10	Übersicht der lateralen Position in Abhängigkeit der Lageplanelemente .....	195
7.11	Querschnitte QE-Untersuchung .....	196
7.12	Versuchsplan QE-Untersuchung .....	198
7.13	Ergebnisse der QE-Untersuchung.....	199
7.14	Übersichtsblatt über alle AID .....	201

# 7.1 Regelplan DII/2 (RSA-95 2015)





## 7.2 Online-Fragebogen Phase 1

 Karlsruher Institut für Technologie	 Institut für Straßen- und Eisenbahnenwesen
Liebe Teilnehmerin, lieber Teilnehmer,	
Auto fahren ist ohne die visuelle Wahrnehmung über das Auge unvorstellbar. Wir erfassen die Umgebung, die vorausliegende Strecke und vieles mehr über das Auge. Wie unterschiedlich dabei jedoch die subjektive Wahrnehmung der Situation von Autofahrer zu Autofahrer sein kann, wurde bislang kaum untersucht.	
Mit Ihrer Teilnahme an diesem Fragebogen helfen Sie mir, im Rahmen meiner Masterarbeit neue Erkenntnisse zur subjektiven Wahrnehmung im Straßenverkehr zu gewinnen.	
Die in diesem Fragebogen gestellten Fragen beziehen sich dabei stets auf Autobahnen sowie Autobahnbaustellen. Antworten Sie intuitiv, Ihre persönliche Einschätzung ist uns wichtig.	
Die Befragung sollte nicht mehr als ca. 10-15 Minuten Ihrer Zeit beanspruchen.	
Ihre Angaben werden absolut vertraulich behandelt und ausschließlich für wissenschaftliche Zwecke genutzt. Rückschlüsse auf die Identität Ihrer Person können nicht geschlossen werden.	
Vielen Dank für Ihr Interesse und Ihre Unterstützung!	
Gustav Strauß	
(Bei Rückfragen stehe wir Ihnen gerne zur Verfügung: Gustav.Strauss@web.de; 0176/97310467 Barbara.Koehler@kit.edu; 0721/60846883)	

 Karlsruher Institut für Technologie	 Institut für Straßen- und Eisenbahnenwesen
1. Dauerhafte Fahrbahnmarkierung wird in Deutschland in weiß ausgeführt. Wie beurteilen Sie diese Farbwahl?	
<p style="text-align: center;"><input type="radio"/> Sehr geeignet      <input type="radio"/> Geeignet      <input type="radio"/> Teilweise geeignet      <input type="radio"/> Nicht geeignet      <input type="radio"/> Überhaupt nicht geeignet</p>	

 Karlsruher Institut für Technologie	 Institut für Straßen- und Eisenbahnenwesen
2. Welche Farbe ist Ihrer Meinung nach für die dauerhafte Fahrbahnmarkierung besser geeignet? (Mehrfachnennung möglich)	
<input type="checkbox"/>  Keine, Weiß ist am besten	
<input type="checkbox"/>  Gelb	
<input type="checkbox"/>  Grün	
<input type="checkbox"/>  Blau	
<input type="checkbox"/>  Rot	
<input type="checkbox"/> Sonstige: <input type="text"/>	

 Karlsruher Institut für Technologie	 Institut für Straßen- und Eisenbahnenwesen			
<p>3. Vorübergehende Fahrbahnmarkierung in Autobahnbaustellen wird in gelb ausgeführt. Wie beurteilen Sie diese Farbwahl?</p>				
Sehr geeignet	Geeignet	Teilweise geeignet	Nicht geeignet	Überhaupt nicht geeignet
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

 Karlsruher Institut für Technologie	 Institut für Straßen- und Eisenbahnenwesen						
<p>4. Welche Farbe ist Ihrer Meinung nach für die vorübergehende Fahrbahnmarkierung in Autobahnbaustellen besser geeignet? (Mehrfachnennung möglich)</p>							
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Keine, Gelb ist am besten		Weiß		Grün		Blau
	Rot	<input type="text" value="Sonstige:"/>					

 Karlsruher Institut für Technologie	 Institut für Straßen- und Eisenbahnenwesen				
<p>5. Wie beurteilen Sie die folgenden Aussagen?</p>					
	Trifft voll zu	Trifft zu	Trifft teilweise zu	Trifft nicht zu	Trifft überhaupt nicht zu
Die Fahrbahnmarkierung ist zur Orientierung im Straßenverkehr hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Bei nassen Straßenoberflächen fällt es mir schwerer die Fahrbahnmarkierung zu erkennen als bei trockenen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Nachts fällt es mir schwerer die Fahrbahnmarkierung zu erkennen als am Tag.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Bei hellen Straßenoberflächen fällt es mir schwerer die Fahrbahnmarkierung zu erkennen als bei dunklen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>




**6. Wie beurteilen Sie das parallele Vorhandensein von weißer und gelber Fahrbahnmarkierung in Autobahnbaustellen?**

Sehr irritierend    
  Irritierend    
  Teilweise irritierend    
  Nicht irritierend    
  Überhaupt nicht irritierend



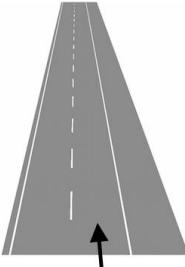

**7. Wie beurteilen Sie die folgenden Aussagen?**

	Trifft voll zu	Trifft zu	Trifft teilweise zu	Trifft nicht zu	Trifft überhaupt nicht zu
Ich fühle mich in Autobahnbaustellen überfordert.	<input type="radio"/>				
Eine Überleitung auf die Gegenfahrbahn in einer Autobahnbaustelle empfinde ich als irritierend.	<input type="radio"/>				
Ich empfinde es als irritierend, wenn in einer Autobahnbaustelle die Fahrstreifen getrennt und auf unterschiedlichen Seiten geführt werden.	<input type="radio"/>				

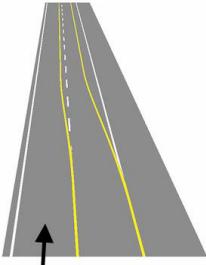


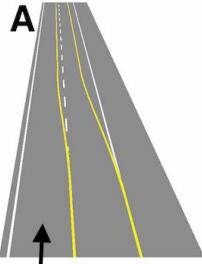
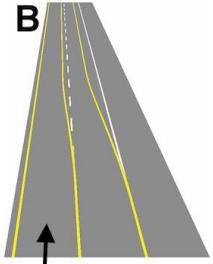

Es folgen nun Fragen um Ihre subjektive Wahrnehmung der Fahrbahnmarkierung in Autobahnbaustellen zu ermitteln. Hierzu werden Ihnen Skizzen unterschiedlicher Autobahnbaustellen gezeigt. Diese Skizzen dienen nur zur Veranschaulichung und besseren Vorstellung.

**Der schwarze Pfeil gibt dabei an, auf welchem Fahrstreifen Sie sich momentan befinden.**



Die folgenden Skizzen wurden mit Hilfe der Simulationssoftware Vissim der PTV AG erstellt.

 Karlsruher Institut für Technologie	 Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen
<b>8. Wie beurteilen Sie eine Fahrstreifenverengung?</b>	
	
Sehr irritierend	<input type="radio"/>
Irritierend	<input type="radio"/>
Teilweise irritierend	<input type="radio"/>
Nicht irritierend	<input type="radio"/>
Überhaupt nicht irritierend	<input type="radio"/>

 Karlsruher Institut für Technologie	 Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen	
<b>9. Wie beurteilen Sie eine Fahrstreifenverengung in den folgenden Fällen?</b>		
<i>Die beiden Fälle unterscheiden sich in der Farbe der Fahrbahnmarkierung am linken Fahrbahnrand</i>		
<b>A</b> 	<b>B</b> 	
A	B	
Sehr irritierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Irritierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Teilweise irritierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Nicht irritierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Überhaupt nicht irritierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

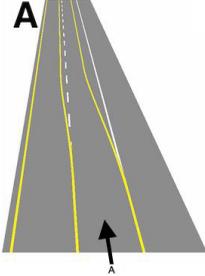


KIT  
Karlsruher Institut für Technologie

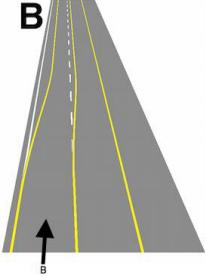


ISE  
Institut für Straßen-  
und Eisenbahnenwesen

10. Wie beurteilen Sie eine Veränderung des Fahrstreifens nach links bzw. rechts?



A



B

Sehr irritierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Irritierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Teilweise irritierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Nicht irritierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Überhaupt nicht irritierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

