

Universität der Bundeswehr München
Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik
Institut für Arbeitswissenschaft

Aktive Wankbewegungen zur Informationsübertragung an den Fahrer in Fahrerassistenzsystemen der Fahrzeugquerführung

Christoph Müller

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik der Universität
der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr. Matthias Gerds
1. Gutachter: Prof. Dr. Berthold Färber
2. Gutachter: Prof. Dr. Klaus Bengler

Diese Dissertation wurde am 08.11.2018 bei der Universität der Bundeswehr München
eingereicht und durch die Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik am 11.05.2019
angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 04.06.2019 statt.

Vorwort

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit in der Abteilung Entwicklung Fahrerassistenzsysteme der AUDI AG in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Arbeitswissenschaft der Universität der Bundeswehr München.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Professor Dr. Berthold Färber für sein Vertrauen, Verständnis und die wohl dosierten Impulse zur richtigen Zeit. Bei Professor Dr. Klaus Bengler bedanke ich mich für die Übernahme des Korreferats, bei Professor Dr. Matthias Gerdts für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission.

Großer Dank gilt Dr.-Ing. Siedersberger von der AUDI AG für die fachliche Betreuung und Motivation durch die Höhen und Tiefen der Arbeit während und nach meiner Zeit im Projekthaus Fahrerassistenzsysteme. Seinem unermüdlichen Einsatz für das Projekthaus ist es zu verdanken, dass es ausreichend Freiraum gab, um Forschungsgeist und kollegiales Miteinander zu leben. Mein Dank gilt dem Werkstattteam sowie Hr. Bültjes und Hr. Demiral für die Unterstützung im Fahrzeug auch während mancher Nacht- und Wochenendschicht. Herzlichen Dank geht an die betreuten Studenten, welche wertvolle Beiträge geliefert haben. Bedanken möchte ich mich bei dem Team des Instituts für Arbeitswissenschaften der Universität der Bundeswehr München für ihre Beiträge zur Arbeit und die Unterstützung bei der Durchführung der Probandenstudien. Hervorzuheben sind Professor Dr. Popp, Professor Dr.-Ing. Nitsch, Hr. Schneider und insbesondere Dr. Sieber, welcher mit fachlichem Rat allzeit zur Seite stand.

Nicht zuletzt schaffte die Flexibilität und die Unterstützung meiner (Schwieger)-Familie den notwendigen Handlungsspielraum, um die Arbeit fertigzustellen. Danke.

Wien, Oktober 2018

Kurzfassung

Eine Verbesserung der Informationsübertragung von Fahrerassistenzsystemen (FAS) zum Fahrer sowie der gegenwärtige Bedarf eines Konzepts zur Rückmeldung vom Lenkrad entkoppelter FAS-Eingriffe motivieren zur vorliegenden Arbeit. Untersucht wird, ob FAS der Fahrzeugquerführung durch gezielt eingebrachte Wankbewegungen Informationen an den Fahrer übertragen können. Anhand exemplarischer FAS wird die Eignung zur Rückmeldung entkoppelter FAS-Eingriffe, das Potential für informierende und warnende FAS sowie die technische Umsetzbarkeit in Serienfahrzeugen evaluiert.

Die Rückmeldung entkoppelter FAS-Eingriffe wird anhand eines aktiven Fahrstreifenhalteassistenten und einer aktiven Fahrstreifenwechselunterstützung untersucht. Es werden zwei neuartige Varianten dieser FAS konzipiert. Eine Variante legt den Schwerpunkt auf die Optimierung der Querführung durch Fahrer und FAS, bei der anderen stehen die Interessen der Mitfahrer im Vordergrund. Das Potential für informierende und warnende FAS wird mithilfe von Navigationshinweisen, einer Ausweichempfehlung und einer Fahrstreifenverlassenswarnung beurteilt.

Die Umsetzbarkeit in Serienfahrzeugen wird durch die Entwicklung seriennaher Implementierungskonzepte eingeschätzt. Zur Querführung werden eine Bahnplanung, ein Bahnfolge- und Lenkwinkelregler sowie eine kombinierte Ansteuerung von Servolenkung, Überlagerungslenkung und Wankregelung entworfen. Erstmals wird das Rollsteuern gezielt genutzt, um entkoppelte FAS-Eingriffe einzubringen. Ein neuartiger Algorithmus schlüsselt den Lenkmomentenverlauf nach Verursacher (Fahrer/FAS) auf, was zur Detektion von Übernahmesituationen dienen kann. Die entworfene Wankregelung erzielt mit der serienmäßigen Achskinematik durch geeignete Radlastverteilung ein Fahrverhalten ähnlich dem von Serienfahrzeugen. Die Implementierungen zeigen, dass zentrale Herausforderungen bereits mit serienmäßiger Sensorik und Aktorik lösbar sind. Zudem verdeutlichen sie, dass nicht zwangsläufig Änderungen an der Achskinematik oder ein entkoppelter Lenkaktor erforderlich sind, was den Umsetzungsaufwand erheblich senkt. Technisch scheint das Konzept somit bereits in heutigen Serienfahrzeugen realisierbar.

Durch Probandenstudien wird belegt, dass das Konzept zur Rückmeldung entkoppelter FAS-Eingriffe geeignet ist. Es ist intuitiv verständlich und verursacht keine unerwünschten Fahrerreaktionen. Somit werden erstmals auch große, lang andauernde entkoppelte Eingriffe nutzbar und deren Vorteile, wie etwa die Assistenz bei fehlerhafter Lenkeingabe erschlossen. Die Querführung ist bei besserer Leistung des Fahrer-Fahrzeug-Gesamtsystems weniger beanspruchend und bevormundend als bei Assistenz mittels additivem Lenkmoment. Sie wird von Fahrer und Passagier im Fond positiv erlebt. Im Gegensatz zu bekannten Neigetechniksystemen wird es bereits auf der Automatisierungsstufe *Fahrerassistenzsystem* möglich, Vorteile für die *Mitfahrer* zu erzielen. In den informierenden und warnenden FAS hingegen ist die Rückmeldung intuitiv wenig verständlich, aber schnell erlernbar. Somit ist der Nutzen für warnende FAS gering, für informierende FAS jedoch gegeben.

Abstract

This contribution introduces further improvements to driver feedback in Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) and outlines a new feedback concept for decoupled ADAS steering interventions. Examined is whether ADAS of the *lateral* vehicle guidance can convey information to the driver via targeted active chassis roll motions. This central idea is applied to exemplary ADAS functions and based on these functions, the ability to feedback decoupled steering interventions, the capability for driver information and warning systems and the technical feasibility for implementation in production cars are evaluated.

The ability to feedback decoupled steering interventions is investigated with the aid of a Lane Keeping Assistance System and a Triggered Lane Change Assistance System. Two novel designs of these functions are conceptualised. One of them focuses on the lateral vehicle guidance shared between ADAS and driver, the other one focuses on the car passengers. The capability for driver information and warning systems is assessed via Navigation Instructions, an Automatic Emergency Steering Intervention System and a Lane Departure Warning System.

The technical feasibility for production cars is appraised through the development of close-to-production implementation concepts. For the assistance of lateral vehicle guidance, a path planning module and a control concept are designed which drives a combination of Electric Power Steering, Superimposed Steering System and Chassis Roll Control. As a new approach targeted roll steer is used to realise decoupled ADAS steering interventions. A novel algorithm apportions the steering wheel moment to its causative agent (ADAS/driver) which can be deployed to detect a driver's takeover intention. The Chassis Roll Control approach devised achieves with the standard axle kinematics a vehicle handling close to production cars by using an adapted wheel-load distribution. The implementations point out that crucial challenges can be met with sensors and actuators already available in production cars. Additionally, it is expounded that modifications of the axle kinematics and the requirement of a decoupled steering actuator are not inevitable, which reduces the realisation effort considerably. Hence, the concept already seems to be technically feasible in today's production cars.

On the basis of two studies conducted, the ability to feedback decoupled ADAS steering interventions is confirmed. The concept is intuitive and no unwanted driver reactions are caused. For the first time large continuous decoupled ADAS steering interventions become utilisable and their benefits, e. g. assistance during incorrect driver steering input, are enabled. The lateral vehicle guidance features better performance of the driver-car-system along with reduced driver stress and paternalism compared to assistance via additive steering moment. Moreover, it is positively rated by the driver and by the passengers in the rear. In contrast to existing tilting cars, advantages for *passengers* can already be realised on driving automation's level *Driver Assistance*. In driver information and warning systems though the feedback is less intuitive but swiftly learnable. Thus, the concept is less useful for warning systems, but is more applicable for information systems.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung	3
2	Grundlagen	5
2.1	Koordinatensysteme und Bewegungsgrößen	5
2.2	Fahrzeugquerführung durch den Fahrer	5
2.2.1	Menschliche Informationsverarbeitung	6
2.2.2	Der Fahrer als Regler	8
2.2.3	Fahrkomfort und Fahrspaß	10
2.3	Fahrerassistenzsysteme der Fahrzeugquerführung	14
2.3.1	Kategorisierung	14
2.3.2	Informationsübertragung an den Fahrer	16
2.3.3	Eingriffskonzepte - Charakteristika und offenes Potential	19
2.4	Fahrzeugaufbaubewegung von Personenkraftwagen	22
2.4.1	Wankbewegungen aus etablierter Sichtweise	23
2.4.2	Paradigmenwechsel: Aktive Neigetechnik	25
3	Aktive Wankbewegungen zur Informationsübertragung an den Fahrer	29
3.1	Eignung als Anzeige	29
3.1.1	Anforderungen und Erfüllungsgrad	30
3.1.2	Vergleich mit alternativen Konzepten	33
3.2	Technische Aspekte und Herausforderungen	34
3.2.1	Aktorik	34
3.2.2	Achskinematik	35
3.3	Potential für Fahrerassistenzsysteme	35
4	Anwendung auf Fahrerassistenzsysteme der Fahrzeugquerführung	37
4.1	Informierende und warnende Funktionen	37
4.1.1	Navigation Instruction	38

4.1.2	Front Collision Avoidance	38
4.1.3	Lane Departure Warning	39
4.1.4	Festlegung der Wankbewegung	39
4.2	Kontinuierlich automatisierende Funktionen	40
4.2.1	Wankbewegung zur Rückmeldung entkoppelter Eingriffe	41
4.2.2	Lane Keeping Assistant / triggered Lane Change Assistant mit <i>variabler</i> Aufgabenübernahme	44
4.2.3	Lane Keeping Assistant / triggered Lane Change Assistant mit <i>alternativer</i> Aufgabenübernahme	51
4.3	Zusammenfassung	55
5	Implementierungskonzepte und Realisierung im Versuchsträger	57
5.1	Aufbau des Versuchsträgers	58
5.1.1	Sensorik	58
5.1.2	Aktorik	59
5.2	Regelungskonzept zur Querführung	63
5.2.1	Querregler	63
5.2.2	Lenkwinkelregler	64
5.2.3	Rollsteuern als entkoppelter Querführungsaktor	69
5.3	Regelstrategie zum aktiven Wanken	74
5.3.1	Regelung (Komfortbereich)	74
5.3.2	Steuerung (Hohe Querdynamik)	79
5.3.3	Bewertung des Kurven- und Übergangsverhaltens	81
5.3.4	Zusammenfassung	85
5.4	Implementierung der Assistenzsysteme	86
5.4.1	Navigation Instruction, Lane Departure Warning, Front Collision Avoidance	86
5.4.2	Lane Keeping Assistant, triggered Lane Change Assistant	88
5.5	Algorithmus zur Aufschlüsselung des Lenkmoments nach Einfluss von Fahrer und Fahrerassistenzsystem	95
5.6	Zusammenfassung	98
6	Probandenstudien	101
6.1	Studie 1	102
6.1.1	Lane Keeping Assistant mit <i>variabler</i> Aufgabenübernahme	103
6.1.2	triggered Lane Change Assistant mit <i>variabler</i> Aufgabenübernahme	115
6.1.3	Navigation Instruction	120
6.1.4	Front Collision Avoidance	125

6.2	Studie 2	128
6.2.1	Lane Keeping Assistant / triggered Lane Change Assistant mit <i>alternativer</i> Aufgabenübernahme	129
6.2.2	Lane Departure Warning	136
7	Zusammenfassung und Ausblick	143
A	Ergänzungen zum Querregler	151
B	Fragebögen der Probandenstudien	155
B.1	Studie 1	155
B.2	Studie 2	172
C	Detaillierte Ergebnisse der Probandenstudien	183
C.1	Studie 1	183
C.2	Studie 2	188
	Abbildungsverzeichnis	191
	Tabellenverzeichnis	195
	Abkürzungsverzeichnis	197
	Symbolverzeichnis	199
	Literaturverzeichnis	203

1. Einleitung

"Autofahrer ab 2018 überflüssig"

Spiegel Online, 7. Januar 2008 [147]

1.1 Motivation

Mit dieser Schlagzeile kommentierte der Spiegel die *Keynote Speech* des General Motors Chefs auf der *Consumer Electronics Show* im Jahr 2008 in Las Vegas sowie die Pläne seines stellvertretenden Entwicklungschefs zur Fahrzeugautomatisierung [104].

Die Formulierung zeigt die großen Ambitionen der Automobilindustrie, jedoch auch die bis heute bestehende zeitliche Unsicherheit in deren Realisierung. "Optimisten gehen von 2025 aus, andere halten den Beginn erster Testphasen von frühestens 2030 an für realistisch" [79, S. 1]. Zwar ist noch kein Kraftfahrzeug zu erwerben, welches fahrerlos am öffentlichen Straßenverkehr teilnimmt, jedoch hat die Fahrzeugautomatisierung zunehmend an Bedeutung gewonnen. Zusammen mit der Fahrzeugvernetzung und Elektrifizierung gilt sie heute als einer der "game changer" [61, S. 2], welche einen Strukturwandel in der Automobilindustrie ausgelöst haben [61].

Die neuen Entwicklungsschwerpunkte locken Unternehmen aus der Digitalbranche auf den Markt, welche auch bei der Fahrzeugautomatisierung neue Wege einschlagen. Während viele etablierte Hersteller einen *evolutionären* Ansatz wählen, der durch möglichst flächendeckende Systemverfügbarkeit und eine schrittweise Erhöhung der Automatisierungsstufe gekennzeichnet ist [205], gehen neue Mitbewerber wie etwa *Waymo* (früher: *Google*) oft den *revolutionären* Weg [205]. In diesem wird eine sehr hohe Automatisierungsstufe, zum Beispiel fahrerloses Fahren [153] in zunächst eingeschränktem Gebiet, wie etwa dem Stadtring Göteborg [152] angeboten und das Gebiet fortan schrittweise erweitert.

Trotz des Wettlaufs um hohe Fahrzeugautomatisierung werden weiterhin auch niedrige Automatisierungsstufen zum Einsatz kommen. Ein Grund ist der ungewisse Zeithorizont bei der Einführung hoher Automatisierungsstufen aufgrund rechtlicher und technischer Beschränkungen. Zudem wird das Einsatzszenario, beispielsweise das freigegebene Gebiet oder

die Maximalgeschwindigkeit [150] zu Beginn vermutlich begrenzt sein. Weiterhin ist insbesondere in den niedrigen Fahrzeugklassen von einer anfänglich geringen Einbaurate auszugehen. Nicht zuletzt dürfte eine Deaktivierung durch den Fahrer, zum Beispiel aufgrund des Wunsches nach Fahrspaß [182] eine Rolle spielen. Ob dies zu manueller Fahrt oder wegen des nachgewiesenen Sicherheitsgewinns [25] zur Degradation auf Assistenzlevel führen wird, bleibt vorerst offen. Eine vergleichbare Entwicklung war beim Electronic Stability Control (ESC) zu beobachten, welches aufgrund des Sicherheitsgewinns in heutigen Fahrzeugen zum Teil nicht mehr deaktivierbar ist [119]. Neben dem evolutionären und revolutionären Streben nach fahrerlosem Fahren, ist somit auch die Weiterentwicklung niedriger Automatisierungsstufen, wie etwa von Assistenzsystemen von essentieller Bedeutung.

Zentraler Bestandteil von Fahrerassistenzsystemen (FAS) ist die Informationsübertragung an den Fahrer [28]. Infolge der zunehmenden Zahl an FAS ist eine Vielzahl an Informationen zu übertragen, was zur Auslastung bestehender Übertragungskanäle sowie zur erhöhten Belastung des Fahrers [28] führt. In informierenden und warnenden FAS beeinträchtigen Schwächen unmittelbar den Funktionsnutzen, da diese FAS nur über den Fahrer wirksam werden [66]. Auch in eingreifenden Systemen führen Schwächen zu funktionalen Einschränkungen. Beispielsweise ist nur eine begrenzte Eingriffsfrequenz und -amplitude möglich, wenn die Eingriffe mittels Lenkrad zurückgemeldet werden. Im Fall eingreifender FAS kommt hinzu, dass das Potential einiger technischer Entwicklungen mangels Konzept zur Informationsübertragung nicht vollständig erschlossen werden kann. Ein Beispiel hierfür sind die Vorteile vom Lenkrad entkoppelter FAS-Eingriffe, wie etwa präzise und hochfrequente Stellbewegungen sowie die Möglichkeit zur Assistenz bei fehlerhafter Lenkeingabe des Fahrers.

1.2 Zielsetzung

Eine Möglichkeit die Informationsübertragung zum Fahrer zu verbessern, ist der Einbezug bisher kaum genutzter Kanäle [204], wie etwa des vestibulären Kanals [108]. Über Jahrzehnte etabliert, jedoch von FAS bisher nicht genutzt, ist die Informationsübertragung mittels Fahrzeugaufbaubewegungen.

Dieser Beitrag untersucht, inwiefern gezielt in den Fahrzeugaufbau eingebrachte Bewegungen zur Informationsübertragung vom FAS an den Fahrer dienen können. Die Betrachtung beschränkt sich auf informierende, warnende und kontinuierlich automatisierende FAS [66] im Bereich Querführung und umfasst folgende Fragestellungen:

- *Können Informationen mit informierendem und warnendem Charakter übermittelt und bestehende Schwächen hierdurch kompensiert werden?*
- *Können vom Lenkrad entkoppelte FAS-Eingriffe rückgemeldet und deren Vorteile hierdurch erschlossen werden?*
- *Erscheint eine Nutzung in Serienfahrzeugen denkbar?*
- *Ist das Konzept zur Informationsübertragung in FAS geeignet?*

2. Grundlagen

2.1 Koordinatensysteme und Bewegungsgrößen

Die genutzten Koordinatensysteme und Bezeichnungen entsprechen der Norm *DIN ISO 8855* [40], welche die vormals gültige *DIN 70000* [39] ersetzt. Zur Veranschaulichung sind die grundlegenden Bewegungsgrößen eines Personenkraftwagens (PKW) in Abbildung 2.1 dargestellt. Konsistent hierzu ist eine Lenkradstellung/-drehung nach links, eine horizontale Krümmung, zum Beispiel von Pfad, Fahrstreifen oder Soll-Bahn nach links sowie ein lateraler Querversatz (Querablage) links zur Soll-Bahn als positiv definiert.

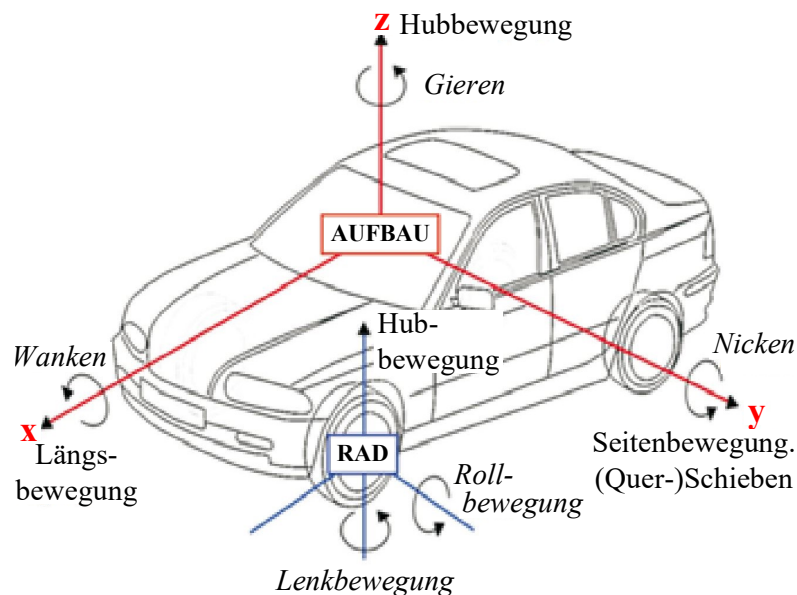


Abbildung 2.1: Koordinatensysteme nach *DIN ISO 8855* [40]. Bild angepasst aus [85]

2.2 Fahrzeugquerführung durch den Fahrer

Zur strukturierten Betrachtung der Fahraufgabe kann diese auf unterschiedliche Weise in Teilaufgaben/-prozesse untergliedert werden. Diese Arbeit bezieht sich vornehmlich auf die primäre Fahraufgabe, welche in der Einteilung nach [69] "vom Fahrer verlangt, das Fahrzeug mit einer bestimmten Geschwindigkeit auf Kurs zu halten" [23, S. 20]. Unterstützende

Tätigkeiten in Abhängigkeit von der Fahrsituation gelten als sekundäre Aufgaben. Beispiele hierfür sind Blinken und Wischen [23]. Die primäre Aufgabe kann gemäß [43] hierarchisch in Aufgaben der Navigationsebene (Auswahl Fahrtroute, Abschätzung Zeitbedarf), der Führungsebene (Ableitung Soll-Trajektorie, antizipatorische Steuerung [44]) sowie der Stabilisierungsebene (Korrigierende Stelleingriffe [44]) unterteilt werden.

2.2.1 Menschliche Informationsverarbeitung

Der Prozess menschlicher Informationsverarbeitung gliedert sich in die aufeinanderfolgend ablaufenden Prozesse *Informationsaufnahme*, *Informationsverarbeitung* und *Informationsumsetzung* (z.B. in [21]). Die Informationsaufnahme ist für diese Arbeit von besonderer Bedeutung und steht daher im Fokus der weiteren Betrachtung.

2.2.1.1 Fahrzeugführungsrelevante Sinneskanäle

In der Literatur werden taktile, haptische, vestibuläre und kinästhetische Informationen teils unterschiedlich zugeordnet [128]. Diese Arbeit orientiert sich an der Bezeichnung der Sinneskanäle und Zuordnung zur Fahrerinformation gemäß [197]. Tabelle 2.1 stellt diese dar und wurde zur besseren Verständlichkeit, teils in Anlehnung an [206] um einige Benamungen und Beispiele ergänzt. Anzumerken ist, dass die gustatorischen und olfaktorischen Sinneskanäle für die primäre Fahraufgabe nicht relevant [128] und daher nicht aufgeführt sind. Über den visuellen Kanal werden etwa 80% - 90% der für die Fahraufgabe relevanten Informationen aufgenommen [169, 186]. Hierzu zählt auch die Bewegung anderer Verkehrsteilnehmer, was eine Schätzung deren künftigen Verhaltens ermöglicht [109]. Jedoch sind auch akustische Informationen, wie etwa Wind-, Motor- und Abrollgeräusche [196] sowie vestibuläre Informationen [20, 28] wichtig für die Fahrzeugführung. Sinnesreize unterschiedlicher Kanäle werden noch als zeitgleich interpretiert [162], wenn sie innerhalb einer Zeitspanne von 0,15 s wahrgenommen werden. Tabelle 2.1 zeigt, dass die Fahrzeugneigung in [197] als weniger wichtig erachtet wird, was der etablierten Haltung in der Fahrwerkstechnik entspricht (s. Kapitel 2.4.1). Jedoch wird auch den Kräften an den Stellgliedern geringe Bedeutung beigemessen, was kritisch zu sehen ist, da das Lenkrad (Lenkwinkel/-moment) in anderen Quellen als "einer der Hauptübermittler von Informationen an den Fahrer" [206, S. 131] gilt. Beispielsweise werden so die Seitenkraftreserve, Spurrillen und Reifenschäden zurückgemeldet [206].

2.2.1.2 Wahrnehmungsschwellen

Zur Beurteilung der Wahrnehmbarkeit obiger Informationen werden Schwellen genutzt. Hierbei wird nach *Absolutschwelle*, die auch *Wahrnehmungsschwelle*, *Reizlimen* sowie *Schwell-*

Tabelle 2.1: Zusammenhang zwischen Sinneskanal und zur Erfüllung der Fahraufgabe aufgenommener Information [197]. In dunkelgrau hinterlegte Informationen gelten als weniger wichtig. In *kursiv* wurden in dieser Arbeit verwendete Bezeichnungen sowie Beispiele aus [206] ergänzt

Information	visuell	vestibulär	haptisch	akustisch
Spurabweichung (<i>Querablage</i>)	X			
Quergeschwindigkeit	X			
Fahrgeschwindigkeit	X			X
Längs- und Querschleunigung (<i>haptisch: Druck abstützender Körperteile</i>)		X	X	
Winkel Fahrzeuglängsachse-Sollkurs (<i>Gierwinkeldifferenz</i>)	X			
Giergeschwindigkeit	X			
Gierbeschleunigung		X		
Neigungswinkel (<i>Wank-/Nickwinkel</i>)	X	X		
Lenkwinkel	X		X	
Kräfte an Stellgliedern (<i>z.B. Lenkmoment</i>)			X	
Fahrgeräusche				X

wert [128] genannt wird und nach *Unterschiedsschwelle* unterschieden. Als *Absolutschwelle* gilt jene Reizintensität I , die mit 50% Entdeckungswahrscheinlichkeit [174] gerade noch wahrgenommen bzw. von $I = 0$ unterschieden werden kann [12, 100]. Als *Unterschiedsschwelle* wird die Differenz zweier Reizintensitäten bezeichnet, die mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% noch unterschieden werden kann [100]. Die genannten Schwellen gelten somit nicht absolut, sondern sind aufgrund intra- und interindividueller Unterschiede mit einer Wahrscheinlichkeitsfunktion assoziiert [128]. Bei dieser gibt es keine Reizschwelle, die mit hundertprozentiger Sicherheit wahrgenommen bzw. nicht wahrgenommen wird [29].

Einflussfaktoren Neben der Reizintensität gelten auch die Art des Reizes, der Kontext des Reizes [27] und die Einwirkdauer [72], welche die wahrgenommene Reizintensität reduziert [83] als Einflussfaktoren. Auch die Frequenz des Reizes beeinflusst die Wahrnehmungsschwellen. So reduzieren Vibrationen im Bereich von bereits 4 - 25 Hz die Sehschärfe [83]. Die Wahrnehmungsschwelle des Tastsinns ist bei ca. 200 Hz am geringsten [83]. Auch sind die akustischen und vestibulären Wahrnehmungsschwellen frequenzabhängig. Beispielsweise sind die Schwellen von Translationsbeschleunigungen bei 3 Hz [188] bzw. 4 - 8 Hz [93] am geringsten. Zudem hängen sie von der Bewegungsrichtung ab (horizontal/vertikal) [188]. Die Wahrnehmungsschwellen eigener Bewegungen werden auch vom Vorhandensein einer visuellen Rückmeldung beeinflusst. Diese reduziert die Schwellen von Gier- und Nickgeschwindigkeit, erhöht jedoch die Schwellen von Quer- und Vertikalbeschleunigung [130]

(s. Abb. 2.2). Im Blick auf Unterschiedsschwellen ist das Weber'sche Gesetz zu beachten, welches besagt, dass Unterschiedsschwellen mit der Intensität des Referenzreizes zunehmen [78]. Dies gilt für die meisten Sinne [70], jedoch vermutlich nicht für vestibuläre Reize [128].

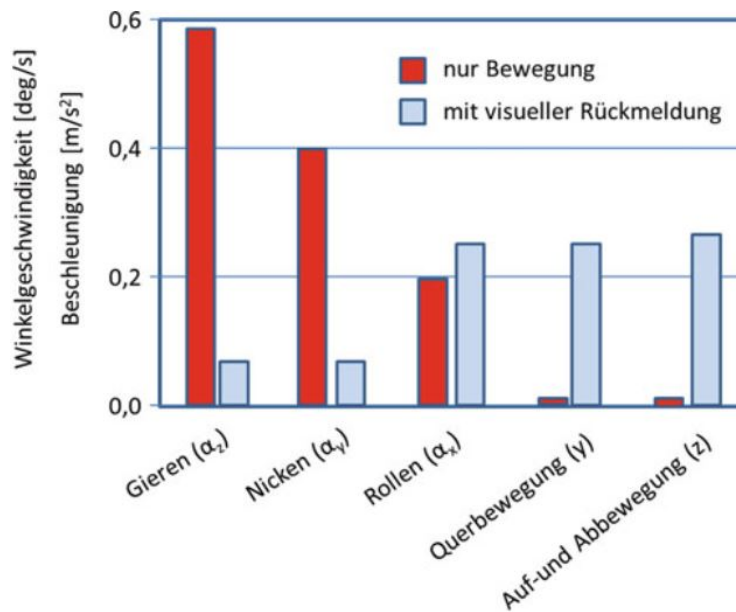


Abbildung 2.2: Wahrnehmungsschwellen ohne und mit visueller Rückmeldung [130]. Bild aus [27, S. 98]

Abschließend sei angemerkt, dass die Reizintensität auch Einfluss auf die Detektionszeit haben kann. Beispielsweise werden Wankbeschleunigungen von $1^\circ/\text{s}^2$ nach einer Sekunde, jene mit $10^\circ/\text{s}^2$ bereits nach 0,1 - 0,15 s detektiert [76].

Quantifizierung In der Literatur angegebene Schwellen variieren stark, was vermutlich auch an unterschiedlichen Versuchsbedingungen liegt. Beispielsweise können die Schwellen mit oder ohne visuelle Rückmeldung, bei Autofahrt oder unter Laborbedingungen, wie etwa im Linearschlitten ermittelt worden sein [106]. In der vorliegenden Arbeit sind Schwellen für die Fahrt im Realfahrzeug von Bedeutung, weswegen im Weiteren die "durch diverse durchgeführte Versuche und unter Zuhilfenahme der Literatur" [83, S. 13] ermittelten Schwellen aus [83] (s. Tabelle 2.2), ergänzt um die Angaben aus [130] (s. Abb. 2.2) genutzt werden.

2.2.2 Der Fahrer als Regler

Im Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis agiert der Fahrer sowohl antizipatorisch steuernd (offener Kreis auf Basis der Voraussicht bzw. des erwarteten Fahrstreifenverlaufs) als auch kompensatorisch regelnd (geschlossener Kreis, Korrektur auf Stabilisierungsebene) [41]. Der Vorteil der Steuerung liegt in schneller Reaktion, jener der Regelung in höherer Genauigkeit [24].

Tabelle 2.2: Zusammenfassung von Wahrnehmungsschwellen nach [83]. Die Einheit der Schwellen von *Rollen* und *Nicken* wurde gemäß [27] korrigiert (originär: ($^{\circ}/s$), in [27]: ($^{\circ}/s^2$))

Bewegung	Richtung / Drehachse	Schwellwert
Rotation	Gieren	$0,05 - 5^{\circ}/s^2$
	Rollen	$0,1 - 0,2^{\circ}/s^2$
	Nicken	$0,1 - 0,2^{\circ}/s^2$
Translation	longitudinal	$0,02 - 0,8 m/s^2$
	transversal	$0,05 - 0,1 m/s^2$
	vertikal	$0,02 - 0,05 m/s^2$

Abbildung 2.3 stellt die typische Sprungantwort eines Fahrers auf ein nicht haptisches Eingangssignal dar, wobei große individuelle und situationsabhängige Abweichungen möglich sind [24]. Das grundsätzliche Regelverhalten ähnelt jedoch dem eines Proportional-Integral-Differential-Reglers (PID-Regler). Zu erkennen ist, dass bis zur physiologischen Reaktions-

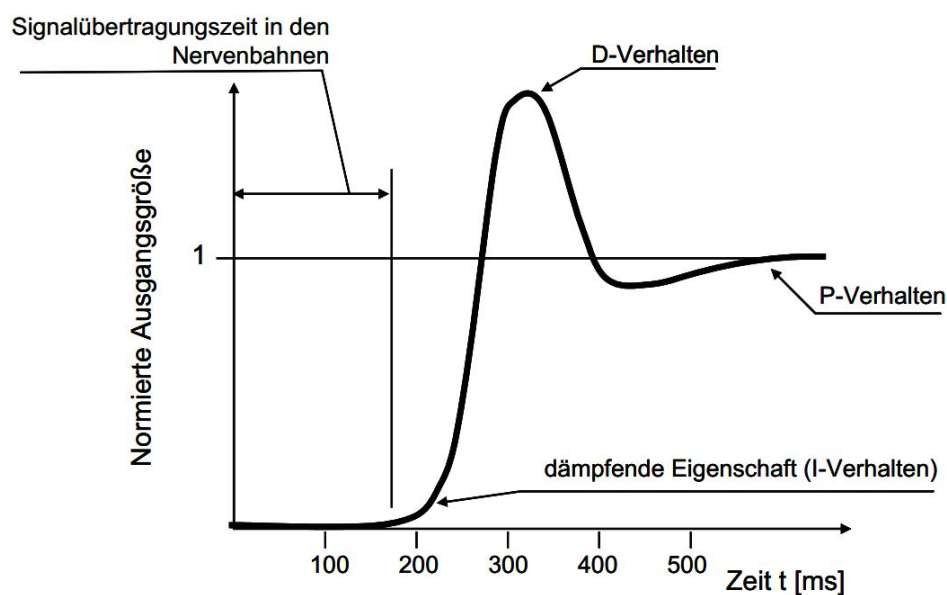


Abbildung 2.3: Typische Lenkreaktion des Fahrers auf ein sprungförmiges, nicht haptisches Eingangssignal, wie etwa ein unerwartet den Fahrstreifen querendes Hindernis [24]. Bild aus [24, S. 40]

zeit von 0,18 s keine Reaktion erfolgt und der Lenkwinkel bei 0,3 s leicht überschwingt bevor er nach 0,5 s den erforderlichen Wert erreicht. Im Hinblick auf das Auftreten kritischer Situationen ist anzunehmen, dass ab einer *Time-to-Collision (TTC)* von weniger als 0,5 s keine adäquate Reaktion mehr möglich ist [15].

Nutzung relevanter Eingangsgrößen Die Eingangsgrößen werden zum Teil redundant über mehrere Sinneskanäle vermittelt (s. Tabelle 2.1). Dies ist bezüglich der Verfügbar-

keit der Information und nach der Theorie multipler Ressourcen [204] auch für die Leistungsfähigkeit der Informationsverarbeitung von Vorteil. Der Fahrer fungiert in diesem Fall als Mehrgrößenregler [121], welcher verschiedene Regelstrecken gleichzeitig miteinbezieht. Gemäß deren Ordnungszahl wird nach Beschleunigungssteuerung (2. Ordnung, Eingangsgröße: *seitlicher Abstand*) und Geschwindigkeitssteuerung (1. Ordnung, Eingangsgröße: *Gierwinkel*) unterschieden. Eine proportionale Regelstrecke wird als Lagesteuerung bezeichnet (Eingangsgrößen: *Krümmung*, *Querb beschleunigung*, *Gierrate*) [22, 49, 58]. Die Beschleunigungssteuerung ist am schwierigsten, die Lagesteuerung ist bei Folgeaufgaben am einfachsten zu handhaben [22, 24]. Die bevorzugt genutzten Eingangsgrößen hängen von mehreren Faktoren ab, wovon ausgewählte in Tabelle 2.3 genannt sind.

Tabelle 2.3: Faktoren, welche sich auf die Wahl der zur Querführung bevorzugt genutzten Eingangsgrößen auswirken

Einflussfaktor	Ausprägung	Bevorzugte Eingangsgröße
Fahrerfahrung	Fahranfänger	seitlicher Abstand [22, 116]
Umweltbedingungen	geringe Vorausschau (z.B. bei Nebel, Folgefahrt in Baustellen)	seitlicher Abstand [206]
Geschwindigkeit	< 25 km/h	Krümmung [90]
	25 - 45 km/h	Krümmung, Gierwinkel, Querablage [90]
	> 45 km/h	Gierwinkel, Querablage [90]
Fahrmanöver	Fahrstreifenwechsel	<i>keine</i> Krümmung [87], seitlicher Abstand [209], Querb beschleunigung [206]
	Fahrstreifenfolgen	Gierwinkel [209]
	Kurvenfahrt	Querabweichung, Krümmung [87]

Die vestibuläre Rückmeldung, welche bei Regelung nach *Gierwinkel* und *Querablage* mit einfließt [206], ist bei niedriger Geschwindigkeit gemäß Tabelle 2.3 kaum von Bedeutung, gewinnt bei höherer Geschwindigkeit jedoch zunehmend an Gewicht [206]. Dies korreliert in etwa damit, dass die visuelle Wahrnehmungsschwelle bei Geradeausfahrt bis 50 km/h geringer als die vestibuläre, jedoch ab 50 km/h höher als diese ist [24]. Gemäß [24] führt dies bei manueller Geradeausfahrt zum Effekt eines leichten Zick-Zack-Kurses [96].

2.2.3 Fahrkomfort und Fahrspaß

Positives Fahrerleben ist ein zentraler Faktor für den Erfolg eines Automobils [194]. Ursachen für das positive Erleben eines Produktes sind gemäß [53, 194] und der Gliederung nach [95] das über die Sinnesorgane vermittelte Gefühl (*physio-pleasure*), soziale Aspekte, z.B. Status (*socio-pleasure*), die Ästhetik oder Werte eines Produkts (*ideo-pleasure*) sowie die Freude aus der Interaktion mit dem Produkt, z.B. gute Benutzbarkeit (*psycho-pleasure*).

Im PKW-Bereich sind neben der Benutzbarkeit vor allem Fahrkomfort und Fahrdynamik

mitentscheidend für das subjektive Erleben [84]. Fahrkomfort gilt als Differenzierungsmerkmal zwischen technisch immer ähnlicher werdenden Automobilen [81] und beeinflusst zusammen mit dem erlebten Fahrspaß die Kaufentscheidung [194]. In Bezug auf FAS (auch Sicherheitssysteme [54]) hat Komfort den größten Effekt auf die Kaufabsicht [5].

Technische Funktionen werden somit zunehmend von emotionalen und erlebnisrelevanten Kaufgründen überlagert [53], weshalb neben der Fahrsicherheit auch der Fahrkomfort und der Fahrspaß in den Fokus der Entwicklung [54, 56] und Bewertung [56] von FAS rücken.

In den Medien und von Herstellern werden Fahrkomfort und Fahrspaß häufig beworben. In der wissenschaftlichen Literatur gelten sie jedoch als diffuse Begriffe, welche uneinheitlich und zum Teil widersprüchlich definiert sind [54]. Oft werden neben den Fahrzeugeigenschaften auch das subjektive menschliche Empfinden sowie die Handlungsmotivation des Fahrers als Einflussfaktoren betrachtet [54].

2.2.3.1 Fahrkomfort

Komfort steht im heutigen Sprachgebrauch für Begriffe wie "*Behaglichkeit, Bequemlichkeit und Zufriedenheit*" [27, S. 146]. Beim Autofahren kann er positiv, zum Beispiel als Entlastung, Annehmlichkeit und Entspannung wahrgenommen werden. Jedoch kann er auch negativ als sogenannter *Diskomfort* wahrgenommen werden. Ursächlich hierfür können Beanspruchung oder Schmerz aufgrund biomechanischer Faktoren, wie etwa infolge Drucks oder der Gelenkstellung sein [211]. Das Modell aus [211] sieht Komfort und Diskomfort als unabhängige und zeitgleich wahrnehmbare Größen. In [199] werden Komfort und Diskomfort hingegen als zusammengehöriges Konstrukt beschrieben, welches sich aus mehreren Faktoren zusammensetzt, die jeweils kontinuierlich zwischen Komfort und Diskomfort eingestuft werden können.

Nutzungs-/Handlungskomfort Beziehen sich die Faktoren des letztgenannten Modells [199] vorwiegend auf sensorische Reize/Empfindungen bzw. vorwiegend auf Aktivität/Tätigkeiten, so kann nach Nutzungs- bzw. Handlungskomfort unterschieden werden [56]. Dies ähnelt der Unterscheidung zwischen passiv wahrnehmbarem Fahrkomfort und aktiv erfahrbarem Bedienkomfort [37, 48].

Komfort- und Genusserleben Der subjektive Anteil des Komforterlebens, welcher das individuell unterschiedliche Erleben einer objektiv identischen Situation beschreibt [36] kann mittels motivationspsychologischer Betrachtung erfasst werden [56]. Je nach Anreizwert der Situation ("*intrinsisch* betrifft den Vollzug der Tätigkeit, *extrinsisch* das, was der Tätigkeit als beabsichtigter Effekt nachfolgt" [167, S. 333]) kann zwischen Genusserleben (intrinsisch) und Komforterleben (extrinsisch) unterschieden werden.

Insgesamt kann somit nach den vier Kategorien Nutzungs-/Handlungskomfort bzw. Nutzungs-/Handlungsgenuss unterschieden werden [56]. Höherer Komfort kann durch Reduktion unangenehmer Handlungen/Reize, höherer Genuss durch Optimierung angenehmer Handlungen/Reize erzielt werden. Ausschlaggebend ist jeweils die Bewertung durch das Individuum. Konkrete Gestaltungshinweise diesbezüglich sind in Abschnitt 2.2.3.3 angeführt.

2.2.3.2 Fahrspaß

Neben dem Fahrkomfort ist das Spaßerleben zu betrachten, um weitere positive Effekte des Autofahrens erfassen zu können [53].

Spaß durch aktives, dynamisches Fahren Unter *Fahrspaß* kann "ein durch aktives Handeln bestimmter, positiver emotionaler Zustand einer Person, der durch ein momentanes sinnliches Erleben der Interaktion Mensch-Fahrzeug-Umwelt bestimmt wird" [194, S. 109] verstanden werden. Kennzeichnend ist demnach eine aktive Auseinandersetzung mit dem Fahrzeug, wie etwa "bewusst gesteuertes, proaktives und auch dynamisches Fahren" [194, S. 109], wobei fahrzeugseitige Einflussfaktoren gegenüber Umweltfaktoren, wie zum Beispiel Straßenbeschaffenheit/-verlauf, Verkehrsaufkommen und Wetter dominieren [194].

Spaß durch Gleiten Zum Teil wird auch komfortables Gleiten mit Fahrspaß assoziiert. Etwa 40% der Fahrer verbinden mit dem Fahren Erlebnisqualitäten, welche die Fahrform des *Gleitens* erkennen lassen [10]. Diese ist intrinsisch motiviert (z.B. Spazierfahrt, Vorbeigleiten der Landschaft) und zeichnet sich durch störungsfreie mühelose Fahrt, das Gefühl der Leichtigkeit und des Schwebens sowie durch Ruhe und Gelassenheit aus. Der erlebte Genuss bezieht sich darauf, dass den eigenen Bewegungen keine Widerstände entgegenstehen [10].

Das Spaßerleben durch Gleiten zeigt, dass das Verständnis von Fahrspaß als ausschließlich aktives, dynamisches Fahren nicht alle Facetten umfasst [53]. Synonym zu *Fahrspaß* werden zum Teil auch die Begriffe *Fahrvergnügen* und *Fahrfreude* verwendet [194]. Eng verwoben scheint zudem der in Abschnitt 2.2.3.1 genannte Begriff *Genuss* (intrinsische Motivation, Optimierung angenehmer Handlungen/Reize [56]), wobei beim Spaßerleben der Handlungsaspekt im Vordergrund steht. Gemäß [53] entsteht Spaß bei intrinsisch motivierter Tätigkeit (hier: Autofahren) und ist umso größer je höher die tätigkeitszentrierte Motivation ist. Dies ähnelt dem *Flow*-Erleben, welches ein völliges Aufgehen in einer glatt ablaufenden Tätigkeit beschreibt [34, 166].

Verknüpfung von Fahrkomfort und Fahrspaß Das Modell *joy and convenience in activities* [55] erläutert den Zusammenhang zwischen Fahrkomfort und Fahrspaß unter Handlungsaspekten und motivationspsychologischen Gesichtspunkten [54]. Es ist nachweislich gut geeignet, um die Entstehung von Fahrkomfort und Fahrspaß zu erklären [53]. Auf Basis des Modells existiert zudem eine valide Methode zur Messung und Evaluation von Fahrkomfort und Fahrspaß bei Nutzung von FAS [53].

2.2.3.3 Gestaltungshinweise bezüglich Fahrkomfort und Fahrspaß

Zur Gestaltung von FAS mit hohem Fahrkomfort und hohem Fahrspaß sind folgende Anhaltspunkte bekannt.

Komfort Zur Komforterhöhung ist der Fahrer von ungeliebten Handlungen und Reizen zu entlasten (s. Abschnitt 2.2.3.1).

Die Vermeidung unangenehmer Reize kommt meist auch den Mitfahrern zugute und wird unter anderem durch das Komfortverständnis der klassischen Fahrwerkstechnik adressiert. Dieses fordert ein geringes Beschleunigungsniveau der Schwingungen am Gesamtfahrzeug und an den Fahrzeugkomponenten, niedrige Nick- und Wankbeschleunigungen sowie eine geringe Geräuscentwicklung [85]. In Bezug auf Vertikalschwingungen gilt der Bereich von 10 - 18 Hz als unangenehm [83]. Besonders relevant für Kinetose und damit ebenfalls zu vermeiden, ist der Bereich von 0,1 - 0,5 Hz [73]. Eine komfortbezogene Einschätzung der Schwingungsamplituden gibt *ISO 2631* [93]. Beispielsweise gelten Beschleunigungen bis $0,315 \text{ m/s}^2$ nicht als unangenehm. Bei automatisierter Fahrt ist gemäß der Literaturübersicht aus [106] auf geringe Beschleunigungen [9, 51, 103], geringen Ruck [9, 51, 103, 203] und eine geringe Standardabweichung zur Fahrstreifenmitte [9] zu achten. Zudem ist eine gleichmäßige und kontinuierliche Trajektorie, die Abwesenheit von Kinetose und die wahrgenommene Sicherheit komfortrelevant. Für letztere zuträglich ist eine ruhige Ausführung von Fahrmanövern und ein ausreichender Abstand zu Verkehrsteilnehmern [51].

Die Vermeidung ungeliebter Handlungen könnte durch FAS mit alternativer Aufgabenübernahme bewerkstelligt werden, da diese Handlungen ersetzen (s. Abschnitt 2.3.1.2).

Fahrspaß Für hohen Fahrspaß sollten dem Fahrer intrinsisch motivierte Fahraufgaben sowie angenehme Reize ermöglicht werden.

Maßgeblich sind Tätigkeiten auf Führungs- und Stabilisierungsebene [194], wobei es dem Fahrer überlassen werden sollte, gemäß seiner Wünsche und Vorlieben mit dem Fahrzeug umzugehen, da Handlungsfreiheit [194] und eine freie Wahl der Aufgabenschwierigkeit [64] wichtige Begeisterungsfaktoren sind. Denkbar ist es auch, die Interaktion mit dem Fahrzeug oder dem FAS neu zu gestalten, damit bisherige Tätigkeiten mehr Freude bereiten [56].

Beispielhaft für eine neue Interaktionsform mit dem Fahrzeug steht die Kurvenneigefunktion des *Mercedes-Benz S-Klasse Coupés* [4], welche den Fahrzeugaufbau in Richtung der Lenkeingabe neigt (s. Abschnitt 2.4.2.1). Eine neuartige Interaktionsform für die Funktion *Lane Keeping Assistant (LKA)* wird in Abschnitt 4.2.2 vorgestellt. Fahrzeugseitig sind eine schnelle und präzise Umsetzung der Fahreingaben [82, 195], gute Kontrollierbarkeit und Straßenlage sowie eine gute Rückmeldung [194] förderlich.

Hinsichtlich angenehmer Reize kann die Längsdynamik, bei geübten Fahrern auch die Querdynamik begeistern [194]. Es ist jedoch kein allgemeingültiger Zusammenhang zwischen Fahrspaß und fahrdynamischen Zuständen bekannt, was in Unterschieden bei Erfahrungsbereich, Kompetenz und gewünschtem Fahrstil begründet sein kann [194]. Kurzzeitiger Diskomfort ist nicht zwangsläufig nachteilig (z.B. Go-Kart Fahren [194]), jedoch ist für dauerhaftes Spaßerleben ausreichend Fahrkomfort notwendig [194].

Aus den bisherigen Überlegungen ist zu folgern, dass Mitfahrer nur eingeschränkt Fahrspaß empfinden können, da sie keine Tätigkeiten zur Interaktion mit Fahrzeug und Umwelt ausüben. Das Spaßerleben dürfte sich somit auf angenehme Reize, wie etwa bei einer Spazierfahrt oder beim Mitfahren bei professionellen Rennfahrern sowie auf ein positives Erleben im weiteren Sinne beziehen (z.B. socio-pleasure, ideo-pleasure, s. Abschnitt 2.2.3.1).

2.3 Fahrerassistenzsysteme der Fahrzeugquerführung

Unter *Fahrerassistenz* kann "eine Zusammenarbeit von Fahrer und System, um eine Gesamtaufgabe zu lösen" [35, S. 37] verstanden werden. Die in dieser Arbeit betrachteten FAS assistieren die primäre Fahraufgabe und sind daher stets "den jeweiligen vom Fahrer durchzuführenden Aufgaben parallel geschaltet" [25, S. 559].

2.3.1 Kategorisierung

Eine Kategorisierung kann auf vielfältige Weise erfolgen, zum Beispiel nach der Nutzung von Umfeldsensorik [45], der Ebene der Fahraufgabe [25], den Prozessschritten menschlicher Informationsverarbeitung [35], den rechtlichen Konsequenzen [65] oder der Interventionsstiefe [114]. Im Weiteren genutzt und daher erläutert wird die Kategorisierung nach Wirkweise [66] sowie nach dem Informationsfluss zwischen Fahrer, FAS und Fahrzeug [25].

2.3.1.1 Kategorisierung nach Wirkweise

FAS können gemäß ihrer Wirkweise auf die Fahrzeugführung, speziell im Hinblick auf die Aufgabenteilung zwischen Mensch und Maschine in *informierende und warnende Funktionen*, *kontinuierlich automatisierende Funktionen* und in *eingreifende Notfallfunktionen* ge-

gliedert werden. Diese Kategorisierung ist auch für die rechtliche Einordnung von Relevanz [66].

Kategorie A: Informierende und warnende Funktionen Erstere dienen reiner Information, wohingegen letztere den Fahrer warnen und zu einer Handlung auffordern [114]. Sie greifen nicht in die Fahrzeugführung ein und wirken daher nur mittelbar über den Fahrer [66].

Kategorie B: Kontinuierlich automatisierende Funktionen Die Funktionen greifen über einen längeren Zeitraum unmittelbar in die Fahrzeugführung ein und können je nach Aufgabenteilung zwischen Fahrer und System weiter untergliedert werden. Die hieraus folgenden fünf [65] bzw. sechs [172] Automatisierungsstufen bzw. Level entsprechen der Gliederung nach rechtlichen Aspekten (Straßenverkehrsordnung) [25].

Als kontinuierlich automatisierendes *Fahrerassistenzsystem (Level 1)* werden Funktionen klassifiziert, bei denen der Fahrer "dauerhaft entweder die Quer- oder die Längsführung" [65, S. 3] ausführt und die jeweils andere Aufgabe "in gewissen Grenzen vom System ausgeführt" [65, S. 3] wird. Vorausgesetzt wird eine dauerhafte Überwachung des Systems sowie die Bereitschaft die Fahrzeugführung jederzeit vollständig zu übernehmen [65]. Gemäß [115] erfolgt die Arbeitsteilung in redundant-paralleler Form, wobei Eingriffe immer übersteuerbar bleiben [66].

Kategorie C: Eingreifende Notfallfunktionen Diese greifen in plötzlichen Notsituationen, die als kollisionsnah oder abstrakt unfallgeneigt zu beschreiben sind und vom Fahrer nicht mehr kontrolliert werden können, unmittelbar in die Fahrzeugsteuerung ein [66]. Da die Wirkung vorübergehend nicht vom Fahrer kontrolliert wird, weil sie zum Beispiel geringer als dessen Reaktionszeit ist oder eine (krankhafte) Handlungsunfähigkeit des Fahrers vorliegt, erfolgt die Ausübung der Fahraufgabe nicht oder nur eingeschränkt parallel durch Mensch und Maschine [66]. In [171] wird ergänzt, dass die Funktionen keinen Teil der Fahraufgabe anhaltend automatisieren und somit nicht die Rolle des Fahrers bei der Fahraufgabe ändern.

2.3.1.2 Kategorisierung nach Informationsfluss zwischen Fahrer, FAS und Fahrzeug

Zur parallelen Ausführung der Fahraufgabe können FAS unterschiedlich in den Informationsfluss zwischen Fahrer und Fahrzeug eingebunden werden. Je nach Verknüpfung wird zwischen *simultaner* und *alternativer* Aufgabenübernahme sowie *nicht eingreifenden FAS* unterschieden [25]. Letztere umfassen informierende und warnende Funktionen, wie in Abschnitt 2.3.1.1 beschrieben.

Simultane Aufgabenübernahme In simultaner Anordnung führen Fahrer und FAS die Aufgabe "simultan und gleichberechtigt" [25, S. 559] aus. Die zugehörigen Funktionen werden auch als *handlungsunterstützende* FAS bezeichnet [28]. Das System unterstützt den Fahrer bei seiner Tätigkeit, "die er nach wie vor selbst ausübt" [25, S. 561]. Der Fahrer bleibt somit "bezüglich der jeweiligen assistierten Teilaufgabe ständig selbst in Aktion" [25, S. 561]. Ein Beispiel ist die Funktion LKA. Seitens des Fahrers steht der Einbezug des Systemverhaltens in die Fahrzeugführungsaufgabe im Vordergrund. Untersuchungen zur Funktion LKA mit Funktionsprinzip *Lenkmomentenüberlagerung* zeigen, dass das Situationsbewusstsein im Vergleich zur manuellen Fahrt kaum beeinträchtigt ist [28].

Charakteristisch ist nach [25], dass die Eingriffsinformationen von Fahrer und FAS über einen sogenannten *Summenpunkt*, zum Beispiel ein Bedienelement, auf das Fahrzeug einwirken. Im Beispiel der Funktion LKA mit Funktionsprinzip *Lenkmomentenüberlagerung* bildet das Lenkrad den Summenpunkt. Die genannten Aspekte werden in Abschnitt 2.3.3 nochmals aufgegriffen und detailliert.

Alternative Aufgabenübernahme In alternativer Struktur überträgt der Fahrer die Ausführung einer Teilaufgabe vollständig an das FAS. Die zugehörigen Funktionen sind auch als *handlungsersetzende* FAS bekannt [28]. Aufgabe des Fahrers ist es, die Ausführung zu überwachen und wenn notwendig wieder zu übernehmen, wodurch das System deaktiviert wird und der Fahrer die Oberhand über das FAS behält [25]. Ein Beispiel ist das *Adaptive Cruise Control (ACC)*.

Nach [28] führen derartige Systeme zu einer Entlastung des Fahrers und zu damit verbundener Komforterhöhung. Jedoch führen sie auch zu reduzierter Aufmerksamkeit, verarmtem Situationsbewusstsein und höherer Neigung zu Nebentätigkeiten. Ein Entgegenwirken ist durch die Aktivierung menschlicher Effektorik möglich. Beispielsweise werden die negativen Auswirkungen des ACC durch Zuschaltung eines LKA mit Funktionsprinzip *Lenkmomentenüberlagerung* abgemildert [28]. Ebenso kann durch den gezielten Einsatz vestibulärer und haptischer Informationen entgegengewirkt werden [28]. Weiterhin birgt die konservative Systembedienung Risiken. So werden Systemübernahmen auch bei Gefahr vermieden [28].

2.3.2 Informationsübertragung an den Fahrer

Die Informationsübertragung an den Fahrer nimmt in FAS eine zentrale Rolle ein [28]. Sie ist Voraussetzung für die Wirkung informierender und warnender FAS und ermöglicht in kontinuierlich automatisierenden FAS die Erfüllung der Fahreraufgaben, zum Beispiel die Überwachung und Übernahme der zuvor übertragenen Teilaufgabe bzw. die Abstimmung mit dem FAS und den Einbezug der Intention des FAS. Ebenso wird der Systemzustand an den Fahrer übermittelt [66].

Die Informationsübertragung erfolgt über Anzeigen sowie Bedienelemente mit Anzeigecharakter (z.B. Stellung des Lenkrads). Als *Anzeige* werden dabei alle technischen Elemente verstanden, "über die gezielt auf gestalterische Weise Information auf den Menschen übertragen wird" [26, S. 273]. In FAS kann dies über den visuellen, akustischen, haptischen und vestibulären Kanal erfolgen. Bei vestibulären Informationen ist zu unterscheiden, ob diese gezielt gestalterisch eingebracht werden, wie etwa ein Bremsruck oder Längs-/Querbewegungen in [106] oder ob diese aus der Fahrzeugbewegung infolge der Fahreingabe resultieren, was in der Regel nicht als Anzeige verstanden wird [26].

2.3.2.1 Charakteristika der Übertragung durch die jeweiligen Sinneskanäle

Eine Schwäche visueller Informationsaufnahme ist die erforderliche Blickabwendung von der Straße, welche mit einer relativen Häufigkeit von ca. 30% und einer mittleren Fixationsdauer von 0,6 s erfolgt [181]. Eine Ausnahme bildet das *Head-Up-Display*. Eine akustische Informationsaufnahme lenkt von der Fahraufgabe ab [28]. Zudem besteht sowohl bei visueller (z.B. Blickabwendung) als auch bei akustischer Übertragung (Beispiel: Übernahmegong in [160]) die Gefahr, dass die Information nicht wahrgenommen wird [108]. Haptische Informationen können beispielsweise via Lenkrad, Sitz oder Gurtstraffer [144] übermittelt werden. Vorteilhaft ist, dass die Information schnell, blickrichtungsunabhängig und ausschließlich vom Fahrer wahrgenommen wird [128]. Nachteilig ist, dass via Lenkrad bereits eine Vielzahl an Informationen übertragen wird [176] und die Gefahr einer Überladung droht [111]. Zudem sind lediglich simple Signale überlagerbar, da die Akzeptanz mit steigender Komplexität sinkt [176]. Weiterhin ist eine sorgfältige Gestaltung erforderlich, da sonst nicht nur Unwirksamkeit, sondern auch nachteiliges Fahrerverhalten resultieren kann [176] (s. Abschnitt 2.3.3.1).

Wirkaspekt vestibulärer Information Fahrer stehen einer vestibulären Informationsübertragung offen gegenüber [108] und erwarten diese von eingreifenden FAS. Beispielsweise ist die Sensibilität für vestibulär-haptische Reize sowie die Vorliebe für die Informationshaltigkeit des FAS entscheidend bei der Individualisierung des FAS [28]. Vorteilhaft ist, dass dieser Kanal bisher kaum aktiv genutzt wird (geringe Auslastung), blickrichtungsunabhängig wahrnehmbar ist und ein hohes Auflösungsvermögen bietet. Beispielsweise wird die Differenzgeschwindigkeit, welche mittels ACC eingeregelt wird, mit geschlossenen Augen auf 5 km/h genau geschätzt [28]. Zudem sind mit den physikalischen Attributen (z.B. Ruck) auch emotionale Qualitäten, wie etwa "'freundlich' oder 'gefährlich'" [28, S. 182] verknüpft, welche somit ebenfalls gezielt übermittelt werden können. Weiterhin besteht ein "'unüberfüllbarer' Aufforderungscharakter, die Aufmerksamkeit auf bestimmte Elemente der Fahrsituation zu richten" [28, S. 182]. Beispielsweise richtet ein Bremsruck die Aufmerksamkeit nach vor-

ne. Die Information kann in entsprechende Umweltinformation transformiert werden (z.B. Vorderfahrzeug) und bei alternativer Aufgabenübernahme als Entscheidungsgrundlage für Systemübernahmen dienen [28]. Ebenso ist der vestibuläre (und haptische) Kanal geeignet, um ungewollten Automationseffekten, wie etwa der Reduktion der Aufmerksamkeit und des Situationsbewusstseins entgegenzuwirken und den Fahrer im Regelkreis zu behalten [28].

2.3.2.2 Konzepte zur Optimierung der Informationsübertragung

Die Vielzahl an Informationen, welche von der zunehmenden Anzahl an Systemen übermittelt wird, kann zur Auslastung der Kanäle und zur Belastung des Fahrers führen. Zur Bewältigung dieser Herausforderung stehen mehrere Vorgehensweisen zur Verfügung¹.

Zeitliche Priorisierung Eine Möglichkeit besteht in der Priorisierung und zeitlichen Entzerrung der Informationen in Abhängigkeit der Fahrerbelastung [99]. Ein Beispiel ist die Unterdrückung von Wischwasser-Füllstandswarnungen während einer Kreuzungsüberquerung.

Multimodale Übertragung unter Einbezug wenig genutzter Kanäle Um die Informationsübertragung auch in Situationen hoher Fahrerbelastung zu gewährleisten, können die Schwächen einzelner Kanäle (s. Abschnitt 2.3.2.1) durch multimodale Übertragung teils kompensiert werden. Zum Beispiel werden Navigationshinweise meist visuell und akustisch übertragen. Dabei kann es vorteilhaft sein, bisher wenig genutzte Kanäle miteinzubeziehen (geringe Auslastung). Die multimodale Übertragung unter Einbezug wenig genutzter Kanäle verspricht nach der Theorie multipler Ressourcen [204] zudem hohe Leistungsfähigkeit bei der Informationsverarbeitung. Auch können die Stärken der jeweiligen Kanäle, wie etwa der Zeitbedarf zur Informationsaufnahme und die übertragbare Komplexität, situationsbezogen kombiniert werden. Beispielsweise ist gemäß [109] *haptisch* zu vermitteln, *was* zu tun ist und *visuell* zu erklären, *warum* dies zu tun ist.

Kaskadierte Struktur Einige Arten der Informationsübertragung wirken sich komfortmindernd aus (z.B. einseitiger Bremsengriff [25]) oder informieren ungewollt auch die Mitfahrer (z.B. akustisches Nagelbandrattern [23]), weshalb sie nur selten eingesetzt werden sollten. In diesem Fall bietet sich die Nutzung innerhalb einer kaskadierten Struktur an. Ein Beispiel ist der *Aktive Totwinkelassistent* der *Mercedes-Benz C-Klasse*, welcher die Information wie folgt überträgt: Anzeige im Seitenspiegel leuchtend - dann blinkend - dann akustische Warnung - dann vestibuläre Warnung und korrigierender einseitiger Bremsengriff

¹Aspekte dieses Abschnitts sind bereits in [124] vorveröffentlicht.

[136].

Zusammenfassend weisen einige bestehende Konzepte zur Informationsübertragung Schwächen auf. Hinzu kommt, dass für einige technische Entwicklungen, wie etwa größere FAS-Eingriffe *ohne* Summenpunkt, noch keine geeigneten Rückmeldekonzepete bekannt und deren Vorteile somit nicht erschließbar sind (s. Abschnitt 2.3.3).

2.3.3 Eingriffskonzepte - Charakteristika und offenes Potential

Eingreifende FAS können nach solchen *mit* und *ohne* Summenpunkt unterschieden werden². Als *Summenpunkt* wird ein Punkt bezeichnet, in dem die Intentionen von Fahrer und FAS aufeinandertreffen [25]. Charakterisierend ist zudem, dass der Fahrer dort die Intention bzw. den "Willen" [25, S. 569] des FAS wahrnehmen kann. Der Informationsfluss ist somit bidirektional. Der Fahrer erlangt so die notwendige Information über den *Eingriffswunsch* des FAS und muss diesen in Folge zulassen, korrigieren oder blockieren. Beispielsweise können aktive Bedienelemente, wie etwa das Lenkrad, als Summenpunkt dienen [25].

In Systemen ohne Summenpunkt werden die Eingriffe von Fahrer und FAS *unabgestimmt* an der Querführungsaktorik überlagert, was für den Fahrer nicht unmittelbar wahrnehmbar ist und daher teils alternative Rückmeldekonzepete notwendig sind.

Bei alternativer Aufgabenübernahme durch Fahrer und FAS (s. Abschnitt 2.3.1.2) existiert definitionsgemäß kein Summenpunkt, wohingegen bei simultaner Ausführung nach Ansicht des Verfassers Systeme mit und ohne Summenpunkt bekannt sind. Dieser Aspekt sowie Vor- und Nachteile der jeweiligen Eingriffskonzepte werden im Folgenden erläutert und auf unerschlossenes Potential hingewiesen.

2.3.3.1 Eingriffe über *Summenpunkt Lenkrad*

Die Überlagerung der Intentionen von Fahrer und FAS am Lenkrad erfolgt momentenbasiert. Die Summe aus Fahrerhandmoment, FAS-Moment und Rückmeldemoment (Fahrzustand) führt zum Lenkwinkel. Dieser ist jedoch schwer vorhersehbar, da er stark von der Fahrsituation und dem Verlauf des FAS-Moments abhängt. Zusätzlich verstärken oder schwächen die Fahrer in der Regel den FAS-Eingriff [183], was präzise Stellbewegungen erschwert. Vorteilhaft ist, dass zur Kompensation des FAS-Eingriffs das Lenkrad lediglich festgehalten werden muss. Nachteilig ist hingegen, dass nur die Summe der Informationen aus Fahrzustand (z.B. Spurrillen, Haftgrenze) und FAS-Rückmeldung wahrnehmbar ist (s. Abb. 2.4). Sind diese nicht ausreichend abgrenzbar, wird die Zuordnung erschwert, was zu Fehlinter-

²Aspekte dieses Abschnitts sind bereits in [125, 127] vorveröffentlicht.

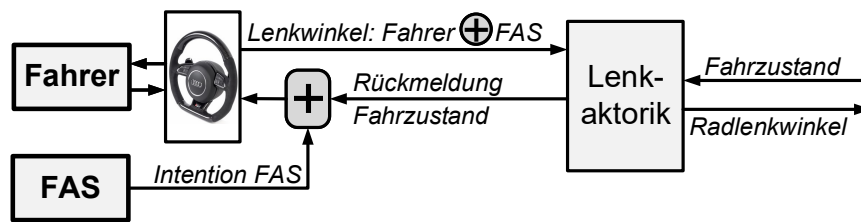


Abbildung 2.4: Informationsfluss eines FAS mit *Summenpunkt Lenkrad*. Bild vorveröffentlicht in [125, 127]. Icon aus [140]

pretationen führen kann. Zum Beispiel kann ein mit steigendem Lenkradwinkel abfallendes Lenkmoment auf das Erreichen der Haftgrenze [26, 161] und auf ein nachlassendes FAS-Moment zurückzuführen sein. Charakteristisch ist, dass sämtliche Eingriffe mit dem Fahrer abgestimmt werden. Bei kontinuierlichen Eingriffen, wie etwa beim LKA führt dies zu dauerhafter Momentenüberlagerung, was vom Fahrer als unangenehm empfunden werden kann [159, 180]. Notwendige Kompromisse können zu funktionalen Einschränkungen führen, zum Beispiel einer schlechteren Bahnfolge beim LKA [176]. Nachteilig ist auch, dass die Abstimmung im *Summenpunkt Lenkrad* die Amplitude der FAS-Eingriffe nach unten (Losbrechmoment) und oben begrenzt. Letzteres liegt an der physischen Gefahr für die Hände am Lenkrad sowie einer drohenden Unklarheit über die Fahrverantwortung [183]. Ähnliches gilt für die maximale Frequenz der Eingriffe, welche durch den Halterelex und die Reaktionszeit des Fahrers beschränkt ist. Ein weiterer konzeptbedingter Nachteil ist, dass keine Assistenz bei unabsichtlichen Lenkeingaben möglich ist [202]. Diese können infolge von Nebentätigkeiten, einem Festhalten des Lenkrads bei Sekundenschlaf oder bei kurzzeitigen Blickabwendungen auftreten.

Vollständige Rückmeldung des Eingriffs am Summenpunkt Im einfachsten Fall sind Lenkradwinkel und Radlenkwinkel fest gekoppelt. Werden FAS-Eingriffe dann mittels additivem Moment der elektromechanischen Servolenkung, engl. *Electric Power Steering (EPS)* eingebracht, besteht ein fester Zusammenhang zwischen FAS-Eingriff und dessen Rückmeldung am *Summenpunkt Lenkrad*. Dieser schränkt die Gestaltungsfreiheit beider Aspekte deutlich ein. So wirkt sich eine Individualisierung der Rückmeldung auch auf die FAS-Eingriffe aus. Umgekehrt müssen die FAS-Eingriffe aufgrund der Kopplung an die Rückmeldung, zum Beispiel in ihrer Dynamik begrenzt werden, was zu funktionalen Einschränkungen führt.

Anteilige Rückmeldung des Eingriffs am Summenpunkt Um Nachteile abzumildern, kann auch nur ein Teil des FAS-Eingriffs an den Summenpunkt geführt werden. Zur Umsetzung sind ein oder mehrere vom Lenkrad entkoppelte Querführungsaktoren erforderlich (z.B.

Hinterachslenkung). Im Fall der Ausweichunterstützung aus [179] wird mithilfe der Überlagerungslenkung, herstellereigentlich engl. *Audi Dynamic Steering* (ADS) nur ein proportionaler Anteil des FAS-Eingriffs via Lenkrad zurückgemeldet. Hierdurch reduziert sich die physische Gefahr für die Fahrerhände (ansonst schnelle Lenkraddrehung), während konzeptbedingte Vorteile, wie etwa die einfache Überstimbarkeit des FAS-Eingriffs durch Festhalten des Lenkrads erhalten bleiben. Zu beachten ist, dass Diskrepanzen zwischen Lenkradausrichtung und Fahrzeugbewegung bei Normalfahrt als inkonsistent empfunden werden und zu geringer Systemakzeptanz führen [187]. In der untersuchten hochdynamischen Ausweichsituation ist dieser Aspekt vermutlich aufgrund des ohnehin nichtlinearen Fahrverhaltens jedoch nachrangig.

2.3.3.2 Eingriffe ohne Summenpunkt

Bei FAS-Eingriffen ohne Summenpunkt besitzen Fahrer und FAS einen separaten Durchgriff auf die Querführungsaktorik. Beide fordern Lenkwinkel an, welche in Summe die Fahrzeugbewegung bestimmen. Die Umsetzung kann über separate Aktoren oder als Summenlenkwinkel über einen Lenkaktor erfolgen. Vorteilhaft ist, dass das Lenkrad vom FAS nicht beeinflusst wird und das Lenkgefühl im engeren Sinne somit unverändert bleibt. Der separate Durchgriff des FAS ermöglicht winkelbasierte Eingriffe in hoher Frequenz und somit präzise Stelleingriffe mit geringer Regelkreiszeitkonstante. Zudem wird es möglich auch während unabsichtlicher Lenkeingaben des Fahrers, zum Beispiel infolge von Sekundenschlaf oder Nebentätigkeiten zu assistieren. Jedoch entfällt die Möglichkeit zur Rückmeldung und Abstimmung der FAS-Eingriffe via Lenkrad, weswegen zum Teil alternative Konzepte erforderlich sind. Diese müssen die FAS-Eingriffe derart rückmelden, dass die Fahrzeugbewegung dem Fahrer trotz der Diskrepanz zur Lenkradstellung konsistent erscheint. Andernfalls stößt das System auf geringe Akzeptanz [187]. Zudem müssen die Rückmeldekonzepete den Fahrer, wenn notwendig zu einem rechtzeitigen und passenden Übersteuereingriff anleiten.

Eingriffe ohne Rückmeldung an den Fahrer Eingriffe zur Störgrößenkompensation erfordern im Regelfall kein alternatives Rückmeldekonzepet, da der Kurs des Fahrzeugs weiterhin der Fahrervorgabe entspricht (s. Abschnitt 4.2.1.1). Störgrößen sind beispielsweise die Straßenquerneigung, Seitenwind [164] und Straßenunebenheiten [187]. Das LKA-System aus [133] nutzt dies und bringt ausschließlich kleine FAS-Eingriffe ohne Summenpunkt ein. Größere Stelleingriffe werden weiterhin zur Rückmeldung und Abstimmung an den *Summenpunkt Lenkrad* geleitet. Durch diese Unterscheidung werden Vorteile, wie etwa präzise und hochfrequente Stabilisierungseingriffe sowie eine Reduktion des haptischen Informationsflusses [187] erzielt und zugleich Inkonsistenzen zwischen Fahrzeugbewegung und Lenkradstellung vermieden. Da Eingriffe bis maximal $0,3^\circ$ Radlenkwinkel [155] auch ohne

explizite Rückmeldung übersteuerbar sind, ist kein alternatives Rückmeldekonzept notwendig.

Alternative Rückmeldekonzepte Die Funktion *Lane Departure Prevention* aus [149] greift "autark" [25, S. 557] und entkoppelt vom Lenkrad mittels einseitiger Bremsung ein. Die Rückmeldung des Eingriffs erfolgt über die resultierende Fahrzeugbewegung, zum Beispiel vestibulär durch die additive Längs-, Quer- und Gierbeschleunigung. Die maximale Eingriffsdauer von 0,2 s [25] entspricht ungefähr der Reaktionszeit des Fahrers [128] (s. Abb. 2.3). Zudem wird der Eingriff abgebrochen, falls Fahreraktivität erkannt wird [25]. Beides gewährleistet, dass Fahrer und FAS nicht zeitgleich, sondern aufeinanderfolgend auf die Querführung einwirken. Der Fahrer wird durch die unkomfortable Rückmeldung motiviert, den Eingriff nachträglich zu überprüfen. Die kurze Eingriffsdauer und das begrenzte Giermoment gewährleisten dabei, dass der Eingriff auch im Nachhinein übersteuerbar bleibt. Positiv im Vergleich zum *Summenpunkt Lenkrad* ist, dass der Lenkeingriff des Fahrers und der FAS-Eingriff separat und nicht als Summe rückgemeldet werden, wodurch Schwierigkeiten bei der Trennung und Zuordnung der Information vermieden werden (s. Abschnitt 2.3.3.1). Nachteilig am Konzept ist, dass dieses aufgrund des gewählten Aktors (Verschleiß), der Art der Reizerzeugung (nur kurzzeitig möglich), des einhergehenden Diskomforts und des fehlenden Konzepts zum *gleichzeitigen* Einwirken von Fahrer und FAS auf die Querführung nur für kurzzeitige und seltene Eingriffe geeignet erscheint.

