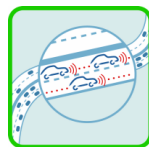


Forschungsinitiative INVENT

Intelligenter Verkehr und
Nutzergerechte Technik

Schlussbericht

VM2010



**Beitrag des
Zuwendungsempfängers:**

**VOLKSWAGEN AG
Brieffach 011/1895
38436 Wolfsburg**

zu dem Teilprojekt:

VLA – Verkehrsleistungsassistentz

Laufzeit:

1. Juli 2001 - 30. September 2005

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 19P1071F gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

gefördert vom



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Wolfsburg, 28. Februar 2006



1	Einleitung.....	2
1.1	Verkehrsleistungsassistentz bei der VOLKSWAGEN AG - Kurzdarstellung.....	4
1.2	Aufgabenstellung	4
1.3	Voraussetzungen für die erfolgreiche Bearbeitung.....	5
1.4	Planung und Ablauf	5
1.5	Ausgangspunkt.....	6
1.6	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	7
2	Forschungsergebnisse im Detail	9
2.1	Methoden und Verfahrensentwicklung.....	9
2.1.1	Analyse und Modellierung relevanter Verkehrssituationen.....	9
2.1.2	Spezifikation von Aufgaben der Verkehrsleistungsassistentz.....	11
2.1.3	Strategien zur Steigerung der Verkehrsleistung	13
2.1.4	Die integrierte Verkehrssimulation.....	17
2.1.5	Potentialabschätzung und Bewertung von VLA-Konzepten	18
2.1.6	Verkehrliche Wirksamkeit der VLA-Fahrstrategie	20
2.2	Informationsbereitstellung.....	30
2.3	Nutzerakzeptanz und Einführungsstrategie	31
2.4	Demonstratoren.....	32
2.4.1	Verkehrssimulation	32
2.4.2	Implementierung und Erprobung im Fahrzeug	34
2.4.3	Kurzfristige Anpassung des Fahrverhaltens an ein Verkehrsereignis.....	35
2.5	Voraussichtlicher Nutzen und die Verwertbarkeit des Ergebnisses.....	36
2.6	Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen.....	37
2.7	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	37



1 Einleitung

Nach wie vor gehören Verkehr und Transport zu den wichtigsten Wirtschaftsfaktoren. Sie sind die Grundlage von Wohlstand und Fortschritt und sie sichern unsere Wettbewerbsfähigkeit. Mobil zu sein ist ein wesentlicher Bestandteil von Lebensqualität, Selbstverwirklichung und persönlicher Freiheit. Gleichzeitig war jedoch das steigende Verkehrsaufkommen in den vergangenen Jahrzehnten von negativen Folgen wie Unfällen und Staus begleitet. Nur durch den Einsatz innovativer Technologien besteht die Chance, diese Probleme nachhaltig in den Griff zu bekommen und den Verkehr der Zukunft auch bei weiterem Wachstum sicherer und effizienter zu machen. Einen Beitrag zu diesem Ziel will die **Forschungsinitiative INVENT** (Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik) leisten. Dazu arbeiten zahlreiche Unternehmen zusammen in den drei in Abbildung 1 dargestellten Projekten Fahrerassistenz, Aktive Sicherheit, Verkehrsmanagement 2010 und Verkehrsmanagement in Transport und Logistik.

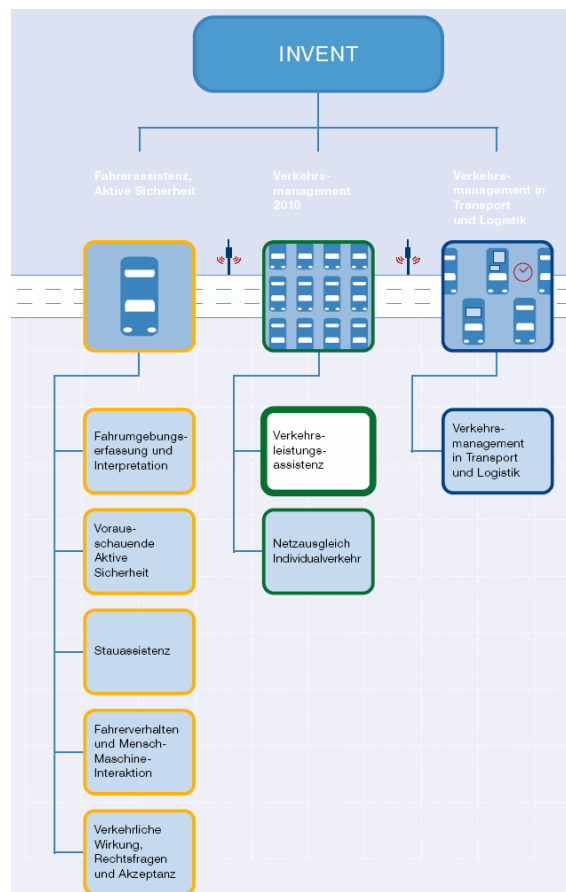


Abbildung 1: Inhaltliche Struktur des Projektes INVENT



Das Ziel von **Verkehrsmanagement 2010** (VM2010) ist es, zukünftige Entwicklungen in der Fahrzeug- und Kommunikationstechnologie und insbesondere auch im Bereich der Fahrerassistenzsysteme aus dem Projekt Fahrerassistenz, Aktive Sicherheit zur effizienteren Nutzung der Verkehrsinfrastruktur und zur Steigerung der Leistungsfähigkeit des Straßennetzes einzusetzen. In diesem Rahmen verfolgt das Teilprojekt Verkehrsleistungsassistenz (VLA) als Hauptziel die Optimierung des Verkehrsflusses.

Der folgende Bericht gibt einen umfassenden Einblick in die Arbeit der VOLKSWAGEN AG innerhalb des Teilprojektes **Verkehrsleistungsassistenz** (VLA). Nach einer kurzen Darstellung der Rahmenbedingungen und des Projektablaufes in Kapitel 2 folgen detaillierte Ergebnisse der Untersuchungen sowie der Nutzen und die Wertbarkeit der Ergebnisse.



1.1 Verkehrsleistungsassistenz bei der VOLKSWAGEN AG - Kurzdarstellung

1.2 Aufgabenstellung

Ziel der VOLKSWAGEN AG im Teilprojekt Verkehrsleistungsassistenz (VLA) des Forschungsprojektes INVENT-VM2010 war es, neuartige Lösungsansätze und Strategien zur Erhöhung der Verkehrsleistungsfähigkeit insbesondere auf mehrspurigen Richtungsfahrbahnen zu entwickeln und die Funktionsweise sowie das Wirkungspotential derartiger Systeme zu demonstrieren.

