

Verkehrszustand als Basis für adaptive Fahrerassistenz am Beispiel der Autobahnauffahrt

Adaptive Driver Assistance on the Basis of Traffic Condition – Exemplary Demonstration for Highway Entrance

Dr. Susanne **Buld**, Sonja **Hoffmann**, Ingo **Totzke**

IZVW, Universität Würzburg

Ahmed **Benmimoun**, J. **Chen**

Institut für Kraftfahrwesen Aachen, RWTH Aachen

PD Dr. Mark **Vollrath**

DLR Braunschweig

Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag stellt eine Bedarfsanalyse von Fahrerassistenz beim Auffahren auf die Autobahn vor. Er wurde im Rahmen des Virtuellen Instituts (VI) „Humane Automation im Verkehr“ erarbeitet. Hierbei handelt es sich um ein interdisziplinäres Projekt technischer und psychologischer Einrichtungen (DLR, IZVW und ika), das von der Helmholtz-Gemeinschaft über drei Jahre gefördert wurde. Für das Auffahren auf die Autobahn wurden Aspekte identifiziert, in denen unterschiedliche Fahrfehler und erhöhte Beanspruchungen auftreten, aus denen sich dann wiederum spezifische Anforderungen an ein Fahrerassistenzsystem ergeben, das den Fahrer wirkungsvoll entlasten und zu einer sicheren Bewältigung dieser Situation beitragen kann. Ausgangspunkt sind Analysen aus der Verkehrssimulation PELOPS zur Auswirkung unterschiedlicher Verkehrszustände auf den Verkehrsfluss. Die simulierten Verkehrszustände wurden anschließend in die Würzburger Fahrsimulation eingebracht. Eine Studie mit N=44 Fahrern zeigt die Wirkung unterschiedlicher Verkehrszustände auf Fahrverhalten und -fehler des einzelnen Fahrers.

Summary

The paper presents the results of the work which was done in the so-called „Virtual Institute – Human-centered Automation in Traffic“. This institute was founded by the German Helmholtz Gemeinschaft as an interdisciplinary project between technical and psychological faculties. Besides improving safety a common aim of Driver Assistance Design is considering drivers needs in a specific scenario. This was done exemplarily for the task of entering a highway. The research group started

investigating the effects of different traffic conditions on traffic flow with methods of traffic simulation. The results were implemented in the driving simulation. A study with N=44 participants shows the impact of the same traffic conditions on driver behavior, mistakes and perceived workload. With respect to these results a demand analysis for driver assistance in different traffic conditions were carried out.

1 Einführung

Autofahren wird üblicherweise als wenig beanspruchend beurteilt. Autobahnauffahrten stellen jedoch eine Ausnahmesituation dar. Eine unbekannte Autobahnauffahrt bei mittlerer Verkehrsdichte wird bereits als mittel beanspruchend bezeichnet (Befragung am IZVW N=44 [1]). Da darüber hinaus aufgrund der hohen Geschwindigkeiten Autobahnunfälle häufig mit besonders hohen Kosten verbunden sind, besteht ein hohes Unterstützungspotenzial. Für diese sicherheitsrelevante Fahrsituation wurden über Untersuchungen im Realverkehr und der Fahrsimulation Aspekte identifiziert, in denen unterschiedliche Fahrfehler und erhöhte Beanspruchungen auftreten, aus denen sich dann wiederum spezifische Anforderungen an ein Fahrerassistenzsystem ergeben, das den Fahrer wirkungsvoll entlasten und zu einer sicheren Bewältigung der Situation beitragen kann. Gleichzeitig wurden Algorithmen entwickelt, wie mit unterschiedlicher Sensorik die relevanten Verkehrszustände objektiv erfasst werden können, so dass eine situationsabhängige Unterstützung des Fahrers erfolgen kann. Entsprechende Konzepte für Fahrerassistenz wurden ebenso erstellt. Die Arbeit entstand im Rahmen des Virtuellen Instituts „Humane Automation im Verkehr“ - ein interdisziplinäres Projekt technischer und psychologischer Einrichtungen, das von der Helmholtz-Gemeinschaft über drei Jahre gefördert wurde. Im Gegensatz zu einer technikgetriebenen Vorgehensweise bei der Entwicklung von Fahrerassistenz haben die Projektpartner Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Interdisziplinäres Zentrum für Verkehrswissenschaften Würzburg (IZVW) und Institut für Kraftfahrwesen RWTH Aachen (ika) mit der Fahrverhaltens- und Fehleranalyse bei Autobahnauffahrten den Fahrer an den Anfang der Entwicklung möglicher Fahrerassistenz gesetzt.

2 Vorgehen

Die Institute ika und IZVW wählten ein iteratives Vorgehen. In der Verkehrssimulation ging es dem ika zunächst darum Verkehrszustände nachzubilden, um diese auf makro und mikroskopischer Ebene zu beschreiben. Die als relevant identifizierten Verkehrszustände werden in die Würzburger Fahrsimulation übertragen. In einer Probandenstudie beschäftigte sich das IZVW mit der Unterscheidbarkeit der Verkehrszustände durch den Fahrer. Darüber hinaus wurde bezogen auf die einzelnen Zustände eine Fahrfehler und Fahrverhaltensanalyse unternommen. Die Ergebnisse aus der Probandenstudie nutze wiederum das ika, um eine Bedarfsanalyse Verkehrszustandsabhängiger Assistenz vorzunehmen. Am Ende des

Beitrags steht die von den Instituten gemeinsam entwickelte Idee eines adaptiven Einfädelassistenten.

3 Definition und Simulation von Verkehrszuständen in PELOPS

Für eine situationsabhängige Unterstützung ist es zunächst notwendig, verschiedene Verkehrszustände zu differenzieren und diese Zustände anhand von messbaren Größen zu beschreiben. Ein erster Ansatz zur Differenzierung kann aus der Darstellung des Verkehrsablaufes im Fundamentaldiagramm erfolgen (siehe Abb. 1).

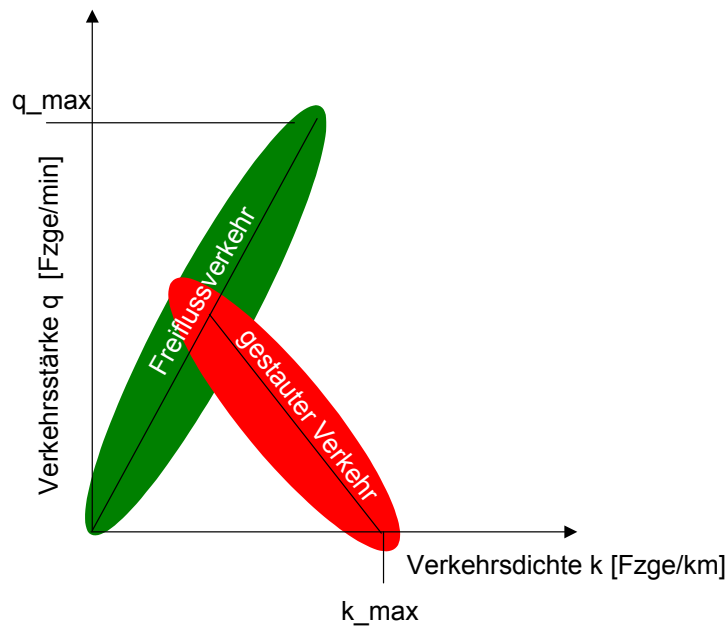


Abb. 1: Darstellung des Verkehrszustandes im Fundamentaldiagramm (Verkehrsstärke über Verkehrsdichte).

Traffic condition in the fundamental diagram (traffic flow in relation to traffic density).

Eine erste Unterscheidung des Verkehrszustandes kann somit in Freiflussverkehr und gestauten Verkehr erfolgen. Die Messgrößen zur Beschreibung des Verkehrs sind hierbei die Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und die Durchschnittsgeschwindigkeit.

In der Literatur finden sich weitere Unterscheidungen dieser beiden Hauptverkehrszustände. Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) [2] unterteilt die beiden Hauptstufen in jeweils zwei Unterstufen (Freiflussverkehr: freier und dichter Verkehr; gestauter Verkehr: zählfließender Verkehr und Stau). Kim und Keller [3] unterscheiden hingegen zwischen vier verschiedenen Unterstufen des gestauten Verkehrs (synchron, stockend, gestaut und stehend). Im Bereich des Freiflussverkehrs unterscheiden sie ebenfalls nur zwischen zwei Unterstufen. Das Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen unterteilt zur Beurteilung der Verkehrsqualität den Freiflussverkehr in 5 Unterstufen (A bis F) [4]. Wohingegen

der gestaute Verkehr als eine einzelne Stufe betrachtet wird. Ein anderer Ansatz, der sich insbesondere mit den Verkehrszuständen und Phänomenen des gestauten Verkehrs auseinandersetzt findet sich bei Kerner et al [5]. Sie unterteilen den Verkehr in die folgenden Zustände: Freiflussverkehr, synchronisierter Verkehr, homogen synchronisierter Verkehr, geschwindigkeitshomogener Verkehr, inhomogen synchronisierter Verkehr und Stop & Go-Verkehr. Helbing et al. [6] konzentrieren sich bei Ihrer Klassifizierung von unterschiedlichen Verkehrszuständen ebenfalls auf den gestauten Verkehr und unterscheiden hier fünf verschiedene Zustände: Stop & Go-Verkehr, einzelne Stauwellen, homogen zähfließender Verkehr, oszillierend zähfließender Verkehr und lokalisierter Zusammenbruch.

