

# Potenziale einer Lenkmomentenempfehlung unter fahrdynamischen Gesichtspunkten

von

Dipl.-Ing. Eman Mehrjerdian

Dortmund 2015

# Potenziale einer Lenkmomentenempfehlung unter fahrdynamischen Gesichtspunkten

Der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Technischen Universität Dortmund  
vorgelegte

## Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

von

Dipl.-Ing. Eman Mehrjerdian

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. h. c. Dr. h. c. Torsten Bertram

Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss

Tag der mündlichen Prüfung: 16.04.2015  
Dortmund

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Vorentwicklung bei der Firma ZF Lenksysteme GmbH in Schwäbisch Gmünd in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik der Technischen Universität Dortmund.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr. h.c. Torsten Bertram, Inhaber des Lehrstuhls für Regelungssystemtechnik und wissenschaftlicher Betreuer dieser Arbeit, gilt an dieser Stelle mein verbindlichster Dank. Sein mir entgegengebrachtes Vertrauen, aber auch seine Anregung und Kritik ermöglichten mir eine gewinnbringende und eigenständige Bearbeitung des Forschungsthemas sowie eine damit verbundene fachliche und persönliche Weiterentwicklung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss danke ich für die Übernahme des Koreferats und Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Bei der Firma ZF Lenksysteme GmbH in Person Herrn Dipl.-Ing. Alexander Gaedke, Leiter der zentralen Forschung und Entwicklung, bedanke ich mich für die Schaffung der guten Rahmenbedingungen, insbesondere für die Finanzierung der vielen Probandenstudien und Erprobungen. Herrn Dipl.-Ing. Roland Greul, Leiter der Abteilung Fahrdynamik und Fahrerassistenz, danke ich für die fachliche Leitung und die wertvollen Diskussionen.

Herrn Dr.-Ing. Payam Dehdari und Herrn Dr.-Ing. Rick Hilchner danke ich für die wertvollen Hinweise und Anregungen sowie die gegenseitige Motivation zur Realisierung der Dissertation. Ebenso möchte ich meinen Kollegen Herrn Dipl.-Ing. Michael Sprinzl und Herrn Dipl.-Ing. Hendrik Büring für die zahlreichen Stunden danken, die sie in das Lesen dieser Arbeit investiert haben. Für das Lektorat bedanke ich mich bei Herrn Dr. phil. Peter Kruck sowie bei meinem Vater Dr. rer. nat. Hooshang Mehrjerdian.

Danken möchte ich auch den zahlreichen Probandinnen und Probanden für den engagierten Einsatz sowie den Studenten, die durch ihre Abschlussarbeiten hilfreiche Akzente gesetzt haben.

Besonders danken möchte ich meiner lieben Frau Daniela für dein ehrliches Interesse an dieser Arbeit, die wertvollen Gespräche und deine unvoreingenommene Außenperspektive, die mich oft aus festgefahrenen Gedanken geholt hat.

Schwäbisch Gmünd, Juni 2014

Eman Mehrjerdian

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der ZF Lenksysteme GmbH.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>III</b>
<b>Abkürzungen und Formelzeichen</b>	<b>VII</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	2
1.2 Stand der Technik . . . . .	5
1.2.1 Funktionale Zusammenhänge elektrischer Lenksysteme . . . . .	6
1.2.2 Lenkassistentenfunktionen . . . . .	9
1.3 Zielsetzung . . . . .	15
1.4 Struktur der Arbeit . . . . .	16
<b>2 Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei Überlagerung von Lenkmomenten</b>	<b>18</b>
2.1 Vorgehensweise und Randbedingungen . . . . .	21
2.1.1 Versuchsgestaltung . . . . .	22
2.1.2 Bewertungskriterien . . . . .	26
2.1.3 Diskussion . . . . .	26
2.2 Auswirkung von Zusatzlenkmomenten . . . . .	27
<b>3 Gestaltungsbereich von Zusatzlenkmomenten</b>	<b>33</b>
3.1 Beurteilung hinsichtlich Beherrschbarkeit . . . . .	33
3.2 Streuungen im Reaktionsverhalten verschiedener Fahrer . . . . .	36
3.3 Fazit . . . . .	39
<b>4 Fahrdynamische Lenkmomentenempfehlung aus funktionaler Sicht</b>	<b>41</b>
4.1 Klassifikation der Systemfunktionalität . . . . .	42
4.2 Gestaltung des Zusatzlenkmoments . . . . .	46

<b>5</b>	<b>Wirksamkeit einer Lenkmomentenempfehlung in Übersteuersituationen</b>	<b>51</b>
5.1	Versuchsdesign . . . . .	52
5.1.1	Wahl eines geeigneten Fahrmanövers . . . . .	53
5.1.2	Probandenauswahl . . . . .	56
5.1.3	Versuchsfahrzeug und Messgrößen . . . . .	56
5.1.4	Versuchsplan . . . . .	57
5.1.5	Subjektive Bewertung . . . . .	58
5.2	Versuchsauswertung . . . . .	59
5.2.1	Aufbereitung von Messdaten . . . . .	61
5.2.2	Spezifikation geeigneter Kenngrößen . . . . .	62
5.2.3	Definition eines Gütekriteriums . . . . .	62
5.3	Ergebnisse . . . . .	64
5.3.1	Gesamtheitliche Analyse . . . . .	67
5.3.2	Fahrerindividuelle Analyse . . . . .	69
5.4	Fazit . . . . .	71
<b>6</b>	<b>Klassifikation verschiedener Fahrer mittels fahrdynamischer Zu-</b>	
	<b>standsgrößen</b>	<b>72</b>
6.1	Kenngrößen und Abhängigkeiten . . . . .	74
6.1.1	Beurteilung während der Normalfahrt . . . . .	74
6.1.2	Fahrerverhalten in speziellen Fahrereignissen . . . . .	78
6.2	Algorithmus zur Ermittlung individueller Fahrereigenschaften . . . . .	79
6.2.1	Ermittlung der Fahrsituation . . . . .	80
6.2.2	Klassifikation des Fahrstils . . . . .	82
6.2.3	Simulierte Fahrereignisse . . . . .	84
6.3	Ergebnisse aus dem Fahrversuch . . . . .	86
6.4	Fazit . . . . .	91
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>93</b>
	<b>Anhang</b>	<b>98</b>
<b>A</b>	<b>Fragebogen zur Probandenauswahl</b>	<b>98</b>
<b>B</b>	<b>Versuchsplan</b>	<b>101</b>
<b>C</b>	<b>Subjektivurteile der Probanden</b>	<b>102</b>
<b>D</b>	<b>Fragebogen des Beobachters</b>	<b>104</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>105</b>

# Abkürzungen und Formelzeichen

## Abkürzungen

ABS	Antiblockiersystem
ACC	Abstandsregelung (Adaptive Cruise Control)
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobilclub
AFS	Aktivlenkung (Active Front Steering)
AP	Applikationsparameter
ASR	Antriebsschlupfregelung
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
CAN	Controller Area Network
EPA	Einparkassistent
EPS	Elektrolenkung (Electric Power Steering)
ESP	Elektronische Stabilitätsprogramm
ESS	Ausweichassistent (Evasive Steering Support)
EU	Europäische Union
FAS	Fahrerassistenzsysteme
FDL	Fahrdynamische Lenkmomentenempfehlung
FDR	Fahrdynamik-Regelungssysteme
FDW	Fahrdynamische Winkelregelung
HMI	Mensch-Maschine-Schnittstelle (Human Machine Interface)
IEC	International Electrotechnical Commission
ISM	Intelligent Steering Management
ISO	International Organization for Standardization
LCA	Spurwechselassistent (Lane Change Assistance)
LDW	Spurverlassenswarnung (Lane Departure Warning)
LKA	Spurführungsassistent (Lane Keeping Assistance)
Lkw	Lastkraftwagen
MSA	$\mu$ -Split-Assistent
OS	Übersteuern (Oversteering)
Pkw	Personenkraftwagen
SbW	Steer-by-Wire

SWA	Seitenwindassistent
TLC	Time to Lane Crossing
US	Untersteuern (Understeering)
VZW	Vorzeichenwechsel

## Formelzeichen

$\beta$	Schwimmwinkel
$\delta_{\text{AFS}}$	Zusatzwinkel der Aktivlenkung
$\delta_{\text{LW}}$	Lenkwinkel am Lenkrad
$\delta_{\text{res}}$	resultierender Lenkwinkel
$\delta_{\text{RI}}$	Ritzelwinkel
$\delta_{\text{RW}}$	Radwinkel am Vorderrad
$\Delta y$	laterale Spurbabweichung zur Fahrbahnmitte
$\theta$	Trägheit
$\mu$	Reibwert
$\mu_j^{(i)}$	i-te Zugehörigkeitsfunktion von $u_j$
$\psi$	Gierwinkel
$\psi_{\text{rel}}$	Relativer Gierwinkel Fahrzeug–Fahrbahntangente
$\dot{\psi}_{\text{ref}}$	Referenzgierrate
$\#$	Anzahl
$a_x$	Längsbeschleunigung
$a_y$	Querbeschleunigung
$a_{y\text{ S}}$	Sicherheitsgrenze der Querbeschleunigung
$A$	Fläche
$c_h$	Radsteifigkeiten hinten
$c_v$	Radsteifigkeiten vorne
$C$	Schwellenwert
$D$	Durchgang
$E$	Extremum
$f$	analytische Funktion
$f_{\text{stabil}}$	Stabilisierungshäufigkeit

$F$	Fahrer
$F_Z$	Zahnstangenkraft
$g_R$	Grenzwert ruhig
$g_S$	Grenzwert sport
$G$	Gütekriterium
$G_{Z \max}$	maximaler Gradient des Zusatzlenkmoments
$i_{AFS}$	Übersetzung Überlagerungsgetriebe
$i_{FS}$	langfristiger Wert des Fahrstils
$i_{FS}^*$	kurzfristiger Wert des Fahrstils
$\hat{i}_{FS}$	subjektive Beurteilung des Fahrstils
$i_G$	Lenkübersetzung
$i_{LG}$	Übersetzung Lenkgetriebe
$i_{RB}$	Wert der Reaktionsbereitschaft
$i_{SI}$	langfristiger Wert der Fahrsituation
$i_{SI}^*$	kurzfristiger Wert der Fahrsituation
$\hat{i}_{SI}$	subjektive Beurteilung der Fahrsituation
$K$	Kenngröße
$l_h$	Abstand Schwerpunkt–Hinterachse
$l_v$	Abstand Schwerpunkt–Vorderachse
$m$	Masse
$M$	Moment
$M_D$	Drehstabmoment
$M_{FDL}$	Lenkmomentenempfehlung der FDL
$M_I$	ISM Soll-Moment
$M_M$	EPS-Motormoment
$M_W$	Giermoment durch Seitenwind
$M_Z$	Zusatzlenkmoment
$M_{Z \max}$	maximale Amplitude des Zusatzlenkmoments
$N$	Probandenanzahl
$p_{SI}$	Zuverlässigkeit der Fahrsituations-Erkennung
$p_{SI}$	Zuverlässigkeit der Fahrstil-Klassifikation
$p_B$	Bremsdruck
$Q_A(x)$	Quartilsabstand der geordneten Stichprobe $x$
$r$	Radius

$s$	Frequenzargument
$S$	subjektive Störungsbewertung
$t$	Zeitargument
$T$	Dauer bis Extremum
$u_j$	j-te Eingangsgröße des Fuzzy-Systems
$v$	Geschwindigkeit
$v_x$	Längsgeschwindigkeit
$v_y$	Quergeschwindigkeit
$\tilde{x}$	Median der geordneten Stichprobe $x$
$\mathbf{x}_F$	Fahrzustände
$\mathbf{x}_U$	Umgebungszustände
$z^{-1}$	Verschiebeoperator
$z_R$	Zählerwert ruhig
$z_S$	Zählerwert sport

# Kurzfassung

Die Arbeit thematisiert die Potenziale einer Lenkmomentenempfehlung in sicherheitsrelevanten Fahrsituationen. Vorbereitend wird mithilfe einer Probandenstudie der Einfluss des Zusatzlenkmoments auf das Fahrer- und Fahrzeugverhalten untersucht und die unterschiedliche Auswirkung der beiden Freiheitsgrade Gradient und maximale Amplitude des Lenkmoments analysiert. Hinsichtlich der Beherrschbarkeit von Zusatzlenkmomenten kann die resultierende Fahrzeugreaktion als die wesentliche Einflussgröße der subjektiven Beurteilung des Fahrers ermittelt werden. Ein identifizierter mathematischer Zusammenhang zwischen der Gierrate des Fahrzeugs und der Beurteilung des Fahrers ermöglicht es, bei der Auslegung von Lenkassistenten das maximal zumutbare Moment in Abhängigkeit der fahrdynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs festzulegen.

Zum Nachweis der Wirksamkeit einer Lenkmomentenempfehlung im fahrdynamischen Grenzbereich wird eine gesonderte Probandenstudie durchgeführt, bei der das Fahrzeug durch Anregung einer Schleuderplatte reproduzierbar in einen übersteuernden Fahrzustand versetzt wird. Fahrerwahrnehmung, Fahrerreaktion und Fahrzeugreaktion als Ergebnis auf die Anregung werden in verschiedenen Versuchsvarianten jeweils mit passiver und aktiver Assistenzfunktion ausgewertet. Die Bewertung der Fahrerwahrnehmung erfolgt auf Basis von subjektiven Einschätzungen des Probanden. Fahrer- und Fahrzeugreaktion hingegen werden durch die objektive Analyse von definierten Kenngrößen bewertet. Als Ergebnis werden Gütekriterien abgeleitet, die in Relation zum maximalen Moment der Empfehlung eine quantitative Bewertung der Funktionalität ermöglichen. Neben der gesamtheitlichen Betrachtung aller Fahrerreaktionen ergibt sich aus der fahrerindividuellen Analyse, dass unterschiedliche Fahrertypen auch verschieden von einer Lenkmomentenempfehlung profitieren. Eine adaptive Auslegung der Funktionsparameter an den Fahrertyp kann somit den Mehrwert der Funktion für viele Fahrer deutlich steigern.

Für die Realisierung eines automatisierten Verfahrens zur Adaption der Funktion wird ein Ansatz zur Ermittlung des Fahrstils vorgestellt, der unter Verwendung serienmäßig vorhandener fahrdynamischer Zustandsgrößen während der Normalfahrt eine Klassifikation des Fahrers anhand seines Fahrverhaltens vornimmt. Diese erfolgt stets relativ zur aktuellen Fahrsituation, das heißt unter Berücksichtigung der Kurvigkeit der Strecke und der Fahrzeuggeschwindigkeit. Zusätzlich zum Fahrstil werden mithilfe simulierter Fahrerereignisse Informationen zur Reaktionsbereitschaft der Fahrer bei unerwarteten Ereignissen gewonnen. Hierzu werden charakteristische Fahrerereignisse, wie beispielsweise eine Bodenwelle, mittels überlagerter Lenkmomente künstlich erzeugt, und das Reaktions- und Regelverhalten des Fahrers wird infolge der Störanregung bewertet. Mithilfe der Informationen zum Fahrstil und zur Reaktionsbereitschaft kann dann eine automatische Adaption der maximalen Lenkmomentenempfehlung vorgenommen werden.



# 1. Einleitung

Führende Automobilhersteller und deren Zulieferer investieren immer stärker in die Entwicklung von Fahrdynamik- und Fahrerassistenzsystemen, die überwiegend durch den technologischen Fortschritt im Bereich der Fahrzeugsensorik und -aktorik ermöglicht werden. Konventionelle Komponenten, wie beispielsweise die Lenkung oder die Bremsen, werden durch die zunehmende Elektronik zu mechatronischen Systemen und bieten zahlreiche Möglichkeiten für neue Assistenzfunktionen. Dabei stehen diese dem Fahrer gegenwärtig nur unterstützend zur Verfügung, können jedoch in Zukunft – wenn gewünscht und die rechtlichen Grauzonen definiert sind – auch autonom das Fahrzeug führen. Somit ist die Entwicklung von Fahrdynamik- und Fahrerassistenzsystemen erst an ihrem Anfang.

Die Unterstützung des Fahrers zur Steigerung von Fahrsicherheit und -komfort ist zum festen Bestandteil bei der Entwicklung und Optimierung vorhandener Fahrzeugkomponenten aller Fahrzeugklassen geworden. Das Lenkrad, bisher maßgeblich als zentrales Bedienelement des Fahrers genutzt, gewinnt in heutigen Fahrzeugen als wichtiges Informationselement zunehmend an Bedeutung. Mit der Einführung der elektrischen Servolenkung (Electric Power Steering, EPS) bietet sich neben ökonomischen Vorteilen, wie einem geringeren Energie- und Platzbedarf [121], auch funktional ein deutlicher Mehrwert im Vergleich zu hydraulischen Systemen [57]. Durch die Variation der Lenkunterstützung kann die haptische Rückmeldung am Lenkrad – das Lenkmoment – frei gestaltet werden, sodass die vom Fahrer aufzubringende Kraft und die Intention zur Ausführung einer Lenkbewegung gezielt beeinflusst werden können. Das bisher passive Stellglied Lenkrad wird somit zu einem aktiven Bedienelement, mit dessen Hilfe Informationen aufbereitet und Empfehlungen gezielt für den Fahrer zurechtgeschnitten werden können [96].

Diese Möglichkeit legt die Basis für zahlreiche neue Lenkfunktionen. Insbesondere im linearen Bereich der Fahrdynamik, im Folgenden als normaler Fahrbereich bezeichnet, finden sich in heutigen Serienfahrzeugen Spurführungssysteme, die den Fahrer auf Autobahnen und gut ausgebauten Landstraßen über einen längeren Zeitraum kontinuierlich mit Lenkmomentenempfehlungen unterstützen. Sie verfolgen das Ziel, das Fahrzeug nahe der idealen Fahrspurmitte zu führen, und leisten nachweislich einen hohen Beitrag zur Steigerung der Fahrsicherheit und des Fahrkomforts [38, 75, 126].

Ein großes Potenzial zur Unterstützung des Fahrers besteht auch in fahrdynamisch kritischen Situationen. Fahrzustände wie Über- oder Untersteuern gehören nicht zu den Alltagssituationen von Normalfahrern. Mangelnde Erfahrung kann dazu führen, dass der Fahrer aufgrund der hohen Anspannung unangemessene, teilweise überzogene Lenkreaktionen ausführt und somit keinen fördernden Beitrag zur Stabilisierung des Fahrzeugs leistet. In der Literatur [47] werden Anwendungen vorgestellt, um in einer solchen Fahrsituation durch eine gezielte Lenkmomentenempfehlung zu einem verbesserten Lenkverhalten zu motivieren – beispielsweise zu einer Gegenlenkbewegung in einer Übersteuersituation. Dabei wird häufig das zugrunde liegende System beziehungsweise das technische Konzept zur Bestimmung eines stabilisierenden Lenkwinkels in den Vordergrund gestellt. In Abhän-

gigkeit der Differenz zum aktuellen Lenkwinkel des Fahrers wird ein Zusatzlenkmoment ermittelt, das dem Fahrer als Empfehlung zur Lenkkorrektur dienen soll. Systematische Untersuchungen hinsichtlich der Gestaltung dieses Moments oder der Wirksamkeit für den Normalfahrer liegen bislang nur vereinzelt vor [93].

Die vorliegende Arbeit greift diese Thematik zur Abschätzung der Wirksamkeit und Akzeptanz von Lenkmomentenempfehlungen im fahrdynamischen Grenzbereich auf. Mit der Hilfe von Probandenstudien unter realen Versuchsbedingungen erfolgen grundlegende Untersuchungen, und zwar mit dem Ziel, Verfahren und Kriterien zur Gestaltung und Bewertung einer Lenkmomentenempfehlung abzuleiten. Die Wirksamkeit beinhaltet dabei Untersuchungen zur Darstellung des tatsächlichen Mehrwerts einer solchen Funktionalität. Beispielsweise beschäftigt sie sich mit der Fragestellung, inwieweit die Lenkmomentenempfehlung den Fahrer tatsächlich zu einem verbesserten Lenkverhalten motivieren kann oder ob der in der ungewohnten Fahrsituation ohnehin stark angespannte Fahrer diese einfach überstimmt. Die Akzeptanz hingegen definiert auf Basis subjektiver und objektiver Messgrößen Grenzwerte hinsichtlich des maximal zumutbaren Lenkmoments. Grundlegende Anforderung an Assistenzfunktionen ist nämlich auch der Nachweis, dass sie unter keinen Umständen den Fahrer in seinem Handlungsspielraum eingrenzen beziehungsweise ihn bevormunden dürfen.

Neben der gesamtheitlichen Betrachtung dieser Sachverhalte über alle Fahrer wird ein besonderer Fokus auf die individuellen Unterschiede zwischen unterschiedlichen Fahrertypen gelegt. Da sich keine signifikanten Abhängigkeiten der Fahrerwahrnehmung von klassischen Merkmalen wie Alter und Geschlecht nachweisen lassen, werden Algorithmen zur Klassifikation unterschiedlicher Fahrertypen anhand des Fahrverhaltens in normalen Fahrsituationen vorgestellt. Mithilfe der Informationen über die individuellen Fahrereigenschaften wird das Potenzial einer adaptiven Gestaltung des Zusatzlenkmoments weiter untersucht.

Hinsichtlich der Methode wird eine realitätsnahe Versuchsdurchführung verfolgt, die eine technische Umsetzbarkeit im Normalfahrzeug ohne die Verwendung zusätzlicher Sensorik voraussetzt. Aus diesem Grund werden alle hier vorgestellten Studien im realen Versuchsträger auf öffentlichen Straßen oder abgesperrten Versuchsstrecken mithilfe von Probanden durchgeführt, die fachlich nicht in die Thematik eingebunden sind. Zusätzlich besteht die grundlegende Anforderung, dass alle im Rahmen der Arbeit entwickelten Verfahren und Algorithmen mit dem heutigen Stand der Technik in der Serienentwicklung von Personenkraftwagen umsetzbar sind.

## 1.1. Motivation

Die Reduzierung von Unfällen ist ein primäres Ziel, das bei der Entwicklung neuer Assistenzsysteme verfolgt wird. Besonders in fahrdynamisch kritischen Fahrsituationen bieten sich trotz der fortgeschrittenen Entwicklungen der vergangenen Jahre weitere Potenziale zur Steigerung der Fahrsicherheit. Die Definition einer kritischen Fahrsituation wird allerdings in der Literatur nicht einheitlich verfolgt. Nach regelungstechnischer Darstel-

lungsform wird eine Fahrsituation als kritisch eingestuft, wenn die Abweichung zwischen der Sollvorgabe des Fahrers und dem Ist-Verhalten des Fahrzeugs eine definierte Schwelle überschreitet. Während diese aus subjektiver Sicht für jeden Fahrer individuell unterschiedlich hoch liegt, können mithilfe fahrdynamischer Eigenschaften objektive Kriterien zur Beschreibung des Fahrzustands verwendet werden. Das Verhältnis von Gierrate des Fahrzeugs zur Lenkwinkleingabe des Fahrers stellt dabei ein häufig verwendetes Maß zur Beschreibung eines querdynamisch kritischen Fahrzustands dar [89]. Dieses im Normalfahrbereich lineare Verhältnis wird mit dem Eintritt in den fahrdynamischen Grenzbereich zunehmend nichtlinear, mit der Folge, dass die Reaktion des Fahrzeugs nicht mehr dem Erfahrungsbereich des Normalfahrers entspricht und im ungeübten Fall zum Kontrollverlust des Fahrzeugs führen kann.

Mithilfe von Unfallstatistiken kann die Häufigkeit der Unfälle, denen ein Kontrollverlust des Fahrzeugs vorausgegangen ist, genau bestimmt werden. Hierzu werden durch das Statistische Bundesamt Unfälle der vergangenen Jahre dokumentiert und mithilfe der polizeilichen Berichterstattung nach unterschiedlichen Kategorien aufgeteilt [118, 119]. In Bild 1.1 ist der prozentuale Verlauf aller Unfälle insgesamt im Vergleich zu den tödlichen Unfällen dargestellt. Hierbei handelt es sich um Ereignisse, die seit der Einführung des Elektronischen Stabilitätsprogramms (ESP) im Jahr 1997 registriert wurden.

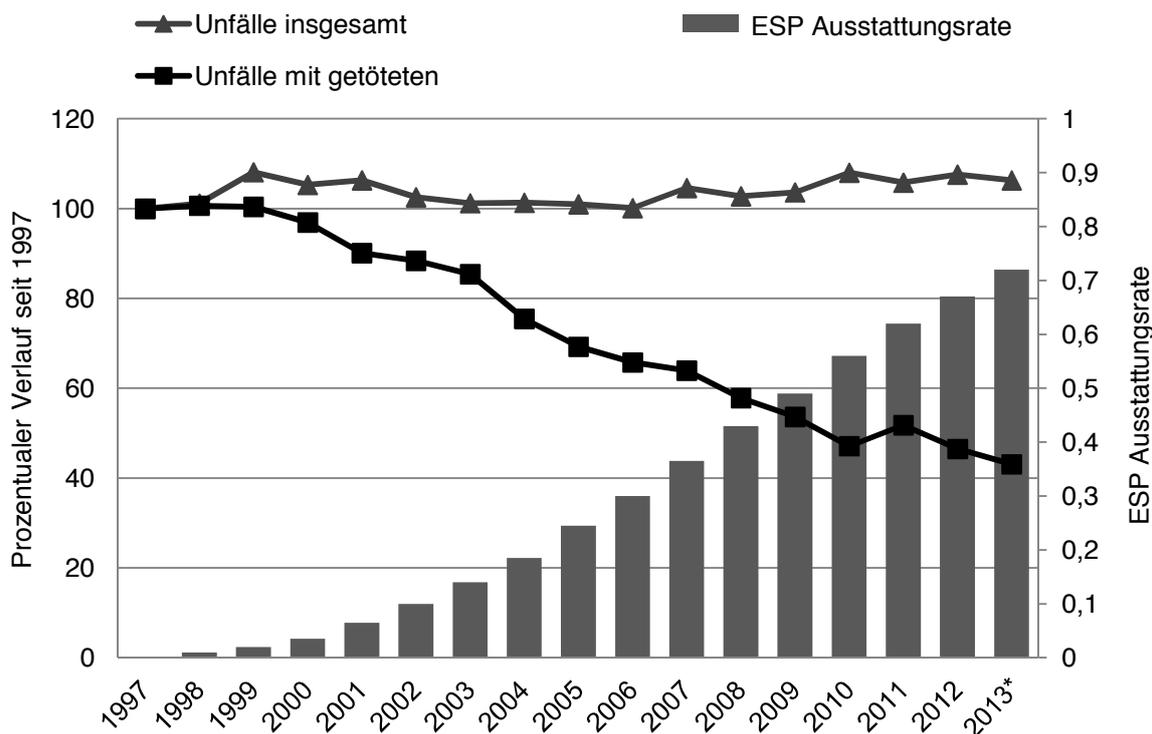


Bild 1.1.: Entwicklung von Unfallzahlen in Deutschland im Vergleich zur Ausstattungsrate der Fahrzeuge mit ESP (\*Schätzwert für die ESP Ausstattungsrate)

Trotz der Tatsache, dass die Gesamtzahl der zugelassenen Fahrzeuge jährlich angestiegen ist, zeigt die Statistik eine nahezu konstant bleibende Zahl der Unfälle insgesamt. Tödliche Unfälle hingegen haben sich seit 1997 um knapp 57% auf 3336 (Stand 2013) reduziert. Gründe hierfür sind laut Untersuchungen von [49] nicht nur die verbesserte Infrastruktur

und Straßenführung, sondern primär der technologische Fortschritt im Bereich der aktiven und passiven Sicherheitssysteme. Am Beispiel der ESP-Ausstattungsrate wird in Bild 1.1 die deutliche Zunahme von Systemen dieser Art verdeutlicht, die neben der Unfallvermeidung auch das Ziel verfolgen, unvermeidbare Unfälle bezüglich der Unfallschwere zu mindern [14].

Die Bundesregierung verfolgt in ihrem Verkehrssicherheitsprogramm von 2011 [5] das ehrgeizige Ziel, die Zahl der Todesopfer von 2011 bis 2020 um 40% zu reduzieren. Um mithilfe neuer FAS einen Beitrag zu dieser Forderung leisten zu können, bedarf es einer genauen Analyse der Ursachen tödlicher Unfälle. Mit 59,8% ereignen sich die meisten Unfälle in Deutschland mit Todesfolge auf Landstraßen. Im Vergleich sind es 29,5% innerhalb geschlossener Ortschaften und 10,8% auf Autobahnen. Häufigster Unfalltyp – also die Konfliktsituation, die zu einem Unfall führt – auf Landstraßen ist der Fahrnfall (Bild 1.2). Mit diesem wird ein Unfall bezeichnet, der aus dem Kontrollverlust des Fahrers über sein Fahrzeug resultiert, ohne dass andere Verkehrsteilnehmer dazu beigetragen haben. Berücksichtigt man die Tatsache, dass nahezu jedem zweiten Fahrnfall ein Schleudervorgang vorausgegangen ist [102], besteht insbesondere in diesen kritischen Situationen ein deutliches Potenzial, den Fahrer zusätzlich zu bestehenden Systemen zu unterstützen.

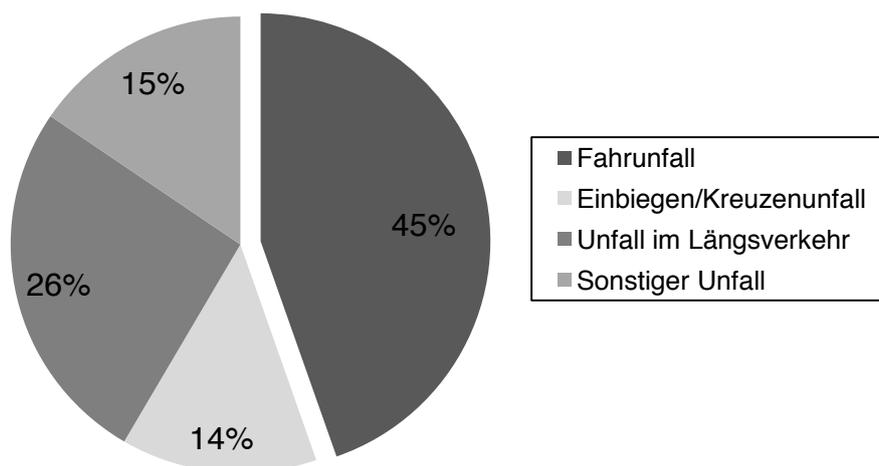


Bild 1.2.: Unfalltypen bei tödlichen Unfällen auf der Landstraße in 2012

Weiterhin geht aus der Analyse der Statistiken hervor, dass die Häufigkeit personenbezogener Unfälle eine große Abhängigkeit vom jeweiligen Fahrertyp aufzeigt. Alter und Geschlecht sind dabei klassische Kriterien, um signifikante Abhängigkeiten zu Unfallhäufigkeiten abzuleiten [117]. Besonders die jungen Fahrer bis 24 Jahre sind mit 109 Getöteten bezogen auf 1 Million Fahrer ihrer Altersgruppe die gefährdetste Fahrergruppe, dicht gefolgt von den älteren Fahrern (älter als 65 Jahre) mit 62 Getöteten<sup>1</sup>. Dabei sind nicht nur die Häufigkeiten auffällig, auch die Unfallursachen variieren stark in Abhängigkeit der jeweiligen Altersgruppe. Bild 1.3 zeigt beispielsweise, dass Geschwindigkeits- und Abstandsfehler vermehrt bei jüngeren Verkehrsteilnehmern beobachtet werden, während Missachtung der Vorfahrtsregeln oder Fehler beim Abbiegen eher mit zunehmendem Alter eintreten.

<sup>1</sup>Diese beiden Gruppen von Fahrern werden aus diesem Grund häufig als Risikofahrer bezeichnet.

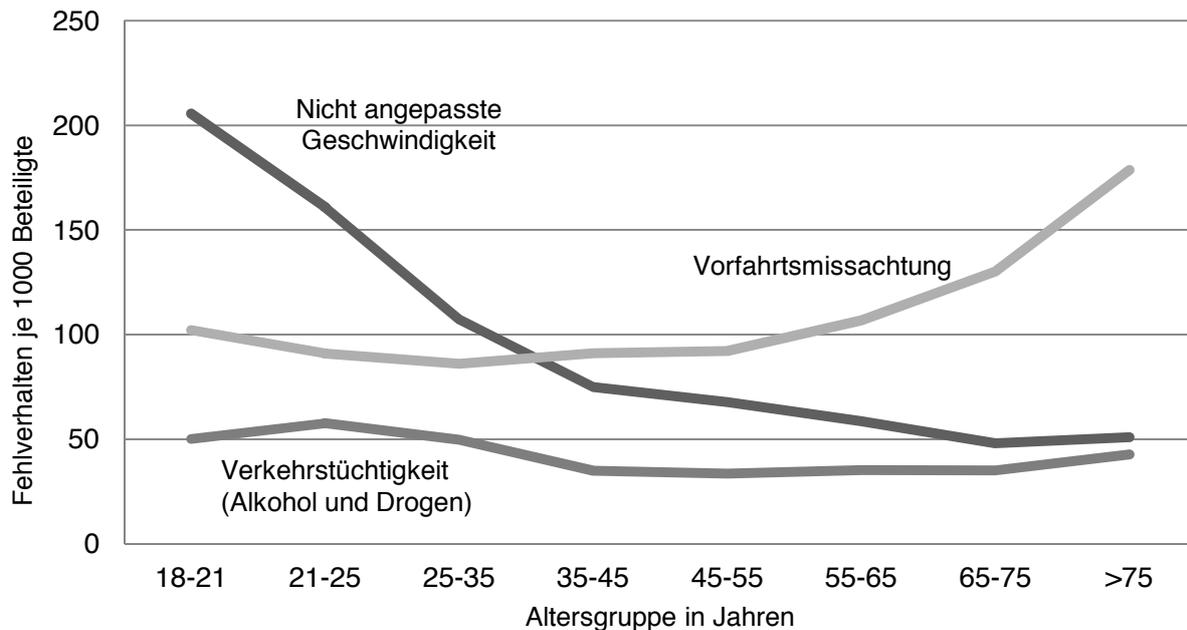


Bild 1.3.: Ursachen für Pkw-Unfälle mit Personenschaden in 2012, verteilt nach Altersgruppen [117]

Alter und Geschlecht sind nur zwei Beispiele für Kriterien zur Klassifikation des Fahrertyps. Sie werden oft herangezogen, weil sie eindeutig und leicht zu ermitteln sind. Das Fahrerverhalten ist jedoch häufig motiviert durch die individuellen Eigenschaften eines Fahrers, die unabhängig von der Altersgruppe unterschiedlich ausfallen können und in erster Linie von den Erfahrungen und Charaktereigenschaften der jeweiligen Fahrer abhängen [59]. Um die Potenziale von Assistenzsystemen besser auszuschöpfen, fordern zahlreiche Studien, die Berücksichtigung des individuellen Fahrertyps bei der Auslegung der Systeme nicht zu vernachlässigen [7, 26, 109].

## 1.2. Stand der Technik

Fahrerassistenzsysteme (FAS) und Fahrdynamik-Regelungssysteme (FDR) sind in den vergangenen Jahren zum zentralen Bestandteil eines Automobils geworden. Dennoch wird in der Literatur häufig keine einheitliche Abgrenzung der beiden Systeme vorgenommen, sondern in vielen Fällen mit dem Oberbegriff FAS alle Möglichkeiten zur Unterstützung des Fahrers zusammengefasst. Dabei arbeiten FDR grundsätzlich entkoppelt vom Fahrer und haben durch aktive Fahrwerk- oder Bremsingriffe die Stabilisierung des Fahrzeugs zur Aufgabe. Das Antiblockiersystem (ABS) [20, 48], die Antriebsschlupfregelung (ASR) [22, 27] oder das ESP [17, 129] sind nur einige Beispiele für Systeme dieser Art. FAS hingegen bieten dem Fahrer nicht nur Unterstützung bei der Stabilisierung des Fahrzeugs, sondern helfen ihm zusätzlich bei der Bewältigung der Fahraufgabe auf den beiden anderen Ebenen der Fahrzeugführung – der Navigation und der Bahnplanung [29]. Im Gegensatz zu den FDR unterstützen sie nicht durch Intervention, sondern nutzen verschiedene Mög-

lichkeiten der Information, Warnung oder Empfehlung, um zur Entlastung des Fahrers beizutragen. Die zahlreichen Beispiele für Systeme dieser Art decken sowohl den Bereich der Längsführung (Geschwindigkeitsregelung [24], Abstandsregelung [99], etc.) als auch der Querverführung (Einparken [65], Spurführung [71], etc.) ab.

Besonders vorteilhaft erweisen sich FAS durch klar definierte Fahraufgaben, die sie in spezifischen Fahrsituationen redundant zum Fahrer ausführen [63]. Dazu weisen sie transparente Funktionen mit klaren Systemgrenzen auf, um auf den Fahrer eindeutig, intuitiv und zuverlässig zu wirken. Die Erwartungskonformität ihrer Interaktion mit dem Fahrer stellt die Herausforderung bei der Entwicklung von FAS dar, insbesondere, wenn mehrere Systeme zur gleichen Zeit ihre Unterstützung bereitstellen [58, 127]. Gesetzliche Vorgaben und Sicherheitsbestimmungen gemäß ISO 26262 [4] und IEC 61508 [3] sind dabei in gleichem Maße einzuhalten wie allgemein akzeptierte Standards oder Empfehlungen, beispielsweise nach dem „Code of Practice“ des EU-Projekts RESPONSE 3 [114]. Nach der Wiener Straßenverkehrskonvention aus dem Jahr 1968 [1] müssen Fahrzeughersteller unter allen Umständen die Beherrschbarkeit des Fahrzeugs durch den Fahrer sichern. Denn für Systeme, die nicht vom Fahrer übersteuert werden können, muss der Hersteller die volle Haftung übernehmen.

Insbesondere Lenkassistenten haben im Zuge neuer funktionaler Freiheitsgrade von mechatronischen Lenksystemen zunehmend an Bedeutung gewonnen. Die Basis hierfür legen zahlreiche Fortschritte im Bereich der Funktionsentwicklung moderner Lenktechnologien. Für ein genaueres Verständnis über die Abhängigkeiten und Einflussgrößen werden im Folgenden die funktionalen Zusammenhänge einer Elektrolenkung genauer erläutert und wichtige Assistenzsysteme vorgestellt, die überlagerte Lenkmomente zur Unterstützung oder Warnung des Fahrers nutzen. Dabei werden neben dem Prinzip und Anwendungsbereich insbesondere Untersuchungen und Erkenntnisse zum Mehrwert dieser Systeme für den Fahrer vorgestellt. Lenkwinkelbasierte Assistenzsysteme, die sich nach heutigem Stand der Technik mithilfe der Aktivlenkung (Active Front Steering, AFS) realisieren lassen [86, 87, 97, 100], werden im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt, da sie aufgrund des direkten Wirkpfads zum Radwinkel keine Empfehlung zum Ziel haben, sondern direkte Korrekturmaßnahmen ergreifen.

### **1.2.1. Funktionale Zusammenhänge elektrischer Lenksysteme**

Im Vergleich zu konventionellen oder hydraulischen Lenksystemen ermöglicht die EPS eine Vielzahl von neuen Lenkfunktionalitäten. Eigenschaften hinsichtlich der Gestaltung des Lenkmoments, die bisher durch die Mechanik fest definiert waren, können mithilfe der EPS durch softwareseitige Maßnahmen in der Steuerlogik verändert werden. Diese Möglichkeit führt zwei wesentliche Vorteile zur Beeinflussung des Fahrverhaltens mit sich. Zum einen kann eine einfache Parametrisierung des Lenkgefühls unabhängig von den konstruktiven Einschränkungen der jeweiligen Fahrzeugklasse vorgenommen werden. Dabei ist sogar eine adaptive Realisierung möglich, die es dem Fahrer durch eine definierte Mensch-Maschine-Schnittstelle (Human Machine Interface, HMI) ermöglicht,

sein gewünschtes Lenkgefühl individuell festzulegen [115]. Zum anderen kann das Lenkverhalten beziehungsweise das resultierende Lenkmoment durch funktionale Maßnahmen unabhängig von der aktuellen Fahrsituation gestaltet werden. Dieses legt die Basis für zahlreiche Systeme, die vom Ein- und Auslenkverhalten bei Kurvenfahrt bis hin zum automatischen Einparken den Unterstützungsgrad des Lenksystems beeinflussen können. Die Voraussetzung für die harmonische Umsetzung der von den einzelnen Funktionen angeforderten Lenkmomente ist ein robust ausgelegtes Konzept für die unterlagerte Regelung des EPS-Lenksystems. Dynamik und Genauigkeit sind dabei die zentralen Anforderungen an den Regler. Seine Güte bestimmt maßgebend die Leistungsfähigkeit des gesamten Lenksystems, die unter anderem durch das resultierende Lenkgefühl und die akustische Rückmeldung an den Fahrer definiert ist. Eine geringe Dynamik hat beispielsweise positiven Einfluss auf das akustische Verhalten des Systems; sie äußert sich aber in einem trägen Anlenkverhalten des Fahrzeugs. In der Literatur werden grundsätzlich zwei unterschiedliche Varianten von EPS-Regelungssystemen unterschieden [44].

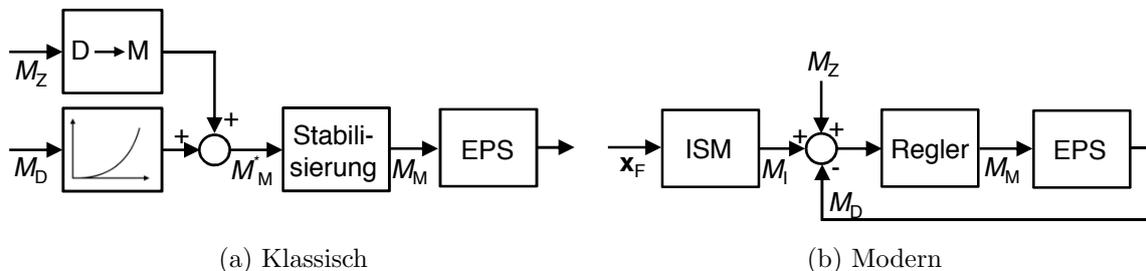


Bild 1.4.: Varianten eines EPS-Regelungssystems

Die klassische Variante in Bild 1.4a entspricht im Grunde dem Prinzip einer hydraulischen Servolenkung. In Abhängigkeit des Moments  $M_D$ , das der Fahrer am Lenkrad aufbringt und durch den Drehstab gemessen werden kann, wird das erforderliche Unterstützungsmoment  $M_M^*$  des Elektromotors berechnet, um das Lenkrad leichtgängiger zu machen. Dabei ist das Verhältnis  $M_D$  zu  $M_M^*$  keine lineare Funktion, sondern bei den meisten Anwendungen progressiv steigend abgestimmt [97]. Während diese klassische Variante aus regelungstechnischer Sicht eine reine Steuerung darstellt, die prinzipbedingt zahlreiche Zusatzfunktionen zur Stabilisierung des Systems erfordert, basieren moderne EPS-Systeme auf der tatsächlichen Regelung eines situationsspezifischen und geschwindigkeitsabhängigen Lenkgefühls [19, 50, 53]. Hierzu wird das vom Fahrer spürbare Drehstabmoment  $M_D$  gemessen und als Regelgröße in das System zurückgeführt (Bild 1.4b). Das gewünschte Lenkgefühl wird durch das Intelligent Steering Management (ISM) in Abhängigkeit der Fahrzustände  $x_F$  berechnet und als Sollvorgabe dem Regelkreis zugeführt. Einflüsse wie das vom Fahrer aufgebrachte Moment oder eventuelle Rückmeldungen durch die Fahrbahn werden aus regelungstechnischer Sicht als Störgrößen aufgefasst und können je nach Sensitivität des Reglers vollständig ausgeglichen werden. Im Gegensatz zu klassischen EPS-Regelungskonzepten erweist sich dieses Verfahren insbesondere dann als vorteilhaft, wenn Zusatzlenkmomente  $M_Z$  der regulären Lenkunterstützung überlagert werden – beispielsweise durch ein Fahrerassistenzsystem. Bei modernen Verfahren wird

$M_Z$  zu der Vorgabe von  $M_I$  addiert und als resultierendes Soll-Moment am Drehstab geregelt. Damit wirkt sich eine vorab applizierte Lenkmomentenempfehlung in jeder Fahrsituation in gleichem Ausmaß am Lenkrad aus. Bei klassischen Verfahren muss aus der Vorgabe  $M_Z$  am Drehstab erst einmal ein entsprechendes Motormoment errechnet werden. Nach Überlagerung mit der regulären Lenkunterstützung und dem Anteil der Stabilisierungsfunktionen wird ein resultierendes Motormoment  $M_M$  erzeugt, das je nach Fahrsituation verschieden ausfallen kann.

Für die Probandenversuche im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist die reproduzierbare Auswirkung des Zusatzlenkmoments  $M_Z$  eine grundlegende Voraussetzung. Aus diesem Grund ist die Verwendung eines klassischen EPS-Regelungssystems für die folgenden Studien nicht zielführend.

Grundsätzlich sind nach [43] drei unterschiedliche Gruppen von Funktionen abzugrenzen, die in ihrem Zusammenwirken für das resultierende Lenkgefühl sowohl in stationären Fahrsituationen (beispielsweise die Haltekraft bei Kurvenfahrt) als auch in dynamischen Fahrsituationen verantwortlich sind:

#### **a) Basisfunktionen**

Die Basisfunktionen stellen die angemessene Lenkunterstützung einer klassischen Servolenkung sicher, wie sie auch durch hydraulische Lenksysteme bekannt ist. Zusätzliche Funktionskomponenten sorgen dafür, dass Rückmeldungen der Fahrbahn trotz der Reibung in den Lagern oder der Trägheit der beweglichen Bauteile einer Lenkung für den Fahrer als spürbare Information zur Verfügung stehen.

#### **b) Erweiterte Funktionen**

Die erweiterten Funktionen erreichen ein EPS-spezifisches Lenkgefühl, indem sie zusätzlich zu den Vorgaben der Basisfunktionen erweiterte Maßnahmen zur Gestaltung der Lenkunterstützung treffen. Hierzu zählen unter anderem die aktive Rücklaufregelung des Lenkrads in die Mittelposition sowie die Geradeauslaufkorrektur, um beispielsweise bei einer quergeneigten Fahrbahn das erforderliche Gegenlenken des Fahrers zu erleichtern. Alle Funktionen dieser Ebene verwenden nur standardmäßig im Fahrzeug vorhandene Sensoren wie den Lenkwinkel oder die Raddrehzahlen.

#### **c) Funktionen auf Fahrzeugebene**

Diese Gruppe wird häufig auch als Lenkassistentenfunktionen bezeichnet und dient grundsätzlich zur Erzeugung eines Überlagerungsmoments, das zusätzlich zu den beiden anderen EPS-Funktionalitäten eine situationsspezifische Warnung oder Empfehlung für den Fahrer erzeugt. Grundlage zur Bestimmung einer angemessenen Assistenz ist die Verwendung von Informationen aus Sensoren, mit denen das Fahrzeug zusätzlich ausgestattet ist. Beispiele hierfür sind die Querschleunigung oder die Gierrate, die von der Sensoreinheit des ESP bereitgestellt werden, oder aber Informationen über die unmittelbare Umgebung, ermittelt aus Sensoren wie Kamera, Radar und Ultraschall.

Das Lenksystem wird somit zu einem intelligenten<sup>2</sup> Aktuator des Fahrzeugs, das in Bedarfssituationen für den Fahrer unterstützende Maßnahmen ergreift, mit dem Ziel, das Fahren sicherer und komfortabler zu gestalten. Eine Vorstellung der wichtigsten Lenkassistentenfunktionen einer EPS erfolgt im folgenden Teilkapitel. Viele von ihnen sind bereits heute in Serienfahrzeugen umgesetzt.

## 1.2.2. Lenkassistentenfunktionen

Lenkassistentenfunktionen richten sich in erster Linie an den Unterstützungsbedarf des Fahrers. Dieser Bedarf ist nicht, wie häufig angenommen, proportional zur Schwierigkeit der Fahraufgabe, sondern besonders hoch sowohl bei leichten Routine-Tätigkeiten des Fahrens als auch bei anspruchsvollen Fahrmanövern, bei denen die Beherrschbarkeit des Fahrzeugs für den Normalfahrer eine Herausforderung darstellt (Bild 1.5).

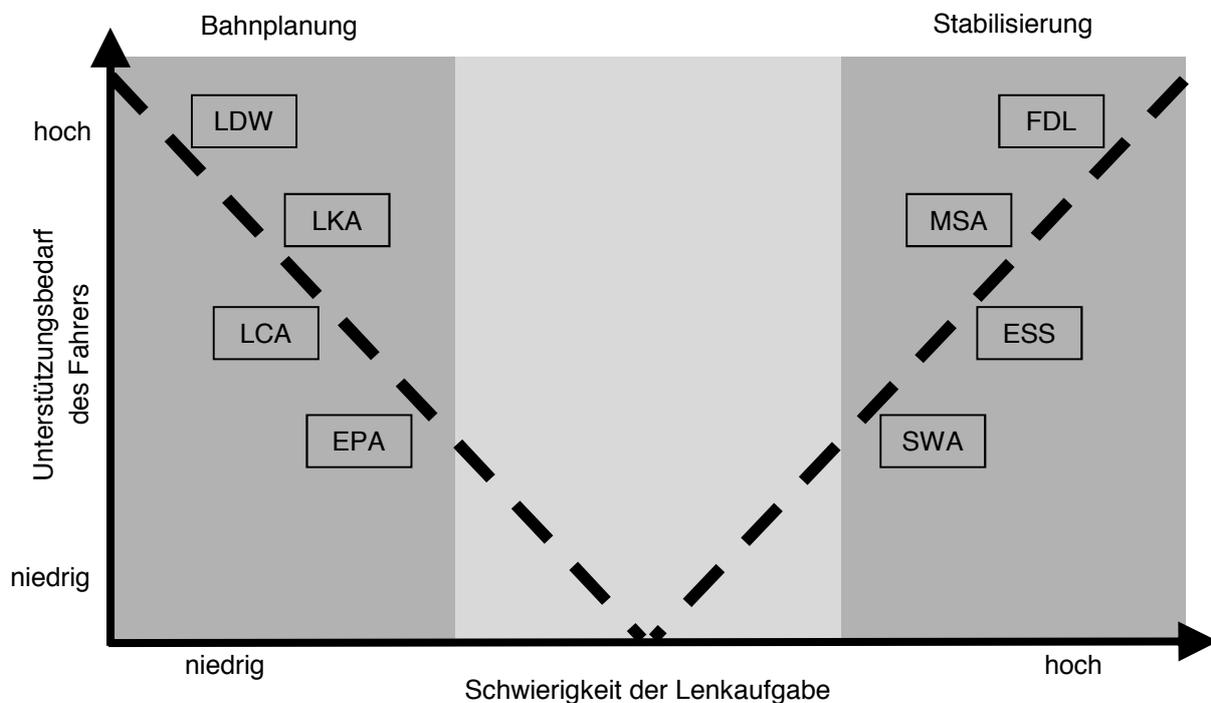


Bild 1.5.: Varianten von Lenkassistenten je nach Schwierigkeit der Lenkaufgabe

Im niedrigen Schwierigkeitsbereich sind es vor allem Lenkassistenten, die den Fahrer bei der Bahnplanungsaufgabe unterstützen. Diese monotonen Fahrsituationen wie beispielsweise eine längere Autobahnfahrt empfinden viele Fahrer als langweilig, wodurch das Risiko einer frühzeitigen Ermüdung oder eines Konzentrationsnachlasses sehr hoch ist. Systeme wie die Spurverlassenswarnung erkennen kritische Situationen wie diese und versuchen, die Aufmerksamkeit des Fahrers auf die Spurhalteaufgabe zurückzuführen.

<sup>2</sup>Intelligent im Sinne von, dass die Lenkung Umfeldinformationen bewerten und selbstständig die Lenkunterstützung anpassen kann.

Auf der anderen Seite besteht im hohen Schwierigkeitsbereich bei der Stabilisierungsaufgabe Bedarf an Unterstützung. Extreme Fahrsituationen wie ein Ausweichmanöver oder Bremsen auf stellenweise vereister Fahrbahn zählen nicht zu dem Erfahrungsbereich eines Normalfahrers. Viele sind in einer solchen Situation überfordert und führen möglicherweise eine unpassende Reaktion aus. Lenkassistenten auf dieser Ebene unterstützen den Fahrer bei der Stabilisierung des Fahrzeugs, indem sie durch eine Lenkmomentenempfehlung die Reaktion des Fahrers beeinflussen.

Im mittleren Schwierigkeitsbereich (helle Fläche von Bild 1.5), bei der die Lenkaufgabe weder monoton noch zu anspruchsvoll ist, spielen Fahrspaß und Fahrkomfortauslegungen des Fahrzeugs und des Lenksystems eine wesentlich größere Rolle. Lenkassistenten, die den Fahrern Teilaufgaben in diesem Bereich abnehmen, werden erst im Zuge des voll automatisierten Fahrens den Markt durchdringen [46, 125].

### Lenkunterstützung bei der Bahnplanung

Bereits in zahlreichen Fahrzeugen erhältlich und ab 2014 gesetzlich verpflichtend für alle neu zugelassenen Schwer-Lkw ist das Lane Departure Warning (LDW) [37]. Mithilfe von Kamerainformationen werden sowohl der Verlauf der Fahrspurmarkierungen als auch die Bewegung des Fahrzeugs innerhalb der Spur überwacht. Besteht die Gefahr eines unbeabsichtigten Verlassens der Fahrspur, beispielsweise indem die hierzu verbleibende Zeit (Time to Lane Crossing, TLC) eine vorab definierte Schwelle unterschreitet [70], erfolgt die Warnung des Fahrers durch eine haptische Rückmeldung. Im Rahmen der Voruntersuchungen zu dieser Arbeit wurden verschiedene Warnstrategien für das LDW untersucht, wobei in Bild 1.6 exemplarisch das Zwei-Ebenen-Warnprinzip für eine gerichtete Lenkradvibration aufgeführt ist [75].