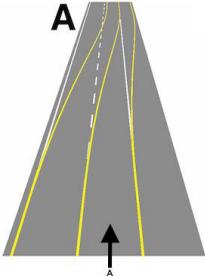


KIT  
Karlsruher Institut für Technologie

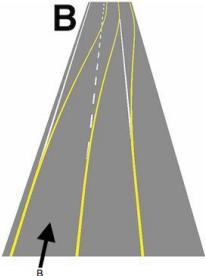


ISE  
Institut für Straßen-  
und Eisenbahnenwesen

11. Wie beurteilen Sie ein Kreuzen der gelben Fahrbahnmarkierung mit einer weißen durchgezogenen bzw. unterbrochenen?

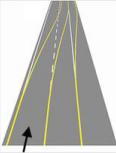
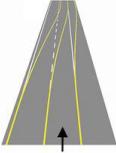


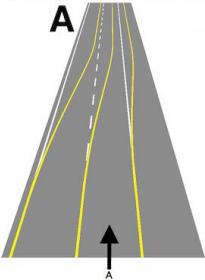
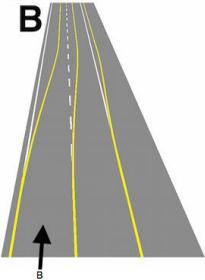
A



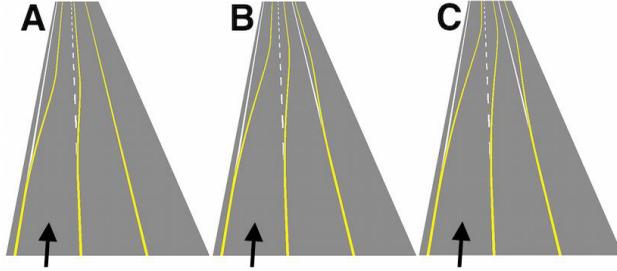
B

Sehr irritierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Irritierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Teilweise irritierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Nicht irritierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Überhaupt nicht irritierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

 						
<p>12. Wie beurteilen Sie die folgenden Aussagen?</p>						
<p>Eine Überleitung auf einen anderen Fahrstreifen empfinde ich als irritierend.</p>		<p>Trifft voll zu</p> <input type="radio"/>	<p>Trifft zu</p> <input type="radio"/>	<p>Trifft teilweise zu</p> <input type="radio"/>	<p>Trifft nicht zu</p> <input type="radio"/>	<p>Trifft überhaupt nicht zu</p> <input type="radio"/>
<p>Eine Überleitung auf den Standstreifen empfinde ich als irritierend.</p>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

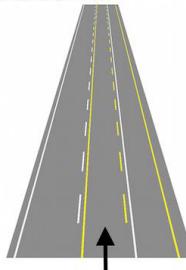
 	
<p>13. Wie beurteilen Sie eine Veränderung der gelben Fahrbahnmarkierung gegenüber einer weißen durchgezogenen bzw. unterbrochenen?</p>	
<p><b>A</b></p>  <p>A</p>	<p><b>B</b></p>  <p>B</p>
<p>Sehr irritierend</p> <input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<p>Irritierend</p> <input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<p>Teilweise irritierend</p> <input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<p>Nicht irritierend</p> <input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<p>Überhaupt nicht irritierend</p> <input type="radio"/>	<input type="radio"/>

14. Wie beurteilen Sie eine Veränderung der gelben Fahrbahnmarkierung gegenüber einer weißen in den folgenden Fällen?



	A	B	C
Sehr irritierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Irritierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Teilweise irritierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Nicht irritierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Überhaupt nicht irritierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

15. Wie beurteilen Sie ein paralleles Vorhandensein weißer Fahrbahnmarkierung außerhalb der gelben?



Sehr irritierend	<input type="radio"/>
Irritierend	<input type="radio"/>
Teilweise irritierend	<input type="radio"/>
Nicht irritierend	<input type="radio"/>
Überhaupt nicht irritierend	<input type="radio"/>



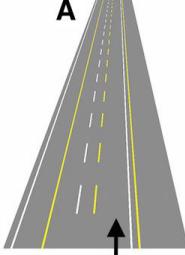
KIT  
Karlsruher Institut für Technologie



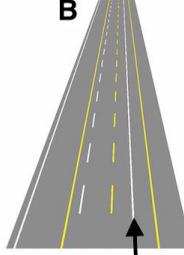
ISE  
Institut für Straßen-  
und Eisenbahnenwesen

16. Wie beurteilen Sie ein paralleles Vorhandensein einer weißen durchgezogenen Fahrbahnmarkierung innerhalb der gelben in den folgenden Fällen?

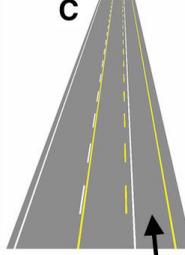
**A**



**B**



**C**



	A	B	C
Sehr irritierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Irritierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Teilweise irritierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Nicht irritierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Überhaupt nicht irritierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>



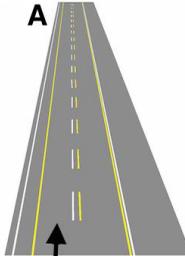
KIT  
Karlsruher Institut für Technologie



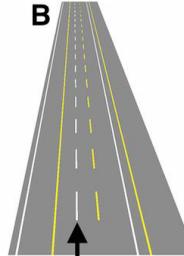
ISE  
Institut für Straßen-  
und Eisenbahnenwesen

17. Wie beurteilen Sie ein paralleles Vorhandensein einer weißen unterbrochenen Fahrbahnmarkierung innerhalb der gelben in den folgenden Fällen?

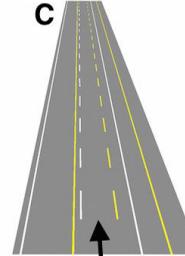
**A**



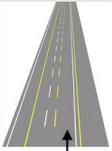
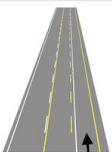
**B**



**C**



	A	B	C
Sehr irritierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Irritierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Teilweise irritierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Nicht irritierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Überhaupt nicht irritierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

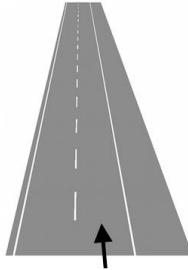
		 <small>Institut für Straßen- und Eisenbahnenwesen</small>				
<b>18. Wie beurteilen Sie die folgenden Aussagen?</b>						
Befindet sich innerhalb meiner Fahrspur auf der rechten Seite eine weiße Fahrbahnmarkierung, fahre ich tendenziell weiter links.		Trifft voll zu	Trifft zu	Trifft teilweise zu	Trifft nicht zu	Trifft überhaupt nicht zu
		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Befindet sich innerhalb meiner Fahrspur auf der linken Seite eine weiße Fahrbahnmarkierung, fahre ich tendenziell weiter rechts.		Trifft voll zu	Trifft zu	Trifft teilweise zu	Trifft nicht zu	Trifft überhaupt nicht zu
		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

		 <small>Institut für Straßen- und Eisenbahnenwesen</small>				
<b>19. Wie beurteilen Sie die folgende Aussage?</b>						
Diese Einrichtung erhöht meine <u>Orientierung</u> in einer Autobahnbaustelle.						
Gelbe Fahrbahnmarkierung		Trifft voll zu	Trifft zu	Trifft teilweise zu	Trifft nicht zu	Trifft überhaupt nicht zu
		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Leitbaken		Trifft voll zu	Trifft zu	Trifft teilweise zu	Trifft nicht zu	Trifft überhaupt nicht zu
		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Leitbaken mit Warnleuchten		Trifft voll zu	Trifft zu	Trifft teilweise zu	Trifft nicht zu	Trifft überhaupt nicht zu
		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Schutzeinrichtungen		Trifft voll zu	Trifft zu	Trifft teilweise zu	Trifft nicht zu	Trifft überhaupt nicht zu
		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