Keiner der beschriebenen Ansätze zur Klassifizierung von Verkehrszuständen deckt sowohl den Freiflussverkehr als auch den gestauten Verkehr detailliert ab. Der Ansatz der BASt [2] unterscheidet lediglich vier Verkehrszustände, was für die Verknüpfung von Fahrfehlern mit dem Verkehrszustand, wie sie für den Ansatz der adaptiven Assistenz vorgesehen ist, zu grob sein könnte. Kim und Keller [3] unterteilen den gestauten Verkehr in vier und den Freiflussverkehr in zwei Zustände. Für die Abgrenzung der Verkehrszustände untereinander werden jedoch keine Kriterien genannt. Das Handbuch zur Bemessung von Straßenverkehrsanlagen [4] konzentriert sich lediglich auf den Freiflussverkehr. Kerner et al. [5] hingegen befassen sich nur mit dem gestauten Verkehr. Helbing et al. [6] beschreibt in seinem Ansatz eher Verkehrsphänomene, die sich nur nach einer längeren Beobachtung des Verkehrs über einen definierten Streckenabschnitt identifizieren lassen. Dies ist gerade für die Applikation in einem Assistenzsystem nur mittels Infrastruktursystem möglich. Im Rahmen des Virtuellen Institutes sollen jedoch zunächst nur fahrzeuggestützte Systeme im Fokus stehen.

Da keiner der Ansätze sowohl im Freiflussverkehr als auch im gestauten Verkehr zu unterschiedliche Verkehrszustände differenziert, werden zwei dieser Ansätze kombiniert:

- Der Ansatz der Verkehrsqualitäten bietet sich hierbei für die Unterscheidung verschiedener Zustände im Freiflussverkehr an und gibt definierte Kriterien und Grenzwerte zur deren Unterscheidung an.
- Für die Unterscheidung von Verkehrszuständen im gestauten Verkehr wird der Ansatz von Kerner et. al herangezogen. Prinzipiell würde sich auch der Ansatz von Kim und Keller eignen, da diese beiden Ansätze recht ähnlich sind. Bei Kim und Keller konnten jedoch keine Kriterien zur Abgrenzung der Zustände voneinander gefunden werden.

Aus diesen beiden Ansätzen werden neun verschiedene Verkehrszustände zur Beschreibung des Freiflussverkehrs und des gestauten Verkehrs abgeleitet. Für den Freiflussverkehr werden die ersten fünf Stufen der Verkehrsqualität (QA-QE) herangezogen. Die letzte Stufe beschreibt den gestauten Verkehr und wird durch die vier Zustände nach Kerner et. al ersetzt. Insgesamt ergeben sich die in Abb. 2 zusammengefassten Verkehrszustände.

Qualitätsstufe A	Qualitätsstufe B	Qualitätsstufe C	Qualitätsstufe D	Qualitätsstufe E
synchron homogen	synchron v_homogen	synchron inhomogen	stop & Go	

Abb. 2: Klassifikation von Verkehrszuständen für ein Assistenzsystem.
Classification of traffic conditions for an assistance system.

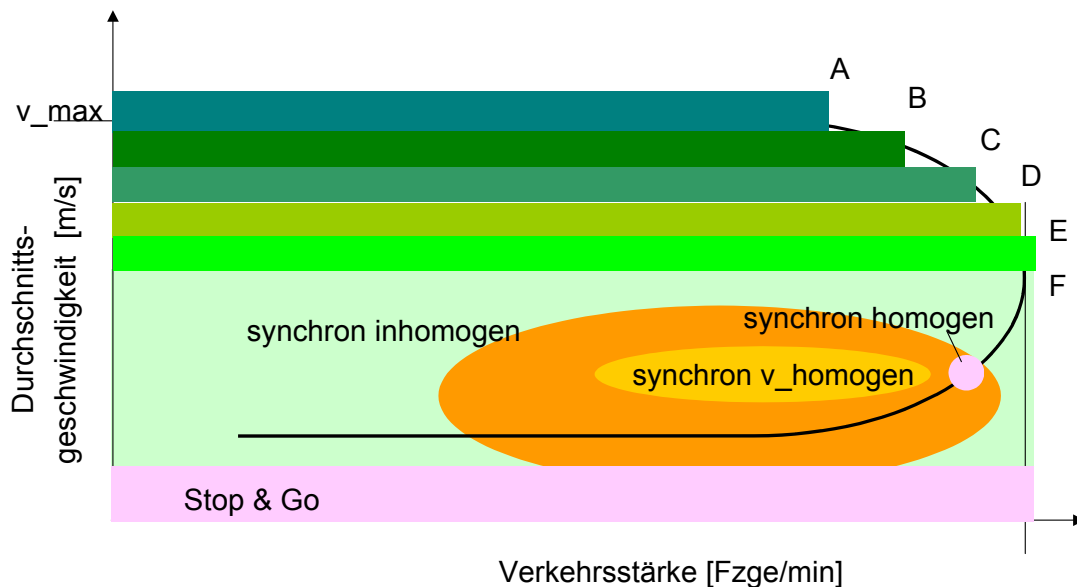


Abb. 3: Klassifikation von Verkehrszuständen für ein Assistenzsystem, Darstellung im Fundamentaldiagramm.
Classification of traffic conditions for an assistance system in the fundamental diagram.

In Abb. 3 sind diese Verkehrszustände im Fundamentaldiagramm (Durchschnittsgeschwindigkeit über Verkehrsstärke) dargestellt.

Die in Abb. 2 dargestellten Klassen von Verkehrszuständen werden im nächsten Schritt in der Verkehrsflusssimulation PELOPS abgebildet mit den folgenden drei Zielen:

- Nachbildung der Verkehrszustände, um diese auf der makroskopischen und mikroskopischen Ebene zu beschreiben. Daraus lässt sich ableiten, inwiefern sich diese Verkehrszustände aus dem Fahrzeug heraus (mikroskopisch) identifizieren lassen.
- Analyse der Fehlertoleranz der unterschiedlichen Verkehrszustände. Die Hypothese ist, dass in Abhängigkeit des Verkehrszustandes Fahrfehler zu unterschiedlichen Konsequenzen führen können.

- Generierung von Szenarien für die Fahrsimulation zur weiteren Analyse der Unterscheidung der Verkehrszustände durch den Fahrer und deren Auswirkungen auf das Fahrverhalten.

3.1 Das Verkehrssimulationsprogramm PELOPS

Für die Simulation der Verkehrszustände steht das mikroskopische Verkehrsfluss-simulationsprogramm PELOPS (Programm zur Entwicklung längsdynamischer, mikroskopischer Prozesse in systemrelevanter Umgebung) zur Verfügung, welches am Institut für Kraftfahrwesen der RWTH-Aachen (ika) in Zusammenarbeit mit der BMW AG entwickelt worden ist [7], [8].

Das Konzept von PELOPS besteht in der Verknüpfung detaillierter submikroskopischer Fahrzeugmodelle mit mikroskopischen verkehrstechnischen Modellen, die sowohl eine Untersuchung des längsdynamischen Fahrzeugverhaltens als auch eine Analyse des Verkehrsablaufs ermöglichen. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, alle Wechselwirkungen zwischen Fahrer, Fahrzeug und Verkehr berücksichtigen zu können.

Im Aufbau orientiert sich PELOPS an den wesentlichen Elementen des Verkehrssystems – Strecke/Umwelt, Fahrer und Fahrzeug. In einer modularen Programmstruktur werden die genannten Elemente modelliert und durch Schnittstellen abgegrenzt (Abb. 4).

Das Umweltmodell erlaubt bei Bedarf eine detaillierte Beschreibung der Einflüsse einer stationären Verkehrsumgebung. Sowohl der Verlauf der Straße in horizontaler und vertikaler Richtung über Radien und Übergänge, als auch die Anzahl und die Breite der Spuren wird angegeben. Zusätzlich zu diesen geometrischen Daten können Verkehrszeichen sowie Umweltbedingungen über Parameter wie Nässe, Glätte etc. vorgegeben werden. Die aktuellen Verkehrsbedingungen für ein Fahrzeug ergeben sich dann aus der Anzahl der umgebenden Fahrzeuge sowie deren Abständen und Geschwindigkeiten. Um bestimmte Verhaltensweisen im Verkehr zu provozieren oder vorgegebene Fahrzyklen nachzufahren, können einzelnen Fahrer-Fahrzeug-Einheiten wahlweise auch bestimmte Geschwindigkeitsprofile vorgeben werden.

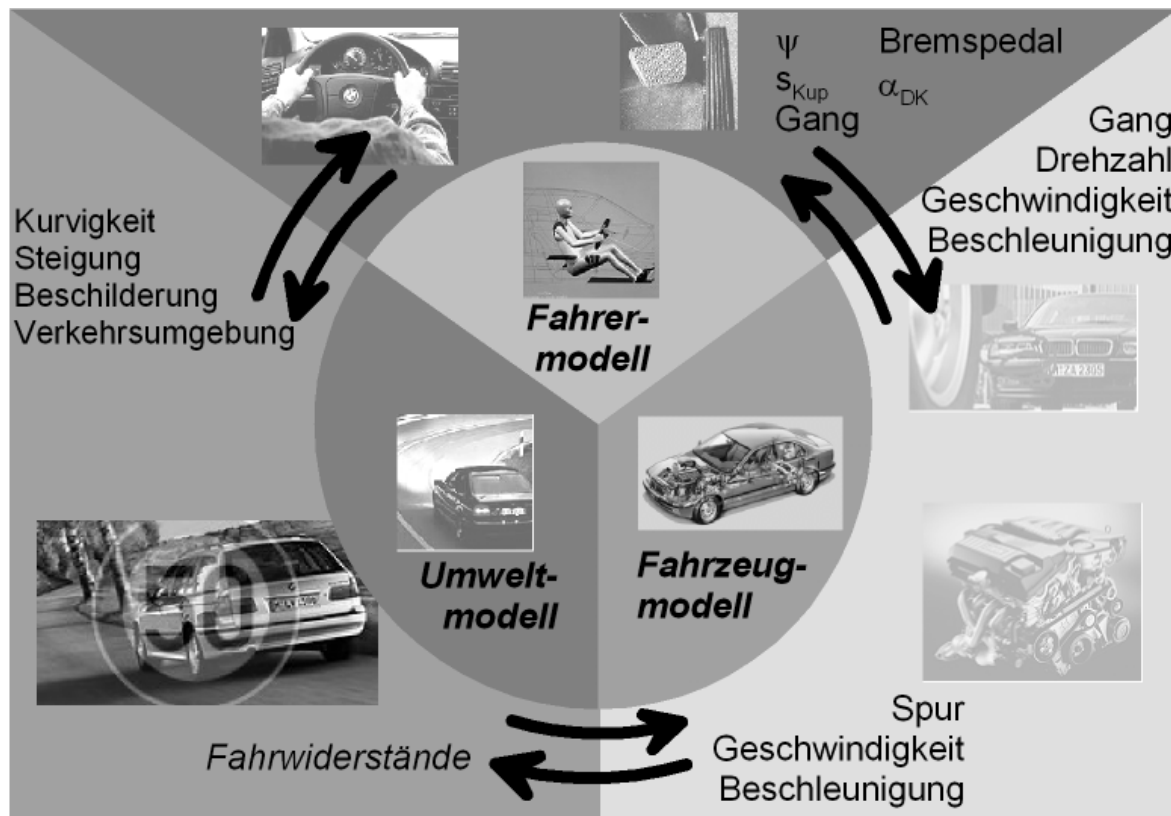


Abb. 4: Das Verkehrsflusssimulationsprogramm PELOPS.
The traffic flow simulation program PELOPS.