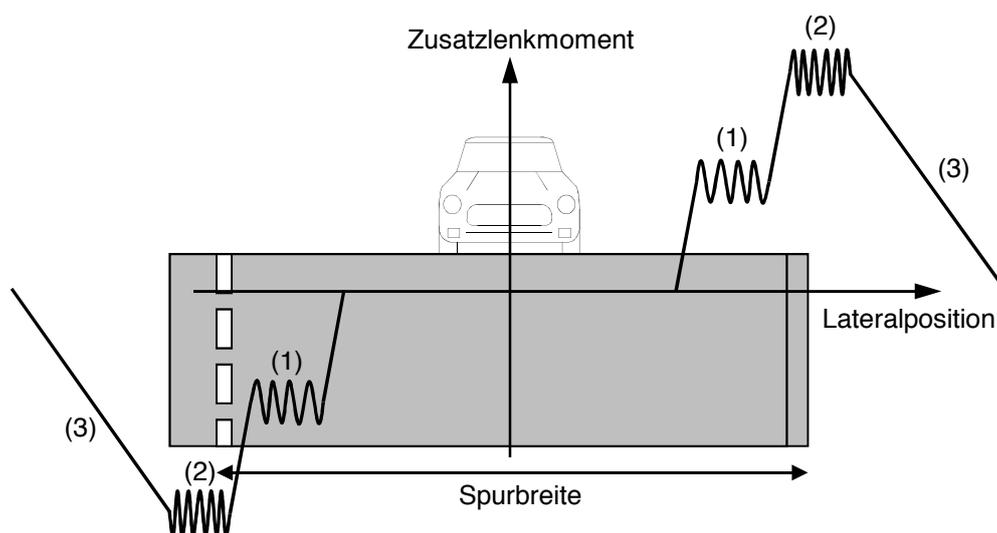


Bild 1.6.: Zwei-Ebenen-Warnsystem für das LDW (vereinfachte Darstellung)

Bei der ersten Warnstufe kurz vor dem Fahrbahnrand erfolgt eine leichte, aber spürbare Vibration mit einem geringen rückführenden Zusatzlenkmoment in die Fahrbahnmitte (1). Reagiert der Fahrer nicht, wird beim Erreichen des Fahrbahnrandes die Vibration

stärker (hochfrequenter) und das Rückführmoment weiter erhöht (2). Überstimmt der Fahrer weiterhin die Funktion, wird von einer bewussten Handlung des Fahrers ausgegangen, beispielsweise um einen Spurwechsel durchzuführen. Die Vibration setzt aus, und das Moment wird langsam ausgeblendet (3), damit der Fahrer seine Wunschbahn fortsetzen kann.

Wesentlich für die Beurteilung des LDW ist zum einen die Gestaltung der Warnung (Zeitpunkt und Intensität des Zusatzlenkmoments) und zum anderen die Fahrspurerkennungsrate der Kamera. Der ADAC hat im Rahmen einer Studie aktuelle Serienfahrzeuge hinsichtlich dieser beiden Kriterien sowohl durch Experten als auch durch Normalfahrer bewerten lassen [9]. Die Ergebnisse in Tabelle 1.1 zeigen, dass die Urteile sehr unterschiedlich ausfallen und von sehr gut bis ausreichend alle Noten vertreten sind. Die beiden letztplatzierten Fahrzeuge verwenden als einzige Fahrzeuge keine haptische Warnung am Lenkrad. Der Citroën verwendet Sitzvibrationen mit Unterscheidung zwischen links- oder rechtsseitiger Annäherung an die Fahrbahngrenze; der Volvo V60 setzt rein auf die akustische Warnung.

Tabelle 1.1.: Bewertung des LDW-Systems unterschiedlicher Fahrzeughersteller durch den ADAC [9]

Platz	Fahrzeug	Probandenurteil	ADAC-Urteil	Mittelwert
1	BMW 5er	1,6	1,4	1,5
2	Mercedes CLS	2,8	2,0	2,4
3	Volvo V40	3,3	2,5	2,9
4	Audi A6	3,5	2,8	3,1
5	Mazda CX-5	3,9	2,6	3,2
6	Citroën DS5	3,9	2,8	3,3
7	Volvo V60	3,7	3,1	3,4

Während das LDW nur in singulären Ereignissen warnend einwirkt und auf die Steigerung der Fahrsicherheit abzielt, bietet das Lane Keeping Assistance (LKA) eine kontinuierliche Führung des Fahrzeugs in Richtung Fahrbahnmitte [45]. Hierzu erfolgt beim LKA eine dauerhafte Fahrer-Fahrzeug-Interaktion über das Lenkmoment, mit dem Ziel, die Spurführungsaufgabe in monotonen Situationen komfortabler zu gestalten. Das LKA wirkt aufgrund gesetzlicher Bestimmungen nicht handlungsersetzend, sondern lediglich unterstützend, damit der Fahrer die Empfehlung jederzeit übersteuern kann. Zusätzliche Algorithmen wie beispielsweise die Hands-Off-Detection prüfen kontinuierlich, ob sich der Fahrer tatsächlich im Regelkreis befindet. Besonders nennenswert sind Untersuchungen zur Gestaltung der überlagerten Lenkmomentenempfehlung. In [21] werden im Rahmen von Probandenversuchen mit N=18 Normalfahrern unterschiedliche Gestaltungsvarianten des Zusatzlenkmoments bewertet. Bei der im Fahrsimulator durchgeführten Studie werden „Eingriffsabstand“ und „Eingriffsstärke“ der Lenkmomentenempfehlung variiert, mit denen niedrige oder hohe Führungsintensitäten realisiert werden (Bild 1.7).

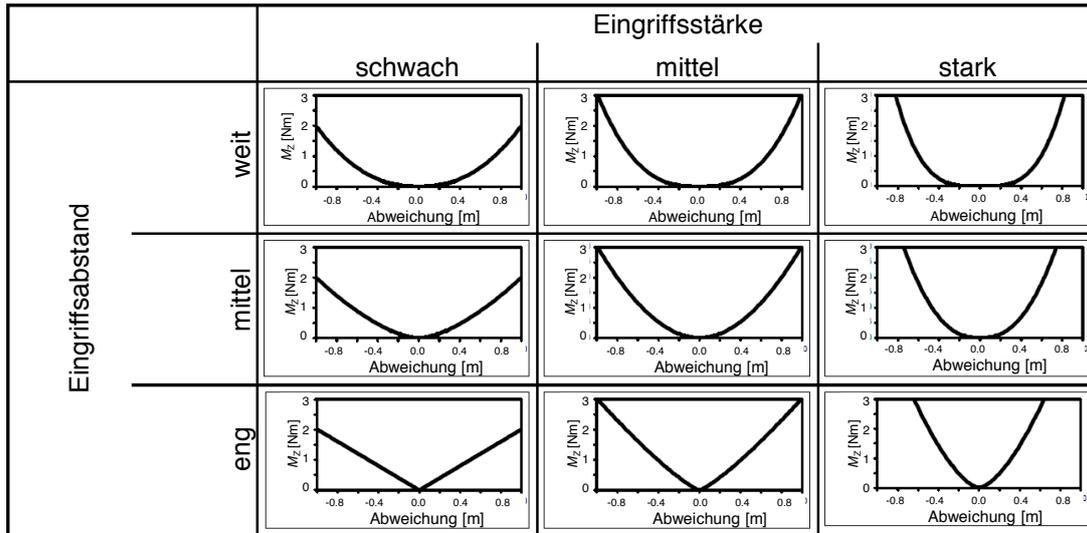


Bild 1.7.: Untersuchte Gestaltungsvarianten des LKA-Zusatzlenkmoments in Abhängigkeit der Spurbabweichung [21]

Im Rahmen der Versuche bestimmen die Probanden ihre bevorzugte Wahl für die Systemeinstellung des LKA. Dabei stellt sich heraus, dass Fahrer den genauen Unterschied der beiden Dimensionen nicht zuverlässig auflösen können, dafür aber in der Lage sind, aus der Menge möglicher Varianten problemlos eine individuell bevorzugte Parametrisierung auszuwählen. Vergleichbare Ergebnisse werden auch in [38] mithilfe von Probandenversuchen im realen Versuchsfahrzeug erzielt. Die Abhängigkeiten des bevorzugten Kennfeldes von den individuellen Eigenschaften des jeweiligen Fahrers werden allerdings im Rahmen beider Studien nicht weiter vertieft.

Eine Unterstützung des Fahrers auf der Ebene der Bahnplanung bietet auch das Lane Change Assistance (LCA). Befindet sich ein anderes Fahrzeug auf der Nachbarspur oder nähert sich mit hoher Geschwindigkeit von hinten, wird der Fahrer vor einem beabsichtigten Spurwechsel gewarnt. Während die meisten Serienlösungen über den akustischen oder visuellen Wahrnehmungskanal versuchen, die Aufmerksamkeit des Fahrers zu erlangen, werden aufgrund der schnelleren Wahrnehmungsgeschwindigkeit vermehrt Möglichkeiten zur haptischen Warnung diskutiert, die mittels Zusatzlenkmomenten den Fahrer von einem Spurwechsel zurückhalten [64]. Zukünftige Systeme werden über die reine Entscheidungshilfe zum Spurwechsel hinausgehen und auch bei der Durchführung eines Spurwechsels assistieren beziehungsweise diese sogar vollständig automatisieren [72]. Die wenigen Studien zur Akzeptanzsicherung und Auslegungsvarianten für unterschiedliche Fahrer sowie die rechtlichen Einschränkungen sind wesentliche Gründe dafür, dass diese Erweiterungen noch nicht am Markt erhältlich sind.

Im niedrigen Geschwindigkeitsbereich halten viele Autofahrer das Einparken für eine anstrengende Fahraufgabe, insbesondere, wenn erschwerte Bedingungen herrschen, wie enge Parklücken, vorhandene Fahrbahnneigung oder hohes Verkehrsaufkommen. Auf Basis von Abstandssensoren und einer EPS kann durch rein funktionale Maßnahmen ein Einparkassistent (EPA) zur Unterstützung des Fahrers realisiert werden [68, 69].

Dabei unterscheidet sich dieses Prinzip grundlegend von den bisher genannten Assistenten. Bei aktuellen Einparkassistenten erfolgt nämlich keine Empfehlung, sondern die Lenkaufgabe wird vollständig durch das System durchgeführt. Der Fahrer muss lediglich die Längsregelung des Fahrzeugs übernehmen<sup>3</sup>. Die EPS dient hier nicht mehr zur Servounterstützung, sondern als Winkelregler. Dies ist erlaubt, weil die gesetzlich vorgeschriebene Geschwindigkeit von 10km/h nicht überschritten wird und der Fahrer jederzeit durch die Betätigung der Bremse das Manöver abbrechen kann. Einfache Bedienung, zuverlässige Detektion potenzieller Parklücken sowie eine kurze Einparkdauer stellen die wesentlichen Kriterien zur Sicherstellung der Fahrerakzeptanz dar [8].

### **Lenkunterstützung bei der Stabilisierung**

Gegenstand moderner Lenkassistenten ist vor allem die Unterstützung in kritischen Fahrsituationen. Dies sind insbesondere Fahrmanöver, wie sie im fahrdynamischen Grenzbereich, also beim Bremsen oder Beschleunigen auf einer Fahrbahn mit seitenweise unterschiedlichem Reibwert ( $\mu$ -Split) oder bei der Durchführung von Ausweichmanövern auftreten können. Da Normalfahrer aufgrund der mangelnden Erfahrung in solchen Situationen häufig überfordert sind, kommen vermehrt Lenkassistenten zum Einsatz, die zusätzlich zu den stabilisierenden Bremseingriffen des ESP versuchen, das Lenkverhalten des Fahrers zu beeinflussen.

Bei dem Seitenwindassistenten (SWA) handelt es sich um ein klassisches Beispiel, das insbesondere für Nutzfahrzeuge mit Hochdach oder langem Radstand große Bedeutung hat [18, 89]. Der Einfluss des Seitenwinds wirkt sich in Form einer Querkraft und eines Giermoments auf das Fahrzeug aus und kann eine Richtungsänderung und einen Kursversatz herbeiführen. Je nach Schwere des Seitenwinds wird die Störung als Komfort- oder Sicherheitsthema eingestuft, wodurch bei unangemessener Fahrerreaktion eine kritische Fahrsituation entstehen kann. Der SWA versucht den Fahrer mithilfe von Zusatzlenkmomenten zu aktivem Gegenlenken mit angemessener Intensität zu motivieren beziehungsweise bei konstant einwirkendem Seitenwind das Lenkmoment in Richtung des idealen Lenkwinkels zu reduzieren. Die Erkennung der eintretenden Störung kann auf Basis unterschiedlicher Varianten erfolgen. In [98] wird das Ausmaß des Seitenwinds durch die modellbasierte Schätzung des induzierten Giermoments  $M_W$  über einen für die Fahrsituation ausgelegten Beobachter ermittelt. Dagegen wird in [95] das Prinzip einer Gierratenregelung angewendet, indem auf Basis der Gierratendifferenz zwischen der Ist-Gierrate und der Referenzgierrate bei ungestörter Fahrt das passende Empfehlungsmoment berechnet wird. Bild 1.8 stellt diese beiden Verfahren gegenüber, wobei der erforderliche Korrekturlenkwinkel hier direkt geregelt wird, beispielsweise mithilfe eines AFS.

Auch Unfälle, deren Ursache in einer fehlerhaften Einschätzung des Fahrers im Längsverkehr beruht, können mithilfe von Lenkassistenten reduziert werden. Der Ausweichassistent (Evasive Steering Support, ESS) [61, 108] bietet dann Unterstützung, wenn Systeme wie der Notbremsassistent [101] oder der Abstandsregler [36] einen Unfall nicht mehr vermei-

---

<sup>3</sup>Für zukünftige Fahrzeuge werden Verfahren vorgestellt, die auch die Längsregelung des Fahrzeugs übernehmen (Beispiel BMW i3 [10])

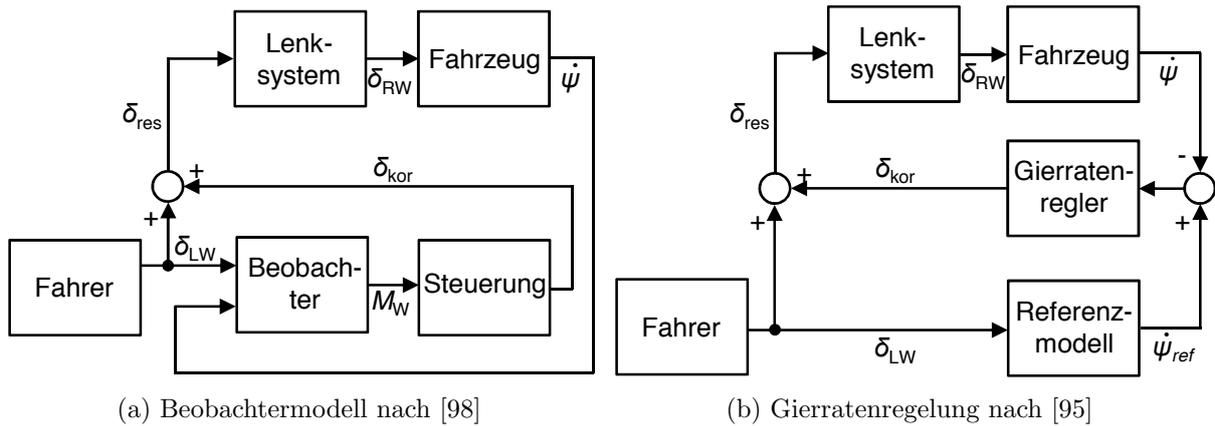


Bild 1.8.: Varianten eines Seitenwindassistenten

den können und der Fahrer daraufhin bewusst ein Ausweichmanöver einleitet. Die richtige Lenkreaktion für die erfolgreiche Umfahrung des Hindernisses erfordert eine korrekte Einschätzung der Situation, die für viele Normalfahrer keine Selbstverständlichkeit darstellt. Zu starkes oder zu schwaches Einlenken führt entweder zum Verlust der Kontrolle über das Fahrzeug oder zur Kollision mit dem Hindernis. Mithilfe einer Lenkmomentenempfehlung führt das ESS den Fahrer entlang einer ermittelten Trajektorie zur Hindernisumfahrung. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass der Fahrer in seiner Handlung nicht bevormundet wird, sondern ihm lediglich ein Lenkverhalten empfohlen wird. Es ist ihm somit jederzeit möglich, diese Empfehlung des Systems aufgrund einer Änderung der Fahrsituation zu überlenken.

Zur Bestimmung des Zusatzlenkmoments werden in der Literatur verschiedene Ansätze wie beispielsweise die Potenzialfeldmethode oder die Methode der elastischen Bänder [116] diskutiert. Im Rahmen der Voruntersuchungen zu dieser Arbeit wurde ein Ausweichassistent entwickelt [113], der mithilfe von Kamerainformationen ein kritisches Hindernis erkennt und auf Basis von geometrischen Bahnplanungsverfahren (Bezier-Kurven [60]) eine bestmögliche Trajektorie für das Ausweichmanöver ermittelt. Bestmöglich heißt dabei, dass die auftretenden Querschleunigungen und Querschleunigungsänderungen so gering wie möglich gehalten werden und ein definierter Sicherheitsabstand zum Hindernis nicht unterschritten wird. Entfernt sich der Fahrer von dieser optimalen Trajektorie, erfolgt in Abhängigkeit der lateralen Abweichung  $\Delta y$  und des relativen Gierwinkels  $\psi_{\text{rel}}$  zwischen der Fahrzeuglängsachse und der Bahntangente eine Empfehlung ähnlich wie bereits beim LKA vorgestellt. Das im Rahmen von Selbstversuchen applizierte Zusatzlenkmoment ist für eine Hindernisumfahrung bei einer Geschwindigkeit von 50km/h in Bild 1.9 abgebildet. Der Betrag des Zusatzlenkmoments  $M_Z$  erreicht hier die Maximalwerte von bis zu 3Nm, wenn  $|\Delta y|$  größer als 1m ist und/oder  $|\psi_{\text{rel}}|$  Winkel größer  $10^\circ$  annimmt. Das hier abgebildete Lenkmoment schafft einen Kompromiss zwischen harmonischem Lenkgefühl und eindeutiger Führung. Es bietet zugleich die Möglichkeit, die Empfehlung jederzeit zu übersteuern.

Nach Bild 1.5 liegt der höchste Anspruch einer Lenkaufgabe bei den meisten Normalfahr-

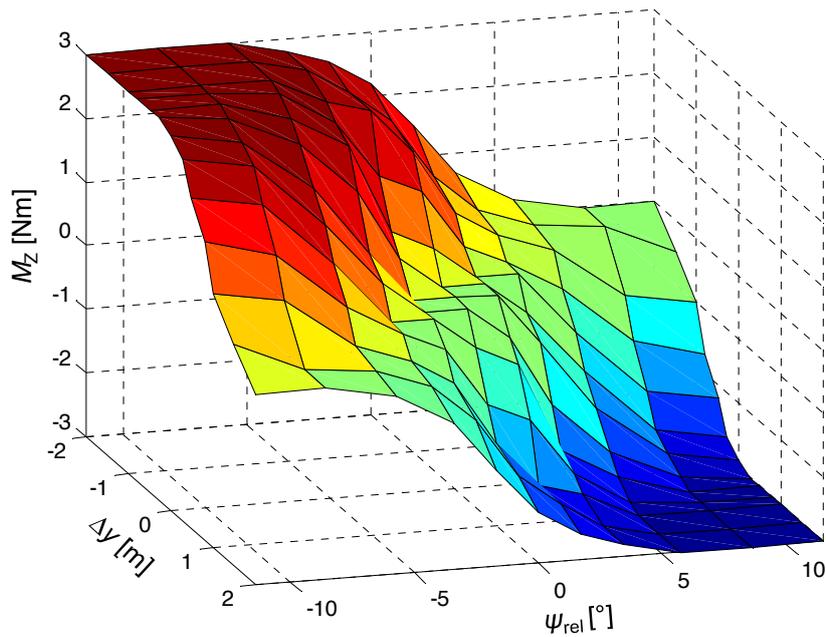


Bild 1.9.: Auslegungsvariante der Lenkmomentenempfehlung für ein ESS

ren im fahrdynamischen Grenzbereich. Dementsprechend ist auch der Unterstützungsbedarf in diesem Arbeitspunkt der nichtlinearen Fahrdynamik besonders hoch. Der  $\mu$ -Split-Assistent (MSA) und die Fahrdynamische Lenkmomentenempfehlung (FDL) sind Beispiele für Assistenten, die auch im Fokus der vorliegenden Arbeit stehen. Auf die detaillierte Vorstellung dieser Systeme mit Fokus auf die FDL-Variante zur Unterstützung in Übersteuersituationen wird an dieser Stelle auf das Kapitel 4 verwiesen.

### 1.3. Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit untersucht die Potenziale von Lenkmomentenempfehlungen, deren Aufgabe es ist, den Bewertungs- und Entscheidungsprozess des Fahrers zu erweitern und ihm frühzeitig das Bewusstsein über den Eintritt in einen fahrdynamisch kritischen Fahrzustand zu vermitteln. Moderne EPS-Regelungssysteme bieten immer bessere Möglichkeiten, die Regelung des Lenkgefühls vorzunehmen. Für Assistenzfunktionen, die das Lenkmoment als Interaktionskanal mit dem Fahrer nutzen, bieten sich dadurch neue Möglichkeiten Informationen und Empfehlungen eindeutig und reproduzierbarer zu gestalten. Die bisher in der Literatur vorgestellten Systeme greifen diese Thematik grundsätzlich von der systemtechnischen Perspektive auf – es sind nur wenige Studien bekannt, die eine Wirksamkeit solcher Funktionen für den Normalfahrer unter realen Versuchsbedingungen untersuchen (vgl. Kapitel 5). Sollen diese Systeme tatsächlich in der Serienentwicklung künftiger Fahrzeuge umgesetzt werden, muss die Auswirkung der Funktion auf den Normalfahrer in einer realen Fahrsituation eindeutig bestimmt werden. Andernfalls kann es vorkommen, dass eine im Fahrversuch abgestimmte Empfehlung durch die hektischen Lenkbewegungen des Fahrers überstimmt wird oder der Fahrer sogar durch die Empfeh-

lung gestört oder bevormundet wird.

Das Ziel dieser Arbeit liegt in der Weiterführung der Untersuchungen zur Wirksamkeit von Lenkmomentenempfehlungen in fahrdynamischen Grenzsituationen. Dabei wird der Fokus auf drei zentrale Themengebiete gesetzt:

1. die Interaktion des Fahrers mit Zusatzlenkmomenten
2. die Wirksamkeit einer Lenkmomentenempfehlung in kritischen Fahrsituationen
3. die adaptive Gestaltung an die individuellen Fahrereigenschaften

Hinsichtlich der Interaktion (Punkt 1) sind neben grundlegenden Erkenntnissen zur Auswirkung eines Zusatzlenkmoments auf das Fahrer- und Fahrzeugverhalten insbesondere Untersuchungen zum maximal zumutbaren Lenkmoment sowie zum charakteristischen Reaktionsverhalten unterschiedlicher Fahrer durchzuführen. Diese Erkenntnisse definieren die funktionalen Rahmenbedingungen eines solchen Lenkassistenten, dessen Wirksamkeit und Akzeptanz für den Normalfahrer unter realen Versuchsbedingungen nachgewiesen werden sollen (Punkt 2). Neben der gesamtheitlichen Untersuchung des Funktionsmehrerts über alle Fahrer ist der Aspekt unterschiedlicher Fahrerreaktionen einzugrenzen und hinsichtlich des Mehrerts einer adaptiven Gestaltung einer Lenkmomentenempfehlung in Abhängigkeit des Fahrertyps zu bewerten (Punkt 3).

Um Ergebnisse zu erzielen, die auf das reale Verhalten eines Fahrers in einer kritischen Fahrsituation zurückgeführt werden können, werden besondere Anforderungen an die gewählte Methode gestellt. Aus diesem Grund werden alle hier aufgeführten Studien unter realen Versuchsbedingungen mit Probanden im Versuchsfahrzeug durchgeführt, die fachlich nicht in die Thematik eingebunden sind. Die Versuchsgestaltung sowie die subjektiven und objektiven Bewertungskriterien sind so gewählt, dass sie in ähnlicher Form für zukünftige Studien eingesetzt werden können.

## 1.4. Struktur der Arbeit

Die gesamte Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel. Nach der Einführung in das Thema und dem Überblick zum aktuellen Stand der Technik lenkmomentenbasierter Assistenzfunktionen wird in Kapitel 2 die Interaktion des Fahrers mit diskreten Lenkmomenten untersucht. Im Rahmen einer Probandenstudie werden die Wahrnehmung und die Reaktion der Fahrer für unterschiedliche Gestaltungsvarianten des Lenkmoments (maximale Amplitude und Gradient) beurteilt. Kapitel 3 führt diese Untersuchungen hinsichtlich der Beherrschbarkeit von Zusatzlenkmomenten weiter fort, mit dem Ziel, das maximal zumutbare Lenkmoment in Abhängigkeit von den fahrdynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs zu bestimmen. Diese Erkenntnisse fließen in das Kapitel 4 ein, das die FDL-Funktion mit den unterschiedlichen Varianten und Möglichkeiten für die Gestaltung der Lenkmomentenempfehlung vorstellt. Den Nachweis von Wirksamkeit und Akzeptanz der Funktion für den Normalfahrer ist Inhalt von Kapitel 5. Hierzu wird eine Probandenstudie in einer Übersteuersituation durchgeführt und mithilfe definierter Kriterien das Fahrerverhalten

in Abhängigkeit unterschiedlicher Applikationsvarianten der FDL bewertet. Da der Mehrwert der Funktionsvarianten abhängig vom Typ des jeweiligen Fahrers ist, werden im Rahmen der weiterführenden Untersuchungen in Kapitel 6 die Möglichkeiten zur Klassifikation des Fahrertyps auf Basis seines Fahrverhaltens analysiert. Dabei liegt der Fokus auf der Betrachtung des Querdynamikverhaltens, die Rückschlüsse auf die Interaktion des Fahrers mit einer Lenkmomentenempfehlung im fahrdynamischen Grenzbereich bietet. Ein solches Verfahren legt die Basis für eine mögliche Serienanwendung, bei der eine automatisierte Erkennung des Fahrertyps und die anschließende Parametrisierung der zugrunde liegenden Assistenzsysteme durchgeführt werden. Den Schluss der Arbeit bildet das Kapitel 7 mit einer Gesamtbetrachtung der wesentlichen Ergebnisse und Schlussfolgerungen. Ausblickend wird hier die Idee einer vollständigen Adaption aller Freiheitsgrade der FDL mithilfe von Fahrermodellen diskutiert. Der Anhang enthält die Fragebögen und Versuchspläne zu den Probandenstudien dieser Arbeit.

Die hier aufgeführten Ergebnisse sind größtenteils in Patentschriften [77, 82–85], in Fachzeitschriften oder auf Konferenzen [75, 78–81, 92] sowie in Form von Posterbeiträgen [73, 74, 76] publiziert.

## 2. Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei Überlagerung von Lenkmomenten

Für den Fahrzeugführer sind die eindeutige Wahrnehmung sowie die richtige Deutung und Interpretation von Informationen, die eine Relevanz hinsichtlich seiner Fahraufgabe darstellen, von entscheidender Bedeutung. In der Vielzahl möglicher Reize bieten die über den haptischen Wahrnehmungskanal einwirkenden Reize den Vorteil, sensibler und somit deutlich schneller wahrnehmbar zu sein als beispielsweise akustische oder visuelle. Zahlreiche Untersuchungen im physiologischen Bereich gehen dabei einheitlich von einer etwa halb so großen Latenzzeit vom Zeitpunkt des Auftretens eines haptischen Reizes bis zum Eintreten einer sichtbaren Reaktion aus [40, 51, 67]. Ein klassisches Beispiel in diesem Zusammenhang ist der Knireflex (Patellarsehnenreflex [123]), wobei ein leichter Schlag unterhalb der Kniescheibe zu einer sichtbaren Streckung des Kniegelenks führt. Insbesondere in kritischen Fahrsituationen, die häufig eine schnelle Handlung des Fahrers erfordern, kann somit die Informationsvermittlung über den haptischen Kanal einen erheblichen Mehrwert für den Fahrer bieten. Werden diese Informationen und deren Übertragung eindeutig gestaltet, so erfordern sie keine bewusste mentale Zuwendung mit der Folge, dass beispielsweise eine Lenkmomentenempfehlung eine intuitiv induzierte Lenkreaktion des Fahrers in die erforderliche Richtung bewirken kann. Dies setzt allerdings eine angemessene Gestaltung der haptischen Information voraus, damit vom Fahrer die erforderliche Deutung für eine richtige Reaktion erfolgen kann. Eine falsche Interpretation der Signale kann nachteilig ausfallen und dann eine für die Situation unangemessene Reaktion herbeiführen.

In der Literatur finden sich bislang nur wenige Studien, die die Wahrnehmung und Auswirkung von Zusatzlenkmomenten auf das Fahrerverhalten systematisch untersuchen. Diese lassen sich in Abhängigkeit ihrer Zielsetzung in die Kategorien Wahrnehmbarkeit, Nutzbarkeit und Beherrschbarkeit unterteilen, wobei je nach Schwerpunkt unterschiedliche Methoden und Ergebnisse ausgearbeitet werden. Abgesehen von einigen Voruntersuchungen und abgeleiteten Thesen aus anderen Analysen [35, 88] erfolgten systematisch durchgeführte empirische Studien unter realitätsnahen Versuchsbedingungen erstmalig durch Schumann [111, 112]. Diese Versuche zur menschlichen Wahrnehmbarkeit von Zusatzlenkmomenten veranschaulichen die Herausforderungen und zahlreichen Abhängigkeiten, die bei der Interaktion mit dem Stimulus Zusatzlenkmoment zu berücksichtigen sind.

Die vorliegenden Literaturbefunde verwenden in den meisten Fällen die maximale Amplitude des Zusatzlenkmoments als Maß zur Referenzierung der untersuchten Momente. Für einen Überblick der wichtigsten Erkenntnisse aus empirischen Versuchen führt Bild 2.1 eine Klassifikation der ermittelten Zusatzlenkmomente nach den drei oben genannten Untersuchungszielen durch. Die erkennbaren Streuungen zwischen den Ergebnissen verschiedener Studien begründen sich insbesondere mit der Wahl unterschiedlicher Fahrzeuge, Kenngrößen, aber auch der zugrunde liegenden Methode.

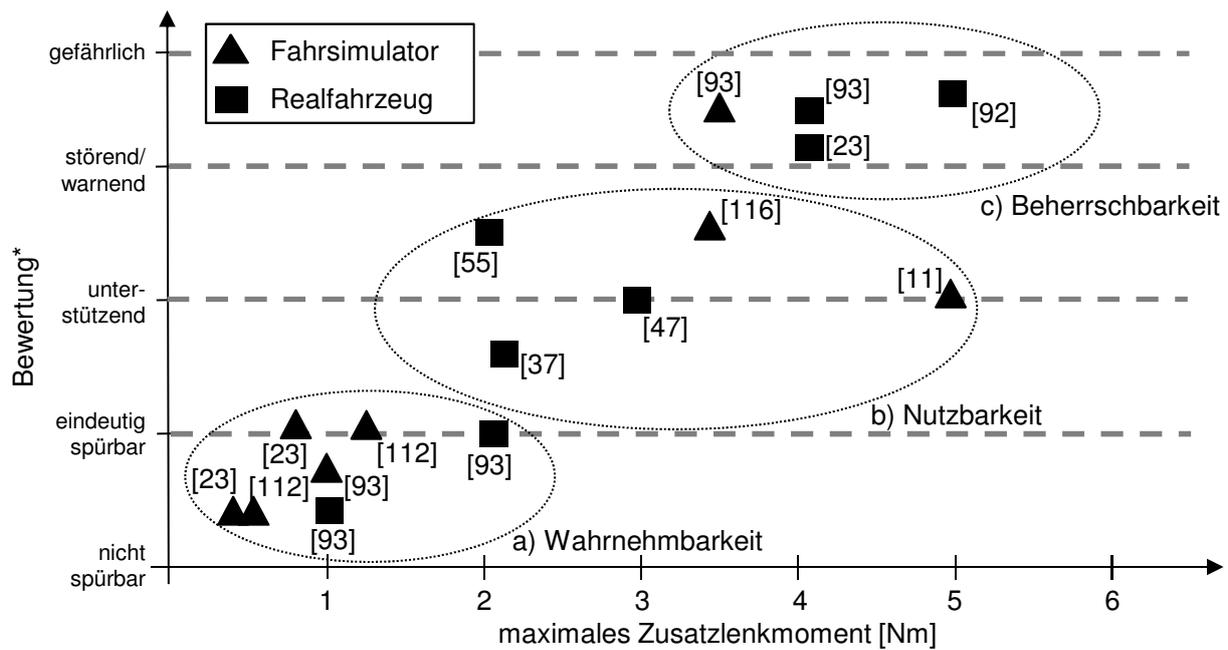


Bild 2.1.: Literaturbefunde aus empirischen Studien zur Interaktion mit Zusatzlenkmomenten (\*Bezeichnungen je nach Studie verschieden)

### a) Wahrnehmbarkeit

Der Schwerpunkt der meisten Untersuchungen liegt im Bereich der Wahrnehmbarkeit von Zusatzlenkmomenten, und zwar mit dem Ziel, menschliche Wahrnehmungsschwellen zu bestimmen, bei denen eine zuverlässige Erkennung des Moments durch den Fahrer erfolgt. Die in der Literatur ermittelten Ergebnisse unterscheiden sich dabei auffallend, was nicht nur mit der unterschiedlichen Versuchsgestaltung (beispielsweise im Fahr Simulator oder Realfahrzeug ermittelt) zusammenhängt, sondern auch maßgeblich durch die zahlreichen Einflüsse und Abhängigkeiten im menschlichen Wahrnehmungsprozess begründet ist. So konnte als Ergebnis der Untersuchungen in [111] die proportionale Abhängigkeit der Wahrnehmungsschwelle vom Ausgangslenkmoment nicht festgestellt und somit das Weber'sche Gesetz<sup>1</sup> der Psychophysik [39] nicht bestätigt werden. Buschardt [23] stellte zudem fest, dass Lenkmomentenänderungen während einer Lenkbewegung tendenziell früher wahrgenommen werden als bei einem unbewegten Lenkrad während einer stationären Fahrt. Bei der Analyse unterschiedlicher Signalformen wird die Aussage durchgängig bestätigt, dass Zusatzlenkmomente mit hohen Gradienten tendenziell früher wahrgenommen werden als solche mit niedrigen Gradienten [23, 93, 105, 111].

### b) Nutzbarkeit

Studien zur Nutzbarkeit untersuchen den Einfluss von Zusatzlenkmomenten auf das Fahrerverhalten mit dem Ziel, Aussagen über die Gestaltung eines Warnsignals oder einer Lenkmomentenempfehlung abzuleiten. Gegenstand der meisten Arbeiten ist die

<sup>1</sup>Weber zeigte im Rahmen von zahlreichen Studien, dass die Differenzschwelle, das heißt die minimale Differenz zwischen zwei haptischen Reizgrößen, keine Konstante ist, sondern proportional zum Stimulus zunimmt.

Ermittlung der Reaktionszeit vom Auftretenszeitpunkt des Zusatzlenkmoments bis zur messbaren Reaktion des Fahrers. Hier werden Zeiten zwischen 150 und 350ms genannt. Dies hängt davon ab, wie hoch der Gradient des Zusatzlenkmoments gewählt wurde und welche Kenngröße – erstes Extremum des Lenkwinkels in [105], erstes Extremum der Lenkwinkelgeschwindigkeit in [93], Lenkwinkeldifferenz  $> 2^\circ$  in [111] – zur Bestimmung der Fahrerreaktion maßgebend war. Auf die Darstellung der genauen Charakteristik eines Überlagerungsmoments zur Unterstützung des Fahrers wird in den meisten Quellen verzichtet. Wesentliche Parameter neben dem maximalen Moment bilden vor allem Gradient, Frequenz (bei Vibrationen) und Dauer der Aufschaltung. Bevorzugte Werte für das maximale Moment bewegen sich in dem Bereich von 2Nm für Warnsignale [37, 116] bis zu 5Nm [11, 47, 55] für Empfehlungen.

### c) Beherrschbarkeit

Von besonderer Bedeutung für die vorliegende Arbeit ist die Sicherstellung der vollständigen Übersteuerbarkeit eines Zusatzlenkmoments durch den Fahrer. Insbesondere vor dem Hintergrund, die Auswirkungen fehlerhaft erzeugter Lenkmomente abzuschätzen beziehungsweise zu kompensieren, wurden von Neukum [91, 93, 94] und Schmidt [106] grundlegende Untersuchungen zur „Controllability“ (vgl. ISO 26262 [4]) von Zusatzlenkmomenten durchgeführt. Obwohl in vielen Studien keine Auskunft über das maximale Moment erfolgt, zeigen die Untersuchungen einheitlich eine Abhängigkeit der Beherrschbarkeit überlagerter Lenkmomente zum einen von der Gestaltung des Moments und zum anderen von der jeweiligen Fahrsituation. Hinsichtlich der Gestaltung wird neben einer maximalen Amplitude des Zusatzlenkmoments auch eine Begrenzung des Gradienten gefordert, denn bei niedrigeren Gradienten werden Momente gleicher Amplitude vom Fahrer als unkritischer bewertet. Den Einfluss der Fahrsituation bewerten die Befunde aus der Literatur teilweise unterschiedlich. Während in [106] Kurvenfahrten als die kritischere Fahrsituation beurteilt werden – mit besonderer Auffälligkeit bei Aufschaltungen in Lenkrichtung (kurveninnen) – können weiterführende Untersuchungen in [93] diese Aussagen nur im mittleren Amplitudenbereich bestätigen. Bei hohen, für die Beherrschbarkeit relevanten Amplitudenbereichen sind keinerlei systematische Unterschiede zwischen Kurve und Gerade feststellbar, weder in der Fahrerbeurteilung noch bei den objektiven Kenngrößen. Weiterführend lässt sich die Fahrerbeurteilung nicht lediglich auf das Moment selbst zurückführen, sondern die durch das Moment induzierte Fahrzeugreaktion scheint auch maßgebend auf die Bewertungsgröße des Fahrers Einfluss zu nehmen. Ob und in welchem Ausmaß die Ergebnisse generalisiert und auf andere Fahrzeuge, Fahrer oder Fahrsituationen übertragen werden können, bleibt zukünftigen Studien vorbehalten.

Für die Entwicklung eines Assistenzsystems, das überlagerte Lenkmomente zur Unterstützung des Fahrers verwendet, ist es somit von grundlegender Bedeutung, die Auswirkungen des Moments auf das Gesamtverhalten von Fahrer und Fahrzeug abbilden und insbesondere eingrenzen zu können. Befunde aus der Literatur stellen hierzu zahlreiche Grundbausteine zur Verfügung, schließen aber aufgrund der verschiedenen

Methoden mit teilweise unterschiedlichen Erkenntnissen ab.

Ziel des vorliegenden Kapitels ist es daher, die Beziehungen zwischen Zusatzlenkmoment und Reaktion des Fahrers systematisch zu untersuchen und mithilfe objektiver fahrzeugunabhängiger Kenngrößen den Sachverhalt zu quantifizieren. Als Methode dient eine Probandenstudie mit Normalfahrern, für die in einer Versuchsumgebung – sehr nah an einer realen Fahrsituation – diskrete Zusatzlenkmomente am Lenkrad überlagert werden. Mit der Untersuchung werden Aussagen zu den folgenden Inhalten angestrebt:

- 1.) Einfluss der Momentengestaltung (maximales Moment und Gradient) auf die Reaktion des Fahrers.
- 2.) Objektive fahrzeugunabhängige Grenzwerte zur Bestimmung eines für den Fahrer maximal zumutbaren Lenkmoments durch ein Assistenzsystem.
- 3.) Fahrerindividuelle Streuungen in der Reaktion unterschiedlicher Fahrer auf die gleiche Lenkmomentenüberlagerung.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen legen die Basis für die Gestaltung einer Lenkmomentenempfehlung. Im Rahmen dieses Kapitels wird die durchgeführte Studie detailliert vorgestellt sowie die Vorgehensweise hinsichtlich der Aufschaltung diskreter Zusatzlenkmomente bei Geradeausfahrt kritisch diskutiert. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf eine Lenkmomentenempfehlungssituation, bei der der Fahrer in eine bestimmte Richtung geführt werden soll, wird grundsätzlich begründet und mit Beispielen fundiert. Mithilfe der zugrunde gelegten Kenngrößen und Bewertungskriterien werden schließlich Aussagen zur Auswirkung von Zusatzlenkmomenten in Abhängigkeit vom maximalen Moment und Gradient abgeleitet (Punkt 1). Tief greifende Untersuchungen zur Beherrschbarkeit von Zusatzlenkmomenten sowie von fahrsituationsspezifischen und fahrerindividuellen Unterschieden in den Reaktionsmustern (Punkte 2–3) sind Gegenstand folgender Betrachtungen in Kapitel 3. Die hier ermittelten Abhängigkeiten werden in Kapitel 4 dazu genutzt, einen Lenkassistenten für fahrdynamische Grenzsituationen auszulegen, mit dem Ziel, dem Fahrer eine optimale Empfehlung zur Stabilisierung des Fahrzeugs zu bieten.

## 2.1. Vorgehensweise und Randbedingungen

Die hier aufgeführten Untersuchungen basieren zum Teil auf der in [92] publizierte Studie zur Darstellung der Auswirkung von Zusatzlenkmomenten. Die ermittelten Ergebnisse über die Nutzbarkeit und Beherrschbarkeit von Lenkmomentenempfehlungen werden im Rahmen dieses und des folgenden Kapitels insbesondere hinsichtlich der Streuungen einzelner Fahrerreaktionen bei gleichem Zusatzlenkmoment erweitert. Zusätzlich zu der im folgenden Teilabschnitt vorgestellten Studie werden weitere Einzelversuche durchgeführt, die anschließend separat aufgeführt werden.

### 2.1.1. Versuchsgestaltung

Aus vorangegangenen Studien [93,106] ist bekannt, dass das maximal zumutbare Lenkmoment nicht nur eine Abhängigkeit von der Höhe des Moments aufweist, sondern dass die daraus resultierende Lenkwinkel- beziehungsweise Fahrzeugreaktion einen maßgebenden Einfluss auf das Urteilsvermögen des Fahrers hat. Dieses impliziert allerdings, dass die für ein Fahrzeug festgestellten Momentengrenzwerte spezifisch sind und nicht ohne Weiteres auf andere Fahrzeuge übertragen werden können. Um allgemeingültige Grenzwerte zur Beherrschbarkeit von Zusatzlenkmomenten festlegen zu können, müssen die querdynamischen Übertragungseigenschaften des jeweiligen Fahrzeugs mit einbezogen werden.

Der Einsatz mehrerer Fahrzeuge mit unterschiedlichen Querdynamikeigenschaften ist aber im Rahmen einer Probandenstudie nur bedingt zielführend. Durch den häufigen Wechsel der Fahrzeuge ändert sich auch die Versuchsumgebung für den Probanden, wodurch sein Urteilsvermögen nicht nur auf die Bewertung des Zusatzlenkmoments beschränkt bleibt. Unterschiede in der Sitzposition, der Form des Lenkrads und/oder der Fahrzeugakustik sind nur einige der möglichen Einflussgrößen. Hinzu kommt, dass die Fahrzeuge meist mit unterschiedlichen Lenksystemen ausgestattet sind, wodurch Zusatzlenkmomente verschiedenartige Auswirkungen finden [41, 44, 57].

Damit die subjektive Bewertung der Probanden nicht maßgebend durch Störgrößen beeinflusst wird, müssen Änderungen in der Versuchsumgebung für den Fahrer so wenig wie möglich bemerkbar sein. Für die Variation der Fahrzeug-Querdynamikeigenschaften wurden deshalb im Rahmen der Studie nicht unterschiedliche Fahrzeuge verwendet, sondern mithilfe eines AFS die Lenkübersetzung  $i_G$  variabel gestaltet.  $i_G$  bezeichnet dabei das Verhältnis vom Winkel am Lenkrad zum Winkel am Vorderrad des Fahrzeugs

$$i_G = \frac{\delta_{LW}(t)}{\delta_{RW}(t)} \quad (2.1)$$

unter der Annahme einer konstanten Kinematik der Radaufhängungen. Mithilfe dieser variablen Gestaltung von  $i_G$  wirkt sich ein vom Fahrer aufgebracht Lenkwinkel unterschiedlich auf den Ritzelwinkel  $\delta_{RI}$  und damit den resultierenden Radwinkel aus. Die querdynamische Reaktion des Fahrzeugs kann somit bei gleichem Lenkbefehl des Fahrers verstärkt ( $i_G$  kleiner) oder gedämpft ( $i_G$  größer) werden.

Diese Übersetzungsänderung realisiert das AFS mithilfe eines Überlagerungsgetriebes. In Kombination mit einem Elektromotor kann unter Berücksichtigung der mechanisch festgelegten Übersetzungen  $i_{LG}$  und  $i_{AFS}$  ein Zusatzwinkel  $\delta_{AFS}$  zu dem vom Fahrer vorgegebenen Lenkwinkel addiert (direktere Lenkübersetzung) oder subtrahiert (indirektere Lenkübersetzung) werden:

$$\delta_{RI}(t) = \frac{1}{i_{LG}} \delta_{LW}(t) + \frac{1}{i_{AFS}} \delta_{AFS}(t). \quad (2.2)$$

Die Winkelüberlagerung findet im Rahmen der Versuche nur während einer Lenkbewegung des Fahrers statt. Der aufgrund der mechanischen Verbindung rückwirkende Einfluss

auf das resultierende Lenkmoment ist in diesem Fall so gering, dass er vom Fahrer nicht spürbar ist [86].

Zusätzlich zum AFS besitzt der Versuchsträger eine EPS, mit deren Hilfe auch das Lenkmoment beeinflusst werden kann. Mit der Kombination aus beiden Systemen lassen sich sowohl der Lenkwinkel als auch das Lenkmoment unabhängig von der regulären Lenkkennlinie des Fahrzeugs und somit unabhängig vom Radwinkel  $\delta_{RW}$  und der Zahnstangenkraft  $F_Z$  variieren (Bild 2.2).

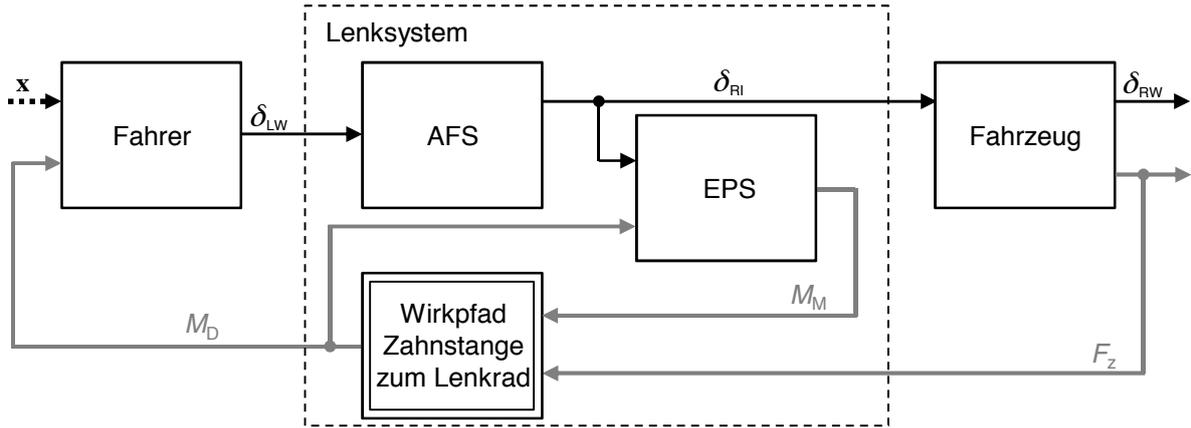


Bild 2.2.: Lenkwinkel- und Lenkmomentenpfad im Gesamtregelkreis Fahrer und Fahrzeug

Für die folgende Studie bedeutet diese Konstellation, dass mithilfe des Unterstützungsmoments  $M_M$  ein Moment  $M_D$  am Lenkrad geregelt wird, welches durch ein Zusatzlenkmoment  $M_Z$  überlagert sein kann. Dieses Moment induziert durch die Reaktion des Fahrers einen Lenkwinkel und eine entsprechende Fahrzeugreaktion, die von der geregelten Lenkübersetzung durch das AFS abhängig ist.  $M_D$  und  $\delta_{RW}$  sind somit funktionale Freiheitsgrade und können im gleichen Versuchsträger unabhängig voneinander beeinflusst werden.

Die Auswirkung einer Übersetzungsänderung auf das Fahrzeugverhalten kann vereinfacht aus den Gleichungen des Einspurmodells

$$m v \left( \omega(t) + \dot{\beta}(t) \right) = c_v \left( \delta_{LW}(t) i_G - \beta(t) - \frac{l_v \omega(t)}{v} \right) - c_h \left( \beta(t) - \frac{l_h \omega(t)}{v} \right), \quad (2.3)$$

$$\theta \dot{\omega}(t) = l_v c_v \left( \delta_{LW}(t) i_G - \beta(t) - \frac{l_v \omega(t)}{v} \right) + l_h c_h \left( \beta(t) - \frac{l_h \omega(t)}{v} \right) \quad (2.4)$$

(vgl. [89]) abgeleitet werden, wobei mit  $\omega(t)$  die zeitliche Ableitung von der Gierrate  $\dot{\psi}(t)$  bezeichnet wird. In Abhängigkeit vom Lenkwinkel  $\delta_{LW}$ , von der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  und weiteren fahrzeugindividuellen Parametern, wie die Masse  $m$ , Trägheit  $\theta$ , Radsteifigkeiten  $c_v$  und  $c_h$  sowie den Fahrzeuflängen  $l_v$  und  $l_h$ , werden die beiden Fahrzustände Schwimmwinkel  $\beta$  und Gierrate  $\omega$  abgebildet. Dabei beschränkt sich der Arbeitspunkt, in dem das Modell Gültigkeit besitzt, auf den normalen Fahrbereich mit Querschleunigungen bis zu  $4m/s^2$ . Wesentliche Annahmen zur vereinfachten Darstellung sind, dass

- die beiden linken und rechten Räder jeweils achsweise zusammengefasst werden,
- die Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  konstant ist,
- keine Wank-, Hub- und Nickbewegungen eintreten und
- die gesamte Masse in einem Schwerpunkt zusammengefasst werden kann.

Mit der Verknüpfung von Gleichung 2.3 und Gleichung 2.4 lässt sich die Beziehung zwischen dem Lenkwinkel und der Gierrate als System 2. Ordnung ableiten, mit

$$\frac{\Omega(s)}{\delta_{\text{LW}}(s)} = \frac{c_v c_h l}{\theta m v i_G} \frac{1 + \frac{m v l_v}{c_h l} s}{s^2 + \frac{\theta (c_v + c_h) + m(c_v l_v^2 + c_h l_h^2)}{\theta m v} s + \frac{(m v^2 (c_h l_h - c_v l_v) + c_v c_h l^2)}{\theta m v^2}}. \quad (2.5)$$

Bei Betrachtung des Parameters  $i_G$  in Gleichung 2.5 wird deutlich, dass die Lenkübersetzung lediglich als konstante Größe auf den Verstärkungsfaktor der Übertragungsfunktion einwirkt. Sie erhöht die stationäre Gierverstärkung des Fahrzeugs, je kleiner ihr Wert, also je direkter das Fahrzeug ausgelegt ist. Bild 2.3 zeigt den Frequenzgang der Gierübertragungsfunktion und die dazugehörige Sprungantwort auf einen Lenkwinkel von  $20^\circ$  am Lenkrad. Die dargestellte Dynamik entspricht dem Verhalten des im Rahmen der Studie verwendeten Versuchsträgers bei einer Fahrgeschwindigkeit von 100km/h. Der Übersicht wegen erfolgt keine logarithmische Darstellung der Amplitude, und der Frequenzgang wird in Hertz aufgeführt.

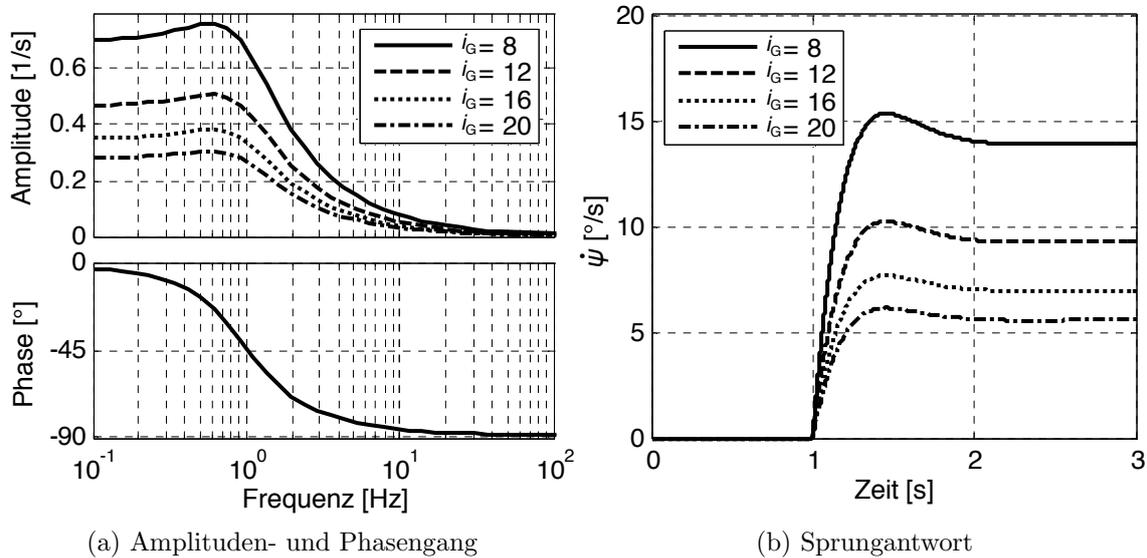


Bild 2.3.: Frequenzgang und Sprungantwort der Gierrateübertragungsfunktion für unterschiedliche Lenkübersetzungen  $i_G$

Der große Einfluss der Lenkübersetzung auf die stationäre Gierverstärkung ist sowohl aus der Sprungantwort (Bild 2.3b) als auch am Amplitudenverhältnis bei kleinen Anregungsfrequenzen erkennbar (Bild 2.3a). Je direkter die Übersetzung ist, desto größer fällt auch der Unterschied der Amplitudenüberhöhung im Bereich der (Lenk-)Eigenfrequenz des Fahrzeugs aus (hier bei etwa 0,6Hz). Bei indirekten Übersetzungen ist die Gierdämpfung

so hoch, dass kaum Resonanzüberhöhungen erkennbar sind. Der Phasengang zwischen Lenkwinkel und Gierrate wird durch die Lenkübersetzung nicht beeinflusst.