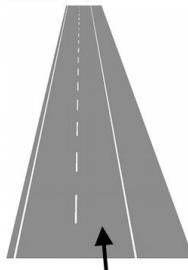
 	
<b>2. Wie beurteilen Sie die folgende Aussage?</b> Diese Einrichtung erhöht meine <b>Aufmerksamkeit</b> in einer Autobahnbaustelle.	
Gelbe Fahrbahnmarkierung 	Trifft voll zu <input type="radio"/> Trifft zu <input type="radio"/> Trifft teilweise zu <input type="radio"/> Trifft nicht zu <input type="radio"/> Trifft überhaupt nicht zu <input type="radio"/>
Leitbaken 	Trifft voll zu <input type="radio"/> Trifft zu <input type="radio"/> Trifft teilweise zu <input type="radio"/> Trifft nicht zu <input type="radio"/> Trifft überhaupt nicht zu <input type="radio"/>
Leitbaken mit Warnleuchten 	Trifft voll zu <input type="radio"/> Trifft zu <input type="radio"/> Trifft teilweise zu <input type="radio"/> Trifft nicht zu <input type="radio"/> Trifft überhaupt nicht zu <input type="radio"/>
Schutzeinrichtungen 	Trifft voll zu <input type="radio"/> Trifft zu <input type="radio"/> Trifft teilweise zu <input type="radio"/> Trifft nicht zu <input type="radio"/> Trifft überhaupt nicht zu <input type="radio"/>

 	
<b>21. In Deutschland gibt es folgende Methoden um irritierende Fahrbahnmarkierung in Baustellen zu verhindern. Wie beurteilen Sie diese Methoden?</b>	
Die weiße Fahrbahnmarkierung:	Sehr geeignet <input type="radio"/> Geeignet <input type="radio"/> Teilweise geeignet <input type="radio"/> Nicht geeignet <input type="radio"/> Überhaupt nicht geeignet <input type="radio"/>
Entfernen 	Sehr geeignet <input type="radio"/> Geeignet <input type="radio"/> Teilweise geeignet <input type="radio"/> Nicht geeignet <input type="radio"/> Überhaupt nicht geeignet <input type="radio"/>
Abdecken 	Sehr geeignet <input type="radio"/> Geeignet <input type="radio"/> Teilweise geeignet <input type="radio"/> Nicht geeignet <input type="radio"/> Überhaupt nicht geeignet <input type="radio"/>
In Gelb auskreuzen 	Sehr geeignet <input type="radio"/> Geeignet <input type="radio"/> Teilweise geeignet <input type="radio"/> Nicht geeignet <input type="radio"/> Überhaupt nicht geeignet <input type="radio"/>
In Gelb ergänzen 	Sehr geeignet <input type="radio"/> Geeignet <input type="radio"/> Teilweise geeignet <input type="radio"/> Nicht geeignet <input type="radio"/> Überhaupt nicht geeignet <input type="radio"/>

Es folgen nun Fragen zur Bedeutung von unterschiedlicher Fahrbahnmarkierung. Auch in diesen Fragen zeigt Ihnen der schwarze Pfeil, auf welchem Fahrstreifen Sie sich momentan befinden.



22. Sie möchten auf den Fahrstreifen links von Ihnen wechseln. Wie verhalten Sie sich?



(Mehrfachnennung möglich)

- Sie dürfen den Fahrstreifen wechseln.
- Sie dürfen den Fahrstreifen nicht wechseln.
- Sie dürfen den Fahrstreifen nur wechseln, wenn Schilder es erlauben.

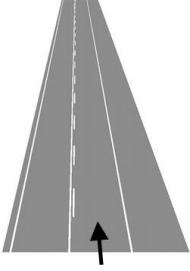


KIT  
Karlsruher Institut für Technologie



ISE  
Institut für Straßen-  
und Eisenbahnwesen

23. Sie möchten auf den Fahrstreifen links von Ihnen wechseln. Wie verhalten Sie sich?



(Mehrfachnennung möglich)

Sie dürfen beide Linien überfahren.  
 Sie dürfen nur die unterbrochene Linie überfahren.  
 Sie dürfen keine der Linien überfahren.

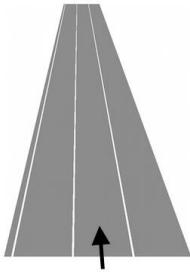


KIT  
Karlsruher Institut für Technologie



ISE  
Institut für Straßen-  
und Eisenbahnwesen

24. Sie möchten auf den Fahrstreifen links von Ihnen wechseln. Wie verhalten Sie sich?

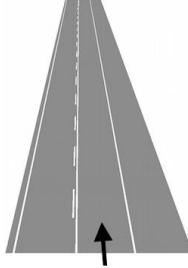


(Mehrfachnennung möglich)

Sie dürfen die Fahrbahnmarkierung

nur überqueren, wenn dadurch niemand gefährdet wird.  
 nicht überqueren oder überfahren.  
 nur zum Überholen überqueren.

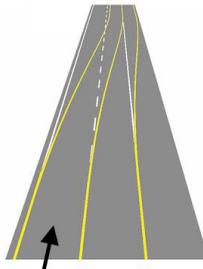
25. Sie möchten auf den Fahrstreifen links von Ihnen wechseln. Wie verhalten Sie sich?



(Mehrfachnennung möglich)

- Sie dürfen beide Linien überfahren.
- Sie dürfen nur die durchgezogene Linie überfahren.
- Sie dürfen keine der Linien überfahren.

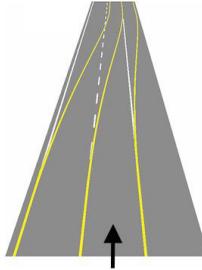
26. Wie verhalten Sie sich in dieser Autobahnbaustelle?



(Mehrfachnennung möglich)

- Sie folgen der weißen Fahrbahnmarkierung.
- Sie folgen der gelben Fahrbahnmarkierung, weil die weiße unterbrochen ist.
- Sie folgen der gelben Fahrbahnmarkierung, ohne die weiße zu beachten.

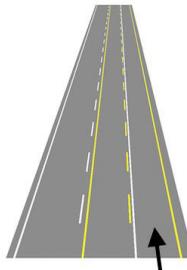
27. Wie verhalten Sie sich in dieser Autobahnbaustelle?



(Mehrfachnennung möglich)

- Sie folgen der gelben Fahrbahnmarkierung nicht, weil die weiße Linie durchgezogen ist.
- Sie folgen der gelben Fahrbahnmarkierung, ohne die weiße zu beachten.
- Sie folgen nur der gelben Fahrbahnmarkierung, wenn dazu Schilder anweisen.

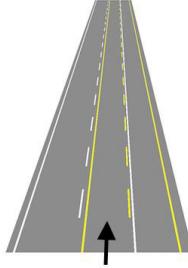
28. Sie möchten auf den Fahrstreifen links von Ihnen wechseln. Wie verhalten Sie sich?



(Mehrfachnennung möglich)

- Sie dürfen den Fahrstreifen wechseln.
- Sie dürfen den Fahrstreifen nicht wechseln.
- Sie dürfen den Fahrstreifen nur wechseln, wenn Schilder es erlauben.

29. Sie möchten auf den Fahrstreifen rechts von Ihnen wechseln. Wie verhalten Sie sich?

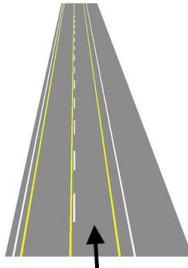


(Mehrfachnennung möglich)

- Sie dürfen den Fahrstreifen nur wechseln, wenn Schilder es erlauben.
- Sie dürfen den Fahrstreifen wechseln.
- Sie dürfen den Fahrstreifen nicht wechseln.

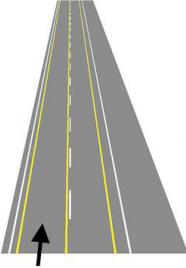
1

30. Sie möchten auf den Fahrstreifen links von Ihnen wechseln. Wie verhalten Sie sich?



(Mehrfachnennung möglich)

- Sie dürfen den Fahrstreifen nicht wechseln.
- Sie dürfen den Fahrstreifen wechseln.
- Sie dürfen den Fahrstreifen nur wechseln, wenn Schilder es erlauben.