Das Fahrzeugmodell basiert auf dem 'Ursache-Wirkungs-Prinzip', bei dem eine Berechnung der Antriebskraft ausgehend vom Motorbetriebspunkt über Kupplung, Getriebe und Differential eine Berechnung der Antriebskraft zu den Rädern erfolgt, an der die Antriebskraft dann mit den Fahrwiderständen bilanziert wird. Der Betriebspunkt wird über die Änderung des Motormomentes (Ursache) gewechselt. Aus der dadurch verursachten Beschleunigung und Geschwindigkeitsänderung resultiert unter Berücksichtigung der Elemente des Antriebsstranges die Motordrehzahl (Wirkung). Als Getriebearten sind das konventionelle Handschalt- sowie Automatikgetriebe implementiert. Weiterhin lässt diese detaillierte Abbildung des Fahrzeugs die Simulation von Fahrerassistenzsystemen wie etwa des ACC (Adaptive Cruise Control; intelligenter Tempomat) zu.

Die Verbindung zwischen der Fahrzeug- und der Verkehrssimulation stellt das Fahrermodell dar. Es ist in ein Verhaltens- und ein Handlungsmodell gegliedert. Im Verhaltensmodell werden die Parameter der lokalen Fahrstrategie aus dem aktuellen Fahrzustand und der Fahrzeugumgebung bestimmt. Die Parameter der lokalen Fahrstrategie sind eine vom Fahrer gewünschte Beschleunigung, die Fahrspur und ggf. der einzulegende Fahrgang. Im Handlungsmodell schließlich werden diese Parameter in fahrzeugseitige Stellgrößen wie Gaspedal, Bremse etc. umgesetzt.

3.2 Abbildung der Verkehrszustände in PELOPS

Für die Abbildung der Verkehrszustände in der Verkehrsflusssimulation PELOPS wird ein Szenario ausgewählt, das eine Auffahrt auf der A4 Aachen Richtung Köln bei Düren darstellt. Dieses Szenario wurde in der Vergangenheit vom ika sowohl hinsichtlich der Infrastruktur als auch des Verkehrsaufkommens detailliert vermessen. Zudem bietet dieses Szenario den Vorteil, dass es die Auffahrt Düren beinhaltet und somit die Möglichkeit gegeben ist, die Auswirkungen der unterschiedlichen Verkehrszustände auf das Fahrverhalten beim Auffahren auf die Autobahn sowohl in der Verkehrsflusssimulation als auch in der Fahrsimulation zu betrachten. Abb. 5 zeigt diese Auffahrt.

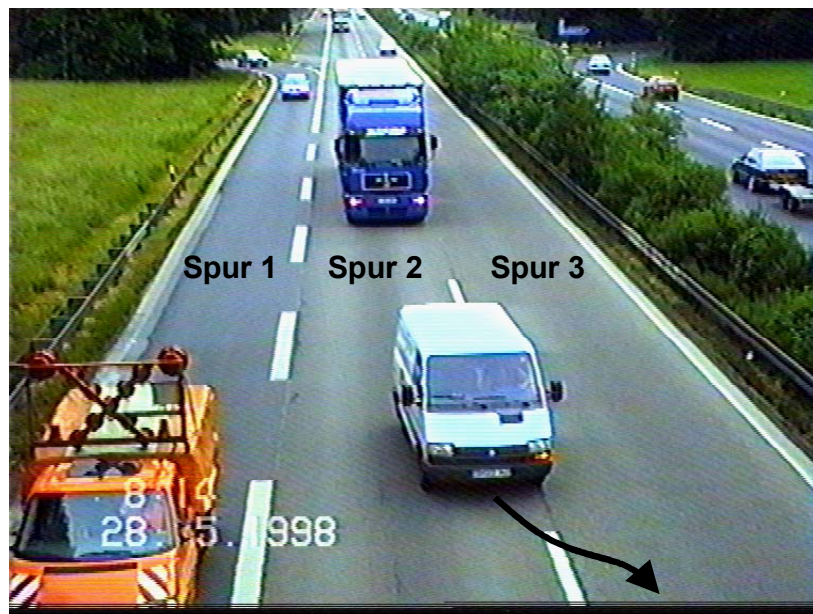


Abb. 5: Autobahnauffahrt Düren.
Highway entrance at Düren.

Basierend auf diesem validierten Szenario werden die definierten Verkehrszustände simuliert. Hierfür werden die makroskopischen Eingangsdaten (Eingangsverkehrsstärke und Durchschnittsgeschwindigkeit) für das PELOPS-Szenario variiert. Es werden keine externen, nicht selbstinduzierten Verkehrsstörungen implementiert. Abb. 6 zeigt die Ergebnisse der simulierten Verkehrszustände im Fundamentaldiagramm. Es ist festzustellen, dass die Durchschnittsgeschwindigkeit mit abnehmender Verkehrsqualität (QA-QE) sinkt. Bei QE wird die maximale Verkehrsstärke erreicht. Eine weitere Erhöhung der Verkehrsstärke führt zu einem Verkehrszusammenbruch. Die Kriterien für die Klassifizierung der Verkehrszustände werden in den einzelnen simulierten Zuständen erfüllt.

Neben den verschiedenen Verkehrsqualitäten sind auch die unterschiedlichen Zustände des gestauten Verkehrs bis auf den synchron homogenen Verkehr dargestellt. Hierbei handelt es sich um einen sehr instabilen Zustand, der in der Simulation nur kurzzeitig nachgebildet werden konnte. Ähnliches gilt auch den

synchron geschwindigkeitshomogenen Verkehr. In diesem Fall kann in der Simulation dieser Zustand allerdings länger aufrecht erhalten werden. Da diese beiden Zustände sehr instabil und sehr schwierig nachzubilden sind und in der Realität selten vorkommen, werden sie im Folgenden und in der Fahrsimulation nicht näher betrachtet.

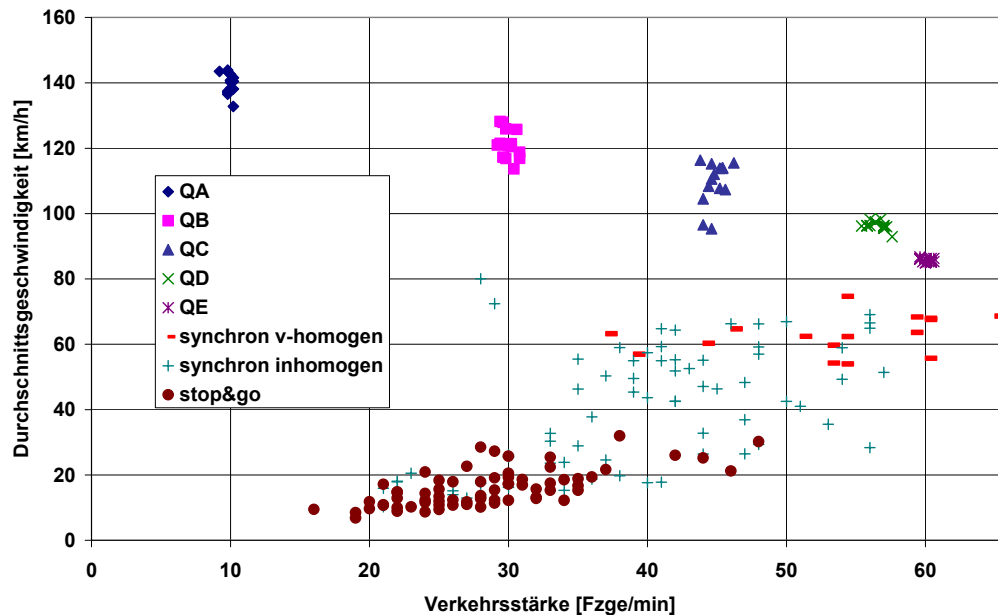


Abb. 6: Simulierte Verkehrszustände in der Verkehrsflussimulation PELOPS (Durchschnittsgeschwindigkeit über Verkehrsstärke).

Simulated traffic conditions in the traffic flow simulation PELOPS (average velocity in relation to traffic flow).

Um Szenariendaten für die Fahrsimulation zu generieren, wird aus den simulierten Zuständen ein bestimmter Zeitabschnitt extrahiert. Für diesen Zeitabschnitt werden alle Fahrzeuge im Bereich der Auffahrt durch Ihre Positionsdaten (Position in Längs- und Querrichtung, Orientierung) und Bewegungsdaten (Geschwindigkeit, Beschleunigung etc.) zeitlich beschrieben. Diese Daten werden den Fahrzeugen in der Fahrsimulation als Art Fahrzyklus aufgezwungen. In der Regel fahren die Fahrzeuge in der Fahrsimulation die Trajektorien aus der Verkehrsflussimulation nach. Lediglich in Situationen, in den sich aufgrund des Einflusses des Probandenfahrzeugs die Verkehrssituation ändert, wird ein Fahrermodell eingesetzt. Auf diese Weise lassen sich in der Fahrsimulation die verschiedenen Verkehrszustände ohne großen Aufwand und detailliertem Fahrermodell für die Probandenversuche nachbilden.