Im Rahmen der Versuchsdurchläufe werden die Probanden mit Zusatzlenkmomenten konfrontiert, die mithilfe der EPS am Drehstab erzeugt werden. Die Momente weisen einen rampenförmigen Anstieg mit maximalen Amplituden  $M_Z$  zwischen 3 und 6Nm auf (bei hohen Gradienten zusätzlich auch 2Nm). Um den Einfluss von unterschiedlichen Signalformen zu untersuchen, werden auch die Gradienten  $G$  des Zusatzlenkmoments im Bereich von 10 bis 250Nm/s variiert (Bild 2.4). Voruntersuchungen bestätigen, dass für eine systematische Untersuchung unterschiedlicher Signalcharakteristiken die Variation des Gradienten besser geeignet ist als die Verwendung häufig eingesetzter Sinus- oder Dreiecksignalformen [111]. Die Dauer jedes Eingriffs beträgt 3s; danach wird das anliegende Moment langsam ausgeblendet. Durch das AFS werden die Übersetzungen 8, 10, 12, 16 und 20 realisiert, um eine große Bandbreite von unterschiedlichen Querdynamikeigenschaften abzudecken. Dabei handelt es sich bei den Übersetzungen 8 (sehr direkt) und 20 (sehr indirekt) um Varianten, die in Serienfahrzeugen nicht umgesetzt werden und hier lediglich zur Verdeutlichung der Einflüsse realisiert sind.

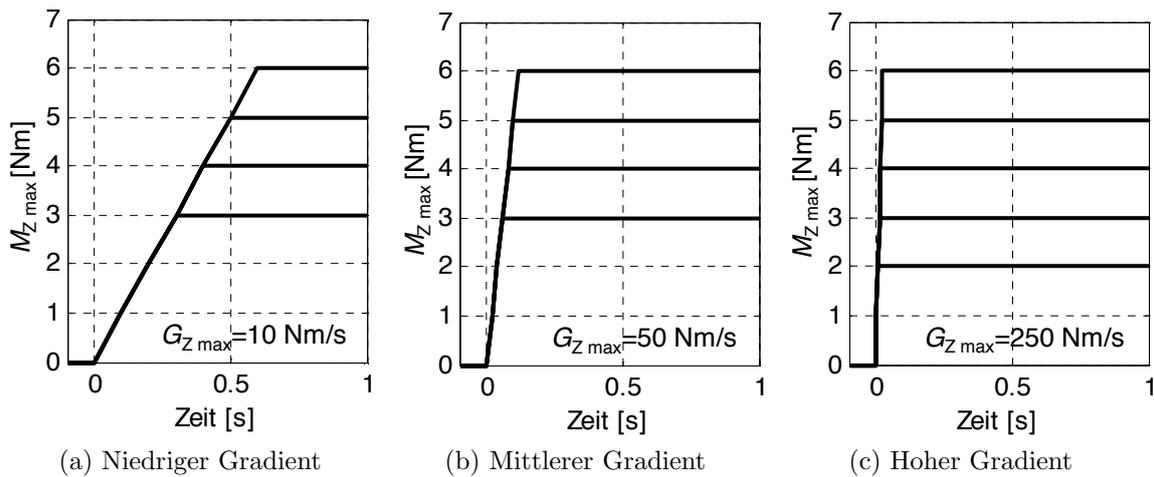


Bild 2.4.: Niveau und Gradienten-Varianten der im Rahmen der Studie untersuchten Zusatzlenkmomente

Insgesamt nehmen 16 Frauen und 14 Männer im Alter von 23 bis 73 Jahren (Median: 35 Jahre) an der Studie teil. Bei den Fahrern handelt es sich um geübte Normalfahrer, die fachlich nicht in die Thematik eingebunden sind. Mit der erforderlichen Einweisung und einem Probedurchlauf werden etwa 2,5 Stunden Versuchsdauer für jeden Probanden eingeplant. Ihre Fahraufgabe besteht darin, eine etwa 1km lange gerade Strecke abzufahren, die durch Pylonen gekennzeichnet ist. Da sich eine Störung bei Geradeausfahrt mit begrenzter Fahrbahnbreite am stärksten auswirkt [105], wird die Breite des Parcours entsprechend üblicher Baustellenbedingungen gewählt [6]. Bei der Durchfahrt dieses Parcours mit der vorgeschriebenen Fahrgeschwindigkeit von 100km/h wird der Fahrer einmalig mit einem Zusatzlenkmoment konfrontiert. Dabei sind alle der oben genannten Momenten- und Übersetzungsvarianten von jedem Fahrer zu durchfahren. Um insbesondere die kriti-

sche Auswirkung des Zusatzlenkmoments zu untersuchen, werden die Fahrer aufgefordert, das Lenkrad nur mit der linken Hand (etwa 7 Uhr) locker zu halten.

### 2.1.2. Bewertungskriterien

Für die objektive Bewertung der Fahrer- und Fahrzeugreaktion werden standardmäßig vorhandene Signale von Lenksystem und Fahrzeug genauer betrachtet. Hierzu zählen zum einen Größen, die das Lenkverhalten des Fahrers abbilden (Lenkwinkel  $\delta_{LW}$ , Lenkgeschwindigkeit  $\dot{\delta}_D$ , Lenkmoment  $M_{LR}$ ), und zum anderen Größen, die eine Beschreibung des resultierenden Fahrzeugverhaltens vornehmen, wie beispielsweise die Gierrate  $\dot{\psi}$  und die Querbeschleunigung  $a_y$ . Da das Fahrmanöver insgesamt eine geringe Dynamik aufweist, wird auf die Bewertung von zusätzlichen Größen wie Schwimmwinkel  $\beta$  oder Referenzgierrate  $\dot{\psi}_{ref}$  verzichtet.

Aus dem zeitlichen Verlauf der einzelnen Signale werden Kenngrößen zur Bewertung des Zusatzlenkmoments  $M_Z$  definiert, die aus der gesamtheitlichen Menge aller Messungen automatisiert ermittelt werden. Die Kenngrößen bestimmen sich aus den Werten der ersten beiden Extrema ( $E_1$  und  $E_2$ ) sowie dem Zeitpunkt ihres Auftretens nach Beginn der Störung ( $T_1$  und  $T_2$ ). Bild 2.5 stellt am Beispiel des induzierten Lenkwinkels einen schematischen Überblick der ermittelten Kenngrößen dar.

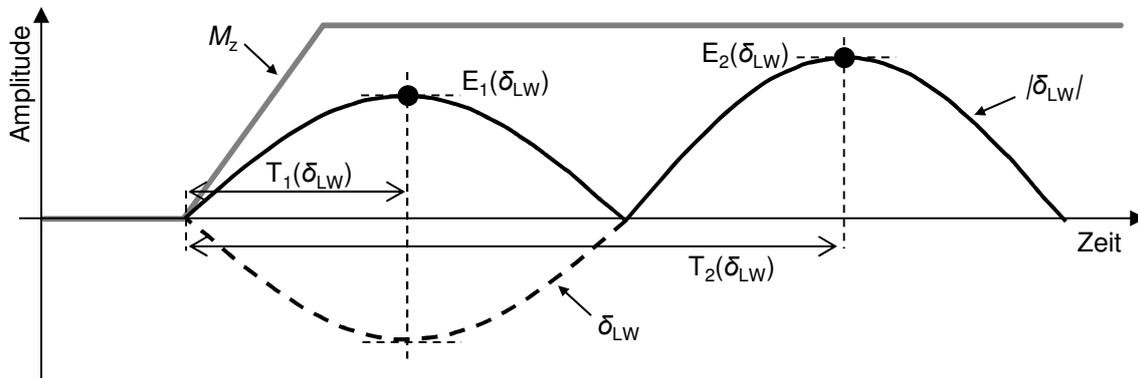


Bild 2.5.: Definition von objektiven Kenngrößen am Beispiel des induzierten Lenkwinkels

### 2.1.3. Diskussion

Grundsätzlich bedeutet eine Lenkmomentenempfehlung, dass der Fahrer mithilfe von Zusatzlenkmomenten zu einer Lenkbewegung motiviert beziehungsweise in eine bestimmte Richtung geführt werden soll. Die für diese Studie angewendeten diskreten Zusatzlenkmomente erfordern allerdings eine Gegenreaktion des Fahrers, damit das Fahrzeug seinem ursprünglichen Kurs wieder folgen kann. Die Frage nach der Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf eine Lenkmomentenempfehlung soll an dieser Stelle diskutiert werden.

Im Gegensatz zu einer Lenkmomentenempfehlungssituation zielt der in Abschnitt 2.1 vorgestellte Versuch darauf ab, die Auswirkungen eines Zusatzlenkmoments auf das Fahrer-

und Fahrzeugverhalten zu untersuchen. Dabei ist neben dem generellen Einfluss des Lenkmoments auch der Einfluss unterschiedlicher Amplituden und Gradienten von Bedeutung, die unter Berücksichtigung verschiedener Fahrer oder Fahrsituationen betrachtet werden müssen. Zusätzlich hierzu sind Aussagen hinsichtlich der Beherrschbarkeit von Zusatzlenkmomenten durch die Fahrer zu generieren. Um den hohen Sicherheitsanforderungen an Assistenzsysteme für den fahrdynamischen Grenzbereich gerecht werden zu können, muss die Empfehlung jederzeit und unter allen Bedingungen vom Fahrer übersteuert werden können. Dies gilt insbesondere, wenn der Fahrer bewusst entgegengesetzt der Lenkmomentenempfehlung lenken möchte, beispielsweise, um ein Hindernis zu umfahren. Aus diesem Grund werden im Rahmen dieser Studie diskrete Zusatzlenkmomente verwendet, die eine Gegenreaktion des Fahrers zur Fahrzeugstabilisierung erfordern. Diese haben zudem den Vorteil, dass sie unabhängig von der Fahrsituation reproduzierbar gestaltet werden und eindeutig in Gradient und Amplitude variiert werden können. Die Untersuchung des Mehrwerts, der durch eine tatsächliche Lenkmomentenempfehlung zu erwarten ist, erfolgt in Kapitel 5.

## 2.2. Auswirkung von Zusatzlenkmomenten

Zur Darstellung der Auswirkungen eines Zusatzlenkmoments auf das Fahrer- und Fahrzeugverhalten erfolgt in Bild 2.6 eine gegenüberstellende Betrachtung von Reaktionen mit Fahrereinfluss (Hands-On) und ohne Fahrereinfluss (Hands-Off). Um das generelle Verhalten zu beschreiben, ist im Hands-On Fall die Reaktion eines ausgewählten Fahrers aufgeführt, der ein klassisches Beispiel für den zeitlichen Verlauf des Lenkwinkels und der resultierenden Gierrate darstellt. Für alle anderen Fahrten und Fahrer ist ein vergleichbarer zeitlicher Verlauf jedoch unterschiedliche Ausprägungen der Extrema zu erwarten (vgl. Kapitel 3.2). Der dargestellte Verlauf der beiden Größen im Hands-Off Fall ist bei gleichem Zusatzlenkmoment reproduzierbar mit gleicher Ausprägung. Das hier aufgeführte Zusatzlenkmoment weist in beiden Fällen eine maximale Amplitude von 5Nm auf, bei einem Gradienten von 50Nm/s und einer Lenkübersetzung von 16.

Grundsätzlich ruft das von der EPS am Drehstab des Fahrzeugs aufgebrachte Zusatzlenkmoment eine Drehbewegung des Lenkrads hervor, die der Richtung der Aufschaltung entgegengesetzt ist. Das Moment muss zumindest in der Höhe gestaltet sein, dass die Trägheit des Lenkrades sowie die Haltekraft des Fahrers überwunden werden können. Dabei ist das vom Fahrer spürbare Moment nicht lediglich das eingeregelter Drehstabmoment, sondern proportional zur Trägheit des Lenkrads und der Lenksäule aufzufassen. Erkennbar werden diese Einflüsse bei Betrachtung der Lenkwinkelverläufe (Bild 2.6a). Das angeforderte Zusatzlenkmoment kann mithilfe des EPS-Stellers sofort umgesetzt werden. Bedingt durch die auftretenden Trägheiten im Wirkpfad zwischen EPS-Motor und Lenkrad erfolgt im Hands-Off-Fall erst nach etwa 60ms eine Drehbewegung des Lenkrads. Befindet sich der Fahrer im Regelkreis, ist aufgrund seiner dämpfenden Lenkradhaltung eine zusätzliche Totzeit  $\Delta t_F$  von 30 bis 40ms zu erkennen.

Während im Hands-Off-Fall der Lenkwinkel kontinuierlich ansteigt, bis die Rückstell-

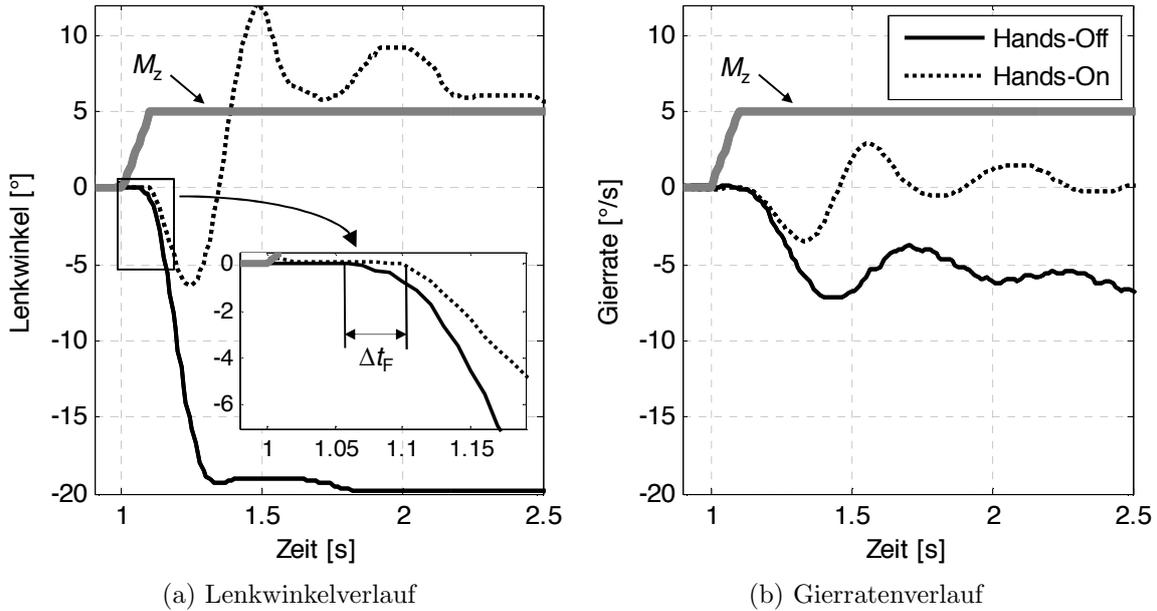


Bild 2.6.: Lenkwinkel- und Gierratenverlauf bei einer Lenkmomentenüberlagerung von 5Nm (mit und ohne Fahrereinfluss)

kräfte an den Rädern die von der EPS aufgebrachte Kraft kompensieren, beginnt im Hands-On-Fall der Fahrer hier etwa 0,25s nach der Aufschaltung eine aktive Gegenlenkreaktion, um das Fahrzeug auf der gewünschten Fahrbahn zu halten. Bei der Betrachtung der Gierraten (Bild 2.6b) wird das zugehörige Fahrzeugverhalten erkennbar. Etwa 100ms nach Eintreten des Zusatzlenkmoments ist bei diesem Fahrzeug eine eindeutige Reaktion messbar. Im Hands-Off-Fall führt das Fahrzeug bei dem konstant anliegenden Moment eine stationäre Kurvenfahrt mit nahezu konstanter Gierrate aus. Befindet sich der Fahrer im Regelkreis, werden die Einflüsse des Zusatzlenkmoments durch die Lenkbewegung des Fahrers kompensiert, sodass die Gierrate um die Null-Lage geführt wird und das Fahrzeug die Geradeausfahrt fortsetzt.

### Einfluss von Amplitude und Gradient

Die Gestaltung der Signalcharakteristik einer Momentenüberlagerung bietet grundsätzlich die beiden Freiheitsgrade maximale Amplitude und Gradient. Das Verständnis über die unterschiedlichen Auswirkungen dieser beiden Parameter auf das Fahrer- und Fahrzeugverhalten ist von grundlegender Bedeutung für die Auslegung eines Lenkassistenten. Für unterschiedliche maximale Amplituden des Zusatzlenkmoments ( $M_{Z \max}$ ) zeigt Bild 2.7 den zeitlichen Verlauf von Lenkwinkel und Gierrate jeweils mit und ohne Fahrereinfluss. Allen Messungen liegen eine konstante Lenkübersetzung von 16 und ein Gradient des Zusatzlenkmoments ( $G_{Z \max}$ ) von 50Nm/s zum Zeitpunkt  $t = 1s$  zugrunde.

Befindet sich der Fahrer nicht im Regelkreis (Bild 2.7a), erfolgt nahezu proportional zu  $M_{Z \max}$  ein größerer Wert für den induzierten Lenkwinkel. Für alle  $M_{Z \max}$  ist dabei der mittlere Gradient des Lenkwinkels bis zum Erreichen des Maximalwerts identisch und liegt bei etwa 110°/s. Ist das angeforderte Zusatzlenkmoment erreicht, führt das

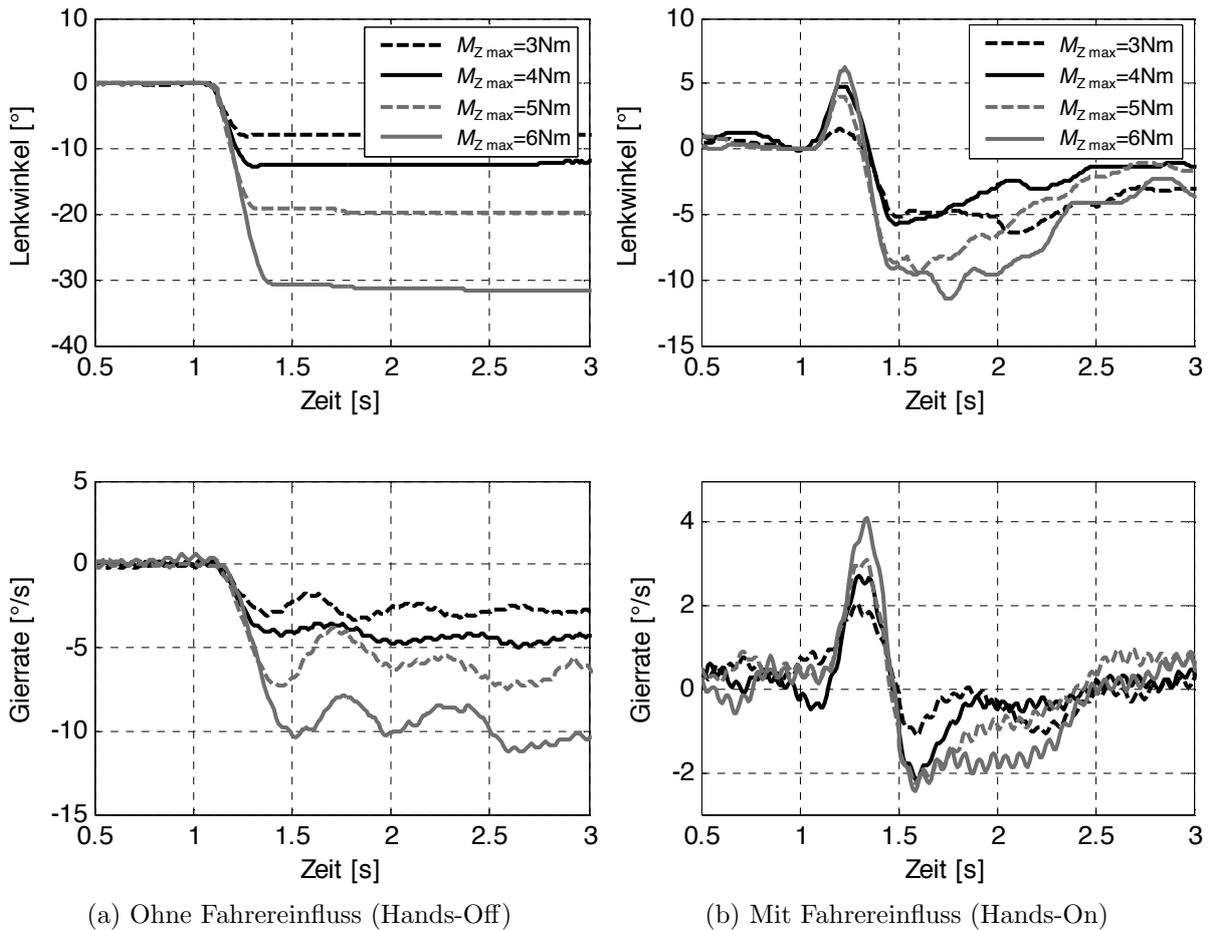


Bild 2.7.: Einfluss von  $M_{Z \max}$  auf den Lenkwinkel und die Gierrate des Fahrzeugs ( $i_G=16$ )

Kräftegleichgewicht an den Vorderrädern des Fahrzeugs zu einer nahezu stationären Kreisfahrt mit konstantem Lenkwinkel.

Bei Fahrten mit Beteiligung des Fahrers (Bild 2.7b) lassen sich deutliche Abhängigkeiten der Fahrerreaktion von  $M_{Z \max}$  erkennen. Je höher das Moment, desto stärker erscheint die Ausprägung der Lenkreaktion und somit die resultierende Fahrzeugbewegung – erkennbar bei Betrachtung der jeweiligen Extrema<sup>2</sup>. Im Gegensatz zum Hands-Off-Fall hat das maximale Moment hier auch Einfluss auf die Schnelligkeit der Lenkbewegung. Während bei einem Zusatzlenkmoment von 3Nm der Fahrer eine langsame und wenig ausgeprägte Gegenlenkbewegung einleitet (maximale Lenkgeschwindigkeiten von  $60^\circ/\text{s}$ ), sind bei höheren Momenten höhere und deutlich schnellere Lenkbewegungen aus den Messungen erkennbar.

Zur Untersuchung des Gradienten als weiteren Freiheitsgrad bei der Gestaltung von Zusatzlenkmomenten wird analog zu Bild 2.7 der zeitliche Verlauf der beiden Messgrößen bei unterschiedlichen Gradienten des angeforderten Zusatzlenkmoments betrachtet (Bild 2.8). Dabei wird bei allen Messungen ein maximales Lenkmoment von 5Nm zum Zeitpunkt  $t = 1\text{s}$  überlagert.

<sup>2</sup> Unterschiede hinsichtlich der Reihenfolge der Lenkwinkel- und Gierratenextrema sind auf geringfügige Unterschiede in der Fahrzeuggeschwindigkeit zurückzuführen.

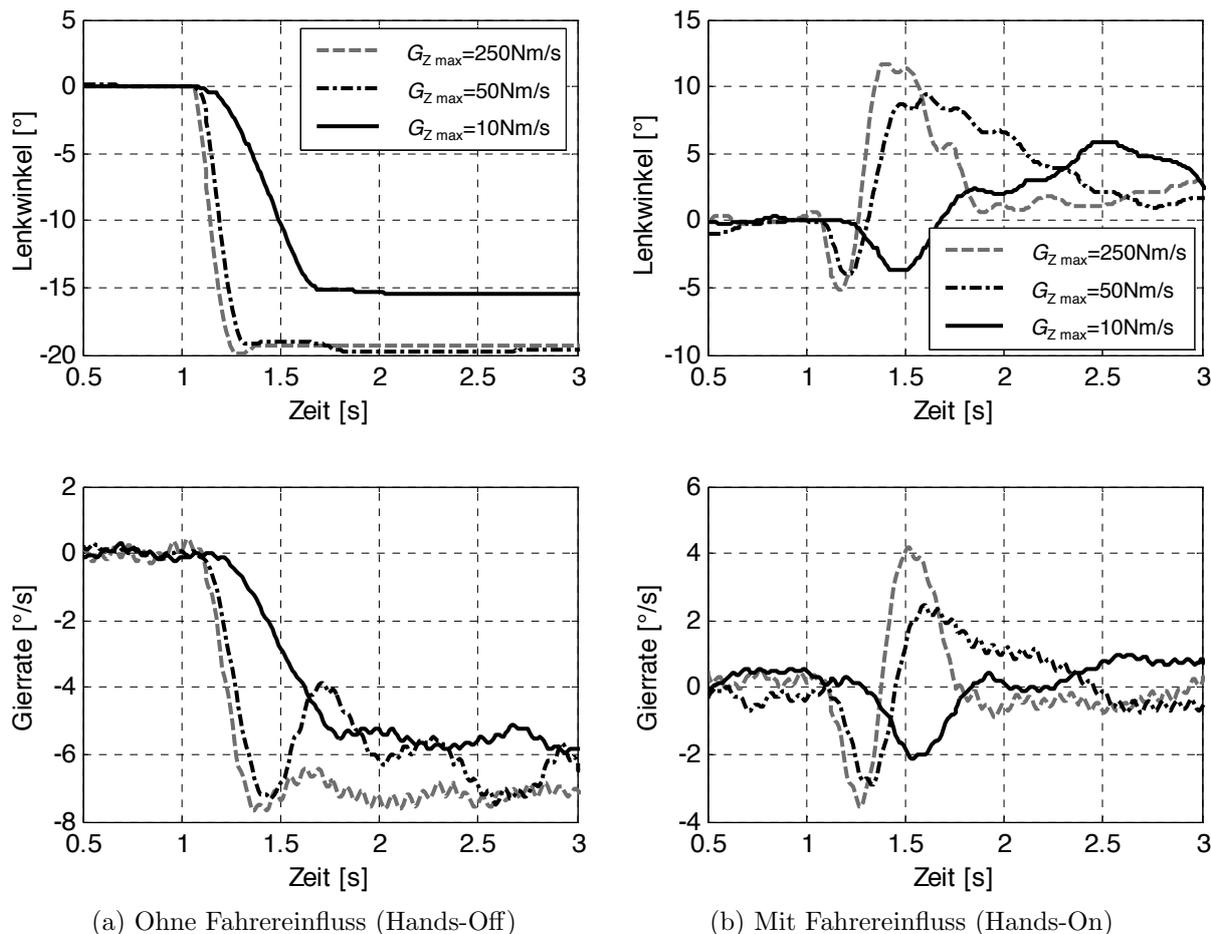


Bild 2.8.: Einfluss von  $G_{Z\max}$  auf den Lenkwinkel und die Gierrate des Fahrzeugs ( $i_G=16$ )

Wie zu erwarten ist, wird für den Hands-Off-Fall (Bild 2.8a) aufgrund des langsameren Momentenanstiegs die Dynamik des Lenkwinkels und der Gierrate durch den Gradienten stark beeinflusst. Insbesondere bei  $10\text{Nm/s}$  tritt der maximale Lenkwinkel (hier etwa  $-16^\circ$ ) knapp  $500\text{ms}$  später ein als bei den höheren Gradienten. Im Vergleich zum Einfluss des maximalen Moments (Bild 2.7a) scheint der Gradient aber einen verhältnismäßig geringen Einfluss auf den resultierenden Maximalwert der jeweiligen Kenngröße zu haben. Bei den höheren Gradienten  $50$  und  $250\text{Nm/s}$  sind die maximalen Lenkwinkel von  $-19^\circ$  sogar identisch. Das Verhalten beim Hands-On-Fall (Bild 2.8b) wirkt sich allerdings unterschiedlich aus. Bei den beiden höheren Gradienten erfolgt die Lenkreaktion des Fahrers ähnlich mit leichter zeitlicher Verzögerung bei  $50\text{Nm/s}$ . Bei dem niedrigen Gradienten ist die Reaktionssystematik gänzlich verschieden. Es erfolgt eine deutlich verzögerte und von der Ausprägung geringere erste Lenkreaktion. Sie dauert allerdings länger als bei hohen Gradienten. Folglich fällt auch die Gegenreaktion gedämpfter aus, dauert dafür aber viel länger, damit das Fahrzeug wieder auf die gewünschte Spur geführt werden kann. Obwohl das Spurverhalten des Fahrzeugs nicht gemessen wurde, lässt es sich vermuten, dass die maximale Spurabweichung bei verschiedenen Gradienten vergleichbar ausgefallen ist.

Zur systematischen Untersuchung und genaueren objektiven Eingrenzung dieser Befunde werden die in Kapitel 2.1.2 definierten Kennwerte über alle durchgeführten Fahrten und Probanden ermittelt und in Abhängigkeit von  $M_{Z\max}$  und  $G_{Z\max}$  statistisch gegenübergestellt. Dabei ist es für die Bestimmung von genauen Schwellwerten nicht zielführend die definierten Kenngrößen über verschiedene Probanden zu mitteln, da die Reaktionsausprägungen unterschiedlicher Fahrer den Mittelwert beeinflussen. Um aber im ersten Schritt eine Tendenz der jeweiligen Abhängigkeiten zu erhalten, bietet sich diese vereinfachte Herangehensweise an. Bild 2.9 stellt exemplarisch für die durch das Moment induzierte Lenkreaktion (Bild 2.9a) und die entstandene Fahrzeugreaktion (Bild 2.9b) den Median des ersten Extremums und den zugehörigen Auftretenszeitpunkt gegenüber. Da die Absolutwerte eine hohe Abhängigkeit von der zugrunde liegenden Lenkübersetzung zeigen (vgl. Kapitel 2.1.1), werden in der Abbildung nur Messungen berücksichtigt, die bei einer konstanten Lenkübersetzung von  $i_G=16$  durchgeführt wurden. Dieser Wert stellt für heutige Serienfahrzeuge eine realistische Lenkübersetzung dar.

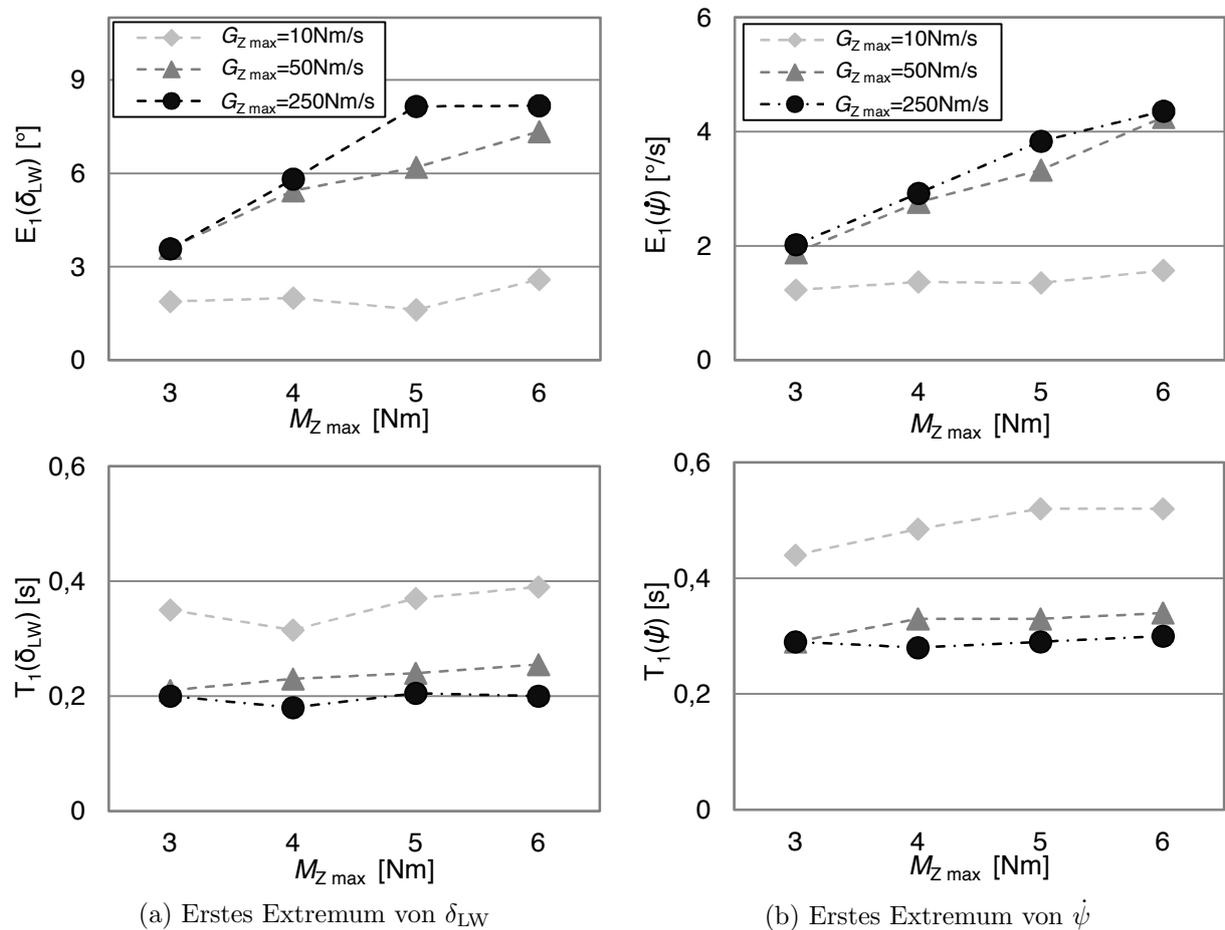


Bild 2.9.: Median von Amplitude und Auftretenszeitpunkt verschiedener Kenngrößen bei  $i_G=16$

Die Abbildung zeigt, dass sich die Beträge der beiden Extrema  $E_1(\delta_{LW})$  und  $E_1(\dot{\psi})$  mit der Höhe des Zusatzlenkmoments unterschiedlich auswirken, je nachdem wie hoch der Gradient gewählt wird. Bei den mittleren und höheren Gradienten (50Nm/s und

250Nm/s) erscheint dieser Anstieg im absoluten Verhalten der Kenngrößen linear zu  $M_{Z \max}$  zu sein. Durch das höhere Moment fällt der induzierte Lenkwinkel bis zur Einleitung der Gegenlenkbewegung des Fahrers höher aus, woraus eine stärkere Gierreaktion des Fahrzeugs resultiert. Je höher das Moment, desto größer ist aber auch die Streuung zwischen den einzelnen Fahrerreaktionen. Bei niedrigen Gradienten (10Nm/s) ist keine systematische Abhängigkeit der Kenngrößen vom maximalen Moment zu erkennen. Vielmehr verbleiben sie konstant bei maximalen Lenkwinkeln kleiner als  $3^\circ$  und Gierraten kleiner als  $1,5^\circ/\text{s}$ , unabhängig von  $M_{Z \max}$ .

Wesentliche Erkenntnisse bieten die Auftretenszeitpunkte  $T_1(\delta_{LW})$  und  $T_1(\dot{\psi})$ . Im Gegensatz zum Betrag der jeweiligen Extrema ist hier keine Abhängigkeit des Zeitpunkts von  $M_{Z \max}$  zu erkennen. Die erforderliche Zeit, um eine Gegenkraft aufzubringen, ist somit unabhängig von der Höhe des Moments und wird nur durch dessen Gradient beeinflusst. Je höher der Gradient, desto früher reagiert der Fahrer. Dies gilt auch für die hohen Gradienten, bei denen der Fahrer durchschnittlich 20% früher reagiert als bei mittleren. Diese Zusammenhänge verdeutlichen noch einmal die unterschiedlichen Reaktionsarten der Fahrer in Abhängigkeit des Gradienten des Zusatzlenkmoments. Während bei mittleren und hohen Gradienten eine schnelle Gegenlenkreaktion erfolgt, wird bei langsam aufbauendem Moment der induzierte Lenkwinkel für einen längeren Zeitraum zugelassen. Die resultierende Fahrzeugbewegung führt schließlich zu einer Reaktion des Fahrers, die mit einer deutlich niedrigeren Intensität, aber dafür über einen längeren Zeitraum erfolgt als bei Momenten mit höherem Gradient.

### 3. Gestaltungsbereich von Zusatzlenkmomenten

Das vorangegangene Kapitel hat mithilfe von Probandenversuchen den Einfluss von Zusatzlenkmomenten auf das Fahrer- und Fahrzeugverhalten genauer dargestellt. Dabei wurde neben der Vorstellung der Studie der Fokus auf die unterschiedlichen Einflüsse von Gradient und maximaler Amplitude von Zusatzlenkmomenten gesetzt und diese unter Verwendung objektiver Kriterien erläutert. Diese Untersuchungen sollen im folgenden Kapitel hinsichtlich des Gestaltungsbereichs von Zusatzlenkmomenten für die Realisierung einer Lenkmomentenempfehlung erweitert werden. Der Gestaltungsbereich wird zum einen durch einen minimalen Wert beschrieben, der durch die Wahrnehmungsschwelle des Fahrers definiert ist. Zum anderen ist aber auch das maximal zumutbare Moment eine wichtige Größe, da dies die Beherrschbarkeit einer Lenkmomentenempfehlung bestimmt und es zu jeder Zeit sichergestellt sein muss. Hierbei handelt es sich nicht um feste Grenzwerte, sondern es kann in Abhängigkeit von den Fahrdynamikeigenschaften des Fahrzeugs, von den individuellen Unterschieden der Fahrer sowie von der Fahrsituation variieren. Die folgenden Untersuchungen sollen vorbereitend auf die Gestaltung einer Lenkmomentenempfehlung neue Erkenntnisse über die Beherrschbarkeit von Zusatzlenkmomenten und über den Streubereich der resultierenden Fahrerreaktionen bieten.

#### 3.1. Beurteilung hinsichtlich Beherrschbarkeit

Während sich für den minimalen Wert eines Zusatzlenkmoments – den Wahrnehmungsschwellen des Fahrers – bereits zahlreiche Erkenntnisse in der Literatur finden (vgl. Kapitel 2), sind die Aussagen hinsichtlich der Beherrschbarkeit eines Zusatzlenkmoments nicht eindeutig. Dabei sind maximal beherrschbare Momente einer Lenkmomentenempfehlung nicht zu verwechseln mit Störmomenten, die beispielsweise aus einem Fehler in der Fahrzeugelektronik resultieren können. Störmomente sind in ihrer Form meist von kürzerer Dauer, wodurch sich der Zeitpunkt der Momentenrücknahme mit dem Gegenlenkmanöver des Fahrers überschneiden kann. Sie werden dadurch als deutlich störender empfunden als Momente einer Lenkmomentenempfehlung, die für einen längeren Zeitraum anliegen [94].

Um die Beherrschbarkeit von Zusatzlenkmomenten einer Lenkmomentenempfehlung als objektive Maßeinheit bestimmen zu können, wird die in Kapitel 2.1 vorgestellte Studie zugrunde gelegt. Zusätzlich zu den objektiven Messdaten wird auch der subjektive Eindruck der Fahrer herangezogen. Hierzu werden die Fahrer nach jedem Durchgang aufgefordert, die am Lenkrad entstandene Störung durch das Zusatzlenkmoment zu bewerten. Als Antwortmöglichkeit steht die elf-stufige Störungsbewertungsskala (disturbance rating scale) nach Neukum [90] zur Verfügung (Bild 3.1).

nicht kontrollierbar	10
gefährlich	9
	8
	7
störend	6
	5
	4
spürbar	3
	2
	1
nichts bemerkt	0

Bild 3.1.: Störungsbewertungsskala zur Erfassung des subjektiven Fahrereindrucks [90]

Die Fahrer haben hier die Möglichkeit, das Moment in die fünf Verbalkategorien *nichts bemerkt* (Stufe 0), *spürbar* (Stufen 1-3), *störend* (Stufen 4-6), *gefährlich* (Stufen 7-9) oder *nicht kontrollierbar* (Stufe 10) einzustufen. Bei der Wahl einer der drei mittleren Verbalkategorien kann der Proband mithilfe einer drei-stufigen Skala sein Urteil weiter verfeinern. Die Skala hat sich bereits in zahlreichen Probandenstudien etabliert [90,91,106] und zeichnet sich insbesondere durch die einfache Handhabung und die intuitive Verständlichkeit seitens der Probanden aus.

Die subjektiven Bewertungen der Fahrer werden in Abhängigkeit des jeweiligen Zusatzlenkmoments (Gradient und maximale Amplitude) bewertet. Um auch den Einfluss unterschiedlicher Fahrdynamikeigenschaften zu berücksichtigen, erfolgt diese Analyse der Fahrerbewertungen getrennt nach der Lenkübersetzung. Für verschiedene Gradienten sind in Bild 3.2 die mittleren Bewertungen in Abhängigkeit vom maximalen Moment und der Lenkübersetzung abgebildet. Damit diese von zu stark oder schwach ausgeprägten Bewertungen einzelner Probanden bereinigt werden, sind nur Werte oberhalb des 25%-Quantils und unterhalb des 75%-Quantils berücksichtigt.

Aus den Bewertungen geht hervor, dass die Fahrer den Eingriff kritischer beurteilen, je höher das maximale Moment ist. Dieses gilt insbesondere für die beiden höheren Gradienten 50 und 250Nm/s. Hinzu kommt die Abhängigkeit der Bewertungen von der jeweiligen Lenkübersetzung. Bei höheren Gradienten wirken sich Momente kritischer aus, je direkter das Fahrzeugverhalten ist. Somit ist die subjektive Beurteilung des Fahrers nicht nur von dem Moment selbst abhängig, sondern auch von den fahrdynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs. Werden maximal zumutbare Momente festgelegt, so gelten sie auch nur für das jeweilige Versuchsfahrzeug.

Um eine allgemeingültige Bewertung unabhängig von den Fahrdynamikeigenschaften des Fahrzeugs ableiten zu können, wird geprüft, inwieweit die Bewertungen des Fahrers auf das jeweilige Zusatzlenkmoment oder auf die induzierte Fahrzeugreaktion zurückzuführen sind. Als objektives Kriterium wird die maximal eintretende Gierrate herangezogen und in

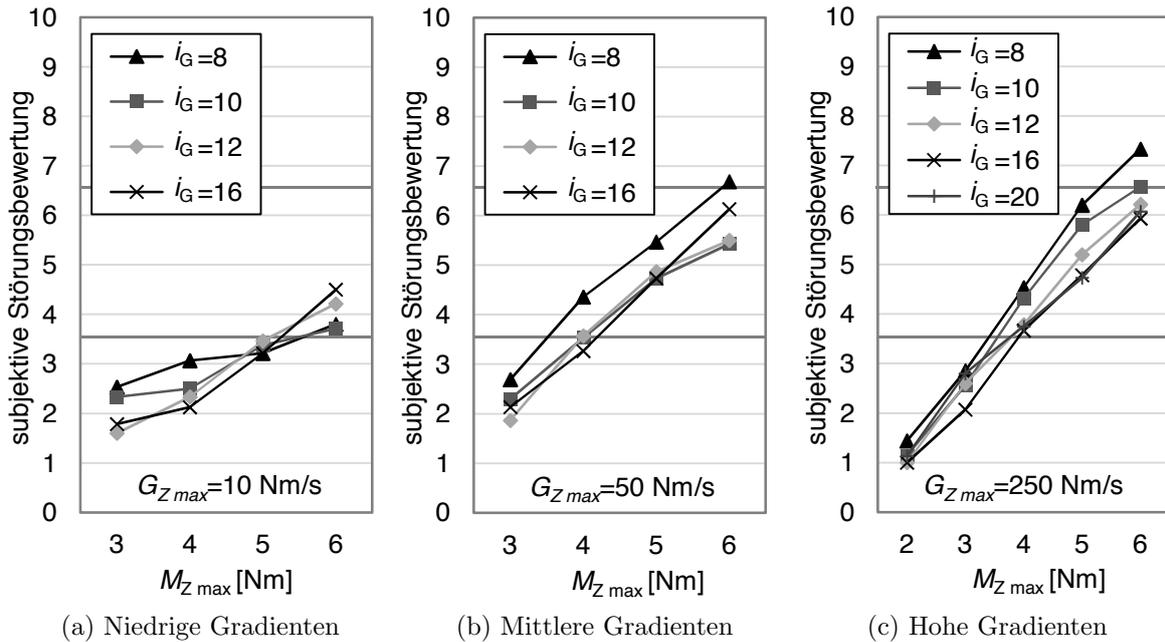


Bild 3.2.: Subjektive Störungsbeurteilung in Abhängigkeit vom maximalen Moment und der Lenkübersetzung

Abhängigkeit der subjektiven Störungsbeurteilung des Fahrers bewertet. Hierzu werden die gemessenen maximalen Gierraten in definierte Intervalle  $\Delta\dot{\psi}_{\max}$  eingeteilt und die dazugehörigen Störungsbeurteilungen des Fahrers zugeordnet. Mithilfe dieser Beziehung wird die Störungsbeurteilung nicht mehr in Abhängigkeit vom maximalen Zusatzlenkmoment dargestellt, sondern sie kann als Funktion der Gierrate abgebildet werden. Für die Intervallbreite  $0,5^\circ/\text{s}$  sind in Bild 3.3 die jeweiligen Störungsbeurteilungen für die unterschiedlichen Lenkübersetzungen aufgetragen. Dabei wird in Abhängigkeit der Lenkübersetzung jeweils eine Regressionskurve zweiter Ordnung abgebildet. Da sich ein Gradient von  $10\text{Nm/s}$  als unkritisch erwiesen hat, sind nur die höheren Gradienten  $50$  und  $250\text{Nm/s}$  aufgeführt. Das Ergebnis zeigt deutlich, dass die Fahrerbewertungen für beide Gradienten (Bild 3.3a und 3.3b) keine Abhängigkeit von den unterschiedlichen Lenkübersetzungen aufzuweisen scheinen. Die Gegenüberstellung der Regressionskurven beider Gradienten in Bild 3.3c bestätigt durch den näherungsweise gleichen Verlauf, dass die maximal induzierte Gierrate ein geeignetes Maß zur Bewertung einer kritischen Lenkmomentenüberlagerung darstellt. Aus der gesamtheitlichen Menge aller Messungen, die bei den Gradienten  $50$  und  $250\text{Nm/s}$  aufgezeichnet werden, lässt sich eine Regressionskurve als mathematische Funktion zweiter Ordnung ableiten:

$$S(\dot{\psi}_{\max}) = -0,1\dot{\psi}_{\max}^2 \left(\frac{\text{s}}{\text{rad}}\right)^2 + 1,67\dot{\psi}_{\max} \left(\frac{\text{s}}{\text{rad}}\right) \quad (3.1)$$

Sie bildet die mittlere subjektive Bewertung  $S$  (einheitenlose Größe) des Zusatzlenkmoments in Abhängigkeit der maximal durch das Moment induzierten Gierrate  $\dot{\psi}_{\max}$  ab. Ein vom Fahrer als gefährlich eingestuftes Zusatzlenkmoment ( $S > 6,5$ ) ergibt durch Anwen-

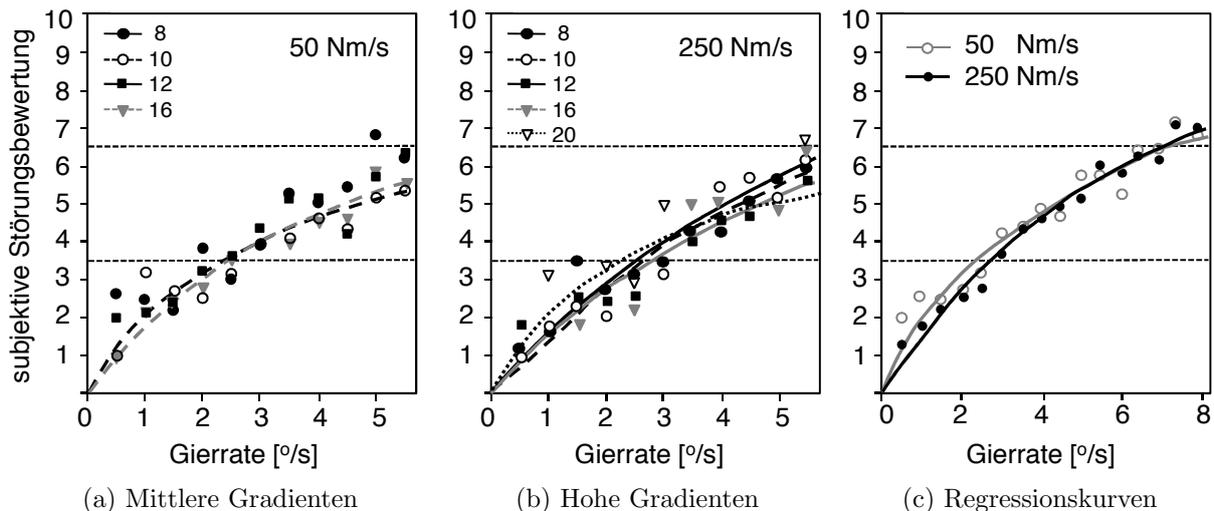


Bild 3.3.: Störungsbewertung des Fahrers in Abhängigkeit von der maximalen Gierreaktion des Fahrzeugs

dung von Gleichung 3.1 den Wert  $6,2^\circ/\text{s}$  für  $\dot{\psi}_{\max}$ . Die Gleichung ist unabhängig von der tatsächlichen Form und Höhe des Zusatzlenkmoments und besitzt Gültigkeit für mittlere und hohe Gradienten.

Für niedrige Gradienten unter  $50\text{Nm/s}$  spielt hingegen die Höhe des maximalen Moments zunehmend eine Rolle bei der subjektiven Bewertung der Fahrer. Bei dem hier untersuchten maximalen Moment von  $6\text{Nm}$  wurden die Störungen als unkritisch empfunden. Die Beurteilung hinsichtlich der Beherrschbarkeit niedriger Gradienten bei besonders hoher Amplitude ( $M_{Z\max} > 6\text{Nm}$ ) muss im Rahmen weiterer Studien untersucht werden.

## 3.2. Streuungen im Reaktionsverhalten verschiedener Fahrer

Für eine Abschätzung des Reaktionsverhaltens infolge überlagerter Zusatzlenkmomente ist nicht nur das Ausmaß der in Abschnitt 2.1.2 definierten Kenngrößen über alle Fahrer relevant, sondern auch das Streuungsverhalten zwischen einzelnen Fahrerreaktionen. Insbesondere wenn es um die Bestimmung maximal zumutbarer Momente für Aussagen hinsichtlich der Beherrschbarkeit geht, müssen diejenigen Fahrer primär berücksichtigt werden, bei denen das gleiche Zusatzlenkmoment die stärkere Reaktion beziehungsweise die kritischere Bewertung hervorruft. In [106] wurden für junge und ältere Fahrer eigenständige Untersuchungen zur Interaktion mit Zusatzlenkmomenten durchgeführt, weil diese in Unfallstatistiken für besondere Auffälligkeit sorgen (vgl. Abschnitt 1.1). Dabei konnten jedoch keine signifikanten Reaktionsunterschiede dieser „potenziell schwächeren Fahrergruppen“ im Vergleich zu den „normalen Fahrern“ festgestellt werden. Der Befund wurde auf die kleine Stichprobenzahl sowie die hohe Erfahrung und Technik-Affinität der rekrutierten Probanden zurückgeführt.

Zur grundsätzlichen Feststellung, ob Zusatzlenkmomente bei bestimmten Fahrergruppen zu unterschiedlichen Reaktionen führen, wird im ersten Schritt das Streuungsverhalten der Kenngrößen betrachtet. Hierzu ist in Bild 3.4 der Quartilsabstand  $Q_A$  für das erste Extremum des Lenkwinkels bei Gradienten von 10 und 250Nm/s aufgetragen<sup>1</sup>. Zusätzlich findet sich in Bild 3.4c der Quartilsabstand für die Kenngröße  $T_1(\delta_{LW})$ , exemplarisch für  $G_{Z\max} = 250\text{Nm/s}$ .

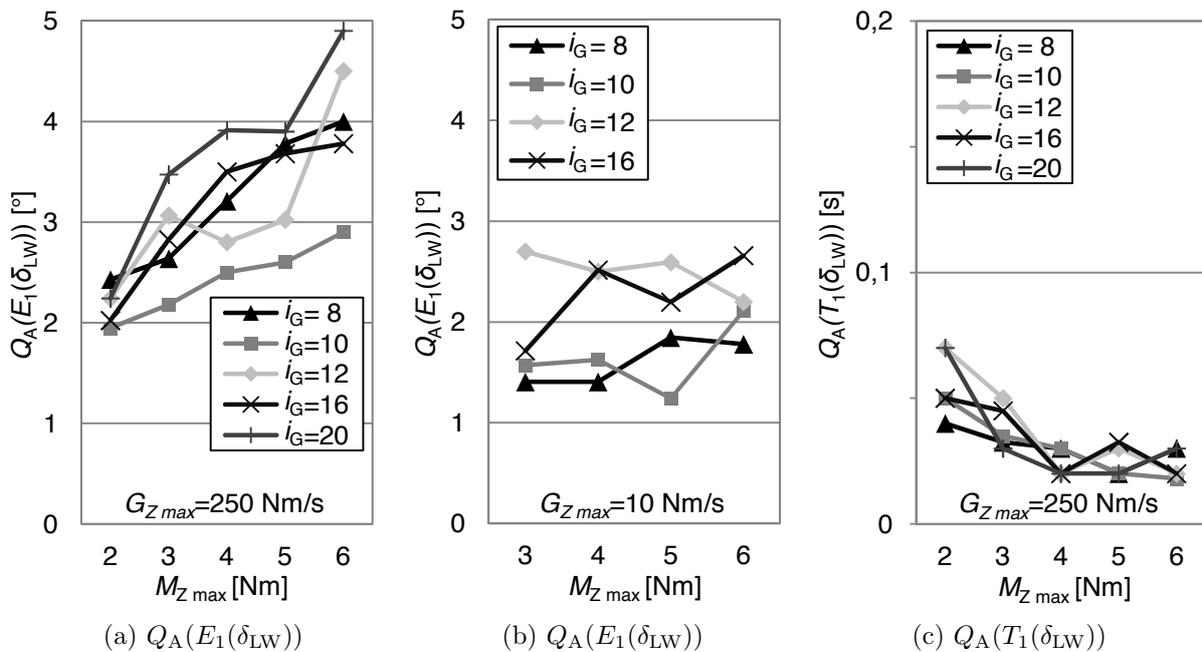


Bild 3.4.: Streuungsverhalten ausgewählter Kenngrößen des Lenkwinkels bei unterschiedlichen Zusatzlenkmomenten

In Abbildung 3.4a ist zu erkennen, dass bei hohem Gradienten die Streuung von  $E_1(\delta_{LW})$  mit dem Zusatzlenkmoment deutlich ansteigt. Je höher also das maximale Zusatzlenkmoment ist, desto unzuverlässiger sind Vorhersagen zur Auswirkung der Fahrerreaktion. Bei einem niedrigen Gradienten hingegen (Bild 3.4b) zeigt das Streuungsverhalten des maximalen Lenkwinkels keine Änderung mit der Variation des Zusatzlenkmoments. Der Quartilsabstand der Extrema verbleibt hier für alle Aufschaltungen in einem Lenkwinkelbereich von etwa 1 bis 3°.

Bei Betrachtung der Reaktionszeit in Bild 3.4c kann eine sehr geringe Streuung des Kennwertes  $T_1(\delta_{LW})$  festgestellt werden. Lediglich bei niedrigen Momenten ist die Reaktionszeit etwas erhöht, was auf die schlechte Wahrnehmbarkeit des Zusatzlenkmoments bei niedriger Amplitude zurückzuführen ist.