 Karlsruher Institut für Technologie	 Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen
<p>31. Sie möchten auf den Fahrstreifen rechts von Ihnen wechseln. Wie verhalten Sie sich?</p>	
	
<p>(Mehrfachnennung möglich)</p>	
<p> <input type="checkbox"/> Sie dürfen den Fahrstreifen nur wechseln, wenn Schilder es erlauben.  <input type="checkbox"/> Sie dürfen den Fahrstreifen wechseln.  <input type="checkbox"/> Sie dürfen den Fahrstreifen nicht wechseln.         </p>	

 Karlsruher Institut für Technologie	 Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen
<p>Zum Schluss folgen nur noch ein paar Fragen zu Ihrer Person.</p>	

 Karlsruher Institut für Technologie	 Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen
<p>32. Welchen Führerscheine besitzen Sie?</p>	
<p>(Mehrfachnennung möglich)</p>	
<p> <input type="checkbox"/> Keinen  <input type="checkbox"/> Klasse A (Motorrad)  <input type="checkbox"/> Klasse B (Pkw)  <input type="checkbox"/> Klasse C (Lkw)  <input type="checkbox"/> Klasse D (Bus)  <input type="checkbox"/> Sonstige Klasse: <input type="text"/> </p>	

 Karlsruher Institut für Technologie	 Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen
<p><b>33. Bitte machen Sie Angaben zu Ihrer Pkw-Nutzung.</b></p>	
	(fast) Täglich      Wöchentlich      Monatlich      Seltener      Nie
Wie häufig fahren Sie einen Pkw?	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>
Wie häufig fahren Sie auf einer Autobahn?	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>
<p><b>34. Wie viele Kilometer fahren Sie als Pkw-Fahrer pro Jahr in etwa? [SD03]</b></p>	
	<input style="width: 150px;" type="text"/> km
<p><b>35. Bitte geben Sie Ihr Geschlecht an. [SD04]</b></p>	
	<input type="radio"/> Weiblich <input type="radio"/> Männlich
<p><b>36. Bitte geben Sie Ihr Geburtsjahr an. [SD05]</b></p>	
	<input style="width: 80px;" type="text"/> (z.B. 1970)

 Karlsruher Institut für Technologie	 Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen
<p><b>37. Bitte geben Sie Ihren höchsten Schulabschluss an. [SD06]</b></p>	
	<input type="radio"/> Noch in schulischer Ausbildung <input type="radio"/> Haupt-(Volk-)schulabschluss <input type="radio"/> Abschluss an der polytechnischen Oberschule <input type="radio"/> Realschul- oder gleichwertiger Abschluss <input type="radio"/> Fachhochschul- oder Hochschulreife <input type="radio"/> Ohne Schulabschluss
<p><b>38. Bitte geben Sie Ihren höchsten beruflichen Bildungsabschluss an. [SD07]</b></p>	
	<input type="radio"/> Lehre/ Berufsausbildung im dualen System <input type="radio"/> Fachschulabschluss <input type="radio"/> Fachschulabschluss in der ehem. DDR <input type="radio"/> Fachhochschulabschluss <input type="radio"/> Universitätsabschluss <input type="radio"/> Promotion <input type="radio"/> Ohne beruflichen Bildungsabschluss



KIT  
Karlsruher Institut für Technologie



ISE  
Institut für Straßen-  
und Eisenbahnenwesen

---

39. In welchem Bundesland wohnen Sie zur Zeit? [SD08]

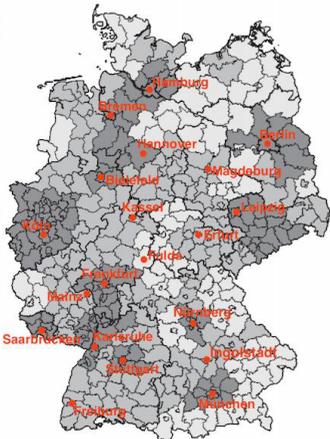
40. In welcher Region befindet sich Ihr Wohnort? (Siehe Karte rechts) [SD09]

In einer

Metropolegion

Verstädterten Region

Ländlichen Region





KIT  
Karlsruher Institut für Technologie



ISE  
Institut für Straßen-  
und Eisenbahnenwesen

---

**Vielen Dank für Ihre Teilnahme!**

Ich möchte mich ganz herzlich für Ihre Unterstützung bedanken.

Die Ergebnisse dieser Befragung werden im Rahmen meiner Masterarbeit "Untersuchung zur subjektiven Wahrnehmung von Markierung in Arbeitsstellen" sowie der Dissertation von Frau Dipl.-Ing. Barbara Köhler am Institut für Straßen- und Eisenbahnenwesen des Karlsruher Instituts für Technologie aufgearbeitet.

Für Rückfragen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung:  
 Gustav.Strauss@web.de  
 Barbara.Koehler@kit.edu

Vielen Dank,  
 Gustav Strauß

## 7.3 Kapazitätsberechnung der AID auf der BAB A5 Phase 2A

Formblatt

<b>Maßnahme</b>	Bundesland: <u>BW</u>	BAB-Nummer	A <u>5</u>
Lage der Arbeitsstelle zwischen <u>AS Bruchsal</u> , km _____ und <u>AS Karlsruhe-Nord</u> , km _____			
Zeitraum der Ausführung vom _____, bis _____			
Art der Behelfsverkehrsführung: <u>4s + 0</u>		Fahrtrichtung _____	
<b>Kapazität der Arbeitsstelle</b> (Einflussfaktoren)	<b>Richtung</b> <u>KA</u>	<b>Richtung</b> <u>F</u>	
Anzahl der Behelfsfahrstreifen $n_{FS}$	<u>2</u>	<u>2</u>	
Breite der Behelfsfahrstreifen in m	FS 1	<u>3,50</u>	<u>3,75</u>
	FS 2	<u>3,00</u>	<u>3,00</u>
	FS 3	_____	_____
OU = Ortsunkundige, d.h. der Anteil des berufsbedingten Verkehrs liegt unter 50 % (Schätzung ggf. erforderlich)	<u>nein</u>	<u>nein</u>	(ja/nein)
RFS = Reduktion der Anzahl der Fahrstreifen vor der Arbeitsstelle	<u>ja</u>	<u>ja</u>	(ja/nein)
ÜL = Überleitung auf die Gegenfahrbahn	<u>nein</u>	<u>ja</u>	(ja/nein)
Kapazität $C_{FS,PE}$ der Fahrstreifen nach Tab. 2 in Pkw-E/h/FS	FS 1	<u>1.740</u>	<u>1.650</u>
	FS 2 +	<u>1.740</u>	+ <u>1.650</u>
	FS 3 +	_____	+ _____
Kapazität $C_{RI,PE}$ der Fahrtrichtung in Pkw-E/h	= <u>3.480</u>	= <u>3.300</u>	
<b>Verkehrsstärke</b> in der Spitzenstunde $q$ der Fahrtrichtung in Kfz/h und SV-Anteil $b_{SV}$ in %			
Dienstag bis Donnerstag $q_{D,Do}/b_{SV,D,Do}$	<u>3.400 / 15%</u>	<u>3.400 / 15%</u>	
am höchstbelasteten Tag (Spitzentag) $q_{Max}/b_{SV,Max}$	_____ / _____	_____ / _____	
Längsneigung in %	<u>eben</u>	<u>eben</u>	
Umrechnungsfaktor $f_G$ nach Tab. 1	<u>1,5</u>	<u>1,5</u>	
Verkehrsstärke der Fahrtrichtung in Pkw-E/h			
$q_{PE,D,Do} = q_{D,Do} \cdot (1 + b_{SV}/100 \cdot (f_G - 1))$	<u>3.145</u>	<u>3.145</u>	
$q_{PE,Max} = q_{Max} \cdot (1 + b_{SV}/100 \cdot (f_G - 1))$	_____	_____	
<b>Übergang</b> je Fahrstreifen in Pkw-E/h			
$S_{Diff,D,Do} = (q_{PE,D,Do} - C_{RI,PE}) / n_{FS}$	<u>-167,5</u>	<u>-77,5</u>	
$S_{Diff,Max} = (q_{PE,Max} - C_{RI,PE}) / n_{FS}$	_____	_____	

Version Mai 2011

(Vorlage des Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2011)

## 7.4 Übersicht der Ergebnisse zum Fahrverhalten Phase 2A

	FR Nord			FR Süd		
<b>Anzahl Bilder</b>	51			51		
<b>mit vorausfahrendem Fahrzeug</b>	47			34		
	links	mitte	rechts	links	mitte	rechts
<b>mit vorausfahrendem Fahrzeug auf IFS</b>	6	32	9	1	11	22
<b>[%]</b>	13 %	68 %	19 %	3 %	32 %	65 %
<b>ohne Überholvorgang (rFS frei)</b>	2	21	5	1	8	21
<b>[%]</b>	7 %	75 %	18 %	3 %	27 %	70 %
<b>Überholvorgang (Lkw oder Pkw auf rFS)</b>	4	11	4	0	3	1
<b>[%]</b>	21 %	58 %	21 %	0 %	75 %	25 %