Neben der Nachbildung der Verkehrszustände und Generierung der Szenarien für die Fahrsimulation wird in der Simulation der Aspekt der Fehlertoleranz von verschiedenen Verkehrszuständen analysiert. Hierbei wird überprüft, welche Konsequenzen ein Fahrfehler beim Auffahren auf die Autobahn nach sich zieht. Als prototypischer Fahrfehler wird hier das Auffahren auf die Autobahn ohne Beachtung

des rückwärtigen Verkehrs und ohne Setzen des Blinkersignals betrachtet. Die Verkehrssituation wird dabei so ausgelegt, dass das Auffahren in kurzem Abstand zum nachfolgenden Fahrzeug durchgeführt wird. Der Abstand wird so gewählt, dass das nachfolgende Fahrzeug durch Bremsen oder Ausweichen reagieren muss, um einen Unfall zu verhindern.

Für die Bewertung der Fehlertoleranz werden zwei Kriterien herangezogen. Zum einen wird anhand der minimalen TTC (Time-To-Collision), der maximalen Verzögerung und des kürzesten Abstandes zwischen den beiden Fahrzeugen die Kritikalität der resultierenden Situation bewertet. Zum anderen wird anhand des Verkehrszustandes auch berücksichtigt, wie wahrscheinlich es ist, dass bei einem solchen Auffahren ohne Beachtung des rückwärtigen Verkehrs das nachfolgende Fahrzeug behindert wird.

Mit der minimalen TTC wird ermittelt, wie viel „Reservezeit“ zur Vermeidung eines Unfalls übrig geblieben ist. Die maximale Verzögerung beschreibt, wie stark die Reaktion des nachfolgenden Fahrzeugs zur Vermeidung eines Unfalls ist. Der minimale Abstand zwischen den beiden Fahrzeugen spielt in der Regel nur eine untergeordnete Rolle zur Beurteilung der Kritikalität der Situation, da insbesondere bei den freien Verkehrszuständen die nachfolgenden Fahrzeuge gar nicht oder nur wenig bremsen, sondern die Fahrspur wechseln. In solchen Situationen kann der Abstand, bei dem die Spurwechsel erfolgt, als zusätzliches Kriterium für die Bewertung der Kritikalität der Situation genutzt werden.

Abb. 7 zeigt eine solche Auffahrsituation beim Verkehrszustand QC. Das auffahrende Fahrzeug bewegt sich zu dem dargestellten Zeitpunkt mit etwa 60 km/h, während sich das nachfolgende Fahrzeug mit etwa 100 km/h nähert (siehe farbliche Kodierung der Fahrzeuge). Sobald die durchgezogene Linie von der gestrichelten Linie abgelöst wird, wechselt das Fahrzeug vom Beschleunigungsstreifen auf die Autobahn.



Abb. 7: Auffahrtssituation beim Verkehrszustand QC.
Entrance situation at the traffic condition QC.

Der Verlauf der wesentlichen Größen zur Beurteilung der Kritikalität der daraus resultierenden Verkehrssituation ist beispielhaft für den Verkehrszustand QC in Abb. 8 dargestellt. Auf der linken Ordinate sind die Geschwindigkeit des nachfolgenden Fahrzeugs, die TTC und der Abstand zum auffahrenden Fahrzeug aufgetragen. Auf der rechten Ordinate sind dessen Beschleunigung, die Zeitlücke und die Differenzgeschwindigkeit zum auffahrenden Fahrzeug gezeigt.

Die minimale TTC beträgt in diesem Fall etwa eine Sekunde. Dies bedeutet, dass der Fahrer des nachfolgenden Fahrzeugs nicht länger als eine Sekunde ab Einscheren des auffahrenden Fahrzeugs mit dem Bremsmanöver hätte warten dürfen, um einen Unfall zu vermeiden. Zudem muss er selbst bei einer sofortigen Reaktion mit etwa 6 bis 7 m/s^2 verzögern, was zwar noch keiner Vollbremsung entspricht, aber schon eine nicht alltägliche Bremsung darstellt. Der absolute Abstand beträgt etwa vier Meter zum Zeitpunkt, an dem die Differenzgeschwindigkeit zu null wird. Die Zeitlücke beträgt zu diesem Zeitpunkt etwa 0,16 Sekunden.

Bei diesem Fehlertyp zeigt die Analyse der Simulationsergebnisse bei verschiedenen Verkehrszuständen, dass insbesondere die Differenzgeschwindigkeit sehr stark prägend für die Kritikalität der resultierenden Situation ist. Diese ist insbesondere bei den Verkehrszuständen QA bis QC sehr hoch. Ab QC sinkt die Differenzgeschwindigkeit aufgrund der höher werdenden Verkehrsdichte (Durchschnittsgeschwindigkeit auf den Autobahnspuren sinkt mit zunehmender Verkehrsdichte). Aufgrund der niedrigen Differenzgeschwindigkeit (teilweise ist das auffahrende Fahrzeug schneller als der nachfolgende Verkehr, wie z.B. beim synchron inhomogenen Verkehr) kann die kritische Situation in der Regel mit einer kurzen Bremsung gelöst werden. Bei den Verkehrszuständen QA und QB hingegen ist die Wahrscheinlichkeit beim unachtsamen Auffahren ein anderes Fahrzeug zu behindern geringer als bei dem Verkehrszustand QC. Aus diesem Grund gilt dieser Verkehrszustand bezüglich des beschriebenen Fehlertyps (unachtsames Auffahren) als kritischsten. Die Fehlertoleranz ist hier am geringsten.

Die Analyse zeigt, dass zusätzlich zu der Betrachtung von verkehrzustandstypischen Fahrfehlern auch berücksichtigt werden muss, dass diese Fahrfehler bei verschiedenen Verkehrszuständen zu unterschiedlichen Konsequenzen führen können.

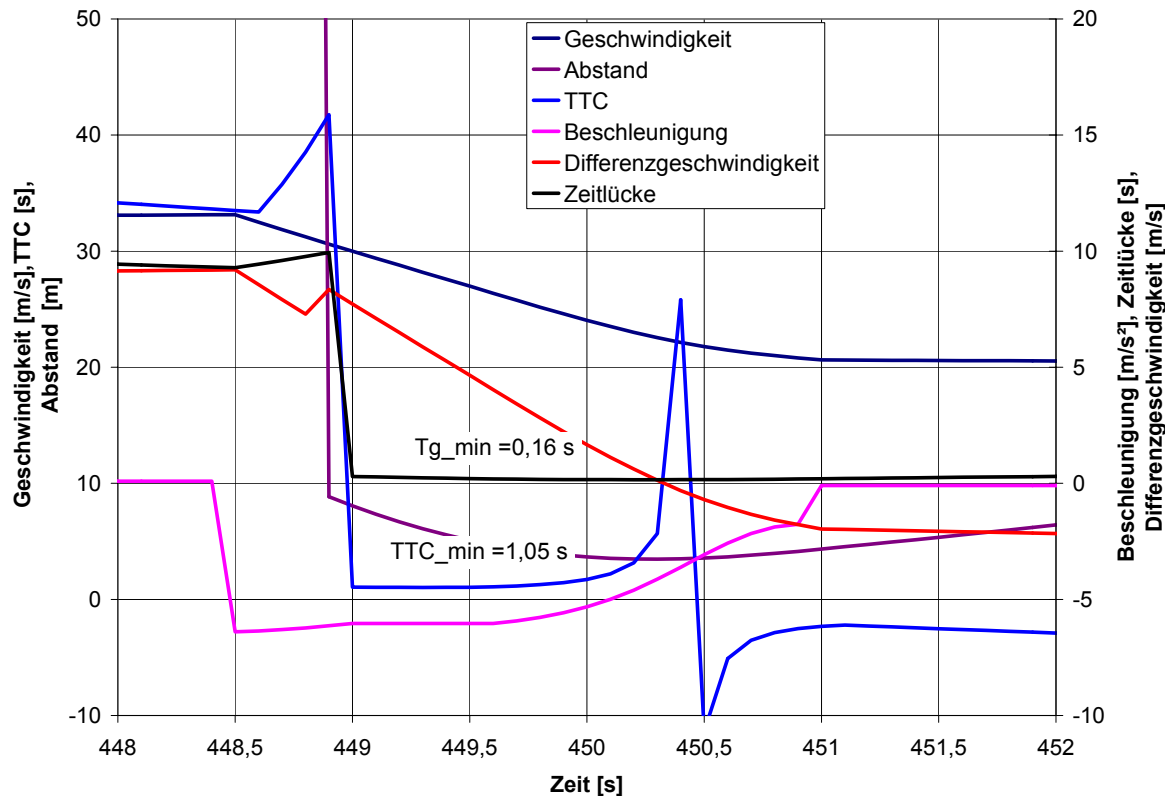


Abb. 8: Fehlertoleranz des Verkehrszustandes, Auffahrtssituation beim Verkehrszustand QC.
Fault tolerance of the traffic condition, entrance situation at the traffic condition QC.

4 Studie in der Würzburger Fahrsimulation

Im Rahmen einer Fahrsimulationsstudie wird geprüft, inwieweit die aus der Verkehrssimulation bekannten Effekte bezüglich der Verkehrszustände den Fahrer tatsächlich betreffen. Ob überhaupt verschiedene Verkehrszustände wahrgenommen werden und ob diese Auswirkungen auf die Fahrweise haben ist die Kernfragestellung der Untersuchung.

4.1 Stichprobe

Insgesamt nahmen $N=44$ Fahrer an der Untersuchung teil, $n=22$ Fahrer mit weniger als 2000 km Autobahnfahrten im Jahr und $n=22$ Fahrer mit mehr als 5000 km Autobahnfahrten im Jahr. Außerdem handelt es sich um jeweils 11 Männer und Frauen im Alter von 23 bis 77 Jahren ($m=48$ Jahre; $sd=16.6$ Jahre). Alle Fahrer sind im Umgang mit dem Fahrsimulator höchst geschult, so dass Fahrfehler auf die Untersuchungsanordnung und nicht auf mangelnden Umgang mit der Simulation zurückzuführen sind.