2.3.3.3 Zusammenfassung

Tabelle 2.4 fasst die Eigenschaften von FAS-Eingriffen mit und ohne *Summenpunkt Lenkrad* zusammen. Aus Abschnitt 2.3.3.2 wird deutlich, dass Eingriffe ohne Summenpunkt bisher nur in einem kleinen Teil des Eingriffsspektrums möglich sind. Dieser Teil umfasst geringfügige Eingriffe sowie seltene kurzzeitige Eingriffe, die nicht gleichzeitig zum Fahrereingriff erfolgen. Mangels alternativer Rückmeldungsform sind große lang andauernde Eingriffe, die simultan zur Fahrereingabe erfolgen und insbesondere eine Kursänderung zum Ziel haben bisher nicht möglich. Beispielsweise nutzen LKA-Systeme derartige Eingriffe. Um die Vorteile vom Lenkrad entkoppelter Eingriffe auch in diesem Spektrum erschließen zu können, ist ein neues Rückmeldekonzept zu entwerfen.

2.4 Fahrzeugaufbaubewegung von PKW

Unter Fahrzeugaufbaubewegungen werden die Rotationen *Wanken* und *Nicken* sowie *Hubbewegungen* verstanden [85] (s. Abb. 2.1). Diese werden meist auf die Fahrbahnebene, in einigen Fällen jedoch auf das inertielle System bezogen (z.B. Neigetechnik [13], Skyhook-

Tabelle 2.4: Charakteristika von FAS-Eingriffen mit und ohne *Summenpunkt Lenkrad*

	Vorteile	Nachteile
Mit Summenpunkt	schnelle, blickrichtungsunabhängige Informationsaufnahme; abgestimmte, leicht überstimmbare FAS-Eingriffe	Kontinuierliche haptische Information ist störend, bevormundend; Teils unklare Fahrverantwortung; Rückmeldungen des Fahrer- und FAS-Eingriffs schlecht abgrenzbar; Einschränkungen bei FAS-Eingriffen unvermeidlich (Sekundenschlaf, Präzision, Frequenz, Amplitude)
Ohne Summenpunkt	Lenkrad hoheitlich beim Fahrer; Lenkgefühl im engeren Sinne unverändert; Eingriffe frei gestaltbar (präzise, hohe Frequenz, Assistenz bei z.B. Sekundenschlaf)	Eingriffe nicht abgestimmt; Übersteuern komplex

Dämpfung [210]). Da Wankbewegungen im Fokus der Arbeit stehen, beziehen sich die weiteren Abschnitte vorwiegend auf diesen Freiheitsgrad.

2.4.1 Wankbewegungen aus etablierter Sichtweise

Im Fokus der etablierten Fahrwerkstechnik steht häufig der Zielkonflikt zwischen Komfort und Agilität [85].

Eine Minimierung von Wankbewegungen trägt zu Agilität, sportlichem Handling, gutem Anlenkverhalten und guter Vertikaldynamik bei [85]. Große Wankwinkel werden generell als negativ empfunden [63]. Eine wankweiche Auslegung verfälscht zudem die Rückmeldung von Lenkeingriffen, da die resultierende Querschleunigung in Kopfhöhe verzögert auftritt und womöglich überschwingt. Hierdurch kann der Lenkeingriff zu groß werden oder unnötige Korrekturen erfordern, was nachteilig ist [121]. Die Auswirkungen auf das Lenkgefühl werden unterschiedlich, teils als unwichtig, teils bedeutender eingestuft [168, 206]. Ebenfalls uneindeutig ist die Wirkung auf den Fahrkomfort. Zum Teil gelten Wankbewegungen hierfür als relevant [121], zum Teil als möglichst zu vermeiden [16, 60]. Eine Wankreaktion zur Kurveninnenseite gilt in der Regel als unangenehm [84]. Ein vollständiges Unterbinden von Wankbewegungen ist nicht zielführend, da hierdurch die Seitenkraft [84, 85] sowie die Annäherung an die Kraftschlussgrenze [121] rückgemeldet werden. Daher wird empfohlen geringe Wankwinkel zuzulassen, welche zum Beispiel proportional an die Querschleunigung gekoppelt werden können [84]. Ein Beispiel hierfür ist das in Abbildung 2.5 dargestellte Wankverhalten *ohne Dynamic Drive*.

Aktive Fahrwerke ermöglichen es, Wankbewegungen bei niedriger Querschleunigung vollständig zu unterbinden (Philosophie: Unterbindung ist komfortoptimal [60, 16]) und erst bei

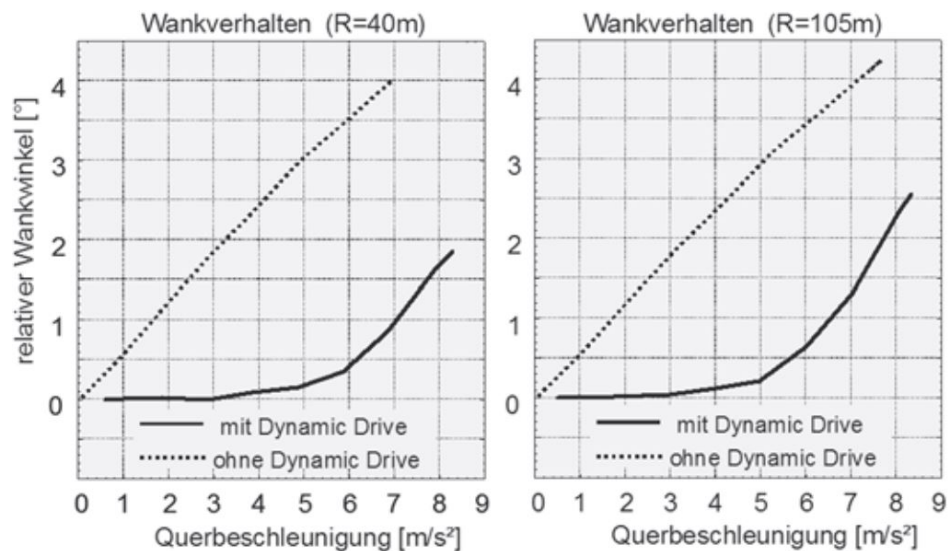


Abbildung 2.5: Wankverhalten *ohne* und *mit* der aktiven Wankstabilisierung *Dynamic Drive* [101]. Mit *Dynamic Drive* werden Wankbewegungen erst bei hoher Querbeschleunigung zugelassen, um den nahenden Grenzbereich rückzumelden [85]. Bild aus [101]

hoher Querbeschleunigung zuzulassen, um die Information über den nahenden Grenzbereich zu übertragen [85]. Ein Beispiel hierfür ist das Wankverhalten *mit Dynamic Drive*, welches in Abbildung 2.5 dargestellt ist.

Der Wankwinkel und die Rückmeldung an den Fahrer sind hierbei stets Folge der Querbeschleunigung und werden nicht "gezielt auf gestalterische Weise" [26, S. 273] erzeugt. Trotz der Übertragung relevanter Informationen gelten sie daher bisher nicht als *Anzeige* (s. Abschnitt 2.3.2).

Lenkeffekt infolge Wankens Viele Fahrzeuge nutzen kinematische Spuränderungen beim Einfedern [85], um unter anderem das Eigenlenkverhalten bei Kurvenfahrt gezielt zu beeinflussen [52]. Dies wird als *Rollsteuern* [40] oder *Wanklenken* [16] bezeichnet. Mittels Wankbewegung kann so ein Untersteuereffekt erzeugt werden [16], welcher dem Fahrer neben dem Wanken als zusätzliche Information über den nahenden Grenzbereich dient. Für den Fahrer ist dieser dahingehend bemerkbar, dass sein bisheriger Lenkeinschlag zur Kurshalterung nicht mehr ausreicht. Ein zu großes Rollsteuern ist jedoch zu vermeiden [85], da es auf einseitig unebener Fahrbahn den Geradeauslauf stört [121]. Beispielsweise können Schwankungen des Lenkmoments [16] sowie Lenk- und Gierbewegungen die Folge sein [84, 85]. Der sich in Summe einstellende Lenkeffekt basiert auf Änderungen der Radstellung, wie durch *Rollsteuern*, Radlaststeuern und der Sturzwinkeländerungen infolge Wankens [161] verursacht und auf Änderungen der Radlast, welche den Vorspureffekt und die Seitenkraftreserve beeinflussen [164]. Da der Lenkeffekt unabhängig vom Lenkrad wirkt, kann er auch

gezielt genutzt werden, um eine vom Lenkrad entkoppelte Gierwirkung einzubringen [164]. Dies wird in Kapitel 5.2.3 angewandt, um einen entkoppelten Querführungsaktor zu emulieren.

Abbildung 2.6 veranschaulicht den Teilaspekt *Rollsteuern* des Lenkeffekts infolge Wankens im genutzten Versuchsfahrzeug. Gemäß dem Ablesebeispiel führt ein Wankwinkel von $3,75^\circ$

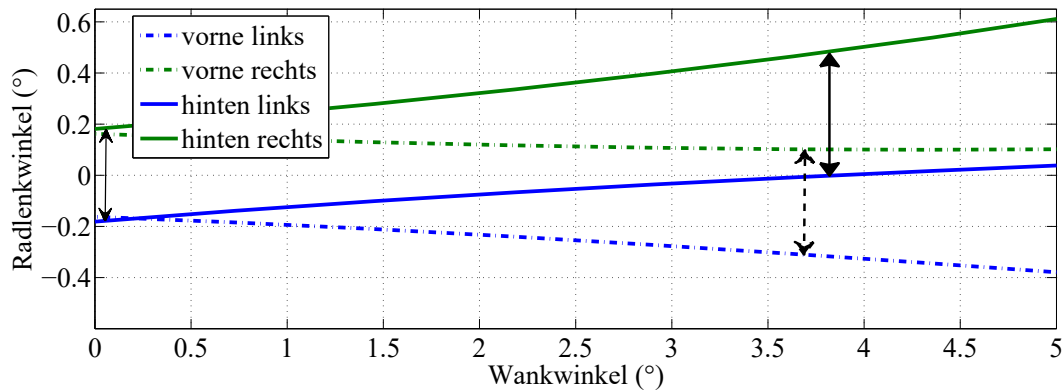


Abbildung 2.6: Veranschaulichung des Rollsteuerns im Versuchsfahrzeug *Audi A5 Sportback* (Simulation bei gleichmäßig wechselseitigem Federn ohne Druckpufferbegrenzung)

zu einem mittleren Lenkwinkel (Mittelwert des linken und rechten Radlenkwinkels einer Achse [40]) von $+0,45^\circ$ an der Hinterachse und $-0,2^\circ$ an der Vorderachse. Beides fördert das Eindrehen des Fahrzeugs in Richtung des Wankwinkels. Beim reaktiven Wanken entspricht dies der Kurvenaußenseite und damit der gewünschten Untersteuertendenz. Der sich im Versuchsträger aus der Summe aller Teilaspekte ergebende Lenkeffekt ist in Abbildung 5.13 dargestellt.

Zusammenfassend galten Wankbewegungen für die primären Zielsetzungen Fahrkomfort und Agilität weitestgehend als nachteilig. Zudem wurde dem Potential zur Informationsübertragung wenig Wert beigemessen (s. Tabelle 2.1). Wankbewegungen waren daher nur in Ausnahmefällen gewünscht. Beispielsweise wog erst die hohe Priorität einer Rückmeldung des nahenden Grenzbereichs die zuvor genannten Nachteile auf.

2.4.2 Paradigmenwechsel: Aktive Neigetechnik

Historisch beschränkten sich die Eingangsgrößen des Fahrwerks auf die vier Radaufstandsflächen [85]. Mit der Anbindung an das Umfeld entstanden auch neue Zielsetzungen, wie etwa das Anheben des Fahrzeugaufbaus zur Einstiegshilfe (Input: Fahrer [68]) oder das Absenken zur Minimierung des Strömungswiderstands (Input: Backend-Daten [157]).

Die Anbindung an FAS führte hingegen zu einem regelrechten Paradigmenwechsel bei eta-

blierten Ansichten. Erstmals in seriennahen PKW wurden Wankbewegungen gezielt eingebracht, um Fahrkomfort und Fahrerlebnis zu verbessern [4, 13]. Ähnliches war zuvor lediglich aus dem Zugverkehr zur Erhöhung des Fahrkomforts oder der Fahrgeschwindigkeit sowie von meist dreirädrigen Schmalspurfahrzeugen zur Kippstabilisierung oder zur Erhöhung des Fahrspaßes bekannt. Ein ausführliche Literaturübersicht zu diesen Fahrzeugen bietet [13]. Ausschlaggebend im PKW-Bereich war die vorausschauende Erkennung der Fahrstreifenkrümmung durch die Sensorik des FAS, wie zum Beispiel der Frontkamera [4, 13]. Dies ermöglichte ein harmonisches Wanken ohne Zeitverzögerung [13, 75].

2.4.2.1 Neigetechniksysteme seriennaher PKW

In [13] wird ein seriennahes Neigetechnikkonzept für *Hoch-/Vollautomation* (s. Abschnitt 2.3.1.1) vorgestellt, welches eine Erhöhung des Insassenkomforts und die Erleichterung von Nebentätigkeiten zum Ziel hat [13]. Hierbei wird die auf die Insassen wirkende Querbesehleunigung unter Berücksichtigung der Straßenquerneigung durch eine leicht voraus-eilende Wankbewegung vollständig kompensiert (s. Abb. 2.7). Es resultieren Vorteile wie etwa die Erhöhung von Fahrkomfort und Konditionssicherheit, die Erleichterung von Nebentätigkeiten und eine höhere Performanz bei visuell-räumlicher Aufgabenbearbeitung, ohne das Risiko von Kinetose zu erhöhen. Anzumerken ist, dass das Automationssystem vom Fahrer imitiert wurde und die Probanden als Beifahrer an den Studien teilnahmen.

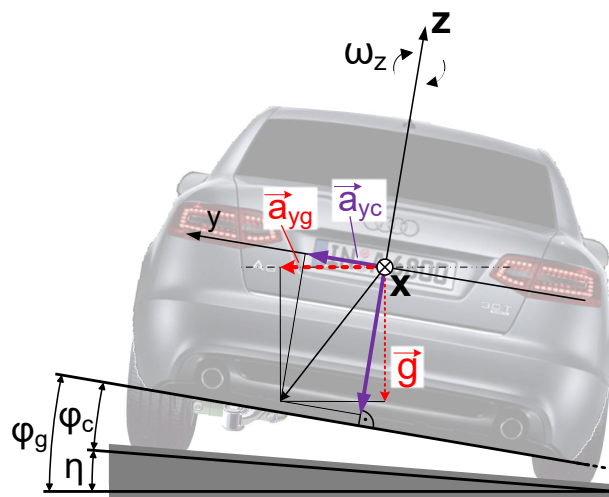


Abbildung 2.7: Wirkweise der Querbesehleunigungskompensation durch Wanken zur Kurveninnenseite. Die Querbesehleunigung a_{yg} lotrecht zum Schwerevektor g wird durch den Wankwinkel φ_g relativ zum Schwerevektor (Summe aus Wankwinkel relativ zur Fahrbahnebene φ_c und Straßenquerneigung η) teilweise kompensiert. Es verbleibt die Querbesehleunigung a_{yc} im Fahrzeugaufbau. Mit ω_z wird die Gierrate des Fahrzeugaufbaus bezeichnet. Bild angepasst aus [13, 122]

Die Kurvenneigefunktion des *Mercedes-Benz S-Klasse Coupés* [4] fokussiert den *Fahrer* bei *manueller Fahrt*. Ziel ist es, Fahrkomfort und Fahrspaß zu erhöhen und ein neuartiges Fahrerlebnis zu bieten. Dieses soll sich nicht durch sportliche Fahrweise, sondern durch "komfortables Cruisen" [75, S. 1] und elegantes, souveränes "Gleiten" [4, S. 1] auszeichnen. Der Wankwinkel wird aus dem vorausliegenden Fahrstreifenverlauf, der Querbeschleunigung und der Lenkeingabe des Fahrers berechnet [86]. Im Gegensatz zum zuvor beschriebenen Neigetechnikkonzept wird keine vollständige Querbeschleunigungskompensation angestrebt [4]. Der maximale Wankwinkel beträgt $2,65^\circ$ [86], jener des vorherigen Konzepts 5° [13].

Wirkung auf Fahrkomfort und Fahrspaß Mithilfe der Neigetechnik können viele Kriterien an den Fahrkomfort bei automatisierter Fahrt erfüllt werden (s. Abschnitt 2.2.3.3). Beispielsweise können Beschleunigungen und Rucke reduziert werden. Das Teilergebnis "sichere Unterscheidung von Rechts- und Linkskurven nicht möglich" [13, S. 102] sowie die komfortbezogenen Vorteile des Neigetechnikkonzepts aus [13] stützen diese Einschätzung.

In anderer Ausgestaltung kann mithilfe der Neigetechnik neben dem Fahrkomfort auch der Fahrspaß adressiert werden, wie die Kurvenneigefunktion des *Mercedes-Benz S-Klasse Coupés* zeigt. Das Spaßerleben basiert dabei auf der neuartigen Interaktionsform zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umwelt bei manueller Fahrt. Hervorzuheben ist, dass die Neigetechnik Fahrspaß nicht nur in seiner Form als proaktives, dynamisches Fahren, sondern auch in seiner Facette als müheloses *Gleiten* (s. Abschnitt 2.2.3.2) adressieren kann.

2.4.2.2 Neue Sichtweise auf Aufbaubewegungen

Mit den genannten Neigetechniksystemen werden auch weiterhin die etablierten Ziele Fahrkomfort und Fahrspaß verfolgt. Wie in der etablierten Fahrwerkstechnik (s. Abschnitt 2.4.1) bleiben die Wankbewegungen Folge und Repräsentant der aktuellen Fahrsituation, da sie weiterhin an die Querbeschleunigung, die Fahrereingabe oder den Straßenverlauf gekoppelt werden.

Die Neigetechniksysteme verdeutlichen jedoch, dass Aufbaubewegungen, respektive Fahrzeugquerneigungen zur Kurveninnenseite den primären Zielsetzungen Fahrkomfort und Agilität durchaus zuträglich sein können. Diese Vereinbarkeit hebt die bisherige Doktrin auf, Wankbewegungen weitestgehend unterbinden zu müssen und ebnet den Weg für neue Gestaltungs- und Nutzungsmöglichkeiten aktiv eingebrachter Wankbewegungen.

3. Aktive Wankbewegungen zur Informationsübertragung an den Fahrer

Die Entwicklungen zur aktiven Neigetechnik zeigen, dass Wankbewegungen im Gegensatz zur etablierten Betrachtungsweise durchaus den Zielen Fahrspaß/-erlebnis und Fahrkomfort zuträglich sein können (s. Abschnitt 2.4). Dieser Paradigmenwechsel lässt die Frage aufkommen, ob auch die Fähigkeit der aktiven Neigetechnik zur Informationsübertragung bisher unterschätzt wurde und sie weiterführend nutzbar ist.

Kern des vorliegenden Konzepts ist es, Bewegungen in den Fahrzeugaufbau einzubringen, welche Informationen an den Fahrer übertragen. Aufbaubewegungen gelten somit als Freiheitsgrad, der auch unabhängig von Fahrereingabe, Straßenverlauf und Fahrzeugbeschleunigung festgelegt und gestalterisch genutzt werden kann. Hierbei werden geplante Aufbaubewegungen erstmals als primärer Informationsträger eingesetzt (vgl. Abschnitt 2.4.1).

Das Konzept sowie Teile des Abschnitts 3.1.1 wurden in [124, 125, 127] vorveröffentlicht und werden mittlerweile in weiteren Forschungsarbeiten untersucht. Diese haben die Rückmeldung von Systemzuständen bei Teilautomation zum Fokus [31, 32, 33]. Aus [31] ist eine Studie zum aktiven *Nicken* hervorzuheben, in welcher 36 Probanden befragt wurden, welche Art rotatorischer Aufbaubewegung einen Fahrstreifenwechsel ankündigen sollte. Abbildung 3.1 zeigt, dass eine Wankbewegung in Richtung des neuen Fahrstreifens stark bevorzugt wird. Dies bestätigt die Expertenmeinung, dass Informationen zur Fahrzeugquerführung auch im vorliegenden Fall mittels Wankbewegung (nicht Nicken/Huben) übermittelt werden sollten.

3.1 Eignung als Anzeige

Die Nutzung des Wankens zur Rückmeldung bei hoher Querbeschleunigung zeigt dessen prinzipielle Eignung zur Informationsübertragung. Bisher galten Wankbewegungen jedoch nicht als Anzeige im eigentlichen Sinne [26], da sie nicht gezielt bzw. gestalterisch eingebracht wurden, sondern meist Folge der Fahrzeugbeschleunigungen waren (s. Kapitel 2.4.1).

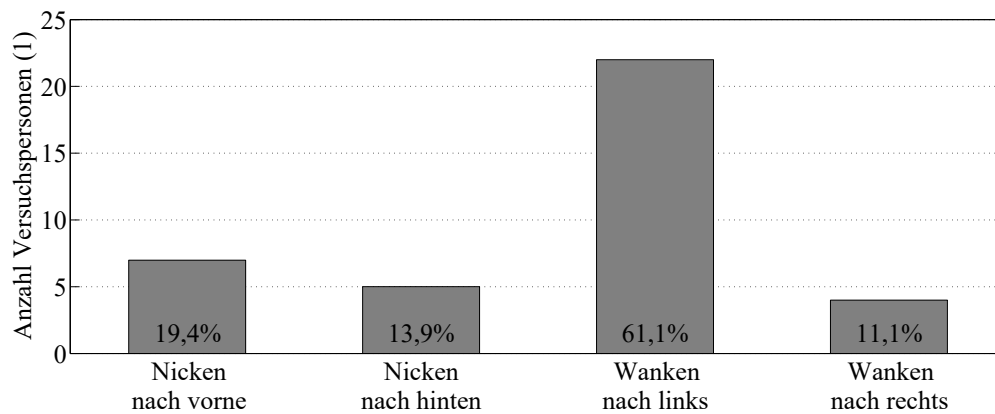


Abbildung 3.1: Befragung von 36 Probanden, mit welcher rotatorischer Aufbaubewegung ein Fahrstreifenwechsel nach links angekündigt werden sollte [31]

3.1.1 Erfüllungsgrad der Anforderungen an FAS-Anzeigen

Um als Anzeige dienen zu können, sind je nach FAS-Kategorie (s. Abschnitt 2.3.1) unterschiedliche Anforderungen zu erfüllen, wobei ausgewählte im Folgenden betrachtet werden³.

- Ausreichende Wahrnehmbarkeit [26]
- Ausreichender Signal-Rausch-Abstand [26]
- Wahrung der Kompatibilität [26]
- Keine unerwünschten oder schreckhaften Reaktionen des Fahrers [176]
- Anzeigen auf Navigationsebene: Müssen Aufmerksamkeit erregen und lokal eindeutig sein [26]
- Anzeigen auf Führungsebene: Müssen im Sichtfeld vor dem Fahrzeug liegen [26]
- Anzeigen für LKA: Müssen unmittelbar der Fahraufgabe zuzuordnen sein [25]

Wahrnehmbarkeit

Wankbewegungen können multimodal über den visuellen, vestibulären und haptischen Kanal wahrgenommen werden. Diese Redundanz ist generell positiv zu werten [26]. Visuell sind sie nur relativ zur Umwelt, jedoch dann unabhängig von der Blickrichtung, zum Beispiel auch durch das Seitenfenster wahrnehmbar. Positiv ist, dass Wankbewegungen auch im Sichtfeld vor dem Fahrzeug und somit ohne Blickabwendung von der Straße wahrnehmbar

³Aspekte dieses Abschnitts sind bereits in [124, 125, 127] vorveröffentlicht.

sind. Werden die Wankbewegungen *in Richtung* der (geforderten) Fahrzeugquerbewegung eingebracht, so wird auch der Fahrzeuginnenraum (z.B. das Armaturenbrett) und die visuell wahrnehmbare [181] Lenkradstellung *relativ zum Umfeld* in diese Richtung rotiert. Der sich ergebende visuelle Eindruck ähnelt dem eines künstlichen Horizonts (s. Abb. 4.2b) und ergänzt die Wahrnehmung der Wankbewegungen durch Bildverschiebungsvektoren [206]. Vestibulär kann die Fahrzeugquerneigung unabhängig von der Blickrichtung über die Wankbeschleunigung, Wankrate und die aus Wankwinkel und Zentrifugalbeschleunigung resultierende Querbeschleunigung wahrgenommen werden [206]. Zudem induziert die Wankbeschleunigung in Abhängigkeit der Wankachse [14] additive Quer- und Vertikalbeschleunigungen, welche vestibulär und haptisch wahrnehmbar sind.

Die multimodale Übertragung über wenig genutzte Kanäle (z.B. vestibulär) verspricht nach der Theorie multipler Ressourcen [204] hohe Leistung bei der Informationsverarbeitung. Die vestibuläre Informationsübertragung ist gegenüber anderen Modalitäten von besonderer Bedeutung (s. Abschnitt 2.3.2.1). Fahrer zeigen sich ihr gegenüber offen [108] und erwarten diese vom FAS [28].

Gestaltungsmöglichkeiten

Um die Informationsaufnahme situativ anzupassen, können gewünschte Modalitäten gezielt in den Vordergrund gerückt werden. Beispielsweise kann die Detektionszeit bei ad-hoc-Informationen verkürzt werden, indem die Wankbeschleunigung erhöht wird (Detektionszeit von 1 s bei $1^\circ/\text{s}^2$; 0,1 - 0,15 s bei $10^\circ/\text{s}^2$ [76]). Da mit den physikalisch messbaren Größen qualitative Attribute (z.B. weicher/ruckartiger Verlauf) und emotionale Attribute (z.B. freundlich/gefährlich) verbunden sind [28], können vermutlich auch diese gezielt an den Fahrer übermittelt werden (z.B. in warnenden FAS). Weiterhin ist der zeitliche Zusammenhang zwischen Wankverlauf und dem relevanten Ereignis ein Gestaltungsparameter. Beispielsweise könnte ein früher einsetzendes Wanken die Detektionszeit und die Reaktionszeit des Fahrers verkürzen.

Kompatibilität

Die Wahrung von Kompatibilität begünstigt eine unmittelbare und zweifelsfreie Interpretation der Information [26] sowie eine einfache Übertragbarkeit auf die Realität. Zwischen Lenkbewegung und Wankbewegung wird Kompatibilität gewahrt, wenn die Wankbewegung *in Richtung* der (geforderten) Fahrzeugquerbewegung eingebracht wird. Dann steht eine Rotation des Fahrzeugaufbaus nach *rechts* für eine Fahrzeugbewegung nach *rechts* und ist kompatibel zur Lenkraddrehung nach *rechts*. Der Zusammenhang *Neigung nach rechts - Bewegung nach rechts* ist aus vielen Bereichen bekannt (Fahrrad, Skifahren, Flugzeug). Unklar ist jedoch, ob diese auf den PKW-Bereich übertragbar sind. Im Neigetechkonzept aus [13]

ist die Fahrzeugquerneigung zur Kurveninnenseite (s. Abb. 3.2) anfangs ungewohnt, findet jedoch nach kurzer Zeit kaum mehr Beachtung. Dies legt die Übertragbarkeit auf bereits



Abbildung 3.2: Querkraftfreies Fahren. Der aktiv eingebrachte Wankwinkel (linkes Fahrzeug) unterscheidet sich deutlich vom Wankwinkel des passiven Fahrwerks (rechts). Bild aus [142]

vorhandene innere Modelle nahe. Die Befragung aus [31], mit welcher rotatorischer Aufbau- bewegung ein Fahrstreifenwechsel nach *links* angekündigt werden sollte, wird zu 61% mit *Wanken nach links* beantwortet (s. Abb. 3.1). Somit scheint eine *Wankbewegung in Richtung der (geforderten) Querbewegung* am geeignetsten, weshalb diese Annahme als Grundlage der weiteren Betrachtungen dient.

Zuordenbarkeit, Erwartungskonformität, Signal-Rausch-Abstand

Durch reaktives Wanken werden bereits Informationen bezüglich der Fahraufgabe übermit- telt (s. Abschnitt 2.4.1). Somit ist anzunehmen, dass auch die Informationen, welche durch aktiv eingebrachte Wankbewegungen übertragen werden, der Fahraufgabe zugeordnet wer- den. Eine abschließende Bewertung erfolgt durch die Probandenstudien in Kapitel 6.

Das reaktive Wankverhalten muss bestehen bleiben, um den bisherigen Informationsfluss aufrechtzuerhalten und um der Erwartung des Fahrers zu entsprechen. Eine ausreichende Abgrenzbarkeit scheint möglich, da FAS-initiiertes Wanken in gegensätzlicher Richtung er- folgt. Zudem kann die Amplitude deutlich unterscheidbar gestaltet werden (im genutzten Versuchsfahrzeug maximal Faktor 10, s. Abschnitt 5.1.2.1). Zur Abgrenzbarkeit trägt ebenso bei, dass sich die Einsatzbereiche von FAS-initiiertem und reaktivem Wanken nicht zwangs- läufig überlappen. Beispielsweise treten mit System *Dynamic Drive* bis zu einer Querbe- schleunigung von 4 m/s^2 kaum reaktive Wankbewegungen auf (s. Abb. 2.5). Im Blick auf reaktive Wankbewegungen durch Unebenheiten der Straßenoberfläche (z.B. Schlagloch, Bo- denwelle) ist von ausreichender Abgrenzbarkeit auszugehen, da diese zwar Aufbaubeschleu- nigungen, jedoch meist nur geringe Wankbewegungen generieren.

Schreckhafte Fahrerreaktionen, Diskomfort

Anzunehmen ist, dass Wankbewegungen unterhalb der Komfortschwellen keine schreckhaften Reaktionen provozieren. Für Neigetechniksysteme zur Querkraftkompensation werden diese mit $4^\circ/\text{s}$ (PKW bei querkraftfreier Fahrt [13]) und $17^\circ/\text{s}^2$ (Richtwert aus dem Zugverkehr [189]) beziffert. Wankbewegungen *ohne* einhergehende Querbewegung werden von Experten bereits bei $4,38^\circ/\text{s}$ bzw. $4,5^\circ/\text{s}^2$ als zu dynamisch empfunden [31]. Da keine Untersuchungen zu schreckhaften Reaktionen vorliegen, wird ihr mögliches Auftreten im Rahmen der Probandenstudien geprüft.

Eine Bewertung des erzeugten Komforts bzw. Diskomforts muss in Abhängigkeit der Zielsetzung des FAS erfolgen. Beispielsweise kann Diskomfort bei seltenen und dringlichen Informationen toleriert werden oder gar gewünscht sein (z.B. einseitiger Bremsengriff als *Lane Departure Prevention*, s. Kapitel 2.3.3.2). Bei dauerhafter Informationsübertragung, wie in kontinuierlich automatisierenden FAS, ist ein Kompromiss zwischen gut wahrnehmbarem Informationsfluss und erzeugtem Diskomfort zu finden. Eine Ausnahme bildet das querkraftfreie Fahren (s. Abschnitt 2.4.2.1), welches den Fahrkomfort erhöht und Potential zur Informationsübertragung bietet (s. Kapitel 4.2.3).

Die bisherigen Erkenntnisse lassen vermuten, dass die Informationsübertragung mittels Wankbewegung nicht zu inakzeptabel hohem Diskomfort führen muss. Auch gibt es in den Untersuchungen aus [13, 32] keine Anzeichen für ein erhöhtes Risiko von Kinetose.

Die Eignung von Wankbewegungen zur Informationsübertragung in FAS wurde bisher vorwiegend auf Basis theoretischer Analysen eingeschätzt. Da keine Untersuchungen zu diesem Thema bekannt sind, wird deren Übertragbarkeit auf die Praxis im Rahmen von Probandenstudien geprüft (s. Kapitel 6). Angemerkt sei, dass sich aktive Nickbewegungen als geeignet erwiesen haben (zuordenbar, verständlich, wenig Diskomfort), um Zustände und Manöver bei Teilautomation rückzumelden [32].

3.1.2 Vergleich mit alternativen Konzepten zur Informationsübertragung

Vorteilhaft gegenüber einer haptischen Informationsübertragung via Lenkrad ist, dass beim aktiven Wanken das Lenkgefühl im engeren Sinne nicht beeinflusst wird und ein ausreichender Signal-Rausch-Abstand gewahrt werden kann (s. Kapitel 2.3.2). Je nach Wankbeschleunigung ist dies bei ähnlich kurzer Detektionszeit möglich (Wanken: $0,1 - 0,15 \text{ s}$ bei $10^\circ/\text{s}^2$ [76], haptisch: $0,1 \text{ s}$ [206]).

Vorteilhaft gegenüber vielen visuellen Anzeigen, mit Ausnahme zum Beispiel des kontaktanalogen *Head-Up-Displays* (kHUD) [25] ist, dass die Information im Sichtfeld vor dem

Fahrzeug ohne erneute Fixation aufgenommen werden kann. Zudem ist sie haptisch und vestibulär auch blickrichtungsunabhängig wahrnehmbar.

Vorteilhaft gegenüber einer akustischen Informationsübertragung ist, dass keine Abhängigkeit von Umgebungsgeräuschen besteht. Zudem kann die Informationsübertragung so gestaltet werden, dass sie von den Mitfahrern kaum wahrgenommen wird (Ausprägung als querkraftfreies Fahren, s. Abschnitt 4.2.3.3). Bei Kurskorrekturen durch das FAS würde dies vermutlich von einigen Fahrer geschätzt, da die Mitfahrer so nicht über die unpräzise Fahrweise informiert werden (Analogie: akustisches Nagelbandrattern [23] verbreitet in Lastkraftwagen, jedoch wenig Kaufinteresse bei PKW [28]).

Bisherige Systeme zur vestibulären Rückmeldung der Fahrzeugquerführung, zum Beispiel die *Lane Departure Prevention* über einseitigen Bremsengriff [149] oder die Zustandsrückmeldung bei Teilautomation aus [107], sind auf eine Kursänderung zur Erzeugung der Quer- bzw. Gierbeschleunigung angewiesen (s. Tabelle 2.1). Dies ist nachteilig, da die Information nur kurzzeitig aufrechterhalten werden kann und die Kursänderung womöglich von anderen Verkehrsteilnehmern fehlinterpretiert wird. Wanken hingegen ermöglicht eine dauerhafte vestibuläre Rückmeldung (konstanter Wankwinkel) und erfordert keinen Querführungseingriff.

3.2 Technische Aspekte und Herausforderungen

Die Einbringung von Wankbewegungen wirkt sich auf verschiedene Fahrzeugbereiche aus. Beispielhaft genannt seien die Positions- und Ausrichtungsänderung der Umfeldsensoren, der Scheinwerferkegel und der Sichtfelder durch Innen- und Außenspiegel. Zudem muss bestehende Software, wie etwa jene des ESC kompatibel gestaltet werden. Ob hierzu Maßnahmen erforderlich sind, wie etwa zum Erhalt der Sichtfelder gemäß gesetzlicher Vorgaben [135]) oder ob bestehende Fahrzeugkonfigurationen genutzt werden können, ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Im Folgenden werden daher lediglich die Kernaspekte *Aktorik* und *Achskinematik* umrissen.

3.2.1 Aktorik

Hauptkriterien bei der Wahl einer geeigneten Aktorik sind die erzielbare Amplitude und Dynamik des Wankverlaufs. Heutige Luftfahrwerke scheiden aufgrund der zu niedrigen Verfahrgeschwindigkeit kategorisch aus, wohingegen in Serie befindliche langsam-aktive Fahrwerke oder aktive Stabilisatoren (kein Huben/Nicken erforderlich) in Betracht kommen. Am geeignetsten erscheinen elektrisch betriebene aktive Stabilisatoren, da sie weniger komplex als langsam-aktive Fahrwerke sind und im Vergleich zur hydraulischen Ausführung geringere Systemkosten sowie einen geringeren Energiebedarf aufweisen [85]. Die Stellwegs-

forderungen sind mit bestehenden Funktionen abzustimmen, wobei sich die Einsatzbereiche nicht zwangsläufig überlappen müssen (z.B. LKA im Komfortbereich, Wankstabilisierung vorwiegend bei hoher Querbeschleunigung).

3.2.2 Achskinematik

Viele Serienfahrzeuge nutzen das Rollsteuern (Änderung des Spurwinkels in Abhängigkeit des Federwegs, s. Kapitel 2.4.1), um einen Lenkeffekt in Richtung des Wankens zu erzeugen. Wird die Radhubkinematik beibehalten, so beeinflussen die Wankbewegungen zur Informationsübertragung ebenfalls die Querführung. Dies widerspricht jedoch der anfangs formulierten Forderung nach Wanken als unabhängigem Freiheitsgrad. Zudem führt das *Wanken in Richtung der (geforderten) Querbewegung* dann zu positiveren Sturzwinkeln an den kurvenäußeren Rädern, was die übertragbare Seitenkraft verringert [85].

Vermieden werden kann dies durch eine Anpassung der Radhubkinematik oder durch Systeme zur aktiven Spur-/Sturzverstellung (z.B. *TWIN* [175]). Kostengünstiger ist es, den stellbaren Wankwinkel zu beschränken, um den Lenkeffekt und die Reduktion des Seitenkraftpotentials gering zu halten. Um die erforderlichen Maßnahmen abschätzen zu können, ist zunächst der Wankverlauf zu ermitteln, welcher zur Übertragung der gewünschten Information mindestens benötigt wird.

Der Lenkeffekt infolge Wankens kann jedoch auch gezielt genutzt werden, um eine Gierwirkung zu erzeugen [164]. Auf diese Weise wird in Kapitel 5.2.3 ein vom Lenkrad entkoppelter Querführungsaktor emuliert.

Abschließend ist festzuhalten, dass PKW mit Neigetechnik, wie etwa das *Mercedes-Benz S-Klasse Coupé* [4] bereits in Serie produziert werden. Dies verdeutlicht, dass das Konzept trotz des mutmaßlich hohen Aufwands bereits heute technisch und wirtschaftlich umsetzbar und damit von unmittelbarer Praxisrelevanz ist.

3.3 Potential für FAS

Die Informationsübertragung mittels Wankbewegung bietet hohe Leistung bei der Informationsaufnahme (multimodal, vestibulärer/haptischer Kanal kaum genutzt, geringe Detektionszeit). Wankbewegungen sind im Sichtfeld vor dem Fahrzeug sowie unabhängig von Blickrichtung und Umgebungsgeräuschen wahrnehmbar. Einhergehender Diskomfort kann, zum Beispiel bei seltener, dringlicher Information akzeptiert oder durch eine geeignete Gestaltung des Wankverlaufs vermieden werden. Für letzteres beispielhaft steht das querkraftfreie Fahren, welches den Fahrkomfort erhöht [13] und gleichzeitig Potential zur Informationsübertragung bietet (s. Kapitel 4.2.3). Da auch von Kompatibilität, Zuordenbarkeit der Infor-

mation sowie ausreichendem Signal-Rausch-Abstand auszugehen ist, erfüllen Wankbewegungen wichtige Anforderungen an FAS-Anzeigen.

Der Wankverlauf ist in Grenzen frei definierbar, weswegen er dem Informationscharakter aller drei Ebenen der Fahrzeugführung [43] entsprechen kann (z.B. unmittelbares, häufiges Wanken für Informationen auf Stabilisierungsebene; zeitlich vorseilendes, lange aufrecht gehaltenes Wanken für Informationen auf Navigationsebene). Zudem können die Informationsaufnahme (Detektionszeit, Modalität) und die übermittelbare emotionale Qualität (freundlich/gefährlich) anforderungsgemäß gestaltet werden. Technisch und ökonomisch ist die Einbringung von Wankbewegungen in Grenzen bereits heute möglich.

Insgesamt scheinen die Einsatzmöglichkeiten von Wankbewegungen zur Informationsübertragung breit gefächert. Jedoch liegen kaum Untersuchungen vor, welche die Gültigkeit der bisher meist theoretischen Überlegungen belegen. In Probandenstudien wird daher untersucht, ob und in welchen Bereichen das Konzept geeignet ist, um aktuelle Schwächen in der Informationsübertragung vom FAS zum Fahrer zu beheben (s. Abschnitt 2.3.2). Zudem wird die Eignung zur Rückmeldung entkoppelter FAS-Eingriffe evaluiert (s. Abschnitt 2.3.3.2).

4. Anwendung auf Fahrerassistenzsysteme der Fahrzeugquerführung

Das Potential des Konzepts (s. Abschnitt 3.3) und dessen Vorteile gegenüber bisherigen Anzeigen (s. Abschnitt 3.1.2) konnten nur theoretisch begründet werden, da kaum Untersuchungen zum Thema bekannt sind. Um die Aussagen zu validieren, wird das Konzept in einem breiten Ansatz auf exemplarische informierende, warnende und kontinuierlich automatisierende FAS mit Schwächen in der Informationsübertragung angewandt und im Rahmen von Probandenstudien evaluiert. Die Eignung in den exemplarisch gewählten Funktionen gibt einen Hinweis auf die Eignung des Konzepts für die jeweilige FAS-Kategorie. Eine Nutzung in eingreifenden Notfallfunktionen, zum Beispiel als Übernahmeaufforderung in Nothaltesystemen [123], ist ebenfalls denkbar. Eingreifende Notfallfunktionen werden jedoch nicht thematisiert, da in dieser Arbeit das Zusammenspiel von Fahrer und FAS im Fokus steht.

4.1 Informierende und warnende Funktionen

Um das Konzept in einem möglichst breitem Spektrum prüfen zu können, werden exemplarische FAS mit konträrem Informationscharakter gewählt (s. Tabelle 4.1)⁴. In der Funktion

Tabelle 4.1: Konträrer Informationscharakter der exemplarisch gewählten informierenden und warnenden Funktionen. Angepasst aus der Vorveröffentlichung in [124]

	Navigation Instruction	Front Collision Avoidance / Lane Departure Warning
Fahrerhandlung auf	Navigationsebene	Führungsebene
Zeitlicher Versatz zur Fahrerhandlung	Hoch (2 - 3 s im kHUD [26])	Sehr niedrig
Art der Information	Niedrige Dringlichkeit / Langes Interesse	Hohe Dringlichkeit / Schnelle Reaktion vonnöten
Interpretation durch den Fahrer	Rein informierend	Zu sofortiger Handlung anleitend

⁴Aspekte dieses Kapitels sind bereits in [124] vorveröffentlicht.

Navigation Instruction (NI) muss die Wankbewegung als rein informierend interpretiert werden, wohingegen sie in den Funktionen *Front Collision Avoidance (FCA)* und *Lane Departure Warning (LDW)* zu einer unmittelbaren Handlung anleiten sollte. Ähnliche Zielsetzungen werden bereits erfolgreich mit *reaktiven* Wankbewegungen verfolgt, welche Informationen bzw. Handlungsaufforderungen bei hoher Querschleunigung übertragen (s. Abschnitt 2.4.1). Die Wahl von FCA und LDW dient der Untersuchung, ob Handlungsaufforderungen sowohl bei vorausliegenden (FCA) als auch seitlichen Ereignissen (LDW) möglich sind. Da kein Eingriff in die Fahrzeugführung erfolgt, reduziert sich der Informationsfluss gemäß Abbildung 4.1. Im Folgenden werden die Schwächen bisheriger Ansätze sowie die potentiellen Vorteile bei einer Informationsübertragung mittels aktiver Wankbewegung aufgezeigt.

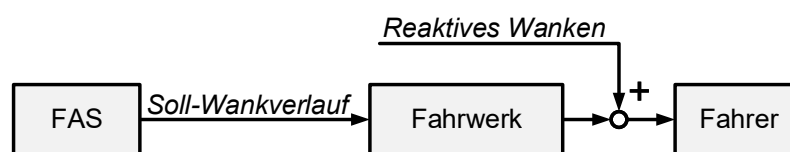


Abbildung 4.1: Informationsfluss bei Informationsübertragung mittels aktiver Wankbewegung in informierenden und warnenden Funktionen

4.1.1 Navigation Instruction (NI)

Die Aufnahme visueller und akustischer Navigationshinweise kann bei hoher Fahrerbeanspruchung beeinträchtigt sein. Zudem lenkt die akustische Informationsaufnahme von der Fahraufgabe ab [28]. Im Kreisverkehr zum Beispiel wird die Aufnahme visueller Navigationshinweise durch häufige Blickabwendungen bei Ein- und Ausfahrt sowie beim Fahrstreifenwechsel beeinträchtigt. Zugleich weist die akustische Information, respektive die Zahlenkodierung der jeweiligen Ausfahrt hohe Komplexität auf.

Wankbewegungen bieten das Potential die Informationen unabhängig von der Blickrichtung zu übertragen und die Aufmerksamkeit des Fahrer auch bei hoher Beanspruchung zu erlangen, da man nicht "wegfühlen" [28, S. 172] kann.

4.1.2 Front Collision Avoidance (FCA)

Bisherige Empfehlungen zu einem vom Fahrer durchzuführenden Ausweichmanöver basieren häufig auf haptischen Informationen, wie zum Beispiel der Überlagerung eines Lenkmoments. Nachteilig ist, dass dies zu einem reflexartigen Halten und Gegensteuern [190] und zu Unklarheiten über die Hoheit der Fahrverantwortung führen kann [183, 184].

Wankbewegungen ermöglichen ebenfalls eine blickrichtungsunabhängige, gerichtete und schnelle Informationsaufnahme. Zudem ist der emotionale Charakter *gefährlich* übermittelbar [28]. Vorteilhaft ist weiterhin, dass das Lenkgefühl im engeren Sinne nicht beeinflusst

wird, weshalb die bisherigen Nachteile einer unklaren Fahrverantwortung sowie eines reflexartigen Haltens und Gegensteuerns vermutlich nicht auftreten.

4.1.3 Lane Departure Warning (LDW)

Die Informationsübertragung erfolgt häufig haptisch via Lenkrad und kann bei Fehlinterpretation zu falscher Lenkreaktion führen. Beispielsweise lenken 50% der Probanden in [190] bei einer Kombination aus Lenkradvibration und gerichteter Lenkmomentenempfehlung in die falsche Richtung. Zudem wird ein solches Signal bereits als zu komplex empfunden und stößt daher auf geringe Akzeptanz [50]. Die starke Abhängigkeit der Wirkung von der Signalgestaltung kann somit nachteilig sein.

Eine Warnung mittels Wankbewegungen hingegen gilt unter theoretischen Gesichtspunkten als verständlich. So ist die Zuordenbarkeit zur Fahraufgabe gegeben, die Kompatibilität gewahrt und der Zusammenhang *Wanken in Richtung der (geforderten) Bewegungsrichtung* bereits aus vielen Bereichen bekannt (s. Kapitel 3.1.1). Selbst wenn dies nur auf einen Teil der Fahrer zutrifft, ist aufgrund des unbeeinflussten Lenkgefühls im engeren Sinne davon auszugehen, dass beim anderen Teil zumindest keine nachteilige Lenkreaktion hervorgerufen wird, was bereits ein Vorteil wäre.

4.1.4 Festlegung der Wankbewegung

Es sind keine Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Wankverlauf und übertragener Information bekannt, weshalb dieser anhand theoretischer Überlegungen festgelegt wird. In den Funktionen FCA und LDW scheint es aufgrund der hohen Dringlichkeit der Information zweckmäßig zunächst die Aufmerksamkeit des Fahrers zu erregen und anschließend die beabsichtigte Information zu übertragen. Dies gilt auch für die Funktion NI, da Schwächen bestehender Konzepte insbesondere bei hoher Beanspruchung und Ablenkung des Fahrers zutage treten.

1. Aufmerksamkeit erregen (*Steiler Anstieg des Wankverlaufs mit abruptem Ende*)

Bei dringlicher Informationen ist die haptische/vestibuläre Modalität in den Vordergrund zu rücken [25]. Die Wankbeschleunigung sollte hoch sein, um eine geringe Detektionszeit zu erzielen [76]. Zudem geht die vestibuläre Information dann mit dem Attribut *gefährlich* einher und steht wie in [28] gefordert in enger Parallelität zur visuellen Analyse, welche aufgrund des drohenden Hindernisses bzw. der nahenden Fahrstreifenmarkierung ebenfalls *Gefahr* erkennen lässt. In [32] wird unter ähnlichen Randbedingungen gezeigt, dass aktive Nickbewegungen bei höherer Nickrate deutlicher wahrgenommen werden.

Um Aufmerksamkeit zu gewinnen, scheint es daher sinnvoll, einen möglichst steilen

Anstieg des Wankwinkels mit abruptem Ende zu wählen. Letzteres erzeugt nochmals eine vestibuläre und haptische Information, was vorteilhaft sein dürfte.

2. Richtungsinformation übertragen (*Stationärer Wankwinkel*)

Der Wankwinkel wird anschließend gehalten, um die Richtungsinformation zu übertragen. Auf eine Ermittlung der erzielbaren Auflösung durch Untersuchung verschiedener Amplituden der Wankbewegung wird vorerst verzichtet. Zunächst wird geprüft, ob eine binäre Richtungsinformation (links/rechts) übertragbar ist. Der Wankwinkel wird gehalten bis das Ereignis passiert oder bis die gewünschte Lenkreaktion eingeleitet wurde. Anzumerken ist, dass die Richtungsinformation auch aus der Richtung des Wankwinkelanstiegs entnommen werden kann.

Hinsichtlich der quantitativen Festlegung des Wankverlaufs liegen zu beiden Zielsetzungen kaum Erkenntnisse vor, weshalb konservativ vorgegangen wird und Komfortaspekte vorerst unberücksichtigt bleiben. Somit sollte der Wankwinkelanstieg die Komfortschwellen (s. Kapitel 3.1.1) deutlich überschreiten und der stationär gehaltene Wankwinkel möglichst groß sein.

4.2 Kontinuierlich automatisierende Funktionen

Mit der Informationsübertragungen über Wankbewegungen steht erstmals ein Konzept zur Verfügung, um potentiell auch große, lang andauernde entkoppelte FAS-Eingriffe an den Fahrer rückzumelden⁵. Die Vorteile entkoppelter Eingriffe (s. Kapitel 2.3.3.2) könnten somit erstmals auch in diesem Eingriffsspektrum erschlossen werden. Beispielsweise wären auch bei Sekundenschlaf LKA-Eingriffe möglich. Zugleich würden Schwächen bisheriger Konzepte, wie etwa die Fahrerbevormundung beim LKA mit *Summenpunkt Lenkrad* [161] vermieden.

Um die Eignung des Konzepts zu untersuchen, wird es auf die Funktionen *Lane Keeping Assistant (LKA)* sowie *triggered Lane Change Assistant (tLCA)* angewandt. Letztere bezeichnet eine Funktion, welche mittels Fahrtrichtungsanzeiger aktiviert wird und via Rückraumüberwachung prüft, ob ein Fahrstreifenwechsel möglich ist. Falls ja, wird dieser analog zur Funktionsweise des LKA assistiert. Falls der Rückraum belegt ist, wird die Anforderung des Fahrers ignoriert. Die Funktion tLCA wird hinzugezogen, um auch engere Radien und andere Regelungsarten des Fahrers untersuchen zu können. So wird der Fahrstreifenwechsel bevorzugt mit einer Beschleunigungssteuerung statt einer Lage- und Geschwindigkeitssteuerung durchfahren [206, 208] (s. Abschnitt 2.2.2).

⁵Aspekte dieses Kapitels sind bereits in [125, 127] vorveröffentlicht.

4.2.1 Wankbewegung zur Rückmeldung entkoppelter Eingriffe

Aufgabe der Wankbewegung ist es, entkoppelte Eingriffe derart rückzumelden, dass die aus FAS-Eingriff und Lenkradstellung resultierende Fahrzeugbewegung plausibel erscheint. Zudem muss sie den Fahrer zu einem passenden Korrekturlenkwinkelverlauf anleiten können. Dies erfordert eine rechtzeitige, gegebenenfalls vorausseilende Informationsübertragung mit ausreichender Auflösung. Der Erfüllungsgrad dieser Anforderungen bestimmt das erschließbare Eingriffsspektrum und somit das Potential des vorgestellten Ansatzes.

Die Entkopplung vom FAS-Eingriff erlaubt es, den Wankverlauf frei festzulegen. Da zu dessen Gestaltung kaum Anhaltspunkte vorliegen, erfolgt zunächst eine theoretische Betrachtung der relevanten Fragestellungen:

- *Welche Eingriffe müssen rückgemeldet werden?*
(Abschnitt 4.2.1.1)
- *Welche Messgröße sollte die Eingriffe repräsentieren?*
(Abschnitt 4.2.1.2)
- *Wie sollte der Wankverlauf an die Messgröße gekoppelt werden?*
(Abschnitt 4.2.1.3)

4.2.1.1 Eingriffe mit erforderlicher Rückmeldung

Aufgrund des Zielkonflikts zwischen konsistenter Fahrzeugbewegung und Fahrkomfort sollten nur diejenigen FAS-Eingriffe mittels Wankbewegung rückgemeldet werden, die ansonsten zu inkonsistenter Fahrzeugbewegung führen würden. Je nach Zielsetzung der FAS-Eingriffe sind diese unterschiedlich zu handhaben:

- *Störgrößenkompensation (Stabilisierungsebene)*
Die Eingriffe dienen dem Erhalt des Fahrzeugkurses, zum Beispiel bei Seitenwind oder einer quergeneigten Fahrbahn [164] und führen somit nicht zu Abweichungen von der Fahrervorgabe. Inkonsistenzen sind möglicherweise zu erwarten, wenn die Störung auch vom Fahrer wahrgenommen und die ausbleibende Kursänderung im Konflikt zu dessen Erwartungshaltung steht (z.B. antizipatorische Lenkkorrektur bei Straßenverwindung). Bekannt ist, dass dies bei Eingriffen von bis zu 2° Lenkradwinkeläquivalent [187] bzw. einer zu kompensierenden Gierrate von bis zu $2^\circ/s$ [164] noch nicht zu beobachten ist.
- *Abstimmung mit Fahrer bei Bahnfolgeregelung (Stabilisierungsebene)*
Diese Eingriffe finden nur bei simultaner Fahrzeugführung, zum Beispiel als Reaktion auf Lenkeingaben des Fahrers statt und führen zu Abweichungen von der Fahrervorgabe. Hierzu sind keine expliziten Untersuchungen bekannt. Auch die Systeme aus

[164, 187] wurden ohne Fahrereingabe untersucht. Naheliegender ist, dass alle wahrnehmbaren Eingriffe auch rückgemeldet werden sollten, um eine Abstimmung zu ermöglichen.

- *Vorgabe einer Soll-Bahn (Führungsebene)*

Dies betrifft Eingriffe, welche beispielsweise in eine Kurve einlenken oder der Soll-Bahn eines aktiv assistierten Fahrstreifenwechsels entsprechen. Hierzu sind keine expliziten Untersuchungen bekannt. Gemäß [187] führen sie jedoch zu inkonsistenter Fahrzeugbewegung, weswegen vermutlich alle wahrnehmbaren Eingriffe auch rückzumelden sind.

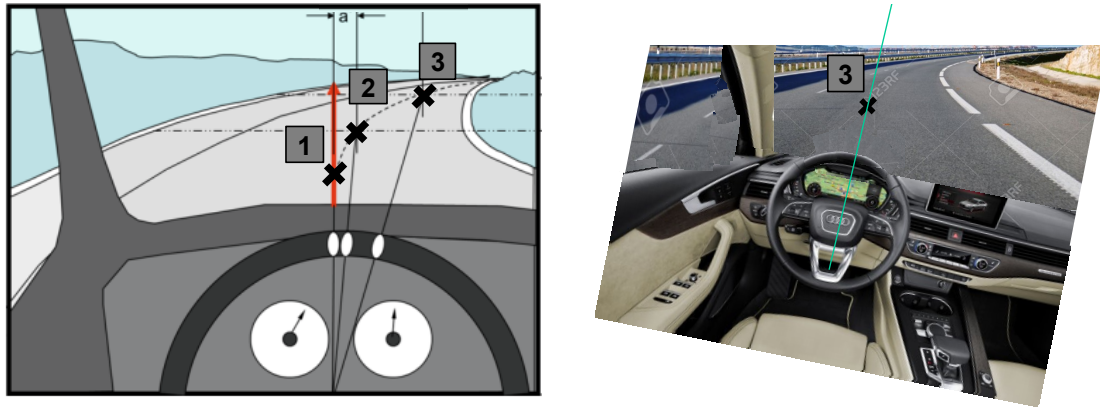
Die einzubringenden Wankbewegungen lassen sich somit reduzieren, indem Eingriffe zur Störungskompensation nicht rückgemeldet werden. Zudem kann eine alternative Übernahme der Querführungsaufgabe gewählt werden, weil dann keine Wankbewegungen zur Abstimmung auf Stabilisierungsebene erforderlich sind.

4.2.1.2 Messgrößen zur Repräsentation des Eingriffs

Einsichtig scheint es, die rückzumeldenden Eingriffe durch Größen zu repräsentieren, welche dem Fahrer bereits als Eingangsgrößen aus der Querführung bekannt sind.

Lenkradwinkeläquivalent Der Wankwinkel kann identisch zum Lenkradwinkelverlauf ausgeprägt werden, welcher zum gleichen Eingriff führen würde. Zur Kompensation des FAS-Eingriffs muss das Lenkrad dann lediglich bei 0° relativ zum Umfeld gehalten werden. Falls nur durch den FAS-Eingriff gelenkt wird, richtet die Wankbewegung das Lenkrad bei unveränderter Stellung relativ zum Innenraum erwartungskonform [24] auf den *aim-point* aus (s. Abb. 4.2). Nachteilig ist, dass die Fahrzeugquerneigung die Fliehkräfte insbesondere bei niedriger Geschwindigkeit überkompensiert, was zu Diskomfort führt [13].

Bewegungsgrößen (Gierrate, Querbeschleunigung) Die Eingriffe können auch durch die Änderung von fahrdynamischen Zustandsgrößen repräsentiert werden, welche die Eingriffe ohne Fahrerzutun hervorrufen würden. Eine Kopplung an die Querbeschleunigung kann beispielsweise den Fahrkomfort erhöhen (Querkraftkompensation [13]). Jedoch ist die quadratische Abhängigkeit zur Fahrzeuggeschwindigkeit für die Informationsübertragung nachteilig, da bei geringer Geschwindigkeit möglicherweise nur ein unzureichend wahrnehmbarer Wankwinkel gestellt wird. Da eine geschwindigkeitsunabhängige Ausprägung aufgrund der drohenden Überkompensation ebenfalls von Nachteil ist (s. Ausprägung *Lenkradwinkeläquivalent*), könnte auch ein linearer Zusammenhang, wie zum Beispiel eine Kopplung an die Gierrate gewählt werden.



(a) Manuelle Fahrt: Lenkradausrichtung auf den *aim-point* (Zeitpunkte 1-2-3). Angepasst aus [24]

(b) Funktion LKA: Erwartungskonforme Lenkradausrichtung auch ohne Drehung relativ zum Innenraum. Angepasst aus [117, 132]

Abbildung 4.2: Kurvenfahrt mit Funktion LKA ohne Fahrerzutun (Lenkwirkung über entkoppelten FAS-Eingriff, Rückmeldung via Wanken in Höhe des Lenkradäquivalents des FAS-Eingiffs). Auch ohne Lenkraddrehung ist dessen Stellung konsistent zur Fahrzeugbewegung. Vorveröffentlicht in [126, S. 10]

4.2.1.3 Zusammenhang zwischen Wankverlauf und gewählter Messgröße

Der Zusammenhang zwischen Wankverlauf und gewählter Datenbasis kann beispielsweise proportional, gemäß einer Übertragungsfunktion oder situationsabhängig ausgeprägt werden. Neben dem Wankverlauf sind auch der Zeitversatz zum Eingriff sowie die Wankachse Gestaltungsparameter [13].

Mittels einer Übertragungsfunktion können hochdynamische Eingriffe gesondert berücksichtigt werden. Beispielsweise kann eine überproportionale Amplitude oder ein zeitlich stark vorseilender Verlauf ausgeprägt werden. Eine Ergänzung um situationsabhängige Informationen bietet die vielversprechende Möglichkeit Funktionsgrenzen, wie das Erreichen des maximalen FAS-Eingriffs oder des maximalen Wankwinkels zu übermitteln. Auch können Umfeldinformationen miteinfließen, was der Informationsübertragung in informierenden und warnenden FAS ähnelt. Ein Beispiel für potentiell sinnvolle additive Information liefert Abbildung 4.3.

Vor der Ermittlung eines optimalen Zusammenhangs sollte untersucht werden, ob Wankbewegungen grundsätzlich geeignet erscheinen, um entkoppelte Eingriffe rückzumelden. In dieser Arbeit werden die Funktionen LKA/tLCA in zwei Formen der Aufgabenübernahme durch Fahrer und FAS ausgeprägt und jeweils ein vielversprechender Wankverlauf festgelegt. Anhand dieser exemplarischen Funktionsausprägungen wird durch Probandenstudien der Nutzen des Konzepts abgeschätzt.

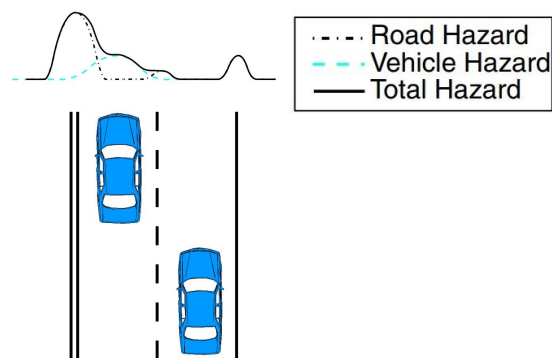


Abbildung 4.3: Ergänzung des Wankverlaufs um situative Informationen, wie etwa das Risiko durch ein entgegenkommendes Fahrzeug und die nahende Fahrstreifen- bzw. Fahrbahnbegrenzung. Veranschaulicht anhand des Querschnitts einer Potentialfeldfunktion gemäß [165, 170]. Bild angepasst aus [170]

4.2.2 LKA / tLCA mit variabler Aufgabenübernahme

Das Konzept aus entkoppelten FAS-Eingriffen und deren Rückmeldung via Wanken erlaubt für die Funktionen LKA / tLCA eine Struktur, welche sich je nach Fahrerverhalten fließend zwischen simultaner und alternativer Aufgabenübernahme bewegt (s. Abschnitt 2.3.1.2). Dies verspricht Vorteile gegenüber der bisher meist simultanen Aufgabenausführung.

4.2.2.1 Struktur

Zur parallelen Aufgabenausführung durch Fahrer und FAS wird ein *shared-control*-Ansatz [74, 129] ohne kooperative Ausprägung gewählt. Es erfolgt kein Informationsfluss vom Fahrer zum FAS. Kooperative Lösungen wären zwar für den Funktionsnutzen von Vorteil, jedoch würden die zu bewertenden konzeptbedingten Unterschiede hierdurch verschleiert. Beispielsweise werden bestehende Schwächen, wie etwa die Fahrerbevormundung am Lenkrad (s. Abschnitt 2.3.3.1) mit dem vorgestellten Ansatz *konzeptbedingt* vermieden, da die FAS-Eingriffe vom Lenkrad entkoppelt sind. Beim *Summenpunkt Lenkrad* hingegen mindern kooperative Lösungen die Fahrerbevormundung. Beispielsweise wird das FAS-Moment bei gegenläufigem Fahrerhandmoment reduziert [6]. Um die konzeptbasierten Unterschiede erfassen und bewerten zu können, werden die Funktionen LKA / tLCA daher möglichst puristisch ausgeprägt und gegenübergestellt. Einhergehende Folge ist, dass konzeptionelle Vergleichbarkeit herrscht, jedoch die Systembewertung nicht der jeweils optimalen Ausprägung entspricht, da die Vorteile kooperativer Ansätze nicht miteinfließen.

Abbildung 4.4 stellt den resultierenden Informationsfluss dar. Fahrer und FAS besitzen einen separaten Durchgriff auf die Stabilisierungsebene, wobei dem entkoppelten FAS-Eingriff im Gegensatz zu [164, 187] ausreichend Potential eingeräumt wird, um die Querführung

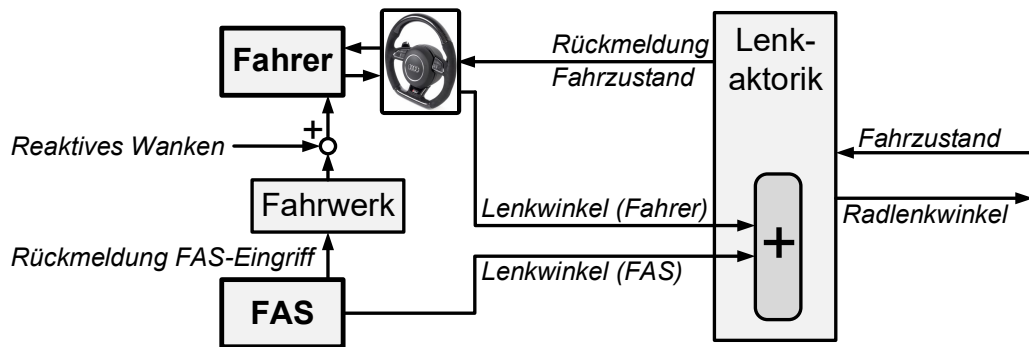


Abbildung 4.4: Informationsfluss der Funktionen LKA/tLCA bei variabler Aufgabenübernahme. Nicht dargestellt ist die Aktivierung der Funktion tLCA mittels Fahrtrichtungsanzeiger. Vorveröffentlicht in [125, 127]. Icon aus [140]

auch alleinig zu bewerkstelligen. Entsprechend vorangegangener Überlegung erfolgt kein Informationsfluss vom Fahrer zum FAS, weshalb Lenkeingaben des Fahrers nicht in die Regelstrategie des FAS einfließen, wie etwa zum Abbruch eines fehlerhaften FAS-Eingriffs, sondern als Störgrößen aufgefasst werden. Die resultierende Konkurrenz um die Fahrzeugbewegung wird für den Fahrer übersteuerbar, indem der maximale FAS-Eingriff begrenzt wird. Analog hierzu wird beim *Summenpunkt Lenkrad* das maximale FAS-Moment beschränkt.

Aufgabenausführung durch Fahrer und FAS Weil das FAS die Querführung auch alleinig bewerkstelligen kann, steht es dem Fahrer frei ob und wie stark er mitlenken möchte. Er kann das FAS lediglich überwachen oder aktiv regelnd eingreifen, wodurch den Gestaltungszielen eines FAS, wie etwa der Entlastung von lästigen Aufgaben und dem Angebot fahrrelevanter Funktionen [28] nachgekommen wird. Die Struktur schafft demnach einen fließenden Übergang zwischen simultaner und alternativer Aufgabenübernahme. Je nach Fahrerbeteiligung liegt somit auch das Situationsbewusstsein, welches durch die motorische Betätigung teilweise erhalten wird [28] sowie die Fehlerwahrscheinlichkeit zwischen denjenigen der simultanen und alternativen Aufgabenübernahme. Im Fehlerfall können beide Akteure (Fahrer, FAS) autark eingreifen, sodass der Fehler des einen vom anderen kompensiert werden kann. Ein Beispiel hierfür ist die Assistenz bei Sekundenschlaf.

Abgrenzung, Kategorisierung und Bezeichnung der Struktur Analog zur alternativen Aufgabenübernahme (s. Abschnitt 2.3.1.2) überträgt der Fahrer eine Teilaufgabe an das FAS und überwacht deren Ausführung. Im Unterschied zur alternativen Ausführung kann sich der Fahrer, sofern gewünscht oder erforderlich mit einem Lenkeingriff an der Informationsumsetzung beteiligen, ohne dass das FAS hierdurch deaktiviert wird. In fließenden Übergängen kann er sich von kleinen Korrekturen bis hin zu einer dominanten Kursvorgabe einbringen und wieder zurückziehen. Falls er nicht tätig ist, ruht das Lenkrad. So wird er auch nicht

passiv, zum Beispiel durch das Mitführen seiner Hände und Arme am sich drehenden Lenkrad an der Informationsumsetzung beteiligt. Diese Betriebsart unterscheidet die Struktur von simultan arbeitenden FAS, in welchen der Fahrer die Teilaufgabe ständig und nach wie vor selbst ausübt [25] (s. Abschnitt 2.3.1.2).

Im Unterschied zum Konzept *H-Mode* (z.B. [59]), ändert sich der Einfluss der Automation mit dem Fahrereingriff nicht und es findet kein Informationsaustausch über das Bedienelement statt. Da die Aufgabenzuteilung zwischen Fahrer und FAS gleich bleibt, unterscheidet sich das System vom Vorschlag einer dynamischen Aufgabenverteilung in Abhängigkeit der Fahrerbelastung [88]. Das System ähnelt dem *mutual mode* aus [89]. Im Gegensatz zum dortigen Verständnis des *mutual mode* kritisiert das FAS jedoch keine Fahrerentscheidungen im Fall von Grenzüberschreitungen (reagierend, feedback), sondern greift unabhängig vom Fahrerzutun dauerhaft und mit eigener Zielsetzung ein.

Die Beispiele zeigen, dass die Struktur nicht vollständig zutreffend in bekannte Schemata einordenbar ist, weshalb eine eigene Bezeichnung gewählt wird. Kennzeichnend erscheint der fließende Übergang zwischen *alternativer* und *simultaner* Aufgabenausführung, weshalb die Struktur im Weiteren als *variable* Aufgabenübernahme bezeichnet wird.

4.2.2.2 Zusammenhang zwischen Eingriff und Wankwinkel

Bei simultaner Aufgabenübernahme sind FAS-Eingriffe zur Bahnfolgeregelung (Stabilisierungsebene) und Bahn-Vorgabe (Führungsebene) rückzumelden, wohingegen jene zur Störgrößekompensation keiner Rückmeldung bedürfen (s. Kapitel 4.2.1.1). Da nicht bekannt ist, ab welcher Größenordnung dies erforderlich ist, werden vorerst sämtliche Eingriffe rückgemeldet. Bei der gemeinsamen Querregelung kommt der Abstimmung zwischen Fahrer und FAS besondere Bedeutung zu. Diesbezüglich vorteilhaft scheint eine Wankbewegung in Höhe des Lenkradwinkeläquivalents des FAS-Eingriffs, da der Eingriff dann potentiell leichter kompensierbar ist und das Lenkrad auch ohne Fahrerzutun erwartungskonform auf den *aim-point* ausgerichtet wird (s. Abschnitt 4.2.1.2). Die einhergehenden Komfortnachteile werden vorerst in Kauf genommen.

Um als zeitgleich wahrgenommen zu werden, sollte der Wankverlauf dem FAS-Eingriff maximal 0,1 s [206] bis 0,2 s [26] nacheilen. Aufgrund der Entkopplung zwischen Eingriff und Rückmeldung ist auch eine vorausseilende Rückmeldung möglich. Diese könnte die Reaktionszeit des Fahrers zum Teil kompensieren und ist auch aus Komfortgründen zu bevorzugen. Für letzteres gilt ein um 0,1 s vorausseilender Wankverlauf als optimal [13].

4.2.2.3 Interaktion zwischen Fahrer und FAS

Zur Veranschaulichung der Interaktionsmöglichkeiten zwischen Fahrer und FAS werden drei exemplarische Fälle ausgewählt und im Detail betrachtet.

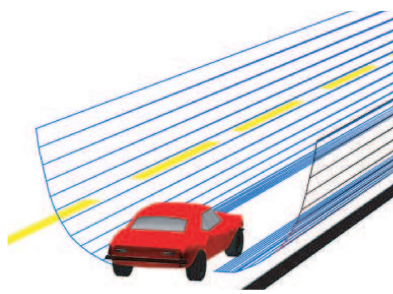
Kurvenfahrt ohne Fahrerzutun (alternativer Betrieb) In diesem Fall wird der zur Kurvenfahrt notwendige Lenkwinkel alleinig vom FAS gestellt. Das Lenkrad bleibt in Mittenstellung, respektive im bevorzugten Bereich des *On-Center-Handlings* [30]. Es wird durch die Fahrzeugquerneigung relativ zum Umfeld auf den *aim-point* und damit konsistent zur Fahrzeugbewegung ausgerichtet (s. Abb. 4.2).

Fahrer lenkt in Richtung des FAS-Eingriffs (simultaner Betrieb) Die erforderliche Lenkwirkung wird teils vom Fahrer, teils vom FAS eingebracht. Das Lenkrad wird durch die Summe aus Fahrereingabe und Drehung relativ zum Umfeld infolge der Wankbewegung erwartungskonform auf den *aim-point* ausgerichtet.

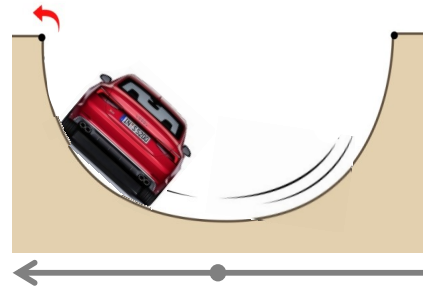
Fahrer lenkt gegen den FAS-Eingriff (simultaner Betrieb) Lenkeingaben des Fahrers werden als Störgrößen aufgefasst, weshalb das FAS entgegensteuert, um die Soll-Bahn zu halten. Da die Wankbewegung an das Lenkradäquivalent des FAS-Eingriffs gekoppelt ist, erhöht sich hierdurch auch der Wankwinkel. Für den Fahrer ergibt sich der Eindruck einer Fahrt in einer Wanne, welche sich entlang der Soll-Bahn des FAS erstreckt. Deren Form wird durch das Querregelungskonzept festgelegt und ist in Abbildung 4.5 exemplarisch für einen Potentialfeldansatz [165, 170] dargestellt. Anzumerken ist, dass der in den Probandenstudien gewählte Querregelungsansatz (s. Kapitel 5.2.1) eine ähnliche Form ausprägt [191].

Bei einer Lenkbewegung nach links wird das Fahrzeug an die Seitenwand der Wanne und weiterhin entlang deren Richtung geführt, da die Fahrereingabe vom FAS vollständig kompensiert wird (s. Abb. 4.5b). Falls der Querregler einen integrativen Anteil besitzt, wird die Seitenwand zunehmend steiler und erschwert es, den lateralen Versatz zu halten, da kontinuierlich mehr Lenkwinkel/-moment erforderlich wird und der Diskomfort infolge der Querneigung steigt. Reduziert der Fahrer die Lenkeingabe wieder, so verringert sich der FAS-Eingriff und das Fahrzeug rutscht die Seitenwand in Richtung Wannenmitte hinab. Beim Übersteuern des LKA, zum Beispiel aufgrund eines Fahrstreifenwechsels wird ein Hinabrutschen in die Wanne des Nachbarfahrstreifens emuliert. Der Wankverlauf entspricht dabei dem Verlauf der Gefahrenkarte aus [165] (s. Abb. 4.5c). Bei der Funktion tLCA krümmt sich der Verlauf der Wanne entlang der Soll-Bahn des assistierten Fahrstreifenwechsels und geleitet das Fahrzeug in den neuen Fahrstreifen.