## 7.5 Ausgewertete Bilder Phase 2A

### 7.5.1 Fahrtrichtung Nord

VP 7 Position 1



VP 7 Position 2



VP 7 Position 3



VP 8 Position 1



VP 8 Position 2



VP 8 Position 3



VP 9 Position 1



VP 9 Position 3



VP 12 Position 1



VP 12 Position 2



VP 12 Position 3



VP 13 Position 3



VP 14 Position 1



VP 15 Position 1



VP 15 Position 2



VP 16 Position 3



VP 20 Position 1



VP 20 Position 2



VP 23 Position 1



VP 23 Position 2



VP 23 Position 3



VP 24 Position 1



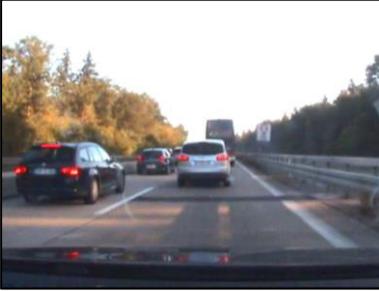
VP 24 Position 2



VP 24 Position 3



VP 25 Position 1



VP 25 Position 2



VP 26 Position 1



VP 26 Position 2



VP 26 Position 3



VP 27 Position 1



VP 27 Position 2



VP 29 Position 1



VP 29 Position 2



VP 29 Position 3



VP 30 Position 1



VP 30 Position 2



VP 30 Position 3



VP 31 Position 1



VP 31 Position 2



VP 31 Position 3



VP 32 Position 1



VP 32 Position 3



VP 33 Position 1



VP 33 Position 2



VP 33 Position 3



## 7.5.2 Fahrtrichtung Süd

VP 7 Position 1



VP 7 Position 2



VP 7 Position 3



VP 8 Position 2



VP 8 Position 3



VP 9 Position 1



VP 9 Position 2



VP 9 Position 3



VP 11 Position 1



VP 11 Position 2



VP 11 Position 3



VP 12 Position 1



VP 12 Position 3



VP 13 Position 1



VP 13 Position 3



VP 14 Position 1



VP 14 Position 2



VP 14 Position 3



VP 15 Position 1



VP 23 Position 1



VP 23 Position 2



VP 23 Position 3



VP 24 Position 1



VP 24 Position 2



VP 25 Position 3



VP 26 Position 2



VP 27 Position 1



VP 29 Position 2



VP 30 Position 1



VP 31 Position 2



VP 32 Position 2



VP 33 Position 1



VP 33 Position 2



VP Position 3



## 7.6 Versuchsplan Fahrsimulator Phase 2B

	Befahrene AID Nr.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>VP01</b>	1r	2r	3r	1r	2r	3r	2l	3l	2l	3l
<b>VP02</b>	1r	2r	3r	1r	2r	3r	2l	3l	2l	3l
<b>VP03</b>	3r	1r	2r	2l	3l	1r	3r	2r	2l	3l
<b>VP04</b>	3r	1r	2r	2l	3l	1r	3r	2r	2l	3l
<b>VP05</b>	2l	3l	1r	3r	2r	2r	3r	1r	3l	2l
<b>VP07</b>	3r	3r	1r	1r	2r	2r	2l	3l	2l	3l
<b>VP08</b>	3r	3r	1r	1r	2r	2r	2l	3l	2l	3l
<b>VP09</b>	3l	2l	3r	2r	1r	3r	2r	1r	3l	2l
<b>VP11</b>	2l	2l	3l	3l	1r	3r	2r	1r	3r	2r
<b>VP12</b>	2l	2l	3l	3l	1r	3r	2r	1r	3r	2r
<b>VP13</b>	2l	3l	2l	3l	1r	2r	3r	1r	2r	3r
<b>VP14</b>	2l	3l	2l	3l	1r	2r	3r	1r	2r	3r
<b>VP16</b>	3l	2l	2r	1r	3r	3l	2l	2r	1r	3r
<b>VP17</b>	3r	1r	2r	2l	3l	3l	2l	2r	3r	1r
<b>VP18</b>	3r	1r	2r	2l	3l	3l	2l	2r	3r	1r
<b>VP19</b>	2r	3r	1r	3l	3l	2l	2l	3r	1r	2r
<b>VP20</b>	2r	3r	1r	3l	3l	2l	2l	3r	1r	2r
<b>VP21</b>	2l	3l	2l	3l	1r	2r	3r	1r	2r	3r

## 7.7 Detailwerte laterale Position Phase 2B

Tabelle 7.1: Laterale Position Phase 2B (rFS)

AID	1r	2r	3r
			
<b>min</b>	-0,1630	-0,0578	-0,1184
<b>q15</b>	0,0156	-0,0114	-0,0446
<b>med_latP</b>	0,2207	0,2133	0,1923
<b>q85</b>	0,4727	0,5467	0,4452
<b>max</b>	0,5242	0,6149	0,5578
<b>q85 – q15</b>	0,4571	0,5581	0,4899
<b>mw_latP</b>	0,2211	0,2527	0,1869
<b>std_latP</b>	0,1940	0,2259	0,1976

Tabelle 7.2: Laterale Position Phase 2B (IFS)

AID	2I	3I
		
<b>min</b>	0,1605	0,0982
<b>q15</b>	0,3241	0,1939
<b>med_latP</b>	0,4350	0,3114
<b>q85</b>	0,6168	0,5744
<b>max</b>	0,9509	0,9882
<b>q85 – q15</b>	0,2927	0,3805
<b>mw_latP</b>	0,4617	0,3684
<b>std_latP</b>	0,1592	0,2009

## 7.8 Versuchsplan Fahrsimulator Phase 3

	Befahrene AID Nr.					
	1	2	3	4	5	6
<b>VP01</b>	AID 5r	AID 4r	AID 5r_V	AID 4r_V	AID 7l_V	AID 6l_V
<b>VP02</b>	AID 4r	AID 5r	AID 5r_V	AID 4r_V	AID 6l_V	AID 7l_V
<b>VP03</b>	AID 4r	AID 5r	AID 4r_V	AID 5r_V	AID 7l_V	AID 6l_V
<b>VP04</b>	AID 4r	AID 5r	AID 4r_V	AID 5r_V	AID 6l_V	AID 7l_V
<b>VP05</b>	AID 5r	AID 4r	AID 4r_V	AID 5r_V	AID 6l_V	AID 7l_V
<b>VP07</b>	AID 4r	AID 5r	AID 5r_V	AID 4r_V	AID 7l_V	AID 6l_V
<b>VP08</b>	AID 5r	AID 4r	AID 4r_V	AID 5r_V	AID 7l_V	AID 6l_V
<b>VP09</b>	AID 4r	AID 5r	AID 4r_V	AID 5r_V	AID 6l_V	AID 7l_V
<b>VP10</b>	AID 4r	AID 5r	AID 5r_V	AID 4r_V	AID 6l_V	AID 7l_V
<b>VP11</b>	AID 4r	AID 5r	AID 4r_V	AID 5r_V	AID 7l_V	AID 6l_V
<b>VP12</b>	AID 5r	AID 4r	AID 5r_V	AID 4r_V	AID 6l_V	AID 7l_V
<b>VP13</b>	AID 4r	AID 5r	AID 5r_V	AID 4r_V	AID 7l_V	AID 6l_V
<b>VP15</b>	AID 5r	AID 4r	AID 5r_V	AID 4r_V	AID 7l_V	AID 6l_V
<b>VP16</b>	AID 5r	AID 4r	AID 4r_V	AID 5r_V	AID 7l_V	AID 6l_V
<b>VP17</b>	AID 4r	AID 5r	AID 4r_V	AID 5r_V	AID 6l_V	AID 7l_V
<b>VP19</b>	AID 4r	AID 5r	AID 5r_V	AID 4r_V	AID 6l_V	AID 7l_V
<b>VP20</b>	AID 5r	AID 4r	AID 4r_V	AID 5r_V	AID 7l_V	AID 6l_V
<b>VP22</b>	AID 5r	AID 4r	AID 5r_V	AID 4r_V	AID 7l_V	AID 6l_V
<b>VP23</b>	AID 5r	AID 4r	AID 5r_V	AID 4r_V	AID 6l_V	AID 7l_V
<b>VP24</b>	AID 4r	AID 5r	AID 5r_V	AID 4r_V	AID 7l_V	AID 6l_V
<b>VP25</b>	AID 4r	AID 5r	AID 4r_V	AID 5r_V	AID 7l_V	AID 6l_V
<b>VP26</b>	AID 5r	AID 4r	AID 4r_V	AID 5r_V	AID 7l_V	AID 6l_V
<b>VP27</b>	AID 4r	AID 5r	AID 5r_V	AID 4r_V	AID 6l_V	AID 7l_V
<b>VP28</b>	AID 4r	AID 5r	AID 5r_V	AID 4r_V	AID 7l_V	AID 6l_V
<b>VP29</b>	AID 5r	AID 4r	AID 4r_V	AID 5r_V	AID 6l_V	AID 7l_V
<b>VP30</b>	AID 5r	AID 4r	AID 5r_V	AID 4r_V	AID 7l_V	AID 6l_V

