

Forschungsprojekt

UR:BAN – Mensch im Verkehr

Schlussbericht

**Beitrag des
Zuwendungsempfängers:** Institut für Kraftfahrzeuge Aachen (ika)
Steinbachstr. 7
52074 Aachen

zu den Teilprojekten: KON – Kontrollierbarkeit
SIM – Simulation
UF – Urbanes Fahren

Laufzeit: 01.04.2012 – 31.03.2016

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen **19S12009N** gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Aachen, 30.09.2016

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN -	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel Forschungsprojekt UR:BAN – Mensch im Verkehr ika-Schlussbericht		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Pütz, Andreas Kotte, Jens	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.03.2016	
	6. Veröffentlichungsdatum 30.09.2016	
	7. Form der Publikation Bericht	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Institut für Kraftfahrzeuge (ika) RWTH Aachen University Steinbachstr. 7 52074 Aachen	9. Ber. Nr. Durchführende Institution 16ap0032	
	10. Förderkennzeichen 19S12009N	
	11. Seitenzahl 84	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 21	
	14. Tabellen 6	
	15. Abbildungen 67	
16. Zusätzliche Angaben -		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) TÜV Rheinland Consulting GmbH, Köln, 30.09.2016		
18. Kurzfassung Im Rahmen des Förderprojekts UR:BAN Mensch im Verkehr beteiligte sich das ika an den Teilprojekten Kontrollierbarkeit (KON), Simulation (SIM) und Urbanes Fahren (UF). Im Teilprojekt Kontrollierbarkeit lag der Fokus der Arbeiten auf der Untersuchung des Einflusses durch den Verkehrsraum durch den Fahrer auf der Kontrollierbarkeit systeminitiiierter Lenkeingriffe zum Notausweichen. Ein weiterer Arbeitspunkt war die systematische Betrachtung des Zielkonflikts zwischen Kontrollierbarkeit, Wirksamkeit und Akzeptanz mit dem Ziel, eine einseitige Optimierung im Sinne der Kontrollierbarkeit zu vermeiden. Im Teilprojekt Simulation stand die Untersuchung der Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion im Vordergrund. Insbesondere wurde hierbei das Querungsverhalten von Fußgängern in Abhängigkeit verschiedener Randbedingungen (Vorhandensein von Querungshilfen, Typ des sich nähernden Fahrzeugs, etc.) betrachtet. Neben diesen inhaltlichen Aspekten wurde das methodische Vorgehen zur gefahrlosen Untersuchung der Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion im kontrollierten Feld thematisiert. Im Teilprojekt Urbanes Fahren wurde durch das Bereitstellen geeigneter Dokumente für die Versuchsdokumentation die Transparenz und Systematisierung der Datenerhebungen im Gesamtprojekt MV zu erhöhen. Der Bericht dokumentiert die durchgeführten Arbeiten und stellt die wichtigsten Ergebnisse in den einzelnen Teilprojekten dar.		
19. Schlagwörter Kontrollierbarkeit, Verkehrsraumeinfluss, Zielkonflikt Wirksamkeit, Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion, Querungsverhalten		
20. Verlag -	21. Preis -	

Inhalt

1. Teilprojekt Kontrollierbarkeit.....	3
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	3
1.2 Arbeitspaketstruktur und Inhalte	3
1.3 Ergebnisdokumentation	5
1.3.1 AP 1000 Problembereiche und bisherige methodische Zugänge.....	5
1.3.2 AP 2000 Empirische Darstellung prototypischer Anordnungen	12
1.3.3 AP 3000 Determinanten der Kontrollierbarkeit und ihre Gestaltung	27
1.3.4 AP 4000 Lösungsansätze und Empfehlungen	39
2. Teilprojekt Simulation.....	44
2.1 Problemstellung und Zielsetzung	44
2.2 Arbeitspaketstruktur und Inhalte	44
2.3 Ergebnisdokumentation	45
2.3.1 AP 1000 Handlungsbedarf und Vorgehensweise	45
2.3.2 AP 2000 Empirie und Versuche	50
2.3.3 AP 3000 Datenanalyse und Modellierung.....	61
2.3.4 AP 4000 Bewertung und Demonstration.....	74
3. Teilprojekt Urbanes Fahren.....	77
3.1 Problemstellung und Zielsetzung	77
3.2 Arbeitspaketstruktur und Inhalte	77
3.3 Ergebnisdokumentation	78
3.3.1 AP 1000: Potenzialanalyse und Systematik.....	78
3.3.2 AP 2000: Potenzialbewertung.....	81

4. Literatur.....84

1. Teilprojekt Kontrollierbarkeit

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Ziel des Teilprojekts *Kontrollierbarkeit* war die Untersuchung der Beherrschbarkeit von Systemen, die den Fahrer im urbanen Umfeld bei der Erfüllung der Fahraufgabe unterstützen. Hierbei stand insbesondere die Prüfung des bestehenden Methodeninventars auf seine Anwendbarkeit für urbane Assistenzsysteme im Vordergrund. Diese verfolgte das Ziel, eine einheitliche methodische Grundlage für Systeme mit Fokus auf zeitkritischen Situationen zu erarbeiten, um diese valide und effizient absichern zu können. Das urbane Umfeld zeichnet sich im Vergleich zu bisherigen Anwendungsschwerpunkten von Assistenzsystemen durch eine höhere Informationsdichte aus, die der Fahrer wahrnehmen und verarbeiten muss. Zudem steht dem Fahrer häufig nur ein engerer Verkehrsraum für eine mögliche Fehlerkompensation zur Verfügung. Der stärkeren räumlichen Einschränkung steht jedoch auch eine mögliche höhere Aktivierung des Fahrers gegenüber, welche sich positiv auf die Kontrollierbarkeit auswirken könnte. Es gilt daher abzuschätzen, wie diese räumlichen Einschränkungen Einfluss auf die Fahrerreaktion in Kontrollierbarkeitssituationen nimmt.

Der aktuelle Stand der Technik im Bereich der Kontrollierbarkeitsprüfung wird dominiert durch die ISO 26262 sowie den Code of Practice (CoP) des RESPONSE 3 Projekts. Diese beiden Richtlinien finden daher häufig Anwendung für den Kontrollierbarkeitsnachweis von z.B. systeminitiierten Eingriffen. Jedoch ist in der Vergangenheit häufig auch eine Verknüpfung von der Untersuchung inhaltlicher Problemstellungen und gleichzeitiger Methodenentwicklung zu beobachten gewesen. Ein übergreifendes Konzept für die Kontrollierbarkeitsprüfung besteht also nicht. Insgesamt wurden daher zwei Zielsetzungen verfolgt:

- 1) Systematisierung von vorhandenem Wissen
- 2) Erarbeitung methodischer Leitlinien

Im Folgenden sind die aus diesen übergeordneten Zielen abgeleiteten Arbeitspaketinhalte dargestellt und operationalisiert. Die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspunkte werden anschließend detailliert dargestellt, um so eine Gegenüberstellung mit den zuvor beschriebenen Zielsetzungen zu ermöglichen.

1.2 Arbeitspaketstruktur und Inhalte

Das AP 1000 *Problembereiche und bisherige methodische Zugänge* dient dem ersten Ziel der Systematisierung von vorhandenem Wissen. Insgesamt werden im Rahmen dieses AP's drei Arbeitspunkt adressiert:

- 1) Systematisierung und Abgrenzung der Definitionen der Kontrollierbarkeit: Trotz des Mangels an einer übergeordneten Konzeption für die Kontrollierbarkeitsevaluierung existieren unterschiedliche Definitionen über den Umfang des Kontrollierbarkeitsbegriffs. Unterschiede ergeben sich durch die Berücksichtigung oder Nicht-Berücksichtigung einzelner Use Cases von Systemen. Ziel ist jedoch nicht die Zusammenfassung oder Ergänzung der bestehenden Begriffsdefinitionen, sondern eine anwendungsnahe Einordnung der in KON bearbeiteten Inhalte in diesen Kontext, um eine klare Ausrichtung und Abgrenzung zu ermöglichen.
- 2) Darstellung des Zielkonflikts zwischen Wirksamkeit, Beherrschbarkeit und Akzeptanz: Da bei der Bewertung der Kontrollierbarkeit eine einseitige Optimierung für eine dieser Interaktionsdimensionen vermieden werden soll, gilt es den bestehenden Zielkonflikt zunächst darzustellen, um ihn im weiteren Projektverlauf geeignet adressieren zu können.
- 3) Entwicklung einer Fahrerleistungsdatenbank zur Abschätzung der Kontrollierbarkeit: Um für neu entwickelte Systeme eine erste Kontrollierbarkeitsabschätzung zu ermöglichen, kann in der Regel auf bestehende Erkenntnisse aus der Literatur zurückgegriffen werden. Dabei ist es wichtig, die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse mithilfe der Versuchsbedingungen zu prüfen. Die Fahrerleistungsdatenbank zielt daher darauf ab, bestehende Literatur der in KON behandelten Thematik zu systematisieren und so „weiße Felder“ zu identifizieren, in denen noch Forschungsbedarf besteht.

Für das AP 2000 *Empirische Darstellung prototypischer Anordnungen* wird der Bedarf nach ergänzenden Versuchen durch die Fahrerleistungsdatenbank festgelegt. Das Ziel für dieses Arbeitspaket ist daher gezielt noch wenig untersuchte Fragestellungen zu adressieren, um so die Fahrerleistungsdatenbank mit Daten anzureichern. Der Versuch soll dazu im kontrollierten Testfeld durchgeführt und anschließend mithilfe von automatisierten Skripten ausgewertet werden.

Mit dem Eintritt in das AP 3000 *Determinanten der Kontrollierbarkeit und ihre Gestaltung* werden die untersuchten Einflüsse auf ihre Bedeutung für die Beherrschbarkeit durch den durchschnittlichen Fahrer analysiert. Dabei ergeben sich folgende zwei Arbeitspunkte und die damit verbundenen Ziele:

- 1) Eine objektive Beschreibung der Unterschiede hinsichtlich des verfügbaren Verkehrsraums zwischen dem urbanen Umfeld und dem bisherigen Anwendungsschwerpunkt von Assistenzsystemen. Ziel dieses Arbeitspunktes ist es, die erforderliche Reaktionszeit und -stärke in Abhängigkeit des verfügbaren Verkehrsraums abschätzen zu können. Durch die Verknüpfung mit den im AP 2000 erhobenen Versuchsdaten kann zudem die Kontrollierbarkeit der im Versuch betrachteten Eingriffe in einem urbanen Umfeld abgeschätzt werden. Dabei gilt es mögliche Einschränkung hinsichtlich der Verallgemeinerbarkeit der hierzu erzielten Ergebnisse zu berücksichtigen.
- 2) Die im AP 1000 beschriebene Wechselwirkung zwischen Wirksamkeit, Beherrschbarkeit und Akzeptanz soll systematisch beschrieben werden, um eine statistische Analyse der Wechselwirkung dieser Interaktionsdimensionen zu ermöglichen. Es soll der Versuch unternommen werden, eine (theoretische) numerische Beschreibung dieser Wechselwirkung vorzunehmen, um einen Rückschluss auf die erforderliche Soll-Fahrerleistung im Fall einer Kontrollierbarkeitssituation zu ermöglichen. Wie bei der objektiven Beschreibung des Verkehrsraums müssen hierbei Einschränkungen der Allgemeinheit berücksichtigt werden, um über zu treffende Annahmen eine numerische Beschreibung realisieren zu können.

Ein weiteres übergeordnetes Ziel des AP 3000 ist die geeignete Dokumentation über die Determinanten der Kontrollierbarkeit, um die im Teilprojekt KON gesammelten Erkenntnisse auf einfache Weise kommunizieren zu können und so eine weite Wissensverbreitung zu erreichen.

Dieser Arbeitspunkt markiert den Übergang ins AP 4000 *Lösungsansätze und Empfehlungen*. Im Rahmen des gesamten Teilprojekts werden zahlreiche Versuche in verschiedenen Versuchsumgebungen mit unterschiedlichen Schwerpunkten durchgeführt. Um abschließend ein konsistentes Bild zu garantieren, werden die in den Datenerhebungen gewonnenen Erkenntnisse miteinander abgeglichen und gemeinsame Lösungsansätze und Empfehlungen erarbeitet.

Ein konkretes Ziel ist dabei, geeignete Verbreitungswege für diese zu finden. Einer dieser Wege ist der projektbegleitende Expertenkreis, welcher in regelmäßigen Abständen dazu dient, einerseits die gesammelten Ergebnisse vorzustellen und andererseits Feedback hierzu in die Projektarbeit einfließen zu lassen. Während der Expertenkreis und das AP 5000 zum Projektmanagement parallel über die gesamte Projektlaufzeit laufen, werden die inhaltlichen Arbeitspakete sequenziell mit kurzen Überlappungsabschnitten bearbeitet (siehe Abb. 1-1)

	Quartale															
	Jahr 1				Jahr 2				Jahr 3				Jahr 4			
Arbeitspakete	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
AP1000 Problembereiche																
AP2000 Empirische Darstellung																

AP3000 Determinanten der Kontrollierbarkeit																			
AP4000 Lösungsansätze und Empfehlungen																			
AP5000 Projektmanagement																			

Abb. 1-1: Zeitplan für das Teilprojekt Kontrollierbarkeit

1.3 Ergebnisdokumentation

1.3.1 AP 1000 Problembereiche und bisherige methodische Zugänge

1.3.1.1 Systematisierung und Abgrenzung der Definitionen der Kontrollierbarkeit

Eine Recherche unterschiedlicher Definitionen des Begriffs Kontrollierbarkeit zeigt, dass kein einheitliches Verständnis über die darin enthaltenen Umfänge besteht. Dabei unterscheiden sich die Definitionen vor allem darin, welche Gebrauchsfälle in die Kontrollierbarkeitsbetrachtung mit einbezogen werden. Die Diskussionen im Rahmen des Teilprojekts führten zu dem Konsens, die bestehende Vielfalt an Begriffsdefinitionen nicht um eine weitere zu ergänzen, sondern das in KON genutzte Verständnis von Kontrollierbarkeit in den Fokus zu stellen. Ein zentraler Diskussionspunkt war dabei die Berücksichtigung des Nutzenfalls, welcher auch im Sinne der gemeinsamen Betrachtung von Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit mit analysiert werden sollte. Insgesamt wurde festgehalten, dass in KON *sicherheitskritisches Fahrerverhalten bei der Interaktion mit FAS* untersucht werden sollte. Der Fokus wurde dabei auf *Systemeingriffe in zeitkritischen Situationen* gelegt (z. B. Lenkeingriffe eines Systems für das Notausweichen). Die dabei betrachteten Gebrauchsfälle umfassen Systemgrenze, Systemfehler, Fehlgebrauch sowie den Nutzenfall (siehe Abb. 1-2).

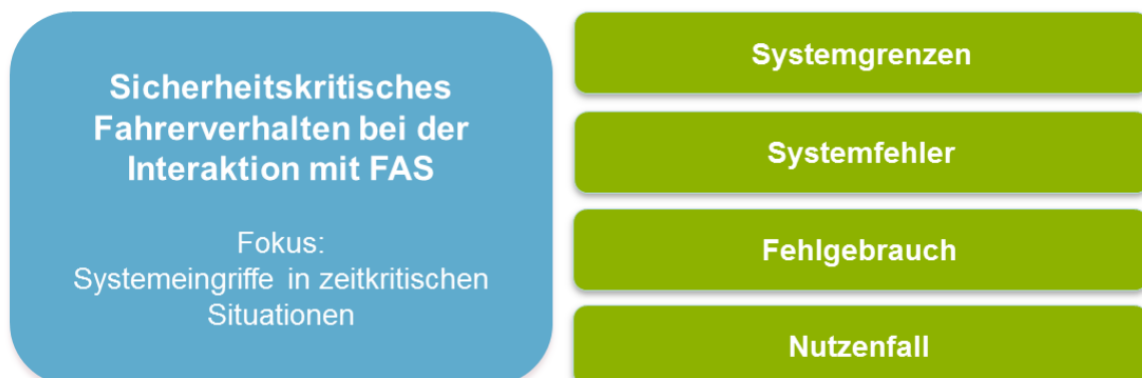


Abb. 1-2: Im Teilprojekt KON betrachtete Aspekte der Beherrschbarkeit

1.3.1.2 Darstellung des Zielkonflikts zwischen Wirksamkeit, Beherrschbarkeit und Akzeptanz

Das urbane Umfeld bietet großes Potenzial zur Verbesserung der Verkehrssicherheit. Fahrerassistenzsysteme, die hierzu einen Beitrag leisten, agieren in einem Umfeld aus komplexen Fahrsituationen im Hinblick auf Infrastruktur, Anzahl der Verkehrsteilnehmer sowie deren Interaktion. Die steigende Komplexität der Szenarien führt auch zu einer Steigerung der Komplexität der FAS. Generell besteht ein Spannungsfeld zwischen der Wirksamkeit bei der Vermeidung von Unfällen und der Kontrollierbarkeit der Systeme durch den Fahrer. Dieser Zielkonflikt wurde im Rahmen des AP 1000 zunächst näher beleuchtet und anschließend im AP 3000 durch eine systematische Betrachtung derart adressiert, dass ein Denkanstoß für die gemeinsame Berücksichtigung dieser Interaktionsdimensionen im Entwicklungsprozess geliefert werden kann (vgl. Kap. 1.3.3).

Beschreibung des Zielkonflikts

Das urbane Verkehrsgeschehen zeichnet sich im Vergleich zu Landstraßen und Autobahnen durch unterschiedliche Randbedingungen aus. Zum einen kommt es durch die Vielzahl an unterschiedlichen Verkehrsteilnehmern zu einer höheren Frequenz von Ereignissen, auf die der Fahrer angemessen reagieren muss. Zum anderen erfordern diese Ereignisse komplexere Lösungsstrategien mit häufig engeren Zeitfenstern für Reaktionen. Soll der Fahrer in solchen Situationen wirksam durch ein FAS unterstützt werden, erfordert dies ggf. starke Systemreaktionen mit geringerer Vorwarnzeit. Dies bedeutet wiederum, dass der Fahrer beim Auftreten von Systemfehlern oder -grenzen weniger Zeit hat, diese Situationen zu kontrollieren. Daher rückt für urbane FAS bei deren Entwicklung der Zielkonflikt zwischen Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit verstärkt in den Vordergrund.

Dieser Zielkonflikt zwischen Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit lässt sich am Beispiel einer automatischen Notbremsung verdeutlichen: Eine Erhöhung der maximalen systembedingten Verzögerung führt im Nutzenfall (z. B. aufgrund eines plötzlich auftauchenden Hindernisses) zu einem größeren Abbau der Geschwindigkeit und erhöht somit die Wirksamkeit bei der Unfallverhinderung bzw. der Unfallfolgenminderung. Gleichzeitig kann sich die stärkere Fahrzeugreaktion auf die Übersteuerungsmöglichkeit durch den Fahrer bei einer ungerechtfertigten Auslösung aus Sicht des Fahrers auswirken. Daher ist es wichtig bei der Entwicklung von urbanen FAS das Verhältnis aus Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit zu berücksichtigen.

Eine isolierte Betrachtung bzw. eine einseitige Optimierung der Kontrollierbarkeit oder der Wirksamkeit ist also nicht sinnvoll [1]. Neben Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit ist für die optimale Systemauslegung auch die Akzeptanz eines Systems durch den Nutzer mit zu berücksichtigen. Der Fokus im Rahmen der Diskussion des Zielkonflikts im TP KON lag auf dem Zielkonflikt zwischen Kontrollierbarkeit und Wirksamkeit. Dazu wurde untersucht, wie die Wirksamkeit im Rahmen der Kontrollierbarkeitsbewertung mit berücksichtigt werden kann.

Ursachen des Zielkonflikts

Eine Ursache für den Zielkonflikt aus Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit ist die Unterstützung der sicheren Fahrzeugführung durch ein zusätzlich zum Fahrer auf das Fahrzeug einwirkendes technisches Assistenzsystem in Verbindung mit der Forderung des „Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr“, dass jeder Fahrer zu jederzeit sein Fahrzeug beherrschen muss: Diese Forderung des Wiener Übereinkommens könnte bei der Entwicklung eines FAS eine Optimierung zugunsten maximaler Wirksamkeit beeinträchtigen. So ist bei der Gestaltung eines Systems stets die Kontrollierbarkeit zu berücksichtigen. Eine automatisierte, nicht fahrerinitiierte Übertragung der Kontrolle über das Fahrzeug an das System, wie sie in bestimmten kritischen Situationen zur Steigerung der Wirksamkeit nötig bzw. sinnvoll wäre, ist daher unter den oben genannten Aspekten zu prüfen. Daher muss aufgrund der aktuellen Rechtslage vom Hersteller ein geeigneter Kompromiss bei der Gestaltung eines FAS gefunden werden. Detaillierte Ausführungen der rechtlich zu berücksichtigen Aspekte finden sich in [2].

Als eine weitere Ursache für den auftretenden Zielkonflikt kann die nicht unter allen Umständen mit hundertprozentiger Zuverlässigkeit mögliche Umfelderkennung und -interpretation der FAS gesehen werden. Wäre durch die Umfelderkennung eine vollständige Erfassung der Fahrzeugumgebung und korrekte Interpretation der Fahrsituation gewährleistet, so würde sich die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Systemfehlern und -grenzen reduzieren. Da die Voraussetzungen einer hundertprozentig korrekten Umfelderkennung nicht erfüllt sind, sind bei der Entwicklung von FAS Vorkehrungen zu treffen, damit eine Systemreaktion durch den Fahrer, der die Situation ggf. besser interpretieren kann, überstimmt werden kann.

Ziele der Berücksichtigung des Zielkonflikts in KON

Die Problematik, dass Systeme, die zur Steigerung der Sicherheit im Straßenverkehr in Fahrzeugen verbaut werden, in speziellen Einzelfällen auch negative Effekte hervorrufen können, beschränkt sich nicht nur auf den Bereich der FAS. Auch bei passiven Sicherheitssystemen, wie Sicherheitsgurt oder Airbag, können in speziellen Einzelfällen, beispielsweise bei falscher Sitzposition des Fahrers, Effekte entstehen, die bei einem Nicht-Vorhandensein des Systems nicht aufgetreten wären. Die Übertragbarkeit der zuvor genannten Ausführungen auf FAS ist jedoch nur bedingt möglich, da im Unterschied zu den genannten passiven Systemen durch eingreifende FAS zum Beispiel auch eine potenzielle Gefährdung Dritter denkbar ist.

Die zuvor dargelegten Aspekte machen deutlich, dass es sich der Zielkonflikt im Rahmen des Teilprojekts KON nicht vollständig gelöst werden kann, sondern mit dem in Kap. 1.3.3 beschriebenen Denkanstoß ein Beitrag für die gemeinsame Berücksichtigung von Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit bei der Kontrollierbarkeitsbewertung im Sinne maximaler Fahrsicherheit geleistet werden kann.

1.3.1.3 Fahrerleistungsdatenbank

Die Kontrollierbarkeit eines FAS ist unmittelbar an die vom Fahrer in der betrachteten Situation umsetzbaren Leistungsfähigkeit gekoppelt. Dabei kommt es durch interindividuelle Unterschiede zu sehr unterschiedlichen Bewertung der Auswirkung von Systemfehlern oder -grenzen. Die Fahrerleistungsdatenbank stellt daher ein Werkzeug dar, welches seinem Nutzer ermöglichen soll, die Leistungsfähigkeit verschiedener Fahrer in einer bestimmten Situation einzuschätzen und den Einfluss der dabei auftretenden Randbedingungen zu bestimmen. Hierzu werden zunächst die Verwendungsmöglichkeiten dieses Werkzeugs dargestellt, um anschließend das Vorgehen zur Erstellung der Fahrerleistungsdatenbank vorzustellen.

Verwendungsmöglichkeiten

Mithilfe der Fahrerleistungsdatenbank werden zwei übergeordnete Ziele verfolgt. Dies ist zum einen die Möglichkeit, den Einfluss verschiedener Randbedingungen bei der Interaktion eines Fahrers mit einem Fahrerassistenzsystem auf die Fahrerleistung zu untersuchen. Hierzu wurde der aktuelle Kenntnisstand aus dokumentierten Experimenten zur Kontrollierbarkeit derart aufbereitet, dass der Nutzer einen schnellen Überblick erhält, welche Erkenntnisse über den Einfluss einer von ihm gewählten Randbedingungen auf die Fahrerleistung bereits vorliegen. Zudem kann dieser Überblick genutzt werden, Forschungsbedarf für künftige Studien zu identifizieren.

Zum anderen kann die Fahrerleistungsdatenbank ihrem Nutzer helfen, die Fahrerleistung in einem bestimmten Szenario abzuschätzen. Auch hierzu wurde zunächst auf den aktuellen Kenntnisstand aus bereits veröffentlichter Literatur zurückgegriffen. Die Abschätzung der Fahrerleistung in einem bestimmten Szenario liefert so Anhaltspunkte zur Entwicklung erster Systemkonzepte, indem erste Abschätzungen der Kontrollierbarkeit eines FAS ermöglicht werden. Hierzu wird das zu untersuchende Szenario durch verschiedene Größen beschrieben und mit dem aktuellen Kenntnisstand abgeglichen, um dem Nutzer die Suche nach bestehenden Erkenntnissen zu erleichtern. Nachfolgend sind die Verwendungsmöglichkeiten der Fahrerleistungsdatenbank stichpunktartig zusammengefasst.

1. Den Einfluss verschiedener Randbedingungen auf die Fahrerleistung abschätzen
 - Sammlung bisheriger Kenntnisse zur Kontrollierbarkeit
 - Identifizierung von Forschungsbedarf für künftige Studien
2. Die Fahrerleistung in einer spezifischen Situation abschätzen
 - Anhaltspunkte zur Entwicklung erster Systemkonzepte
 - Erste Abschätzung der Kontrollierbarkeit von FAS

Vorgehen zur Erstellung der Fahrerleistungsdatenbank

Das Vorgehen zur Erstellung der Fahrerleistungsdatenbank unterteilt sich in drei Schritte (vgl. Abb. 1-3): Zunächst wurden Versuche aus den berücksichtigten Quellen der Literatur zu Kontrollierbarkeitsuntersuchungen durch ein einheitliches Schema beschrieben und in die Fahrerleistungsdatenbank integriert. In einem zweiten Schritt wurde eine kurze Übersicht über bestehende Ansätze zur Modellierung der Regeltätigkeit des Menschen generiert und ein geeignetes Modell ausgewählt, welches durch seine Modellparameter auf möglichst einfache Weise die zentralen Aspekte der Fahrerleistung kategorisiert, um so den abstrakten Begriff der Fahrerleistung zu operationalisieren. Im dritten Schritt wurde ein Modell zur Kategorisierung der Fahrerleistung ausgewählt und die Ergebnisse der in Schritt 1 betrachteten Versuche mithilfe des ausgewählten Fahrermodells gegliedert. Dazu wurden die in den Versuchen betrachteten Größen zur Fahrerleistungsbewertung den Modellparametern zugeordnet.

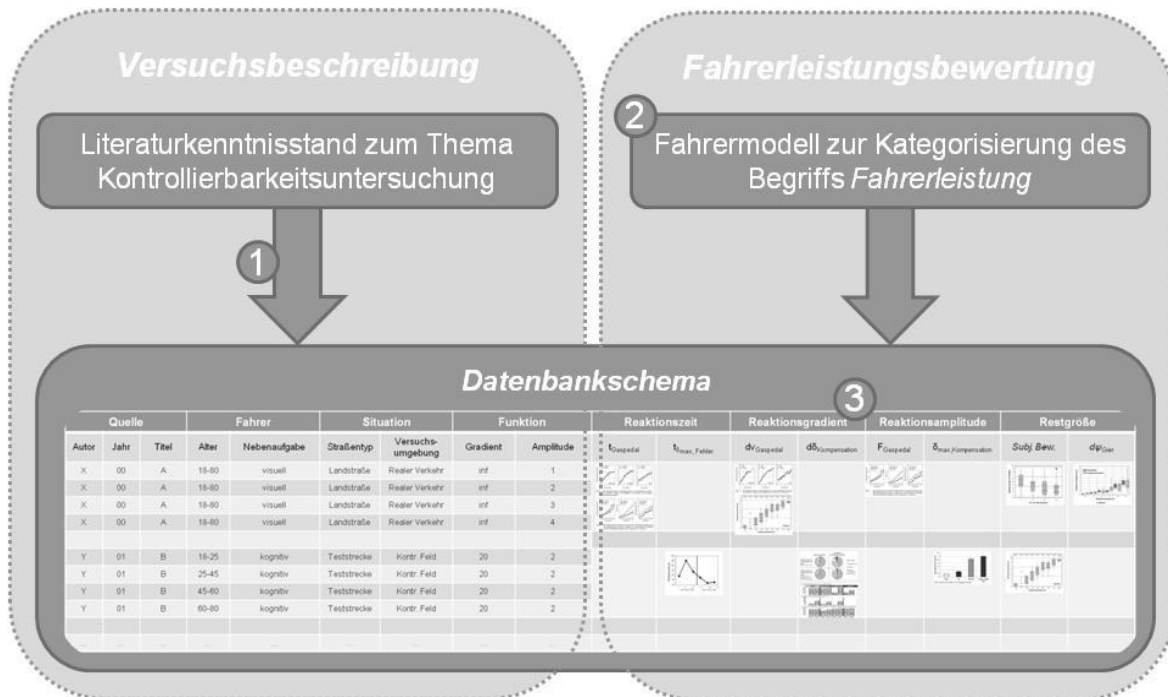


Abb. 1-3: Methodisches Vorgehen zur Erstellung der Fahrerleistungsdatenbank

Schritt 1

Als Basis für die Erstellung der Fahrerleistungsdatenbank diente ein als Status Quo der empirischen Befunde definierter Literaturbestand von ca. 30 Quellen. Die in den Quellen beschriebenen Versuche wurden durch ein einheitliches Schema beschrieben, welches sich an der Beschreibung des Assistenzszenarios aus dem Teilprojekt UF (vgl. Kap. 0) orientiert. Das für die Fahrerleistungsdatenbank gewählte Schema unterteilt sich daher in die Kategorien *Fahrer*, *Situation* und *Funktion*. Innerhalb dieser Kategorien werden versuchsbeschreibende Größen genutzt, um das durch die Prüfanordnung dargestellte Szenario näher zu beschreiben. Die genannten Kategorien werden im Folgenden mit einigen ihrer Größen kurz beispielhaft beschrieben; eine detaillierte Auflistung der Größen (inklusive der verwendeten Einheiten) findet sich im Anhang des KON AP 1000 Berichts.

Kategorien und Größen (Spalten): Die Größen zur **Fahrer**-Beschreibung bestehen aus den in den entsprechenden Quellen enthaltenen Angaben zum untersuchten Probandenkollektiv. Dies sind zum einen Fahrer-eigenschaften wie Alter oder Geschlecht, zum anderen Angaben zur Fahrerfahrung (Dauer des Führerscheinbesitzes oder Kilometerleistung) sowie zum Fahrerszustand (z.B. Ablenkung durch Nebentätigkeiten). Die Kategorie **Situation** enthält die relevanten Größen zur Beschreibung der Fahrsituation, wie sie sich den Probanden in den Versuchen darstellt. Dies sind zum Beispiel das durchzuführende Fahrmanöver, die dabei

gefahrenen Geschwindigkeit oder auch der befahrene Straßentyp. Hinzu kommt die Darstellung der Beteiligung weiterer, relevanter Verkehrsteilnehmer am Versuch sowie der Versuchsumgebung (Fahrsimulator, Real-Test, etc.). Größen zur Beschreibung der im Versuch eingesetzten Funktion (bzw. des FAS) finden sich in der Kategorie **Funktion**. Hierbei ist zu beachten, dass nicht alle Kontrollierbarkeitsuntersuchungen sich auf ein bestimmtes FAS beziehen müssen, sondern teilweise nur die relevanten Aspekte für die zu betrachtende Fahrerreaktion im Versuch dargestellt werden (z.B. Amplitude des Lenkmomentes eines Spurhalteassistenten).

Versuchsreihen (Zeilen): In die Fahrerleistungsdatenbank werden die in den berücksichtigten Quellen beschriebenen Versuchsreihen und deren Ergebnisse (in Form von Diagrammen) aufgenommen. Wurde zum Beispiel in einem Versuch die Amplitude der getesteten Funktion oder das Alter des untersuchten Probandenkollektivs variiert, so wird für jede untersuchte Amplituden- bzw. Altersstufe eine Zeile in der Datenbank ergänzt (vgl. Abb. 1-4). Sind für einen Versuch bzw. eine Versuchsreihe bestimmte Größen der Kategorien nicht in den berücksichtigten Quellen angegeben, so bleiben die entsprechenden Einträge im Datenbankschema leer.

Quelle			Fahrer		Situation		Funktion	
Autor	Jahr	Titel	Alter	Nebenaufgabe	Straßentyp	Versuchsumgebung	Gradient	Amplitude
X	00	A	18-80	visuell	Landstraße	Realer Verkehr	inf	1
X	00	A	18-80	visuell	Landstraße	Realer Verkehr	inf	2
X	00	A	18-80	visuell	Landstraße	Realer Verkehr	inf	3
X	00	A	18-80	visuell	Landstraße	Realer Verkehr	inf	4
Y	01	B	18-25	kognitiv	Teststrecke	Kontr. Feld	20	2
Y	01	B	25-45	kognitiv	Teststrecke	Kontr. Feld	20	2
Y	01	B	45-60	kognitiv	Teststrecke	Kontr. Feld	20	2
Y	01	B	60-80	kognitiv	Teststrecke	Kontr. Feld	20	2
...

Abb. 1-4: Beispielhafter Auszug des Datenbankschemas zur Versuchsbeschreibung

Die Diagramme zur Wiedergabe der Versuchsergebnisse werden zunächst ohne Gliederung den Quellen zugeordnet. Ihre Gliederung erfolgt mithilfe der im Folgenden beschriebenen Kategorisierung des Begriffs *Fahrerleistung*.

Schritt 2

Die Kategorisierung der Fahrerleistung wurde in der Fahrerleistungsdatenbank mithilfe eines Fahrermodells vorgenommen. Der abstrakte Begriff *Fahrerleistung* wurde so in operationalisierbare Kategorien eingeteilt. Ziel war es daher, ein möglichst einfaches Modell für das menschliche Regelungsverhalten auszuwählen, dessen Modellparameter bei der Bewertung der Fahrerleistung leicht identifizierbar sind. Es zeigte sich, dass aufgrund seiner Allgemeinheit und Einfachheit das Cross-Over-Modell gute Voraussetzungen bietet, die Ergebnisse unterschiedlicher Versuchsarten zu inhaltlich zu gliedern. Als Kategorien wurden dabei die Reaktionszeit, sowie der Gradient und die Amplitude der Fahrerreaktion mit den Modellparametern assoziiert. Die in den betrachteten Quellen untersuchten Leistungsindikatoren wurden diesen Kategorien zugeordnet. Somit ergibt sich analog zur Strukturierung der Versuchsbeschreibung auch für die Bewertung der Fahrerleistung eine Gliederung in Kategorien und Größen (vgl. Abb. 1-5). Da nicht alle fahrerleistungsbewertende Größen den gewählten Kategorien zur Fahrerleistungsbewertung zugeordnet werden können, wurde eine weitere „Rest“-Kategorie eingeführt, welcher diese Leistungsindikatoren zugeordnet werden.

	Versuchsbeschreibung	Fahrerleistungsbewertung
Kategorien	Quelle, Fahrer, Situation, System	Reaktionszeit, Reaktionsgradient, Reaktionsamplitude, Restgröße
Größen	Autor, ..., Alter, ..., Manöver, ..., Systemstatus, ...	Zeit bis zur Gaspedalbetätigung, ..., Gaspedalgeschwindigkeit, ..., max. Pedalkraft, ..., subjektive Bewertung, ...

Abb. 1-5: Vergleich der Strukturierung von Versuchsbeschreibung und Fahrerleistungsbewertung

Schritte 3

Nach der Integration aller Quellen des Status Quo der empirischen Befunde wurde die Fahrerleistungsdatenbank dazu genutzt, eine Übersichtsmatrix zu erstellen, welche Quellen den Einfluss der versuchsbeschreibenden Größen auf die verschiedenen Aspekte der Fahrerleistung zum Untersuchungsgegenstand gemacht haben. Diese Matrix wurde anschließend durch die Bestimmung von „weißen Feldern“ (Bereiche innerhalb der Matrix, in der keine Erkenntnisse aus der Literatur vorliegen; durch blaue Rahmen markiert in Abb. 1-6 bis Abb. 1-8) zur Identifizierung von Forschungsbedarf eingesetzt und diente somit als Grundlage für die Versuchsinhalte des AP 2000. Die Matrix inklusive der identifizierten weißen Felder sind (der Übersichtlichkeit halber) in Abb. 1-6, Abb. 1-7 und Abb. 1-8 zu sehen. Als Untersuchungsgegenstand wurde der Einfluss des Verkehrsraums auf die Fahrerleistung als inhaltlicher Schwerpunkt gewählt. Als zweiter inhaltlicher Aspekt wurde die Fahrerreaktion auf systeminitiierte Lenkeingriffe eines Systems für das Notausweichen identifiziert.

		Fahrer					
		Alter	Geschlecht	Führerscheinbesitz	Fahrleistung	Erlebnishäufigkeit	Nebenaufgaben
Fahrerleistung	Reaktionsamplitude	Neukum 2003 Neukum 2008a Neukum 2008b Schmidt 2009 Switkes 2006 Wallentowitz 2002	Neukum 2003 Neukum 2008a Neukum 2008b Wallentowitz 2002	Neukum 2008b		Bender 2008 Neukum 2008a	Tijerina 2000
	Reaktionsgradient	Neukum 2003 Neukum 2008a Neukum 2008b Schmidt 2009	Neukum 2003 Neukum 2008a Neukum 2008b	Neukum 2008b		Bender 2008	
	Reaktionszeit	Bender 2008 Neukum 2003 Neukum 2008a Neukum 2008b Schmidt 2009 Switkes 2006	Bender 2008 Neukum 2003 Neukum 2008a Neukum 2008b	Neukum 2008b		Bender 2008 Neukum 2008a Niederée 2009	Tijerina 2000
	Gesamt/weitere Aspekte	Bender 2008 Färber 2005 Fecher 2008 Jamson 2005 Marberger 2007 Neukum 2003 Neukum 2008a Neukum 2008b Neukum 2009b Neukum 2010b Neukum 2010c Schmidt 2009 Sommer 2009 Switkes 2006 Wallentowitz 2002	Bender 2008 Fecher 2008 Marberger 2007 Neukum 2003 Neukum 2008a Neukum 2008b Neukum 2009b Neukum 2010b Neukum 2010c Schmidt 2006 Sommer 2009 Wallentowitz 2002	Jamson 2005 Neukum 2008b	Jamson 2005 Neukum 2010a	Bender 2008 Neukum 2008a Neukum 2008b Neukum 2010b Niederée 2009 Sommer 2009	Tijerina 2000
		Fahrerfahrung (Lang-/Kurzzeit)					bast

Abb. 1-6: Übersichtsmatrix der Fahrerleistungsdatenbank (Ausschnitt Kategorie „Fahrer“)

		Funktion											
		Ebene der Fahraufgabe	Rückmelde- modalität	Interventions- tiefe	Informations-/ Warnzeitpunkt	Status	Ereignis	Längs/quer	Vorzeichen	Signal- charakteristik	Amplitude	Aufschaltdauer	Gradient
Fahrerleistung	Reaktionsamplitude			Bender 2008 Niederée 2009	Kobiela 2010	Schmidt 2009 Switkes 2006	Kobiela 2010 Schmitt 2006 Tijerina 2000			Neukum 2009b Neukum 2010a Schmidt 2009 Schumann 1994 Switkes 2006	Neukum 2003 Neukum 2008b Neukum 2009b Neukum 2010a Neukum 2010c Schmidt 2009 Switkes 2006 Tijerina 2000	Neukum 2010a Wallentowitz 2002	Schmidt 2009
	Reaktionsgradient		MMMI-Größen	Bender 2008					Schmidt 2009	Neukum 2009b Neukum 2010a Schmidt 2009	Neukum 2008b Neukum 2010a Neukum 2010c Schmidt 2009 Switkes 2006	Neukum 2010a Neukum 2010b	Schmidt 2009
	Reaktionszeit			Niederée 2009	Kobiela 2010	Switkes 2006	Kobiela 2010 Tijerina 2000			Neukum 2010a Schmidt 2009 Schumann 1994 Switkes 2006	Kobiela 2010 Neukum 2010a Neukum 2010c Schmidt 2009 Switkes 2006 Tijerina 2000	Neukum 2010a Tijerina 2000	
	Gesamt/weitere Aspekte			Färber 2005 Neukum 2010c	Bender 2008 Niederée 2009	Kobiela 2010	Schmidt 2009 Switkes 2006	Färber 2005 Fecher 2008 Kleen 2009 Kobiela 2010 Schmitt 2006 Sommer 2009 Tijerina 2000	Bender 2008 Schumann 1994	Neukum 2010a Schmidt 2009	Neukum 2009b Neukum 2010a Schmidt 2009 Schumann 1994 Switkes 2006	Bender 2008 Fecher 2008 Kobiela 2010 Neukum 2003 Neukum 2008b Neukum 2009b Neukum 2010a Neukum 2010b Neukum 2010c Schmidt 2009 Tijerina 2000	Neukum 2003 Neukum 2009b Neukum 2010a Neukum 2010b Schumann 1993 Tijerina 2000 Wallentowitz 2002
Wirkrichtung													

Abb. 1-7: Übersichtsmatrix der Fahrerleistungsdatenbank (Ausschnitt Kategorie „Funktion“)

		Situation														
		Straßentyp	Gegen- verkehr	Verkehrs- dichte	Fahrstreifen- anzahl	Fahrstreifen- nummer	Fahrstreifen- breite	Hindernis	Wetter	Fahrbahn	Geschwindig- keit	Fahr- manöver	Fahrzeug- eigenschaften	Kurvenradius	Versuchs- umgebung	
Fahrerleistung	Reaktionsamplitude		Kleen 2009								Neukum 2003 Neukum 2010a Schmidt 2009 Switkes 2006 Wallentowitz 2002	Schmidt 2009 Switkes 2006	Neukum 2008b Schmidt 2009	Schmidt 2009	Neukum 2010a	
	Reaktionsgradient										Neukum 2010a	Schmidt 2009	Jamson 2005 Neukum 2008b Neukum 2010b Schmidt 2009		Methodischer Einfluss	
	Reaktionszeit										Neukum 2010a	Switkes 2006	Schmidt 2009			
	Gesamt/weitere Aspekte		Kleen 2009									Neukum 2003 Neukum 2008b Neukum 2009b Neukum 2010a Neukum 2010b Schmidt 2009 Schumann 1994 Switkes 2006 Wallentowitz 2002	Neukum 2003 Neukum 2010b Wallentowitz 2002 Schmidt 2009 Switkes 2006	Fecher 2008 Jamson 2005 Neukum 2008b Neukum 2010c Schmidt 2009		Schmidt 2009
zur Verfügung stehender Verkehrsraum																
Witterung																
Radius																

Abb. 1-8: Übersichtsmatrix der Fahrerleistungsdatenbank (Ausschnitt Kategorie „Situation“)

Mithilfe des vorgestellten Vorgehens konnten so die inhaltlichen Schwerpunkte für die im Folgenden beschriebene Datenerhebung festgelegt werden.