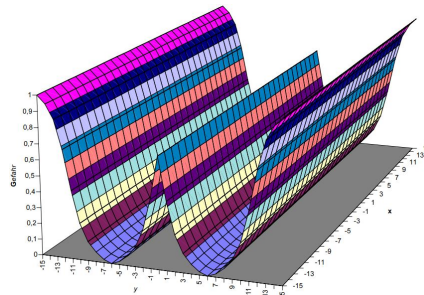
Das Bild eines wannenförmigen bzw. "tonnenförmigen" [23, S. 12] Fahrstreifens wird auch für LKA-Systeme mit Rückmeldung via additivem Lenkmoment genutzt. Im Unterschied dazu, bleibt im vorgestellten Ansatz das Lenkgefühl im engeren Sinne unberührt. Die Wannenform wird stattdessen anschaulich und multimodal durch die Fahrzeugquerneigung nachgebildet und durch ein hierzu kompatibles Lenkverhalten bekräftigt. Beispielsweise ist dem Fahrer bekannt, dass die Fahrt entlang einer quergeneigten Fahrbahn entgegengerichte-



(a) Fahrstreifenmittig. Bild angepasst aus [170]



(b) Lenkeingabe nach links, infolgedessen Fahrt entlang der Seitenwand. Vorveröffentlicht in [126, S. 11]. Icons aus [137, 138]



(c) Ausprägung zweier Wannen bei zwei Fahrstreifen je Fahrtrichtung. Bild aus [165, S. 43]

Abbildung 4.5: Funktionen LKA / tLCA. Metapher der Fahrt entlang einer Wanne. Exemplarisch dargestellt für Querregelung mittels Potentialfeldfunktion [165, 170]

te Lenkeingaben erfordert. Gleiches ist während der quergeneigten Fahrt entlang der Seitenwand der Wanne erforderlich (s. vorheriges Beispiel).

Für die Akzeptanz des vorgestellten Ansatzes ist die Metapher *Fahrt entlang einer Wanne* von größter Bedeutung, da sie dem Fahrer das eigentümliche Lenkverhalten der Struktur, zum Beispiel dass eine Lenkeingabe unter Umständen nicht zum Gieren des Fahrzeugs führt anschaulich und erwartungskonform erklärt.

4.2.2.4 Potential

Das Konzept ist potentiell in der Lage die Vorteile entkoppelter FAS-Eingriffe zu erschließen und bestehende Nachteile zu vermeiden (s. Kapitel 2.3.3), wobei nachfolgende Aspekte hervorzuheben sind.

Lenkgefühl / Lenkverhalten Das Lenkrad bleibt hoheitlich beim Fahrer, sodass das Lenkgefühl im engeren Sinne unverändert bleibt und bestehende Schwächen, wie etwa Bevormun-

dung und haptische Überladung [111] vermieden werden. Ebenso bleibt das Anlenkverhalten zunächst ähnlich, weil Lenkeingaben des Fahrers über den vergleichsweise langsamen Regelkreis der Fahrzeugbewegung/Umfeldwahrnehmung kompensiert werden, da kein direkter Informationsfluss vom Fahrer zum FAS erfolgt.

Falls der Fahrer einen monitiven/alternativen Betrieb bevorzugt, befindet sich das Lenkrad länger im vorteilhaften Bereich des *On-Center-Handlings*. Dieser ist dem Fahrer vertraut [80], kann das Gefühl eines zuverlässigen Lenksystems vermitteln [57] und ist besser zur Erfüllung der Regelaufgabe geeignet [30]. Aufgrund des geänderten Lenkverhaltens ist jedoch zu untersuchen, ob diese Vorteile auch im jetzigen Anwendungsfall gültig sind. Im Hinblick auf einen erneuten Fahrereingriff ist die fortwährende Lenkungsmittellage vermutlich nicht nachteilig, insofern die Erkenntnisse aus [98] auf den vorliegenden Fall übertragbar sind. In [98] wird festgestellt, dass die Lenkradstellung bei einer Übernahme aus Hochautomation kaum von Einfluss ist.

Bahnfolgeverhalten Da Fahrer und FAS auf separaten Pfaden agieren (s. Abb. 4.4), kann auch bei versehentlicher oder ausbleibender Lenkeingabe, zum Beispiel aufgrund von Nebentätigkeiten oder Sekundenschlaf assistiert werden. Wie in [202] gefordert, wird das Fahrzeug hierdurch weiterhin im Fahrstreifen gehalten. Zudem können Fahrstreifenwechsel gemäß der Forderung aus [206] winkelbasiert assistiert werden, was das Einpendeln in den neuen Fahrstreifen reduziert [173].

Im Blick auf die Individualisierung des FAS ist von Vorteil, dass Eingriff und Rückmeldung entkoppelt sind. Individualisierungen betreffen vorwiegend die Rückmeldung der Eingriffe. Maßgebend sind die Sensibilität des Fahrers für vestibulär-haptische Reize und die Vorliebe für die Informationshaltigkeit des FAS [28]. Aufgrund der Entkopplung kann die Rückmeldung unabhängig von der Bahnfolgeregelung geändert werden, sodass keine gegenseitigen Kompromisse eingegangen werden müssen, was auch den Entwicklungsaufwand reduziert. In LKA-Systemen mit *Summenpunkt Lenkrad* hingegen führt eine geringere Rückmeldung, respektive weniger additives Lenkmoment auch zu Einschränkungen bei den FAS-Eingriffen und in Folge zu geringerem Nutzen des FAS.

Abstimmung auf Führungsebene Für die Bewertung ist entscheidend, inwieweit das Lenken entgegen eines FAS-Eingriffs als bevormundend empfunden wird (s. Abschnitt 4.2.2.3). Ist dieser Eindruck geringer als beim *Summenpunkt Lenkrad*, könnten größere Diskrepanzen zwischen den Soll-Bahnen von Fahrer und FAS akzeptiert werden. Dies betrifft den Querversatz sowie den Längsversatz der Anlenkpunkte bei Kurveneingang und -ausgang. Zudem müsste das System in geringerem Ausmaß an die jeweiligen Fahrertypen, wie etwa *loose, tight drivers* (enge/weite Querablage) [7] oder an die "Handschrift des Lenkens" [154, S.

8] angepasst werden. Eine mittlere Auslegung wäre somit weniger kompromissbehaftet. In Summe wären *konzeptbedingt* weniger Entwicklungsaufwand zur adaptiven Systemanpassung und zur exakten Trajektorien-schätzung erforderlich und eine geringere Komplexität die Folge.

Vorteilhaft gegenüber einer alternativen Aufgabenübernahme ist, dass die dortige Tendenz, Systeme trotz Gefahr aktiviert zu lassen (Aufwand zum Ab-/Anschalten als Hürde [28]) in der vorliegenden Struktur nicht zu erwarten ist. Grund ist die fließende Eingriffsmöglichkeit des Fahrers.

Kritikpunkte, offene Fragestellungen Kritisch zu sehen ist, dass der gewählte Zusammenhang zwischen FAS-Eingriff und Wanken nur begrenzte FAS-Eingriffe zulässt und vor allem bei niedriger Geschwindigkeit zu Diskomfort führen kann (Überkompensation, s. Abschnitt 4.2.1.2). Dieser ist im *monitiven* Betrieb *ungewollt*, kann jedoch im *aktiven* Betrieb auch *Teil der Rückmeldung* sein (s. Lenken gegen das FAS in Abschnitt 4.2.2.3). Nachteilig ist, dass das FAS die Wünsche des Fahrers nicht berücksichtigt. Falls die Längsführung mit alternativer Aufgabenübernahme, zum Beispiel via ACC assistiert wird, ist zu prüfen, ob sich der Fahrer ausreichend an der Querverführung beteiligt. Dies gibt einen Hinweis darauf, dass er noch ausreichend in die Fahraufgabe eingebunden ist und stellt sicher, dass die Grenzen der Automatisierungstufe *Fahrerassistenz* nicht überschritten werden (s. Abschnitt 2.3.1.1).

Unklar ist, ob das Konzept den als wichtig erachteten Fahrkomfort und Fahrspaß (s. Abschnitt 2.2.3) erhöht oder mindert. Für eine Erhöhung spricht die variable Aufgabenübernahme, welche dem Fahrer die geforderte Handlungsfreiheit ermöglicht. So kann er mitlenken, wenn er möchte (z.B. intrinsisch motiviert), was den Handlungsgenuss fördert. Er muss dies jedoch nicht, falls er nicht möchte, was dem Handlungskomfort zuträglich ist (s. Abschnitt 2.2.3.1). Gründe hierfür könnten eine hohe Aufgabenschwierigkeit, wie etwa bei Baustellendurchfahrt, lästige Handlungen oder kurze Blickabwendungen sein. Offen bleibt, ob der Fahrer die Stabilisierungs- und Führungsaufgabe überhaupt ausübt, wenn dies optional ist. Eine Ausführung wird für viele Facetten des Fahrspaßes vorausgesetzt. Unklar ist auch, ob die neue Interaktionsform zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umwelt Freude bereitet. Für ein positives Erleben sind Faktoren wie Fahrbarkeit, jedoch auch die innerhalb und außerhalb des Fahrzeugs empfundene Ästhetik und Eleganz der Neigetechnik von Bedeutung (s. Abschnitt 2.2.3).

Die Erschließung des bisher genannten Potentials setzt voraus, dass sich die Rückmeldung als geeignet erweist und das Zusammenspiel der Akteure Fahrer und FAS funktioniert, was in den Probandenstudien aus Kapitel 6 evaluiert wird.

4.2.3 LKA/tLCA mit alternativer Aufgabenübernahme

Die Funktionen LKA/tLCA sind nur in simultaner Anordnung des Informationsflusses bekannt, da eine alternative Anordnung unter den Beschränkungen der Automatisierungsstufe *Fahrerassistenz* für den *Fahrer* wenig sinnvoll erscheint (z.B. manuelle Längsführung erforderlich, s. Abschnitt 2.3.1.1).

Das vorgestellte Konzept aus entkoppelten FAS-Eingriffen und deren Rückmeldung via Wanken bietet jedoch auch großes Potential für die mitfahrenden Insassen. Ein Beispiel sind die Vorteile des *Querkraftfreien Fahrens* [13] (s. Abschnitt 2.4.2.1). Um diese erschließen zu können, sind Lenkeingriffe des Fahrers zu vermeiden, da sie nicht vorab bekannt (Wankverlauf sollte voraussehen [13]) und nicht in ihrer Geschwindigkeit begrenzt sind (Komfortgrenze der Wankrate bei $4^\circ/\text{s}$ [13]). Zweckmäßig ist es daher eine alternative Aufgabenübernahme zu wählen, weil dann nur im Fall einer Übernahme Fahrereingaben erfolgen.

Stehen die Mitfahrer im Fokus der Fahrt, wie etwa in Chauffeurslimousinen erscheint die Kombination aus alternativ assistierter Querführung und beispielsweise manueller Längsführung dem Fahrer durchaus zumutbar, um weitere Vorteile für die Mitfahrer erschließen zu können.

4.2.3.1 Struktur

Bei alternativer Aufgabenübernahme überwacht der Fahrer die Funktionen LKA/tLCA (s. Kapitel 2.3.1.2), nimmt jedoch nicht an der Querregelung teil. In [98] liegt ein ähnlicher Anwendungsfall vor (keine Lenkeingabe, entkoppeltes Lenkrad, Kurve/Fahrstreifenwechsel bei 120 km/h), weshalb die Schnittstelle zum Lenkrad gemäß [98] (*mode stationary*) gestaltet wird. Demzufolge bleibt das Lenkrad bei aktivem System bis zu einem deutlich wahrnehmbaren Gegenmoment, respektive mindestens 0,8 Nm [29] blockiert, was unabsichtliche Lenkeingaben verhindert und eine Fahrt mit anliegenden Händen ermöglicht (Vorteil: schnelle Übernahme). Ein Übersteuern der Lenkmomentenschwelle führt zur Deaktivierung des FAS (analog zur Betätigung des Bremspedals beim ACC) und zur sukzessiven Angleichung der Lenkradstellung an die Ausrichtung der Vorderräder (in [98] zeitbasiert innerhalb von 0,2 s). Gleichzeitig wird der Systemzustand hierdurch haptisch übermittelt (*aktiv, wenn Lenkrad blockiert*). Bei aktivem System verbleibt die Lenkradstellung stationär bei 0° , was im Fall einer Übernahme nicht nachteilig ist [98]. Durch die Wankbewegung wird das Lenkrad relativ zum Umfeld *in Richtung* des *aim-point* gedreht (keine exakte Ausrichtung, jedoch ähnlich Abbildung 4.2b).

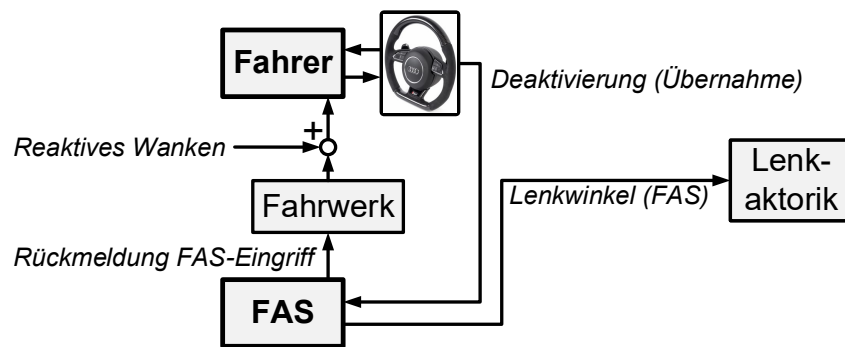


Abbildung 4.6: Informationsfluss der Funktionen LKA/tLCA bei alternativer Aufgabenübernahme. Nicht dargestellt ist die Aktivierung der Funktion tLCA mittels Fahrtrichtungsanzeiger. Icon aus [140]

4.2.3.2 Zusammenhang zwischen Eingriff und Wankwinkel

Stabilisierungseingriffe müssen nicht rückgemeldet werden, da sie keiner Abstimmung bedürfen und im Normalfall (Beispiele: [164, 187]) nicht zu inkonsistenter Fahrzeugbewegung führen (s. Abschnitt 4.2.1.1). Somit ist dem Fahrer lediglich die Soll-Bahn des FAS anzuzeigen (Führungsebene). Falls der Fahrer im Fokus stünde, wäre es naheliegend die Soll-Bahn über deren Krümmungsverlauf zu repräsentieren, da dieser auch dem Fahrer zur Soll-Kursbildung dient (Scheinwerferorientierung [58, 158]). Da jedoch der Insassenkomfort im Vordergrund steht (Querkraftkompensation), wird der Wankwinkel an die zu erwartende Querbeschleunigung gekoppelt. Analog zu [13] wird diese aus der Krümmung der Soll-Bahn und der Fahrzeuggeschwindigkeit abzüglich der Hangabtriebsbeschleunigung infolge der Straßenquerneigung berechnet (s. Abbildung 2.7 und Gleichung 5.8).

Kompensationsrate Aus Neigetechnikzügen sind Kompensationsraten von 45% bis 55% [46, 62] sowie die Forderung nach einer Mindestquerbeschleunigung bekannt (z.B. $0,14 \text{ m/s}^2$ in [92]). Für PKW empfiehlt [13] hingegen eine vollständige Kompensation ohne Mindestquerbeschleunigung und warnt vor Diskomfort infolge von Überkompensation. Da bei vollständiger Kompensation auch die Abgrenzbarkeit von reaktiven Wankbewegungen gewährleistet ist (Signal-Rausch-Abstand im Versuchsfahrzeug ca. Faktor 10, s. Kapitel 5.1.2.1), wird der Wankverlauf dementsprechend festgelegt.

Zeitlicher Zusammenhang Die Soll-Kursbildung des Fahrers basiert auf dem um bis zu 1 s vorausliegenden Krümmungsverlauf [42, 209]. Aus Komfortgesichtspunkten ist bereits ein um 0,4 s vorseilender Verlauf nachteilig, wohingegen ein um 0,1 s vorseilender Verlauf als optimal gilt [13]. Weil letzterer auch konform zum erwarteten Zeitverzug zwischen Lenkraddrehung (relativ zum Umfeld) und resultierender Fahrzeugreaktion ist (optimal bei manueller Fahrt: 0,1 - 0,15 s [206]), wird der zeitliche Zusammenhang dementsprechend fest-

gelegt. Positiv am vorausseilenden Verlauf ist, dass er die Reaktionszeit des Fahrers zum Teil kompensieren könnte.

Wankachse als Gestaltungsparameter In Anlehnung an [13] kann die Wankachse zur Beifahrerseite verschoben werden, um die Informationsübertragung an den Fahrer durch höhere wankinduzierte Vertikal- und Quereschleunigungen zu verstärken. In Bezug auf den chauffierten Insassen wird sie hierdurch zugleich abgeschwächt, da dieser meist hinten-rechts sitzt. Da eine solche Verschiebung optional erscheint, wird zunächst von mittiger Wankachse ausgegangen.

Kompatibilität einer querkraftfreien Fahrt Aus vielen Bereich ist bekannt, "dass die Höhe eines Neigewinkels dem querkraftfreien Zustand entspricht (z.B. Radfahren, Sprint) und daher innere Kompatibilität gewahrt wird. Aus diesen ist zum Teil auch bekannt (z.B. Fahrrad-/Motorradlenker, Steuerknüppel des Flugzeugs), dass die Stellung des Bedienelements im Bezug auf den Innenraum, z.B. bei stationärer Kurvenfahrt und Geradeausfahrt ähnlich sein kann und dessen Stellung relativ zur Umwelt die Querkwirkung anzeigt" [127, S. 45] (s. Abb. 4.2b).

Mögliche Nachteile vollständiger Querkraftkompensation Aus Fahrsimulatoren ohne vestibuläre Rückmeldung ist das Phänomen eines überzogenen Lenkverhaltens bekannt [24]. Dies ist im vorliegenden Fall nicht zu erwarten, da Lenkeingaben zu unmittelbarer und erwartungskonformer Fahrzeugreaktion führen (Querbewegung, reaktives Wanken). Auch ist die dort erhöhte Reaktionszeit auf externe Störgrößen [196] nicht zu erwarten, da Störgrößen entweder unmerklich kompensiert werden oder erwartungskonform (auch vestibulär) wahrgenommen werden. Die in Simulatoren ohne vestibuläre Rückmeldung beobachtete Tendenz zu hoher Fahrzeuggeschwindigkeit [24] ist im vorliegenden Fall ebenfalls denkbar und entsprechend zu untersuchen.

Aus Fahrersicht ist die querkraftfreie Auslegung vermutlich nicht optimal, da Fahrer eine vestibuläre Rückmeldung wünschen und daher in der Regel nicht die komfortabelste FAS-Einstellung wählen [28]. Insofern der Fahrer dennoch ausreichend informiert wird, erscheint ihm die Auslegung jedoch zumutbar.

4.2.3.3 Potential

Auf mitfahrende Insassen wirkt das System identisch zur Neigetechnik aus [13] (s. Abschnitt 2.4.2.1), weshalb die dortigen Vorteile, zum Beispiel die Erhöhung von Fahrkomfort und Konditionssicherheit, die Erleichterung von Nebentätigkeiten und die höhere Performanz bei visuell-räumlicher Aufgabenbearbeitung erschlossen werden. Im Unterschied zu [13] (*Voll-*

und *Hochautomation*) ist dies bereits mit der gegenwärtig verfügbaren Automatisierungsstufe *Fahrerassistenz* möglich. Die querkraftfreie Auslegung ermöglicht FAS-Eingriffe, welche insbesondere von den Fond-Passagieren weitgehend unbemerkt bleiben, da der Informationsfluss vorwiegend visuell erfolgt und die Fond-Passagiere nur ein eingeschränktes Sichtfeld nach draußen besitzen.

Vorteile alternativer Aufgabenübernahme Die alternative Aufgabenübernahme ermöglicht die querkraftfreie Systemauslegung gemäß [13] (s. Erläuterung zu Beginn des Kapitels 4.2.3). Da der Fahrer nicht an der Querregelung teilnimmt, entfällt dessen Zick-Zack-Kurs bei Geradeausfahrt [96] sowie das Einpendeln beim Fahrstreifenwechsel [173]. Beides ist dem Fahrkomfort und vermutlich auch der Interpretation der Fahrzeugbewegung durch andere Verkehrsteilnehmer zuträglich. Förderlich für den Fahrkomfort ist zudem, dass Stabilisierungseingriffe nicht abgestimmt (weniger Eingriffe) oder rückgemeldet werden müssen (weniger Wankbewegung). Letzteres trägt zur geringeren Auslastung des Kanals bei. Weiterhin muss das Rückmeldekonzent nur für Informationen auf Führungsebene, bei variabler Aufgabenübernahme hingegen auch für Informationen auf Stabilisierungsebene geeignet sein.

Wirkung der alternativen Aufgabenübernahme auf den Fahrer Die alternative Aufgabenübernahme wirkt sich in verschiedenen Bereichen auf den Fahrer aus (s. Abschnitt 2.3.1.2). Im Folgenden werden einige Auswirkungen im Hinblick auf die vorgestellte Systemausprägung diskutiert.

- *Rückzug des Fahrers aus der Fahraufgabe [28]*

Vermutlich werden Diskrepanzen zwischen der Soll-Bahn des FAS und der Wunsch-Bahn des Fahrers infolge des Rückzugs als weniger bevormundend empfunden (ähnlich einer Vorgabe durch das ACC), was im Vergleich zum *Summenpunkt Lenkrad* vorteilhaft ist.

- *Reduktion der Aufmerksamkeit auf zur Überwachung relevante Hinweisreize [28]*

Die Reduktion ist kritisch zu sehen, da die Informationsübertragung vorwiegend visuell erfolgt [13] und somit bei Blickabwendung beeinträchtigt ist. Abhilfe könnte durch situativ eingebrachte Hinweisreize geschaffen werden. Zum Beispiel könnte mittels additiver Wankbewegung auf das Erreichen des maximalen FAS-Eingriffs oder auf gefährliche Situationen aufmerksam gemacht werden (s. Abschnitt 4.2.1.3). Ähnlich zu [19] ist auch eine Zuhilfenahme des Lenkrads denkbar, welches anderweitig stationär in Mittenstellung verbleibt. Letzteres würde zwar nicht den Insassenkomfort, jedoch das Lenkgefühl im engeren Sinne beeinträchtigen.

- *Reduktion des Situationsbewusstseins [28]*

Die Reduktion kann zum Teil kompensiert werden, indem der Fahrer zu motorischer Betätigung angeregt und hierdurch wieder in die Fahrzeugregelung zurückgeholt wird [28]. Im Gegensatz zu [28] kann dies nicht via Lenkrad erfolgen (Systemdeaktivierung). Ob der Effekt auch mittels aktiver Fahrpedale erzielbar ist, bleibt fraglich. Das Entgegenwirken über gezielte vestibuläre Informationen [28] scheidet aufgrund des Zielkonflikts mit dem Insassenkomfort aus.

- *Reduktion des Fahrspaßes*

Für viele Facetten des Fahrspaßes wird eine intrinsische Tätigkeit vorausgesetzt (s. Abschnitt 2.2.3.2). Aufgrund des Rückzugs aus der Fahraufgabe ist somit von reduziertem Fahrspaß auszugehen. Der Rückzug kann auch durch manuelle Längsführung nur teilweise verhindert werden ("Stabilisierungsaufgabe eher als eine Handlungseinheit" [28, S. 174]). Vermutlich trägt auch die Neigetchnik kaum zum Fahrspaß bei, da sie in querkraftfreier Ausprägung und ohne Interaktion mit dem Fahrer bereits nach kurzer Zeit kaum mehr Beachtung findet (angelehnt an [13]). Da die Mitfahrer im Fokus der Auslegung stehen, scheint Fahrspaß jedoch nachrangig.

- *Einfluss auf das Lenkgefühl im engeren Sinne und das Lenkverhalten*

Positiv ist, dass das Lenkgefühl im engeren Sinne sowie das Lenkverhalten nicht beeinträchtigt werden, weil das Lenkrad, sobald gewünscht unmittelbar und hoheitlich an den Fahrer übergeht und das System deaktiviert wird.

Zusammenfassend ist zu untersuchen, ob die Auswirkungen auf den *Fahrer* unkritisch und zumutbar sind. Ist dies der Fall, so ermöglicht das vorgestellte Konzept bereits mit heutigen technischen und rechtlichen Rahmenbedingungen zahlreiche Vorteile für die *Mitfahrer*, was zum Beispiel für Chauffeurslimousinen nützlich ist.

4.3 Zusammenfassung

Der Kerngedanke einer Informationsübertragung mittels aktiv eingebrachter Wankbewegungen (s. Kapitel 3) wurde in einem breiten Ansatz auf aktuelle FAS mit Schwächen in der Informationsübertragung angewandt. Zudem wurden vielversprechende Konzepte zur Rückmeldung entkoppelter FAS-Eingriffe erarbeitet. Tabelle 4.2 fasst die in den Probandenstudien zu untersuchenden FAS und deren Potential zusammen.

Tabelle 4.2: Übersicht der FAS, auf welche das Konzept angewandt wird

	Funktion	Ebene der Fahrzeugführung	Aktuelle Schwächen	Potential der Informationsübertragung via Wanken
Informierende und warnende FAS	NI	Navigationsebene	<i>visuell</i> : Blickabwendung, <i>akustisch</i> : Umgebungsgeräusche, ablenkend	blickrichtungsunabhängig, Aufmerksamkeit erregen
	FCA	Führungsebene	<i>haptisch</i> : Haltereflex, Gegensteuern, Fahrverantwortung unklar	Übermittlung eines emotionalen Charakters (hier: gefährlich), kein Haltereflex, keine unklare Verantwortung
	LDW	Führungsebene	<i>haptisch</i> : Fehlinterpretation, falsche Lenkreaktion	hohe Verständlichkeit, keine nachteilige Lenkreaktion (Lenkgefühl im engeren Sinne unbeeinflusst)
Kontinuierlich automatisierende FAS	LKA, tLCA (<i>variable</i> Aufgaben- übernahme)	Führungs- und Stabilisierungsebene	<i>haptisch</i> : drohende Bevormundung, haptische Überladung, kaum Assistenz bei Sekundenschlaf	weniger Bevormundung (Lenkgefühl im engeren Sinne unverändert), Assistenz bei versehentlicher Lenkeingabe (Nebentätigkeit, Sekundenschlaf), verbesserte Bahnfolge, vereinfachte Individualisierbarkeit
	LKA, tLCA (<i>alternative</i> Aufgaben- übernahme)	Führungsebene	<i>keine Umsetzung bekannt</i>	<i>Vorteile für die Mitfahrer</i> : Erhöhung von Konditionssicherheit und Fahrkomfort (Querkraftkompensation, ruhigeres Bahnfolgeverhalten), Erleichterung von Nebentätigkeiten

5. Implementierungskonzepte und Realisierung im Versuchsträger

Um die in Kapitel 4 vorgestellten Untersuchungsschwerpunkte im Realfahrzeug darstellen zu können, ist ein prototypischer Fahrzeugaufbau vonnöten. Dieser soll in Hardware und Software möglichst wenig vom Serienstand abweichen, um die Funktionen auch im realen Straßenverkehr testen zu können. Gleichzeitig soll hierdurch aufgezeigt werden, dass die Systeme bereits mit seriennaher Sensorik und Aktorik umsetzbar und damit von potentieller Relevanz für gegenwärtige Entwicklungen im Bereich Fahrerassistenzsysteme sind.

Die Anforderungen der in Kapitel 4 entworfenen FAS an die Umsetzung im Fahrzeug sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst. Im Folgenden wird der Aufbau des Versuchsträgers auf Komponentenebene vorgestellt. Im Anschluss wird auf die entwickelten Implementierungskonzepte eingegangen.

Tabelle 5.1: Anforderungen der entworfenen FAS an die Umsetzung im Fahrzeug

Themenbereich	Anforderung
Wankfunktionalität	Wankverlauf frei definierbar, keine Auswirkungen auf die Querführung, reaktives Wanken weiterhin möglich, maximale Wankrate/-beschleunigung subjektiv als Ruck empfunden, maximaler Wankwinkel ausreichend zur Kompensation der Querbeschleunigung bis 120 km/h auf Autobahnen, Wankachse fahrzeugmittig
Funktionen NI, FCA, LDW	Reproduzierbare hochgenaue relative Lokalisierung, Fahrverhalten ähnlich dem von Serienfahrzeugen
Funktionen LKA, tLCA	Fahrt im geschlossenen Kreis mit der Umfeldsensorik, Unterdrückung eines Fahrstreifenwechsel-Triggers bei belegtem Fahrzeugrückraum, FAS-Eingriffe vom Lenkrad entkoppelt, Lenkrad bei Fahrt ohne Fahrerzutun stillstehend relativ zum Fahrzeuginnenraum, <i>variable Aufgabenübernahme</i> : gemeinsame Querführung mit/ohne Betätigung des Lenkrads möglich, <i>alternative Aufgabenübernahme</i> : Lenkrad unterhalb einer Lenkmomentenschwelle in Mittenstellung blockiert

5.1 Aufbau des Versuchsträgers

Als Versuchsfahrzeug dient ein *Audi A5 Sportback 3.0 TDI* (Baujahr 2012) mit Automatikgetriebe und dem Fahrerassistenzsystem *Audi side assist* [151]. Der Umbau des Fahrzeugs beschränkt sich auf die notwendigen Maßnahmen zur Erfüllung der Anforderungen aus Tabelle 5.1, sodass einige der in Kapitel 3.2 genannten technische Herausforderungen in dieser Arbeit nicht behandelt werden. Beispiele hierfür sind die Ausrichtung der Scheinwerferkegel und der Spiegel in Abhängigkeit des Wankwinkels.

5.1.1 Sensorik

Die genutzte Sensorik ist in Abbildung 5.1 dargestellt und wird im Folgenden zusammen mit

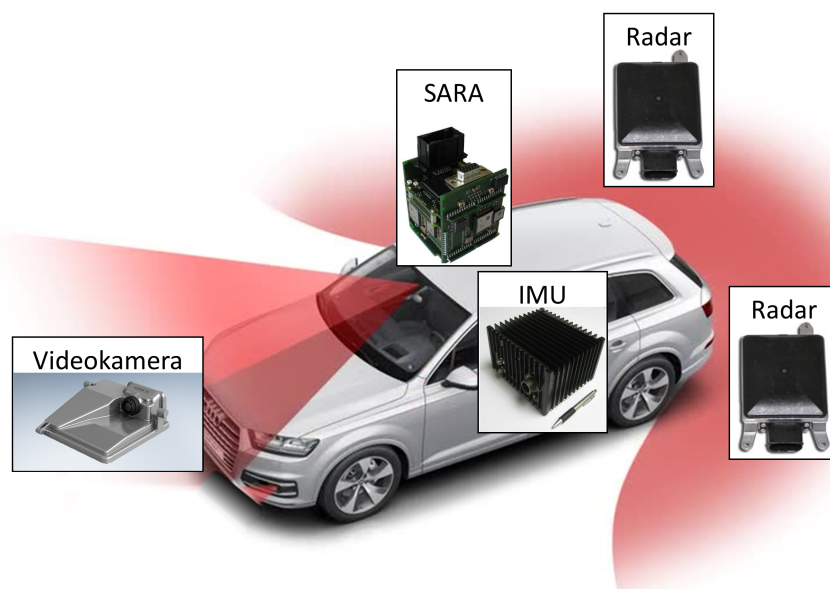


Abbildung 5.1: Übersicht der genutzten Sensorik. Icons aus [13, 131, 139, 141, 143]

den verwendeten Schnittstellen vorgestellt.

- *1x Monokulare Frontkamera (Audi A3)*

Die Frontkamera stellt den Verlauf (Krümmung c_0 , Krümmungsänderung c_1) der Fahrstreifenmarkierungen sowie die Position des Fahrzeugs relativ zu diesen zur Verfügung (Querablage d_y , Gierwinkeldifferenz Ψ_{Diff}). Die Fahrstreifenmarkierungen werden bereits dem eigenen bzw. den Nachbarfahrstreifen zugeordnet.

- *2x Heckradar (Audi A5)*

Die Heckradare ermöglichen die geforderte Überwachung des Fahrzeugrückraums. Die Auswertung der Sensordaten erfolgt durch die serienmäßige Funktion *Audi side assist* [151], welche ein binäres Signal (Fahrstreifenwechsel *möglich / nicht möglich*) zur Verfügung stellt.

- *1x SARA (Audi A6)*
6 D-Sensorcluster, herstellerspezifisch engl. *Sensor Array Audi* (SARA). Misst die Eigenbewegung des Fahrzeugs, zum Beispiel die Gierrate ω_z .
- *1x IMU mit DGPS-Anbindung (Referenzsystem)*
Inertiale Messeinheit, engl. *Inertial Measurement Unit* (IMU) des Typs *iMAR iTrace F400-E* [91] mit *Differential Global Positioning System* (DGPS). Ermöglicht eine hochgenaue Lokalisierung und stellt den Wankwinkel relativ zum Schwerevektor φ_g zur Verfügung (s. Abb. 2.7). Anzumerken ist, dass dieser auch mithilfe der serienmäßig verfügbaren SARA per Strap-Down-Algorithmus berechnet werden könnte [13].

Die Umsetzung erfolgt demnach weitgehend auf Basis serienmäßiger Sensorik. Die Sensoren sind über *Controller Area Network* (CAN)-Bus mit 100 Hz (IMU, SARA), 20 Hz (Heckradare) und 10 Hz (Frontkamera) angebunden.

5.1.2 Aktorik

Die benötigte Aktorik ist in Serienfahrzeugen bereits verfügbar. Im genutzten *Audi A5* wird ein aktives Fahrwerk nachgerüstet. Der entkoppelte Querführungsaktor wird durch die Kombination mehrerer Lenkaktoren und des Lenkeffekts infolge Wankens emuliert (s. Abschnitt 5.2.3).

5.1.2.1 Langsam-aktives Fahrwerk

Bei Wahl des Fahrwerks sind gemäß Kapitel 3.2.1 elektrisch betriebene langsam-aktive Fahrwerke oder elektrische aktive Stabilisatoren zu bevorzugen. Da der Versuchsträger auch für Projekte mit aktivem Huben [71] und Nicken [32, 33] genutzt werden soll, wird das elektrisch langsam-aktive *Electrical Semiactive Body Control* (eABC) gewählt. Aufgrund der Bauraumvorgaben wird dieses analog zu [13, 71] an der Vorderachse (VA) in Modulbauweise (s. Abb. 5.2) und an der Hinterachse (HA) in rotatorischer Variante (s. Abb. 5.3) ausgelegt. Da die Funktionsweise des eABC in [13, 85, 122] ausführlich beschrieben ist, wird sie im Folgenden nur als Abriss dargestellt.

Der Aufbau in Modulbauweise ähnelt dem hydraulischen *Active Body Control* mit Federfußpunktverstellung [85]. An Stelle des Hydraulikzylinders bewegt jedoch ein Elektromotor über einen Kugelgewindtrieb den Federteller entlang der Längsachse des Aktors. Eine Speicherfeder stützt die statische Last des Fahrzeugaufbaus ab, um den Energieverbrauch gering zu halten (s. Abb. 5.2).

Die rotatorische Variante des eABC besitzt ebenfalls eine Speicherfeder, um die statische Last zu tragen (s. Abb. 5.3). Der Aktor besteht aus einem an der Karosserie befestigten Elektromotor, welcher abtriebsseitig einen Torsionsstab mit Hebelarm ähnlich der Hälfte eines

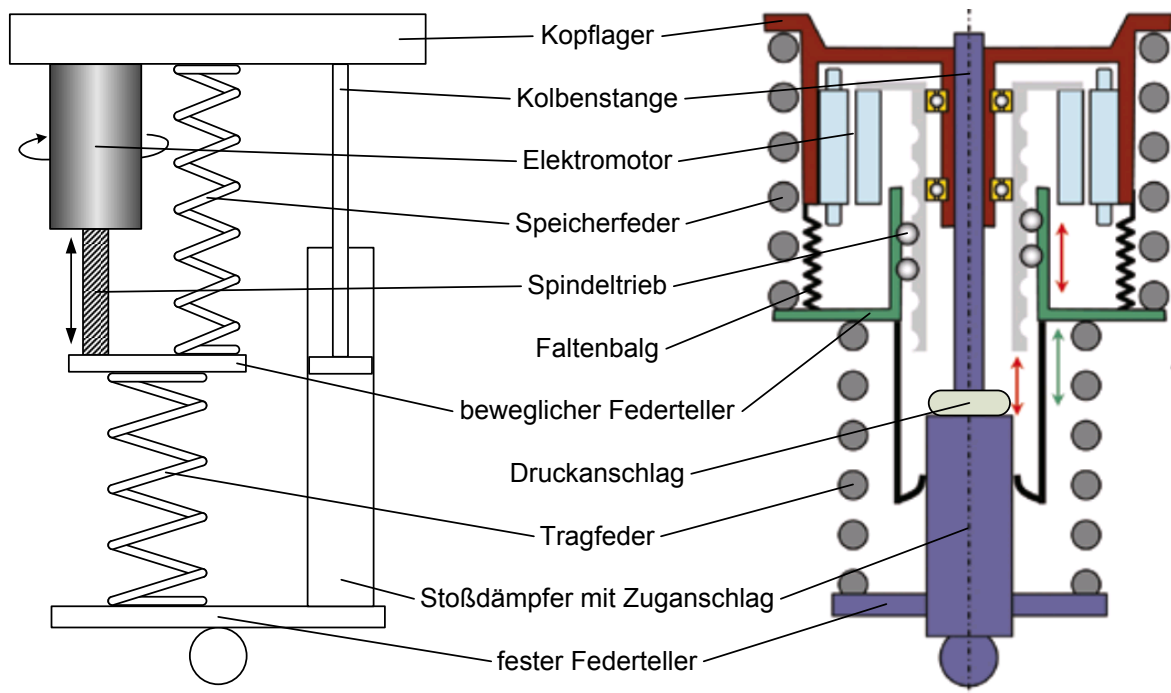


Abbildung 5.2: Aufbau eines eABC-Aktors an der Vorderachse (Modulbauweise). Bild aus [122, 193]

passiven Stabilisators trägt. Da das Torsionsmoment im Unterschied zu aktiven Stabilisatoren an der Karosserie abgestützt wird, sind die jeweiligen Radaufhängungen unabhängig voneinander beeinflussbar.

Die Anbindung der Aktoren erfolgt über ein 21 V Inselbordnetz und ansteuerungsseitig mit 100 Hz über einen CAN-Bus. Hiermit werden die einzelnen Aktorpositionen vorgegeben. Der Hub des Rades relativ zur Trimmlage wird von den serienmäßigen Federwegssensoren mit 800 Hz erfasst und über CAN-Bus mit 400 Hz ausgegeben.

Der resultierende Wankwinkel hängt nicht nur vom Verfahren der Aktoren, sondern auch von der Nebenfederhärte, der Steifigkeit der Tragfeder bzw. des Torsionsstabs, der Zuladung sowie vom Freigang zum Zug- und Druckpuffer ab. Die gewählte Fahrzeugkonfiguration erlaubt einen maximalen Wankwinkel von $\varphi_c = 4,5^\circ$ (s. Abb. 2.7). Bei gegenläufigem Wankmoment, zum Beispiel infolge von Ausweichmanövern oder Kurvenfahrt fällt dieser jedoch geringer aus (Größenordnung: $\Delta\varphi_c = 0,5^\circ$ bei $a_{yg} = 1,7 \text{ m/s}^2$). Die maximale Dynamik wird bei sprunghaftem Verfahren der Aktoren erzielt und ermöglicht eine Wankrate von $\dot{\varphi}_c = 16^\circ/\text{s}$ sowie eine Wankbeschleunigung von $\ddot{\varphi}_c = 125^\circ/\text{s}^2$. Maßgebend hierfür sind das maximale Aktormoment, die Steifigkeit der Tragfeder bzw. des Torsionsstabs sowie die Dämpfercharakteristik.

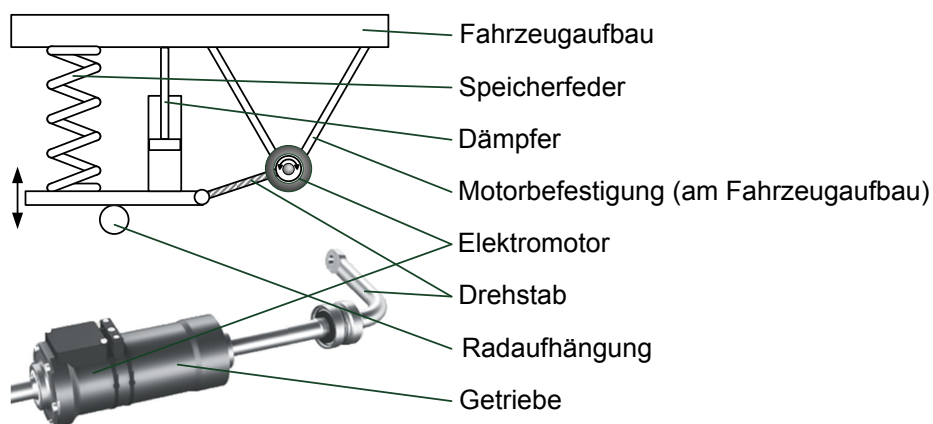


Abbildung 5.3: Aufbau eines eABC-Aktors an der Hinterachse (rotatorische Variante). Bild aus [122, S. 18]

5.1.2.2 Lenkaktorik

Zur Umsetzung der FAS werden die serienmäßige EPS (Bauart: *Rack Concentric* [161]) sowie die serienmäßige ADS eingesetzt (Funktionsprinzip: *Winkelüberlagerungsgetriebe im Lenksäulenoberteil* [161]). Abbildung 5.4 stellt deren Verbau im Fahrzeug und

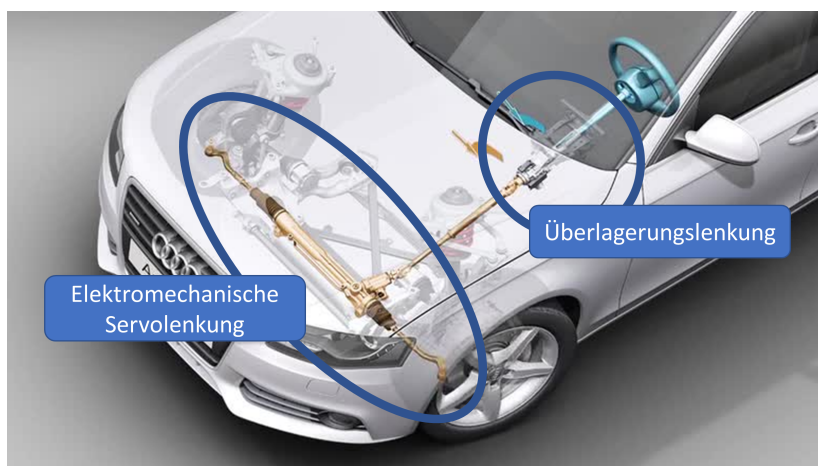


Abbildung 5.4: Schaubild über die genutzte Lenkaktorik. Bild angepasst aus [134]

5.5 deren prinzipielle Wirkweise dar.

Mittels EPS kann über die Schnittstelle des serienmäßigen LKA-Systems ein Lenkmomentenäquivalent von maximal 3 Nm [67] mit 5 Nm/s überlagert werden. Bei der Ansteuerung ist zu beachten, dass das tatsächlich überlagerte Moment neben der Anforderung M_{LKA} auch von der Fahrzeuggeschwindigkeit und dem aktuellen Lenkmoment beeinflusst wird [6].

Mittels modifizierter Ansteuerung der ADS kann an der Lenkzwischenwelle ein additiver Lenkwinkel δ_{ADSa} von maximal $\pm 6^\circ$ mit $6,9^\circ/\text{s}$ eingebracht werden (ähnlich [187]). Der Zeitverzug im Folgeverhalten der ADS beträgt etwa 0,035 s. Die Begrenzungen der Stellwinkel und -rate dienen der Beherrschbarkeit des Fahrzeugs im Fehlerfall. Sprunghafte Fehler

von 4° gelten als leicht beherrschbar, jene bis $7,6^\circ$ können noch von fast allen Probanden bewältigt werden [155]. Somit werden die genannten Stellgrenzen als ausreichend erachtet, um die Fahrsicherheit zu gewährleisten.

Die im Weiteren relevanten Lenkwinkel und -momente sind in Abbildung 5.5 dargestellt und werden im Folgenden erläutert. Der am Lenkrad gemessene Winkel δ_H wird um

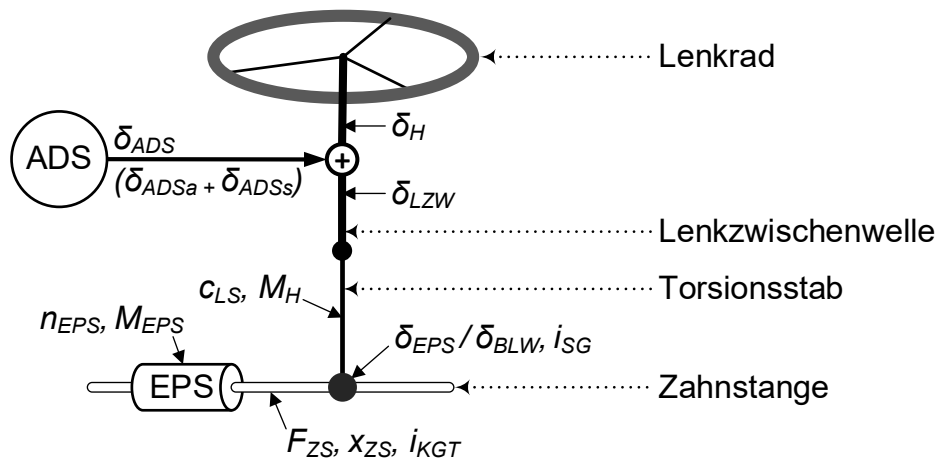


Abbildung 5.5: Prinzipdarstellung des Lenkstrangs und Benennung der relevanten Lenkwinkel, Momente und Kräfte

den Winkel δ_{ADS} der ADS überlagert und resultiert im Winkel δ_{LZW} am oberen Ende der Lenkzwischenwelle. Die Verwindung des Lenkstrangs, zum Beispiel aufgrund von Torsionsdämpfungselementen [161] geht nicht in δ_{LZW} ein. Der Winkel δ_{ADS} setzt sich aus dem Teil-Überlagerungswinkel δ_{ADSs} der serienmäßigen Funktion der ADS (z.B. variable Lenkübersetzung) und dem additiv überlagerbaren Winkel δ_{ADSa} zusammen. Weitere Messgröße ist die Drehzahl des Servomotors der EPS n_{EPS} , welche sich mit der Übersetzung des Kegelgewindetribs i_{KGT} und der Lenkgetriebeübersetzung i_{SG} in die Geschwindigkeit des Lenkwinkels δ_{EPS} umrechnen lässt. δ_{EPS} führt mittels i_{SG} zur Zahnstangenposition x_{ZS} . Der Unterschied zwischen δ_{EPS} und dem berechneten Lenkwinkel δ_{BLW} besteht in softwareseitigen Korrekturen (z.B. Geradeauslauf), um welche δ_{BLW} erweitert ist. Der Unterschied zu δ_{LZW} besteht in der Verwindung des Lenkstrangs (Torsionssteifigkeit c_{LS}). Relevant sind zudem das Lenkmoment M_H (Messung durch Torsionsstab), das Drehmoment M_{EPS} der EPS sowie die Zahnstangenkraft F_{ZS} .

5.2 Regelungskonzept zur Querführung

Zur Querregelung wird gemäß Abbildung 5.6 eine Kaskade aus Querregler (s. Abschnitt 5.2.1) und unterlagertem Regler entworfen. Von letzterem werden zwei Varianten benötigt. Der unterlagerte Lenkwinkelregler (LWR) stellt den Soll-Lenkwinkel des Querreglers über die EPS (s. Abschnitt 5.2.2). Die unterlagerte Wankregelung, welche dem Konzept *Regelung* aus Abschnitt 5.3.1 entspricht, erzeugt einen äquivalenten Lenkeffekt durch aktives Wanken (s. Abschnitt 5.2.3).

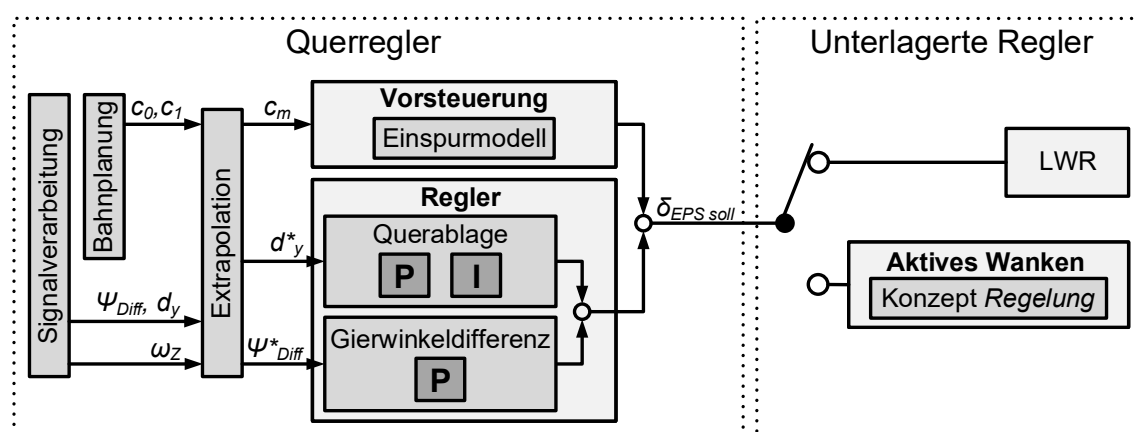


Abbildung 5.6: Struktur der Querregelung

5.2.1 Querregler

Zur Querregelung wird ein Bahnfolgeregler und ein separates Modul zur Bahnplanung (s. Abschnitt 5.4.2.1) genutzt. Die Struktur der Regelung orientiert sich am Trajektorienfolge-regler aus [97, 118] und besteht aus einer Vorsteuerung auf Basis des einfachen Einspurmodells [85] sowie einer linearen Folgeregelung (s. Abbildung 5.6).

Die Vorsteuerung stellt den Lenkwinkel, welcher zum Durchfahren der Krümmung (c_0, c_1) der Soll-Bahn erforderlich ist. Störungen, zum Beispiel aufgrund der Straßenquerneigung oder infolge Seitenwinds werden vom Regler unterdrückt.

Ein theoretischer Entwurf des Reglers kann gemäß [118] mit den Methoden der robusten Regelung [1] erfolgen. Im vorliegenden Fall werden die Parameter heuristisch bestimmt und durch Realfahrten optimiert. Im Gegensatz zu [97, 118] wird der Regler um ein schwaches Integrator-Glied erweitert, welches zum einen die stationäre Genauigkeit der Querablage verbessert [164]. Zum anderen erweitert es die Interaktion mit dem Fahrer um eine zeitliche Komponente. Lenkt dieser gegen das FAS, so reagiert das FAS *zunehmend* nachdrücklicher (s. Kapitel 4.2.2.3). Begrenzt wird dies durch den maximalen FAS-Eingriff. Gemäß Kapitel 4.2.2.1 erfolgt vorerst keine kooperative Ausprägung des Systemverhaltens und somit keine

unmittelbare Berücksichtigung des Fahrers im Regelkreis. Ein Regelungskonzept, welches solches ermöglicht, wird in [163] vorgestellt.

Je nach Variante der Funktionen LKA bzw. tLCA (*variable* oder *alternative* Aufgabenübernahme) übergibt der Querregler den Soll-Lenkswinkel $\delta_{EPS\,soll}$ entweder an den LWR oder die Wankregelung (s. Implementierung in Kapitel 5.4.2). Beide sind dem Querregler unterlagert, weisen jedoch unterschiedliches Regelverhalten auf (vgl. Abb. 5.12 und Abb. 5.16). Die Parameter des Querreglers sind daher separat zu optimieren. Um den Zeitverzug der unterlagerten Regler zu kompensieren (LWR: $T_{LWR} = 0,47$ s, Konzept *Regelung*: $T_{KR} = 0,4$ s), werden die Eingangsgrößen des Querreglers um T_{LWR} bzw. T_{KR} extrapoliert. Hierbei sind die aktuellen Bewegungsgrößen des Fahrzeugs (Gierrate ω_z , Geschwindigkeit v), dessen Relativposition im eigenen Fahrstreifen (Querablage d_y , Gierwinkeldifferenz Ψ_{Diff}) sowie der klothoidische Krümmungsverlauf der Soll-Bahn (Krümmung c_0 , Krümmungsänderung c_1) zu berücksichtigen. Da sich die Latenz T_{KAM} der Daten der Frontkamera von den Latenzen der anderen Messdaten unterscheidet, wird diese separat berücksichtigt. Die Zeit T_{prevQR} bezeichnet die Zeitspanne, um die extrapoliert wird. Extrapolierte Größen werden im Folgenden mit einem '*' gekennzeichnet. Zur einfacheren Lesbarkeit werden häufig auftretende Terme wie folgt zusammengefasst.

$$T_{prev} = T_{KAM} + T_{prevQR} \quad (5.1)$$

$$D_{prev} = v \cdot T_{prev} \quad (5.2)$$

Die Berechnungsvorschriften für die extrapolierte Gierwinkeldifferenz Ψ_{Diff}^* sowie die Querablage d_y^* werden in Anhang A anhand der geometrischen Beziehungen hergeleitet. Zur Vereinfachung werden die Längsbeschleunigung sowie die Gierbeschleunigung vernachlässigt. Zudem wird von einem stationären Gleichgewichtszustand des Fahrzeugs ausgegangen. Somit ist der Radius der Fahrzeugbewegung identisch zum Radius der Fahrzeug-Bahnkurve [40]. Die hergeleiteten Berechnungsvorschriften sind im Folgenden dargestellt.

$$\Psi_{Diff}^* = \Psi_{Diff} + \omega_z \cdot T_{prev} - c_0 \cdot D_{prev} + 0,5 \cdot c_1 \cdot D_{prev}^2 \quad (5.3)$$

$$d_y^* = d_y - \sin(\Psi_{Diff}) \cdot D_{prev} - \frac{v}{\omega_z} \cdot (1 - \cos(\omega_z \cdot T_{prev})) + \dots \quad (5.4)$$

$$\dots \frac{1 - \cos(c_0 \cdot D_{prev} + 0,5 \cdot c_1 \cdot D_{prev}^2)}{c_0 + 0,5 \cdot c_1 \cdot D_{prev}}$$

Eine Bewertung der Querregelung erfolgt in Kapitel 6.1.1 sowie Kapitel 6.1.2.

5.2.2 Lenkwinkelregler

Die Anforderungen an den jeweils unterlagerten Regler werden mithilfe des *Worst Case* Szenarios *getriggert* Fahrstreifenwechsel zur Kurveninnenseite bei minimalem Kurvenradius

abgeschätzt. Der minimale Radius beträgt auf normgerechten Autobahnen 720 m [146]. Im Versuchsträger wird für den genannten Fahrstreifenwechsel nach kurveninnen ein Lenkwinkel δ_{BLW} von maximal 7° ($3,9^\circ$ ohne Fahrstreifenwechsel) bei $4^\circ/\text{s}$ benötigt (Grundlage: Messdatenauswertung).

Die Erarbeitung des Regelungskonzepts erfolgt in Kooperation mit [105]. Besondere Bedeutung kommt der Berücksichtigung der Nichtlinearitäten im Lenkstrang (Reibung) und in der EPS-Ansteuerung zu (Stellgrößen-/Stellratenbegrenzung, Abhängigkeit des überlagerten EPS-Moments vom Lenkmoment und der Fahrzeuggeschwindigkeit, s. Abschnitt 5.1.2.2). Als Grundlage für den Regelungsentwurf wird ein Modell des Lenkstrangs gebildet.

5.2.2.1 Modellierung und Validierung des Lenkstrangs

Der Lenkstrang (s. Abb. 5.5) kann gemäß [207] auf ein reibungsbehaftetes Feder-Masse-System reduziert werden, welches in Abbildung 5.7 dargestellt ist. Die Massenträgheiten

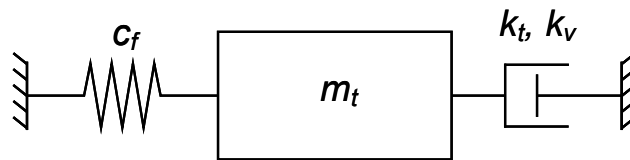


Abbildung 5.7: Modell des Lenkstrangs. Reduktion auf ein Feder-Masse-System mit viskoser und trockener Reibung. Bild angepasst aus [105]

und Trägheitsmomente sämtlicher Komponenten werden zum Massenträgheitsäquivalent m_t zusammengefasst. Die Reibung wird in trockene und viskose Reibung unterteilt (k_t , k_v) und die Rückstellkraft der Lenkung als Feder mit Steifigkeit c_f modelliert. Aus dem Kräftegleichgewicht und der Translation der Zahnstange x_{ZS} folgt:

$$m_t \cdot \ddot{x}_{ZS} + k_v \cdot \dot{x}_{ZS} + k_t \cdot \text{sgn}(\dot{x}_{ZS}) + c_f \cdot x_{ZS} = F_{ZS} \quad (5.5)$$

Die Zahnstangentranslation x_{ZS} kann mit der Lenkgetriebeübersetzung i_{SG} in den Lenkwinkel δ_{EPS} umgerechnet werden. Die Zahnstangenkraft F_{ZS} kann mit der Übersetzung des Kugelgewindetriebs i_{KGT} als Moment M_{EPS} des Servomotors der EPS ausgedrückt werden. Beide stehen als Messwerte zur Verfügung (s. Kapitel 5.1.2.2). Das Massenträgheitsäquivalent m_t wird einem Mehrkörpersimulationsprogramm entnommen. Die Federsteifigkeit c_f sowie die trockene Reibung k_t werden in einem Versuch gemessen. Die viskose Reibung k_v wird durch einen Abgleich zwischen Simulationsmodell und Realität iterativ optimiert.

Zur Validierung des Modells wird ein sinusförmiger Verlauf des Moments M_{EPS} mit steigender Frequenz vorgegeben (*sinus sweep*) und der resultierende Lenkwinkelverlauf δ_{EPS}

aus Simulation und Versuchsträger gegenübergestellt. Abbildung 5.8 zeigt, dass die Verläufe eine hohe Übereinstimmung aufweisen, weswegen Modellierung und Parameterwahl als geeignet angesehen werden.

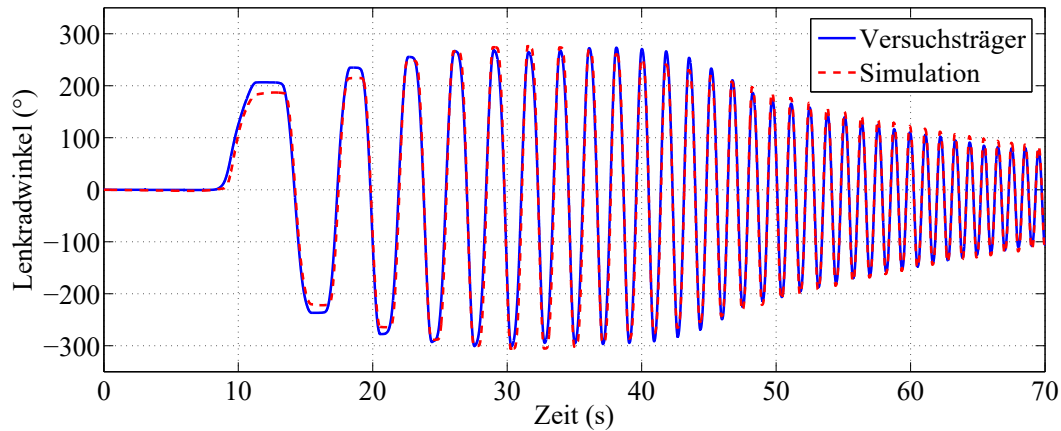


Abbildung 5.8: Validierung des Modells des Lenkstrangs aus Abbildung 5.7. Gegenübergestellt sind die Lenkradwinkelverläufe δ_{EPS} aus Simulation und Versuchsfahrzeug, welche aus der Vorgabe eines sinusförmigen Momentenverlaufs M_{EPS} mit steigender Frequenz resultieren (*hands-off*). Bild angepasst aus [105]

5.2.2.2 Regelungskonzept

Um einen linearen Regelungsentwurf durchführen zu können, müssen zunächst die zu Beginn des Kapitels 5.2.2 genannten Nichtlinearitäten gehandhabt werden. Die nichtlinearen Einflüsse des Lenkmoments M_H und der Fahrzeuggeschwindigkeit auf das Stellmoment der EPS werden modelliert und der Schnittstelle reziprok vorangestellt, um sie zu kompensieren (s. Abb. 5.9). Die Begrenzungen der Stellgröße und Stellrate können mittels Nyquist-Ortskurven in die Stabilitätsbetrachtung des Regelkreises miteinbezogen werden [2]. Da für die ortskurvenbasierte Stabilitätsbetrachtung ein lineares Modell des Lenkstrangs erforderlich ist, wird die trockene Reibung der viskosen zugeschlagen. Der einhergehende Fehler wird bei der späteren Regelung reduziert, indem der Regler um eine Vorsteuerung ergänzt wird, welche die trockene Reibung und die Rückstellkraft der Strecke kompensiert (ähnlich [207]).

Entwurf des Reglers Der Reglerentwurf wird detailliert in [105] und im Folgenden als Übersicht dargestellt. Stellgrößen-/Stellratenbegrenzungen führen häufig zu Dauerschwingungen (Grenzyklen). Die Grenzyklen nichtlinearer Regelkreise können mit der Methode der harmonischen Balance näherungsweise linear beschrieben werden. Die Beschreibungsfunktion der Stellgrößen-/Stellratenbegrenzung wird in [2] ermittelt und kann als Ortskurve in die komplexe Ebene eingezeichnet werden (s. Abb. 5.10). Das Stabilitätskriterium von

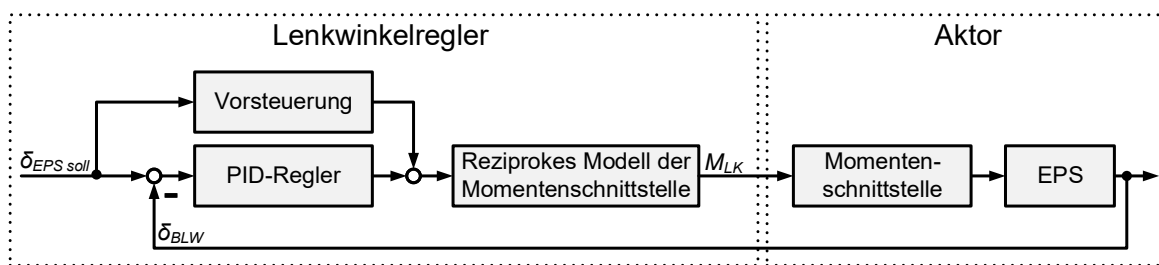


Abbildung 5.9: Struktur des LWR

Nyquist wird gemäß [3] dahingehend erweitert, dass die Ortskurve des offenen Regelkreises diejenige der Stellgrößen-/Stellratenbegrenzung nicht schneiden darf. Hinsichtlich des Verlaufs der Ortskurve des offenen Kreises erweist sich ein PID-Regler als vorteilhaft [105]. Dieser wird gemäß [112] derart parametrisiert, dass die Pole der Regelstrecke kompensiert

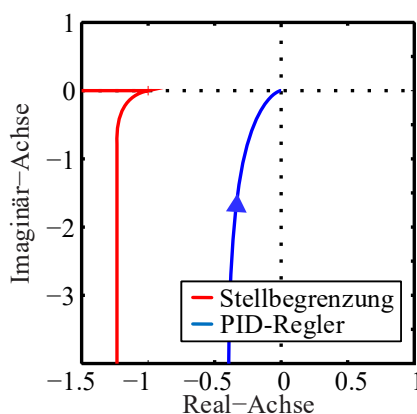


Abbildung 5.10: Ortskurve der Stellgrößen-/Stellratenbegrenzung und des PID-Reglers des LWR in der komplexen Ebene. Bild angepasst aus [105]

werden. Zu deren Berechnung wird ebenfalls das linearisierte Modell des Lenkstrangs genutzt. Eine parasitäre Zeitkonstante zur Vermeidung sprunghafter Stellgrößen wird nicht implementiert, da die Momentenschnittstelle die Stellrate ohnehin begrenzt.

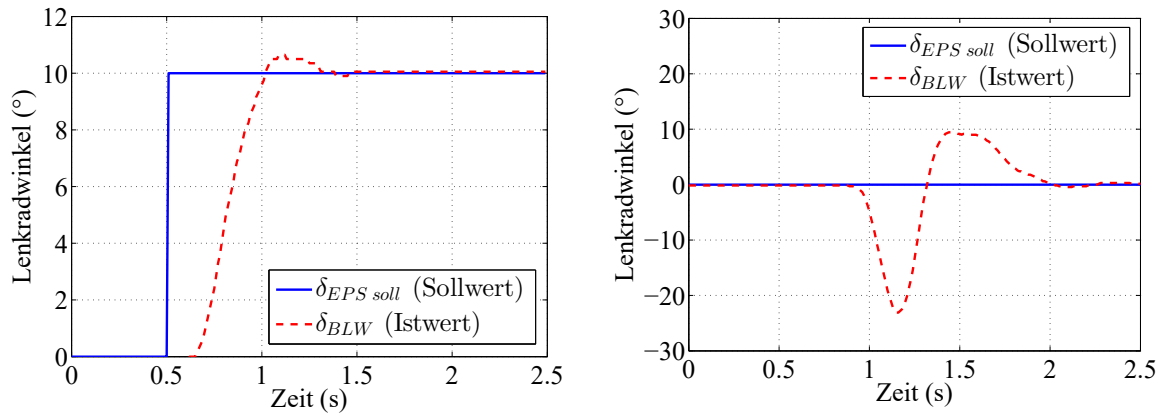
Entwurf der Vorsteuerung Die Vorsteuerung dient der Kompensation der Reibung und der Rückstellkraft (s. Abb. 5.7). Das vorzusteuern Moment M_{EPS} wird auf Basis von Gleichung 5.5 und in Abhängigkeit des Soll-Lenkradwinkels $\delta_{EPS\,soll}$ wie folgt definiert [207]:

$$M_{EPS} = \frac{1}{i_{KGT}} \cdot \left(\frac{k_v}{i_{SG}} \cdot \dot{\delta}_{EPS\,soll} + k_t \cdot \text{sgn} \left(\dot{\delta}_{EPS\,soll} \right) + \frac{c_f}{i_{SG}} \cdot \delta_{EPS\,soll} \right) \quad (5.6)$$

Aus Gleichung 5.6 geht hervor, dass bei konstanter Führungsgröße $\delta_{EPS\,soll}$ kein Moment M_{EPS} vorgesteuert wird, um die trockene Reibung auch weiterhin zu kompensieren. Damit dies nicht vom Regler übernommen werden muss, wird eine Logik integriert, welche das benötigte Moment in Richtung sinkender Regeldifferenz aufschaltet.

5.2.2.3 Regelverhalten

Die Parameter des PID-Reglers werden am realen System optimiert und das in Abbildung 5.11 dargestellte Regelverhalten erzielt. Die Messdaten stammen aus einer Geradeausfahrt



(a) Sprungantwort. Bild angepasst aus [105]

(b) Verhalten nach einer Störung

Abbildung 5.11: Sprungantwort (*hands-off*) und Verhalten des LWR nach einer Störung (Lenkeingabe durch den Fahrer). Die Fahrzeuggeschwindigkeit beträgt jeweils 120 km/h

mit 120 km/h.

Abbildung 5.11a zeigt die Antwort auf einen Sprung von 0° auf 10° (erforderlich: 7° , s. Anforderungen zu Beginn des Kapitels 5.2.2). Der Ist-Verlauf wird nach 1,5 s stationär genau, wobei das Überschwingen maximal 7% des Soll-Lenkswinkels beträgt. Da der LWR in den Probandenstudien auch bei simultaner Aufgabenausführung genutzt wird (s. Konzept *Summenpunkt Lenkrad* in Kapitel 5.4.2.2), ist das Verhalten nach einer Störungsanregung durch den Fahrer von Bedeutung.

In Abbildung 5.11b lenkt der Fahrer kurzzeitig auf 23° und gibt das Lenkrad anschließend frei. Der Soll-Lenkswinkel des LWR verbleibt währenddessen bei 0° . Auch in diesem Fall zeigt der LWR ein stabiles Verhalten und erreicht nach 1,5 s wieder stationäre Genauigkeit.

Abbildung 5.12 stellt das Folgeverhalten des LWR dar, wenn am Lenkrad keine Hände anliegen (*hands-off*). Die dargestellten Verläufe weisen eine Lenkgeschwindigkeit von maximal $6,7^\circ/\text{s}$ auf (gefordert: $4^\circ/\text{s}$, s. Anforderungen zu Beginn des Kapitels 5.2.2). Die Regeldifferenz beträgt maximal $1,5^\circ$, wobei der Ist-Verlauf um etwa 0,47 s nacheilt. Die Querbeschleunigung a_{yg} beträgt maximal $0,55 \text{ m/s}^2$. Ein Grund für die Abweichung sowie den Zeitverzug liegt in der Kombination aus trockener Reibung und Stellratenbegrenzung, welche sich insbesondere bei einem Vorzeichenwechsel der Lenkgeschwindigkeit bemerkbar macht.

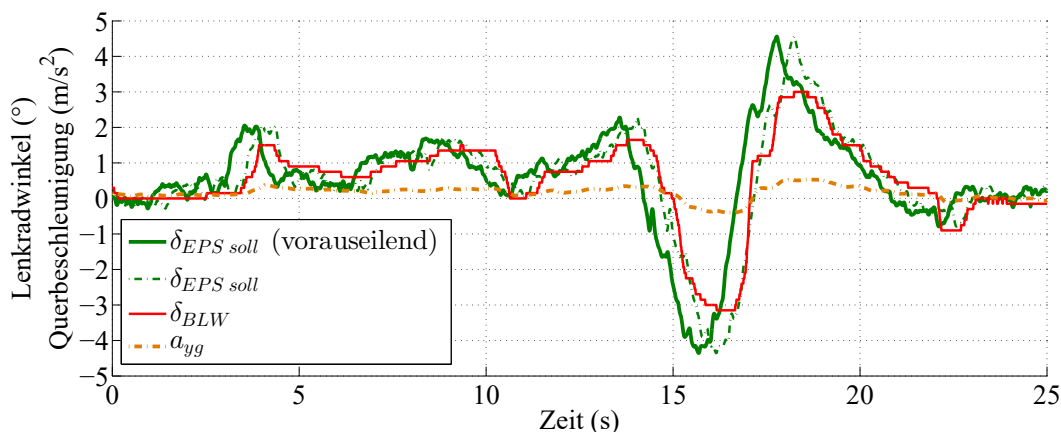


Abbildung 5.12: Folgeverhalten des LWR. Messdatenauszug eines getriggerten Fahrstreifenwechsels (Funktion tLCA, Variante *Summenpunkt Lenkrad*, Fahrt *hands-off*, s. Kapitel 5.4.2.2)

Zusammenfassend wird festgehalten, dass der LWR mit 0,47 s einen relativ großen Zeitverzug und insbesondere bei kleinen Soll-Lenk winkeln eine deutliche Regeldifferenz aufweist.

5.2.3 Rollsteuern als entkoppelter Querführungsaktor

Vom Lenkrad entkoppelte FAS-Eingriffe können durch Lenkaktoren gestellt werden, die nicht mechanisch an das Lenkrad gekoppelt sind, wie etwa eine *Steer-by-Wire* Vorderachslenkung oder eine Hinterachslenkung. Ebenso ist eine Entkopplung der mechanischen Verbindung mithilfe von EPS und ADS denkbar. In der einzig bekannten Umsetzung aus [187] wurde dies jedoch nur für Geradeausfahrt validiert.

In [164] wird die Möglichkeit genannt, Lenkeffekte durch die Einbringung eines Wankwinkels zu erzeugen (s. Absatz *Lenkeffekt infolge Wankens* auf Seite 24). Vermutlich kam dies bisher nicht zur Anwendung, da ein horizontierter Fahrzeugaufbau gefordert war (s. Kapitel 2.4.1). In den umzusetzenden FAS wird der Ansatz nun erstmals nutzbar. Der Lenkeffekt wirkt entkoppelt vom Lenkrad und erlaubt eine Umsetzung der entkoppelten FAS-Eingriffe ohne zusätzliche Hardware/Lenkaktorik, was in Bezug auf Komplexität, Kosten und Baubedarf vorteilhaft ist. Nachteilig ist hingegen, dass der Zusammenhang zwischen Wanken und Lenkeneingriff durch die (Elasto-)Kinematik festgelegt und somit nur eingeschränkt variierbar ist (s. Abschnitt 5.2.3.1).

Eine umfassende Analyse, ob die vorgestellten Konzepte nicht ohnehin Anpassungen an der bisherigen (Elasto-)Kinematik erfordern (s. Abschnitt 3.2.2) und ob hierbei noch Spielraum besteht, um den Lenkeffekt als Querführungsaktor auszuprägen, ist nicht Teil dieser Arbeit. Jedoch soll exemplarisch anhand der Funktionen LKA/tLCA abgeschätzt werden, ob eine Nutzung grundsätzlich denkbar erscheint. Auch soll geprüft werden, welche Einschränkungen mit dem Lenkeffekt einhergehen. Ein Beispiel ist die Notwendigkeit zur Unterbindung

des Lenkeffekts in informierenden und warnenden FAS. Als Grundlage der Einschätzung dient die serienmäßige Achskinematik des Versuchsfahrzeugs *Audi A5*. Angemerkt sei, dass das Regelkonzept zur Herstellung des Soll-Wankwinkels in Kapitel 5.3 behandelt wird.

5.2.3.1 Erzeugung des Lenkeffekts durch Radlastverteilung und Wanken

Der Lenkeffekt kann über die Radlastverteilung (Radlaststeuern, Vorspureffekt) und den Wankwinkel (Rollsteuern, Sturzwinkeländerung) beeinflusst werden. Änderungen der Wankmomentenverteilung erlauben es, das Seitenkraftpotential achsweise festzulegen, wirken sich hier jedoch kaum aus [164], da die vorgestellten FAS meist bei Querschleunigungen kleiner 4 m/s^2 eingesetzt werden.

Radlastverteilung Die Radlastverteilung kann durch eine diagonale Verspannung des Fahrwerks beeinflusst werden. Der resultierende Lenkeffekt wird in FAS beispielsweise zur Kompensation von Seitenwind genutzt [148]. Im Versuchsträger lässt sich mit diagonaler Verspannung bei horizontalem Aufbau und Winterreifen mit 2,4 bar ein Lenkwinkeläquivalent von maximal $2,5^\circ$ erzielen, was deutlich unter der Forderung von 7° liegt (s. Anforderungen zu Beginn des Kapitels 5.2.2). Zudem kann im Fall großer Wankwinkel zwar eine Lenkwirkung in Richtung der Wankbewegung, jedoch kaum entgegen dieser erwirkt werden (s. Ablesebeispiel in Abbildung 2.6). Hinzu kommt, dass das gesamte Aktorpotential (s. Kapitel 5.1.2.1) benötigt wird, um den für querkraftfreie Fahrt bis 120 km/h geforderten Wankwinkel von $4,5^\circ$ [13] zu stellen. Eine zusätzliche Anforderung würde somit zu Einbußen beim erzielbaren Wankverlauf führen. Aus diesen Gründen wird im Weiteren von einer Beeinflussung des Lenkeffekts durch die Radlastverteilung abgesehen.