Der Innovationscharakter ergibt sich aus der differenzierten Betrachtung von Fahrzeugfolgevorgängen und ihrem wesentlichen Einfluss auf die Dynamik ganzer Verkehrssysteme. Außerdem beruhen die Lösungsansätze zu einem Großteil darauf, dass verkehrlich relevante Daten von Fahrzeugen erfasst und anderen Fahrzeugen mit Hilfe einer Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation zur Verfügung gestellt werden können. Dies eröffnet die Möglichkeit, verkehrlich relevante Informationen nicht nur aus der unmittelbaren Umgebung, sondern aus dem weiteren Umfeld für das eigene Fahrverhalten zu nutzen und den Verkehrsablauf dadurch insgesamt zu verbessern, indem Fahrzeuge moderierend oder gar kooperativ im Verkehrsgeschehen agieren.

Ausgangspunkt der Arbeiten waren zunächst Analysen zu den Störungsursachen und -auswirkungen auf deutschen Autobahnen und daraus abgeleitete Ansatzpunkte für Aufgaben einer Verkehrsleistungsassistenz, die fahrzeuggestützt gelöst werden können. Mit Hilfe geeigneter verkehrstheoretischer Modelle zur Nachbildung von Verkehrsabläufen auf Basis von Einzelfahrzeugen wurden dann Lösungsansätze untersucht und deren individuelle und kollektive Wirkungen simuliert. Hierfür wurden technische Umsetzungsaspekte zunächst als machbar angenommen und in einem zweiten Schritt aus den als positiv bewerteten Lösungsansätzen als Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme formuliert. Schließlich wurde sowohl die prinzipielle Funktionsweise der Assistenzsysteme als auch deren individuelle bzw. verkehrliche Wirksamkeit aufgezeigt. Hierfür wurden Demonstratoren entwickelt, die einerseits aus Sicht des Fahrers Funktion und Interaktion mit dem Assistenzsystem veranschaulichen und andererseits über Simulationen mit entsprechenden 2D-/3D-Animationen die verkehrlichen Auswirkungen transparent machen, die der einzelne Fahrer nur mittelbar erfahren kann, wenn beispielsweise ein auftretender Stau durch ein Assistenz-gestütztes Fahren vermieden oder verringert werden konnte.

Zusätzlich zu diesem Aufgabenumfang wurde ein im Rahmen der Untersuchungen entwickelter Fahrzeug-Längsregler im Fahrzeug implementiert und neben der ver-



kehrzustandsabhängigen und verkehrsoptimierten Fahrweise auch hinsichtlich Sicherheit und Komfort untersucht.

1.3 Voraussetzungen für die erfolgreiche Bearbeitung

Die Bearbeitung des Teilprojektes Verkehrsleistungsassistenz innerhalb des Forschungsprojektes INVENT-VM2010 konnte bei der VOLKSWAGEN AG erfolgreich durchgeführt werden, weil wesentliche organisatorische und wissenschaftlich-technische Voraussetzungen erfüllt waren.

Eine Voraussetzung bestand zunächst in der Absicht, auch als Automobilhersteller langfristig an der Sicherung der individuellen Mobilität jedes einzelnen Verkehrsteilnehmers mitzuwirken. Das in den letzten Jahren gestiegene und auch in den kommenden Jahren steigende Verkehrsaufkommen im Straßenverkehr und die nicht in gleichem Umfang wachsende Verkehrsinfrastruktur werden zu Kapazitätsengpässen auf hoch frequentierten Straßen führen. Insbesondere der Anstieg des Güterverkehrsaufkommen, der u. a. durch den Globalisierungsprozess wie bspw. der EU-Ost-Erweiterung einhergeht, bringt eine Reihe von Folgeerscheinungen mit sich. So führt bspw. die erhöhte Belastung der Straßen zu häufiger notwendig werdenden Instandsetzungsmaßnahmen, die wiederum in Form von Baustellen den Verkehrsablauf beeinträchtigen.

An dieser Stelle sind neue Formen eines intelligenten und flexiblen Verkehrsmanagements gefordert. Voraussetzung dafür ist die Verfügbarkeit von Technologien, die sowohl die räumliche als auch die zeitliche präzise Auflösung von Verkehrsinformationen und Verhaltensanforderung der Verkehrsteilnehmer ermöglicht. Bestandteile dieser Technologien sind im Ansatz schon verfügbar. So spielt z. B. für die automatische Beeinflussung des Fahrzeugfolgeverhaltens die Adaptive Abstandsregelung (ACC) eine wichtige Rolle, die bereits heute als Sonderausstattung für PKW und LKW auf dem Markt erhältlich ist.

Aus organisatorischer Sicht war die Unterstützung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung für das Projekt von großer Bedeutung. Ebenso hilfreich waren die Kooperationsbereitschaft und die konstruktive Zusammenarbeit der Projektpartner im Teilprojekt INVENT-VLA. Aus Sicht von VOLKSWAGEN AG ist zusätzlich die enge Zusammenarbeit mit dem Institut für Wirtschaft und Verkehr der Technischen Universität Dresden und die Zusammenarbeit mit der IAV GmbH zu nennen.

1.4 Planung und Ablauf

Neben der Projektkoordination (AP 1000) zur Dokumentation und Koordination der Arbeit, die sich über die gesamte Projektlaufzeit erstreckt, hat die VOLKSWAGEN AG an einer Reihe von Arbeitspaketen mitgewirkt. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick der Beteiligung der VOLKSWAGEN AG an den einzelnen Projektbestandteilen inklusive des zeitlichen Ablaufs.



Zu Beginn der Arbeit wurde zunächst die Entwicklung der methodischen Vorgehensweise und der anzuwendenden Verfahren (AP2000) durchgeführt, die unter anderem eine Analyse relevanter Verkehrssituationen, Fahrstrategien zur Steigerung des Verkehrsflusses und eine Potentialabschätzung der Maßnahmen vorsah. In einem weiteren Arbeitspaket mit dem Titel Informationsbereitstellung (AP3000) wurden die Anforderungen an Fahrzeugsensorik und die Verkehrsdatenerfassung spezifiziert. Neben der technischen Umsetzung war die VOLKSWAGEN AG auch an Untersuchungen zur Nutzerakzeptanz und Einführungsstrategie (AP5000) beteiligt, bei denen die Bedienbarkeit und die Realisierungschancen betrachtet und diskutiert wurden.

AP	2001	2002	2003	2004	2005
1000 Projektmanagement					M11
2000 Methoden und Verfahren	M1			M5	
3000 Informationsbereitstellung	M2		M7		
4000 Mobile Kommunikation		M3		M8 M9	
5000 Nutzerakzeptanz/Einführung				M6	
6000 Demonstratoren			M4		

Tabelle 1: Projekt im zeitlichen Verlauf mit Meilensteinen

Schließlich beinhaltet die Erarbeitung der Demonstratoren (AP6000) die Untersuchung der Verkehrsleistungsassistenz in den Stufen 1-3, die u. a. die Dämpfung von Stop-and-Go-Wellen, die Verkehrsflussstabilisierung und die -auflösung von Staus sowie die Steigerung der Abflussrate umfassten.