1.3.2 AP 2000 Empirische Darstellung prototypischer Anordnungen

Wie zuvor dargestellt wurde im Rahmen des AP 1000 der Bedarf identifiziert, den Einfluss von räumlichen Einschränkungen auf die Fahrerleistung bei kurzfristigen Lenkeingriffen für das Notausweichen zu untersuchen. Zudem sind auch die Fahrerreaktion bei berechtigten und unberechtigten Systemeingriffen sowie der Einfluss von Abbruchmöglichkeiten (aufgrund der längeren Eingriffsdauer) Gegenstand der Datenerhebung und sollen Erkenntnisse zu folgenden damit verbundenen Fragestellungen liefern:

- Fahrerreaktion bei unberechtigten Systemeingriffen
 - Welche Fahrerreaktionen treten bei unberechtigten Systemeingriffen auf?
 - Wie ändert sich die Fahrerreaktion wiederholten unberechtigten Systemeingriffen?
 - Kommt es bei unberechtigten Systemeingriffen durch hohe Lenkradmomente dazu, dass der Fahrer die Kontrolle über das Lenkrad verliert?
- Fahrerreaktion bei berechtigten Systemeingriffen
 - Welche Fahrerreaktionen treten bei berechtigten Systemeingriffen auf?
 - Wirkt der Fahrer bei berechtigten Systemeingriffen als Störgröße für den Eingriff?
 - Woran kann der Zeitpunkt der Entscheidung des Fahrers, den Eingriff nicht zu übersteuern festgemacht werden?
 - Wie ändert sich die Fahrerreaktion bei wiederholten berechtigten Systemeingriffen?
- Berücksichtigung von Abbruchkriterien
 - Kann die Beherrschbarkeit von unberechtigten Systemeingriffen durch die Verwendung einer Abbruchbedingung erhöht werden?
 - An welchen Parametern kann die Übersteuerungsabsicht des Fahrers festgemacht werden?
 - Nach welcher Zeit kann die Übersteuerungsabsicht des Fahrers erkannt werden?
- Einfluss des Verkehrsraums auf die Fahrerleistung
 - Welchen Einfluss haben räumliche Einschränkungen (z.B. durch andere Verkehrsteilnehmer, Hindernisse, etc.) auf die Fahrerleistung?
 - Ergeben sich hierbei Unterschiede zwischen berechtigten und unberechtigten Systemeingriffen?

Im Folgenden wird zunächst ein kurzer Überblick über die zur Untersuchung dieser Fragestellungen gewählte Versuchsanordnung gegeben. Anschließend werden die wichtigsten Ergebnisse zu den oben genannten Fragestellungen dargestellt.

1.3.2.1 Versuchsanordnung

Um die zuvor genannten Fragestellungen zu untersuchen, wurde eine Realfahrzeugstudie mit N=26 Probanden durchgeführt. Dazu wurden drei unterschiedliche Szenarien auf der ika-Teststrecke in Aachen definiert. Neben einer 2,5 m breiten Pylonengasse wurden zwei weitere Szenarien aufgebaut, in denen unter anderem auch die Fahrerreaktion bei berechtigten Systemeingriffen für das Notausweichen untersucht werden konnte.

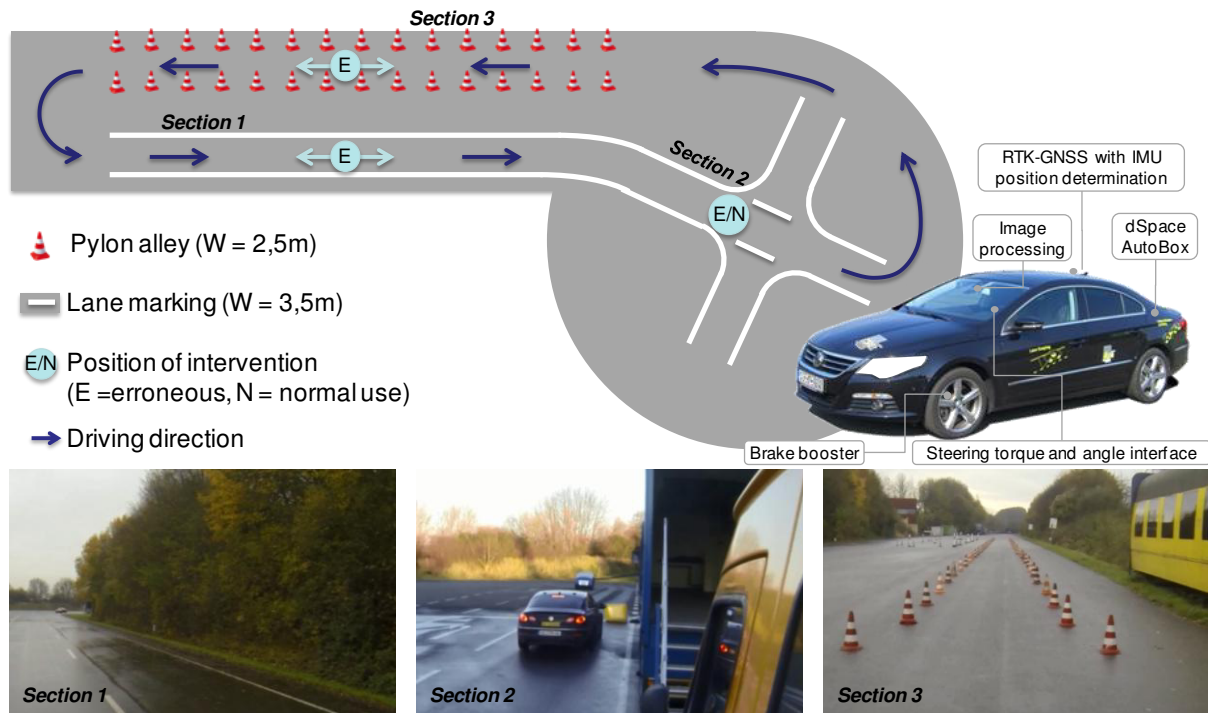


Abb. 1-9: Versuchsanordnung der Datenerhebung

Der erste Abschnitt ist die ca. 60 m lange Zufahrt, die mithilfe von Fahrbahnmarkierung einen zweistreifigen geraden Straßenabschnitt mit einer Fahrstreifenbreite von 3,5 m darstellt. Am Ende dieses Abschnitts schließt sich nach einer leichten Kurve der zweite Abschnitt an, welcher ein Kreuzungsszenario darstellt. Die Kreuzung ist ebenfalls durch Fahrstreifenmarkierungen (Fahrstreifenbreite ebenfalls 3,5 m) auf der Fahrdynamikfläche der Teststrecke definiert. Im Kreuzungsbereich wurden mehrere reale Fahrzeuge und Fahrzeugattrappen als parkende oder wartende Fahrzeuge positioniert, um so eine Sichtverdeckung für ein plötzlich auftauchendes Schaumstoffhindernis zu bieten und weitere Verkehrsteilnehmer zu repräsentieren. Das Schaumstoffhindernis wurde genutzt um die Reaktion der Fahrer bei berechtigten Systemeingriffen zu analysieren, indem es aus der seitlichen Sichtverdeckung orthogonal ca. 120 cm in den von den Fahrern befahrenen Fahrstreifen eintrat. Auf dem Rückweg zum ersten Abschnitt passierten die Probanden die ca. 100 m lange Pylonengasse mit einer Fahrstreifenbreite von 2,5 m.

Die Systemeingriffe, mit denen das Probandenkollektiv konfrontiert wurde, wurden abgeleitet vom Lenkradwinkelsignal eines Kollisionsvermeidungssystems, welches in einem andere Projekt entwickelt wurde. Ohne Fahrereingriff realisiert der Eingriff bei der Versuchsgeschwindigkeit von ca. 45 km/h eine Ausweichbreite von ca. 0,9 m. Um auch die Möglichkeit des Abbruchs des Systemeingriffs durch den Fahrer zu berücksichtigen, wurden drei unterschiedliche Varianten des Systemeingriffs untersucht. Die hierzu genutzte Erkennung einer Übersteuerungsabsicht wurde so umgesetzt, dass der Fahrer ein Lenkradmoment von mehr als 4 Nm entgegen der Eingriffsrichtung über einen Zeitraum von mindestens 300 ms aufbringen musste. Dabei wurden die ersten 200 ms nach dem Beginn des Systemeingriffs von dieser Erkennung ausgenommen, weshalb ein Abbruch frühestens nach 500 ms erfolgen konnte. Wurde das Abbruchkriterium durch den Fahrer erfüllt, so konnte das von System aufgebrachte zusätzliche Lenkmoment (Variante A) unmittelbar abgeschaltet werden, (Variante B) kontinuierlich über einen Zeitraum von 500 ms reduziert werden oder (Variante C) wie geplant fortgesetzt werden. Alle Kombinationen von Szenario und Abbruchmöglichkeit wurden während des Versuchs für alle Fahrer umgesetzt. Um eine Vorbereitung der Probanden bezüglich der Eingriffsrichtung zu vermeiden, wurde diese randomisiert (außer beim berechtigten Eingriff).

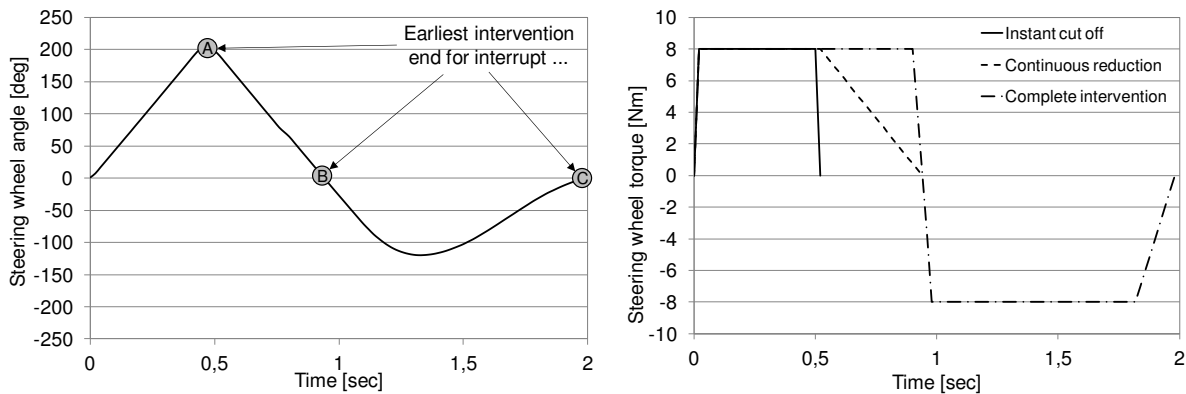


Abb. 1-10: Systemeingriff (Soll-Lenkradwinkel und –Lenkradmoment)

1.3.2.2 Reaktionsmuster bei unberechtigten Systemeingriffen

Im Folgenden soll zunächst der Ablauf der Fahrerreaktion bei unberechtigten Lenkeingriffen dargestellt werden. Drei unterschiedliche Phasen können bei der Übersteuerung dieser Eingriffe festgestellt werden: Fehlerphase, Gegenlenken und Kompensation. Während der Fehlerphase erhöht das zusätzliche Lenkradmoment den Lenkradwinkel bis der Fahrer diesen Anstieg unterbindet. Das Ende der Fehlerphase wird daher durch das erste Maximum des Lenkradwinkels bestimmt (vgl. Abb. 1-11), welches auch fehlerinduziertes Lenkradwinkelmaximum genannt wird.

Nach dem ersten Lenkradwinkelextremum kann ein erstes Gegenlenken des Fahrers festgestellt werden. Während dieser Phase reduziert der Fahrer den fehlerinduzierten Lenkradwinkel, indem er ein Lenkradmoment aufbringt, welches in der Amplitude größer ist als das zur systemseitigen Regulierung des Lenkradwinkels. In Abhängigkeit der Dauer der Gegenlenkbewegung kann es zu einer Überlagerung der Gegenlenkphase mit der Rücknahme oder dem Richtungswechsel des Zusatzlenkmoments kommen. Fälle, in denen es zu dieser Überlagerung kommt, können anhand des Vergleichs der Zeitspanne zwischen ersten und zweitem Lenkradwinkelextremum und dem Beginn der Rücknahme oder des Richtungswechsels des Zusatzlenkmoments bestimmt werden (siehe Abb. 1-11). Ist zum Zeitpunkt der Rücknahme oder des Richtungswechsels des Zusatzlenkmoments die erste Gegenlenkbewegung des Fahrers bereits abgeschlossen, so wird ein Fall ohne Überlagerung bestimmt.

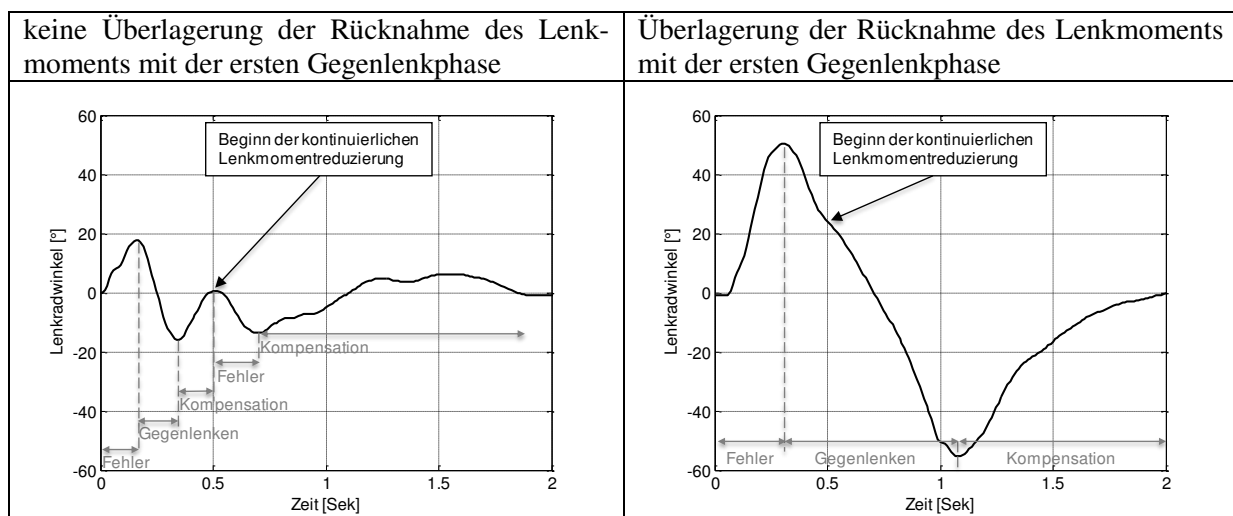


Abb. 1-11: Beispielhafte Reaktionsmuster bei der Fahrerreaktion bei unberechtigten Eingriffen

Das Ende der ersten Gegenlenkbewegung markiert den Beginn der Kompensationsphase. Während dieser Phase versucht der Fahrer, die durch den Fehler und seine Gegenlenkbewegung ausgelöste Fahrzeugbewegung zu kompensieren. Diese Kompensation kann dabei parallel zum noch aktiven Systemeingriff ablaufen.

Dies bedeutet, dass in einem Fall ohne Überlagerung der Rücknahme des Zusatzlenkmoments (in der Gegenlenkphase) die Kompensation durch die Rücknahme oder den Richtungswechsel des Zusatzmoments gestört werden kann. Dies kann in diesem Fall als zweite Fehlerphase angesehen werden (vgl. Abb. 1-11 links). Das Ende der Kompensationsphase wird bestimmt durch den Vergleich der Gierrate und der Lenkaktivität mit einem probandenspezifischen Wert, der während der Gewöhnungsfahrt vor dem ersten Systemeingriff bestimmt wurde.

In Tabelle 1-1 ist das Auftreten der zwei Reaktionsmuster in Abhängigkeit des Szenarios zu sehen. Hierbei fällt auf, dass es im Vergleich zur Kreuzung in der Anfahrt zu einem erhöhten Anteil an Fällen kommt, in denen eine Überlagerung zwischen der ersten Gegenlenkphase des Fahrers und der Rücknahme bzw. dem Richtungswechsel des Zusatzmoments kommt. In der Pylonengasse tritt dieser Fall vergleichsweise seltener auf.

Tabelle 1-1: Auftreten der Reaktionsmuster in Abhängigkeit des Szenarios.

	keine Überlagerung	Überlagerung
Anfahrt	59% (103/174)	41% (71/174)
Kreuzung	67% (68/102)	33% (34/102)
Pylonengasse	76% (132/173)	24% (41/173)

1.3.2.3 Einfluss der Abbruchmöglichkeit bei unberechtigten Systemeingriffen

Um den Einfluss der Abbruchmöglichkeit zu bestimmen, wurden im Versuchsdesign zwei unterschiedliche Varianten des Abbruchs vorgesehen. Hierbei soll untersucht werden, wie die Berücksichtigung und die Auslegung einer Abbruchmöglichkeit die Fahrerreaktion bei unberechtigten systeminitiierten Lenkeingriffen beeinflusst. Als Bewertungsgröße dient hierzu die maximale Gierrate, die während des Systemeingriffs und der Fahrerreaktion auftritt. Diese ist in Abb. 1-12 für die unterschiedlichen Abbruchmöglichkeiten und die zuvor diskutierten Reaktionsmuster dargestellt

Im ersten Schritt erfolgte die Überprüfung, ob die Berücksichtigung einer Abbruchmöglichkeit die Fehlerauswirkung im Hinblick auf die maximale Gierrate reduziert. Aus Abb. 1-12 ist ersichtlich, dass sowohl für die sprunghafte als auch die kontinuierliche Reduzierung unabhängig von dem auftretenden Reaktionsmuster signifikant geringere maximale Gierraten festzustellen sind ($p < 0.001$) als für die Fälle ohne Abbruchmöglichkeit. Somit kann der Nutzen einer Abbruchmöglichkeit zur Verringerung der maximalen Gierrate während des Fehlers und der Fahrerreaktion im ersten Schritt bestätigt werden.

Des Weiteren wurde im zweiten Schritt untersucht, ob eine kontinuierliche Reduzierung des zusätzlichen Lenkmoments zu geringeren Gierraten als eine sprunghafte Rücknahme führt. Der hierzu durchgeführte direkte Vergleich zwischen den maximalen Gierraten für die sprunghafte und kontinuierliche Reduzierung zeigt, dass sich für die Fälle, in denen es zu einer Überlagerung zwischen ersten Gegenlenkbewegung des Fahrers und der Rücknahme des Zusatzmoments kommt, eine signifikant geringere Gierrate für die sprunghaft Reduzierung ergibt als für die kontinuierliche ($p < 0.05$). Für die Fälle, in denen diese Überlagerung nicht auftritt, konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden.

Somit lässt sich zusammenfassen, dass die Berücksichtigung einer Abbruchmöglichkeit zu einer signifikant geringeren maximalen Gierrate bei unberechtigten Eingriffen führen kann. Die maximale Verringerung kann im durchgeführten Versuch mithilfe einer sprunghaften Reduzierung erzielt werden. Dabei ist der auftretende Unterschied zwischen den Abbruchvarianten nur in Fällen signifikant, in denen die erste Gegenlenkbewegung von der Rücknahme des Zusatzlenkmoments überlagert wird.

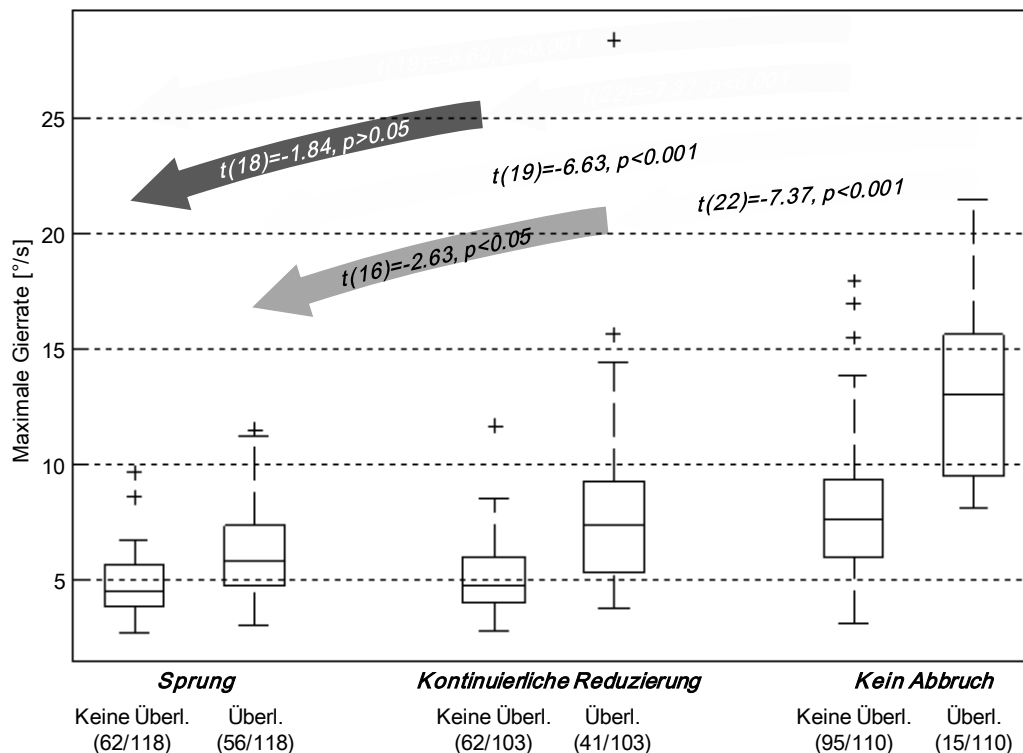


Abb. 1-12: Maximale Gierrate bei unberechtigten Eingriffen in Abhängigkeit der Abbruchmöglichkeit.

1.3.2.4 Einfluss des Verkehrsraums bei unberechtigten Systemeingriffen

Die Analyse des Einfluss des Verkehrsraums beleuchtete im ersten Schritt Unterschiede im normalen, unbeeinflussten Lenkverhalten aufgrund der unterschiedlichen Fahrsituationen. Hierbei erlangte Erkenntnisse wurden anschließend genutzt, um Unterschiede in der Fahrerleistung im Fall von unberechtigten Eingriffen zu erklären. In beiden Schritten wurde dazu das Fahrerverhalten in der Anfahrt und in der Pylonengasse genutzt.

Für urbane Fahrerassistenzsysteme ist die Fahreraufmerksamkeit im Sinne der Fokussierung auf die Durchführung der primären Fahraufgabe von hoher Bedeutung. Verhaltensanpassungen aufgrund von Änderungen in der Anforderung durch die (primäre) Fahraufgabe sind bereits in verschiedenen Studien untersucht worden (z.B. [3], [4], [5]). Um mögliche Änderungen im Lenkverhalten des Fahrers zu berücksichtigen, wurde in diesem Versuch der damit verbundene Einfluss des Verkehrsraums adressiert, indem das unbeeinflusste Lenkverhalten in Anfahrt und Pylonengasse verglichen werden.

Wegen der geringeren Gassenbreite und dem Vorhandensein von räumlichen Begrenzungen zur Darstellung der Fahrgasse wird angenommen, dass ein erhöhter Anteil an Regelungstätigkeit in diesem Bereich festgestellt werden kann. Basierend auf den Erkenntnissen aus [6] lassen sich hierzu verschiedene Messgrößen für die Bestimmung der Lenkradbedienung durch den Fahrer nutzen. Eine dieser Größen ist die Frequenz der Richtungsänderungen der Lenkbewegung des Fahrers, welche in Abb. 1-13 dargestellt ist. Es ist zu erkennen, dass Fahrer ihre Lenkmomenteingabe in der Pylonengasse signifikant häufiger anpassen als in der Anfahrt ($t(25) = -12.43$, $p < 0.001$). Der gleiche Effekt lässt sich basierend auf dem Lenkradwinkel feststellen.

Höhere Amplituden der Lenkmomenteingabe des Fahrers in der Anfahrt sind ein weiterer Indikator für die Verhaltensanpassung des Fahrers in den beiden Fahrsituationen (Abb. 1-13). Sie spiegeln sich wider im höheren Effektivwert des Lenkradmoments, welcher ebenfalls einen signifikanten Unterschied zwischen Anfahrt und Pylonengasse aufweist. Der Grund für die höheren Amplituden liegt in der geringeren Frequenz der Lenkkorrekturen. Die Fahrer tendieren dazu, ihre laterale Position in der Anfahrt seltener zu korrigieren, müssen dies daher aber mit stärkeren Eingriffen tun.

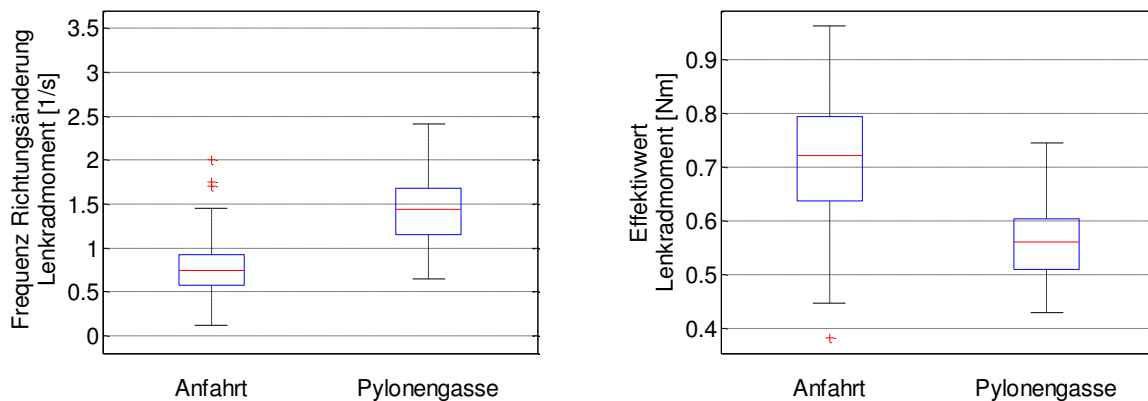


Abb. 1-13: Frequenz der Richtungsänderung und Effektivwert des Lenkradmoments für Anfahrt und Pylonengasse.

Um die Unterschiede durch die unterschiedlichen Fahrsituationen im normalen, unbeeinflussten Lenkverhalten näher zu spezifizieren, wurde zudem das Frequenzspektrum der Lenkmomenteingabe des Fahrers analysiert. Aus der Literatur ist bekannt, dass Lenkbewegungen in bestimmten Frequenzbereichen mit unterschiedlichen Regelungsstrategien assoziiert werden können (vgl. [7], [8], [9]). Während geringere Frequenzen zwischen 0.1 und 0.3 Hz der antizipatorischen Steuerung zugerechnet werden, beziehen sich Frequenzen zwischen 0.35 und 0.6 Hz (bzw. bis 1 Hz in [9]) auf die kompensatorische Regelung des Fahrers. Diese Erkenntnisse wurden anschließend benutzt, um Änderungen im Fahrerverhalten zwischen diesen beiden Fahrsituationen zu zeigen.

Abb. 1-14 links zeigt das durch die Signalenergie normierte und über alle Probanden gemittelte Frequenzspektrum der Fahrerlenkmomenteingabe im Frequenzbereich zwischen 0 und 2 Hz. Durch den Vergleich der Flächenintegrale der Frequenzbereiche der Steuerungs- und Regelungsanteile lässt sich zeigen, dass in der Anfahrt ein erhöhter Anteil an Steuerungstätigkeit festgestellt werden kann, während in der Pylonengasse vergleichsweise mehr Regelungstätigkeit beobachtet werden kann. Auf der rechten Seite von Abb. 1-14 ist hierzu der signifikante Unterschied im Verhältnis der Regelungs- zu Steuerungsfrequenzen dargestellt ($t(25)=-10.09$, $p<0.001$).

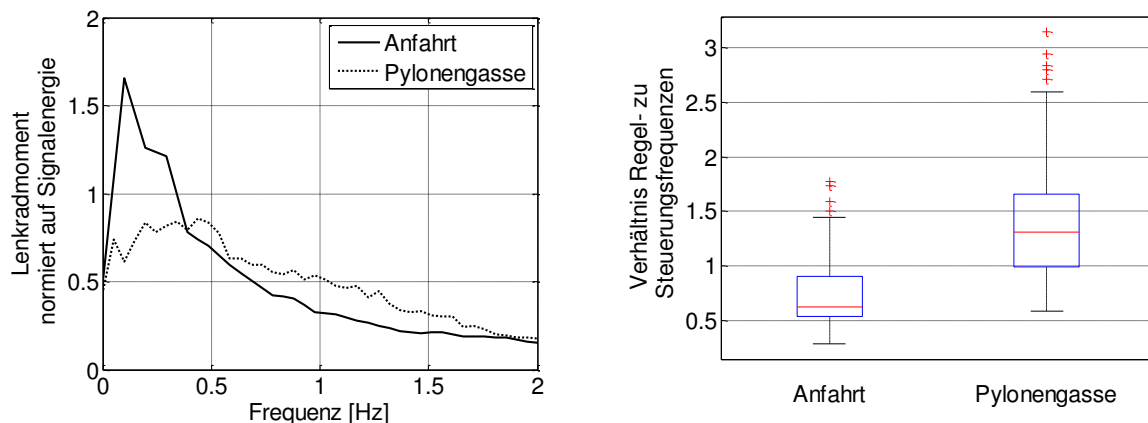


Abb. 1-14: Frequenzspektrum und Verhältnis der Regelungs- zu Steuerungsfrequenzen der Lenkmomenteingabe des Fahrers.

Im zweiten Schritt der Untersuchung zum Einfluss des Verkehrsraums wurden die Folgen der zuvor dargestellten Verhaltensanpassungen bei unberechtigten Lenkeingriffen analysiert. Da während des Versuchs unterschiedliche Varianten des Systemeingriffs untersucht wurden, die unterschiedlichen Varianten im Zusammenhang mit der Untersuchung des Verkehrsraums nicht betrachtet werden sollen, wurde für jeden Probanden eine Gleichverteilung der unterschiedlichen Varianten in den beiden Fahrsituationen gefordert.

Dies ermöglichte, Daten von 15 verschiedenen Probanden für die Bestimmung der Fahrerleistung zu berücksichtigen.

Um die zuvor bestimmten Effekte auf die Fahrerleistung bei unberechtigten Eingriffen zu übertragen, wurden objektive Messgrößen für den dynamischen Fahrzustand bei der Fehleraufschaltung in den beiden Bereichen verglichen. Abb. 1-15 zeigt hierzu die maximale Gierrate und Spurbabweichung während des systeminitiierten Lenkeingriffs und der damit verbundenen Fahrerreaktion. Für beide Messgrößen konnten in der Anfahrt signifikant höhere Werte festgestellt werden (Gierrate: $t(14)=5.16$, $p<0.001$; Spurbabweichung: $t(14)=4.41$, $p<0.001$).

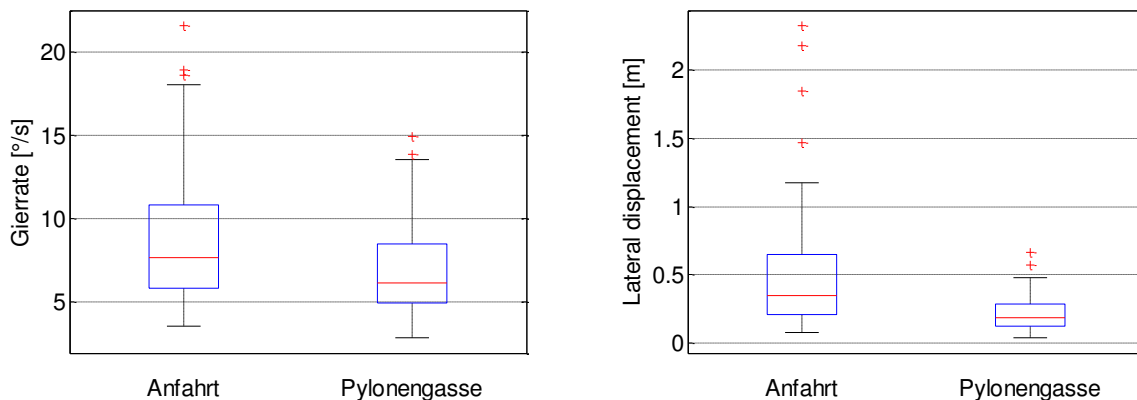


Abb. 1-15: Maximale Gierrate und Spurbabweichung bei unberechtigten Eingriffen in Abhängigkeit der Fahrsituation.

Zusätzlich zu der geringeren Amplitude der Gierrate und Spurbabweichung konnte auch eine geringere Varianz zwischen den Fahrern in der Pylonengasse festgestellt werden. Diese verringerte Varianz ließ sich auch in der Zeit des fehlerinduzierten Lenkradwinkels feststellen, welche mit der Reaktionszeit des Fahrers assoziiert werden kann (siehe Abb. 1-16). Wie für Gierrate und Spurbabweichung konnte auch für diese Messgröße beim Vergleich der Fahrsituationen ein signifikanter Effekt festgestellt werden ($t(14)=4.41$, $p<0.001$). Die geringere mittlere Reaktionszeit in der Pylonengasse kann der Tatsache zugeordnet werden, dass der Fahrer die laterale Fahrzeugposition häufiger und präziser korrigieren muss und daher feinfühlicher gegenüber dem Auftreten von Fahrzeugbewegungen ist.

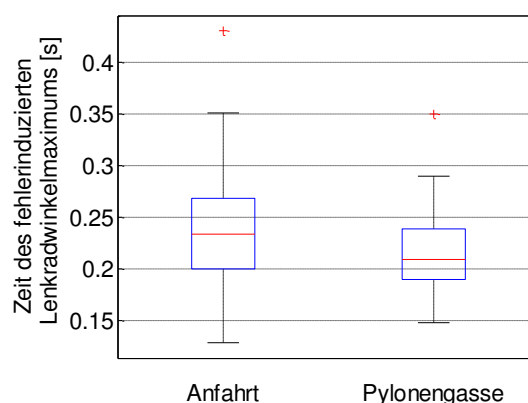


Abb. 1-16: Zeitpunkt des fehlerinduzierten Lenkradwinkelmaximums in Abhängigkeit der Fahrsituation.

1.3.2.5 Fahrerreaktion bei berechtigten Systemeingriffen

Bei berechtigten Systemeingriffen treten unterschiedliche Fahrerreaktionen bei Auftreten des Hindernisses und der Auslösung des Systemeingriffs auf. In einem ersten Schritt wurde hierzu bestimmt, ob die Fahrer in

den untersuchten Situationen eine Bremsreaktion zeigen oder nicht. Zur Bestimmung einer Bremsreaktion wurde der Bremsdruck mit einem Schwellwert verglichen.

Tabelle 1-2 zeigt den Anteil an Bremsreaktionen im Vergleich mit Situationen ohne und bei unberechtigten Systemeingriffen. Es ist zu erkennen, dass 49% der Fahrer bei berechtigten Systemeingriffen zusätzlich zu der auftretenden Lenkreaktion eine Bremsreaktion zeigen. Dies entspricht ungefähr dem Anteil in Situationen ohne Systemeingriff. Bei unberechtigten Eingriffen ergibt sich hierzu im Vergleich zu berechtigten Systemeingriffen ein geringerer Anteil an Bremsreaktionen.

Tabelle 1-2: Anteil an Fahrerreaktionen bei berechtigten, unberechtigten und ohne Systemeingriff

	berechtigt	ohne Eingriff	unberechtigt
keine Bremsreaktion	51%	50%	77%
Bremsreaktion	49%	50%	23%

Im Folgenden wurden die Lenkreaktionen der Fahrer bei berechtigten Systemeingriffen näher untersucht. Hierbei wurden ausschließlich Reaktionen im Erstkontakt betrachtet. Die Reaktionen lassen sich dabei grob in vier unterschiedliche Reaktionsmuster einteilen: Im ersten Fall reagiert der Fahrer nach dem Auftreten des Hindernisses bis zum Einsetzen des Systemeingriffes nicht am Lenkrad und übersteuert dann den auftretenden Systemeingriff (vgl. Abb. 1-17 oben links).

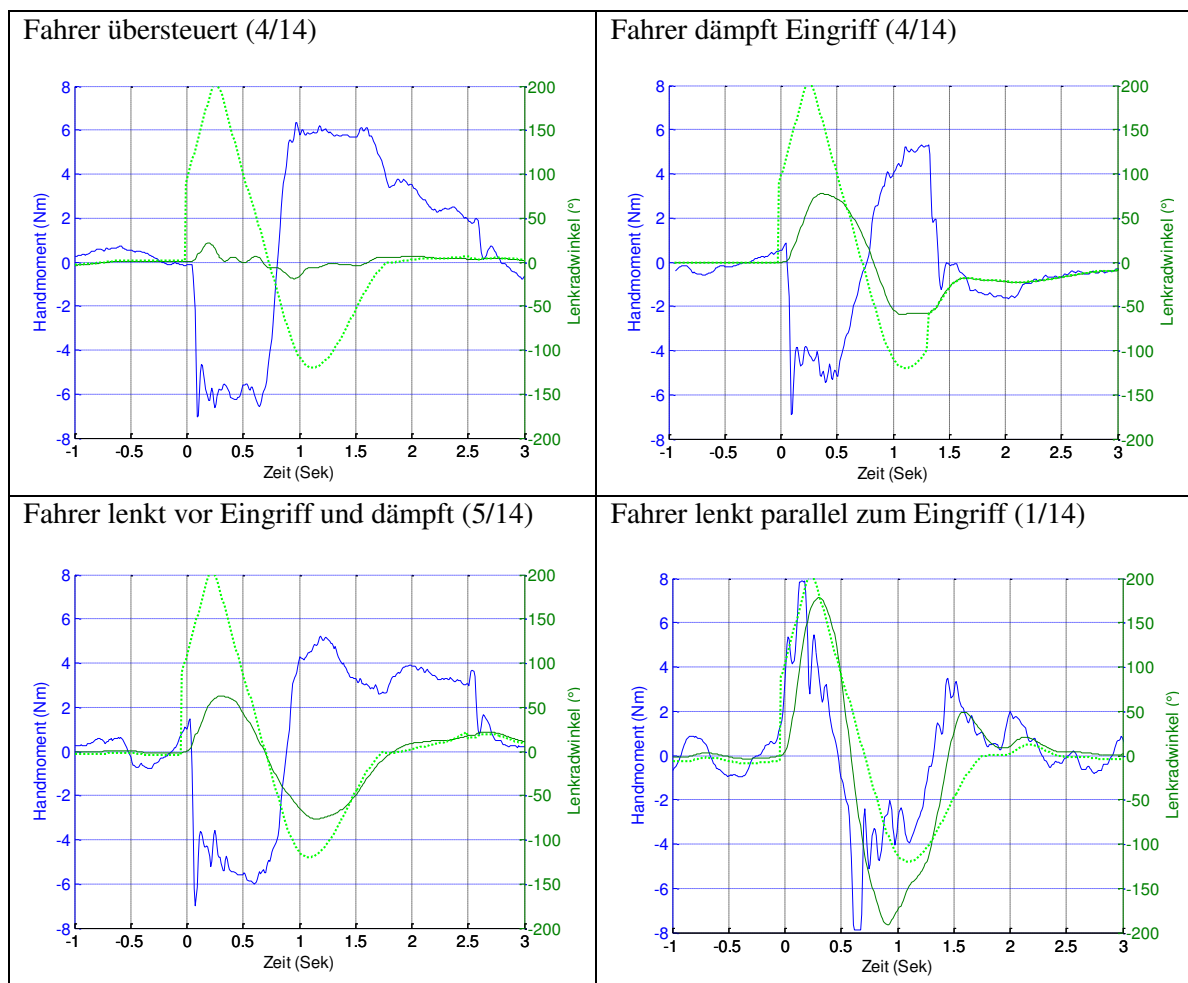


Abb. 1-17: Beispiele für unterschiedliche Lenkreaktionen bei berechtigten Systemeingriffen (Erstkontakt)

Die Lenkreaktion entspricht dabei der bei unberechtigten Systemeingriffen. Im zweiten Fall (Abb. 1-17 oben rechts) dämpft der Fahrer den Systemeingriff deutlich ab, lässt dabei aber eine Ausweichbewegung (erkennbar am Lenkradwinkelverlauf) zu. Das Zulassen der Ausweichbewegung ist auch am Lenkradwinkel im dritten Fall zu erkennen (Abb. 1-17 unten links). In diesem Fall beginnt der Fahrer allerdings vor dem Einsetzen des Systemeingriffs schon eigenständig mit einer Lenkreaktion und dämpft nach dem Einsetzen des Systemeingriffs diesen ab. Auch im vierten Fall lenkt der Fahrer bereits vor dem Systemeingriff. Anders als im dritten Fall kommt es allerdings nicht zu einer Dämpfung des Systemeingriffs, sondern der Fahrer lenkt nahezu parallel zur Lenkradwinkelvorgabe (Abb. 1-17 unten rechts). Dieser Fall zeichnet sich dadurch aus, dass anders als bei den drei übrigen Reaktionsarten das Lenkradmoment gleichgerichtet zum Lenkradwinkel ist.

Die Unterscheidung, ob ein Fahrer ein Systemeingriff übersteuert oder lediglich dämpft, wurde für diese Auswertung anhand eines Vergleichs zwischen dem ersten Lenkradwinkelmaximum und dem mittleren fehlerinduzierten Lenkradwinkel getroffen. Basierend auf dieser Annahme kann in fast allen Fällen eine Dämpfung des Systemeingriffs durch den Fahrer festgestellt werden (unabhängig davon, ob der Fahrer bereits vor Beginn des Systemeingriffs selber lenkt oder nicht). Nur ein Fahrer lenkte selbstständig nahezu wie vom System vorgesehen während ca. 30% der Fahrer eine Übersteuerungsreaktion zeigen.

Abb. 1-18 zeigt den Vergleich der maximalen Lenkradwinkel bei berechtigten und unberechtigten Systemeingriffen sowie für Situationen ohne Systemeingriff. Es ist zu erkennen, dass der mittlere maximale Lenkradwinkel bei berechtigten Systemeingriffen höher liegt als bei unberechtigten, dabei aber auch eine deutlich größere Streuung aufweist. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass bei berechtigten Systemeingriffen alle Fahrerreaktionen unabhängig von erkennbarem Übersteuerungswunsch berücksichtigt wurden.

Insbesondere im Vergleich mit den in Situationen ohne Systemeingriff erzielten maximalen Lenkradwinkeln zeigt sich der Einfluss des Systemeingriffs. Bei berechtigten Systemeingriffen liegt der mittlere maximale Lenkradwinkel mehr als doppelt so hoch. Hierbei muss beachtet werden, dass es sich bei dem gezeigten Vergleich um einen between-Faktor handelt und insbesondere für die Situationen ohne Systemeingriff und bei unberechtigten Systemeingriffen geringe Stichprobengrößen vorlagen.

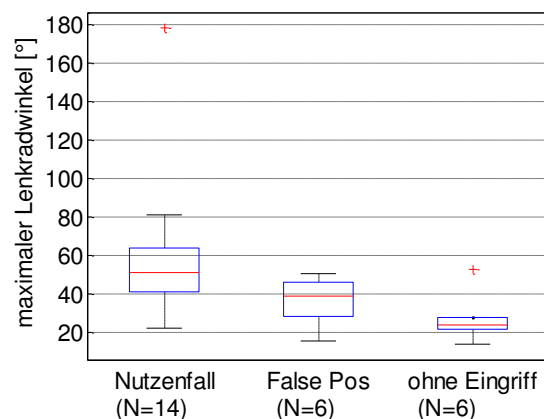


Abb. 1-18: Vergleich des maximalen Lenkradwinkel bei berechtigten und unberechtigten Systemeingriffen sowie Situationen ohne Systemeingriff

1.3.2.6 Der Fahrer als Störgröße bei berechtigten Systemeingriffen

Wie zuvor dargestellt werden die Systemeingriffe durch fast alle Fahrer abgedämpft oder sogar übersteuert, so dass sich teils deutlich geringere maximale Lenkradwinkel (siehe Abb. 1-18) als der maximale Soll-Lenkradwinkel des Systemeingriffs ($>200^\circ$) ergeben. Lediglich ein Fahrer führt eigenständig eine Ausweichlenkbewegung durch, die dem Systemeingriff nahe kommt, und erzielt dabei einen Querversatz, der die Soll-Trajektorie des Systemeingriffs sogar übertrifft. In Abb. 1-19 sind die im Erstkontakt bei berechtigten Systemeingriffen befahrenen Trajektorien zu sehen. Hierbei ist anzumerken, dass zur Vermeidung einer

Kollision mit dem Hindernis nicht die gesamte Ausweichbreite des Systemeingriffs erforderlich war, was aufgrund der zum Zeitpunkt des Systemeingriffs noch andauernden Bewegung des Hindernisses für den Fahrer jedoch nicht ersichtlich war. In einigen Fällen geht der erzielte Querversatz nicht über die bei unberechtigten Systemeingriffen zugelassen Querversätze hinaus. Im Mittel liegt der erzeugte Querversatz bei ca. 0,7 m und damit ca. 30 cm höher als in Situationen ohne Systemeingriff, aber fast 50 cm unter dem Querversatz durch den Systemeingriff ohne Fahrerinteraktion (Open-Loop-Messung).