Wankwinkel Der Einfluss des Wankwinkels auf den Lenkeffekt basiert zum einen auf dem Rollsteuern, welches als Radlenkwinkeländerung infolge Wankens definiert ist [40] und zum anderen auf der Sturzwinkeländerung infolge Wankens. Wird nur das Rollsteuern betrachtet, so führt ein Wankwinkel von $3,75^\circ$ zu einem mittleren Lenkwinkel von $-0,2^\circ$ an der VA und $+0,45^\circ$ an der HA, was im Versuchsfahrzeug einem Lenkwinkeläquivalent von mehr als 9° entspricht (s. Ablesebeispiel in Abbildung 2.6). Es besteht daher das Potential auch mit der Summe aller Teilaspekte das geforderte Lenkwinkeläquivalent von 7° erreichen zu können. Nachteilig an der Beeinflussung des Lenkeffekts mittels Wankwinkel ist die Zwangskopplung von Wankwinkel und Lenkeffekt.

5.2.3.2 Ermittlung des Zusammenhangs Wankwinkel - Lenkeffekt

Zur Quantifizierung des Lenkeffekts wird die Summe aller Teilaspekte betrachtet. Da in den Probandenstudien nur definierte Fahrszenarien, eine reproduzierbare Radlastverteilung und

kein aktives Nicken oder Huben betrachtet werden, sind die Einflussfaktoren begrenzt. Dies erlaubt es, den Lenkeffekt durch einen kennlinienbasierten Ansatz zu beschreiben, welcher sich durch geringen Implementierungs- und Rechenaufwand auszeichnet. Wie in Abbildung 5.13 dargestellt, wird der Zusammenhang *Wankwinkel - Lenkeffekt* eindimensional abgebildet. Die Kennlinien werden bei Geradeausfahrt mit 100 km/h bestimmt und um den Einfluss der Straßenquerneigung bereinigt.

Zur Wankregelung werden in dieser Arbeit zwei Konzepte entwickelt, welche als Konzept *Regelung* und Konzept *Steuerung* bezeichnet werden (s. Kapitel 5.3). Diese nutzen un-

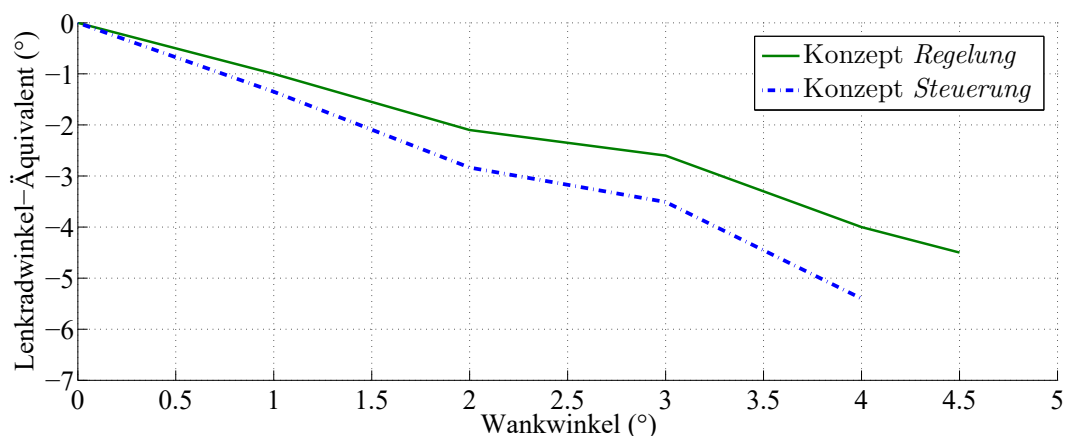


Abbildung 5.13: Lenkeffekt infolge Wankens. Aus dem Wankwinkel φ_c folgt je nach Wankregelung (Konzept *Regelung* bzw. *Steuerung*, s. Kapitel 5.3) ein Lenkeffekt in Höhe des Lenkwinkeläquivalents δ_{BLW}

terschiedliche Radlastverteilungen, weswegen eine separate Beschreibung erforderlich ist. Das Konzept *Steuerung* wird genutzt, um bei ähnlichen Randbedingungen *einen* definierten Wankwinkelsprung zu stellen. Um systematische Abweichungen zu reduzieren, wird die Kennlinie auf diesen Sprung optimiert. Das Konzept *Regelung* wird hingegen sehr variabel eingesetzt. Die Kennlinie wird bei quasi-stationärem Wankwinkel aufgezeichnet und unterliegt demnach systematischen Abweichungen infolge der Wankdynamik (Radlaststeuern) und infolge äußerer Einflussfaktoren, zum Beispiel einem größeren Vorspureffekt bei höherer Querbewegung. Da die Kennlinie nur zur Vorsteuerung genutzt und von einem Regler begleitet wird (s. Kapitel 5.3.1), werden solche Abweichungen kompensiert. Nicht dargestellt ist, dass die Wankbewegung dem Lenkeffekt (Messgröße: Gierrate) um etwa 0,1 s vorausseilt, was unter anderem auf den Reifeneinlauf zurückzuführen ist.

Das Konzept *Steuerung* stützt das Wankmoment über beide Achsen ab. Das Konzept *Regelung* stützt es hingegen vorwiegend über die HA ab, was zu einem schwächeren Lenkeffekt führt. Ursächlich ist, dass das Hinterrad der abgesenkten Fahrzeugseite (z.B. *hinten rechts* beim Wanken nach *rechts*), welches am stärksten in Richtung des Wankwinkels lenkt (s. Ablesebeispiel in Abbildung 2.6), dann weniger Radaufstandskraft erfährt, was den Vorspur-

effekt reduziert. Auch führt die unterschiedliche Wankdynamik zu anderem Radlaststeuern und so zu Abweichungen des Lenkeffekts.

5.2.3.3 Beeinflussung des Lenkeffekts mittels ADS

Um den Zusammenhang zwischen Wankwinkel und Lenkwirkung variabler zu gestalten, kann der Lenkeffekt infolge Wankens mit anderweitig erzeugten Lenkwirkungen überlagert werden. Diese können zum Beispiel aus zusätzlicher Aktorik, wie etwa einer Hinterachslenkung oder aus der Verspannungslenkung stammen. Letztere hat sich im vorliegenden Fall als unzureichend erwiesen (s. Abschnitt 5.2.3.1). Als zusätzlicher Lenkaktor erscheint die Überlagerungslenkung (hier: ADS) betrachtenswert, da sie bei vielen Herstellern im Angebot und somit hoch verfügbar ist. Im vorliegenden Fall ermöglicht sie ein schnelles (Zeitverzug: 0,035 s) und präzises winkelbasiertes Stellen. Zudem ist der maximale Überlagerungswinkel von 6° (s. Abschnitt 5.1.2.2) ausreichend, um den Lenkeffekt, zum Beispiel in informierenden und warnenden FAS vollständig zu kompensieren. Die Stellratenbegrenzung von $6,9^\circ/\text{s}$ führt jedoch dazu, dass der Lenkeffekt nur bis zu einer Wankrate von $5,1^\circ/\text{s}$ kompensiert werden kann. Als Berechnungsgrundlage hierzu dient die bis zur Stellratengrenze linear extrapolierte Kennlinie des Konzepts *Steuerung* aus Abbildung 5.13. Bei höherer Wankrate ist eine Lenkwinkelanpassung notwendig, um den Kurs zu halten. Zu beachten ist, dass additive Überlagerungen der ADS nur zu Auslenkungen der Zahnstange führen, wenn das hierzu benötigte Lenkmoment über das Fahrerhandmoment am Lenkrad abgestützt oder von der EPS additiv eingebracht wird. Letzteres scheidet jedoch mangels geeigneter Software aus (s. Beginn des Kapitels 5.2.3).

Ob eine Beeinflussung des Zusammenhangs *Wanken - Lenkeffekt* trotz der damit einhergehenden Auswirkungen auf das Lenkmoment und ggf. den Lenkwinkel zweckdienlich erscheint, ist für jede der umzusetzenden Funktionen separat abzuwägen.

5.2.3.4 Schlussfolgerungen für die umzusetzenden FAS

Informierende und warnende Funktionen (NI, FCA, LDW) Diese Funktionen greifen nicht in die Querführung ein, weshalb sich auch die Wankbewegung nicht auf die Querführung auswirken darf. Ebenso darf das Lenkrad nicht beeinflusst werden, weil dies die Ergebnisse der Probandenstudien verfälscht. Da zur Informationsübertragung ein Wankwinkelsprung gewählt wird, welcher die Schwelle von $5,1^\circ/\text{s}$ übersteigt (Wankrate: $16^\circ/\text{s}$, s. Kapitel 5.3.2), können die genannten Anforderungen nicht erfüllt werden.

Als Folge sind die Szenarien der Funktionen NI und FCA in den Probandenstudien so zu gestalten, dass der Lenkeffekt infolge Wankens nicht kompensiert werden muss, sondern vernachlässigt werden kann. Beispielsweise können kleine Radien gewählt werden (z.B. Kreisverkehr für Funktion NI), sodass der wirkende Lenkeffekt relativ zum Lenkwinkelbedarf der

Fahrzeug-Bahnkurve gering ist.

Die Funktion LDW ist insbesondere auf Landstraßen und Autobahnen von Bedeutung, so dass auch in der Probandenstudie große Kurvenradien gewählt werden sollten. In diesen bewegen sich der Lenkeffekt und die (gewünschte) Fahrereingabe in ähnlicher Größenordnung, weshalb eine Unterbindung des Lenkeffekts unerlässlich ist, um den Funktionsnutzen bewerten zu können. Die damit einhergehende Beeinflussung des Lenkmoments und -winkels ist nicht zu vermeiden (s. Abschnitt 6.2.2.4).

Kontinuierlich automatisierende Funktionen LKA / tLCA mit *alternativer* Aufgabenübernahme In diesen Funktionen wird die Querführung vom FAS übernommen (Lenkrad stillstehend, s. Abschnitt 4.2.3) und der Lenkeffekt nicht als Querführungsaktor benötigt. Er geht lediglich als beobachtbare Störgröße ein (s. Kapitel 5.4.2.3). Deren Kompensation hat keine Auswirkungen auf den *Lenkradwinkel*, da die maximale Wankrate von $4,3 \text{ }^\circ/\text{s}$ (s. Kapitel 5.3.1) unterhalb des Schwellwerts von $5,1 \text{ }^\circ/\text{s}$ liegt. Ebenso bleibt das *Lenkmoment* unbeeinflusst, da die EPS das Abstützmoment des kompensierenden ADS-Überlagerungswinkels übernimmt. Dies ist möglich, da keine Interaktion zwischen Fahrer und Lenkrad erforderlich ist, weshalb die EPS winkelbasiert angesteuert werden darf. Zusammenfassend ist der Lenkeffekt ohne negative Auswirkungen auf die Funktionen LKA / tLCA mit alternativer Aufgabenübernahme handhabbar.

Kontinuierlich automatisierende Funktionen LKA / tLCA mit *variabler* Aufgabenübernahme In diesen Funktionen soll der Lenkeffekt infolge Wankens als vom Lenkrad *entkoppelter* Querführungsaktor dienen (s. Kapitel 4.2.2). Aufgrund der Auswirkungen auf das *Lenkmoment* scheidet eine Beeinflussung mittels ADS somit aus. Aus der Radlastverteilung des Konzepts *Regelung* (s. Abschnitt 5.3.1) und den Fahrzeugparametern, wie etwa jenen der Radhubkinematik und der Reifen resultiert somit ein relativ fester Zusammenhang zwischen Wankwinkel und Lenkeffekt (s. Abbildung 5.13). Dies schränkt die Gestaltungsmöglichkeiten der Wankbewegung zur Informationsübertragung stark ein. Im vorliegenden Fall entspricht der sich ergebende Zusammenhang jedoch *zufällig* der gewünschten Ausprägung *Wanken in Höhe des Lenkradwinkeläquivalents des FAS-Eingriffs* (s. Abschnitt 4.2.2.2). Diese ist somit wunschgemäß umsetzbar. Günstig an der Zwangskopplung ist, dass die Wankbewegung dem Lenkeffekt stets um $0,1 \text{ s}$ vorausseilt, was als komfortoptimal gilt [13].

Im Hinblick auf die Nutzung als Querführungsaktor ist das maximale Lenkwinkeläquivalent von $4,5^\circ$ ausreichend, um die Funktion LKA auch bei minimalem Kurvenradius darstellen zu können. Gemäß der Anforderungen zu Beginn des Kapitels 5.2.2 sind hierzu $3,9^\circ$ erforderlich. Das *Worst Case* Szenario eines Fahrstreifenwechsels bei minimalem Kurvenradius erfordert hingegen ein Lenkwinkeläquivalent von 7° und ist somit nicht darstellbar. Die Pro-

bandenstudie für *variable* Aufgabenübernahme ist daher so zu gestalten, dass die Funktion tLCA nur auf Geraden oder bei großen Kurvenradien ausgelöst wird. Von der Wankregelung ist ein Wankwinkel von mindestens $3,9^\circ$ bei einer Wankrate von mindestens $4^\circ/\text{s}$ zu fordern (s. Abschnitt 5.3.1), damit das benötigte Lenkwinkeläquivalent von $3,9^\circ$ und die erforderliche Lenkgeschwindigkeit von $4^\circ/\text{s}$ erreicht wird.

5.3 Regelstrategie zum aktiven Wanken

Aufgrund des frühen Entwicklungsstands des eABC liegt noch kein Regelungskonzept, wie etwa zur Niveauregulierung, Aufbaukontrolle oder Dämpfung [85] vor, in welches die Wankfunktionalität integriert werden könnte. Der Wankverlauf wird daher durch direkte Ansteuerung der jeweiligen Aktoren erzeugt. Weil sich dies auf das Eigenlenkverhalten auswirkt, ist beim Regelungsentwurf auch auf die Gewährleistung der Fahrsicherheit zu achten.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Informationsübertragung und weniger auf der fahrdynamisch optimalen Ansteuerung der Aktorik, sodass ein pragmatischer Ansatz gewählt wird. Bei niedriger zu erwartender Querbesehleunigung, wie etwa in den Funktionen LKA/tLCA kann ein Regelungskonzept aus [13, 122] genutzt werden (s. Abschnitt 5.3.1). Für hohe zu erwartende Dynamik, wie etwa in den Funktionen LDW und FCA wird eine Steuerung entworfen (s. Abschnitt 5.3.2).

5.3.1 Regelung (Funktionen: LKA, tLCA)

Bei variabler Aufgabenübernahme dient der Lenkeffekt infolge Wankens als entkoppelter Querführungsaktor. Hierzu muss die Wankregelung einen Wankwinkel $\varphi_c > 3,9^\circ$ und eine Wankrate $\dot{\varphi}_c > 4^\circ/\text{s}$ herstellen können (s. Kapitel 5.2.3.4). Zur Realisierung des querkraftfreien Fahrens bis 120 km/h ist gemäß [13] eine stationäre Genauigkeit mit einem Fehler von $\varphi_{c\text{ diff}} < 1,75^\circ$ bzw. $\Delta a_{yc} < 0,3 \text{ m/s}^2$, ein Wankwinkel von $4,3^\circ$ sowie eine Wankrate von $4,3^\circ/\text{s}$ erforderlich.

Die Anforderungen an den Wankverlauf und bestehende Randbedingungen, zum Beispiel die direkte Ansteuerung eines eABC im *Audi A5* ähneln den Arbeiten aus [13, 122], weshalb eine Nutzung der dortigen Regelstrategien in Betracht kommt. Im Unterschied zu [13, 122] sind auch Wankbewegungen umzusetzen, welche die Komfortgrenzen (z.B. Wankrate: $4^\circ/\text{s}$ [13]) überschreiten, zum Beispiel um den Fahrer auf Unzulänglichkeiten hinzuweisen. Aus den in [13, 122] vorgestellten Regelungskonzepten, wird daher der performante, jedoch dort nur simulativ betrachtete *PID-Regler mit voreilender Führungsgröße und Vorsteuerung* gewählt.

Analog zu [13, 122] werden die vier Aktorpositionen mithilfe geometrischer Daten des eABC auf einen Freiheitsgrad umgerechnet (Wankachse *fahrzeugmittig*). Dieser dient dem

PID-Regler als Steuergröße. Um den geforderten Wankwinkel von $4,3^\circ$ zu erzielen (maximal $4,5^\circ$, wenn $a_{yg} = 0 \text{ m/s}^2$, s. Kapitel 5.1.2.1), muss das Wankmoment vorwiegend über die HA abgestützt werden, da die dortigen Aktoren einen größeren Hub stellen können [13, 122]. Dies verschiebt das Eigenlenkverhalten in Richtung Übersteuern, was die Beherrschbarkeit des Fahrzeugs erschwert [85]. Die Regelung wird daher nur im Komfortbereich eingesetzt. Beim Auftreten hoher Querschleunigung wird sie vorsorglich auf geeignete Weise abgeschaltet und in einen fahrdynamisch stabilen Zustand überführt (s. Abschnitt 5.3.1.3).

5.3.1.1 Ermittlung des Wankwinkels relativ zur Straßenoberfläche

Die Regelgröße *Wankwinkel relativ zur Straßenoberfläche* φ_c (s. Abb. 2.7) wird mithilfe der vier Federwegssensoren (s. Kapitel 5.1.2.1) unter Berücksichtigung der Reifeneinfederung berechnet. Letztere kann im Komfortbereich durch ein Feder-Dämpfer-Modell beschrieben werden [13]. Zur Berechnung der Reifeneinfederung sind die Radnormalkräfte im Bezug auf den Radmittelpunkt erforderlich. Abbildung 5.14 stellt deren Modellierung nach [77, 122] exemplarisch für ein Rad der HA dar. Das Modell beschreibt die Wirkweise des Aktors

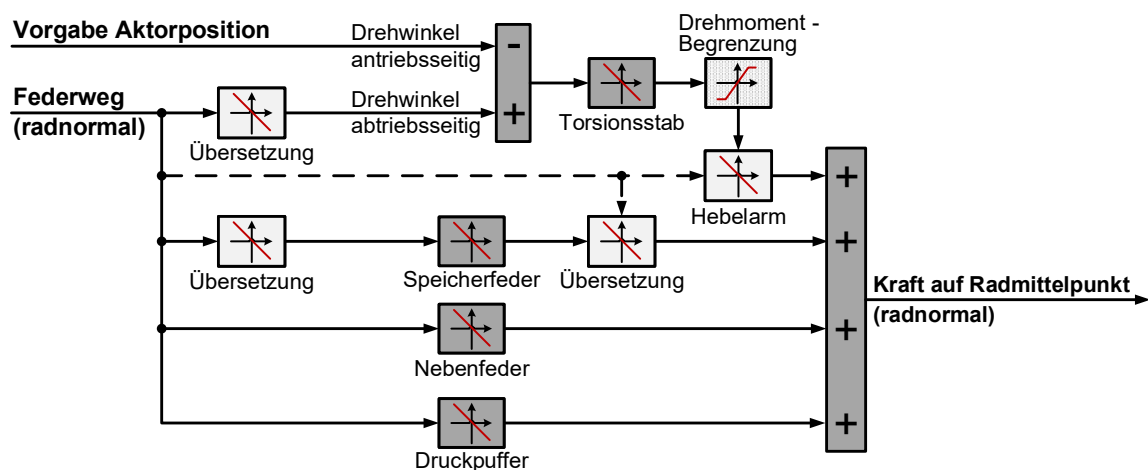


Abbildung 5.14: Modell der Radaufhängung und eABC-Aktorik an der Hinterachse. Ziel ist die Berechnung der Radnormalkräfte im Bezug auf den Radmittelpunkt

gemäß Abbildung 5.3 und berücksichtigt zusätzlich den Druckpuffer und den Einfluss der Elastokinematik, welcher via Nebenfeder modelliert ist. Die Berechnung des Wankwinkels erfolgt in der Reihenfolge nach [40], wobei angenommen wird, dass die Reifenaufstandsflächen in einer Fahrbahnebene liegen.

Um den ermittelten Wankwinkel φ_c zu validieren, wird er der Differenz aus dem Wankwinkel relativ zum Schwerevektor φ_g , welcher von der IMU gemessen wird und der Straßenquerneigung η gegenübergestellt (s. Abb. 5.15). Die Messdatenaufzeichnung erfolgt auf einem Testgelände bei 130 km/h in einer Kurve-Gerade-Kurve-Kombination mit bekannter Straßenquerneigung η . Abbildung 5.15 zeigt die relevanten Verläufe bei einer Wankrate von

maximal $4,5^\circ/\text{s}$ sowie die erhöhte Genauigkeit bei Berücksichtigung der Reifeneinfederung. Der verbleibende Fehler von $0,07^\circ$ ist deutlich geringer als die geforderte stationäre Genauigkeit von $1,75^\circ$ und wird daher als ausreichend klein erachtet.

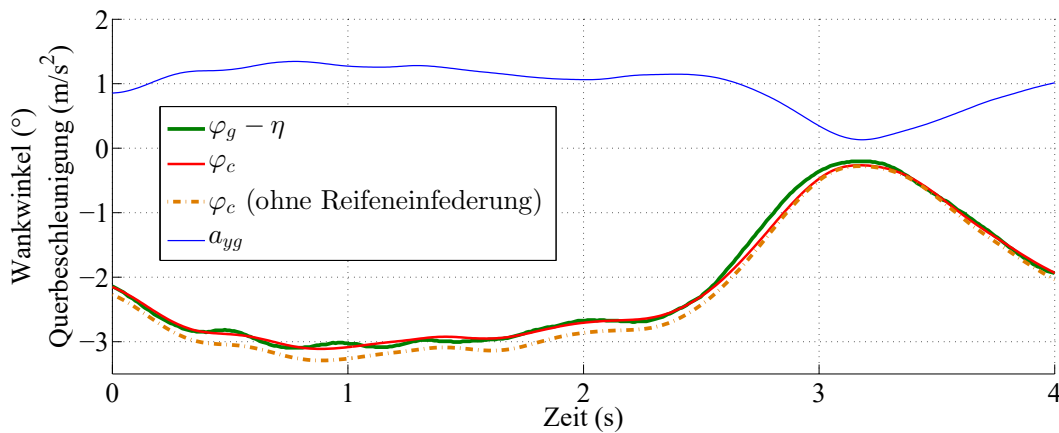


Abbildung 5.15: Validierung des *Wankwinkels relativ zur Straßenoberfläche* φ_c durch Vergleich mit dem *Wankwinkel relativ zum Schwerevektor* φ_g , welcher um die *Straßenquerneigung* η bereinigt wurde

5.3.1.2 Regelverhalten

Die Struktur des *PID-Regler mit voreilender Führungsgröße und Vorsteuerung* wird aus [13, 122] übernommen. Die Fahrzeugparameter, wie zum Beispiel Gewicht, Federsteifigkeiten und Pufferfreigänge werden an das Versuchsfahrzeug angepasst. Die Parametrisierung des PID-Regler erfolgt nach den Einstellregeln von Ziegler und Nichols [113] und wird anschließend im Versuchsträger optimiert.

Abbildung 5.16 stellt das Folgeverhalten der Regelung bei einem getriggertem Fahrstreifenwechsel dar. Aufgrund der ähnlichen Querbeschleunigung gilt das Verhalten stellvertretend auch für die Funktion LKA (Maximalwert in Abb. 5.16: 1 m/s^2 , Maximalwert LKA: $0,74 \text{ m/s}^2$ auf normgerechter Autobahn bei 120 km/h [13]). Um den Zeitverzug der Regelung zu kompensieren, eilt die Führungsgröße $\varphi_{c, \text{soll}}$ um $0,4 \text{ s}$ voraus. Die Maximalwerte des Wankverlaufs betragen $4,6^\circ/\text{s}$ (gefordert: $4,3^\circ/\text{s}$) bzw. $26^\circ/\text{s}^2$. Die Regeldifferenz ist bei hoher Soll-Wankbeschleunigung, wie etwa bei $t = 2,1 \text{ s}$ und $t = 7,8 \text{ s}$ am größten und beträgt maximal $0,2^\circ$ (gefordert: $<1,75^\circ$). Die maximale Wankbeschleunigung von $26^\circ/\text{s}^2$ erfüllt die Forderung nach deutlich wahrnehmbarer Wankbewegung, insofern die Komfortgrenze von $15^\circ/\text{s}^2$ aus dem Zugverkehr [11] als Richtwert herangezogen werden darf. Anzumerken ist, dass auch der fahrzeugseitig maximal mögliche Wankwinkel von $4,5^\circ$ erreicht wird.

Im Vergleich zum Folgeverhalten des LWR (s. Abb. 5.12) ergibt sich ein um $0,07 \text{ s}$ geringerer Zeitverzug und eine höhere stationäre Genauigkeit. Dies könnte in der winkelbasierten Ansteuerung des eABC begründet sein. Der LWR hingegen nutzt eine momentenbasierte

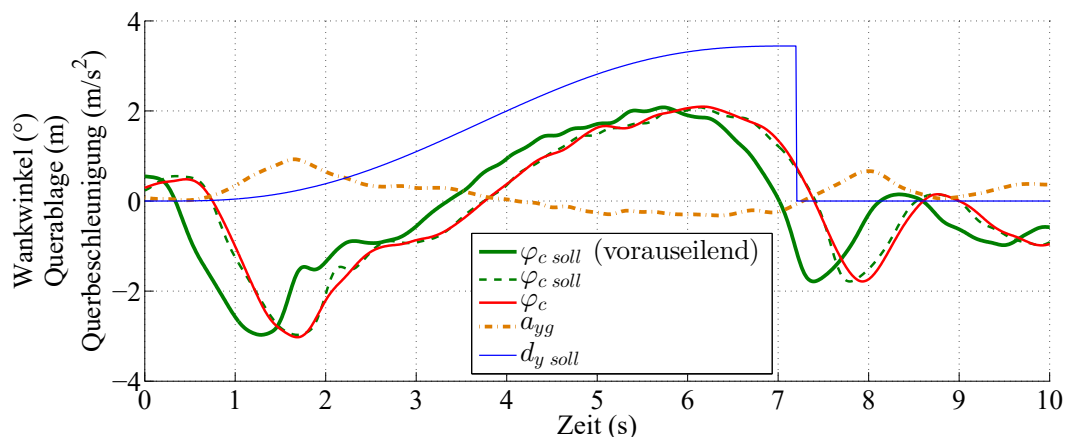


Abbildung 5.16: Folgeverhalten des Konzepts *Regelung*. Der Sollwert $\varphi_{c,soll}$ (Ansteuerung eilt um 0,4 s voraus) wird dem Istwert φ_c gegenübergestellt. Die Messdaten entstammen einem getriggerten Fahrstreifenwechsel (Anstieg von Querablage $d_{y,soll}$ und Querbeschleunigung a_{yg}) der Funktion tLCA mit variabler Aufgabenübernahme bei stillstehendem Lenkrad (s. Abschnitt 4.2.2)

Ansteuerung mit Stellgrößen- und Stellratenbegrenzung.

Zusammenfassend erfüllt das Konzept *Regelung* sowohl die Anforderungen an die Nutzung als unterlagerter (Lenkwinkel-)Regler (s. Abb. 5.6) als auch jene des querkraftfreien Fahrens.

5.3.1.3 Abschaltung bei hoher Fahrdynamik

Das Konzept zur Abschaltung der Regelung wird in Kooperation mit [77] entwickelt. Es gliedert sich in die Erkennung relevanter Situationen und die Überführung in einen Zustand, welcher aufgrund theoretischer Überlegungen und praktischer Versuche als fahrdynamisch stabil erachtet wird.

Erkennung kritischer Situationen Um die Fahrsicherheit zu gewährleisten, wird ein konservativer Ansatz gewählt. Nach [120] ist ein Fahrzustand kritisch, "wenn der Fahrer durch die ihm zur Verfügung stehenden Eingriffsmöglichkeiten (Lenkrad, Fahr-/Bremspedal) und mit seiner Fahrerfahrung das Fahrzeug nicht selbstständig in einen stabilen Zustand zurückführen kann" [120, S. 6]. In dieser Arbeit bezieht sich der Begriff *kritisch* vorwiegend auf die Fahrzeugstabilität. Diese kann über den Schwimmwinkel [8] oder ähnlich dem ESC über die kombinierte Betrachtung mehrere Messgrößen, wie zum Beispiel Radrehzahl, Querbeschleunigung, Gierrate und Lenkwinkel quantifiziert werden [17]. Da kein Schwimmwinkelbeobachter für geringe Querdynamik zur Verfügung steht und die Schwelle zum serienmäßigen ESC-Eingriff als zu hoch erachtet wird, wird ein eigener Ansatz entwickelt. Dieser beruht auf der Überwachung der Messgrößen *Lenkradgeschwindigkeit/-*

moment, *Fahrzeugquer-/längsbeschleunigung* und *Gierrate*, welche zu definierende Schwellwerte nicht überschreiten dürfen. Zur Festlegung der Schwellwerte werden Manöver durchgeführt, welche von Experten als noch nicht kritisch bewertet werden. Die Schwellwerte werden teilweise geschwindigkeitsabhängig angepasst. Vorteilhaft an dieser Umsetzung ist der niedrige Implementierungsaufwand sowie die im Bedarfsfall schnelle und einfache Anpassung.

Überführung in einen fahrdynamisch stabilen Zustand Da eine fahrdynamisch optimale Ansteuerung des eABC nicht im Fokus dieser Arbeit steht, wird ein pragmatischer Ansatz verfolgt und durch Fahrversuche validiert.

Ausgangspunkt der theoretischen Betrachtung ist eine erkannte kritische Situation und die Abstützung des Wankmoments vorwiegend über die HA. Um die Übersteuertendenz zu verringern, wird die Radlastdifferenz an der HA abgebaut und das Wankmoment stattdessen über die VA abgestützt, was zur Untersteuertendenz beiträgt [85]. Hierzu wird der Durchgriff des Reglers auf die Aktorik unterbrochen, die aktuelle Position der VA-Aktoren gehalten und die HA-Aktoren stromlos geschaltet. Da die Aktoren nicht selbsthemmend sind, entspricht dieser Zustand einem Freilauf.

Erfolgt das erkannte dynamische Fahrmanöver *in Richtung* der abgesenkten Fahrzeugseite, besteht an beiden Achsen ausreichend Federwegsreserve. Aufgrund der Wankmomentenabstützung über die VA überwiegt jedoch dort die Radlastdifferenz, was zur Untersteuertendenz beiträgt. Erfolgt das Manöver *entgegen* der abgesenkten Fahrzeugseite, so drückt vorwiegend die VA-Aufhängung kurvenaußen auf den Druckpuffer, da die HA-Aufhängung konstruktiv bedingt einen größeren Federweg aufweist. Die fehlende Federwegsreserve führt zu dynamischen Radlastschwankungen, welche das Seitenkraftpotential der VA reduzieren. Zudem wird das Wankmoment auch in diesem Fall vorwiegend über die VA abgestützt, was zusätzlich zur Untersteuertendenz beiträgt.

Nachteilig an diesem Vorgehen ist der einhergehende Abbau des ursprünglichen Wankwinkels. Erfolgt keine Kompensation des Lenkeffekts infolge Wankens, so wird dem Fahrer ein Korrekturlenkwinkel zur Haltung des Kurses abverlangt (s. Abschnitt 5.2.3). Gemäß der Ergebnisse des Kapitels 6 sind hierbei jedoch keine schreckhaften Reaktionen zu erwarten.

Weiterhin ist ein Ausfall des eABC zu betrachten. Da die Aktoren nicht selbsthemmend sind, gehen sämtliche Aktoren in den Freilauf. Dies ist insbesondere bei Manövern *in Richtung* der abgesenkten Fahrzeugseite nachteilig, da der Aufbau aufgrund des geringen gegenläufigen Wankmoments schnell nach kurvenaußen wankt bis die Radaufhängungen schließlich auf die Druckpuffer prallen. Wird der Lenkeffekt infolge Wankens nicht kompensiert, ist eine entsprechend schnelle Lenkkorrektur erforderlich. Aufgrund des konstruktiv bedingt größeren Freigangs an der HA ist anschließend mit verstärkter Wankabstützung über die VA sowie

höheren dynamischen Radlastschwankungen am kurvenäußeren Rad der VA zu rechnen, was eine Untersteuertendenz begünstigt.

Die vorangegangenen theoretischen Überlegungen zum Eigenlenkverhalten nach Abschaltung des Konzepts *Regelung* sowie zum Eigenlenkverhalten bei Ausfall der Aktorik werden in Kapitel 5.3.3 durch Fahrversuche validiert.

5.3.2 Steuerung (Funktionen: NI, FCA, LDW)

Das in Kapitel 5.3.1 vorgestellte Konzept *Regelung* ist wegen der Übersteuertendenz für hohe Querdynamik ungeeignet. Da in den Funktionen NI, FCA und LDW eine hohe Dynamik zu erwarten ist, wird für diese ein separates Konzept entworfen.

Eine Anforderung ist es, die Fahrsicherheit zu gewährleisten. Zudem soll sich der Versuchsträger in dynamischen Manövern ähnlich einem Serienfahrzeug verhalten, da ein ungewohntes Fahrverhalten unsichere Fahrerreaktionen provozieren kann. Dies würde die Ergebnisse der Probandenstudien verfälschen. Bei der Betrachtung und Gestaltung des Fahrverhaltens stehen das Kurven- und Übergangsverhalten (s. Abschnitt 5.3.3) sowie das reaktive Wankverhalten (s. Kapitel 2.4.1) im Vordergrund. Bezüglich der Wankbewegung wird gefordert, dass die Wankrate und Wankbeschleunigung deutlich über der Wahrnehmungsschwelle liegen und die Wankbewegung subjektiv als Ruck empfunden wird. Somit ist eine hohe Dynamik erforderlich. Im Gegensatz zu den Funktionen LKA / tLCA ist jedoch keine stationäre Genauigkeit notwendig, da gemäß Kapitel 4.1.4 lediglich eine binäre Richtungsinformation angestrebt wird.

Die genannten Anforderungen lassen den Einsatz einer *Steuerung* zu, da die Steuerstrecke bekannt und keine Störgrößenkompensation erforderlich ist. Eine Steuerung erlaubt es bei vergleichsweise geringem Implementierungsaufwand, die maximale eABC-Dynamik mit minimaler Verzögerung einzustellen, wie es etwa für einen Wankwinkelsprung notwendig wäre. Wie gefordert lässt die Steuerung reaktives Wanken zu, da Wankbewegungen infolge von Lenkeingaben aufgrund des offenen Wirkungswegs einer Steuerung [38] nicht erfasst oder beeinflusst werden.

Um das Fahrverhalten ähnlich dem von Serienfahrzeugen auszuprägen, wird das Wankmoment wie beim Serienfahrzeug über beide Achsen abgestützt. Die Betrachtung des Kurven- und Übergangsverhaltens erfolgt in Abschnitt 5.3.3. Im Vergleich zum Konzept *Regelung*, welches vorwiegend über die HA abstützt, ergibt sich durch die Abstützung über beide Achsen ein geringerer maximaler Wankwinkel, da die HA-Aktoren nicht den vollen Stellweg nutzen können (s. Abschnitt 5.3.1). Weitere Einbußen resultieren aus Stellwegsbegrenzungen, welche zur Vermeidung mechanischer Schäden beim sprunghaften Verfahren der Aktoren erforderlich sind. Der maximale Wankwinkel sowie die erzielbare Dynamik sind in

Abbildung 5.17 dargestellt. Diese zeigt einen Wankwinkelsprung bei 50 km/h ohne bzw. mit

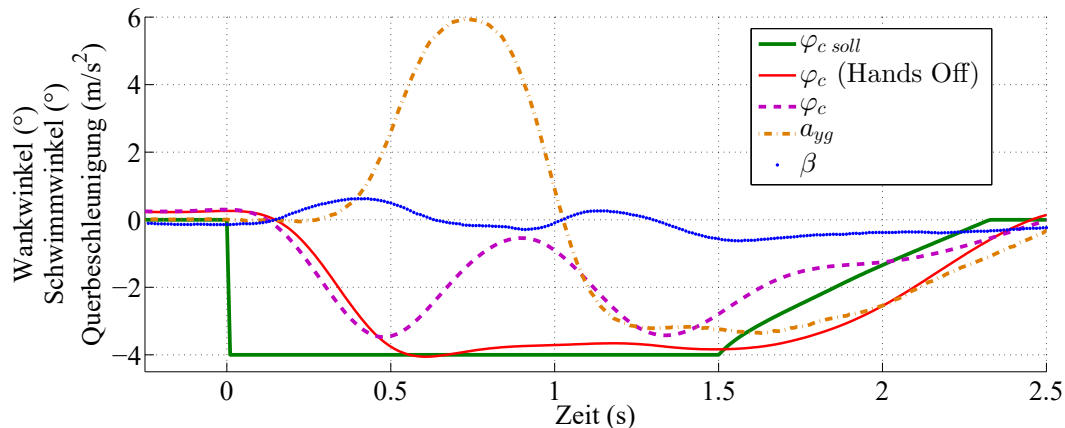


Abbildung 5.17: Wankwinkelsprung ($t = 0$ s) mit Konzept *Steuerung* ohne (*hands-off*) bzw. mit anschließender Lenkreaktion des Fahrers in Richtung des Wankwinkels

exemplarischer Lenkreaktion des Fahrers in Richtung des Wankwinkels. Die stationäre Ungenauigkeit des Wankwinkels beträgt $0,25^\circ$, insofern keine Lenkeingabe erfolgt. Die reaktive Wankbewegung infolge der Lenkeingabe beträgt $3,2^\circ$ (Querbeschleunigung $a_{yg} = 6 \text{ m/s}^2$, Schwimmwinkel $\beta = 0,6^\circ$).

Die Forderung nach deutlich wahrnehmbarem Wankverlauf wird erfüllt, da die Maximalwerte der Wankrate ($16^\circ/\text{s}$), Wankbeschleunigung ($125^\circ/\text{s}^2$) und Vertikalbeschleunigung ($0,75 \text{ m/s}^2$) die jeweiligen Wahrnehmungsschwellen von $0,25^\circ/\text{s}$ [130], $0,2^\circ/\text{s}^2$ [83] und $0,05 \text{ m/s}^2$ [83] um ein Vielfaches überschreiten. Zudem erfolgt die Überschreitung innerhalb von $0,15$ s, weswegen der Wankwinkelsprung zeitgleich mit der Anforderung wahrgenommen wird [162].

Die stationäre Ungenauigkeit von $0,25^\circ$ und der geringere maximale Wankwinkel von 4° gegenüber $4,5^\circ$ im Konzept *Regelung* sind für die Funktionen NI, FCA und LDW nicht von Nachteil, da lediglich eine binäre Richtungsinformation gefordert wird (s. Kapitel 4.1.4). Das Verhältnis von Signal (Wankwinkel) und Störung (stationäre Ungenauigkeit) entspricht Faktor 16 und wird als ausreichend groß erachtet. Wie gefordert ähnelt das reaktive Wankverhalten demjenigen von Serienfahrzeugen. So wankt der Versuchsträger bei einer Querbeschleunigung von 6 m/s^2 reaktiv um $3,2^\circ$, ein *BMW 7er (E38)* um $3,5^\circ$ [201] und das Referenzfahrzeug *Audi A5 Cabrio* mit Sportfahrwerk aus Kapitel 5.3.3 um $2,4^\circ$.

Zusammenfassend erfüllt das Konzept *Steuerung* die Anforderungen an den einzubringenden Wankverlauf und das reaktive Wankverhalten. Die Ähnlichkeit des Kurven- und Übergangsverhaltens zu denjenigen von Serienfahrzeugen wird in Kapitel 5.3.3 bewertet.

5.3.3 Bewertung des Kurven- und Übergangsverhaltens

Die theoretischen Vorüberlegungen zum Fahrverhalten der Konzepte *Regelung* (s. Abschnitt 5.3.1) und *Steuerung* (s. Abschnitt 5.3.2) werden in Kooperation mit [77] durch Fahrversuche validiert. Ziel ist die Beantwortung folgender Fragestellungen:

- *Ist die Fahrsicherheit beim Ausfall der eABC-Aktorik gewährleistet?*
(Freilauf aller Aktoren)
- *Ist die Rückfallebene des Konzepts 'Regelung' fahrdynamisch stabil?*
(Wankmomentenabstützung über VA, HA-Aktoren im Freilauf)
- *Ähneln das Fahrverhalten mit Konzept 'Steuerung' dem von Serienfahrzeugen?*
(Abstützung über VA und HA)

Das Fahrverhalten wird durch eine Analyse des Kurven- und Übergangsverhaltens [16] charakterisiert. Das Kurvenverhalten wird durch das Manöver *stationäre Kreisfahrt* (s. Abschnitt 5.3.3.1) ermittelt. Das Übergangsverhalten wird anhand eines selbst definierten Manövers bewertet, welches einem *doppelten Fahrstreifenwechsel* ähnelt (s. Abschnitt 5.3.3.2).

Als Referenzfahrzeug dient ein Serienfahrzeug ähnlichen Typs (*Audi A5 Cabrio*) mit gleicher Motorisierung (*3.0 TDI*), ähnlichem Radstand (0,06 m geringer), Sportfahrwerk und identischer Bereifung (*Winterreifen mit 2,4 bar*). Ein größerer Unterschied besteht im Gesamtgewicht. Der Versuchsträger ist 250 kg schwerer, was auf den Verbau von Messtechnik im Kofferraum zurückzuführen ist. Dementsprechend liegt das zusätzliche Gewicht auf der HA. Zur Erfassung der Bewegungsgrößen wird im Referenzfahrzeug eine IMU gleichen Typs verbaut (s. Abschnitt 5.1.1).

Bei den Untersuchungen wird angenommen, dass die Menge aller anfänglich einstellbaren Wankwinkel durch die Betrachtung der jeweiligen Wankwinkel-Extrema repräsentiert werden kann.

5.3.3.1 Stationäre Kreisfahrt

Das Fahrmanöver *stationäre Kreisfahrt* [94] beschreibt eine Kreisfahrt im eingeschungenen Zustand von Lenkradwinkel, Geschwindigkeit und Bahnradius [40]. Bei deaktiviertem ESC wird eine Kreisbahn mit einem Radius von 100 m linksherum durchfahren und die Längsgeschwindigkeit ausgehend von 10 km/h mit maximal $0,2 \text{ m/s}^2$ (Erhalt des stationären Zustands) bis zum Grenzbereich erhöht. Als Fahrzeugführer kommt ein geübter, jedoch kein professioneller Fahrer zum Einsatz. Die Konfiguration *Freilauf aller Aktoren* wird zur Schonung der prototypischen eABC-Aktorik nicht getestet.

Zur Beurteilung des Eigenlenkverhaltens wird der Lenkradwinkel δ_{BLW} in Abbildung 5.18

als Funktion der Querbeschleunigung aufgetragen [16]. Um die Vergleichbarkeit der Konfigurationen herzustellen, wird der Lenkradwinkel um den Lenkeffekt infolge des Wankwinkels bei 10 km/h bereinigt (konstanter Offset).

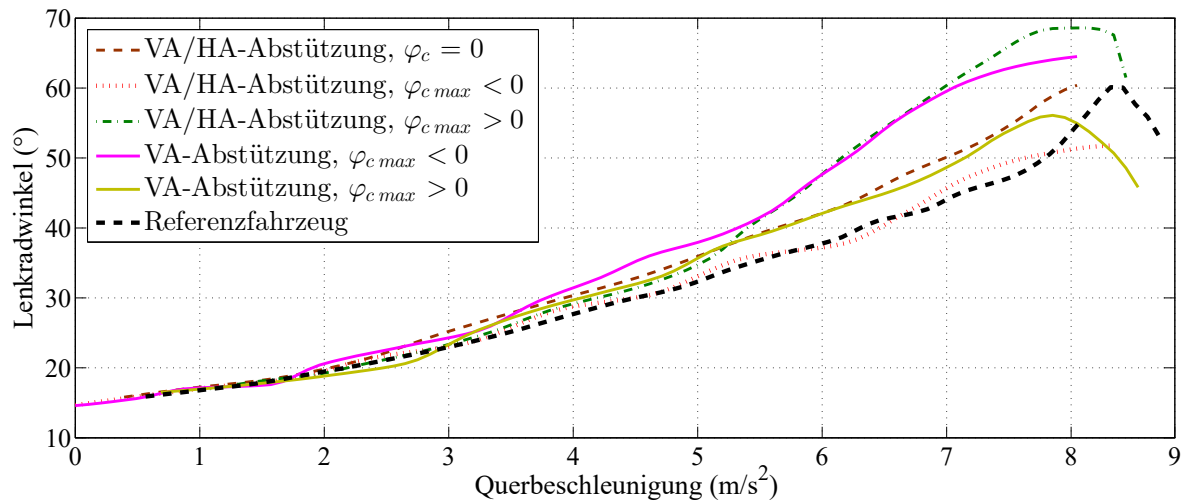


Abbildung 5.18: Ergebnisse des Versuchs *stationäre Kreisfahrt*. Zur Ermittlung des Eigenlenkverhaltens ist der Lenkradwinkel δ_{BLW} als Funktion der Querbeschleunigung aufgetragen. Bild angepasst aus [77]

Abbildung 5.18 zeigt das untersteuernde Verhalten des Referenzfahrzeugs (positiver Lenkradwinkelgradient [200]) bis zum Übersteuern bei $8,34 \text{ m/s}^2$. Der Versuchsträger weist in der Konfiguration *VA-Abstützung*, welche als Rückfallebene des Konzepts *Regelung* dient, unabhängig vom Wankwinkel eine stärkere Untersteuertendenz als das Referenzfahrzeug auf. Dies bestätigt die theoretischen Vorüberlegungen aus Kapitel 5.3.1.3. Bei der *VA/HA-Abstützung* des Konzepts *Steuerung* ist das Eigenlenkverhalten beim Lenken in Richtung des Wankwinkels, was dem gewünschten Fahrerverhalten in den Funktionen NI, FCA und LDW entspricht, nahezu identisch zum Referenzfahrzeug. Dies bekräftigt die Vorüberlegungen aus Kapitel 5.3.2. Bei einem Wankwinkel von 0° (Kontrollgruppe in den Probandenstudien) ist das Eigenlenkverhalten etwas untersteuernder, jedoch weiterhin dem Eigenlenkverhalten des Referenzfahrzeugs ähnlich.

5.3.3.2 Doppelter Fahrstreifenwechsel (Ausweichmanöver)

Zur Untersuchung des Übergangsverhaltens wird ein *open loop*-Ansatz [40] gewählt. Dieser ermöglicht es, das jeweilige Fahrzeugverhalten isoliert zu betrachten (Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis ist nicht von Belang) und mit hoher Reproduzierbarkeit zu vergleichen [185]. Wie in [185] gefordert, sind die Beurteilungskriterien objektiv messbar, da die Fahrzeugstabilität über den Schwimmwinkelverlauf bewertet wird [8].

Als Bahn wird ein doppelter Fahrstreifenwechsel vorgegeben. Dieser ist einem Ausweichma-

nöwer ähnlich und scheint daher für die Funktionen LKA und tLCA praxisrelevant. Zunächst wird der Lenkradwinkelverlauf bestimmt, welcher bei Fahrt *closed loop* mit dem Referenzfahrzeug im Mittel für einen doppelten Fahrstreifenwechsel mit 85 km/h nahe des Grenzbereichs benötigt wird. Im anschließenden Fahrversuch wird der Verlauf mittels LWR (s. Kapitel 5.2.2) aufgeprägt. Um auch die Längsführung reproduzierbar zu gestalten, wird mittels ACC eine Geschwindigkeit von 85 km/h eingeregelt und das Getriebe kurz vor Beginn des Lenkmanövers in Neutralstellung geschaltet. Anschließend wird der LWR aktiviert und der genannte Lenkradwinkelverlauf eingebracht. Die Konfigurationen *VA-Abstützung*, $\varphi_{c\ max} > 0^\circ$ sowie *HA-Abstützung*, $\varphi_{c\ max} < 0^\circ$ konnten aufgrund eines Schadens an der Aktorik nicht getestet werden. Das ESC wurde während des Versuchs deaktiviert. Der Schwimmwinkel wird aus Messdaten der IMU errechnet.

Abbildung 5.19 zeigt die mittels LWR gestellten Lenkradwinkelverläufe, welche als aus-

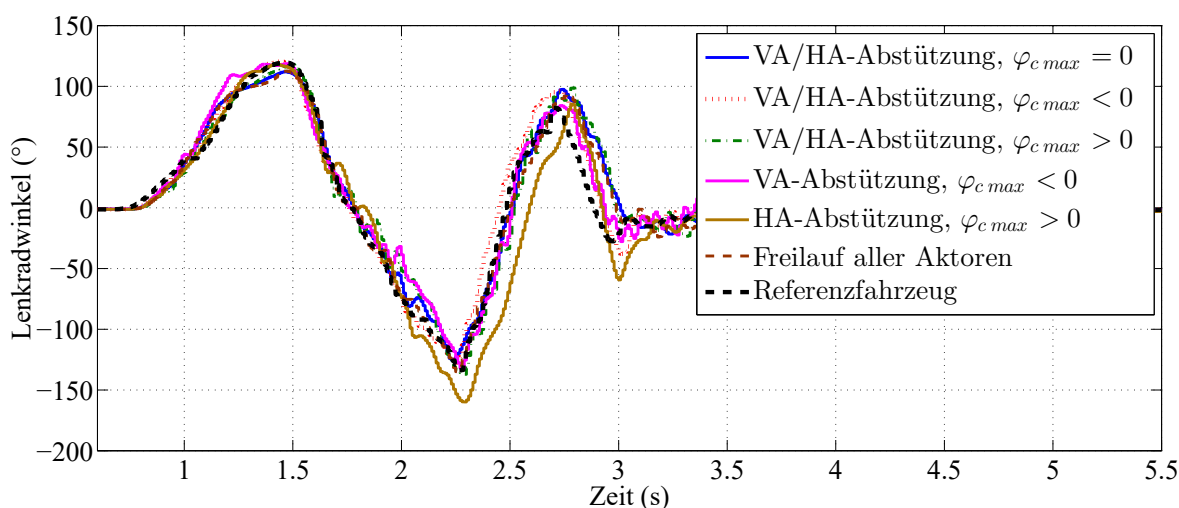


Abbildung 5.19: Lenkradwinkelverläufe des *open loop*-Manövers *doppelter Fahrstreifenwechsel*. Bild angepasst aus [77]

reichend ähnlich zueinander erachtet werden. Die ersichtlichen Abweichungen resultieren aus den Stellgrößen-/Stellratenbegrenzungen der Schnittstelle zur EPS (s. Abschnitt 5.1.2.2), welche gegenüber der Rückstellkraft bei hochdynamischen Manövern zu restriktiv sind.

Die Schwimmwinkelverläufe sind in Abbildung 5.20 dargestellt. In Konfiguration *HA-Abstützung*, $\varphi_{c\ max} > 0^\circ$ ist ein Ausbrechen des Versuchsträgers zu erkennen. In den Konfigurationen *VA/HA-Abstützung* sowie *Freilauf aller Aktoren* stellt sich im Vergleich zum Referenzfahrzeug meist ein geringerer Schwimmwinkel sowie ein abgeschwächtes Einschwingen am Ende des Manövers ein. Die geringsten Schwimmwinkelamplituden weist die Variante *VA-Abstützung*, $\varphi_{c\ max} < 0^\circ$ auf. Das Ausbrechen des Fahrzeugs bei *HA-Abstützung* (VA-Aktoren im Freigang) bekräftigt die vorsorgliche Abschaltung des Konzepts *Regelung* bei hoher Querschleunigung (s. Abschnitt 5.3.1.3). Im Unterschied zur getesteten Konfiguration *HA-Abstützung* wird im Konzept *Regelung* zum Teil auch über die VA abgestützt, da die

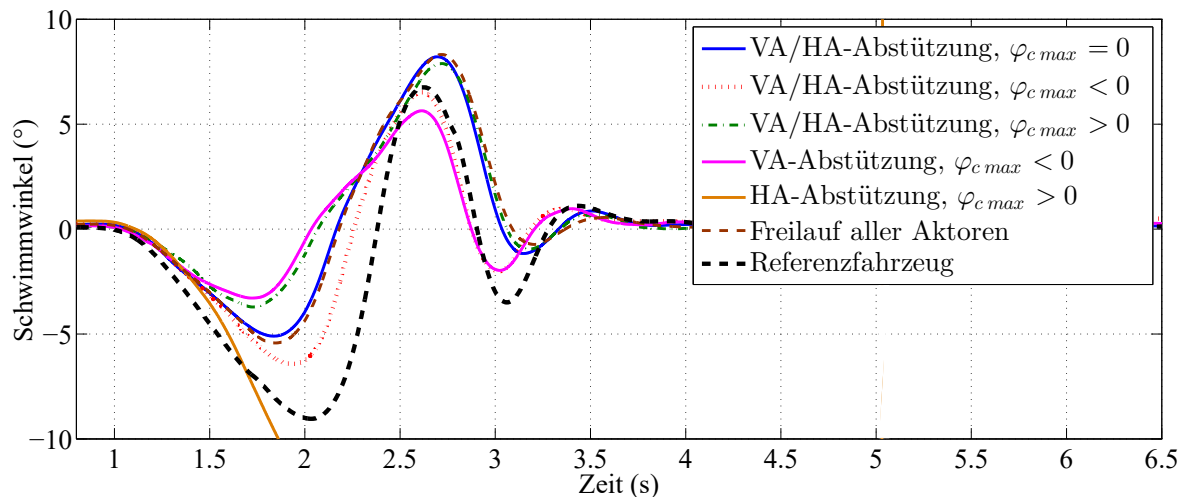


Abbildung 5.20: Schwimmwinkelverläufe des Fahrversuchs *doppelter Fahrstreifenwechsel* (*open loop*). Bild angepasst aus [77]

VA-Aktoren nicht im Freigang sind und bei reaktivem Wanken somit zunehmend über diese abgestützt wird. Mit Konzept *Regelung* ist daher ein gutmütigerer Verlauf zu erwarten.

Die Abstützung über beide Achsen (Konzept *Steuerung*) sowie der *Freilauf aller Aktoren* (Ausfall des eABC) erweisen sich als stabil und dem Verhalten des Referenzfahrzeugs am ähnlichsten. Das stabilste Verhalten wird bei ausschließlicher Abstützung über die VA erzielt, was der Rückfallebene des Konzepts *Regelung* entspricht. Anzumerken ist, dass die Variante *VA-Abstützung*, $\varphi_{c\ max} > 0^\circ$ nicht getestet werden konnte. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich ein ähnlich stabiles Verhalten ergibt, da der Schwimmwinkel mit Variante *VA-Abstützung*, $\varphi_{c\ max} < 0^\circ$ sowohl beim Lenken in als auch entgegen der Richtung des Wankwinkels am geringsten ist.

5.3.3.3 Fazit der Fahrversuche

Im Folgenden werden die Fragestellungen zu Beginn dieses Kapitels beantwortet und bewertet, ob die Konzepte *Regelung* und *Steuerung* das gewünschte Fahrverhalten erzeugen.

Ist die Fahrsicherheit beim Ausfall der eABC-Aktorik gewährleistet? Beim Ausfall befinden sich alle Aktoren im Freilauf. Mit dem *doppelten Fahrstreifenwechsel* wird nachgewiesen, dass das Übergangsverhalten stabil und ähnlich dem Verhalten des Referenzfahrzeugs ist. Die Fahrsicherheit ist somit auch beim Ausfall des eABC gewährleistet.

Ist die Rückfallebene des Konzepts 'Regelung' fahrdynamisch stabil? Der *doppelte Fahrstreifenwechsel* zeigt die hohe Übersteuertendenz bei *ausschließlicher* Abstützung über die HA. Obwohl im Konzept *Regelung* ein gutmütigerer Verlauf zu erwarten ist, erscheint die vorsorgliche Abschaltung bei hoher Querschleunigung gerechtfertigt.

Die in diesem Fall aktivierte Rückfallebene *Abstützung über VA* zeigt sowohl im Kurvenverhalten (Eigenlenkverhalten) als auch im Übergangsverhalten den gewünschten gutmütigen Verlauf (Untersteuertendenz). Sie ist daher für hohe Querdynamik geeignet.

Ähneln das Fahrverhalten mit Konzept 'Steuerung' dem von Serienfahrzeugen? Mit der genutzten Konfiguration *VA/HA-Abstützung* wird bei Lenkmanövern in Richtung der Wankbewegung, was dem gewünschten Fahrerverhalten in den Funktionen NI, FCA und LDW entspricht, ein zum Referenzfahrzeug nahezu identisches Eigenlenkverhalten und ein sehr ähnliches Stabilitätsverhalten erzielt. Bei einem Wankwinkel von 0° , was der Kontrollgruppe in den Probandenstudien entspricht, wird ein ähnliches Eigenlenkverhalten und ein vergleichbares Stabilitätsverhalten erzielt. Da auch das reaktive Wankverhalten dem eines Serienfahrzeugs gleicht (s. Abschnitt 5.3.2), wird das Konzept *Steuerung* als geeignet angesehen, um ein Fahrverhalten ähnlich dem von Serienfahrzeugen zu erzielen.

Kritisch anzumerken ist, dass in den Fahrversuchen nur die Rückfallebene des Konzepts *Regelung* betrachtet wird. Von Interesse wäre auch das Fahrverhalten während des Abschaltvorgangs, respektive der Überführung in die fahrdynamisch stabile Rückfallebene. Aufgrund der sofortigen Verschiebung der Wankmomentenabstützung in Richtung VA (s. Abschnitt 5.3.1.3) liegt aus theoretischer Sicht auch währenddessen eine Untersteuertendenz vor, weshalb ein Fahrversuch als nicht zwingend notwendig erachtet wird.

Zusammenfassend bestätigen die Fahrversuche die theoretischen Vorüberlegungen. Das Fahrverhalten der Konzepte *Regelung* und *Steuerung* wird daher als geeignet angesehen.

5.3.4 Zusammenfassung der Regelstrategien

Aufgrund des frühen Entwicklungsstands des eABC lag noch kein Gesamtkonzept zu dessen Ansteuerung vor, in welches die Wankfunktionalität hätte integriert werden können. Diese greift daher alleinig und unmittelbar auf die eABC-Aktorik zu. Zur Umsetzung der Anforderungen an den Wankverlauf werden zwei separate Konzepte genutzt.

Um den Wankverlauf für querkraftfreie Fahrt bis 120 km/h zu stellen, was für die Funktionen LKA/tLCA mit *alternativer* Aufgabenübernahme gefordert ist, wird das Konzept *Regelung* genutzt. Dieses basiert auf einem in [13] simulativ vorgestelltem Ansatz. Es wird gezeigt, dass der Ansatz die Anforderungen an den Wankverlauf auch im Realfahrzeug erfüllt. Jedoch droht hierbei eine Übersteuertendenz, weshalb ein Konzept zur Gewährleistung der Fahrsicherheit entworfen wird. Dieses schaltet das Konzept *Regelung* bei hoher Querbeschleunigung geeignet ab und überführt das Fahrzeug in einen fahrdynamisch stabilen Zustand. Die Radlastverteilung des Konzepts *Regelung* prägt den Lenkeffekt infolge Wankens *zufällig* so aus, wie es für die Nutzung als entkoppelter Querführungsaktor in den Funktio-

nen LKA/tLCA mit *variabler* Aufgabenübernahme gefordert wird (s. Abschnitt 5.2.3.4). Das Konzept *Regelung* ist somit für beide Varianten der Funktionen LKA/tLCA geeignet und wird im Weiteren für diese eingesetzt.

Zur Einbringung des Wankverlaufs in den Funktionen NI, FCA und LDW, in welchen vorab eine hohe Querschleunigung zu erwarten ist, wird eine Steuerung entworfen. Im Unterschied zum Konzept *Regelung* stützt das Konzept *Steuerung* das Wankmoment über beide Achsen ab. Zum einen ermöglicht dies eine höhere Dynamik beim geforderten Wankwinkelsprung, da sämtliche Aktoren zur Wankbeschleunigung beitragen. Zum anderen wird hierdurch die geforderte Ähnlichkeit des Fahrverhaltens zu jenem von Serienfahrzeugen erzielt. Hierzu wird das Kurven- und Übergangsverhalten sowie das reaktive Wankverhalten in Fahrversuchen evaluiert. Ein ähnliches Fahrverhalten ist notwendig, um die Ergebnisse der hochdynamischen Versuche nicht durch Fahrerreaktionen zu überlagern, welche aus ungewohntem Fahrverhalten resultieren. Im Unterschied zum Konzept *Regelung* ist keine stationäre Genauigkeit und nur ein geringerer maximaler Wankwinkel erzielbar.

5.4 Implementierung der Assistenzsysteme

Als zentrale Recheneinheit dient ein echtzeitfähiges *rapid-control-prototyping* Steuergerät des Typs *Micro-Autobox II* der Firma *dSpace GmbH* [47], welches über CAN-Bus mit der Sensorik und Aktorik kommuniziert.

5.4.1 Informierende und warnende Funktionen (NI, FCA, LDW)

Dieser Abschnitt stellt die geforderte hochgenaue Lokalisierung für die Funktionen NI, FCA und LDW sowie die Implementierung sämtlicher Komponenten vor. Die Erzeugung des Wankverlaufs wird in Kapitel 5.3.2 behandelt. Möglichkeiten zur Unterbindung des Einflusses des Lenkeffekts infolge Wankens auf die Querführung und damit einhergehende Einschränkungen werden in Kapitel 5.2.3 behandelt.

5.4.1.1 NI, FCA

Die Funktionen NI und FCA werden in den Probandenstudien auf vorab definierten Strecken getestet. Die Beschränkung auf wenige Strecken erlaubt es diese hochgenau zu vermessen und das Fahrzeug im Versuch mittels der DGPS-fähigen IMU zu lokalisieren. Vorteilhaft an diesem Vorgehen ist die hohe Genauigkeit und Reproduzierbarkeit bei gleichzeitig geringem Implementierungsaufwand.

Abbildung 5.21 stellt die Umsetzung der Funktionen NI und FCA schematisch dar. Aus dem Modul *Abgespeicherte Streckendaten* resultiert die Größe *Bahnposition*, welche die aktuelle

Position des Fahrzeugs auf der zuvor abgespeicherten Bahn beschreibt. Die jeweils relevanten Punkte, zum Beispiel das Hindernis bei Funktion FCA und die Abbiegesituation bei Funktion NI sind auf der abgespeicherten Bahn markiert, sodass ein vorauseilender Anstieg des Soll-Wankwinkels möglich ist. Der Wankwinkel wird mittels Konzept *Steuerung* gestellt (s. Kapitel 5.3.2), wobei der einhergehende Lenkeffekt nicht kompensiert werden muss (s. Kapitel 5.2.3.4).

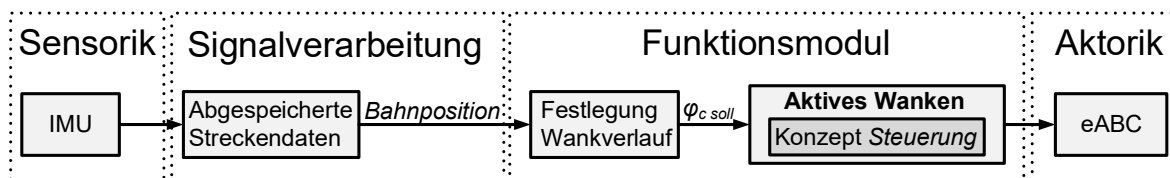


Abbildung 5.21: Struktureller Aufbau der Funktionen NI und FCA

5.4.1.2 LDW

Die Funktion LDW wird in der Probandenstudie auf der Autobahn getestet. Da der genutzte Streckenabschnitt in Abhängigkeit der Verkehrssituation variieren kann, erfolgt die Lokalisierung nicht auf Basis abgespeicherter Streckendaten, sondern mittels Umfeldsensorik. Abbildung 5.22 stellt den Aufbau der Funktion LDW schematisch dar. Die Frontkamera stellt die Querablage des Fahrzeugs im Fahrstreifen zur Verfügung und übergibt diese an das Funktionsmodul, welches den Soll-Wankverlauf bestimmt. Dieser wird durch das Konzept *Steuerung* (s. Kapitel 5.3.2) gestellt, wobei der damit einhergehenden Lenkeffekt zu kompensieren ist (s. Kapitel 5.2.3.4). Das Modul *Aufschaltung ADS* legt den hierzu erforderlichen Überlagerungswinkel der ADS fest. Die Bewertung des Gesamtsystems erfolgt in Kapitel 6.2.2. Im Folgenden werden die jeweiligen Komponenten detailliert betrachtet.

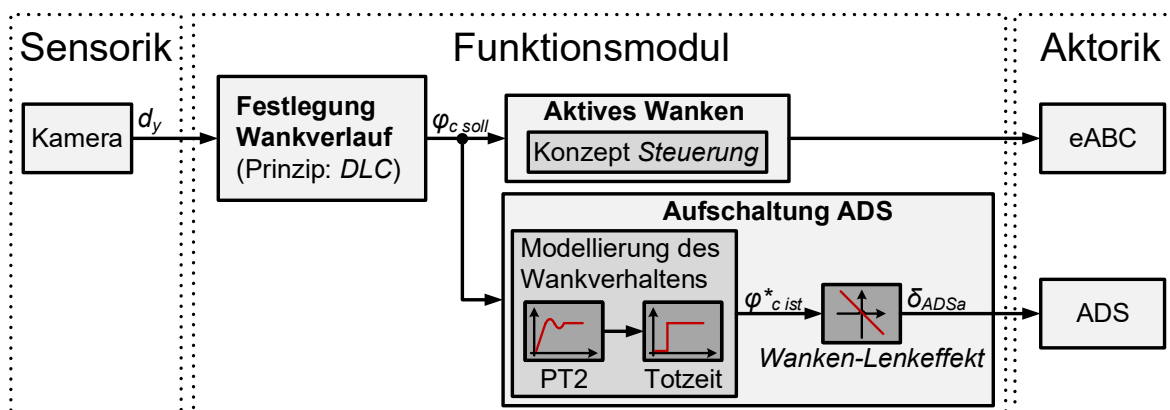


Abbildung 5.22: Struktureller Aufbau der Funktion LDW

Funktionsprinzip *Distance-to-Line-Crossing (DLC)* Die Funktion LDW wird nach dem Prinzip *DLC* [6] implementiert, welches eine Warnung ausgibt, sobald ein definierter Abstand zur Fahrstreifenbegrenzung unterschritten wird. Nachteilig gegenüber dem Prinzip *Time-to-Line-Crossing* ist die erhöhte Zahl an Falschaktivierungen, beispielsweise beim Kurvenschneiden sowie die fehlende Möglichkeit zum prädiktiven Auslösen [6]. Ersteres ist für die Probandenstudie nicht relevant, da die Funktion bei Geradeausfahrt getestet wird. Da Auslösezeitpunkt und Wankbewegung als zeitgleich wahrgenommen werden (s. Kapitel 5.3.2), ist es nicht zwingend erforderlich den Zeitverzug des Konzepts *Steuerung* zu kompensieren. Jedoch könnte die Reaktionszeit des Fahrers durch prädiktives Auslösen zum Teil kompensiert werden. Für die Probandenstudie ist dies jedoch nicht von Belang, da die Fahrzeug-Bahnkurve nicht ausgewertet, sondern lediglich qualitativ geprüft wird, ob der Fahrstreifen beibehalten wird. Aufgrund des geringeren Implementierungsaufwands wird daher das Konzept *DLC* gewählt.

Aufschaltung ADS Der Lenkeffekt infolge Wankens wird durch einen additiven Überlagerungswinkel der ADS kompensiert, welcher am Fahrerhandmoment abgestützt wird (s. Kapitel 5.2.3.4). Um diesen zeitgleich zum Lenkeffekt bzw. Wankwinkel stellen zu können, ist der Zeitverzug der ADS in Höhe von 0,035 s zu kompensieren. Da eine lineare Prädiktion des Ist-Wankwinkels aufgrund dessen sprunghaften Verlaufs zu Fehlern führt, wird eine Berechnung auf Basis des Soll-Wankwinkels bevorzugt. Hierzu wird der Wankwinkelsprung mit Konzept *Steuerung* (s. Abb. 5.17) durch ein PT2-Glied und ein Totzeitglied modelliert, wobei die Totzeit um den Zeitverzug der ADS reduziert wird. Mit Hilfe der Kennlinie *Wanken - Lenkeffekt* (s. Abb. 5.13) wird anschließend der benötigte Überlagerungswinkel ermittelt.

5.4.2 Kontinuierlich automatisierende Funktionen (LKA, tLCA)

Abbildung 5.23 stellt die wichtigsten Systemkomponenten der Funktionen LKA und tLCA sowie den Aufbau dieses Kapitels dar. Systemkomponenten mit doppelter Umrandung wurden bereits vorgestellt. Das Modul *Querregler* wurde in Abschnitt 5.2.1, der *LWR* in Abschnitt 5.2.2 und das Konzept *'Regelung'* in Abschnitt 5.3.1 beschrieben.

5.4.2.1 Sensorik, Signalverarbeitung, Bahnplanung

Sensorik Die Umsetzung der Funktionen erfolgt weitgehend auf Basis der serienmäßigen Umfeld- und Eigenbewegungssensorik (s. Kapitel 5.1.1). Um die Fahrsicherheit auch beim Ausfall der Umfelddaten gewährleisten zu können, wird eine Rückfallebene implementiert, welche die Daten ersatzweise zur Verfügung stellt. Ähnlich zur Umsetzung der Funktionen NI und FCA (s. Abschnitt 5.4.1.1) basiert diese auf der Lokalisierung mittels IMU innerhalb

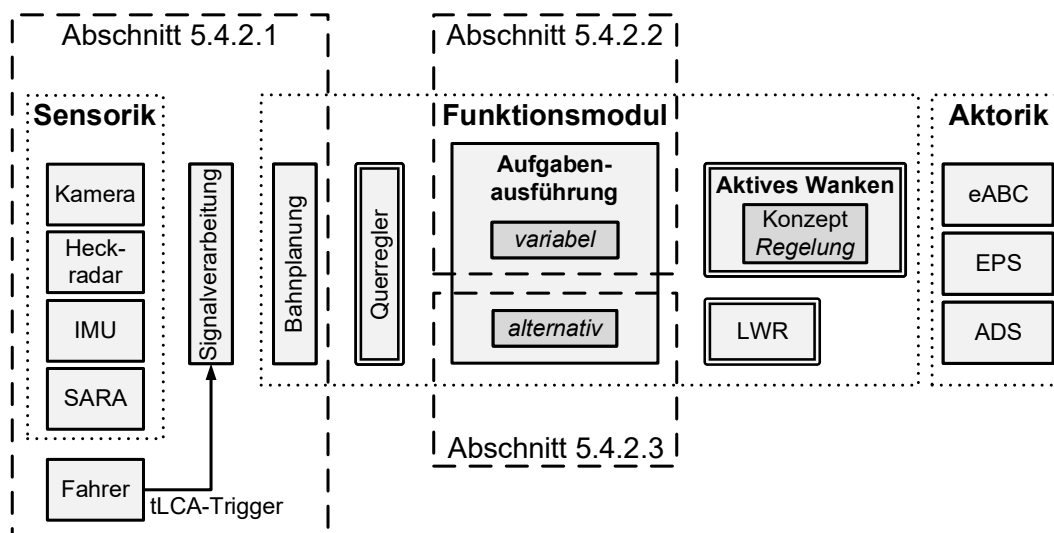


Abbildung 5.23: Struktureller Aufbau der Funktionen LKA und tLCA. Das Modul *Querregler* wird in Abschnitt 5.2.1, das Modul *LWR* in Abschnitt 5.2.2 und das Modul *Konzept 'Regelung'* in Abschnitt 5.3.1 vorgestellt

zuvor abgespeicherter Streckendaten (Referenzbahnen sind mittig im jeweiligen Fahrstreifen hinterlegt).

Signalverarbeitung Die Frontkamera ordnet die Fahrstreifenmarkierungen bereits den jeweiligen Fahrstreifen zu (s. Abschnitt 5.1.1). Ausfälle der Fahrstreifenmarkierungen werden wie folgt abgefangen: Fällt *eine* Fahrstreifenmarkierung aus, stützt sich die Querführung auf die verbleibende Markierung. Fallen beide aus, werden die Daten der Rückfallebene genutzt (s. vorhergehender Abschnitt *Sensorik*). Mögliche Ursachen eines Ausfalls sind Störungen, wie etwa Gegenlicht oder ein zu großer Wankwinkel, da die Fahrstreifenmarkierung dann nicht mehr im Sichtbereich der Kamera liegt (s. Kapitel 3.2).

Um die Funktion tLCA jederzeit ausführen zu können, wird die Breite der möglichen Fahrstreifenwechsel permanent bestimmt. Hierzu werden die Fahrstreifenmarkierungen der Nachbarfahrstreifen, insofern vorliegend einem gleitenden Mittelwert zugeführt und der laterale Versatz berechnet. Die tLCA-Anforderung des Fahrers wird zunächst mit dem binären Signal der Rückraumüberwachung abgeglichen. Falls der Rückraum belegt ist, wird die Anforderung ignoriert. Falls er frei ist, wird der laterale Soll-Versatz des Fahrstreifenwechsels dem Modul *Bahnplanung* zur Verfügung gestellt.

Zudem wird die aktuelle Straßenquerneigung η aus der Differenz des *Wankwinkels relativ zum Schwerevektor* φ_g und des *Wankwinkels relativ zur Straßenoberfläche* φ_c berechnet (s. Abb. 2.7). Eine vorausseilende Bestimmung ist mangels Verfügbarkeit von geeigneter Software nicht möglich, könnte jedoch durch die Schätzung der Straßenverwindung auf Basis von Kameradaten bewerkstelligt werden [13].

Bahnplanung Die Ausgestaltung der Bahnplanung erfolgt in Kooperation mit [106]. Als Soll-Bahn der Funktion LKA wird die Mitte des Fahrstreifens definiert. Dementsprechend wird, insofern beide Fahrstreifenmarkierungen verfügbar sind der Mittelwert der jeweils gemessenen Größen Ψ_{Diff} , c_0 und c_1 verwendet. Der Verlauf des getriggerten Fahrstreifenwechsels wird gemäß [110, 192] als Polynom fünften Grades ausgeprägt, welches krümmungstetig und ruckoptimal ist. Dieses wird der Soll-Bahn des eigenen Fahrstreifens überlagert. Der ruckoptimale Verlauf entspricht der Forderung nach hohem Fahrkomfort (s. Abschnitt 2.2.3.3). Als Randbedingungen des Polynoms dienen die Fahrstreifenwechselbreite (s. Abschnitt *Signalverarbeitung*) sowie die gewünschte Dauer des Fahrstreifenwechsels. Die Bahn des Fahrstreifenwechsels wird zu Beginn einmalig berechnet. Dies ist nachteilig, da anfängliche Messfehler der Fahrstreifenwechselbreite während des Fahrstreifenwechsels nicht mehr korrigiert werden können. Der Fahrstreifenwechsel endet dann nicht exakt auf der Bahn des neuen Fahrstreifens, was zu einem leichten Einschwingvorgang des Querreglers führen kann.