1.5 Ausgangspunkt

Zum einen existiert heute das Wissen, dass das Fahrverhalten einzelner Verkehrsteilnehmer einen wesentlichen Einfluss auf den konkreten Verkehrsablauf insbesondere in kritischen Verkehrssituationen hat und zum anderen sind bereits heute Technologien verfügbar, die in Form von Fahrerassistenzsystemen die Möglichkeit bieten, den Fahrer während der Fahrt zu unterstützen und Lücken in Wissen und Fähigkeiten des Fahrers zu ergänzen. Diese beiden Aspekte dienen als Ausgangspunkt der wissenschaftlich-technischen Betrachtung.

Aus empirischen Untersuchungen und Simulationen von Verkehrssystemen sind in den letzten Jahrzehnten eine Reihe von Theorien und Modellen über das Folgeverhalten von Fahrzeugen und deren Einfluss auf das Verkehrsgeschehen entwickelt worden. Es zeigt sich, dass Kapazitätsengpässe auf den Straßen gezielt durch Beeinflussung des kollektiven und individuellen Verhaltens reduziert werden können



(siehe Verkehrsbeeinflussungsanlagen) und damit der Verkehrsfluss aufrechterhalten werden kann.

Die Zahl der technischen Möglichkeiten, die zur Realisierung solcher Systeme in Betracht kommen, steigt ständig an. Beispielsweise bietet die bereits heute verfügbare Adaptive Geschwindigkeitsregelanlage einen günstigen Ausgangspunkt, um mit hoch entwickelter Sensorik und Aktuatorik Fahrzeug-Folgevorgänge sicher und komfortabel, und in Zukunft sicherlich auch je nach Verkehrszustand optimal zu gestalten. Des Weiteren bietet sich auch die Einbeziehung von mobilen Kommunikationssystemen an, um die Weitergabe von aktuellen und präzisen Verkehrsinformationen an andere Verkehrsteilnehmer zu realisieren. In ersten Ansätzen stehen bereits heute schon Systeme zur Verfügung, die in ihrer Funktionalität und ihren Eigenschaften an die Anforderungen im Verkehr angepasst werden müssen.

Ziel ist es, das Wissen um die genannten Zusammenhänge und die existierenden Technologien sinnvoll zu verknüpfen und weiterzuentwickeln, um Anwendungen für eine nachhaltige und zukunftsfähige Mobilität zu generieren.

1.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Teilprojekt Verkehrsleistungsassistenz innerhalb des Forschungsprojektes INVENT-VM2010 erfolgte durch die VOLKSWAGEN AG zum einen in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern und zum anderen in Zusammenarbeit mit Institutionen, die im Namen der VOLKSWAGEN AG als Unterauftragnehmer aufgetreten sind und einen wesentlichen Beitrag zur inhaltlichen Bearbeitung geleistet haben.

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern, zu denen die

- Daimler-Chrysler AG, die
- BMW AG, die
- MAN AG, die
- Robert-Bosch GmbH und die
- VOLKSWAGEN AG

zählen, wurden die Aufgaben koordiniert und bearbeitet. Innerhalb von regelmäßigen Workshops wurden Ergebnisse ausgetauscht und über das weitere Vorgehen beraten. Außerdem wurden gemeinsame Applikationen erarbeitet, die gegen Ende der Projektlaufzeit in gemeinsamen Feldversuchen hinsichtlich ihrer Funktionsfähigkeit demonstriert wurden.

Die Bearbeitung der Aufgaben der VOLKSWAGEN AG erfolgte teilweise im Rahmen der Vergabe von Unteraufträgen an weitere Institutionen, u. a. der

- Technischen Universität Dresden, Institut für Wirtschaft und Verkehr und der
- IAV GmbH.



Die umfangreichen Arbeiten an der TU Dresden bestanden im Wesentlichen in der Modellierung und der Simulation der verkehrlichen Aspekte, während die Arbeit der IAV GmbH in der Umsetzung der Ergebnisse im realen Fahrzeug und die Durchführung von Fahrversuchen bestand.



2 Forschungsergebnisse im Detail

Im INVENT-Teilprojekt VM2010 wurden zukünftige Entwicklungsszenarien in der Fahrzeugtechnik und Kommunikationstechnologie untersucht. Im Rahmen des Teilprojektes Verkehrsleistungsassistenz (VLA) wurden Möglichkeiten von Fahrerassistenzsystemen im Hinblick auf die Optimierung des Verkehrsflusses betrachtet. Dieser Bericht stellt die Forschungsergebnisse der VOLKSWAGEN AG vor.

2.1 Methoden und Verfahrensentwicklung

Um Konzepte zur Verkehrsleistungssteigerung entwickeln und deren Potential abschätzen zu können, ist in einem ersten Schritt die Analyse und Modellierung häufig auftretender und somit damit relevanter Verkehrssituationen notwendig. Anschließend werden die Strategien zur Verkehrsleistungssteigerung festgelegt und mögliche Fahrerassistenzsysteme spezifiziert.

2.1.1 Analyse und Modellierung relevanter Verkehrssituationen

Im Rahmen der Arbeit wurden Verkehrsstörungen auf der BAB A5 nördlich von Frankfurt untersucht. Mit Hilfe einer neu entwickelten Routine zur Datenanalyse und durch die Verwendung der Geschwindigkeit als direkt gemessene Größe anstelle der errechneten Verkehrsdichte ist ein Optimum an Deutlichkeit in der raum-zeitlichen Darstellung erreicht worden. Dabei wird auch dem subjektiven Empfinden der Fahrer Rechnung getragen, welche eine Verkehrsstörung als einen Zustand geringer Geschwindigkeit wahrnehmen. Überdies sind dadurch auch Phänomene wie der Bumerang-Effekt oder das Auftreten von HCT-Zuständen empirisch bestätigt worden. Dies wurde durch die verwendete Verkehrssimulationen vorhergesagt, während sie durch andere Modellierungsansätze nicht reproduziert werden konnte.