4.2 Streckengestaltung

Abb. 9 zeigt die Gestaltung der Autobahnauffahrt in der Fahrsimulation. Sie wurde an die Autobahnauffahrt Düren (vgl. Kap. 3.2) angelehnt.

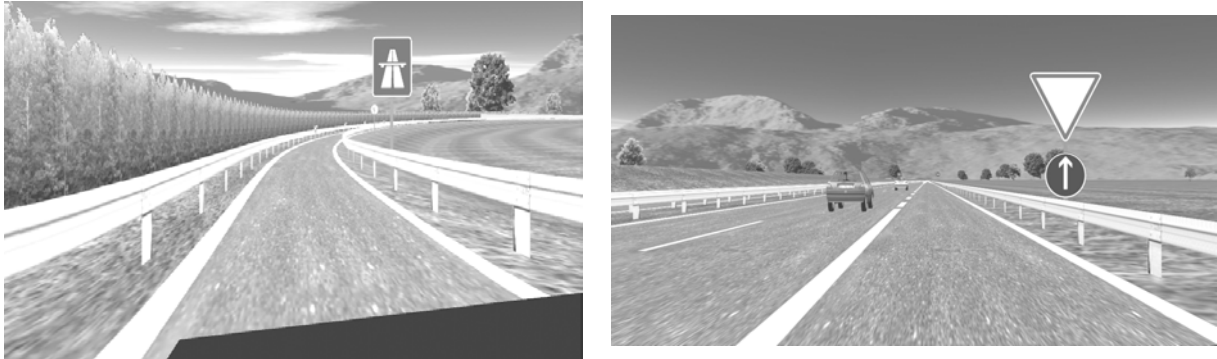


Abb. 9: Umsetzung der Autobahnauffahrt in der Fahrsimulation; links: Teil 1 Anfahrsstrecke, rechts: Teil 2 Auffahrstück.

Scenario design for highway entry in the driving simulation. Left side: Part 1 Access Road, Right: Part 2 Acceleration lane.

Der erste Teil des Szenarios ist eine Anfahrsstrecke, Spurbreite 3.75m mit Leitplanken rechts und links. Ein Heckenband versperrt die Sicht auf die Autobahn, so dass der Fahrer den Verkehrszustand erst einsehen kann, wenn er die Autobahn erreicht hat. Der zweite Teil des Szenarios besteht aus dem eigentlichen Auffahrstück. Die Auffahrt geht in den Beschleunigungsstreifen über. Der Fahrer muss jetzt auf eine zweispurige Autobahn (Spurbreite je 3.75m) auffahren und sich in den Verkehr einordnen.

Die Variation der einzelnen Autobahnauffahrten erfolgte über die direkte Übertragung der in Kapitel 3 dargestellten 7 Verkehrszustände vom freifließenden zum gestauten Verkehr. Innerhalb der Verkehrszustände wurde darüber hinaus die Verkehrsbewegung variiert. Im einen Fall verhalten die anderen Verkehrsteilnehmer sich bei gleichbleibender Anzahl eher statisch und bleiben wenn möglich auf der einmal gewählten Spur. Im anderen Fall verhalten sich die Fahrer dynamisch. Hier nehmen die Verkehrsteilnehmer viele Spurwechsel vor, fahren dichter auf oder drängen sich in vom Probanden ausgesuchte Lücken hinein, ohne auf das Ego-Fahrzeug Rücksicht zu nehmen.

4.3 Versuchsablauf

Die Versuchsteilnehmer absolvierten zunächst eine Eingewöhnungsfahrt zum Kennen lernen der Autobahnauffahrten und Üben der Befragung.

In der Versuchsfahrt hatte jeder Fahrer 14 Autobahnauffahrten (7 Verkehrszustände in 2 Ausgestaltungsvarianten) zu absolvieren. Bei 44 Fahrern ergibt das eine Datenbasis von 616 Autobahnauffahrten. Die Fahrer wurden instruiert, die Situation

zügig zu durchfahren und dabei die Fahrspur zu wählen, die am günstigsten erscheint.

4.4 Auswertung

Die Auswertung erfolgt auf den Datenebenen Fehlerbeobachtung, Fahrdatenanalyse und Befragung.

Zu den in der Autobahnauffahrt möglichen Fehlern wurde für jede Versuchsfahrt ein Fehlerprotokoll entwickelt, in dem die unterlaufenen Fehler markiert werden können. Neben dem Versuchsleiter wurde für diese Aufgabe ein geschulter Beobachter eingesetzt. Die Fehler werden angelehnt an Brenner Hartmann [4] gegeben.

Im Gegensatz zur Fehlerbeobachtung wird in der Fahrdatenanalyse nicht nach Fehlern gesucht, sondern die Fahrweise, die sich in bestimmten Fahrparametern widerspiegelt nach den Experimentalvarianten vergleichend dargestellt.

Nach jeder Autobahnauffahrt wurden die Fahrer außerdem gefragt, wie viel sie in der jeweiligen Fahrsituation aufpassen mussten und zur Einschätzung des Verkehrszustands, wie viel los war. Als Antwortgrundlage dient die sog. Kategorienunterteilungsskala (vgl. Abb. 10)



Abb. 10: Die Kategorienunterteilungs-Skala.
Category-Division-Rating Scale.

4.5 Ergebnisse

4.5.1 Verkehrszustände und Verkehrsbewegungen

Da die Einführung von zusätzlicher Verkehrsbewegung die signifikanten Ergebnisse, die sich aufgrund des Verkehrszustands ergeben, nicht grundsätzlich verändern (es lagen keine signifikanten Wechselwirkungen vor), sondern verschärfen, werden diese beiden Komponenten immer gemeinsam dargestellt. In der Ergebnisdarstellung findet man neben Häufigkeitsdiagrammen Mittelwertplots. Dargestellt ist jeweils der Mittelwert. Die Fehlerbalken beschreiben den Standardfehler.

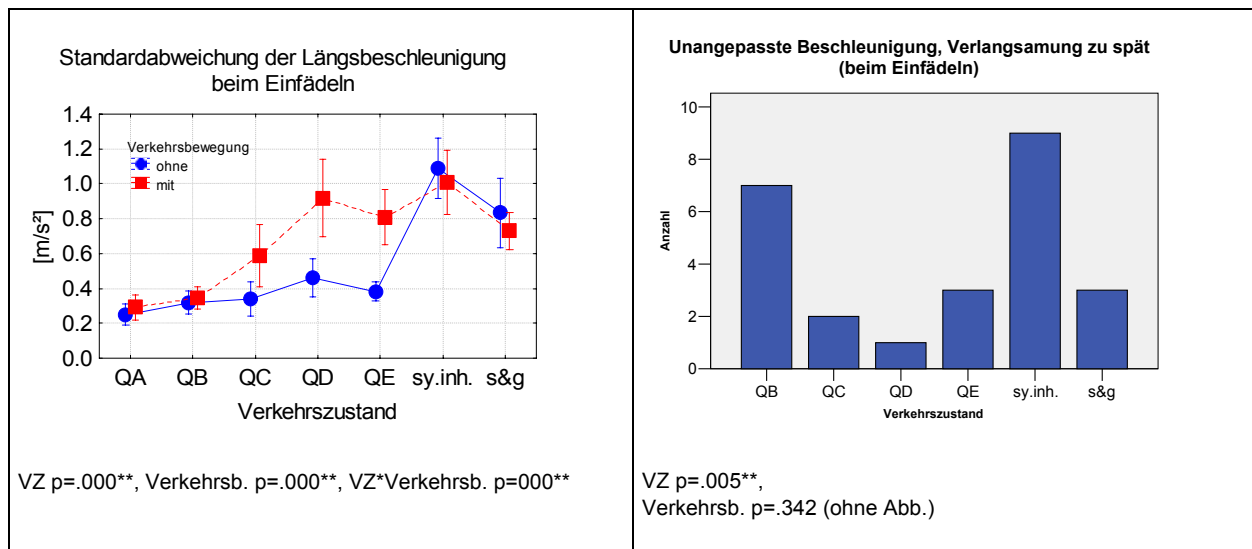


Abb. 11: Längsregelung beim Einfädelvorgang.
Longitudinal acceleration entering the highway.

Beim Einfädeln nimmt die Standardabweichung der Längsbeschleunigung sprunghaft beim synchron inhomogenen Verkehr zu. Bei mehr Dynamik der anderen Verkehrsteilnehmer tritt dieser Effekt bereits ab QD ein.

Dieser Parameter reagiert immer dann, wenn sich die Geschwindigkeit des auf der Autobahn bereits befindlichen Verkehrs deutlich von der des Ego-Fahrzeugs in der Zufahrt unterscheidet. Darüber hinaus ist es schwieriger für die Fahrer eine geeignete Einfädellücke zu finden, je mehr Fahrzeuge sich um das Ego-Fahrzeug herum dynamisch bewegen. Dies äußert sich in einer höheren Variabilität in der Längsführung.

Die Beobachter geben den Fehler „unangepasste Beschleunigung, Verlangsamung zu spät (beim Einfädeln)“ vor allem bei QB und synchron inhomogenem Verkehr (vgl. Abb.5). QB nimmt hier eine besondere Stellung ein. Insgesamt befanden sich hier nur drei Fahrzeuge bereits auf der Autobahn. Zwei von ihnen fuhren auf der rechten Spur ohne Verkehrsbewegungen mit ca. 90 km/h, mit Verkehrsbewegungen mit ca. 130 km/h. Für die sieben hier eingegangenen Fahrer ergab sich laut der Beobachtungsprotokolle je nach Geschwindigkeit in der Zufahrt ein Entscheidungsproblem. Die Geschwindigkeit der anderen Fahrzeuge wurde unterschätzt, die Wahl vor oder nach den Fahrzeugen einzufädeln, wurde erst sehr spät getroffen und führte zu einer unangemessenen Verzögerung. Ähnliche Phänomene treten erst wieder vermehrt im SY.INH. des zusammenbrechenden Verkehrs auf.