5.4.2.2 Variable Aufgabenübernahme

Die Funktionen LKA und tLCA sind mit *variabler* und *alternativer* Aufgabenübernahme umzusetzen. Zusätzlich sind Ausprägungen zu implementieren, welche in den Probandenstudien gegenübergestellt werden.

Dem Konzept der *variablen* Aufgabenübernahme (s. Kapitel 4.2.2) werden die Ausprägungen *Summenpunkt Lenkrad (SL)* und *Summenpunkt Lenkrad mit Wankbewegung (SLW)* gegenübergestellt. Die dazugehörigen Implementierungen sind in Abbildung 5.24 dargestellt und werden im Folgenden erläutert. Gemäß Kapitel 4.2.2.1 wird kein Informationsfluss vom Fahrer zum FAS implementiert, um die Vergleichbarkeit auf konzeptioneller Ebene herzustellen.

Konzept *Variable Aufgabenausführung (VAA)* Die Realisierung entspricht der Forderung aus Abbildung 4.4. Da der entkoppelte Lenkaktor über den Lenkeffekt infolge Wankens realisiert wird (s. Kapitel 5.2.3), reduziert sich die zu implementierende Struktur auf jene in Abbildung 5.24a. Diese erfüllt die Forderungen, dass sich der Fahrer flexibel an der Querführung beteiligen kann und kein Einfluss auf das Lenkrad ausgeübt wird. Wie gefordert bleibt somit auch die Lenkradstellung relativ zum Innenraum konstant, wenn kein Fahrereingriff erfolgt (s. Abb. 4.2b).

Konzept *Summenpunkt Lenkrad (SL)* Das Konzept ähnelt den in Serie befindlichen Systemen mit *Summenpunkt Lenkrad* (simultane Aufgabenausführung). Der zugehörige Informationsfluss ist in Abbildung 2.4 und die Implementierung des Konzepts in Abbildung 5.24b

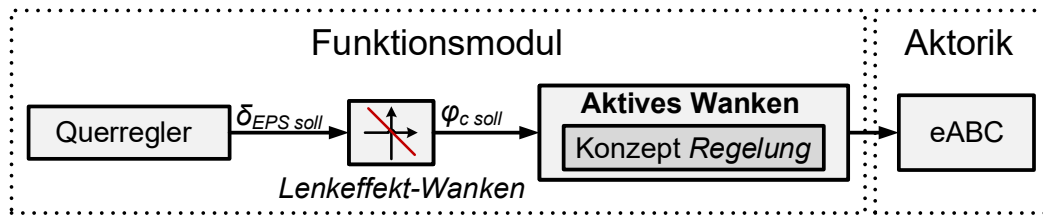
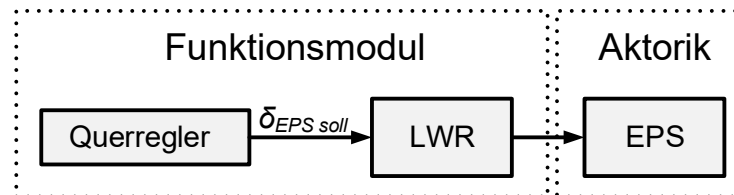
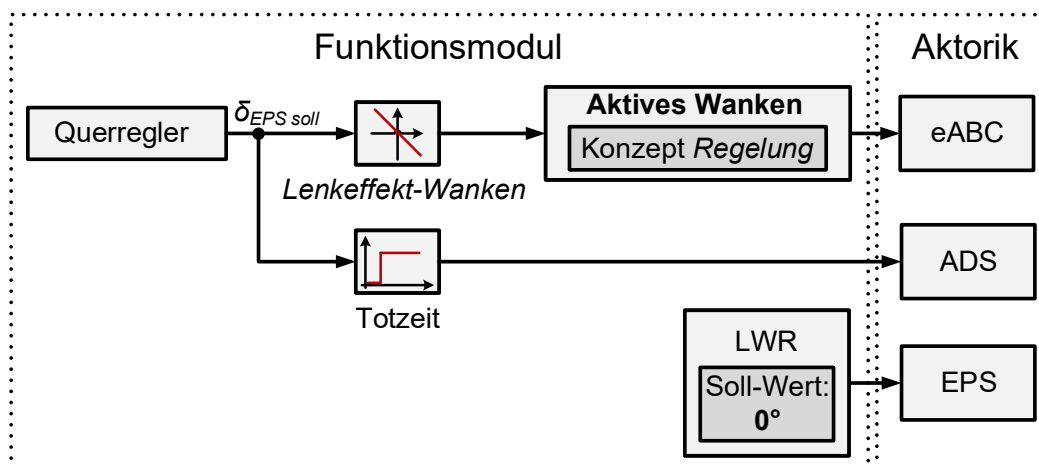
(a) Konzept *Variable Aufgabenausführung (VAA)*(b) Konzept *Summenpunkt Lenkrad (SL)*(c) Konzept *Summenpunkt Lenkrad mit Wankbewegung (SLW)*

Abbildung 5.24: In (a) wird die Implementierung der Funktionen LKA und tLCA mit *variabler* Aufgabenübernahme gezeigt. In (b) und (c) sind die Implementierungen der Konzepte dargestellt, welche in der Probandenstudie gegenübergestellt werden

dargestellt.

Um eine höhere Qualität der Querführung zu erzielen, wird das Lenkrad vom FAS nicht rein momentenbasiert, sondern durch eine Kombination aus winkel- und momentenbasierter Ansteuerung beeinflusst. Hierzu wird der LWR aus Abschnitt 5.2.2 eingesetzt. Die genutzte Momentenschnittstelle zur EPS (s. Abschnitt 5.1.2.2) reduziert in Anlehnung an [6] das *maximal überlagerbare* Moment bei gegenläufigem Fahrerhandmoment. Hierdurch wird der

LWR leichter übersteuerbar und eine simultane Aufgabenausführung am Lenkrad möglich. Der Einbezug des Fahrerhandmoments kommt einem Informationsfluss vom Fahrer zum FAS gleich, welcher bei der genutzten Momentenschnittstelle jedoch nicht zu vermeiden ist. Anderweitig wird kein Informationsfluss vom Fahrer zum FAS implementiert. Beispielsweise wird der Soll-Lenkwinkel $\delta_{EPS\ soll}$ nicht an den Fahrerwunsch angepasst. Entsprechend Kapitel 4.2.2.1 könnte die Implementierung daher als *straffer* bzw. *enger führend* als in Serie befindliche Systeme empfunden werden.

Konzept *Summenpunkt Lenkrad mit Wankbewegung (SLW)* Die Querführung durch Fahrer und FAS ähnelt dem Konzept *SL* (simultane Aufgabenausführung). Die Intention des FAS wird jedoch zusätzlich durch den Wankwinkel rückgemeldet. Die Implementierung ist in Abbildung 5.24c dargestellt.

Ohne Fahrereingriff erfolgt die Querführung ausschließlich durch den Lenkeffekt infolge Wankens. Der FAS-Eingriff (Soll-Lenkwinkel $\delta_{EPS\ soll}$) wird mittels additivem Überlagerungswinkel der ADS am Lenkrad angezeigt. Der LWR stützt den Überlagerungswinkel ab (Vorgabe 0°), damit er trotz anliegender Fahrerhände zu einer Lenkraddrehung führt.

Zum Übersteuern des FAS gibt der Fahrer den Lenkradwinkel vor und das FAS steuert gemäß seiner Zielsetzung entgegen, weil kein Informationsfluss vom Fahrer zum FAS erfolgt. Da der Fahrer den LWR übersteuert, führt der additive Winkel der ADS nicht zu einer Drehung des Lenkrads sondern zu einer additiven Auslenkung der Zahnstange. Die hervorgerufene Lenkwirkung entspricht dem Lenkeffekt infolge Wankens, erfolgt jedoch entgegengesetzt, sodass sich die Effekte gegenseitig aufheben. Zusammenfassend bringt das FAS wunschgemäß keine Lenkwirkung ein, sobald der Fahrer den Lenkradwinkel vorgibt.

Der Unterschied in den Zeitkonstanten der Wankregelung und der ADS wird durch ein Totzeitglied angeglichen (Konzept *Regelung*: 0,4 s, ADS: 0,035 s). Das Folgeverhalten des Konzepts *Regelung* muss aufgrund dessen stationärer Genauigkeit nicht modelliert werden.

5.4.2.3 Alternative Aufgabenübernahme

Bei alternativer Aufgabenübernahme ist das Lenkrad unterhalb einer Lenkmomentenschwelle zu blockieren und während der Fahrt bei 0° relativ zum Fahrzeuginnenraum zu halten (s. Kapitel 4.2.3.1). Die in den Probandenstudien gegenübergestellten Ausprägungen *Aufbau querkraftfrei*, *Aufbau horizontiert* und *Querkraft überkompensiert* unterscheiden sich lediglich im Wankverlauf, sodass zu deren Umsetzung eine Anpassung des Soll-Wankwinkels ausreichend ist (s. Abb. 5.25).

Die Querführung übernehmen der Querregler aus Kapitel 5.2.1 und der LWR aus Kapitel 5.2.2. Das Blockieren des Lenkrads unterhalb einer Lenkmomentenschwelle erfolgt durch den LWR, die Ausrichtung des Lenkrads auf 0° relativ zum Fahrzeuginnenraum durch die

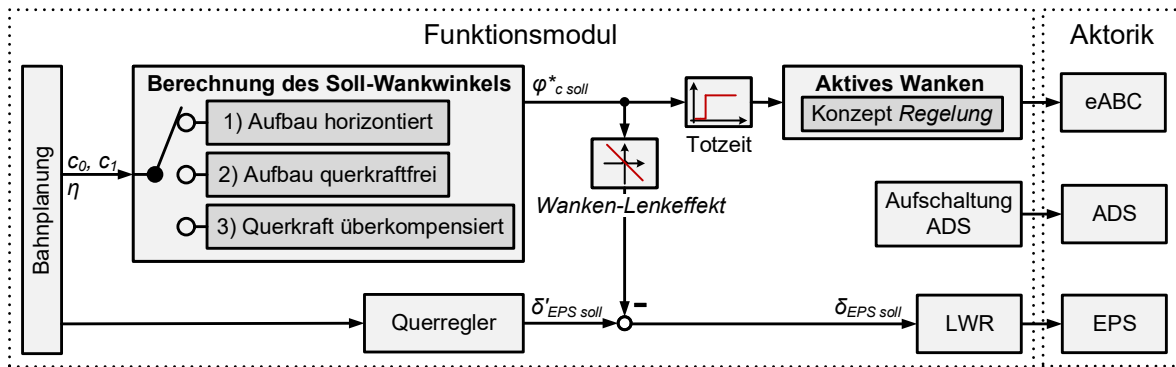


Abbildung 5.25: Implementierung der Funktionen LKA und tLCA mit alternativer Aufgabenübernahme. *Aufbau querkraftfrei* entspricht der in Kapitel 4.2.3 vorgestellten Ausprägung. In der Probandenstudie gegenübergestellt werden die Varianten *Aufbau horizontaliert* und *Querkraft überkompensiert* (s. Kapitel 6.2.1)

ADS. Der Lenkeffekt infolge Wankens wird gemäß Abschnitt 5.2.3.4 als beobachtbare Störgröße berücksichtigt. Hierzu wird der Soll-Wankwinkel $\varphi_{c\,soll}$ um den Zeitverzug T_{LWR} des LWR vorauseilend berechnet und dem LWR zur Verfügung gestellt ($\varphi_{c\,soll}^*$ in Abb. 5.25). Anzumerken ist, dass die Regeldifferenz des Konzepts *Regelung* als ausreichend klein erachtet und daher nicht modelliert wird (max. $0,2^\circ$, s. Abschnitt 5.3.1.2). Da der Zeitverzug $T_{KR} = 0,4\text{ s}$ des Konzepts *Regelung* geringer als $T_{LWR} = 0,47\text{ s}$ ist, wird der vorauseilende Soll-Wankwinkel $\varphi_{c\,soll}^*$ durch ein Totzeitglied um $0,07\text{ s}$ verzögert und anschließend an das Konzept *Regelung* weitergeleitet.

Im Folgenden wird die Berechnung des Soll-Wankwinkels in den jeweiligen Ausprägungen sowie das Modul *Aufschaltung ADS* aus Abbildung 5.25 erläutert.

Variante *Aufbau querkraftfrei (QKF)* Diese entspricht der in Kapitel 4.2.3 vorgestellten Ausprägung. Analog zu [13] soll der Wankwinkel die auf die Insassen wirkende Querbesehleunigung vollständig kompensieren (s. Abb. 2.7). Gemäß Abschnitt 4.2.3.2 wird er aus der Krümmung der Soll-Bahn (c_0, c_1), der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit v und der Straßenquerneigung η berechnet.

Aus den geometrischen Beziehungen aus Abbildung 2.7 und der klothoidischen Bahnkrümmung (Bahnlänge l)

$$c(l) = c_0 + c_1 \cdot l \quad (5.7)$$

ergibt sich mit dem Betrag der Erdbeschleunigung g die Berechnungsvorschrift des prädi-zierten Soll-Wankwinkels $\varphi_{c\,soll}^*$ zu:

$$\varphi_{c\,soll}^* = -\arctan\left(\frac{(c_0 + c_1 \cdot v \cdot T_{LWR}) \cdot v^2}{g}\right) - \eta \quad (5.8)$$

Anzumerken ist, dass die Fahrzeuglängsbeschleunigung vernachlässigt wurde und die Straßenquerneigung η nicht vorseilend zur Verfügung steht.

Variante *Aufbau horizontiert (HO)* Es wird ein konstanter Soll-Wankwinkel $\varphi_{c\text{ soll}}^*$ von 0° vorgegeben.

Variante *Querkraft überkompensiert (ÜK)* Der Soll-Wankwinkel $\varphi_{c\text{ soll}}^*$ entspricht demjenigen der Variante *Aufbau querkraftfrei* multipliziert mit dem Faktor 1,5.

Modul *Aufschaltung ADS* Das Modul soll mithilfe eines additiven Überlagerungswinkels δ_{ADSa} der ADS während der Fahrt einen Lenkwinkel δ_H von 0° sicherstellen. Hierzu wird eine *Steuerung* als ausreichend erachtet, da die Steuerstrecke vollständig bekannt ist (s. Lenkstrang in Abb. 5.5). Zu kompensieren ist die Auslenkung der Zahnstange (Messwert: δ_{BLW}) sowie die Verwindung des Lenkstrangs infolge des Lenkmoments M_H . Maßgebend für die Verwindung mit Torsionssteifigkeit c_{LS} sind der Torsionsstab und die Torsionsdämpfungselemente [161]. Weiterhin ist der serienmäßige Überlagerungswinkel δ_{ADSs} der ADS zu berücksichtigen (s. Abb. 5.5).

Um den Zeitverzug T_{ADS} der ADS zu kompensieren, wird der Lenkwinkel δ_{BLW} mithilfe der Drehzahl n_{EPS} des Servomotors der EPS um T_{ADS} linear extrapoliert. Der Fehler ist hierbei gering, da T_{ADS} klein (0,035 s) und die maximale Lenkradbeschleunigung des LWR vergleichsweise gering ist (s. Abb. 5.11a). Das Lenkmoment M_H sowie der Winkel δ_{ADSs} stehen nicht um T_{ADS} vorseilend zur Verfügung, was zu Abweichungen führt. Gleichung 5.9 fasst die vorangegangenen Überlegungen in einer Berechnungsvorschrift zusammen.

$$\delta_{ADSa} = \delta_{BLW} + n_{EPS} \cdot \frac{i_G}{i_{KGT}} \cdot T_{ADS} + M_H \cdot c_{LS} - \delta_{ADSs} \quad (5.9)$$

Die Torsionssteifigkeit c_{LS} wird im Rahmen eines Versuchs gemessen. Anzumerken ist, dass die Reibung (s. Abschnitt 5.2.2.1) bei der Berechnung der Verwindung des Lenkstrangs vernachlässigt wurde.

Um die Tauglichkeit des Moduls abzuschätzen, ist die Variante *Aufbau horizontiert* zu betrachten. In dieser ist der zu kompensierende Lenkwinkel δ_{BLW} am größten, da der Lenkeffekt infolge Wankens keinen Anteil am Soll-Lenkwinkel $\delta_{EPS\text{ soll}}$ übernimmt (s. Abb. 5.25). Im *Worst Case* Szenario *getriggelter Fahrstreifenwechsel bei minimalem Kurvenradius* weist δ_{BLW} Maximalwerte von 7° und $4^\circ/s$ auf (s. Beginn des Kapitels 5.2.2). Aufgrund der Stellgrößen-/Stellratenbegrenzung der ADS in Höhe von 6° und $6,9^\circ/s$ (s. Kapitel 5.1.2.2) kann der Maximalwert von 7° nicht vollständig kompensiert werden. Hinsichtlich der Probandenstudie ist daher zu fordern, dass die Funktion tLCA mit *alternativer* Aufgabenübernahme nur auf Geraden oder bei großen Kurvenradien ausgelöst wird.

5.5 Algorithmus zur Aufschlüsselung des Lenkmoments nach Fahrer-FAS-Einfluss

In LKA-Systemen mit *Summenpunkt Lenkrad* kann es zu Fahrerbevormundung kommen (s. Kapitel 2.3.3.1). Aus dem Verlauf des Lenkmoments lassen sich diesbezüglich nur begrenzt Schlussfolgerungen entnehmen, da nicht unterscheidbar ist, ob das Moment vom FAS oder dem Fahrer herrührt. Der folgende Ansatz wird in Kooperation mit [177] entwickelt. Er schlüsselt das am Torsionsstab gemessene Lenkmoment M_H (s. Abb. 5.5) nach Verursacher auf (Fahrer/FAS) und quantifiziert, ob und wie stark der jeweilige Verursacher ein Moment eingebracht oder abgebaut hat.

Berechnungsmethodik

Im Folgenden wird das prinzipielle Vorgehen erläutert:

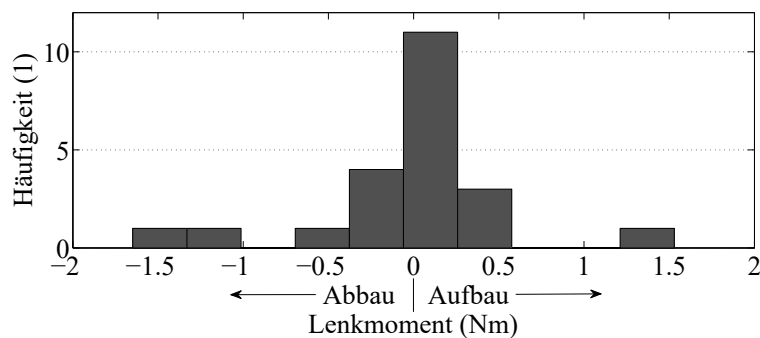
1. Das Lenkmoment wird um die Reibung im Lenkstrang bereinigt (s. Abschnitt 5.2.2.1) und in Abschnitte unterteilt, in denen der Verlauf streng monoton steigt bzw. fällt.
2. Im jeweiligen Abschnitt wird die Winkelgeschwindigkeit und -beschleunigung der Größen δ_H und δ_{EPS} betrachtet (s. Abb. 5.5) und das aus deren Differenz (Verwindung) resultierende Lenkmoment ermittelt.
3. Verursacher der Lenkmomentenänderung eines Zeitabschnitts (s. *Punkt 1*) ist derjenige, dessen Winkelbeschleunigung am Beginn der Momentenänderung größer ist. So ist der *Fahrer* Verursacher, wenn $\ddot{\delta}_H$ größer ist. Das *FAS* ist Verursacher, wenn $\ddot{\delta}_{EPS}$ größer ist. Der jeweils andere Akteur/Sensor wird *etwas später* vom Verursacher *mitgedreht* und erfährt daher erst später eine Winkelbeschleunigung. Dies gilt für den Momentenaufbau wie auch den Momentenabbau. Angemerkt sei, dass der serienmäßige Überlagerungswinkel der ADS dem Lenkradwinkel δ_H im Normalfall reaktiv folgt und daher keinerlei Moment initiiert. Eine Ausnahme bilden additive Stabilisierungseingriffe der ADS [85].
4. Ist die Momentenänderung eines Zeitabschnitts derart klassifiziert (Verursacher, Aufbau/Abbau), so wird diese Erkenntnis sowie die Höhe der Momentenänderung dem jeweiligen Zeitabschnitt als Merkmal hinzugefügt.

Auswertung

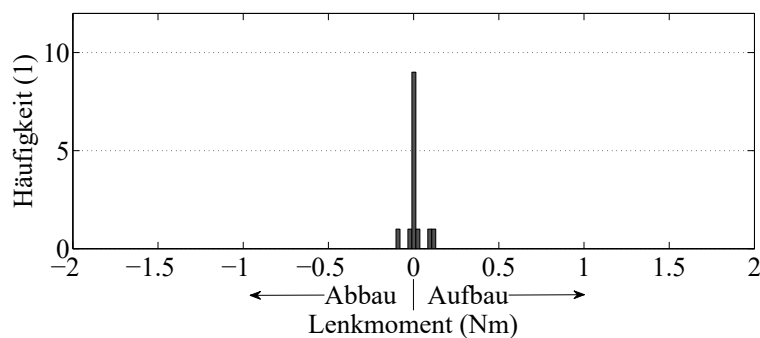
Histogramme zur Erfassung eines relevanten Zeitraums Zur Interpretation der Daten eines relevanten Zeitraums können diese in Histogrammen erfasst werden. Die einzel-

nen Merkmale werden gemäß ihrer Kategorie (Verursacher: Fahrer/FAS, Moment: Aufbau/Abbau) und unter Berücksichtigung der jeweiligen Momentenänderung in die Histogramme eingeordnet. Dies lässt die Aussage zu, *wer* (Fahrer/FAS) im betrachteten Zeitraum *wie stark* am Momentenaufbau oder Momentenabbau beteiligt war.

Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 5.26 die Histogramme eines exemplarischen Szenarios. Der Fahrer wurde bei Autobahnfahrt mit 120 km/h und aktiver Funktion LKA in Variante *Konzept 'Summenpunkt Lenkrad'* (s. Kapitel 5.4.2.2) instruiert, an den Rand des Fahrstreifens zu lenken und das Lenkrad anschließend loszulassen. Aus Abbildung 5.26a ist



(a) Lenkmomentenaufbau/-abbau durch den Fahrer



(b) Lenkmomentenaufbau/-abbau durch den LKA

Abbildung 5.26: Histogramme des aufgeschlüsselten Fahrer-FAS-Einflusses auf das Lenkmoment im exemplarischen Szenario *Fahrer lenkt bei aktivem LKA gegen den Fahrstreifenrand und lässt das Lenkrad anschließend los* (Autobahnfahrt bei 120 km/h mit LKA-Variante *Konzept 'Summenpunkt Lenkrad'*, s. Kapitel 5.4.2.2). Bilder angepasst aus [177]

zum einen zu entnehmen, dass der *Fahrer* ein Moment erzeugt, um die geforderte Querablage aufzubauen und zum anderen, dass *er selbst* dieses auch wieder *vollständig* (gleiche Größenordnung) abbaut (Handlung: Loslassen des Lenkrads). Abbildung 5.26b zeigt, dass das *FAS* weder den Momentenaufbau noch den Momentenabbau verursacht hat, was den tatsächlichen Gegebenheiten des Szenarios entspricht.

Verknüpfung aufeinanderfolgender Merkmale zu einer abstrakten Aussage Eine weitere vielversprechende Auswertemöglichkeit bietet die logische Verknüpfung zeitlich aufeinanderfolgender Merkmale zu einer komplexen bzw. abstrakten Gesamtaussage. Folgt beispielsweise einer Lenkmomentenänderung der Kategorie *FAS baut Moment auf*, womöglich sogar in gleicher Größenordnung eine Lenkmomentenänderung der Kategorie *Fahrer baut Moment ab*, kann dies als Aussage *Fahrer hat dem Wunsch des FAS nachgegeben* gewertet werden. Offen bleibt zunächst, ob er dies willentlich getan hat oder vom FAS mitgezogen wurde. Ein Einbezug der (Mindest-)Reaktionszeit des Fahrers könnte diesbezüglich Aufschluss geben. Kommt eine solche Korrektur durch das FAS häufig und mit großem Lenkmomentaufbau und -abbau vor, kann dies als Indiz für eine Bevormundung des Fahrers gewertet werden.

Fehlerquellen Systematische Abweichungen entstehen dadurch, dass die Rückmeldung des Fahr- und Straßenzustands via Lenkmoment (s. Abb. 2.4) nicht separat erfasst wird. Weil diese ebenfalls eine Änderung des Winkels δ_{EPS} initiiert, wird deren Einfluss fälschlicherweise dem FAS zugeschrieben. Abbildung 5.26b zeigt jedoch, dass der resultierende Fehler zumindest im untersuchten Beispiel einer Autobahnfahrt auf einwandfreier Straßenoberfläche gering ist.

Potential

Das Wissen um den Verursacher des Lenkmoments ist potentiell hilfreich, wenn der Fahrereinfluss separat betrachtet werden soll. Beispiele hierfür sind die *hands-on*-Erkennung im LKA, die Erkennung einer Übernahme aus hohen Automatisierungsstufen und die Müdigkeitserkennung [102, 198]. Der systematische Fehler infolge der Rückmeldung des Fahr- und Straßenzustands ist in diesem Fall nicht von Belang, da lediglich nach Fahrereinfluss vs. restlichen Einflüssen unterschieden wird.

Weiterhin könnte mithilfe der Kenntnis des Verursachers eines Momentenaufbaus und Momentenabbaus das Zusammenspiel von Fahrer und FAS analysiert werden. Hierdurch könnte die Fahrerbevormundung bewertet oder das FAS fahrerindividuell adaptiert werden. Da in diesem Fall auch der Einfluss des FAS ausgewertet wird, ist der zuvor genannte systematische Fehler zu berücksichtigen.

Eine weitere Betrachtung des Algorithmus findet in dieser Arbeit nicht statt, da bestehende Verfahren als ausreichend erachtet werden, um die Probandenstudien aus Kapitel 6 auszuwerten.

5.6 Zusammenfassung der Realisierungskonzepte

Umsetzung mit serienmäßiger Sensorik und Aktorik Die in Kapitel 4 konzipierten Funktionen NI, FCA, LDW, LKA und tLCA sowie die Varianten LKA/tLCA mit *variabler* und *alternativer* Aufgabenübernahme werden weitgehend mit in Serie befindlicher Sensorik und Aktorik realisiert. Ausnahme bildet die Messgröße *Wankwinkel relativ zum Schwerevektor*, welche aus der IMU bezogen wird, jedoch ebenfalls mithilfe von Seriensensorik berechenbar ist [13]. Trotz vieler ungelöster technischer Herausforderungen (s. Abschnitt 3.2) verdeutlicht dies, dass die Informationsübertragung mittels Wankbewegungen bereits für gegenwärtige Entwicklungen im Bereich FAS relevant ist.

Aktives Wanken unter Berücksichtigung des resultierenden Fahrverhaltens Die Wankfunktionalität wird durch die direkte Ansteuerung eines langsam-aktiven Fahrwerks umgesetzt, da noch kein regelungstechnisches Gesamtkonzept vorlag, in welches sie hätte integriert werden können. Zur Erfüllung der Anforderungen des querkraftfreien Fahrens bis 120 km/h, was für die Funktionen LKA/tLCA mit *alternativer* Aufgabenübernahme gefordert ist, wird ein Ansatz aus [13] genutzt (Konzept *Regelung*). Dessen Radlastverteilung prägt den Lenkeffekt infolge Wankens etwa so aus, dass er den Anforderungen zur Nutzung als entkoppelter Querführungsaktor in den Funktionen LKA/tLCA mit *variabler* Aufgabenübernahme entspricht. Somit kommt der Ansatz aus [13] in beiden Varianten der Funktionen LKA/tLCA zum Einsatz. Da dieser das Wankmoment vorwiegend über die HA abstützt, droht eine Übersteuertendenz, weshalb der Ansatz um ein Konzept zur Wahrung der Fahrstabilität erweitert wird. Dieses schaltet das Konzept *Regelung*, wenn notwendig in geeigneter Weise ab und überführt das Fahrzeug in eine fahrdynamisch stabile Rückfallebene. Um die Anforderungen der Funktionen NI, FCA und LDW zu erfüllen, wird ein eigener Ansatz entwickelt (Konzept *Steuerung*). Wie gefordert bringt dieser eine hochdynamische Wankbewegung ein und gewährleistet ein Fahrverhalten ähnlich dem von Serienfahrzeugen. Letzteres wird durch Fahrversuche zum Kurven- und Übergangsverhalten sowie zum reaktiven Wankverhalten bestätigt.

Entkoppelte FAS-Eingriffe ohne zusätzliche Hardware Der Wegfall der etablierten Zielsetzung Wankbewegungen minimieren zu müssen, erlaubt es den Lenkeffekt infolge Wankens als Querführungsaktor einzusetzen. Hierdurch wird die Forderung nach vom Lenkrad entkoppelten FAS-Eingriffen ohne zusätzliche Hardware verwirklicht. Um den Lenkeffekt zur Querführung in den Funktionen LKA/tLCA nutzen zu können, wird eine Kaskade aus Querregler und unterlagertem Lenkwinkelregler sowie unterlagertem Wankregler entworfen. Es wird gezeigt, dass die Kopplung zwischen Wankwinkel und Lenkeffekt durch die Radlast-

verteilung oder durch zusätzliche Aktorik, wie etwa mittels ADS beeinflusst werden kann. Letztere weist im Versuchsfahrzeug höheres Potential auf, geht jedoch mit unerwünschtem Einfluss auf das Lenkgefühl im engeren Sinne einher. Dieser resultiert aus der Abstützung des additiven Überlagerungswinkels am Fahrerhandmoment. Eine Beeinflussung bzw. Unterbindung des Lenkeffekts mittels ADS wird im Blick auf die Probandenstudien für sämtliche Funktionen diskutiert, jedoch nur für die Funktion LDW als sinnvoll erachtet.

Aufschlüsselung des Lenkmoments nach Fahrer-FAS-Beteiligung Es wird ein Algorithmus entwickelt, der den Lenkmomentenverlauf nach Verursacher aufschlüsselt (Akteure: Fahrer/FAS) und quantifiziert *wer, wieviel* Moment *eingbracht* oder *abgebaut* hat. Es wird gezeigt, dass diese Kenntnis zur Einschätzung der Fahrerbevormundung am Lenkrad dienen kann und auch für weitere Themenbereiche potentiell relevant ist. Beispiele hierfür sind die fahrerindividuelle Adaption von FAS, die *hands-on*-Erkennung im LKA sowie die Erkennung von Übernahmen aus höheren Automatisierungsstufen.

Die Umsetzung der Funktionen erfüllt die zu Beginn dieses Kapitels formulierten Anforderungen weitgehend. Im Blick auf die Probandenstudien sind die in Tabelle 5.2 angeführten Einschränkungen zu beachten.

Tabelle 5.2: Einschränkungen, welche aus der Umsetzung der FAS resultieren und bei der Gestaltung der Probandenstudien zu beachten sind

Funktion	Einschränkung	Grund
NI, FCA	Es sind kleine Kurvenradien zu wählen	Lenkeffekt infolge Wankens muss dann nicht kompensiert, sondern kann vernachlässigt werden (s. Abschnitt 5.2.3.4)
LDW	Beim Wankwinkelsprung wird das Lenkrad beeinflusst (Lenkwinkel/-moment)	Lenkeffekt infolge Wankens muss kompensiert werden. Beeinflussung des Lenkrads ist dabei unvermeidbar (s. Abschnitt 5.2.3.4)
LKA, tLCA (variable Aufgaben- übernahme)	Funktion tLCA darf nur auf	Lenkeffekt infolge Wankens ansonsten zur Querführung nicht ausreichend (s. Abschnitt 5.2.3.4)
LKA, tLCA (alternative Aufgaben- übernahme)	Geraden oder bei großen Kurvenradien ausgelöst werden	
		Lenkrad kann ansonsten nicht bei 0° gehalten werden (s. Abschnitt 5.4.2.3)

6. Probandenstudien

Die bisherigen Erkenntnisse bezüglich der Eignung des Konzepts für die exemplarisch gewählten FAS basieren vorwiegend auf theoretischen Überlegungen (s. Tabelle 4.2). Mithilfe der Probandenstudien werden diese validiert und die Eignung des Konzepts bewertet. Hieraus lassen sich die geforderten Rückschlüsse auf die Eignung für die jeweilige FAS-Kategorie ableiten.

Versuch mit Probanden (keine Experten) im realen Straßenverkehr In den Studien steht die Wirksamkeit der FAS, die Interaktion zwischen Fahrer und FAS sowie die Beherrschbarkeit der entkoppelten FAS-Eingriffe im Vordergrund. Für valide Ergebnisse werden die Versuche daher mit "unbedarften' Endnutzern" [18, S. 185] durchgeführt (keine Experten, wenig Erfahrung mit FAS). Da die Fahrsicherheit nach Expertenmeinung und gemäß der Fahrversuche aus Kapitel 5.3.3 gewährleistet ist, können die meisten Funktionen im Realverkehr untersucht werden (Ausnahme: FCA). Dies scheint insbesondere für eine valide Bewertung der visuellen Wahrnehmung der Wankbewegungen essentiell (Überlagerung durch Steigung, Straßenquerneigung; Sichtfeldänderung auf Verkehrsteilnehmer, Schutzplanken).

Versuchsfahrzeug und Datenerhebung Als Versuchsfahrzeug dient ein *Audi A5 Sportback* mit Automatikgetriebe, in welchen die zu untersuchenden FAS gemäß Kapitel 5 prototypisch integriert wurden. Die Umsetzung entspricht mit wenigen Einschränkungen (s. Tabelle 5.2) den Forderungen aus Kapitel 4. Zur Versuchsauswertung werden relevante Fahrzeugdaten und die Fahrzeugbewegung mit 100 Hz erfasst (Messung mittels hochgenauer DGPS-fähiger IMU). Zusätzlich werden Videos vom Fahrer, dessen Handhaltung und das Bild der Frontkamera aufgezeichnet. Die Erhebung subjektiver Daten erfolgt mittels Fragebögen, welche in Anhang B gelistet sind.

6.1 Studie 1 (LKA / tLCA mit variabler Aufgabenübernahme, NI, FCA)

Die Studie umfasst die Funktionen LKA und tLCA mit variabler Aufgabenübernahme sowie die Funktionen NI und FCA.

Probandenkollektiv Am Versuch nehmen 36 Probanden (12 weiblich) im Alter von 20 bis 59 Jahren teil ($M = 30$, $SD = 11$). Sie weisen eine Gesamtfahrleistung von 30 000 km bis 1 000 000 km auf ($M = 240 000$, $SD = 225 000$). Die Versuchsgruppen werden nach Alter, Geschlecht und Fahrleistung parallelisiert.

Versuchsablauf Die Probanden absolvieren den gesamten Versuch als Fahrer und in einem der folgenden Versuchsdurchgänge als Passagier im Fond (Sitzplatz *hinten-rechts*). Abbildung 6.1 stellt den Versuchsablauf als Übersicht dar.

Zu Beginn werden demographische Daten, Fahrerfahrung und Vorkenntnisse im Bereich

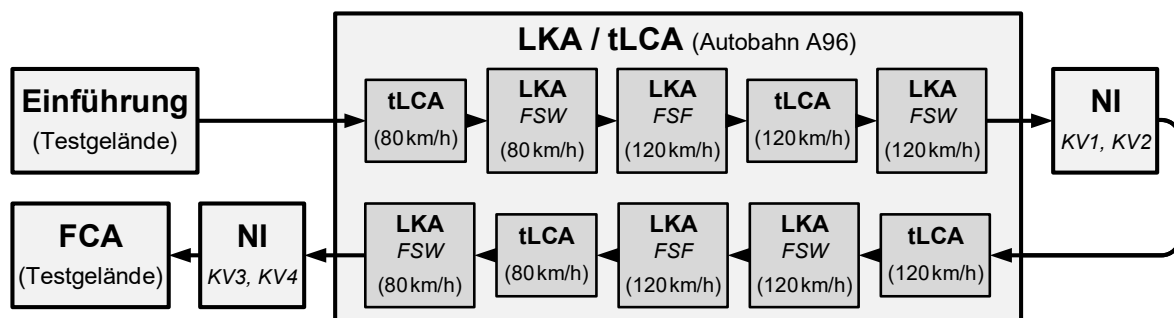


Abbildung 6.1: Versuchsablauf und Szenarienabfolge der Studie 1. Die Szenarien sind kurziv markiert (*Fahrstreifenwechsel (FSW)*, *Fahrstreifenfolgen (FSF)*, *Kreisverkehr (KV)*)

FAS mittels Fragebogen erfasst. Anschließend machen sich die Probanden durch einfache Fahrmanöver auf dem Testgelände der Universität der Bundeswehr München mit dem Fahrzeug vertraut. Darauf folgt die Anfahrt zur Autobahn A 96 (ca. 45 min), auf welcher die Funktionen LKA / tLCA untersucht werden. Im Kreisverkehr (KV) der Abfahrt *Landsberg am Lech – West* (KV 1) sowie jenem der Abfahrt *Buchloe – West* (KV 2) wird die Funktion NI getestet. Während der Rückfahrt auf der A 96 werden erneut die Funktionen LKA / tLCA und innerhalb der Gemeinde *Unterhaching* nochmals die Funktion NI untersucht (KV 3, 4). Im Anschluss wird die Funktion FCA auf dem Testgelände geprüft. Die Versuchsdauer beträgt je nach Verkehrslage etwa drei Stunden.

Der weitere Verlauf des Kapitels gliedert sich nach den untersuchten FAS.

6.1.1 LKA mit variabler Aufgabenübernahme

Das Konzept wurde in Kapitel 4.2.2 erarbeitet und in Kapitel 5.4.2 technisch umgesetzt. Kennzeichnend ist, dass das FAS entkoppelt vom Lenkrad eingreift und den Eingriff mittels Wankbewegung an den Fahrer zurückmeldet (s. Abb. 4.4). Dem Fahrer steht es frei, ob und wie stark er sich an der Querführung beteiligt.

Die Studie evaluiert, ob die Rückmeldung via Wanken geeignet ist und ob das Zusammenspiel zwischen Fahrer und FAS funktioniert. Weiterhin wird geprüft, inwieweit die potentiellen Vorteile des Ansatzes zum Tragen kommen (s. Tabelle 4.2). Die folgenden Fragestellungen stehen hierbei im Fokus⁶:

- *Ist das Rückmeldekonzept wahrnehmbar und verständlich?*
- *Ist die Übersteuerbarkeit der Eingriffe gewährleistet?*
- *Wie erleben Fahrer und Passagier im Fond die gemeinsame Querführung?*
- *Wird das Konzept als geeignet erachtet?*

6.1.1.1 Funktionsausprägungen

Dem zu untersuchenden Konzept *Variable Aufgabenausführung (VAA)* werden die Konzepte SL und SLW gegenübergestellt. Diese unterscheiden sich in der Rückmeldung an den Fahrer und in der Übernahme der Querführungsaufgabe. Um Vergleichbarkeit auf konzeptioneller Ebene herzustellen, erfolgt gemäß Kapitel 4.2.2.1 kein Informationsfluss vom Fahrer zum FAS.

Konzept *Summenpunkt Lenkrad (SL)* Dieses entspricht dem etablierten Konzept mit simultaner Fahrzeugführung und Summenpunkt im Lenkrad. Da kein Informationsfluss vom Fahrer zum FAS erfolgt, repräsentiert es nicht dessen optimale Ausprägung, sondern kann als straffer empfunden werden (s. Abschnitt 5.4.2.2).

Konzept *Summenpunkt Lenkrad mit Wankbewegung (SLW)* Dieses entspricht weitgehend dem Konzept SL (simultane Fahrzeugführung, Summenpunkt im Lenkrad). Die Intention des FAS wird jedoch zusätzlich via Wankbewegung rückgemeldet. Der Vergleich zum Konzept VAA erlaubt Rückschlüsse, ob eine zusätzliche Rückmeldung mittels Lenkrad und das Vorhandensein eines Summenpunkts bevorzugt würde.

⁶Aspekte dieses Abschnitts sind bereits in [125, 127] vorveröffentlicht.

6.1.1.2 Szenarien

Der betrachtete Autobahnabschnitt ist 55 km lang, kurvenreich und besitzt je Richtung zwei Fahrstreifen. Die Geschwindigkeit ist zum Teil auf 80 km/h bzw. 120 km/h beschränkt. FAS zur Unterstützung der Längsführung sind deaktiviert. Das jeweils untersuchte LKA-Konzept ist stets aktiv.

Szenario *Fahrstreifenfolgen (FSF)* Das Szenario besteht aus einer Fahrstreifenfolgefahrt mit 120 km/h im kurvenreichen Autobahnabschnitt (Dauer ca. 10 min). Hierbei wird bewertet, wie die gemeinsame Fahrzeugführung erlebt wird.

Szenario *Fahrstreifenwechsel (FSW)* Der Proband wird auf einer Geraden gebeten, den Fahrstreifen zweimal gegen den Willen des LKA zu wechseln. Hierbei wird das Rückmeldekonzent und die Übersteuerbarkeit des FAS bewertet. Das Szenario wird bei 80 km/h und 120 km/h durchgeführt.

6.1.1.3 Versuchsablauf, Studiendesign

Allgemeine Informationen zum Ablauf werden zu Beginn des Abschnitts 6.1 gegeben. Die Szenarien werden in Abfolge und Fahrzeuggeschwindigkeit gemäß Abbildung 6.1 durchgeführt. Nach Abschluss eines Szenarios wird der zugehörige Fragebogen vorgelesen und vom Probanden während der Fahrt beantwortet. Auf der Hin- und Rückfahrt ist jeweils eine andere Funktionsausprägung aktiv. Jede Ausprägung wird von 24 Probanden bewertet.

6.1.1.4 Operationalisierung

Zur Erfassung der Wahrnehmbarkeit und Verständlichkeit des Rückmeldekonzent wird die Aussage *Das Fahrzeug 'wehrte' sich gegen den Spurwechsel* auf einer 5-Punkte-Skala von (1) trifft überhaupt nicht zu bis (5) trifft voll zu bewertet.

Die Übersteuerbarkeit des Eingriffs wird durch die Bewertung der Aussage *Die Spur 'von Hand' zu wechseln war schwierig* erfasst. Objektiv wird einbezogen, wie viele Fahrer den Wechsel tatsächlich durchführen konnten.

Das Erleben der gemeinsamen Fahrzeugführung wird in Anlehnung an [29] über vier Teilbereiche erfasst.

- Wahrnehmbarkeit der Wankbewegungen
- Beanspruchung des Fahrers
- Leistung des Fahrer-Fahrzeug-Gesamtsystems

- Subjektivbewertung

Die Wahrnehmung der Wankbewegungen wird ausschließlich nach vestibulären Kriterien beurteilt, da die bekannten visuellen Wahrnehmungsschwellen für Neigungen vor bewegter Szenerie das Vorhandensein der zugehörigen vestibulären Information voraussetzen. Dies ist aufgrund der Überlagerung mit der Zentrifugalbeschleunigung nicht gegeben. Weiterhin wird die Amplitude und Stellfrequenz der Wankbewegungen betrachtet.

Die physische Beanspruchung des Fahrers wird nach [29] durch die Lenkarbeit und den Effektivwert des Lenkmoments gemessen. Die mentale und physische Beanspruchung wird durch die Lenkradaktivität und diese wiederum durch die Effektivwerte von Lenkwinkel, Lenkwinkelgeschwindigkeit und Lenkradrichtungswechselrate erfasst.

Die Leistung des Fahrer-Fahrzeug-Gesamtsystems wird gemäß [29] durch die Effektivwerte der Gierrate, der Gierbeschleunigung, des Gierwinkelfehlers und durch die Standardabweichung der Querablage erfasst.

Die Subjektivbewertung durch den *Fahrer* fokussiert das Lenk- und Fahrzeugverhalten sowie das Gesamtsystem. Der *Passagier im Fond* bewertet nur das Gesamtsystem. Hierzu werden die Aussagen aus Tabelle 6.1 auf der zuvor genannten 5-Punkte Skala eingestuft.

Tabelle 6.1: Subjektivbewertung der gemeinsamen Fahrzeugführung. Die jeweiligen Teilbereiche (fett) werden durch die darunter stehenden Aussagen erfasst

Lenkverhalten
Das Fahrzeug 'wehrte' sich gegen bestimmte Lenkbewegungen.
In der Spur 'von Hand' zu lenken war schwierig.
Fahrzeugverhalten
Das Fahrzeug pendelte hin und her.
Das Fahrzeug reagierte eher schwerfällig.
Das Fahrzeug hielt die Spur immer genau ein.
Gesamtsystem
Das Fahrzeug reagierte unmittelbar auf mein Lenken.
Das Auto reagierte unmittelbar auf Kurven und Störungen.
Der Fahrbahnkontakt war optimal.
Ich hatte das Auto in jeder Situation unter Kontrolle.
Ich hatte Vertrauen in das System.
Gesamtsystem (Bewertung durch den Passagier im Fond)
Die Fahrt war entspannend.
Die Fahrt war langweilig.
Die Fahrzeugbewegungen haben mich gestört.
Der Fahrer hatte das Auto in jeder Situation unter Kontrolle.

Die Unterschiede in den gegenübergestellten Daten werden statistisch mittels *Kruskal-Wallis-Test* und *Dunn's post-hoc-Test* sowie *Wilcoxon-Test* analysiert.

6.1.1.5 Ergebnisse

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse hervorgehoben. Weitere Details sind in Anhang C.1.1 gelistet. Je System werden 24 Probanden (subjektiv) bzw. 23 Probanden (objektiv, ein Messdatenausfall) ausgewertet.

Verhalten des Konzepts VAA Abbildung 6.2 zeigt charakteristische Messdaten des Konzepts VAA. Im *alternativen Betrieb* (kein Fahrerzutun) besteht bei konstanter Fahrzeugge-

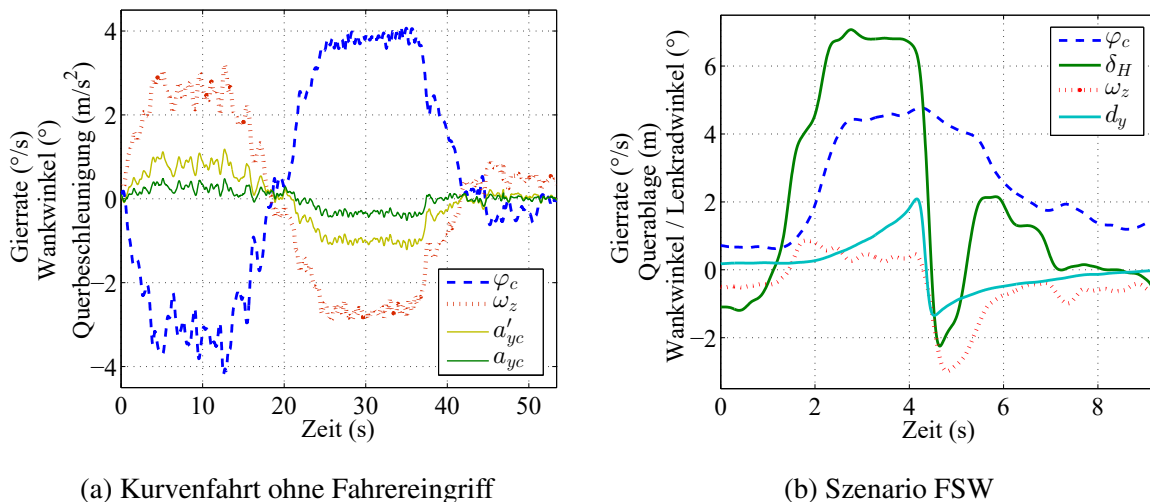


Abbildung 6.2: Zeitverläufe charakteristischer Messgrößen (Wankwinkel φ_c , Gierrate ω_z , Lenkradwinkel δ_H , Querablage d_y , Querbeschleunigung im Fahrzeugaufbau a_{yc} , Querbeschleunigung bei horizontiertem Aufbau a'_{yc}). Angepasst aus der Vorveröffentlichung in [127]

windigkeit ein nahezu proportionaler Zusammenhang zwischen Wankwinkel und Gierrate (s. Abb. 6.2a). Dieser führt im dargestellten Abschnitt zu einer Querbeschleunigungskompensation von ca. 65%.

Abbildung 6.2b zeigt den *simultanen Betrieb*. Zum Zeitpunkt $t = 0$ s wird eine leichte Rechtskurve durchfahren, in welcher die erforderliche Gierrate zu etwa gleichen Teilen von Fahrer ($\delta_H = -1^\circ$) und FAS ($\varphi_c = +0,7^\circ$) erzeugt wird. Im Abschnitt $2 \text{ s} < t < 4 \text{ s}$ versucht das FAS den vom Fahrer initiierten Fahrstreifenwechsel nach links (δ_H steigt auf $+7^\circ$, d_y steigt) zu kompensieren (φ_c steigt auf $+4,3^\circ$, ω_z bleibt mit $0,25^\circ/\text{s}$ gering). Dieses Verhalten ist als *Fahrt entlang einer Wanne* erlebbar (s. Abschnitt 4.2.2.3). Die Größenordnung der kompensierten Gierreaktion wird im Abschnitt $4 \text{ s} < t < 5 \text{ s}$ deutlich. Hier führt eine ähnliche Lenkradddrehung aufgrund des nahezu gleichbleibenden FAS-Eingriffs zu einer 10-fach höheren Gierrate. Die Schwankungen im Lenkradwinkelverlauf ab $t > 4,5 \text{ s}$ zeigen den Einschwingvorgang des Fahrers (FAS-Eingriff gleichmäßig) in den neuen Fahrstreifen. Im Unterschied zur Prinzipdarstellung in Abbildung 4.5c ist der Verlauf des Wankwinkels beim Übergang zwischen

der *Wanne* des alten und des neuen Fahrstreifens ausgerundet. Zu erkennen ist auch, dass der Fahrereingriff verzögert kompensiert wird (Zeitverzug ca. 0,75 s), weshalb das Anlenkverhalten anfänglich unbeeinflusst bleibt.

Verständlichkeit und Übersteuerbarkeit 90% der Probanden assoziieren das Verhalten des Konzepts VAA beim Fahrstreifenwechsel mit einem mehr oder weniger starken *Wehren* (s. Abb. 6.3a). Sämtliche Probanden haben die Ausprägung VAA übersteuert und dies im

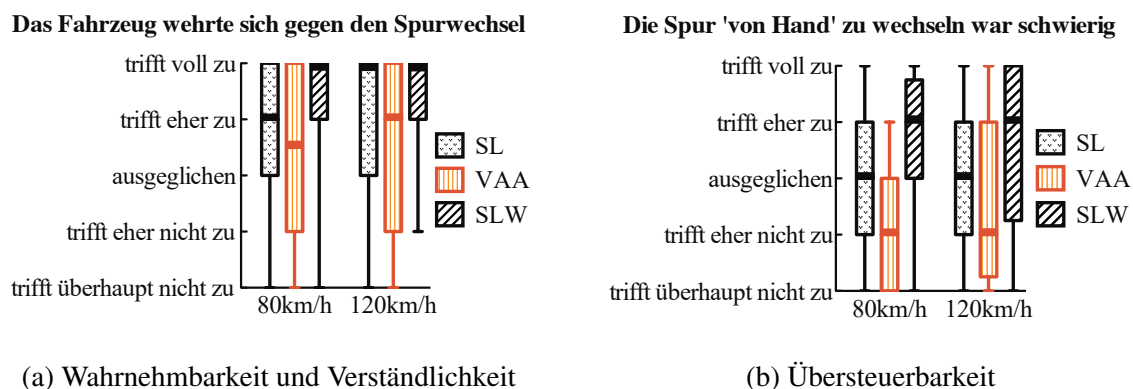


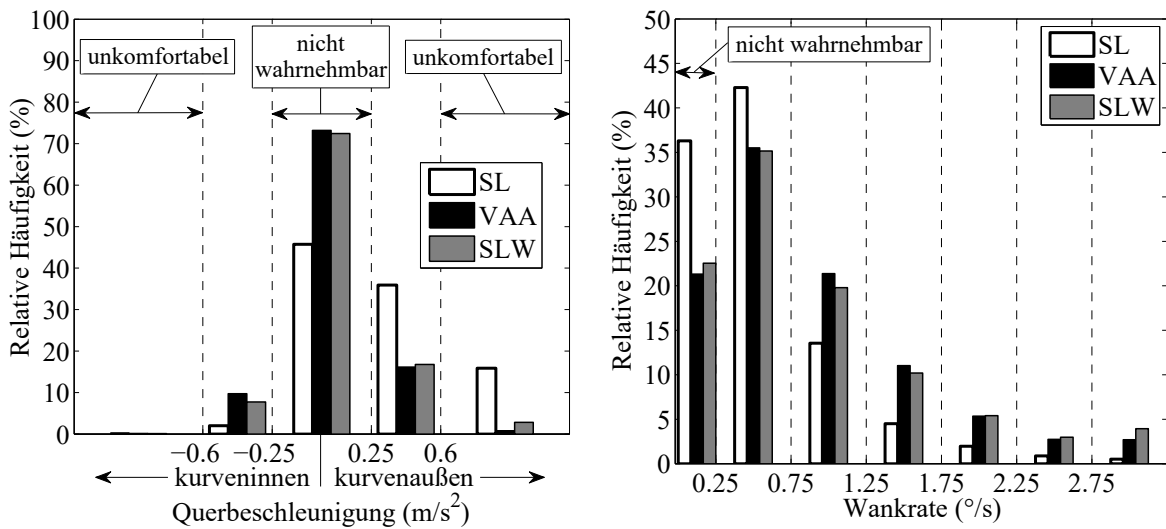
Abbildung 6.3: Subjektivbewertung der Wahrnehmbarkeit und Verständlichkeit der Rückmeldekonzepte sowie der Übersteuerbarkeit des FAS (Szenario FSW). Die Antenne zeigt die Spannweite der Daten. Siehe auch [125, 127]

Median als *eher nicht schwierig* beurteilt (s. Abb. 6.3b).

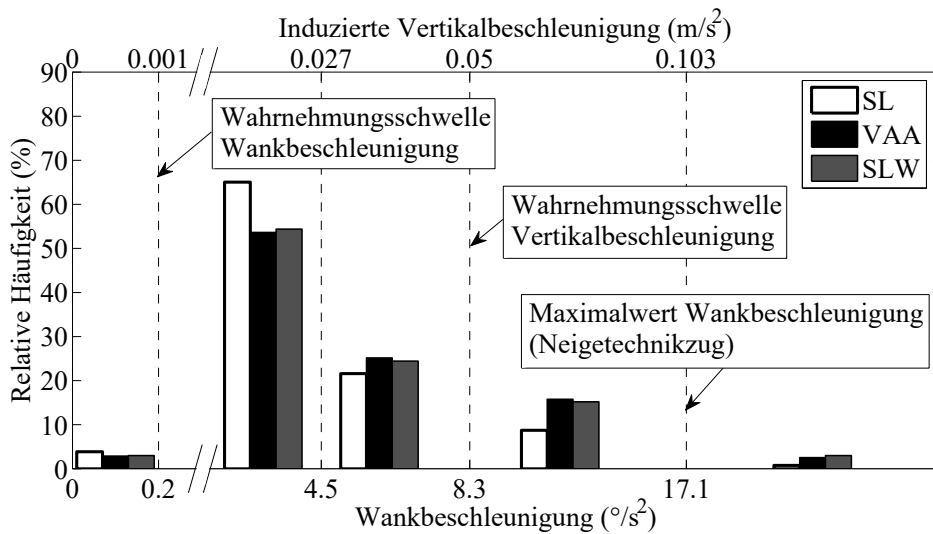
Im Vergleich der Konzepte und Fahrzeuggeschwindigkeiten ist der Fahrstreifenwechsel bei 80 km/h mit Konzept SLW signifikant schwieriger als mit Konzept VAA ($H(2, N = 72) = 12.49$, $p = .0019$). Deskriptiv lassen sich die Konzepte gemäß Median von VAA (am schwächsten) über SL bis SLW (am stärksten) ordnen. Dies gilt sowohl für das Wehren gegen den Fahrstreifenwechsel als auch für die Schwierigkeit diesen durchzuführen.

Angemerkt sei, dass sich das Konzept VAA signifikant stärker gegen den Fahrstreifenwechsel als gegen Lenkbewegungen beim Fahrstreifenfolgen wehrt ($W(N = 47) = -115$, $p = .0122$, s. Abb. 6.6). Ebenso ist der Fahrstreifenwechsel im Vergleich zu Lenkbewegungen beim Fahrstreifenfolgen signifikant schwieriger durchzuführen ($W(N = 47) = -115$, $p = .0452$).

Wahrnehmung der Wankbewegungen Das Wanken des Konzepts VAA relativ zur Fahrbahnebene wird in Tabelle 6.2 kategorisiert. Die Stellfrequenz liegt im Bereich von 0 - 1,7 Hz. Die auf die Insassen wirkende Querschleunigung, die Wankrate, die Wankbeschleunigung sowie die hierdurch induzierte Vertikalbeschleunigung sind gemäß Abbildung 6.4 in den Konzepten VAA und SLW ähnlich. Gegenüber dem Konzept SL wird die wahrnehmbare Querschleunigung deutlich verringert. Unkomfortable Beschleunigungen zur Kurvenaußenseite werden fast vollständig kompensiert (s. Abb. 6.4a). Zur Kurveninnenseite hingegen



(a) Querbeschleunigung im Fahrzeugaufbau. Wahrnehmungsschwelle (mit visueller Rückmeldung) nach [130]. Komfortgrenze nach [93] (b) Wankrate relativ zum Schwerevektor (Absolutwert). Wahrnehmungsschwellen (mit visueller Rückmeldung) nach [130]



(c) Wankbeschleunigung relativ zum Schwerevektor sowie hierdurch induzierte Vertikalbeschleunigung in Sitzmitte (Absolutwerte). Wahrnehmungsschwellen nach [83]. Der Maximalwert aus der Zugtechnik [189] dient lediglich der Einschätzung der Größenordnung, da die Übertragbarkeit auf den PKW-Bereich bisher nicht validiert ist [13]

Abbildung 6.4: Vestibuläre Wahrnehmung der Wankbewegungen (Szenario FSF). Siehe auch [127]

Tabelle 6.2: Kategorisierung der Wankbewegungen des Konzepts VAA nach Perzentilen (Szenario FSF). Vorveröffentlicht in [127, S. 49]

	5%	25%	50%	75%	95%
Wankwinkel (°)	0,13	0,63	1,31	2,13	3,18
Wankrate (°/s)	0,05	0,24	0,52	0,93	1,82

werden Beschleunigungen generiert (Überkompensation). In den Konzepten VAA und SLW sind Wankraten häufiger als im Konzept SL wahrnehmbar (78% vs. 64% der Fahrtzeit). Zudem sind sie im Betrag höher (s. Abb. 6.4b). Wankbeschleunigungen sind in allen Konzepten fast durchgehend wahrnehmbar. In den aktiv gewankten Konzepten VAA und SLW fallen diese etwas höher aus (s. Abb. 6.4c). Etwa 10% (SL) bzw. 18% (VAA, SLW) der Wankbeschleunigungen sind in Sitzmitte auch als Vertikalbeschleunigung wahrnehmbar.

Beanspruchung des Fahrers Im Konzept VAA ist die Beanspruchung (Lenkaktivität, Lenkarbeit) signifikant geringer als im Konzept SLW (s. Tabelle 6.3). Im Vergleich zum Konzept

Tabelle 6.3: Fahrerbeanspruchung (Szenario FSF). Die Lenkarbeit entspricht dem Integral der Beträge von Lenkrate und Lenkmoment (*Mitziehen* der Fahrerhände durch das FAS geht positiv ein). Signifikante Unterschiede sind grau hinterlegt und beim post-hoc-Test durch '<' veranschaulicht. Die vollständigen Angaben zum Kruskal-Wallis-Test sind in Anhang C.1.1 gelistet. Siehe auch [127]

	SL	VAA	SLW	Kruskal-Wallis-Test	post-hoc-Test
Lenkaktivität					
Lenkradwinkel (effektiv) (°)	2,71	1,58	2,74	p < .0001	VAA < SL, SLW
Lenkradgeschwindigkeit (effektiv) (°/s)	2,09	0,86	2,84	p < .0001	VAA < SL, SLW
Lenkradrichtungswechselrate (1/s)	0,68	0,33	0,80	p < .0001	VAA < SL, SLW
Lenkarbeit					
Lenkmoment (effektiv) (Nm)	0,61	0,30	1,41	p < .0001	VAA, SL < SLW
Arbeitsintegral (Nm)	4,10	1,14	18,25	p < .0001	VAA, SL < SLW

SL ist die Lenkaktivität signifikant reduziert und deskriptiv ist auch die Lenkarbeit geringer. Die Gegenüberstellung der Konzepte mit Summenpunkt (SL, SLW) ergibt eine signifikant höhere Lenkarbeit und deskriptiv eine höhere Lenkaktivität im Konzept SLW.

Abbildung 6.5 zeigt, dass die Lenkaktivität der Probanden zum Teil stark variiert. Im Konzept VAA führen 25% der Probanden höherfrequente Lenkbewegungen in der Größenordnung der Konzepte mit Summenpunkt aus. Die dortigen Maximalwerte werden jedoch nicht erreicht.

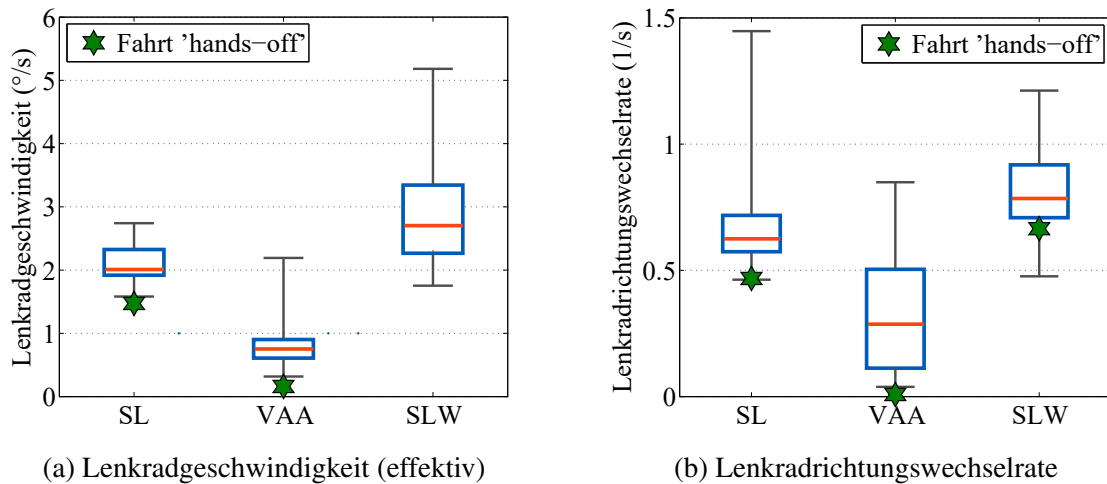


Abbildung 6.5: Lenkaktivität (Szenario FSF). Analyse hochfrequenter Lenkradbewegungen mittels der Kennwerte *Lenkradgeschwindigkeit* und *Lenkradrichtungswechselrate*. Die Antenne zeigt die Spannweite der Daten. Siehe auch [125, 127]

Leistung des Fahrer-Fahrzeug-Gesamtsystems Das Konzept VAA schneidet in drei von vier Kennwerten signifikant besser als die Konzepte SL und SLW ab (s. Tabelle 6.4). Betrachtet man die Konzepte mit Summenpunkt, so ist das Konzept SL in drei der vier Kenn-

Tabelle 6.4: Leistung des Fahrer-Fahrzeug-Gesamtsystems (Szenario FSF). Gierwinkelfehler und Querablage beziehen sich auf die Soll-Bahn des FAS (Fahrstreifenmitte). Signifikante Unterschiede sind grau hinterlegt und beim post-hoc-Test durch '<' veranschaulicht. Die vollständigen Angaben zum Kruskal-Wallis-Test sind in Anhang C.1.1 zu finden. Siehe auch [127]

		SL	VAA	SLW	Kruskal-Wallis-Test	post-hoc-Test
Gierwinkelfehler (effektiv)	(°)	0,142	0,145	0,196	$p < .0001$	VAA, SL < SLW
Gierbeschleunigung (effektiv)	(°/s ²)	0,020	0,016	0,028	$p < .0001$	VAA < SL < SLW
Gierrate (effektiv)	(°/s)	0,020	0,018	0,020	$p = .0034$	VAA < SL
Querablage (SD)	(m)	0,153	0,132	0,177	$p < .0001$	VAA < SL < SLW

werte signifikant besser als das Konzept SLW. In den Kennwerten *Gierbeschleunigung* und *Querablage* ergibt sich eine konsistente Ordnung der Konzepte von VAA (am besten) über SL bis SLW (am schlechtesten). Die Wahrnehmungsschwelle der Gierbeschleunigung von $0,05^\circ/\text{s}^2$ [83] wird von sämtlichen Effektivwerten unterschritten.

Anzumerken ist, dass das Konzept VAA auch bei Fahrt *hands-off* in drei der vier Kennwerte besser als das Konzept SL abschneidet (Größenordnung: 20%, s. Anhang C.1.1). Relativ zur Fahrt *hands-off* verschlechtert sich der Kennwert *Gierbeschleunigung* bei gemeinsamer Fahrzeugführung in beiden Konzepten ähnlich (SL: +20%, VAA: +16%).

Subjektivbewertung der gemeinsamen Fahrzeugführung Das Lenken innerhalb des Fahrstreifens wird mit Konzept VAA im Median als einfach erachtet (*überhaupt nicht* schwie-

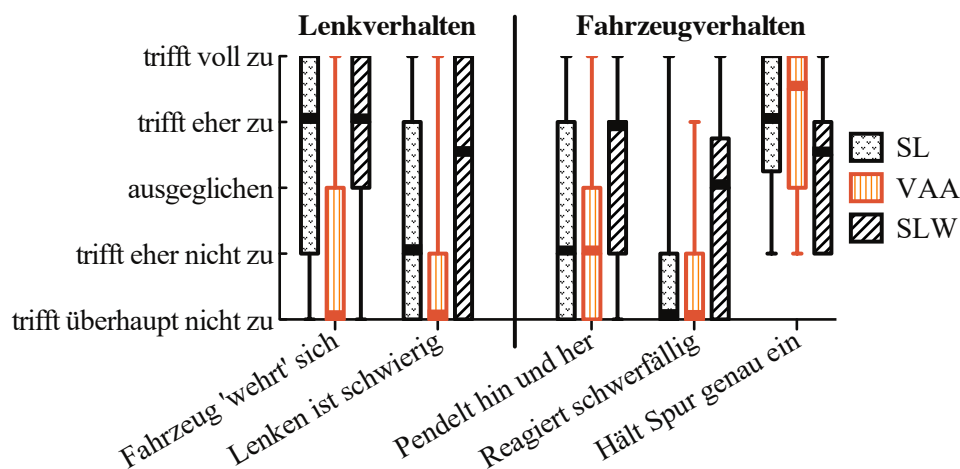


Abbildung 6.6: Subjektivbewertung des Lenk- und Fahrzeugverhaltens (Szenario FSF). Die bewerteten Aussagen sind in voller Länge in Tabelle 6.1 zu finden. Die Antenne zeigt die Spannweite der Daten. Siehe auch [125, 127]

rig, Fahrzeug wehrt sich *überhaupt nicht*, s. Abb. 6.6). Der post-hoc-Test zeigt, dass sich die Konzepte SL und SLW signifikant stärker gegen bestimmte Lenkbewegungen wehren ($H(2, N = 72) = 8.96, p = .0114$). Mit Konzept SLW ist auch das Lenken innerhalb des Fahrstreifens signifikant schwieriger ($H(2, N = 72) = 8.64, p = .0133$).

Das Fahrzeugverhalten des Konzepts VAA wird gemäß Abbildung 6.6 im Median positiv beurteilt (pendelt *eher nicht*, reagiert *überhaupt nicht* schwerfällig, hält die Spur genau ein). Im Vergleich zu den Konzepten SL und SLW ergibt der post-hoc-Test keine signifikanten Unterschiede. Deskriptiv ist das Lenk- und Fahrzeugverhalten im Konzept SLW im Median schlechter als in den Konzepten VAA und SL.

Subjektivbewertung des Gesamtsystems Die Fahrer bewerten das Gesamtsystem in den Konzepten VAA und SL ähnlich positiv (Im Median *voll zutreffend*: Fahrzeug reagiert unmittelbar auf Lenken, Fahrbahnkontakt war optimal, Auto in jeder Situation unter Kontrolle, Vertrauen in das Konzept SL; Im Median *eher zutreffend*: Fahrzeug reagiert unmittelbar auf Kurven und Störungen, Vertrauen in das Konzept VAA). Das Konzept SLW reagiert im Vergleich zum Konzept SL signifikant schlechter auf Kurven und Störungen ($H(2, N = 72) = 7.087, p = .0289$) und stößt auf signifikant weniger Vertrauen beim Fahrer ($H(2, N = 72) = 7.7, p = .0213$).

Die Probanden im Fond bewerten das jeweilige Gesamtsystem im Median identisch und eher positiv (Fahrt *eher* entspannend, Fahrt *ausgeglichen* / *eher nicht* langweilig, Fahrzeugbewegungen *eher nicht* störend, Fahrer hatte Auto in jeder Situation *voll* unter Kontrolle).

Die Verteilung der Bewertung des Gesamtsystems durch Fahrer und Passagier im Fond ist in Anhang C.1.1 dargestellt.

6.1.1.6 Diskussion

Der Vergleich zwischen den Konzepten *Summenpunkt Lenkrad (SL)* und *Summenpunkt Lenkrad mit Wankbewegung (SLW)* zeigt, dass der additive Informationsfluss via Wanken wahrgenommen wird und in die Querführung eingeht. Die Auswirkungen sind jedoch ausschließlich negativ. Die Ergänzung des etablierten Konzepts SL um eine Wankbewegung, welche *die Intention des FAS* widerspiegelt, ist somit nicht zielführend, um beispielsweise die Verständlichkeit zu erhöhen.

Die ausschließlich negativere Bewertung des Konzepts SLW im Vergleich zum Konzept *Variable Aufgabenausführung (VAA)* zeigt, dass die Ergänzung des Konzepts VAA um einen Summenpunkt bzw. eine Rückmeldung am Lenkrad nachteilig wäre. Anzumerken ist, dass ein Summenpunkt zum Übersteuern unerwarteter oder hochdynamischer Eingriffe vorteilhaft sein könnte, dies jedoch noch nicht untersucht wurde.

Ist die Rückmeldung des Konzepts VAA wahrnehmbar und verständlich? Lenkt der Fahrer explizit gegen den Willen des FAS, so wird dessen Rückmeldung von 90% der Probanden mit einem mehr oder weniger starken *Wehren* assoziiert. Da kein signifikanter Unterschied zum etablierten Konzept SL besteht, wird dies als ausreichend verständlich erachtet. Deskriptiv wehren sich die Konzepte SL und SLW zwar stärker, jedoch liegt dies vermutlich an deren größeren Fähigkeit zum Gegenhalten (s. Abb. 6.3b). Diese wird vom Begriff *wehren* unerwünschter Weise ebenfalls erfasst (frei nach [145]). Positiv ist zudem, dass die Verständlichkeit bei unterschiedlicher Fahrzeuggeschwindigkeit gegeben ist.

Implizit sprechen auch die guten Ergebnisse des Szenarios FSF für ausreichende Verständlichkeit, da entkoppelte FAS-Eingriffe anderweitig nicht akzeptiert würden [187]. Positiv ist weiterhin, dass die Information mit unterschiedlichem Nachdruck übermittelt werden kann. So empfinden die Fahrer, dass sich das Konzept signifikant stärker gegen den Fahrstreifenwechsel als gegen Lenkbewegungen beim Fahrstreifenfolgen wehrt.

Ist die Übersteuerbarkeit des Konzepts VAA gewährleistet? Ein vom Fahrer initiiertes Übersteuern ist bei 80 km/h und 120 km/h deskriptiv einfacher als im etablierten Konzept SL. Für eine abschließende Bewertung sind auch unerwartete und hochdynamische FAS-Eingriffe zu untersuchen.

Wie erlebt der Fahrer die gemeinsame Querführung mit Konzept VAA?

- ***Wahrnehmbarkeit der Wankbewegungen***

Auffällig ist, dass auch ohne aktives Wanken häufig Wankbewegungen wahrnehmbar sind (Wankraten zu 64%, Wankbeschleunigungen zu 96% der Fahrtzeit). Ursächlich ist neben reaktivem Wanken vor allem die Straßenverwindung. Das Konzept VAA weist demgegenüber höhere Wankraten und Wankbeschleunigungen auf, was als komfortmindernd gilt (s. Abschnitt 2.2.3.3). Gleiches gilt für die Überkompensation der Querschleunigung. Deren Betrag wäre nach [93] als nur *leicht unkomfortabel* einzustufen, jedoch wertet [13] eine Überkompensation grundsätzlich als stark komfortmindernd. Die Reduktion der auf die Insassen wirkenden Querschleunigung ist hingegen dem Fahrkomfort zuträglich, weshalb sich kein eindeutiger Rückschluss im Blick auf den Fahrkomfort ergibt. Die Stellfrequenz der Wankbewegungen (0 - 1,7 Hz) liegt nicht im sensiblen Bereich des Beschleunigungsempfindens von ca. 3 Hz [27], umfasst jedoch den für Kinetose besonders relevanten Bereich von 0,1 - 0,5 Hz [73]. Zwar hat kein Proband derartige Symptome kundgetan, jedoch setzt eine abschließende Bewertung weitere Versuche voraus.

Anzumerken ist, dass die Wankbewegungen *im Mittel* nicht zu Diskomfort führen sollten. Eine dahingehende Optimierung muss jedoch situationsabhängig erfolgen, da Diskomfort teils ungewollt (z.B. alternativer Betrieb), jedoch auch erwünschter Bestandteil der Rückmeldung sein kann (z.B. Überkompensation als Teil der Metapher *Fahrt entlang einer Wanne*, s. Abschnitt 4.2.2.3).