Das theoretische Konzept eines Phasendiagramms für Stauformen, welches begründet ist durch die verschiedenen Verkehrszustände, die sich bei Simulationen einer Hauptstrecke mit Zufluss bzw. Engpass zeigen, erweist sich als ausgesprochen nützlich für die Klassifikation und das Verständnis des realen Verkehrszustände. Die Klassifikation ergibt folgende dominierende Stauformen:

- Homogeneous Congested Traffic (HCT), d. h. homogener zähfließender Verkehr,



- Oscillating Congested Traffic (OCT), d. h. oszillierender zähfließender Verkehr,
- Triggered Stop-and-Go Traffic (TSG), d. h. induzierte Stop-and-Go-Wellen,
- Moving Localized Cluster (MLC), d. h. einzelne stromaufwärts laufende Staus
- Pinned Localized Cluster (PLC), ortsfeste Verkehrsverdichtungen an den Kapazitätsengpässen

Die beobachteten Verkehrsstörungen lassen sich trotz der Heterogenität der Fahrzeuge nahezu vollständig in die für idealisierte Bedingungen bei der Simulation auftretenden Stauklassen einordnen. Von eng aufeinander folgenden Engpässen dominiert meist einer, an welchem sich dann ggf. ein Stau bildet. Für das Verkehrsgeschehen an der Anschlussstelle Friedberg auf der Autobahn A5 Richtung Frankfurt wurde ein umfassendes empirisches Phasendiagramm mit über 70 Verkehrszuständen erstellt. Abbildung 2 zeigt eine Auswahl dieser Verkehrssituationen und deren Zuordnung in das Phasendiagramm.

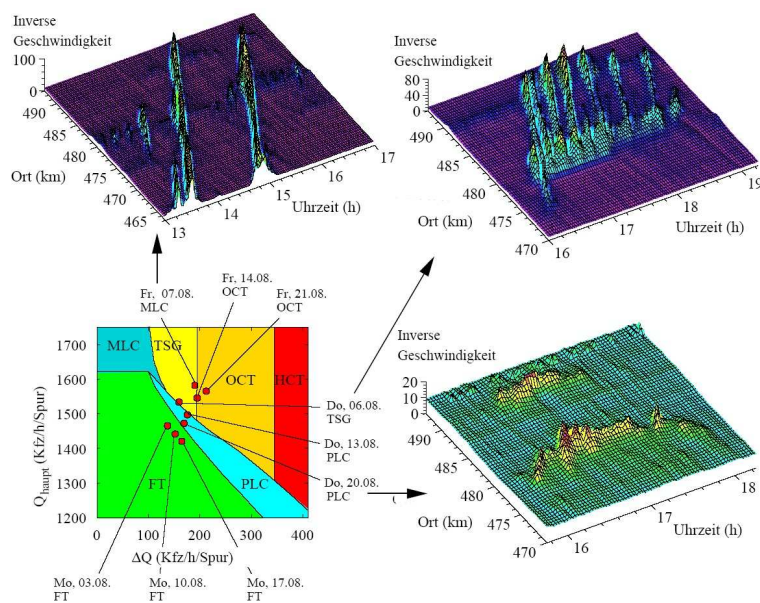


Abbildung 2: Empirisch ermittelte Verkehrsstörungen und deren Zuordnung im Phasendiagramm

Die Lage der einzelnen Stauformen entspricht größtenteils den theoretisch vorhergesagten Positionen. Der multistabile Bereich, in welchem freier Verkehr sowie mehrere Formen von gestörtem Verkehr auftreten, ist allerdings wesentlich größer als in der Theorie. Das liegt zum einen an der generellen Metastabilität des Verkehrs: Der Verkehrszustand hängt von der Historie und von der Größe der Stau auslösenden Verkehrsinhomogenität ab, welche für den betrachteten Engpass nicht konstant sind. Außerdem spielen die starke Streuung der Flussdaten eine Rolle. Dieses "Wide Scattering" genannte Phänomen konnte auf die starke Variation der mittleren Nettozeitlücken im behinderten Verkehr zurückgeführt werden, deren Ursache in der Heterogenität der Kraftfahrzeuge und im unterschiedlichen Fahrerverhalten liegt.

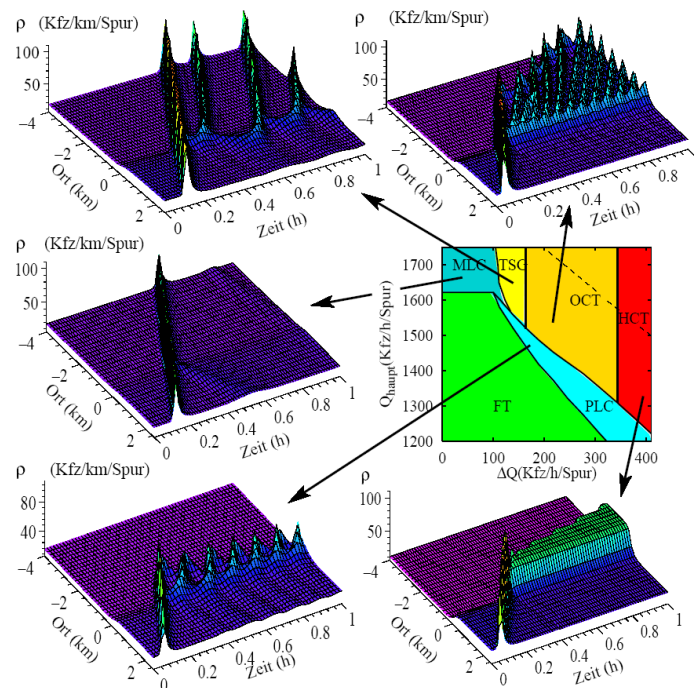


Abbildung 3: Unterschiedliche Verkehrszustände nach Störung im Bereich einer Zufahrt (am Ort = 0 km) simuliert mit dem Intelligent Driver Model (IDM)

Unter Verwendung des Fahrzeugfolgemedells „Intelligent Driver Model“ (IDM)¹ wurden die in der Realität beobachteten Verkehrsstörungen nachgebildet. Nach einer Kalibrierung des Modells wurden die Verkehrszustände, die in erster Linie von der Art der Störung und den Verkehrsströmen auf der Hauptfahrbahn und ggf. auf der Zufahrt abhängig sind, simuliert. Abbildung 3 zeigt die Simulation der Verkehrszustände unter den aus der Realität ermittelten Randbedingungen und deren Zuordnung in die Bereiche des Phasendiagramms.

2.1.2 Spezifikation von Aufgaben der Verkehrsleistungsassistenz

Gemäß den Ergebnissen aus der Analyse und der Modellierung relevanter Verkehrssituationen ist die Erhöhung des Stauausflusses (d. h. die Erhöhung des Verkehrsdurchsatzes bei zusammengebrochenen Verkehr) und die Verhinderung bzw. Verzögerung der Verkehrszusammenbrüche an Engpässen (d. h. die Erhöhung des Verkehrsdurchsatzes im Bereich noch nicht zusammengebrochenen Verkehrs) für die Erhöhung der Verkehrsleistung essentiell. Indirekt trägt auch die Steigerung der Verkehrssicherheit durch Verringerung der Unfallzahlen zum besseren Verkehrsfluss bei.