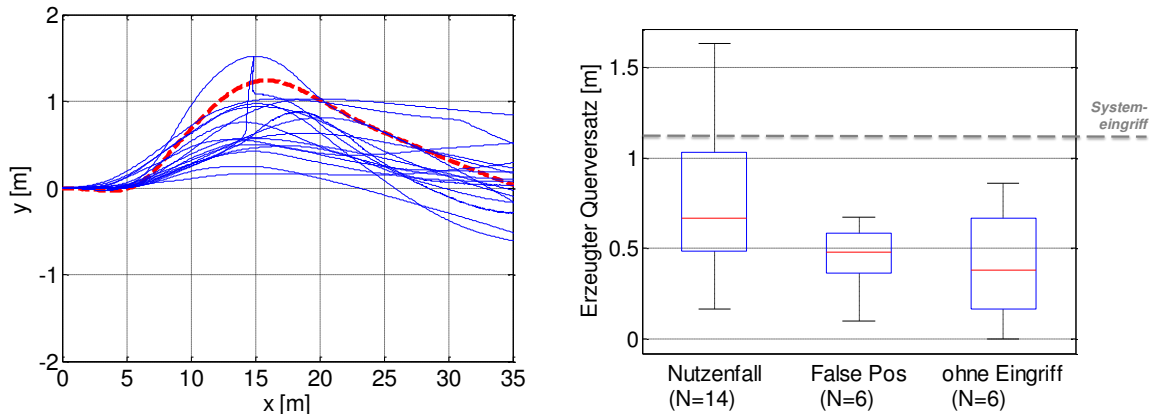


Abb. 1-19: Ausweichtrajektorien im Erstkontakt bei berechtigten Systemeingriffen (rot: Soll-Trajektorie des Systemeingriffs) und Vergleich der erzeugten Querversätze bei unberechtigten Systemeingriffen und Situationen ohne Systemeingriff

Auch bei der maximalen Gierrate während des Systemeingriffs und der Fahrerreaktion kann ein deutlicher Unterschied zwischen der vom System geplanten und der vom Fahrer ausgeführten Lenkreaktion festgestellt werden (vgl. Abb. 1-20). Hierbei muss berücksichtigt werden, dass einige Fahrer im Versuch vor dem Beginn des Systemeingriffs reagierten und die somit erforderliche Dynamik des Ausweichvorgangs reduziert werden konnte. Der Systemeingriff hingegen beginnt zum spätestmöglichen Zeitpunkt, bei dem ein Ausweichen unter Annahme bestimmter querdynamischer Voraussetzungen noch möglich ist.

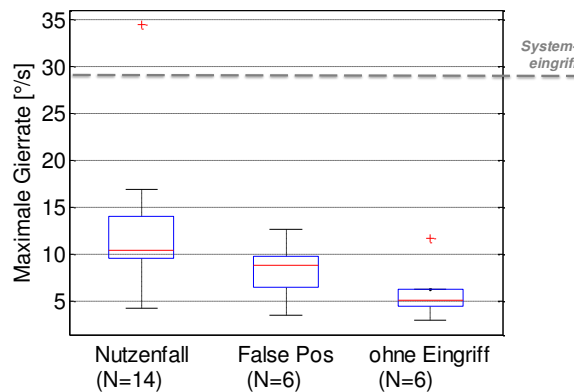


Abb. 1-20: Maximale Gierrate während des Systemeingriffs und der Fahrerreaktion

Auffällig ist die relativ starke Streuung der maximalen Gierrate bei berechtigten Systemeingriffen (zwischen 5 und 35°/s). Die unterschiedlich starke Dämpfung der Systemeingriffe durch den Fahrer lässt vermuten, dass die Fahrer auch bei berechtigten Systemeingriffen nur eine bestimmte Gierreaktion des Fahrzeugs zulassen, um einen (subjektiven) Kontrollverlust zu verhindern. Zur Untersuchung dieser Annahme wurde die Abhängigkeit zwischen dem probandenspezifischen Mittelwert des ersten Gierratenmaximums im Nutzenfall und der probandenspezifischen maximalen Gierrate, die in Situationen ohne Systemeingriff erzielt wurde, analysiert (siehe Abb. 1-21). Es ergibt sich eine hohe Korrelation von 0.84 ($p < 0.001$), was die getroffene Annahme bekräftigt.

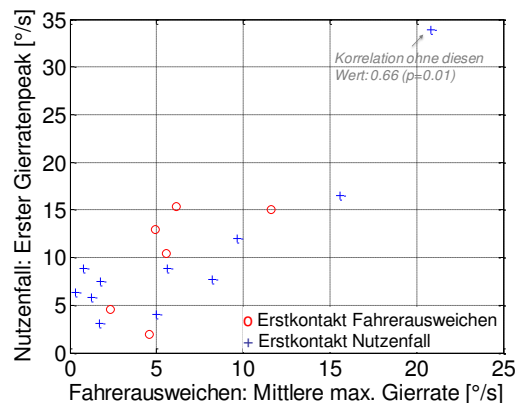


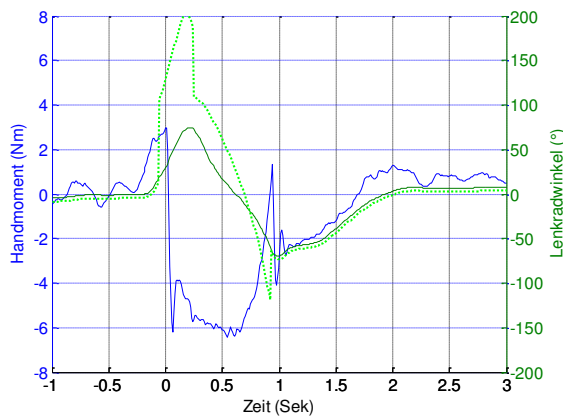
Abb. 1-21: Abhängigkeit zwischen dem probandenspezifischen Mittelwert des ersten Gierratenmaximums bei berechtigten Systemeingriffen und der probandenspezifischen mittleren maximalen Gierrate beim Ausweichen ohne Systemeingriff

1.3.2.7 Einfluss der Wiederholung bei berechtigten Systemeingriffen

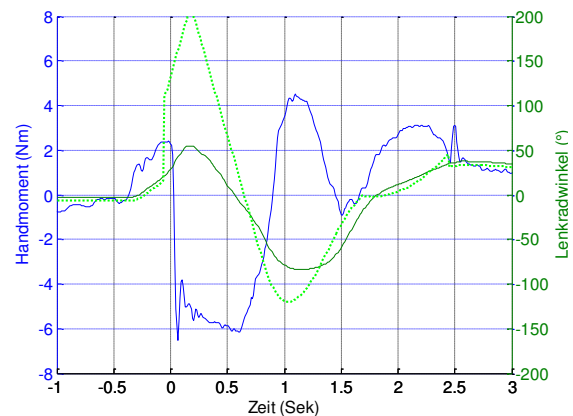
Der Einfluss der Wiederholung besitzt für die Untersuchung der Fahrerreaktion bei berechtigten Systemeingriffen einer assistierten Ausweichfunktion eine große Bedeutung, da nach dem Erstkontakt des Probanden mit der Prüfsituation von einer Vorbereitung ausgegangen werden muss. Im Vergleich mit unberechtigten Eingriffen ist zudem eine Variation des Aufschaltorts nur mit einem hohen Aufwand und selbst dann nur aufgrund des erforderlichen Auftretens eines Hindernisses mit Einschränkungen möglich. Nach dem Erstkontakt war den Probanden bewusst, dass es zu Ausweichsituationen kommen konnte, und er konnte sein Verhalten in Situationen, in denen es aufgrund von Sichtverdeckungen zu weiteren ähnlichen Situationen kommen konnte, stärker auf das mögliche Auftreten von Hindernissen, an das Erlebte anpassen (Geschwindigkeit anpassen, bremsbereit sein, bestimmte Bereiche genau beobachten).

Im Folgenden wurde daher untersucht werden, in wie weit sich das wiederholte Erleben von berechtigten Eingriffen auf die Fahrerreaktion auswirkt. In Abb. 1-22 und Abb. 1-23 sind die Fahrerreaktionen von zwei Probanden im Erstkontakt sowie der folgenden drei Wiederholungen dargestellt. Proband 1 (Abb. 1-22) beginnt in allen vier gezeigten Situationen bereits vor Beginn des Systemeingriffs mit einer Ausweichlenkbewegung und dämpft den Eingriff anschließend derart ab, dass es in allen vier Situationen zu einer relativ gleichmäßigen Ausweichbewegung mit vergleichbaren Lenkradwinkelverläufen kommt.

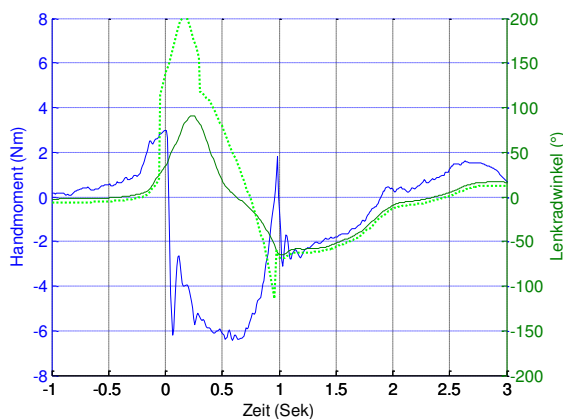
Erstkontakt



1. Wiederholung



2. Wiederholung



3. Wiederholung

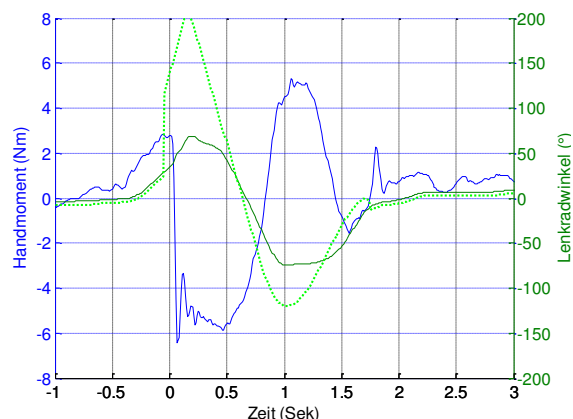
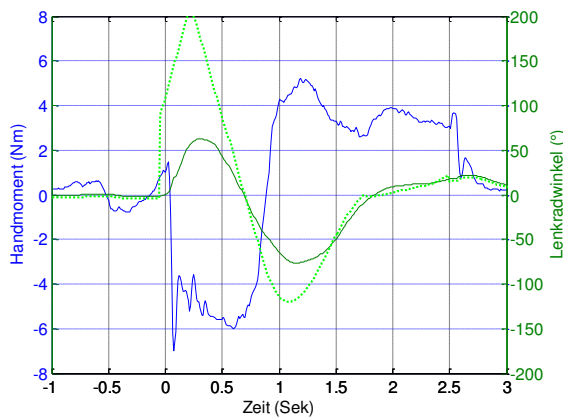


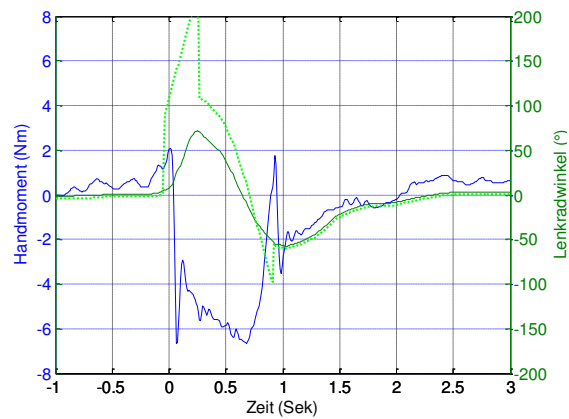
Abb. 1-22: Wiederholte Fahrerreaktionen bei berechtigten Systemeingriffen (Proband 1)

Auch Proband 8 (Abb. 1-23) zeigte ein relativ stabiles Verhalten und lässt ähnlich wie Proband 1 eine Ausweichbewegung durch den Systemeingriff zu. Ebenso kann auch hier bereits vor Beginn des Systemeingriffs eine Ausweichbewegung festgestellt werden.

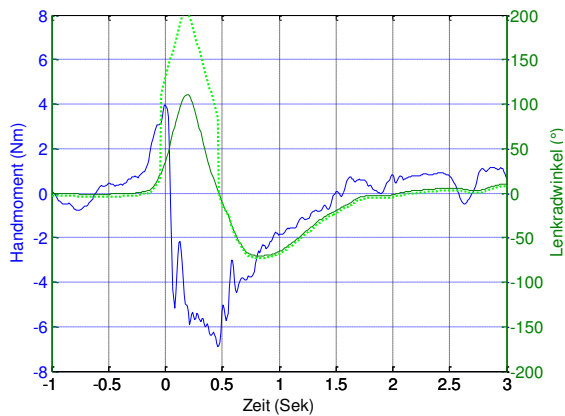
Erstkontakt



1. Wiederholung



2. Wiederholung



3. Wiederholung

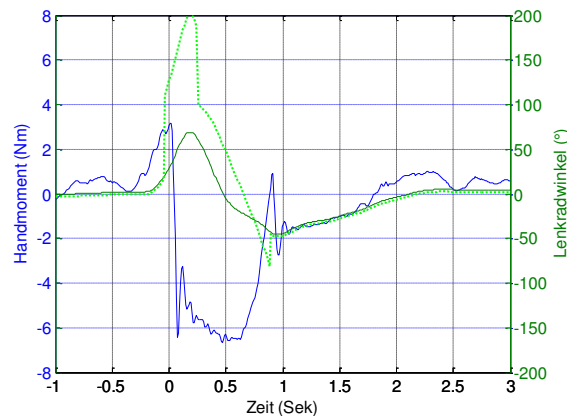


Abb. 1-23: Wiederholte Fahrerreaktionen bei berechtigten Systemeingriffen (Proband 8)

In Abb. 1-24 ist der durch den Systemeingriff und die Fahrerreaktion erzeugte Querversatz sowie die damit verbundenen maximale Lenkradwinkel und Gierraten zu sehen. Dabei bleiben den mittlere erzeugte Querversatz sowie die mittlere maximale Gierrate näherungsweise konstant und zeigen keine eindeutige Tendenz von zu- oder abnehmender Gierrate oder Querversatz mit steigender Anzahl an Wiederholungen. Lediglich im Hinblick auf den maximalen Lenkradwinkel ist eine Tendenz für geringere maximale Lenkradwinkel bei wiederholten Systemeingriffen zu erkennen. Dieses spiegelt größtenteils das Ergebnis der zuvor gezeigten beispielhaften Betrachtungen des individuellen Lenkverhaltens wieder.

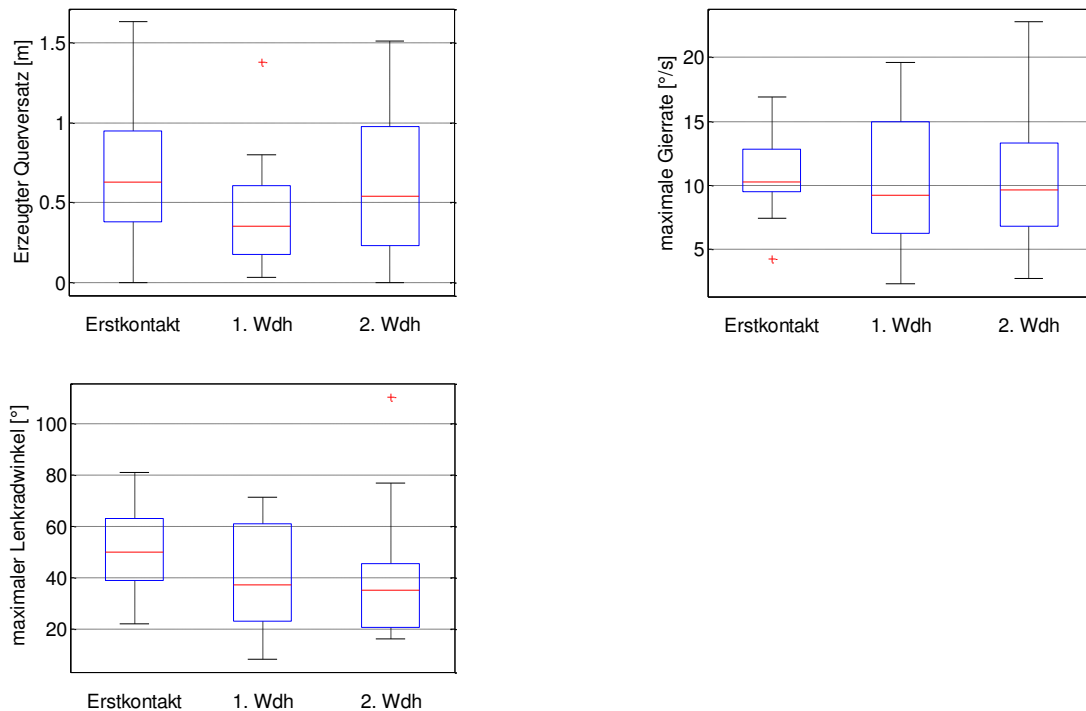


Abb. 1-24: Erzeugter Querversatz und maximale Gierrate in Abhängigkeit der Wiederholung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass im durchgeführten Versuch keine klare Tendenz für den Einfluss der Wiederholung festgestellt werden konnte. Zwar zeigt der mittlere maximale Lenkradwinkel eine geringfügige Abnahme mit steigender Anzahl an Wiederholungen, jedoch ergibt sich hieraus keine eindeutige Veränderung des erzielten Querversatzes oder der maximalen Gierrate.

1.3.2.8 Fazit

- Welche Fahrerreaktionen treten bei unberechtigten Systemeingriffen zum assistierten Ausweichen auf? Bei unberechtigten Eingriffen passt der Fahrer seine Reaktion der Fahrsituation, in der er sich befindet, an. Prinzipiell können dadurch zwei unterschiedliche Arten der Fahrerreaktion festgestellt werden. Diese hängen stark von dem verfügbaren Verkehrsraum im direkten Umfeld des Fahrzeugs ab. Steht dem Fahrer ausreichend Raum zur Verfügung, so kommt es vor, dass Fahrer große Querabweichungen durch den Systemeingriff zulassen und dabei nur die Dynamik des Eingriffs ein wenig abdämpfen. Bei enger Beschränkung des Verkehrsraums hingegen kommt es in der Regel zu einer deutlich schnelleren Reaktion des Fahrers mit einer stärkeren, schnelleren Gegenlenkphase, was in einigen Fällen zu einer Überkompensation führt. Insgesamt bleiben die Querabweichungen in diesem Fall jedoch kleiner, als bei größerem verfügbarem Verkehrsraum.

- Wie ändert sich die Fahrerreaktion bei wiederholten unberechtigten Systemeingriffen zum assistierten Ausweichen?

Dabei bleibt die Fahrerreaktion intraindividuell über das wiederholte Erleben von Systemeingriffen weitestgehend konstant. Fahrer, die beim Erstkontakt eine stark ausgeprägte erste Gegenlenkphase zeigen, behalten dies auch bei wiederholten Eingriffen bei. Insgesamt kann eine geringe Abnahme der durch Systemeingriff und Fahrerreaktion hervorgerufenen querdynamischen Anregung festgestellt werden.

- Kommt es bei unberechtigten Systemeingriffen zum assistierten Ausweichen durch hohe Lenkradmomente dazu, dass der Fahrer die Kontrolle über das Lenkrad verliert?

Während des Versuchs konnte nicht festgestellt werden, dass durch die hohen Lenkmomente Fahrer die Kontrolle über das Lenkrad verlieren. Selbst bei lockerer Lenkradhaltung kam es zwar in einigen Fällen zu einem Durchrutschen des Lenkrads, jedoch konnten auch in diesen Fällen die Fahrer durch Zugreifen die Dynamik des Systemeingriffs beenden und den unberechtigten Eingriff anschließend übersteuern/kompensieren.

- Welche Fahrerreaktionen treten bei berechtigten Systemeingriffen zum assistierten Ausweichen auf?

Während der Versuchsdurchführung konnten drei unterschiedliche Arten der Fahrerreaktion beim Erstkontakt mit berechtigten Systemeingriffen festgestellt werden. In nahezu allen Fällen trat eine Dämpfung des Systemeingriffs durch den Fahrer auf. Während in einigen Fällen (knapp 30%) die Dämpfung auf dem Niveau der Fahrerreaktionen bei Falschauslösungen (und damit im Bereich der Übersteuerung) lag, ließen annähernd zwei Drittel der Fahrer eine Ausweichbewegung des Fahrzeugs mit abgedämpfter Amplitude zu. Die Dämpfung konnte dabei auch beobachtet werden, wenn der Fahrer zum Zeitpunkt des Eingriffs bereits mit einer Ausweichlenkbewegung begonnen hatte. Nur in einem Fall konnte festgestellt werden, dass der Fahrer eine Ausweichlenkbewegung ähnlich dem Systemeingriff durchführte. In diesem Fall wurde der Systemeingriff durch den Fahrer nicht bemerkt.

- Wirkt der Fahrer bei berechtigten Systemeingriffen als Störgröße?

Wie zuvor beschrieben, kommt es auch bei berechtigten Systemeingriffen durch nahezu alle Fahrer zu einer deutlichen Dämpfung. Jedoch war im durchgeführten Versuch auch nicht die volle Ausweichbreite des Systemeingriffs erforderlich, um das Hindernis zu umfahren. Somit kann in diesem Fall von einer bedarfsge rechten Anpassung der Ausweichbreite an die Situation durch den Fahrer gesprochen werden. Durch den Abgleich mit Situationen, in denen der Fahrer nicht bei der Durchführung eines Ausweichmanövers durch den Systemeingriff unterstützt wurde, konnte festgestellt werden, dass Fahrer, die auch ohne Unterstützung mit einer höheren Dynamik ausweichen, bei berechtigten Systemeingriffen eine geringere Dämpfung des Systemeingriffs aufwiesen.

- Wie ändert sich die Fahrerreaktion bei wiederholten berechtigten Systemeingriffen zum assistierten Ausweichen?

Ähnlich wie bei der Betrachtung der Fahrerreaktion bei unberechtigten Eingriffen konnte auch bei den Reaktionen bei berechtigten Systemeingriffen ein stabiles intraindividuelles Verhalten festgestellt werden. Fahrer, die im Erstkontakt mit dem berechtigten Systemeingriff eine Übersteuerreaktion aufwiesen, zeigten diese auch beim wiederholten Erleben des Systemeingriffs. Umgekehrt blieb auch die Tendenz zum Ausweichen bei anderen Fahrern über wiederholte Systemeingriffe erhalten.

- Kann die Beherrschbarkeit von Systemeingriffen zum assistierten Ausweichen bei unberechtigten Systemeingriffen durch die Verwendung einer Abbruchbedingung erhöht werden?

Im Fall des Erkennens einer Übersteuerungsabsicht eines Fahrers kann der Systemgriff vorzeitig beendet werden, um dem Fahrer die Kontrolle über das Fahrzeug zu erleichtern. Hierzu wurde im Versuch eine exemplarische Abbruchbedingung untersucht, welche einen Abbruch des Systemeingriffs nach ca. 500 ms ermöglichte. Es zeigte sich, dass sich hierdurch die Auswirkungen durch einen unberechtigten Systemeingriff signifikant verringern lassen. Insbesondere bei verzögerten Fahrerreaktionen kann ein Abbruch zu deutlich geringeren maximalen Gierraten durch den Systemeingriff und die Fahrerreaktion führen.

- An welchen Parametern kann die Übersteuerungsabsicht des Fahrers festgemacht werden?
- Nach welcher Zeit kann die Übersteuerungsabsicht des Fahrers erkannt werden?

Im Rahmen einer detaillierten, versuchsübergreifenden Untersuchung der Möglichkeiten eine Übersteuerungsabsicht des Fahrers zu erkennen, erwies sich der Vergleich der vom System geplanten Lenktrajektorie mit der aktuellen Lenkbewegung des Fahrers als zielführend. Je nach Auslegungsart eines solchen Kriteriums erscheint der im Versuch betrachtete Zeitbereich von ca. 500 ms als geeignet.

- Welchen Einfluss haben räumliche Einschränkungen (z.B. durch andere Verkehrsteilnehmer, Hindernisse, etc.) auf die Fahrerleistung?

Die veränderten Randbedingungen hinsichtlich des Verkehrsraums der FAS-Anwendung im urbanen Raum im Vergleich zu bisherigen Anwendungsschwerpunkten haben Auswirkungen auf das Fahrerverhalten und damit auch auf die Fahrerleistung bei Systemeingriffen. In den in der Versuchsanordnung dargestellten Fahrsituationen mit unterschiedlicher Fahrstreifenbreite und räumlicher Begrenzung konnten Unterschiede im natürlichen (unbeeinflussten) Lenkverhalten der Fahrer festgestellt werden. Diese Veränderung bewirkt eine situationsgerechte Anpassung der Reaktion bei fälsch ausgelösten Systemeingriffen. Bei verringerter Fahrstreifenbreite und dem Vorhandensein von räumlichen Einschränkungen kommt es zu einer schnelleren Fahrerreaktion und dadurch zu geringeren Auswirkungen bei unberechtigten Systemeingriffen.

- Besteht eine Abhängigkeit zwischen Spurbreitenbedarf und Subjektivbewertung durch den Fahrer bei der Störgrößenkompensation bei unberechtigten Eingriffen?

Ein direkter Zusammenhang zwischen den auftretenden Querabweichungen und der subjektiven Bewertung durch die Fahrer konnte im durchgeführten Versuch nicht gefunden werden.

- Kann ein Zusammenhang zwischen Fahrerreaktion und Spurbreite hergestellt werden?

Bei der Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Fahrerreaktion und der auftretenden Querabweichung sind zwei Aspekte der Fahrerreaktion von Bedeutung: Für die Größe der initialen Querabweichung in Richtung des Systemeingriffs ist insbesondere die Dauer, bis der Fahrer den fehlerinduzierten Lenkgradwinkel kompensiert hat, von Bedeutung. Die Qualität der anschließenden Fahrerreaktion im Hinblick auf eine mögliche Überkompensation bewirkt dann die Größe der Querabweichung in die entgegengesetzte Richtung.

- Welche Größe eignet sich zur Beschreibung der Kontrollierbarkeit bei berechtigten Systemeingriffen?

Aufgrund der teilweise erforderlichen hohen Dynamik bei berechtigten Systemeingriffen können zur Bewertung der Kontrollierbarkeit bei berechtigten Systemeingriffen nicht die gleichen Kriterien wie bei unberechtigten Eingriffen angesetzt werden. Geeignet erscheinen hingegen Größen, welche eine situationsunangepasste Verstärkung oder Dämpfung des Systemeingriffs quantifizieren.

1.3.3 AP 3000 Determinanten der Kontrollierbarkeit und ihre Gestaltung

Im Rahmen der Versuchsdurchführung zur Untersuchung des Einflusses des Verkehrsraums auf die Fahrerleistung im AP 2000 konnte festgestellt werden, dass sich durch Verkehrsraumbeschränkungen deutliche Unterschiede im Fahrerverhalten ergeben. Aus diesem Grund wurde im Folgenden der Versuch unternommen, diesen Effekt sowie seine Auswirkungen auf die Kontrollierbarkeit einer unberechtigten Auslösung zu quantifizieren. Im Folgenden sind dazu zunächst die betrachtete Forschungsfrage sowie das zur Beantwortung genutzte methodische Vorgehen beschrieben und anschließend die Ergebnisse dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass es sich um eine exemplarische Anwendung des methodischen Vorgehens mithilfe der im AP 2000 erhobenen Daten handelt. Somit sind die vorgestellten Ergebnisse nicht grundsätzlich verallgemeinerbar und beziehen sich ausschließlich auf die im AP 2000 umgesetzte Versuchsanordnung (Versuchsfahrzeug, Szenariengestaltung, Fahrgeschwindigkeiten etc.).

1.3.3.1 Forschungsfragen

Die erste Forschungsfrage bezieht sich auf den Manöverraum, der sich dem Fahrer bietet, um einen unberechtigten Eingriff zu kontrollieren:

- 1) *Wie viel Manöverraum hat der Fahrer zur Verfügung, um einen unberechtigten Eingriff zu kontrollieren?*

Hintergrund dieser Frage ist der Unterschied des in UR:BAN adressierten Anwendungsgebiets für Fahrerassistenzsysteme (Stadt) im Vergleich zu bisherigen Anwendungsschwerpunkten (Autobahn, Landstraße). Hieraus ergeben sich veränderte Randbedingungen hinsichtlich der Verkehrssituation, die der Fahrer berücksichtigen muss, z. B. geringere Abstände zu anderen Verkehrsteilnehmern oder Hindernissen. Der Fokus liegt hierbei auf den lateralen Abständen z. B. zu baulichen Begrenzung oder Fahrstreifen- bzw. Fahrbahnmarkierungen sowie zu anderen Fahrzeugen. Da diese Frage stark situativ beeinflusst wird, kann sie nur unter Berücksichtigung verschiedener situativer Faktoren beantwortet werden.

Die zweite Frage baut inhaltlich auf der ersten Frage auf, indem sie die Fahrerleistung thematisiert, welche erforderlich ist, den zuvor beschriebenen Manöverraum bei einer unberechtigten Auslösung nicht zu verlassen:

- 2) *Wie (schnell) muss ein Fahrer reagieren, um das Verlassen dieses vorhandenen Manöverraums bei einer unberechtigten Auslösung zu verhindern?*

Zur Beantwortung der Frage muss dabei nicht nur die Reaktionszeit, sondern auch die Stärke und Qualität der Fahrerreaktion berücksichtigt werden. Dabei wurde das Ziel verfolgt, einen möglichst einfachen Zusammenhang zwischen Fahrerreaktion und der Querabweichung zu finden, welche sich durch die unberechtigte Auslösung ergibt. Die Bewertungsgröße für die Qualität der Fahrerreaktion muss es dabei ermöglichen, einen Zusammenhang mit der Wirkung eines Übersteuerungsklassifikators herzustellen, um eine Beurteilung der dritten Forschungsfrage zu erlauben.

Auch die dritte Frage baut auf den zwei vorherigen Fragen auf und adressiert dabei das Potential eines Übersteuerungsklassifikators, den Fahrer bei der Kompensation einer unberechtigten Auslösung zu unterstützen:

- 3) *Welches Potential bietet einen Übersteuerungsklassifikator das Verlassen des vorhandenen Manöverraums bei einer unberechtigten Auslösung zu verhindern?*

Die zugrundeliegende Annahme hinter dieser Frage lautet, dass mithilfe eines Übersteuerungsklassifikators die Qualität der Fahrerreaktion dahingehend verbessert werden kann, dass es bei einer unberechtigten Auslösung zu einer geringeren Querabweichung kommt, um somit gegebenenfalls das Verlassen des verfügbaren Manöverraums verhindert werden kann.

1.3.3.2 Methodisches Vorgehen

Das methodische Vorgehen zur Beantwortung der zuvor genannten Forschungsfragen gliederte sich in drei Schritte, welche wie die Forschungsfragen selber inhaltlich aufeinander aufbauen.

Objektive Beschreibung des verfügbaren Manöverraums

Im ersten Schritte wurde eine objektive Beschreibung des Manöverraums von verschiedenen Anwendungsschwerpunkten von Fahrerassistenzsystemen vorgenommen, um so die Unterschiede des verfügbaren Raums für die Querführung des Fahrzeugs zu quantifizieren. Da sich der verfügbare Manöverraum situationsabhängig aus verschiedenen Randbedingungen ergibt, muss hierbei eine Auswahl getroffen werden, welche Faktoren bei der Beschreibung berücksichtigt werden müssen. Aufgrund der Vielzahl von Einflussfaktoren durch das Szenario wurde die Beschreibung im ersten Schritt zunächst auf die statischen Randbedingungen, welche sich auf den infrastrukturellen Begrenzungen von Fahrstreifen und Fahrbahnen ergeben, sowie dynamische Randbedingungen, welche durch die Abstände zu anderen Verkehrsteilnehmern entstehen, fokussiert. Hierzu wurden Informationen aus den baulichen Richtlinien für die Anlage von Autobahnen und Stadtstraßen [10] genutzt, um in Abhängigkeit der Fahrzeugbreite sowie der aktuellen Position im Fahrstreifen berechnen zu können, welche lateralen Abstände sich zu den unterschiedlichen Begrenzungen der verschiedenen Elemente einer Fahrbahn ergeben. Um bei der Beschreibung mithilfe der statischen Randbedingungen auch situative Einflussfaktoren berücksichtigen zu können, wurde bei der Berechnung des verfügbaren Manöverraums variabel gestaltet, ob z. B. das Verlassen des eigenen Fahrstreifens und ein kurzzeitiges Befahren von Nachbarfahrstreifen zugelassen werden kann. Mithilfe der vorgenommenen Berechnung ist es möglich zu bestimmen, welcher (laterale) Manöverraum dem Fahrer für die Querführung des Fahrzeugs zur Verfügung steht. Somit kann auch für eine Situation, in der es zu einer unberechtigten Auslösung kommt, quantifiziert werden, welcher Manöverraum vom Fahrer für die Kompensation der unberechtigten Auslösung genutzt werden kann. Zur Berücksichtigung von dynamischen Objekten, welche den Manöverraum eingrenzen, wurden auch laterale Abstände zu anderen Verkehrsteilnehmern berücksichtigt. Hierbei wird angenommen, dass diese mithilfe einer geeigneten Umfelderkennung detektiert werden können und laterale und longitudinale Abstände somit direkt für die Berechnung des verfügbaren Manöverraums genutzt werden können.

Bestimmung der Soll-Fahrerleistung zur Einhaltung des verfügbaren Manöverraums

Nachdem im ersten Schritt mithilfe der objektiven Beschreibung des Manöverraums bestimmt wurde, welcher Manöverraum für den Fahrer für die Kompensation einer unberechtigten Auslösung verfügbar ist, folgte im zweiten Schritt die Verknüpfung mit der dazu erforderlichen Fahrerleistung. Hierzu wurde basierend mit den im Rahmen des AP 2000 erhobenen empirischen Daten ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Fahrerreaktion bei einer unberechtigten Auslösung und der durch die unberechtigte Auslösung und die anschließende Fahrerreaktion hervorgerufene Querabweichung hergestellt. Für diesen Zusammenhang mussten zunächst aussagekräftige Bewertungsgrößen für die Qualität der Fahrerreaktion identifiziert werden, welche sowohl die Reaktionszeit als auch die Reaktionsstärke beinhalten. Zur Veranschaulichung sind in Abb. 1-25 zwei Lenkradwinkelverläufe von Fahrerreaktionen bei unberechtigten Auslösungen dargestellt. Es sind deutliche qualitative Unterschiede in den Fahrerreaktionen erkennbar: Während Fahrer 2 schneller auf die unberechtigte Auslösung reagiert und auch eine kürzere Rückführzeit aufweist (Dauer zwischen fehlerinduziertem maximalen Lenkradwinkel und der Rückführung des Lenkradwinkels auf den Wert null), benötigt der Fahrer 1 in beiden Phasen deutlich länger. Hierdurch kommt es zu einer deutlich größeren Querabweichung durch die unberechtigte Auslösung ($dy_{\text{Fehler, Fahrer 1}} = 0,59 \text{ m}$, $dy_{\text{Fehler, Fahrer 2}} = 0,04 \text{ m}$). Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die Querablage als Integral der Gierrate bzw. des damit verbundenen Lenkradwinkels berechnen lässt. Als Maß für die Reaktionsdauer wird daher die Kompensationszeit verwendet, welche sich aus der Summe von Reaktions- und Rückführzeit zusammensetzt.

$$t_{\text{Kompensation}} = t_{\text{Reaktion}} + t_{\text{Rückführung}}$$

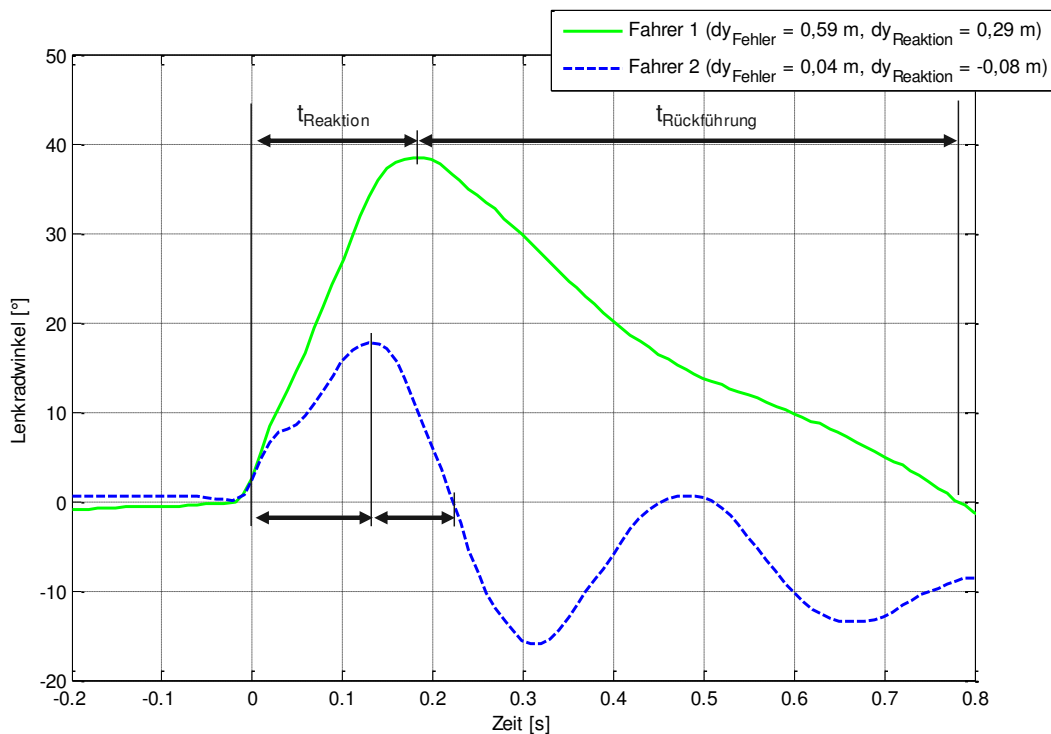


Abb. 1-25: Exemplarische Lenkradwinkelverläufe von Fahrerreaktionen bei unberechtigten Auslösungen

Durch die Reaktion des Fahrers kann es nach der Querabweichung in Richtung der unberechtigten Auslösung gegebenenfalls zu einer Überkompensation kommen, und dadurch zu einer Querabweichung in die (der unberechtigten Auslösung) entgegengesetzte Richtung. In dem gezeigten Beispiel tritt dies bei der Reaktion von Fahrer 2 auf. Fahrer 2 kompensiert den durch die unberechtigten Auslösung induzierten Lenkradwinkel zwar deutlich schneller als Fahrer 1; durch die Überkompensation ist aber die Querabweichung aufgrund der Fahrerreaktion ($dy_{\text{Reaktion, Fahrer 2}} = -0,08 \text{ m}$) absolut gesehen größer, als die durch die unberechtigten Auslösung selbst.

Als Maß für diese Überkompensation der Fahrerreaktion wird das Verhältnis der Gierratenamplituden von Fehler und Reaktionsphase genutzt. Dieses vergleicht die Größe des ersten Maximums der Gierrate (hervorgerufen durch die unberechtigten Auslösung) mit dem sich anschließenden Minimum (hervorgerufen durch die Fahrerreaktion).

$$V_{Gier} = \frac{\dot{\psi}_{max,Fehler}}{\dot{\psi}_{max,Reaktion}}$$

In Abb. 1-26 sind hierzu die Giergeschwindigkeitsverläufe des zuvor gezeigten Beispiels zu sehen. Während für Fahrer 1 das Verhältnis der Gierratenamplituden gegen unendlich geht, da es zu keiner Überkompensation kommt, kann für Fahrer 2 ein Verhältnis der Gierratenamplituden von $V_{Gier, Fahrer 2} = 0,92$ festgestellt werden. Da dieser Wert unter 1 liegt, wird die Gierbewegung durch die Fahrerreaktion verstärkt.

Da es durch diese Überkompensation durch den Fahrer auch zu einem Verlassen des verfügbaren Manöverraums (in der zur unberechtigten Auslösung) entgegengesetzten Richtung) kommen kann, muss dieser Aspekt bei der Bewertung der Soll-Fahrerleistung ebenfalls berücksichtigt werden. Wichtig ist bei der Identifizierung geeigneter Bewertungsgrößen für die Qualität der Fahrerreaktion zudem die spätere Verknüpfung mit der Wirkung eines Übersteuerungsklassifikators, um dessen Potential für die Verbesserung der Kontrollierbarkeit einer unberechtigten Auslösung abschätzen zu können.

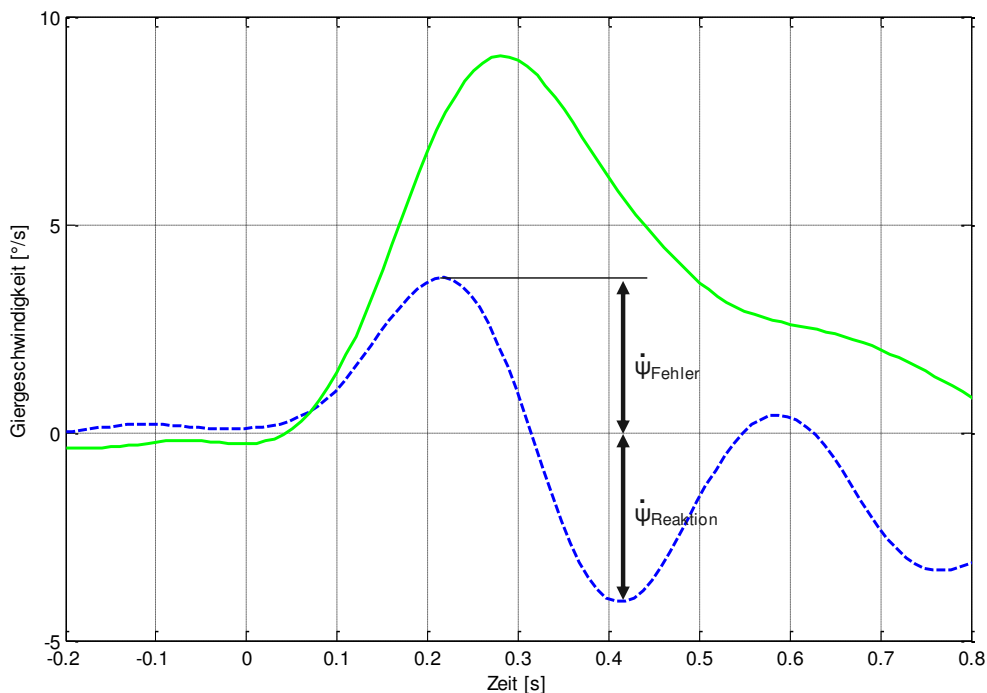


Abb. 1-26: Exemplarische Giergeschwindigkeitsverläufe von Fahrerreaktionen bei unberechtigten Auslösungen

Nach der Identifizierung geeigneter Bewertungsgrößen für die Qualität der Fahrerreaktion kann der funktionale Zusammenhang zu der durch die unberechtigten Auslösung und Fahrerreaktion hervorgerufene Querabweichung hergestellt werden. In Abb. 1-27 oben links ist hierzu ein fiktiver Zusammenhang zwischen der (durch die unberechtigten Auslösung induzierte) Querabweichung und der Dauer der Kompensationszeit. Unten links ist ein ebenfalls fiktiver Zusammenhang zwischen der (durch die Fahrerreaktion hervorgerufene) Querabweichung und dem Verhältnis der Gierratenamplituden dargestellt.