- ***Fahrerbeanspruchung***

Im Vergleich zum etablierten Konzept SL ist die Lenkaktivität signifikant reduziert und deskriptiv ist auch die Lenkarbeit reduziert. Dies lässt auf geringere mentale und physische Beanspruchung im Konzept VAA schließen [29].

Anzumerken ist, dass die Lenkaktivität des Konzepts VAA bei Fahrt *hands-off* konzeptbedingt geringer ist. Der Unterschied bei gemeinsamer Querführung ist jedoch nicht konzeptionell begründet, da unter schwierigen Umständen, wie zum Beispiel bei unzureichender Rückmeldung der entkoppelten FAS-Eingriffe auch im Konzept VAA hochfrequente Korrekturbewegungen eingebracht würden. Analoges gilt für die Konzepte mit Summenpunkt. Dies wird in Abbildung 6.5 daran ersichtlich, dass deren Lenkradbewegungen weit hochfrequenter sind als es konzeptbedingt (*hands-off*) zur Bewältigung der Strecke erforderlich wäre. Somit wird die Lenkaktivität bei *gemeinsamer* Querführung trotz konzeptioneller Unterschiede maßgeblich vom Fahrer festgelegt. Um den Einfluss der konzeptbedingten Mindest-Lenkaktivität auszuschließen, sollte das Beanspruchungsempfinden auch subjektiv, zum Beispiel mittels Fragebogen *NASA-TLX* [29] erfasst werden.

- *Leistungsbewertung*

Das Konzept VAA schneidet *hands-off* und bei gemeinsamer Querführung signifikant besser als das etablierte Konzept SL ab. Die bessere Leistung bei Fahrt *hands-off* verdeutlicht, dass der Lenkeffekt infolge Wankens zum Stellen der entkoppelten FAS-Eingriffe geeignet ist (Verbesserung gegenüber Konzept SL ca. 20%). Die bessere Leistung bei gemeinsamer Querführung zeigt, dass die Vorteile vom Lenkrad entkoppelter FAS-Eingriffe nun auch für gemeinsame Querführung erschlossen werden. Beispielsweise ist der Kennwert *Gierbeschleunigung*, welcher einen ruhigen und ausgeglichenen Kurs repräsentiert und die höchste Korrelation mit Subjektivurteilen aufweist [29] im Konzept VAA geringer. Dies trägt zum Fahrkomfort bei. Relativ zur Fahrt *hands-off* erhöht sich die Gierbeschleunigung in beiden Konzepten ähnlich, was verdeutlicht, dass das Zusammenspiel zwischen Fahrer und FAS im Konzept VAA funktioniert.

- *Subjektivbewertung*

Das Lenkverhalten des Konzepts VAA (leicht, wehrt sich nicht) lässt auf geringe Bevormundung des Fahrers schließen, was ein Vorteil gegenüber dem Konzept SL ist (wehrt sich beim Fahrstreifenfolgen signifikant stärker). Die positive Bewertung des Fahrzeugverhaltens (kaum Pendeln, nicht schwerfällig, fahrstreifenmittige Führung) bestätigt, dass das Zusammenspiel zwischen Fahrer und FAS funktioniert. Auch das Gesamtsystem wird positiv bewertet (Kontrollierbarkeit, Vertrauen, Reaktion auf Lenken/Störungen). Dies verdeutlicht, dass das Konzept VAA beim Fahrer Gefallen findet.

Wie erlebt der Passagier im Fond die gemeinsame Querführung mit Konzept VAA? Der Passagier im Fond erlebt das Konzept positiv (entspannend, Fahrzeugbewegungen nicht störend) und bewertet es nahezu identisch zum Konzept SL. Dies zeigt, dass mögliche Bedenken hinsichtlich Diskomfort im Fond unbegründet sind.

Wird das Konzept VAA als geeignet erachtet? Der Lenkeffekt infolge Wankens erweist sich als geeignet, um vom Lenkrad entkoppelte FAS-Eingriffe zu stellen und deren Vorteile zu erschließen. Das Rückmeldekonzept, welches als *Fahrt entlang einer Wanne* erlebbar ist (s. Abschnitt 4.2.2.3), gilt als verständlich und einfach übersteuerbar. Es bietet die Möglichkeit die Information mit unterschiedlichem Nachdruck zu vermitteln und provoziert keine schreckhaften Reaktionen. Die gemeinsame Querführung ist bei besserer Leistung des Fahrer-Fahrzeug-Gesamtsystems weniger beanspruchend und weniger bevormundend als im etablierten Konzept. Sie wird von Fahrer und Passagier im Fond positiv erlebt. Hervorzuheben ist, dass aus der geringeren Bevormundung auch ein geringerer Entwicklungsaufwand resultiert (s. Abschnitt 4.2.2.4). Das Zusammenspiel von Fahrer und FAS funktioniert. Ein

Großteil der Fahrer bringt lediglich niederfrequente Lenkbewegungen ein, obwohl Lenken als einfach erachtet wird. Die Fahrer überlassen die Querführung somit freiwillig dem FAS. Dies zeigt zum einen, dass die entkoppelten FAS-Eingriffe als konsistent und angenehm empfunden werden. Zum anderen zeigt dies, dass die Handlungsfreiheit des Konzepts *variable Aufgabenübernahme* genutzt wird, um lästige Aufgaben abzugeben, was zum Komfort beiträgt. Komfortfördernd ist auch die hohe Gleichmäßigkeit und Kontinuität des Kurses, wohingegen die Auswirkungen der Wankbewegungen nicht eindeutig sind. Das Subjektivurteil der Passagiere im Fond ist ähnlich positiv wie im Konzept SL. Insgesamt scheinen mögliche Bedenken hinsichtlich Diskomfort im Konzept VAA somit unbegründet. Das Komfortempfinden der Fahrer wird im Rahmen der Funktion tLCA betrachtet (s. Abschnitt 6.1.2).

Zusammenfassend bestätigen sich zahlreiche Vorteile gegenüber dem etablierten Konzept mit Summenpunkt im Lenkrad, weshalb das Konzept VAA als vielversprechend erachtet wird. Für einen abschließenden Vergleich sind die jeweils optimalen Ausprägungen gegenüberzustellen. Dies umfasst den Einbezug kooperativer Lösungen sowie die Optimierung des Zusammenhangs zwischen Wankwinkel und FAS-Eingriff. Im Blick auf das Konzept VAA sind detaillierte Untersuchungen zur Übersteuerbarkeit von unerwarteten und hochdynamischen FAS-Eingriffen, zu Fahrkomfort und Fahrspaß sowie dem Risiko von Kinetose notwendig. Auch ist das Situationsbewusstsein und die Fehlerwahrscheinlichkeit zu prüfen, welche aufgrund der geringen Fahrerbeteiligung vermutlich im Bereich alternativer Aufgabenübernahme liegen.

6.1.2 tLCA mit variabler Aufgabenübernahme

Das Konzept wurde in Kapitel 4.2.2 entwickelt und in Abschnitt 5.4.2 technisch umgesetzt. Die Nutzung als LKA wurde in Abschnitt 6.1.1 behandelt. Die Funktion tLCA wird betrachtet, um auch engere Radien und andere Regelungsarten des Fahrers zu untersuchen (Beschleunigungs- statt Lage- und Geschwindigkeitssteuerung [206, 208], s. Abschnitt 2.2.2). Im Fokus des Versuchs stehen die folgenden Fragestellungen:

- *Wie erlebt der Fahrer die gemeinsame Querführung?*
- *Wird das Konzept als geeignet erachtet?*

6.1.2.1 Funktionsausprägungen

Die Soll-Bahn des FAS beim Fahrstreifenwechsel entspricht einem Polynom 5. Grades (s. Abschnitt 5.4.2.1). Die Dauer des Fahrstreifenwechsels wird von Experten auf 7 s festgelegt. Anzumerken ist, dass Studien zur Teilautomation bekannt sind, welche kürzere Dauer empfehlen (z.B. 4,4 - 5,1 s [108]). Ausschlaggebend für den Unterschied könnte die höhere Fahrzeuggeschwindigkeit (80 - 120 km/h vs. 60 km/h in [108]) oder die unterschiedliche

Übernahme der Querführungsaufgabe sein.

Die Unterdrückung des Fahrstreifenwechsel-Triggers bei belegtem Fahrzeugrückraum wurde deaktiviert, da es sich in Vorstudien als verwirrend herausgestellt hat, wenn der Fahrstreifenwechsel-Trigger ignoriert wird, ohne den Fahrer hierüber zu informieren. Somit wird der Fahrstreifenwechsel nach einem Trigger stets auch ausgeführt.

Analog zur Studie zum LKA wird dem Konzept *Variable Aufgabenausführung (VAA)* das etablierte Konzept *Summenpunkt Lenkrad (SL)* sowie das Konzept *Summenpunkt Lenkrad mit Wankbewegung (SLW)* gegenübergestellt (s. Abschnitt 6.1.1.1).

6.1.2.2 Szenario, Versuchsablauf, Studiendesign

Für hohe Reproduzierbarkeit und aufgrund von Einschränkungen bei der Funktionsumsetzung (s. Tabelle 5.2) finden die Fahrstreifenwechsel auf geraden Streckenabschnitten der A 96 statt. Die Längsführung erfolgt manuell. Der Versuchsleiter bittet den Probanden den Fahrstreifen zweimal hin und zurück zu wechseln. Anschließend wird der Fragebogen vorgelesen und vom Probanden während der Fahrt beantwortet.

Das Szenario wird bei 80 km/h und 120 km/h durchgeführt und ist gemäß Abbildung 6.1 in den Versuchsablauf eingebettet. Auf der Hin- und Rückfahrt ist jeweils eine andere Funktionsausprägung aktiv.

6.1.2.3 Operationalisierung

Das Erleben der gemeinsamen Fahrzeugführung wird ähnlich der Studie zum LKA über die Teilbereiche Fahrerbeanspruchung, Leistung des Fahrer-Fahrzeug-Gesamtsystems und Subjektivbewertung erfasst. Die dazugehörigen Kennwerte sind in Abschnitt 6.1.1.4 angeführt. Die Subjektivbewertung fokussiert das Erleben von Komfort und Dynamik, da möglicher Diskomfort vermutlich bei der Funktion tLCA verstärkt zum Tragen kommt. Gemäß der Komfortkriterien aus Abschnitt 2.2.3.3 werden Aussagen zur Gleichmäßigkeit des Kurses, zum Ruck und zu den Wankbewegungen eingestuft (s. Tabelle 6.5). Die Bewertung erfolgt auf einer 5-Punkte Skala von (1) *trifft überhaupt nicht zu* bis (5) *trifft voll zu*. Die statistische Analyse erfolgt mittels *Kruskal-Wallis-Test* und *Dunn's post-hoc-Test* bzw. *Wilcoxon-Test*.

6.1.2.4 Ergebnisse

Je Funktionsausprägung werden 24 Probanden (subjektiv) bzw. 23 Probanden (objektiv, ein Messdatenausfall) ausgewertet. Abbildung 5.16 auf Seite 77 zeigt die typischen Verläufe von Wankwinkel und Querbeschleunigung relativ zum Schwerevektor beim Fahrstreifenwechsel mit Konzept VAA im alternativen Betrieb (Lenkrad stillstehend).

Tabelle 6.5: Subjektivbewertung der gemeinsamen Fahrzeugführung. Die jeweiligen Teilbereiche (fett) werden durch die darunter stehenden Aussagen erfasst

Dynamik
Das Fahrzeug führte den Spurwechsel ohne Verzögerung aus.
Das Einpendeln in die neue Spur ging schnell.
Komfort
Das Fahrzeug führte den Spurwechsel glatt und flüssig aus.
Zu Beginn des Spurwechsels gab es einen Ruck.
Im Verlauf des Spurwechsels gab es einen Ruck.
Am Ende des Spurwechsels gab es einen Ruck.
Das Fahrzeug schaukelte sich in die neue Spur hinein.
Gesamtsystem
Die Fahrzeugbewegungen beim Spurwechsel erschienen mir richtig.

Beanspruchung des Fahrers Gemäß Tabelle 6.6 ist die Lenkaktivität im Konzept VAA signifikant geringer als in den Konzepten SL und SLW. Die Lenkarbeit ist signifikant geringer als im Konzept SLW und deskriptiv zum Teil auch geringer als im Konzept SL.

Tabelle 6.6: Fahrerbeanspruchung. Die Lenkarbeit entspricht dem Integral der Beträge von Lenkrate und Lenkmoment (*Mitziehen* der Fahrerhände durch das FAS geht positiv ein). Signifikante Unterschiede sind grau hinterlegt und beim post-hoc-Test durch '<' veranschaulicht. Die vollständigen Angaben zum Kruskal-Wallis-Test sind in Anhang C.1.2 gelistet

	SL	VAA	SLW	Kruskal-Wallis-Test	post-hoc-Test
Lenkaktivität					
Lenkradwinkel (effektiv) (°)	2,87	2,00	2,88	p < .0001	VAA < SL, SLW
Lenkradgeschwindigkeit (effektiv) (°/s)	3,32	2,44	4,20	p < .0001	VAA < SL, SLW
Lenkradrichtungswechselrate (1/s)	0,59	0,28	0,93	p < .0001	VAA < SL < SLW
Lenkarbeit					
Lenkmoment (effektiv) (Nm)	0,47	0,47	1,14	p < .0001	VAA, SL < SLW
Arbeitsintegral (Nm)	1,70	1,50	5,85	p = .0003	VAA, SL < SLW

Leistung des Fahrer-Fahrzeug-Gesamtsystems Bei Fahrt *hands-off* schneidet das Konzept VAA gegenüber dem Konzept SL in zwei Kennwerten besser und in zweien schlechter ab (s. Anhang C.1.2). Hervorzuheben ist der Kennwert *Gierbeschleunigung*, welcher im Konzept VAA ca. 13% höher ist.

Relativ zur Fahrt *hands-off* verschlechtern sich die Kennwerte *Gierbeschleunigung* und *Gierrate* bei gemeinsamer Fahrzeugführung im Konzept VAA weniger (VAA: ca. 9%, SL: ca.

15%). Die Kennwerte *Gierwinkelfehler* und *Querablage* nehmen hingegen stärker zu (VAA: ca. 41%, SL: 7%).

Die gemeinsame Querführung mit Konzept VAA weist gegenüber dem Konzept SL einen signifikant höheren *Gierwinkelfehler* und deskriptiv eine höhere *Querablage* auf (s. Tabelle 6.7). Die Kennwerte *Gierbeschleunigung* und *Gierrate* sind ähnlich. Das Konzept SLW schneidet in allen Kennwerten signifikant schlechter als das Konzept SL ab. Im Vergleich zum Konzept VAA ist die *Gierbeschleunigung* signifikant höher.

Tabelle 6.7: Leistung des Fahrer-Fahrzeug-Gesamtsystems. *Gierwinkelfehler* und *Querablage* beziehen sich auf die Soll-Bahn des FAS. Signifikante Unterschiede sind grau hinterlegt und beim post-hoc-Test durch '<' veranschaulicht. Die vollständigen Angaben zum Kruskal-Wallis-Test sind in Anhang C.1.2 zu finden

		SL	VAA	SLW	Kruskal-Wallis-Test	post-hoc-Test
Gierwinkelfehler (effektiv)	(°)	0,264	0,330	0,374	p < .0001	SL < VAA, SLW
Gierbeschleunigung (effektiv)	(°/s ²)	0,028	0,029	0,039	p < .0001	VAA, SL < SLW
Gierrate (effektiv)	(°/s)	0,021	0,021	0,023	p = .0113	SL < SLW
Querablage (SD)	(m)	0,181	0,205	0,234	p < .0001	SL < SLW

Subjektivbewertung Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst. Die Verteilung der Bewertung ist in Anhang C.1.2 zu finden.

- *Dynamik*

Die Aussagen *Das Fahrzeug führte den Spurwechsel ohne Verzögerung aus* und *Das Einpendeln in die neue Spur ging schnell* werden in allen Konzepten bei 80 km/h und 120 km/h im Median als *voll zutreffend* erachtet.

- *Komfort*

Die Fahrstreifenwechsel werden in allen Konzepten bei 80 km/h und 120 km/h im Median als *glatt und flüssig* erachtet (*voll zutreffend*). Zu Beginn, im Verlauf und am Ende des Fahrstreifenwechsels gab es *überhaupt keinen* Ruck. Die Konzepte SL und SLW schaukeln bei beiden Fahrzeuggeschwindigkeiten *überhaupt nicht* bzw. *eher nicht*. Das Konzept VAA schaukelt bei 80 km/h im Median *ausgeglichen/eher nicht* und bei 120 km/h *überhaupt nicht*, was eine signifikante Reduktion darstellt ($W(N=72) = -77$, $p = .0159$). Gegenüber dem Konzept SLW schaukelt das Konzept VAA bei 120 km/h signifikant weniger ($H(2, N=72) = 7,87$, $p = .0195$).

- *Gesamtsystem*

Die Fahrzeugbewegungen werden in allen Konzepten bei 80 km/h und 120 km/h im Median als *richtig* erachtet (*voll zutreffend*).

6.1.2.5 Diskussion

Das Konzept *Summenpunkt Lenkrad mit Wankbewegung (SLW)* beansprucht den Fahrer bei teils schlechterer Leistung des Fahrer-Fahrzeug-Gesamtsystems stärker als das Konzept *Variable Aufgabenausführung (VAA)* und wird zudem als stärker schaukelnd empfunden. Die Ergänzung des Konzepts VAA um einen Summenpunkt wäre somit von Nachteil.

Wie erlebt der Fahrer die gemeinsame Querführung mit Konzept VAA?

- *Beanspruchung*

Die signifikant geringere Lenkaktivität zeigt, dass die mentale und physische Beanspruchung im Konzept VAA geringer als im etablierten Konzept *Summenpunkt Lenkrad (SL)* ist. Anzumerken ist, dass die unterschiedliche Lenkaktivität maßgeblich vom Fahrer verursacht wird und nicht konzeptionell begründet ist (s. *Fahrerbeanspruchung* in Abschnitt 6.1.1.6).

- *Leistung des Fahrer-Fahrzeug-Gesamtsystems*

Die ähnliche Leistung der Konzepte VAA und SL bei Fahrt *hands-off* zeigt, dass die Vorteile entkoppelter FAS-Eingriffe mit der gewählten Umsetzung nicht erschlossen werden. Der für ausgeglichenen Kurs maßgebliche Kennwert *Gierbeschleunigung*, welcher zudem die höchste Korrelation mit Subjektivurteilen aufweist [29], ist im Konzept VAA bei Fahrt *hands-off* höher als im Konzept SL. Bei gemeinsamer Fahrzeugführung ist er hingegen ähnlich. Dies zeigt, dass das Zusammenspiel von Fahrer und FAS im Konzept VAA besser als im Konzept SL funktioniert. Die Kennwerte *Gierrate* und *Gierbeschleunigung* ähneln bei gemeinsamer Fahrzeugführung jenen des Konzepts SL, wohingegen der *Gierwinkelfehler* und (deskriptiv) auch die *Querablage* erhöht sind. Dies legt den Schluss nahe, dass der Fahrer im Konzept VAA bei ähnlich ruhigem Kurs seine Wunsch-Bahn deutlicher gegenüber dem FAS durchsetzt.

- *Subjektivbewertung*

Die Dynamik der Fahrstreifenwechsel wird in allen Konzepten ähnlich bewertet. Die Wankbewegungen erhöhen die empfundene Dynamik somit nicht. Der Fahrstreifenwechsel verläuft ohne Ruck und mit hoher Gleichmäßigkeit und Kontinuität (*glatt und flüssig*), was für hohen Fahrkomfort und gutes Zusammenspiel von Fahrer und FAS spricht. Hinsichtlich des Komforts ist zu beachten, dass der Zusammenhang *Wanken gemäß Lenkradäquivalent des FAS-Eingriffs* bei niedriger Geschwindigkeit (80 km/h) zunehmend als schaukelnd empfunden wird. Um Diskomfort zu vermeiden, sollte zumindest bei niedriger Geschwindigkeit eine andere Berechnungsgrundlage gewählt werden (s. Abschnitt 4.2.2.2).

Die Fahrzeugbewegungen erscheinen in allen Konzepten richtig. Dies zeigt, dass das

Konzept VAA die entkoppelten FAS-Eingriffe so zurückgemeldet, dass die Fahrzeugbewegung konsistent zur Lenkradstellung erscheint. Das Konzept VAA gilt demnach als verständlich.

Wird das Konzept VAA als geeignet erachtet? Die technische Umsetzung der entkoppelten FAS-Eingriffe ist nicht geeignet, um deren Vorteile zu erschließen (Fahrt *hands-off*). Das Rückmeldekonzert VAA, welches als *Fahrt entlang einer Wanne* erlebbar ist (s. Abschnitt 4.2.2.3), gilt als verständlich. Das Zusammenspiel von Fahrer und FAS funktioniert. Dies zeigt die im Vergleich zum Konzept SL geringere Beanspruchung und die im Vergleich zum Konzept SL geringere Verschlechterung der Leistung des Gesamtsystems relativ zur Fahrt *hands-off*. Ebenso spricht die positive Subjektivbewertung für ein gutes Zusammenspiel (kein Ruck, glatter und flüssiger Verlauf). Positiv gegenüber dem etablierten Konzept ist zudem, dass der Fahrer seine Wunsch-Bahn stärker gegenüber dem FAS durchsetzt, was als geringere Bevormundung gedeutet werden kann. Ähnlich zur Funktion LKA wäre eine Ergänzung des Konzepts VAA um einen Summenpunkt ausschließlich nachteilig.

Im Blick auf den Fahrkomfort erfolgt der Fahrstreifenwechsel ähnlich gleichmäßig und kontinuierlich wie im Konzept SL (ähnliche effektive Gierbeschleunigung, glatt und flüssig, keine Rucke). Bei 120 km/h werden die Wankbewegungen nicht als schaukelnd empfunden. Um dies auch bei geringer Geschwindigkeit zu gewährleisten, könnte ein geschwindigkeitsabhängiger Zusammenhang zwischen FAS-Eingriff und Wankwinkel gewählt werden. Insgesamt erweisen sich mögliche Bedenken hinsichtlich Diskomfort im Konzept VAA somit größtenteils als unbegründet.

Zusammenfassend wird das Konzept VAA für die Funktion tLCA und somit für engere Radien und Beschleunigungssteuerung des Fahrers als geeignet erachtet. Ausschlaggebend sind die Verständlichkeit der Rückmeldung und das funktionierende Zusammenspiel zwischen Fahrer und FAS, welches bei ähnlicher Leistung des Fahrer-Fahrzeug-Gesamtsystems weniger beansprucht und bevormundet als das etablierte Konzept. Weiteres Potential bietet die Optimierung des Zusammenhangs zwischen FAS-Eingriff und Wankbewegung sowie eine technische Umsetzung, welche die Vorteile entkoppelter FAS-Eingriffe erschließt.

6.1.3 Navigation Instruction (NI)

Das Konzept wird in Kapitel 4.1 erarbeitet und in Abschnitt 5.4.1.1 technisch umgesetzt. Die Studie validiert die potentiellen Vorteile von Navigationshinweisen mittels Wankbewegung (s. Tabelle 4.2). Hieraus lässt sich wie gefordert ableiten, ob das Konzept grundsätzlich für informierende FAS geeignet scheint.

Im Fokus des Versuchs stehen die folgenden Fragestellungen⁷:

- Wird die Wankbewegung wahrgenommen?
- Wird sie intuitiv als Navigationshinweis verstanden?
- Resultieren schreckhafte oder anderweitig ungewollte Fahrerreaktionen?
- Wird das Konzept als geeignet erachtet?

6.1.3.1 Veranschaulichung der eingebrachten Wankbewegung

Gemäß Kapitel 4.1.4 wird für die informierenden und warnenden Funktionen NI, FCA und LDW die gleiche Wankbewegung genutzt. Kennzeichnend ist ein Sprung (Ziel: *Aufmerksamkeit erregen*) auf einen großen stationären Wankwinkel (Ziel: *Richtungsinformation übertragen*). Komfortaspekte bleiben zunächst unberücksichtigt. Abbildung 6.7 zeigt den Wankverlauf, welcher nach 0,47 s 95% seines Endwerts erreicht und sich diesem nahezu asymptotisch

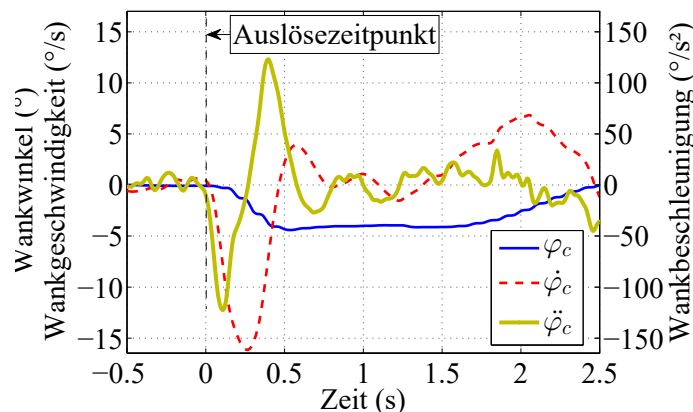


Abbildung 6.7: Wankbewegung zur Informationsübertragung in den informierenden und warnenden Funktionen NI, FCA und LDW. Dargestellt sind der Wankwinkel φ_c , die Wankrate $\dot{\varphi}_c$ und die Wankbeschleunigung $\ddot{\varphi}_c$. Angepasst aus der Vorveröffentlichung in [124]

nähert. Die Wankrate erreicht die 95%-Schwelle nach 0,21 s, die Wankbeschleunigung und die hierdurch induzierte Vertikalbeschleunigung nach 0,089 s. Die Maximalwerte betragen $16^\circ/\text{s}$ und zweimal $125^\circ/\text{s}^2$. Letzteres entspricht einer Vertikalbeschleunigung in Sitzmitte von $0,75 \text{ m}/\text{s}^2$. Somit werden die Wahrnehmungsschwellen von $0,25^\circ/\text{s}$ [130], $0,2^\circ/\text{s}^2$ [83] und $0,05 \text{ m}/\text{s}^2$ [83] deutlich überschritten. Der stationäre Wankwinkel beträgt 4° , was zu einer Querbeschleunigung von $0,69 \text{ m}/\text{s}^2$ führt (Wahrnehmungsschwelle: $0,25 \text{ m}/\text{s}^2$ [130]).

⁷ Aspekte dieses Abschnitts sind bereits in [124] vorveröffentlicht.

"Anzumerken ist, dass die Werte fahrzeugfest gemessen sind und die Bewegung des Fahrers geringere Maximalwerte aufweist (Teilkompensation durch Sitzpolsterung), jedoch von Experten weiterhin als deutlich wahrnehmbar erachtet wurde." [124, S. 87]. Die Dauer der Fahrzeugquerneigung wird in Abhängigkeit der jeweiligen Funktion festgelegt. Die technische Umsetzung gewährleistet ein Fahrverhalten ähnlich dem von Serienfahrzeugen (s. Kapitel 5.3.2). Dies schließt Fahrerreaktionen aufgrund eines ungewohnten Fahrverhaltens aus, welche ansonsten die Ergebnisse überlagern würden.

6.1.3.2 Szenario

Untersucht werden Navigationshinweise im Kreisverkehr (KV), da die Schwächen aktueller Systeme hier verstärkt zutage treten (s. Abschnitt 4.1.1). Zudem wird den Forderungen nach geringen Kurvenradien (eingeschränkte Funktionsumsetzung, s. Tabelle 5.2) und der Übermittlung von zunächst binären Richtungsinformationen entsprochen (s. Abschnitt 4.1.4).

Der Versuchsleiter bittet die Probanden in den Kreisverkehr einzufahren und solange in diesem zu bleiben bis ein Hinweis zur Ausfahrt kommt. Das serienmäßige Navigationssystem ist deaktiviert.

Der zeitliche Versatz des Wankwinkelsprungs relativ zur Ausfahrt und die Dauer des stationär gehaltenen Wankwinkels werden von Experten für jeden Kreisverkehr separat festgelegt, um zunächst eine möglichst optimale Einstellung zu untersuchen. Der Abbau des Wankwinkels erfolgt mit $4^\circ/\text{s}$. Gemäß Tabelle 6.8 ähneln sich KV 2 - 4, wohingegen sich KV 1 in der

Tabelle 6.8: Charakteristische Daten zur Wankbewegung und zu den durchfahrenen Kreisverkehren. Vorveröffentlicht in [124, S. 90]

	Variante mit Hinweis zur	Zeitversatz zur Ausfahrt	Dauer der Neigung	Ausfahrt Nr.	Durchmesser	Anzahl Fahrstreifen
1	Weiter-/Ausfahrt	10,0 s	11,0 s	7	320 m	3
2	Weiter-/Ausfahrt	3,4 s	3,5 s	3	33 m	1
3	Ausfahrt	3,0 s	2,9 s	3	29 m	1
4	Ausfahrt	3,6 s	3,8 s	3	31 m	1

gewählten Ausfahrt (7. Ausfahrt, nach einer vollständiger Umrundung), der Geometrie und der Fahrzeuggeschwindigkeit unterscheidet. Zudem wird im KV 1 der Wankwinkelsprung zum Zeitpunkt B aus Sicherheitsgründen (Lenkeffekt infolge Wankens) von $16^\circ/\text{s}$ auf $9^\circ/\text{s}$ reduziert (s. Abb. 6.8).

6.1.3.3 Versuchsablauf, Studiendesign

Allgemeine Informationen zum Ablauf werden zu Beginn des Kapitels 6.1 gegeben. Insgesamt werden vier Kreisverkehre durchfahren, welche gemäß Abbildung 6.1 in den Ver-

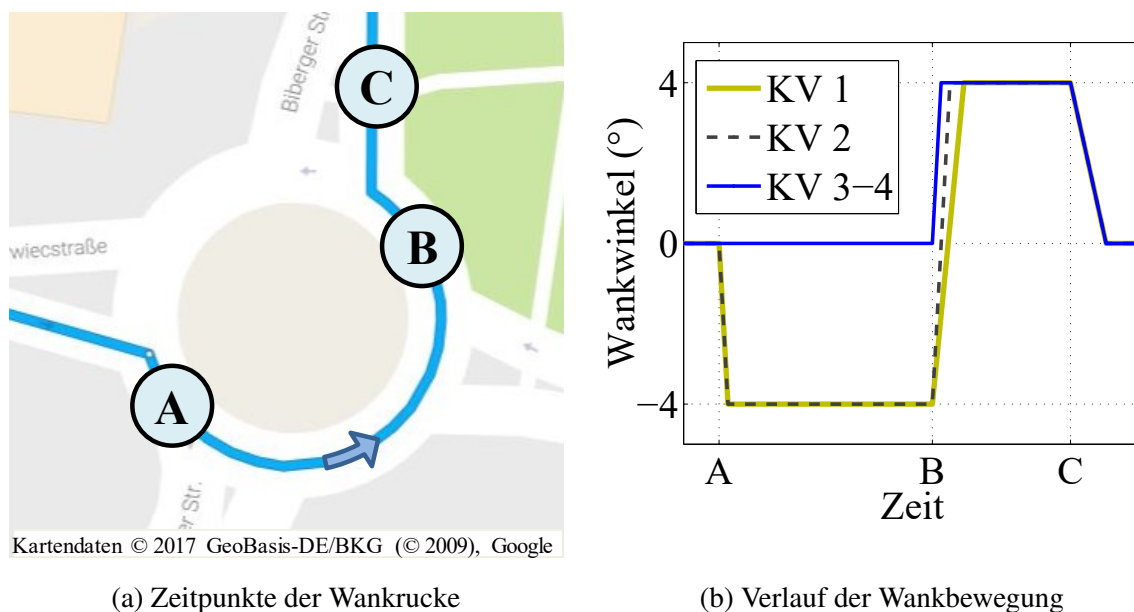


Abbildung 6.8: Zeitpunkte und Soll-Verlauf der als Navigationshinweis genutzten Wankbewegungen. Betrachtet werden die Varianten *Hinweis zur Weiter-/Ausfahrt* (KV 1 - 2) sowie *Hinweis zur Ausfahrt* (KV 3 - 4). Angepasst aus der Vorveröffentlichung in [124]

suchsablauf eingebettet sind. Untersucht werden zwei Ausprägungen des Wankverlaufs (s. Abb. 6.8). KV 1 - 2 werden mit Variante *Weiter-/Ausfahrt* durchfahren, welche einen Hinweis zum Verbleib im Kreis (Wanken zur Kurveninnenseite) und einen Hinweis zur Ausfahrt gibt (Wanken in Richtung der Ausfahrt). KV 3 - 4 werden mit Variante *Ausfahrt* durchfahren, welche lediglich auf die Ausfahrt hinweist.

Die subjektive Bewertung erfolgt innerhalb von 15 min nach Durchfahrt des jeweiligen Kreisverkehrs im Fahrzeugstillstand. Die Kreisverkehre und Varianten werden von den 36 Probanden in der Reihenfolge gemäß Tabelle 6.8 durchfahren.

6.1.3.4 Operationalisierung

[124, S. 90]: "Objektiv wurde erfasst, ob die jeweilige Ausfahrt genommen wurde und mittels der Fahrzeugdaten ausgewertet, ob es zu ungewollten Reaktionen des Fahrers kam (z.B. Verreißen des Lenkrads). Die Wahrnehmbarkeit und intuitive Verständlichkeit des Hinweises wurden mittels Fragebogen auf einer 5-Punkte Skala bewertet ((1) trifft überhaupt nicht zu bis (5) trifft voll zu). Die Unterschiede in der Häufigkeit, ob eine Ausfahrt genommen wurde, werden mittels *McNemar-Test* (Erst-/Folgekontakt derselben Ausprägung) und *Fishers exaktem Test* (Unterschied zwischen den Ausprägungen), die subjektiven Daten mittels *Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest* analysiert."

6.1.3.5 Ergebnisse

[124, S. 90 f.]: "Bei der Häufigkeit, mit der dem Hinweis gefolgt wurde, gibt es keine Unterschiede zwischen KV 1 und KV 2 (16/30 vs. 19/30) bzw. KV 3 und KV 4 (20/26 vs. 25/26, $\chi^2(1, n = 26) = 3.20, p = .0736$). Der Unterschied zwischen den Ausprägungen *Weiter-/Ausfahrt* und *Ausfahrt* ist höchst signifikant (35/60 vs. 48/55, $p = .0007$). Die unterschiedliche Anzahl ausgewerteter Datensätze ist Systemausfällen geschuldet. Probanden, die dem Hinweis nicht gefolgt sind, geben auf Nachfrage an, die Wankbewegung wahrgenommen, jedoch (trotz einwandfreier Straßenoberfläche) als Bodenunebenheit interpretiert zu haben. In keinem Fall wurden schreckhafte oder nachteilige Fahrerreaktionen hervorgerufen.

Folgende Aussagen wurden für beide Ausprägungen im Median als (*eher / überhaupt*) *nicht zutreffend* bewertet: *Das Fahrzeug neigte sich zur Kurveninnenseite* (5 bei *Weiter-/Ausfahrt* vs. 4,5 bei *Ausfahrt*), *Die Neigungsbewegung begann sofort nach Einfahrt in den Kreisverkehr* (4 vs. 5), *Das Fahrzeug schaukelte im Kreis hin und her* (5 vs. 5), *Ich empfand das als störend* (4 vs. 4, signifikant weniger zutreffend für *Ausfahrt*: $W(N = 36) = 122, p = .0194$). Für beide Varianten wurden im Median als (*eher / voll*) *zutreffend* bewertet: *Das Fahrzeug neigte sich zur Kurvenaußenseite* (1 vs. 1), *Das Fahrzeug zeigte, wo ich den Kreisverkehr verlassen sollte* (1 vs. 1, signifikant zutreffender für *Ausfahrt*: $W(N = 36) = 67, p = .0182$) und *Dieser Hinweis war immer leicht verständlich* (2 vs. 1, hoch signifikant zutreffender für *Ausfahrt*: $W(N = 36) = 186, p = .0023$)."

6.1.3.6 Diskussion

Wird die Wankbewegung wahrgenommen und intuitiv als Navigationshinweis verstanden?

[124, S. 91]: "Hinsichtlich der Einschätzung der intuitiven Verständlichkeit sind innerhalb einer Ausprägung keine objektiven Unterschiede zwischen Erst- und Folgekontakt festzustellen (Zeitraum von ca. 1 h zwischen dem Erleben der Ausprägungen). Einschränkend ist zu werten, dass 42% der Probanden dem Hinweis *Weiter-/Ausfahrt* nicht folgen (13% bei Hinweis *Ausfahrt*), wobei angegeben wird, die Bewegung zwar wahrgenommen, jedoch als Bodenunebenheit interpretiert zu haben. Anzumerken ist, dass 33% der Probanden im Vorfeld keinerlei Wissen/Erfahrung über aktive Aufbaubewegung hatten. Die Verständlichkeit des Hinweises (leicht verständlich, Deutung als Hinweis zur Ausfahrt) sowie das Folge leisten sind in der Variante *Ausfahrt* zwar signifikant besser, jedoch könnte dies auch Übungs-/Lerneffekten geschuldet sein (Durchfahrt der Kreisverkehre erfolgte in gleicher Reihenfolge). Die Vermutung eines schnellen Lerneffekts wird durch den deutlichen Trend zur Verbesserung zwischen KV 3 [Kreisverkehr (KV) – Anm. d. Verf.] und KV 4 gestützt ($p = .0736$). Da bei Navigationssystemen Systemvertrautheit vorausgesetzt werden darf, kann ein Befolgen des Hinweises als äußerst wahrscheinlich angesehen werden (97% in KV 4)."

Resultieren schreckhafte oder anderweitig ungewollte Fahrerreaktionen? Es waren keine unerwünschten Reaktionen zu beobachten.

Wird das Konzept als geeignet erachtet? [124, S. 91]: "Insgesamt scheint die Wankbewegung als Navigationshinweis im Kreisverkehr geeignet, da sich mögliche Nachteile nicht bestätigten (keine schreckhafte Fahrerreaktion, kein Schaukeln, nicht störend) und die Fähigkeit zum Anzeigen der Ausfahrt subjektiv (voll zutreffend/verständlich) und objektiv (87% Ausfahrt bei Variante *Ausfahrt*) gegeben ist (Vergleichswerte serienmäßiger Navigationssysteme liegen nicht vor). Aufgrund der einhergehenden Komfortbeeinträchtigung (signifikant geringer in Variante *Ausfahrt*) wird die Nutzung in einer Kaskade empfohlen (z.B. optisch – akustisch – Wanken)."

Um die Eignung für Navigationshinweise detaillierter einschätzen zu können, "sind ein optimaler Wankverlauf zu bestimmen (Kompromiss mit Insassenkomfort) und die Informationsaufnahme bei unerwartetem Hinweis sowie bei mehreren möglichen Fahrtrichtungen zu untersuchen (bisher nur Kreisverkehre mit Option 'Ausfahrt')" [124, S. 91].

6.1.4 Front Collision Avoidance (FCA)

Das Konzept wird in Kapitel 4.1 erarbeitet und in Abschnitt 5.4.1.1 technisch umgesetzt. Die Studie validiert die potentiellen Vorteile einer Ausweichempfehlung mittels Wankbewegung (s. Tabelle 4.2). Die Erkenntnisse erlauben Rückschlüsse, ob Handlungsaufforderungen bezüglich vorausliegender Hindernisse möglich sind, was in die Bewertung der Eignung des Konzepts für warnende FAS einfließt. Die Eignung für seitliche Ereignisse wird anhand der Funktion LDW untersucht (s. Abschnitt 6.2.2).

Im Fokus des Versuchs stehen die folgenden Fragestellungen⁸:

- *Resultieren schreckhafte oder anderweitig ungewollte Fahrerreaktionen?*
- *Wird die Fahrverantwortung eindeutig als beim Fahrer liegend angesehen?*
- *Ist die Ausweichempfehlung wirksam?*
- *Wird das Konzept als geeignet erachtet?*

6.1.4.1 Szenario

Es wird ein Ausweichmanöver mit geringer TTC, kleinem Querversatz sowie visuell und kognitiv abgelenktem Fahrer untersucht, da aktuelle Systeme hier Schwächen aufweisen (s. Abschnitt 4.1.2). Um eine hohe Vergleichbarkeit zu den Studien aus [183, 184] herzustellen,

⁸Aspekte dieses Abschnitts sind bereits in [124] vorveröffentlicht.

wird das Szenario identisch gestaltet. Der Fahrereingriff übersteigt den Lenkeffekt infolge Wankens deutlich, sodass der Lenkeffekt wie aufgrund eingeschränkter Funktionsumsetzung gefordert (s. Tabelle 5.2) vernachlässigbar ist. Die technische Umsetzung gewährleistet ein Fahrverhalten ähnlich dem von Serienfahrzeugen (s. Kapitel 5.3.2), um Fahrerreaktionen infolge eines ungewohnten Fahrverhaltens auszuschließen.

[124, S. 88]: "Die Probanden wurden gebeten, einem Straßenverlauf (ein Fahrstreifen je Richtung) mit möglichst 50 km/h (manuelle Längsführung) zu folgen. Sie waren durch eine Aufgabe einer *cover-story* visuell abgelenkt (lautes Vorlesen der an der gegenüberliegenden Fahrbahnbegrenzung aufgestellten Schilder [184]). Mittels der Vorrichtung *CAPLOS* [178] wurde ein zunächst verdecktes und einem Fahrzeug ähnliches Dummy-Objekt mit ca. 1,3 m/s ungefähr 0,6 m in den eigenen Fahrstreifen hineingeschossen. Dies wurde für den Fahrer bei einer TTC von 1,2 s sichtbar und dann die Ausweichempfehlung angefordert" (s. Abb. 6.9). Die eingebrachte Wankbewegung ist in den informierenden und warnenden Funktionen NI,



Abbildung 6.9: Ausweichempfehlung nach links (Dummy-Fahrzeug ausgefahren). Vorveröffentlicht in [124, S. 88]

FCA und LDW identisch und wird in Kapitel 6.1.3.1 vorgestellt. Der Wankwinkel wird bis zu einer Lenkradgeschwindigkeit kleiner $-35^\circ/s$ (Drehung *zum* Hindernis), jedoch für maximal 1,5 s gehalten. Der Abbau erfolgt mit $6^\circ/s$.

6.1.4.2 Versuchsablauf, Studiendesign

Allgemeine Informationen zum Ablauf werden zu Beginn des Kapitels 6.1 gegeben. Die Funktion FCA wird am Schluss der Studie durchgeführt (s. Abb. 6.1), weshalb sämtliche Probanden aktive Aufbaubewegungen bereits erlebt haben. "Der Probandengruppe mit Ausweichempfehlung wurde eine Kontrollgruppe ohne Empfehlung gegenübergestellt (jeweils 18 Probanden, *between-subjects-Design*)" [124, S. 88].

6.1.4.3 Operationalisierung

[124, S. 88]: "Das Szenario wurde subjektiv hinsichtlich seiner Kritikalität auf einer 10-Punkte Skala eingeschätzt (*nichts bemerkt (0)*, *harmlos (1-3)*, *unangenehm (4-6)*, *gefährlich (7-9)*, *nicht kontrollierbar (10)*) [155]. Objektiv wird die Zahl der Kollisionen mit dem Dummy-Objekt, die Reaktionszeit und -häufigkeit (Lenkradwinkel min. 10° nach links, Betätigung Bremspedal), die Stärke (Maximalwert) von Brems-/Lenkreaktion sowie deren Reihenfolge erfasst (keine Reaktion, nur gebremst, nur gelenkt, zuerst gebremst, zuerst gelenkt, gleichzeitig gebremst und gelenkt). Die Eindeutigkeit der Fahrverantwortung wird in der Gruppe mit Empfehlung durch die Bewertung des *Gefühls der Kontrolle* bzw. *der Verantwortung über die Lenkung des Fahrzeugs während des Eingriffs* auf einer 4-stufigen Skala erfasst. Die Unterschiede zwischen den Probandengruppen werden mittels *Mann-Whitney-U-Test* (Kritikalitätseinschätzung), *Pearson- χ^2 -Test* (Häufigkeiten/Reaktionsreihenfolge) sowie *t-Test* (Reaktionszeit/-stärke) analysiert."

6.1.4.4 Ergebnisse

[124, S. 89]: "Es gab keine Unterschiede im Kritikalitätsempfinden der Situation (jeweils $M = 7.2$, $SD = 1,59$). 64% der Probanden stuften diese als *gefährlich* oder *unkontrollierbar* ein ($Min = 4$, $Max = 8$, $Mdn = 8$). Es kam zu keinen Kollisionen mit dem Dummy-Objekt. Zudem gab es keine signifikanten Unterschiede in der Häufigkeit von Brems- (17 *ohne* vs. 18 Probanden *mit* Ausweichempfehlung) oder Lenkreaktion (18 vs. 17), den Maximalwerten von Brems- ($6,71 \text{ m/s}^2$ vs. $6,95 \text{ m/s}^2$) oder Lenkreaktion ($47,43^\circ$ vs. $51,08^\circ$), der Reaktionszeit von Brems- (1,000 s vs. 1,001 s) oder Lenkreaktion (0,974 s vs. 0,945 s) sowie der Reaktionsreihenfolge. Deskriptiv erfolgte die Lenkreaktion mit Ausweichempfehlung im Mittel 30 ms früher ($t(N = 33) = 0.873$, $p = .389$). Die Wankbewegung hat keine unerwünschte Fahrerreaktion hervorgerufen (z.B. Verreißen des Lenkrads). Sechs Probanden (33%) bemerkten die Neigungsbewegung, wovon sie einer nicht negativ und fünf durchgehend positiv bewerteten (*unterstützend*, *gut geeignet*, *effektiv*). Alle sechs Probanden stuften die Wahrnehmbarkeit bzw. Verständlichkeit der Empfehlung weder als *sehr gering* noch *sehr hoch* ein und empfanden während des Eingriffs *leicht beeinträchtigt* *uneingeschränkte* Kontrolle über die Lenkung. Fünf der sechs gaben an, die Verantwortung für die Lenkbewegung *weitestgehend* oder *vollständig* zu besitzen."

6.1.4.5 Diskussion

Resultieren schreckhafte oder anderweitig ungewollte Fahrerreaktionen? Es wurden keine unerwünschten Fahrerreaktionen infolge der Wankbewegung beobachtet.

Wird die Fahrverantwortung eindeutig als beim Fahrer liegend angesehen? Die über das Lenkrad empfundene Kontrolle wird kaum beeinträchtigt und die Verantwortung über das Ausweichmanöver weiterhin beim Fahrer gesehen.

Ist die Ausweichempfehlung wirksam? [124, S. 89]: "Auffällig ist, dass die gemäß Wahrnehmungsschwellen und von Experten als gut wahrnehmbar erachtete Wankbewegung von den Probanden häufig (66%) nicht wahrgenommen wird. Ein Grund könnte sein, dass den Experten sowohl Versuchsaufbau als auch Art der Empfehlung im Vorfeld bekannt waren. In den objektiven Kriterien (Lenk-/Bremsverhalten) werden kaum Unterschiede zur Kontrollgruppe festgestellt, was entweder am guten Abschneiden der Kontrollgruppe liegt (Deckeneffekt) oder zeigt, dass die Ausweichempfehlung unwirksam ist. Um ersteres auszuschließen könnte in künftigen Versuchen die Kritikalität des Szenarios erhöht werden (hier: Einstufung als *gefährlich/unkontrollierbar* durch 64% der Probanden)."

Wird das Konzept als geeignet erachtet? Positiv ist, "dass die Ausweichempfehlung im Gegensatz zu [183, 184] zu keinen unerwünschten Fahrerreaktionen führt, die empfundene Kontrolle über das Lenkrad kaum beeinträchtigt und die Verantwortung über das Ausweichmanöver als beim Fahrer liegend angesehen wird." [124, S. 89]. Ausschlaggebend ist jedoch, dass die Wankbewegung trotz hoher Dynamik und großem stationären Wankwinkel häufig nicht wahrgenommen wird (66%) und sich der Ausweichvorgang im untersuchten Szenario nicht von der Kontrollgruppe unterscheidet. Somit ist davon auszugehen, dass aktive Wankbewegungen als Ausweichempfehlung wenig geeignet sind.

6.2 Studie 2 (LKA /tLCA mit alternativer Aufgabenübernahme, LDW)

Die Studie umfasst die Funktionen LKA /tLCA mit alternativer Aufgabenübernahme sowie die Funktion LDW.

Probandenkollektiv Am Versuch nehmen 36 Probanden (14 weiblich) im Alter von 21 bis 61 Jahren teil ($M = 37$, $SD = 15$). Deren Gesamtfahrleistung liegt im Bereich von 1 100 km bis 1 600 000 km ($M = 386 200$, $SD = 398 955$). Die Versuchsgruppen werden nach Alter, Geschlecht und Fahrleistung parallelisiert.

Versuchsablauf Zu Beginn werden demographische Daten, Fahrerfahrung und Vorkenntnisse im Bereich FAS mittels Fragebogen erfasst. Anschließend machen sich die Probanden durch einfache Fahrmanöver auf dem Testgelände der Universität der Bundeswehr München

mit dem Fahrzeug vertraut. Darauf folgt die Anfahrt (ca. 30 min) zur Autobahn A 95 in Richtung Garmisch-Partenkirchen. Bis zum Umkehrpunkt an der Abfahrt *Wolfratshausen* wird die Funktion tLCA, auf dem Rückweg die Funktion LKA und die Funktion LDW untersucht. Die Versuchsdauer beträgt je nach Verkehrslage etwa zwei Stunden.

Der weitere Verlauf des Kapitels gliedert sich nach den untersuchten FAS.

6.2.1 LKA / tLCA mit alternativer Aufgabenübernahme

Das Konzept wurde in Kapitel 4.2.3 erarbeitet und in Kapitel 5.4.2 technisch umgesetzt. Ziel ist es, Vorteile für die *Mitfahrer* zu erschließen. Kennzeichnend ist, dass das FAS die Querführung ausführt und der Fahrer dies lediglich überwacht. Die Fahrt erfolgt *hands-on* mit in Mittenstellung blockiertem Lenkrad. Die Rückmeldung via Wanken basiert auf der Querbesehleunigung, welche gemäß der Soll-Bahn des FAS zu erwarten ist. Diese wird durch die Fahrzeugquerneigung vollständig kompensiert (querkraftfreier Zustand), was für die *Mitfahrer* vorteilhaft ist (s. Tabelle 4.2). Die Studie evaluiert, ob dies auch dem Fahrer zumutbar ist, was für die Anwendbarkeit des Konzepts ausschlaggebend ist.

Im Fokus des Versuchs stehen folgende Fragestellungen:

- *Ist die Rückmeldung bei querkraftfreier Fahrt ausreichend?*
- *Erlebt auch der Fahrer eine Komforterhöhung?*
- *Wirken die Wankbewegungen dem erwarteten Verlust an Fahrspaß entgegen?*
- *Ist das Konzept dem Fahrer zumutbar und somit anwendbar?*

6.2.1.1 Funktionsausprägungen

Im Versuch werden drei Funktionsausprägungen gegenübergestellt, welche sich ausschließlich im Wankverlauf unterscheiden.

Variante *Aufbau querkraftfrei (QKF)* Dies entspricht der angestrebten Systemausprägung. Die Komponente *Querbesehleunigung* trägt nicht zur Informationsrückmeldung bei. Während der Fahrt ist keine Querbesehleunigung wahrnehmbar.

Variante *Querkraft überkompensiert (ÜK)* Um die Wirkung der Wankbewegung einzuschätzen, wird eine Ausprägung mit verstärkter Wankbewegung gegenübergestellt. Der Wankverlauf entspricht dem 1,5-fachen des Verlaufs der Variante QKF. Die Querbesehleunigung wird somit überkompensiert, was komfortmindernd ist [13]. Dementsprechend deutlich sollte die übertragene Information wahrgenommen werden.

Variante Aufbau horizontalisiert (HO) Es werden keine Wankbewegungen eingebracht, weshalb der Fahrzeugaufbau lediglich reaktiv wankt. Da das Lenkrad in Mittenstellung verbleibt, werden ausschließlich über die (resultierende) Fahrzeugquerbewegung Informationen an den Fahrer übertragen. Die Variante gibt Aufschluss, ob die Querführung auch ohne explizite Rückmeldung akzeptiert wird. Der Vergleich zur Variante QKF zeigt, wie eine explizite Rückmeldung via Wankbewegung unter Einbuße der Eingangsgröße *Querbesehleunigung* gegenüber rein reaktiver Informationsübertragung einzuordnen ist.

Anzumerken ist, dass das Konzept HO analog in der Längsführung genutzt wird (Beispiel: ACC). Bei *simultan* ausgeführter Querführung würde es nicht akzeptiert, da die Diskrepanz zwischen Lenkradstellung und Fahrzeugbewegung als inkonsistent empfunden wird [187]. Bei Teilautomation (ebenfalls alternative Aufgabenübernahme) hingegen wird es akzeptiert. Dortige Querführung erfolgt jedoch *hands-off* und mit zusätzlicher visueller Rückmeldung durch die Lenkraddrehung.

6.2.1.2 Studiendesign

Um geringe subjektive Unterschiede zwischen den Varianten auflösen zu können, werden diese im Paarvergleich gegenübergestellt. Jeder Proband führt einen Paarvergleich mit Funktion LKA und einen mit Funktion tLCA aus. Somit wird jeder Paarvergleich pro FAS zwölfmal durchgeführt.

6.2.1.3 Szenarien, Versuchsablauf

Allgemeine Informationen zum Versuchsablauf werden zu Beginn des Abschnitts 6.2 gegeben. Die Funktion tLCA wird auf der A 95 in Richtung Wolfratshausen, die Funktion LKA auf dem Rückweg getestet. Jede Richtungsfahrbahn besitzt drei Fahrstreifen. Die Fahrt erfolgt mit 120 km/h bei manueller Längsführung und mit stets aktiver Funktion LKA (Variante: HO).

Funktion tLCA Die Funktion tLCA wird für hohe Reproduzierbarkeit und aufgrund von Einschränkungen bei der Funktionsumsetzung (s. Tabelle 5.2) auf geradem Streckenabschnitt untersucht. Der Proband wird gebeten den Fahrstreifen zweimal mittels Funktion tLCA zu wechseln. Anschließend wird die Funktionsausprägung geändert und der Fahrstreifen erneut zweimal gewechselt.

Funktion LKA Die Funktion LKA wird in zwei aufeinanderfolgenden und zueinander ähnlichen Kurven getestet (s. Abb. 6.10). Jede wird mit einer anderen Ausprägung durchfahren.

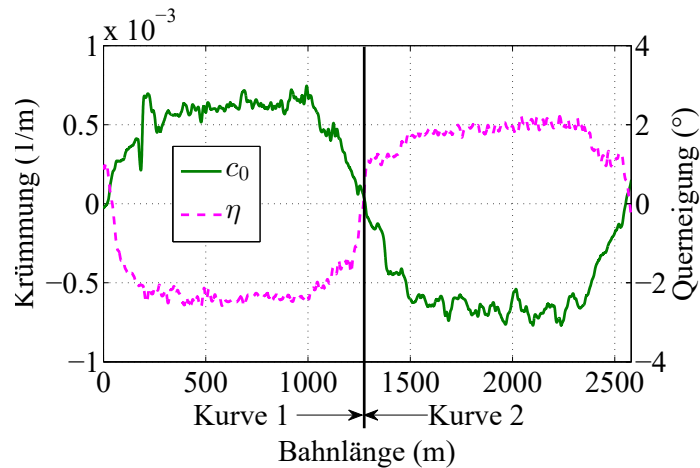


Abbildung 6.10: Kurvenfolge zum Test der Funktion LKA. Die Kurven ähneln sich in Krümmung c_0 , Straßenquerneigung η und Länge

Nach Abschluss des jeweiligen Szenarios wird der Fragebogen vorgelesen und vom Probanden während der Fahrt beantwortet.

6.2.1.4 Operationalisierung

Die Informationsrückmeldung, der Komfort, der Fahrspaß und das Gesamtsystem werden subjektiv durch die Fragen aus Tabelle 6.9 erfasst. Diese werden auf einer 5-Punkte Skala von (-2) trifft voll für das 1. System zu bis (2) trifft voll für das 2. System zu bewertet. Abweichungen vom Mittelwert null deuten auf die Bevorzugung einer Variante hin und werden statistisch mittels *t-Test* analysiert.

6.2.1.5 Ergebnisse

Im Folgenden werden wichtige Erkenntnisse hervorgehoben und zusammenfassend vorgestellt. Die vollständigen Ergebnisse sind in Anhang C.2.1 gelistet.

Veranschaulichung der Funktionsausprägungen Abbildung 6.11 stellt die typischen Wankverläufe der Varianten QKF und ÜK dar. Von Experten werden diese als deutlich unterscheidbar erachtet. Abbildung 6.11a zeigt, dass sich das Lenkrad beim Fahrstreifenwechsel bis zu $0,76^{\circ}$ in Richtung der Fahrzeugquerbewegung dreht. Gemäß der Unterschiedsschwelle von $0,68^{\circ}$ bei einem Lenkwinkel von 4° [156] gilt dies als wahrnehmbar, weshalb Informationen unbeabsichtigt auch via Lenkrad an den Fahrer fließen. Weiterhin ist zu erkennen, dass sich Schwankungen der Fahrzeuggeschwindigkeit auf den Wankverlauf auswirken ($t = 62$ s in Abb. 6.11b). Ebenso führen Fehler der Umfeldwahrnehmung zu Schwankungen ($t = 11$ s in Abb. 6.11b). Beides wirkt als Störeinfluss auf den Paarvergleich.

Tabelle 6.9: Operationalisierung der zu bewertenden Teilbereiche (fett) durch die darunter stehenden Fragen. *Spurwechsel* betrifft die Funktion tLCA, *Kurvenfahrt* die Funktion LKA

Informationsrückmeldung
Welcher Spurwechsel / welche Kurvenfahrt kündigte sich deutlicher an?
Bei welchem Spurwechsel / welcher Kurvenfahrt hätten Sie lieber eingegriffen?
Bei welchem Spurwechsel / welcher Kurvenfahrt verstanden Sie das Fahrzeug besser?
Bei welchem Spurwechsel / welcher Kurvenfahrt folgte das Lenkrad der Bewegung des Fahrzeugs besser?
Komfort
Welchen Spurwechsel / welche Kurvenfahrt fanden Sie angenehmer?
Bei welchem Spurwechsel schaukelte sich das Fahrzeug mehr in die neue Spur hinein? /
Bei welcher Kurvenfahrt schaukelte das Fahrzeug mehr?
Fahrspaß
Welcher Spurwechsel / welche Kurvenfahrt setzte schneller ein?
Welcher Spurwechsel / welche Kurvenfahrt ging insgesamt schneller?
Welcher Spurwechsel / welche Kurvenfahrt machte Ihnen mehr Spaß?
Gesamtsystem
Bei welchem Spurwechsel / welcher Kurvenfahrt erschienen Ihnen die Fahrzeugbewegungen richtiger?

Paarvergleich *HO* vs. *QKF* Es gibt keine signifikanten Unterschiede. Im Trend kündigt sich der Fahrstreifenwechsel mit Variante HO deutlicher an ($M = -0.92$, $SD = 1.51$, $p = .0586$).

Paarvergleich *QKF* vs. *ÜK* Die Variante ÜK schaukelte sich beim Fahrstreifenwechsel signifikant mehr in den neuen Fahrstreifen hinein ($M = 1.67$, $SD = 0.49$, $p < .0001$).

Paarvergleich *ÜK* vs. *HO*

- *Informationsübertragung*

Die Variante ÜK kündigt die Kurvenfahrt signifikant deutlicher an ($M = -1.17$, $SD = 0.72$, $p = .0002$). Beim Fahrstreifenwechsel gibt es einen Trend hierzu ($M = -0.92$, $SD = 1.62$, $p = .076$). Bei Kurvenfahrt wird das Fahrzeug mit Variante ÜK ($M = -1.00$, $SD = 1.35$, $p = .0261$), beim Fahrstreifenwechsel hingegen mit Variante HO signifikant besser verstanden ($M = 1.22$, $SD = 1.07$, $p = .0012$). Konsistent zu letzterem hätten die Probanden beim Fahrstreifenwechsel mit Variante ÜK signifikant lieber eingegriffen ($M = -1.08$, $SD = 1.16$, $p = .0081$). Das Lenkrad folgte der Bewegung des Fahrzeugs bei Kurvenfahrt ($M = 0.00$, $SD = 1.41$, $p = 1.0000$) und beim Fahrstreifenwechsel im Mittel ähnlich ($M = 0.58$, $SD = 1.51$, $p = .2064$).

- *Komfort*

Keine Variante wird als signifikant *angenehmer* empfunden. Die Ausprägung ÜK schau-

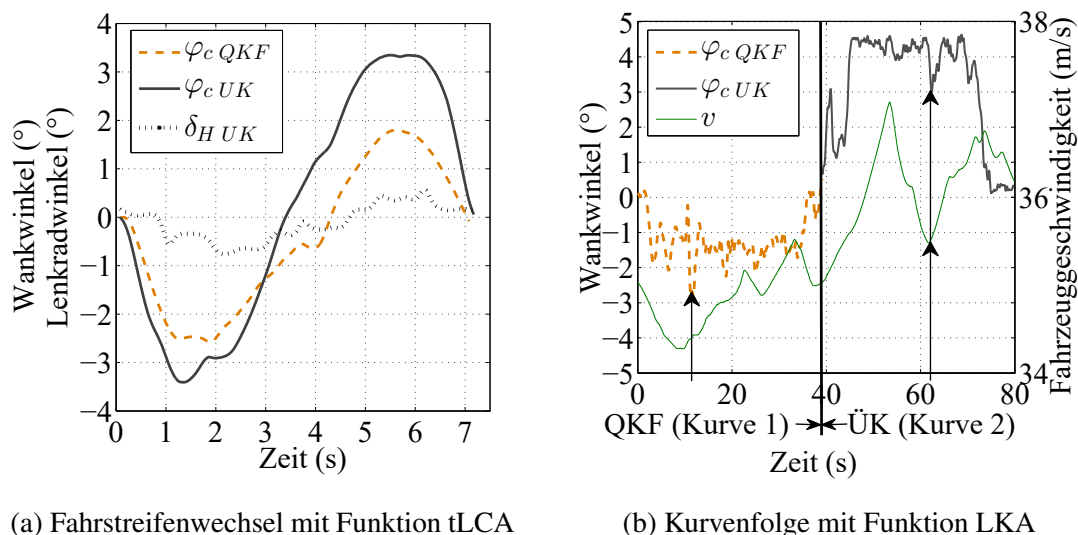


Abbildung 6.11: Unterschied im Wankverlauf φ_c der Ausprägungen QKF und ÜK. Abbildung a) stellt die Abweichung des Lenkradwinkels δ_H von der Mittelstellung exemplarisch für Variante ÜK dar. Die Messdaten stammen aus *einem* Versuchsdurchgang

kelt sich beim Fahrstreifenwechsel signifikant mehr in den neuen Fahrstreifen hinein ($M = -1.42$, $SD = 1.08$, $p = .0009$).

- *Fahrspaß*

Die Kurvenfahrt geht mit Variante ÜK insgesamt schneller ($M = -1.00$, $SD = 0.60$, $p = .0001$). Die Bewertungen, welcher Fahrstreifenwechsel insgesamt schneller geht ($M = -0.42$, $SD = 1.98$, $p = .4802$) und mehr Spaß macht ($M = 0.17$, $SD = 1.95$, $p = .2064$) weisen mit Abstand die höchsten Standardabweichungen des Versuchs auf.

- *Gesamtsystem*

Beim Fahrstreifenwechsel erscheinen die Fahrzeugbewegungen der Variante HO signifikant richtiger ($M = 1.00$, $SD = 1.48$, $p = .0388$). Bei Kurvenfahrt gibt es keine Unterschiede.

Allgemeines Auffällig ist, dass der beim Fahrstreifenwechsel empfundene Spaß in sämtlichen Paarvergleichen mit Mittelwerten nahe null und hohen Standardabweichungen bewertet wird (HO vs. QKF: $M = 0.00$, $SD = 1.81$; QKF vs. ÜK: $M = 0.00$, $SD = 1.76$; ÜK vs. HO: $M = 0.17$, $SD = 1.95$). Ähnlich hohe Standardabweichungen ergibt der Vergleich zwischen den gewankten Ausprägungen und der horizontalen Variante bei der Frage, welche Variante bei Kurvenfahrt und Fahrstreifenwechsel angenehmer ist (s. Anhang C.2.1). Festzuhalten ist, dass sich für keine der Fragen eine signifikante Ordnung der Ausprägungen, zum Beispiel nach der Stärke des Wankverlaufs ergibt.

6.2.1.6 Diskussion

Die Ergebnisse werden zunächst im Allgemeinen und anschließend mit Fokus auf die angestrebte Systemausprägung *Aufbau querkraftfrei (QKF)* diskutiert.

Rückmeldung ausschließlich durch die resultierende Fahrzeugbewegung Die Probanden haben mit Variante *Aufbau horizontiert (HO)* weder bei Kurvenfahrt noch beim Fahrstreifenwechsel die Querführung übernommen. Im Gegensatz zur simultan ausgeführten Querführung werden entkoppelte FAS-Eingriffe bei alternativer Ausführung somit auch ohne explizite Rückmeldung akzeptiert.

Anzumerken ist, dass auf der Rückfahrt eine Kurve mit einem Radius von 320 m mit 80 km/h durchfahren wurde, in welcher sämtliche Probanden die Querführung übernommen haben. Dies zeigt, dass die Akzeptanz gewisse Randbedingungen voraussetzt (z.B. minimaler Radius, maximale Gierrate).

Rückmeldung durch Wanken Die Variante *Querkraft überkompensiert (ÜK)* kündigt die Kurvenfahrt signifikant und den Fahrstreifenwechsel im Trend deutlicher als Variante HO an. Dies zeigt, dass die Wankbewegungen wahrgenommen und mit der gewünschten Querführungsinformation assoziiert werden. Die Kurvenfahrt wird hierdurch besser verstanden. Für den Fahrstreifenwechsel hingegen wankt die Variante ÜK zu stark bzw. häufig (Wertung: Fahrzeug schaukelt), was gegenüber horizontiertem Aufbau nachteilig ist (weniger verstanden, lieber eingegriffen, Fahrzeugbewegung weniger richtig). Im Vergleich zur Variante QKF bewirken die stärkeren Wankbewegungen keine verbesserte Informationsübertragung, sondern werden lediglich als stärker schaukelnd aufgefasst. Die Variante QKF kündigt den Fahrstreifenwechsel im Trend schwächer als Variante HO an, weist jedoch keinen Nachteil bei der Informationsübertragung auf (Eingriffswunsch, Verständlichkeit).

Hieraus ergeben sich folgende Schlüsse. Die Wankbewegungen werden wahrgenommen und mit der beabsichtigten Querführungsinformation assoziiert. Bei geeignetem Wankverlauf wird das Fahrzeug hierdurch besser verstanden. Stärkeres Wanken überträgt die Information nicht nachdrücklicher, sondern reduziert die Verständlichkeit. Wankt der Aufbau geringfügig, wird die Information nicht schwächer, sondern vermehrt durch die (Rest-)Querbeschleunigung übertragen (Extremfall: Variante HO). Dies ist im untersuchten Szenario (große Radien) bei alternativer Aufgabenübernahme ausreichend, jedoch zum Teil nicht optimal (Beispiel: Kurvenfahrt).

Rückmeldung durch die Lenkradstellung relativ zum Umfeld Die Informationsrückmeldung wird in den Paarvergleichen teils signifikant unterschiedlich bewertet. Die Frage, bei welcher Variante das Lenkrad besser der Fahrzeugbewegung folgt, wird hingegen bei

geringer Standardabweichung mit Mittelwerten nahe null bewertet. Somit ist anzunehmen, dass die Lenkradstellung relativ zum Umfeld keinen entscheidenden Teil zur Informationsrückmeldung beiträgt. Dementsprechend müssen die zugehörigen Kriterien, wie etwa die Ausrichtung des Lenkrads auf den *aim-point* (s. Abb. 4.2) bei der Festlegung des Wankverlaufs nicht berücksichtigt werden.

Fahrspaß und Fahrkomfort Die Frage nach dem Spaß beim Fahrstreifenwechsel wird in sämtlichen Paarvergleichen mit hoher Standardabweichung und Mittelwerten nahe null bewertet. Gleiches gilt für die Gegenüberstellung der gewankten Ausprägungen zur horizontalen Variante bei der Frage, welche Variante bei Fahrstreifenwechsel und Kurvenfahrt angenehmer ist. Dies sowie entsprechende Nachfragen bei Probanden deuten darauf hin, dass der ein Teil der Probanden die Querschleunigung und der andere die Wankbewegung als spaßfördernd und angenehm empfindet. Demzufolge gibt es keinen Wankverlauf, der in diesen Punkten für alle Probanden optimal ist.

Übergreifend wird die Variante ÜK beim Fahrstreifenwechsel als schaukelnd empfunden, was komfortmindernd ist. Ebenso wird empfunden, dass sie die Dynamik der Kurvenfahrt gegenüber horizontiertem Aufbau erhöht (*ging insgesamt schneller*), was zum Fahrspaß beitragen kann.

Gesamtsystem Es werden nur die Fahrzeugbewegungen der Variante ÜK beim Fahrstreifenwechsel als weniger richtig empfunden. Dies ist konsistent zur deren auch anderweitig schlechteren Bewertung.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Wirkung der Wankbewegung auf Fahrkomfort und Fahrspaß von der Vorliebe der Fahrer abhängt. Übergreifend wird empfunden, dass die Rückmeldung via Wanken bei geeignetem Wankverlauf die Querführung verständlicher macht. Die Fahrzeugbewegungen werden hierbei nicht als mehr oder weniger richtig im Vergleich zu einem horizontalen Aufbau erachtet.

Im Folgenden werden die Ergebnisse im Blick auf die Ausprägung QKF diskutiert.

Ist die Rückmeldung bei querkraftfreier Fahrt ausreichend? Die Probanden haben weder bei Kurvenfahrt noch beim Fahrstreifenwechsel die Querführung übernommen, was für die Akzeptanz der Variante QKF spricht. Zudem ergeben sich im Vergleich zur jeweils präferierten extremen Variante (Fahrstreifenwechsel: HO, Kurvenfahrt: ÜK) in keinem Aspekt signifikante Vor- oder Nachteile. Die Variante QKF scheint daher ein geeigneter Mittelweg. Somit wird Informationsübertragung der Variante QKF im untersuchten Szenario für Kurvenfahrt und Fahrstreifenwechsel als ausreichend erachtet.

Erlebt auch der Fahrer mit Variante QKF eine Komforterhöhung? Die Wankbewegungen der Variante QKF werden im Vergleich zu horizontiertem Aufbau bei Fahrstreifenwechsel und Kurvenfahrt nicht als schaukelnd empfunden, weshalb mögliche Bedenken unbegründet sind. Die Frage, ob Kurvenfahrt und Fahrstreifenwechsel angenehmer sind, wird mit Mittelwerten nahe null und hoher Standardabweichung beantwortet. Wie in Abschnitt *Fahrspaß und Fahrkomfort* diskutiert, scheint somit ein Teil der Fahrer die Variante QKF, ein anderer Teil den horizontierten Aufbau als komfortabler zu empfinden.

Wirken die Wankbewegungen der Variante QKF dem erwarteten Verlust an Fahrspaß entgegen? Der Spaß bei Kurvenfahrt und Fahrstreifenwechsel wird im Vergleich zu horizontiertem Aufbau mit Mittelwerten nahe null und hoher Standardabweichung bewertet. Wie in Abschnitt *Fahrspaß und Fahrkomfort* diskutiert, erhöht die Variante QKF somit vermutlich nur bei einem Teil der Fahrer den Fahrspaß. Im Mittel kann der infolge alternativer Aufgabenausführung erwartete Verlust somit nicht kompensiert werden.

Anzumerken ist, dass Fahrspaß lediglich im Verständnis als dynamisches Fahren, jedoch nicht in seiner Facette als müheloses *Gleiten* erfasst wurde (s. Abschnitt 2.2.3.2). Letzteres könnte durch die Neigetechnik verstärkt zum Tragen kommen (s. Abschnitt 2.4.2.1) und entsprechend zum Fahrspaß beitragen.

Ist die Variante QKF dem Fahrer zumutbar und das Konzept somit anwendbar? Eine positive Wirkung auf Fahrspaß und Komfort wäre wünschenswert, ist jedoch keine Voraussetzung, um dem Fahrer die Variante QKF zumuten zu können. Ausschlaggebend hierfür ist die Informationsübertragung, welche sich im untersuchten Szenario als ausreichend erwiesen hat. Zudem wird das Konzept von den Fahrern akzeptiert, da sie weder bei Kurvenfahrt noch beim Fahrstreifenwechsel die Querführung übernehmen.

Zusammenfassend wird die Variante QKF als dem Fahrer zumutbar und das Konzept als grundsätzlich anwendbar erachtet. Künftige Untersuchungen sollten die Gefahr einer erhöhten Längsgeschwindigkeit und die Reduktion des Situationsbewusstseins aufgrund der alternativ ausgeführten Querführung adressieren (s. Abschnitt 4.2.3).

6.2.2 Lane Departure Warning (LDW)

Das Konzept wird in Kapitel 4.1 erarbeitet und in Abschnitt 5.4.1.2 technisch umgesetzt. Die Studie validiert die potentiellen Vorteile einer LDW mittels Wankbewegung (s. Tabelle 4.2). Die Erkenntnisse erlauben Rückschlüsse, ob Handlungsaufforderungen bezüglich seitlicher Ereignisse möglich sind, was in die Bewertung der Eignung des Konzepts für warnende FAS einfließt. Die Eignung für vorausliegende Ereignisse wird anhand der Funktion FCA untersucht (s. Abschnitt 6.1.4).

Im Fokus des Versuchs stehen die folgenden Fragestellungen:

- *Ist die LDW mittels Wankbewegung intuitiv verständlich?*
- *Resultieren schreckhafte oder anderweitig ungewollte Fahrerreaktionen?*
- *Wird das Konzept als geeignet erachtet?*

6.2.2.1 Funktionsausprägungen

Die Funktion LDW wird ausgelöst, wenn sich das Fahrzeug bis auf 0,06 m der Fahrstreifengrenze genähert hat (Prinzip DLC, s. Abschnitt 5.4.1.2).

Variante Wankbewegung (WB) Die eingebrachte Wankbewegung ist identisch zu den Funktionen NI und FCA und wird in Abschnitt 6.1.3.1 vorgestellt. Analog zur Funktion FCA wird der Wankwinkel bis zum Auftreten einer Lenkradgeschwindigkeit von 35°/s in Richtung des *neuen* Fahrstreifens, jedoch maximal für 2,5 s gehalten.