Weil sich in der gesamtheitlichen Betrachtung der Fahrerreaktionen ein deutliches Streuungsverhalten bemerkbar macht, werden im nächsten Schritt die Reaktionen in Abhängigkeit der einzelnen Fahrer betrachtet. Dabei soll geprüft werden, ob die Streuung durch Reaktionsunterschiede des gleichen Fahrers (intraindividuell) oder durch die unterschied-

<sup>1</sup>Aufgrund der ähnlichen Reaktionsverhalten bei 50 und 250Nm/s wird in der Darstellung auf Gradienten von 50Nm/s nicht eingegangen.

liche Reaktionen verschiedener Fahrer (interindividuell) entstehen. Für drei ausgewählte Fahrer stellt Bild 3.5 jeweils die aufgetretenen Mittelwerte der Kenngröße  $E_1(\delta_{LW})$  für die Gradienten 50 und 250Nm/s dar. Dabei handelt es sich um Fahrer, die grundsätzlich ein unterschiedliches Reaktionsverhalten aufweisen. In allen Fällen wird eine Lenkübersetzung von  $i_G = 16$  gewählt.

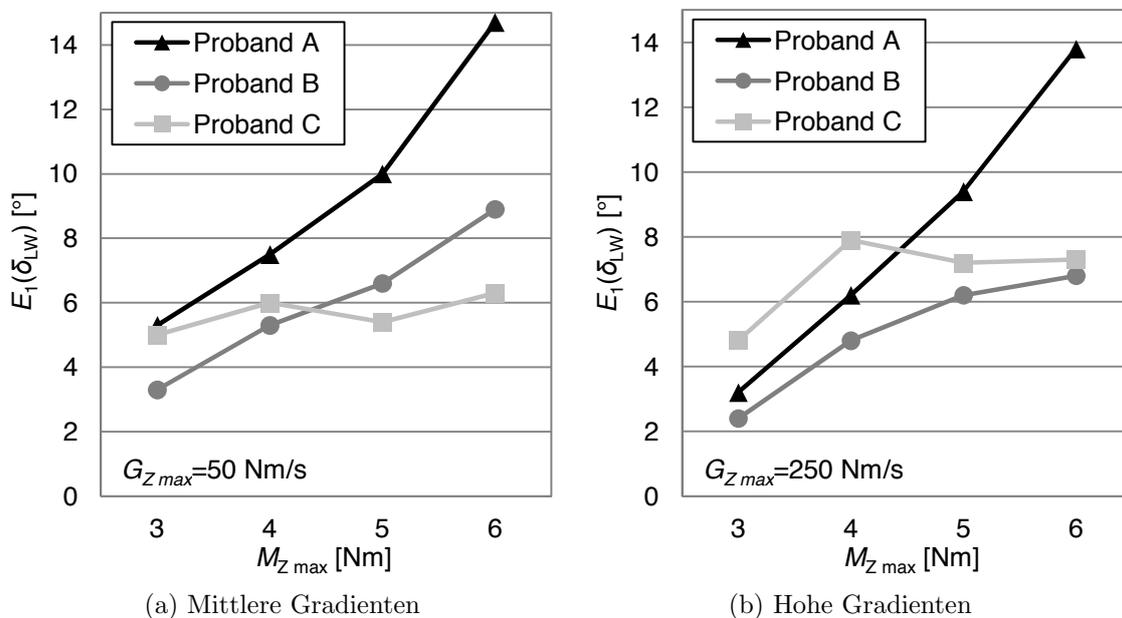


Bild 3.5.: Unterschiedliches Verhalten von  $E_1(\delta_{LW})$  für drei ausgewählte Probanden ( $i_G=16$ )

Am Beispiel der drei Probanden lassen sich generelle Unterschiede in den Reaktionsmustern erkennen. Proband A zeichnet sich im Vergleich zu den anderen Fahrern durch eine höhere Reaktionsbereitschaft aus. Je höher das maximale Moment ist, desto stärker fällt auch seine Reaktion aus. Dieses gilt für beide Gradienten 50 und 250Nm/s des Zusatzlenkmoments sowie für die verschiedenen Lenkübersetzungen (hier nicht abgebildet). Im Gegensatz hierzu zeigt Proband B grundsätzlich ein gedämpfteres Reaktionsverhalten. Obwohl auch bei diesem Fahrer die Ausprägung der Reaktion mit der Höhe des Moments zunimmt, sind große Unterschiede der beiden Fahrerverhalten bei der absoluten Betrachtung von  $E_1(\delta_{LW})$  zu erkennen. Dies gilt insbesondere für die höheren Amplituden des Moments.

Keine eindeutige Tendenz weisen die Reaktionen von Proband C auf. Der induzierte Lenkwinkel steht bei diesem Fahrer nicht in direkter Abhängigkeit zur Höhe des Zusatzlenkmoments, sondern er nimmt in jedem Fall einen Wert zwischen 6 und 8° an (ausgenommen ist das niedrige Moment bei  $M_{Zmax}=3$ Nm). Im Vergleich zu den anderen Probanden weist dieser Fahrer weder ein erhöhtes noch ein gedämpftes Reaktionsverhalten auf.

Diese Verhaltensunterschiede der Probanden bestätigen sich in gleicher Form unabhängig davon, ob das Zusatzlenkmoment mittlere (Bild 3.5a) oder hohe Gradienten (Bild 3.5b) aufweist. Weiterführende Analysen in Abhängigkeit der persönlichen Daten der Probanden können allerdings keine Zusammenhänge zum Reaktionsverhalten ermitteln. Im Gegen-

satz zu den Unfallstatistiken, die in Abhängigkeit von demografischen Daten wie Alter oder Geschlecht signifikante Unterschiede in den Unfallursachen zeigen (vgl. Kapitel 1.1), scheint das Reaktionsverhalten der Fahrer auf Zusatzlenkmomente von anderen Eigenschaften abhängig zu sein. In den Kapiteln 4 und 5 wird dieser Sachverhalt tief greifender untersucht. Dabei können die unterschiedlichen Reaktionen auf zahlreiche Faktoren wie die aktuelle Fahrsituation oder dem individuellen Erfahrungsbereich der Fahrer zurückgeführt werden.

Unabhängig von den individuellen Fahrereigenschaften sind allerdings der Einfluss von Sitzposition des Fahrers sowie seine Haltekraft am Lenkrad nicht zu vernachlässigen. Zur Feststellung, inwieweit unterschiedliches Halten des Lenkrads die Reaktion des Fahrers beeinflusst, werden im Rahmen einer weiteren Untersuchung  $N=10$  Probanden mit Zusatzlenkmomenten ähnlicher Art wie im ersten Versuch (vgl. Abschnitt 2.1) konfrontiert. Im Unterschied hierzu sind die Fahrer allerdings aufgefordert, das Lenkrad jeweils mit einer Hand und anschließend mit beiden Händen zu halten. Bild 3.6 zeigt als Beispiel die Medianwerte der beiden Kenngrößen  $E_1(\delta_{LW})$  und  $T_1(\delta_{LW})$ .

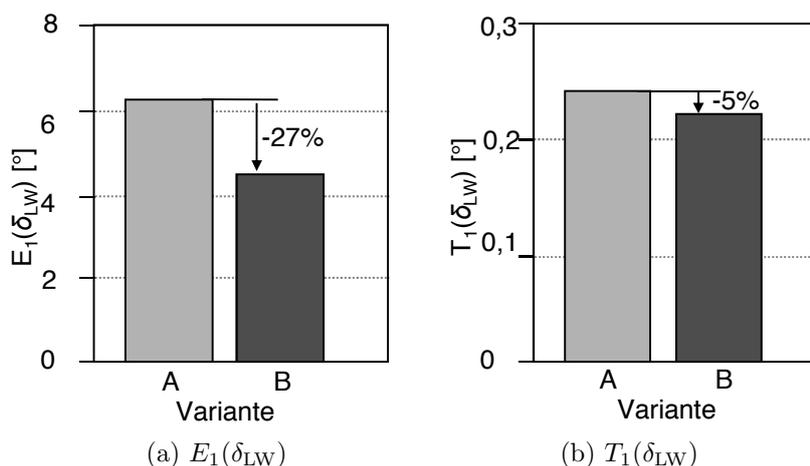


Bild 3.6.: Abweichungen in der Fahrerreaktion bei unterschiedlichem Halten des Lenkrads (Variante A: einhändig, Variante B: beidhändig)

Die Ergebnisse zeigen, dass der induzierte Lenkwinkel beim Fahren mit zwei Händen deutlich geringer ausfällt als mit einer Hand. Dieses hängt mit der zusätzlichen Trägheit zusammen, die der Fahrer durch seine Armkraft aufbringt. Das Lenkmoment hat in diesem Fall einen geringeren Einfluss auf die Fahrzeugreaktion und somit erwartungsgemäß auf die subjektive Bewertung der Beherrschbarkeit. Auf das zeitliche Verhalten der Lenkreaktion ist dieser Einfluss allerdings nur geringfügig.

### 3.3. Fazit

Die Kapitel 2 und 3 bieten grundlegende Erkenntnisse hinsichtlich der Gestaltung von Zusatzlenkmomenten und legen somit die Basis für die Gestaltung einer Lenkmomentenempfehlung. Hinsichtlich der Beherrschbarkeit kann bei höheren Gradienten ( $G \geq 50 \text{Nm/s}$ )

die resultierende Fahrzeugreaktion als wesentliche Einflussgröße bei der Beurteilung des maximalen Zusatzlenkmoments ermittelt werden. Die identifizierte mathematische Abhängigkeit zwischen der Gierrate des Fahrzeugs und der subjektiven Einschätzung des Fahrers in Gleichung 3.1 ermöglicht es, bei der Auslegung von Lenkassistenten das maximal zumutbare Moment in Abhängigkeit der fahrdynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs festzulegen. Dabei setzt diese Beziehung den Worst Case Fall zugrunde, bei dem der Fahrer mit einer Hand das Lenkrad hält und eine Lenkbewegung entgegen der Lenkmomentenempfehlung ausführen möchte. Bei niedrigen Gradienten konnte diese Abhängigkeit allerdings nicht bestätigt werden, denn die untersuchten Momente bis zu 6Nm wurden selbst bei sehr direkter Lenkübersetzung als unkritisch beurteilt. Der Einfluss höherer Momente bei niedrigen Gradienten muss bei Bedarf im Rahmen weiterer Studien untersucht werden.

Die abschließende Betrachtung des Streuverhaltens der Kenngrößen bei gleicher Lenkmomentenaufschaltung offenbart deutliche Unterschiede in der Reaktionssystematik verschiedener Fahrer. So zeigen sich Probanden, die durchgängig stärker auf Zusatzlenkmomente reagierten, sowie Probanden, deren Reaktion sich eher dämpfend auswirkt. Eine Abhängigkeit dieser individuellen Reaktionssystematik von demografischen Eigenschaften wie Alter und Geschlecht kann allerdings nicht nachgewiesen werden. Vielmehr sind sie auf die individuellen Erfahrungsunterschiede sowie auf Einflüsse wie der Lenkradhaltung oder der Fahrsituation zurückzuführen.

## 4. Fahrdynamische Lenkmomentenempfehlung aus funktionaler Sicht

In querdynamisch anspruchsvollen Fahrsituationen ist ein angemessenes Lenkverhalten des Fahrers von zentraler Bedeutung. Auch wenn das Fahrzeug mit fahrdynamischen Regelsystemen, wie dem ESP oder dem ABS ausgestattet ist, kann eine richtige Fahrerreaktion für den funktionalen Eingriff der Systeme eine große Vorarbeit leisten. Hingegen können Lenkmanöver, welche die Gierreaktion des Fahrzeugs noch weiter steigern, in vielen Fahrsituationen den Maßnahmen der Regelsysteme entgegenwirken und den fördernden Beitrag dieser Systeme zur Stabilisierung des Fahrzeugs nicht vollständig ausschöpfen. Zur Veranschaulichung dieser Zusammenhänge zeigt Bild 4.1 am Beispiel zweier Bremsmanöver auf einer Fahrbahn mit unterschiedlichen Reibwerten ( $\mu$ -Split) den Einfluss des Lenkwinkels bei der Stabilisierung des Fahrzeugs.

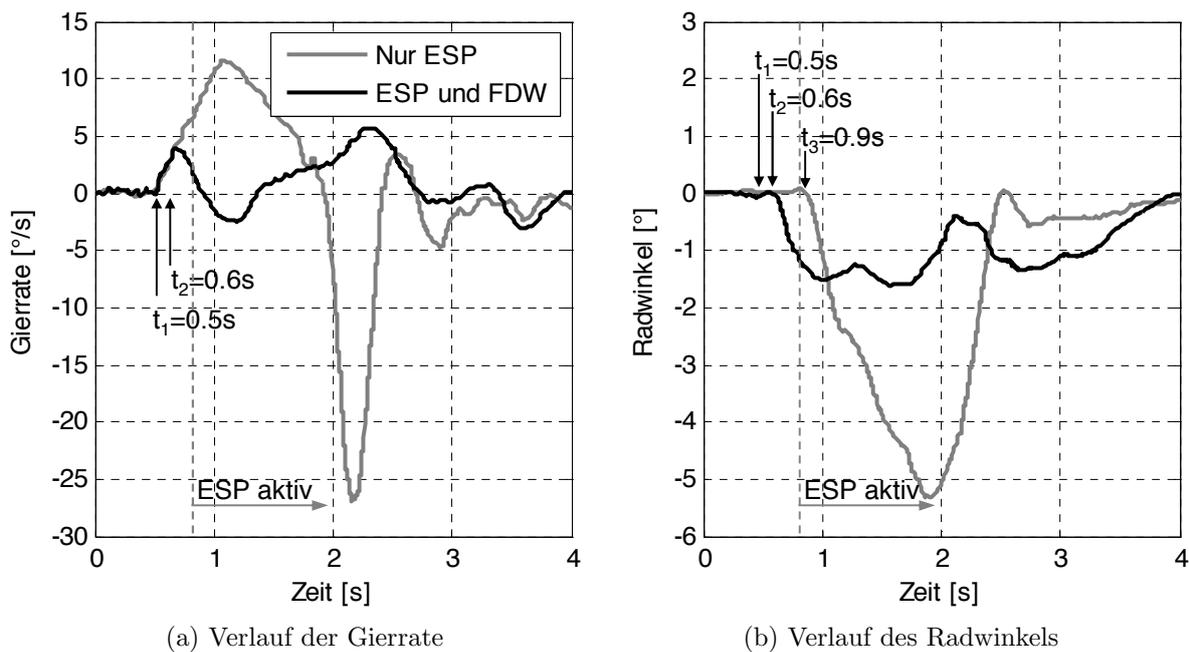


Bild 4.1.: Resultierendes Fahrzeugverhalten durch Bremsen auf  $\mu$ -Split bei 100km/h mit und ohne FDW

In den beiden hier aufgeführten Fällen sind alle gängigen Regelsysteme wie ABS oder ESP aktiviert, wodurch das vollständige Ausbrechen des Fahrzeugs in Richtung des größeren Reibwerts ( $\mu$ -High) verhindert wird. Lediglich die Lenkreaktionen der beiden aufgeführten Beispiele sind unterschiedlich: Im ersten Fall (graue Linie) erfolgt eine Gegenlenkbewegung durch einen geübten Normalfahrer und im zweiten Fall (schwarze Linie) durch die Fahrdynamische Winkelregelung (FDW), die mithilfe des AFS einen optimalen Radwin-

kel zur Stabilisierung des Fahrzeugs regelt [62]. An den Beispielen wird deutlich, dass der maximale Sicherheitsgewinn durch vorhandene Fahrdynamik-Regelungssysteme nur bei einem angemessenen Lenkverhalten erreicht werden kann. Durch das Bremsen zum Zeitpunkt  $t_1$  wird beiden Fahrzeugen eine Gierstörung induziert, die zum Ausbrechen des Fahrzeughecks mit vergleichbarer Intensität führt. Beim Fahrzeug mit FDW wird dieses Störverhalten innerhalb kürzester Zeit ( $t_2 - t_1 = 0,1\text{s}$ ) erkannt und ein für die Situation geeigneter Korrekturingriff an den Vorderrädern eingeleitet (Bild 4.1b). Der Fahrer hingegen benötigt bis zum Einleiten der Gegenlenkbewegung zum Zeitpunkt  $t_3$  etwa  $0,3\text{s}$  länger. Innerhalb dieser Zeit steigt die induzierte Gierreaktion weiter an, mit der Folge, dass der erforderliche Lenkwinkel zur Stabilisierung des Fahrzeugs größer ausfallen muss. Die korrekte Lenkreaktion durch das FDW ermöglicht somit eine höhere Fahrzeugstabilität und führt nach Untersuchungen von [42] zu einer Reduktion des erforderlichen Bremswegs um 10%, weil die Bremsingriffe stärker ausfallen können. Bedingt durch die gedämpfte Gierreaktion bei Fahrzeugen mit FDW werden auch die Bremsingriffe des ESP zur Stabilisierung des Fahrzeugs (hier nicht abgebildet) gezielter und weicher ausfallen [103].

Eine FDW wird sich allerdings aufgrund der hohen Zusatzkosten des AFS nicht in allen Fahrzeugklassen durchsetzen. Ein alternatives System, um den stabilisierenden Lenkwinkel einzubringen, bietet die Fahrdynamische Lenkmomentenempfehlung (FDL), die mithilfe einer serienmäßig vorhandenen Elektrolenkung umgesetzt werden kann. Im Unterschied zur FDW regelt sie nicht den Radwinkel, sondern bietet dem Fahrer eine Lenkmomentenempfehlung in Richtung des stabilisierenden Winkels. Sollte der Fahrer durch diese zu einem verbesserten Lenkverhalten motiviert werden, so ist bei einem Zusammenwirken von ESP und FDL ein deutlicher Mehrwert zu erwarten. Dieser Mehrwert durch die FDL lässt sich nach Bild 4.2 durch eine schnellere Stabilisierung mit einer geringeren Ausprägung der Fahrzeugreaktion beschreiben.

Das vorliegende Kapitel wird die FDL aus funktionaler Sicht genauer darstellen. Neben der Klassifikation unterschiedlicher Varianten wird der Fokus auf die Teilfunktion Übersteuerkompensation gesetzt. Der zugrunde liegende Regelkreis sowie die wesentlichen Anforderungen hinsichtlich der Gestaltung des Zusatzlenkmoments werden diskutiert und es werden – vorbereitend auf die anschließende Studie zur Wirksamkeit der FDL – Thesen für den möglichen Mehrwert einer solchen Funktion formuliert.

## 4.1. Klassifikation der Systemfunktionalität

Die FDL bezeichnet eine Gruppe von Funktionen, die in dynamischen Fahrsituationen den Fahrer zu einem optimalen Lenkverhalten motivieren. Optimales Lenkverhalten zeichnet sich dabei durch die Wahl des richtigen Zeitpunkts, der richtigen Richtung und der angemessenen Ausprägung des vom Fahrer initiierten Lenkmanövers aus. Zum besseren Verständnis des Wirkprinzips sowie dem Zusammenwirken mit dem ESP stellt Bild 4.3 den Gesamtregelkreis der wesentlichen Komponenten dar. Erfolgt der Eintritt in eine fahrdynamische Grenzsituation, wird dieser durch Bewertung geeigneter Sensorinfor-

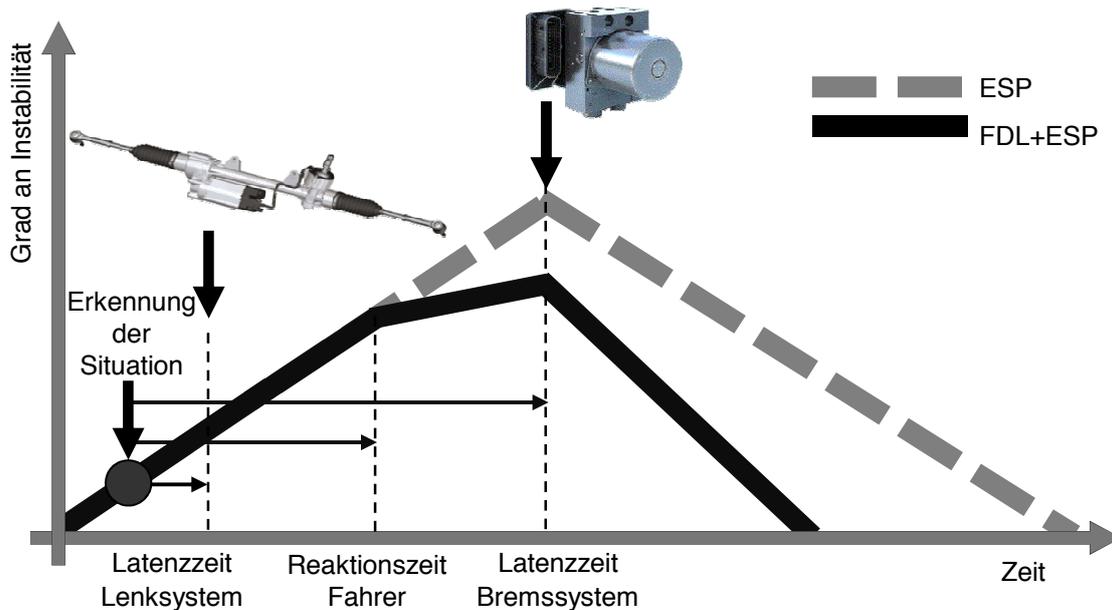


Bild 4.2.: Sicherheitsgewinn durch Zusammenwirken von FDL und ESP

mationen – insbesondere durch die Gierrate und die Querschleunigung – erkannt. Dann werden Maßnahmen zur Wiederherstellung der Fahrstabilität bestimmt, die auf Brems-, Lenkungs- oder Antriebseingriffe basieren können. Das ESP beispielsweise versucht, durch die individuelle Regelung der Bremsmomente der Gierstörung des Fahrzeugs entgegenzuwirken. Der Eingriff erfolgt unabhängig von der Fahrerreaktion; lediglich die Wiederherstellung der Fahrzeugstabilität ist entscheidend.

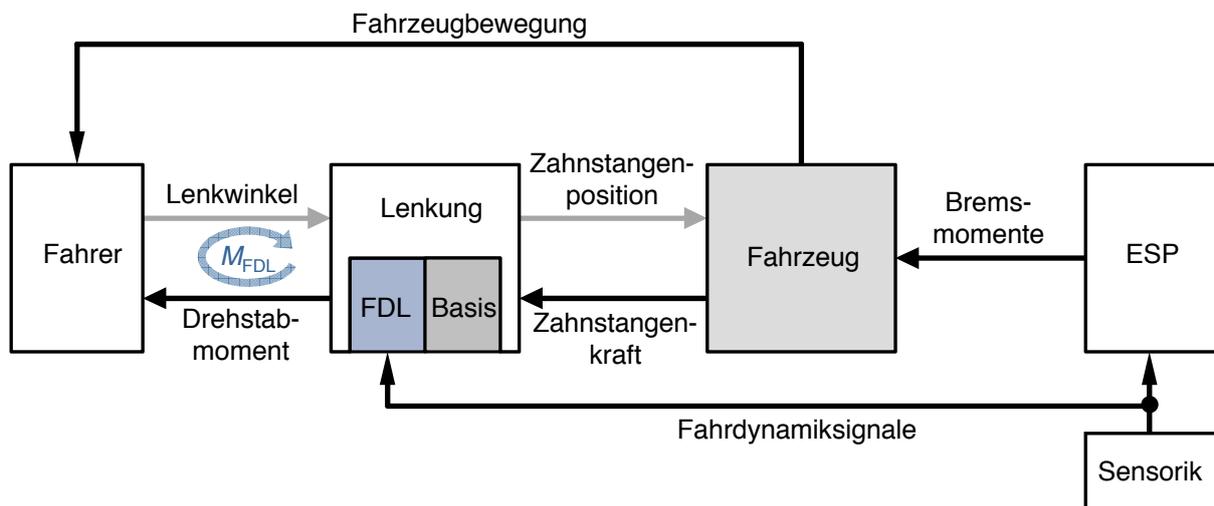


Bild 4.3.: Die FDL im Gesamtregelkreis

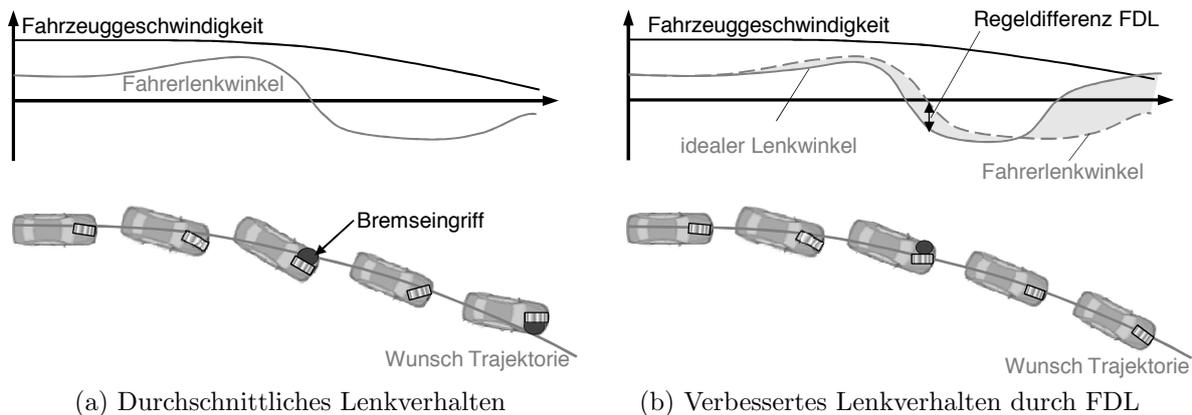
Zusätzlich zum ESP versucht die FDL, das Lenkverhalten des Fahrers zu optimieren. Ist in der Situation eine Lenkmomentenempfehlung sinnvoll, wird in Abhängigkeit der aktuellen Lenkunterstützung durch die EPS ein zusätzliches Lenkmoment errechnet und am Drehstab des Lenksystems eingeregelt. Die Empfehlung ist dann für den Fahrer als eine Steigerung oder Reduzierung des Handmomentenniveaus am Lenkrad spürbar, der

er durch die Wahl seiner Lenkbewegung folgen oder die er übersteuern kann. Die FDL nimmt also keinen direkten Einfluss auf den Lenkwinkel, sondern hilft dem Fahrer dabei, den erforderlichen Stabilisierungswinkel zu finden.

Insgesamt kommen drei unterschiedliche Varianten der FDL zum Einsatz, die im Folgenden kurz vorgestellt werden. Da der funktionale Aufbau der einzelnen Komponenten vergleichbar ist, erfolgt eine detaillierte Betrachtung hinsichtlich der Gestaltungsmöglichkeiten für das Zusatzlenkmoment nur für die FDL-Komponente Übersteuern.

### FDL-Komponente Übersteuern

Eine Übersteuersituation resultiert aus unterschiedlichen Schräglaufwinkeln an den Rädern der Vorder- und Hinterachse. Letztere weisen aufgrund der Fahrsituation – beispielsweise bei zu starker Beschleunigung in der Kurve – einen größeren Winkel auf als bei denen der Vorderachse, wodurch das Fahrzeug über die Hinterräder in Richtung kurvenaußen rutscht [89]. Das ESP kompensiert diese Bewegung, indem das kurvenäußere Vorderrad abgebremst wird (Bild 4.4a). Erfolgt keine angepasste Lenkbewegung des Fahrers entsteht hierbei eine Querbewegung, die das Fahrzeug von der Wunschtrajektorie des Fahrers entfernt. Das ESP kompensiert somit die Übersteuerreaktion stets auf Kosten einer Querbewegung.



**Bild 4.4.:** Lenkverhalten des Fahrers und resultierende Fahrzeugreaktion in einer Übersteuersituation mit und ohne FDL

Bei einem Übersteuermanöver ist zusätzlich ein schnelles Gegenlenkmanöver des Fahrers von großer Bedeutung. Ein ausbleibendes Lenkmanöver oder zu langes Halten des Lenkwinkels (Überreaktion) erhöhen die Instabilität und können zum vollständigen Kontrollverlust des Fahrzeugs führen. Die FDL reagiert auf eine solche Situation und versucht, mithilfe einer gerichteten Lenkmomentenempfehlung den Fahrer zu einer Gegenlenkbewegung zu motivieren, die früh genug und mit der richtigen Ausprägung erfolgt. Zusätzlich motiviert sie den Fahrer, den Lenkwinkel passend zur Fahrsituation rechtzeitig zurückzunehmen. Durch ein korrektes Lenkverhalten kann das Fahrzeug besser auf der Wunsch-Trajektorie des Fahrers gehalten werden. Ferner können zu starke Bremsengriffe des ESP reduziert werden (Bild 4.4b). Im Gegensatz zum Fahrphysikalischen Rücklauf (vgl. Kapitel 1.2.1) handelt es sich bei der FDL ausschließlich um eine

Funktion zur Erhöhung der Fahrstabilität, die nicht darauf abzielt, das Lenkgefühl in der Übersteuersituation zu verbessern.

### FDL-Komponente Untersteuern

Beim Überschreiten der maximalen Seitenführungskraft wird das lineare Verhältnis zwischen der Seitenführungskraft und dem Schräglaufwinkel nicht weiter fortgesetzt. Das für den Fahrer spürbare Lenkmoment reduziert sich ab diesem Zeitpunkt, entwickelt sich also entgegengesetzt der Querbewegung des Fahrzeugs. Dieses nichtlineare Verhalten des Lenkmoments, das ein Zeichen für die fehlenden Sicherheitsreserven des Fahrzeugs darstellt, ist für die meisten Fahrer nicht eindeutig auflösbar und führt durch die reduzierte Gegenkraft des Lenkrads zum weiteren Einlenken durch den Fahrer. Ein weiteres Einlenken überschreitet den optimalen Radwinkel für die maximale Seitenführung mit der Folge, dass das Fahrzeug über die Vorderräder schiebt und tangential zur Kurve die gewünschte Soll-Trajektorie verlässt. Eine solche Situation wird durch das ESP erkannt, und durch das Abbremsen des kurveninneren Hinterrades wird eine Korrektur des Fahrzeugverhaltens eingeleitet (Bild 4.5a).

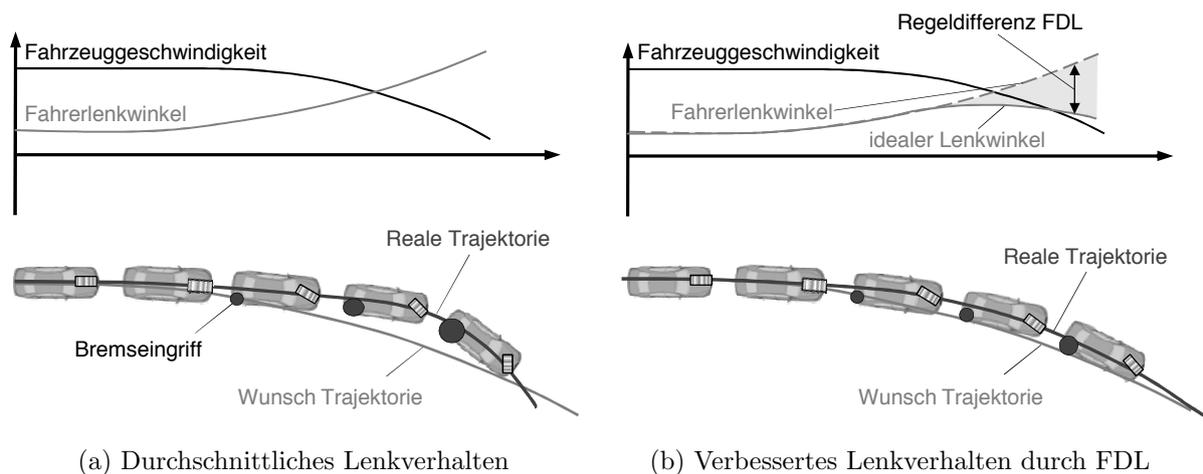


Bild 4.5.: Lenkverhalten des Fahrers und resultierende Fahrzeugreaktion in einer Untersteuersituation mit und ohne FDL

Die FDL-Komponente Untersteuern versucht, zusätzlich zu den Bremseneingriffen des ESP, den Fahrer von einem weiteren Einlenken zurückzuhalten. Hierzu wird das lineare Verhalten des Lenkmoments trotz der fallenden Seitenführungskraft nicht nur aufrechterhalten, sondern auch progressiv mit größerem Gradienten erhöht. Je weiter der Fahrer einlenkt, desto höher wird auch das Moment der FDL in Richtung des idealen Lenkwinkels (Bild 4.5b). Der Fahrer wird darauf aufmerksam gemacht, nicht weiter einzulenken, damit das Fahrzeug seinem Lenkwunsch in lateraler Richtung so weit wie möglich folgen kann.

### FDL-Komponente $\mu$ -Split

Wie bereits in der Einleitung dieses Kapitels erläutert, entsteht bei einer  $\mu$ -Split-Bremmung aufgrund der unterschiedlichen Absetzung der Bremskräfte eine Gierstörung

in Richtung des größeren Reibwertes (Bild 4.6a). Das ABS begrenzt daraufhin die Bremskräfte auf der  $\mu$ -High-Seite auf die maximal absetzbare Bremskraft auf  $\mu$ -Low und reduziert somit das Störmoment. Dieses erhöht zwar den Bremsweg, der Fahrer gewinnt aber Zeit, um sich an die Situation anzupassen und ein erforderliches Gegenlenkmanöver zu starten. Zusätzlich unterstützt die FDL ähnlich wie beim Übersteuern durch eine Lenkmomentenempfehlung, die den Fahrer in Richtung des stabilisierenden Lenkwinkels führt (vgl. Bild 4.1). Das verbesserte Lenkverhalten erzeugt ein kompensierendes Giermoment, das der Gierstörung entgegenwirkt und so die Geradeausfahrt des Fahrzeugs fördert (Bild 4.6b).

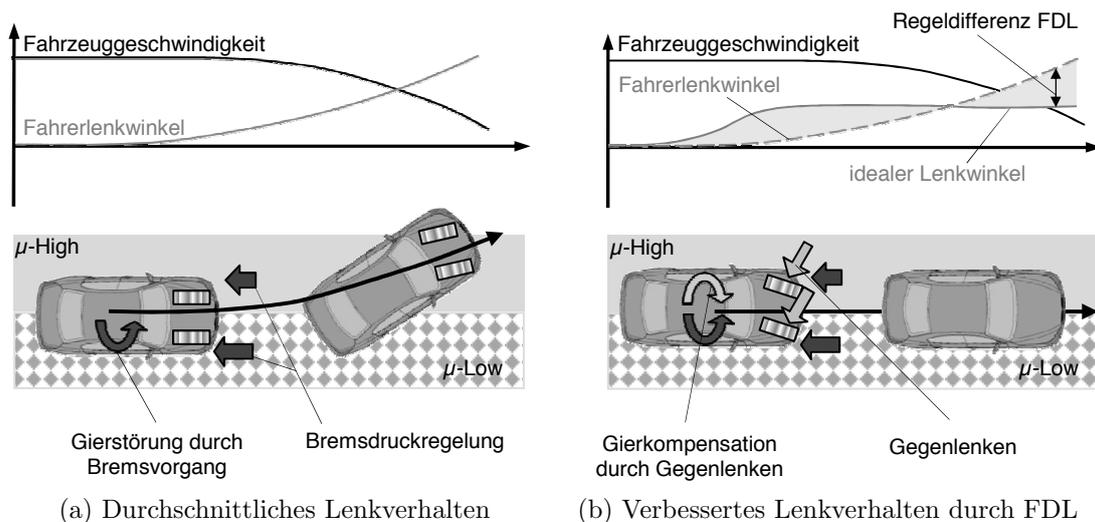


Bild 4.6.: Lenkverhalten des Fahrers und resultierende Fahrzeugreaktion bei einer  $\mu$ -Split Bremsung

Wie aus der Beschreibung der einzelnen Funktionskomponenten hervorgeht, stehen die FDL- und die ESP-Funktion in Koexistenz bei der Bewältigung der Stabilisierungsaufgabe. Ihre Abgrenzung ist aufgrund der unterschiedlichen Stellgrößen zwar klar definiert, ihre funktionale Platzierung auf dem ESP- oder EPS-Steuergerät ist jedoch aufgrund der Verwendung gleicher Sensorinformationen nicht festgelegt. Die für die Probandenstudien in Kapitel 5 verwendete Funktion basiert auf der Realisierung im EPS-Steuergerät. Als vorteilhaft erweist sich diese Variante hinsichtlich der Gestaltung des Zusatzlenkmoments, wenn die einzelnen Lenkfunktionen (vgl. Kapitel 1.2.1) der EPS Lenkmomente anfordern. Durch die Koordination der Anforderungen durch das EPS-Steuergerät kann ein harmonisches Gesamtlenkgefühl sichergestellt werden, wodurch die Information zum richtigen Lenken dem Fahrer eindeutiger vermittelt werden kann.

## 4.2. Gestaltung des Zusatzlenkmoments

Grundsätzlich setzt sich die FDL aus drei eindeutig abgrenzbaren Funktionsbausteinen zusammen, in die alle im vorherigen Abschnitt vorgestellten Teilkomponenten Übersteu-

ern, Untersteuern und  $\mu$ -Split integriert sind (Bild 4.7).

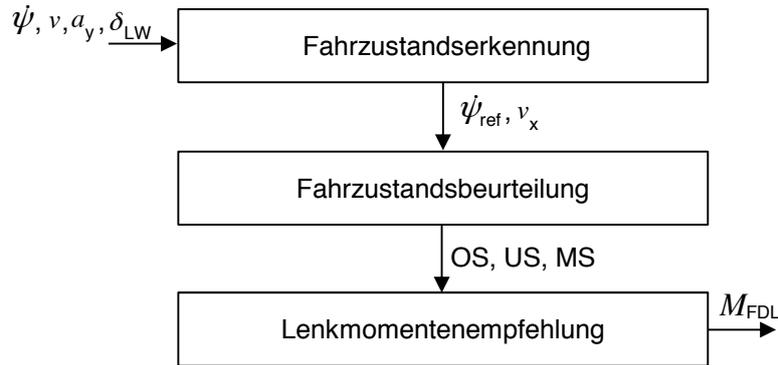


Bild 4.7.: Funktionsbausteine der Fahrdynamischen Lenkmomentenempfehlung

Voraussetzung für die Ermittlung einer passenden Lenkmomentenempfehlung ist die Erkennung und Beurteilung der Fahrsituation. Hierzu werden in der Fahrzustandserkennung mithilfe von serienmäßig vorhandenen Sensorsignalen die für die Beschreibung des Fahrzustands erforderlichen Größen wie die Referenzgierrate  $\dot{\psi}_{ref}$  oder die Fahrzeuggeschwindigkeit in Längsrichtung  $v_x$  ermittelt. Der Baustein Fahrzustandsbeurteilung verwendet in der nächsten Instanz die oben genannten Zustandsgrößen, um den Grad des Übersteuerns (OS), Untersteuerns (US) oder  $\mu$ -Split (MS) zu klassifizieren und somit die richtige Funktionskomponente der FDL aktivieren zu können. Die Erkennung und Beurteilung des Fahrzustands basieren auf validierten Fahrzeugmodellen, die das ungestörte Referenzverhalten des Fahrzeugs bei dem aktuellen Lenkwinkel darstellen. Sie sind in ähnlicher Form auch aus der Literatur [54, 122, 129] bekannt – beispielsweise aus Funktionsdarstellungen des ESP – und werden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter ausgearbeitet.

Bei dem Baustein zur Bestimmung der Lenkmomentenempfehlung handelt es sich um das Kernstück der FDL-Funktion. Die Basis dieser Teilfunktion bildet ein Gierratenregler, der die Differenz zwischen der Ist-Gierrate  $\dot{\psi}_{ist}$  und der errechneten Referenzgierrate  $\dot{\psi}_{ref}$  als Regelgröße verwendet. Da die Bestimmung von  $\dot{\psi}_{ref}$  modelltechnisch in Abhängigkeit des Fahrerlenkwinkels erfolgt, wird die resultierende Lenkmomentenempfehlung  $M_{FDL}$  maßgebend durch das Verhalten des Fahrers beeinflusst.

Bild 4.8 zeigt eine vereinfachte Darstellung, die das grundlegende Prinzip der Gierratenregelung auf Basis eines PD-Reglers wiedergibt. Zusätzlich zu dieser Regelung werden weitere Kenngrößen wie die Fahrzeuggeschwindigkeit, die Querbewegung, das Pendelverhalten des Fahrzeugs sowie die rückgekoppelte Fahrerreaktion als Informationen zur Justierung des Faktors  $K_{FDL}$  herangezogen. Um den Fokus auf die wesentliche Funktionalität und die Parametrisierungsmöglichkeiten der FDL zu legen, werden diese Komponenten hier nicht weiter betrachtet.

Aus der Abbildung geht hervor, dass der verwendete Gierratenregler nicht direkt ein Zusatzlenkmoment bestimmt und der regulären Lenkkennlinie überlagert, sondern einen Faktor  $K_{FDL}$  ableitet, der sich aus einem proportionalen Anteil  $K_P$  und einem differenzierenden Anteil  $K_D$  der Gierratendifferenz  $e_{\dot{\psi}}$  zusammensetzt. Dieser Faktor wird anschließend mit  $M_{ISM}$  – die für die Fahrsituation bestimmte Lenkunterstützung der Servolenkung

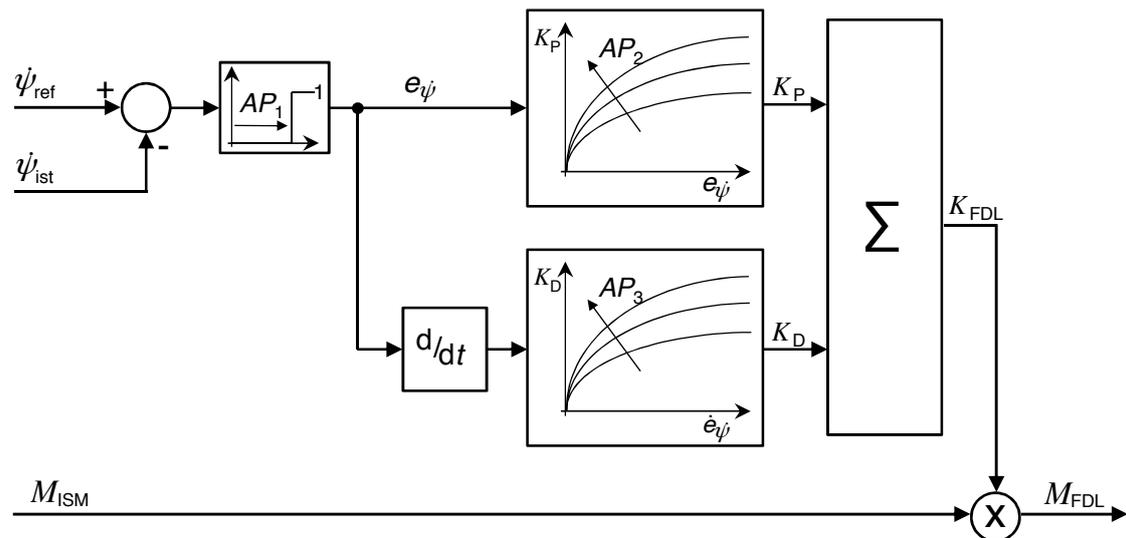


Bild 4.8.: Prinzip der Gierratenregelung zur Bestimmung der Lenkmomentenempfehlung einer FDL (vereinfachte Darstellung)

(vgl. Kapitel 1.2.1) – multipliziert und vom untergeordneten EPS Regler am Drehstab eingeregelt. Somit wird bei diesem Verfahren die durch die jeweilige Fahrsituation eindeutig definierte Unterstützungsleistung der Servolenkung durch die FDL erhöht beziehungsweise reduziert. Diese Herangehensweise erweist sich im Vergleich zum klassischen EPS-Regelungskonzept als besonders vorteilhaft, weil durch die Regelung des resultierenden Moments  $M_{FDL}$  die Reproduzierbarkeit der Lenkmomentenempfehlung in jeder Fahrsituation sichergestellt werden kann und diese für den Fahrer als eindeutige Information ohne weitere Störgrößen zur Verfügung gestellt wird.

Aus den Ergebnissen der Streuungsanalyse in Kapitel 3.2 geht hervor, dass unterschiedliche Fahrer auch verschieden auf das gleiche Zusatzlenkmoment reagieren können. Um einen möglichst hohen Einfluss der FDL zu erreichen, ist eine fahreradaptive Gestaltung von  $M_{FDL}$  ein zielführender Weg bei der Realisierung der Funktion. Für die genaue Auslegung der Lenkmomentenempfehlung bietet die Funktion die folgenden parametrisierbaren Freiheitsgrade:

- die Eingriffsschwelle durch den Parameter  $AP_1$ ,
- das Niveau durch den Parameter  $AP_2$  und
- den Gradienten durch den Parameter  $AP_3$ .

Die Auswirkungen unterschiedlicher Parametrisierungen für  $AP_2$  und  $AP_3$  auf das resultierende Moment  $M_{FDL}$  verdeutlicht Bild 4.9 am Beispiel einer Gegenlenkempfehlung nach rechts. Die hier aufgeführten Verläufe entstammen aus der Simulation.

Die genaue Festlegung dieser Freiheitsgrade erfolgt im Rahmen von Fahrversuchen mithilfe des subjektiven Eindrucks geschulter Testfahrer. Diese Abstimmung richtet sich in der Regel nicht an verschiedene Fahrertypen, sondern es entsteht eine Auslegung, die für einen Großteil von Fahrern eine zufriedenstellende Lösung bietet. Für eine adaptive

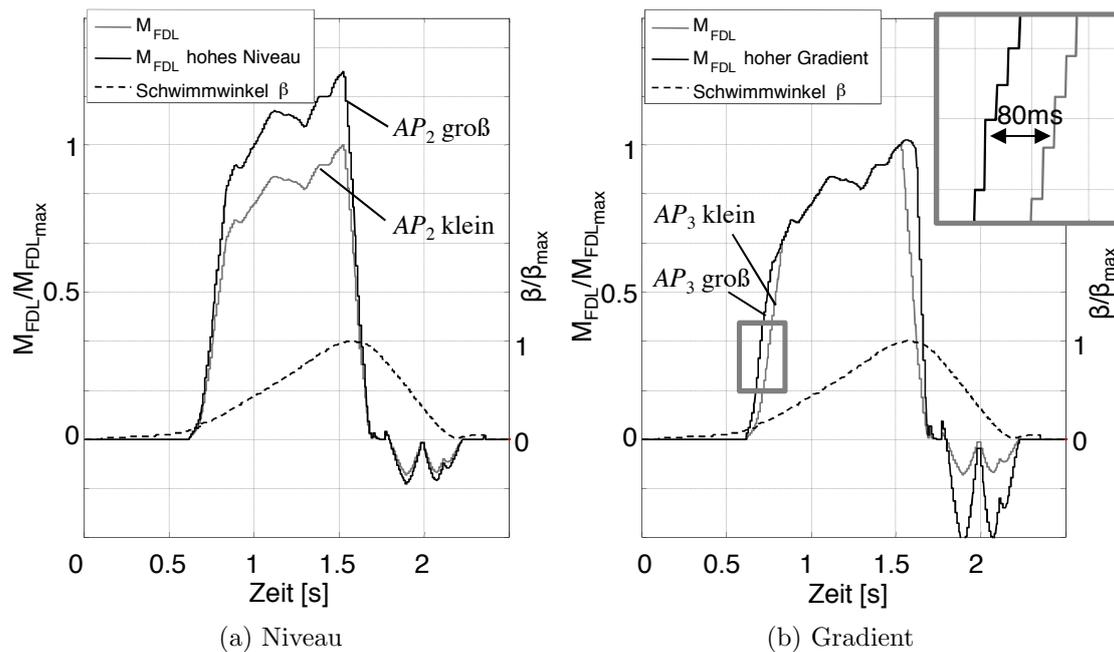


Bild 4.9.: Parametrisierung von Niveau und Gradient einer Gegenlenkempfehlung nach rechts

Gestaltung des Moments für verschiedene Fahrertypen bietet sich die Variation der oben genannten Freiheitsgrade an. Inwieweit dadurch ein Mehrwert der Lenkmomentenempfehlung für den Fahrer erwartet werden kann, wird im Rahmen der folgenden Untersuchungen in Kapitel 5 geklärt.

### Bewertung der Beherrschbarkeit

Die Gestaltung der Lenkmomentenempfehlung muss an die jeweilige Fahrsituation angepasst werden und kann je nach Applikation verschiedene Formen und Ausprägungen annehmen. Unabhängig von dieser Applikation darf das durch die FDL erzeugte Moment aber maximal so hoch gestaltet sein, dass der Fahrer durch die Funktion nicht bevormundet wird und die volle Verantwortung jederzeit bei ihm verbleibt. Die Funktion integriert den Fahrer in die Stabilisierungsaufgabe, lässt ihm aber zu jeder Zeit die Möglichkeit, die Lenkmomentenempfehlung zu übersteuern, beispielsweise eine Lenkbewegung in die entgegengesetzte Richtung ausführen, um ein Hindernis zu umfahren. Zur Sicherstellung dieser grundlegenden Voraussetzung für die FDL-Funktion müssen die maximalen Schwellen und Gradienten der Empfehlung in Übereinstimmung mit den in Kapitel 3.1 aufgeführten Ergebnissen der Untersuchung zur Beherrschbarkeit von diskreten Zusatzlenkmomenten gewählt werden. Zur Beurteilung, wie stark die geregelten Zusatzlenkmomente der FDL den Fahrer beeinflussen, werden in einer Folgeuntersuchung die in verschiedenen Situationen auftretenden Momente hinsichtlich ihrer Beherrschbarkeit bewertet. Hierzu wird wie folgt vorgegangen:

1. Aufzeichnung der resultierenden Lenkmomentenempfehlung  $M_{FDL}$  für die verschiedenen kritischen Übersteuersituationen: Gasstoß in der Kurve, Bremsen auf  $\mu$ -Split, doppelter Spurwechsel, Anregung durch Schleuderplatte.
2. Künstliche Überlagerung des aufgezeichneten Moments als störendes Ereignis bei ungestörter Geradeausfahrt analog zum Versuch in Kapitel 3.1.
3. Bewertung der maximal induzierten Gierrate durch das Zusatzlenkmoment mithilfe des ermittelten Verhältnisses zwischen induzierter Gierrate und der subjektiven Störungsbewertungsskala (vgl. Gleichung 3.1).

Bild 4.10 zeigt als Ergebnis den durch die Momentenüberlagerung auftretenden Bereich der maximalen Gierraten, eingestuft in die subjektive Störungsbewertung der vorangegangenen Studie. Der Versuch wurde exemplarisch am Beispiel von drei Probanden durchgeführt, wodurch sich der kleine Streubereich der ermittelten Werte erklären lässt. Dargestellt sind jeweils der minimale und maximale Wert der aufgetretenen Gierraten.

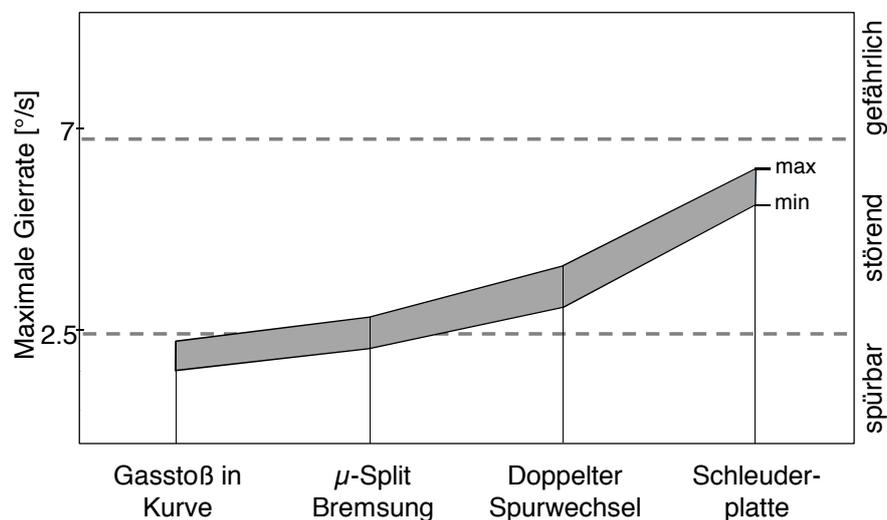


Bild 4.10.: Eingriffsinduzierte Gierrate durch fehlerhafte Lenkmomentenaufschaltung bei Geradeausfahrt

Anhand der Grafik wird deutlich, dass die resultierenden Gierraten bei fehlerhafter Aufschaltung insgesamt in die Kategorie störend fallen und nicht als gefährlich gelten. Dies entspricht auch den subjektiven Urteilen, bei denen kein Fahrer das Moment als gefährlich bewertet hat. Der Fahrer wird somit durch die FDL-Funktion in seiner Handlung nicht eingeschränkt. Obwohl die Lenkmomentenempfehlung für das gleiche Fahrmanöver sehr ähnlich ausfällt, sind deutliche Unterschiede im Einfluss von  $M_{FDL}$  für verschiedene Fahrmanöver zu erkennen. Die maximal induzierten Gierraten bei Geradeausfahrt rufen bei einer Schleuderplattenanregung die stärkste Fahrzeugreaktion hervor und sind als das kritischste Fahrmanöver zu betrachten. Als Ergebnis dieses Versuchs lässt sich festhalten, dass der Fahrer die Empfehlung der FDL stets überlenken kann und seinem gewünschten Fahrkurs, in diesem Fall die Geradeausfahrt, mit vernachlässigbar kleiner Abweichung weiter fortfahren kann. Die FDL-Funktion mit den für diesen Versuch applizierten Parametern  $AP_1$ ,  $AP_2$  und  $AP_3$  ist somit als nicht sicherheitsrelevant einzustufen.

## 5. Wirksamkeit einer Lenkmomentenempfehlung in Übersteuersituationen

Nachdem im vorherigen Kapitel die FDL-Funktion für drei unterschiedliche Anwendungsbereiche aus funktionaler Sicht vorgestellt wurde, wird im vorliegenden Kapitel der tatsächliche Mehrwert einer solchen Lenkmomentenempfehlung im Fall eines übersteuernden Fahrzeugs untersucht. Das Ziel dieser Untersuchungen liegt darin, den Mehrwert der Funktion für den realen Einsatz im Feld nachzuweisen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind entscheidend für eine mögliche Durchsetzung der Funktion am Markt, da sie bewerten, ob die FDL tatsächlich einen Zugewinn an Sicherheit für den Normalfahrer darstellt oder ob sie eher zu unangemessenen Reaktionen des Fahrers führt. Systematische Untersuchungen dieser Art dienen nicht nur „zur Beruhigung des Managements“ [66], sondern sind auch ein wesentlicher Prozessschritt im Rahmen der Entwicklung neuer Funktionen. Insbesondere bei Assistenzsystemen, die stärker mit dem Fahrer interagieren, ist auch die Fahrerakzeptanz ein wesentliches Kriterium bei der Bewertung der Funktion, wie bereits Erfahrungen bei der Entwicklung des Adaptive Cruise Control (ACC) zeigen. Mithilfe der zahlreichen Probandenstudien [7, 34, 36] wurde hier eine kontinuierliche Optimierung der Teilkomponenten im Rahmen des Entwicklungsprozesses erwirkt und ein entscheidender Beitrag für die positiven Kundenrückmeldungen nach Serieneinführung geleistet.