	<b>Befahrene AID Nr.</b>					
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>VP31</b>	AID 4r	AID 5r	AID 4r_V	AID 5r_V	AID 6l_V	AID 7l_V
<b>VP32</b>	AID 5r	AID 4r	AID 5r_V	AID 4r_V	AID 6l_V	AID 7l_V
<b>VP33</b>	AID 4r	AID 5r	AID 4r_V	AID 5r_V	AID 7l_V	AID 6l_V
<b>VP34</b>	AID 5r	AID 4r	AID 4r_V	AID 5r_V	AID 6l_V	AID 7l_V
<b>VP35</b>	AID 5r	AID 4r	AID 5r_V	AID 4r_V	AID 6l_V	AID 7l_V
<b>VP36</b>	AID 5r	AID 4r	AID 5r_V	AID 4r_V	AID 7l_V	AID 6l_V
<b>VP37</b>	AID 5r	AID 4r	AID 4r_V	AID 5r_V	AID 6l_V	AID 7l_V
<b>VP38</b>	AID 5r	AID 4r	AID 5r_V	AID 4r_V	AID 6l_V	AID 7l_V
<b>VP39</b>	AID 5r	AID 4r	AID 5r_V	AID 4r_V	AID 7l_V	AID 6l_V
<b>VP40</b>	AID 5r	AID 4r	AID 5r_V	AID 4r_V	AID 7l_V	AID 6l_V

## 7.9 Detailwerte laterale Position Phase 3

Tabelle 7.3: Laterale Position Phase 3 (Teil 1)

AID	4r	5r	4r_V
			
<b>min</b>	-0,1046	-0,8113	0,1219
<b>q15</b>	0,0978	-0,0516	0,2391
<b>med_latP</b>	0,2713	0,1517	0,3424
<b>q85</b>	0,4407	0,3845	0,5140
<b>max</b>	0,7974	0,7785	0,7423
<b>q85 – q15</b>	0,3429	0,4361	0,2749
<b>mw_latP</b>	0,2689	0,1612	0,3694
<b>std_latP</b>	0,1772	0,2862	0,1453

Tabelle 7.4: Laterale Position Phase 3 (Teil 2)

AID	5r_V	6l_V	7l_V
			
<b>min</b>	0,0516	-0,4917	-0,2803
<b>q15</b>	0,1711	0,0710	0,0531
<b>med_latP</b>	0,3165	0,2053	0,2581
<b>q85</b>	0,4910	0,4152	0,5302
<b>max</b>	0,7228	0,7053	1,1071
<b>q85 – q15</b>	0,3199	0,3442	0,4772
<b>mw_latP</b>	0,3272	0,2221	0,2798
<b>std_latP</b>	0,1550	0,2196	0,2824

## 7.10 Übersicht der lateralen Position in Abhängigkeit der Lageplanelemente

### Weißer Markierung in der linken Fahrstreifenhälfte

AID	Laterale Position [m]		
	Rechtskurve	Linkskurve	Gerade
AID 2r	0,2096	0,3016	0,2306
AID 3r	0,1834	0,2148	0,1311
AID 4r	0,1617	0,3823	0,1468
AID 4r_V	0,3721	0,3847	0,2985
AID 3l	0,3101	0,3657	0,2788
AID_7l_V	0,2011	0,2883	0,2196

### Weißer Markierung in der rechten Fahrstreifenhälfte

AID	Laterale Position [m]		
	Rechtskurve	Linkskurve	Gerade
AID 5r	0,1573	0,2682	0,0464
AID 5r_V	0,3067	0,3660	0,2959

### Ohne weiße Markierung im eigenen befahrenen Fahrstreifen

AID	Laterale Position [m]		
	Rechtskurve	Linkskurve	Gerade
AID 1r	0,2471	0,2587	0,1844
AID 2l	0,4719	0,4588	0,3950
AID 6l_V	0,2091	0,2060	0,2468

## 7.11 Querschnitte QE-Untersuchung

qe11



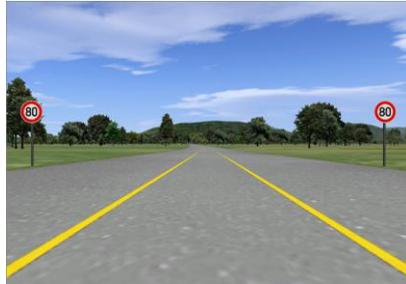
qe12



qe21



qe22



qe23



qe25



qe26



qe32



qe33



qe52



qe62



qe66

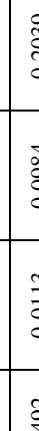


## 7.12 Versuchsplan QE-Untersuchung

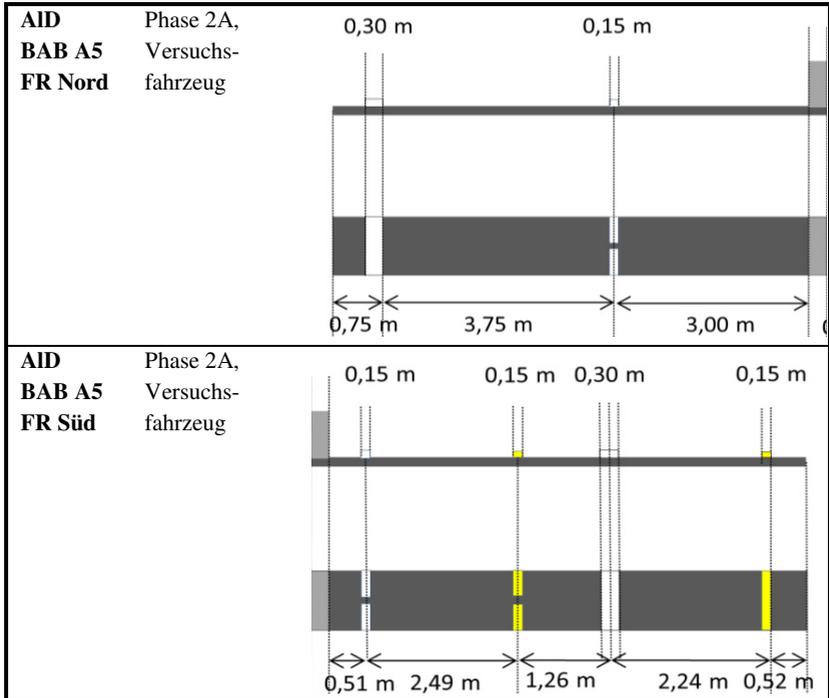
Versuchs- person	Quer- schnitt 1	Quer- schnitt 2	Quer- schnitt 3	Quer- schnitt 4	Quer- schnitt 5	Quer- schnitt 6
VP01	qe12	qe25	qe23	qe33	qe32	qe51
VP05	qe26	qe62	qe21	qe66	qe22	qe11
VP07	qe62	qe32	qe22	qe21	qe26	qe11
VP11	qe22	qe21	qe66	qe32	qe33	qe11
VP17	qe26	qe52	qe25	qe12	qe23	qe62
VP18	qe23	qe52	qe22	qe26	qe11	qe25
VP21	qe33	qe32	qe62	qe12	qe66	qe21
VP24	qe52	qe62	qe23	qe11	qe32	qe25
VP28	qe22	qe33	qe21	qe12	qe66	qe26
VP29	qe23	qe32	qe12	qe52	qe62	qe26
VP30	qe66	qe22	qe25	qe21	qe33	qe11
VP37	qe33	qe52	qe66	qe12	qe25	qe23
VP41	qe66	qe33	qe22	qe21	qe25	qe23
VP44	qe66	qe33	qe22	qe21	qe25	qe23
VP45	qe52	qe62	qe26	qe21	qe12	qe22