¹ Treiber, M.; Hennecke, A.; Helbing, D.: Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. In: Phys. Rev. E 62 (2000), S. 1805-1824



Die Erhöhung des Stauausflusses kann man generell durch Begrenzung der Folgezeitlücken zum Vorderfahrzeug mit zügiger Beschleunigung sicherstellen. Der Staukopf lässt sich durch signifikante Beschleunigung aus geringem Geschwindigkeitsbereich detektieren. Für eine Automatisierung dieser Strategie im Rahmen eines VLA-Systems ist eine Detektion des Abstands zum Vorderfahrzeug erforderlich. Aufgrund der Tatsache, dass der Staukopf in 80 Prozent der Fälle an einem ortfesten Engpass liegt, lassen sich durch GPS-Ortsbestimmung unter Zuhilfenahme einer Streckendatenbank schon potentielle Staukopfpositionen erkennen. Eine vollständige Bestimmung von Staukopfpositionen ist durch Fahrzeuge im Verkehr möglich, welche ihre Information per Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation an andere ausgestattete Fahrzeuge übermitteln. Die Verhinderung bzw. Verzögerung von Verkehrszusammenbrüchen an Engpässen lässt sich durch Erhöhung der dynamischen Kapazität an den Engpässen erreichen. Dies kann durch lokale Reduzierung der Folgezeiten geschehen, wobei dafür der Ort des Engpasses bekannt sein muss. Auch hier ist für eine Automatisierung der Detektion des Abstands zum Vorderfahrzeug unbedingt notwendig.

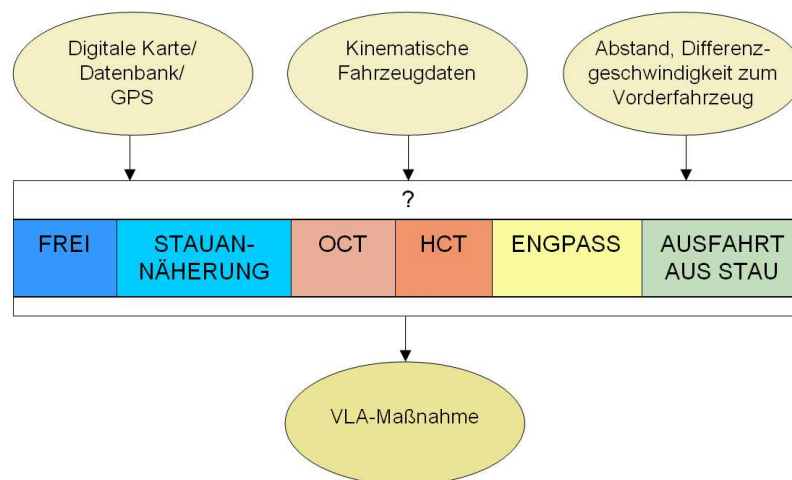


Abbildung 4: Identifikation der Verkehrszustände mit Hilfe von bekannten Eingangsgrößen

Im Fall von kapazitätsmindernden Verflechtungsvorgängen kann eine Spurwechselassistentz Verbesserungen bringen. In jedem Fall, auch bei einfachen Empfehlungen oder Warnhinweisen an den Fahrer, ist dazu eine Umfelderkennung der Fahrzeugumgebung unerlässlich. Für einen kooperativen Spurwechsel, z. B. das Schaffen von Lücken, sind zudem eine Kommunikation zwischen den Fahrzeugen und ein entsprechend hoher Ausstattungsgrad mit der dazugehörigen Technik nötig.

Die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur kann der Verkehrsleistung dienen, indem Detektoren den aktuellen Verkehrszustand übermitteln. Die Information kann dabei so behandelt und weiterkommuniziert werden, wie die Information von einem „mobilen Detektor“, d. h. von einem ausgestatteten Fahrzeug.



2.1.3 Strategien zur Steigerung der Verkehrsleistung

Ein wesentlicher Schritt innerhalb der Forschungsarbeiten behandelt grundlegende Modellerweiterungen, welche die Voraussetzungen für eine Umsetzung und quantitative Simulation der genannten Strategien darstellen. Danach werden auf Basis der empirischen Verkehrsanalyse sowie der Spezifikation von Verkehrsleistungsassistentenaufgaben aus den vorangegangenen Arbeitsschritten geeignete Strategien zur Verkehrsleistungsassistenz (VLA) entwickelt.

Zunächst wurde die Constant-Acceleration Heuristics (CAH) entwickelt, die eine Erweiterung des Intelligent-Driver Model (IDM) darstellt. Sie sorgt für eine „entspannte“ Fahrcharakteristik in Fällen plötzlicher Abstandsverringerung (z. B. durch einscherende Fahrzeuge), in denen keine akute Unfallgefahr besteht. Sie reduziert in solchen Fällen die Bremsverzögerung gegenüber der Standard-IDM-Verzögerung. Eine weitere Komponente begrenzt darüber hinaus den Ruck. Anschließend folgt eine Untersuchung über heterogene Fahrzeugparameter. Für eine realistische Simulation ist eine realistische Verteilung der Parameter wie Wunschgeschwindigkeit und Wunschfolgezeit sowie des Beschleunigungsvermögens notwendig. Darüber hinaus beschreibt die verbesserte Modellierung von Spurwechseln mit Hilfe einer Longitudinal-Transversal-Interaktion, welche hier anhand eines Spursperrungsszenarios untersucht wird. Sie stellt ebenfalls eine Voraussetzung für eine realistische quantitative Simulation dar. Schließlich werden nach einer Einführung von „VLA innerhalb des IDM“ Strategien behandelt, die auf Basis von bordautonom verfügbaren Daten und GPS-Daten in Verbindung mit einer digitalen Straßenkarte arbeiten. und zusätzlich durch Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation und Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation erweitert werden können.

Einige verkehrliche Situationen, wie das plötzliche Einscheren eines Fahrzeuges oder ein Spurwechsel liegen häufig im Grenzbereich des normalen Folgevorganges. Die daraus resultierende starke Änderung des Abstandes stellt hohe Anforderungen an ein realistisches Fahrzeugfolgemodell:

- die Verkehrssicherheit muss in jeder (physikalisch beherrschbaren) Situation gewährleistet sein,
- Schwingungen (auch gedämpfte) müssen vermieden werden,
- der Verlauf der Beschleunigung sollte so „ruckfrei“ und „mensenähnlich“ wie möglich sein und
- die Longitudinalregelung sollte Kolonnenstabilität gewährleisten.

Konstantes Beschleunigungsverhalten

Um diesen Grenzsituationen eine „panische“ Reaktion des IDM zu vermeiden, wurde die Modellerweiterung „Constant-Acceleration Heuristics“ (CAH) entwickelt, um folgende Verbesserungen zu gewährleisten:

- Wird der gewünschte Abstand aus externen Gründen stark unterschritten, ohne dass eine akute Gefahr besteht, soll das Modell „cooler“, d. h. mit geringeren Bremsverzögerungen reagieren.