Zur Ableitung der Soll-Fahrerleistung kann nun der durch die objektive Beschreibung des Manöverraums bestimmte, verfügbare Manöverraum eingetragen werden (siehe Abb. 1-27 rechts). Aus dem Schnittpunkt der durch den Manöverraum zulässigen Querabweichung mit dem funktionalen Zusammenhang zwischen

der Qualität der Fahrerreaktion und der durch die unberechtigte Auslösung induzierten Querabweichung, ergibt sich einerseits die Zeit innerhalb der Fahrer die unberechtigte Auslösung kompensiert haben muss (Abb. 1-27 oben rechts). Andererseits ergibt sich ein minimales Verhältnis der Gierratenamplituden, das der Fahrer bei seiner Reaktion vornehmen muss, um ein Verlassen des verfügbaren Manörraums zu der der unberechtigten Auslösung entgegengesetzten Seite zu vermeiden.

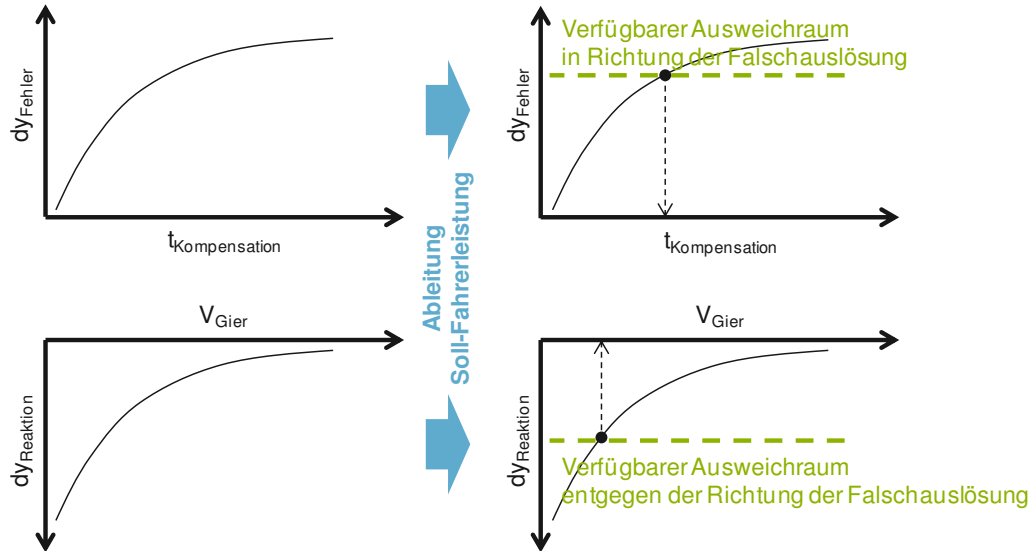


Abb. 1-27: Fiktiver Zusammenhang zwischen der Qualität der Fahrerreaktion (ausgedrückt durch Kompensationszeit sowie das Verhältnis der Gierratenamplituden) und der Querabweichung durch die unberechtigte Auslösung und Fahrerreaktion

Bestimmung des Potentials von Übersteuerungsklassifikatoren

Mithilfe des funktionalen Zusammenhangs zwischen der Fahrerreaktion bei einer unberechtigten Auslösung und der Querabweichung kann neben der Ableitung der Soll-Fahrerleistung auch das Potential von Übersteuerungsklassifikatoren abgeschätzt werden (Forschungsfrage/Schritt 3). Dem zugrunde liegt die Annahme, dass ein Übersteuerungsklassifikator die Fahrerleistung bei der Kompensation einer unberechtigten Auslösung verbessern kann. Der Übersteuerungsklassifikator bewertet dazu während eines Systemeingriffs kontinuierlich das Lenkverhalten des Fahrers und kann so eine mögliche Übersteuerungsabsicht (z. B. bei einer unberechtigten Auslösung) identifizieren. Im Falle einer erkannten Übersteuerungsintention kann so der Systemeingriff abgebrochen werden, um dem Fahrer die Kontrolle über die Lenkung zu erleichtern. Das Potential eines Übersteuerungsklassifikators kann somit über die Verbesserung der Fahrerleistung in eine Verringerung des zur Kompensation benötigten Manörraums umgerechnet werden.

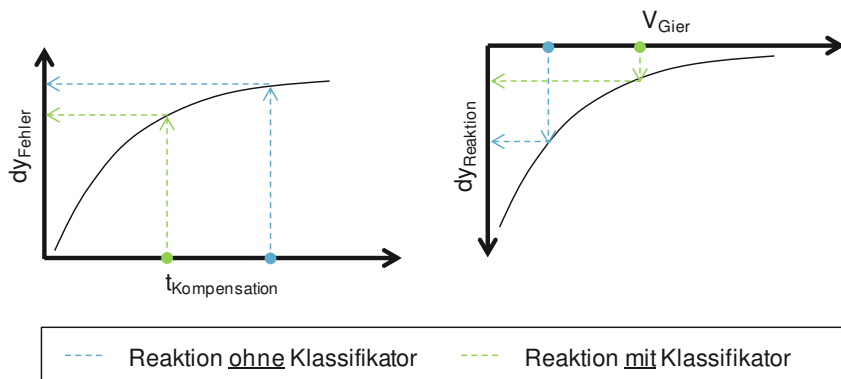


Abb. 1-28: Ableitung des Potentials eines Übersteuerungsklassifikators im Hinblick auf die Verringerung des zur Kompensation benötigten Manörraums

Ähnlich zu der zuvor beschriebenen Ableitung der Soll-Fahrerleistung kann auch das Potential eines Übersteuerungsklassifikators bestimmt werden. Für die Bestimmung des Potentials wird jedoch der umgekehrte Weg beschritten. Ist für den Übersteuerungsklassifikator bekannt, wie stark er die Fahrerleistung hinsichtlich der Kompensationszeit und des Verhältnisses der Gierratenamplituden verbessern kann, so kann auf Grundlage des funktionellen Zusammenhangs zwischen Querabweichung und Fahrerreaktion bestimmt werden, welche Verringerung in der Querabweichung durch den Klassifikator erwartet werden kann (vgl. Abb. 1-28).

1.3.3.3 Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse orientiert sich an der Gliederung des zuvor vorgestellten methodischen Vorgehens.

Objektive Beschreibung des Manöverraums

Die objektive Beschreibung des Verkehrsraums stellt die durch die statischen und dynamischen Randbedingungen des Szenarios vorgegebenen lateralen Abstände zu baulichen Begrenzung oder Fahrstreifen- bzw. Fahrbahnmarkierungen sowie zu anderen Verkehrsteilnehmern dar. Berücksichtigt wurden dabei Stadtstraßen, als Einsatzgebiet für die in UR:BAN entwickelten Funktionen, sowie Autobahnen, als bisheriger Anwendungsschwerpunkt von Assistenzsystemen. Mithilfe der entsprechenden Richtlinien für die Anlage dieser Straßentypen (RAA und RAST) wurden für die möglichen Varianten des entsprechenden Straßentyps die sich ergebenden Fahrstreifen- und Fahrbahnbreiten berechnet und für eine variable Szenarienbeschreibung hinterlegt. Diese erhält vom Nutzer über eine graphische Oberfläche folgende Eingabegrößen:

<i>Fahrzeugparameter</i>	<i>Situationsparameter</i>	<i>Infrastrukturparameter</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Fahrzeugbreite 	<ul style="list-style-type: none"> • Aktueller lateraler Versatz im Fahrstreifen • Lateraler Abstand zu anderen Verkehrsteilnehmern 	<ul style="list-style-type: none"> • Straßentyp • Anzahl der Fahrstreifen • Aktuell befahrener Fahrstreifen • Auswahl befahrbarer Fahrbahnteile

Hieraus wird mithilfe der hinterlegten Daten berechnet, welcher laterale Abstand dem Fahrer für die Kompensation der unberechtigten Auslösung zur Verfügung steht und dies in der Oberfläche angezeigt (siehe Abb. 1-29 und Abb. 1-30). Während für Autobahn nur drei grundsätzliche Fahrstreifenbreiten vorgesehen sind (3,25 m / 3,50 m / 3,75 m), ergeben sich für Stadtstraßen hingegen insgesamt über 10 mögliche Fahrstreifenbreiten zwischen den in Tabelle 1-3 genannten Maximal- und Minimalwerten. Wird durch die Auswahl der befahrbaren Fahrbahnelemente auch das Befahren von z. B. Nachbarfahrstreifen oder Randstreifen zugelassen, ergeben sich deutlich größere verfügbare Manöverräume.

Ergibt sich durch ein dynamisches Objekt ein geringerer Manöverraum, als durch die statischen Randbedingungen, so wird der minimale Manöverraum durch das dynamische Objekt angegeben (und umgekehrt).

Fahrzeugbreite: m

Anzahl Fahrstreifen in Ego-Fahrtrichtung:
(inkl. eventueller Bus- und SB-Spuren)

Befahrer Fahrstreifen:

Breite Fahrstreifen: m

Versatz zur Fahrstreifenmitte: m
(links +, rechts -)

Zusatzangaben zur Situation:

Baulich nicht abgetrennter Gegenverkehr

Straßenbahn auf linker Spur m

Schutzstreifen für Radfahrer rechts

Radspur rechts m

Rechte Spur ist Busspur m

Linke Spur ist Busspur m

Befahrbare Fahrbahnteile:

Eigener Fahrstreifen

Nachbar-Fahrstreifen

Busspur

Straßenbahn-Spur

Schutzstreifen für Radfahrer

Radspur

Gegenverkehr

Dynamisches Objekt:

Objekt aktiv

Objektbreite: m

lateraler Versatz: m
(bezogen auf Obj.-Mitten) (links +, rechts -)

longitudinaler Versatz: m

Zur Verfügung stehender Manöverraum

0,575 linker Manöverraum (m) 1,850 Fahrzeugbreite (m) 0,700 rechter Manöverraum (m)

Abb. 1-29: Graphische Oberfläche für Ein- und Ausgabe zur objektiven Beschreibung des Manöverraums (Stadtstraßen).

Fahrzeugbreite m

Welcher Autobahntyp wird befahren:

EKA 1

EKA 2

EKA 3

Anzahl Fahrstreifen:

Versatz zu Fahrstreifenmitte: m
(links +, rechts -)

Befahrer Fahrstreifen

Befahrbare Fahrbahnteile:

Eigener Fahrstreifen

Nachbarfahrstreifen

Randstreifen

Standstreifen

Dynamisches Objekt:

Objekt aktiv

Objektbreite: m

lateraler Versatz: m
(bezogen auf Obj.-Mitten) (links +, rechts -)

longitudinaler Versatz: m

Zur Verfügung stehender Manöverraum

0,700 linker Manöverraum (m) 1,850 Fahrzeugbreite (m) 0,700 rechter Manöverraum (m)

Abb. 1-30: Graphische Oberfläche für Ein- und Ausgabe zur objektiven Beschreibung des Manöverraums (Autobahnen).

Zur Veranschaulichung der Unterschiede hinsichtlich des Manöverraums aufgrund der statischen Randbedingungen zwischen Stadtstraßen und Autobahnen sollen im folgenden Beispiel minimale und maximale Ausprägungen des jeweiligen Straßentyps dargestellt werden. Dieses Beispiel wird im Folgenden aufgegriffen, um die erforderliche Soll-Fahrerleistung sowie das Unterstützungspotential eines Übersteuerungsklassifikators zu bestimmen.

Beispiel. Um eine einheitliche Bewertungsgrundlage zu schaffen, wird eine Situation betrachtet, in der der Fahrer eine unberechtigte Auslösung innerhalb des eigenen Fahrstreifens kompensieren soll. Mithilfe der objektiven Beschreibung des Manöverraums wird für Stadtstraßen und Autobahnen der minimale und maximale Manöverraum bestimmt, der bei einer mittigen Fahrweise im Fahrstreifen bis zur linken und rechten Fahrstreifenbegrenzung vorhanden ist. Es ergeben sich bei einer Fahrzeugbreite von 1.85 m die in Tabelle 1-3 angegebenen Werte.

Tabelle 1-3: Minimale und maximale Fahrstreifenbreiten für Stadtstraßen und Autobahnen nach RAST und RAA

	Fahrstreifenbreite (max/min)	Verfügbare Manöverraum zu beiden Seiten (max/min)
Stadtstraße	5 m / 2.25 m	1.58 m / 0,20 m*
Autobahn	3.75 m / 3.25 m	0,95 m / 0.70 m

* als minimaler „Bewegungsraum“ wird in der RAST ein Wert von 0.15 m angegeben

Bestimmung der Soll-Fahrerleistung zur Einhaltung des verfügbaren Manöverraums

Zur Bestimmung der Soll-Fahrerleistung zur Einhaltung des zuvor beschriebenen Manöverraums bei einer unberechtigten Auslösung muss ein Zusammenhang zwischen der Fahrerreaktion und der dabei erzielten Querabweichung gefunden werden. Dieser ist im hohen Maße von den fahrdynamischen Eigenschaften des Versuchsfahrzeugs abhängig. Die im Folgenden dargestellte Bestimmung der Soll-Fahrerleistung basiert auf dem im Rahmen des AP 2000 durchgeführten Versuchs zur Bestimmung des Einflusses des Verkehrsraums auf die Fahrerleistung (insbesondere das dabei verwendete Versuchsfahrzeug) und kann daher nicht generalisiert werden.

Wie im methodischen Vorgehen zur Bestimmung der Soll-Fahrerleistung dargestellt, wird angenommen, dass der Zusammenhang zwischen Fahrerreaktion und resultierender Querabweichung mithilfe der Größen Kompensationszeit und dem Verhältnis der Gierratenamplituden beschrieben werden kann. Hierbei wird die Kompensationszeit als maßgeblich für die initiale Abweichung in Richtung der unberechtigten Auslösung angesehen sowie das Verhältnis der Gierratenamplituden für die anschließende Abweichung in die entgegengesetzte Richtung. Die Kompensationszeit kann somit als „Schnelligkeit“ der Fahrerreaktion gewertet werden, während das Verhältnis der Gierratenamplituden die Qualität (z. B. Überkompensation) der Fahrerreaktion adressiert.

In Abb. 1-31 ist zunächst der Zusammenhang zwischen der Kompensationszeit und der Querabweichung in Richtung der unberechtigten Auslösung zu sehen. Die bei unberechtigter Auslösung aufgetretenen Kompensationszeiten wurden Intervall-Klassen von 100 ms zusammengefasst und die jeweilige Verteilung innerhalb dieser Klasse als Boxplot aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender Kompensationszeit zum einen die Median-Werte der Intervalle, zum anderen die Streuung innerhalb der Intervalle zunimmt.

Zudem wurden die Erstreaktionen bei unberechtigten Auslösungen dargestellt, um einen Eindruck zu vermitteln, in welchen Bereich sich die Werte bei unvorbereiteten Fahrern befinden. Der funktionale Zusammenhang zwischen den Median-Werten der Intervall-Klassen und den entsprechenden Kompensationszeiten wurde mithilfe einer quadratischen Funktion angenähert, wobei für die Anpassungen des Modells die Mediane der Intervalle mit ihrer Fallzahl gewichtet wurden. Die Annahme eines quadratischen Zusammenhangs wurde auf Grundlage des quadratischen Zusammenhangs zwischen der durch eine Gierrate hervorgerufenen Querabweichung ($dy = 0,5\psi vt^2$) getroffen. Für die Erstkontakte wurde ebenfalls eine quadratische Funktion angenähert.

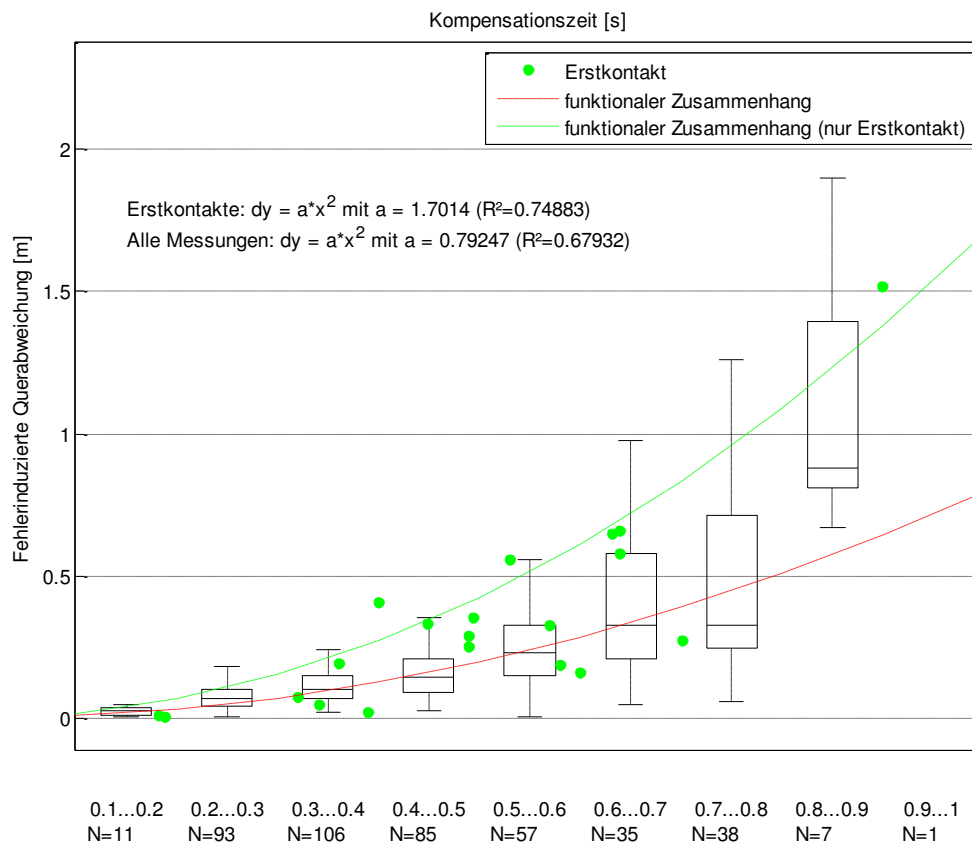


Abb. 1-31: Bestimmung des Zusammenhangs zwischen Kompensationszeit des Fahrers und der daraus resultierenden, fehlerinduzierten Querabweichung

Für die Qualität der Fahrerreaktion ist in Abb. 1-32 der Zusammenhang zwischen dem Verhältnis der Gierratenamplituden und der maximalen Querabweichung in der Gegenrichtung der unberechtigten Auslösung zu sehen. Analog zum Vorgehen für die Kompensationszeit wurden auch die Werte des Verhältnisses der Gierratenamplituden in Intervall-Klassen eingeteilt und der (logarithmisch) gewählte funktionale Zusammenhang mithilfe der gewichteten Median-Werte der Intervall-Klassen bestimmt. Die Vorzeichenkonvention für die Querabweichung entspricht dabei der in Abb. 1-31. Dies bedeutet, dass eine negative Querabweichung einer Überkompensation über die ursprüngliche laterale Position hinaus stattgefunden hat. Bei einer positiven maximalen Querabweichung durch die Fahrerreaktion befindet sich das erste Extremum nach der fehlerinduzierten Querabweichung ebenfalls in der gleichen Richtung.

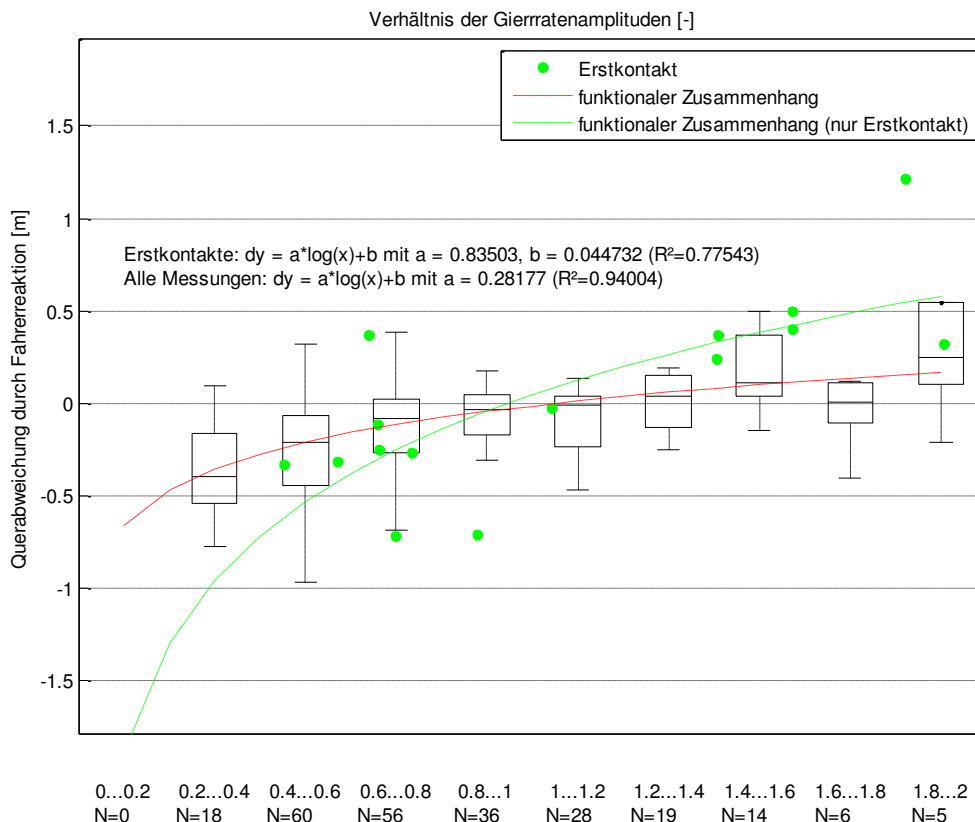


Abb. 1-32: Bestimmung des Zusammenhangs zwischen dem Verhältnis der Gierratenamplituden des Fahrers und der daraus resultierenden Querabweichung in Gegenrichtung der unberechtigten Auslösung.

Beispiel. Mithilfe der bestimmten funktionalen Zusammenhänge lässt sich für die Tabelle 1-4 berechneten verfügbaren Manöverräume die erforderliche Fahrerreaktion ableiten. Hierzu wird die Umkehrfunktion der funktionalen Zusammenhänge für die Kompensationszeit und das Verhältnis der Gierratenamplituden genutzt. Es ergeben sich folgende Werte:

Tabelle 1-4: Erforderliche Fahrerreaktion bei maximaler und minimaler Fahrstreifenbreite für Stadtstraßen und Autobahnen

	Verfügbare Manöverraum zu beiden Seiten (max/min)	Kompensationszeit	Verhältnis der Gierratenamplituden
Stadtstraße	1.58 m / 0.20 m	1.7 s / 0.46 s	$\cong 0 / 2.2$
Autobahn	0.95 m / 0.70 m	1.02 s / 0.87 s	0.04 / 0.09

In Tabelle 1-3 und Tabelle 1-4 ist zu erkennen, dass die erforderlichen Kompensationszeiten und Verhältnisse der Gierratenamplituden für minimale und maximale Fahrstreifenbreiten auf Autobahnen sowie für maximale Fahrstreifenbreiten auf Stadtstraßen auch bei Erstreaktionen eingehalten werden können. Für sehr enge Fahrstreifen auf Stadtstraßen hingegen sind Reaktionen erforderlich, die von mehr als 50% der Fahrer bei der Erstreaktion nicht eingehalten werden.

Bestimmung des Potentials von Übersteuerungsklassifikatoren

Zur Bestimmung des Übersteuerungspotentials von Übersteuerungsklassifikatoren wurde zunächst die Auswirkung der Verwendung eines solchen Klassifikators auf die Kompensationszeit und das Verhältnis der Gierratenamplituden bestimmt. In Abb. 1-33 sind hierzu die entsprechenden Werte für die Rahmen des

Versuchs erhobenen Daten zu sehen. Für die Kompensationszeit ergeben sich nur minimale Unterschiede zwischen Eingriffen mit und ohne Übersteuerungsklassifikator. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der untersuchte Übersteuerungsklassifikator nach frühestens 500 ms einen Abbruch des Systemeingriffs ermöglichte und damit der Abbruch in der Regel erst nach Ablauf der Kompensationszeit stattfand. Bei höheren Kompensationszeiten kann durch den harten Abbruch jedoch ein Effekt beobachtet werden.

Für das anschließende Verhältnis der Gierratenamplituden ergibt sich ein deutlicher Unterschied zwischen Situationen mit und ohne Übersteuerungsklassifikator. Während die initiale Gierbewegung ohne Übersteuerungsklassifikator durch die Fahrerreaktion noch verstärkt wird (Verhältnis der Gierratenamplituden < 1) kann sie bei Verwendung eines Übersteuerungsklassifikators im Mittel verringert werden (Verhältnis der Gierratenamplituden > 1). Hierbei sollte darauf verwiesen werden, dass es sich bei dem systeminitiierten Lenkeingriff um einen feste Lenktrajektorie handelt, welche unabhängig von der aktuellen Fahrzeugposition einen sinus-ähnlichen Lenkradwinkelverlauf einzuregeln versucht. Hierdurch kann es dazu kommen, dass bei einer Übersteuerungsreaktion des Fahrers sich das Fahrermoment zur Kompensation der ersten Auslenkbewegung und das Systemmoment zur Einleitung der Gegenlenkbewegung (beim Übergang zwischen Aus- und Rücklenkbewegung) derart überlagern, dass dies zu einer Überkompensation führt.

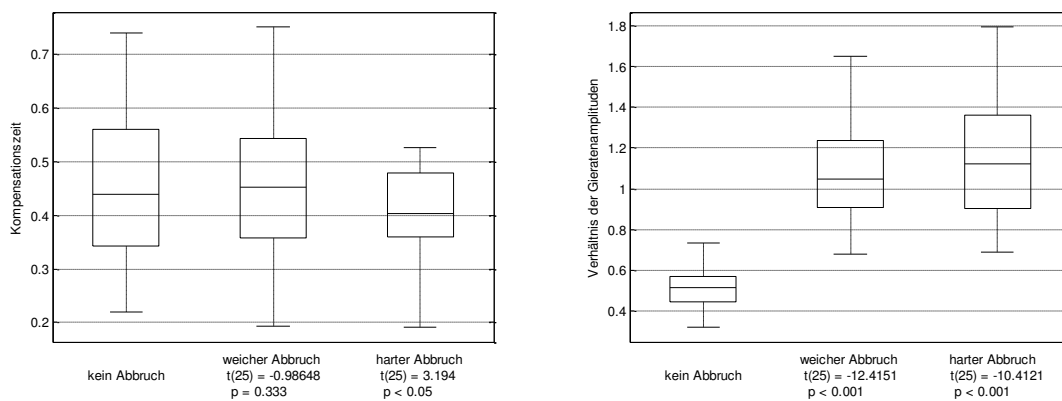


Abb. 1-33: Einfluss der Verwendung von Übersteuerungsklassifikatoren auf die Kompensationszeit und das Verhältnis der Gierratenamplituden (basierend auf Versuch aus AP2000)

Mithilfe der zuvor hergeleiteten funktionalen Zusammenhänge kann die Verringerung des zur Kompensation benötigten Manörraums bestimmt werden. Hierbei sei nochmals darauf hingewiesen, dass es sich bei den hier dargestellten Zusammenhängen und daraus abgeleiteten Werten um empirische Daten handelt, die sich nicht ohne Einschränkung auf andere Versuchsdarstellungen verallgemeinern lassen.

Beispiel. Mithilfe des in Abb. 1-33 beschriebenen Einflusses des Übersteuerungsklassifikators auf die Kompensationszeit und das Verhältnis der Gierratenamplituden sowie der funktionalen Zusammenhänge lässt sich berechnen, zu welcher Verringerung des benötigten Manörraums die Verwendung des Übersteuerungsklassifikators führt: Während für die Querabweichung in Eingriffsrichtung nur bei einem harten Abbruch eine geringfügige Verringerung erzielt werden kann, ist der Einfluss für die anschließende Querabweichung entgegen der Eingriffsrichtung mit ca. 20 cm deutlich größerer. Dieses Ergebnis zeigt, dass der Vorteil der Verwendung eines Übersteuerungsklassifikators (aufgrund der voraussichtlich benötigten Zeit für eine zuverlässige Bestimmung der Übersteuerungsabsicht) vor allem in der Phase der Rücklenkbewegung und der daraus resultierenden verringerten Querabweichung entgegen der Eingriffsrichtung liegt.

Tabelle 1-5: Einfluss des Übersteuerungsklassifikators auf die Querabweichung.

	Ohne Übersteuerungsklassifikator	Mit Übersteuerungsklassifikator	
	Kein Abbruch	Weicher Abbruch	Harter Abbruch
Querabweichung in Eingriffsrichtung	0.16 m	0.16 m	0.13 m
Querabweichung entgegen Eingriffsrichtung	-0.2 m	0 m	0.02 m

1.3.3.4 Abgleich mit dem Toleranzansatz

Die zuvor dargestellten Ergebnisse legen den Fokus auf objektive Randbedingungen durch die Verkehrssituation, berücksichtigen dabei aber nicht die subjektive Bewertung der Situation durch die Fahrer. In [11] wird dazu festgestellt, dass „eine Festlegung von Toleranzkriterien auf Basis von Fahrbahnüberschreitungen [...] Stellfehler zu[lässt], die von den Fahrern nicht mehr akzeptiert werden.“ Basierend auf den subjektiven Fahrerurteilen wird ein Gierratenkriterium festgelegt, welches für eine Geschwindigkeit von 50 km/h eine maximale Gierrate von 4°/s als tolerierbar festlegt. Um diese Erkenntnisse mit den beschriebenen Ergebnissen in einen Kontext zu stellen, ist in Abb. 1-34 der Zusammenhang zwischen der Kompensationszeit und der maximalen Gierrate dargestellt. Erwartungsgemäß ergibt sich eine mit der Kompensationszeit zunehmende maximale Gierrate.

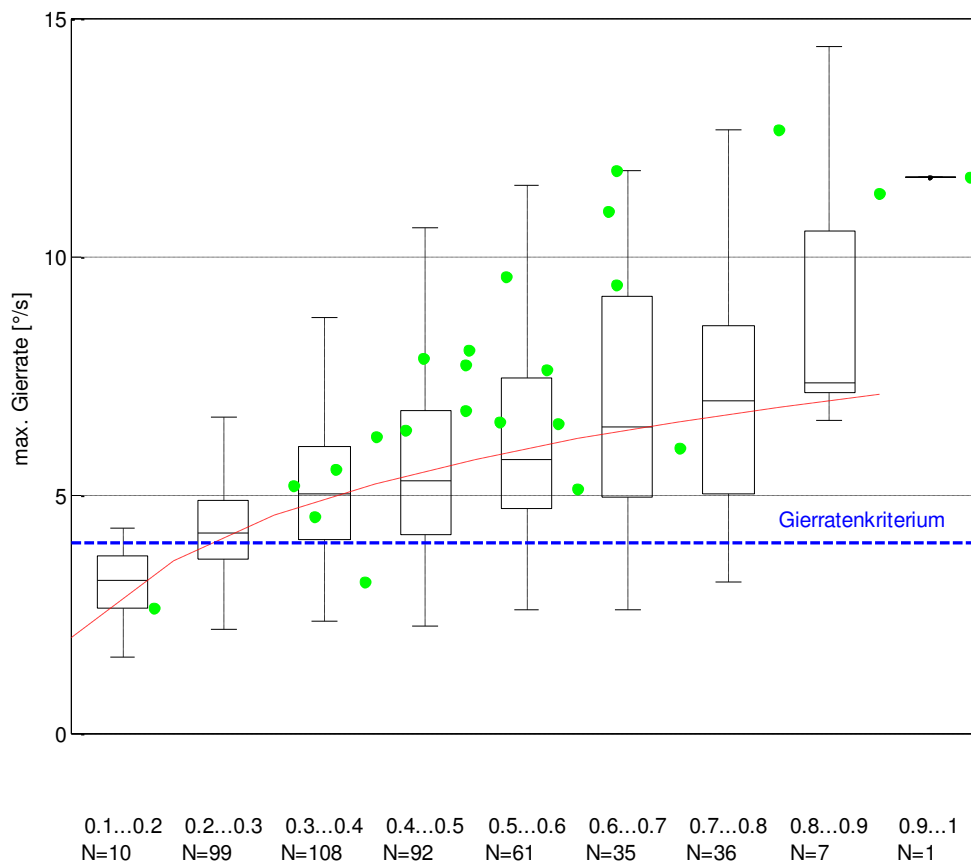


Abb. 1-34: Zusammenhang zwischen max. Gierrate und Kompensationszeit

Des Weiteren kann der Abbildung entnommen werden, dass die auftretenden maximalen Gierraten bei Erstkontakten mit der unberechtigten Auslösung bis auf zwei Ausnahmen oberhalb der Gierratengrenze von 4°/s liegen. Es ist zu erkennen, dass für den in diesem Versuch untersuchten Systemeingriff zur Einhaltung einer maximalen Gierrate von weniger als 4°/s eine sehr schnelle Fahrerreaktion (< 0,3 s) erforderlich ist, welche insbesondere beim Erstkontakt mit der unberechtigten Auslösung von nahezu allen Fahrern nicht erreicht wird. Dies legt nahe, dass für die Bewertung der Kontrollierbarkeit klassische fahrdynamische Kennwerte

wie z. B. die Gierrate nicht ohne Anpassung der bestehenden Grenzwerte anwendbar scheinen. Insgesamt konnte auch hier (wie in [10]) festgehalten werden, dass eine Bewertung der Kontrollierbarkeit über die Fahrertoleranz deutlich konservativer ausfällt als auf Basis des verfügbaren Manöverraums (hier der Fahrstreifenbreite).

1.3.3.5 Zusammenfassung und Diskussion

Mithilfe des vorgestellten Vorgehens zur Ableitung der Soll-Fahrerleistung aus der Beschreibung des verfügbaren Manöverraums, kann basierend auf den getroffenen Annahmen abgeschätzt werden, wie schnell und wie stark der Fahrer reagieren muss/darf, um ein Verlassen des vorhandenen Manöverraums zu vermeiden. Hierbei ist anzumerken, dass die vorgestellten Ergebnisse eine exemplarische Anwendung auf Grundlage der in AP 2000 erhobenen empirischen Daten darstellen und daher nicht verallgemeinerbar sind. Die abgeleiteten Werte sind daher nur für die in der Versuchsanordnung Szenariendarstellung uneingeschränkt gültig. Demzufolge dienen die auf Basis der aus der Versuchsanordnung abgeleiteten funktionalen Zusammenhänge zwischen Querabweichung und Kompensationszeit sowie zwischen Querabweichung und dem Verhältnis der Gierratenamplituden auch nur der groben Orientierung für die Soll-Fahrerleistung für die Manöverräume, die sich aus den situativen Voraussetzungen auf der Autobahn ableiten. Für eine tatsächliche Ableitung der erforderlichen Soll-Fahrerleistung bei unberechtigten Auslösungen auf Autobahnen muss der Einfluss der höheren Fahrgeschwindigkeit mit berücksichtigt werden. Des Weiteren ist die Verallgemeinerbarkeit auf den im Versuch untersuchten Systemeingriff beschränkt.

Trotz der zuvor genannten Einschränkungen für die allgemeingültige Anwendbarkeit der exemplarischen Ergebnisse, liefert die vorgestellte Methodik wertvolle Erkenntnisse hinsichtlich des Potentials von Übersteuerungsklassifikatoren zur Einhaltung des verfügbaren Manöverraums: So ergab sich der Vorteil der Verwendung eines Übersteuerungsklassifikators in der betrachteten Versuchsanordnung insbesondere dadurch, dass ein deutliches Überschwingen bei der Fahrerreaktion besser vermieden werden kann. Der Effekt der Überlagerung der Gegenlenkbewegung des Fahrers mit dem Richtungswechsel einer Sinus-förmig angenommenen (Lenkradwinkel-)Trajektorie kann bei rechtzeitiger Erkennung der Übersteuerungsabsicht des Fahrers vermieden werden. Die Auswirkung der unberechtigten Auslösung kann somit größtenteils auf die initialen Fehlerwirkung beschränkt werden und beinhaltet nicht die (häufig) deutlich größere fahrdynamische Anregung durch eine mögliche Überkompensation des Fahrers.

1.3.4 AP 4000 Lösungsansätze und Empfehlungen

Im Rahmen des AP 4000 wurden basierend auf den Erkenntnissen der vorangegangenen Arbeitspakete Lösungsansätze und Empfehlungen erarbeitet, die zu einer Verbesserung der Kontrollierbarkeit beitragen können. Um bei Maßnahmen zur Verbesserung der Kontrollierbarkeit die Wirksamkeit nicht zu verringern, wird im Folgenden ein Lösungsansatz für eine gemeinsame Berücksichtigung von Kontrollierbarkeit und Wirksamkeit vorgestellt.

Bei der Entwicklung von Assistenzsystemen, die aktiv in die Fahrdynamik eingreifen (wie z. B. ein Ausweichassistent), besteht ein Spannungsfeld zwischen der Wirksamkeit und der Kontrollierbarkeit. Eine Erhöhung der Dynamik, mit der das Assistenzsystem eingreifen kann, bewirkt einerseits, dass im Nutzenfall ggf. mehr Kollisionen verhindert werden können, führt jedoch andererseits bei einer unberechtigten Auslösung dazu, dass diese für den Fahrer schwerer zu kontrollieren ist. [12] beschreiben die Wechselwirkung der „Interaktionsdimensionen“ Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit wie folgt: „Notwendige Voraussetzung [...] ist die Kontrollierbarkeit der Auswirkungen von Fehlern einer Funktion. Oberstes Ziel [...] einer Interaktion ist die Wirksamkeit einer Interaktion und daraus folgend einer Funktion als solches.“ Somit wird klar, dass beide Interaktionsdimensionen nicht getrennt voneinander betrachtet werden sollten, sondern ihre wechselseitige Wirkung bei einer Systemauslegung berücksichtigt werden muss.

Der genannte Zielkonflikt wurde bereits im Kap. 1.3.1.2 beschrieben. Im Rahmen des AP 4000 wurde ein methodischer Denkanstoß erarbeitet, Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit bei der Entwicklung eines Assistenzsystems gemeinsam im Sinne der Maximierung des Gesamtnutzens zu berücksichtigen. Die Grundlage hierzu bildet die Verknüpfung von Kontrollierbarkeit und Wirksamkeit über die maximale Gierrate in einer

Ausweichsituation. Die Idee ist, dass aus der Literatur bekannt ist, dass eine hohe maximale Gierrate mit geringer Kontrollierbarkeit durch den Fahrer assoziiert werden kann. Auf der anderen Seite kann beim Zulassen einer hohen Gierrate die Wirksamkeit eines Systems gesteigert werden, da in mehr Situationen eine Kollisionsvermeidung durch Ausweichen ermöglicht werden kann. Die Diskussion im Rahmen des KON-Kreises ergab, dass eine quantitative numerische Beschreibung des Spannungsfelds aufgrund der nötigen zu treffenden Annahmen bzw. der immensen Aufwands für einen experimentellen Beleg nicht zielführend ist. Das vorgestellte Konzept sollte somit vielmehr als Denkanstoß für eine Systemabstimmung im Spannungsfeld zwischen Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit verstanden werden, welcher im Zusammenhang der Entwicklung eines Assistenzsystems für das Notausweichen genutzt werden kann, um eine einseitige Optimierung zu vermeiden. Der vorgestellte Ansatz erhebt daher nicht den Anspruch, das Spannungsfeld auflösen zu können, sondern einen methodischen Denkanstoß für eine geeignete, gemeinsame Berücksichtigung von Kontrollierbarkeit und Wirksamkeit im Rahmen einer Systemabstimmung darzustellen.

1.3.4.1 Fragestellung

Im Rahmen des AP 4000 wurde der Versuch unternommen, das Spannungsfeld zwischen Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit von eingreifenden Assistenzsystemen geeignet zu adressieren. Hierzu wurde in einem ersten Schritt das Spannungsfeld am Beispiel der Anwendung eines Ausweichassistenzsystems im urbanen Raum beschrieben. Der Fokus liegt hierbei auf der Berücksichtigung situationsspezifischer Parameter wie der Annäherungsgeschwindigkeit und der erforderlichen Ausweichbreite.

Um die Wirksamkeit einer Ausweichfunktion im urbanen Anwendungsbereich zu beschreiben, kann unter bestimmten Annahmen berechnet werden, in welchen Situationen Ausweichmanöver besser geeignet sind eine Kollision zu vermeiden, als Bremsmanöver. Dazu werden die minimal erforderlichen Abstände, die in einer beispielhaft angenommenen Annäherungssituation an ein Hindernis zur Kollisionsvermeidung durch Ausweichen und Bremsen erforderlich sind, wie folgt berechnet.

Für die Kollisionsvermeidung durch Bremsen ergibt sich unter der Annahme einer konstanten Verzögerung der folgende Zusammenhang zwischen minimalem Bremsabstand und der Annäherungsgeschwindigkeit:

$$dx_{min,Bremsen} = \frac{v^2}{2a_{längs,max}}$$

Für eine Kollisionsvermeidung durch Ausweichen wird eine kreisbogenförmige Ausweichtrajektorie angenommen. Es besteht neben der Abhängigkeit des minimalen Ausweichabstands von der Annäherungsgeschwindigkeit auch eine Abhängigkeit von der maximalen Gierrate:

$$dx_{min,Ausweichen} = \sqrt{\frac{2v}{\psi_{max}} B - B^2}$$

Beide Zusammenhänge sind in Abb. 1-35 visualisiert. Dabei wurde exemplarisch eine maximal mögliche Längsverzögerung von 10 m/s^2 sowie eine konstante Ausweichbreite angenommen. Dargestellt sind jeweils die Grenzkurven, bei denen der erforderliche Bremsabstand dem erforderlichen Ausweichabstand entspricht. Wie zu sehen ist, ist der Verlauf dieser Grenzkurven von der erforderlichen Ausweichbreite abhängig. Bei höheren Annäherungsgeschwindigkeiten („rechtsseitig der Grenzkurven“) kann eine höhere Wirksamkeit durch Ausweichen angenommen werden, da sich in diesem Bereich der erforderliche Abstand für ein Ausweichen um das Hindernis geringer ist, als zur Kollisionsvermeidung durch Bremsen benötigt würde. Umgekehrt ist bei geringeren Geschwindigkeiten („linksseitig der Grenzkurven“) der erforderliche Bremsabstand geringer, weshalb in diesen Situationen von einer höheren Wirksamkeit durch Bremsen ausgegangen wird.