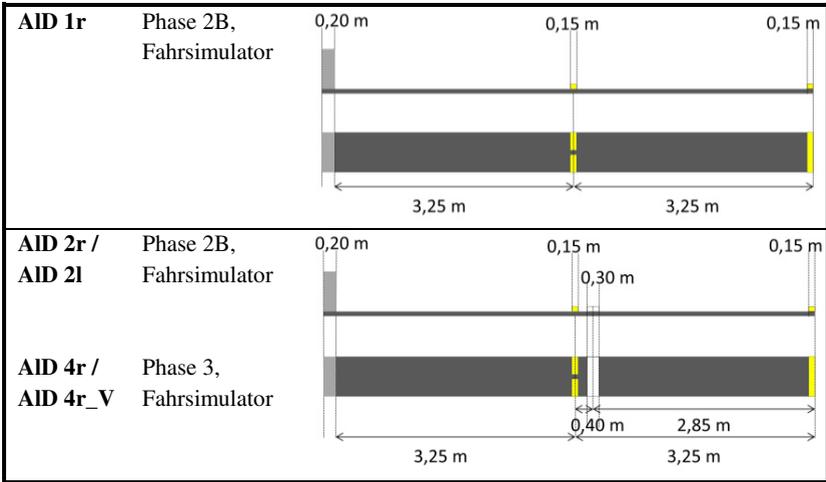
## 7.13 Ergebnisse der QE-Untersuchung

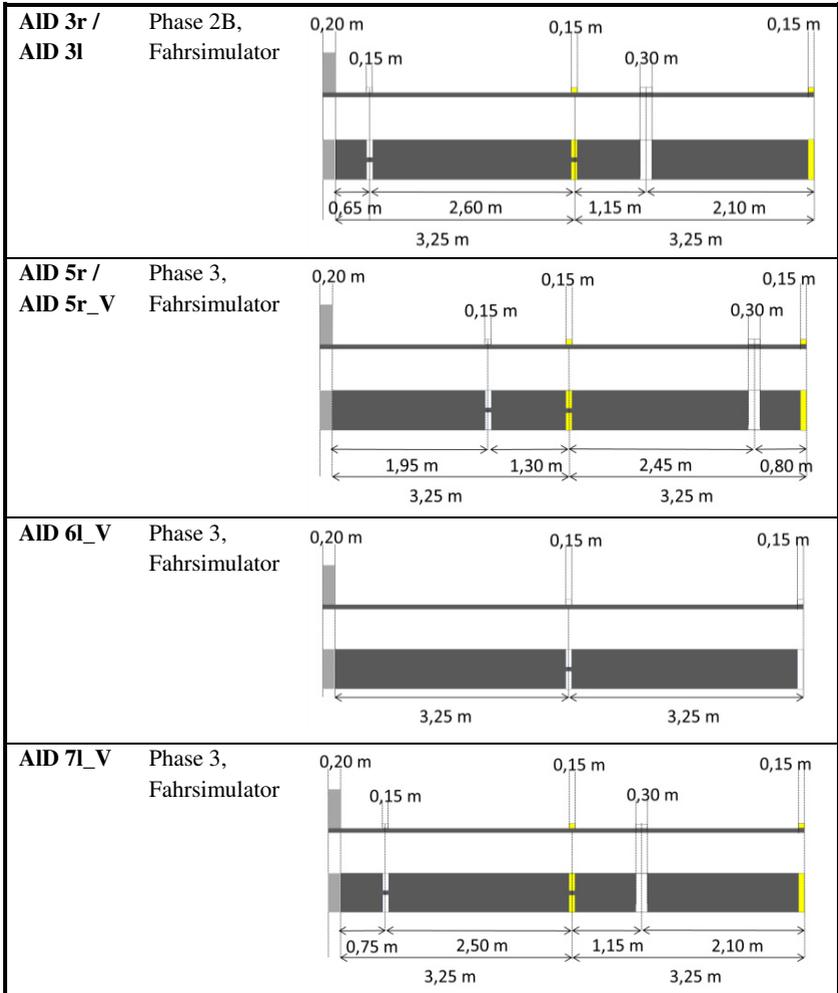
Kombination der QE		Kenn- Werte [Einheit]							
		min [m]	q15 [m]	median [m]	q85 [m]	max [m]	q85-q15 [m]	mw_latP [m]	std_abw [m]
qe66		-0,0409	0,0328	0,1920	0,4130	0,4556	0,3803	0,2117	0,1378
qe62		0,0407	0,0553	0,3377	0,4351	0,8343	0,3799	0,3303	0,1607
qe52		0,1046	0,1938	0,3180	0,4997	0,7225	0,3059	0,3527	0,1742
qe33		0,0885	0,1766	0,2860	0,3758	0,7494	0,1992	0,3075	0,1374
qe32		0,0970	0,1063	0,2323	0,4605	0,8042	0,3542	0,3097	0,1381
qe26		-0,0703	-0,0581	0,1467	0,2626	0,5641	0,3207	0,1506	0,1523

Kombination der QE	qe11	qe12	qe21	qe22	qe23	qe25	
min [m]	0,2190	0,0715	-0,0492	0,0113	0,0984	0,2039	
q15 [m]	0,2331	0,1324	0,0540	0,0384	0,1141	0,2503	
median [m]	0,2868	0,2276	0,2323	0,2250	0,3869	0,5973	
q85 [m]	0,3876	0,3558	0,3373	0,4057	0,5562	0,7536	
max [m]	0,7900	0,6471	0,4228	0,4155	0,7130	1,3570	
q85-q15 [m]	0,1545	0,2234	0,2833	0,3673	0,4420	0,5033	
mw_latP [m]	0,3484	0,2617	0,1970	0,2148	0,3614	0,5992	
std_abw [m]	0,1508	0,1338	0,1370	0,1405	0,1258	0,3405	

## 7.14 Übersichtsblatt über alle AID









## Veröffentlichungen des Institutes für Straßen- und Eisenbahnwesen

---

Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Ralf Roos

- \* Band 1 Rüdiger Lamm  
**Die Gefährdungswahrscheinlichkeit – Ein Beitrag zur  
Untersuchung von Straßenknoten ohne  
Lichtsignalregelung.** 1968
  
- \* Band 2 Hans Günter Krebs, Rüdiger Lamm, Rolf Heinemann  
**Verschleiß und temperaturabhängige Verformungen  
von Tragschichten mit Oberflächenschutz unter der  
Straßenprüfanlage.** 1969
  
- Band 3 Wolfgang Arand  
**Dichte im Asphaltstraßenbau.** 1969
  
- Band 4 Manfred Pilger  
**Untersuchungen über die Leistungsfähigkeit zweigleisiger  
Eisenbahnstrecken mit Mischbetrieb zwischen S-Bahnen  
und Fernbahnen.** 1970
  
- \* Band 5 Klaus Kraß  
**Kriechuntersuchungen an  
zylindrischen Asphaltprobekörpern.** 1971
  
- \* Band 6 Rolf Heinemann, Heinrich E. Herring, Jürgen H. Klöckner,  
Rüdiger Lamm, Rolf Leutner, Hans Gg. Schlichter  
**Geschwindigkeit, Fahrdynamik, Sicherheit.** 1971
  
- Band 7 Wolfgang Arand  
**Der bituminöse Mörtel.** 1971
  
- Band 8 Ernst Joachim Vater  
**Viskoelastisches Verhalten von Destillationsbitumen.** 1972
  
- Band 9 Rolf Heinemann  
**Schleppkurven – Funktionale Erfassung und An-  
wendung auf die Fahrbahngeometrie.** 1972