- Im Falle abrupter Änderungen in den Input-Größen, soll der Ruck begrenzt werden, sofern keine Gefahr besteht.
- Der Übergang zwischen den Modellkomponenten soll kontinuierlich sein.

Die Untersuchung der Reaktion von Fahrzeugen auf einscherende Fahrzeuge erfolgte unter Verwendung unterschiedlicher Szenarien. Es wurde ein Spektrum von „normalen“ Verkehrssituationen (z. B. geringe Geschwindigkeitsdifferenz, großer Abstand) bis hin zu Extremsituationen (z. B. hohe Geschwindigkeitsdifferenz, geringer Abstand) simuliert. Es zeigt sich, dass selbst in gefährlichen Situationen, wie sie in der Realität durchaus auftreten können, Kollisionen vermieden werden können. Dabei kommen Parameter zum Einsatz, wie sie auch in der Realität ohne weiteres Verwendung finden.

Die Untersuchung der Kolonnenstabilität liefert ähnliche Ergebnisse. Selbst bei Folgeabständen „jenseits des zulässigen Bereichs“ und extremer Bremsverzögerung des ersten Fahrzeuges, kann die Stabilität der Kolonne gewährleistet werden. Abbildung 5 zeigt Reaktion der in der Kolonne fahrenden Fahrzeuge. Es wird deutlich, dass trotz der heftigen Bremsung des Führungsfahrzeuges die Schwingung gedämpft werden kann.

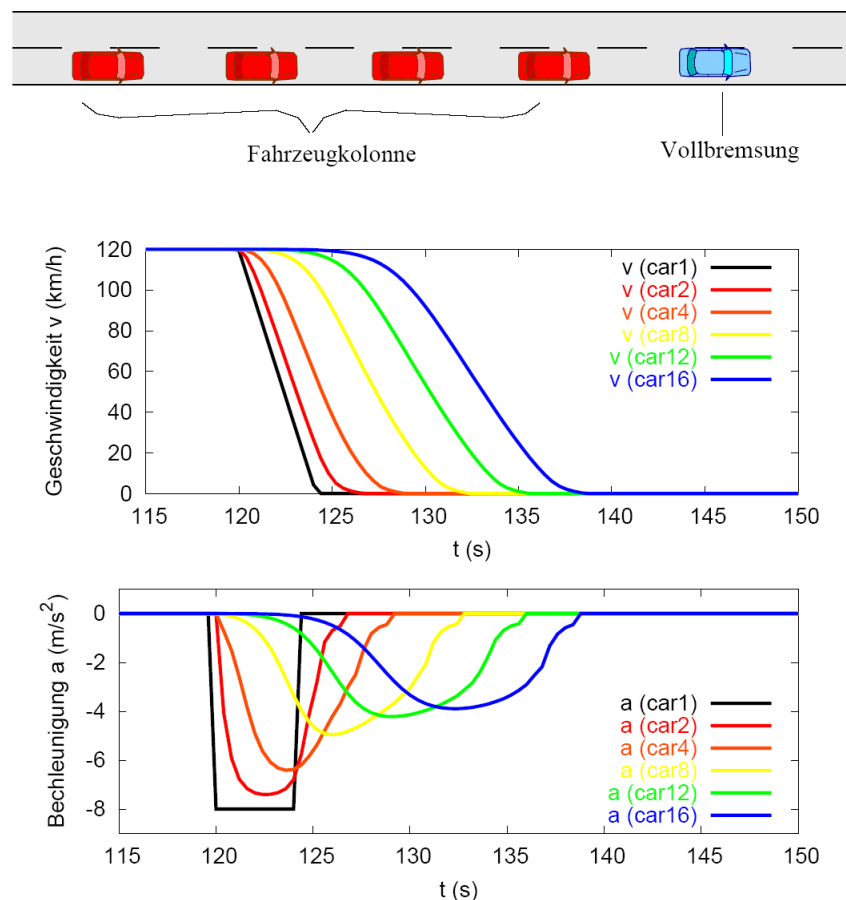


Abbildung 5: Simulation einer Extremsituation (Vollbremsung) unter Gewährleistung der Kolonnenstabilität



Spurwechsel-Interaktion

Um das Spurwechselverhalten an Engstellen zu verbessern, wurde eine Interaktion zwischen Fahrzeugen auf benachbarten Spuren formuliert. In einem Simulationsszenario mit einer Spursperrung konnte gezeigt werden, dass die zusätzlich zum Longitudinalmodell wirkenden Beschleunigungen aufgrund von abstoßenden und anziehenden Kräften zwischen den nächsten Nachbarn auf der benachbarten Fahrspur ein Fahren auf Lücke und damit ein effizienteres Spurwechseln ermöglichen. Das Modell der Interaktionen besitzt drei Parameter, welche die maximale Stärke der Wechselwirkung, die Gewichtung des Einflusses von Hinter- und Vorderfahrzeugs und die Reichweite der Interaktion beschreiben. Mit der Longitudinal-Transversal-Kopplung (LT-Kopplung) gelingt es, zusammen mit dem IDM-CAH als dem zugrunde liegenden Longitudinalmodell und dem bewährten Spurwechselalgorithmus MOBIL, Spurwechsel realistischer zu modellieren.

Für die Simulation wird ein Verflechtungsbereich vor der Spursperrung definiert, in dem die Präferenz für die Zielspur linear wächst. Die Interaktionsstärke wurde für die rechte und linke Spur unterschiedlich gewählt um zwischen aktivem und passivem Verhalten unterscheiden zu können. Um Bremsmanöver beim Einscheren zu verringern, wird der IDM-Parameter für die Zeitlücke nach einem Spurwechsel im Verflechtungsbereich vorübergehend verringert. Danach wird die Zeitlücke dem Wunschwert kontinuierlich angepasst.

In Szenarien mit verschiedenen Longitudinalmodellen und zusätzlichen Tempolimits wurde eine Effizienzsteigerung der Spurwechsel durch die Interaktion nachgewiesen. Bei einem kritischen Verkehrsfluss steigt sowohl die mittlere Dauer bis zum Verkehrszusammenbruch als auch der maximal erreichbare Verkehrsfluss vor der Spursperrung. Der Anteil starker Bremsverzögerungen verringert sich durch die homogenisierend wirkende Interaktion. Dadurch sinkt auch der Anteil unfallkritischer Situationen, die durch die Betrachtung der Time-To-Collision (TTC) quantifizierbar sind.

Das vorgeschlagene Modell einer Interaktion für das Fahren auf Lücke kann man auch als einen (virtuellen) Blinker interpretieren. Durch den Wechselwunsch eines Fahrzeugs aufgrund der Spursperrung im Verflechtungsbereich reagieren die Nachbarfahrzeuge auf den Nachbarspuren leicht bremsend bzw. beschleunigend, um dem Fahrzeug potentiell eine Lücke zu schaffen. Dieses Konzept ließe sich auf beliebige Verkehrssituationen verallgemeinern, in denen ein Wechselwunsch eine Wechselwirkung der Nachbarn induzieren soll. Die vorgestellte Interaktion kann z. B. auch bei Auf- und Abfahrten Verwendung finden, für die ebenfalls effiziente und koordinierte Spurwechsel benötigt werden.