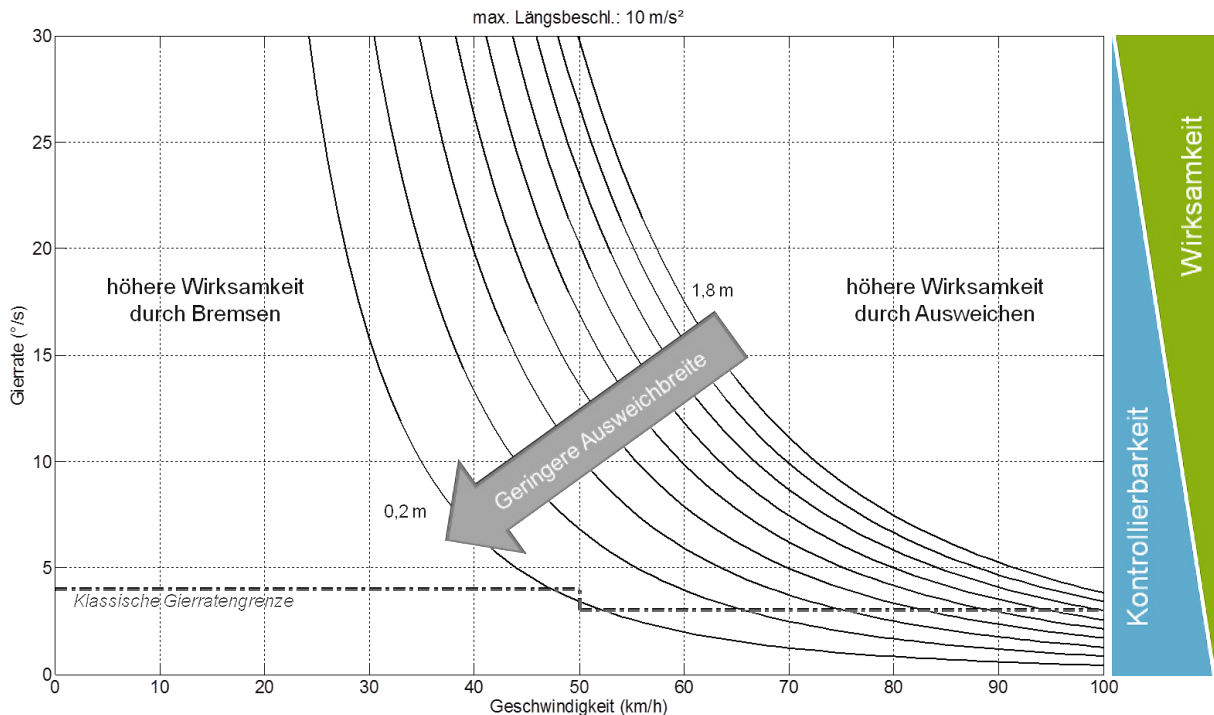


Abb. 1-35: Wirksamkeit für Bremsen und Ausweichen in Abhängigkeit der Annäherungsgeschwindigkeit, der maximalen Gierrate sowie der Ausweichbreite

Des Weiteren wurde in Abb. 1-35 die Toleranzgrenze durch die subjektive Kontrollierbarkeitsbewertung nach [11] eingetragen. Es ist zu erkennen, dass bei Einhaltung dieses Grenzwertes für „urbane“ Annäherungsgeschwindigkeiten (≤ 50 km/h) durch Bremsen eine höhere Wirksamkeit zur Kollisionsvermeidung erzielt werden kann, als durch das Ausweichen. Um in diesem Geschwindigkeitsbereich (gerade bei größeren Ausweichbreiten) eine höhere Wirksamkeit durch Ausweichen zu erzielen, ist es erforderlich, höhere maximale Gierraten zuzulassen. Wie bereits dargestellt, legt dies nahe, dass für die Bewertung der Kontrollierbarkeit von Ausweichfunktionen klassische fahrdynamische Kennwerte wie z. B. die Gierrate nicht ohne Anpassung der bestehenden Grenzwerte anwendbar scheinen. Das Spannungsfeld zwischen Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit ist also für den urbanen Anwendungsraum bzw. für urbane Annäherungsgeschwindigkeiten dahingehend ausgeprägt, dass situationsspezifisch hohe Gierraten erforderlich sind, welche aber deutlich über der bisher angewendeten Kontrollierbarkeitsgrenze liegen.

Im folgenden Abschnitt wird nun ein Denkanstoß vorgestellt, der Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit im Sinne eines maximalen Gesamtnutzens für eine Systemauslegung diskutiert und somit eine einseitige Optimierung zugunsten einer dieser Interaktionsdimension vermeidet. Eine Ableitung von allgemeingültigen Ziel- bzw. Grenzwerten ist dabei weder sinnvoll noch möglich, wie anschließend detailliert dargestellt wird. Bei Kenntnis des theoretischen maximalen Gesamtnutzens bzw. der damit verbundenen Fahrdynamik kann jedoch darauf basierend festgelegt werden, zu welchem Zeitpunkt in einer kritischen Annäherungssituation ein Ausweichassistent eingreifen sollte. Mit Blick auf die Systemakzeptanz sollte ein solches System dabei zum letztmöglichen Zeitpunkt eingreifen, bei dem eine Kollision vermieden werden kann, aber noch ein „Mindestmaß“ an Kontrollierbarkeit gewährleistet werden kann.

1.3.4.2 Methodischer Denkanstoß zur gemeinsamen Berücksichtigung von Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit im Sinne eines maximalen Gesamtnutzens

Um im urbanen Bereich durch Systeme zur Kollisionsvermeidung durch Ausweichen einen Beitrag zur Verminderung von Unfällen zu leisten, müssen basierend auf den zuvor beschriebenen Randbedingungen höhere maximale Gierraten für Systemeingriffe zugelassen werden (unter den hier getroffenen Annahmen). Hieraus ergibt sich allerdings die eingangs formulierte Problematik, dass durch eine höhere maximale Gier-

rate zwar in mehr Situationen eine Kollision durch Ausweichen vermieden werden kann, jedoch auch berechtigt angenommen werden kann, dass die erhöhte Dynamik dazu führt, dass nur weniger Fahrer bei einem unberechtigten Systemeingriff diesen kontrollieren können.

Daher wurde ein methodischer Ansatz vorgestellt, der Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit im Sinne eines maximalen Gesamtnutzens für eine Systemauslegung diskutiert und somit eine einseitige Optimierung zugunsten einer dieser Interaktionsdimensionen vermeidet. Die zugrundeliegende Annahme für diesen Ansatz beruht auf der Überlegung, dass Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit funktional von der maximalen Gierrate sowie der Geschwindigkeit abhängen. Aus der Überlegung dieser Abhängigkeit von Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit von Annäherungsgeschwindigkeit sowie Gierrate ergibt sich die Möglichkeit für jede Geschwindigkeit eine bestimmte Gierrate errechnen zu können, bei der der Gesamtnutzen unter Berücksichtigung der situationspezifischen Parameter maximal wird. Dieser Zusammenhang sei im Folgenden anhand einer exemplarischen, qualitativen Darstellung veranschaulicht:

Um den „optimalen“ Gesamtnutzen aus Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit bestimmen zu können, müssen beide Interaktionsdimensionen zunächst auf geeignete Kenngrößen normiert werden. Anschließend können mithilfe der qualitativen Verläufe der beiden Kenngrößen für eine konstante Annäherungsgeschwindigkeit die Gierrate errechnet werden, bei der sich der maximale Gesamtnutzen ergibt.

Für die Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit werden jeweils qualitative Funktionen, welche sowohl von der maximalen Gierrate als auch Annäherungsgeschwindigkeit abhängig sind, angenommen.

$$f_W(\dot{\psi}, v) \text{ und } f_K(\dot{\psi}, v)$$

Die Funktion für die Kontrollierbarkeit $f_K(\dot{\psi}, v)$ kann z. B. durch den Prozentsatz an Fahrern dargestellt werden, welcher eine Situation mit einer bestimmten Gierstörung bei einer bestimmten Geschwindigkeit kontrollieren kann. Für die Wirksamkeit kann diese Funktion $f_W(\dot{\psi}, v)$ z. B. den Prozentsatz einer Unfallpopulation bei der gewählten Annäherungsgeschwindigkeit beschreiben, welche durch die entsprechende Gierrate vermieden werden kann.

Der Gesamtnutzen ergibt sich demnach als Summation dieser Einzelterme:

$$F_{ges}(\dot{\psi}) = f_W(\dot{\psi}) + f_K(\dot{\psi})$$

Um nun die Gierrate des maximalen Gesamtnutzens zu errechnen, muss das Maximum dieses Verlaufes bestimmt werden.

$$\max\{F_{ges}(\dot{\psi})\} \rightarrow \dot{\psi}_{max, Gesamtnutzen}$$

Der sich ergebende Verlauf Gierrate des maximalen Gesamtnutzens ist nur noch von der Annäherungsgeschwindigkeit abhängig und bezeichnet diejenige Gierrate, bei der die Summe aus den Kenngrößen beider Interaktionsdimensionen für eine bestimmte Geschwindigkeit maximal wird:

$$\dot{\psi}_{max, Gesamtnutzen} = f(v)$$

Um bei der Bestimmung von $\dot{\psi}_{max, Gesamtnutzen}$ eine Gewichtung zwischen Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit vornehmen zu können, können die oben genannten Verläufe $f_W(\dot{\psi}, v)$ und $f_K(\dot{\psi}, v)$ mit Gewichtungsfaktoren kombiniert werden. In diesem Fallt ergibt sich:

$$F_{ges}(\dot{\psi}) = g_W * f_W(\dot{\psi}, v) + g_K * f_K(\dot{\psi}, v)$$

Dabei ist $g_W = 1 - g_K$ als prozentuale Gewichtung von Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit zu sehen, welche bei einer Systemauslegung entsprechend berücksichtigt werden können. Folglich ist $\dot{\psi}_{max, Gesamtnutzen}$

daher nicht nur eine Funktion der Geschwindigkeit, sondern auch der Gewichtung von Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit.

$$\psi_{max,Gesamtnutzen} = f(v, g_K, g_W)$$

1.3.4.3 Zusammenfassung und Diskussion

Die Beschreibung des Spannungsfelds zwischen Kontrollierbarkeit und Wirksamkeit im urbanen Anwendungsbereich von Ausweichassistenzsystemen zeigte durch die Gegenüberstellung der theoretischen Wirksamkeit von Ausweich- und Bremsmanövern die Bedeutung dieses Spannungsfelds für die im Teilprojekt KON betrachteten Funktionen. Dabei wurde ersichtlich, dass eine Anwendung klassischer Kontrollierbarkeitsgrenzen für die Bewertung von Ausweichfunktionen nicht sinnvoll erscheint. Hierzu konnte gezeigt werden, dass speziell bei der Anwendung solcher Funktionen bei urbanen Annäherungsgeschwindigkeiten im Sinne der Wirksamkeit insbesondere bei größeren erforderlichen Ausweichbreiten höhere maximale Gierraten zugelassen werden müssen, um einen Wirksamkeitsvorteil gegenüber einem Bremsmanöver zu erzielen.

Bei dem vorgestellten Vorgehen zur gemeinsamen Berücksichtigung von Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit handelt es sich um einen generischen Ansatz, um bei einer Systemauslegung einer Ausweichfunktion diese Interaktionsdimensionen im Sinne eines maximalen Gesamtnutzens zu optimieren und nicht nur zu zugunsten nur einer Dimension. Der Ansatz erhebt dabei nicht Anspruch, das Spannungsfeld zu lösen, sondern dient dazu, eine Methodik vorzustellen, die eine geeignete gemeinsame Berücksichtigung von Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit im Rahmen einer Systemabstimmung darstellen kann. Die Ableitung von verallgemeinerbaren Ziel- und Grenzwerten ist explizit nicht intendiert und kann aufgrund der zu berücksichtigenden situations- und fahrzeugspezifischen Randbedingungen nur individuell vorgenommen werden. [12] merken hierzu an: „Kontrollierbarkeit und Wirksamkeit lassen sich nur auf Gesamtfahrzeugebene bewerten [...].“

Die getroffene Annahme, dass beide Interaktionsdimensionen eine Abhängigkeit von der Annäherungsgeschwindigkeit sowie der maximalen Gierrate aufweisen, ist zum einen Grundvoraussetzung für ein sinnvolles Ergebnis bei der Anwendung des gewählten Ansatzes, stellt zum anderen aber auch die Schwierigkeit heraus, die bestehende Abhängigkeit für die Ableitung konkreter Werte nutzen zu können. Während die Abhängigkeit der Wirksamkeit z. B. durch Daten aus Unfallstatistiken oder theoretische Überlegungen abgeleitet werden könnten (und damit eine gewisse Allgemeingültigkeit besitzen), ist die der Kontrollierbarkeit nur fahrzeugspezifisch (und damit mit einem großen Aufwand) bestimmbar. Des Weiteren können neben Annäherungsgeschwindigkeit und max. Gierrate, die Systemauslegung und Gestaltung einen positiven Einfluss auf die Kontrollierbarkeit haben, die funktionspezifisch untersucht werden müssen.

2. Teilprojekt Simulation

2.1 Problemstellung und Zielsetzung

Das Teilprojekt *Simulation* verfolgt das Ziel, das Interaktionsverhalten von Verkehrsteilnehmern im urbanen Raum zu analysieren und auf generisch-deskriptive Art zu modellieren. Neben den bekannten Simulationswerkzeugen der Verkehrs- und Fahrsimulation soll dabei auch die Simulation von Interaktionsszenarien im kontrollierten Feld berücksichtigt werden. Dabei stellt sich jedoch die Darstellung von relevanten, kritischen Szenarien bei der Interaktion von Fahrzeugen mit schwächeren Verkehrsteilnehmern ohne deren Gefährdung als problematisch dar. Ein möglicher Lösungsansatz sind Dummysysteme, mit deren Hilfe kritische Interaktionsszenarien ohne Gefährdung von Versuchsteilnehmern realisiert werden können. Diese Dummysysteme weisen jedoch in der Regel den Nachteil auf, dass ihr Bewegungsverhalten sehr abstrahiert dargestellt wird und Aspekte des Interaktionsverhaltens nicht berücksichtigt werden können.

Aber auch für die Simulationswerkzeuge der Verkehrs- und Fahrsimulation besteht Verbesserungspotential hinsichtlich der Darstellung des Bewegungs- und Interaktionsverhaltens von schwächeren Verkehrsteilnehmern bei der Interaktion mit motorisierten (und gegebenenfalls mit Assistenzsystemen ausgerüsteten) Verkehrsteilnehmern. Dieses zeichnet sich insbesondere durch den Bedarf nach Datenbeständen über das natürliche Verhalten der Verkehrsteilnehmer für die Parametrierung und Weiterentwicklung von bestehenden Bewegungs- und Interaktionsmodellen aus.

Das Ziel der durchgeführten Arbeiten im Teilprojekt *Simulation* war es daher, geeignete Methoden und Werkzeuge zu entwickeln, mit denen die Interaktion von Fahrzeugfahrern und schwächeren Verkehrsteilnehmern (betrachtet wurden hierbei insbesondere Fußgänger) analysiert und modelliert werden kann. Die in den verschiedenen Versuchsanordnungen gesammelten Daten wurden daher so aufgearbeitet, dass sie zum einen für die Parametrierung von Interaktionsmodellen in der Simulation und zum anderen auch für die Darstellung eines realistischen Interaktions-/Bewegungsverhaltens eines Fußgängerdummysystems genutzt werden können. Im Folgenden wird daher zunächst kurz die Vorgehensweise bei der Erarbeitung dieser Ergebnisse beschrieben (Kap. 2.2), um anschließend die Inhalte der Ergebnisse detailliert darzustellen (Kap. 2.3).

2.2 Arbeitspaketstruktur und Inhalte

Das AP 1000 *Handlungsbedarf und Vorgehensweise* analysiert die Eignung aktuell vorhandener Methoden zur Untersuchung der Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion im kontrollierten Testfeld, die in der Lage sind, die durch die Vorhabensbeschreibung und den ersten Expertenkreis formulierten Fragen zu beantworten. Hierauf aufbauend erfolgt eine Konkretisierung des Handlungsbedarfs hinsichtlich der Weiterentwicklung der Methoden zur Untersuchung der Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion im kontrollierten Feld.

Das AP 2000 *Empirie und Versuche* teilt sich in zwei Phasen auf. Auf Grundlage des in AP 1000 erarbeiteten und abgeleiteten Handlungsbedarfs inklusive Vorgehensweise sowie der identifizierten Versuchs- und Testszenarien erfolgt dabei die Konkretisierung und Definition des detaillierten Untersuchungssetups für die Feldbeobachtungen und Tests im kontrollierten Feld.

Auch das AP 3000 *Datenanalyse und Modellierung* teilt sich in zwei Phasen, welche es ermöglichen Erkenntnisse der ersten Versuchsphase bei der Durchführung der zweiten mit einzubinden. Hierzu wird das Interaktionsverhalten der Verkehrsteilnehmer beschrieben und in Interaktionsmodelle integriert. Der Fokus bei der Modellierung liegt hierbei auf den in vorherigen Arbeitspaketen als relevant eingestuften Szenarien, welche im Rahmen der Datenanalyse besondere Beachtung finden. Durch die sequentielle Bearbeitung der Arbeitspakete zur Empirie und der Datenanalyse werden die Ergebnisse der Feldbeobachtungen aus der ersten empirischen Phase genutzt, um das Versuchsdesign der zweiten Phase mit der Analyse des Interaktionsverhaltens im kontrollierten Feld zu erarbeiten.

Im AP 4000 *Bewertung und Demonstration* werden einerseits die Ergebnisse der Datenanalyse bewertet und andererseits durch die Integration in das Bewegungsverhalten eines Fußgänger-Demonstrators zu einer praktischen Anwendung gebracht. Der Fußgänger-Demonstrator verfolgt dabei das Ziel, eine realistische Abbildung des Interaktionsverhaltens von Fußgängern in kritischen Situationen ohne eine Gefährdung für Versuchsteilnehmer zu ermöglichen. Hierbei werden die Fähigkeiten aktueller Fahrerassistenzsysteme für den Fußgängerschutz hinsichtlich der Erkennung der Verhaltensintention (z.B. anhand der Blickzuwendung des Fußgängers) berücksichtigt.

Durch den Austausch im AP 5000 *Expertenkreis* mit Experten verschiedener Simulationstools werden bestehende Erkenntnisse bereits zu einem frühen Zeitpunkt in die Versuchsplanung und die Datenanalyse mit eingebunden. Zudem kann durch die während des Projekts erzielten Ergebnisse ein Wissenstransfer „nach außen“ ermöglicht werden. Anders als in der Vorhabensbeschreibung geplant, wurde der Expertenkreis jährlich durchgeführt, um einen kontinuierlichen Austausch mit den Anwendern der Ergebnisse zu etablieren.

Abgesehen von den Arbeitspaketen zum Expertenkreis und zum Projektmanagement wurden die Arbeitspakete AP 1000 bis AP 4000 sequentiell durchlaufen, wobei wie bereits erwähnt, die Arbeitspakete AP 2000 und AP 3000 in zwei Phasen mit jeweils geringer Überlappung bearbeitet wurden (vgl. Abb. 2-1).

Arbeitspakete	Quartale															
	Jahr 1				Jahr 2				Jahr 3				Jahr 4			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
AP 1000 Handlungsbedarf und Vorgehensweise	■	■	■													
AP 2000 Empirie und Versuche			■	■	■	■			■	■	■	■				
AP 3000 Datenanalyse und Modellierung					■	■	■				■	■	■	■		
AP 4000 Bewertung und Demonstration														■	■	■
AP 5000 Expertenkreis		■													■	
AP 6000 Projektmanagement und Dokumentation	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Abb. 2-1: Zeitplan für das Teilprojekt Simulation

2.3 Ergebnisdokumentation

2.3.1 AP 1000 Handlungsbedarf und Vorgehensweise

Ziel der Arbeiten im AP 1000 war die Bestimmung des Handlungsbedarfs zur Ableitung von Simulationsmodellen für die Interaktion zwischen Fahrzeugen und Fußgängern basierend auf Daten, die im kontrollierten Testfeld gesammelt werden. Hierzu wurde zunächst der Stand der Technik zur Untersuchung der Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion im kontrollierten Testfeld bestimmt. In einem weiteren Schritt wurden die angewendeten Methoden und Werkzeuge mit den zu beantwortenden Fragestellungen abgeglichen und so der Handlungsbedarf bestimmt. Abschließend wurde aus dem bestehenden Handlungsbedarf die Vorgehensweise für die Datenerhebungen im folgenden AP 2000 abgeleitet.

2.3.1.1 Stand der Technik

Der Stand der Technik im Bereich der Methoden und Werkzeuge zur Untersuchung der Fzg.-Fußgänger-Interaktion im kontrollierten Feld ist stark durch die Untersuchung der Detektion von Fußgängern durch die Umfeldüberwachung von Assistenzsystemen geprägt. Die Interaktion zwischen Fahrzeug und Fußgänger wird/wurde dabei in verschiedenen deutschen und europäischen Projekten thematisiert (vFSS, AKTIV, SaveU, Watch-Over, AsPeCSS). Die in diesen Projekten betrachteten Szenarien werden in der Regel aus der Unfallforschung abgeleitet und kommen daher zumeist auf die gleichen Szenarien. Dies sind:

1. Fußgänger kreuzt Fahrbahn ohne Sichtverdeckung (ca. 60%¹)
2. Fußgänger kreuzt Fahrbahn mit Sichtverdeckung (ca. 27%)
3. Fahrzeug kreuzt Fußgänger beim Abbiegen (ca. 7%)
4. Fußgänger bewegt sich parallel zum Fahrzeug (ca. 3%)

Die beschriebenen Szenarien werden mithilfe verschiedener Testvorrichtungen zur Darstellung des Fußgängers umgesetzt, um so eine Möglichkeit zu schaffen, Assistenzsysteme, die einen Zusammenstoß mit Fußgängern verhindern sollen, auf ihre Funktionsfähigkeit zu überprüfen. Hierzu werden Fußgängerdummys eingesetzt, deren Bewegungstrajektorien auf unterschiedliche Weise realisiert werden können.

Brückensysteme werden zur Untersuchung der ersten beiden Szenarien (Fußgänger kreuzt Fahrbahn) eingesetzt. Die Führung des Fußgängers erfolgt oberhalb des Fußgängerdummys, was bei einer Kollision den Vorteil bietet, dass der Dummy nach oben wegschwingen kann und die Folgen der Kollision somit minimiert werden. Bei Plattformsystemen muss zum einen die Plattform so ausgelegt sein, dass sie ohne Probleme vom Fahrzeug überfahren werden kann, und zum anderen der Dummy so konzipiert ist, dass die Kollision mit dem Fahrzeug zu keiner Beschädigung des Fahrzeugs oder einer Gefährdung der Insassen führt. Im Vergleich zu Brückensystemen bieten Plattformen den Vorteil, flexibler bei der Darstellung unterschiedlicher Szenarien zu sein und für den Fahrer des Fahrzeugs keine Hinweise auf eine potentielle Gefahrenstelle zu liefern. Einige Beispiele der beschriebenen Testvorrichtungen sind in Abb. 2-2 zu sehen.

¹ Anteil an Fz-FG-Unfällen



<i>Realisierbare Szenarien</i>	durch Führung vorgegeben	flexibel	durch Schienen vorgegeben
<i>Genauigkeit</i>	hoch z.B. bei Messung und Synchronisation per dGPS oder auch Weg-Zeit-Nehmer an Dummy & dGPS an Fahrzeug möglich (Synchronisation offline)	abhängig von Ortungsgenauigkeit	hoch z.B. bei Messung und Synchronisation per dGPS oder auch Weg-Zeit-Nehmer an Dummy & dGPS an Fahrzeug möglich (Synchronisation offline)
<i>Reproduzierbarkeit</i>	hoch - Weg durch Führung vorgegeben - zeitl. Abhängigkeit	begrenzt durch Ortungs- und Regelungsgüte	hoch - Weg durch Schienen vorgegeben - zeitl. Abhängigkeit
<i>Realitätsnähe</i>	<i>Dummy</i>	hoch - 3D-Dummy mit Beinbewegungen	hoch - 3D-Dummy mit Beinbewegungen
	<i>Bewegung</i>	mittel - feste Bahnkurve	hoch - reale Bewegungsabläufe simulierbar
		hoch - 3D-Dummy mit Beinbewegungen	mittel - feste Bahnkurve

Abb. 2-2: Testvorrichtungen zur Untersuchung der Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion im kontrollierten Feld.

Brücken und Plattformen können unterteilt werden in Systeme, bei denen die Bewegung des Fußgängers entlang einer festen Bahnkurve fest ist (Abb. 2-2 rechts u. links), und solche, bei denen sich der Fußgänger entlang einer frei wählbaren Bahnkurve bewegen kann (Abb. 2-2 Mitte). Aufgrund der Führungseigenschaften von Brückensystemen und schienengebundenen Plattformsystemen ähneln sich diese stark in ihren Eigenschaften.

Wie bereits einleitend erwähnt, dienen die beschriebenen Testvorrichtungen i.d.R. der Funktionsüberprüfung; das natürliche, komplexe Bewegungsverhalten der Fußgänger wird hierbei stark vereinfacht. Eine

Interaktion zwischen Fahrzeug und Fußgänger im Sinne einer beidseitigen Reaktion der Verkehrsteilnehmer aufeinander (z.B. aufgrund der erkannten Gefahrensituation) findet nicht statt. Dennoch kann die Reaktion des Fahrers auf einen unerwartet auftauchenden Fußgänger bei ausreichender Verdeckung der Testvorrichtung ohne Gefährdung für den Fußgänger untersucht werden. Allerdings muss auch hierbei die fehlende Reaktion des Fußgängers auf die Situation bei der Bewertung berücksichtigt werden.

In Tabelle 2-1 sind die Vor- und Nachteile der Untersuchung der Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion im kontrollierten Testfeld gegenübergestellt. Im Folgenden soll der sich aus den Nachteilen ergebende Handlungsbedarf näher beschrieben und ausgearbeitet werden.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - Möglichkeit der Darstellung kritischer Situationen ohne Gefährdung anderer Verkehrsteilnehmer - Hohe Reproduzierbarkeit der Fußgängerbewegung bei Einsatz von Dummysystemen - Fokussierte Betrachtung zur Isolierung der Einflüsse einzelner Faktoren möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Künstliche Verkehrsumgebung und daraus resultierend künstliche Fahrsituation für den Fahrer - unnatürliches Bewegungsverhalten von Fußgängern aufgrund der künstlichen Verkehrssituation

Tabelle 2-1: Vor- und Nachteile der Untersuchung der Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion im kontrollierten Testfeld.

Fazit

Aufgrund der Eigenschaften des kontrollierten Testfelds scheint dieses insbesondere geeignet die Reaktion des Fahrers (oder eines Assistenzsystems) auf das Bewegungsverhalten von Fußgängern zu untersuchen. Zudem können unterschiedliche Einflüsse auf das Fahrer- und Fußgängerverhalten isoliert und damit sehr gezielt abgeschätzt werden. Eine Kombination aus einer Studie im Feld mit einer im kontrollierten Feld scheint demnach zielführend zu sein.

2.3.1.2 Fragestellung und Handlungsbedarf

Primäres Ziel des TP *Simulation* war die generische Modellierung des Verhaltens und der Interaktion der verschiedenen Verkehrsteilnehmer im urbanen Raum. Bezogen auf die Verkehrsteilnehmer Fahrzeug/Fahrer und Fußgänger lag das Hauptaugenmerk auf der Analyse des gerichteten Querens von Fußgängern und des ungerichteten Querens von Fußgängern zwischen Knotenpunkten inmitten der urbanen Straße. Hierbei galt es zum einen Toleranzschwellen für spezifische Verhaltensweisen/-änderungen (z.B. plötzliches Loslaufen bei Rot an LSA-Furten oder zwischen Knotenpunkten) zu ermitteln und zum anderen spezifische Verhaltensmodelle für diese Situationen zu erstellen.

Der Bedarf der Berücksichtigung des taktischen Fußgängerverhaltens in der Modellierung wurde durch die Teilnehmer des ersten SIM-Expertenkreises bestätigt. Im Bereich der Verkehrssimulation findet die Darstellung des Fußgängerverkehrs bislang lediglich für die Verkehrsplanung (z.B. im Sinne von Verkehrsflusskapazitäten) Berücksichtigung, nicht aber für die Simulation von Fahrerassistenzsystemen und ihrer Auswirkung auf die Verkehrssicherheit (im Sinne von durch ein FAS verhinderten Unfällen)². Die Gründe hierfür liegen zum einen in der fehlenden Möglichkeit der Darstellung von Konfliktsituationen in der Simulation, die zum Unfall führen und zum anderen in der nicht ausreichenden Datenbasis zur Kalibrierung dieser Konfliktsituationen. Hierbei wurde von Seiten der befragten Simulationsexperten die Erwartung/der Wunsch geäußert, dass die in UR:BAN gesammelten Daten eine empirische Basis für die Kalibrierung des taktischen Fußgängerverhalten liefern können.

² Es ist zu beachten, dass die Erkenntnisse des Expertenworkshops auf den Simulationswerkzeugen der am Workshop teilnehmenden Partner basieren und damit lediglich einen Ausschnitt der existierenden Simulationswerkzeuge darstellen.

Im Bereich der Fahrsimulation ergeben sich andere Anforderungen an die Modellierung des Fußgängerverhaltens als bei der Verkehrssimulation. Bei der Fahrsimulation werden i.d.R. spezielle Szenarien mit fest definiertem Verhalten von Fußgängern dargestellt (geskriptet). Der Fokus bei der Modellierung von Fußgängern liegt daher stärker auf den natürlichen Bewegungsabläufen (z. B. Arm- und Beinbewegung) des Fußgängers. Im Zusammenspiel mit einem sinnvollen räumlichen Bewegungsverhalten kann neben einer realistischeren Darstellung von Fahrzeug-Fußgänger-Interaktionen in Konfliktsituationen aber auch ein Beitrag geleistet werden, urbane Szenarien in der Fahrsimulation abwechslungsreicher und realistischer im Sinne einer Fahrerumgebung zu gestalten, welche dem Fahrer eine Vielzahl an zu berücksichtigenden Umgebungseinflüssen darbietet und somit zu einem natürlichen Fahrerverhalten führt.

In Verlauf des TP *Simulation* sollen die Verhaltensmodelle zum einen auf Testvorrichtungen für die Untersuchungen im kontrollierten Feld übertragen werden. Hierdurch soll die Möglichkeit geschaffen werden, z. B. bei der Funktionsprüfung eines Assistenzsystems zur Vermeidung von Fußgängerunfällen das natürliche Bewegungsverhalten von Fußgängern besser zu berücksichtigen und so eine genauere Aussage über die korrekte Bewertung der Situation durch das Assistenzsystem machen zu können.

Zum anderen sollen die Verhaltensmodelle für die Verwendung in Simulationstools nutzbar gemacht werden, um so ein realistischeres Verhalten von Fußgängern in der Simulation zu ermöglichen. Somit soll ein Beitrag geleistet werden, zukünftig auch in der Simulation die Wirkung von Fahrerassistenzsystemen zum Schutz von schwächeren Verkehrsteilnehmern auf die Verkehrssicherheit abschätzen zu können.

Zur Ermittlung der Toleranzschwellen und zur Herleitung der Verhaltensmodelle sollen dabei folgende Szenarien und Fragen adressiert werden:

Fußgängerbezogen:

1. Welche Umgebungsparameter haben einen Einfluss auf die Querungsentscheidung von Fußgänger?
2. Welche Unterschiede zwischen gerichteten und ungerichteten Queren können beobachtet werden?
3. Welchen Einfluss hat die Fahrzeugart auf das Interaktionsverhalten des Fußgängers?

Fahrerbezogen:

1. Wie unterscheidet sich das Fahrerverhalten beim gerichteten Queren im Vergleich zum ungerichteten Queren von Fußgängern?

Fazit

Die Bestimmung des aktuellen Stands der Technik sowie die Ergebnisse der Expertenbefragung beim ersten SIM Expertenkreis haben gezeigt, dass die Darstellung des Fußgängerverhaltens sowohl im kontrollierten Testfeld als auch in der Verkehrs- und Fahrsimulation der Weiterentwicklung bedarf. Hierbei sind vor allem die Weiterentwicklung der taktischen (räumlichen) Verhaltensmodelle sowie das natürliche Bewegungsverhalten (Arm- und Beinbewegungen) von Fußgänger zu nennen.

Zur Untersuchung der Interaktion von Fahrzeug und Fußgänger im kontrollierten Testfeld müssen die bestehenden Testvorrichtungen dahingehend erweitert werden, dass eine Interaktion zwischen den beiden Verkehrsteilnehmern im Sinne eines Erkennens der Situation und daraus folgender Bewegungsänderung des Fußgängers ermöglicht wird. Zudem muss das taktische Verhalten von Fußgängern bei den betrachteten Szenarien (gerichtetes Queren und ungerichtetes Queren zwischen Knotenpunkten) in den Bewegungsabläufen (z.B. Beschleunigen oder Abbremsen aufgrund eines sich annähernden Fahrzeugs) künstlicher Fußgänger besser abgebildet werden.

Zur Untersuchung des natürlichen Bewegungsverhaltens eines Fußgängers in der Interaktion mit einem Fahrzeug ist das kontrollierte Testfeld aufgrund des i.d.R. stark vereinfachten, künstlichen Szenarios primär weniger gut geeignet. Es besteht daher Bedarf, das Bewegungsverhalten von Fußgängern in einer Umgebung zu untersuchen, in der sie keine gesteigerte Erwartungshaltung für ein bestimmtes (kritisches) Ereignis aufweisen. Die dazu angestrebte Vorgehensweise soll im Folgenden näher dargestellt werden.

2.3.1.3 Vorgehensweise

Die Analyse des Stands der Technik (Kap. 2.3.1.1) im Bereich der Untersuchung der Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion im dem kontrollierten Testfeld hat gezeigt, dass es Handlungsbedarf zur Weiterentwicklung der Methoden gibt. Dieser Handlungsbedarf wurde anschließend (Kap. 2.3.1.2) dargestellt und soll im Folgenden einen Ansatz zur Verbesserung der Untersuchungsmöglichkeiten überführt werden.

Wie zuvor beschrieben sind die bisherigen Methoden zur Untersuchung der Interaktion zwischen Fahrzeug und Fußgänger im kontrollierten Testfeld geeignet, die Reaktion des Fahrers auf plötzlich auftauchende Fußgänger zu erfassen, aber nur eingeschränkt die des Fußgängers auf das Fahrzeug. Die Gründe hierfür liegen zum einen im bisherigen Fokus auf der Detektion des Fußgängers durch die Umfeldsensorik und zum anderen in der stark vereinfachten und künstlichen Verkehrssituation im kontrollierten Feld und der daraus gesteigerten Konzentration des Fußgängers auf die wesentlichen Elemente des Geschehens. Zur Untersuchung spezieller Faktoren ist das kontrollierte Testfeld jedoch effizienter als die Untersuchung mittels Feldstudie, sodass eine geeignete Methode entwickelt werden muss, die die Konzentration des Fußgängers weg von den wesentlichen Elementen des Geschehens leitet.

Zur Untersuchung der Interaktion wird daher ein dreigliedriger Ansatz angestrebt, bei dem zunächst mittels Feldstudie das Interaktionsverhalten im realen Verkehr betrachtet werden soll. Diese Feldstudie untergliedert sich in zwei Teile, deren Fokus jeweils auf einem der beiden Interaktionsteilnehmer liegt. Der Versuchsaufbau kann dabei für beide Teile ähnlich gestaltet werden und erfordert so wenig zusätzliche Ressourcen. Darauf aufbauend soll eine statische Verkehrsbeobachtung an relevanten Orten zusätzliche Informationen liefern. Basierend auf einer Analyse dieser Ergebnisse sollen anschließend relevante Szenarien abgeleitet werden, die im kontrollierten Feld genauer untersucht werden.

Eine detaillierte Ausarbeitung des Versuchsaufbaus sowie der betrachteten Szenarien erfolgt in AP2000.

2.3.2 AP 2000 Empirie und Versuche

Die Durchführung der empirischen Datenerhebung im AP 2000 wurde in zwei Phasen aufgeteilt (vgl. Kap. 2.2). Während in der ersten Phase eine Probandenstudie im realen Verkehr durchgeführt wurde (siehe Kap. 2.3.2.1), bestand die zweite Phase aus einer Probandenstudie im kontrollierten Testfeld, welche durch statische Verkehrsbeobachtungen ergänzt wurden (siehe Kap. 2.3.2.2 und 2.3.2.3).

2.3.2.1 Phase 1: Probandenstudie im Realverkehr

Die im Folgenden beschriebene Datenerhebung zur Untersuchung der Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion verfolgte das Ziel, die Möglichkeiten der Darstellung der betrachteten Szenarien im kontrollierten Testfeld zu verbessern. Da eine der Herausforderungen der Versuchsdurchführung im kontrollierten Testfeld die Darstellung von möglichst natürlichem Bewegungsverhalten ist, sollte dieses zunächst in einem ersten Schritt im realen Straßenverkehr untersucht werden. Es besteht somit ein Unterschied zwischen Untersuchungsumgebung (realer Straßenverkehr) und Anwendungsumgebung (kontrolliertes Testfeld).

Die durchgeführte Untersuchung zur Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion hatte neben der Verbesserung der Abbildung des Bewegungsverhaltens von Fußgängern das Ziel, für die Abschätzung des Einflusses von Assistenzsystemen zum Fußgängerschutz, Vergleichsdaten der unbeeinflussten Interaktion zwischen Fahrern und Fußgängern zu liefern. Daher wurde neben dem Verhalten der Fußgänger auch das der Fahrer untersucht, um so für spätere Erhebungen Daten im Sinne einer Baseline zur Verfügung stellen zu können.

Fragestellungen

Die Bestimmung des Handlungsbedarfs im AP 1000 ergab, dass die Darstellung des Fußgängerverhaltens sowohl im kontrollierten Testfeld als auch der Verkehrs- und Fahrsimulation der Weiterentwicklung bedarf. Hierbei ist vor allem die Weiterentwicklung der taktischen und operativen Verhaltensmodelle von Fußgängern zu nennen. Durch den Expertenkreis wurde insbesondere der Bedarf nach einer empirischen Datenbasis zur Validierung und Kalibrierung von Entscheidungs- und Bewegungsmodellen hervorgehoben.

Primäres Ziel der Untersuchung des Fußgängerverhaltens war daher die Ermittlung von Toleranzschwellen für spezifische Verhaltensweisen und -änderungen für das gerichtete und ungerichtete Queren von Fußgängern an und zwischen urbanen Knoten. Im Fokus stehen Situationen, in denen Fußgänger beim Queren einer urbanen Straße in Interaktion mit einem sich annähernden Fahrzeug treten. Hierbei muss der Fußgänger die Entscheidung treffen, vor oder hinter dem Fahrzeug die Fahrbahn (bzw. den Fahrstreifen) zu queren. Mithilfe der erhobenen Daten soll der Versuch unternommen werden, anhand von Häufigkeitsverteilungen und statistischen Analysen von möglichen Bewertungsgrößen wie Abstand, Zeitlücke, TTC oder PET, Rückschlüsse auf die Entscheidungsgrundlage von querungsbeabsichtigten Fußgänger zu ziehen. Zu berücksichtigen sind hierbei verschiedene persönliche, situations- und verkehrsraumspezifische Randbedingungen wie Alter, Annäherungsgeschwindigkeit des Fahrzeugs, Fahrbahnbreite oder das Vorhandensein von Querungshilfen (Zebrastreifen, FG-Furt, etc.).

Neben der Entscheidung die Fahrbahn (bzw. den Fahrstreifen) trotz eines sich nähernden Fahrzeugs zu queren, kann es auch im Verlaufe des Querungsvorgangs zu einer Verhaltensänderung bzw. -anpassung kommen. Diese können zum Beispiel beim Erkennen einer Fehleinschätzung der Geschwindigkeit oder des Abstands des interagierenden Fahrzeugs durch den Fußgänger auftreten. Hierbei sind der Zeitpunkt der Verhaltensänderung sowie die ergriffene Maßnahme (Beschleunigen, Änderung der Bewegungsrichtung, Abbruch des Querungsvorgangs, etc.) zur Verminderung der Kollisionsgefahr zu untersuchen.

Die Forschungsfragen bezüglich des Verhaltens von querungsbeabsichtigten Fußgängern bei der Interaktion mit sich annähernden Fahrzeugen sind im Folgenden zusammengefasst:

1. Welche kinematischen Voraussetzungen müssen erfüllt sein, sodass FG (Fußgänger) sich zum Queren der Fahrbahn (bzw. des Fahrstreifens) entscheiden?
2. Welche situationsspezifischen Parameter haben (den größten) Einfluss auf die Querungsentscheidung des FG?
3. Welche verkehrsraumspezifischen Parameter haben (den größten) Einfluss auf die Querungsentscheidung des FG?
4. Welche persönlichen Eigenschaften der FG haben Einfluss auf die Querungsentscheidung?
5. Welche Unterschiede beim Querungsverhalten bestehen zwischen gerichtetem und ungerichtetem Queren?
6. Bei welchen kinematischen Voraussetzungen passt der FG seine Bewegung während des Querungsvorgangs an die Situation an?
7. In welcher Weise passt der FG seine Bewegung während des Querungsvorgangs an die Situation an?
8. Bei welchen Voraussetzungen bricht ein FG einen Querungsvorgang ab?

Bei der Untersuchung der Interaktion von Fußgängern mit sich annähernden Fahrzeugen sollte jedoch nicht nur das Verhalten des Fußgängers betrachtet werden. Ebenso wie der Fußgänger in der betrachteten Situation eine Entscheidung trifft, die Fahrbahn zu überqueren oder das Fahrzeug zunächst passieren zu lassen, muss auch der Fahrer entscheiden, wie er sich in der Interaktion verhält. Auch er kann in Abhängigkeit der aktuellen Situation die Wahl treffen, seine Geschwindigkeit ggf. zu verringern, um dem Fußgänger die Möglichkeit zu geben, vor ihm die Fahrbahn zu queren oder seinen Fahrzustand beizubehalten.

Es ergeben sich daher in Bezug auf das Fahrerverhalten ähnliche Forschungsfragen, wie für den Fußgänger. Aufgrund des vorgestellten methodischen Vorgehens bei der Untersuchung der Interaktion zwischen Fußgängern und Fahrern, können für die Untersuchung des Fahrerverhaltens auch subjektive Daten der Fahrer genutzt werden. Die zu untersuchenden Forschungsfragen für das Fahrerverhalten bei der Interaktion mit querungsbeabsichtigten Fußgängern sind im Folgenden zusammengefasst:

1. Welche persönlichen Eigenschaften der Fahrer haben Einfluss auf das Interaktionsverhalten des Fahrers?
2. Welche Unterschiede in der Fahrerreaktion bestehen zwischen gerichtetem und ungerichtetem Queren?
3. Gibt es eine objektive Bewertungsgröße, die Rückschlüsse auf die subjektive Kritikalitätsbewertung des Fahrers zulässt?
4. Was sind die Auslöser für vom Fahrer als kritisch bewertete Querungsereignisse?
5. Wie beeinflusst der Zeitpunkt der ersten Sichtbarkeit des FG für den Fahrer die Fahrerreaktion?

Im Folgenden soll die zur Beantwortung der dargestellten Fragestellungen gewählte Erhebungsmethodik näher vorgestellt werden.