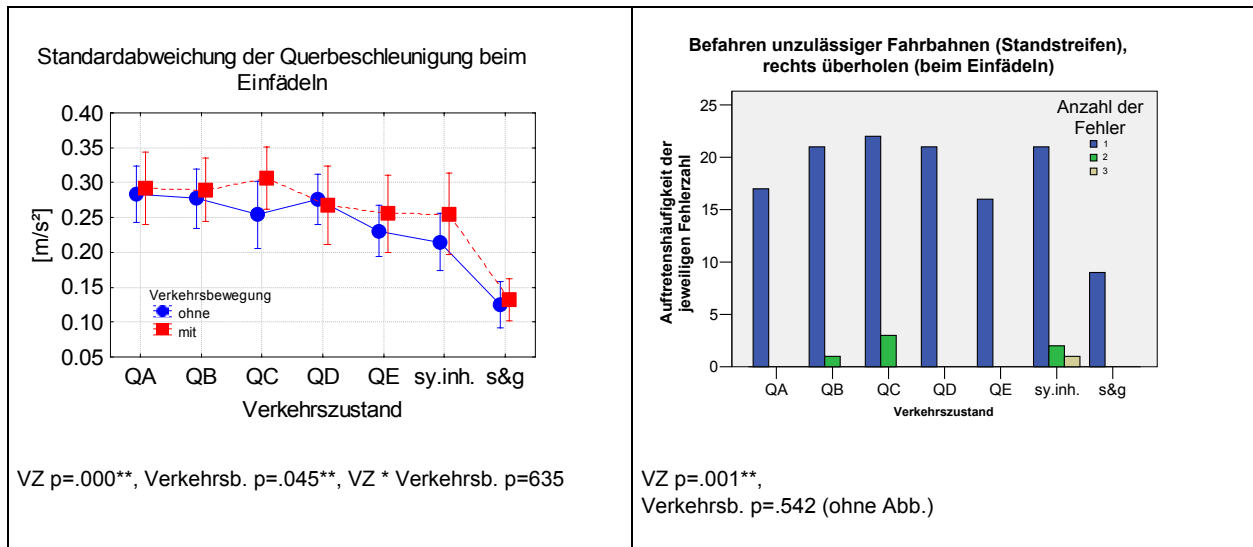


Abb. 12: Querregelung beim Einfädelvorgang (Abb. links) sowie Spurnutzung (Abb. rechts).

Lateral acceleration entering the highway (fig. left) and usage of trace.

Der Parameter der Querbewegung sinkt erwartungsgemäß mit den niedrigeren Geschwindigkeiten in höheren Verkehrszuständen. Bei mehr Verkehrsbewegung liegt der Wert tendenziell höher.

Auch in der Spurnutzung fällt der Verkehrszustand synchron inhomogen als zusammenbrechender Verkehr mit der höchsten Fehlerzahl auf. Vor allem dort wird die Standspur befahren, bzw. rechts überholt, da der Spurwechsel nicht rechtzeitig vorgenommen werden konnte (bis zu 3 Fehler in einer Auffahrt).

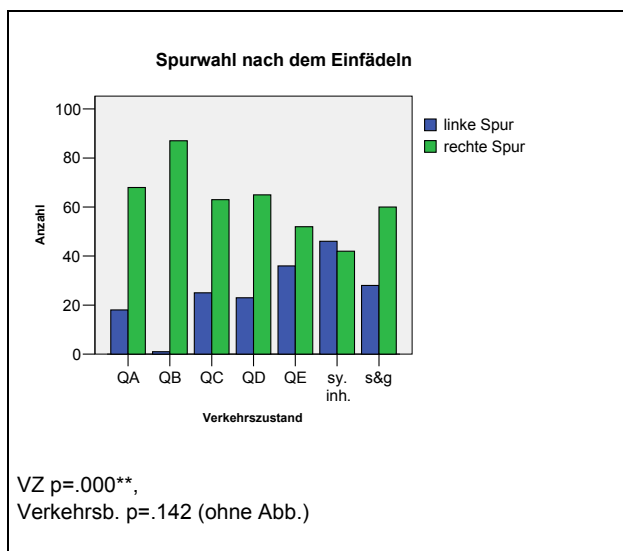


Abb. 13: Häufigkeiten der gewählten Spur nach dem Einfädeln bezogen auf den Verkehrszustand.

Frequency of lane choice after entering the highway with respect to traffic flow.

Nach dem Einfädeln ordnen sich die Fahrer in der Regel rechts ein (vgl. Abb. 9). Erst in den Verkehrszuständen QE und synchron inhomogen nimmt die Nutzung der linken Spur zu. Nur im synchron inhomogenen Verkehr wird für die Weiterfahrt häufiger die linke Fahrspur gewählt als die rechte. Im stauenden Verkehr (S&G) bleiben die Fahrer wieder häufiger rechts, da auch auf der linken Spur nicht schneller gefahren werden kann.

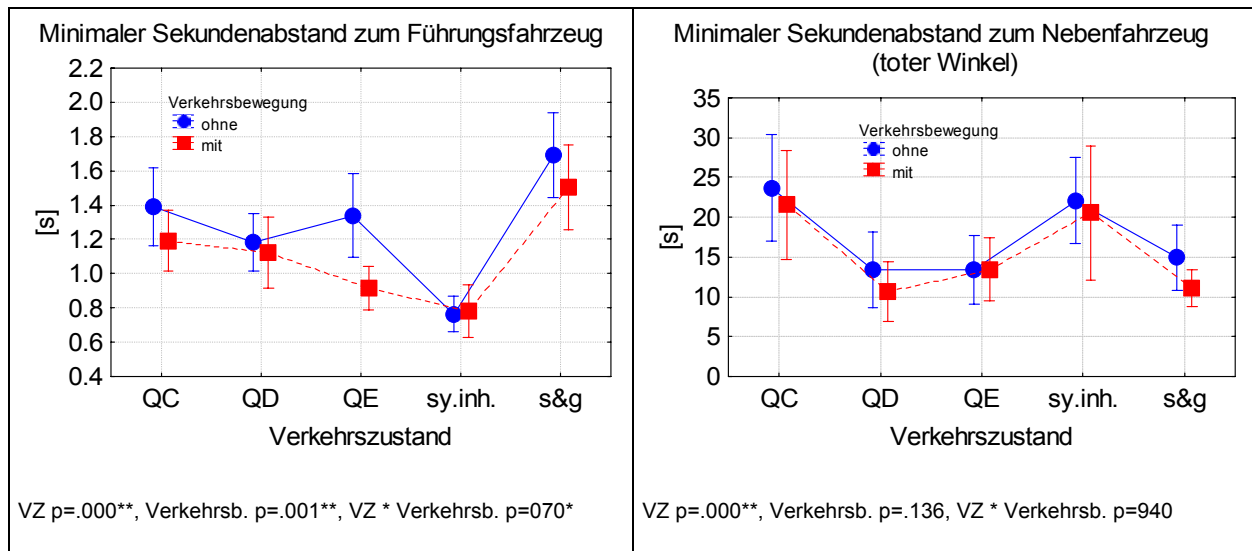


Abb. 14: Abstandsverhalten während des Einfädelvorgangs.
Car to car distance entering the highway.

Laut Beobachterurteil werden in Bezug auf Abstände zu umliegenden Fahrzeugen folgende Fehler gegeben (ohne Abbildung): Vor allem im synchron inhomogenen Verkehr werden zu geringe Abstände zu Führungsfahrzeugen eingenommen. In den Zuständen QD-sy.inh. werden häufiger rückliegende Fahrzeuge zum Abbremsen gezwungen. Zu geringe Seitenabstände werden besonders häufig in QD gefahren. Die Fahrdatenanalyse bestätigt diese Urteile. Die Sekundenabstände zum Führungsfahrzeug sinken kontinuierlich bis ein Minimum im synchron inhomogenen Verkehr erreicht ist. Besonders kleine Abstände zum Nebenfahrzeug treten in QD und QE, aber auch im Stop&Go-Verkehr auf. Mehr Verkehrsbewegung verstärkt diese Effekte

Die Verkehrszustände QA und QB wurden in die abhängige Varianzanalyse nicht mit aufgenommen, da hier aufgrund der geringen Anzahl der Fahrzeuge im Fließverkehr die meisten Fahrer in den Abstandsparametern fehlende Werte haben. Für diese Verkehrszustände sei auf die Fehlerbeobachtung verwiesen.

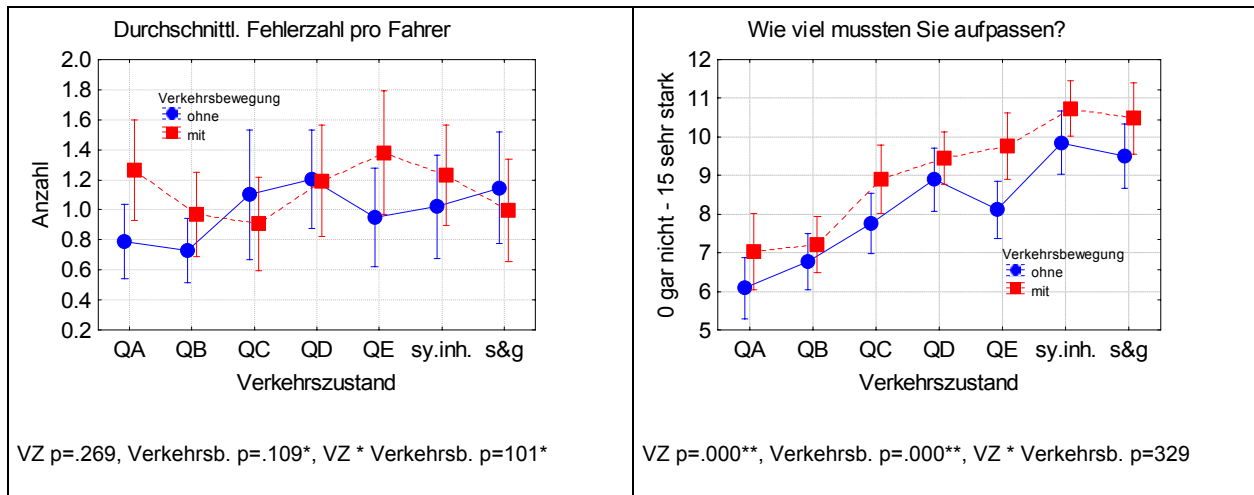


Abb. 15: :Durchschnittliche Fehlerzahl pro Fahrer und Verkehrszustand (links). Beurteilung der Beanspruchung bezogen auf die einzelnen Verkehrszustände (rechts).