Aufgrund der Komplexität der Fahrsituation stellt die Durchführung einer Probandenstudie im fahrdynamischen Grenzbereich eine große Herausforderung dar. Die Reproduzierbarkeit der Fahrzeugreaktion oder Gewöhnungseffekte des Normalfahrers sind Gründe, warum bislang nur wenige Untersuchungen zu diesem Thema unter realen Versuchsbedingungen stattgefunden haben. Erste systematische Studien zur Ermittlung der Wirksamkeit und Akzeptanz einer Lenkmomentenempfehlung in fahrdynamisch kritischen Situationen wurden im Jahr 2003 von Barthel durchgeführt [13]. Für drei unterschiedliche Fahrmanöver erfolgen Probandenstudien im realen Versuchsträger, bei denen unter Verwendung eines Einspurmodells das Ausmaß der fahrdynamischen Grenzsituation abgeschätzt und mithilfe eines einfachen Momentenreglers eine Lenkmomentenempfehlung durch eine Steer-by-Wire Lenkung (SbW) umgesetzt wird. Da die Fahrsituationen vergleichsweise moderat mit geringer Ausprägung der Gierstörung gewählt sind und in schwierigeren Fällen zusätzlich das ESP unterstützt, kann ein positiver Einfluss einer Lenkmomentenempfehlung in Übersteuersituationen nachgewiesen werden – insbesondere im Zusammenwirken mit dem ESP. Es ist allerdings anzumerken, dass es sich bei der untersuchten Funktion eher um eine Gegenlenkempfehlung mit einem vereinfachten Verfahren zur Ermittlung des Zusatzlenkmoments handelt. Das resultierende Moment, das durch Selbstversuche auf Amplituden kleiner 4Nm und Gradienten proportional zum Quadrat der Gierrate festgelegt wurde, ist nicht zu verwechseln mit der in Kapitel 4 vorgestellten FDL. Mit dem fortgeschrittenen Reifegrad dieser Funktion hinsichtlich einer Serieneinführung stellen sich

im Vergleich zu einer einfachen Gegenlenkempfehlung deutlich höhere Anforderungen an den Mehrwert.

Die Ergebnisse von Barthel werden auch gestützt durch nachfolgende Untersuchungen zur Wahrnehmung von Zusatzlenkmomenten [93]. Hierbei stellen Neukum et al. im Rahmen von Bremsmanövern auf einer  $\mu$ -Split Fahrbahn fest, dass positive Effekte in der Fahrerwahrnehmung und -reaktion erzielt werden, wenn ein Zusatzlenkmoment der Gierstörung des Fahrzeugs entgegenwirkt. Dabei handelt es sich bei den untersuchten Momentenvarianten um diskrete sprung- beziehungsweise sinusförmig aufgetragene Zusatzlenkmomente. Der Nachweis von Akzeptanz und Sicherheitsgewinn durch geregelte Lenkeingriffe in sicherheitsrelevanten Grenzsituationen bleibt nach Neukum die Aufgabe künftiger Studien. Obwohl die aufgeführten Untersuchungen aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums offene Fragen hinterlassen, bilden sie hinsichtlich der Vorgehensweise die Ausgangsbasis für zukünftige Studien mit ähnlichen Fragestellungen. In [33] werden beispielsweise grundlegende Inhalte für die Gestaltung von Probandenstudien im fahrdynamischen Grenzbereich diskutiert. Mit dem Ziel, die Wirksamkeit und Akzeptanz des ESP quantitativ zu bestimmen, werden grundlegende Herangehensweisen bei der Wahl der Fahrmanöver, der Definition geeigneter Qualitätskriterien sowie der Auswahl der Versuchspersonen betrachtet, die auch für die Untersuchungen in diesem Kapitel als Grundlage angewendet werden. Das Ziel ist, die FDL im Kreis der potenziellen Nutzer unter angemessenen ökonomischen Randbedingungen hinsichtlich des zu erwartenden Mehrwerts an Sicherheit zu analysieren. Dabei soll nicht der grundsätzliche Sachverhalt geklärt werden, ob ein Zusatzlenkmoment dem Fahrer das Potenzial zum verbesserten Lenkverhalten bietet. Vielmehr soll aufgezeigt werden, welchen Mehrwert eine ausgereifte FDL in einer anspruchsvollen Fahrsituation mit sich bringt, die ohne Assistenz zum Verlust der Kontrolle über das Fahrzeug führen könnte. Die Wahl des Versuchsdesigns soll die Möglichkeit bieten, folgende Fragen zu beantworten:

- Ist für alle Fahrer derselbe Mehrwert durch die Funktion zu erwarten?
- Wie ist die Akzeptanz des Systems für unterschiedliche Fahrertypen abgebildet?
- Kann eine falsche Interpretation der Empfehlung oder eine Störung des Fahrers durch das Lenkmoment ausgeschlossen werden?

## 5.1. Versuchsdesign

Grundsätzlich bieten sich zur Erprobung und zum Funktionsnachweis neuer Systeme die folgenden Varianten für die Wahl der Versuchsumgebung an:

1. modellbasiert mithilfe von validierten Fahrer- und Fahrzeugmodellen,
2. Fahrsimulator mit Probanden oder
3. realer Fahrversuch unter Verwendung von Versuchsfahrzeugen.

Die Auswahl der jeweiligen Testumgebung kann einen erheblichen Einfluss auf die erzielten Ergebnisse haben [71]. Während rein modellbasierte Erprobungen meist für Funktionsauslegungen oder Robustheitsuntersuchungen Verwendung finden, lassen sich mithilfe von Fahrsimulatoren und realen Fahrversuchen viel genauere Untersuchungen der Interaktion des Fahrers mit dem Assistenzsystem durchführen. Die wesentlichen Faktoren bei der Wahl der jeweiligen Versuchsvariante bestimmen sich aus der Zielsetzung der Studie, den technischen Möglichkeiten und den ökonomischen Randbedingungen.

An die zu ermittelnden Ergebnisse der folgenden Studie steht die grundsätzliche Anforderung, dass sie auf das realistische Verhalten von Normalfahrern in einer kritischen Fahr situation übertragbar sind. Eine vollständige Abbildung einer kritischen Situation durch einen Fahrsimulator ist allerdings unter angemessenen Randbedingungen nicht möglich, da Fahrer im fahrdynamischen Grenzbereich in erster Linie auf Fahrzeugbewegungen (Quer-, Längsbeschleunigung oder Gierrate) reagieren und diese am Simulator nur unzureichend abgebildet werden. Aus diesem Grund wird für die folgenden Untersuchungen der reale Fahrversuch angewendet. Mit dem Hintergrund, die verwendete Versuchsgestaltung auch in Zukunft für ähnliche Probandenstudien einsetzen zu können, werden für die genaue Festlegung des Fahrmanövers und des Versuchsablaufs zahlreiche Voruntersuchungen durchgeführt. Aus diesem Grund wird das Versuchsdesign zur Durchführung einer Probandenstudie im fahrdynamischen Grenzbereich detaillierter beschrieben.

### **5.1.1. Wahl eines geeigneten Fahrmanövers**

Im Rahmen der vorliegenden Studie wird der Einfluss der FDL-Funktion in der Fahr situation Fahrzeug-Übersteuern genauer untersucht, die für die meisten Fahrer eine der anspruchsvollsten Fahr situationen darstellt [129]. Sie entsteht, sobald die Hinterräder des Fahrzeugs die Grenzen der lateralen Traktion früher erreichen als die Vorderräder mit der Folge, dass die Ist-Gierrate im Vergleich zur Lenkbewegung deutlich erhöht wird und das Fahrzeugheck ausbricht (vgl. Kapitel 4.1). Ein klassisches Manöver zum Erreichen des Fahrzeug-Übersteuerns ist der VDA-Spurwechsel in Anlehnung an ISO 3888-1 [2]. Dies wird häufig zum Test oder zur Applikation von sicherheitsrelevanten Funktionen wie beispielsweise dem ESP verwendet. Ihre Anwendung für die Durchführung von Studien mit Normalfahrern ist allerdings umstritten, da die resultierende Fahrzeugreaktion stark abhängig von der ersten Lenkphase des Fahrers ist. Leichte Abweichungen beziehungsweise Unregelmäßigkeiten im Fahrerverhalten resultieren in Fahr situationen, die nicht miteinander vergleichbar sind. Außerdem ist der Gewöhnungseffekt der Fahrer an das Manöver sehr hoch, da sie stets denselben Parcours mit derselben Geschwindigkeit und in derselben Richtung abfahren. Der optimale Lenkwinkel zum erfolgreichen Durchfahren des Parcours wird bereits nach wenigen Versuchsdurchgängen erlernt und das Lenkverhalten des Fahrers durch eine Art Winkelsteuerung ersetzt.

Neben dem VDA-Spurwechsel sind weitere Fahrmanöver zum Erreichen eines übersteuernden Fahrzeuges möglich. Für eine Probandenstudie sind allerdings nur Manöver geeignet, bei denen der Fahrer nicht selbst Maßnahmen ergreifen muss, um das Fahrzeug

in diesen Fahrzustand zu führen. Aufmerksamkeit und Energie des Fahrers müssen sich auf die eigentliche Stabilisierungsaufgabe beschränken. Die nachfolgenden Manöver erfüllen diese Voraussetzung und werden im Rahmen von Vorversuchen detaillierter auf ihre Eignung für die beabsichtigte Studie untersucht:

**$\mu$ -Split Bremsung:** Bei der Fahrt auf einer Fahrbahn mit unterschiedlichen Reibwerten (vgl. Kapitel 4.1) erfolgt die Einleitung eines Bremsvorgangs durch den begleitenden Versuchsleiter, beispielsweise mithilfe einer externen Ansteuerungsmaßnahme des Bremsdrucks. Aufgrund der unterschiedlichen Wirksamkeit der Bremskräfte erfolgt eine Drehbewegung des Fahrzeugumpfes in Richtung des höherwertigen Reibwertes. Das Ereignis tritt für den Fahrer überraschend ein, da er nicht vorher absehen kann, wann der Bremsvorgang vom Versuchsleiter eingeleitet wird. Allerdings sind die Drehrichtung des Fahrzeugs sowie die Intensität der Anregung stets identisch, wenn der Parcours mit derselben Fahrzeuggeschwindigkeit durchfahren wird. Für eine Probandenstudie ist dieses Manöver somit nur bedingt geeignet, da der Fahrer nach wiederholtem Durchfahren einen bestimmten Lenkwinkelverlauf zur Stabilisierung des Fahrzeugs erlernt.

**Destabilisierender Bremseingriff:** Während einer stationären Kurvenfahrt erfolgt die gezielte Bremsung des kurveninneren, hinteren Rades durch den begleitenden Versuchsleiter. Dies führt zu einer Gierbewegung des Fahrzeugs in die kurvenäußere Seite. Alternativ bietet sich innerhalb der Kurve ein Reibwertsprung an, beispielsweise durch eine Teilbewässerung der Fahrbahn. Vorteile dieses Manövers zeigen sich zum einen in der eindeutigen Reproduzierbarkeit der Fahrzeugreaktion und zum anderen in der einstellbaren Intention, die durch die Stärke des Bremseingriffs variiert werden kann. Nachteilig hingegen wirkt sich die vorgeschriebene Richtung aus, in die das Fahrzeugheck ausbricht – sie wird durch die Kurvenrichtung definiert. Bremseingriffe haben zudem den Nachteil, dass eine Änderung in der Zahnstangenkraft entstehen kann, die zu einer Momentenrückmeldung am Lenkrad führt. Die Unterscheidung, ob das Moment durch die FDL oder durch den Bremseingriff erzeugt wurde, ist für den Fahrer nur schwer möglich.

**Anregung durch eine Schleuderplatte:** Das Prinzip einer Schleuderplattenanregung kommt in vielen Fahrsicherheitstrainings zur Anwendung, bei der die Fahrer das Verhalten des Fahrzeugs im fahrdynamischen Grenzbereich erfahren können. Sobald die Hinterräder des Fahrzeugs die Platte überfahren, führt diese eine seitliche Bewegung aus und überträgt einen Kraftimpuls auf das Fahrzeugheck. Dies hat zur Folge, dass die Hinterräder des Fahrzeugs auf der folgenden, meist bewässerten Fahrbahn zu rutschen beginnen und das Fahrzeug in den übersteuernden Fahrzustand versetzt wird. Aufgrund der stets gleichen Auslenkung der Platte wird eine vollständig reproduzierbare Anregung des Fahrzeugs erreicht, wenn die Platte mit derselben Geschwindigkeit überfahren wird. Weiterhin wird der Gewöhnungseffekt des Fahrers möglichst gering gehalten, da die Auslöserichtung der Platte variiert werden kann. Der Fahrer kann im Voraus nicht absehen,

in welche Richtung die erste Lenkbewegung erfolgen muss. Er muss die Fahrzeugreaktion abwarten und dann ein geeignetes Lenkmanöver zur Stabilisierung auswählen.

Für die Wahl des Fahrmanövers zur Durchführung einer Probandenstudie werden zusammenfassend in Tabelle 5.1 die zur Auswahl stehenden Manöver anhand definierter Kriterien bewertet.

Tabelle 5.1.: Bewertung möglicher Fahrmanöver für eine Probandenstudie: geeignet (+), bedingt geeignet (o) und ungeeignet (-)

Manöver	Kriterium	Reproduzierbarkeit	Gewöhnungseffekt	Fahrerbeanspruchung	Längsdynamikeinfluss
VDA-Spurwechsel		-	-	-	o
$\mu$ -Split Bremsung		+	-	o	-
Destabilisierender Bremseneingriff		+	-	o	o
Schleuderplattenanregung		+	+	+	+

Neben den bereits erläuterten Kriterien *Reproduzierbarkeit* und *Gewöhnungseffekt* werden zwei weitere Kriterien für die Bewertung des Fahrmanövers betrachtet. Die *Fahrerbeanspruchung* bezeichnet Aufgaben des Fahrers, die neben der eigentlichen Stabilisierungsaufgabe zusätzlich durchgeführt werden müssen. Beim VDA-Spurwechsel ist beispielsweise die Durchführung der ersten Lenkphase eine zusätzliche Beanspruchung, um reproduzierbar in den übersteuernden Fahrzustand zu gelangen. Auch das Einhalten einer vorgegebenen Fahrgeschwindigkeit stellt einen negativen Einfluss auf den Stressfaktor dar. Bei den beiden Manövern mit externem Bremseneingriff wird automatisch auch der Tempomat deaktiviert, wodurch eine manuelle Geschwindigkeitsregelung durch den Fahrer erforderlich wird. Normalfahrern ist es in Grenzsituationen nur schwer möglich, eine Unterscheidung zwischen den Einflüssen der Längs- und Querdynamik zu treffen. Aus diesem Grund sind Fahrmanöver, die einen längsdynamischen Einfluss beinhalten, also beispielsweise eine Bremsung des Fahrzeugs erfordern ( $\mu$ -Split Bremsung und destabilisierender Bremseneingriff), für die subjektiven Bewertungen der Fahrer nur bedingt geeignet. Dieser Einfluss wird mit dem Kriterium *Einfluss der Längsdynamik* bewertet.

Mithilfe der Bewertungsmatrix aus Tabelle 5.1 wird die Anregung durch eine Schleuderplatte für die Durchführung der Probandenstudie gewählt. Sie erweist sich in allen vier Kriterien als vorteilhaft gegenüber den anderen Manövern. Die Fahrerbeanspruchung ist gering, da der Fahrer sich mit keiner Zusatzaufgabe beschäftigen muss. Und im Manöver

ist kein Einfluss der Längsdynamik vorhanden, wenn die Bremse nicht betätigt wird. Weiterhin können durch Variation der Auslenkgeschwindigkeit der Platte verschiedene Intensitäten der Fahrzeuganregung erreicht werden. Die genaue Beschreibung dieses Fahrmanövers und die Darstellung der zeitlichen Verläufe wichtiger Größen erfolgen in Abschnitt 5.2.

### 5.1.2. Probandenauswahl

Die Rekrutierung der Probanden geschieht durch einen Fragebogen mit etwa 40 Fragen an die jeweiligen Teilnehmer (siehe Anhang A). Die Fragestellungen entstammen aus Publikationen, die sich im Rahmen von Probandenstudien insbesondere mit der Ermittlung unterschiedlicher Fahrertypen durch die Selbsteinschätzung der Fahrer beschäftigen [7, 15, 30, 32]. Aus der Menge möglicher Antworten werden die Kandidaten anhand ihrer Eigenschaften Erfahrung, Sportlichkeit und Interesse hinsichtlich der Fahrzeugführungsaufgabe klassifiziert.

Von allen Bewerbern werden  $N=12$  Probanden zur Teilnahme an der Studie ausgewählt. Die Auswahl basiert auf den Eigenschaften Alter (50% jünger als 30 Jahre), Geschlecht (50% weiblich) und der Fahrerfahrung. Dabei werden Risiko-Fahrer (Fahranfänger und Senioren, vgl. Kapitel 1.1) bei der Auswahl nicht berücksichtigt, um nicht zu viele unterschiedliche Fahrergruppen in der Stichprobe zu vermischen. Im Gegensatz zur Studie in Kapitel 2 werden die Probanden bei dieser Studie für ihre Teilnahme nicht entlohnt. Da die freiwillige Teilnahme auf eine Technik Affinität der Fahrer hinweisen könnte mit einer entsprechend positiven Grundstimmung, werden die mithilfe des Fragebogens ermittelten extremen Kandidaten für die Teilnahme ausgeschlossen.

Bild 5.1 stellt die Übersicht der ausgewählten Personen dar. Die beiden Eigenschaften Fahrstil (ruhig/komfortabel bis sportlich/aggressiv) und Technik-Affinität werden hier lediglich als Zusatzinformation aufgeführt (Wertebereich -5 bis 5), haben aber auf die Gruppierung der Probanden keinen Einfluss. Für alle Fahrergruppen wird versucht, mindestens zwei Probanden unterschiedlichen Geschlechts zu rekrutieren. Bei den statistisch am häufigsten vertretenen Fahrergruppen (Gruppe 2: ältere Fahrer mit viel Fahrerfahrung und Gruppe 3: junge Fahrer mit wenig Fahrerfahrung) wird mindestens die doppelte Anzahl erreicht. Die Gruppe ältere männliche Fahrer mit wenig Fahrerfahrung kann in der Stichprobe nicht besetzt werden.

### 5.1.3. Versuchsfahrzeug und Messgrößen

Als Versuchsträger dienen die beiden Fahrzeuge, die bereits in Kapitel 2 für die Untersuchungen zur Wahrnehmung von Zusatzlenkmomenten eingesetzt wurden. Zusätzlich zu den serienmäßig vorhandenen Fahrzeug-Sensorsignalen werden mithilfe von Schätz-Algorithmien, die speziell auf die Fahrsituation Schleuderplattenanregung ausgelegt sind, weitere Größen wie der Fahrzeug-Schwimmwinkel  $\beta$  und die Referenzgierrate  $\dot{\psi}_{ref}$  ermittelt.

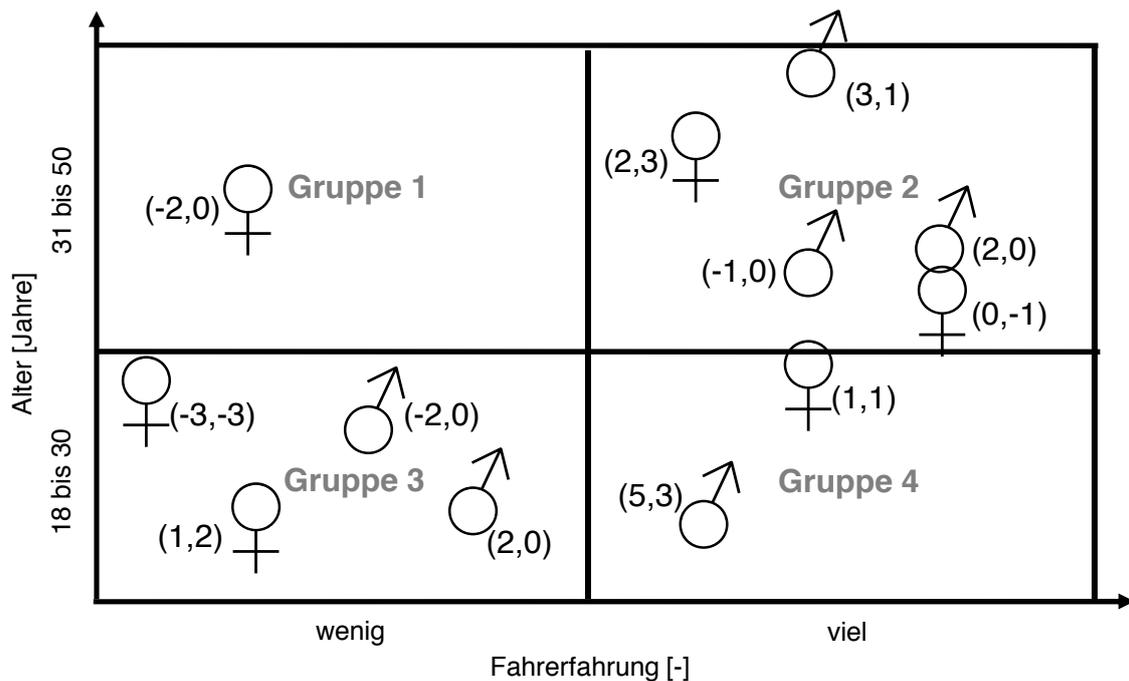


Bild 5.1.: Gruppierung der Probanden nach Alter, Fahrerfahrung und Geschlecht. Zusatzinformation in Klammern: (Fahrstil, Technik-Affinität)

Während der gesamten Versuche wurde die ESP-Funktion des Fahrzeugs deaktiviert, damit die Bewertung des Fahrer- und Fahrzeugverhaltens nur auf Basis der FDL-Funktion erfolgt. Andernfalls würden sowohl die objektiven Messwerte als auch die subjektiven Einschätzungen des Fahrers durch die Bremsengriffe des ESP beeinflusst. Nachteilig wirkt sich diese Herangehensweise auf die Verfügbarkeit der Geschwindigkeitsregelanlage aus. Sie deaktiviert sich mit der Abschaltung des ESP, wodurch die Probanden gezwungen sind, die Regelung der Geschwindigkeit selbst zu übernehmen.

#### 5.1.4. Versuchsplan

Den Versuchsteilnehmern wird vor Versuchsbeginn das Fahrzeug erklärt und die individuell erforderliche Zeit zur Gewöhnung an das Fahrverhalten zur Verfügung gestellt. Diese Lernphase stellt eine Art „eingeschwungenen Zustand“ dar [66], nach der die Reaktionen der Fahrer als repräsentativ angesehen werden können. Alle Fahrer bekommen die Aufgabe, das Fahrzeug nach der Anregung durch die Schleuderplatte allein auf Basis von Lenkbewegungen zu stabilisieren und anschließend fahrstabil aus einer aufgestellten Pylonengasse zu fahren. Um die angestrebten Zielsetzungen der Studie untersuchen zu können, wird der gesamte Versuchsaufbau in drei aufeinanderfolgende Durchgänge unterteilt. Während die Fahrer im ersten Durchgang keine Informationen über die FDL-Funktion erhalten, werden sie in den folgenden Durchgängen schrittweise immer mehr über die Funktion und ihre Aktivität aufgeklärt (Tabelle 5.2). In den Durchgängen 2 und 3 wird zusätzlich eine weitere Variante  $FDL_{high}$  eingesetzt. Diese ist vom Prinzip und von der Dynamik des Zusatzlenkmoments identisch mit der FDL, erreicht aber von der Amplitu-

de des Moments ein doppelt so hohes Niveau. Die in der Tabelle als „Passiv“ definierte Variante bezeichnet Fahrten, bei denen eine reguläre Servounterstützung durch die EPS erfolgt, aber keine Lenkmomentenempfehlung bereitgestellt wird.

Tabelle 5.2.: Versuchsplan je Fahrer mit drei unterschiedlichen Versuchsreihen

	Untersuchte Funktionsvarianten	Prinzip der FDL ist bekannt	FDL-Aktivität ist bekannt
Durchgang 1	Passiv, FDL	nein	nein
Durchgang 2	Passiv, FDL, FDL <sub>high</sub>	ja	nein
Durchgang 3	FDL, FDL <sub>high</sub>	ja	ja

Für jede der drei Funktionsvarianten Passiv, FDL und FDL<sub>high</sub> werden die Fahrer angewiesen, die Schleuderplatte dreimal je Durchgang zu überqueren. Die Gesamtzahl der Fahrten liegt somit bei 21: 6 Mal in Durchgang 1, 9 Mal in Durchgang 2 und 6 Mal in Durchgang 3. Die Verteilung der Funktionsvarianten je Durchgang erfolgt in einer fest vorgeschriebenen Reihenfolge, die für jeden der 12 Probanden identisch festgelegt ist (siehe Anhang B). In Durchgang 1 werden den Fahrern keine Informationen über die FDL bereitgestellt, um zu überprüfen, ob die Fahrer von der Funktion profitieren können, ohne ihren Einfluss zu kennen. In Durchgang 2 wird zwar das Prinzip der Funktion erläutert, es erfolgt aber keine Auskunft darüber, ob die Funktion bei der jeweiligen Fahrt aktiviert ist. Ziel dieses Durchgangs ist in erster Linie die Untersuchung der Wahrnehmbarkeit der Lenkmomentenempfehlung. Im letzten Durchgang wird den Probanden die Aktivität der Funktion versichert. Der Fahrer soll versuchen, die Empfehlung zu spüren und die Information für eine verbesserte Stabilisierung zu nutzen.

### 5.1.5. Subjektive Bewertung

Im Fahrzeug werden die Probanden durch zwei Versuchsleiter begleitet. Der Koordinator auf dem Beifahrersitz instruiert den Probanden und ist für die korrekte Einstellung der Funktionsvarianten verantwortlich. Der Beobachter auf dem Rücksitz führt eine Beurteilung des Fahrerhaltens sowie die Dokumentation von besonderen Auffälligkeiten und Kommentaren der Probanden aus. Zur Erfassung des subjektiven Eindrucks werden für jeden Durchgang Fragen vorbereitet, die im Anschluss an die Fahrt sowohl vom Fahrer selbst als auch in ähnlicher Form vom Beobachter beantwortet werden. Hierzu werden die Probanden aufgefordert, nach dem Manöver das Fahrzeug so zeitnah wie möglich anzuhalten

und ihre Eindrücke schriftlich festzuhalten. Die Fragen sind für alle Versuchsdurchgänge identisch formuliert und zielen auf die Beurteilung der folgenden Eigenschaften:

1. Bewertung des Fahrzeugverhaltens: *Wie beurteilen Sie den entstandenen Spurversatz?*
2. Bewertung des Fahrerverhaltens: *Wie beurteilen Sie Ihre Lenkbewegungen?*
3. Bewertung der Lenkmomentenempfehlung: *Wie beurteilen Sie den Eingriff?* (Nicht für Durchgang 1)

Die Antwortmöglichkeiten (Anhang C) sind erneut nach der 10-stufigen Skala nach Neukum et al. [90] aufgebaut, wie sie auch für die Untersuchungen in Kapitel 2 dargestellt wurden. Für die Übermittlung der Fragen wird bewusst auf elektronische Mittel (wie ein Touchscreen-Monitor) verzichtet, um den Fahrer nicht durch zusätzliche Technik im Fahrzeug abzulenken.

Der Beobachter bewertet mithilfe seines Fragebogens (Anhang D) auch zusätzliche Aspekte, die für die spätere Auswertung der Studie relevant sein können. Hierzu zählen beispielsweise die Halteposition des Lenkrads oder die Beanspruchung des Fahrers bei der Bewältigung des Fahrmanövers.

## 5.2. Versuchsauswertung

Durch die Anregung der Schleuderplatte wird ein kritischer Fahrzustand erzeugt, den der Fahrer ausschließlich durch sein Lenkverhalten zu beherrschen versucht. Zur Veranschaulichung der entstehenden Situation ist in Bild 5.2 das Fahrzeugverhalten infolge der Anregung F zum Zeitpunkt  $t_{\text{Start}} \approx 7,2\text{s}$  durch den Verlauf der Querbeschleunigung  $a_y$  und des Schwimmwinkels  $\beta$  dargestellt. Zusätzlich ist im Diagramm der Radwinkel als Ergebnis des vom Fahrer aufgebrauchten Lenkwinkels  $\delta_{\text{LW}}$  aufgeführt. Die abgebildete Fahrt erfolgt durch einen Testfahrer, der in diesem Fall das Fahrzeug nach etwa drei Sekunden ( $t_{\text{Ende}} \approx 10,1\text{s}$ ) erfolgreich stabilisiert.

Zum Zeitpunkt  $\textcircled{\text{A}}$  beim ersten Extremum der Querbeschleunigung verlässt das Fahrzeug die Schleuderplatte und rutscht mit den Hinterrädern über die bewässerte Fahrfläche. Der Betrag von  $a_y$  zeigt an dieser Stelle die eingestellte Anregungsstärke der Schleuderplatte. Sie wird im Rahmen der vorliegenden Versuche so eingestellt, dass der Betrag der Querbeschleunigung den definierten Bereich von  $6,2 \pm 0,3\text{m/s}^2$  nicht überschreitet. Durch den Anstieg von Gierrate und Schwimmwinkel bemerkt der Testfahrer die Instabilität des Fahrzeugs und beginnt nach einer Reaktionszeit von etwa 300ms ein gezieltes Gegenlenkmanöver mit großem Auslenkwinkel zum Zeitpunkt  $\textcircled{\text{B}}$  500ms nach  $\textcircled{\text{A}}$ . Die Stärke der Anregung, die erforderliche Reaktionszeit und der Lenkwinkelverlauf des Testfahrers führen dazu, dass das Fahrzeug nicht sofort stabilisiert wird, sondern dass eine Pendelbewegung des Fahrzeughecks in die entgegengesetzte Richtung (Folgependler) erfolgt  $\textcircled{\text{C}}$ . Durch die Lenkbewegung nach links dämpft der Testfahrer die Fahrzeugreaktion und erzielt in diesem Fall die erfolgreiche Durchfahrt der Pylonengasse  $\textcircled{\text{D}}$ .

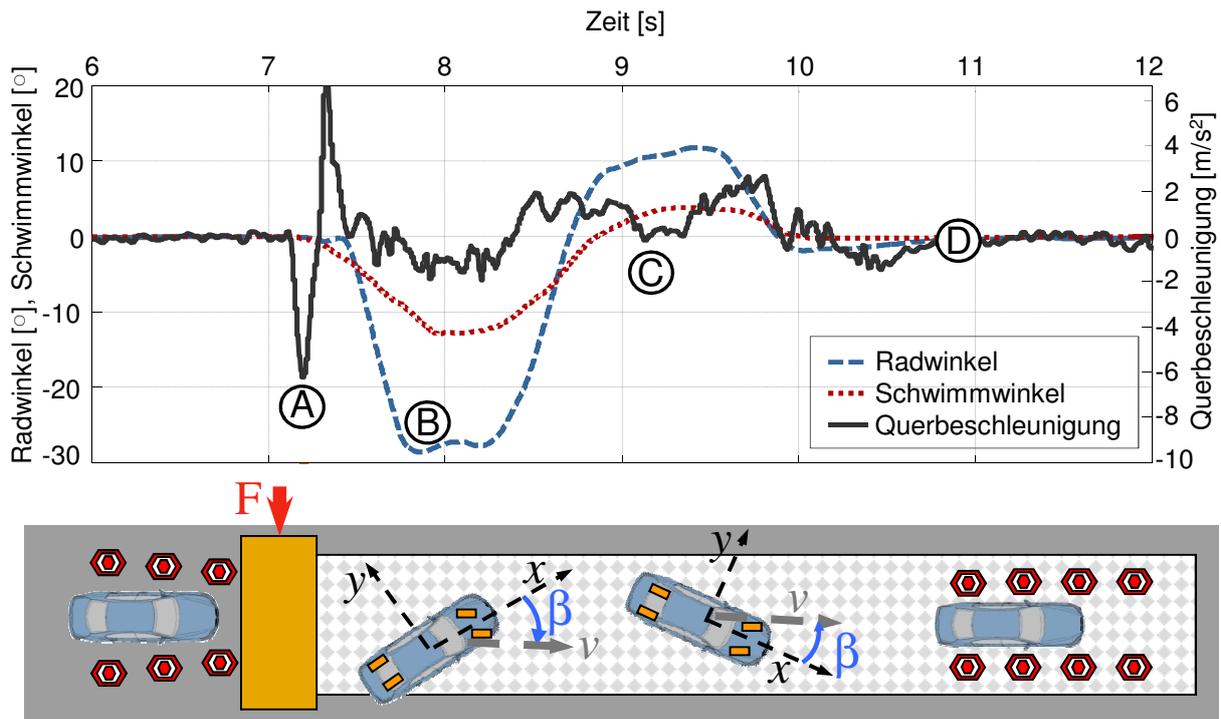


Bild 5.2.: Fahrzeugreaktion und Lenkverhalten eines Testfahrers infolge der Schleuderplattenanregung F

Eine optimale Fahrerreaktion zur Stabilisierung des Fahrzeugs zeichnet sich durch einen linearen Verlauf des Fahrer-Lenkwinkels in Abhängigkeit des Fahrzeug-Schwimmwinkels aus. In Bild 5.3 sind diese beiden Größen für die oben dargestellte Fahrt gegeneinander abgebildet.

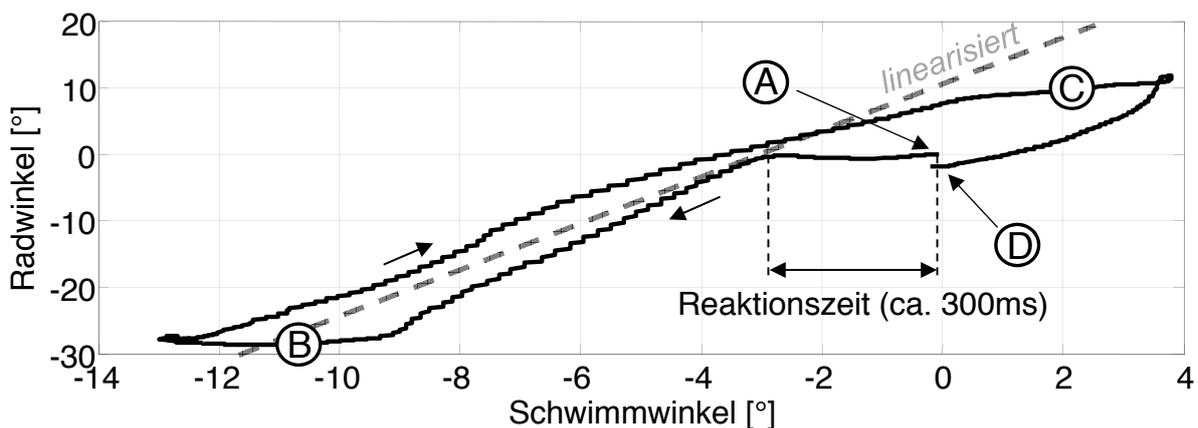


Bild 5.3.: Verlauf Schwimmwinkel zu Radwinkel beim Testfahrer

Wie aus dem resultierenden Verlauf der beiden Signale hervorgeht, ist selbst ein Testfahrer nicht in der Lage, einen exakt linearen Verlauf zwischen Schwimmwinkel und Radwinkel zu erreichen. Grund hierfür ist unter anderem die erforderliche Reaktionszeit, die vom Zeitpunkt der Plattenauslenkung bis zur Reaktion des Fahrers etwa 300ms beträgt. Zu diesem Zeitpunkt hat das Fahrzeug bereits einen Schwimmwinkel von etwa  $-3^\circ$  erreicht. Grundsätzlich muss der Fahrer immer eine wahrnehmbare Reaktion des Fahrzeugs abwarten,

bevor er eine weitere Lenkbewegung ausführt. Diese Zeitdifferenz zwischen Wahrnehmung und Reaktion sind ausschlaggebend dafür, dass der reale Verlauf von Schwimmwinkel zum Radwinkel eine zusätzliche Hysterese aufweist.

### 5.2.1. Aufbereitung von Messdaten

Um die nachträgliche Aufbereitung und den Anteil ungeeigneter Messungen gering zu halten, werden Prüfalgorithmen erstellt, die dem Koordinator nach jeder Fahrt die Gültigkeit eines Manövers rückmelden. Eine Fahrt wird nur dann als gültig bestätigt und muss nicht wiederholt werden, wenn jede der folgenden Anforderungen erfüllt ist:

- Die Fahrzeuggeschwindigkeit zum Zeitpunkt der Plattenanregung befindet sich im festgelegten Bereich von  $45 \pm 3\text{km/h}$ .
- Die Schleuderplatte hat mit der richtigen Intensität ausgelöst, gemessen durch die maximale Querbeschleunigung von  $6,2 \pm 0,3\text{m/s}^2$ .
- Der Fahrer hat während des Stabilisierungsvorgangs die Bremse des Fahrzeugs nicht betätigt.

Großen Einfluss hat dabei die Einhaltung der Fahrzeuggeschwindigkeit. Ist sie beispielsweise bei der Überfahrt der Schleuderplatte zu hoch, fällt die Verweildauer der Hinterachse auf der Schleuderplatte kürzer aus, was bei gleicher Plattenanregung in einer schwächeren Fahrzeugreaktion resultiert.

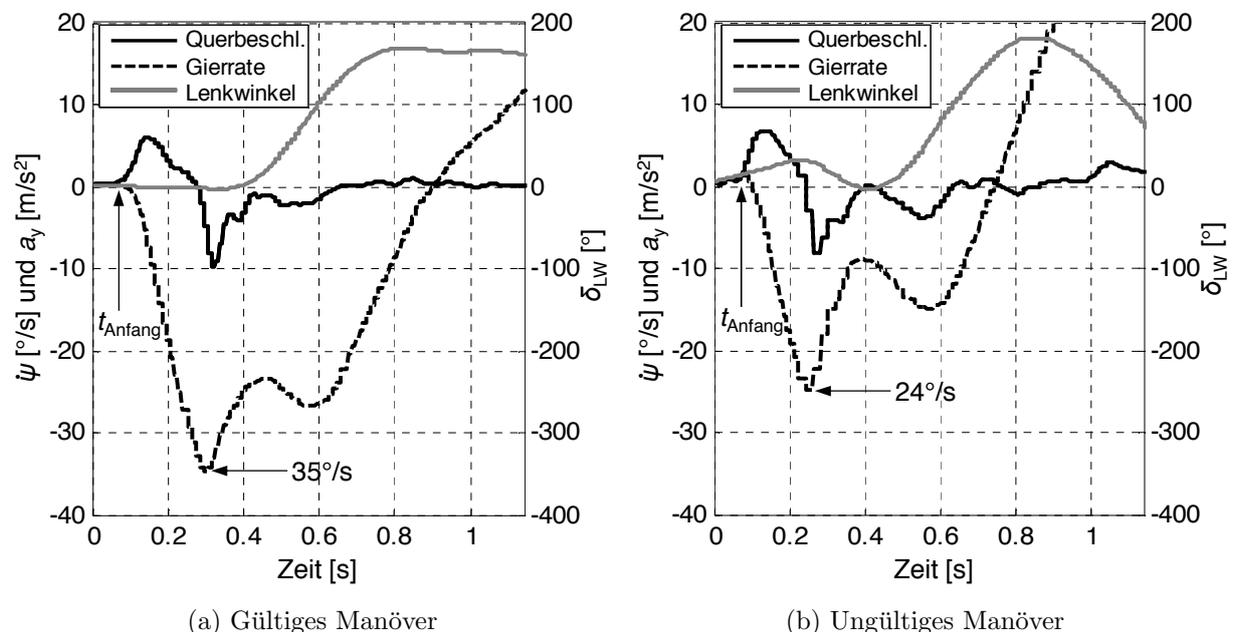


Bild 5.4.: Einfluss eines vorzeitigen Lenkmanövers auf die Gierreaktion des Fahrzeugs

Trotz der Prüfalgorithmen ist vor der Auswertung der Messdaten eine detaillierte Durchsicht der Daten im Hinblick auf die Gültigkeit notwendig. Ungültige Messungen treten bei Fahrten auf, bei denen der Versuchsplan nicht eingehalten wurde oder bei denen der

Fahrer bereits gelenkt hat, bevor die Platte auslöste. Bild 5.4 zeigt die unterschiedlichen Reaktionen des Fahrzeugs, wenn der Fahrer nach der Plattenauslösung ein Lenkmanöver einleitet (Bild 5.4a) oder wenn er bereits vor der Auslösung lenkt (Bild 5.4b). Ein vorzeitiges Lenkmanöver spiegelt sich sehr stark in der ersten Gierreaktion des Fahrzeugs wider, die als ein Maß für die Schwierigkeit der Fahrsituation dient. Je stärker die Gierreaktion, desto größer ist der notwendige Lenkaufwand des Fahrers zur erfolgreichen Stabilisierung des Fahrzeugs. Das Intervall für gültige Messungen wird bei der vorliegenden Auswertung bei einer Gierrate zwischen  $29$  und  $36^\circ/\text{s}$  festgelegt. Etwa jede achte durchgeführte Messung musste wegen der Verletzung einer dieser beiden Kriterien verworfen werden.

### 5.2.2. Spezifikation geeigneter Kenngrößen

Für die objektive Analyse des zu erwartenden Mehrwerts durch die FDL-Funktion sind Kenngrößen zu ermitteln, die für die dargestellte Fahrsituation relevante Informationen hinsichtlich definierter Eigenschaften in quantitativer Form ermöglichen. Mithilfe der Messdaten aus den Vorversuchen werden die in Bild 5.5 aufgeführten Kenngrößen identifiziert. Sie werden unterteilt in Kenngrößen  $K$  zur Darstellung des Fahrer- und des Fahrzeugverhaltens.

### 5.2.3. Definition eines Gütekriteriums

Aus den Ergebnissen in Kapitel 2 zur Interaktion der Fahrer mit Zusatzlenkmomenten geht hervor, dass das Ausmaß der Reaktionen verschiedener Fahrer individuell unterschiedlich ausfallen kann, insbesondere in einer kritischen Fahrsituation wie bei der  $\mu$ -Split Bremsung. Für die Bewertung der Wirksamkeit einer FDL ist es damit nicht zielführend die im vorherigen Abschnitt spezifizierten Kenngrößen über alle Fahrten und alle Fahrer zu mitteln. Zum einen ist dann keine Aussage über den Mehrwert der Funktion in Abhängigkeit der einzelnen Fahrer möglich. Zum anderen kann es beispielsweise vorkommen, dass Fahrer A im Allgemeinen eine deutlich intensivere Lenkreaktion ausübt als Fahrer B. Bei einer Mittelwertbildung des maximalen Lenkwinkels fällt dann die Reaktionsänderung von Fahrer B infolge einer Lenkmomentenempfehlung kaum ins Gewicht, obwohl sie verhältnismäßig größer sein kann als beim Fahrer A. Aus diesem Grund ist ein Kriterium erforderlich, das unter Berücksichtigung des fahrerindividuellen Mehrwerts dennoch eine gesamtheitliche Aussage über den zu erwartenden Mehrwert der FDL über alle Fahrer ermöglicht. Hierzu wird im ersten Schritt für jeden Fahrer  $F_i$  im Durchgang  $D_j$  der Einfluss  $G$  der Lenkmomentenempfehlung auf jeweils eine der in Bild 5.5 definierten Kenngrößen  $K$  ermittelt:

$$G_K(F_i, D_j) = \frac{\overline{K}(F_i, D_j)|_{\text{passiv}} - \overline{K}(F_i, D_j)|_{\text{FDL}}}{\overline{K}(F_i, D_j)|_{\text{passiv}}} \quad (5.1)$$

Im zweiten Schritt wird dieser fahrerindividuelle Mehrwert über die gesamten Fahrer errechnet, um einen quantitativen Wert zur Abbildung des Funktionseinflusses darzustellen.

Objektive Kenngrößen zur Beschreibung des Fahrerverhaltens

Zeichnung	Kenngrößen $K$	Beschreibung
	<p><u>Lenkreaktion</u></p> $E_1(\delta_{LW}) \text{ und } E_1(\dot{\delta}_{LW})$ $E_1(\dot{\delta}_{LW})/E_1(\dot{\psi})$	Die erste Lenkreaktion des Fahrers wird sowohl absolut als auch relativ in Abhängigkeit der Gierreaktion des Fahrzeugs ausgewertet.
	<p><u>Lenkaufwand</u></p> $\int_{t_{\text{Anfang}}}^{t_{\text{Ende}}}  \delta_{LW}(t)  dt$	Der gesamte Lenkaufwand, welcher zur Stabilisierung des Fahrzeugs vom Fahrer aufgebracht werden muss, ist definiert als das Integral des Lenkwinkelbetrags über die Zeit.
	<p><u>Lenkpräzision</u></p> $VZW \{\delta_{LW}(t)\}$ $VZW \{\dot{\delta}_{LW}(t)\}$	Die Anzahl der Lenkrichtungsänderungen pro Manöver (VZW) stellt ein Maß für die Lenkpräzision des Fahrers dar. Je häufiger korrigiert wird, desto unpräziser die Lenkbewegung.

Objektive Kenngrößen zur Beschreibung des Fahrzeugverhaltens

Zeichnung	Kenngrößen $K$	Beschreibung
	<p><u>Stabilisierungshäufigkeit und -dauer</u></p> $f_{\text{Stabil}} = \frac{\sum \text{Fahrten}_{\text{Stabil}}}{\sum \text{Fahrten}_{\text{Gesamt}}}$ $T_{\text{Stabil}} = t_{\text{Ende}} - t_{\text{Anfang}}$	Neben der Häufigkeit erfolgreicher Stabilisierungsvorgänge ist auch die erforderliche Dauer für die Stabilisierung des Fahrzeugs von Bedeutung.
	<p><u>Maß der Instabilität</u></p> $\max \{\beta(t)\}$ $VZW \{\beta(t)\}$	Für die quantitative Beschreibung des Ausmaßes einer Instabilität wird das Maximum des Schwimmwinkels sowie die Anzahl der Vorzeichenwechsel betrachtet.
	<p><u>Pendelverhalten</u></p> $\max \{\dot{\psi}(t)\}$ $VZW \{\dot{\psi}(t)\}$	Zusätzlich zum Ausmaß der Instabilität wird das Pendelverhalten mit Hilfe der maximalen Gierrate sowie der Anzahl der Vorzeichenwechsel bestimmt.

Bild 5.5.: Kenngrößen zur quantitativen Beschreibung des Fahrer- und Fahrzeugverhaltens

Die Angabe bezeichnet die individuelle, prozentuale Veränderung des Kennwerts durch den Einfluss der FDL mit der Besonderheit, dass jeder Fahrer relativ zu seinem eigenen Verhalten berücksichtigt wird.

$$\bar{G}_K(D_j) = \frac{\sum_{F_i} G_K(F_i, D_j)}{\#F_i} 100 \% \quad (5.2)$$

Um einen Einfluss von Gewöhnungseffekten der Fahrer an die Fahrsituation möglichst gering zu halten, wurde dieser Wert im ersten Schritt der Auswertung für jeden Durchgang  $D_j$  einzeln ermittelt und ausgewertet. Da aber kein systematischer Einfluss des Durchgangs auf das Verhalten der einzelnen Fahrer festgestellt werden konnte, erfolgt für die folgenden Darstellungen keine explizite Trennung der Durchgänge.

### 5.3. Ergebnisse

Bevor der Mehrwert der Funktion untersucht wird, ist die Frage nach der Akzeptanz vorrangig zu beantworten, denn eine Funktion, die eher stört als zu unterstützen, wird sich am Markt nicht durchsetzen können. Bild 5.6 zeigt hierzu die Akzeptanz-Bewertungen der Probanden in den Durchgängen 2 und 3 (Frage 3 auf Seite 60) für alle Fahrten mit FDL und FDL<sub>high</sub>.

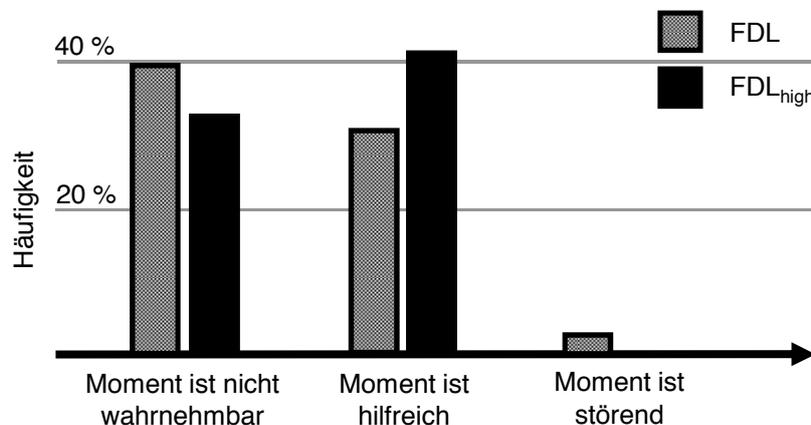


Bild 5.6.: Subjektive Beurteilung der Lenkmomentenempfehlung durch die Probanden

Die Bewertungen zeigen, dass in 40% der Fälle die FDL vom Fahrer nicht bewusst wahrgenommen wird. Dieses trifft insbesondere für Fahrten zu, bei denen der Fahrer korrekt in Richtung der Empfehlung lenkt und somit das Lenkmoment weniger spürbar ist. Nimmt der Fahrer das Moment wahr, wird sie in den meisten Fällen als hilfreich bewertet – insbesondere die Variante FDL<sub>high</sub>. Lediglich bei einer Fahrt wird die FDL als störend bewertet. Da dem Fahrer allerdings keine genaueren Fragen zum Hintergrund der Bewertung gestellt wurden, kann die Ursache dieser außerordentlichen Bewertung nicht geklärt werden.

Im nächsten Schritt wird die subjektive Einschätzung über die entstandene Fahrsituation bewertet. Da die Bewertungen der Fahrer aufgrund der hohen Anspannung in der Fahrsituation keine einheitlichen Aussagen hinsichtlich des Fahrzeug- und Lenkverhaltens bieten [81], werden im Folgenden die Bewertungen des Beobachters herangezogen. Hierzu zeigt Bild 5.7 die Häufigkeiten der Wertungen bei der Frage nach dem entstandenen Spurversatz. Dargestellt sind die Bewertungen aus den Versuchsreihen 1 und 2, da sie dieselbe Anzahl an Fahrten mit und ohne FDL aufweisen.

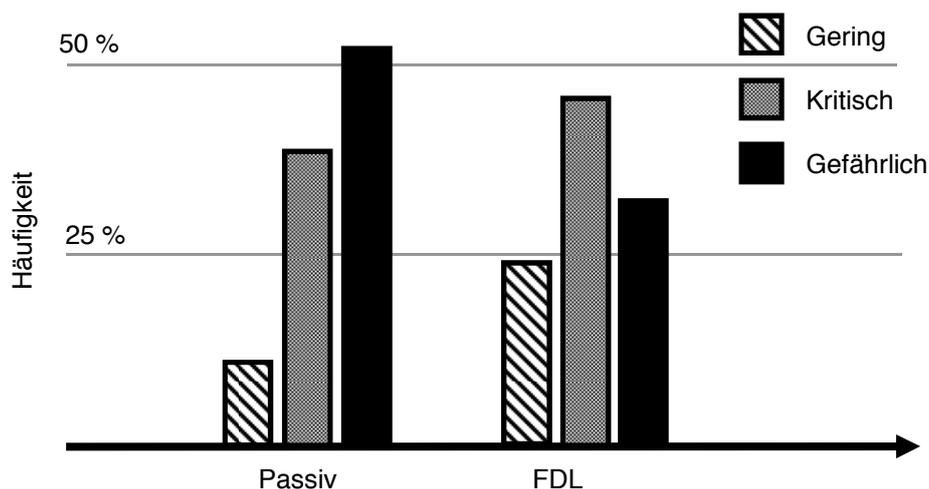


Bild 5.7.: Subjektive Einschätzung des entstandenen Spurversatzes durch den Beobachter

Den Urteilen des Beobachters zufolge wird der resultierende Spurversatz bei den meisten rein passiven Fahrten als kritisch oder sogar gefährlich eingestuft. Durch die FDL kann dieser um mehr als 20% reduziert und zugleich der Anteil des geringen Spurversatzes signifikant erhöht werden. Die subjektiven Urteile lassen grundsätzlich darauf schließen, dass mithilfe der FDL die Fahraufgabe besser gelöst werden kann als ohne.

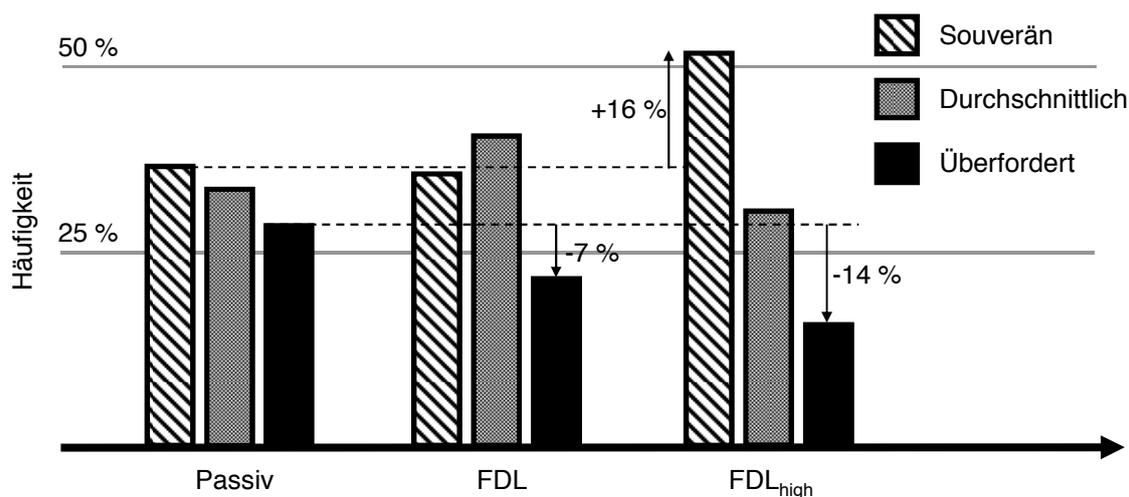


Bild 5.8.: Subjektive Einschätzung der Fahrerbeanspruchung durch den Beobachter

Diese Besserung ist auf das angepasste Fahrerverhalten infolge der Lenkmomentenempfehlung zurückzuführen. Bei Betrachtung der Fahrerbeanspruchung in Bild 5.8 wird deutlich,

dass die Häufigkeiten unterschiedlicher Fahrerverhalten bei passiver Fahrt in etwa gleich verteilt sind. Mehr als 30% der Fahrer sind hiernach in der Lage, allein auf Basis ihres Fahrvermögens das Fahrzeug souverän zu stabilisieren. Die Unterschiede bei den Beurteilungen werden bei aktivierter FDL größer. Je höher das Moment der Empfehlung, desto weniger Fahrer sind mit der Lenkaufgabe überfordert, wodurch die Anzahl der souverän und durchschnittlich gelösten Fahraufgaben gesteigert werden kann. Es ist aber auch festzustellen, dass trotz der maximalen Lenkmomentenempfehlung  $FDL_{high}$  dennoch 16% der Fahrer mit der Lenkaufgabe überfordert sind.