Kontrollvariante Akustische Warnung durch Versuchsleiter (AKVL) Der Versuchsleiter weist den Probanden akustisch an, den Fahrstreifenwechsel abubrechen und im bisherigen Fahrstreifen zu bleiben. Die Variante dient als Richtwert, da die Informationsübertragung zwischen Versuchsleiter und Proband in den Untersuchungsschwerpunkten Verständlichkeit, ungewollte Fahrerreaktionen und empfundene Kontrollierbarkeit als optimal angesehen wird.

6.2.2.2 Versuchsablauf, Szenario, Studiendesign

Allgemeine Informationen zum Versuchsablauf werden zu Beginn des Abschnitts 6.2 gegeben. Die Funktion LDW wird nach den Funktionen LKA/tLCA auf der A 95 getestet, weshalb aktive Aufbaubewegungen bereits bekannt sind. Die Fahrt erfolgt mit 120 km/h bei manueller Längs- und Querführung.

Der Proband wird auf geradem Streckenabschnitt bei freiem Fahrzeugrückraum gebeten, den Fahrstreifen zu wechseln. Bei Annäherung an die Leitlinie wird mittels Variante AKVL gewarnt. Nach einer Weiterfahrt im bisherigen Fahrstreifen von ca. 5 s wird der Proband erneut gebeten, den Fahrstreifen zu wechseln. Nun wird mittels Variante WB gewarnt. Anschließend wird der Fragebogen vorgelesen und vom Probanden während der Fahrt beantwortet. Alle 36 Probanden durchfahren den Versuch wie zuvor beschrieben (*within-subjects design*). Die Richtung der Fahrstreifenwechsel wird nach Versuchsplan variiert.

6.2.2.3 Operationalisierung

Unerwünschte Fahrerreaktionen werden mittels der Fahrzeugdaten und -bewegung erfasst. Der im Vergleich zur Kontrollvariante empfundene Schreck wird mittels Paarvergleich erfasst ((-2) trifft voll für das 1. System zu bis (2) trifft voll für das 2. System zu). Zusätzlich wird die über das Fahrzeug empfundene Kontrolle auf einer 5-Punkte Skala von (1) trifft überhaupt nicht zu bis (5) trifft voll zu bewertet.

Die Verständlichkeit der Varianten wird ebenfalls auf dieser Skala erfasst. Mittels Paarvergleich wird bewertet, bei welcher Variante gefühlt schneller reagiert wird und bei welcher Variante das Lenkrad besser der Fahrzeugbewegung folgt.

Die Unterschiede in den separat bewerteten Aussagen werden statistisch mittels *Wilcoxon-Test* analysiert. In den Paarvergleichen deutet eine Abweichung des Mittelwerts von null auf die Bevorzugung einer Variante hin, was statistisch mittels *t-Test* analysiert wird. Der Wortlaut der bewerteten Aussagen ist im Abschnitt 6.2.2.4 zu finden.

6.2.2.4 Ergebnisse

Störeinfluss aufgrund eingeschränkter Funktionsumsetzung Die Wankbewegung wirkt sich auf das Lenkmoment und die Querführung aus (s. Tabelle 5.2). Um den Kurs zu halten, ist gemäß Abbildung 6.12 ein Korrekturlenkswinkel von bis zu $3,2^\circ$ einzubringen. Dies gilt

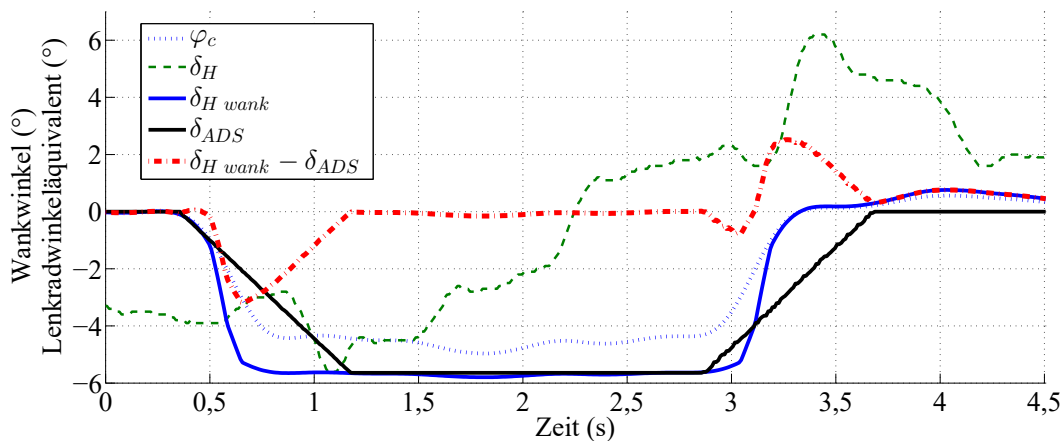


Abbildung 6.12: Einfluss der Wankbewegung auf die Querführung. Messdatenauszug eines Versuchsdurchgangs. Der Wankwinkel φ_c führt zum Lenkeffekt $\delta_{H\ wank}$, welcher mittels ADS (δ_{ADS}) kompensiert wird. Aufgrund deren Stellratenbegrenzung verbleibt $\delta_{H\ wank} - \delta_{ADS}$ und ist via Lenkrad (δ_H) einzubringen, um den Kurs zu halten

gemäß der Unterschiedsschwelle von $0,68^\circ$ bei einem Lenkwinkel von 4° [156] als wahrnehmbar. Unklar ist jedoch, ob diese Schwelle gültig ist, wenn der Fahrer gleichzeitig unter dem Eindruck des Wankwinkelsprungs steht. Die Einbringung des Korrekturverlaufs führt

maßgeblich zu den sinusförmigen Regelbewegungen in den Zeiträumen $0,75\text{ s} < t < 1,25\text{ s}$ und $3\text{ s} < t < 3,5\text{ s}$ (s. Abb. 6.12). Vermutlich trägt auch die Abstützung des Fahrers am Lenkrad während der hohen Wankbeschleunigung hierzu bei.

Anzumerken ist, dass die Überkompensation des Lenkeffekts bei $t = 3\text{ s}$ in der Optimierung des Systems für Sprünge *aus* der horizontalen Lage begründet ist. Da der Abbau des Wankwinkels nicht im Fokus der Untersuchung steht, sind diese systematischen Abweichungen kaum von Relevanz. Der Einfluss auf das Lenkmoment konnte aufgrund eines Messdatenfehlers nicht ausgewertet werden.

Verständlichkeit Die Variante WB wird von 15 der 36 Probanden unmittelbar *eher* oder *voll* verstanden. Die anderen geben auf Nachfrage an, einen Ruck wahrgenommen zu haben, diesen jedoch (trotz einwandfreier Straßenoberfläche) als Bodenunebenheit gedeutet oder nicht mit einer LDW assoziiert zu haben. Die Variante AKVL wird signifikant besser verstanden (im Median *voll* verständlich, s. Tabelle 6.10). Die Probanden geben an, mit Variante WB schneller reagiert zu haben (s. Tabelle 6.11). Das Lenkrad folgt der Fahrzeugbewegung mit Variante AKVL besser.

Tabelle 6.10: Ergebnisse der separat bewerteten Fragen. Signifikante Unterschiede sind grau hervorgehoben

Frage	Verteilung	Wilcoxon-Vorzeichenrangtest
Beim 1. Spurwechselversuch haben Sie sofort verstanden was der Versuchsleiter wollte.	<i>Min</i> = 1, <i>Max</i> = 5, <i>Mdn</i> = 5	<i>W</i> (36) = 289, <i>p</i> = .0002
Beim 2. Spurwechselversuch haben Sie sofort verstanden was das System wollte.	<i>Min</i> = 1, <i>Max</i> = 5, <i>Mdn</i> = 2,5	
Ich hatte das Auto beim 1. Spurwechselversuch unter Kontrolle.	<i>Min</i> = 4, <i>Max</i> = 5, <i>Mdn</i> = 5	<i>W</i> (36) = 195, <i>p</i> = .0002
Ich hatte das Auto beim 2. Spurwechselversuch unter Kontrolle.	<i>Min</i> = 2, <i>Max</i> = 5, <i>Mdn</i> = 4	

Tabelle 6.11: Ergebnisse der Paarvergleiche. Die signifikante Bevorzugung einer Variante ist grau hervorgehoben

Frage	AKVL vs. WB
Bei welchem Spurwechselversuch sind Sie mehr erschrocken?	<i>M</i> = 1,56, <i>SD</i> = 1,05 <i>t</i> (<i>N</i> = 36) = 8.85, <i>p</i> < .0001
Bei welchem Spurwechselversuch haben Sie schneller reagiert?	<i>M</i> = 0,64, <i>SD</i> = 1,74 <i>t</i> (<i>N</i> = 36) = 2.20, <i>p</i> = .0345
Bei welchem Spurwechselversuch folgte das Lenkrad der Bewegung des Fahrzeugs besser?	<i>M</i> = -0,72, <i>SD</i> = 1,34 <i>t</i> (<i>N</i> = 36) = 3.22, <i>p</i> = .0027

Schreckhafte oder ungewollte Fahrerreaktionen In keinem Fall treten schreckhafte oder ungewollte Fahrerreaktionen auf. Die Probanden erschrecken sich mit Variante WB deutlich stärker (s. Tabelle 6.11). 75% der Probanden haben das Fahrzeug hierbei gefühlt *eher oder voll* unter Kontrolle, was signifikant weniger als mit Variante AKVL sind (im Median *voll* unter Kontrolle, s. Tabelle 6.10).

6.2.2.5 Diskussion

Die der Variante *Akustische Warnung durch Versuchsleiter (AKVL)* zugrundeliegende Annahme, dass die Informationsübertragung zwischen Versuchsleiter und Fahrer optimal ist, wird durch die Versuchsergebnisse bekräftigt (im Median *voll* verständlich, Fahrzeug gefühlt *voll* unter Kontrolle).

Ist die LDW mittels Wankbewegung intuitiv verständlich? Die Wankbewegung wird stets wahrgenommen, jedoch nur von 42% der Probanden intuitiv als LDW verstanden. Dies sind signifikant weniger als bei optimaler Informationsübertragung (Variante AKVL: 86%) und weniger als in heutigen Systemen (Beispiel [190]: 50% mit richtiger Reaktion nach Warnung via Lenkradvibration und -moment). Das Konzept wird daher als wenig intuitiv erachtet.

Resultieren schreckhafte oder anderweitig ungewollte Fahrerreaktionen? Im Vergleich zur optimalen Informationsübertragung durch die Variante AKVL erschrecken sich die Fahrer mehr und haben das Fahrzeug gefühlt weniger unter Kontrolle (75% in Variante *Wankbewegung (WB)*, 100% in Variante AKVL). Da hieraus keine unerwünschten Reaktionen resultieren und warnende Systeme nur selten aktiv sind, wird beides als akzeptabel erachtet.

Wird das Konzept als geeignet erachtet? Vorteilhaft gegenüber manch aktuellem System ist, dass die LDW mittels Wankbewegung keine unerwünschten Fahrerreaktionen hervorruft (Beispiel [190]: 50% der Probanden mit richtiger, 50% mit falscher Lenkbewegung nach Warnung via Lenkradvibration und -moment). Dies ist jedoch noch für unbeabsichtigtes Verlassen des Fahrstreifens zu validieren (hier: Falschauslösung). Vorteilhaft ist auch, dass gefühlt schnell reagiert wird. Eine abschließende Bewertung der Reaktionszeit, des empfundenen Schrecks und der Kontrollierbarkeit ist weiteren Versuchen vorbehalten, da keine Vergleichswerte bestehender LDW-Systeme vorliegen. Der entscheidende Nachteil des Konzepts liegt in der geringen intuitiven Verständlichkeit, was insbesondere für warnende Systeme ungünstig ist, da diese zum Teil selten aktiv und daher womöglich nicht vertraut sind, jedoch trotzdem eine schnelle Fahrerreaktion erwirken sollen.

Insgesamt ergibt sich kein eindeutiges Urteil im Vergleich zum exemplarisch gewählten bestehenden System aus [190]. Stattdessen ist die geringere Verständlichkeit der LDW mit-

tels Wankbewegung gegen das Auftreten unerwünschter Fahrerreaktionen beim Vergleichssystem abzuwägen.

Anzumerken ist, dass die Störeinflüsse auf das Lenkmoment und die Querführung womöglich wahrgenommen wurden. Aufgrund der niedrigen Größenordnung ist jedoch von geringem Einfluss auf die Versuchsergebnisse auszugehen.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Der Wettlauf um das fahrerlose Fahren ist sehr präsent, jedoch werden auch weiterhin FAS zum Einsatz kommen. Eine weitere Verbesserung der Informationsübertragung vom FAS zum Fahrer sowie der gegenwärtige Bedarf eines Rückmeldekonzepts, welches technische Neuerungen, wie etwa vom Lenkrad entkoppelte FAS-Eingriffe ermöglichen würde, motivieren zur vorliegenden Arbeit. Untersucht wird, ob FAS der Fahrzeugquerführung mittels gezielt eingebrachter Wankbewegungen Informationen an den Fahrer übertragen können. Der Freiheitsgrad *Wanken* wird hierbei erstmals gestalterisch als primärer Informationsträger genutzt. Das Konzept wird theoretisch evaluiert und für informierende und warnende FAS sowie zur Rückmeldung entkoppelter FAS-Eingriffe in kontinuierlich automatisierenden FAS ausgestaltet. Um die technische Machbarkeit abzuschätzen, werden seriennahe Implementierungskonzepte erarbeitet und prototypisch umgesetzt. Exemplarische FAS werden in Studien mit Probanden (keine Experten) untersucht, um die theoretischen Überlegungen zu validieren. Zusammenfassend ergeben sich folgende Erkenntnisse im Blick auf die eingangs gestellten Forschungsfragen.

Können Informationen mit informierendem und warnendem Charakter übermittelt und bestehende Schwächen hierdurch kompensiert werden? Es werden drei exemplarische FAS untersucht. Zur Informationsübertragung wird ein Wankwinkelsprung eingebracht. Dieser soll *Aufmerksamkeit erregen* und die *Richtungsinformation übertragen*. Die Maximalwerte des Wankverlaufs betragen 4° , $16^\circ/\text{s}$ und $125^\circ/\text{s}^2$.

- ***Funktion Navigation Instruction***

Untersucht werden Navigationshinweise im Kreisverkehr. Im ersten Kreisverkehr folgen 53%, im vierten 97% der Probanden dem Hinweis zur Ausfahrt. Die intuitive Verständlichkeit ist somit eingeschränkt, der Hinweis jedoch schnell erlernbar. Da für Navigationssysteme Systemvertrautheit vorausgesetzt werden darf und sich mögliche Bedenken nicht bestätigten (keine unerwünschte Fahrerreaktion, nicht schaukelnd/störend), ist das Konzept potentiell geeignet. Für eine abschließende Aussage sind unerwartete Hinweise und Szenarien mit mehreren Fahrtrichtungen zu untersuchen. Möglicher Diskomfort für die Mitfahrer könnte durch eine weniger dynamische

Wankbewegung und durch die Nutzung innerhalb einer Kaskade gemindert werden. Beispielsweise könnte der Navigationshinweis zunächst rein *visuell*, dann *akustisch*, dann via *Wankbewegung* übertragen werden.

- Funktion *Front Collision Avoidance*

Untersucht wird ein Ausweichmanöver bei 50 km/h, mit geringer *Time-to-Collision*, kleinem Querversatz sowie visuell und kognitiv abgelenktem Fahrer. Der untersuchte Wankwinkelsprung wird nur von 33% der Probanden wahrgenommen. Im Vergleich zur Fahrt ohne Empfehlung ändert sich weder das Brems-/Lenkverhalten noch das Kritikalitätsempfinden. Somit ist der Wankwinkelsprung als Ausweichempfehlung unwirksam.

- Funktion *Lane Departure Warning*

Der Fahrer wird bei Autobahnfahrt mit 120 km/h gebeten den Fahrstreifen zu wechseln. Die Warnung wird bei Annäherung an die Leitlinie ausgelöst. Es treten keine unerwünschten Fahrerreaktionen auf, was ein Vorteil gegenüber manch bestehendem System ist. Beispielsweise reagieren 50% der Probanden in [190] auf eine Warnung mittels Lenkradvibration und -moment mit einer richtigen Lenkbewegung, die anderen 50% reagieren hingegen mit einer falschen Lenkbewegung. Nachteilig an der Warnung mittels Wankwinkelsprung ist, dass diese nur für 42% der Probanden intuitiv verständlich ist. Somit ergibt der Vergleich zum exemplarischen System aus [190] kein eindeutiges Urteil, da der geringere Nutzen mit den Folgen einer möglichen Fehlreaktion abzuwägen ist.

Aus der eingeschränkten intuitiven Verständlichkeit ist zu schlussfolgern, dass ein Wankwinkelsprung zur Informationsübertragung in selten aktiven warnenden FAS von geringem Nutzen ist. Aufgrund der schnellen Erlernbarkeit kann er potentiell in häufig aktiven informierenden FAS eingesetzt werden. Fraglich ist, inwieweit die Schwächen bestehender Systeme kompensiert werden können, da diese insbesondere bei abgelenktem Fahrer zutage treten und auch der Wankwinkelsprung nur von einer Minderheit der visuell *und* kognitiv abgelenkten Fahrer wahrgenommen wird.

Für eine abschließende Aussage zum Nutzen des Konzepts für informierende und warnende FAS und zur Kompensation bestehender Schwächen sind weitere potentiell denkbare Wankbewegungen zu untersuchen. Im Fokus sollte die Wahrnehmbarkeit bei abgelenktem Fahrer und die intuitive Verständlichkeit der Wankbewegung stehen.

Können vom Lenkrad entkoppelte FAS-Eingriffe rückgemeldet und deren Vorteile hierdurch erschlossen werden? Große, lang andauernde vom Lenkrad entkoppelte FAS-Eingriffe, welche simultan zur Fahrereingabe erfolgen und eine Kursänderung zum Ziel haben, sind

mangels geeigneter Rückmeldung bisher nicht möglich. Exemplarisch für dieses Eingriffsspektrum werden die Funktionen *Lane Keeping Assistant* und *triggered Lane Change Assistant* betrachtet. Es werden zwei vielversprechende Varianten dieser Funktionen konzipiert und mit 120 km/h auf der Autobahn untersucht.

- Variante 1: *Variable Aufgabenübernahme*

Diese Variante fokussiert die *gemeinsame Querführung* durch Fahrer und FAS. Beide Akteure besitzen einen separaten Durchgriff auf die Stabilisierungsebene. Dem Fahrer steht es frei, ob und wie stark er sich an der Querführung beteiligt, weshalb die Aufgabenübernahme als *variabel* bezeichnet wird. Die Rückmeldung via Wankbewegung erfolgt in Höhe des Lenkradwinkeläquivalents des FAS-Eingriffs. Für den Fahrer ist die Struktur als Fahrt entlang eines *wannenförmigen* Fahrstreifens erlebbar.

Das Rückmeldekonzept ist intuitiv verständlich. Es kann die Information mit unterschiedlichem Nachdruck vermitteln und ist einfach übersteuerbar. Die gemeinsame Querführung ist bei zum Teil besserer Leistung des Fahrer-Fahrzeug-Gesamtsystems weniger beanspruchend und weniger bevormundend als im etablierten Konzept mit Funktionsprinzip *Lenkmomentenüberlagerung*. Die Fahrt wird von Fahrer und Passagier im Fond positiv erlebt. Bestehende Schwächen, wie zum Beispiel Fahrerbevormundung werden vermieden und Vorteile, wie etwa die Möglichkeit zur Assistenz bei Sekundenschlaf erschlossen. Für ein abschließendes Urteil sind unerwartete und hochdynamische FAS-Eingriffe zu untersuchen und die optimalen Ausprägungen beider Konzepte gegenüberzustellen. Dies umfasst den Einbezug kooperativer Ansätze sowie die Optimierung der Wankbewegung.

- Variante 2: *Alternative Aufgabenübernahme*

Diese Variante fokussiert die *Mitfahrer*, was zum Beispiel für Chauffeurslimousinen relevant ist. Das System wirkt auf die Mitfahrer identisch zum Neigetechnikkonzept für Hoch-/Vollautomation aus [13]. Kennzeichnend ist die vollständige Kompensation der Querbeschleunigung durch die Fahrzeugquerneigung. Vorteile wie etwa die Erhöhung von Fahrkomfort und Konditionssicherheit, die Erleichterung von Nebentätigkeiten und die höhere Performanz bei visuell-räumlicher Aufgabenbearbeitung können so bereits mit einem *Assistenzsystem* erschlossen werden. Zudem werden FAS-Eingriffe möglich, die von den Mitfahrern weitgehend unbemerkt bleiben.

Voraussetzung ist, dass der Fahrer keine Lenkeingaben einbringt, weshalb eine alternative Aufgabenübernahme gewählt wird. Hierbei führt das FAS die Querführung aus, der Fahrer überwacht dies und übernimmt, wenn notwendig. Die Fahrt erfolgt *hands-on* mit in Mittenstellung blockiertem Lenkrad. Ein neuartiger Algorithmus schlüsselt den Lenkmomentenverlauf nach Verursacher (Fahrer/FAS) auf und quantifiziert den jeweiligen Momentenaufbau/-abbau, was zur Erkennung eines Übernahmewunsches

dienen kann. Die Beschränkungen der Automatisierungsstufe *Assistenzsystem* erfordern es, dass die Längsführung beispielsweise manuell ausgeführt wird.

Die Fahrer akzeptieren die Kombination aus alternativ ausgeführter Querführung und manueller Längsführung. Zudem empfinden sie die Rückmeldung der entkoppelten FAS-Eingriffe via Wankbewegung trotz des Wegfalls der Komponente Querbesehleunigung als ausreichend. Das Konzept ist für den Fahrer nicht sinnvoll, jedoch scheint es ihm zumutbar. Somit ist diese Variante nur ratsam, wenn die Interessen der Mitfahrer im Vordergrund stehen. Künftige Untersuchungen sollten die Gefahr einer erhöhten Fahrzeuggeschwindigkeit und eine mögliche Reduktion des Situationsbewusstseins aufgrund der alternativ ausgeführten Querführung adressieren.

Zusammenfassend werden entkoppelte FAS-Eingriffe durch Wankbewegungen intuitiv verständlich rückgemeldet. Dies erlaubt es erstmals, deren Vorteile auch für gemeinsame Querführung zu erschließen. Bei alternativer Aufgabenübernahme und Fahrt *hands-on* erleichtert die Entkopplung die technische Umsetzung, da der Einfluss der Fahrerhände bei stillstehendem Lenkrad einfacher zu unterbinden ist.

Anzumerken ist, dass die Vorteile der Varianten nicht vereinbar sind. Die Kompensation der Querbesehleunigung nach [13] erfordert eine vorausseilende und in der Wankrate begrenzte Herstellung des querkraftfreien Zustands, was ohne Beeinflussung des Lenkgefühls im engeren Sinne nicht möglich ist. Zudem reagiert das Rückmeldekonzept der *variablen Aufgabenübernahme* gegensätzlich. Gemäß der Metapher des *wannenförmigen Fahrstreifens* führt eine Lenkeingabe das Fahrzeug an die Seitenwand der Wanne und somit zu einer Wankbewegung, welche die Querbesehleunigung infolge der Lenkeingabe nicht kompensiert, sondern erhöht.

Erscheint eine Nutzung in Serienfahrzeugen denkbar? Die Einbringung von Wankbewegungen wirkt sich auf zahlreiche Fahrzeugbereiche aus. Genannt seien die geänderte Ausrichtung der Umfeldsensoren, der Scheinwerferkegel und der Sichtbereiche. Um eine erste Einschätzung zu ermöglichen, werden ausgewählte zentrale Themen im Blick auf die exemplarischen FAS und das genutzte Versuchsfahrzeug erörtert.

- *Sensorik und Aktorik*

Die Funktionen *Lane Departure Warning*, *Lane Keeping Assistant* und *triggered Lane Change Assistant* sowie die Varianten mit variabler und alternativer Aufgabenübernahme werden mit in Serie befindlicher Sensorik und Aktorik umgesetzt und unter realen Bedingungen, respektive auf der Autobahn mit 120 km/h im geschlossenen Kreis mit der Umfeldwahrnehmung untersucht.

- *Fahrverhalten*

Die Fahrversuche *stationäre Kreisfahrt* und *doppelter Fahrstreifenwechsel* belegen, dass durch geeignete Radlastverteilung auch mit serienmäßiger Achskinematik ein fahrdynamisch stabiles und einem Serienfahrzeug ähnliches Fahrverhalten erzielt werden kann.

- *Lenkeffekt infolge Wankens*

Der Lenkeffekt basiert unter anderem auf Änderungen der Radstellung beim Einfedern und wirkt entkoppelt vom Lenkrad in Richtung der Wankbewegung. In informierenden und warnenden FAS ist dies zu unterbinden. Eine diagonale Verspannung des Fahrwerks erweist sich hierzu als nicht ausreichend, weshalb ein weiterer entkoppelter Lenkaktor benötigt wird. In den Funktionen *Lane Keeping Assistant* und *triggered Lane Change Assistant* wird der Lenkeffekt erstmals gezielt genutzt, um eine Gierwirkung zu erzeugen. Er bringt die entkoppelten FAS-Eingriffe ein und ist geeignet, um deren Vorteile zu erschließen. Das Potential ist ausreichend um Fahrstreifenwechsel und kurvenreiche Autobahnabschnitte zu durchfahren. Die Wankbewegung eilt dem Lenkeffekt um 0,1 s voraus, was als komfortoptimal gilt [13]. Nachteilig hingegen ist die Kopplung von Wankbewegung und Lenkeffekt. Diese könnte durch diagonale Fahrwerksverspannung beeinflusst werden, sodass hierzu kein entkoppelter Lenkaktor erforderlich wäre.

Zusammenfassend scheint es nicht ausgeschlossen, das Konzept mit der bestehenden Sensorik, Aktorik und Achskinematik umsetzen zu können. Entscheidende Bedeutung kommt der diagonalen Fahrwerksverspannung zu. Ist diese ausreichend, würde weder für informierende und warnende FAS noch für die Vorteile entkoppelter FAS-Eingriffe ein entkoppelter Lenkaktor benötigt. Trotz des mutmaßlich hohen Aufwands zeigt die Kurvenneigefunktion des *Mercedes-Benz S-Klasse Coupés* [4], dass Wankwinkel bis $2,65^\circ$ [86] bereits technisch und wirtschaftlich möglich sind. Für die Umsetzbarkeit in Serienfahrzeugen maßgebend und daher zu ermitteln, ist die im jeweiligen Anwendungsfall mindestens erforderliche Wankbewegung.

Ist das Konzept zur Informationsübertragung in FAS geeignet? Die Eignung zur Informationsübertragung wird anhand ausgewählter Anforderungen an FAS-Anzeigen zusammengefasst.

- *Wahrnehmbarkeit*

Wankbewegungen werden multimodal übertragen, was hohe Leistung bei der Informationsaufnahme verspricht. Sie sind im Sichtfeld vor dem Fahrzeug ohne Blickabwendung von der Straße wahrnehmbar. Haptisch und vestibulär sind sie unabhängig von

Blickrichtung und Umgebungsgeräuschen wahrnehmbar. Die vestibulären Reize können dauerhaft aufrechterhalten werden, da die Erzeugung keiner Kursänderung bedarf. Die Informationsaufnahme ist situativ anpassbar. So kann für ad-hoc-Informationen eine ähnlich kurze Detektionszeit wie bei haptischer Übertragung via Lenkrad erzielt werden, ohne das Lenkgefühl im engeren Sinne zu beeinträchtigen.

Der diskret eingebrachte Wankwinkelsprung, welcher die Querführung nur unwesentlich beeinflusst, wird außer von visuell *und* kognitiv abgelenkten Fahrern stets wahrgenommen. Die kontinuierlich eingebrachten Wankbewegungen, welche weniger dynamisch und stets an einen Querführungseingriff gekoppelt sind, werden ebenfalls wahrgenommen.

- *Signal-Rausch-Abstand*

Die Wankbewegungen werden entgegengesetzt zum reaktiven Wanken infolge der Zentrifugalbeschleunigung und zum Teil mit stark unterschiedlicher Amplitude eingebracht. Die Umsetzung gewährleistet ein reaktives Wankverhalten ähnlich dem von Serienfahrzeugen, um den bisherigen Informationsfluss erwartungskonform zu erhalten. Eine Verwechslung oder gegenseitige Beeinträchtigung wurde nicht festgestellt. Dies ist gegenüber der Informationsübertragung mittels additivem Lenkmoment von Vorteil.

- *Verständlichkeit*

Der diskret eingebrachte Wankwinkelsprung, welcher die Querführung nur unwesentlich beeinflusst, wird von ca. 50% der Fahrer trotz einwandfreier Straßenoberfläche als Bodenunebenheit gedeutet. Intuitiv ist die Wankbewegung somit wenig verständlich, jedoch ist sie schnell erlernbar. Die kontinuierlichen Wankbewegungen, welche an Querführungseingriffe gekoppelt sind, werden intuitiv als Rückmeldung dieser Eingriffe verstanden. Dies gilt auch für die Fahrt mit vollständig kompensierter Querschleunigung.

Ursächlich für die höhere intuitive Verständlichkeit könnte die Kopplung an die Querführungseingriffe sein, wodurch die Rückmeldung als Fahrt entlang eines *wannenförmigen* Fahrstreifens erlebbar wird. Ebenso könnte die *geringere* Dynamik der Wankbewegungen ursächlich sein. So setzt ein zu starkes Wanken auch in den kontinuierlich automatisierenden FAS die Verständlichkeit herab und wird als schaukelnd empfunden.

- *Unerwünschte oder schreckhafte Fahrerreaktionen*

Die Fahrer haben sich beim Wankwinkelsprung auf der Autobahn im Vergleich zur akustischen Warnung durch den Versuchsleiter mehr erschrocken und hatten das Fahrzeug gefühlt weniger unter Kontrolle. Keine der untersuchten Wankbewegungen führte

jedoch zu unerwünschten Reaktionen. Zudem wird die Fahrverantwortung weiterhin als beim Fahrer liegend gesehen. Beides ist vorteilhaft gegenüber der Informationsübertragung via additivem Lenkmoment.

- *Diskomfort*

Der Wankwinkelsprung wird vom Fahrer bei niedriger Geschwindigkeit als nicht störend empfunden, jedoch erschreckt er ihn bei 120 km/h. Die kontinuierlichen Wankbewegungen in Verbindung mit Querführungseingriffen werden von Fahrer und Passagier im Fond als nicht störend empfunden. Die vollständige Querkraftkompensation erhöht den Komfort für die Mitfahrer, wird jedoch nur von einem Teil der Fahrer gegenüber horizontiertem Aufbau als angenehmer empfunden. Die Entkopplung der FAS-Eingriffe führt zu einem ruhigeren und ausgeglicheneren Kurs, was zum Komfort beiträgt. In keinem Fall gab es Anzeichen von Kinetose.

Zusammenfassend erfüllt die Rückmeldung entkoppelter FAS-Eingriffe via Wankbewegung in kontinuierlich automatisierenden FAS die Anforderungen an FAS-Anzeigen. Für eine Nutzung des Konzepts in informierenden FAS wäre es vorteilhaft auch visuell *und* kognitiv abgelenkte Fahrer erreichen zu können. Für warnende FAS müsste die Wankbewegung zudem intuitiv verständlich sein. Die Einschätzungen zur Umsetzbarkeit in Serienfahrzeugen zeigen, dass das Konzept bereits für gegenwärtige Entwicklungen von unmittelbarer Relevanz ist.

Abschließend sei auf das Potential für höhere Automatisierungsstufen hingewiesen. Bei Teilautomation sind aktive Nickbewegungen geeignet um Systemzustände rückzumelden [31, 32, 33]. Bei Hoch- und Vollautomation entfällt das Lenkrad als Informationsträger, da die Fahrt *hands-off* erfolgt, das Lenkrad stillsteht oder nicht mehr vorhanden ist. Die Wünsche nach Informationen über den Fahrzustand und nach Fahrkomfort bleiben hingegen bestehen [108]. Beide könnten mittels aktiver Aufbaubewegungen adressiert werden.

A. Ergänzungen zum Querregler

Im Folgenden werden die Berechnungsvorschriften hergeleitet, um die Eingangsgrößen *Gierwinkeldifferenz* Ψ_{Diff}^* und *Querablage* d_y^* des Querreglers zu extrapolieren. Die Ausführungen ergänzen das Kapitel 5.2.1.

Um den Zeitverzug der unterlagerten Regler zu kompensieren (LWR: $T_{LWR} = 0,47$ s, Konzept *Regelung*: $T_{KR} = 0,4$ s), werden die Eingangsgrößen des Querreglers um T_{LWR} bzw. T_{KR} extrapoliert. Hierbei sind die aktuellen Bewegungsgrößen des Fahrzeugs (Gierrate ω_z , Geschwindigkeit v , Radius der Fahrzeugbewegung R bzw. der Bahn des Fahrzeugs R_P), dessen Relativposition im eigenen Fahrstreifen (Querablage d_y , Gierwinkeldifferenz Ψ_{Diff}) sowie der Krümmungsverlauf der Soll-Bahn miteinzubeziehen (Krümmung c_0 , Krümmungsänderung c_1). Da sich die Latenz T_{KAM} der Daten der Frontkamera von denjenigen der anderen Messdaten unterscheidet, wird diese separat berücksichtigt. Die Zeit T_{prevQR} bezeichnet die Zeitspanne, um die extrapoliert wird, wobei extrapolierte Größen mit einem '*' gekennzeichnet sind. Zur einfacheren Lesbarkeit werden häufig auftretende Terme zusammengefasst (s. Gleichungen A.1, A.2). Zur Vereinfachung wird die Längsbeschleunigung des Fahrzeugs vernachlässigt (s. Gleichung A.2).

$$T_{prev} = T_{KAM} + T_{prevQR} \quad (A.1)$$

$$D_{prev} = v \cdot T_{prev} \quad (A.2)$$

Die Gierbeschleunigung wird bei der Extrapolation vernachlässigt (ω_z konstant), weswegen im Prädiktionszeitraum T_{prev} eine Kreisbahn durchfahren wird (s. Abbildung A.1). Der Einfluss der Gierrate auf die extrapolierte Gierwinkeldifferenz (fortan: $\Psi_{Diff \omega_z}^*$) beträgt somit:

$$\Psi_{Diff \omega_z}^* = \alpha = \omega_z \cdot T_{prev} \quad (\alpha \text{ in Abb. A.1}) \quad (A.3)$$

Der Einfluss der klothoidischen Bahnkrümmung auf die extrapolierte Gierwinkeldifferenz (fortan: $\Psi_{Diff c}^*$) ist in Gleichung A.4 angegeben (Bahnlänge l).

$$\Psi_{Diff c}^* = \int_0^{D_{prev}} c_0 + c_1 \cdot l \, dl = c_0 \cdot D_{prev} + 0,5 \cdot c_1 \cdot D_{prev}^2 \quad (A.4)$$

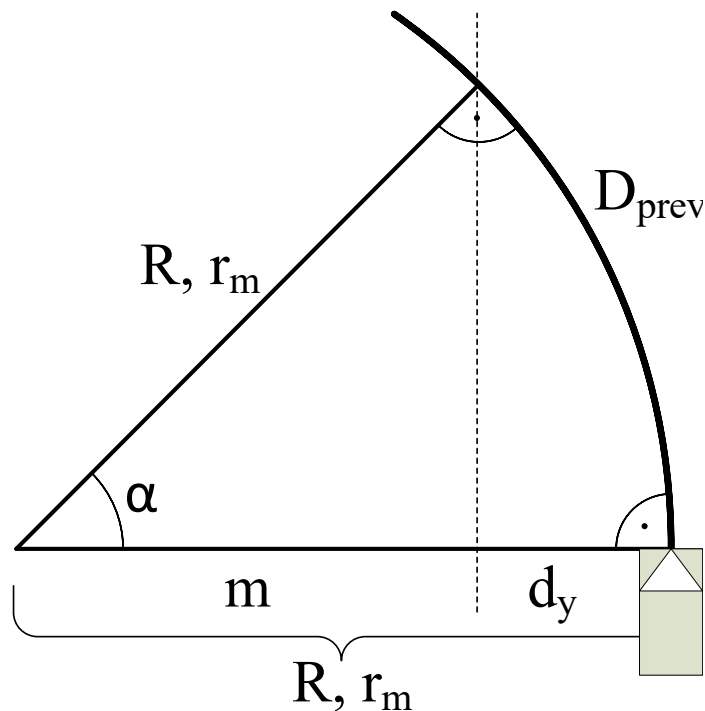


Abbildung A.1: Geometrische Betrachtung zur Extrapolation der aktuellen Querablage

Unter Berücksichtigung sämtlicher Teilaspekte wird die extrapolierte Gierwinkeldifferenz Ψ_{Diff}^* gemäß Gleichung A.5 berechnet.

$$\Psi_{Diff}^* = \Psi_{Diff} + \Psi_{Diff \omega_z}^* - \Psi_{Diff c}^* \quad (\text{A.5})$$

Zur Berechnung des Einflusses der Gierrate auf die Extrapolation der Querablage (fortan: $d_{y \omega_z}^*$) wird vereinfachend von einem stationären Gleichgewichtszustand des Fahrzeugs ausgegangen, weshalb der Radius der Fahrzeugbewegung R sowie derjenige der Fahrzeugbahnkurve R_p identisch sind [40]:

$$\frac{v}{\omega_Z} = R = R_p = \frac{1}{\kappa} \quad (\text{A.6})$$

$$(\text{A.7})$$

Unter Einbezug von Gleichung A.3 und Abbildung A.1 gilt:

$$m = R \cdot \cos(\alpha) \quad (\text{A.8})$$

$$d_{y \omega_z}^* = R - m = R(1 - \cos(\alpha)) = \frac{v}{\omega_Z} \cdot (1 - \cos(\omega_Z \cdot T_{prev})) \quad (\text{A.9})$$

Zur Berechnung des Einflusses der Bahnkrümmung auf die Extrapolation der Querablage (fortan: $d_{y c}^*$) wird vereinfachend angenommen, dass die Krümmung über die präzidierte Bahnlänge D_{prev} konstant bleibt. Als Krümmung (fortan: c_m) wird der Mittelwert der

Bahnkrümmungen zu Beginn und Ende der prädierten Bahnlänge D_{prev} gewählt (s. Gleichung A.10).

$$c_m = c_0 + c_1 \cdot (0,5 \cdot D_{prev}) \quad (\text{A.10})$$

Hierdurch wird eine Kreisbahn modelliert, weshalb Abbildung A.1 auch für diesem Fall gültig ist. Unter Einbezug von

$$c_m = \frac{1}{r_m} \quad (\text{A.11})$$

und der geometrischen Beziehungen aus Abbildung A.1 gilt:

$$\alpha = c_m \cdot D_{prev} \quad (\text{Kreisbogen}) \quad (\text{A.12})$$

$$m = r_m \cdot \cos(\alpha) \quad (\text{A.13})$$

$$d_{yc}^* = r_m - m = r_m \cdot (1 - \cos(\alpha)) = \frac{1 - \cos(c_0 \cdot D_{prev} + 0,5 \cdot c_1 \cdot D_{prev}^2)}{c_0 + 0,5 \cdot c_1 \cdot D_{prev}} \quad (\text{A.14})$$


Unter Berücksichtigung aller Teilaspekte resultiert somit für die extrapolierte Querablage d_y^* :

$$d_y^* = d_y - \sin(\Psi_{Diff}) \cdot D_{prev} - d_{y\omega z}^* + d_{yc}^* \quad (\text{A.15})$$

B. Fragebögen der Probandenstudien

B.1 Studie 1

B.1.1 Allgemeines (*Demographische Daten, Vorkenntnisse, Abschließende Fragen*)

<u>Instruktion Versuchsperson (Fahrer & Beifahrer)</u>	Fahrer: Beifahrer:
Institut für Arbeitswissenschaft, Universität der Bundeswehr, München	

Lieber Versuchsteilnehmer, liebe Versuchsteilnehmerin,

herzlichen Dank für Ihre Bereitschaft, uns bei diesem Forschungsprojekt zu unterstützen! Mit Ihrer Teilnahme helfen Sie uns, zukünftige Autos noch komfortabler und sicherer zu machen.

Bei dieser Studie geht es um einen Vergleich verschiedener Fahrerassistenzsysteme. Dieses Fahrzeug

- hilft Ihnen die momentane Spur einzuhalten.
- kann Ihnen helfen die Spur zu wechseln falls sie frei ist.

Sie sollen diese Unterstützungen unter realen Verkehrs-Bedingungen auf Autobahnen und Landstraßen erleben und mehrfach durch Vergabe von Noten bewerten. Der mitfahrende Versuchsleiter wird Ihnen im passenden Moment dazu Fragen stellen. Bei der Beantwortung dieser Fragen geht es um Ihre spontane Einschätzung. Am Ende jeder Fahrt werden Sie noch Fragebogen zur letzten Fahrt ausfüllen.

Zusätzlich werden technischen Daten des Fahrzeugs, ein Videobild der Verkehrssituation und ein Portraitvideo aufgezeichnet. Die gesammelten Daten werden zur weiteren Auswertung auf Datenträgern gespeichert. Ihre persönlichen Daten werden nicht mit den technischen Daten verknüpft und werden vor einer statistischen Auswertung gelöscht. Eine Weitergabe an Dritte findet nicht statt.

Der Versuch gliedert sich in folgende Abschnitte:

1. Fragebogen, Erklärungen ausfüllen
2. Einweisung in das Versuchsfahrzeug im Stand
3. Eingewöhnungsfahrt auf unserem Testgelände
4. Fahrt quer durch München zur A96 (Lindau) bis Buchloe
5. Fragebogen ausfüllen
6. Rückfahrt bis München und weiter zum Testgelände der UniBw
7. Fragebogen ausfüllen
8. Testfahrten auf dem Testgelände
9. Abschlussfragebogen, Verabschiedung

Der Versuch wird ca.3 Stunden dauern.

Fahrer:

Bitte beachten Sie, dass Sie während der Fahrt stets der verantwortliche Fahrzeugführer sind. Beachten Sie alle Verkehrsvorschriften. Wir testen bei diesem Versuch nicht Ihr fahrerisches Können. Aber uns interessiert Ihr persönlicher Umgang mit diesem Fahrzeug. Wir bitten Sie, sich wie mit Ihrem privaten Auto zu verhalten und auch so – unter Beachtung der Verkehrsregeln – zu fahren.

Beifahrer:

Wir bitten Sie sich wie ein Beifahrer(z.B. in einem Taxi) zu verhalten und den Fahrer nicht zu stören. Beschäftigen Sie sich mit Ihrem Laptop, Smartphone. Sie können auch lesen.

Beide:

Sie können jederzeit den Versuch abbrechen, wenn Sie denken, dass die Aufgaben Sie zu sehr beanspruchen. Durch einen Abbruch entstehen Ihnen keinerlei Nachteile.

Wir wünschen Ihnen ein gutes Gelingen!

Dipl.-Ing Christoph Müller
Prof. Dr. Michael Popp

<u>vor Versuchsbeginn</u>	Fahrer:	
Erklärung:	Beifahrer:	

Ich versichere hiermit, dass...

- ... ich eine gültige Fahrerlaubnis zum Führen des Pkw besitze und dabei habe.
- ... ich eine eventuell benötigte Sehhilfe dabei habe und auch benutze.
- ... ich mich gesundheitlich in einem **fahrtüchtigen Zustand** befinde.
- ... ich damit einverstanden bin, dass die Fahrdaten und Videobilder meiner Fahrt wissenschaftlich ausgewertet und in einer wissenschaftlichen Veröffentlichung verwendet werden dürfen, selbstverständlich ohne Nennung meines Namens.
- ... mir klar ist, dass es sich bei diesem Fahrzeug um einen **Prototypen** handelt. Ich verpflichte mich, **sehr sorgfältig mit dem Fahrzeug umzugehen**.
- ... ich mich an die **Verkehrsvorschriften** (z.B. Geschwindigkeitsbegrenzung) halte. **In jeder Fahrsituation bleibe ich verantwortlicher Fahrzeugführer.**

.....
Ort, Datum

.....
Unterschrift Versuchsteilnehmer

vor der Fahrt
Fragebogen:

Fahrer: _____
Beifahrer: _____

1. männlich weiblich
2. **Führerschein** (Pkw) seit Jahren
3. **Ich fahre regelmäßig** seit Jahren
4. **Jahreskilometer**-Leistung in den letzten 12 Monaten ca.km
5. **Gesamtkilometer-Leistung** ca.km
6. **Ich fahre momentan mit einem Pkw der Marke:**
7. **Mein Alter:** Jahre
8. **Mein Beruf:**
9. **Wie oft fahren Sie mit dem Auto?**
-
- (mehrmals/Woche) (2-3x/ Woche) (2-3x /Monat) (1x/Monat) (seltener)
10. **Wie oft fahren Sie mit dem Auto auf der Autobahn?**
-
- (mehrmals/Woche) (2-3x/ Woche) (2-3x /Monat) (1x/Monat) (seltener)
11. **Wie oft fahren Sie mit Automatik-Fahrzeugen?**
-
- immer oft gelegentlich selten nie

12. Sind Sie schon mit einem Fahrzeug mit Spurhalteassistent gefahren?

immer oft gelegentlich selten nie

13. Sind Sie schon mit einem Fahrzeug mit Spurwechselassistent gefahren?

immer oft gelegentlich selten nie

14. Haben Sie eigene Erfahrung mit ABS-Eingriffen?

immer oft gelegentlich selten nie

15. Haben Sie eigene Erfahrungen mit ESP Eingriffen?

immer oft gelegentlich selten nie

16. Wie bezeichnen Sie Ihre Fahrweise?

- sehr sportlich
- sportlich
- ausgewogen
- komfortbetont
- sehr komfortbetont

nach Versuchsende	Fahrer:	
äußere Umstände, Sonstiges:	Beifahrer:	

Versuchsleiter: Datum: _____ Beginn: _____

Fahrbahn ist trocken feucht nass

Wetter: sonnig bewölkt diesig Regen/Schnee

Einschätzung des Versuchsleiters nach der Fahrt:

Fahrstil des Fahrers:

ruppig sportlich ausgewogen zurückhaltend ängstlich

Zustand des Beifahrers:

entspannt ausgewogen angespannt

B.1.2 LKA / tLCA mit variabler Aufgabenübernahme

A 96, 80 km/h	Fahrer:	
tLCA, LKA	Beifahrer:	

Das Fahrzeug führte den Spurwechsel ohne Verzögerung aus.
trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Das Fahrzeug führte den Spurwechsel glatt und flüssig aus.
trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Die Fahrzeugbewegungen beim Spurwechsel erschienen mir richtig.
trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Zu Beginn des Spurwechsels gab es einen Ruck.
trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Im Verlauf des Spurwechsels gab es einen Ruck.
trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Am Ende des Spurwechsels gab es einen Ruck.
trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Das Fahrzeug schaukelte sich in die neue Spur hinein.
trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Das Einpendeln in die neue Spur ging schnell.
trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Die Spur „von Hand“ zu wechseln war schwierig.
trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Das Fahrzeug „wehrte“ sich gegen das Spurwechseln.
trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

A 96, 120 km/h	Fahrer:	
LKA	Beifahrer:	

Das Fahrzeug hielt die Spur immer genau ein.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Das Fahrzeug pendelte hin und her.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Das Fahrzeug fuhr zu nah am Rand der Spur.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Das Fahrzeug reagierte eher schwerfällig.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Ich musste beim Kurvenfahren eingreifen.

nein ja

In der Spur „von Hand“ zu Lenken war schwierig.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Das Fahrzeug „wehrte“ sich gegen bestimmte Lenkbewegungen.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

A 96, 120 km/h	Fahrer:	
tLCA, LKA	Beifahrer:	

Das Fahrzeug führte den Spurwechsel ohne Verzögerung aus.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Das Fahrzeug führte den Spurwechsel glatt und flüssig aus.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Die Fahrzeugbewegungen beim Spurwechsel erschienen mir richtig.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Zu Beginn des Spurwechsels gab es einen Ruck.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Im Verlauf des Spurwechsels gab es einen Ruck.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Am Ende des Spurwechsels gab es einen Ruck.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Das Fahrzeug schaukelte sich in die neue Spur hinein.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Das Einpendeln in die neue Spur ging schnell.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Die Spur „von Hand“ zu wechseln war schwierig.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Das Fahrzeug „wehrte“ sich gegen das Spurwechseln.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

<u>Anschließend im Stand</u>	Fahrer:	
nach jeder Fahrt (Reaktion, Kontrolle, Sicherheit):	Beifahrer:	

Das Fahrzeug reagierte unmittelbar auf mein Lenken.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Das Auto reagierte unmittelbar auf Kurven und Störungen.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Ich hatte Vertrauen in das System.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Der Fahrbahnkontakt war optimal.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Ich hatte das Auto in jeder Situation unter Kontrolle.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

<u>Anschließend im Stand</u>	Fahrer:	
nach jeder Fahrt (Anzeigen, ak. Signale):	Beifahrer:	

Die Anzeige für das aktive Spurhaltesystem habe ich gesehen.

nein weiß ich nicht mehr ja

Gab es einen Farbwechsel der Anzeige?

nein weiß ich nicht mehr ja

Welchen Wechsel haben Sie gesehen?.

Haben Sie einen Warnton gehört?

nein weiß ich nicht mehr ja mehrfach

Was haben Sie nach dem Farbwechsel getan?

<u>Anschließend im Stand</u>	Fahrer:	
Beifahrer:	Beifahrer:	

Die Fahrt war entspannend.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Die Fahrt war langweilig.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Die Fahrzeugbewegungen haben mich gestört.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Der Fahrer hatte das Auto in jeder Situation unter Kontrolle.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

B.1.3 Navigation Instruction

<u>Kreisverkehr 1+2 bzw. 3+4</u>	Fahrer:	
Kreisverkehr:	Beifahrer:	

Das Fahrzeug neigte sich zur Kurvenaußenseite.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Das Fahrzeug neigte sich zur Kurveninnenseite.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Die Neigungsbewegung begann sofort nach Einfahrt in den Kreisverkehr.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Das Fahrzeug schaukelte im Kreis hin und her.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Ich empfand das als störend.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Das Fahrzeug zeigte wo ich den Kreisverkehr verlassen sollte.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Dieser Hinweis war immer leicht verständlich.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

B.1.4 Front Collision Avoidance



VP-Nr. _____

Datum, Uhrzeit: _____

Sie haben eine kritische Verkehrssituation erlebt. Dabei hat ein quer zur Fahrbahn stehendes Fahrzeug die Vorfahrt missachtet und Ihnen teilweise den Weg blockiert.

1. Wie kritisch war die Situation?

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

1. Wie wollten Sie reagieren, als das Hindernis plötzlich erschien?

- Ich wollte das Hindernis ungebremst umfahren.
- Ich wollte vor dem Hindernis in den Stillstand bremsen.
- Ich wollte die Geschwindigkeit mindern und das Hindernis umfahren.

2. Wie hat Ihr Fahrzeug reagiert, als das Hindernis plötzlich erschien?



3. Hat die Fahrzeugreaktion Ihre Entscheidung beeinflusst?

Ja, auf folgende Weise:

Nein.

Kann ich nicht beurteilen.

4. Wie beurteilen Sie den Warn-/Eingriffszeitpunkt?

zu früh ○-----○-----○-----○-----○ zu spät



VP-Nr. _____

Datum, Uhrzeit: _____

Während der kritischen Verkehrssituation hat das Fahrzeug selbstständig in das Geschehen eingegriffen.

Wann haben Sie die aktive Neigungsbewegung bemerkt?

- Überhaupt nicht.
- Kurz nachdem ich das Hindernis entdeckt hatte.
- Kurz bevor ich das Hindernis entdeckt hatte.

In welche Richtung hat sich das Fahrzeug geneigt?

Welche Bedeutung hatte die Neigungsbewegung Ihrer Meinung nach?

Bitte beurteilen Sie die aktive Neigungsbewegung:

- | | | | | | | | | | | |
|-------------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|-----------------------|------------------|
| behindernd | <input type="radio"/> | ----- | <input type="radio"/> | ----- | <input type="radio"/> | ----- | <input type="radio"/> | ----- | <input type="radio"/> | unterstützend |
| gut spürbar | <input type="radio"/> | ----- | <input type="radio"/> | ----- | <input type="radio"/> | ----- | <input type="radio"/> | ----- | <input type="radio"/> | schlecht spürbar |
| verwirrend | <input type="radio"/> | ----- | <input type="radio"/> | ----- | <input type="radio"/> | ----- | <input type="radio"/> | ----- | <input type="radio"/> | gut verständlich |
| ungeeignet | <input type="radio"/> | ----- | <input type="radio"/> | ----- | <input type="radio"/> | ----- | <input type="radio"/> | ----- | <input type="radio"/> | gut geeignet |
| effektiv | <input type="radio"/> | ----- | <input type="radio"/> | ----- | <input type="radio"/> | ----- | <input type="radio"/> | ----- | <input type="radio"/> | ineffektiv |

Was würden Sie an der Neigungsbewegung ändern?



VP-Nr. _____

Datum, Uhrzeit: _____

Bitte beschreiben Sie Ihr Gefühl der Kontrolle über die Lenkung des Fahrzeugs während des Eingriffs:

- Mir wurde jegliche Kontrolle über die Lenkung weggenommen
- Meine Kontrolle über die Lenkung wurde stark beschnitten
- Meine Kontrolle über die Lenkung war leicht beeinträchtigt
- Ich hatte die uneingeschränkte Kontrolle über die Lenkung

Bitte beschreiben Sie Ihr Gefühl der Verantwortung über die Lenkung des Fahrzeugs während des Eingriffs:

- Ich musste nichts tun.
- Ich musste leicht korrigieren.
- Ich musste die Lenkbewegung weitestgehend selbst ausführen.
- Ich musste die Lenkbewegung vollständig selbst ausführen.

Meine Lenkbewegungen wurden unmittelbar umgesetzt.

Trifft überhaupt nicht zu -------------------- Trifft völlig zu

Die Lenkung fühlte sich verändert an.

Trifft überhaupt nicht zu -------------------- Trifft völlig zu

B.2 Studie 2

B.2.1 Allgemeines (*Demographische Daten, Vorkenntnisse, Abschließende Fragen*)

<u>Instruktion Versuchsperson (Fahrer)</u>	Fahrer:	
Institut für Arbeitswissenschaft, Universität der Bundeswehr, München		

Lieber Versuchsteilnehmer, liebe Versuchsteilnehmerin,

herzlichen Dank für Ihre Bereitschaft, uns bei diesem Forschungsprojekt zu unterstützen! Mit Ihrer Teilnahme helfen Sie uns, zukünftige Autos noch komfortabler und sicherer zu machen.

Bei dieser Studie geht es um einen Vergleich verschiedener Fahrerassistenzsysteme. Dieses Fahrzeug

- hilft Ihnen die momentane Spur einzuhalten.
- kann Ihnen helfen die Spur zu wechseln falls sie frei ist.

Sie sollen diese Unterstützungen unter realen Verkehrs-Bedingungen auf Autobahnen und Landstraßen erleben und mehrfach durch Vergabe von Noten bewerten. Der mitfahrende Versuchsleiter wird Ihnen im passenden Moment dazu Fragen stellen. Bei der Beantwortung dieser Fragen geht es um Ihre spontane Einschätzung. Am Ende jeder Fahrt werden Sie noch Fragebogen zur letzten Fahrt ausfüllen.

Zusätzlich werden technischen Daten des Fahrzeugs, ein Videobild der Verkehrssituation und ein Portraitvideo aufgezeichnet. Die gesammelten Daten werden zur weiteren Auswertung auf Datenträgern gespeichert. Ihre persönlichen Daten werden nicht mit den technischen Daten verknüpft und werden vor einer statistischen Auswertung gelöscht. Eine Weitergabe an Dritte findet nicht statt.

Der Versuch gliedert sich in folgende Abschnitte:

1. Fragebogen, Erklärungen ausfüllen
2. Einweisung in das Versuchsfahrzeug im Stand
3. Eingewöhnungsfahrt auf unserem Testgelände
4. Fahrt quer durch München zur A95 (Garmisch) bis Wolfratshausen
5. Fragebogen ausfüllen
6. Rückfahrt bis München und weiter zum Testgelände der UniBw
7. Fragebogen ausfüllen
8. Abschlussfragebogen, Verabschiedung

Der Versuch wird ca. 2 Stunden dauern.

Fahrer:

Bitte beachten Sie, dass Sie während der Fahrt stets der verantwortliche Fahrzeugführer sind. Beachten Sie alle Verkehrsvorschriften. Wir testen bei diesem Versuch nicht Ihr fahrerisches Können. Aber uns interessiert Ihr persönlicher Umgang mit diesem Fahrzeug. Wir bitten Sie, sich wie mit Ihrem privaten Auto zu verhalten und auch so – unter Beachtung der Verkehrsregeln – zu fahren.

Sie können jederzeit den Versuch abbrechen, wenn Sie denken, dass die Aufgaben Sie zu sehr beanspruchen. Durch einen Abbruch entstehen Ihnen keinerlei Nachteile.

Wir wünschen Ihnen ein gutes Gelingen!

Dipl.-Ing Christoph Müller
Prof. Dr. Michael Popp

<u>vor Versuchsbeginn</u>	Fahrer:	
Erklärung:		

Ich versichere hiermit, dass...

- ... ich eine gültige Fahrerlaubnis zum Führen des Pkw besitze und dabei habe.
- ... ich eine eventuell benötigte Sehhilfe dabei habe und auch benutze.
- ... ich mich gesundheitlich in einem **fahrtüchtigen Zustand** befinde.
- ... ich damit einverstanden bin, dass die Fahrdaten und Videobilder meiner Fahrt wissenschaftlich ausgewertet und in einer wissenschaftlichen Veröffentlichung verwendet werden dürfen, selbstverständlich ohne Nennung meines Namens.
- ... mir klar ist, dass es sich bei diesem Fahrzeug um einen **Prototypen** handelt. Ich verpflichte mich, **sehr sorgfältig mit dem Fahrzeug umzugehen**.
- ... ich mich an die **Verkehrsvorschriften** (z.B. Geschwindigkeitsbegrenzung) halte. **In jeder Fahrsituation bleibe ich verantwortlicher Fahrzeugführer.**

.....
Ort, Datum

.....
Unterschrift Versuchsteilnehmer

vor der Fahrt
Fragebogen:

Fahrer:



1. männlich weiblich
2. **Führerschein** (Pkw) seit Jahren
3. **Ich fahre regelmäßig** seit Jahren
4. **Jahreskilometer**-Leistung in den letzten 12 Monaten ca.km
5. **Gesamtkilometer**-Leistung ca.km
6. **Ich fahre momentan mit einem Pkw der Marke:**
7. **Mein Alter:** Jahre
8. **Mein Beruf:**
9. **Wie oft fahren Sie mit dem Auto?**

(mehrmals/Woche) (2-3x/ Woche) (2-3x /Monat) (1x/Monat) (seltener)
10. **Wie oft fahren Sie mit dem Auto auf der Autobahn?**

(mehrmals/Woche) (2-3x/ Woche) (2-3x /Monat) (1x/Monat) (seltener)
11. **Wie oft fahren Sie mit Automatik-Fahrzeugen?**

immer oft gelegentlich selten nie

12. Sind Sie schon mit einem Fahrzeug mit Spurhalteassistent gefahren?

.....
immer oft gelegentlich selten nie

13. Sind Sie schon mit einem Fahrzeug mit Spurwechsellassistent gefahren?

.....
immer oft gelegentlich selten nie

14. Haben Sie eigene Erfahrung mit ABS-Eingriffen?

.....
immer oft gelegentlich selten nie

15. Haben Sie eigene Erfahrungen mit ESP Eingriffen?

.....
immer oft gelegentlich selten nie

16. Wie bezeichnen Sie Ihre Fahrweise?

- sehr sportlich
- sportlich
- ausgewogen
- komfortbetont
- sehr komfortbetont

Nach Versuchsende	Fahrer:	
nach jeder Fahrt (opt./akust. Anzeigen, Signale):		

Die Anzeige für das aktive Spurhaltesystem habe ich gesehen.

nein weiß ich nicht mehr ja

Gab es einen Farbwechsel der Anzeige?

nein weiß ich nicht mehr ja

Welchen Wechsel haben Sie gesehen?

Haben Sie einen Warnton gehört?

nein weiß ich nicht mehr ja mehrfach

Was haben Sie nach dem Farbwechsel getan?

Was hat das Lenkrad gemacht?

Wenn ja, was? _____

<u>Nach Versuchsende</u>	Fahrer:	
äußere Umstände, Sonstiges:		

Versuchsleiter: **Datum:** _____ **Beginn:** _____

Fahrbahn ist trocken feucht nass

Wetter: sonnig bewölkt diesig Regen/Schnee

Einschätzung des Versuchsleiters nach der Fahrt:

Fahrstil des Fahrers:

ruppig sportlich ausgewogen zurückhaltend ängstlich

B.2.2 LKA / tLCA mit alternativer Aufgabenübernahme

A 95 Richtung Garmisch-Partenkirchen, 120 km/h	Fahrer:	
Paarvergleich tLCA		

Welcher Spurwechsel kündigte sich deutlicher an?

1. Spurwechsel 2. Spurwechsel

Welcher Spurwechsel setzte schneller ein?

1. Spurwechsel 2. Spurwechsel

Welcher Spurwechsel ging insgesamt schneller?

1. Spurwechsel 2. Spurwechsel

Bei welchem Spurwechsel hätten Sie lieber eingegriffen?

1. Spurwechsel 2. Spurwechsel

Bei welchem Spurwechsel verstanden Sie das Fahrzeug besser?

1. Spurwechsel 2. Spurwechsel

Bei welchem Spurwechsel folgte das Lenkrad der Bewegung des Fahrzeugs besser?

1. Spurwechsel 2. Spurwechsel

Welcher Spurwechsel machte Ihnen mehr Spaß?

1. Spurwechsel 2. Spurwechsel

Welchen Spurwechsel fanden Sie angenehmer?

1. Spurwechsel 2. Spurwechsel

Bei welchem Spurwechsel schaukelte sich das Fahrzeug mehr in die neue Spur hinein?

1. Spurwechsel 2. Spurwechsel

Bei welchem Spurwechsel erschienen Ihnen die Fahrzeugbewegungen richtiger?

1. Spurwechsel 2. Spurwechsel

A 95 Richtung München, 120 km/h	Fahrer:	
Paarvergleich LKA (Kurvenfahrt)		

Welche Kurvenfahrt kündigte sich deutlicher an?

1. Kurvenfahrt 2. Kurvenfahrt

Welche Kurvenfahrt setzte schneller ein?

1. Kurvenfahrt 2. Kurvenfahrt

Welche Kurvenfahrt ging insgesamt schneller?

1. Kurvenfahrt 2. Kurvenfahrt

Bei welcher Kurvenfahrt hätten Sie lieber eingegriffen?

1. Kurvenfahrt 2. Kurvenfahrt

Bei welcher Kurvenfahrt verstanden Sie das Fahrzeug besser?

1. Kurvenfahrt 2. Kurvenfahrt

Bei welcher Kurvenfahrt folgte das Lenkrad der Bewegung des Fahrzeugs besser?

1. Kurvenfahrt 2. Kurvenfahrt

Welche Kurvenfahrt machte Ihnen mehr Spaß?

1. Kurvenfahrt 2. Kurvenfahrt

Welche Kurvenfahrt fanden Sie angenehmer?

1. Kurvenfahrt 2. Kurvenfahrt

Bei welcher Kurvenfahrt schaukelte das Fahrzeug mehr?

1. Kurvenfahrt 2. Kurvenfahrt

Bei welcher Kurvenfahrt erschienen Ihnen die Fahrzeugbewegungen richtiger?

1. Kurvenfahrt 2. Kurvenfahrt

B.2.3 Lane Departure Warning

A 95 nach München, 120 km/h	Fahrer:	
LDW: Manueller Spurwechsel		

Beim 1. Spurwechselversuch haben Sie sofort verstanden was der Versuchsleiter wollte.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Beim 2. Spurwechselversuch haben Sie sofort verstanden was das System wollte.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Bei welchem Spurwechselversuch sind Sie mehr erschrocken?

1. Spurwechsel 2. Spurwechsel

Bei welchem Spurwechselversuch haben Sie schneller reagiert?

1. Spurwechsel 2. Spurwechsel

Bei welchem Spurwechselversuch folgte das Lenkrad der Bewegung des Fahrzeugs besser?