Average number of mistakes per driver and traffic condition (left). Rating of workload relating to the different traffic conditions (right).

Insgesamt werden bei höherer Dynamik des umgebenden Verkehrs mehr Fehler gemacht. Ohne Verkehrsbewegungen werden die meisten Fehler in den Verkehrszuständen QC, QD und S&G gemacht. Mit Verkehrsbewegungen hingegen in QA, QD, QE und sy.inh. (vgl. Abb. 6, links). In den niedrigen Verkehrszuständen bestehen die Schwierigkeiten immer darin, dass die Fahrer nicht damit rechnen, dass die wenigen umgebenden Fahrzeuge unter Umständen die Spur blockieren. Insgesamt wird dort die Verkehrsdichte unterschätzt bzw. Geschwindigkeiten falsch eingeschätzt. Unabhängig vom Verkehrszustand ist die berichtete Beanspruchung immer dann höher, wenn Verkehrsbewegungen stattfinden (vgl. Abb. 6, rechts). Darüber hinaus steigt die Beanspruchung mit der Verkehrsdichte bis zu Verkehrszustand synchron inhomogen kontinuierlich an. Der synchron inhomogene Verkehr fordert die Fahrer offensichtlich am stärksten. Im Stop & Go steigt die Beanspruchung nicht weiter an. Dies steht im Widerspruch zu den Fehlern, die den Fahrer während der Fahrten unterliefen. Hier findet sich kein kontinuierlicher Anstieg in den Verkehrszuständen. Die niedrigen Verkehrszustände werden demnach von den Fahrern unterschätzt.

4.6 Unterscheidbarkeit verschiedener Verkehrszustände durch den Fahrer

Die Fahrer bilden den jeweiligen Verkehrszustand in der Befragung direkt nach jeder Autobahnauffahrt (Wie viel war los?) wie in Abb. 7 links zu sehen hoch signifikant ab ($r=.8$, $p=.000$).

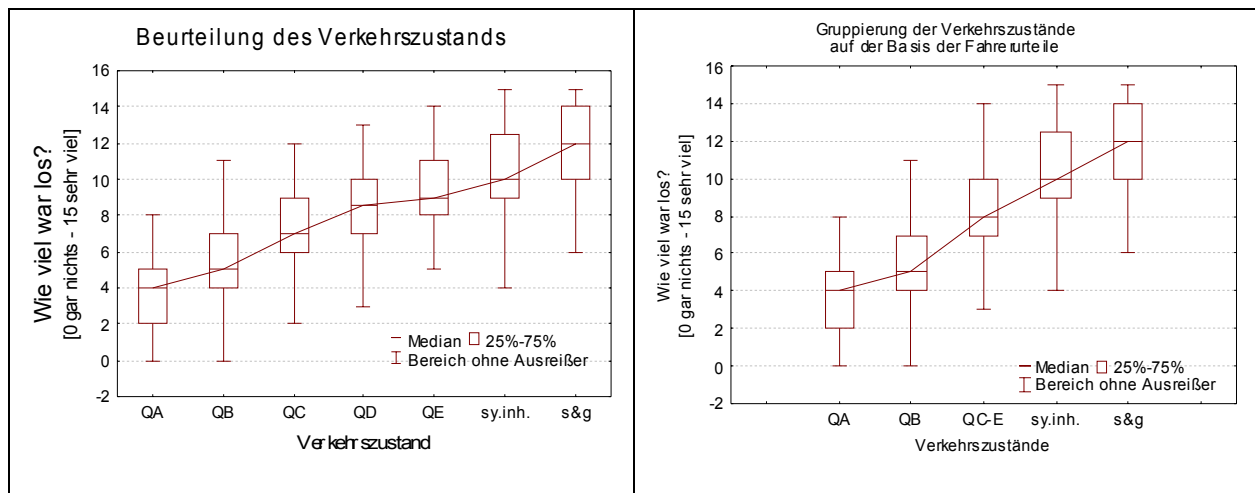


Abb. 16: Beurteilung des Verkehrszustandes.
Rating of the traffic condition.

Nachgeschaltete Scheffé-Tests ergeben, dass sich die Verkehrszustände QC, QD und QE in der Beurteilung nicht signifikant unterscheiden.

In der Nachbefragung geben die Fahrer zudem im Durchschnitt an, 5 Verkehrszustände unterschieden zu haben ($m=5.05$; $sd=1.29$). Somit wären die Verkehrszustände subjektiv gemäß Abb. 7 rechts zu gruppieren.

4.6.1 Fazit

Die Variabilität der Parameter der Längsführung bzw. gewählter Abstände zeigen, dass Schwierigkeiten vorwiegend im Zusammenhang mit dem Auffinden einer geeigneten Einfädellücke auftreten. Die Fehlerbeobachtung bestätigt dieses Phänomen.

Einen besonderen Stand hat durchwegs der synchron inhomogene Verkehr. Es handelt sich hier um einen „Übergangszustand“ vom fließenden zum stauenden Verkehr. Bereits in der Variante ohne gezielte Verkehrsbewegungen stellt sich dieser Verkehrszustand deutlich dynamischer dar, da sich die umliegenden Fahrzeuge von hohen Geschwindigkeiten in Niedrigere einfinden müssen und deswegen häufiger gebremst wird. In allen erhobenen Parametern, auch in der Beurteilung der Beanspruchung und Herzratenvariabilität (ohne Abbildung), erlebt dieser Verkehrszustand ein Maximum. Führt man zusätzlich Verkehrsbewegungen ein, verstärkt sich dieser Effekt.

Insgesamt nehmen Schwierigkeiten im Fahrverhalten mit höherem Verkehrszustand zu. Auffällig sind die mittleren Verkehrszustände, in denen Fehlerzahlen einen sprunghaften Anstieg erleben (bereits ab QC). Im stauenden Verkehr nehmen die Fehler tendenziell leicht ab. Dort werden nicht mehr so viele Spurwechsel unternommen, die Fahrer stellen sich auf niedrigere Geschwindigkeiten ein und „fügen sich“ in ihr Stau-Schicksal.

Mit Verkehrsbewegungen treten Fehler, unruhigeres Fahren und niedrigere Abstände unabhängig vom Verkehrszustand signifikant häufiger auf. Dies kann bereits den Verkehrszustand QA mit nur einem relevanten Fahrzeug betreffen, das das Einfädeln erschwert.

Verkehrsbewegungen werden auch als beanspruchender beurteilt. Interessanterweise steigt die beurteilte Beanspruchung aber fast linear mit zunehmendem Verkehrszustand. Offensichtlich werden Fehler und kritische Situationen in den mittleren Verkehrszuständen nicht als beanspruchend wahrgenommen. Den sprunghaften Anstieg von niedrigen Abständen bzw. Fehlern findet man im Urteil der Fahrer nicht.

Eine adaptive Assistenz sollte ihr Augenmerk auf die Verkehrszustände richten, die vom Fahrer unterschätzt werden, bzw. die von Dynamik geprägt sind. Das Fahrerverhalten orientiert sich letztendlich an den dem Fahrer direkt umgebenden Fahrzeugen und deren Verhalten, ganz egal, wie viele Fahrzeuge sonst noch vorhanden sind. Mehr Verkehrsbewegung führt unabhängig vom Verkehrszustand zu kritischerem Verhalten. Da auch die Fahrer selbst nur 5 Verkehrszustände unterscheiden, wäre eine auf dem momentanen Stand der Sensortechnik beruhende gröbere Einteilung der Verkehrsdichte akzeptabel um FAS basierte Unterstützung anzubieten.

5 Empfehlungen für adaptive Fahrerassistenz

Aus den Ergebnissen der Fahrsimulatorstudie wird der unterschiedliche Bedarf an Assistenz in Abhängigkeit des Verkehrszustandes für die Situation Autobahnauffahrt abgeleitet. Anhand der Art der Fahrfehler, die die Probanden im Fahrsimulator bei den unterschiedlichen Verkehrszuständen begehen, und deren Häufigkeit lässt sich beschreiben, auf welche Weise der Fahrer am sinnvollsten unterstützt werden sollte.

Hierzu wird zunächst überprüft, welche Assistenzsysteme generell für die Anwendung an einer Autobahnauffahrt in Frage kommen. Im nächsten Schritt werden diese anhand der Phasen des Auffahrens klassifiziert, bei denen sie den Fahrer unterstützen können. Die hierbei betrachteten Phasen sind:

- Auffahrt
- Beschleunigungsstreifen
- Lückensuche
- Einfädeln

Nach der Klassifizierung werden jedem Assistenzsystem die Fahrfehler zugeordnet, die von diesem kompensiert werden könnten. Im letzten Schritt findet dann der Abgleich mit den Ergebnissen der Fahrsimulatoruntersuchung statt mit dem Fokus

auf die Fragestellung, bei welchen Verkehrszuständen diese Fahrfehler vermehrt auftreten.