Die subjektiven Erstaussagen lassen sich bestätigen, wenn im zweiten Schritt die objektiven Messdaten hinzugezogen werden. In Bild 5.9 ist der Lenkwinkel- und Schwimmwinkelverlauf für erfolgreich stabilisierte und vergleichbare Fahrten in Abhängigkeit der jeweiligen Funktionsaktivität über die Zeit aufgetragen.

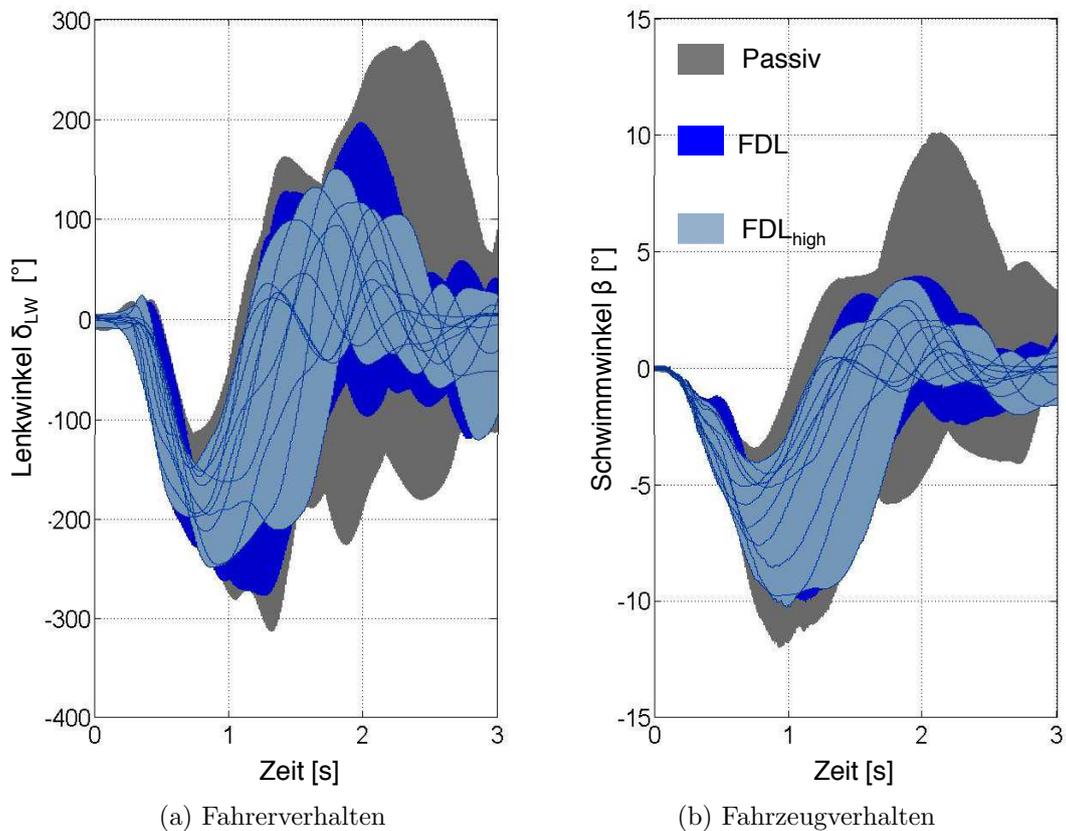


Bild 5.9.: Fahrerverhalten und Fahrzeugverhalten in Abhängigkeit der Funktionsaktivität

Wie aus Bild 5.9a hervorgeht, führen die Fahrer mit FDL oder  $FDL_{high}$  gezieltere Lenkbewegungen innerhalb eines deutlich schmaleren Lenkwinkelbandes aus. Diese im Allgemeinen auch schneller ausgeführten Bewegungen führen zu einer gedämpften Fahrzeugreaktion, die sich im Vergleich zu passiven Fahrten generell durch ein niedrigeres Schwimmwinkelniveau äußert (Bild 5.9b). Das frühzeitige Zurücklenken trägt zusätzlich dazu bei, starke Folgependler zu vermeiden und somit das Fahrzeug früher zu stabilisieren. Stellenweise auftretende Überhöhungen im Schwimmwinkelverlauf passiver Fahrten

(beispielsweise bei  $t=1.5s$ ) sind auf vereinzelte Fahrten zurückzuführen. Grundsätzlich ist der maximale Schwimmwinkel mit FDL oder  $FDL_{high}$  aber geringer als bei passiver Fahrt.

### 5.3.1. Gesamtheitliche Analyse

Zur Quantifizierung des Zugewinns durch eine Lenkmomentenempfehlung, erfolgt im nächsten Schritt eine gesamtheitliche Bewertung der Messungen über alle Fahrer und Fahrten. Hierzu werden die definierten Kenngrößen aus Kapitel 5.2.3 herangezogen und mithilfe von  $\overline{G}_K$  aus Gl. 5.2 ein Maß zur Beschreibung des Fahrer- und Fahrzeugverhaltens abgeleitet. In Tabelle 5.3 wird dieser Wert in der zweiten Spalte prozentual aufgeführt. Sie spiegelt für die untersuchte Kenngröße  $K$  die fahrerindividuelle Verbesserung durch eine FDL im Durchschnitt wider. Zum direkten Vergleich sind zusätzlich die Werte für einen Testfahrer aufgeführt. Da sein Lenkverhalten aufgrund seiner Erfahrung dem Idealverhalten naht, wird dieser im Folgenden als Referenz gewählt. Eine Verbesserung tritt ein, wenn das Verhalten des jeweiligen Fahrers mit aktivierter Funktion mehr dem des Testfahrers entspricht. Zusätzlich zu der prozentualen Bewertung nach dem Gütekriterium stellt Tabelle 5.3 die Medianwerte der untersuchten Kriterien dar<sup>1</sup>. Diese erfolgt gesamtheitlich betrachtet jeweils für alle gültigen Fahrten mit und ohne FDL, damit ein Vergleich der jeweiligen Absolutwerte erfolgen kann.

Wie aus der Tabelle 5.3 hervorgeht, ist bei einer gesamtheitlichen Betrachtung über alle Probanden eine positive Entwicklung des Fahrer- und Fahrzeugverhaltens mit FDL festzustellen. Während beispielsweise bei passiven Fahrten nur etwa jede zweite Fahrt erfolgreich stabilisiert wird, erfüllen die Fahrer mit aktivierter Lenkmomentenempfehlung die Fahraufgabe deutlich häufiger. Auch die Güte des Stabilisierungsvorgangs – hier dargestellt durch die Stabilisierungsdauer  $T_{Stabil}$  und dem benötigten Lenkaufwand  $\int |\delta_{LW}(t)| dt$  aller erfolgreichen Fahrten – steigt infolge der FDL-Funktion<sup>2</sup>. Bei der deutlichen Reduzierung dieser beiden Kenngrößen um knapp 20% ähnelt das Verhalten der Normalfahrer mehr dem des Testfahrers. Auf diesen hat die FDL-Funktion kaum einen Einfluss, da er erfahrungsbasiert agiert, ohne durch die überlagerte Momentenempfehlung beeinträchtigt zu werden.

Durch das höhere Moment der  $FDL_{high}$  ist ein weiterer Zugewinn im Verhalten der Kenngrößen zu erkennen (Tabelle 5.4). Dieser Zugewinn ist allerdings nicht linear zum Niveau des Moments, denn durch das doppelt so hohe Moment der  $FDL_{high}$  wird nicht die doppelte Verbesserung im Verhalten der Kenngröße erreicht. Die Ergebnisse bestätigen in quantitativer Form die in Bild 5.9 dargestellten Hüllkurven. Beim Vergleich der individuellen Verbesserung  $\overline{G}_K$  und der Entwicklung der absoluten Werte aller Probanden durch die FDL (Tabelle 5.3) ist zu erkennen, dass diese je nach Kenngröße deutliche Unterschiede aufweisen können. So wird beispielsweise bei der Stabilisierungshäufigkeit eine individu-

---

<sup>1</sup>Für  $f_{Stabil}$  ist anstelle des Medians die prozentuale Häufigkeit dargestellt, da der Median dieses Kriteriums keine besondere Aussagekraft beinhaltet.

<sup>2</sup>Nicht alle untersuchten Kriterien haben einen einheitlich positiven Einfluss durch die FDL aufzeigen können. Größen wie Quer- und Gierbeschleunigung weisen je nach Versuchsfahrt starke Streuungen auf, sodass keine eindeutige Tendenz feststellbar ist.

Tabelle 5.3.: Gesamtheitliche Analyse des Mehrwerts einer FDL (\*: Häufigkeit)

	Kenngröße $K$	Individuelle Verbesserung durch FDL $\bar{G}_K$	Median über alle Probanden		Mittelwert über Testfahrer	
			Ohne FDL	Mit FDL		
Fahrerverhalten	$E_1(\delta_{LW})$	7.8%	153.5	178.0	229.0	[°]
	$E_1(\dot{\delta}_{LW})$	11.9%	530.3	603.1	817.0	[°/s]
	$\int_{t_{\text{Anfang}}}^{t_{\text{Ende}}}  \delta_{LW}(t)  dt$	18.6%	234.2	202.9	177.5	[°·s]
Fahrzeugverhalten	$f_{\text{Stabil}}$	–	57*	73*	100*	[%]
	$T_{\text{Stabil}}$	17.7%	3.3	3.0	2.7	[s]
	$\max \{\beta(t)\}$	8.1%	9.0	7.9	6.3	[°]

elle Verbesserung durch die FDL um durchschnittlich 19,6% erreicht. Die Häufigkeiten hingegen steigen von 57 auf 73% und somit um mehr als 28% im Durchschnitt. Diese Unterschiede deuten darauf hin, dass der Mehrwert durch die Funktion deutliche Streuungen in Abhängigkeit der einzelnen Fahrer aufweisen kann. Aus diesem Grund wird im folgenden Abschnitt die fahrerindividuelle Analyse des zu erwartenden Mehrwerts durch die FDL genauer betrachtet.

Tabelle 5.4.: Einfluss der FDL<sub>high</sub> (\*: Häufigkeit)

Kenngröße $K$	Median über alle Probanden		
	Ohne FDL	Mit FDL	Mit FDL <sub>high</sub>
$f_{\text{Stabil}}$	57*	73*	83* [%]
$\int_{t_{\text{Anfang}}}^{t_{\text{Ende}}}  \delta_{LW}(t)  dt$	234.2	202.9	194.1 [°·s]
$T_{\text{Stabil}}$	3.3	3.0	2.9 [s]

### 5.3.2. Fahrerindividuelle Analyse

Da sich bei der FDL der Fahrer innerhalb des Regelkreises befindet, wird im nächsten Schritt das individuelle Verhalten der Fahrer getrennt voneinander ausgewertet. Dabei ist eine deutliche Streuung der Funktionsgüte in Abhängigkeit vom Typ des jeweiligen Fahrers erkennbar, die aus der Analyse der Anzahl erfolgreicher Stabilisierungen hervorgeht. Hierzu ist in Abbildung 5.10 für jeden einzelnen Fahrer die Anzahl aller erfolgreich stabilisierten Fahrten aufgeführt (maximal 21 Fahrten pro Fahrer, vgl. Kapitel 5.1.4). Zusätzlich befindet sich im gleichen Diagramm die prozentuale Verbesserung durch die FDL, die durch die Differenz der Häufigkeit aller mit FDL stabilisierten Fahrten  $f_{\text{Stabil}}|_{\text{FDL}}$  und der Häufigkeit aller passiven Fahrten  $f_{\text{Stabil}}|_{\text{Passiv}}$  des jeweiligen Fahrers definiert ist.

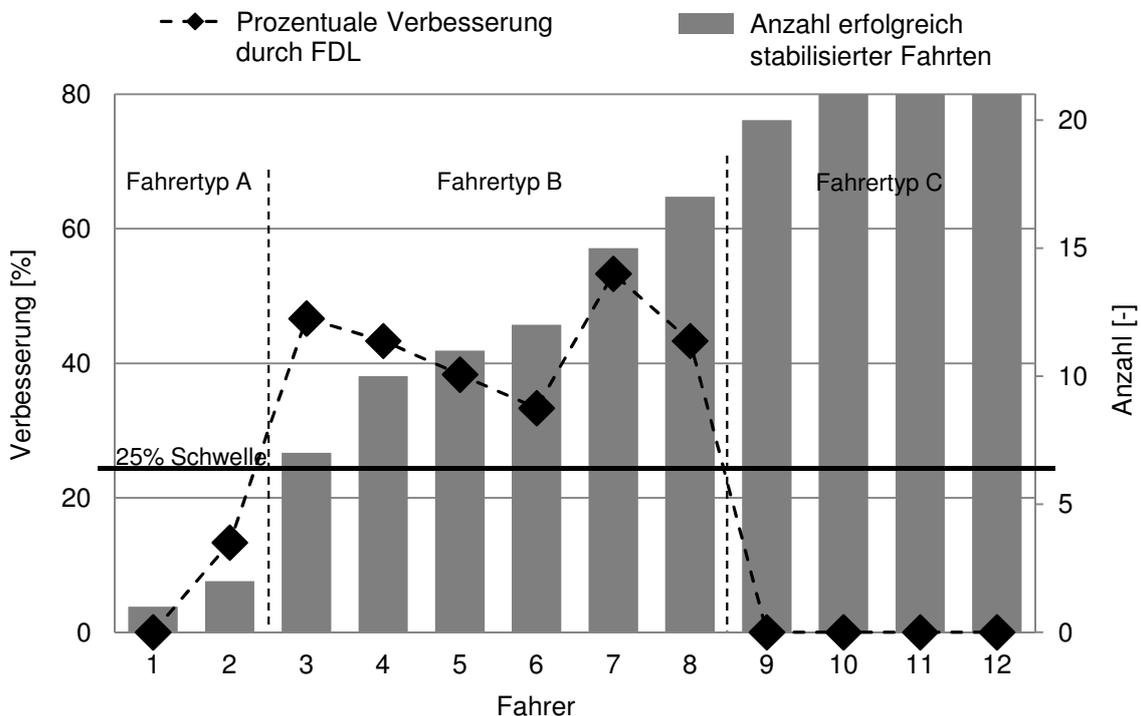


Bild 5.10.: Fahrerindividuelle Darstellung der Stabilisierungshäufigkeit

Durch die Sortierung nach der Anzahl der erfolgreichen Stabilisierungen lassen sich drei verschiedene Fahrertypen klassifizieren, die jeweils unterschiedlich durch die FDL-Funktion profitieren. Dabei wird hier angenommen, dass ein Fahrer nur dann von der FDL profitiert, wenn die prozentuale Verbesserung die definierte 25% Schwelle überschreitet. Während Fahrertyp A und C kaum einen Mehrwert durch die Funktion erlangen, weil sie entweder ihr Verhalten nicht ändern (Typ A) oder weil sie ohnehin in der Lage sind, das Fahrzeug zu stabilisieren (Typ C), wird bei der Mehrheit der Fahrer (Typ B) die Fahraufgabe mit FDL häufiger erfüllt – vereinzelt sogar in über 50% der Fälle.

Zur genaueren Analyse dieses Sachverhalts werden die Teilnehmer mithilfe der zur Verfügung stehenden Informationen aus den Fragebögen (vgl. Kapitel 5.1.5) sowie den Kommentaren und Bewertungen des Beobachters hinsichtlich ihres Fahrstils und ihrer Reaktionsbereitschaft in unterschiedliche Gruppen klassifiziert. Dabei bezeichnet die Gruppe

„Klammerer“<sup>3</sup> Fahrer, die im Allgemeinen seltener das Fahrzeug nutzen, durch Fahrstil und Sitzverhalten besonders vorsichtig orientiert sind und ein hohes Bedürfnis nach Routine und Sicherheit haben. „Sportliche“ Fahrer hingegen zeichnen sich durch einen dynamischen Fahrstil aus mit häufiger Nutzung des Fahrzeugs teilweise auch über den fahrstabilen Bereich hinaus. Mit „Durchschnitt“ werden alle anderen Fahrer bezeichnet, die im Allgemeinen gewöhnliche Eigenschaften aufweisen. In Abhängigkeit davon, in welche Gruppe die Fahrer zugeordnet werden, erfolgt die erneute Betrachtung der definierten Kenngrößen. Für die drei Größen Stabilisierungshäufigkeit, -dauer und Lenkaufwand stellt Bild 5.11 die prozentuale Verbesserung der Fahrergruppen durch eine Lenkmomentenempfehlung dar – links für die FDL (Bild 5.11a) und rechts für FDL<sub>high</sub> (Bild 5.11b).

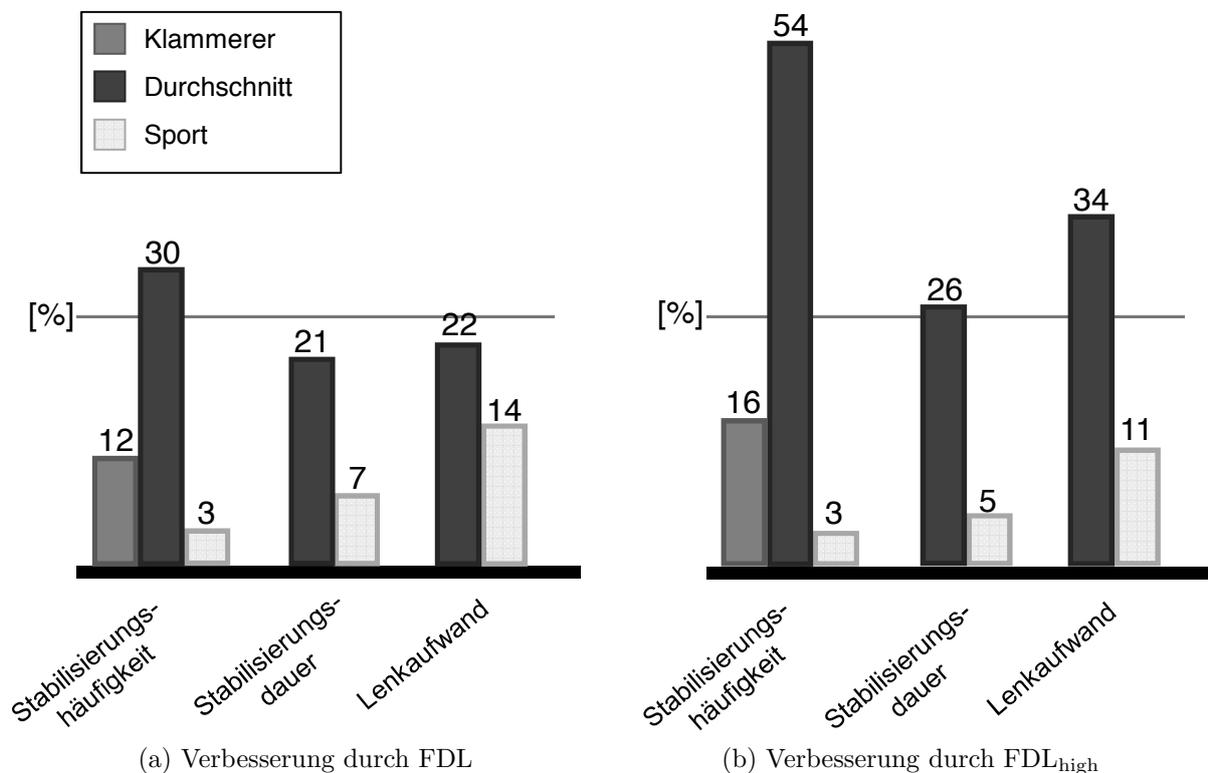


Bild 5.11.: Prozentuale Verbesserung des Stabilisierungsvorgangs bei unterschiedlichen Fahrertypen

Aus der Abbildung geht hervor, dass der Durchschnittsfahrer einen erheblichen Vorteil aus der Funktion erhalten kann, da er sowohl die Fahraufgabe häufiger erfüllt als auch die Güte seines Lenkverhaltens deutlich steigern kann je höher die Empfehlung ist. Im Gegensatz hierzu fällt der Zugewinn zur Situationsbeherrschung für die Gruppen Klammerer und Sport geringer aus. Die Gruppe der Klammerer ist mit der entstehenden Fahrsituation eindeutig überfordert. Sie kann die Empfehlung nicht nachweislich wahrnehmen, klammert sich infolge der Schleuderplattenanregung am Lenkrad fest und unternimmt kaum eine Lenkreaktion, um das Fahrzeug abzufangen. Die absolute Anzahl aller erfolgreich stabilisierten Fahrten ist bei diesem Fahrertyp so gering, dass eine Betrachtung von Sta-

<sup>3</sup>Quelle: ADAC, „So sitzen Sie richtig“)

bilisierungsdauer und Lenkaufwand in Bild 5.11 nicht sinnvoll erscheint. Der sportliche Fahrer hingegen ist sowohl mit als auch ohne FDL in der Lage, das Fahrzeug fast immer erfolgreich zu stabilisieren. Ein leichter Vorteil zeigt sich aber, wenn die Güte des Stabilisierungsvorgangs betrachtet wird. Hierzu ist das niedrige Niveau der Empfehlung völlig ausreichend. Im Gegensatz zum Durchschnittsfahrer bringt die  $FDL_{high}$ -Einstellung diesem Fahrertyp keinen zusätzlichen Vorteil.

## 5.4. Fazit

Das Kapitel veranschaulicht im Rahmen einer empirischen Studie die Wirksamkeit einer Lenkmomentenempfehlung für fahrdynamische Grenzsituationen. Dabei kann sowohl mithilfe der subjektiven Fahrerurteile als auch anhand der objektiven Bewertungsgrößen der Mehrwert einer FDL-Funktion für den Fahrer nachgewiesen werden. Durch die Lenkmomentenempfehlung führen die Fahrer gezieltere Lenkbewegungen zur Stabilisierung des Fahrzeugs aus und erreichen damit eine schnellere Wiederherstellung des stabilen Fahrzustands mit geringerer Ausprägung der Gierreaktion. Die Akzeptanz des Systems wird einheitlich von allen Probanden der Stichprobe bestätigt. Kein Fahrer hat das Empfinden, durch die Funktion in seiner Handlung bevormundet zu sein.

Aus den Ergebnissen der individuellen Verhaltensanalyse wird allerdings deutlich, dass nicht jeder Fahrer in gleichem Ausmaß durch eine FDL-Funktion profitiert. Insbesondere für verschiedene Fahrertypen kann ein unterschiedliches Niveau der Lenkmomentenempfehlung den Zugewinn durch die FDL deutlich steigern. Dabei stellen der Fahrstil und die Reaktionsbereitschaft in einer unerwarteten Fahrsituation die wesentlichen Kriterien des Fahrertyps dar, die die Wirksamkeit unterschiedlicher FDL-Applikationsvarianten bestimmen kann. Eine fahreradaptive Gestaltung der FDL an die individuellen Fahrereigenschaften kann somit einen zielführenden Weg bei der Realisierung dieser Funktion darstellen. Ein solches Verfahren wird im nächsten Schritt genauer untersucht.

## 6. Klassifikation verschiedener Fahrer mittels fahrdynamischer Zustandsgrößen

Fahrerassistenz- und Fahrdynamikregelsysteme werden in heutigen Serienfahrzeugen mithilfe des subjektiven Eindrucks geschulter Testfahrer abgestimmt. Diese Abstimmung orientiert sich in der Regel nicht an verschiedenen Fahrertypen, sondern es erfolgt vielmehr eine Auslegung basierend auf durchschnittlichen Erwartungswerten, die für einen Großteil von unterschiedlichen Fahrern eine zufriedenstellende Lösung bietet [109]. Bei aktiven Systemen wie beispielsweise dem ABS oder ESP, die in bestimmten Fahrsituationen entkoppelt vom Fahrer in die Fahrzeugführung eingreifen, bietet diese Herangehensweise ein zufriedenstellendes Verfahren. Diese bewirken nämlich eine Optimierung des Fahrdynamikverhaltens, damit der Fahrerwunsch besser umgesetzt werden kann. Moderne FAS, deren Interaktionsgrad<sup>1</sup> mit dem Fahrer höher gestaltet ist, erfordern zusätzliche Maßnahmen zur Gestaltung höherer Individualisierungen, damit das beabsichtigte Ziel und die Akzeptanz des Systems bei einer großen Bandbreite von unterschiedlichen Fahrern erreicht werden können. Bild 6.1 stellt diese Abhängigkeit am Beispiel von fünf ausgewählten FAS dar.

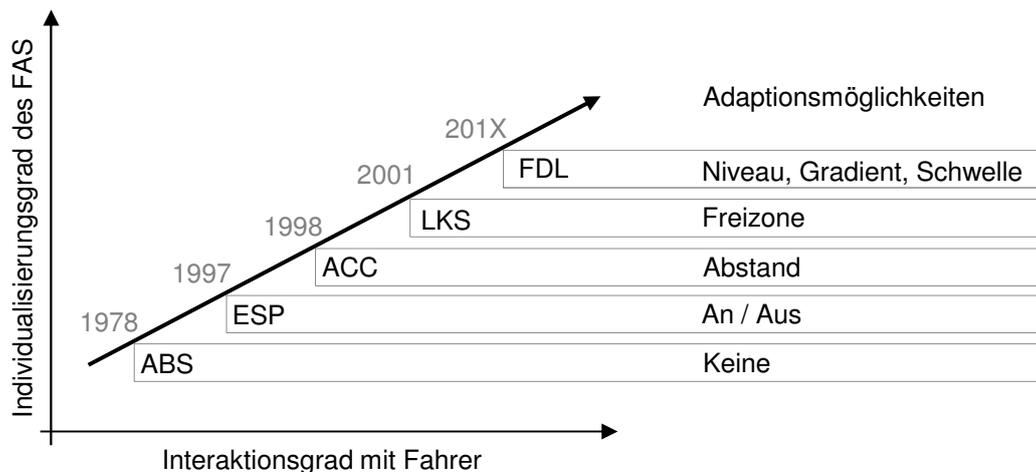


Bild 6.1.: Der zunehmende Individualisierungsgrad moderner FAS

Für die individuelle Abstimmung ermöglichen moderne Fahrzeuge, über Bedienelemente zwischen vorab festgelegten Parametrisierungsvarianten von Komponenten wie der Lenkung, den Dämpfern oder der Schaltauslegung von Automatikgetrieben auszuwählen [115]. Komfort, Normal und Sport sind hierbei häufig verwendete Bezeichnungen, zwischen denen der Fahrer je nach Charakter und Befinden auswählen kann.

Der Wunsch nach individueller Mobilität geht aber über die einfache Umschaltung der Fahreigenschaften mit nur beschränkten Auswahlmöglichkeiten hinaus. Um dem Fahrer

<sup>1</sup>Der Interaktionsgrad bezeichnet die Höhe der gegenseitigen Wechselwirkung zwischen Fahrer und FAS. Bei einer FDL ist dieser besonders hoch, weil die Reaktionsmöglichkeiten des Fahrers durch das Moment nicht eingeschränkt werden.

eine höhere Individualität zu ermöglichen, ohne dabei die Komplexität durch weitere Bedienelemente zu erhöhen, wird häufig die Idee einer automatisierten Auslegung der Fahrzeugsysteme an die individuellen Fahrereigenschaften verfolgt [30, 110, 120]. Voraussetzung hierfür ist allerdings die Bekanntheit der individuellen Fahrereigenschaften, die mithilfe geeigneter Algorithmen durch eine automatisierte Analyse des Fahrerhaltens ermittelt werden müssen.

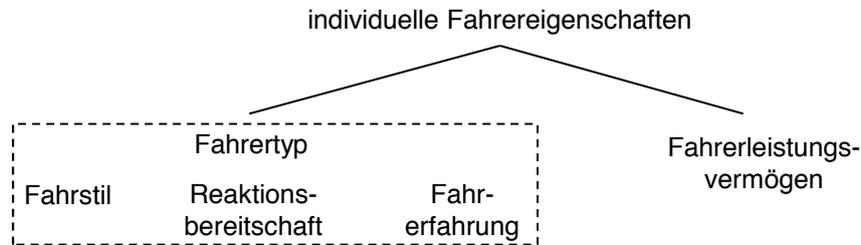


Bild 6.2.: Kategorien individueller Fahrereigenschaften

Wie in Bild 6.2 dargestellt ist, lassen sich diese individuellen Fahrereigenschaften in die Kategorien Fahrertyp und Fahrerleistungsvermögen unterteilen [16]. Während der Fahrertyp die individuellen Charaktereigenschaften (zum Beispiel Fahrstil und Reaktionsbereitschaft) sowie die erlernte Fahrpraxis des Fahrers abbildet, spiegelt das Fahrerleistungsvermögen das momentane physische Befinden des Fahrers wider – beispielsweise seine Müdigkeit oder Aufmerksamkeit. Bei einer Klassifikation wird häufig eine diskrete Einordnung des Fahrers in eine der Eigenschaftsklassen vorgenommen, dessen Wertebereich sich beispielsweise beim Fahrstil zwischen komfortabel/ruhig bis sportlich/aggressiv bewegt [26]. Für die Einstufung werden verschiedene objektive Größen verwendet, die je nach Zielsetzung variieren können. So werden für die Untersuchung von Eingriffsschwellen eines Abstandsregelsystems (ACC) häufig Merkmale genutzt, die das Längsregelverhalten des Fahrers beschreiben. Hierzu zählen insbesondere die Längsbeschleunigung und der Bremsdruck sowie die Größen zur Darstellung des Abstandsverhaltens zum vorausfahrenden Fahrzeug [7, 31, 109]. Für die Realisierung eines adaptiven Algorithmus für einen Spurhalteassistenten wird in [16] der Fahrstil des Fahrers mithilfe der auftretenden Quer- und Längsbeschleunigungen ermittelt. Dieses Verfahren trägt dazu bei, die „Fehleingriffe und Fehlwarnungen aufgrund einer dynamischen Fahrweise zu minimieren“ und somit die Sicherheit und die Akzeptanz dieser Systeme signifikant zu steigern.

Das vorliegende Kapitel leistet einen Beitrag zur automatisierten Klassifikation des Fahrertyps. Das Ziel liegt darin, aus der Analyse des Fahrverhaltens während der Normalfahrt Informationen über die Reaktion des Fahrers in einer kritischen Fahrsituation abzuleiten. Bei den Untersuchungen zur Wirksamkeit der FDL in Kapitel 5 stellte sich nämlich heraus, dass unterschiedliche Fahrer auch eine andere Amplitude der Lenkmomentenempfehlung bevorzugen. Der Normalfahrer beispielsweise, der sich selbst durch eine eher durchschnittlich vorausschauende Fahrweise beschreibt, kann durch ein höheres Moment wirksamer unterstützt werden als der sportlich orientierte Fahrer. Die Festlegung der FDL-Parameter sollte nicht zwingend auf demografischen Eigenschaften wie Alter und Geschlecht basieren, sondern vielmehr der Fahrstil und die Reaktionsbereitschaft der Fahrer als zentrale

Kriterien verwendet werden. Beschränkt auf diese beiden Kenngrößen werden im Rahmen der folgenden Untersuchungen die Möglichkeiten einer Klassifikation durch die Analyse des Querdynamikverhaltens untersucht. Es wird ein Algorithmus vorgestellt, der in verschiedenen Umgebungsbedingungen eine robuste Identifikation ermöglicht, auch wenn sich das Verhalten des Fahrers infolge besonderer Ereignisse kurzfristig ändert.

## 6.1. Kenngrößen und Abhängigkeiten

Für eine automatisierte Klassifikation des Fahrstils müssen im ersten Schritt die geeigneten fahrdynamischen Größen ermittelt werden, die zuverlässige Rückschlüsse auf die individuellen Fahrereigenschaften erlauben. Hierzu werden die Daten einer umfangreichen Probandenstudie bewertet, die im Rahmen der Untersuchung zur „Analyse des Energiebedarfs von Servolenkungen im realen Fahrbetrieb {...}“ [12] vom Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS) durchgeführt wurde. Bei den Versuchen durchfahren 56 Normalfahrer eine definierte Strecke von 60 Kilometern Länge mit jeweils dem selben Versuchsfahrzeug. Die Rundstrecke (FKFS-Rundkurs) führt um die Stadt Stuttgart herum und weist ähnliche Streckenanteile für die drei Fahrsituationen Autobahn, Landstraße und Stadt auf. Das Alter der Probanden liegt zwischen 21 und 56 Jahren; es wurde darauf geachtet, ein breites Spektrum unterschiedlicher Fahrertypen zu rekrutieren. Als Referenzwert für den Fahrstil stehen subjektive Beurteilungen zur Verfügung – zum einen durch den Probanden (Selbstbild) und zum anderen durch einen geschulten Versuchsbegleiter (Fremdbild). Beide Urteile befinden sich in einem Wertebereich von „ruhig“ (Skalenwert 1) bis „sportlich“<sup>2</sup> (Skalenwert 5) und wurden mithilfe einer Checkliste im Anschluss an die jeweiligen Fahrten ermittelt. Weiterhin bieten die Checklisten Möglichkeiten, eine Beurteilung der Verkehrs- und Witterungssituation vorzunehmen sowie allgemeine Kommentare zu verfassen.

Zusätzlich zu diesen Messdaten werden in kleinerem Stichprobenumfang eigene Fahrten mit ausgewählten Probanden durchgeführt. Der Fokus liegt dabei auf dem Fahrerverhalten in speziellen Situationen, wie beispielsweise bei einem Überholmanöver oder bei Brems- und Beschleunigungsvorgängen. Mithilfe dieser Aufzeichnungen werden die grundlegenden Untersuchungen für die Klassifikation des Fahrstils und die Ermittlung der individuellen Reaktionsbereitschaft durchgeführt. Dabei werden grundsätzlich zwei verschiedene Herangehensweisen betrachtet: zum einen die kontinuierliche Bewertung während der Normalfahrt und zum anderen die Bewertung in speziellen Fahrereignissen.

### 6.1.1. Beurteilung während der Normalfahrt

Die erste Strategie beinhaltet die kontinuierliche Analyse des Fahrerverhaltens und der daraus resultierenden Fahrzeugreaktion. Dabei wird eine gesamtheitliche Betrachtung

---

<sup>2</sup>Um eine Unterscheidung zu dem in Kapitel 5 als sport bezeichneten Fahrertyp zu ermöglichen, wird dieser Fahrstil im Folgenden als dynamisch bezeichnet.

über die Fahrt beziehungsweise den Fahrtsequenzen vorgenommen, ohne die gesonderte Berücksichtigung von speziellen Fahrereignissen. Um eine zuverlässige Aussage über den Fahrstil treffen zu können, müssen die objektiven Kenngrößen und Schwellenwerte stets in Abhängigkeit eines Referenzzustands oder einer Referenzgröße, wie beispielsweise der Fahrzeuggeschwindigkeit, bewertet werden [12]. Bild 6.3 zeigt in diesem Zusammenhang den unterschiedlichen Verlauf der auftretenden Querbeschleunigungen  $a_y$  in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  für zwei ausgewählte Probanden der Stichprobe. Die markierte Randlinie kennzeichnet dabei die in [104] vorgeschlagene Sicherheitsgrenze

$$a_{yS} = \begin{cases} 0,103 v & v \leq 31,5 \text{ km/h} \\ \frac{v^2}{157} e^{-\left(\frac{v}{41,3}\right)^{1,5}} & v > 31,5 \text{ km/h} \end{cases} \quad (6.1)$$

die in Abhängigkeit von  $v$  die maximal auftretende Querbeschleunigung eines Normalfahrers im Hinblick auf den Reisekomfort definiert.

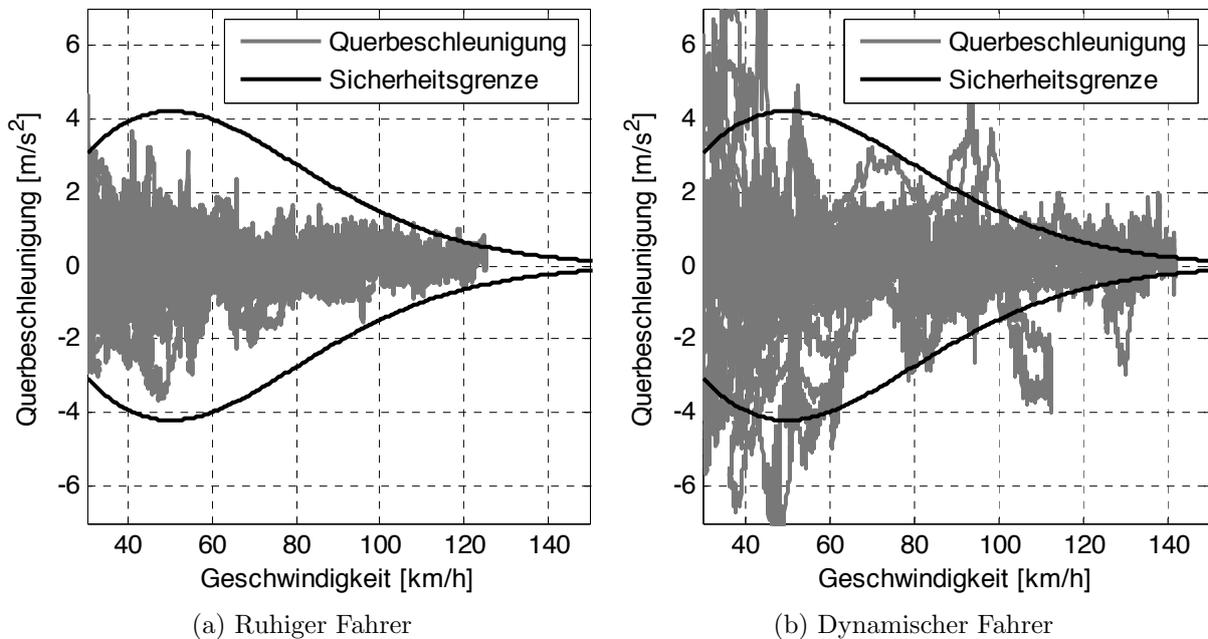


Bild 6.3.: Verlauf der Querbeschleunigung für unterschiedliche Fahrertypen (vgl. [12])

In den Abbildungen werden bei den Fahrern unterschiedliche Verläufe von  $a_y$  deutlich, obwohl dieselbe Fahrstrecke befahren wird. Beim ruhigen, komfortorientierten Fahrer (Bild 6.3a) treten im gesamten Geschwindigkeitsbereich kleinere Querbeschleunigungen auf. Die Sicherheitsgrenze für Normalfahrer wird dabei deutlich unterschritten; insbesondere im mittleren Geschwindigkeitsbereich ist ein größerer Abstand zu dieser Linie erkennbar. Beim dynamischen Fahrer (Bild 6.3b) hingegen werden durchgehend höhere Querbeschleunigungen erreicht, mit Überschreitung der Sicherheitsgrenze in vielen Arbeitspunkten. Der in Bild 6.3 nicht abgebildete Geschwindigkeitsbereich bis 30km/h zeigt kaum Unterschiede im Querbeschleunigungsverhalten der beiden Fahrer.

Der Unterschied im Verhalten der beiden Fahrer ist in den aufgeführten Fällen deutlich

erkennbar, weil die Fahrer dieselbe Fahrstrecke durchfahren. Eine zuverlässige Abgrenzung des Fahrstils auf Basis von  $a_y$  und  $v$  ist bei unterschiedlichen Fahrstrecken deutlich schwieriger, da nicht nur die Fahrzeuggeschwindigkeit, sondern auch die Kurvigkeit der befahrenen Fahrstrecke von Bedeutung ist. Dabei ist die Kurvigkeit höher, je kleiner der jeweilige Radius der Strecke ist oder je größer die zeitliche Änderung des Radius ist. Zur Verdeutlichung dieses Einflusses zeigt Bild 6.4 die Häufigkeitsverteilung von  $a_y$  für denselben Fahrer bei identischem Geschwindigkeitsbereich ( $70 \leq v < 100\text{km/h}$ ), jedoch bei unterschiedlichen Streckenverläufen.

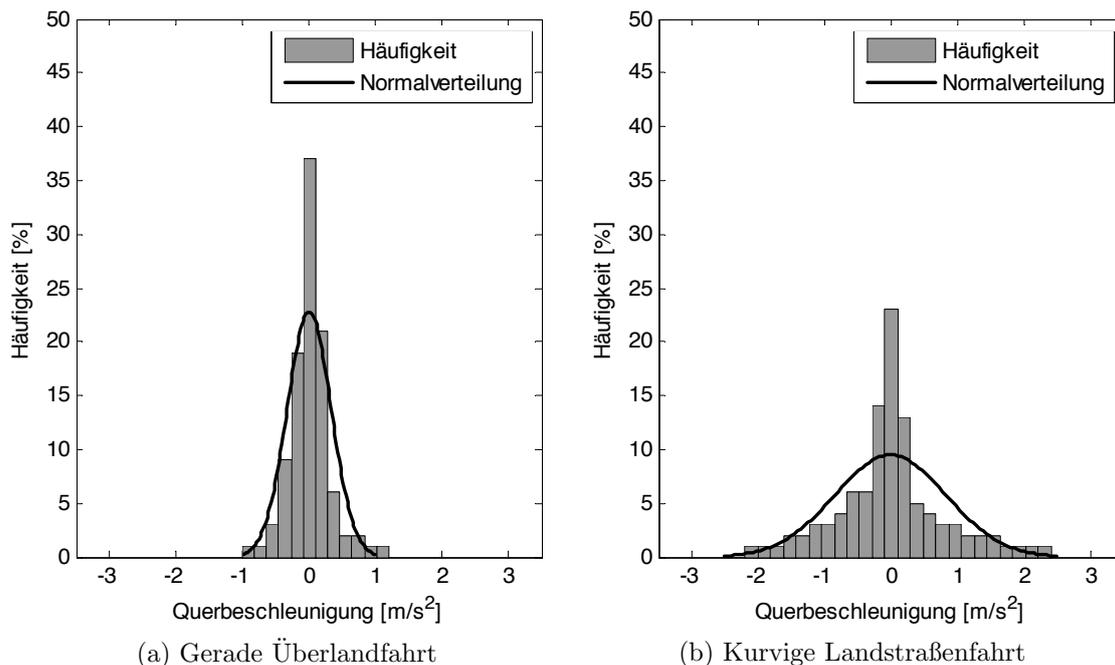
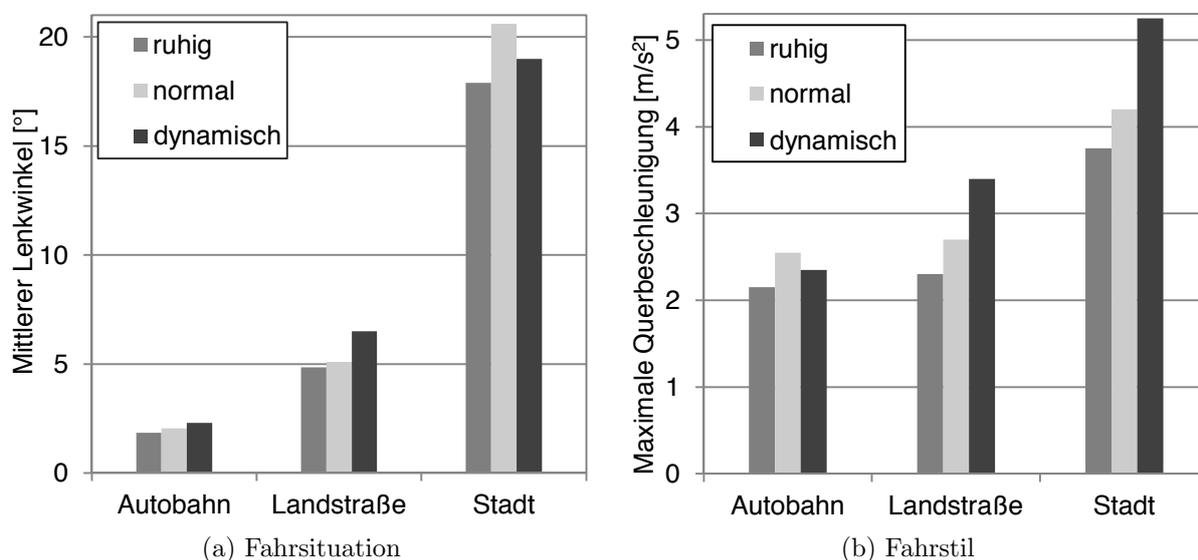


Bild 6.4.: Häufigkeit der auftretenden Querschleunigungen desselben Fahrers in unterschiedlichen Fahrsituationen ( $70 \leq v < 100\text{km/h}$ )

Obwohl es sich bei beiden Aufzeichnungen um denselben Fahrer handelt, zeigen sich deutliche Unterschiede in der Häufigkeitsverteilung von  $a_y$ . Dies resultiert aus der unterschiedlichen Kurvigkeit der befahrenen Strecke. Während die Verteilung in Bild 6.4b auf einer klassischen Landstraßenfahrt mit teilweise kurvigen Abschnitten basiert, wird in Bild 6.4a eine Überlandfahrt mit Fahrgeschwindigkeitsbegrenzungen durchgeführt, bei der kaum kurvige Abschnitte auftreten. Die Darstellungen zeigen, dass für eine automatisierte Ermittlung des Fahrstils eine Bewertung von Kenngrößen lediglich in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit nicht zielführend ist. Durch die zusätzliche Berücksichtigung der Kurvigkeit kann eine Aussage über die Fahrsituation getroffen werden, die eine höhere Zuverlässigkeit bei der Klassifikation ermöglicht.

Am Beispiel von  $a_y$  wird deutlich, dass für eine robuste Realisierung der automatischen Fahrstilklassifikation die Feststellung zweier Größen notwendig ist: zum einen die Fahrsituation und zum anderen der relativ hierzu abgeleitete Fahrstil. Um geeignete Signale für eine eindeutige Bestimmung dieser beiden Unbekannten zu finden, werden die aufgezeichneten Daten aller 56 Probanden statistisch in Abhängigkeit vom subjektiv ermittelten

Fahrstil und von der Fahrsituation bewertet. Als Referenzwert für die Fahrsituation dient dabei die subjektive Einstufung der Fahrtsequenzen durch den Versuchsleiter. In einer gesonderten Fahrt werden auf Basis der zugelassenen Fahrzeuggeschwindigkeit und der Kurvigkeit die Fahrtsequenzen in die Kategorien stadähnlich, landstraßenähnlich sowie autobahnähnlich eingestuft. Für jeden Fahrer werden dann aus den über die Zeit gemessenen Fahrzeugsignalen der Mittelwert, der Maximalwert sowie die Standardabweichung der Betragswerte getrennt nach der Fahrsituation gebildet. Damit diese nicht durch einmalige Ereignisse wie beispielsweise ein Überholmanöver oder ein vorausfahrendes Fahrzeug beeinflusst werden, werden die Kenngrößen jeweils für eine festgelegte Zeitdauer bestimmt. Bild 6.5 zeigt das mittlere Verhalten der Kenngrößen beispielhaft für die Kenngrößen Mittelwert des Lenkwinkels sowie Maximalwert der Querbeschleunigung – jeweils als Absolutwerte. In beiden Grafiken sind nur Fahrer berücksichtigt, denen eindeutig einer der drei Fahrstile ruhig, normal oder dynamisch zugeordnet werden kann.



**Bild 6.5.:** Beispiele für geeignete Kenngrößen zur Klassifikation von Fahrsituation und Fahrstil

Für die Ermittlung der Fahrsituation sind diejenigen Kenngrößen geeignet, deren Werte sich für die drei unterschiedlichen Fahrsituationen signifikant voneinander abgrenzen lassen. In Abhängigkeit des Fahrstils dürfen diese jedoch keine großen Unterschiede aufweisen, weil die Fahrsituation unabhängig vom Fahrstil bestimmt werden muss. Bild 6.5a zeigt, dass der Mittelwert des Lenkwinkels eine geeignete Kenngröße zur Ermittlung der Fahrsituation darstellt. Trotz kleinerer Streuungen für die unterschiedlichen Fahrstile, lassen sich eindeutig abgrenzbare Wertebereiche für die einzelnen Fahrsituationen ermitteln. Auf der anderen Seite müssen für die Klassifikation des Fahrstils gerade diejenigen Signale herangezogen werden, bei denen sich in der gleichen Fahrsituation die Kenngrößen signifikant voneinander abgrenzen lassen. In Bild 6.5b ist mit dem Maximalwert der Querbeschleunigung eine Kenngröße abgebildet, die diese Eigenschaft auf Landstraßen- und Stadtfahrten erfüllt. Eine Klassifikation des Fahrstils nur unter Verwendung der ma-

ximalen Querbesehleunigung ist somit auf Autobahnen nicht möglich.

Auf Basis dieser Überlegungen werden analog zu Bild 6.5 die Kenngrößen für verschiedene fahrdynamische Größen ermittelt. Ferner wird eine Bewertung durchgeführt, ob sich diese zur Erfassung der Fahrsituation oder zur Klassifikation des Fahrstils eignen. Tabelle 6.1 stellt die Ergebnisse dieser Untersuchungen beispielhaft für fünf ausgewählte Signale gegenüber. Sie dienen als Grundlage für den in Kapitel 6.2 vorgestellten Algorithmus zur automatisierten Klassifikation des Fahrstils während der Normalfahrt.

Tabelle 6.1.: Bewertung unterschiedlicher Kenngrößen: geeignet (+), bedingt geeignet (o) und ungeeignet (-)

(a) Für die Erfassung der Fahrsituation				(b) Für die Klassifikation des Fahrstils			
Signal	Mittelwert	Standardabweichung	Maximalwert	Signal	Mittelwert	Standardabweichung	Maximalwert
$v_x$	+	0	+	$v_x$	-	+	0
$\delta_{LW}$	+	+	0	$\delta_{LW}$	-	-	-
$\delta_{LW}$	0	+	0	$\delta_{LW}$	0	0	0
$a_y$	+	-	0	$a_y$	-	+	+
$a_x$	-	-	-	$a_x$	-	0	+

### 6.1.2. Fahrerverhalten in speziellen Fahrereignissen

Auf der Grundlage von Informationen über die Betätigung der Stellelemente Lenkrad, Gaspedal und Bremse sowie über die daraus resultierende Fahrzeugreaktion kann ein Index für den Fahrstil errechnet werden. Ein geeignetes Verfahren hierfür wird in Kapitel 6.2.2 vorgestellt. Für die Gestaltung von FAS ist allerdings je nach Zielsetzung nicht nur der allgemeine Fahrstil des Fahrers von Bedeutung, sondern auch sein Verhalten in den relevanten Fahrsituationen. So müssen beispielsweise für die fahrstilabhängige Gestaltung des ACC insbesondere das individuelle Brems-, Beschleunigungs- und Abstandsverhalten als Maß für das Sicherheitsbedürfnis des Fahrers untersucht werden, um in Abhängigkeit des regulären Fahrerverhaltens die Parameter des Systems fahrerindividuell zu variieren. Bild 6.6a zeigt hierzu für zwei verschiedene Fahrstile einen Bremsvorgang bei etwa 50km/h. Während der ruhige Fahrer frühzeitig einen Bremsvorgang mit geringem, aber konstantem Bremsdruck einleitet, startet der dynamische Fahrer hier etwa 2s später mit dem aktiven Bremsen, das intensiver und kurzzeitiger ausfällt. Für einen Spurwechselassistenten, der mithilfe einer Lenkmomentenempfehlung den Fahrer bei der Ausführung eines Spurwechsels unterstützt, ist die Dynamik von Bedeutung, mit der der Fahrer ohne Assistenz einen Spurwechsel ausführt. Hierzu zeigt Bild 6.6b den typischen Verlauf der Querbesehleunigungen bei einem Spurwechselvorgang. Als Kenngrößen für die Bewertung des unterschiedlichen Fahrerverhaltens eignen sich beispielsweise die auftretenden Extrema  $E_{i1}$  und  $E_{i2}$  oder die Dauer des Manövers. Ein adaptiver Ansatz dieser Art führt zu mehr Akzeptanz und Zufriedenheit beim Fahrer im Vergleich zu Systemen ohne die Möglichkeit einer individuellen Parametrisierung.