1. Spurwechsel 2. Spurwechsel

Ich hatte das Auto beim 1. Spurwechselversuch unter Kontrolle.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

Ich hatte das Auto beim 2. Spurwechselversuch unter Kontrolle.

trifft überhaupt nicht zu trifft voll zu

C. Detaillierte Ergebnisse der Probandenstudien

C.1 Studie 1

C.1.1 LKA mit variabler Aufgabenübernahme

Tabelle C.1: Fahrerbeanspruchung. Vollständige Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests in Ergänzung zu Tabelle 6.3

	Kruskal-Wallis-Test
Lenkaktivität	
Lenkradwinkel (effektiv)	$H(2, N = 69) = 33.3, p < .0001$
Lenkradgeschwindigkeit (effektiv)	$H(2, N = 69) = 44.45, p < .0001$
Lenkradrichtungswechselrate	$H(2, N = 69) = 28.78, p < .0001$
Lenkarbeit	
Lenkmoment (effektiv)	$H(2, N = 69) = 36.35, p < .0001$
Arbeitsintegral	$H(2, N = 69) = 41.53, p < .0001$

Tabelle C.2: Leistung des Fahrer-Fahrzeug-Gesamtsystems. Vollständige Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests in Ergänzung zu Tabelle 6.4

	Kruskal-Wallis-Test
Gierwinkelfehler (effektiv)	$H(2, N = 69) = 34.69, p < .0001$
Gierbeschleunigung (effektiv)	$H(2, N = 69) = 46.14, p < .0001$
Gierrate (effektiv)	$H(2, N = 69) = 11.38, p = .0034$
Querablage (SD)	$H(2, N = 69) = 31.37, p < .0001$

Tabelle C.3: Vergleich der Leistungen des Gesamtsystems der Konzepte VAA und SL bei Fahrt *hands-off* und *hands-on*. Gierwinkelfehler und Querablage beziehen sich auf die Soll-Bahn des FAS (Fahrstreifenmitte). Vorveröffentlicht in [127]

		Konzept SL (<i>hands-off</i> vs. <i>hands-on</i>)	Konzept VAA (<i>hands-off</i> vs. <i>hands-on</i>)	<i>hands-off</i> (SL) vs. <i>hands-off</i> (VAA)
Gierwinkelfehler (effektiv)	(%)	- 4,7	+ 30,3	- 24,9
Gierbeschleunigung (effektiv)	(%)	+ 20,3	+ 15,6	- 17,5
Gierrate (effektiv)	(%)	+ 9,3	- 9,9	+ 12,3
Querablage (SD)	(%)	- 10,6	+ 1,3	- 24

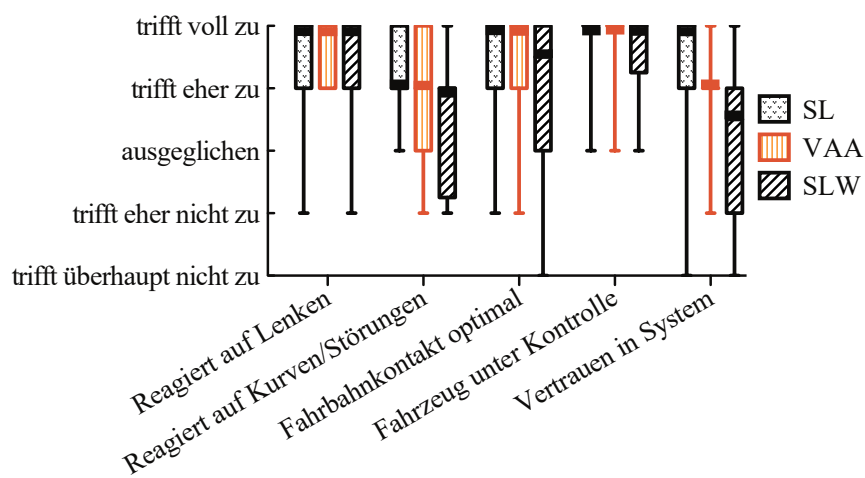


Abbildung C.1: Bewertung des Gesamtsystems durch den Fahrer. Die Antenne zeigt die Spannweite der Daten. Siehe auch [127]

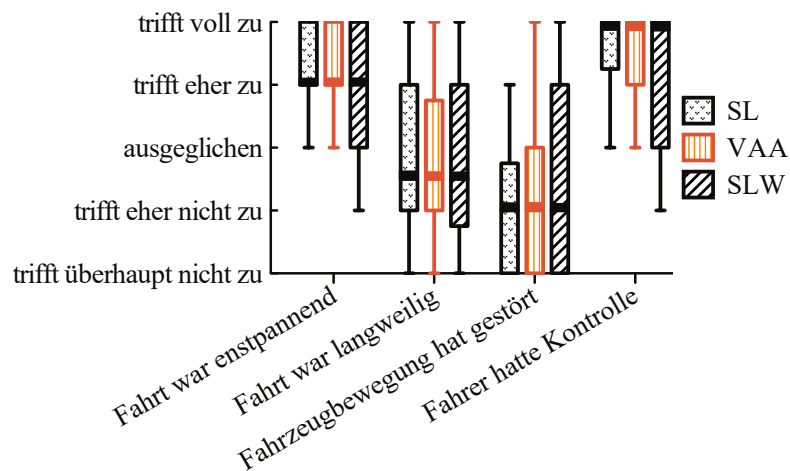


Abbildung C.2: Bewertung des Gesamtsystems durch den Passagier im Fond. Die Antenne zeigt die Spannweite der Daten

C.1.2 tLCA mit variabler Aufgabenübernahme

Tabelle C.4: Fahrerbeanspruchung. Vollständige Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests in Ergänzung zu Tabelle 6.6

	Kruskal-Wallis-Test
Lenkaktivität	
Lenkradwinkel (effektiv)	$H(2, N = 67) = 23.8, p < .0001$
Lenkradgeschwindigkeit (effektiv)	$H(2, N = 67) = 20.9, p < .0001$
Lenkradrichtungswechselrate	$H(2, N = 67) = 49.5, p < .0001$
Lenkarbeit	
Lenkmoment (effektiv)	$H(2, N = 67) = 24.35, p < .0001$
Arbeitsintegral	$H(2, N = 67) = 16.39, p = .0003$

Tabelle C.5: Leistung des Fahrer-Fahrzeug-Gesamtsystems. Vollständige Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests in Ergänzung zu Tabelle 6.7

	Kruskal-Wallis-Test
Gierwinkelfehler (effektiv)	$H(2, N = 67) = 25.85, p < .0001$
Gierbeschleunigung (effektiv)	$H(2, N = 67) = 20.31, p < .0001$
Gierrate (effektiv)	$H(2, N = 67) = 8.96, p = .0113$
Querablage (SD)	$H(2, N = 69) = 19.89, p < .0001$

Tabelle C.6: Vergleich der Leistungen des Fahrer-Fahrzeug-Gesamtsystems der Konzepte VAA und SL bei Fahrt *hands-off* und *hands-on*. Gierwinkelfehler und Querablage beziehen sich auf die Soll-Bahn des FAS

		Konzept SL (<i>hands-off</i> vs. <i>hands-on</i>)	Konzept VAA (<i>hands-off</i> vs. <i>hands-on</i>)	<i>hands-off</i> (SL) vs. <i>hands-off</i> (VAA)
Gierwinkelfehler (effektiv)	(%)	+ 9,1	+ 41,7	- 3,8
Gierbeschleunigung (effektiv)	(%)	+ 16,4	+ 9,3	+ 13,3
Gierrate (effektiv)	(%)	+ 14,3	+ 9,4	+ 6,2
Querablage (SD)	(%)	+ 4,5	+ 40,7	- 15,9

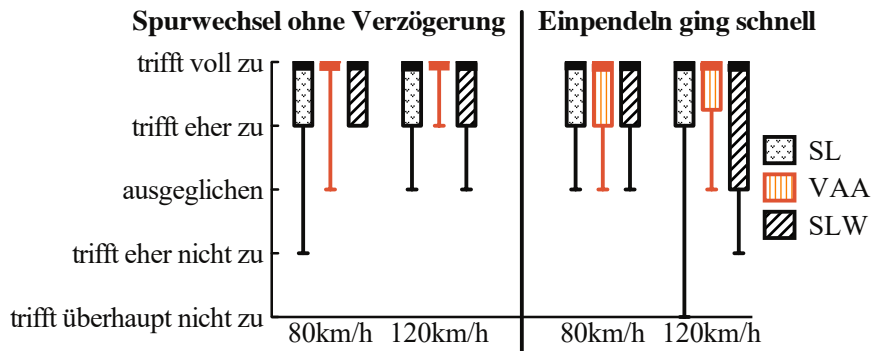
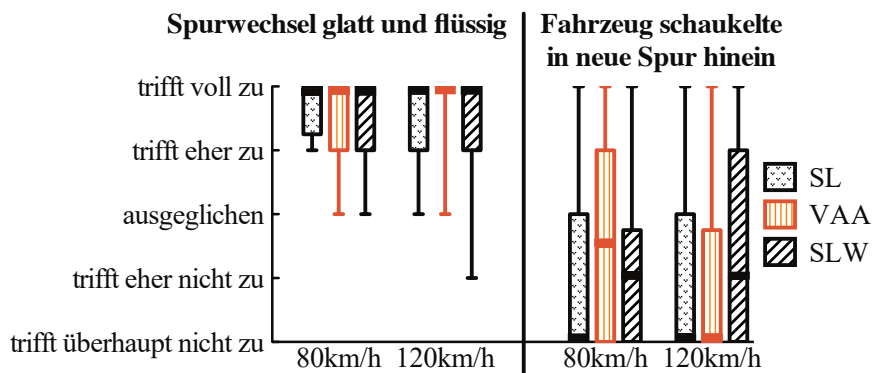
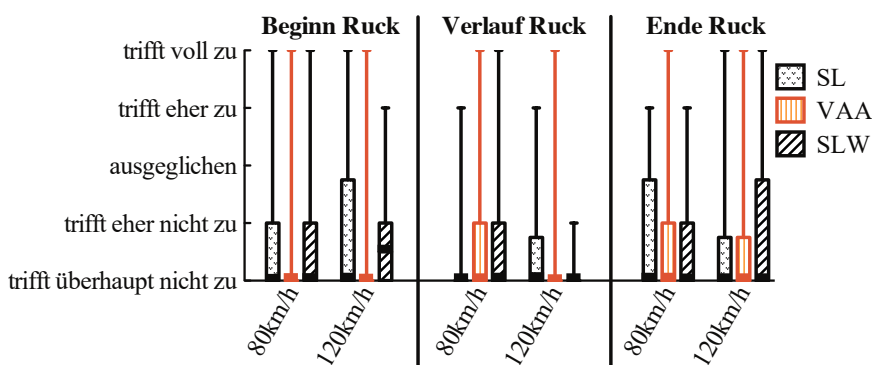


Abbildung C.3: Bewertung der Dynamik des Fahrstreifenwechsels. Die Antenne zeigt die Spannweite der Daten



(a) Gleichmäßigkeit und Kontinuität



(b) Rucke

Abbildung C.4: Bewertung des Komforts beim Fahrstreifenwechsel. Die Antenne zeigt die Spannweite der Daten

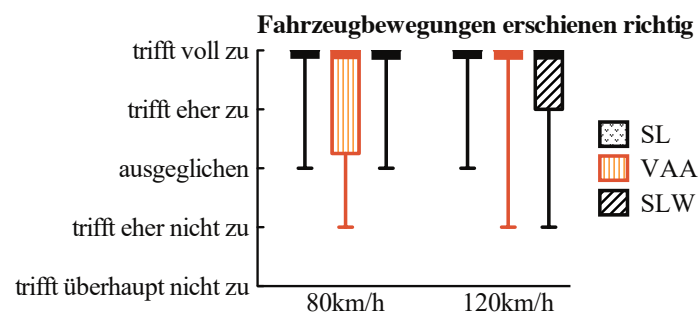


Abbildung C.5: Bewertung des Gesamtsystems. Die Antenne zeigt die Spannweite der Daten

C.2 Studie 2

C.2.1 LKA / tLCA mit alternativer Aufgabenübernahme

Tabelle C.7: Funktion LKA: Vollständige Ergebnisse der Paarvergleiche in Ergänzung zu Abschnitt 6.2.1.5. Signifikante Abweichungen des Mittelwerts von null sind grau hinterlegt

Frage	HO vs. QKF	QKF vs. ÜK	ÜK vs. HO
Welche Kurvenfahrt kündigte sich deutlicher an?	$M = 0,17$, $SD = 1,34$, $t(12) = 0,43$, $p = 0,6742$	$M = 0,17$, $SD = 1,27$, $t(12) = 0,46$, $p = 0,6576$	$M = -1,17$, $SD = 0,72$, $t(12) = 5,63$, $p = 0,0002$
Welche Kurvenfahrt setzte schneller ein?	$M = 0,00$, $SD = 1,21$, $t(12) = 0,00$, $p = 1,0000$	$M = 0,25$, $SD = 1,06$, $t(12) = 0,82$, $p = 0,4293$	$M = -0,50$, $SD = 1,17$, $t(12) = 1,48$, $p = 0,1661$
Welche Kurvenfahrt ging insgesamt schneller?	$M = -0,25$, $SD = 0,87$, $t(12) = 1,00$, $p = 0,3388$	$M = 0,42$, $SD = 1,08$, $t(12) = 1,33$, $p = 0,2098$	$M = -1,00$, $SD = 0,60$, $t(12) = 5,74$, $p = 0,0001$
Bei welcher Kurvenfahrt hätten Sie lieber eingegriffen?	$M = 0,00$, $SD = 1,60$, $t(12) = 0,00$, $p = 1,0000$	$M = 0,58$, $SD = 1,16$, $t(12) = 1,74$, $p = 0,1106$	$M = 0,25$, $SD = 1,36$, $t(12) = 0,64$, $p = 0,5364$
Bei welcher Kurvenfahrt verstanden Sie das Fahrzeug besser?	$M = 0,25$, $SD = 1,66$, $t(12) = 0,52$, $p = 0,6119$	$M = 0,00$, $SD = 1,54$, $t(12) = 0,00$, $p = 1,0000$	$M = -1,00$, $SD = 1,35$, $t(12) = 2,57$, $p = 0,0261$
Bei welcher Kurvenfahrt folgte das Lenkrad der Bewegung des Fahrzeugs besser?	$M = 0,58$, $SD = 1,51$, $t(12) = 1,34$, $p = 0,2064$	$M = 0,08$, $SD = 1,31$, $t(12) = 0,22$, $p = 0,8298$	$M = 0,00$, $SD = 1,41$, $t(12) = 0,00$, $p = 1,0000$
Welche Kurvenfahrt machte Ihnen mehr Spaß?	$M = 0,25$, $SD = 1,86$, $t(12) = 0,46$, $p = 0,6514$	$M = -0,42$, $SD = 1,44$, $t(12) = 1,00$, $p = 0,3388$	$M = -0,58$, $SD = 1,51$, $t(12) = 1,34$, $p = 0,2064$
Welche Kurvenfahrt fanden Sie angenehmer?	$M = 0,08$, $SD = 1,88$, $t(12) = 0,15$, $p = 0,8808$	$M = -0,42$, $SD = 1,51$, $t(12) = 0,96$, $p = 0,3582$	$M = -0,25$, $SD = 1,76$, $t(12) = 0,49$, $p = 0,6332$
Bei welcher Kurvenfahrt schaukelte das Fahrzeug mehr?	$M = 0,75$, $SD = 1,54$, $t(12) = 1,68$, $p = 0,1207$	$M = 0,17$, $SD = 1,40$, $t(12) = 0,41$, $p = 0,6887$	$M = -0,50$, $SD = 1,51$, $t(12) = 1,15$, $p = 0,2750$
Bei welcher Kurvenfahrt erschienen Ihnen die Fahrzeugbewegungen richtiger?	$M = 0,25$, $SD = 1,76$, $t(12) = 0,49$, $p = 0,6332$	$M = -0,25$, $SD = 1,60$, $t(12) = 0,54$, $p = 0,5997$	$M = -0,25$, $SD = 1,60$, $t(12) = 0,54$, $p = 0,5997$

Tabelle C.8: Funktion tLCA: Vollständige Ergebnisse der Paarvergleiche. Signifikante Abweichungen des Mittelwerts von null sind grau hinterlegt. Ergebnisse, die auf einen Trend hindeuten sind fett markiert

Frage	HO vs. QKF	QKF vs. ÜK	ÜK vs. HO
Welcher Spurwechsel kündigte sich deutlicher an?	$M = -0,92$, $SD = 1,51$, $t(12) = 2.11$, $p = 0.0586$	$M = 0,42$, $SD = 1,44$, $t(12) = 1.00$, $p = 0.3388$	$M = -0.92$, $SD = 1,62$, $t(12) = 1.96$, $p = 0.0760$
Welcher Spurwechsel setzte schneller ein?	$M = -0,33$, $SD = 1,37$, $t(12) = 0.84$, $p = 0.4175$	$M = 0,08$, $SD = 1,56$, $t(12) = 0.18$, $p = 0.8569$	$M = -0.17$, $SD = 1,64$, $t(12) = 0.35$, $p = 0.7318$
Welcher Spurwechsel ging insgesamt schneller?	$M = -0,17$, $SD = 1,34$, $t(12) = 0.43$, $p = 0.6742$	$M = 0,17$, $SD = 1,34$, $t(12) = 0.43$, $p = 0.6742$	$M = -0,42$, $SD = 1,98$, $t(12) = 0.73$, $p = 0.4802$
Bei welchem Spurwechsel hätten Sie lieber eingegriffen?	$M = -0,17$, $SD = 1,40$, $t(12) = 0.41$, $p = 0.6887$	$M = 0,25$, $SD = 0,97$, $t(12) = 0.90$, $p = 0.3889$	$M = -1.08$, $SD = 1,16$, $t(12) = 3.22$, $p = 0.0081$
Bei welchem Spurwechsel verstanden Sie das Fahrzeug besser?	$M = -0,67$, $SD = 1,50$, $t(12) = 1.54$, $p = 0.1513$	$M = 0,17$, $SD = 1,53$, $t(12) = 0.38$, $p = 0.7126$	$M = 1,33$, $SD = 1,07$, $t(12) = 4.30$, $p = 0.0012$
Bei welchem Spurwechsel folgte das Lenkrad der Bewegung des Fahrzeugs besser?	$M = 0,00$, $SD = 1,41$, $t(12) = 0.00$, $p = 1.0000$	$M = -0,25$, $SD = 1,22$, $t(12) = 0.71$, $p = 0.4910$	$M = 0.58$, $SD = 1,51$, $t(12) = 1.34$, $p = 0.2064$
Welcher Spurwechsel machte Ihnen mehr Spaß?	$M = 0,00$, $SD = 1,81$, $t(12) = 0.00$, $p = 1.0000$	$M = 0,00$, $SD = 1,76$, $t(12) = 0.00$, $p = 1.0000$	$M = 0,17$, $SD = 1,95$, $t(12) = 0.30$, $p = 0.7723$
Welchen Spurwechsel fanden Sie angenehmer?	$M = 0,25$, $SD = 1,71$, $t(12) = 0.51$, $p = 0.6230$	$M = -0,75$, $SD = 1,54$, $t(12) = 1.68$, $p = 0.1207$	$M = 0,92$, $SD = 1,78$, $t(12) = 1.78$, $p = 0.1023$
Bei welchem Spurwechsel schaukelte sich das Fahrzeug mehr in die neue Spur hinein?	$M = -0,08$, $SD = 1,62$, $t(12) = 0.18$, $p = 0.8619$	$M = 1,67$, $SD = 0,49$, $t(12) = 11.73$, $p < 0.0001$	$M = -1,42$, $SD = 1,08$, $t(12) = 4.53$, $p = 0.0009$
Bei welchem Spurwechsel erschienen Ihnen die Fahrzeugbewegungen richtiger?	$M = -0,08$, $SD = 1,62$, $t(12) = 0.18$, $p = 0.8619$	$M = -0,75$, $SD = 1,54$, $t(12) = 1.68$, $p = 0.1207$	$M = 1,00$, $SD = 1,48$, $t(12) = 2.35$, $p = 0.0388$

Abbildungsverzeichnis

2.1	Fahrzeugkoordinatensysteme nach <i>DIN ISO 8855</i>	5
2.2	Wahrnehmungsschwellen ohne bzw. mit visueller Rückmeldung	8
2.3	Sprungantwort eines Fahrers	9
2.4	Informationsfluss eines FAS mit <i>Summenpunkt Lenkrad</i>	20
2.5	Wankverhalten ohne und mit aktiver Wankstabilisierung	24
2.6	Veranschaulichung des Rollsteuerns im Versuchsfahrzeug	25
2.7	Wirkweise der Querbeschleunigungskompensation durch Wanken	26
3.1	Befragung, mit welcher rotatorischer Aufbaubewegung ein Fahrstreifenwechsel angekündigt werden sollte	30
3.2	Wankwinkel bei querkraftfreier Fahrt	32
4.1	Informationsfluss bei Informationsübertragung mittels aktiver Wankbewegung in informierenden und warnenden Funktionen	38
4.2	Kurvenfahrt mit Funktion LKA ohne Fahrerzutun	43
4.3	Erweiterung des Zusammenhangs zwischen FAS-Eingriff und Wankwinkel um situative Informationen	44
4.4	Informationsfluss der Funktionen LKA/tLCA bei variabler Aufgabenübernahme	45
4.5	Funktionen LKA/tLCA. Metapher <i>Fahrt entlang einer Wanne</i>	48
4.6	Informationsfluss der Funktionen LKA/tLCA bei alternativer Aufgabenübernahme	52
5.1	Übersicht der im Versuchsfahrzeug genutzten Sensorik	58
5.2	Aufbau eines eABC-Aktors an der Vorderachse (Modulbauweise)	60
5.3	Aufbau eines eABC-Aktors an der Hinterachse (rotatorische Variante)	61
5.4	Schaubild über die genutzte Lenkaktorik	61
5.5	Prinzipdarstellung des Lenkstrangs	62
5.6	Struktur der Querregelung	63
5.7	Modell des Lenkstrangs	65

5.8	Validierung des Modells des Lenkstrangs	66
5.9	Struktur des LWR	67
5.10	Nyquist-Ortskurve des PID-Reglers des LWR	67
5.11	Sprungantwort und Störverhalten des LWR	68
5.12	Folgeverhalten des LWR	69
5.13	Lenkeffekt infolge Wankens	71
5.14	Modell der Radaufhängung und eABC-Aktorik an der Hinterachse	75
5.15	Validierung des Wankwinkels relativ zur Straßenoberfläche	76
5.16	Folgeverhalten des Konzepts <i>Regelung</i>	77
5.17	Wankwinkelsprung mit Konzept <i>Steuerung</i>	80
5.18	Ergebnisse des Versuchs <i>stationäre Kreisfahrt</i>	82
5.19	Lenkradwinkelverläufe des Versuchs <i>doppelter Fahrstreifenwechsel</i>	83
5.20	Schwimmwinkelverläufe des Versuchs <i>doppelter Fahrstreifenwechsel</i>	84
5.21	Struktureller Aufbau der Funktionen NI und FCA	87
5.22	Struktureller Aufbau der Funktion LDW	87
5.23	Struktureller Aufbau der Funktionen LKA und tLCA	89
5.24	Implementierung der Funktionen LKA/tLCA mit variabler Aufgabenübernahme sowie der in den Probandenstudien gegenübergestellten Konzepte	91
5.25	Implementierung der Funktionen LKA/tLCA mit alternativer Aufgabenübernahme	93
5.26	Aufschlüsselung des Lenkmoments nach Fahrer-FAS-Einfluss	96
6.1	Versuchsablauf und Szenarienabfolge der Studie 1	102
6.2	LKA mit variabler Aufgabenübernahme: Zeitverläufe charakteristischer Messgrößen	106
6.3	LKA mit variabler Aufgabenübernahme: Subjektivbewertung der Verständlichkeit und Übersteuerbarkeit	107
6.4	LKA mit variabler Aufgabenübernahme: Vestibuläre Wahrnehmung der Wankbewegungen	108
6.5	LKA mit variabler Aufgabenübernahme: Fahrerbeanspruchung. Analyse der Lenkaktivität	110
6.6	LKA mit variabler Aufgabenübernahme: Subjektivbewertung des Lenk- und Fahrzeugverhaltens	111
6.7	Wankbewegung zur Informationsübertragung in den informierenden und warnenden FAS	121
6.8	NI: Zeitpunkte und Soll-Verlauf der Wankbewegungen	123
6.9	FCA: Ausweichempfehlung nach links	126

6.10	LKA mit alternativer Aufgabenübernahme: Ähnlichkeit der Kurvenfolge beim Paarvergleich der Funktionsausprägungen	131
6.11	LKA/tLCA mit alternativer Aufgabenübernahme: Unterschiede der gegenübergestellten Varianten	133
6.12	LDW: Einfluss der Wankbewegung auf die Querführung	138
A.1	Extrapolation der Querablage	152
C.1	LKA mit variabler Aufgabenübernahme: Bewertung des Gesamtsystems durch den <i>Fahrer</i>	184
C.2	LKA mit variabler Aufgabenübernahme: Bewertung des Gesamtsystems durch den <i>Passagier im Fond</i>	184
C.3	tLCA mit variabler Aufgabenübernahme: Bewertung der Dynamik	186
C.4	tLCA mit variabler Aufgabenübernahme: Bewertung des Komforts	186
C.5	tLCA mit variabler Aufgabenübernahme: Bewertung des Gesamtsystems	187

Tabellenverzeichnis

2.1	Sinneskanäle und jeweils zur Fahraufgabe aufgenommene Information . . .	7
2.2	Zusammenfassung der Wahrnehmungsschwellen	9
2.3	Einflussfaktoren auf die zur Querführung bevorzugt genutzten Eingangsgrößen	10
2.4	Charakteristika von FAS-Eingriffen mit und ohne <i>Summenpunkt Lenkrad</i> .	23
4.1	Informationscharakter der betrachteten informierenden und warnenden FAS	37
4.2	Übersicht der FAS, auf welche das Konzept angewandt wird	56
5.1	Anforderungen der entworfenen FAS an die Umsetzung im Fahrzeug	57
5.2	Einschränkungen der Funktionsumsetzung, welche bei der Gestaltung der Probandenstudien zu beachten sind	99
6.1	LKA mit variabler Aufgabenübernahme: Operationalisierung der Subjektiv- bewertung der gemeinsamen Fahrzeugführung	105
6.2	LKA mit variabler Aufgabenübernahme: Kategorisierung der Wankbewe- gungen im Konzept VAA	109
6.3	LKA mit variabler Aufgabenübernahme: Fahrerbeanspruchung	109
6.4	LKA mit variabler Aufgabenübernahme: Leistung des Fahrer-Fahrzeug-Ge- samtsystems	110
6.5	tLCA mit variabler Aufgabenübernahme: Operationalisierung der Subjektiv- bewertung der gemeinsamen Fahrzeugführung	117
6.6	tLCA mit variabler Aufgabenübernahme: Fahrerbeanspruchung	117
6.7	tLCA mit variabler Aufgabenübernahme: Leistung des Fahrer-Fahrzeug-Ge- samtsystems	118
6.8	NI: Charakteristische Daten zur Wankbewegung und zu den durchfahrenen Kreisverkehren	122
6.9	LKA/tLCA mit alternativer Aufgabenübernahme: Operationalisierung der Subjektivbewertung	132
6.10	LDW: Ergebnisse der separat bewerteten Fragen	139
6.11	LDW: Ergebnisse der Paarvergleiche	139

C.1	LKA mit variabler Aufgabenübernahme: Fahrerbeanspruchung. Vollständige Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests	183
C.2	LKA mit variabler Aufgabenübernahme: Leistung des Fahrer-Fahrzeug-Gesamtsystems. Vollständige Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests	183
C.3	LKA mit variabler Aufgabenübernahme: Vergleich der Leistungen des Gesamtsystems der Konzepte VAA und SL bei Fahrt <i>hands-off</i> und <i>hands-on</i> .	184
C.4	tLCA mit variabler Aufgabenübernahme: Fahrerbeanspruchung. Vollständige Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests	185
C.5	tLCA mit variabler Aufgabenübernahme: Leistung des Fahrer-Fahrzeug-Gesamtsystems. Vollständige Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests	185
C.6	tLCA mit variabler Aufgabenübernahme: Vergleich der Leistungen des Gesamtsystems der Konzepte VAA und SL bei Fahrt <i>hands-off</i> und <i>hands-on</i> .	185
C.7	LKA mit alternativer Aufgabenübernahme: Vollständige Ergebnisse der Paarvergleiche	189
C.8	tLCA mit alternativer Aufgabenübernahme. Vollständige Ergebnisse der Paarvergleiche	190

Abkürzungsverzeichnis

ACC	Adaptive Cruise Control
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
ADS	Überlagerungslenkung, herstellerspezifisch engl. <i>Audi Dynamic Steering</i>
AKVL	Akustische Warnung durch Verkehrsleiter
CAN	Controller Area Network
DGPS	Differential Global Positioning System
DLC	Distance-to-Line-Crossing
eABC	Electrical Semiactive Body Control
EPS	Elektromechanische Servolenkung, engl. <i>Electric Power Steering</i>
ESC	Electronic Stability Control
FAS	Fahrerassistenzsystem
FCA	Front Collision Avoidance
FSF	Fahrstreifenfolgen
FSW	Fahrstreifenwechsel
HA	Hinterachse
HO	Aufbau horizontal
IMU	Inertiale Messeinheit, engl. <i>Inertial Measurement Unit</i>
kHUD	kontaktanaloges Head-Up-Display
KV	Kreisverkehr
LDW	Lane Departure Warning

LKA	Lane Keeping Assistant
LWR	Lenkwinkelregler
NI	Navigation Instruction
PID-Regler	Proportional-Integral-Differential-Regler
PKW	Personenkraftwagen
QKF	Aufbau querkraftfrei
SARA	6 D-Sensorcluster, herstellerspezifisch engl. <i>Sensor Array Audi</i>
SL	Summenpunkt Lenkrad
SLW	Summenpunkt Lenkrad mit Wankbewegung
tLCA	triggered Lane Change Assistant
TTC	Time-to-Collision
ÜK	Querkraft überkompensiert
VA	Vorderachse
VAA	Variable Aufgabenausführung
WB	Wankbewegung

Symbolverzeichnis

β	Schwimmwinkel
δ_{ADS}	Überlagerungswinkel der ADS. Summe aus δ_{ADSs} und δ_{ADSa} . Positiv, wenn er bei Nullstellung des Lenkrads zu einer Linkskurve führt
δ_{ADSa}	Teil-Überlagerungswinkel der ADS. Mittels FAS additiv überlagerbar
δ_{ADSs}	Teil-Überlagerungswinkel der ADS. Festgelegt durch die serienmäßigen ADS-Funktionen
δ_{BLW}	Berechneter Lenkradwinkel. In Linkskurven positiv. Vom EPS-Steuergerät auf Basis von n_{EPS} berechnet und durch Funktionen wie Geradeauslaufkorrektur korrigiert
δ_{EPS}	Lenkradwinkeläquivalent, welches auf der Zahnstangentranslation x_{ZS} basiert und durch Multiplikation mit $i_{S,f}$ berechnet wird
$\delta_{EPS\ soll}$	Sollwert des Lenkradwinkeläquivalents δ_{EPS}
$\ddot{\delta}_{EPS}$	Beschleunigung des Lenkradwinkeläquivalents δ_{EPS}
δ_H	Lenkradwinkel (Verdrehwinkel des Lenkrades). In Linkskurven positiv
$\ddot{\delta}_H$	Beschleunigung des Lenkradwinkels δ_H
$\delta_{H\ wank}$	Lenkradwinkeläquivalent des Lenkeffekts infolge Wankens. Positiv bei Lenkeffekt nach links
δ_{LZW}	Lenkradwinkeläquivalent am oberen Ende der Lenkzwischenwelle. Berechnet aus Subtraktion von δ_H und δ_{ADS} . In Linkskurven positiv
η	Querneigungswinkel der Fahrbahnebene (Straßenquerneigung)
κ	Krümmung der Bahnkurve des Fahrzeugs. Umkehrfunktion des Bahnradius R_p
φ_c	Wankwinkel relativ zur Fahrbahnebene
$\varphi_{c\ diff}$	(Regel-)Differenz zwischen $\varphi_{c\ soll}$ und φ_c
$\dot{\varphi}_c$	Wankgeschwindigkeit bzw. Wankrate relativ zur Fahrbahnebene

$\ddot{\varphi}_c$	Wankbeschleunigung relativ zur Fahrbahnebene
$\varphi_{c\ max}$	Maximaler Wankwinkel relativ zur Fahrbahnebene
$\varphi_{c\ soll}$	Sollwert des Wankwinkels relativ zur Fahrbahnebene
φ_g	Wankwinkel relativ zum Schwerevektor
Ψ_{Diff}	Gierwinkeldifferenz, z.B. zwischen der Fahrstreifenmarkierung und der Fahrzeuglängsachse
ω_z	Gierrate. Z-Komponente der Winkelgeschwindigkeit des fahzeugaufbaufesten Achsensystems
a_{yc}	Querbeschleunigung im Fahrzeugaufbau
a_{yg}	Querbeschleunigung lotrecht zum Schwerevektor
c_0	Krümmung, z.B. der Fahrstreifenmarkierung
c_1	Krümmungsänderung, z.B. der Fahrstreifenmarkierung
c_f	Federsteifigkeit der Feder, welche die Rückstellkraft der Lenkung bezogen auf die Zahnstange modelliert
c_{LS}	Verwindungssteifigkeit des Lenkstrangs inklusive Torsionsstab
c_m	Arithmetisches Mittel der Krümmung zu Beginn und Ende des Prädiktionszeitraums T_{prev}
D_{prev}	Bahnlänge, um welche die Eingangsgrößen des Querregeler extrapoliert werden
d_y	Querablage des Fahrzeugs relativ zur Soll-Bahn
$d_{y\ soll}$	Soll-Wert der Querablage des Fahrzeugs relativ zur Soll-Bahn
F_{ZS}	Zahnstangenkraft
g	Betrag der Schwere bzw. Erdbeschleunigung
I	Reizintensität
i_{KGT}	Übersetzung des Kugelgewindetribs der EPS. Verhältnis der Änderung des Drehwinkels des Servomotors der EPS im Verhältnis zur Änderung der Zahnstangentranslation x_{ZS}
$i_{s,f}$	Verhältnis der Änderung des Lenkradwinkels im Bezug auf die Änderung des mittleren kinematischen Lenkwinkels des VA-Radpaares (engl. <i>steering ratio front axle</i>)

i_{SG}	Lenkgetriebeübersetzung (engl. <i>steering gear ratio</i>). Verhältnis der Änderung des Lenkradwinkels δ_{EPS} in Bezug auf die Änderung der Zahnstangentranslation x_{ZS}
k_t	Koeffizient trockener Reibung
k_v	Koeffizient viskoser Reibung
l	Bahnlänge
M_{EPS}	Moment des Servomotors der EPS
M_H	Moment am Lenkrad um dessen Drehachse. Gemessen am Torsionsstab
M_{LKA}	Überlagerungsmoment der LKA-Schnittstelle. Gestellt durch die EPS
m_t	Massenträgheitsäquivalent, welches die Massenträgheiten und Trägheitsmomente aller Komponenten des Lenkstrangs zusammenfasst
n_{EPS}	Drehzahl des Servomotors der EPS. Positiv für Lenkbewegung nach links
R	Radius der Fahrzeugbewegung. Bei stationärer Kreisfahrt identisch zu R_p [40]
R_p	Radius der Bahnkurve des Fahrzeugs. Umkehrfunktion der Bahnkrümmung κ . Bei stationärer Kreisfahrt identisch zu R [40]
t	Zeit, z.B. in Messdatenverläufen
T_{ADS}	Zeitverzug im Folgeverhalten der ADS beim Stellen des additiven Überlagerungswinkels δ_{ADSa}
T_{KAM}	Latenz der Messdaten der Frontkamera
T_{KR}	Zeitverzug im Folgeverhalten des Konzepts <i>Regelung</i> (Wankwinkelregelung)
T_{LWR}	Zeitverzug im Folgeverhalten des LWR
T_{prev}	Prädiktionszeitraum. Summe aus T_{KAM} und T_{prevQR}
T_{prevQR}	Zeitdauer, um welche die Führungsgrößen des Querreglers vorseilen

v Geschwindigkeit des Fahrzeugschwerpunkts

x_{ZS} Translation der Zahnstange

Literaturverzeichnis

- [1] ACKERMANN, J.: *Robust Control: The Parameter Space Approach*. 2. Aufl. London, Vereinigtes Königreich : Springer, 2002 (Communications and Control Engineering)
- [2] ACKERMANN, J. ; BÜNTE, T.: Robust prevention of limit cycles for robustly decoupled car steering dynamics. In: *Kybernetika* 35 (1999), Nr. 1, S. 105–116
- [3] ADAMY, J.: *Nichtlineare Regelungen*. Berlin - Heidelberg : Springer, 2009
- [4] ALLNER, M.: *Sternstunden der Technik: Die Kurvenneigefunktion im S-Klasse Coupé - Kurven-Künstler*. Presse-Information Daimler AG, Mai 2014. – <http://media.daimler.com/marsMediaSite/ko/de/9919919>, abgerufen am 17.01.2018
- [5] ARNDT, S.: *Evaluierung der Akzeptanz von Fahrerassistenzsystemen - Modell zum Kaufverhalten von Endkunden*. Wiesbaden : VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2011 (Verkehrspsychologie)
- [6] BARTELS, A. ; ROHLFS, M. ; HAMEL, S. ; SAUST, F. ; KLAUSKE, L. K.: Querführungsassistenz. In: WINNER, H. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 3. Aufl. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2015 (ATZ/MTZ-Fachbuch), S. 937–957
- [7] BATAVIA, P.: *Driver-Adaptive Lane Departure Warning Systems*. Pittsburgh, PA, USA, Carnegie Mellon University, Diss., 1999
- [8] BEIKER, S. ; MITSCHKE, M.: Verbesserungsmöglichkeiten des Fahrverhaltens von Pkw durch zusammenwirkende Regelsysteme. In: *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)* 103 (2001), Nr. 1, S. 38–43
- [9] BELLEM, H. ; SCHÖNENBERG, T. ; KREMS, J. F. ; SCHRAUF, M.: Objective metrics of comfort: Developing a driving style for highly automated vehicles. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 41 (2016), S. 45 – 54
- [10] BERGER, H. ; BLIERSBACH, G. ; DELLEN, R. G.: *Buchreihe der Arbeits- und Forschungsgemeinschaft für Straßenverkehr und Verkehrssicherheit*. Bd. 25: *Fahrformen*

- und Erlebensentwicklungen bei der Teilnahme im Straßenverkehr*. Köln : Arbeits- und Forschungsgemeinschaft für Straßenverkehr und Verkehrssicherheit, 1975. – 1–98 S.
- [11] BITTERBERG, U.: *Wissensbasiertes Verfahren zum Neigen von Wagenkästen bei Schienenfahrzeugen*, Leibniz Universität Hannover, Diss., 1999
- [12] BOFF, K. R. ; KAUFMAN, L. ; THOMAS, J. P.: *Handbook of perception and human performance. Volume I: Sensory Processes and Performance*. Bd. 1. New York, NY, USA : Wiley, 1986
- [13] BÄR, M.: *Vorausschauende Fahrwerkregelung zur Reduktion der auf die Insassen wirkenden Querbeschleunigung*, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Diss., 2014
- [14] BÄR, M. ; MEITINGER, K.-H.: *Method for adjusting the spatial position of the roll axis of a motor vehicle*. Patent, 2012. – United States patent US 13/825,683
- [15] BRAESS, H.-H. ; DONGES, E.: Technologien zur aktiven Sicherheit von Personenkraftwagen - "Konsumierbare" oder echte Verbesserungen? In: *2. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*. Garching bei München, 2006
- [16] BRAESS, H.-H. ; SEIFFERT, U.: *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 4. Aufl. Vieweg+Teubner Verlag, 2005 (ATZ-MTZ-Fachbuch)
- [17] BRAESS, H.-H. ; SEIFFERT, U.: *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 7. Aufl. Vieweg+Teubner Verlag, 2013 (ATZ/MTZ-Fachbuch)
- [18] BREUER, J. ; VON HUGO, C. ; MÜCKE, S. ; TATTERSALL, S.: Nutzerorientierte Bewertungsverfahren von Fahrerassistenzsystemen. In: WINNER, H. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 3. Aufl. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2015 (ATZ/MTZ-Fachbuch), S. 183–196
- [19] BRUNKEN, C. ; SCHOMERUS, J. ; LÖPER, C. ; SCHIEBEN, A. ; KELSCH, J. ; KÖSTER, F.: Entwicklung haptischer Interaktionsmuster zur Führung hochautomatisierter Fahrzeuge über ein Steer-by-Wire-System. In: *13. Braunschweiger Symposium Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel (AAET)*. Braunschweig, 2012, S. 499–519
- [20] BUBB, H.: Analyse der Geschwindigkeitswahrnehmung im Kraftfahrzeug. In: *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 31(2) (1977), S. 103–112
- [21] BUBB, H.: Informationswandel durch das System. In: SCHMIDTKE, H. (Hrsg.): *Ergonomie*. 3. Aufl. München-Wien : Hanser Verlag, 1993

- [22] BUBB, H.: Systemergonomie. In: SCHMIDTKE, H. (Hrsg.): *Ergonomie*. 3. Aufl. München-Wien : Hanser Verlag, 1993, S. 333–390
- [23] BUBB, H.: Einführung. In: BUBB, H. (Hrsg.) ; BENGLER, K. (Hrsg.) ; GRÜNEN, R.E. (Hrsg.) ; VOLLRATH, M. (Hrsg.): *Automobilergonomie*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015 (ATZ/MTZ-Fachbuch), S. 1–26
- [24] BUBB, H.: Das Regelkreisparadigma der Ergonomie. In: BUBB, H. (Hrsg.) ; BENGLER, K. (Hrsg.) ; GRÜNEN, R. E. (Hrsg.) ; VOLLRATH, M. (Hrsg.): *Automobilergonomie*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015 (ATZ/MTZ-Fachbuch), S. 27–66
- [25] BUBB, H. ; BENGLER, K.: Fahrerassistenz. In: BUBB, H. (Hrsg.) ; BENGLER, K. (Hrsg.) ; GRÜNEN, R.E. (Hrsg.) ; VOLLRATH, M. (Hrsg.): *Automobilergonomie*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015 (ATZ/MTZ-Fachbuch), S. 525–582
- [26] BUBB, H. ; BENGLER, K. ; BREUNINGER, J. ; GOLD, C. ; HELMBRECHT, M.: Systemergonomie des Fahrzeugs. In: BUBB, H. (Hrsg.) ; BENGLER, K. (Hrsg.) ; GRÜNEN, R.E. (Hrsg.) ; VOLLRATH, M. (Hrsg.): *Automobilergonomie*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015 (ATZ/MTZ-Fachbuch), S. 259–344
- [27] BUBB, H. ; VOLLRATH, M. ; REINPRECHT, K. ; MAYER, E. ; KÖRBER, M.: Der Mensch als Fahrer. In: BUBB, H. (Hrsg.) ; BENGLER, K. (Hrsg.) ; GRÜNEN, R.E. (Hrsg.) ; VOLLRATH, M. (Hrsg.): *Automobilergonomie*. Wiesbaden : Springer Fachmedien, 2015 (ATZ/MTZ-Fachbuch), S. 67–162
- [28] BULD, S. ; KRÜGER, H.-P.: *Wirkungen von Assistenz und Automation auf Fahrerzustand und Fahrsicherheit. Projekt EMPHASIS. Abschlussbericht. Förderkennzeichen 19S98127*. Würzburg : Interdisziplinäres Zentrum für Verkehrswissenschaften, 2002
- [29] BUSCHARDT, B.: *Synthetische Lenkmomente*, Technische Universität Berlin, Diss., 2003
- [30] BUSCHARDT, B.: Synthetische Lenkmomente. In: *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 22*, 12 (2003), S. 48–72
- [31] CRAMER, S. ; LANGE, A. ; BÜLTJES, S. ; KLOHR, J.: Design Possibilities for Vehicle Roll Motions as Feedback for the Driver during Automated Driving. In: *9. International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*. Oldenburg, 2017, S. 152–157
- [32] CRAMER, S. ; MILLER, B. ; SIEDERSBERGER, K.-H. ; BENGLER, K.: Perceive the Difference: Vehicle Pitch Motions as Feedback for the Driver. In: *IEEE International*

- Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. Banff, Kanada, 2017, S. 1699–1704
- [33] CRAMER, S. ; SIEDERSBERGER, K.-H. ; BENGLER, K.: Active Vehicle Pitch Motions as Feedback-Channel for the Driver during Partially Automated Driving. In: UNIDAS E. V. (Hrsg.): *11. Workshop Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren*. Walting, 2017, S. 74–83
- [34] CSIKSZENTMIHALYI, M.: *Das Flow-Erlebnis. Jenseits von Angst und Langeweile: Im Tun aufgehen*. 8. Aufl. Stuttgart : Klett-Cotta, 1999
- [35] DAMBÖCK, D.: *Automationseffekte im Fahrzeug - von der Reaktion zur Übernahme*, Technische Universität München, Diss., 2013
- [36] DE LOOZE, M. P. ; KUIJT-EVERS, L. F. M. ; VAN DIEËN, J.: Sitting comfort and discomfort and the relationships with objective measures. In: *Ergonomics* 46 (2003), Nr. 10, S. 985–997
- [37] DIDIER, M.: *Ein Verfahren zur Messung des Komforts von Abstandsregelsystemen (ACC-Systemen)*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2006
- [38] *DIN IEC 60050-351:2014-09, Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 351: Leittechnik (IEC 60050-351:2013)*
- [39] *DIN 70000:1994-01, Straßenfahrzeuge; Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten; Begriffe (ISO 8855:1991, modifiziert)*
- [40] *DIN ISO 8855:2013-11, Straßenfahrzeuge - Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten - Begriffe (ISO 8855:2011)*
- [41] DONGES, E.: *Ein Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug*. Bd. 27. Meckenheim : Forschungsgesellschaft für Angewandte Naturwissenschaften, Forschungsinstitut für Anthropotechnik, 1977
- [42] DONGES, E.: Ein regelungstechnisches Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug. In: *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* 24 (1978), S. 98–112
- [43] DONGES, E.: Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. In: *Automobil-Industrie* 27 (1982), Nr. 2, S. 183–190
- [44] DONGES, E.: Fahrerhaltensmodelle. In: WINNER, H. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 3. Aufl. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2015 (ATZ/MTZ-Fachbuch), S. 17–26

- [45] DONNER, E. ; WINKLE, T. ; WALZ, R. ; SCHWARZ, J.: RESPONSE 3 - "Code of Practice" für die Entwicklung, Validierung und Markteinführung von Fahrerassistenzsystemen. In: *VDA Technischer Kongress*. Sindelfingen, 2007, S. 231–241
- [46] DONOHEW, B. E. ; GRIFFIN, M. J. ; QUETIN, F. ; GAUTIER, P.-E. ; CLEON, L.-M.: Predicting motion sickness on tilting-trains: application to field test results with the experimental tilting TGV. In: *6. World Congress on Railway Research (WCRR)*. Edinburgh, Schottland, 2003, S. 95–96
- [47] DSPACE GMBH (Hrsg.): *Micro Autobox II*. Paderborn: dSpace GmbH, Juni 2017. – https://www.dspace.com/shared/data/pdf/2017/dSPACE_MicroAutoBoxII_Brochure_2017-A_170703_E.pdf, abgerufen am 09.12.2017
- [48] EBELING, S. ; NEUBERT, E.: Komfort als fachübergreifendes Qualitätsmerkmal von Kraftfahrzeugen. In: *VDI-Berichte 1613* (2001), S. 95–114
- [49] ECKSTEIN, L.: *Entwicklung und Überprüfung eines Bedienkonzepts und von Algorithmen zum Fahren eines Kraftfahrzeuges mit aktiven Sidesticks*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 471. Düsseldorf : VDI-Verlag, 2001
- [50] EL JAAFARI, M. ; FORZY, J.-F. ; NAVARRO, J. ; MARS, F. ; HOC, J.-M.: User acceptance and effectiveness of warning and motor priming assistance devices in car driving. In: *European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems*. Lyon, France, 2008, S. 311–320
- [51] ELBANHAWI, M. ; SIMIC, M. ; JAZAR, R.: In the Passenger Seat: Investigating Ride Comfort Measures in Autonomous Cars. In: *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 7 (2015), Nr. 3, S. 4–17
- [52] ELBERS, C.: *Mathematische Abbildung von Kinematik und Elastokinematik aus Prüfstandsmessung*, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Diss., 2001
- [53] ENGELBRECHT, A.: *Fahrkomfort und Fahrspaß bei Einsatz von Fahrerassistenzsystemen*, Humboldt-Universität Berlin, Diss., 2013
- [54] ENGELBRECHT, A. ; ENGELN, A. ; ARNDT, S.: Unterstützung von Fahrkomfort und Fahrspaß durch Fahrerassistenzsysteme. In: *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 22*, 29 (2009), S. 451–456
- [55] ENGELN, A. ; ENGELBRECHT, A. ; KIENINGER, C.: Joy and convenience of driving. In: *4. International Congress of Traffic and Transport Psychology (ICTTP)*. Washington, D.C., USA, 2008

- [56] ENGELN, A. ; VRATIL, B.: Fahrkomfort und Fahrgenuss durch den Einsatz von Fahrerassistenzsystemen. In: SCHADE, J. (Hrsg.) ; ENGELN, A. (Hrsg.): *Fortschritte der Verkehrspsychologie: Beiträge vom 45. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Psychologie*. Wiesbaden : VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2008, S. 275–288
- [57] ENGELS, A.: *Geradeauslaufkriterien für Pkw und deren Bewertung*, Technische Universität Braunschweig, Diss., 1994
- [58] FIALA, E.: Lenken von Fahrzeugen als kybernetische Aufgabe. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 68/5 (1966)
- [59] FLEMISCH, F. ; BENGLER, K. ; BUBB, H. ; WINNER, H. ; BRUDER, R.: Towards cooperative guidance and control of highly automated vehicles : H-Mode and Conduct-by-Wire. In: *Ergonomics* 57 (2014), Nr. 3 Special Issue: SI, S. 343–360
- [60] FRÜHAUF, F.: Aktive Fahrzeugfederung. In: METTNER, M. (Hrsg.): *Elektronik im Kraftfahrzeugwesen*. 3. Aufl. Renningen : expert Verlag, 2002
- [61] FRÖHLICH, K.: *IAA Preview 2017*. Presse-Information BMW Group, September 2017. – https://www.bmwgroup.com/content/dam/bmw-group-websites/bmwgroup_com/company/downloads/de/2017/Rede_Froehlich_IAA_Preview_2017.pdf, abgerufen am 20.10.2017
- [62] FÖRSTBERG, J.: *Motion-related comfort in tilting trains*. Linköping, Schweden : Swedish National Road and Transport Research Institute, 2000 (VTI rapport 449A)
- [63] FUCHS, J.: *Beitrag zum Verhalten von Fahrer und Fahrzeug bei Kurvenfahrt*, Technische Universität München, Diss., 1993
- [64] FULLER, R.: Towards a general theory of driver behaviour. In: *Accident Analysis & Prevention* 37 (2005), Nr. 3, S. 461 – 472
- [65] GASSER, T.: *Ergebnisse der Projektgruppe Automatisierung: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung*. Bundesanstalt für Straßenwesen, 2012. – http://www.ftm.mw.tum.de/uploads/media/05_Gasser.pdf, abgerufen am 06.05.2018
- [66] GASSER, T. M. ; SEECK, A. ; SMITH, B. W.: Rahmenbedingungen für die Fahrerassistenzentwicklung. In: WINNER, H. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 3. Aufl. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2015 (ATZ/MTZ-Fachbuch), S. 27–54
- [67] GAYKO, J.: Lane Keeping Support. In: WINNER, H. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 2. Aufl. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2012 (ATZ-MTZ Fachbuch Praxis), S. 554–561

- [68] GEIGER, T.: So fährt sich der neue Audi A8. In: *Die Welt* (2017), Oktober. – <https://www.welt.de/motor/fahrberichte-tests/oberklasse/article169345963/So-faehrt-sich-der-neue-Audi-A8.html>, abgerufen am 01.03.2018
- [69] GEISER, G.: Mensch-Maschine-Kommunikation im Kraftfahrzeug. In: *Automobil-technische Zeitschrift* 87 (1985), Nr. 2, S. 77–84
- [70] GESCHIEDER, G. A.: *Psychophysics. The fundamentals*. 3. Aufl. Mahwah, NJ, USA : Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 1997
- [71] GÖHRLE, C.: *Methoden und Implementierung einer vorausschauenden Fahrwerksregelung für aktive und semi-aktive Federungssysteme*, Universität Stuttgart, Diss., 2014
- [72] GOLDSTEIN, E. B. ; IRTEL, H. ; PLATA, G.: *Wahrnehmungspsychologie. Der Grundkurs*. 7. Aufl. Berlin : Spektrum Akademischer Verlag, 2008
- [73] GRIFFIN, M. J.: *Handbook of Human Vibration*. London, Vereinigtes Königreich : Academic Press, 1996
- [74] GRIFFITHS, P. G. ; GILLESPIE, R. B.: Sharing Control Between Humans and Automation Using Haptic Interface: Primary and Secondary Task Performance Benefits. In: *Human Factors* 47 (2005), Nr. 3, S. 574–590
- [75] GRÜNWEIG, T.: S-Klasse Coupé mit Neigetechnik - Wie ist die Lage? In: *Spiegel Online* (2014), Juli. – <http://spon.de/aegyo>, abgerufen am 07.05.2018
- [76] GUNDRY, A. J.: Experiments on the detection of roll motion. In: *Aviation, Space and Environmental Medicine* 57 (1978), Nr. 5, S. 657–664
- [77] HACKEL, B.: *Untersuchung fahrdynamischer Systemgrenzen von Neigetechnik-Fahrzeugen*, Technische Universität Braunschweig, Diplomarbeit, 2014
- [78] HANDWERKER, H. O.: Allgemeine Sinnesphysiologie. In: SCHMIDT, R. F. (Hrsg.) ; SCHAIBLE, H.-G. (Hrsg.): *Neuro- und Sinnesphysiologie*. 5. Aufl. Berlin - Heidelberg : Springer, 2006 (Springer-Lehrbuch), S. 182–202
- [79] HARLOFF, T. ; REEK, F.: Verkehrssicherheit - So weit ist das autonome Fahren. In: *Süddeutsche Zeitung* (2018), März. – <http://www.sueddeutsche.de/auto/verkehrssicherheit-so-weit-ist-das-autonome-fahren-1.3913983>, abgerufen am 23.03.2018

- [80] HARRER, M.: Steering system development in premium car segment. In: *SAE Technical Paper* (2006)
- [81] HARTUNG, J. ; MERGL, C. ; BUBB, H.: Werkzeuge zur Beurteilung des statischen Sitzkomforts. In: *47. Fachausschusssitzung Anthropotechnik der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt e. V. Wolfsburg*, 2005, S. 73–90
- [82] HARTY, D.: Brand-by-Wire-A Possibility? In: *SAE Technical Paper* (2003), Nr. 2003-01-0097
- [83] HEISSING, B. ; KUDRITZKI, D. ; SCHINDLMAISTER, R. ; MAUTER, G.: Menschen-gerechte Auslegung des dynamischen Verhaltens von PKW. In: BUBB, H. (Hrsg.): *Ergonomie und Verkehrssicherheit*. München : Utz Verlag, 2000, S. 1–31
- [84] HEISSING, B. ; BRANDL, H.-J.: *Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens*. Würzburg : Vogel, 2002 (Vogel-Fachbuch)
- [85] HEISSING, B. ; ERSOY, M. ; GIES, S.: *Fahrwerkhandbuch*. 4. Aufl. Springer Vieweg, 2013 (ATZ/MTZ-Fachbuch)
- [86] HENRICHS, M.: S-Klasse-Coupé wird zum Kurvenstar. In: *VDI Nachrichten* (2014), August. – <https://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Wirtschaft/S-Klasse-Coupe-Kurvenstar>, abgerufen am 25.03.2018
- [87] HENZE, R.: Beurteilung von Fahrzeugen mit Hilfe von Fahrermodellen. In: *Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik TU Braunschweig* 7 (2004)
- [88] HOC, J.-M.: Towards a cognitive approach to human-machine cooperation in dynamic situations. In: *International Journal of Human-Computer Studies* 54 (2001), Nr. 4, S. 509 – 540
- [89] HOC, J.-M. ; YOUNG, M. S. ; BLOSSEVILLE, J.-M.: Cooperation between drivers and automation: implications for safety. In: *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 10 (2009), Nr. 2, S. 135–160
- [90] HUANG, P.: *Regelkonzepte zur Fahrzeugführung unter Einbeziehung der Bedienelementeigenschaften*, Technische Universität München, Diss., 2004
- [91] IMAR NAVIGATION GMBH (Hrsg.): *iTrace F400-E*. 3.2. St. Ingbert: iMAR Navigation GmbH, 2012. – http://imar-navigation.de/downloads/TraceRT-F400_de.pdf, abgerufen am 26.10.2017
- [92] IMMISCH, R. ; LINKE, K. ; KÜGLER, H.: Pro und Contra Neigetchnik. In: *EI - Eisenbahningenieur* 58 (2007), S. 10–17

- [93] ISO 2631-1:1997-05, *Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements (ISO 2631-3:1985)*
- [94] ISO 4138:2012-06, *Passenger cars - Steady-state circular driving behaviour - Open-loop test methods*
- [95] JORDAN, P. W.: *Designing Pleasurable Products: An Introduction to the New Human Factors*. London, Vereinigtes Königreich : Taylor & Francis, 2000
- [96] JÜRGENSOHN, T.: Bedienermodellierung. In: TIMPE, K.-P. (Hrsg.) ; JÜRGENSOHN, T. (Hrsg.) ; KOLREP, H. (Hrsg.): *Mensch-Maschine-Systemtechnik*. Düsseldorf : Symposium Publishing, 2000, S. 107–148
- [97] KEHL, S.: *Querregelung eines Versuchsfahrzeugs entlang vorgegebener Bahnen*, Universität Stuttgart, Diss., 2007
- [98] KERSCHBAUM, P. ; LORENZ, L. ; BENGLER, K.: Highly automated driving with a decoupled steering wheel. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 58 (2014), Nr. 1, S. 1686–1690
- [99] KÖHLER, L. ; MERGL, C. ; BLÄSE, D. ; BENGLER, K.: Fahrerbeanspruchung im urbanen Raum. Erhebung der subjektiven Beanspruchung des Fahrers bei Kreuzungsüberquerung. In: *VDI-Berichte* 2205 (2013), S. 237–250
- [100] KINGDOM, F. A. A. ; PRINS, N.: *Psychophysics: A Practical Introduction*. London, Vereinigtes Königreich : Academic Press, 2010 (Elsevier science & technology books)
- [101] KONIK, D. ; BARTZ, R. ; BÄRNTHOL, F. ; BRUNS, H. ; WIMMER, M.: Dynamic Drive - das neue aktive Wank-Stabilisierungssystem der BMW Group. In: *9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*. Aachen, 2000, S. 471–490
- [102] KRAJEWSKI, J.: *Lenkradbewegungsbasierte Müdigkeitserkennung*. Vortrag, 2012. – http://www.dlr.de/fs/Portaldata/16/Resources/dokumente/vk/Vortrag_Krajewski_091112.pdf, abgerufen am 04.01.2018
- [103] KRANKE, F. ; STAUSS, H.-J.: *Forschungsinitiative INVENT. Schlussbericht VM2010 zu dem Teilprojekt: VLA - Verkehrsleitungsassistentz. Förderkennzeichen 19P1071F*. Wolfsburg : Volkswagen AG, 2006
- [104] KRISHER, T.: Autodrive automobiles on the horizon. In: *The New York Times* (2008), Januar. – <http://www.nytimes.com/2008/01/07/business/worldbusiness/07iht-07cars.9046708.html>, abgerufen am 13.10.2017

- [105] LANGE, A.: *Entwicklung eines Lenkwinkelreglers auf Basis einer Momentenschnittstelle*, Technische Universität München, Diplomarbeit, 2012
- [106] LANGE, A.: *Gestaltung der Fahrdynamik beim Fahrstreifenwechselmanöver als Rückmeldung für den Fahrer beim automatisierten Fahren*, Technische Universität München, Diss., 2018
- [107] LANGE, A. ; ALBERT, M. ; SIEDERSBERGER, K.-H. ; BENGLER, K.: Ergonomic design of the vehicle motion in an automated driving car. In: *Procedia Manufacturing* 3 (2015), S. 2761–2768
- [108] LANGE, A. ; MAAS, M. ; ALBERT, M. ; SIEDERSBERGER, K.-H. ; BENGLER, K.: Automatisiertes Fahren - So komfortabel wie möglich, so dynamisch wie nötig. In: *VDI-Berichte 2223* (2014), S. 1–14
- [109] LANGE, C.: *Wirkung von Fahrerassistenz auf der Führungsebene in Abhängigkeit der Modalität und des Automatisierungsgrades*, Technische Universität München, Diss., 2008
- [110] LEE, J. W. ; LITKOUHI, B.: A unified framework of the automated lane centering/changing control for motion smoothness adaptation. In: *IEEE 15. International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Anchorage, AK, USA, 2012, S. 282–287
- [111] LEMARCHAND, C. ; COFFIN, F.: Conception method of man machine interface for an automotive vehicle transversal driving assistance system. In: *1. world congress on applications of transport telematics and intelligent vehicle-highway systems* Bd. 4. Paris, Frankreich, 1994, S. 1820 – 1827
- [112] LUNZE, J.: Reglerentwurf anhand des PN-Bildes des geschlossenen Kreises. In: LUNZE, J. (Hrsg.): *Regelungstechnik 1*. 10. Aufl. Berlin - Heidelberg : Springer, 2014, S. 389–421
- [113] LUTZ, H. ; WENDT, W.: *Taschenbuch der Regelungstechnik*. 7. Aufl. Berlin : Harri Deutsch, 2007
- [114] MAIER, F.: *Fahrerassistenzsysteme in der Fahrausbildung*, Technischen Universität München, Diss., 2014
- [115] MAURER, M.: Entwurf und Test von Fahrerassistenzsystemen. In: WINNER, H. (Hrsg.) ; HAKULI, S. (Hrsg.) ; WOLF, G. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2009

- [116] MCRUER, D. T. ; KLEIN, R. H.: *Automobile Controllability - Driver/vehicle Response for Steering Control. Volume I - Summary Report. Final Report.* Springfield, USA : National Technical Information Service, 1975
- [117] MCSHANE, D.: *Driving on Highway A6 as it curves away from Madrid, Spain.* Bild, . – ©David McShane/123rf.com (https://de.123rf.com/profile_pixelthat). https://de.123rf.com/photo_2655515_driving-on-highway-a6-as-it-curves-away-from-madrid-spain-.html, abgerufen am 27.03.2018
- [118] MEIER, G. ; ROPPECKER, G. ; WURMTHALER, C.: Automatic lateral vehicle guidance using tracking control - a modular approach to separate driver- and vehicle-dependent dynamics. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Parma, Italien, 2004, S. 145–149
- [119] MEYER, M.: Leser fragen - Experten antworten: Wann das ESP ausschalten? In: *Die Welt* (2014), August. – <https://www.welt.de/motor/news/article130984258/Leser-fragen-Experten-antworten.html>, abgerufen am 20.03.2018
- [120] MEYWERK, M. ; AYKENT, B. ; TOMASKE, W.: *Forschungsprogramm Straßenverkehrstechnik. Einfluss der Fahrdynamikregelung auf die Sicherheit von NI-Fahrzeugen bei unterschiedlichen Beladungszuständen. Abschlussbericht-Teil 1: Grundlagen, Unfallstatistik, Abstütz- und Beladungseinrichtung, Fahrzeugdatenermittlung. Im Auftrag der BASt, Auftrags-Nr. FE 82.329/2007.* Hamburg : Institut für Fahrzeugtechnik und Antriebssystemtechnik. Universität der Bundeswehr Hamburg, 2009
- [121] MITSCHKE, M. ; WALLENTOWITZ, H.: *Dynamik der Kraftfahrzeuge.* 5. Aufl. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014 (VDI-Buch)
- [122] MÜLLER, C.: *Aktive Fahrwerksregelung zur Reduktion der Quereschleunigung,* Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, 2010
- [123] MÜLLER, C.: *Verfahren zum Betrieb eines zur automatischen Führung eines Kraftfahrzeugs ausgebildeten Fahrerassistenzsystems und Kraftfahrzeug.* 2016. – DE Patent 102,015,009,217
- [124] MÜLLER, C. ; SIEBER, M. ; SIEDERSBERGER, K.-H. ; POPP, M. ; FÄRBER, B.: Aktives Wanken als Kommunikationskanal. In: UNI-DAS E.V. (Hrsg.): *11. Workshop Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren.* Walting, 2017, S. 84–93

- [125] MÜLLER, C. ; SIEDERSBERGER, K.-H. ; FÄRBER, B. ; POPP, M.: Aktive Aufbaueinigung als Rückmeldekanal bei Querführungsassistenz über entkoppelte Lenkaktorik. In: *VDI-Berichte* 2288 (2016), S. 395–409
- [126] MÜLLER, C. ; SIEDERSBERGER, K.-H. ; FÄRBER, B. ; POPP, M.: *Aktive Aufbaueinigung als Rückmeldekanal bei Querführungsassistenz über entkoppelte Lenkaktorik*. 2016. – Vortrag auf 32. VDI/VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und automatisiertes Fahren, Wolfsburg
- [127] MÜLLER, C. ; SIEDERSBERGER, K.-H. ; FÄRBER, B. ; POPP, M.: Aktive Aufbaueinigung als Rückmeldekanal bei Querführungsassistenz über entkoppelte Lenkaktorik. In: *Forschung im Ingenieurwesen* 81 (2017), Nr. 1, S. 41–55
- [128] MÜLLER, T. A.: *Ermittlung vestibulärer Wahrnehmungsschwellen zur zielgerichteten Gestaltung der Fahrzeug-Längsdynamik*, Technische Universität München, Diss., 2015
- [129] MULDER, M. ; ABBINK, D. A. ; BOER, E. R.: Sharing Control With Haptics: Seamless Driver Support From Manual to Automatic Control. In: *Human Factors* 54 (2012), Nr. 5, S. 786–798
- [130] MURAGISHI, Y. ; FUKUI, K. ; ONO, E.: Development of a Human Sensitivity Evaluation System for Vehicle Dynamics. In: *AutoTechnology* 7 (2007), Nr. 6, S. 56–58
- [131] N., N.: *Audi Q7: Praediktiver Effizienzassistent*. Bild, . – https://www.audi-technology-portal.de/files/videos/Audi-Q7_Praediktiver-Effizienzassistent-ohne-ACC_720p_H264_DE_thumb_3.jpg, abgerufen am 26.10.2017
- [132] N., N.: *Blick ins neue A4-Cockpit mit "Virtual Cockpit" und entschlacktem MMI-System*. Bild, . – http://i.auto-bild.de/ir_img/1/2/3/0/2/8/2/Audi-A4-Teaser-560x373-aa0dfbec3694afb0.jpg, abgerufen am 22.02.2018
- [133] N., N.: *Direct adaptive steering*. Medieninformation, Nissan Motor Co., Ltd, . – http://nissannews.com/media_storage/images/Infiniti_Q50_Direct_Adaptive_Steering.pdf, abgerufen am 19.03.2018
- [134] N., N.: *Dynamiklenkung, Audi AG*. Bild, . – https://www.audi-technology-portal.de/files/videos/07_Dynamiklenkung_DEU_thumb_1.jpg, abgerufen am 26.10.2017

- [135] N., N.: *EU-Richtlinien und Sichtfeldklassen*. Ergersheim : Vortrag der MEKRA Lang GmbH & Co. KG, . – https://www.mekra.de/fileadmin/upload_images/FE_images/PRODUKTE/EU-Umruestung/EURichtlinienSichtfeldklassen.pdf, abgerufen am 15.01.2018
- [136] N., N.: *Fahrassistenz und Sicherheit - Aktiver Totwinkel-Assistent*. – <https://www.mercedes-benz.at/passengercars/mercedes-benz-cars/models/c-class/c-class-estate/explore/intelligent-technologies/blind-spot-assistance.popup.html>, abgerufen am 27.03.2018
- [137] N., N.: *Heck des Audi S5 Coupé 2016*. Bild, . – <http://www.motorsport-total.com/auto/fotos-videos/galerien/news/2016/audi-a5-und-s5-2016/die-revolution-muss-warten/s1/c40/d1/p1/z0/1465290673/16audia5s5>, abgerufen am 22.02.2018
- [138] N., N.: *How to drop in a halfpipe with a skateboard*. Bild, . – <https://www.wikihow.com/Drop-in-on-a-Halfpipe-With-a-Skateboard#/Image:Drop-in-on-a-Halfpipe-With-a-Skateboard-Step-6.jpg>, abgerufen am 22.02.2018
- [139] N., N.: *iTrace F400-E, iMAR Navigation GmbH*. Bild, . – <http://www.cbil.co.uk/files/8813/0260/6895/TraceRT-F400.jpg>, abgerufen am 26.10.2017
- [140] N., N.: *Lenkrad Audi RS4*. Bild, . – <https://neidfaktor.com/>, abgerufen am 16.08.2016
- [141] N., N.: *Multi Purpose Camera Gen.1, Robert Bosch GmbH*. Bild, . – https://http://www.mogi.bme.hu/TAMOP/jarmurendszerek_iranyitasa_angol/images/image_41.jpeg, abgerufen am 26.10.2017
- [142] N., N.: *Querkräftfreies Fahren, Audi AG*. Bild, . – <https://p5.focus.de/img/fotos/origs1171593/4704174322-w496-h331-o-q75-p5/So-will-Audi-der-Reisekrankheit-ein-Schnippchen-schlagen.jpg>, abgerufen am 14.01.2018
- [143] N., N.: *Radarsensor audi side assist*. Bild, . – <https://www.kufatec.de/shop/media/images/popup/40920.jpg>, abgerufen am 26.10.2017
- [144] N., N.: *Video-Spurassistent, Citroën S.A.*. – <http://www.citroen.de/technologie/video-spurassistent.html>, abgerufen am 21.03.2018
- [145] N., N.: *"weh-ren", Duden*. – <https://www.duden.de/node/706966/revisions/1397685/view>, abgerufen am 29.06.2018

- [146] N., N.: *Richtlinien für die Anlage von Straßen - Teil: Linienführung (RAS-L)*. Köln : FGSV, 1995
- [147] N., N.: Autofahrer ab 2018 überflüssig. In: *Spiegel Online* (2008), Januar. – <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/plaene-des-gm-chefs-autofahrer-ab-2018-ueberfluessig-a-527135.html>, abgerufen am 20.10.2017
- [148] N., N.: *Mercedes-Benz CL-Klasse Modelljahr 2010. Active Body Control (ABC): Aktives Fahrwerk, das die Federung binnen Sekundenbruchteilen an die jeweilige Fahrsituation anpasst und Seitenwind ausgleichen kann*. Presse-Information Daimler AG, September 2010. – <http://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/picture.xhtml?oid=7449278>, abgerufen am 26.12.2017
- [149] N., N.: *Mercedes-Benz Intelligent Drive: Das Auto lernt denken*. Presse-Information Daimler AG, Juli 2014. – <http://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Mercedes-Benz-Intelligent-Drive-Das-Auto-lernt-denken.xhtml?oid=9904946>, abgerufen am 14.01.2018
- [150] N., N.: *AUDI A8 - AUDI AI STAUPILOT*. Presse-Information AUDI AG, Juli 2017. – <https://www.audi-technology-portal.de/de/download?file=1683>, abgerufen am 20.03.2018
- [151] N., N.: *Audi Technology Portal - Elektrik/Elektronik - Fahrerassistenzsysteme*. 2017. – <https://www.audi-technology-portal.de/de/elektrik-elektronik#filter=fahrerassistenzsysteme>, abgerufen am 20.10.2017
- [152] N., N.: *Drive Me*. 2017. – <https://www.testsitesweden.com/en/projects-1/driveme>, abgerufen am 20.10.2017
- [153] N., N.: *Waymo - FAQ*. 2017. – <https://waymo.com/faq/>, abgerufen am 20.10.2017
- [154] NEUKUM, A.: Bewertung des Fahrverhaltens im Closed Loop - Zur Brauchbarkeit des korrelativen Ansatzes. In: BECKER, K. (Hrsg.): *Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen II. Korrelation zwischen objektiver Messung und subjektiver Beurteilung von Versuchsfahrzeugen und Komponenten* Bd. 12. Renningen : expert, 2002, S. 1–20
- [155] NEUKUM, A. ; KRÜGER, H.-P.: Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungsmethodik und Bewertungskriterien. In: *VDI-Berichte 1791* (2003), S. 297–318

- [156] NEWBERRY, A. C. ; GRIFFIN, M. J. ; DOWSON, M.: Driver perception of steering feel. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 221 (2007), Nr. 4, S. 405–415
- [157] NOLL, A. ; AMENT, C.: Konzeption und Entwicklung eines Preview-Systems zur Verbesserung der Komforteigenschaften und der Reichweiteneffizienz eines Fahrzeugs mit geregelten Vertikaldynamiksystemen auf Basis von Backend-Daten. In: *VDI-Berichte* 2288 (2016), S. 63–81
- [158] OHNO, T.: Steering Control on a Curved Course. In: *SAE Review. Japan* 20/5 (1966)
- [159] PENKA, A.: *Vergleichende Untersuchung zu Fahrerassistenzsystemen mit unterschiedlichen aktiven Bedienelementen*, Technische Universität München, Diss., 2001
- [160] PETERMANN-STOCK, I. ; HACKENBERG, L. ; MUHR, T. ; MERGL, C.: Wie lange braucht der Fahrer? Eine Analyse zu Übernahmezeiten aus verschiedenen Nebentätigkeiten während einer hochautomatisierten Staufahrt. In: *6. Tagung Fahrerassistenzsysteme*. München, 2013
- [161] PFEFFER, P. ; HARRER, M.: *Lenkungs-handbuch*. 2. Aufl. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2013 (ATZ/MTZ-Fachbuch)
- [162] PÖPPEL, E.: *Grenzen des Bewußtseins: wie kommen wir zur Zeit, und wie entsteht Wirklichkeit?* 2. Aufl. Insel-Verlag, 2000 (Insel-Taschenbuch)
- [163] RATHGEBER, C.: *Trajektorienplanung und -folgeregelung für assistiertes bis hochautomatisiertes Fahren*, Technische Universität Berlin, Diss., 2016
- [164] RAU, Magnus: *Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik mittels Verspannungslenkung*, Universität Stuttgart, Diss., 2007
- [165] REICHARDT, D.: *Kontinuierliche Verhaltenssteuerung eines autonomen Fahrzeugs in dynamischer Umgebung*, Universität Kaiserslautern, Diss., 1996
- [166] RHEINBERG, F.: *Motivation*. 5. Aufl. Stuttgart : Kohlhammer, 2004
- [167] RHEINBERG, F.: Intrinsische Motivation und Flow-Erleben. In: HECKHAUSEN, J. (Hrsg.) ; HECKHAUSEN, H. (Hrsg.): *Motivation und Handeln*. 3. Aufl. Berlin - Heidelberg : Springer, 2006 (Springer-Lehrbuch), S. 331–354
- [168] RIEDEL, A. ; ARBINGER, R.: Ergänzende Auswertungen zur subjektiven und objektiven Beurteilung des Fahrverhaltens von PKW. In: *FAT-Schriftenreihe* Bd. 161. Frankfurt a.M. : FAT, 2000

- [169] ROCKWELL, T. H.: Eye Movement Analysis of Visual Information Acquisition in Driving: An Overview. In: *paper presented at North Carolina State University, Raleigh* (1971)
- [170] ROSETTER, E. J.: *a potential field framework for active vehicle lanekeeping assistance*, Stanford University, CA, USA, Diss., 2003
- [171] SAE INTERNATIONAL: *Automated driving levels of driving automation are defined in new SAE international standard J3016*. Broschüre, 2014. – https://www.smmmt.co.uk/wp-content/uploads/sites/2/automated_driving.pdf, abgerufen am 15.03.2018
- [172] SAE, *J3016:2016-09, Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*
- [173] SATO, H. ; HARAGUCHI, J. ; OSAWA, I.: Experimental Analysis of Steering Response Characteristics and Steering Feeling. In: *Japan SAE Review* 44 (1990), Nr. 3, S. 52–58
- [174] SCHIFFMAN, H. R.: *Sensation and perception: An integrated approach*. 5. Aufl. New York, USA : John Wiley & Sons, 2001
- [175] SCHMID, W. ; MEITINGER, K.-H. ; KUNSCH, P. ; GLASER, H.: Twin - A Revolutionary Approach for Active Toe and Camber Regulation. In: *19. Aachener Kolloquium*. Aachen, 2010, S. 1617–1636
- [176] SCHMIDT, G. F.: *Haptische Signale in der Lenkung: Controllability zusätzlicher Lenkmomente*, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Diss., 2009
- [177] SCHMIEDHOFER, K.: *Verfahren zum Erkennen einer Steuerungssituation eines Fahrzeugs mit einem automatischen Steuerungssystem*. 2018. – DE Patent 102,017,200,713
- [178] SCHNEIDER, M. ; SIEBER, M. ; FÄRBER, B.: CAPLOS - Compressed Air Powered Lateral Obstacle Simulator. In: *Proceedings of the International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems - Volume 1: VEHITS*. Rom, Italien, 2016, S. 71–78
- [179] *Kapitel Kollisionsvermeidung durch Ausweichen und Bremsen - AUDI AG*. In: SCHOLL, W. (Hrsg.): *Die Demonstratoren. Forschungsprojekt UR:BAN. Abschlusspräsentation. Förderkennzeichen 19S12008B*. Düsseldorf, 2015, S. 33

- [180] SCHUMANN, J. ; GODTHELP, J. ; HOEKSTRA, W.: An Exploratory Simulator Study on the Use of Active Control Devices in Car Driving. In: *TNO Institute for Perception. Soesterberg, Niederlande* (1992)
- [181] SCHWEIGERT, M.: *Fahrerblickverhalten und Nebenaufgabe*, Technische Universität München, Diss., 2003
- [182] SIEBEL, T.: Europäer sehen autonomes Fahren kritisch. In: *Springer Professional - Onlineartikel* (2017), Januar. – <https://www.springerprofessional.de/automatisiertes-fahren/mobilitaetskonzepte/europaer-sehen-autonomes-fahren-kritisch-/12015430>, abgerufen am 20.03.2018
- [183] SIEBER, M. ; SCHNEIDER, M. ; SIEGEL, A. ; SIEDERSBERGER, K.-H. ; FÄRBER, B.: Wirksamkeit von Ausweichempfehlungen in Kombination mit Teilbremsung beim Notausweichen. In: UNI-DAS E.V. (Hrsg.): *10. Workshop Fahrerassistenzsysteme*. Walting, 2015, S. 39–49
- [184] SIEBER, M. ; SIEDERSBERGER, K. H. ; A., Siegel ; B., Färber: Automatic Emergency Steering with Distracted Drivers: Effects of Intervention Design. In: *IEEE 18. International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Las Palmas de Gran Canaria, Spanien, 2015, S. 2040–2045
- [185] SIMMERMACHER, D.: *Objektive Beherrschbarkeit von Gierstörungen in Bremsmanövern*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2013
- [186] SIVAK, M.: The Information That Drivers Use: Is it Indeed 90% Visual? In: *Perception* 25 (1996), Nr. 9, S. 1081–1089
- [187] STEMMER, M. G.: *Energetische und funktionale Vernetzung von aktiven Lenksystemen*, Technische Universität München, Diss., 2013
- [188] STEWARD, J. D.: Human perception of Angular Acceleration and Implications in Motion Simulator. In: *Journal of Aircraft* 8 (1971), Nr. 4, S. 248–253
- [189] SUZUKI, H.: Research trends on riding comfort evaluation in Japan. In: *Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 212 (1998), Nr. 1, S. 61–72
- [190] SUZUKI, K. ; JANSSON, H.: An analysis of driver's steering behaviour during auditory or haptic warnings for the designing of lane departure warning system. In: *JSAE review* 24 (2003), Nr. 1, S. 65–70

- [191] SWITKES, J. P.: *Handwheel force feedback with lanekeeping assistance: combined dynamics, stability and bounding*, Stanford University, CA, USA, Diss., 2006
- [192] TAKAHASHI, A. ; HONGO, T. ; NINOMIYA, Y. ; SUGIMOTO, G.: Local Path Planning And Motion Control For Agv In Positioning. In: *Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Tsukuba, Japan, 1989, S. 392–397
- [193] THOMÄ, A. ; GILSDORF, H. J. ; MÜNSTER, M. ; MAIR, U. ; MÜLLER, C. ; HIPPO, M. ; HOFFMAN, J.: Electromechanical Semi-Active Body control. In: *FISITA Congress*. München, 2008
- [194] TISCHLER, M. A. ; RENNER, G.: Ansatz zur Messung von positivem Fahrerleben - Die Messung von Fahrspaß und Ableitungen für die Fahrzeuggestaltung. In: *VDI-Berichte 2015 (2007)*, S. 105–117
- [195] TODA, Y. ; KAGEYAMA, I.: Measuring a Driver's Pleasure during Driving. In: *Review of automotive engineering* 28 (2007), Nr. 1, S. 89–93
- [196] TOMASKE, W.: *Einfluß der Bewegungsinformation auf das Lenkverhalten des Fahrers sowie Folgerungen für die Auslegung von Fahrsimulatoren*, Hochschule der Bundeswehr Hamburg, Diss., 1983
- [197] TOMASKE, W. ; FORTMÜLLER, T.: Der Einfluss von Wahrnehmungsschwellen auf die Auslegung von Bewegungssystemen in der Fahrsimulation. In: GÄRTNER, K.-P. (Hrsg.) ; GRANDT, M. (Hrsg.): *Human Factors bei der Entwicklung von Fahrzeugen. Anhang 1 zum DGLR-Bericht Bd. 2001/6*. Bonn : Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt, 2001
- [198] VAN DER HULST, M. ; MEIJMAN, T. F. ; ROTHENGATTER, J. A.: Maintaining task set under fatigue: A study of time-on-task effects in simulated driving. In: *Transportation Research. Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 4 (2001), S. 103 – 118
- [199] VERGARA, M. ; PAGE, A.: System to measure the use of the backrest in sitting-posture office tasks. In: *Applied ergonomics* 31 (2000), Nr. 3, S. 247–254
- [200] WALLENTOWITZ, H.: *Vertikal-, Querdynamik von Kraftfahrzeugen*. 4. Aufl. Aachen : IKA Institut für Kraftfahrwesen, 2000 (Schriftenreihe Automobiltechnik)
- [201] WALLISER, G.: *Elektronik im Kraftfahrzeugwesen: Steuerungs-, Regelungs- und Kommunikationssysteme*. 4. Aufl. Renningen : expert-Verlag, 2004 (Kontakt & Studium)

- [202] WALTER, M. ; FECHNER, T. ; HELLMANN, W. ; THIEL, R.: Lane Departure Warning. In: WINNER, H. (Hrsg.) ; HAKULI, S. (Hrsg.) ; WOLF, G. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 2. Aufl. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2012, S. 543–553
- [203] WERLING, M. ; ZIEGLER, J. ; KAMMEL, S. ; THRUN, S.: Optimal trajectory generation for dynamic street scenarios in a Frenét Frame. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2010, S. 987–993
- [204] WICKENS, C. D.: Multiple resources and performance prediction. In: *Theoretical Issues in Ergonomics Science* (2002), S. 159–177
- [205] WINNER, H. ; WACHENFELD, W. ; JUNIETZ, P.: (How) can Safety of Automated Driving be Validated? In: *9. Grazer Symposium Virtuelles Fahrzeug (GSVF)*. Graz, Österreich, 2016. – http://www.fzd.tu-darmstadt.de/media/fachgebiet_fzd/publikationen_3/2016_5/2016_Wi_Wf_Ju_ViV-Symposium_Graz.pdf, abgerufen am 20.10.2017
- [206] WOLF, H. J.: *Ergonomische Untersuchung des Lenkgefühls an Personenkraftwagen*, Technische Universität München, Diss., 2009
- [207] YIH, P.: *Steer-by-Wire: Implications for vehicle handling and safety*, Stanford University, CA, USA, Diss., 2005
- [208] YUHARA, N. ; HORIUCHI, S. ; ASANUMA, N. ; NISHI, Y. ; KOHATA, T.: Improvement of vehicle handling quality through active control of steering reaction torque. In: *International Symposium on Advanced Vehicle Control*. Yokohama, Japan, 1992
- [209] YUHARA, N. ; TAJIMA, J. ; SANO, S. ; TAKIMOTO, S.: Steer-by-Wire-Oriented Steering System Design: Concept and Examination. In: *Vehicle System Dynamics Supplement* 33 (1999), S. 692–703
- [210] ZELLER, P. (Hrsg.): *Handbuch Fahrzeugakustik*. 2. Aufl. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2012 (ATZ/MTZ-Fachbuch)
- [211] ZHANG, L. ; HELANDER, M. G. ; DRURY, C. G.: Identifying Factors of Comfort and Discomfort in Sitting. In: *Human Factors* 38 (1996), Nr. 3, S. 377–389