Das Modell der Longitudinal-Transversal-Interaktion als vorbereitende Maßnahme für einen Spurwechsel hat als Eingangsgrößen die Abstände und die Geschwindigkeiten der unmittelbaren Nachbarfahrzeuge auf den benachbarten Spuren. Damit kann diese Strategie als Grundlage eines Verkehrsleistungsassistentz mit integrierter Spurwechselassistentz dienen.

Ziele

Die Verkehrsleistungsassistentz hat im Großen und Ganzen zwei Ansatzpunkte:



1. Stauprävention: Erhaltung hoher Verkehrsflüsse durch
 - Stabilisierung des Verkehrs (Dämpfung von potentiell stauauslösenden Inhomogenitäten) und
 - Homogenisierung der dynamischen Kapazität z. B. durch „aggressivere“ Einstellungen im Bereich von Engstellen.

Unter Stabilisierung und Homogenisierung fällt eine möglichst störungsfreie Verflechtung von Fahrzeugen verschiedener Fahrspuren an Spursperrungen sowie Zu- und Abfahrten. Die Vorbereitung in Form von „auf Lücke fahren“ und die Durchführung unter kurzfristiger Akzeptanz geringerer Folgezeiten gehören z. T. auch zur menschlichen Fahrweise. Eine Erweiterung der IDM-Longitudinal-Reglung, in welche die Positionen der Fahrzeuge auf benachbarten Spuren eingehen, ist deshalb nicht nur im Hinblick auf eine Spurwechselassistentz nötig, sondern generell für eine realistische Modellierung der „normalen Spurwechsels“ zur Quantifizierung jedweder VLA-Maßnahmen.

2. Schnelle Stauauflösung: Für die Stauauflösung sind kurze Folgezeiten beim Anfahren am Staukopf erforderlich, was in der Regel mit kräftiger Beschleunigung zu erzielen ist. Zudem ist eine Drosselung des Zuflusses sinnvoll, entweder durch bewusstes Verlangsamens des herannahenden Verkehrs oder sofern möglich durch Umleitung des Verkehrs auf Ersatzstrecken. Letzteres erfordert u. U. eine zentrale Leitung der Verkehrsströme.

Unter die Stauvermeidung lässt sich auch die Unfallprävention zählen, obwohl sie natürlich ein selbständiges Ziel außerhalb der Verkehrsleistungsassistentz darstellt. Nicht zuletzt spielt der Fahrkomfort mit einem Fahrerassistentzsystem eine wichtige Rolle, welcher für die Akzeptanz eines VLA-Systems von großer Bedeutung ist.

Strategien

Im Zusammenhang mit den verkehrszustandsabhängigen VLA-Strategien wurden gemäß den oben genannten Methoden und Simulationsergebnissen folgende Ansätze erarbeitet. Es wird unterschieden zwischen folgenden sechs Verkehrszuständen (siehe Abbildung 4), in denen sich ein Fahrzeug befinden kann, und in denen jeweils eine geeignete Strategie im Hinblick auf die genannten Ziele angewendet werden sollte:

- Freier Verkehr: In diesem Fall realisiert der VLA-Longitudinal-Regler ein „normales“ Fahrverhalten
- Annähern an einen Stau: In dieser Situation ist zur Erhöhung der Sicherheit und zur Dämpfung bzw. Glättung der stromaufwärtigen Staufront eine Verringerung der Wunschverzögerung sinnvoll.
- Im homogenen zähfließenden Verkehr (HCT) ist es nicht nötig, von der Grundeinstellung der VLA-Parameter abzuweichen. Dem natürlichen Verhalten der Fahrer ohne VLA-System entspräche eine leichte Erhöhung der Folgezeit.



- Im oszillierenden zählfließenden Verkehr (OCT) ist eine Reduzierung der Oszillationen aus Komfort-, Sicherheits- und Energiespargründen sinnvoll.
- Engpassbereich: Im Bereich eines Engpasses ist bei noch nicht zusammengebrochenem Verkehr zur Erhöhung der Kapazität.

Verkehrszustand	Fahrverhalten	Verkehrliche Wirkung	Modellumsetzung
Freier Verkehr	Standard	Neutral	Referenzparameter
Stauannäherung	Frühzeitiges, sanftes Bremsen	Sicherheits- und Komfortgewinn	Verringerung der Wunschverzögerung
Stau	Standard	Neutral	Referenzparameter
Engstellenbereich	Aufmerksames und zügiges Fahren	(Lokale) Steigerung der Kapazität	Verringerung der Folgezeit
Stauausfahrt	Rechtzeitiges und kräftiges Beschleunigen	Steigerung des Ausflusses aus Stau	Verringerung der Folgezeit und Erhöhung der max. Beschleunigung

Tabelle 2: Übersicht der VLA-Fahrstrategien

Die gibt einen Überblick über das gewünschte Fahrverhalten innerhalb eines Verkehrszustandes mit der dazugehörigen verkehrlichen Wirkung und der Umsetzung im Regler.

2.1.4 Die integrierte Verkehrssimulation

Die verkehrszustandsabhängige, verkehrseffiziente Fahrstrategie und deren automatische Umsetzung in einem ACC-System werden direkt durch das Verkehrsgeschehen beeinflusst. Aussagen über die Verkehrsdynamik und das verkehrsleistungssteigernde Potenzial eines gewissen VLA-Anteils können nur innerhalb von Verkehrssimulationen getroffen werden, in denen die gegenseitigen Abhängigkeiten dynamisch berücksichtigt werden. Das Diagramm in der Abbildung 6 zeigt die verschiedenen Simulationskomponenten und deren komplexes Zusammenspiel:

- Mit einem mikroskopischen Verkehrsmodell, einer gegebenen Verkehrsinfrastruktur und einer gewissen Verkehrsnachfrage entwickelt sich eine Verkehrsdynamik.
- Die verschiedenen dynamischen Verkehrszustände werden mit Hilfe der VLA-Zustandserkennung von jedem VLA-Fahrzeug autonom identifiziert.
- Die VLA-Fahrstrategie sorgt für eine verkehrszustandsabhängige Fahrverhaltensadaption des ACC-Systems.
- Die lokale Änderung des Fahrverhaltens der VLA-Fahrzeuge hat wiederum eine direkte Rückwirkung auf die Verkehrsdynamik des Gesamtsystems.



Ein wichtiger Kontrollparameter ist dabei der Ausstattungsgrad an VLA-Fahrzeugen.