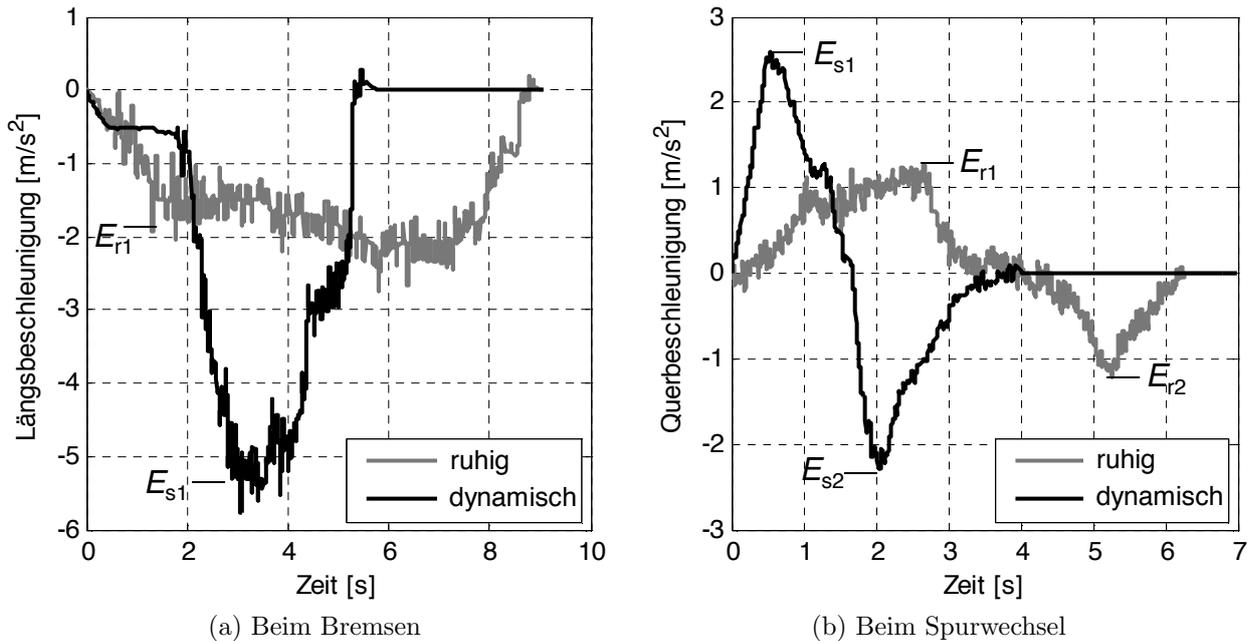


Bild 6.6.: Verhalten unterschiedlicher Fahrertypen

Wie aus den Untersuchungen in Kapitel 5 hervorgeht, stellt auch die Reaktionsbereitschaft bei der FDL eine wesentliche Eigenschaft des Fahrers dar, die den Nutzen der Funktion in Abhängigkeit der gewählten Funktionsparameter maßgebend bestimmt. Dabei bezieht sich die Reaktionsbereitschaft auf das Querdynamikverhalten des Fahrers bei plötzlich eintretenden unerwarteten Ereignissen. Im Normalfahrbereich können Ereignisse dieser Art in Form von Störungen wie einer Spurrinne, einer Bodenwelle oder einer in Querrichtung des Fahrzeugs einwirkende Windböe [107, 124] entstehen. Ausgelöst werden Reaktionen des Fahrers insbesondere durch den Lenkeingriff, der aus der Störung resultiert. Beispielsweise entsteht bei der Überfahrt einer Bodenwelle ein Störmoment am Lenkrad, das je nach persönlichem Sicherheitsbedürfnis eine Lenkreaktion auslöst, die Informationen zum individuellen Reaktionsverhalten des Fahrers enthält. Allerdings ist die Ermittlung dieser Informationen mit großen Schwierigkeiten verbunden. Zum einen kann das Auftreten eines solchen Ereignisses in realer Umwelt nur mit hohem Aufwand detektiert werden. Zum anderen sind die auftretenden Ereignisse von ihrer Art und Intensität nie identisch, sodass die resultierende Fahrerreaktion nicht eindeutig einem Fahrertyp zugeordnet werden kann.

## 6.2. Algorithmus zur Ermittlung individueller Fahrereigenschaften

Nun wird das funktionale Verfahren genauer erläutert, das zur Klassifikation des Fahrstils und zur Ermittlung der Reaktionsbereitschaft des Fahrers verwendet wird. Ziel dieses Verfahrens ist eine zuverlässige Bestimmung der beiden Fahrereigenschaften durch die automatisierte Bewertung von Sensorinformationen. Dabei stellt in beiden Fällen die Kenntnis

der momentanen Fahrsituation eine grundlegende Voraussetzung für eine robuste Klassifikation dar, denn sie ermöglicht die relativierte Bewertung der ermittelten Kenngrößen. Damit die Algorithmen in Zukunft für eine große Bandbreite von Fahrzeugkategorien und Funktionalitäten genutzt werden können, werden bei der Umsetzung die folgenden Anforderungen berücksichtigt:

- Die einzelnen Komponenten sind unabhängig voneinander gestaltet und austauschbar.
- Der Algorithmus ist erweiterbar, beispielsweise um die Ermittlung weiterer Kenngrößen zur Abbildung des individuellen Fahrerverhaltens zu ermöglichen.
- Es werden nur serienmäßig vorhandene Sensoren genutzt. Sensoren wie Kamera und Radar, die nur bei Sonderausstattungen verfügbar sind, sollen vermieden werden.
- Die Algorithmen sind hinsichtlich der Rechenleistung so einfach wie möglich zu gestalten, damit sie auf einem Seriensteuergerät umgesetzt werden können.

Bild 6.7 zeigt den vereinfachten Aufbau des Algorithmus. Die Ermittlung der Reaktionsbereitschaft erfolgt durch die Bewertung der Fahrerreaktion in speziellen Fahrereignissen. Hierzu wird ein Verfahren für die künstliche Erzeugung charakteristischer Fahrereignisse (simulierte Fahrereignisse, vgl. Kapitel 6.2.3) entwickelt. Die einzelnen Komponenten werden in diesem Teilkapitel aus funktionaler Sicht genauer vorgestellt und im folgenden Teilkapitel 6.3 durch Fahrversuche bewertet.

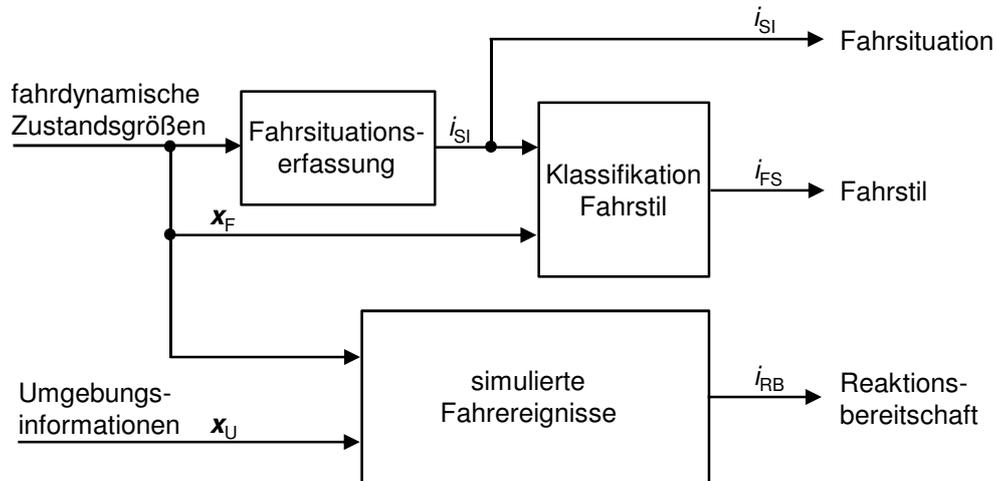


Bild 6.7.: Gesamtaufbau des Algorithmus zur Ermittlung von Fahrstil und Reaktionsbereitschaft

### 6.2.1. Ermittlung der Fahrsituation

Aus den in Kapitel 6.1.1 beschriebenen Untersuchungen geht hervor, dass eine Klassifikation des Fahrstils allein auf Basis der offiziellen Straßenbezeichnungen nicht zielführend ist, weil ein unterschiedlicher Streckenverlauf bei gleichem Straßentyp die Kenngrößen der

Fahrstilerfassung maßgebend beeinflussen kann. Ein geeigneter Algorithmus zur Fahr-  
 situationserfassung muss somit in der Lage sein, die Ermittlung in Abhängigkeit von der  
 Kurvigkeit und der Fahrzeuggeschwindigkeit vorzunehmen. Ein solcher Algorithmus soll  
 neben der Klassifikation des Fahrstils auch für zahlreiche andere Funktionalitäten Anwen-  
 dung finden, wie beispielsweise für die automatische Anpassung der Servounterstützung  
 an die Fahr-situation. Daher wird eine scharfe Einhaltung der Anforderungen insbesondere  
 hinsichtlich der genutzten Sensorinformationen und der erforderlichen Rechenleistung ge-  
 fordert. Bild 6.8 verdeutlicht die Verhältnisse der beiden Kenngrößen für Fahr-situationen,  
 die im Folgenden als stad-tähnlich, landstraßen-ähnlich und autobahn-ähnlich bezeichnet  
 werden.

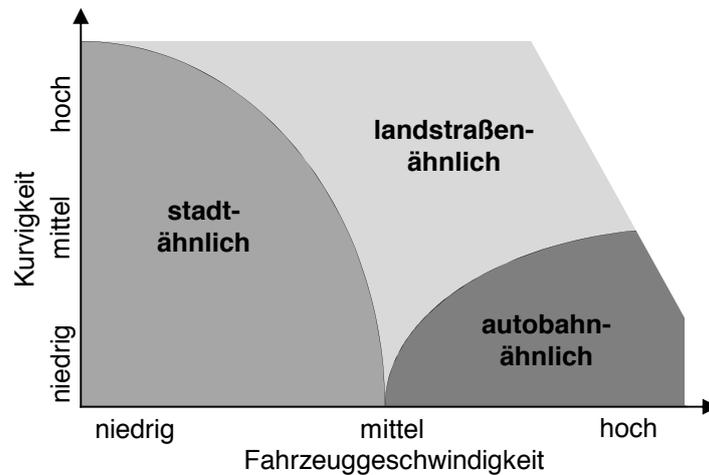


Bild 6.8.: Ermittlung der Fahr-situation aus der Kurvigkeit und der Fahr-geschwindigkeit

Eine Definition von klaren Grenzwerten für die als geeignet ermittelten Kenngrößen aus  
 Tabelle 6.1a ist allerdings schwierig durchzuführen, weil zum einen die Übergänge zwischen  
 den drei Fahr-situationen in der Realität nicht klar abgegrenzt sind und zum anderen die  
 Kurvigkeit nicht direkt gemessen werden kann<sup>3</sup>. Zur Berücksichtigung dieser Unschärfe,  
 die der Versuchsbegleiter bei der subjektiven Bewertung der Fahr-situation mithilfe seiner  
 Intuition und Erfahrung auflösen kann, wird deshalb für die technische Umsetzung ein Al-  
 gorithmus basierend auf der Fuzzy-Logik [128] entwickelt. Für die drei Eingangssignale  $u_j$   
 (Fahr-geschwindigkeit, Querschleunigung und Lenkgeschwindigkeit) werden jeweils  
 $i=3$  Zugehörigkeitsfunktionen festgelegt, die eine Zugehörigkeit  $\mu_j^{(i)} : u_j \rightarrow [0, 1]$  zu der  
 Zielmenge stad-tähnlich, landstraßen-ähnlich und autobahn-ähnlich definieren. Sie werden  
 als differenzierbare Glockenkurve der Form

$$\mu_j^{(i)}(u_j) = \frac{1}{1 + \left| \frac{u-m}{a} \right|^{2b}} \quad (6.2)$$

definiert und sind durch die drei Parameter  $a$ ,  $b$  und  $m$  eindeutig festgelegt. Für jede  
 Zugehörigkeitsfunktion wird eine Regel definiert, wodurch eine Regelbasis mit insgesamt

<sup>3</sup>Da keine Zusatzsensoren wie beispielsweise vom Navigationssystem genutzt werden dürfen, muss die  
 Kurvigkeit durch die Bewertung verschiedener fahrdynamischer Größen abgeschätzt werden.

9 Regeln entsteht, die die Zusammenhänge zwischen den Eingängen und dem Ausgang des Fuzzy-Systems festlegen. Damit die Parameteroptimierung der Fuzzifizierung und Defuzzifizierung mit ausreichender Robustheit hinsichtlich der unterschiedlichen Signalverläufe von verschiedenen Fahrern erfolgen kann, werden die Messdaten unterschiedlicher Fahrertypen als Trainingsdaten herangezogen. Diese Optimierung erfolgt auf Basis des Gütekriteriums

$$J = \sum_{k=1}^n e^2(k) = \sum_{k=1}^n (i_{\text{SI}}^*(k) - \hat{i}_{\text{SI}}(k))^2, \quad (6.3)$$

das als Referenzwert  $\hat{i}_{\text{SI}}(k)$  die subjektive Einschätzung der Fahrsituation SI durch den Versuchsleiter heranzieht.  $\hat{i}_{\text{SI}}(k)$  wird in Abhängigkeit der gefahrenen Strecke identisch für alle Fahrer ermittelt und auf die Messzeitpunkte  $k = 1, \dots, n$  projiziert. Die Ermittlung der unbekannt Parameter können dann mithilfe von Optimierungsverfahren wie beispielsweise dem ANFIS-Algorithmus [56] erfolgen, die den Fehler  $e$  zwischen dem Ausgang des Fuzzy-Systems  $i_{\text{SI}}^*(k)$  und dem Referenzwert  $\hat{i}_{\text{SI}}(k)$  minimieren. Da in einer realen Umgebung die Fahrsituation keine schnellen Schwankungen aufweist, werden kurzfristige Änderungen von  $i_{\text{SI}}^*(k)$  gefiltert und daraus ein langfristiger Wert  $i_{\text{SI}}(k)$  für die Fahrsituation ermittelt. Aus dem zeitlichen Verlauf und der Höhe der Abweichung zwischen  $i_{\text{SI}}^*(k)$  und  $i_{\text{SI}}(k)$  wird zusätzlich der Wert  $p_{\text{SI}}(k)$  errechnet, der die Zuverlässigkeit einer korrekten Bestimmung von  $i_{\text{SI}}(k)$  darstellt. Das Verhalten des Algorithmus wird durch Betrachtung des Eingangs- und Ausgangsverhaltens des Fuzzy-Systems in Abschnitt 6.3 dargestellt.

### 6.2.2. Klassifikation des Fahrstils

Mit Kenntnis der Fahrsituation kann nun der Fahrstil klassifiziert werden. Damit eine leichte Parametrisierung und Erweiterung des Systems durch weitere Mess- oder Kenngrößen ermöglicht wird, beruht der Algorithmus für die Klassifikation des Fahrstils auf dem Prinzip von zwei Zählersystemen für ruhig (R) und dynamisch (D) in Verbindung mit einer Statusmaschine. Hierzu werden jeweils für definierte Zeitabschnitte  $T$  aus ausgewählten fahrdynamischen Zustandsgrößen  $\mathbf{x}_F$  geeignete Kenngrößen ermittelt (vgl. Tabelle 6.1b). Für jede Kenngröße  $K_i \in \mathbf{K}$  werden in Abhängigkeit der Fahrsituation Grenzwerte  $g_D(K_i)$  und  $g_R(K_i)$  bestimmt, wodurch bei deren Über- beziehungsweise Unterschreiten die Zählerwerte  $z_D(K_i)$  beziehungsweise  $z_R(K_i)$  auf den Wert 1 gesetzt werden. Am Beispiel der maximalen Querbeschleunigung in einer landstraßenähnlichen Fahrsituation wird bei dem gewählten Versuchsträger  $z_D(a_y)$  gesetzt, wenn die Kenngröße einen Wert von  $3,5\text{m/s}^2$  überschreitet. Wird jedoch der Wert von  $2,5\text{m/s}^2$  unterschritten, so wird der Zähler  $z_R(a_y)$  gesetzt. Die gewichtete Mittelwertbildung der Zählerwerte aller Kenngrößen  $K_i$  resultiert in einem skalaren Wert für  $z_D$  und  $z_R$ , woraus mithilfe einer Statusmaschine und einem definierten Schwellenwert  $C$  der momentane Fahrstilindex  $i_{\text{FS}}^*$  für die letzten  $T$  Sekunden ermittelt wird. Das Prinzip zur Bestimmung des Fahrstils ist vereinfacht in Bild 6.9 abgebildet.

Da sich das Verhalten der Fahrer aufgrund von Umgebungs- oder Verkehrssituationen ver-

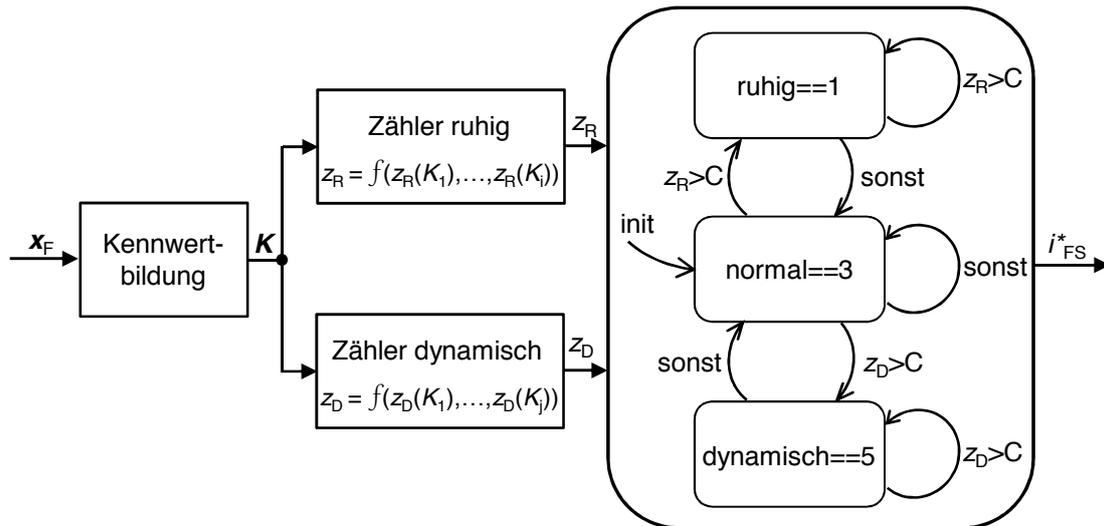


Bild 6.9.: Prinzip des Algorithmus zur Klassifikation des Fahrerstils  $i_{FS}^*$

ändern kann – beispielsweise nach einer Schrecksituation, einer Verwarnung oder durch Stau – werden weitere Maßnahmen für die finale Ermittlung des Fahrstilindex  $i_{FS}$  getroffen (Bild 6.10). Zum einen können optional mithilfe zusätzlicher Sensorik  $x_U$  Sonderereig-

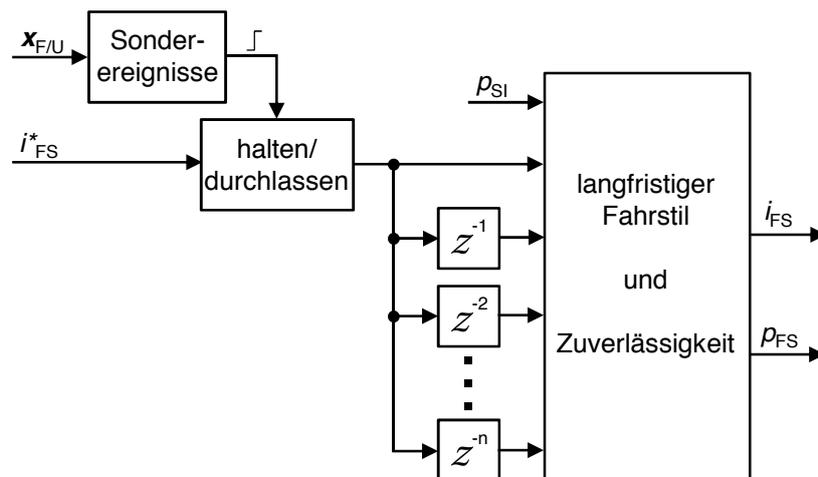


Bild 6.10.: Bestimmung des langfristigen Fahrstils und der Zuverlässigkeit

nisse aus dem Umfeld detektiert werden, wie beispielsweise höheres Verkehrsaufkommen, längerer Fahrzeugstillstand oder schlechte Wetterbedingungen. Da diese Einflüsse notwendigerweise eine Veränderung im Fahrstil bewirken, wird die Fahrstilermittlung für die entsprechende Dauer eingestellt und der zuletzt ermittelte Wert  $i_{FS}^*$  für den Zeitraum eingefroren. Ist das Sonderereignis beendet, kann die Bestimmung des Fahrstils mit den zuletzt gespeicherten Werten fortgeführt werden.

Zum anderen kann der Fahrstil über einen längeren Zeitraum als  $T$  ermittelt werden. Hierzu bietet sich eine gesonderte Funktionskomponente an, die je nach Zielverteilung zwischen Robustheit und Dynamik über einen Zeitbereich  $n \cdot T$  zurückblickt und einen langfristigen Wert  $i_{FS}$  für den Fahrstil ermittelt. Ein solches Vorgehen erweist sich für die adaptive Gestaltung von Systemen und Fahrzeugkomponenten als vorteilhaft, da häufig

eintretende kurzfristige Änderungen im Fahrerverhalten nicht sofort zu einer Änderung der zugrundeliegenden Parametrisierung führen. Die verwendete Logik kann vereinfacht als eine gewichtete Mittelwertbildung betrachtet werden, bei dem diejenigen  $i_{\text{FS}}^*(j)$  stärker gewichtet werden, die dem ermittelten langfristigen Wert  $i_{\text{FS}}$  entsprechen. Mit diesem Verfahren wird ein häufiger Wechsel von  $i_{\text{FS}}$  aufgrund von kurzfristigen Änderungen im Fahrerverhalten oder der Verkehrssituation vermieden.

Um eine Aussage darüber zu erhalten, wie zuverlässig der ermittelte Wert von  $i_{\text{FS}}$  ist, kann zusätzlich eine Zuverlässigkeit  $p_{\text{FS}}$  zwischen 0 und 100% bestimmt werden. Sie wird aus dem Wert  $i_{\text{FS}}$ , den letzten  $n$  Werten von  $i_{\text{FS}}^*$  sowie den beiden Zählerwerten  $z_{\text{D}}$  und  $z_{\text{R}}$  ermittelt. Da die Schwellenwerte für die Fahrerstilerfassung stets abhängig von der jeweiligen Fahrsituation sind, wird auch die Zuverlässigkeit der Fahrsituationserfassung  $p_{\text{SI}}$  anteilig mit dem Faktor  $a$  mit berücksichtigt. Für den Zeitpunkt  $t$  kann die Zuverlässigkeit, dass  $i_{\text{FS}}$  korrekt ermittelt wurde, wie folgt bestimmt werden:

$$p_{\text{FS}}(t) = f(i_{\text{FS}}(t), i_{\text{FS}}^*(t), i_{\text{FS}}^*(t - T), \dots, i_{\text{FS}}^*(t - nT), z_{\text{D}}, z_{\text{R}}) a p_{\text{SI}}(t) \quad (6.4)$$

Dieser Wert ist besonders hoch, wenn alle  $n$  Vorgänger von  $i_{\text{FS}}^*$  denselben Wert für den Fahrstil ermittelt haben, dieser Wert gleich dem langfristigen Wert  $i_{\text{FS}}^*$  ist, die Zählerwerte eindeutig sind (beispielsweise  $z_{\text{R}} < C < z_{\text{D}}$  oder  $z_{\text{D}} < C < z_{\text{R}}$ ) und zusätzlich die Fahrsituation mit einer hohen Zuverlässigkeit  $p_{\text{SI}}$  ermittelt wird.

### 6.2.3. Simulierte Fahrereignisse

Mithilfe von simulierten Fahrereignissen können Informationen zur Reaktionsbereitschaft unterschiedlicher Fahrer erhoben werden. Hierzu werden geeignete Fahrereignisse identifiziert und in einer geeigneten Fahrsituation künstlich erzeugt, mit dem Ziel, eine Fahrerreaktion auszulösen, die Informationen über individuelle Fahrereigenschaften bietet. Die künstliche Erzeugung erfolgt im Rahmen dieser Arbeit durch ein Zusatzlenkmoment der EPS, das über eine gesonderte Schnittstelle der Lenkung dem Unterstützungsmoment der Servolenkung überlagert wird (Bild 6.11). Der Fahrer nimmt diese Störung wahr und führt in Abhängigkeit der aktuellen Umfeldsituation eine korrigierende Lenkbewegung durch. Mithilfe der resultierenden Fahrer- und Fahrzeugreaktion lassen sich dann Informationen zur Klassifikation des Reaktionsbereitschaft  $i_{\text{RB}}$  ermitteln. Um den Einfluss von besonderen Fahrereignissen auf das resultierende Lenkmoment verschiedener Fahrzeuge und Lenkapplikationen zu untersuchen, wird im Folgenden der Einfluss einer realen Spurrinnenüberfahrt genauer betrachtet. Bild 6.12 zeigt die Verläufe der Zahnstangenkraft und des Lenkmoments jeweils für ein Mittel- und Oberklassefahrzeug. Bei beiden Messungen wird eine konkave Spurrinne mit der Geschwindigkeit von etwa 30km/h und einem Einfahrwinkel von näherungsweise  $25^\circ$  überfahren. Dabei wurde zum Zeitpunkt der Überfahrt das Fahrzeug leicht gebremst, um den Effekt auf das resultierende Lenkmoment zu verstärken.

Zum Start der Messung wird das linke Vorderrad durch die Kombination aus Bremskraft und seitlich angreifender Störkraft beeinflusst, wodurch die Zahnstangenkraft ansteigt.

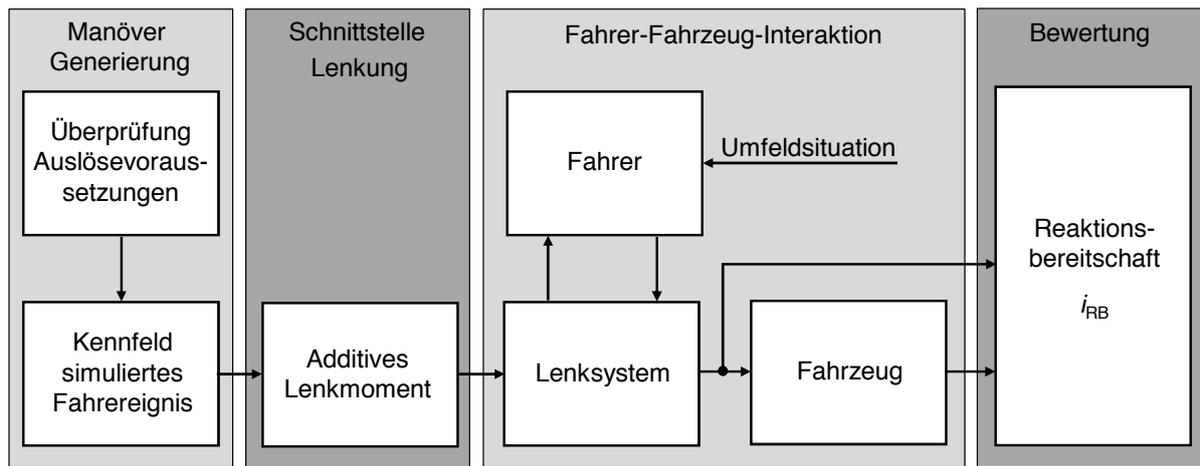


Bild 6.11.: Vorgehensweise zur Bewertung der Reaktionsbereitschaft mithilfe simulierter Fahrereignisse

Da für beide Fahrzeuge dieselben Versuchsbedingungen gelten, ist der Verlauf der Zahnstangenkräfte ähnlich. In Abhängigkeit der Dynamik des Wirkpfades zwischen den Rädern und dem Lenkrad, die in erster Linie durch das Übertragungsverhalten des Lenksystems bestimmt wird, entsteht aus der Zahnstangenkraft das Lenkmoment. Wie aus Bild 6.12 hervorgeht, kann je nach gewünschter Lenkabstimmung des Fahrzeugherstellers der Einfluss der gleichen Spurrinne unter gleichen Fahrbedingungen einen Unterschied im resultierenden Lenkmoment herbeiführen, das sich von der Amplitude und der Dynamik deutlich unterscheidet.

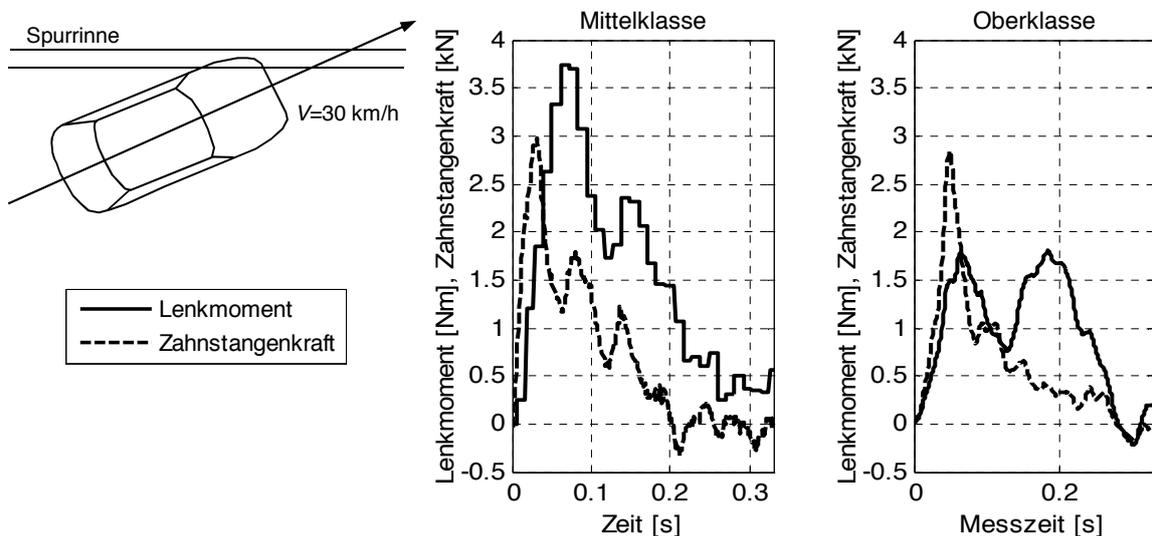


Bild 6.12.: Lenkmomenten- und Zahnstangenkraftverlauf bei Überfahrt einer Spurrinne für unterschiedliche Fahrzeuge mit und ohne Servounterstützung

Für ein simuliertes Fahrereignis kommen grundsätzlich verschiedenartige Ereignisse in Betracht. Ihre Ausprägung muss mindestens so gestaltet sein, dass sie eine auswertbare Fahrerreaktion bewirkt. Sie darf allerdings auch nicht zu extrem verlaufen, weil so eine kritische Folgereaktion resultieren kann. Ein Vorteil eines solchen Verfahrens ist insbeson-

dere die Reproduzierbarkeit des Ereignisses. Somit sind die Reaktionen unterschiedlicher Fahrer eindeutig miteinander vergleichbar und können je nach Bedarf auch wiederholt werden. Außerdem stellt die eintretende Störwirkung ein vertrautes Ereignis für den Fahrer dar. Im besten Fall wird sie nicht als bewusster Störeingriff aufgefasst, sondern als ein natürlich vorkommendes Ereignis nur im Unterbewusstsein wahrgenommen. Die Ausprägung des simulierten Fahrereignisses muss allerdings in Abhängigkeit der Lenkapplikation des jeweiligen Fahrzeugs erfolgen. Weist diese prinzipiell eine hohe Dämpfung für eine geringe Fahrbahnrückmeldung auf (häufig bei Oberklassefahrzeugen, vgl. Bild 6.12), muss auch das simulierte Fahrereignis deutlich gedämpfter erfolgen.

Da im Rahmen der folgenden Untersuchungen nur das Lenkmoment als Freiheitsgrad für die simulierte Erzeugung des Ereignisses verwendet wird, scheiden Ereignisse aus, die großen Einfluss auf weitere Freiheitsgrade des Fahrzeugs haben. Wird beispielsweise die Durchfahrt einer Windböe lediglich durch ein überlagertes Lenkmoment erzeugt, ohne dabei die bei realer Einwirkung entstehende Wankbewegung realisieren zu können, kann dies zu einer Verwirrung des Fahrers beitragen. Da sich eine Querrinnenüberfahrt aufgrund der hohen Auswirkung auf das Lenkmoment bei höheren Fahrzeuggeschwindigkeiten störend auswirken kann, wird für die folgenden Untersuchungen eine Bodenwelle als simuliertes Fahrereignis angewendet. Ihr Einfluss auf das Lenkmoment wird im Rahmen der folgenden Fahrversuche genauer erläutert.

### 6.3. Ergebnisse aus dem Fahrversuch

Der Funktionsnachweis der vorgestellten Verfahren erfolgt im Rahmen von Erprobungsfahrten, bei denen derselbe Versuchsträger eingesetzt wird wie bei den Studien in Kapitel 2 und 5. Zusätzlich zu den serienmäßig vorhandenen Sensorinformationen stehen optional die Daten der Fahrzeugkamera zur Verfügung, die Informationen über die Position des Fahrzeugs innerhalb der Fahrspur bietet. Die Versuchsfahrten erfolgen auf einem 40km langen Rundkurs um die Stadt Schwäbisch Gmünd, der nach subjektiver Bewertung des Versuchsbegleiters alle drei Fahrsituationen autobahnähnlich (25%), landstraßenähnlich (45%) und stadähnlich (30%) enthält. Die Untersuchung des Einflusses von simulierten Fahrereignissen erfolgt direkt im Anschluss an die Fahrt auf einem separaten Autobahnabschnitt, der mit einer Geschwindigkeit von 110km/h durchfahren wird. An definierten Stellen dieser Strecke wird durch den Versuchsbegleiter ein simuliertes Fahrereignis in Form einer einseitigen Bodenwelle eingeleitet. Der Einfluss einer realen Bodenwelle auf das Lenkmoment wird ähnlich wie im Versuch von Bild 6.12 vorab ermittelt. Dabei wird eine reale Bodenwelle mehrmals vom gleichen Versuchsfahrer überfahren und das resultierende Lenkmoment aufgezeichnet. Der mittlere Verlauf dieser Momente wird für das simulierte Fahrereignis genutzt und ist in Bild 6.15a (ohne Fahrereinfluss) aufgetragen. Für die Ermittlung der Fahrsituation und des Fahrstils zeigt Bild 6.13 die Verläufe der wesentlichen Größen des Algorithmus. Dabei ist ein Ausschnitt aus der Fahrt eines dynamischen Fahrers aufgeführt, die in einer stadähnlichen Fahrsituation beginnt und zum

Zeitpunkt  $t_d$  in eine landstraßenähnliche übergeht. Als Eingangsgrößen sind beispielhaft die Fahrzeuggeschwindigkeit und die Querbeschleunigung in Bild (a) aufgetragen.

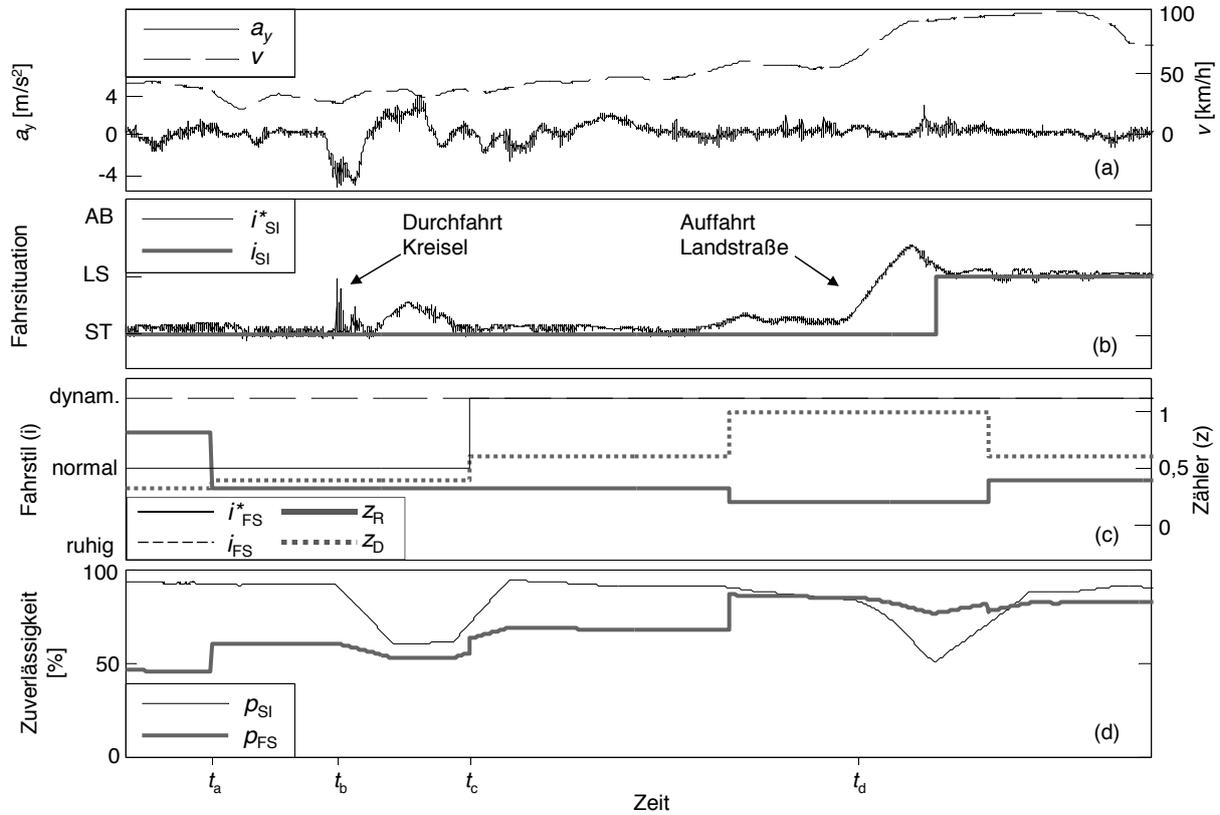


Bild 6.13.: Verlauf unterschiedlicher Signale bei der Klassifikation des Fahrstils (AB: autobahnähnlich, LS: landstraßenähnlich, ST: stadähnlich)

In Bild (b) sind die Ergebnisse der kurzfristigen  $i_{SI}^*$  und langfristigen  $i_{SI}$  Fahrsituationserfassung abgebildet.  $i_{SI}^*$  erkennt zeitnah die Änderung der Fahrsituation zum Zeitpunkt  $t_d$ , unterliegt aber Schwankungen, die durch gesonderte Manöver (hier durch die dynamische Durchfahrt eines Kreisells zum Zeitpunkt  $t_b$ ) auftreten können.  $i_{SI}$  hingegen filtert diese kurzfristigen Schwankungen, erkennt allerdings eine dauerhafte Änderung der Fahrsituation deutlich später. Als Gütemaß für  $i_{SI}$  dient die Zuverlässigkeit  $p_{SI}$ , die mit einer kurzzeitigen Änderung der Fahrsituation abfällt (Bild 6.13 (d)). Die zugehörigen Größen zur Klassifikation des Fahrstils sind in Bild (c) aufgeführt. Die Zählerwerte  $z_R$  und  $z_D$  werden in definierten Zeitabschnitten neu bestimmt und legen mithilfe der Statusmaschine und des Schwellenwerts  $C$  (hier  $C=0,5$ ) von Bild 6.9 den Verlauf des Fahrstils fest. Während der langfristige Fahrstil  $i_{FS}$  den Fahrer eindeutig als dynamisch klassifiziert, ist die Tendenz für  $i_{FS}^*$  in der stadähnlichen Fahrsituation schwankend zwischen normal und dynamisch. Grund hierfür ist die Bedingung  $z_R > C$  und  $z_D < C$ , die vor dem Zeitpunkt  $t_a$  eingetreten ist. Nach  $t_a$  sind beide Zähler kleiner als  $C$ , worauf  $i_{FS}^*$  seinen Wert beibehält. Erst zum Zeitpunkt  $t_c$  steigt auch  $i_{FS}^*$  auf dynamisch, bedingt durch den Fall  $z_D > C$  und  $z_R < C$ . Je länger  $i_{FS}^*$  und  $i_{FS}$  denselben Wert ermitteln und je höher die Zuverlässigkeit  $p_{SI}$  der Fahrsituation ist, desto größer ist auch die Gesamtzuverlässigkeit  $p_{FS}$  des Fahrstils (Bild 6.13 (d)).

Bild 6.14 führt exemplarisch die Ergebnisse der Fahrstilerfassung von drei Probanden auf, die den gesamten Parcours durchfahren haben. Dargestellt sind jeweils Mittelwert, Standardabweichung und das 95%-Vertrauensintervall aller Bewertungen  $i_{FS}^*$  in Abhängigkeit der jeweiligen Fahrsituation. Dabei werden quantitative Werte 1, 3 und 5 für die Fahrstile ruhig, normal und dynamisch vergeben.

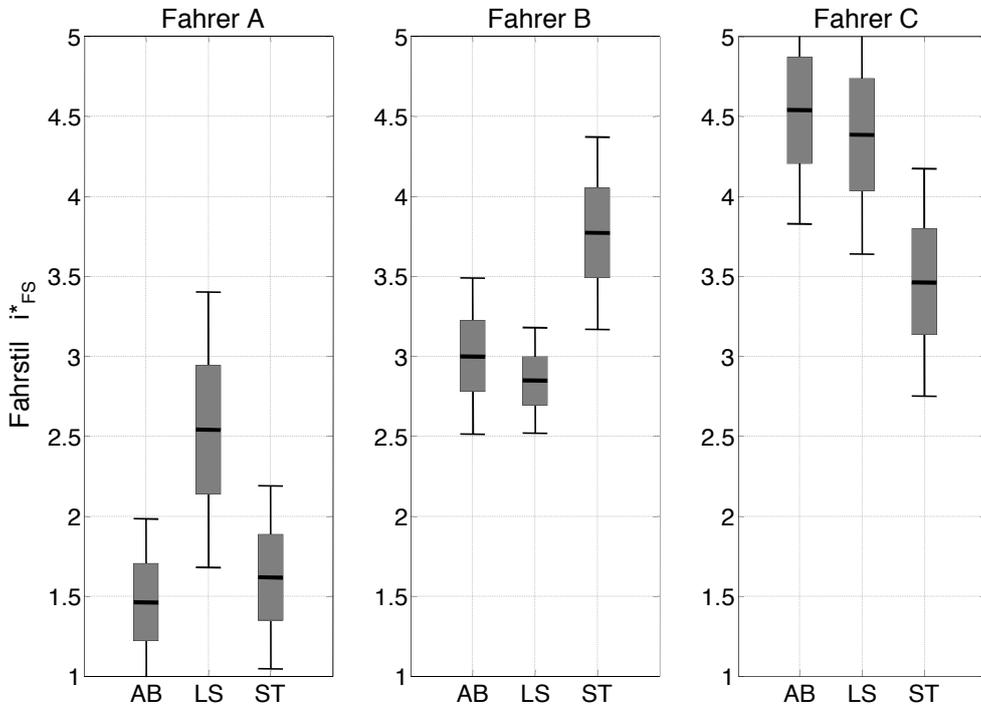


Bild 6.14.: Bewertung des Fahrstils für drei unterschiedliche Fahrer

Die drei Fahrer wurden durch das Fremdbild subjektiv jeweils unterschiedlich eingestuft: von ruhig (Fahrer A) bis dynamisch (Fahrer C). Diese Tendenz ist ebenfalls durch die objektive Auswertung des Algorithmus ersichtlich. Allerdings sind auch deutliche Unterschiede des individuellen Fahrstils in Abhängigkeit der jeweiligen Fahrsituation erkennbar. So wird beispielsweise Fahrer A grundsätzlich als ruhiger Fahrer eingestuft, was aus der mittleren Gesamtwertung von  $i_{FS}^* \approx 1,5$  in autobahnähnlichen wie auch in stadtähnlichen Fahrsituationen hervorgeht. In landstraßenähnlichen Fahrsituationen hingegen streut sein Verhalten viel stärker und nimmt im Mittel einen höheren Fahrstilindex an. Ähnliches Verhalten ist auch bei den übrigen Fahrern zu beobachten. So zeigt Fahrer C auf Autobahnen und Landstraßen ein sehr dynamisches Fahrverhalten, während er in der Stadt gemäßiger unterwegs ist.

Anhand des Mittelwerts und der verhältnismäßig kleinen Standardabweichung ist die Robustheit des Algorithmus bei einer langfristigen Betrachtung erkennbar. Vereinzelt sind aber auch Bewertungen vorhanden, die stark vom jeweiligen Mittelwert abweichen. Diese treten insbesondere auf, wenn gesonderte Ereignisse eintreten. Auch wird in Situationen mit erhöhtem Verkehrsaufkommen ein hoher Anstieg der Standardabweichung bemerkt, der zu einer Verzerrung der Gesamtwertung beiträgt. Eine zusätzliche Nutzung von weiteren Sensoren, wie beispielsweise des Abstandssensors, erhöht in diesen Fällen die Ro-

bustheit bei der Klassifikation des Fahrstils.

Im nächsten Schritt erfolgt die Bewertung der Fahrerreaktionen auf das simulierte Fahrerereignis Bodenwelle. Dabei werden Bodenwellen simuliert, die sowohl an dem linken Rad (resultierendes Lenkmoment in die linke Richtung) wie auch an dem rechten Rad (resultierendes Lenkmoment in die rechte Richtung) eine Vertiefung der Fahrbahn aufweisen. Diese erfolgen für die Probandenstudien nur bei Geradeausfahrt, da bei einer Kurvenfahrt ein großes Streuungsverhalten der Reaktionen gleicher Fahrer infolge eines simulierten Fahrerereignisses festgestellt wurde – insbesondere bei einem Moment in Richtung der kurveninneren Seite [78]. In Bild 6.15 ist die Menge der Verläufe von Lenkmoment und Lenkwinkel zweier Fahrer bei Geradeausfahrt aufgetragen. Um den Einfluss einer simulierten Bodenwelle zu beschreiben und den Lenkanteil des Fahrers von dem durch den simulierten Fahrerereignis hervorgerufenen Anteil abgrenzen zu können, ist zusätzlich eine Messung ohne Fahrereinfluss (Hands-Off) aufgetragen.

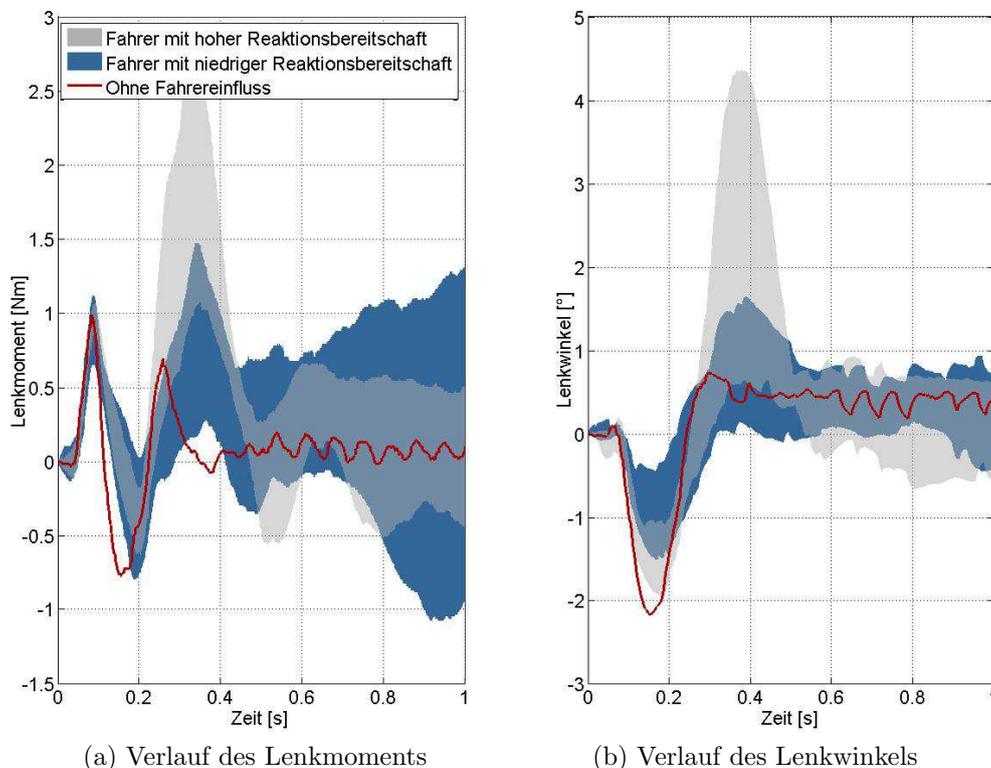


Bild 6.15.: Menge der Lenkreaktionen von zwei verschiedenen Fahrern und einer Hands-Off-Messung

Aus dem Verlauf des Lenkmoments in Bild 6.15a geht hervor, dass bis zum ersten Maximum (etwa 0,09s nach der Aufschaltung) kaum Streuungen im Lenkmoment der einzelnen Fahrer erkennbar sind. Ihre Verläufe sind nahezu deckungsgleich mit dem der Hands-Off-Messung, was darauf schließen lässt, dass der Fahrer innerhalb dieses Zeitbereichs keinen aktiven Lenkeingriff als Reaktion auf die Störanregung vornimmt. Unterschiede im Lenkwinkelverlauf bis zu diesem Zeitpunkt (Bild 6.15b) sind nach den Ergebnissen aus Kapitel 3 eher auf die verschiedenen Halte- und Greifkräfte der Fahrer zum Zeitpunkt des Manövers zurückzuführen als auf individuelle Unterschiede im Fahrerverhalten. Die

deutliche Abgrenzung individueller Fahrerreaktionen entsteht erst ab einem Zeitpunkt von 0,15s mit dem Beginn des Phasenverzugs zwischen dem Hands-Off-Manöver und den Fahrerreaktionen. Der Fahrer mit der höheren Reaktionsbereitschaft weist grundsätzlich eine deutlich intensivere Wahrnehmung und Reaktion auf das simulierte Fahrereignis auf, welche sich in den höheren Maximalamplituden von Lenkmoment und -winkel bemerkbar machen. Auch die Ausregelzeit dieses Fahrers, das heißt die Zeitdauer bis zum Erreichen des Normallenkverhaltens, fällt im Durchschnitt 30% länger aus. Im Gegensatz hierzu führt der Fahrer mit niedriger Reaktionsbereitschaft kaum eine aktive Lenkreaktion infolge des simulierten Fahrereignisses aus, sondern dämpft den Einfluss durch die Trägheit der auf das Lenkrad gestützten Arme. Dieses bestätigen auch die subjektiven Wahrnehmungen der beiden Fahrer. Während der Fahrer mit hoher Reaktionsbereitschaft in drei viertel der Fälle das simulierte Fahrereignis korrekt bemerkt, ist für den Fahrer mit niedriger Reaktionsbereitschaft das simulierte Fahrereignis nur selten wahrnehmbar<sup>4</sup>.

Für die quantitative Bewertung der Reaktionsbereitschaft mithilfe der Lenkreaktion des Fahrers sind die Randbedingungen zum Zeitpunkt des Manövers zu berücksichtigen. Trotz gleicher Störanregung sowie Geschwindigkeits- und Fahrmanöverwahl können signifikante Streuungen im Verhalten gleicher Fahrer auftreten. Eine wesentliche Ursache hierfür ist die Ausgangsposition des Fahrzeugs in der Fahrbahn. In Bild 6.16 wird hierzu die Reaktion desselben Fahrers in Abhängigkeit seiner aktuellen Fahrbahnposition und der Richtung der Störanregung untersucht. Im Fall A befindet sich das Fahrzeug auf der Fahrbahnmitte (Bild 6.16a), und das simulierte Fahrereignis ist nach links gerichtet. In den beiden anderen Fällen befindet sich das Fahrzeug nahe dem rechten Fahrbahnrand, der zum Standstreifen abgrenzt. Das simulierte Fahrereignis ist im Fall B nach links in Richtung Fahrbahnmitte gerichtet und im Fall C nach rechts in Richtung Standstreifen.

Die Reaktionen des Fahrers sind für die Fälle A und B von vergleichbar geringer Ausprägung, weil die Richtung des simulierten Fahrereignisses keinen Lenkwinkel in die kritische Richtung (Verlassen der Fahrbahn) induziert. Hingegen fällt die Reaktion des Fahrers im Fall C deutlich stärker und länger aus, insbesondere durch die Gegenreaktion beim zweiten Extremum des Lenkwinkels nach  $t \approx 0,4s$  (Bild 6.16a). Durch die Schrecksituation entfernt sich der Fahrer sogar vom Fahrbahnrand und lenkt in Richtung Fahrbahnmitte (Bild 6.16b). Um die ermittelten Kenngrößen, wie den maximalen Lenkwinkel und die Ausregelzeit, mit Referenzwerten vergleichen und eine Aussage über das Reaktionsverhalten des Fahrers treffen zu können, müssen somit zusätzliche Informationen berücksichtigt werden, die das Verhalten des Fahrer beeinflussen können.

---

<sup>4</sup>Vorausgesetzt, die Fahrer werden vorab über das Prinzip des simulierten Fahrereignisses informiert. Ansonsten ist das Manöver selbst für den Fahrer mit hoher Reaktionsbereitschaft nicht wahrnehmbar.

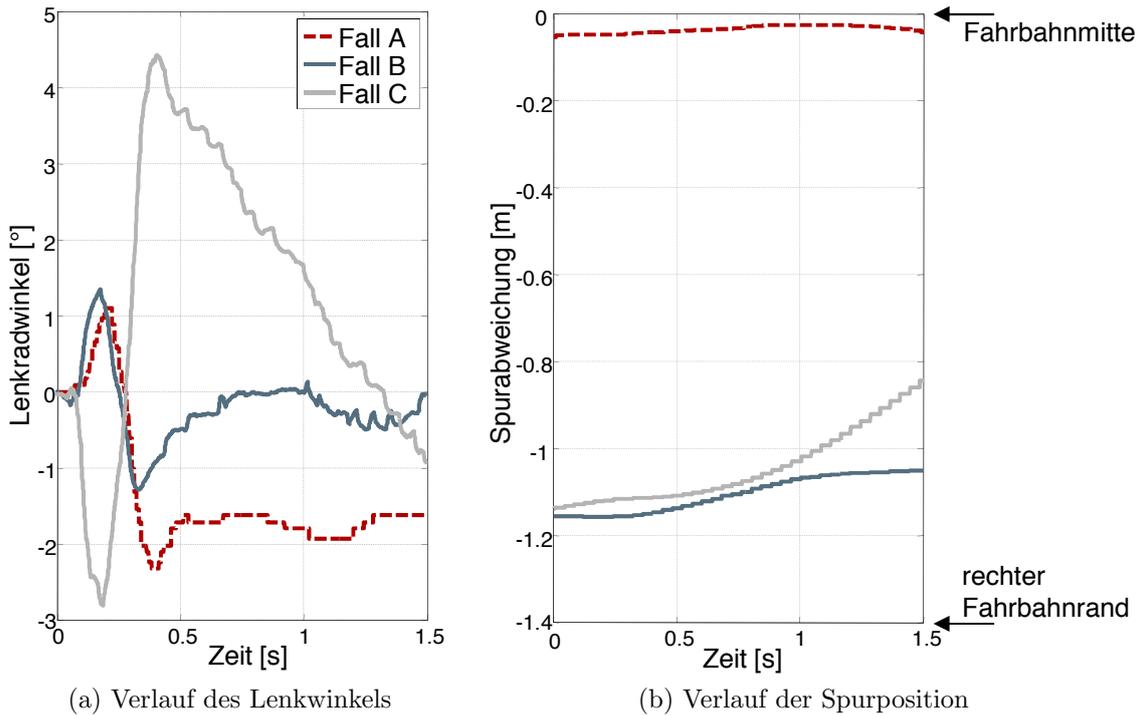


Bild 6.16.: Lenkreaktion des Fahrers in Abhängigkeit von der Lateralabweichung zur Spurmitte und von der Richtung der Störanregung

## 6.4. Fazit

Das Kapitel stellt ein Verfahren zur Ermittlung individueller Fahrereigenschaften aus der objektiven Analyse des Fahrverhaltens vor. Dabei liegt der Fokus auf die beiden Eigenschaften Fahrstil und Reaktionsbereitschaft, die in Kapitel 5 als die wesentlichen Eigenschaften für die Gestaltung der maximalen Amplitude der Fahrdynamischen Lenkmomentenempfehlung ermittelt wurden. Den Zusammenhang zwischen den beiden Eigenschaften und dem entsprechenden Fahrertyp ist in Bild 6.17 skizziert.