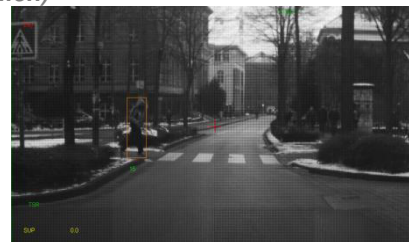
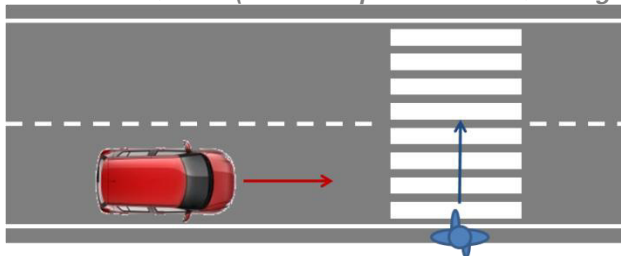
Methoden

Basierend auf der Analyse des Stands der Technik zur Untersuchung der Interaktion zwischen Fahrern und Fußgängern im kontrollierten Testfeld im Rahmen des AP 1000 wurde das methodische Vorgehen für die im Folgenden beschriebene Datenerhebung festgelegt. Wie bereits in den einleitenden Worten erwähnt, ist es zur Verbesserung der Werkzeuge für die Untersuchungen im kontrollierten Feld zunächst erforderlich, die im realen Verkehr auftretenden Abläufe bei der Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion in einem natürlichen Umfeld zu betrachten und anschließend geeignet abzubilden.

Szenarien

Zentrales Szenario der Untersuchung der Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion bildete das (orthogonale) Queren eines Fußgängers vor einem sich annähernden Fahrzeug beziehungsweise die erkennbare Intention eines Fußgängers die Fahrbahn (vor oder hinter dem sich nähernden Fahrzeugs) zu queren. Unterschieden wird hierbei zwischen dem gerichteten Queren an Knotenpunkten oder Querungshilfen (Zebrastreifen, Fußgänger-Furten) und dem ungerichteten Queren zwischen Knotenpunkten. In Abb. 2-3 sind zwei Beispiele für die in der Untersuchung betrachteten Szenarien abgebildet. Bei der Untersuchung des gerichteten Querens werden Situationen ausgenommen, in denen das Fahrzeug am Knoten steht.

Gerichtetes Queren (an Knotenpunkten und Querungshilfen)



Ungerichtetes Queren (zwischen Knotenpunkten)

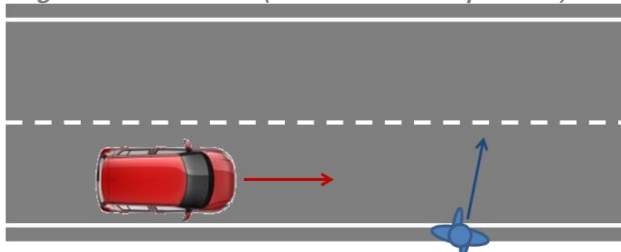


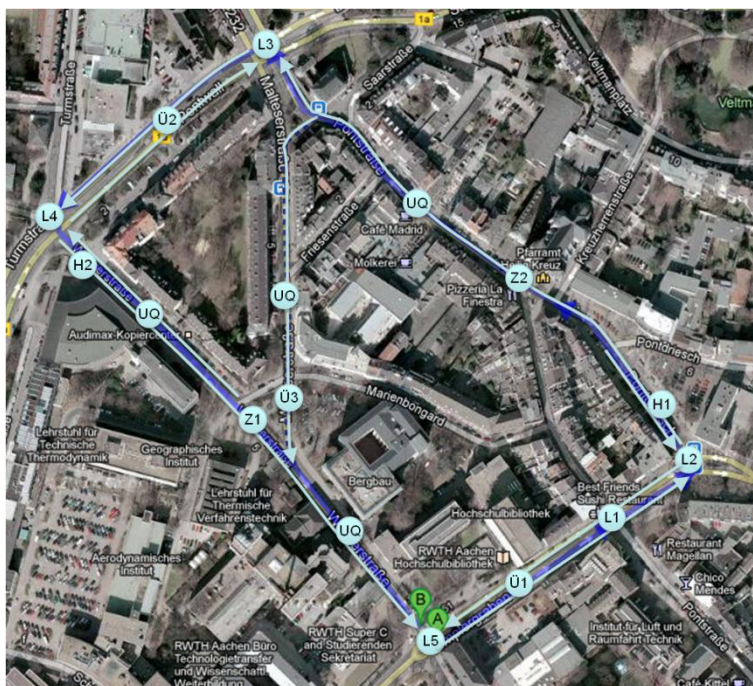
Abb. 2-3: Gerichtetes und ungerichtetes Queren von Fußgängern

Um ein möglichst natürliches Verhalten von Fahrern und Fußgängern analysieren und gleichzeitig die Situationseinschätzung der Fahrer berücksichtigen zu können, wurde eine Probandenstudie im realen Straßenverkehr durchgeführt. 30 Probanden befuhren mit einem Versuchsfahrzeug eine Strecke im

Innenstadtbereich der Stadt Aachen, in dem aufgrund der Nähe zur Universität und des guten Wetters während der Datenerhebung starker Fußgängerverkehr herrscht. Die Probanden erhielten dabei keinen Hinweis auf den Untersuchungsgegenstand der Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion, um ein möglichst unbeeinflusstes Fahrerverhalten zu bewirken.

Versuchsstrecke

In Abb. 2-4 ist die befahrene Versuchsstrecke dargestellt. Auf der Versuchsstrecke befinden sich fünf Knotenpunkten mit Lichtsignalanlagen (LSA) sowie 10 (kleinere) Knotenpunkte ohne LSA. An zwei Punkten sind Querungshilfen für Fußgänger in Form von Zebrastreifen und an drei Punkten in Form von Fußgänger-Furten vorhanden. Auf ca. 50% der Versuchsstrecke ist die Fahrbahn nur zum Befahren in einer Richtung freigegeben und ermöglicht Fußgängern daher einen einfachen und schnellen Überblick über sich annähernde Fahrzeuge. Aus diesem Grund kommt es in diesen Bereichen häufig zum ungerichteten Queren von Fußgängern.



Strecke: ca. 2 km

Fahrzeit: ca. 8 min.

$v_{max} = 50$ km/h



ungerichtetes

Queren



LSA



Zebrastreifen



FG-Furt



Haltepunkt



Fahrbahnrichtung

Abb. 2-4: Versuchsstrecke im Innenstadtbereich der Stadt Aachen

Während der ca. einstündigen Versuchsfahrt absolvierten die Probanden je nach Verkehrsaufkommen ca. acht bis zehn Runden auf der Versuchsstrecke. Das wiederholte Abfahren der Versuchsstrecke diente der Erhöhung der Anzahl an vergleichbaren Situationen und reduzierte den Einfluss des Befahrens unbekannter Strecken für nicht-ortskundige Probanden. Insgesamt legten die Probanden in ca. 30 Stunden Fahrzeit etwa 600 km Strecke zurück.

Versuchsablauf/Instruktion

Nach der Begrüßung der Probanden am Institut für Kraftfahrzeuge Aachen (ika) wurde von den Probanden zunächst ein Fragebogen zur Erfassung der Angaben zu Alter, Geschlecht, Beruf, Fahrerfahrung, subjektiver Selbsteinschätzung des Fahrstils sowie des aktuellen Ermüdungszustands ausgefüllt. Die Angabe des aktuellen Ermüdungszustands diente in Kombination mit der anschließend gegebenen Erklärung, das Ermüdungsverhalten von Fahrern in häufig wiederkehrenden Verkehrssituationen untersuchen zu wollen, der Verschleierung des tatsächlichen Untersuchungsgegenstands.

Im Anschluss an das Ausfüllen des Fragebogens wurde den Probanden die Nutzung der in Abb. 2-5 gezeigten Skala für die Bewertung von kritischen Fahrsituationen erklärt und die Skala im Sichtbereich des Fahrers aufgestellt. Die Skala beinhaltet die vier Konflikt-Schwere-Stufen nach [13], die in [14] in einen Zusammenhang mit der nötigen fahrzeugseitigen Längsverzögerung zur Herstellung eines bestimmten Sicherheits-Zeitabstands bei der Interaktion von Fahrzeugen mit querenden Fußgängern herstellt. Die Probanden wurden instruiert, während der Fahrt beim Auftreten von Situationen, die in die durch die Skala beschriebenen Kategorien fallen, die Situationsbewertung dem Versuchsleiter unaufgefordert mitzuteilen. Mithilfe der Situationsbewertung soll eine Verknüpfung von objektiven und subjektiven Daten ermöglicht werden.

	<i>Kategorie</i>	<i>Beschreibung</i>
1	Leicht kritisch	Die Situation erfordert eine <u>merkliche</u> Reaktion, ist aber <u>leicht</u> kontrollierbar. Sie gibt genügend Zeit zur Orientierung und Berücksichtigung weiterer Verkehrsvorgänge.
2	Kritisch	Die Situation erfordert eine <u>deutliche</u> Reaktion, ist aber kontrollierbar. Andere Verkehrsteilnehmer können kaum berücksichtigt werden.
3	Sehr kritisch	Die Situation erfordert eine <u>sehr deutliche</u> Reaktion, die <u>kaum kontrollierbar</u> ist. Andere Verkehrsteilnehmer können nicht berücksichtigt werden.
4	Notfall	Keine kontrollierbare Situation. Beinahe-Unfall.

Abb. 2-5: Skala zur Bewertung von kritischen Fahrsituationen durch die Probanden

Nach der Unterweisung in die Fahrzeugbedienung diente die Anfahrt vom Institut für Kraftfahrzeuge Aachen zur Versuchsstrecke (ca. 3 km) als Gewöhnungsfahrt. Anschließend befuhren die Probanden die Versuchsstrecke jeweils ca. eine Stunde, unterbrochen von einer ca. fünfminütigen Pause nach 30 Minuten Fahrzeit zur Beantwortung eines weiteren Fragebogens, welcher ebenfalls den aktuellen Ermüdungszustand der Probanden sowie die subjektive Priorisierung der Beachtung einzelner Elemente des Verkehrsgeschehens abfragt. Während der gesamten Fahrzeit wurde die Datenaufzeichnung vom Versuchsleiter auf dem Rücksitz überwacht und beim Auftreten von vom Fahrer als kritisch empfundenen Ereignissen, dieses im Messschrieb vermerkt.

Je nach Bedarf wurden die Probanden während der Fahrt aufgefordert, an den zwei in Abb. 2-4 gezeigten Haltepunkten kurz zu stoppen, um bei der Durchfahrt durch die nachfolgenden Streckenabschnitte einen möglichst großen Abstand zu vorausfahrenden Fahrzeugen zu erzeugen. So konnte die Wahrscheinlichkeit der Interaktion zwischen Versuchsfahrzeug und Fußgängern erhöht werden. Nach Abschluss der Versuchsfahrt und der Rückfahrt zum Institut für Kraftfahrzeuge Aachen (ika) füllten die Probanden den Abschlussfragebogen aus, in dem die Probanden zusätzlich angeben sollten, ob sie in der Vergangenheit kritische Erlebnisse mit Fußgängern oder als Fußgänger erlebt haben.

Der letzte Teil der Untersuchung bestand aus einer Betrachtung und Bewertung von drei kurzen Videosequenzen, die die Anbahnungsphase einer Fußgängerquerung zeigen. Nach der Betrachtung der einzelnen Sequenzen wurden die Probanden gebeten, die Situationen im Hinblick auf ihrer Kritikalität mithilfe der in Abb. 2-5 gezeigten Skala zu bewerten und anzugeben, wie sie in der Situation reagieren würden. Mithilfe dieser Videobewertung wurde die Möglichkeit geschaffen, Unterschiede bei der Bewertung von kritischen Ereignissen während der Versuchsfahrt zu berücksichtigen.

Probandenkollektiv

Insgesamt nahmen 30 Probanden an dem Versuch teil. Bei der Zusammenstellung des Probandenkollektives wurde dabei auf eine ausgewogene Zusammensetzung im Hinblick auf Geschlecht, Alter und

Beruf/Studienrichtung geachtet. Berücksichtigt wurden hierzu drei Altersgruppen (18-25 Jahre, 26-45 Jahre, >45 Jahre). In Abb. 2-6 ist das Probandenkollektiv des Versuchs beschrieben. Das Durchschnittsalter der Probanden lag bei 36 Jahren, die Anzahl an Teilnehmern mit technischem Hintergrund bei elf Personen.

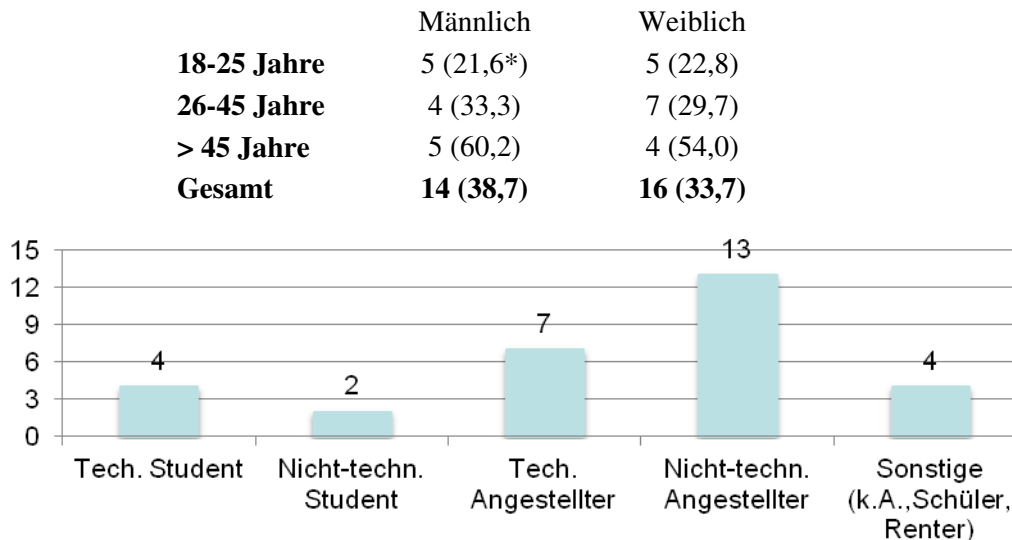


Abb. 2-6: Zusammensetzung des Probandenkollektivs (* Durchschnittsalter)

Trotz der ausgewogenen Zusammensetzung des Probandenkollektivs muss bei der Auswertung berücksichtigt werden, dass die Probanden freiwillig an der Untersuchung teilnahmen und die Fahrer somit i.d.R. gut geübt sind und gerne Autofahren. Dies wird durch die subjektive Selbsteinschätzung des Fahrstils mithilfe des ersten Fragebogens bestätigt (vgl. Abb. 2-7): Im Mittel geben die Probanden hier an, dass sie tendenziell viel bis sehr viel Freude beim Fahren empfinden. Die Probanden wurden für die Teilnahme am Versuch entlohnt.

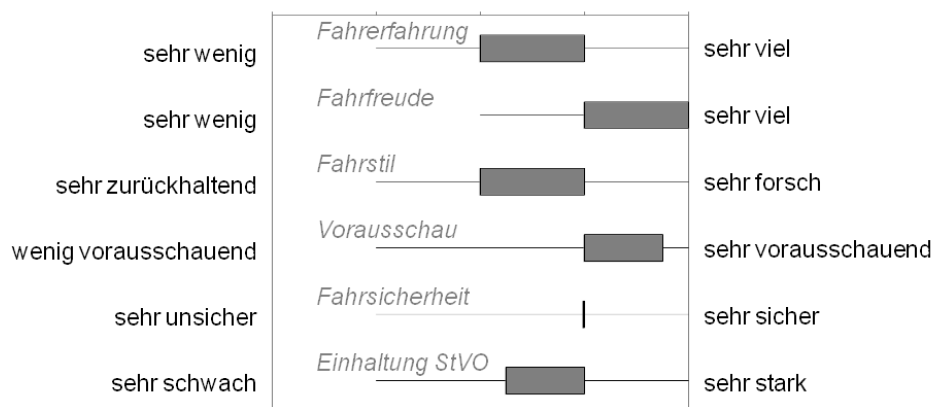


Abb. 2-7: Subjektive Selbsteinschätzung des Fahrstils

Messaufbau/Messgrößen

Für die Durchführung der Versuchsfahrten sowie die Messung und Aufzeichnung der objektiven Messdaten wurde das in Abb. 2-8 gezeigte Versuchsfahrzeug des ika eingesetzt. Das Fahrzeug vom Typ VW Passat CC verfügt zur Erfassung der Fahrzeugumgebung und anderer Verkehrsteilnehmer über verschiedene Bildverarbeitungs- und Radarsysteme. Mithilfe der Bildverarbeitung können Fußgänger in der Fahrzeugumgebung als solche erkannt und ihre Position und Bewegungsgrößen aufgezeichnet werden. Der

eingesetzte Radarsensor für den Nahbereich ermöglicht eine alternative Positions- und Geschwindigkeitsbestimmung von Objekten in der Fahrzeugumgebung und bietet so die Möglichkeit, die systembedingten Schwächen der Bildverarbeitung zu kompensieren. Zudem wurden im Bereich der hinteren Seitenscheiben und der Heckscheibe Kameras angebracht, um den Erfassungsbereich der eingesetzten Systeme zu vergrößern und so die Interpretation und Auswertung der aufgezeichneten Fahrzeug-Fußgänger-Interaktionen zu verbessern.

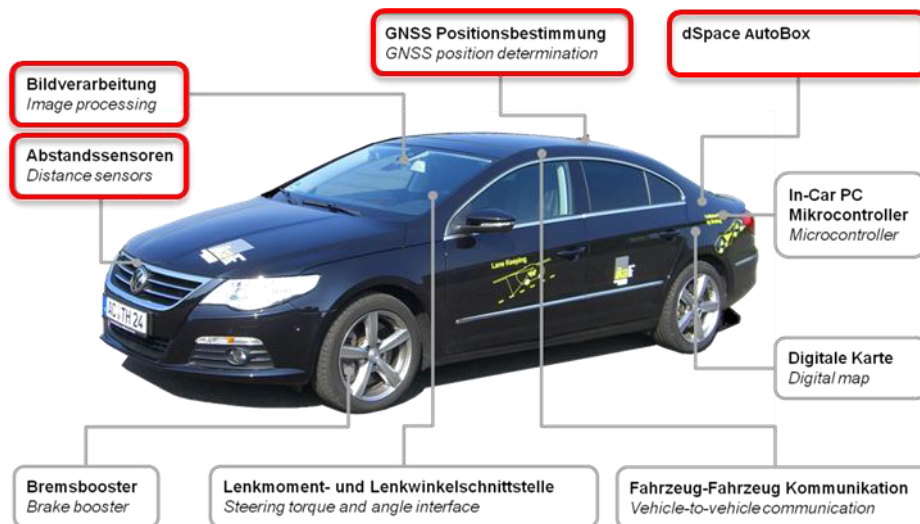


Abb. 2-8: Versuchsfahrzeug des ika (rot markiert: im Versuch eingesetzte Systeme)

Zur Untersuchung der Fahrerreaktion können die Bedieneingaben (Lenkreaktion, Pedalbetätigung, etc.) des Fahrers über CAN-Bus Daten nachvollzogen werden. Zudem kann die Fahrerreaktion mithilfe einer Kamera zur Innenraumbeobachtung untersucht werden, um so mögliche Ablenkungszustände berücksichtigen zu können. Der aktuelle Fahrzustand des Fahrzeugs kann ebenfalls mithilfe der CAN-Daten sowie alternativ mit einem Inertialsensor eines hochgenauen GNSS-Ortungssystems bestimmt werden. Das Ortungssystem ermöglicht es, einen Zusammenhang zwischen Fahrereingaben, Fahrzeugumgebung und anderen Verkehrsteilnehmern herzustellen. Dies vereinfacht insbesondere die Interpretation der erhobenen Daten, indem die gesammelten Informationen in eine digitale Karte transferiert und so in geeigneter Form visualisiert werden können.

Neben den objektiven Messdaten stehen auch subjektive Messdaten durch die Beantwortung von Fragebögen und die Bewertung von kritischen Ereignissen während der Versuchsfahrt zur Verfügung. Somit können die objektiven Daten im Kontext der subjektiven Situationsbewertung des Fahrers betrachtet werden.

Auswertung

Aufgrund der Menge der erhobenen Daten ist eine manuelle Auswertung der Daten nur mit großem Aufwand möglich. Ziel der Auswertung ist es daher, basierend auf den Messdaten der Umfoldsensoren die relevanten Situationen in dem Datenbestand zu identifizieren, um diese anschließend einer detaillierten Analyse unterziehen zu können. Die Auswertungsmethodik unterteilt sich in sechs Einzelschritte, die teilweise iterativ durchlaufen werden und ist in Abb. 2-9 zusammengefasst.

Nach der manuellen Identifizierung von relevanten Situationen für einen kleinen Datensatz (N=3) wird in Matlab ein Algorithmus zur automatisierten Identifizierung der zu untersuchenden Situationen entwickelt. Durch den Abgleich mithilfe des manuell ausgewerteten Datensatzes kann die korrekte Funktion des Algorithmus im nächsten Schritt geprüft werden. Ist der Algorithmus in der Lage die gewünschten Situationen mit einer ausreichenden Erkennungsrate zu bestimmen, so kann er für den gesamten Datensatz

genutzt werden. Sind alle relevanten Situationen identifiziert, kann die Berechnung der Bewertungsgrößen (TTC, PET, etc.) und ihre statistische Analyse durchgeführt werden.

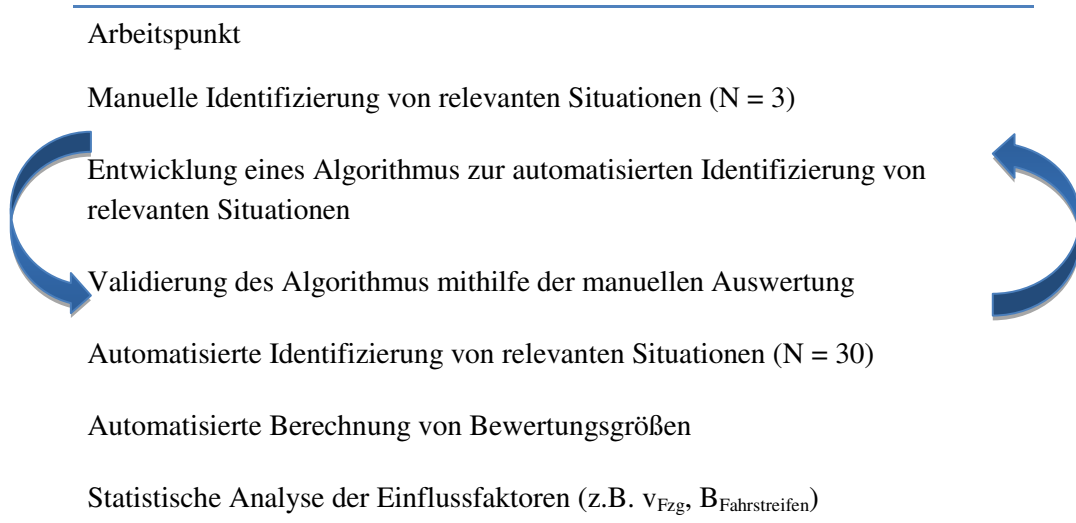


Abb. 2-9: Auswertungsmethodik/-schritte für die erhobenen Daten

Diskussion versuchsergebnisbeeinflussender Faktoren

Bei der Analyse und Bewertung der erhobenen Daten müssen verschiedene Faktoren berücksichtigt werden, die das Versuchsergebnis beeinflussen. Aufgrund der Nähe zur Universität handelt es sich bei den Fußgängern überproportional häufig um Studenten. Dies ist insbesondere bei der Interpretation der Toleranzschwellen von Abständen zu sich nähernden Fahrzeugen sowie den Gehgeschwindigkeiten zu beachten. Zudem kann die Motivation einzelner Fußgänger nur unvollständig eingeschätzt werden. Weitere wichtige Faktoren bei der Anzahl beziehungsweise der Frequenz an Interaktionen sind die Erzeugung von großen Abständen zu Vorderfahrzeugen durch das vom Versuchsleiter geregelte Losfahren an den zwei Haltepunkten sowie das gute Wetter zum Versuchszeitpunkt.

Auch das Fahrerverhalten muss unter dem Einfluss der Versuchsanordnung betrachtet werden. Hierbei ist insbesondere das Bewusstsein der Probanden über die Aufzeichnung der Daten sowie die Anwesenheit des Versuchsleiters von Bedeutung. Hinzu kommen das Fahren mit einem fremden Fahrzeug und der durch die Versuchsteilnahme geänderte Fahrtzweck (und damit ggf. geringere zeitliche Motivation). Aufgrund der Tatsache, dass die Probanden nicht über den Untersuchungsgegenstand aufgeklärt waren, eine Gewöhnungsfahrt durchgeführt wurde und sich die zu befahrende Strecke häufig wiederholte, kann von einer geringen Beeinflussung des Interaktionsverhaltens ausgegangen werden.

2.3.2.2 Phase 2: Statische Verkehrsbeobachtungen

Die dynamische Beobachtung des Realverkehrs (s. Kap. 2.3.3.1) aus einem fahrenden Fahrzeug lieferte viele Kennwerte zur Interaktionsbeschreibung zwischen Fahrzeugen und Fußgängern. Um diese Daten zu erweitern und insbesondere das Verhalten von Fußgängern, die hinter dem Fahrzeug queren, besser beschreiben zu können, soll das Interaktionsverhalten zusätzlich mit einer externen statischen Messeinrichtung beobachtet werden. Dazu wurde eine mobile Fußgänger-Fahrzeug Beobachtungsstation entwickelt, die es ermöglicht an vielen Stellen im Realverkehr das Verhalten von Fußgängern und Fahrzeugen zu untersuchen. Die Station ist in Abb. 2-10 dargestellt und besteht aus einem IBEO Laser Scanner, einem ADTF Messrechner sowie einer Batterie zur mobilen Spannungsversorgung. Da der Fokus der Untersuchungen auf dem Fußgängerverhalten liegt, ist eine verdeckte Anbringung nicht notwendig.

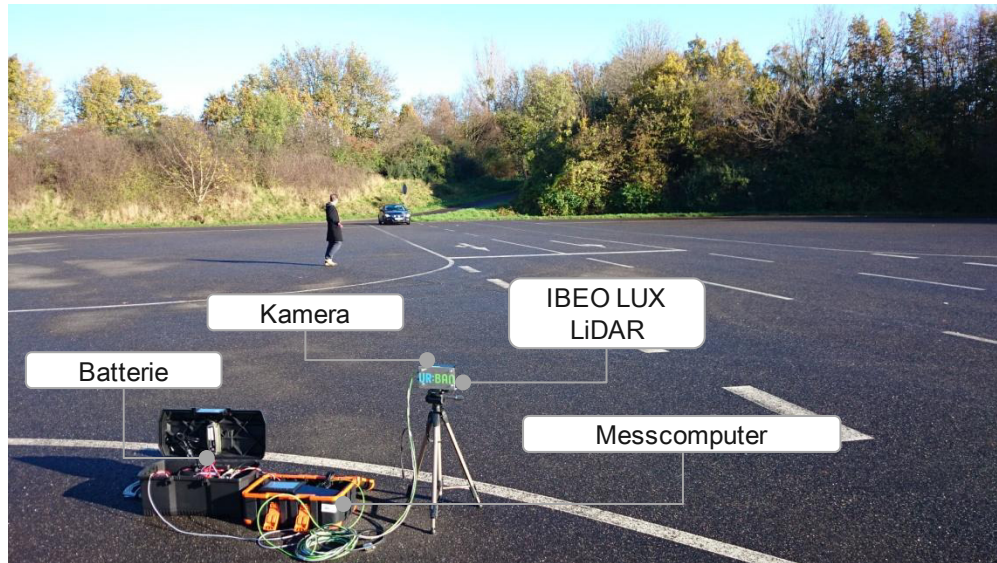


Abb. 2-10: Mobile Fußgänger-Fahrzeug-Interaktions Beobachtungsstation

Messstellen

Die Beobachtungsstationen wurden insgesamt an zwei Stellen im Innenstadtbereich von Aachen (Wüllnerstraße, Templergraben) und an einer Stelle im Innenstadtbereich der benachbarten niederländischen Stadt Vaals (Maastrichterlaan) genutzt, um die Daten der Feldstudie zu ergänzen. Am ersten Messpunkt (Wüllnerstraße) wurde das Verhalten von Fußgängern an einem Fußgängerüberweg beobachtet. Dieser Messpunkt war auch Bestandteil der Versuchsstrecke der Feldstudie. Dies ermöglicht den Vergleich der Ergebnisse.

Die zweite Messstelle (Templergraben) ist in der Nähe der ersten (etwa 260 m entfernt) und vor dem Hauptgebäude der RWTH Aachen University, sodass davon ausgegangen werden kann, dass das Kollektiv der beobachteten Probanden dem der Feldstudie ähnelt. Da diese Messstelle zwischen zwei Universitätsgebäuden liegt, ist die Anzahl der Querungen hoch. Ein Fußgängerüberweg ist nicht vorhanden.

Als dritte Messstelle wurde ein Fußgängerüberweg unmittelbar hinter der deutsch-niederländischen Grenze in der benachbarten niederländischen Stadt Vaals gewählt. Die Messstelle ähnelt der ersten Messstelle (Wüllnerstraße), da jedoch die unmittelbare Nähe zur Universität nicht gegeben ist und die Messstelle sich in der Grenzregion befindet, wird von einem anderen Kollektiv der beobachteten Fußgänger ausgegangen (weniger Studenten, ausgeglichenes Verhältnis Niederländer und Deutsche). Die Geschwindigkeitsbegrenzung an den Messstellen Wüllnerstraße und Maastrichterlaan ist 50 km/h und an der Messstelle Templergraben 30 km/h. Eine Karte mit den eingezeichneten Messstellen ist in Abb. 2-11 dargestellt.

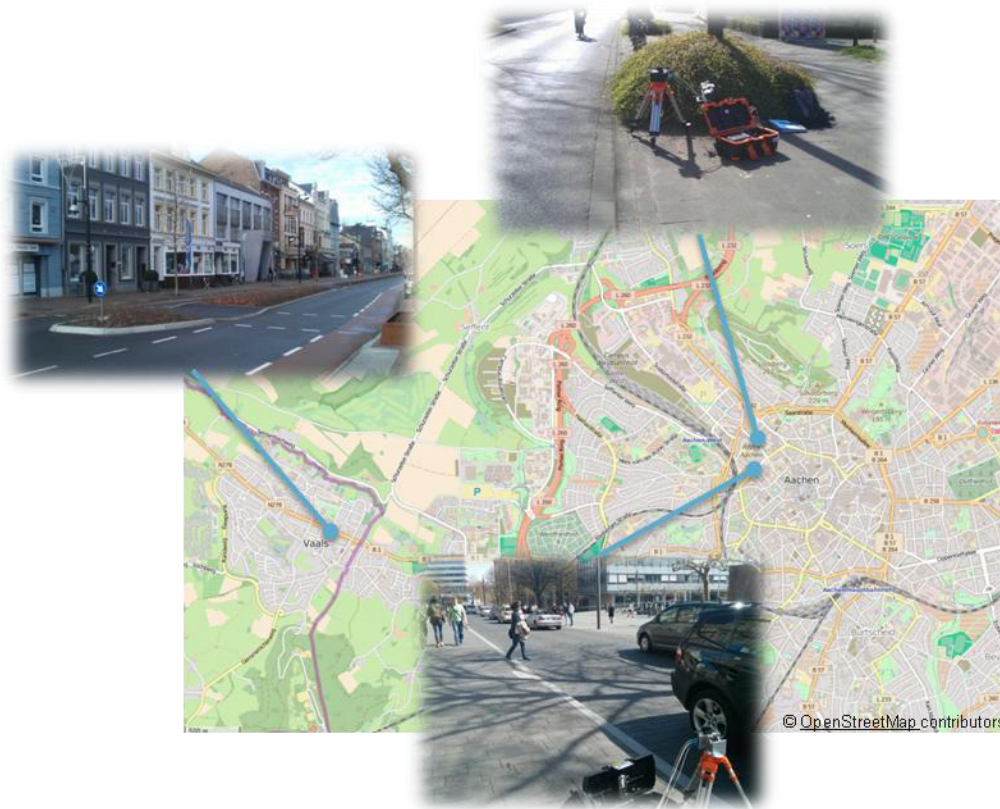


Abb. 2-11: Messstellen der externen Fußgänger-Fahrzeug Beobachtung

2.3.2.3 Phase 2: Probandenstudie im kontrollierten Testfeld

Basierend auf den Ergebnissen der Untersuchungen im Realverkehr sollten Szenarien extrahiert und auf der Teststrecke im kontrollierten Feld detailliert untersucht werden. Dazu wurde der Fokus auf gerichtete Querungen gelegt. Ziel der Studie war die Untersuchung von definierten Interaktionen zwischen Fußgängern und Fahrzeugen. Dabei sollen die Fahrzeugart und die physikalischen Aktionen des Fahrzeugs im Mittelpunkt stehen. Die Studie wurde mit 30 Probanden auf der Teststrecke des ika in Aachen durchgeführt.

Versuchsablauf

Im Laufe des Versuchs sollten die Probanden mehrmals eine auf der Teststrecke markierte Straße mit einem Zebrastreifen überqueren. Parallel fuhren je ein PKW und ein LKW auf der markierten Straße (Fahrer Konfidenten) mit definierten Manövern auf und ab, deren Start mit der Position des Fußgängers synchronisiert wurden. Pro Fahrzeugtyp (PKW, LKW) wurden 14 Manöver definiert, die sich aus den Variationsgruppen *Anfahrsgeschwindigkeit*, *Entfernung*, *Start Verzögerung* und *Verzögerungsraten* zusammengesetzt haben. Die Variationen sind in Abb. 2-12 dargestellt. Die Manöver sind so ausgelegt, dass sie typische Interaktionen zwischen Fußgängern und Fahrzeugen an Zebrastreifen wiedergeben. Insgesamt konnten so 28 verschiedene Interaktionsszenarien untersucht werden. Die Verzögerungsraten wurden jeweils durch die ACC Schnittstellen der Fahrzeuge vorgegeben und die Reihenfolge der Manöver pro Proband variiert. Um den Fokus der Probanden nicht auf die Querung der Straße zu legen, wurde auf jeder Seite der Straße jeweils ein Parcours aufgebaut, den die Probanden durchlaufen sollten. Bei dem Weg von Parcours 1 zu Parcours 2 mussten die Probanden jedoch die Straße queren, auf denen die definierten Fahrmanöver durchgeführt wurden. Um zu verhindern, dass die Probanden einen Zusammenhang zwischen den Fahrzeugen und dem Versuch herstellen, wurde den Probanden eine Coverstory erzählt. Zudem fuhren die Fahrzeuge zwischendurch auch unsynchronisiert die Strecke auf und ab.

Fahrzeugtyp	Geschwindigkeit	Entfernung "Start Verzögerung"	Verzögerungsrate *
<ul style="list-style-type: none"> ▪ PKW ▪ LKW 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 30 m/s ▪ 50 m/s 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ keine Verzögerung ▪ 50 m ▪ 30 m 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 1.8 m/s² ▪ 2.5 m/s² ▪ 3 m/s²

* Durchschnittliche Verzögerungsrate eingesteuert über die ACC Schnittstelle der Versuchsfahrzeuge

Abb. 2-12: Übersicht Fahrmanöver

Instruktion

Nach der Begrüßung der Probanden auf der Teststrecke des ika wurde von den Probanden zunächst ein Fragebogen zur Erfassung der Angaben zu Alter, Geschlecht, Beruf, Fahrerfahrung sowie subjektiver Selbsteinschätzung des Fahrstils ausgefüllt. Zudem wurde die Position des Smartphones am Körper vermessen. Um ein realitätsnahes Querungsverhalten untersuchen zu können, wurde den Probanden anschließend folgende Coverstory erzählt: „Ziel der Studie ist es, die Genauigkeit von Sensoren aus Smartphones zu untersuchen. Dazu durchlaufen Sie bitte abwechselnd zwei verschiedene Parcours (P1 und P2). Die beiden Parcours liegen aufgrund des Sichtbereiches des Referenzsensors und zur Untersuchung von verschiedenen Randbedingungen auf zwei unterschiedlichen Seiten der auf der Teststrecke markierten Straße. Aufgrund einer Überbuchung der Teststrecke findet auf dieser Straße parallel leider ein weiterer Versuche zur Untersuchung von Kamerasystemen statt. Um einen sicheren Ablauf zu gewährleisten und Verwirrungen zu vermeiden, wurde den Fahrern der Versuchsfahrzeuge erzählt, dass Sie die Straßenverkehrsordnung achten sollen. Um die Querung jedoch zu vereinfachen wurde temporär ein Zebrastrreifen installiert (dieser wird den Probanden in gezeigt)“.

Messaufbau

Zur Beobachtung des Fußgänger- und Fahrzeugverhaltens wird die oben beschriebene mobile Beobachtungsstation verwendet (siehe Abb. 2-10). Zusätzlich werden die Probanden mit einem Smartphone ausgestattet, das mittels einer eigens entwickelten App die Positions- und Bewegungsdaten der Fußgänger aufzeichnet. Hierdurch können Informationen über den Fußgänger auch bei Sichtverdeckung für den Laserscanner ausgewertet werden. Das Smartphone dient zusätzlich zur Unterstützung der Coverstory. Um eine synchrone Aufzeichnung der Daten gewährleisten zu können, werden die Daten des Laserscanners wie auch die vom Smartphone zusammen mit einem GPS Zeitstempel aufgezeichnet. Der Fokus dieser Studie soll auf physikalische Interaktionskenngrößen (Beschleunigungen, Änderungen der Beschleunigung, Wartezeiten, ...) und nicht auf soziale Interaktionen liegen, da diese im realen Verkehrsablauf oft schwer messbare Größen sind. Aus diesem Grund sind soziale Interaktionen zwischen den Fahrern und den Probanden in diesem Versuch zu vermeiden. Da die Fahrer der Fahrzeuge Konfidenten sind, können Gesten direkt vermieden werden. In Abb. 2-13 sind Bilder des Versuchs dargestellt. Auf der linken Seite ist eine synchronisierte Interaktion mit dem PKW dargestellt. Die rechte Seite zeigt ein unsynchronisiertes Durchfahren des LKWs, während der Proband einen der Parcours durchläuft, um zu vermeiden, dass dieser einen Zusammenhang zwischen den beiden Versuchen herstellt.



Abb. 2-13: Bilder von den Fußgänger-Fahrzeug Interaktionsuntersuchungen auf der Teststrecke

Probandenkollektiv

Insgesamt nahmen 30 Probanden an dem Versuch teil. Davon waren 24 männlich und 6 weiblich. Das Durchschnittsalter der Probanden lag bei 24,6 Jahren ($\sigma = 4.09$; min= 19; max = 41) und ähnelt dem Umfeld, das auch hauptsächlich beim Feldtest und den Verkehrsbeobachtungen betrachtet wurde. Um missglückte Synchronisierungen auszugleichen, wurden pro Proband zwei zusätzliche Querungen initiiert, sodass in etwa 900 Querungen aufgezeichnet wurden. Da die Synchronisierung nicht trivial ist, beinhalten jedoch nicht alle Aufnahmen Fußgänger-Fahrzeug Interaktionen, sodass weniger Daten für die Auswertung zur Verfügung stehen.

2.3.3 AP 3000 Datenanalyse und Modellierung

Neben der Durchführung der empirischen Datenerhebung im AP 2000 (siehe Kap. 2.3.2) wurde auch die *Datenanalyse und Modellierung* in AP 3000 in zwei Phasen aufgeteilt. Während in der ersten Phase eine Probandenstudie im realen Verkehr ausgewertet wurde (siehe Kap. 2.3.2.1), bestand die zweite Phase aus einer Probandenstudie im kontrollierten Testfeld, welche durch statische Verkehrsbeobachtungen ergänzt wurden (siehe Kap. 2.3.2.2 und 2.3.2.3).

2.3.3.1 Phase 1: Probandenstudie im Realverkehr

Vorgehen bei der Datenanalyse

Im Rahmen der ersten Phase des AP 2000 wurden mithilfe verschiedener Sensoren Daten zur Interaktion von Fußgängern und Fahrern von dreißig Probanden aufgezeichnet. Aufgrund der dabei entstandenen großen Datenmenge ist eine manuelle Auswertung mit hohem Aufwand verbunden. Aus diesem Grund wird für die Datenauswertung eine Kombination aus manueller und automatisierter Auswertung vorgenommen. Das Ziel der automatisierten Auswertung ist es, basierend auf den Messdaten der Umfeldsensoren die relevanten Situationen im Datenbestand zu identifizieren, um diese anschließend einer detaillierten Analyse unterziehen zu können. Die im Rahmen des Versuchskonzepts erarbeitete Auswertungsmethodik umfasst dabei sieben Teilschritte, die teilweise iterativ durchlaufen werden (siehe Abb. 2-14).

Nach einer manuellen Datenauswertung für einen kleinen Datensatz ($N=3$) wird dieser genutzt, um einen in Matlab entwickelten Erkennungsalgorithmus zur Identifizierung von relevanten Situationen zu validieren. Weist der Algorithmus eine ausreichende Erkennungsgenauigkeit auf, so kann er für den gesamten Datensatz ($N=30$) eingesetzt werden. Nach einer manuellen Prüfung der korrekten Klassifizierung der relevanten Situationen kann der Bestand an identifizierten Fahrer-Fußgänger-Interaktionen für die Berechnung von Bewertungsgrößen und die statistische Analyse der Einflussfaktoren genutzt werden.

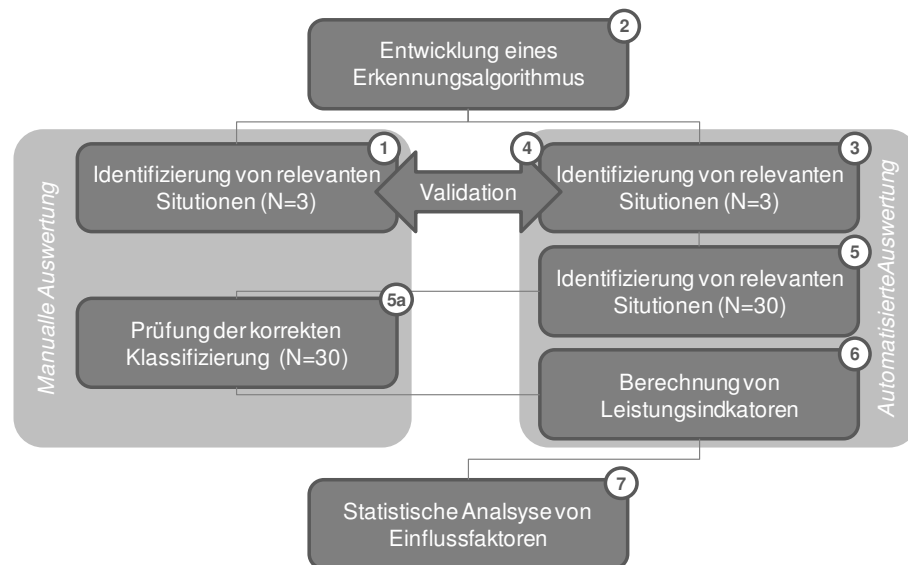


Abb. 2-14: Auswertungsmethodik zur Datenanalyse der Fahrer-Fußgänger-Interaktion

Eines der zentralen Elemente der automatisierten Auswertung ist die Identifizierung von relevanten Situationen mithilfe der aufgezeichneten Daten der Fahrzeug-Umfeldsenorik. Die relevanten Situationen umfassen das Queren sowie die Querungsabsicht von Fußgängern vor oder hinter einem sich annähernden Fahrzeug. Eine detaillierte Beschreibung der betrachteten Szenarien findet sich im Bericht zum AP 2000. Für die Situationsanalyse bei der Interaktion von Fahrzeugen und Fußgängern sind aus der Literatur verschiedene Ansätze bekannt. In [15] werden diese Ansätze wie folgt kategorisiert:

Ad-hoc-Ansätze sind einfache Ansätze, um die Bewegung von Fahrzeug und Fußgänger in Verbindung zu setzen und zu bewerten. Ein klassisches Beispiel für einen solchen Ansatz ist die Bewertung, ob sich Fahrzeug und Fußgänger zu einem bestimmten Zeitpunkt unter Beibehaltung der aktuellen Bewegung auf Kollisionskurs befinden. Dabei kann für die Bewegung die Annahme einer konstanten Geschwindigkeit (1. Ordnung) oder einer konstanten Beschleunigung (2. Ordnung) getroffen werden. Eine Erweiterung dieses Ansatzes besteht in der Berechnung einer Time To Collision (TTC), die aber auch zur Gruppe der physikalischen Ansätze gezählt werden kann.