Die hierbei betrachteten Fahrerassistenzsysteme und die Beschreibung der Fahrfehler, die mit diesen kompensiert werden könnten, sind nachfolgend aufgeführt:

- Geschwindigkeitsassistent (Informationssystem/autonome Längsführung)
 - Wahl der falschen Geschwindigkeit auf dem Beschleunigungsstreifen
- Lückenfinder und –bewerter
 - Wahl einer ungeeigneten Lücke zum Einfädeln
 - Nicht-Finden einer passenden Lücke zum Einfädeln
- Kooperationsassistent
 - Keine ausreichende Lücke vorhanden zum Einfädeln
- Blind Spot Detection (Überwachung des Raumes seitlich und hinter dem Fahrzeug)
 - Übersehen eines Fahrzeugs auf der Nachbarspur
- Spurwechselassistent (Warnsystem)
 - Falsche Situationsbewertung (z. B. falsche Geschwindigkeitseinschätzung der sich von hinten nähernden Fahrzeuge)
 - Übersehen eines Fahrzeugs auf der Nachbarspur
- Kollisionswarnung (Überwachung des Raumes vor dem Fahrzeug)
 - Übersehen eines Fahrzeugs auf der eigenen Spur bzw. Nachbarspur während des Einfädelns
- Notbremsassistent
 - Übersehen eines Fahrzeugs auf der eigenen Spur bzw. Nachbarspur während des Einfädelns
 - Fehlende Reaktion auf das Vorderfahrzeug auf der eigenen Spur bzw. Nachbarspur während des Einfädelns
- Spurverlassenswarnung
 - Unbeabsichtigtes Spurverlassen während des Einfädelns
- Spurhalteassistent

- Unbeabsichtigtes Spurverlassen während des Einfädelns
- Autonomer Spurwechselassistent
 - Generelle Spurwechselfehler von der Informationsaufnahme bis zur Umsetzung des Spurwechsels

Der Verkehrszustand synchron inhomogener Verkehr beispielsweise ist durch eine variierende Verkehrsdichte aufgrund von Dichtewellen gekennzeichnet. D.h. zum einen können die Fahrzeuge voraus unerwartet bremsen, zum anderen sind die Lücken zum Einfädeln sehr inhomogen verteilt, so dass es teilweise sehr schwierig ist, eine passende Lücke zu finden. Bei diesem Verkehrszustand treten auch die meisten Fahrfehler und Fehlertypen auf. Sowohl der Fahrfehler „Gs2 unangepasste Beschleunigung, Verlangsamung zu spät“ als auch der Fehler „Gf2 Ausbremsen des Hintermanns“ treten beim Verkehrszustand synchron inhomogener Verkehr (6) am häufigsten auf. Dies wird durch die wenigen oder teils nicht vorhandenen Lücken zum Einfädeln bedingt. Teilweise sind zwar ausreichend große Lücken vorhanden, diese liegen aber entweder etwas weiter stromabwärts oder aufwärts und werden von vielen Probanden nicht gesehen.

Da während des Einfädelns der Fahrer seine Aufmerksamkeit auf den nachfolgenden, den seitlichen und den vorausfahrenden Verkehr lenken sollte, übersieht er häufig einige wesentliche Dinge, insbesondere, wenn sich die Verkehrssituation unerwartet und schnell ändert (z.B. aufgrund von Dichtewelle). Aus diesem Grund wird auch sehr häufig zu nah auf das Vorderfahrzeug aufgefahren, wie Abb. 17 zeigt. Auch der Fehlertyp „Fb2 Spurwechselfehler: zögerlich, übervorsichtig, uneindeutig, verspätet, Abbruch“ tritt besonders bei diesem Verkehrszustand vermehrt auf. Durch die unübersichtliche und sich unerwartet ändernde Verkehrssituation sind viele Probanden teilweise überfordert und bräuchten Unterstützung zur Bewältigung des Fahrmanövers.

Ab2 Längsabstand außerorts zu gering (beim Einfädeln)

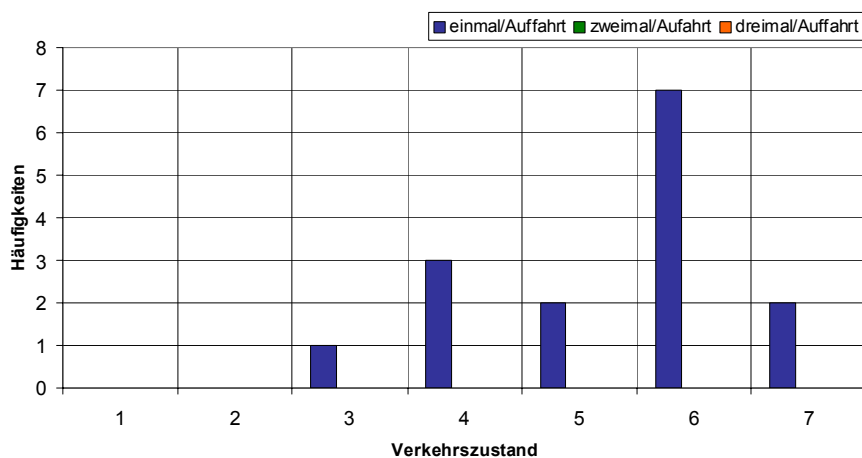


Abb. 17: Fahrfehler Ab2 bei verschiedenen Verkehrszuständen.

Frequency of driving mistake Ab2 in dependency of the current traffic condition.

Aus diesem Grund gibt es zahlreiche Assistenzsysteme, die den Fahrer bei diesem Verkehrszustand unterstützen können:

- Kollisionswarnung: Der Verkehrszustand synchron inhomogener Verkehr zeichnet sich dadurch aus, dass die Verkehrsgeschwindigkeit sich plötzlich ändern kann (z.B. plötzliches Bremsen der Vorderfahrzeuge aufgrund von Dichtewellen). Gleichzeitig muss der Fahrer sich sehr stark auf die Beobachtung des nachfolgenden Verkehrs auf der Nachbarspur konzentrieren. Die Gefahr, dabei ein Abbremsen des Vorderfahrzeugs zu übersehen, ist sehr groß.
- Notbremsassistent: Auch bei diesem Verkehrszustand besteht aufgrund der hohen Beanspruchung die Gefahr, dass bei der Aktivierung einer Kollisionswarnung der Fahrer nach vorne absichert und seine anderen Fahraufgaben vernachlässigt. Deswegen könnte ein autonomes bzw. intervenierendes System hilfreicher sein.
- Blind Spot Detection: Aufgrund der teilweise noch großen Lücken besteht weiterhin die Gefahr, ein Fahrzeug auf der Nachbarspur zu übersehen.
- Lückensucher und –bewerter: Die Lückengröße und –verteilung ist bei diesem Verkehrszustand sehr inhomogen. Hinweise auf passende Lücken zum Einfädeln stromabwärts oder -aufwärts würden dem Fahrer seine Fahraufgabe sehr erleichtern.
- Spurhalteassistent: In den Fahrsimulatoruntersuchungen wird bei diesem Verkehrszustand oft ein geringer Seitenabstand zu den Nachbarfahrzeugen eingestellt. Gleichzeitig sinkt die Spurführungsqualität des Fahrers. Die Spurverlassenwarnung ist für diesen Verkehrszustand nicht hilfreich. Im Gegenteil, das System könnte zu einer Verschlechterung der Situation führen, da eine Warnung lediglich die Belastung noch zusätzlich erhöhen würde.
- Autonomer Spurwechselassistent: Insgesamt scheint dieser Verkehrszustand der schwierigste zu sein, bei dem am häufigsten Fahrfehler (insbesondere während des Einfädelns) passieren. Eine autonome Durchführung des Einfädelvorgangs wäre daher sinnvoll.

Insgesamt zeigt sich, dass in Abhängigkeit vom Verkehrszustand deutlich unterschiedliche Fehlertypen mit unterschiedlicher Häufigkeit auftreten. Das Konzept des Virtuellen Institutes ist es, für jeden Verkehrszustand die bedarfsgerechte Assistenzfunktion und –unterstützung aufzuzeigen.

Im nächsten Schritt sollen diese Assistenzfunktionen realisiert werden und soweit möglich von den Fahrern in der Fahrsimulation und im realen Verkehr bewertet werden.

6 Literatur

- [1] BULD, S.; HOFFMANN, S.; TOTZKE, I. & KRÜGER, H.-P.
Autobahnauffahrten in Abhängigkeit von Verkehrsdichte und –bewegung: Studie durchgeführt im Rahmen des Virtuellen Instituts „Humane Automation“
Interner Bericht, IZVW Würzburg, 2006

- [2] N.N.
Webseite der Bundesanstalt für Straßenwesen
www.bast.de

- [3] KIM, Y.; KELLER, H.
Zur Dynamik zwischen Verkehrszuständen im Fundamentaldiagramm
Straßenverkehrstechnik, S.433-442, 9/2001

- [4] N.N.
Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln
Köln, 2001

- [5] KERNER, B. S; KONHÄUSER, P.
Cluster effect in initially homogeneous traffic flow
Physical Review E, Band 48, Nr. 5, S. 2335–2338
The American Physical Society, 1993

- [6] HELBING, D.; NAGEL, K.
Verkehrsdynamik und urbane Systeme
Methoden der Nichtlinearen Dynamik und der Statistischen Physik leisten wichtige Beiträge zum Verständnis von Verkehrsphänomenen
Physik Journal, 2 (2003) Nr. 5, 2005

- [7] DIEKAMP, R.
Entwicklung eines fahrzeugorientierten Verkehrssimulationsprogramms
Dissertation am Institut für Kraftfahrwesen der RWTH Aachen
Aachen, 1995

- [8] LUDMANN, J.
Beeinflussung des Verkehrsablaufs auf Straßen - Analyse mit dem fahrzeugorientierten Verkehrssimulationsprogramm PELOPS
Dissertation am Institut für Kraftfahrwesen der RWTH Aachen
Aachen, 1998

- [9] BRENNER-HARTMANN, J.
Durchführung standardisierter Verhaltensbeobachtungen im Rahmen der medizinisch-psychologischen Untersuchung (MPU)
38.BDP Kongress für Verkehrspsychologie, Regensburg, 2002
http://bdp-verkehr.de/backstage2/ver/documentpool/kongress/brenner_01.pdf
(14.07.2006)