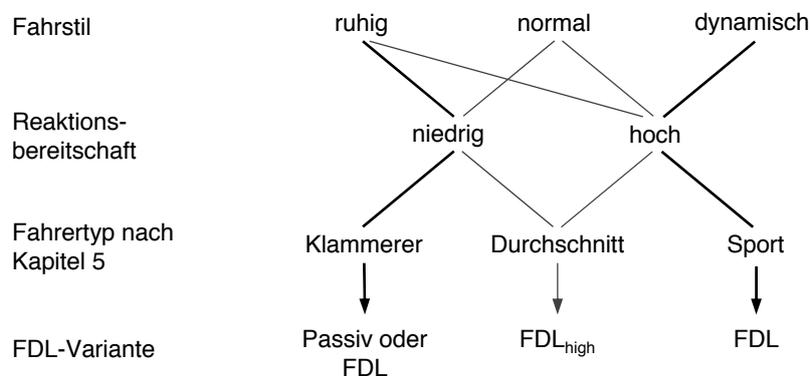


Bild 6.17.: Ermittlung der FDL-Variante mithilfe des Fahrstils und der Reaktionsbereitschaft

Ruhige Fahrer mit niedriger Reaktionsbereitschaft wurden in Kapitel 5 als Klammerer bezeichnet. Eine FDL führt hier weder zu einer Verbesserung der Fahrerreaktion noch wirkt sie sich störend auf den Fahrer aus. Der dynamische Fahrer mit hoher Reaktionsbereitschaft kann durch eine FDL die Güte des Stabilisierungsvorgangs verbessern – ein zusätzlicher Mehrwert durch  $FDL_{\text{high}}$  ist vernachlässigbar klein. Der normale Fahrer hingegen profitiert in jedem Fall von einer höheren Lenkmomentenempfehlung. Je höher diese gewählt wird, desto häufiger und besser ist der erfolgreiche Stabilisierungsvorgang durchgeführt worden. Lediglich für den dynamischen Fahrer mit niedriger Reaktionsbereitschaft kann kein eindeutiger Zusammenhang zur bevorzugten FDL-Variante vorgenommen werden.

Wird keine adaptive Strategie der FDL verfolgt, so zeigen Bild 6.17 und die Ergebnisse aus Kapitel 5, dass die normale FDL-Variante in jedem Fall eine risikofreie Kompromisslösung bietet.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit werden die Potenziale einer Lenkmomentenempfehlung untersucht und neue Ergebnisse über deren Wirksamkeit und Akzeptanz im fahrdynamischen Grenzbereich abgeleitet. Dabei wird der besondere Wert auf die praktische Umsetzbarkeit der entwickelten Algorithmen gelegt, damit sie in Serienfahrzeugen nach dem heutigen Stand der Technik angewendet werden können. Auch die praktische Relevanz der ermittelten Ergebnisse ist von großer Bedeutung. Aus diesem Grund wird auf Untersuchungen im Fahrsimulator verzichtet; alle durchgeführten Studien werden mit Normalfahrern im realen Versuchsfahrzeug durchgeführt.

Aus dem Stand der Technik in Kapitel 1 werden die Potenziale für neue Funktionen vorgestellt, die durch eine EPS ermöglicht werden. Insbesondere für die Gestaltung des Lenkmoments bieten moderne EPS-Regelungssysteme einen erheblichen Mehrwert gegenüber klassischen Reglern, da sie die direkte Regelung des Drehstabmoments vornehmen und die Lenkmomentenempfehlung eines Assistenzsystems eindeutig und reproduzierbar für den Fahrer gestalten können. Die vorgestellten Lenkassistenten zeigen auf, wo der Fahrer einen Bedarf an zusätzlicher Unterstützung hat: Das sind besonders kritische und besonders langweilige Fahrsituationen. Dabei wird deutlich, dass die Zufriedenstellung unterschiedlicher Fahrertypen immer wichtiger für die Gestaltung zukünftiger Assistenzsysteme wird.

Die erste Studie dieser Arbeit liefert grundlegende Erkenntnisse hinsichtlich des Einflusses von unterschiedlich gestalteten Zusatzlenkmomenten. Dabei wird die Auswirkung verschiedener Amplituden und Gradienten des Zusatzlenkmoments untersucht. Ein Empfehlungsmoment darf weder zu langsam noch zu schnell aufgebaut werden, damit es vom Fahrer als Führung akzeptiert wird und keine reflexartige Gegenreaktion hervorruft. Hinsichtlich der Beherrschbarkeit kann bei höheren Gradienten ( $G \geq 50\text{Nm/s}$ ) die resultierende Fahrzeugreaktion als wesentliche Einflussgröße bei der Beurteilung des Zusatzlenkmoments ermittelt werden. Die identifizierte mathematische Abhängigkeit zwischen Gierrate des Fahrzeugs und subjektiver Einschätzung des Fahrers ermöglicht, bei der Auslegung von Lenkassistenten das maximal zumutbare Moment in Abhängigkeit von den fahrdynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs festzulegen. Bei niedrigen Gradienten kann diese Abhängigkeit allerdings nicht bestätigt werden, denn Momente bis zu  $6\text{Nm}$  werden selbst bei sehr direkter Lenkübersetzung als unkritisch beurteilt. Der Einsatz höherer Momente ist für eine fahrdynamische Lenkmomentenempfehlung nicht praxisrelevant und wird im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht.

Die Betrachtung des Streuverhaltens der Kenngrößen bei gleicher Lenkmomentenaufschaltung offenbart deutliche Unterschiede im Reaktionsverhalten verschiedener Fahrer. So zeigen sich Probanden, die durchgängig stärker auf Zusatzlenkmomente reagierten, sowie Probanden, deren Reaktion sich eher dämpfend auswirkt. Eine Abhängigkeit dieser individuellen Unterschiede von demografischen Eigenschaften wie Alter und Geschlecht kann allerdings nicht nachgewiesen werden. Vielmehr sind sie auf die individuellen Er-

fahrungsunterschiede sowie auf Einflüsse wie der Lenkradhaltung oder der Fahrsituation zurückzuführen.

Diese Informationen über den Einfluss des Lenkmoments geben wesentliche Hinweise für die Gestaltung der FDL-Funktion. Hierzu werden die verschiedenen Auslegungen einer FDL für Übersteuern, Untersteuern und  $\mu$ -Split aus funktionaler Sicht genauer vorgestellt, und der zu erwartende Mehrwert einer korrekten Lenkreaktion im Zusammenwirken mit dem ESP wird erläutert. Unter Verwendung der oben genannten Beziehung zur Beurteilung der Beherrschbarkeit wird für verschiedene Übersteuersituationen nachgewiesen, dass die maximale Lenkmomentenempfehlung keinen störenden Einfluss auf den Fahrer haben wird.

Um die vorbereitenden Versuche und theoretischen Betrachtungen hinsichtlich des Mehrwerts einer FDL im gesamten Wirkkreis aus Fahrer, Fahrzeug und realer Fahrsituation zu untersuchen, wird im nächsten Schritt eine Probandenstudie zum Nachweis der Wirksamkeit der FDL durchgeführt. Hierbei werden Normalfahrer durch die Anregung einer Schleuderplatte reproduzierbar in einen übersteuernden Fahrzustand versetzt, der durch die gewählte Auslenkgeschwindigkeit der Platte eine anspruchsvolle Fahrsituation erzeugt. Fahrer- und Fahrzeugreaktion als Ergebnis auf die Anregung werden in verschiedenen Versuchsvarianten jeweils mit passiver und aktiver Assistenzfunktion (FDL oder  $FDL_{\text{high}}$ ) ausgewertet. Die Analyse der subjektiven und objektiven Daten zeigt, dass bei einer gesamtheitlichen Betrachtung über alle Probanden ein positiver Einfluss auf das Fahrer- und Fahrzeugverhalten festzustellen ist. Mit höherer Amplitude der Lenkmomentenempfehlung führen Fahrer im Allgemeinen präzisere Lenkbewegungen aus und erreichen so eine höhere Erfolgsquote beim Stabilisierungsvorgang.

Zusätzlich zur gesamtheitlichen Betrachtung aller Fahrerreaktionen erfolgt eine individuelle Verhaltensanalyse der Fahrer. Anhand eines Fragebogens und der Kommentare des Beobachters werden aus der Menge aller Probanden drei unterschiedliche Fahrertypen klassifiziert und der Analyse des Fahrerverhaltens zugrunde gelegt. Dabei sind deutliche Streuungen erkennbar, die kennzeichnend dafür sind, dass nicht alle Fahrer in gleichem Maße von der Lenkmomentenempfehlung profitieren. So erhöht sich die Güte der Lenkreaktion vom Durchschnittsfahrer, je höher das maximale Moment der Empfehlung ist. Sportliche Fahrer hingegen profitieren nur von der FDL-Funktion. Ein höheres Moment der Empfehlung ( $FDL_{\text{high}}$ ) bietet diesem Fahrertyp weder einen Nachteil noch einen zusätzlichen Mehrwert. Eine dritte Gruppe der Fahrer (Klammerer) sind mit der Situation eindeutig überfordert. Sie zeigen keinerlei Reaktionsbereitschaft, um das Fahrzeug zu stabilisieren – weder mit noch ohne die FDL. Für diesen Fahrertyp bietet die FDL keinen Vorteil, wirkt sich aber den subjektiven Urteilen zufolge auch nicht nachteilig aus.

Damit der Mehrwert der FDL maximal ausgenutzt werden kann, wird eine adaptive Gestaltung der Lenkmomentenempfehlung in Abhängigkeit der individuellen Fahrereigenschaften verfolgt. Die Parametrisierung erfolgt dabei automatisiert durch das System. Hierzu wird mithilfe serienmäßig vorhandener fahrdynamischer Zustandsgrößen das Fahrerverhalten während der Normalfahrt bewertet und der Auswahl des maximalen

Moments der FDL zugrunde gelegt. Um die drei unterschiedlichen Fahrertypen zu klassifizieren, sind zum einen der Fahrstil und zum anderen die Risikobereitschaft des Fahrers zu ermitteln.

Die Klassifikation des Fahrstils erfolgt dabei in Abhängigkeit der Fahrsituation, die zuvor unter Berücksichtigung der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Kurvigkeit der befahrenen Strecke ermittelt wird. Dabei zeigt sich, dass derselbe Fahrer in verschiedenen Fahr- und Verkehrssituationen unterschiedliche Werte für den Fahrstilindex erreichen kann. Um kurzfristige Änderungen im Fahrstil zu filtern, wird ein Verfahren für die langfristige Ermittlung des Fahrstilindex eingeführt und ein zugehöriger Wert für dessen Zuverlässigkeit ermittelt. Die einheitlichen Ergebnisse aus der objektiven Bewertung durch das System und aus der subjektiven Bewertung durch den Versuchsbegleiter zeigen, dass sich die individuellen Fahrereigenschaften in den fahrdynamischen Zustandsgrößen sehr genau widerspiegeln.

Die Ermittlung der Reaktionsbereitschaft des Fahrers infolge eines unerwarteten Ereignisses ist mit größerem Aufwand verbunden, denn die eindeutige Detektion und Vergleichbarkeit kann bei real eintretenden Ereignissen nicht notwendigerweise vorausgesetzt werden. Aus diesem Grund werden simulierte Fahrereignisse bestimmt, die in definierten Fahrsituationen den Einfluss eines realen Ereignisses auf das Lenkmoment nachbilden. Die resultierende Reaktion des Fahrers wird anschließend ausgewertet und eine Aussage über seine Reaktionsbereitschaft abgeleitet. Vorteilhaft erweist sich dieses Verfahren dadurch, dass der Fahrer den Eingriff nicht als bewusste Störung des Lenksystems wahrnimmt, sondern diesen als reales Ereignis meist unbewusst verarbeitet. Am Beispiel der simulierten Bodenwelle auf Autobahnen zeigt sich, dass Fahrer mit hoher Reaktionsbereitschaft deutlich stärker auf diese reagieren und eine längere Ausregelzeit benötigen als Fahrer mit einer niedrigeren Reaktionsbereitschaft. Um allerdings eine robuste Aussage treffen zu können, sollten zusätzlich aktuelle Umwelteinflüsse mit berücksichtigt werden – beispielsweise die Ausgangsposition des Fahrzeugs in der Fahrspur zum Zeitpunkt des simulierten Fahrereignisses.

Das hier dargestellte Verfahren berücksichtigt die diskrete Klassifikation der fahrerindividuellen Eigenschaften in vorab festgelegte Gruppen. In Abhängigkeit dieser Zuordnung erfolgt dann die Auswahl einer FDL-Variante (Passiv, FDL oder  $FDL_{high}$ ), die für den jeweiligen Fahrer den besten Unterstützungsgrad bietet. Andere mögliche Varianten – beispielsweise eine Variante, die zwischen FDL und  $FDL_{high}$  liegt – werden somit nicht berücksichtigt; genauso wenig wie ein Fahrer, dessen Fahrstil sich zwischen normal und dynamisch bewegt. Des Weiteren bietet die FDL zusätzlich zum maximalen Moment auch die Möglichkeit weitere Parameter, wie den Gradienten und die Eingriffsschwelle, zu variieren (vgl. Kapitel 4).

Um mit der FDL für jeden Fahrer eine optimal ausgelegte Lenkmomentenempfehlung realisieren zu können, müssen auch diese Parameter identifiziert werden. Eine Probandenstudie ist hierfür allerdings kein zielführendes Vorgehen, denn die große Anzahl möglicher Freiheitsgrade und individueller Fahrereigenschaften würde eine deutlich höhere Proban-

denzahl und Versuchsfahrten je Proband erfordern. Themen wie Gewöhnungseffekt und Wirtschaftlichkeit müssen dann erneut diskutiert und bewertet werden.

Für die systematische Bestimmung der fahrerindividuellen Lenkmomentenempfehlung bietet sich in diesem Fall der Einsatz von Fahrermodellen an. Fahrermodelle nach dem aktuellen Stand der Technik [25,52] bieten nämlich die Möglichkeit, auch das Lenkmoment als Informationsgröße des Fahrers zu nutzen. Die Reaktion unterschiedlicher Fahrertypen auf die verschiedenen Parameter der FDL kann somit in der Simulation eingeschränkt und anschließend im Rahmen von Versuchsfahrten im realen Fahrzeug validiert werden. Der Einsatz von Fahrermodellen kann aber auch für die funktionale Realisierung einer fahreradaptiven FDL im Fahrzeug dienen. Bild 7.1 zeigt hierzu eine mögliche Umsetzung dieses Verfahrens.

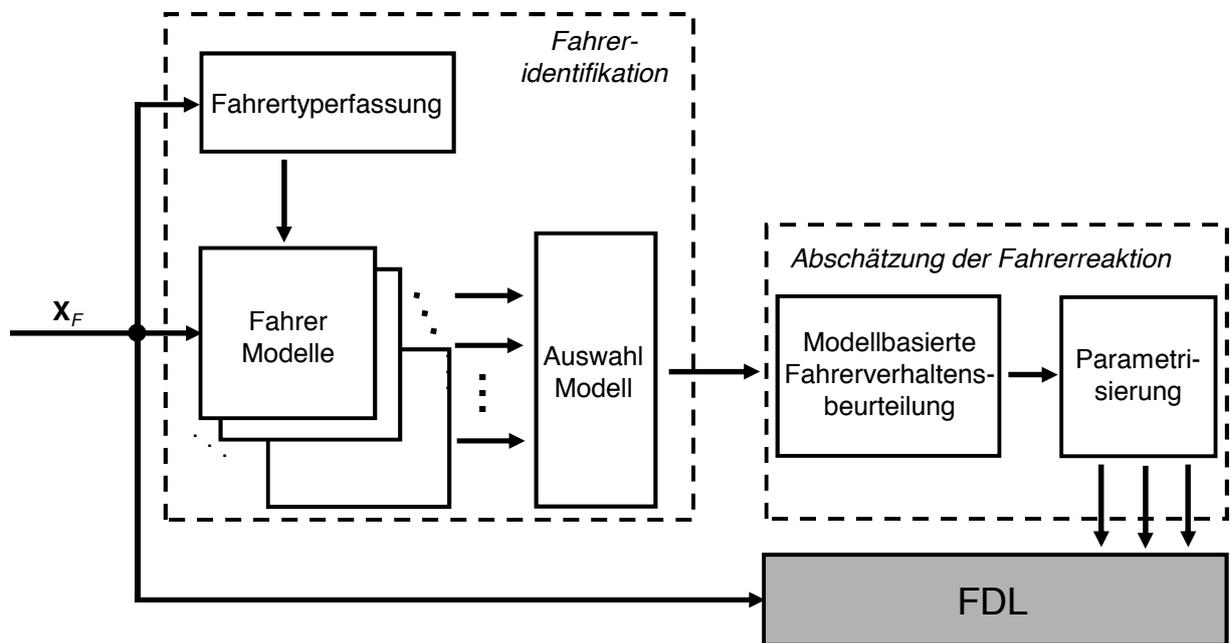


Bild 7.1.: Prinzip einer automatischen Adaption der Lenkmomentenempfehlung an die individuellen Fahrereigenschaften

Bei der Fahreridentifikation werden durch die Analyse des Fahrerhaltens in normalen Fahrsituationen die individuellen Fahrereigenschaften ermittelt. Dies kann analog zu dem in Kapitel 6 dargestellten Vorgehen erfolgen und um weitere Eigenschaften wie beispielsweise der Fahrerfahrung, Fahreraufmerksamkeit oder -müdigkeit erweitert werden. Sie werden anschließend der Parametrisierung und Auswahl der jeweiligen Fahrermodelle zugrunde gelegt. Bei den meisten Fahrermodellen besteht der menschliche Regler aus einer Vorsteuerung und einem Regler [28]: Je erfahrener beispielsweise der Fahrer ist, desto größer ist sein Steuerungsanteil, mit dem er erfahrungsbasiert einen Lenkwinkel einsteuert.

Ist diese Basis gelegt, erfolgt im nächsten Schritt eine Abschätzung der zu erwartenden Fahrerreaktion in kritischen Fahrsituationen. Die modellbasierte Fahrerhaltensbeurteilung simuliert hierzu eine definierte Fahrsituation, beispielsweise die Anregung durch eine Schleuderplatte in der Verbundumgebung aus Fahrer, Fahrzeug und FDL-Funktion.

Durch ein einfaches Optimierungsverfahren können dann die geeigneten Parameter der FDL ermittelt werden, die das Verhalten der Kenngrößen so nah wie möglich an festgelegte Referenzwerte bringen. Sollte das Fahrzeug im weiteren Verlauf der Fahrt in eine FDL-relevante Situation gelangen, so sind die Parameter der Funktion bereits bestimmt, um dem Fahrer die optimale Lenkunterstützung bieten zu können.

# A. Fragebogen zur Probandenauswahl

## Fragebogen

---

Falls nicht anders angegeben, Bitte nur eine Antwortmöglichkeit wählen.

### 1. Angaben zur Person

Name: \_\_\_\_\_

Adresse: \_\_\_\_\_

Alter: \_\_\_\_\_

Beruf: \_\_\_\_\_

Geschlecht:  m  w

Erwerbsjahr des Pkw Führerscheins: 

1	9		
---	---	--	--

### 2. Angaben zur Fahr- und Fahrzeugerfahrung

Interessieren Sie sich für Fahrzeuge?

- nein, kaum
- ja, ich beschäftige mich auch mal detaillierter (z.B. Zeitschriften, Museen, ...)
- ja, ich beschäftige mich aktiv (z.B. Hobbyschrauber, Mitglied im Rennsport Club, Beruf, ...)

Jährliche Kilometerleistung: ca. \_\_\_\_\_ km

davon

... Stadtfahrten? ca. \_\_\_\_\_ %

... Landstraße? ca. \_\_\_\_\_ %

... Autobahn? ca. \_\_\_\_\_ %

Verwendungshäufigkeit des Fahrzeugs:

- täglich (z.B. Fahrt zur Arbeit) Gesamtfahrdauer pro Tag \_\_\_\_\_h
- gelegentlich (z.B. ab und zu zum Einkaufen)
- selten (z.B. nur Urlaubsfahrten)

Beschreibung des am meisten genutzten Fahrzeugs:

Marke und Typ: \_\_\_\_\_  
Baujahr: \_\_\_\_\_  
Leistung: \_\_\_\_\_ PS

Folgende Zusatzeinrichtungen sind in diesem Fahrzeug vorhanden:

ABS	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> weiß nicht
ESP	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> weiß nicht
Servolenkung	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> weiß nicht
Sportfahrwerk	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> weiß nicht
Tempomat	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> weiß nicht
ACC	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> weiß nicht
Einparkhilfe	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> weiß nicht

Erfahrungen mit Automatikgetriebe:

vertraut  oft gefahren  selten bzw. gar nicht

Regelmäßige Nutzung weiterer Pkw:

Ja, nämlich \_\_\_\_\_  
 Nein

Wunschfahrzeug: \_\_\_\_\_

Haben Sie bereits ein Fahrsicherheitstraining absolviert?

Ja, im Jahr \_\_\_\_\_  
 Nein

Ich fahre mit dem Auto (Mehrfachwahl möglich)

weil Autofahren Spaß macht  
 weil es mich zum Ziel befördert  
 weil es mir mehr Unabhängigkeit verschafft  
 weil ich mich sicherer fühle als mit anderen Fortbewegungsmitteln

Wie häufig leuchtet die ESP Leuchte in Ihrem Fahrzeug?

häufig     ab und zu     kaum     gar nicht     weiß nicht

Haben Sie schon einmal die Kontrolle über das Fahrzeug verloren?

Ja  
 Nein

Bitte geben Sie an, inwiefern die folgenden Aussagen auf Sie zutreffen

Ich fahre lieber selbst	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	Ich fahre lieber als Beifahrer
Ich empfinde das Verkehrsgeschehen als hektisch	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	Ich empfinde das Verkehrsgeschehen als gemächlich
Ich fahre schnell und sportlich	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	Ich fahre langsam und zurückhaltend
Ich vermeide beim Fahren prinzipiell jedes Risiko	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	Ich nutze beim Fahren jede Gelegenheit, um schneller voranzukommen
Ich beherrsche mein Fahrzeug vollkommen	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	Ich habe häufig Schwierigkeiten mit dem Fahrzeug zurechtzukommen
Ich finde mich leicht in fremden Fahrzeugen zurecht	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	Es fällt mir schwer, in einem fremden Fahrzeug zurechtzukommen
Ich fahre spritsparend	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	Der Benzinverbrauch beeinflusst meine Fahrweise nicht
Ich halte mich immer an die Verkehrsregeln	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	Ich fahre nach meiner eigenen Einschätzung
Lange Strecken (>500 km) fahre ich lieber mit dem Auto	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	Für lange Strecken (>500 km) nutze ich lieber Bahn oder Flugzeug
Ich fahre am liebsten auf kurvigen Bergstraßen	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	Fahren auf komfortablen Autobahnen macht mir am meisten Spaß
Fehler anderer Verkehrsteilnehmer sehe ich geduldig nach	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	Fehler anderer Verkehrsteilnehmer regen mich auf

### Teilnahmebedingungen

Der Veranstalter hat keine Versicherungen zugunsten der Teilnehmer abgeschlossen. Für entsprechenden Versicherungsschutz sorgt der Teilnehmer selbst (Kranken- bzw. Unfallversicherung). Er stellt den Veranstalter von jeglichen Schadensersatzansprüchen frei.

Die Platz- und Betriebsordnung ist einzuhalten.

\_\_\_\_\_, den \_\_\_\_\_  
Unterschrift

## B. Versuchsplan

### Durchgang 1

	<b>Passiv</b>	<b>FDL</b>
<b>F1</b>	X	
<b>F2</b>		X
<b>F3</b>		X
<b>F4</b>	X	
<b>F5</b>		X
<b>F6</b>	X	

### Durchgang 2

	<b>Passiv</b>	<b>FDL</b>	<b>FDL<sub>high</sub></b>
<b>F1</b>	X		
<b>F2</b>			X
<b>F3</b>			X
<b>F4</b>		X	
<b>F5</b>		X	
<b>F6</b>	X		
<b>F7</b>		X	
<b>F8</b>	X		
<b>F9</b>			X

### Durchgang 3

	<b>FDL</b>	<b>FDL<sub>high</sub></b>
<b>F1</b>	X	
<b>F2</b>		X
<b>F3</b>		X
<b>F4</b>	X	
<b>F5</b>	X	
<b>F6</b>		X

## C. Subjektivurteile der Probanden

### Frage 1

Stellen Sie sich vor, Sie schauen von oben auf das Fahrzeug.

**Wie beurteilen Sie den entstandenen Spurversatz?**

(Nur ein Feld ankreuzen!)

Fzg. außer Kontrolle	10
Spurversatz kritisch	9
	8
	7
	6
Spurversatz deutlich	5
	4
	3
Spurversatz gering	2
	1
kein Spurversatz	0

### Frage 2

Denken Sie an die von Ihnen ausgeführten Lenkbewegung um das Fahrzeug zu kontrollieren.

**Wie beurteilen Sie Ihre Lenkbewegung?**

(Nur ein Feld ankreuzen!)

panisch	10
hektisch	9
	8
	7
angemessen	6
	5
zögerlich	4
	3
	2
keine Reaktion	1
	0

**Frage 3**

Die Funktion war möglicherweise eingeschaltet.

**Wie haben Sie den möglichen Eingriff wahrgenommen?**

(Nur ein Feld ankreuzen!)

Eingriff gefährlich	10
Eingriff störend	9
	8
	7
Eingriff hilfreich	6
	5
	4
Eingriff spürbar	3
	2
	1
kein Eingriff	0

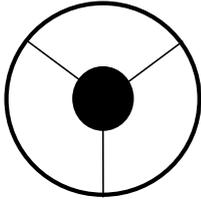
# D. Fragebogen des Beobachters

Fragebogen für Versuchsbegleiter

Fahrer:

Durchgang: 1 Versuch: 1

## Lenkradhaltung (bei Auslösung der Schleuderplatte)?



Bemerkung:

## Fahrerbeanspruchung?

Fahrer hat Aufgabe souverän gelöst		Fahrerreaktion durchschnittlich		Fahrer war bei der Aufgabe überfordert	
6	5	4	3	2	1

Bemerkung:

## Entstandener Spurversatz?

Spurversatz gering		Spurversatz unkritisch		Spurversatz gefährlich	
6	5	4	3	2	1

Bemerkung:

## Schleuderplattenauslösung?

Zu heftig		Ungefähr gleich		Zu schwach	
6	5	4	3	2	1

Bemerkungen:

Sonstige Bemerkungen:

# Literaturverzeichnis

- [1] *Übereinkommen über den Strassenverkehr*. BL17.1. Vereinte Nationen, 1968
- [2] *Passenger cars - Test track fo a severe lane-change manoeuvre*. BSi, BS ISO 3888-1:1999(E), 1999
- [3] *Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme*. Deutsches Institut für Normung e.V. und Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. : DIN EN 61508, 2001
- [4] *Road vehicles - Functional safety*. ISO/FDIS 26262, BL17.1, 2010
- [5] *Verkehrssicherheitsprogramm 2011*. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Straßenentwicklung, 2011
- [6] *Richtlinien und Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen*. RSA/ZTV-SA Handausgabe, 12. Auflage. Moravia-Verlag : Wiesbaden, 2012
- [7] ABENDROTH, B.: *Gestaltungspotentiale für ein PKW-Abstandsregelsystem unter Berücksichtigung unterschiedlicher Fahrertypen*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, Ergonomia Verlag : Stuttgart, 2001
- [8] ADAC: *Test Einpark-Assistenten*. ADAC Fahrzeugtechnik, [http://www.adac.de/\\_mmm/pdf/Test%20Einparkassistenten\\_83\\_KB\\_23681.pdf](http://www.adac.de/_mmm/pdf/Test%20Einparkassistenten_83_KB_23681.pdf), 2012
- [9] ADAC: *Warnsignale von Assistenzsystemen*. ADAC Fahrzeugtechnik, [http://www.adac.de/infotestrat/tests/assistenzsysteme/assistenzsysteme\\_2012/default.aspx?tabid=tab4](http://www.adac.de/infotestrat/tests/assistenzsysteme/assistenzsysteme_2012/default.aspx?tabid=tab4), 2012
- [10] AHRENS, D.: *Parkassistent mit automatisierter Längs- und Querregelung*, 8. Dortmunder Autotag, Dortmund, 2013
- [11] ANTONELLO, P. C. ; BOZZO, S. ; DAMIANI, S.: *Driver steering task support system to improve vehicle lateral control*, XXVI. FISITA Congress, S. 3431–3450, Prag, Tschechien, 1996
- [12] ARIÖZ, M. ; BAUMAN, G.: *Analyse des Energiebedarfs von Servolenkungen im realen Fahrbetrieb und Potenzialanalyse für Elektrische Servolenkungen*. Forschungsbericht FKFS Stuttgart, 2007
- [13] BARTHEL, R.: *Ergonomische Betrachtung von Lenkassistentenfunktionen zur Fahrerunterstützung in kritischen Fahrsituationen*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, Ergonomia Verlag : Stuttgart, 2003
- [14] BAUM, H. ; GRAWENHOFF, S. ; GEISSLER, T.: *Cost-Benefit-Analysis of the Electronic Stability Program (ESP)*. Institute for Transport Economics at the University of Cologne, 2007

- [15] BEIER, G.: *Kontrollüberzeugungen im Umgang mit Technik: Ein Persönlichkeitsmerkmal mit Relevanz für die Gestaltung technischer Systeme*, Humboldt-Universität zu Berlin, Dissertation, dissertation.de : Berlin, 2003
- [16] BOSSDORF-ZIMMER, J. ; KOLLMER, H. ; HENZE, R. ; KÜCÜKAY, F.: *Fingerprint des Fahrers zur Adaption von Fahrerassistenzsystemen*. Automobiltechnische Zeitschrift, Nr. 3, S. 226–231, Springer Fachmedien : Wiesbaden, 2011
- [17] BOYKE, T. ; RÖDER, O. ; SAGEFKA, M. ; WILK, T.: *Das ESP*. Automobiltechnische Zeitschrift, Nr. 2, S. 50–55, Springer Fachmedien : Wiesbaden, 2008
- [18] BRAND, W.: *Einsatz der aktiven Lenkung zur Seitenwindkompensation*, Rheinisch-Westfaelische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, fka : Aachen, 2008
- [19] BRAND, W. ; BRENNER, P.: *Seriennahe Funktionsentwicklung zur Optimierung des Lenkgefühls*, 21. Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik, Aachen, 2012
- [20] BREUER, B. ; BILL, K.: *Bremsenhandbuch: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Fahrdynamik*. Vieweg+Teubner Verlag : Braunschweig, 2012
- [21] BULD, S. ; KRÜGER, H.-P. ; HOFFMANN, S. ; TOTZKE, I.: *Die Fahrsimulation als Methode bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen*, VDI-Berichte Nr. 1745: Simulation und Simulatoren - Mobilität virtuell gestalten, S. 153–175, VDI Verlag : Düsseldorf, 2003
- [22] BURCKHARDT, M.: *Fahrwerktechnik: Radschlupf-Regelsysteme*. 1. Auflage. Vogel Buchverlag : Würzburg, 1993
- [23] BUSCHARDT, B.: *Synthetische Lenkmomente*, Technische Universität Berlin, Dissertation, VDI Verlag : Düsseldorf, 2003
- [24] CHRYSLER: *Chrysler Auto-Pilot Brochure*. The old car manual project, [http://www.oldcarbrosures.com/static/NA/Chrysler\\_and\\_Imperial/1958\\_Chrysler/1958\\_Chrysler\\_Auto-Pilot\\_Brochure/1958%20Chrysler%20Auto-Pilot%20Brochure-01.html](http://www.oldcarbrosures.com/static/NA/Chrysler_and_Imperial/1958_Chrysler/1958_Chrysler_Auto-Pilot_Brochure/1958%20Chrysler%20Auto-Pilot%20Brochure-01.html), 1980
- [25] COLE, D.: *Steering Feedback - Mathematical Simulation of Effects on Driver and Vehicle*. ATZautotechnology, Nr. 11, S. 2–6, Springer Fachmedien : Wiesbaden, 2008
- [26] DEML, B. ; FREYER, J. ; FÄRBER, B.: *Ein Beitrag zur Prädiktion des Fahrstils*, VDI-Berichte Nr. 2015: Fahrer im 21. Jahrhundert, S. 327–339, VDI Verlag : Düsseldorf, 2007
- [27] DIETSCHKE, K.-H. ; REIF, K. ; ROBERT BOSCH GMBH (Hrsg.): *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*. 27. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag : Wiesbaden, 2011
- [28] DONGES, E.: *A Two-Level Model of Driver Steering Behavior*. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, Nr. 20, S. 691–707, Santa Monica, 1978
- [29] DONGES, E.: *Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen*. Automobil-Industrie, Nr. 2, S. 183–190, Vogel Business Media : Würzburg,

- [30] EBERSBACH, D.: *Entwurfstechnische Grundlagen für ein Fahrerassistenzsystem zur Unterstützung des Fahrers bei der Wahl seiner Geschwindigkeit*, Technische Universität Dresden, Dissertation, 2006
- [31] EBERSBACH, D. ; DIETZE, M. ; LIPPOLD, C. ; MAYSER, C.: *Fahrerassistenzsysteme zur Unterstützung der Längsregelung im ungebundenen Verkehr*, Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, München, 2004
- [32] EHMANN, D.: *Modellierung des taktischen Fahrerverhaltens bei Spurwechselvorgängen*, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, fka : Aachen, 2005
- [33] FAULHABER, A.: *Wirksamkeit und Akzeptanz des Fahrdynamikregelsystems Electronic Stability Program (ESP) beim Einsatz durch Normalfahrer*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, Ergonomia Verlag : Stuttgart, 2003
- [34] FECHER, N.: *Analyse des stationären Folgeverhaltens von PKW Fahrzeugführern unter Berücksichtigung von Nässe und einhergehender Sichtbehinderung*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, VDI Verlag : Düsseldorf, 2005
- [35] FERARIC, J. P.: *Echtzeitfähige Modellierung des individuellen Fahrerverhaltens zur Realisierung adaptiver Unterstützungsfunktionen in einem Monitor- und Warnsystem*, Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 1996
- [36] FILZEK, B.: *Abstandsverhalten auf Autobahnen - Fahrer und ACC im Vergleich*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, VDI Verlag : Düsseldorf, 2002
- [37] GAEDKE, A. ; GREUL, R. ; KREIS, C. ; STRECKER, J.: *Potential of mechatronic steering for lateral guidance of vehicles*, Steering.Tech, TÜV Süd, Garching, 2008
- [38] GAYKO, J.: *Evaluierung eines Spurhalteassistenten für das Honda Intelligent Drive Support System*. In: Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung, Springer Verlag : Heidelberg, 2005
- [39] GOLDSTEIN, B.: *Wahrnehmungspsychologie: Der Grundkurs*. 7. Auflage. Spektrum Verlag : Berlin, 2007
- [40] GOLENHOFEN, Klaus: *Basislehrbuch Physiologie*. 4. Auflage. Urban Fischer Verlag : München, 2007
- [41] GRASSMANN, O. ; HENRICHFREISE, H. ; NIESSEN, H. ; HAMMEL, K. v.: *Variable Lenkunterstützung für eine elektromechanische Servolenkung*, 23. Tagung Elektronik im Kfz, Haus der Technik, Stuttgart, 2003
- [42] GREUL, R.: *Potential of Mechatronic Steering in System Interconnection*, CTI Liaison au sol et dynamique véhicule, Paris, 2006
- [43] GRÜNER, S. ; GAEDKE, A.: *Control of electric power steering systems: state of the art and future concepts*, 2. internationales Münchener Fahrwerk-Symposium: chassis.tech plus, München, 2011

- [44] GRÜNER, S. ; GAEDKE, A. ; KARCH, G.: *Control of Electric Power Steering Systems - from State of Art to Future Challenges*, 17th IFAC World Congress, Seoul, Korea, 2008
- [45] GUNIA, D. ; PLAUMERT, R. ; TATSCHKE, T.: *Der Spurhalteassistent von Ford - Vom Konzept bis zur Verifikation*, 19. Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentchnik, Aachen, 2010
- [46] HAUB, M. ; MATHES, J.: *Fahrerassistenz der Zukunft: Fahren oder gefahren werden?* Automobiltechnische Zeitschrift, Nr. 3, S. 72–77, Springer Fachmedien : Wiesbaden, 2011
- [47] HAUCK, S.: *Steering input assistance - A supplementary function of the electronic stabilization program of Volkswagen*, 4th International CTi Forum Steering Systems, Düsseldorf, 2008
- [48] HEISSING, B. ; ERSOY, M. ; GIES, S.: *Fahrwerkhandbuch*. 3. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag : Wiesbaden, 2011
- [49] HEINRICH, T. ; ORTLEPP, J. ; SCHMIELE, J. ; VOSS, H.: *Infrastrukturgestützte Fahrerassistenz*. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V., Forschungsbericht VI 02. 2011
- [50] HENRICHFREISE, H. ; JUSSEIT, J. ; NIESSEN, H.: *Optimale Regelung einer elektromechanischen Servolenkung*, VDI-Berichte Nr.1971: Mechatronik, S. 381–400, VDI Verlag : Düsseldorf, 2003
- [51] HOFMAIER, A.: *Propriozeptionsmessungen am Kniegelenk unter kritischer Betrachtung wissenschaftlicher, methodischer und messtechnischer Gesichtspunkte*, Universität Münster, Dissertation, 2005
- [52] HOULT, W.: *A neuromuscular model for simulating driver steering torque*, University of Cambridge, Dissertation, 2008
- [53] HSU, H. ; HARRER, M. ; GAEDKE, A. ; GRÜNER, S.: *Die neue Lenkung im Porsche 911 - Optimale Auslegung einer E-Lenkung für Sportwagen*, 21. Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentchnik, Aachen, 2012
- [54] ISERMANN, R.: *Fahrdynamik-Regelung*. Vieweg Verlag : Wiesbaden, 2006
- [55] ISHIDA, S. ; GAYKO, J.E.: *Development, evaluation and introduction of a lane keeping assistance system*, Intelligent Vehicles Symposium, 2004 IEEE, S. 943–944, Parma, Italy, 2004
- [56] JANG, J.-S. R.: *ANFIS Adaptive Network Based Fuzzy Inference System*, IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics 23, S. 665–685, 1993
- [57] KARCH, G. ; GRÜNER, S.: *Mechatronische Lenksysteme (Mechatronic Steering Systems)*. Automatisierungstechnik, Nr. 55, S. 281–289, De Gruyter Verlag : Berlin, 2007

- [58] KASSNER, A.: *Verbesserung der Wirkung und Akzeptanz von Fahrerassistenzsystemen durch Berücksichtigung der Anforderungen an den Fahrer*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2011
- [59] KAUSNER, Y. ; KENNTNER-MABIALA, R.: *Fahrerassistenz und demografischer Wandel*, 7. Dortmunder AutoTag, Dortmund, 2012
- [60] KÖCKLER, N. ; SCHWARZ, H.: *Numerische Mathematik*. 9. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag : Wiesbaden, 2011
- [61] KELLER, M. ; HASS, C. ; SEEWALD, A. ; BERTRAM, T.: *Ein Regelungskonzept für eine Notausweichassistenz*, VDI-Berichte Nr. 2196: Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren, S. 365–372, VDI Verlag : Düsseldorf, 2013
- [62] KNOOP, M. ; FLEHMIG, F. ; HAULER, F.: *Improvement of Vehicle Dynamics by Networking of ESP® with Active Steering and Torque Vectoring*, 8th Stuttgart International Symposium, Stuttgart, 2008
- [63] KRAISS, K.-F.: *Benutzergerechte Automatisierung - Grundlagen und Realisierungskonzepte*. at - Automatisierungstechnik, 46, S. 457–467, De Gruyter Verlag : Berlin, 1998
- [64] KUHL, R. ; SAURE, M.: *Steuergeräte und Sensoren für EPS*. Automobil Elektronik, Nr. 4, S. 34–39, Hüthing Verlag : Heidelberg, 2013
- [65] LAMBERT, G. ; KIRCHNER, A. ; HUEGER, P.: *Parkassistenzsysteme. Technologien von heute und morgen*, 24. VDI/VW-Gemeinschaftstagung Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme, Wolfsburg, 2008
- [66] LANDAU, K. ; WINNER, H.: *Fahrversuche mit Probanden - Nutzwert und Risiko*, VDI-Berichte Nr. 557: Verkehrstechnik / Fahrzeugtechnik, S. 297–318, VDI Verlag : Düsseldorf, 2003
- [67] LANGE, A.: *Physikalische Medizin*. 1. Auflage. Springer Verlag : Berlin, 2002
- [68] LEE, W. ; UHLER, W. ; BERTRAM, T.: *Analyse des Parkverhaltens und Auslegung eines semiautomen Parkassistenzsystems*, 21. Internationale VDI/VW-Gemeinschaftstagung Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme, S. 99–112, Wolfsburg, 2004
- [69] LEE, W. C.: *Beiträge zur Entwicklung eines Fahrerassistenz-Systems für Einparkvorgänge*, Technische Universität Ilmenau, Dissertation, Shaker-Verlag : Aachen, 2006
- [70] MAMMAR, S. ; GLASER, S. ; NETTO, M.: *Time to line crossing for lane departure avoidance: a theoretical study and an experimental setting*, IEEE Intelligent Transportation Systems, S. 226–241, 2006
- [71] MAURER, M. ; STILLER, S.: *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Springer Verlag : Berlin, 2005

- [72] MAYR, R.: *Regelungsstrategien für die automatische Fahrzeugführung*, Springer Verlag : Berlin, 2001
- [73] MEHRJERDIAN, E.: *Potenziale einer geregelten Lenkmomentenempfehlung*, 5. Dortmunder Autotag, Dortmund, 2010
- [74] MEHRJERDIAN, E. ; GAEDKE, A. ; GREUL, R.: *Potenzial der Lenkmomentengestaltung für die Realisierung von Assistenzfunktionen*, 3. Dortmunder Autotag, Dortmund, 2008
- [75] MEHRJERDIAN, E. ; GAEDKE, A. ; GREUL, R.: *Potenzial der Mechatronischen Lenkung zur Querführung von Kraftfahrzeugen*, 4th International CTi Forum Steering Systems, Düsseldorf, 2008
- [76] MEHRJERDIAN, E. ; GAEDKE, A. ; GREUL, R.: *Erfassung des Fahrertyps für die nutzerorientierte Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen*, 4. Dortmunder Autotag, Dortmund, 2009
- [77] MEHRJERDIAN, E. ; GAEDKE, A. ; GREUL, R.: *Verfahren und Vorrichtung zum Erkennen eines Ermüdungszustands des Fahrers eines Fahrzeugs*. Schutzrecht DE 10 2009 047 323, 2009
- [78] MEHRJERDIAN, E. ; GAEDKE, A. ; GREUL, R. ; BERTRAM, T.: *Beurteilung unterschiedlicher Fahrertypen unter besonderer Berücksichtigung des Querdynamikverhaltens*, VDI Tagung - Der Fahrer im 21. Jahrhundert, Braunschweig, 2009
- [79] MEHRJERDIAN, E. ; GAEDKE, A. ; GREUL, R. ; BERTRAM, T.: *Efficiency of Steering Torque Recommendation in Limits of Driving Dynamics: An Empirical Study*, IFAC International Symposium Advances in Automotive Control, München, 2010
- [80] MEHRJERDIAN, E. ; GAEDKE, A. ; GREUL, R. ; BERTRAM, T.: *Lenkmomentenempfehlung unter fahrdynamischen Gesichtspunkten*. mechatronik mobil, Nr. 1, Expert Verlag : Renningen, 2012
- [81] MEHRJERDIAN, E. ; GAEDKE, A. ; SPRINZL, M. ; BERTRAM, T.: *Superposition of Steering Torque to Support the Driver in critical Situation*, 1. internationales Münchener Fahrwerk-Symposium chassis.tech plus, München, 2010
- [82] MEHRJERDIAN, E. ; GREUL, R.: *Verfahren zur Fahreridentifikation*. Schutzrecht DE 10 2009 026 833, 2009
- [83] MEHRJERDIAN, E. ; GREUL, R.: *Verfahren zur Fahreridentifikation in einem Fahrzeug*. Schutzrecht DE 10 2009 026 950, 2009
- [84] MEHRJERDIAN, E. ; GREUL, R. ; KANNGIESSER, S.: *Verfahren zur Lenkungsregelung in Übungsfahrzeugen*. Schutzrecht DE 10 2010 003 210, 2010
- [85] MEHRJERDIAN, E. ; GREUL, R. ; KREIS, C.: *Verfahren und Vorrichtung zum Erkennen eines Bedienzustands eines Lenkrads in einem Fahrzeug*. Schutzrecht DE 10 2011 002 401, 2011

- [86] MEHRJERDIAN, E. ; REIMANN, G. ; BÜRING, H.: *Potenziale der Aktivenkung für einen komfortablen Geradeauslauf*, VDI-Berichte Nr. 2135: Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren, S. 591–604, VDI Verlag : Düsseldorf, 2011
- [87] MEHRJERDIAN, E. ; REIMANN, G. ; BÜRING, H.: *Spurführungsassistenzenverfahren für ein Kraftfahrzeug*. Schutzrecht DE 10 2011 086 897, 2011
- [88] MITSCHKE, M ; NIEMANN, K.: *Regelkreis Fahrer - Fahrzeug bei Störung durch schiefziehende Bremsen*. Automobiltechnische Zeitschrift, Nr. 3, S. 67–72, Springer Fachmedien : Wiesbaden, 1974
- [89] MITSCHKE, M. ; WALLENTOWITZ, H.: *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. 4. Auflage. Springer Verlag : Heidelberg, 2004
- [90] NEUKUM, A. ; KRÜGER, H.-P.: *Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungsmethoden und Bewertungskriterien*, VDI-Bericht Nr. 1791: Reifen - Fahrwerk - Fahrbahn, Düsseldorf, 2003
- [91] NEUKUM, A. ; LEONHARDT, A. ; LÜBBEKE, T. ; UFER, E. ; KRÜGER, H.-P. ; ENGELS, F. ; JAGT, P. van d.: *Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei fehlerhaften Eingriffen eines EPS-Lenksystems*, VDI-Berichte Nr. 2085: Der Fahrer im 21. Jahrhundert, Braunschweig, 2009
- [92] NEUKUM, A. ; MEHRJERDIAN, E. ; GREUL, R. ; GAEDKE, A.: *Einflussfaktor Fahrzeug - Zur Übertragbarkeit von Aussagen über die Wirkung von Zusatzlenkmomenten*, VDI-Bericht Nr. 2104: Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit, Düsseldorf, 2010
- [93] NEUKUM, A. ; PAULIG, J. ; KRÜGER, H.-P. ; FRÖMMIG, L. ; HENZE, R. ; KÜCÜKAY, F.: *Untersuchung zur Wahrnehmung von Lenkmomenten bei Pkw*, Projekt im Auftrag der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. und der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), 2009
- [94] NEUKUM, A. ; UFER, Paulig J. E. ; KRÜGER, H.-P.: *Controllability of superposition steering system failures*, steering.tech, TÜV Süd, München, 2008
- [95] NUTSCH, T. ; BRAUN, A.: *Sicherheits- und Komfortgewinn durch Hybridlenkungen*, VDI-Bericht Nr. 1986: Nutzfahrzeuge, S. 133–148, VDI Verlag : Düsseldorf, 2007
- [96] PFEFFER, P. ; HARRER, M.: *Lenkungsbandbuch*. 1. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag : Wiesbaden, 2011
- [97] POESTGENS, U.: *Servolenksysteme für Pkw und Nutzfahrzeuge*. 2. Auflage. Süddeutscher Verlag : München, 2012
- [98] RAU, M.: *Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik mittels Verspannungslenkung*, Universität Stuttgart, Dissertation, 2007
- [99] REIF, K.: *Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme*. 1. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag : Wiesbaden, 2010

- [100] REINELT, W. ; KLIER, W. ; REIMANN, G.: *Active Front Steering (Part 2) - Safety and Functionality*, SAE technical paper 2004-01-1101, S. 591–604, Detroit, USA, 2004
- [101] REINISCH, P. ; ZAHN, P. ; SCHRAMM, D.: *Using a Reaction Time Model for Determining a Collision Avoidance System's Brake Timing*, 6th IFAC Symposium Advances in Automotive Control, S. 477–482, München, 2010
- [102] ROBERT BOSCH GMBH: *Trend of driving accidents in Germany*. Unfallforschung RB - CR/AEV1, 2011
- [103] SCHERMANN, E. ; HAEUSSLER, T. ; KIEREN, M. ; WILLY, K.: *Integrated safety-oriented development and verification of stability-oriented steering functions combined with ESP*, steering.tech, TÜV Süd, München, 2008
- [104] SCHIMMELPFENNIG, K.-H. ; HEBING, N.: *Geschwindigkeiten bei kreisförmiger Kurvenfahrt/Stabilitäts- und Sicherheitsgrenze*. Der Verkehrsunfall, Nr. 20, S. 97–99, 1982
- [105] SCHMIDT, G.: *Wann spürt der Fahrer überhaupt?*, VDI-Berichte Nr. 2015: Fahrer im 21. Jahrhundert, S. 15–27, VDI Verlag : Düsseldorf, 2007
- [106] SCHMIDT, G.: *Haptische Signale in der Lenkung: Controllability zusätzlicher Lenkmomente*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2009
- [107] SCHMIDT, G. ; SCHOLZ, S. ; NEUKUM, A. ; KRÜGER, H.-P.: *Fahrer-Fahrzeug-Wechselwirkungen bei Fahrmanövern mit Querdynamikbeanspruchungen und zusätzlichen Vertikaldynamikstörungen*. FAT-Schriftenreihe Band 208, VDA : Berlin, 2006
- [108] SCHORN, M.: *Ausweichen eines Personenwagens - Quer- und Längsregelung zur Unfallvermeidung*. Automobiltechnische Zeitschrift, Nr. 9, S. 690–699, Springer Fachmedien : Wiesbaden, 2009
- [109] SCHULZ, A. ; FRÖMING, R.: *Analyse des Fahrerverhaltens zur Darstellung adaptiver Eingriffsstrategien von Assistenzsystemen*. Automobiltechnische Zeitschrift, Nr. 12, S. 1124–1131, Springer Fachmedien : Wiesbaden, 2008
- [110] SCHULZ, A. ; FRÖMING, R. ; SCHINDLER, V.: *Darstellung fahreradaptiver Warn- und Bremsassistentenstrategien durch Online-Analyse des Fahrerverhaltens*, VDI-Berichte Nr. 2015: Der Fahrer im 21. Jahrhundert, S. 271–278, VDI Verlag, 2007
- [111] SCHUMANN, J.: *On the use of discrete proprioceptive-tactile warning signals during manual control*, Universität Münster, Dissertation, Waxmann Verlag : Münster, 1994
- [112] SCHUMANN, J. ; GODTHELP, J. ; HOECKSTRA, W.: *An exploratory simulator study on the use of active control devices in car driving*, IZF Report, Soesterberg, Netherlands, 1992
- [113] SCHWAB, J.: *Entwicklung und Erprobung eines Assistenzsystems zur Unterstützung des Fahrers bei der Durchführung von Ausweichmanövern*, Hochschule Esslingen,

Diplomarbeit, 2009

- [114] SCHWARZ, J.: *Response 3 - Code of Practice for Development, Validation and Market Introduction of Advanced Driver Assistance Systems*, VDI-Berichte Nr. 1960: Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme, S. 465–472, VDI Verlag, 2006
- [115] SCHWARZ, R. ; ULLMANN, S.: *Fahrzeugabstimmung - Eine Frage des Charakters*. Automobiltechnische Zeitschrift, Nr. 1, S. 94–99, Springer Fachmedien : Wiesbaden, 2011
- [116] SONDERMANN-WÖLKE, C. ; SATTEL, T. ; BÖHM, M. ; BRANDT, T.: *Untersuchungen zur fahrerindividuellen Lenkmomentenrückkopplung für ein Assistenzsystem zur Spurhaltung und Kollisionsvermeidung*, 9. Symposium Automatisierungs-, Assistenzsysteme für Transportmittel, S. 13–25, Braunschweig, 2008
- [117] STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.): *Unfälle von Frauen und Männern im Straßenverkehr*. Statistisches Bundesamt : Wiesbaden, 2012
- [118] STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.): *Verkehrsunfälle 2012*. Fachserie 8 Reihe 7. Statistisches Bundesamt : Wiesbaden, 2012
- [119] STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.): *Verkehr aktuell*. Fachserie 8 Reihe 1.1. Statistisches Bundesamt : Wiesbaden, 2014
- [120] TREFFLICH, B.: *Videogestützte Überwachung der Fahreraufmerksamkeit und Adaption von Fahrerassistenzsystemen*, Technische Universität Ilmenau, Dissertation, Cavillier-Verlag : Göttingen, 2010
- [121] VÄHNING, A. ; GAEDKE, A. ; HEGER, M. ; REUSS, H.-C.: *Analyse des Leistungs- und Energiebedarfs hydraulischer und elektromechanischer Lenksysteme*, 9. Internationales Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentchnik, Stuttgart, 2009
- [122] VIETINGHOFF, A.: *Nichtlineare Regelung von Kraftfahrzeugen in querdynamisch kritischen Fahrsituationen*, Universität Karlsruhe, Dissertation, Universitätsverlag : Karlsruhe, 2008
- [123] VOGEL, P.: *Kursbuch Klinische Neurophysiologie: EMG - ENG - Evozierte Potentiale*. 3. Auflage. Thieme Verlag : Stuttgart, 2011
- [124] WAGNER, A.: *Ein Verfahren zur Vorhersage und Bewertung der Fahrerreaktion bei Seitenwind*, Universität Stuttgart, Dissertation, Expert Verlag : Renningen, 2003
- [125] WILLE, M. ; SAUST, F. ; MAURER, M. ; NOTHDURFT, T. ; HECKER, P.: *Projekthaus Stadtpilot: Autonomes Fahren auf dem Braunschweiger Stadtring*, 19. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik, S. 829–845, Aachen, 2010
- [126] WINNER, N. ; HAKULI, S. ; WOLF, G.: *Handbuch der Fahrerassistenzsysteme*. 2. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag : Wiesbaden, 2012
- [127] WOLF, H. ; ZÖLLNER, R. ; BUBB, H.: *Ergonomischer Lösungsansatz für die gleichzeitige Rückmeldung von Fahrerassistenzsystemen*, 2. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, München, 2006

- [128] ZADEH, L. A.: *Fuzzy sets*. Information and Control, Nr. 8, S. 338–353, 1965
- [129] ZANTEN, A. van: *Fahrdynamikregelung*, Schulungsunterlagen Robert Bosch : Stuttgart, 2006