In geometrischen Ansätzen werden Zonen im Fahrzeugumfeld definiert und die erkannten Fußgänger nach ihrem Aufenthaltsort in Bezug auf das Fahrzeug bewertet. Fußgänger, die sich z.B. im (prädierten) Fahrschlauch des sich annähernden Fahrzeugs befinden, werden als unmittelbar relevant betrachtet. Dasselbe gilt für Fußgänger, die sich im direkten seitlichen Bereich des Fahrschlauchs befinden und sich in Richtung des (prädierten) Fahrschlauchs bewegen. Personen, die sich außerhalb der zwei zuvor genannten Bereiche befinden, werden als irrelevant für die Situation gewertet. Die longitudinale Ausdehnung des relevanten Bereiches wird dabei in der Regel in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit definiert.

Die physikalischen Ansätze werten die zeitliche und räumliche Annäherung zwischen Fahrzeug und Fußgänger aus. In die Auswertung gehen dabei Abstände, Geschwindigkeiten und teilweise auch Beschleunigungen der Verkehrsteilnehmer ein. Die Extrapolation der Bewegung ermöglicht dabei auch eine Berücksichtigung von Fußgängern, die noch nicht in den Bereich vor dem Fahrzeug eingetreten sind. Weitergehende physikalische Ansätze beziehen auch die physischen Fähigkeiten der Verkehrsteilnehmer mit ein (vgl. [15]). Für einen Fußgänger kann etwa eine maximal erzielbare Beschleunigung definiert werden. Zusammen mit den anderen Bewegungsparametern kann damit bestimmt werden, wann der Fußgänger einen bestimmten Punkt frühestens erreichen kann. Insgesamt bildet die Gruppe der physikalischen Ansätze die Fußgängerdynamik deutlich besser ab, als dies mit einer geometrischen Herangehensweise möglich ist.

In stochastischen Ansätzen der Situationsanalyse wird versucht, die Bewegung von Fußgängern mittels zufallsgesteuerter Prozesse vorherzusagen. Der Ursprung dieser Ansätze liegt in der Untersuchung des Ver-

haltens von Menschen in größeren Ansammlungen. In komplexen Verkehrssituationen mit entsprechend vielen Interaktionen können stochastische Ansätze der Situationsanalyse Vorteile aufweisen, da hier die Wechselwirkungen zwischen den Verkehrsteilnehmern besser abgebildet werden. Da in den hier betrachteten Szenarien in der Regel die Interaktion zwischen einem einzelnen Fußgänger und einem Fahrer betrachtet wird, werden diese Ansätze im Folgenden nicht näher betrachtet.

Identifizierung relevanter Situationen

Um zu identifizieren, welche von der Sensorik erkannten Fußgänger eine Querungsabsicht besitzen und dabei in die Interaktion mit dem Versuchsfahrzeug treten, ist es nötig, eine Referenzsituation festzulegen. Aufgrund der untersuchten Fragestellung und der einfachen Umsetzung wird bei der Situationsanalyse ein geometrischer Ansatz verwendet. Bei der Definition der relevanten Zonen muss eine geeignete Auswahl getroffen werden, um möglichst alle Fußgänger mit Querungsabsicht zu erfassen, gleichzeitig aber nicht eine zu große Anzahl, an irrelevanten Fußgängern mit zu berücksichtigen. Hierzu wird in lateraler Richtung ein 1,5 m breiter Bereich seitlich des vom Fahrzeug befahrenen Fahrschlauchs festgelegt (vgl. Abb. 2-15). Dieser stellt bei der Versuchsfahrzeugbreite von 1,85 m und einer angenommenen Fahrstreifenbreite von 3,5 m den Übergangsbereich zwischen Fahrstreifen und angrenzendem Gehweg bzw. Nachbarfahrstreifen dar.

$$y_{max, Interaktion} = 1,5 \text{ m}$$

In longitudinaler Richtung wird ein geschwindigkeitsabhängiger maximaler Interaktionsabstands definiert. Dabei wird die Annahme getroffen, dass die Time To Collision für diesen Abstand konstant bleibt. Als Grenzwert für die TTC werden fünf Sekunden gewählt. Um Interaktionen in niedrigen Geschwindigkeitsbereichen besser zu erfassen, wird zusätzlich ein Offset von zehn Metern für den kritischen Abstand berücksichtigt. Somit lässt sich der maximale longitudinale Interaktionsabstand für einen Fußgänger wie folgt berechnen:

$$x_{max, Interaktion} = 10 \text{ m} + v_{rel, x} * 5 \text{ s} \quad \text{mit} \quad [v_{rel, x}] = \frac{m}{s}$$

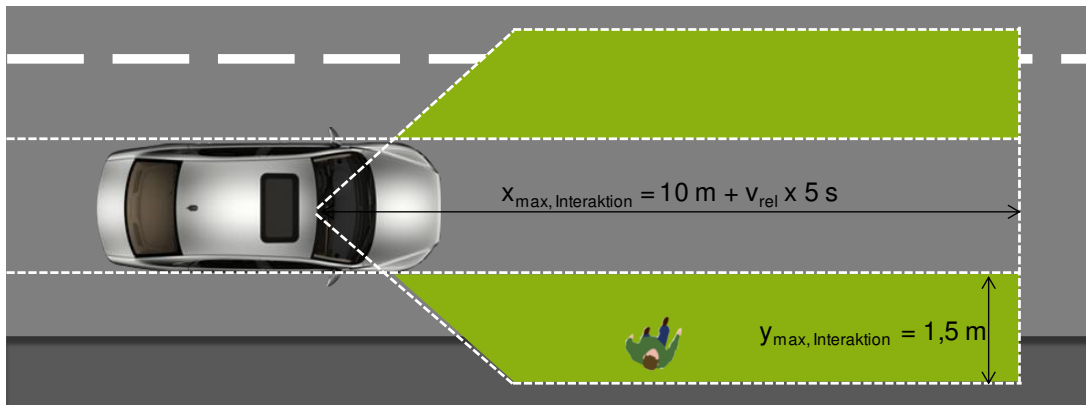


Abb. 2-15: Zonen für die automatisierte Erkennung von relevanten Situationen

Als zusätzliches Kriterium für die Erfassung einer relevanten Situation (Interaktion) wird festgelegt, dass sich in longitudinaler Richtung zwischen Versuchsfahrzeug und Fußgänger kein weiteres Fahrzeug befindet.

Erkennung vor dem Fahrzeug querender Fußgänger

Aufgrund der Tatsache, dass die Situationsanalyse für den durchgeführten Versuch nachträglich durchgeführt werden kann und die Bewegung der Interaktionsteilnehmer nicht prädiziert, sondern mithilfe der Sensordaten offline nachvollzogen werden kann, kann die Erkennung, ob ein Fußgänger vor dem Fahrzeug quert, sehr einfach daran nachvollzogen werden, ob er zu einem beliebigen Zeitpunkt im vom Fahrzeug befahrenen Fahrschlauch von der Sensorik erfasst wurde. Der Fahrschlauch (als tatsächlich befahrende Tra-

jektorie in Absolutkoordinaten) kann dazu mithilfe der Positionsdaten vom eingesetzten Ortungssystem sehr genau bestimmt werden und mit den ebenfalls in Absolutkoordinaten transformierten erkannten Fußgängerpositionen abgeglichen werden.

Erkennung hinter dem Fahrzeug querender Fußgänger

Die Erkennung von Fußgängern, die die Fahrbahn erst hinter dem interagierenden Fahrzeug queren, ist aufgrund der Tatsache, dass im Versuchsfahrzeug keine Messsysteme zur Erfassung der Bewegung anderer Verkehrsteilnehmer hinter Fahrzeug verbaut sind, eine größere Herausforderung. Somit muss die Erkennung von Fußgängern, die hinter dem Fahrzeug queren, auf Basis von Daten erfolgen, die von der im Frontbereich des Fahrzeugs verbauten Sensorik aufgezeichnet werden. Diese können bei ausreichender Datenqualität für eine Prädiktion der Fußgängerbewegung genutzt werden. Allerdings können durch diesen Ansatz nur Fußgänger berücksichtigt werden, welche sich in Richtung des Fahrschlauchs bewegen. Fußgänger, die wartend am Fahrbahnrand stehen, können so nicht berücksichtigt werden. Daher kommt für die Identifizierung der hinter dem Fahrzeug querenden Fußgänger der manuellen Prüfung der korrekten Klassifizierung der als relevant eingestuften Situationen eine stärkere Bedeutung zu.

Um dennoch eine möglichst hohe Anzahl an relevanten Situationen mithilfe der automatisierten Auswertung zu bestimmen, wird mithilfe eines physikalischen Ansatzes die aktuelle Bewegung der erkannten Fußgänger unter der Annahme konstanter Geschwindigkeit prädiziert, um abzuschätzen, ob sie bei Beibehaltung ihrer Bewegungsrichtung den Fahrschlauch kreuzen. Als weitere Größen zur Beurteilung, ob ein Fußgänger potentiell hinter dem Fahrzeug quert, dient der prädizierte Eintrittswinkel in den Fahrschlauch und die prädizierte Zeit bis der Fußgänger den Fahrschlauch erreicht.

Bewertungsgrößen

Für die Bewertung der als relevant eingestuften Situationen stehen prinzipiell verschiedene Bewertungsgrößen zur Verfügung. Da Interaktionen zwischen Fahrzeugen und Fußgängern ein kontinuierlicher Prozess sind und sich die Verkehrssituation während des Verlaufs verändern kann, sollte eine geeignete Bewertungsgröße idealerweise eine Verkehrssituation zu jeder Zeit beschreiben können. Dem gegenüber steht der Wunsch, Verkehrssituationen durch einen einzelnen Wert in ihrer Konfliktschwere bewerten zu können.

Die Time To Collision (TTC) ist definiert als die verbleibende Zeit bis zu einer möglichen Kollision, wenn die Interaktionspartner ihre gegenwärtige Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung beibehalten. Die wesentliche Einschränkung dieser Bewertungsgröße ist, dass sie nur zu den Zeitpunkten definiert ist, in denen tatsächlich ein Kollisionskurs besteht. Dies ist der Fall, wenn sich die beiden Verkehrsteilnehmer unter Beibehaltung ihrer Bewegung zur gleichen Zeit auf der Konfliktfläche aufhalten werden. Zudem wird bei der Berechnung der TTC keine Kollisionsgeschwindigkeit berücksichtigt. Besteht ein Kollisionskurs, so kann mithilfe der TTC die Interaktion kontinuierlich bewertet werden. Zur Bewertung der Situationskritikalität wird der niedrigste Wert TTC_{\min} genutzt.

Eine weitere Größe zur Bewertung von Interaktionen zwischen Verkehrsteilnehmern ist die Post Encroachment Time (PET). Sie ist definiert als die Zeitlücke zwischen dem Verlassen der gemeinsamen Konfliktfläche bzw. Konfliktlinie durch den ersten Verkehrsteilnehmer und dem Erreichen dieser Fläche bzw. Linie durch den zweiten Verkehrsteilnehmer. Damit ermöglicht die PET Interaktionen zu bewerten, in denen sich die Verkehrsteilnehmer beliebig knapp verpassen und in denen kein Kollisionskurs vorliegt. Die PET kann somit als Ergänzung zur TTC benutzt werden, ermöglicht aber nur eine kontinuierliche Bewertung, solange kein Kollisionskurs vorliegt.

Um eine kontinuierliche Bewertung unabhängig vom Bestehen eines möglichen Kollisionskurses zu ermöglichen, werden für die Bewertungsgröße Time Advantage (TAdv) die Ideen der TTC als auch der PET aufgegriffen. Die Größe Time Advantage beschreibt die minimale Verspätung des ersten Verkehrsteilnehmers einer Interaktion, die zu einer Kollision führen würde. Dabei wird wie bei der TTC davon ausgegangen, dass die beiden beteiligten Teilnehmer ihre Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung beibehalten (vgl.

[16]). Die Größe TAdv kann sowohl zur Bewertung von ungestörten Fahrbewegungen, als auch von leichten und schweren Verkehrskonflikten genutzt werden.

Eine Größe, die insbesondere bei der Bewertung von Fahrzeug-Fußgänger-Interaktionen als geeignet erscheint, ist die sogenannte Deceleration to Safety Time (DST). Sie beschreibt die erforderliche Verzögerung eines Interaktionsteilnehmers zur Herstellung einer bestimmten Zeitlücke zwischen dem Verlassen der Konfliktfläche durch den ersten Konfliktpartner und dem Erreichen der Konfliktfläche durch den zweiten Konfliktpartner. Somit ermöglicht sie sowohl mit als auch ohne bestehenden Kollisionskurs eine kontinuierliche Bewertung der Situation.

Modellierungsansatz

Das Ziel der Untersuchung zur Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion ist nicht die Erstellung neuer Modellansätze für die simulative Darstellung von Fußgängerbewegungen, sondern die Bereitstellung einer empirischen Datenbasis zur Parametrierung und Kalibrierung bestehender Modelle. Im Fokus der Betrachtung steht dabei die Entscheidung eines Fußgängers die Fahrbahn vor oder hinter einem sich annähernden Fahrzeug zu queren. Unter Berücksichtigung der verschiedenen Randbedingungen können so mithilfe der als relevant identifizierten Situationen Querungswahrscheinlichkeiten für das Fußgängerverhalten und die damit verbundenen Fahrerreaktionen berechnet werden.

Wichtig für die Anwendbarkeit/Umsetzbarkeit der erzielten Ergebnisse in der Modellierung des Querungsverhaltens von Fußgängern sowie der Fahrerreaktion ist die Auswahl geeigneter Bewertungsgrößen, die zum einen die vom Fußgänger zur Beurteilung der Situation und Entscheidung genutzten Größen und zum anderen die vom Fahrer als Reaktionen umgesetzten Maßnahmen beinhaltet. Für die gewählten Bewertungsgrößen kann die Querungswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Bewertungsgröße errechnet werden, indem die Quervorgänge diskreten Intervallen der Bewertungsgröße zugeordnet werden und der prozentuale Anteil an durchgeführten Quervorgängen zu erkannten Interaktionen der entsprechenden Intervalle bestimmt werden (siehe Abb. 2-16).

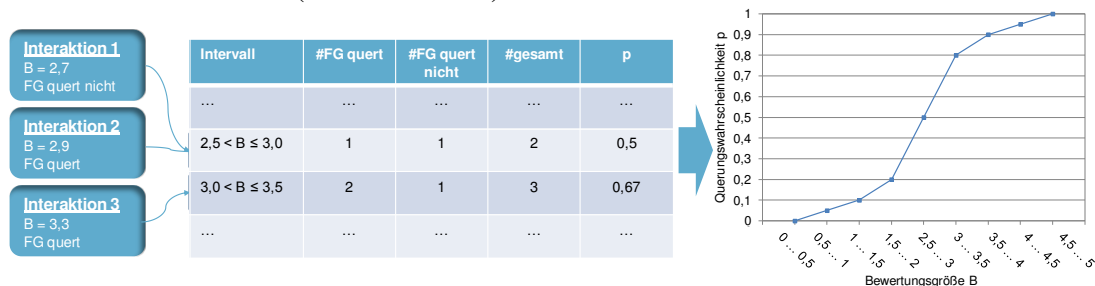


Abb. 2-16: Ansatz zur Erstellung der Querungswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit der Bewertungsgrößen

Ergebnisse

Nachdem mithilfe der kombinierten manuellen und automatisierten Auswertung der gesamte Datensatz auf Interaktionsereignisse mit Fußgängern ausgewertet werden konnte, wurden die Daten zu diesen Interaktionsereignissen in einer Datenbank abgelegt. Die Bewertung der ca. 5000 erkannten Situationen ergab, dass hiervon ca. 1880 als relevante Interaktionsereignisse zwischen Fußgänger und Fahrzeug beim Queren der Fahrbahn klassifiziert werden können. In Abb. 2-17 ist die Verteilung der relevanten Interaktionsereignisse über der Versuchsstrecke zu sehen. Ca. 68% der Interaktionen fanden dabei zwischen Knotenpunkten statt (ungerichtetes Queren), 12% an Querungshilfen wie Zebrastreifen und Fußgängerfurten (gerichtetes Queren) sowie 20% an Lichtsignalanlagen (im Folgenden nicht weiter betrachtet).

Die folgenden Abbildungen zur Beschreibung des Bewegungsverhaltens von Fußgängern und Fahrern (sowie deren Interaktionsverhalten) beinhalten teilweise abweichende Angaben bezüglich der betrachteten Interaktionsereignisse im Vergleich mit Abb. 2-17. Dies ist darauf zurückzuführen, dass für die entspre-

chenden Auswertungen teilweise andere Kriterien genutzt wurden, als in der in Abb. 2-17 dargestellten Gesamtübersicht.

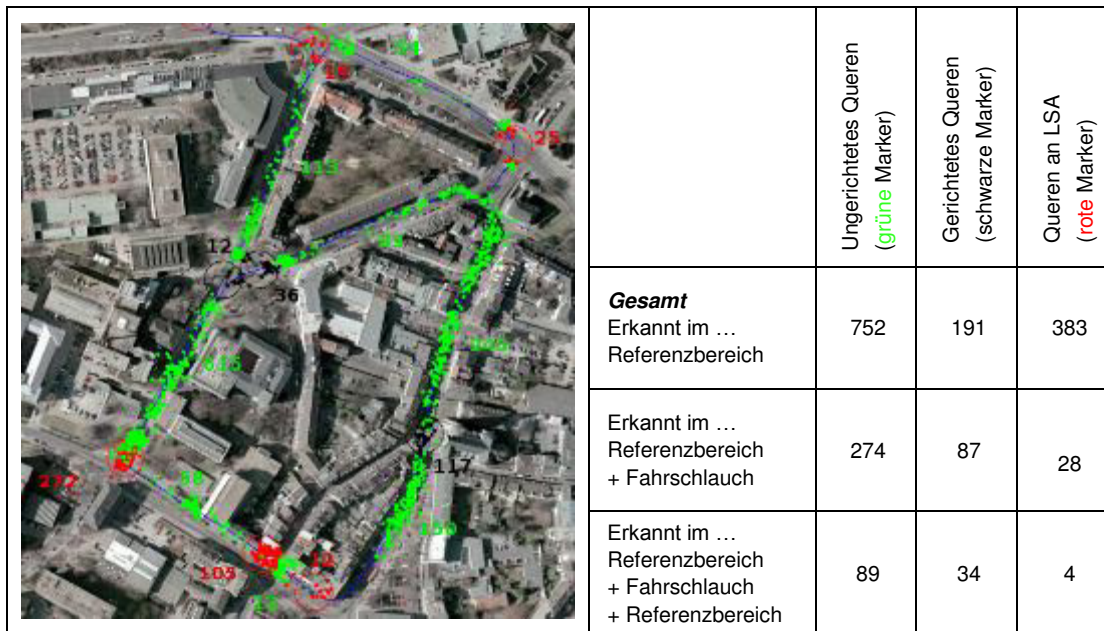


Abb. 2-17: Erkannte Interaktionsereignisse auf der Versuchsstrecke

Die Ergebnisdarstellung differenziert im Folgenden zwischen dem gerichteten Queren (an Querungshilfen wie Zebrastreifen und Fußgängerfurten) und dem ungerichteten Queren (zwischen Knotenpunkten). Hierzu sollen zunächst einige Kenngrößen zur Beschreibung des Bewegungsverhaltens des FG sowie des Fahrers in den Querungssituationen ausgewertet werden, um diese anschließend bei der Modellierung des Querungsverhaltens anwenden zu können.

Bewegungsverhalten des Fußgängers

Für die Beschreibung des Bewegungsverhaltens des FG ist in Abb. 2-18 die Verteilung der Querungsgeschwindigkeiten zu sehen. Bei den dargestellten Querungsgeschwindigkeiten handelt es sich um die gemittelte Geschwindigkeit des Querungsvorgangs für die Zeitpunkte, zu denen sich der Fußgänger innerhalb des vom Versuchsfahrzeug befahrenen Fahrschlauchs befindet. Es handelt sich somit um die durchschnittliche Querungsgeschwindigkeit während der Fußgänger sich in der potentiellen Konfliktzone befindet.

Die Querungsgeschwindigkeiten liegen im Bereich zwischen 1 und 2 m/s und damit im Bereich der normalen Gehgeschwindigkeit (vgl. z.B. [15]). Der Median liegt bei ca. 1,5 m/s sowohl für das gerichtete wie auch für das ungerichtete Queren.

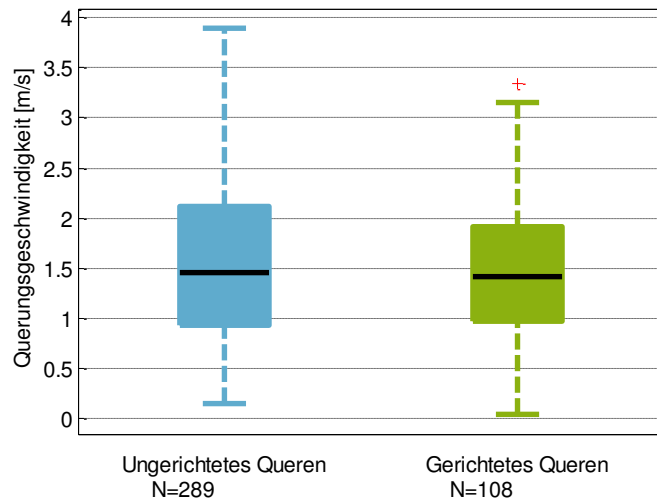


Abb. 2-18: Verteilung der mittleren Querungsgeschwindigkeit für FG-Querungen

Verhaltens des Fahrers

Bei der Bewertung des Fahrerverhaltens bei FG-Querungen ist insbesondere die Fahrzeuglängsbeschleunigung interessant. Durch die Änderung der Fahrgeschwindigkeit hat der Fahrer die Möglichkeit dem FG sein Kooperationsverhalten zu signalisieren oder eine ggf. kritische Situation zu entschärfen. Aus diesem Grund sind in Abb. 2-19 die Verteilungen der maximalen Längsverzögerungen bei den erfassten FG-Querungen dargestellt.

Zusätzlich zu den zuvor genannten Kriterien für die Filterung der Interaktionsereignisse wurden hierbei nur solche Interaktionsereignisse berücksichtigt, in denen der erkannte Fußgänger die maximale Verzögerung zur Herstellung eines bestimmten Sicherheitsabstandes im Vergleich mit anderen im Fahrschlauch befindlichen Objekten erforderte. So konnte abgesichert werden, dass der Fußgänger den Grund für die gemessene Verzögerung darstellte und nicht z. B. ein weiter entferntes, stehendes Hindernis („Fußgänger quert hinter einem Stauende“).

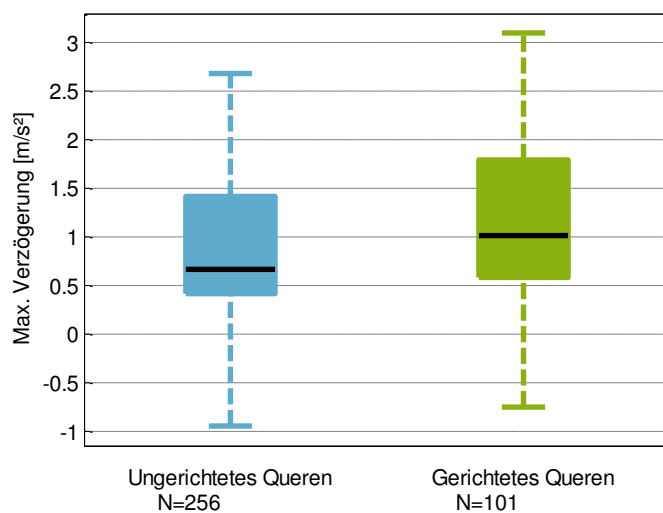


Abb. 2-19: Verteilung der Fzg-Längsverzögerungen bei FG-Querungen

Für das gerichtete Queren treten geringfügig höhere Längsverzögerungen auf. Dies ist jedoch auch zu erwarten, da der Fußgänger an diesen Stellen (Zebrastreifen) Vorrang gegenüber dem sich nähernden Fahrzeug besitzt. Im Mittel liegen die auftretenden Verzögerungen beim ungerichteten Queren bei ca. 0,5 bis 1 m/s² und damit im Bereich einer komfortablen Verzögerung. Für das gerichtete Queren liegt der Median minimal über 1 m/s². Auch hier kann noch von einer komfortablen Verzögerung gesprochen werden.

Interaktionsverhalten

Zur Beschreibung des Interaktionsverhaltens kann unter anderem die Post Encroachment Time (PET) genutzt werden, da sie sich aus dem Bewegungsverhalten beider Interaktionsteilnehmer ergibt. Die PET wurde mithilfe des durch das Versuchsfahrzeug befahrenen Fahrschlauchs berechnet. Da nicht für alle Interaktionen der Zeitpunkt des Austritts des Fußgängers aus dem Fahrschlauch messtechnisch bestimmt werden kann, verringert sich folglich die betrachtete Stichprobengröße. Für das ungerichtete Queren konnte ein Mittelwert von ca. 3 s bestimmt werden. Für das gerichtete Queren an Querungshilfen liegt der Mittelwert geringfügig unter dem des ungerichteten Querens. Zeitliche Abstände von unter 1 s traten nur für das ungerichtete Queren und dort auch nur in geringer Anzahl auf.

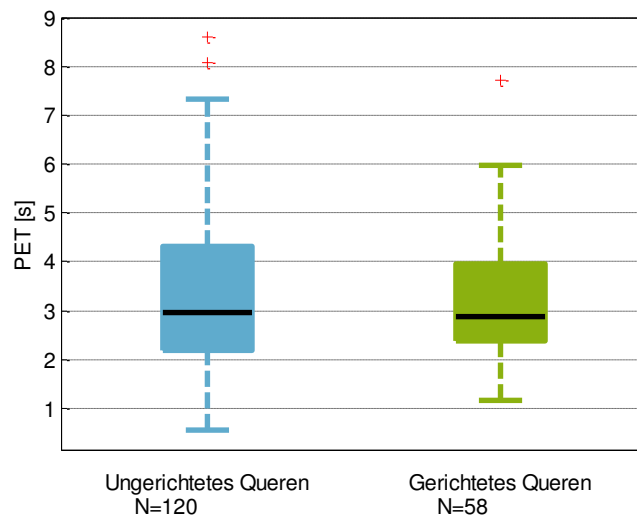


Abb. 2-20: Verteilung der Post Encroachment Time (PET) für Fußgänger-Querungen

Bestimmung von Querungshäufigkeiten

Neben der Beschreibung des erfassten Fußgänger- und Fahrerverhaltens soll die Querungshäufigkeit in Abhängigkeit bestimmter Bewertungsgrößen bestimmt werden. Mithilfe dieses Schritts soll das Querungsverhalten von Fußgängern modellhaft dargestellt werden. In Abb. 2-21 ist die Querungshäufigkeit in Abhängigkeit der Deceleration to Safety Time (DST) zu sehen. Hierbei ist anzumerken, dass für die Berechnung der DST eine konstante Querungsgeschwindigkeit angenommen wurde, die dem Mittelwert der bei den Querungsereignissen entspricht (1,5 m/s). Zudem wurde der vom FG zurückzulegende Weg zum Verlassen der Konfliktzone dem kürzesten Abstand zur gegenüberliegenden Begrenzung des Fahrschlauchs und die zeitliche Sicherheitslücke dem zuvor bestimmten Wert der PET (3 s) gleichgesetzt.

Durch die getroffenen Annahmen wird das zuvor bestimmte durchschnittliche Querungs- bzw. Interaktionsverhalten als Entscheidungsgrundlage für den Fußgänger angenommen, welche Verzögerung er dem Fahrer in der entsprechenden Situation zumuten möchte. Diese Annahme ist erforderlich, um für Situationen, in denen der Fußgänger quert und solche, in denen er das Fahrzeug erst passieren lässt, eine gleiche Bewertungsgrundlage zu schaffen.

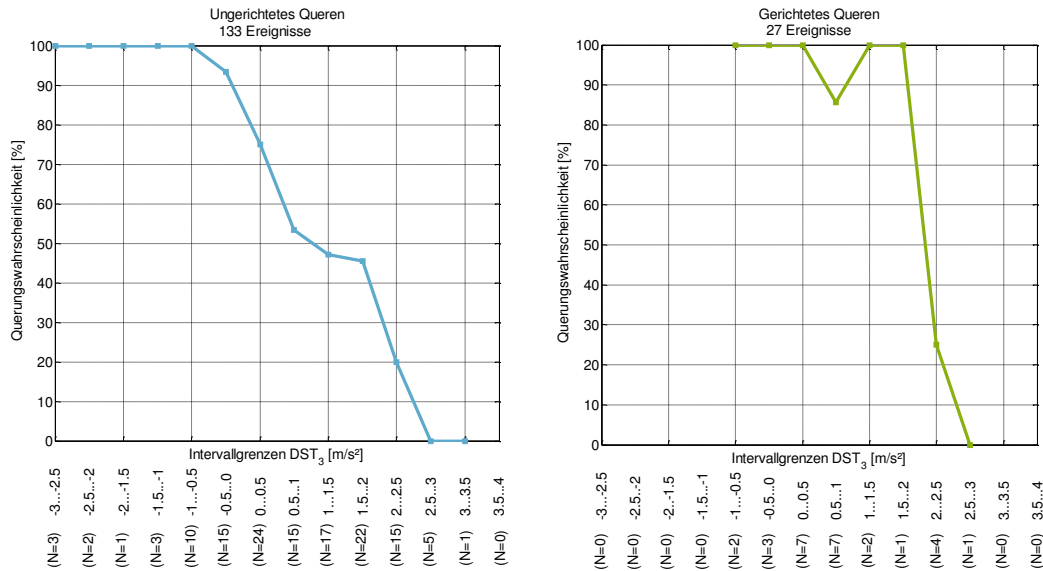


Abb. 2-21: Querungshäufigkeit in Abhängigkeit der theoretisch erforderlichen Fahrzeugverzögerung bei durchschnittlichem Querungsverhalten

Der Verlauf der Quereungshäufigkeit zeigt den erwarteten Zusammenhang abnehmender Querungshäufigkeit mit zunehmender erforderlicher Fahrzeugverzögerung. Dabei ist zu erkennen, dass für das gerichtete Queren - wie zu erwarten – bei höheren erforderlichen Fahrzeugverzögerungen eine höhere Querungshäufigkeit bestimmt werden kann, da in diesen Situationen (z. B. am Zebrastreifen) der Fußgänger Vorrang gegenüber dem sich nähernden Fahrzeug besitzt und Fußgänger daher dem Fahrzeug auch eine höhere Verzögerung zumuten (vgl. Abb. 2-21). Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs für das gerichtete Queren und die daraus resultierenden ebenfalls geringen Stichprobenumfangs innerhalb der einzelnen Intervalle kommt es hier zu einem unstetigeren Verlauf als beim ungerichteten Queren. Insgesamt kann für das gerichtete Queren eine höhere Querungshäufigkeit bei höheren erforderlichen Verzögerungen festgestellt werden.

Modellierung der Querungswahrscheinlichkeit

Mithilfe der zuvor beschriebenen Querungshäufigkeiten kann ein Modell für die Querungswahrscheinlichkeit angenähert werden. Hierzu wird angenommen, dass sich das im Versuch bestimmte Querungsverhalten auch auf andere Situationen übertragen lässt und die gemessenen Querungshäufigkeiten die Wahrscheinlichkeit für eine Querung eines Fußgängers in der entsprechenden Situation wiedergeben kann. Unter diesen Annahmen könnte das entwickelte Modell dazu genutzt werden, die Querungswahrscheinlichkeit eines durch die Umfeldsensorik erfassten Fußgängers für ein Assistenzsystem zu bestimmen. Diese kann wiederum für die Parametrierung einer Warnung dienen.

Für die Modellierung der Querungswahrscheinlichkeit wird angenommen, dass der Fußgänger seine Entscheidung, die Fahrbahn vor oder hinter einem sich nähernden Fahrzeug zu queren, in Abhängigkeit der (theoretisch) erforderlichen Fahrzeugverzögerung trifft. Desweiteren wird angenommen, dass die Querungswahrscheinlichkeit dabei als normalverteilt angesehen und so modelliert werden kann. Die Querungswahrscheinlichkeit lässt sich unter diesen Annahmen wie folgt ausdrücken:

$$p_{\text{Queren}} = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\mu - \text{DST}}{\sqrt{2\sigma^2}} \right) \right]$$

In die Bewertungsgrundlage des Fußgängers gehen somit folgende Randbedingungen mit ein (vgl. Definition der DST):

- s_{Fzg} : Der aktuelle Abstand des sich nähernden Fahrzeugs zur Konfliktzone
- s_{FG} : Der vom Fußgänger (minimal) zurückzulegende Weg bei einer angenommenen Querung vor dem sich nähernden Fahrzeug
- v_{Fzg} : Die (vom Fußgänger geschätzte) Geschwindigkeit des Fahrzeugs
- v_{FG} : Die (vom Fußgänger geplante) Querungsgeschwindigkeit des Fußgängers
- t_{safety} : Die (vom Fußgänger geplante) zeitliche Lücke zwischen seinem Verlassen der Konfliktzone und dem Eintreffen des Fahrzeugs in der Konfliktzone

Von diesen Randbedingungen kann der Fußgänger nur seine geplante Querungsgeschwindigkeit v_{FG} sowie seine (akzeptierte) Zeitlücke t_{safety} direkt beeinflussen. Abstand und Geschwindigkeit des sich nähernden Fahrzeugs sowie der vom Fußgänger minimal zurückzulegende Weg sind durch das Szenario festgelegt. In Abb. 2-22 sind die so modellierten Querungswahrscheinlichkeiten für das gerichtete und ungerichtete Queren zu sehen.

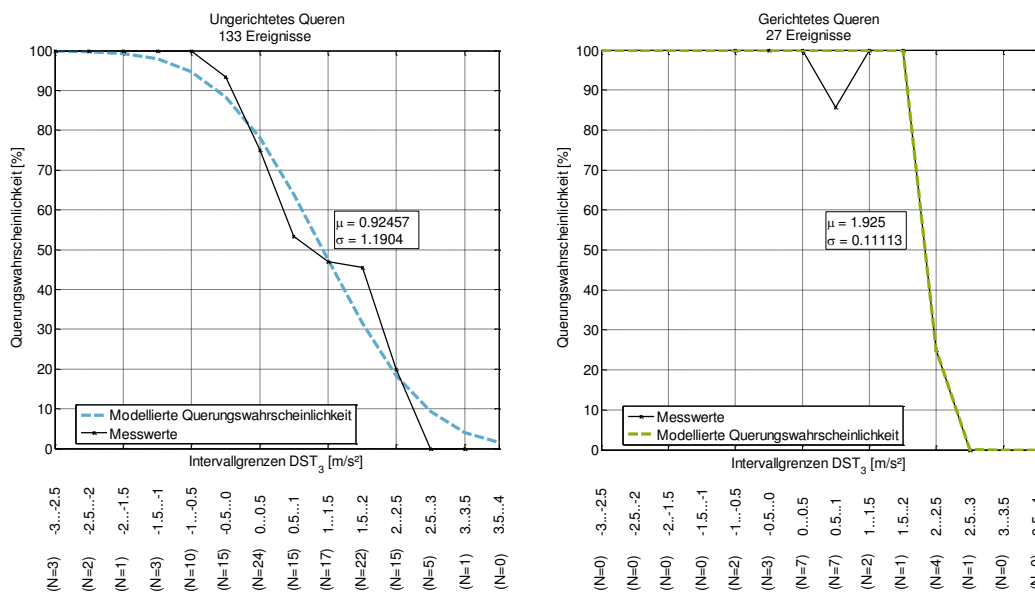


Abb. 2-22: Modellierte Querungswahrscheinlichkeit für das ungerichtete und gerichtete Queren

Es ergeben sich für das gerichtete und ungerichtete folgende Beschreibungen der Zusammenhänge zur Bestimmung der Querungswahrscheinlichkeiten:

$$p_{ungerichtet} = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{0,48 - DST}{\sqrt{2 * 1,1^2}} \right) \right] \quad p_{gerichtet} = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{1,47 - DST}{\sqrt{2 * 0,45^2}} \right) \right]$$

Die Verschiebung der Querungswahrscheinlichkeit in Richtung höherer erforderlicher Verzögerungen lässt sich anhand des Erwartungswerts μ feststellen. Hier kommt es zu einem Unterschied von fast 1 m/s². Dabei ergibt sich für das ungerichtete Queren eine deutlich höhere Varianz (σ^2) als für das gerichtete Queren.

Diskussion

Diskussion Methodik: Für den geometrischen Ansatz der automatisierten Situationsanalyse der vor dem Fahrzeug querenden Fußgänger ist die eingesetzte Fahrzeugsensorik gut geeignet. Es zeigt sich, dass durch die Situationsanalyse in Absolutkoordinaten mithilfe der Positionserfassung des Fahrzeugs und der Umrechnung der relativen Messgrößen des Fußgängers eine anschauliche Situationsdarstellung vorgenommen werden kann. Basierend hierauf kann mit einfachen Mitteln eine hohe Klassifizierungsrate erzielt werden, sodass der Aufwand für eine manuelle Nachbearbeitung des entstehenden Datensatzes sehr gering ausfällt. Aufgrund der Einbauposition der Sensorik im Bereich der Fahrzeugfront stellt die Erkennung von hinter

dem Fahrzeug querenden Fußgängern eine große Herausforderung an die Messung der aktuellen Fußgängerbewegung und ist dennoch aufgrund der erforderlichen Prädiktion mit einer hohen Unsicherheit verbunden. Dies erfordert einen hohen Aufwand an manueller Klassifizierung der als relevant erkannten Interaktionsereignisse.

Die beschriebene Problematik lässt sich durch den Einsatz anderer (zusätzlicher) Sensorik verringern. So kann z. B. durch den Einsatz von mobilen Empfängern die Fußgängerposition in Absolutkoordinaten im gesamten Fahrzeugumfeld erfasst werden und würde somit auch eine hohe Klassifizierungsgenauigkeit von hinter dem Fahrzeug querenden Fußgängern ermöglichen. Mobile Empfänger stellen zudem auch die aktuelle Geschwindigkeit, Beschleunigung und Bewegungsrichtung zur Verfügung. Diese Informationen können zum einen die Untersuchung zur Fahrer-Fußgänger-Interaktion verbessern und zum anderen auch als Informationsquelle zukünftige Fahrerassistenzsysteme dienen. In diesem Kontext ist als Voraussetzung für die Interaktionserfassung zu klären, welche Eigenschaften die mobilen Empfänger erfüllen müssen und in welcher Art und Weise diese Informationen als Eingangsdaten für die Parametrierung von Fußgängermodellen zu Bewegungsprädiktion genutzt werden können. Dieser Ansatz wird in der zweiten empirischen Phase untersucht.

Diskussion Ergebnisse: Die in der Phase der Datenerhebung erfassten Fahrzeug-Fußgänger-Interaktionen wurden aufgrund ihrer hohen Anzahl in einer Datenbank aufbereitet. Bei der Nutzung der Daten für die Auswertung der im AP 1000 und AP 2000 definierten Fragestellungen zeigte sich, dass für spezifische Fragestellung zusätzliche Filterungskriterien angelegt werden mussten, welche für bestimmte Fragestellungen im Vergleich mit der Gesamtanzahl an erkannten Interaktionen eine deutlich reduzierte Stichprobengröße ergab. Die zusätzlichen Filterungskriterien waren erforderlich, um der Vielzahl an weiteren Randbedingungen durch die Datenerhebung im öffentlichen Straßenverkehr Rechnung zu tragen. So wurde z. B. für die Bestimmung des Verzögerungsverhaltens des Fahrers bei der Interaktion mit einem Fußgänger dafür Sorge getragen, dass eine auftretende Längsverzögerung nicht durch andere Verkehrsteilnehmer bedingt wurde, sondern durch den erkannten Fußgänger. Aus diesem Grund wird zur Ergänzung des Versuchs der ersten empirischen Phase das Querungsverhalten von Fußgängern in der zweiten Erhebungsphase durch einen Versuch im kontrollierten Feld ergänzt. Hierbei kann eine Beeinflussung durch andere Randbedingungen (wie z. B. weitere Verkehrsteilnehmer) ausgeschlossen werden.

Das beschriebene Verhalten von Fahrern und Fußgängern zeigt gute Übereinstimmung mit bestehenden Erkenntnissen aus der Literatur und gibt somit eine geeignete Repräsentation des durchschnittlichen Verhaltens dieser beiden Gruppen bei ihrer Interaktion miteinander wieder. Auch aufgrund des methodischen Vorgehens, die Probanden nicht über den tatsächlichen Untersuchungsgegenstand aufzuklären, lässt die Annahme zu, dass das Fahrerverhalten das natürliche Interaktionsverhalten mit Fußgängern widerspiegelt. Auf der anderen Seite wird das Interaktionsverhalten wie zuvor beschrieben durch eine Vielzahl externer Faktoren (Verhalten weiterer Verkehrsteilnehmer, persönliche und verkehrsraumspezifische Faktoren, etc.) beeinflusst, die die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Szenarien einschränkt.

Zusammenfassung

Mithilfe des durchgeführten Versuchs konnte das Querungsverhalten von Fußgängern in Abhängigkeit eines sich nähernden Fahrzeugs untersucht werden. Der Fokus lag hierbei auf der Beschreibung des Interaktionsverhaltens des Fußgängers und des Fahrers sowie der Modellierung der Querungswahrscheinlichkeit. Im Folgenden sollen hierzu die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchung mit Bezug auf die im Rahmen des AP 2000-Berichts definierten Forschungsfragen zusammengefasst werden.

1. Welche kinematischen Voraussetzungen müssen erfüllt sein, sodass Fußgänger sich zum Queren des Fahrstreifens entscheiden?
2. Welche Unterschiede beim Querungsverhalten bestehen zwischen gerichtetem und ungerichtetem Queren?

Die Entscheidung den Fahrstreifen eines sich nähernden Fahrzeugs zu queren variiert zwischen Fußgängern trotz kinematisch gleicher Voraussetzungen. Aus diesem Grund kann für die Querungsentscheidung keine allgemeingültige, scharfe Grenze an kinematischen Voraussetzungen gefunden werden. Für die im Versuch beobachteten Interaktionsereignisse des ungerichteten Querens querten alle Fußgänger, wenn zur Herstellung des durchschnittlichen Sicherheitsabstandes eine Beschleunigung größer 1 m/s^2 erforderlich gewesen wäre. Keiner der Fußgänger querte in Situationen, in denen unter den gleichen Annahmen eine Verzögerung von über $2,5 \text{ m/s}^2$ nötig geworden wäre. Die Wahrscheinlichkeit für Situationen zwischen diesen beiden Extremwerten lässt sich gut durch eine Normalverteilung annähern.