\* vergriffen

- Band 10 Hans Günter Krebs, Wolfgang Arand  
**Forschung zwischen Fahrdynamik und  
Asphaltstraßenbau.** 1973
- Band 11 Rüdiger Lamm  
**Fahrdynamik und Streckencharakteristik  
Ein Beitrag zum Entwurf von Straßen unter besonderer  
Berücksichtigung der Geschwindigkeit.** 1973
- Band 12 Rolf Leutner  
**Fahrraum und Fahrverhalten.** 1974
- Band 13 Hanns Cronen  
**Nutzen aus der Steigerung der Reisegeschwindigkeit  
im Personenfernverkehr auf der Schiene.** 1975
- Band 14 Institut für Straßenbau und Eisenbahnwesen  
**1965 – 1975  
Wissenschaftliche Beiträge und Tätigkeitsbericht.** 1975
- Band 15 Jürgen Heinz Klöckner  
**Sachschäden von Straßenverkehrsunfällen  
als Bewertungsgröße in der Unfallstatistik.** 1976
- Band 16 Peter Kupke  
**Simulatorexperimente zum trassenabhängigen Fahrverhalten  
und Überprüfen der Linienführung.** 1977
- Band 17 Helmut Naumann  
**Entwicklung eines Programmsystems zur Herstellung von  
computererzeugten Perspektivfilmen.** 1977
- Band 18 Seminar für Verkehrswegebau, Sommersemester 1978  
**Gemeinsame Nutzung des Wolfacher Eisenbahntunnels  
für Schienen- und Straßenverkehr.** 1979
- Band 19 Alpay Dengiz  
**Relaxationsverhalten von Asphaltprobekörpern im  
einaxialen Zugversuch.** 1980
- Band 20 Wolfgang Jäger  
**Mechanisches Verhalten von Asphaltprobekörpern.** 1980

\* vergriffen

- Band 21 Ulrich Weißleder  
**Simulation eines neuartigen Betriebssystems für hochbelastete Eisenbahnstrecken.** 1980
- Band 22 Institut für Straßenbau und Eisenbahnwesen  
**1965 – 1980**  
**Wissenschaftliche Beiträge und Tätigkeitsberichte.** 1980
- Band 23 Ulrich Oser  
**Stochastisches Modell zur Analyse und Simulation des rechnergesteuerten Ablaufbetriebes in Rangierbahnhöfen.** 1981
- Band 24 Hans Günter Krebs, Gerhard Bernstein, Harald Timm  
**Der Bau neuer Eisenbahnstrecken aus der Sicht der Bevölkerung.** 1981
- Band 25 Nicola Damianoff  
**Beeinflussung und Schätzung von Fahrgeschwindigkeiten in Kurven.** 1981
- \* Band 26 Klaus Dieterle  
**Fahrzeugverhalten auf nasser Fahrbahn.** 1982
- \* Band 27 Jürgen Schneider  
**Unfallanalytische und fahrdynamische Beurteilung der negativen Querneigung.** 1982
- Band 28 Ernst-Ulrich Hiersche  
**Straße und Denkmal.** 1983
- Band 29 Willy Pastorini  
**Nachfrageorientierte Produktionskonzepte für den kombinierten Ladungsverkehr.** 1985
- Band 30 Hans Gg. Schlichter  
**Räumliche Linienführung von Verkehrswegen.** 1985
- Band 31 Alex Stefan Schilcher  
**Laufverhalten von Abläufen bei der Laufzielbremsung.** 1985

\* vergriffen

- Band 32 Norbert Weiland  
**Verformungsverhalten von Asphaltprobekörpern unter dynamischer Belastung.** 1986
- Band 33 Festschrift Krebs  
**Beiträge zum Umweltschutz und zur Verkehrssicherheit.** 1986
- Band 34 Achim Taubmann  
**Unfallgeschehen innerhalb bebauter Gebiete in Abhängigkeit von Straßen- und Verkehrsbedingungen.** 1987
- \* Band 35 Thomas Wörner  
**Umweltverträglichkeit alternativer Baustoffe für den Straßenbau.** 1988
- Band 36 Bernhard Tenzinger  
**Einflußfaktoren auf das Unfallgeschehen unter besonderer Berücksichtigung der Fahrbahn.** 1989
- \* Band 37 Kyriakos Vassiliou  
**Bautechnische Eigenschaften von ungebundenen Tragschichten aus wiederverwendbaren Baustoffen.** 1989
- Band 38 Reinhard Bickelhaupt  
**Beurteilung des dreistreifigen Querschnittstyps b2+1 unter besonderer Berücksichtigung des Schwerverkehrs.** 1991
- Band 39 Walter Gerstner  
**Einsatzstrategien für Beidrücklokomotiven.** 1991
- \* Band 40 ISE-Festschrift (1981 – 1991). 1992
- Band 41 Schi-Juehn Lin  
**Steuerung des Hohlraumgehaltes von Dränasphalt im Hinblick auf die Optimierung seiner bautechnischen Eigenschaften.** 1993
- Band 42 Markus Stöckner  
**Möglichkeiten der Errichtung eines integrierten und zertifizierbaren Qualitätsmanagementsystems für Asphaltmischanlagen.** 1994

\* vergriffen

- Band 43 Honoré Codjia  
**Erarbeitung eines Bewertungshintergrundes für das Prüfverfahren „Schichtenverbund nach LEUTNER“ und Bestimmung der Präzision.** 1994
- Band 44 Delia Brocke  
**Eisenbahnbedingter Straßenpersonenverkehr in Einzugsbereichen von Bahnhöfen.** 1995
- Band 45 Shafik Jendia  
**Bewertung der Tragfähigkeit von bituminösen Straßenbefestigungen.** 1995
- Band 46 Martin Kiuntke  
**Bewährung von Asphaltbefestigungen mit hohen Anteilen von Ausbauasphalt.** 1996
- Band 47 Jürgen Reichelt  
**Mineralogische Aspekte bautechnischer und umweltrelevanter Eigenschaften von Müllverbrennungsschlacken.** 1996
- Band 48 Bernd Bühler  
**Realisierung eines geräuschabsorbierenden Asphaltoberbaus unter Einführung der Kennwertsynthese als multikriteriale Entscheidungshilfe.** 1996
- Band 49 ISE-Festschrift (1992 – 1996). 1996
- Band 50 Wolfgang Lackner  
**Untersuchung von Zusammenhängen zwischen Ebenheitsmerkmalen und Tragfähigkeitseigenschaften von Straßen im Hinblick auf die Minimierung des Aufwandes bei der Zustandserfassung.** 1999
- Band 51 Matthias Zimmermann  
**Quantitative Methoden zur Beurteilung räumlicher Linienführung von Straßen.** 2001
- Band 52 Andreas Großmann  
**Bewertung des Tragverhaltens von Betonfahrbahnen basierend auf Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer.** 2003

\* vergriffen

- Band 53 Axel Norkauer  
**Beurteilung von Maßnahmen zur Staureduktion bei  
Arbeitsstellen Kürzerer Dauer auf Bundesautobahnen.** 2004
- Band 54 Carsten Karcher  
**Prognose und Bewertung des Verformungsverhaltens von  
Asphalten mit dem Druckschwellversuch am Beispiel des  
Splittmastixasphalt.** 2005
- Band 55 Rainer Hess  
**Optimierte Planung von Arbeitsstellen an  
Autobahnen auf der Grundlage verkehrlicher  
Überlastungswahrscheinlichkeiten.** 2006
- Band 56 Thorsten Cypra  
**Entwicklung einer Entscheidungsmethode  
für Maßnahmen im Winterdienst auf  
hochbelasteten Bundesautobahnen.** 2007
- Band 57 v. Loeben Wolf-Henrik  
**Überprüfung eines funktionalen Zusammenhanges zwischen  
der Fahrbahntextur und dem erzielbaren Bremsweg.** 2007

**Ab Band 58 erscheint die Reihe bei KIT Scientific Publishing,  
ISSN 0344-970X.**

Die Bände sind unter [www.ksp.kit.edu](http://www.ksp.kit.edu) als PDF frei verfügbar  
oder als Druckausgabe bestellbar.

- Band 58 Leyla Chakar  
**Optimierung des Verformungswiderstandes  
von Splittmastixasphalt durch Modifikation  
mit Elektroofenschlacke.** 2009
- Band 59 Thomas Chakar  
**Methode zur Klassifizierung von  
Tragfähigkeitsmessergebnissen des Falling Weight  
Deflectometers bei Asphaltbefestigungen.** 2010
- Band 60 Plachkova-Dzhurova, Plamena Nedeva  
**Über den Zusammenhang von  
Tragfähigkeitsmessergebnissen mit mechanischen  
Modellgrößen bei Asphaltstraßen.** 2016

\* vergriffen

Band 61 Barbara Köhler  
**Auswirkungen der Wahrnehmung von  
Markierungskonstellationen auf das Fahrverhalten  
in Arbeitsstellen auf Bundesautobahnen. 2019**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen  
Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Ralf Roos

ISSN 0344-970X  
ISBN 978-3-7315-0703-1