Für das gerichtete Queren kann eine geringfügig schärfere Grenze gefunden werden. Hier queren alle Fußgänger wenn nur eine geringe Verzögerung von bis zu $0,5 \text{ m/s}^2$ erforderlich wird. Im durchgeführten Versuch traten bei gerichteten Quervorgängen keine Situationen auf, in denen eine Verzögerung von mehr als $2,5 \text{ m/s}^2$ nötig geworden wäre. Daher kann kein konkreter Wert gefunden werden, bei dem keiner der Fußgänger mehr den Fahrstreifen quert. Durch die Annäherung der Daten mithilfe einer Normalverteilung kann dieser Wert nur extrapoliert werden. Dem gebildeten Modell nach wäre dies bei ca. $3 \text{ bis } 3,5 \text{ m/s}^2$ der Fall. Wiederum ergibt sich zwischen diesen Extremwerten eine Querungswahrscheinlichkeit, die mithilfe einer Normalverteilung angenähert werden kann.

Hierbei ist anzumerken, dass es sich bei den genannten Werten um empirische Größen basierend auf dem erhobenen Datenbestand handelt, welche daher nicht ohne Einschränkungen verallgemeinerbar sind. Desweiteren ergibt sich aufgrund der strengen angelegten Filterungskriterien ein geringer Stichprobenumfang für das gerichtete Queren.

2.3.3.2 Phase 2: Statische Verkehrsbeobachtungen

Die aufgezeichneten Messdaten der Realverkehrsbeobachtung wurden gefiltert und hinsichtlich ihrer Abhängigkeit zur Umgebung (Querungshilfe, Kollektiv, Geschwindigkeitslimit, ...) analysiert. Hierfür wurden verschiedene Interaktions- und Situationsparameter (Zeitlücke, Weglücke, PET, TTC, DST) für die aufgezeichneten Querungen berechnet. Da die TTC nur definiert ist, wenn der Fußgänger mit dem Fahrzeug auf Kollisionskurs ist, ist die Anzahl der auswertbaren TTC Werte im Vergleich zu den anderen Werten gering.

Die Auswertung zeigt einen Zusammenhang zwischen den Situations- und Interaktionsparametern. Der Interaktionsparameter DST_0 scheint jedoch weitestgehend unabhängig von der Situation zu sein und kann so gut für den Vergleich von Messungen an verschiedenen Messstellen genutzt werden. Die Querungshäufigkeit an allen Messstellen in Abhängigkeit von DST_0 Klassen ist in Abb. 2-23 dargestellt.

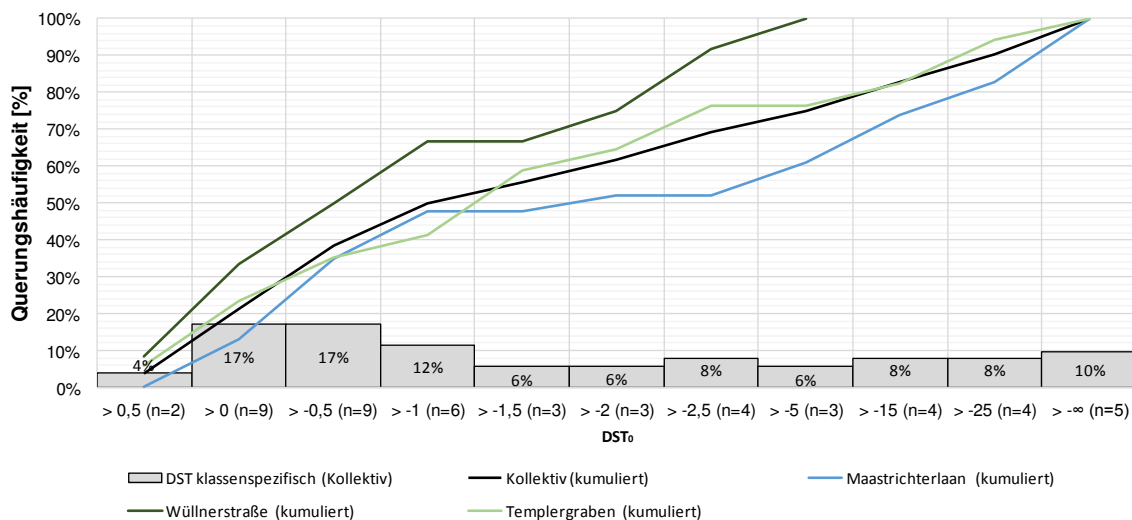


Abb. 2-23: Abhängigkeit der Querungshäufigkeit von der DST_0 bei den Verkehrsbeobachtungen

Da die DST_0 definiert ist als die erforderliche Verzögerung eines Interaktionsteilnehmers zur Herstellung einer Zeitlücke von 0 s zwischen dem Verlassen der Konfliktfläche durch den ersten Konfliktpartner und dem Erreichen der Konfliktfläche durch den zweiten Konfliktpartner, sind insbesondere DST_0 Werte $> -1,5 \text{ m/s}^2$ interessant. Ein DST_0 Wert von $-1,5 \text{ m/s}^2$ beschreibt demnach Situationen in denen das Fahrzeug mit $1,5 \text{ m/s}^2$ beschleunigen müsste, um den Fußgänger gerade zu verpassen.

Die Analyse zeigt zudem, dass nur eine kleine Prozentzahl (4%) der beobachteten Fußgänger bei positiven DST_0 Werten kreuzt. Diese 4% haben demnach angenommen, dass das ankommende Fahrzeug für sie verzögert. Dies zeigt jedoch auch, dass die Mehrheit der beobachteten Fußgänger nur queren, wenn für eine sichere Querung keine Verzögerung des Fahrzeugs notwendig ist.

2.3.3.3 Phase 2: Probandenstudie im kontrollierten Testfeld

Die Auswertung der aufgezeichneten Messdaten der Probandenstudie im kontrollierten Testfeld wurde dreiteilig durchgeführt. Zum einen wurden die Zusammenhänge zwischen Querungshäufigkeit und Interaktionsparametern wie der DST automatisch basierend auf den LiDAR Daten analysiert. Das Blickverhalten der Probanden vor dem Kreuzen der Straße wurde hingegen visuell basierend auf den Kameradaten ausgewertet und der Sicherheitsabstand, den der Proband wählte während er darauf wartete die Straße queren zu können, basierend auf einer Kombination aus einer visuellen Analyse der aufgezeichneten Video- und LiDAR Daten.

Der Zusammenhang zwischen Querungshäufigkeit und DST_0 ist in Abb. 2-24 dargestellt. Wie die Abbildung zeigt, queren in der Probandenstudie 50% der Fußgänger bei einer DST_0 von $-2,5 \text{ m/s}^2$ wohingegen in der Verkehrsbeobachtung 50% der beobachteten Fußgänger bei einer DST_0 von -1 m/s^2 querten. Dies zeigt, dass die Fußgänger im kontrollierten Feld mit einer größeren Sicherheitsreserve queren. Zudem zeigt die Probandenstudie, dass die Fußgänger bei der Interaktion mit einem LKW im Vergleich zum PKW größere Sicherheitsreserven bei der Querungsentscheidung berücksichtigen. Dies kann aus der Tatsache abgeleitet werden, dass bei den Interaktionen mit dem LKW kein Fußgänger bei positiven DST_0 Werten quert. Zudem wird diese Aussage durch die Restgeschwindigkeit der Fahrzeuge bei der Querung des Fußgängers im Nahbereich ($< 15 \text{ m}$ Entfernung) unterstützt. Bei Interaktionen mit dem LKW entschieden sich die Probanden im Durchschnitt die Straße bei einer Geschwindigkeit des LKWs von $1,24 \text{ m/s}$ zu queren wohingegen die Entscheidung bei Interaktionen mit dem PKW im Durchschnitt bei einer Geschwindigkeit von $2,77 \text{ m/s}$ ($p = 0.0304$) stattfand.

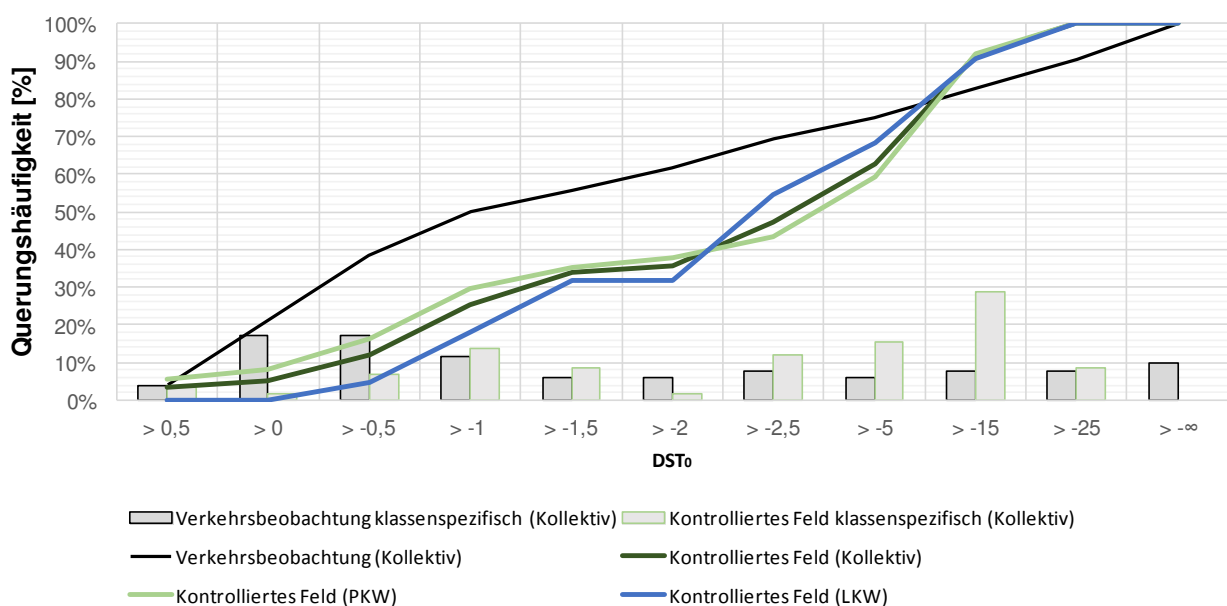


Abb. 2-24: Abhängigkeit der Querungshäufigkeit von der DST_0 für die Verkehrsbeobachtungen und der Probandenstudie im kontrollierten Feld

Auch die Analyse des Sicherheitsabstandes, den der Proband wählte während er darauf wartete die Straße queren zu können, unterstützt diese Beobachtung. Im Durchschnitt warteten die Fußgänger bei der Interaktion mit dem PKW durchschnittlich in einem Abstand von 1,28 m zur Straße, während sie bei der Interaktion mit einem LKW durchschnittlich in einem Abstand von 1,46 m zur Straße warteten ($p = 0.2185$). Für die Auswertung der Geschwindigkeit und des Sicherheitsabstandes wurden die Mittelwerte herangezogen. Weitere Effekte konnten beobachtet werden, wurden aber nicht weiter betrachtet, da die Datengrundlage aufgrund der hohen Anforderungen an die Datenqualität nicht groß genug für valide Aussagen war.

Die Analyse des Blickverhaltens unterstützt die Hypothesen anderer Untersuchungen (z.B. [17]), dass der Blickkontakt zwischen Fahrer und Fußgänger ein entscheidender Teil des Interaktionsprozesses ist. Im Durchschnitt gab es 1,61 (PKW: 1,58; LKW: 1,65) Blickkontakte bevor der Fußgänger sich entschied die Straße zu queren. Zwischen LKW und PKW konnten keine signifikanten Unterschiede beobachtet werden ($p = 0.5311$).

2.3.4 AP 4000 Bewertung und Demonstration

Im Rahmen der Ermittlung des Stands der Technik zur Untersuchung der Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion im kontrollierten Feld (siehe AP 1000-Bericht) wurde festgehalten, dass das kontrollierte Feld durch den Einsatz von FG-Dummies insbesondere für die Untersuchung kritischer Szenarien ohne Gefährdung der Verkehrsteilnehmer und mit hoher Reproduzierbarkeit geeignet ist. Dem Vorteil der fokussierten Betrachtung des Einflusses einzelner Faktoren stehen dabei die Nachteile der künstlichen Verkehrsumgebung mit ihrer resultierenden Auswirkung auf das Verhalten der Versuchsteilnehmer sowie das künstliche und (i.d.R.) rückwirkungsfreie Verhalten von FG-Dummysystemen gegenüber. Während der Nachteil der künstlichen Verkehrsumgebung nur mit großem Aufwand adressiert werden kann, kann das Verhalten von FG-Dummysystemen auch mit geringen Mitteln verbessert werden. Ein entsprechender Ansatz soll im Folgenden vorgestellt werden.

Motivation

Für die Untersuchung von kritischen Interaktionsereignissen zwischen Fahrzeugen und Fußgängern wurden in vergangenen Jahren FG-Dummysysteme entwickelt, die eine Bewegung des FG entlang einer definierten Bahnkurve mithilfe von Bewegungsplattformen ermöglichen (siehe AP1000-Bericht). Zur Darstellung eines natürlichen Bewegungsverhaltens kann zudem eine Bewegung der Extremitäten umgesetzt werden. Diese dient vor allem der verbesserten Erkennung des Dummies durch die eingesetzte Bildverarbeitungssensorik. Derartige Dummysysteme können heute schon als kommerzielle Produkte erworben werden, ermöglichen bisher aber nur sehr begrenzt ein tatsächliches Interaktionsverhalten zwischen Fahrzeug und FG.

Ein elementarer Bestandteil dieses Interaktionsverhaltens ist die Blickzuwendung des FG zu einem sich nähernden Fahrzeug. Eine Blickzuwendung eines querungsbeabsichtigten FG bei einem sich nähernden Fahrzeug ist ein wichtiger Parameter des Interaktionsverhaltens für

- a) die Abschätzung des Fahrers oder eines Assistenzsystems, ob der FG das sich nähernde Fahrzeug bemerkt hat und
- b) die Möglichkeit des FG das sich nähernde Fahrzeug wahrzunehmen und sein Verhalten dementsprechend anzupassen.

Insbesondere im Hinblick auf Absichtserkennung des FG durch ein Assistenzsystem ist die Blickzuwendung bzw. Kopforientierung ein wichtiger Indikator für die Situationsanalyse von Schutzsystemen für schwächere Verkehrsteilnehmer. Für weitere Details zur Bedeutung der Kopforientierung sei an dieser Stelle auf die Arbeiten des UR:BAN KA-Teilprojekts SVT verwiesen.

Anforderungsdefinition/Konzeption

Um ein realistisches Interaktionsverhalten im Hinblick auf die Blickzuwendung zu erzeugen, werden zunächst die Anforderungen an den Dummy sowie die umzusetzende Kopfbewegung definiert:

- A1 Um für Tests von Assistenzsystemen mit Fußgängererkennung einen akzeptierten Standard zu nutzen, handelt es sich um einen Euro NCAP zertifizierten Dummy.
- A2 Die umsetzbare Kopfbewegung des Dummys orientiert sich an der menschlichen Bewegungsfreiheit für die transversale Drehung und ermöglicht daher eine Rotation des Kopfs von mehr als 50° zu jeder Seite (s. z.B. [18]).
- A3 Die Drehbewegung ist in ihrer Drehwinkelamplitude sowie der -geschwindigkeit frei einstellbar.
- A4 Die Umsetzung der Kopfbewegung kann mit anderen Bewegungsabläufen (Arme, Beine) synchronisiert und ebenfalls ferngesteuert werden.
- A5 Durch den Umbau des Dummys ergeben sich keinerlei Einschränkungen für die übrige Funktionsweise des Dummys.

Zunächst wird die Umsetzung der reinen Kopfbewegung ohne Rückwirkung auf das Verhalten des FG durchgeführt. In einer weiteren Ausbaustufe könnte jedoch durch die Ausrüstung des Dummykopfs mit Umgebungserfassungssensorik auch eine Rückwirkung der Kopfbewegung auf das Bewegungsverhalten des FG vorgesehen werden.

Realisierung

Für die Umsetzung des Vorhabens wird ein kommerzieller FG-Dummy genutzt, welcher als statischer Dummy den Anforderungen von Euro NCAP genügt. Zunächst wird der Oberkörper des Dummy in seine Einzelteile zerlegt, um die vorhandenen Randbedingungen für die Umsetzung der Kopfbewegung zu prüfen. Kopf und Rumpf bestehen aus zwei Schaumstoffhälften (links/rechts), welche mit Gurten und durch die Außenhülle des Dummys um ein Kunststoffrohr (ähnlich einer menschlichen Wirbelsäule) fixiert werden.

Um eine Rotation des Kopfs um dieses Kunststoffrohr zu ermöglichen, wird dieser in der Halsregion vom Rumpf getrennt und kann so unabhängig vom Körper bewegt werden. Um eine axiale Verschiebung des Kopfs auf dem Kunststoffrohr zu hindern, wird der aufgesetzte Stopfen durch einen neu konstruierten Stopfen mit Absatz ersetzt, welcher mit dem beweglichen Teil des Servomotors verschraubt wird.

Für den Servomotor wird eine passgenaue Halterung gefertigt, welche mithilfe einer seitlichen Finne in der Trennebene der linken und rechten Kopfhälfte fixiert wird. So wird die Rotationsbewegung des Motors auf den Kopf übertragen.



Abb. 2-25: Umbau des FG-Dummys zur Darstellung der Kopfbewegung

Der eingesetzte Servomotor ermöglicht eine Gesamtrotation von knapp 180° und somit deutlich mehr, als die 50° zu jeder Seite, welche für die transversale Drehung eines Menschen angegeben wird. Er wird per WLAN über einen Mikrocontroller angesprochen und kann so einen zuvor definierten Winkel mit einer definierten -geschwindigkeit einstellen.

Demonstration

Die Funktion des Dummys inklusive der umgesetzten zusätzlichen Kopfbewegung wurde im Rahmen des Vortrags zu Untersuchung der Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion mithilfe eines Videos demonstriert.

3. Teilprojekt Urbanes Fahren

3.1 Problemstellung und Zielsetzung

In der gesamten Projekt *Mensch im Verkehr* (und seinen Nachbarprojekten) wurden mit großem Aufwand zahlreiche Datenbestände zum Fahrerverhalten und Verhalten schwächerer Verkehrsteilnehmer in kritischen Verkehrssituationen erhoben. Die Datenerhebung durch viele Partner mit unterschiedlichen Forschungsschwerpunkten führt einerseits zu einem großen Datenbestand, birgt aber auf der anderen Seite auch die Gefahr, dass Daten gegebenenfalls an unterschiedlichen Stellen doppelt erhoben werden. Daher wurden diese Aktivitäten aufeinander abgestimmt. So konnten inhaltliche Fragestellungen für individuelle Datenerhebungen genauer spezifiziert werden oder aus Effizienzgründen Daten gegebenenfalls mehrfach genutzt werden.

Eine weitere Herausforderung durch die zahlreichen Datenerhebung mit teilweise inhaltlichen Überschneidungen ergibt sich bei der Ergebnisinterpretation. Da trotz der individuellen Datenerhebung und –auswertung ein einheitliches Bild erzeugt werden sollte, bestand der Bedarf die Ergebnisse der einzelnen Teilprojekte auf Überschneidungen und Widersprüche zu prüfen. Während dies innerhalb der einzelnen Teilprojekte durch die Diskussion der Partner im Teilprojektkreis gewährleistet werden konnte, sollte durch das Teilprojekt Urbanes Fahren diese Einheitlich- und Beständigkeit auch über die Teilprojektgrenzen hinaus erzeugt werden.

3.2 Arbeitspaketstruktur und Inhalte

Das Teilprojekt *Urbanes Fahren* – als übergreifendes Projekt im Rahmen von *Mensch im Verkehr* – verstand sich daher als Plattform für den organisatorischen und inhaltlichen Austausch zwischen den einzelnen Teilprojekten und mit den Nachbarprojekten. In der frühen Phase des Projekts wurden daher mit der Systematik der Assistenzszenarien und der Definition von Datenstandards die Möglichkeit für den organisatorischen und inhaltlichen Austausch geschaffen.

Gerade das urbane Verkehrsgeschehen und die entsprechenden städtischen Verkehrsszenarien sind im Vergleich zur Autobahn sehr heterogen bezüglich der beteiligten Verkehrsteilnehmer, der Infrastruktur, der Umgebungsbebauung und der relevanten zeitlichen Verläufe. Eine einheitliche Beschreibungsgrundlage für einen effektiven Austausch über betrachtete Szenarien ist daher ein essentieller Bestandteil der Dokumentation von Versuchsinhalten. Mit der Systematik der Assistenzszenarien wurde hier im AP 1000 *Potentialanalyse und Systematik* eine Möglichkeit geschaffen, untersuchte Szenarien detailliert zu dokumentieren und so Missverständnisse zu vermeiden und Ursachen für ggf. auftretende Ursachen für unterschiedliche Ergebnisse in inhaltlich ähnlichen Untersuchungen identifizieren zu können.

Mit der Definition eines einheitlichen Datenstandards für die Versuchsdokumentation wurde in Ergänzung zu den Assistenzszenarien ein weiteres Werkzeug bereitgestellt, welches sich vor allem den organisatorischen Randbedingungen der verschiedenen Datenerhebungen widmet. So konnte in der Phase der Versuchsplanung ein schneller Überblick über weitere geplante Datenerhebungen mit inhaltlich ähnlich gelagerten Schwerpunkten generiert werden, um so Versuche inhaltlich aufeinander abstimmen zu können. In der Phase der Versuchsdokumentation konnte mit dem gleichen Werkzeug eine Übersicht über den gesamten in der Projektsäule *Mensch im Verkehr* gesammelten Datenbestand erzeugt werden.

In der zweiten Projekthälfte wurden im AP 2000 *Potentialbewertung* die beiden Werkzeuge der Assistenzszenarien und der Datenstandards basierend auf den Erfahrungen während der Projektlaufzeit angepasst. Desweiteren wurde eine Übersicht über den gesamten in MV gesammelten Datenbestand generiert, um eine sinnvolle Weiterverwendung der Daten über das Projektende hinaus zu ermöglichen. Der detaillierte Zeitplan für die Arbeitspakete ist in Abb. 3-1 zu sehen.

	Quartale															
	Jahr 1				Jahr 2				Jahr 3				Jahr 4			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
AP 1000 Potenzialanalyse u. Systematik																
Systematik Assistenzszenarien	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Definition von Datenstandards	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AP 2000 Potenzialbewertung																
Überarbeitung der Systematik	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Abgleich Bewertungskriterien, Wirkungsanalyse	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Abb. 3-1: Zeitplan für das Teilprojekt Urbanes Fahren

3.3 Ergebnisdokumentation

3.3.1 AP 1000: Potenzialanalyse und Systematik

Eine zentrale Aufgabe innerhalb des AP 1000 des TP Urbanes Fahren war die Förderung einheitlicher Standards bei der Datenerhebung und -auswertung (AP 1200). Hierbei stand nicht die Definition von Messvorschriften im Vordergrund, sondern das Schaffen von Übersicht und Transparenz über die Vielzahl der im Projekt *Mensch im Verkehr* durchgeführten Versuche.

Für die Versuchsphasen Planung, Durchführung und Dokumentation standen hierzu verschiedene Werkzeuge (Versuchsmatrix-Planung, Messgrößenverzeichnis, Versuchsdatenblatt, Versuchsmatrix-Dokumentation) bereit, die die Datenerhebung und -auswertung geeignet begleiteten. Abb. 3-2 zeigt die dazu erstellte Methodik, die im Folgenden inklusive der eingesetzten Werkzeuge näher erläutert werden soll.

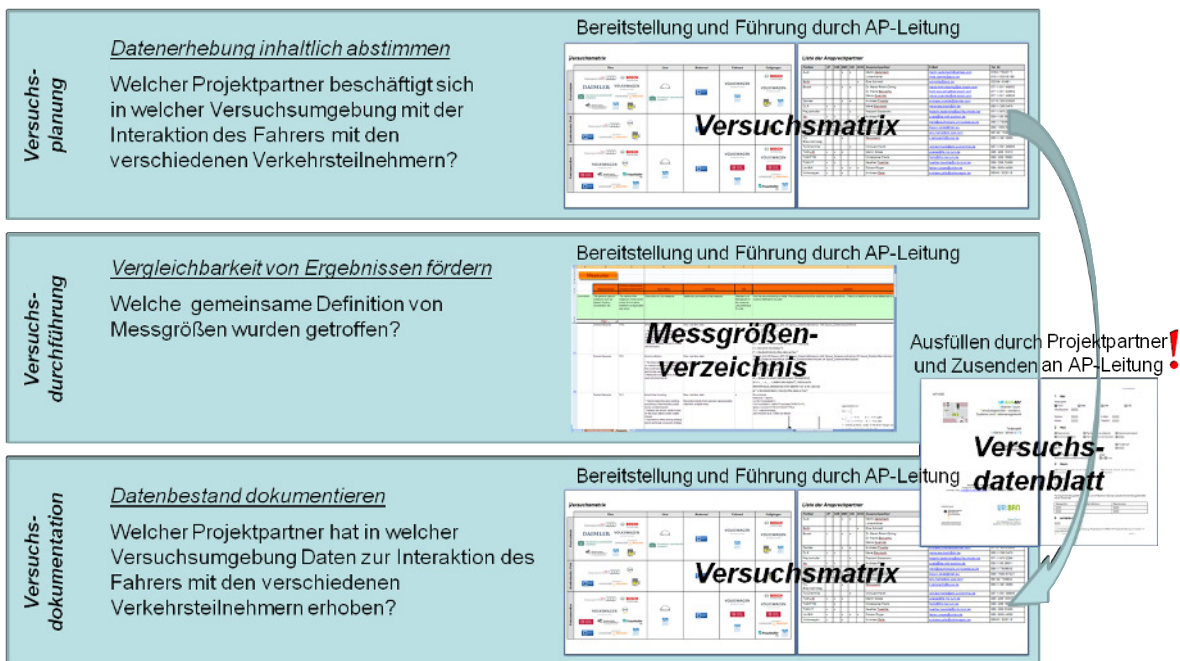


Abb. 3-2: Grafische Darstellung des methodischen Vorgehens

Die Versuchsmatrix (beider Phasen) wurde durch die Leitung des AP 1200 bearbeitet und diente den Partnern zur Information über geplante und durchgeführte Datenerhebungen. Das Messgrößenverzeichnis wurde ebenfalls durch die AP-Leitung verwaltet. Es sollte bei der Datenerhebung und -auswertung der Partner

Berücksichtigung finden. Abweichungen von diesem Standard konnten im Versuchsdatenblatt zu dokumentiert werden.

3.3.1.1 Versuchsplanung

Wie einleitend erwähnt, beschäftigten sich verschiedene Projektpartner in teilweise unterschiedlichen Versuchsumgebungen mit der Interaktion der gleichen Verkehrsteilnehmer. Daher sollte neben der inhaltlichen Abstimmung der Arbeiten im Hinblick auf die betrachteten Szenarien auch die durchzuführenden Versuche im Vorfeld der Datenerhebung abgestimmt werden. Wo nötig, konnten so durch den Austausch zwischen den Partnern Datenerhebungen diversifiziert und harmonisiert werden und Daten nach Absprache gemeinsam genutzt werden, um so benötigte Ressourcen zu verringern.

Partner	GF	MF	HS	KCS	Ansprechpartner	E-Mail	Tel. No.
Audi	x	x	x	x	Markus Zechner	markus.zechner@audi.de	01402 7022171
BASF	x	x	x	x	Ulrich Kasper	ulrich.kasper@basf.com	0181 1208180
Bosch	x	x	x	x	Eike Schmitt	eike.schmitt@bosch.com	05204 42481
DAIMLER	x	x	x	x	Dr. Stefan Wittenberg	stefan.wittenberg@daimler.com	0711 671 41982
DAIMLER	x	x	x	x	Dr. Frank Beckhoff	frank.beckhoff@daimler.com	0711 671 42904
DAIMLER	x	x	x	x	Hans-Joachim	hans-joachim@daa.com	0711 671 44459
DAIMLER	x	x	x	x	Andreas Grottel	andreas.grottel@daimler.com	0176 320 55555
DAIMLER	x	x	x	x	Wolfgang	wolfgang@daa.com	0891 298 2475
Freiburger	x	x	x	x	Florian Dreier	florian.dreier@freiburger.com	0711 671 2206
Freiburger	x	x	x	x	Andreas Pütz	andreas.puetz@freiburger.com	02471 78 22817
Freiburger	x	x	x	x	Christoph	christoph@freiburger.com	0691 7555555
Freiburger	x	x	x	x	Dr. Sören Wiese	soeren.wiese@freiburger.com	0691 1688 91237
Freiburger	x	x	x	x	Janina	janina@freiburger.com	069 42 74 482
Freiburger	x	x	x	x	Stephan	stephan@freiburger.com	0691 281 9555
Freiburger	x	x	x	x	Volker	volker@freiburger.com	0371 931 9888
Freiburger	x	x	x	x	Markus	markus@freiburger.com	069 289 18419
Freiburger	x	x	x	x	Christoph	christoph@freiburger.com	069 289 15653
Freiburger	x	x	x	x	Heiner	heiner@freiburger.com	069 289 22435
Freiburger	x	x	x	x	Patrick	patrick@freiburger.com	069 800 4008
Freiburger	x	x	x	x	Andreas	andreas@freiburger.com	03581 1621716

Abb. 3-3: Ansicht der Versuchsmatrix inklusive Liste der Ansprechpartner

Wie bereits einleitend erwähnt wurde im Rahmen von MV eine Vielzahl von Versuchen durchgeführt. Um den Projektpartnern eine schnelle Übersicht über die geplanten Datenerhebung zu ermöglichen, wurde auf Basis der Vorhabensbeschreibung eine Matrix erstellt, aus der hervorgeht, welcher Projektpartner sich in welcher Versuchsumgebung (Realverkehr, kontrolliertes Feld, Fahrsimulation) mit der Interaktion des Fahrers mit den verschiedenen Verkehrsteilnehmern beschäftigt (siehe Abb. 3-3 links). Steht nicht die Interaktion des Fahrers mit anderen Verkehrsteilnehmern, sondern mit dem eigenen Fahrzeug im Vordergrund (z.B. bei Fragen zur MMI oder der Kontrollierbarkeit), so wird der Versuch der entsprechenden Fahrzeugkategorie zugeordnet. Zudem beinhaltet die Versuchsmatrix eine Liste mit Ansprechpartnern für die partnerspezifischen Versuche (siehe Abb. 3-3 rechts).

3.3.1.2 Versuchsdurchführung

Um die Ziele des AP 1200 zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erreichen, war es erforderlich die Definitionen der in den Datenerhebungen erfassten Größen zu harmonisieren. Hierbei wurden präzise, operationalisierbare Beschreibungen der Messgrößen bereitgestellt. Zudem konnten Messgrößen ergänzt werden, um so der Vielzahl unterschiedlicher Versuchsarten Rechnung zu tragen.

Measure	Unit	Description
Reaction time	s	Time from the start of the stimulus to the beginning of the response
Heart rate	b/min	Number of heartbeats per minute
Eye fixation	%	Percentage of time the gaze is fixed on a specific object
Stress level	mmHg	Diastolic blood pressure

Abb. 3-4: Ansicht des Messgrößenverzeichnisses

Das Messgrößenverzeichnis beruht auf der FESTA PI-Matrix und wurde für die Bedürfnisse in UR:BAN MV angepasst. Hierbei wurden einige der vorhandenen Größen, die sich auf die Verwendung für Feldversuche fokussieren, entfernt, um so eine bessere Übersicht für UR:BAN-relevante Inhalte zu ermöglichen.

Desweiteren wurden Filter im Verzeichnis integriert, um bestimmte Größen bedarfsgerecht einblenden zu können und eine grundsätzliche Übersichtlichkeit zu gewährleisten.

3.3.1.3 Versuchsdokumentation

Die Versuchsdokumentation besitzt eine wichtige Rolle in MV. In Verbindung mit den definierten Messgrößen sollte die Transparenz innerhalb der Versuche gefördert werden, um so die Ergebnisse aus verschiedenen Versuchen interpretierbar und vergleichbar zu gestalten. Kriterien für das im Folgenden vorgestellte Versuchsdatenblatt waren, dass es eine kompakte Versuchsdokumentation ohne großen Aufwand ermöglicht, da es zusätzlich zur partnerinternen Dokumentation vorgenommen wurde. Zudem muss es für Nutzer gut interpretierbar sein, sodass er schnell die gewünschten Informationen ablesen werden konnte.

Zur besseren Handhabung wurden die Informationen der Versuchsdatenblatt im Projektverlauf ggf. in eine Excel-Liste überführt, mit deren Hilfe die Suche für Nutzer erleichtert wurde. Der Nutzer konnte die Informationen so in der für ihn geeigneten Weise filtern und in kurzer Zeit alle für ihn relevanten Information aus den Versuchsdatenblättern extrahieren.

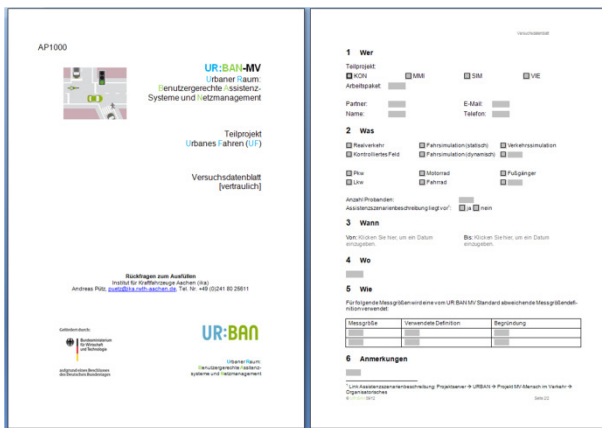


Abb. 3-5: Ansicht des Versuchsdatenblatts

Das Versuchsdatenblatt zur Erfassung von in MV durchgeführten Versuchen beinhaltet auf einer Seite die wichtigsten Informationen, die der Nutzer benötigt, um sich einen kurzen Einblick in die einzelnen Versuche zu verschaffen. Hierzu werden die Antworten auf die Fragen „Wer?“, „Was?“, „Wann?“, „Wo?“ und „Wie?“ gegeben.

Wer

In der ersten Kategorie „Wer“ werden Angaben zum ausführenden Projektpartner aufgeführt. Hierzu wird festgehalten in welchem AP welchen Teilprojekte der Versuch durchgeführt wird und wer der entsprechende Ansprechpartner (mit Kontaktdaten) für mögliche Rückfragen ist.

Was

Die Kategorie „Was“ beinhaltet die Informationen zur Versuchsumgebung, den Verkehrsteilnehmern mit denen der Fahrer interagiert (wenn diese im Fokus der Betrachtung stehen) sowie der Größe des untersuchten Probandenkollektivs. Zusätzlich wird der Link zur Beschreibung der Assistenzszenarien erstellt, indem spezifiziert wird, ob diese für den entsprechenden Versuch bereits erstellt wurde, und ein Verweis auf das Dokument zu den Assistenzszenarien gegeben wird.

Wann

In der Kategorie „Wann“ wird Beginn und Ende der durchgeführten Datenerhebung aufgenommen. Es ist zu beachten, dass dieser Zeitraum sich ausschließlich auf die Datenerhebung bezieht (Beginn der ersten Messung bis Ende der letzten Messung) und die Phasen der Versuchsplanung und -auswertung nicht berücksichtigt werden.

	Pkw	Lkw	Motorrad	Fahrrad	Fußgänger
Realverkehr					
Kontrolliertes Feld					
Fahrsimulator (statisch)					
Fahrsimulator (dynamisch)					

Abb. 3-7: Versuchsmatrix abgeschlossener Datenerhebungen im Projekt *Mensch im Verkehr*

Des Weiteren kann aus Abb. 3-7 die große Methodenvielfalt der durchgeführten Versuche abgelesen werden. Neben Studien im Realverkehr und im kontrollierten Testfeld wurden zahlreiche Versuche in virtuellen Testumgebungen (statische/dynamische Fahrsimulation sowie Verkehrssimulation) erhoben. Da zudem insbesondere die Teilprojekte Kontrollierbarkeit (KON) und Simulation (SIM) methodische Aspekte thematisch in den Vordergrund stellen, wurde durch das Projekt *Mensch im Verkehr* insgesamt umfangreiches und wertvolles methodisches Wissen für die Untersuchung der Fahrerinteraktion mit Assistenzfunktionen und anderen Verkehrsteilnehmer generiert.

Für die durchgeführten Versuche wurden von 21 Partnern aus 4 Teilprojekten insgesamt 31 unterschiedliche Assistenzszenarien beschrieben und den anderen Partnern zur Verfügung gestellt. Zusätzlich wurden Anwendungserfahrungen gesammelt und in eine weitere Überarbeitung der Systematik eingearbeitet. Anwendungserfahrungen, Kritikpunkte und zukünftige Zielsetzungen seien im Anschluss knapp dargestellt.

Aufgrund der unterschiedlichen methodischen Hintergründe der beteiligten Partner wurde bereits bei der Erstellung der Systematik deutlich, dass die Zusammenstellung geeigneter fachübergreifender Kategoriensysteme, die Findung allgemein verständlicher Begrifflichkeiten sowie die Verankerung von Konventionen eine Herausforderung sein würde. Die konsequente und regelmäßige Befüllung der Systematik der Assistenzszenarien sowie der Datenstandards ist zudem von ganz grundsätzlicher Bedeutung für den Nutzen, der aus der Anwendung der Systematik generiert werden kann. Nach einer Anlaufphase wurde die initiale Systematik weiter überarbeitet und an vereinzelt geäußerte Bedarfe angepasst. Der breite Rücklauf, der über alle in MV beteiligten Teilprojekte erzielt werden konnte, spricht grundsätzlich für den vertretbaren Arbeitsaufwand, der mit der Versuchsdokumentation durch die Assistenzszenarien sowie die Datenstandards einhergeht; wörtlich äußerten sich viele Anwender, dass die entsprechenden Dokumente schnell und einfach zu befüllen und intuitiv zugänglich sind. Zudem schafft besonders die Aufführung nicht im Fokus stehender Kategorien durch die Systematik des Assistenzszenarios eine sorgfältige Betrachtung dieser Aspekte. Insbesondere zu Beginn der Forschungsarbeiten, so wurde angemerkt, sei aber zugleich eine umfassende Befüllung schwierig, da auch die Schärfung der Forschungsfrage in einen iterativen Prozess darstellt. Auch im Hinblick auf den Austausch mit anderen Projektpartnern ist es somit sinnvoll, die Kategorien nach Abschluss einer initialen Konzeptionsphase zu befüllen.

Von den Anwendern des Assistenzszenarios wird immer wieder angemerkt, dass die Systematik der Assistenzszenarien eher den Charakter einer, die minimal zur Beschreibung notwendigen Kategorien erfassenden, Checkliste innehat. Für eine umfangreiche und exakte Szenarienbeschreibung, wie sie bei vereinzelt Funktionsentwicklungen notwendig ist, fällt sie noch zu wenig detailliert aus.

Hierzu sei noch einmal vor Augen geführt, dass sich Werkzeuge wie die Systematik der Assistenzszenarien und der Datenstandards stets zwischen Ausführlichkeit der Darstellung und Ökonomie der Anwendung bewegen. Dieser Kompromiss wird nicht alle Interessenspartner zufrieden stellen. Insbesondere in Teilbereichen wie der Funktionsentwicklung, in welchen sehr spezifisches Fachwissen eingebracht wird, ist zudem die Findung eines begrifflichen Konsenses zudem oft besonders schwierig. Begriffe sind auch teilweise in unterschiedlichen Disziplinen unterschiedlich besetzt, was Abstimmungsaufwand generiert, welcher über die Befüllung der Systematik hinausreicht.

4. Literatur

- [1] Eckstein, L. (2008). Souveräne Interaktion mit Fahrerassistenzsystemen. VDA Technischer Kongress, Ludwigsburg.
- [2] Seeck, A., Gasser, T. (2006). Deutsche und völkerrechtliche Rahmenbedingungen moderner FAS. Tagung AktiveSicherheit 2006, München
- [3] Summala, H. (1997). Hierarchical model of behavioural adaptation and traffic accidents. *Traffic and transport psychology: theory and application*, 41–52.
- [4] Vollrath, M. & Krems, J. F. (Eds.). (2011). *Verkehrspsychologie: Ein Lehrbuch für Psychologen, Ingenieure und Informatiker*. Stuttgart: Kohlhammer.
- [5] Fuller, R. (2005). Towards a general theory of driver behavior. *Accident Analysis & Prevention*, 461–472.
- [6] Buschardt, B. (2003). *Synthetische Lenkmomente* 16 ed.: ZMMS Spektrum
- [7] Blaauw, G. J. (1984). Car driving as a supervisory control task. Soesterberg.
- [8] McLean, J. R. & Hoffman, E. R. (1971). Analysis of Drivers' Control Movement. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*(13), 407–408.
- [9] Isomura, A., Hara, T. & Kamiya, K. (1995). Human factors on driver's steering wheel operation: Three parameters evaluating characteristics of driver's steering wheel operations. *Technical Notes, JSAE Review*(16), 383–410.
- [10] RAS06. (2007). *Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen – RAS 06*. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V..
- [11] Neukum, A. & Reinelt, W. (2005). Bewertung der Funktionssicherheit aktiver Lenksysteme: ein Human Factors Ansatz. *VDI-Bericht, 1919*, 161-176.
- [12] Eckstein, L.; Schwalm, M.; Zlocki, A. (2015). Methodenbaukasten zur Bewertung der automatisierungsrelevanter Dimensionen der Fahrer-Fahrzeug Interaktion. Haus der Technik, RWTH Aachen University, Essen
- [13] Erke, H.; Gstalter, H.; Zimolong, B. *Verkehrskonflikte im Innerortsbereich Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.) Unfall- und Sicherheitsforschung, Straßenverkehr, Heft 15.*
- [14] Hupfer, C.; Computergestützte Videobildverarbeitung zur Verkehrssicherheitsarbeit – am Beispiel von Fußgängerquerungen an städtischen Hauptverkehrsstraßen. Fachgebiet Verkehrswesen Universität Kaiserslautern Grüne Reihe Nr. 40
- [15] Tiemann (2012). Ein Beitrag zur Situationsanalyse im vorausschauenden Fußgänger-schutz. Dissertation. Universität Duisburg-Essen.
- [16] Laureshyn, Svensson, Hydén (2010). Evaluation of traffic safety, based on micro-level behavioral data: Theoretical framework and first implementation. *Accident Analysis and Prevention*, S. 1637-1646.
- [17] Kloeden, H.; Brouwer, N.; Ries, S.; Rasshofer, R. (2012): Potenzial der Kopfposenerkennung zur Absichtsvorhersage von Fußgängern im urbanen Verkehr. FAS Workshop Fahrerassistenzsysteme, Walting, 2012.
- [18] Schünke, M. (2014). Funktionelle Anatomie: Topographie und Funktion des Bewegungssystems
- [19] Schweizer, T., Thomas, C., & Regli, P. (2009). *Verhalten am Fussgängerstreifen*. Zürich: Fussverkehr Schweiz
- [20] Ren, Z., Jiang, X., & Wang, W. (2016). Analysis of the Influence of Pedestrians' eye Contact on Drivers'.
- [21] Nitz, G. (2010). Entwicklung eines Systems zur aktiven Bremsung eines Fahrzeugs in Gefahrensituationen, ISBN: 978-3-8322-8848-8, Reihe Reports on Measurement and Sensor Systems, Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Alexander W. Koch, München
- [22] Reinisch, P. (2012). Eine risikoadaptive Eingriffsstrategie für Gefahrenbremssysteme, <http://duepublico.uni-duisburg-essen.de/servlets/DocumentServlet?id=29942>
- [23] Schweizer, Thomas; Thomas, Christian; Regli, Pascal (2009): Verhalten am Fussgängerstreifen. Zürich: Fussverkehr Schweiz.
- [24] Ren, Z.; Jiang, X.; Wang, W. (2016): Analysis of the Influence of Pedestrians' eye Contact on Drivers'.