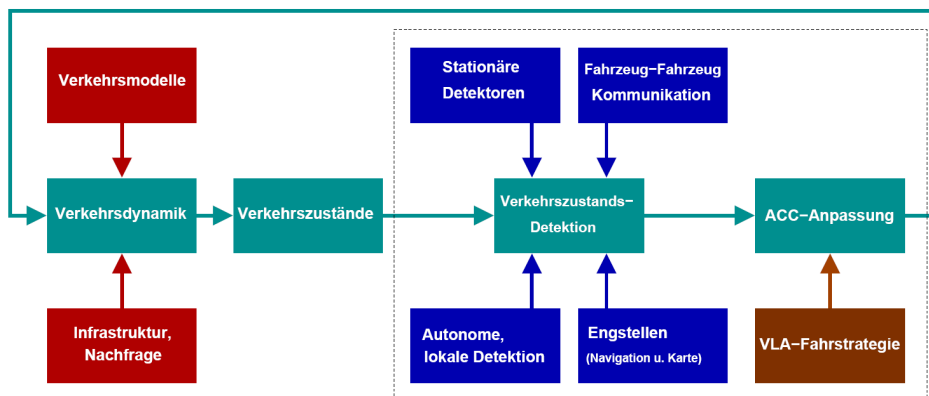


Abbildung 6: Die integrierte Verkehrssimulation

Die Fahrzeugfolgedynamik beschreiben wir mit dem mikroskopischen „Intelligent-Driver-Model“ (IDM) und der Erweiterung um eine Constant-Acceleration-Heuristic (CAH). Ein Vorteil des IDM ist, dass die Parameter zur Beschreibung des Fahrverhaltens anschaulich sind, so dass die VLA-Fahrstrategie relativ leicht durch eine Änderung weniger Parameter umgesetzt werden kann. Die IDM-Modellparameter und typische Werte zur Beschreibung von PKW und LKW-Fahrverhalten sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

IDM-Parameter	PKW	LKW	VLA-Matrix	λ_a	λ_b	λ_T
Wunschgeschwindigkeit v_0	130 km/h	85 km/h	Freier Verkehr	1	1	1
Min. Abstand zum Vorderfahrzeug s_0	2 m	2 m	Stauannäherung	1	0.7	1
Zeitl. Sicherheitsabstand T	1.5 s	2.0 s	Stau	1	1	1
Maximale Beschleunigung a	1.0 m/s ²	0.5 m/s ²	Engstelle	1.5	1	0.7
Komfortable Bremsverzögerung b	2 m/s ²	2 m/s ²	Stauausfahrt	2	1	0.5

Tabelle 3: IDM-Parameter und VLA-Matrix

Die verkehrsangepassten Fahrstrategien unterscheiden sich in den Werten der IDM-Parameter für die gewünschte Maximalbeschleunigung, die gewünschte komfortable Bremsverzögerung und die Wunschfolgezeitlücke, deren Faktoren ebenfalls in Tabelle 3 dargestellt sind.

2.1.5 Potentialabschätzung und Bewertung von VLA-Konzepten

Der Grundgedanke des VLA-Ansatzes ist die Erweiterung einer adaptiven Geschwindigkeitsregelung „Adaptive Cruise Control“ (ACC) um eine Komponente zur autonomen und automatischen Wahl einer verkehrsadaptiven Fahrstrategie, d. h. einer Anpassung des Fahrverhaltens an die aktuelle Verkehrssituation. Das Ziel der



VLA-Fahrstrategie ist es, einen Verkehrszusammenbruch zu verhindern bzw. zu vermeiden, und - im Falle eines Staus - die Verkehrsstörung schneller aufzulösen zu können. Das VLA-Modell besteht aus den folgenden Komponenten:

- Für eine verkehrseffiziente Fahrweise klassifizieren wir das Verkehrsgeschehen in mehrere Kategorien (Verkehrszustände) und schlagen eine darauf abgestimmte, verkehrsadaptive VLA-Fahrstrategie vor. Eine verkehrsleistungssteigernde Wirkung wird vor allem durch ein aufmerksames Fahren mit einer geringfügig reduzierten Folgezeit im Bereich von Engstellen und durch rechtzeitiges und gegebenenfalls kräftiges Beschleunigen am Staukopf erreicht.
- Die VLA-Fahrstrategie wird im ACC-Reglermodell durch einen Wechsel gewisser Fahrverhaltensparameter umgesetzt. In der „VLA-Matrix“ werden diese Fahrverhaltensparameter den VLA-Verkehrszuständen zugeordnet.
- Die Detektion der Verkehrszustände erfordert eine bordautonome Verkehrszustandsschätzung. Dazu werden die Sensordaten des ACC-Systems und die Kenntnis der permanenten Engstellen (z. B. Auf- und Abfahrten) durch ein Navigationssystem benutzt. Weiterhin können auch die Informationen nichtlokaler Quellen wie die kurzreichweitige Kommunikation zwischen Fahrzeugen und die Kommunikation mit stationären Sendern berücksichtigt werden, um die Qualität der Verkehrszustandsdetektion zu steigern.
- Die Längsregelung des Fahrzeugs, d. h. das Beschleunigen und Bremsen, wird durch einen erweiterten ACC-Regler operativ umgesetzt.

Die Bewertung der VLA-Fahrstrategie und die Abschätzung des Potentials der verkehrlichen Wirkungen können nur innerhalb von mikroskopischen Verkehrssimulationen geschehen. Das Zusammenspiel des Verkehrsgeschehens, die fahrzeugbasierte, verkehrsadaptive VLA-Fahrverhaltensanpassung und die Rückwirkung auf die Verkehrsdynamik in Abhängigkeit ebenfalls zu berücksichtigenden VLA-Ausstattungsgrades wurde durch eine interaktive und intuitive Simulation demonstriert. Die wesentlichen Ergebnisse der Simulationsstudien zur Potentialabschätzung von VLA sind im Folgenden zusammengestellt:

- Bereits bei geringen VLA-Ausstattungsgraden wird in den Verkehrssimulationen der Verkehrszusammenbruch verzögert bzw. vermieden. In Simulationen mit einer Autobahnzufahrt und einer Steigungsstrecke wird gezeigt, dass sich die Reisezeiten in Situationen mit und ohne Stau um einen Faktor 2 bis 3 unterscheiden.
- Die drastischen Unterschiede in der Stauausbildung und in der Reduktion der Reisezeit kommen dadurch zustande, dass ein Verkehrszusammenbruch mit einer deutlichen Verringerung der Verkehrsleistung von ca. 10 bis 20 Prozent (Capacity Drop) einhergeht. Bereits eine moderat erhöhte Kapazität im Bereich der Engstelle verzögert den Verkehrszusammenbruch, so dass eine hohe Verkehrsleistung länger aufrechterhalten werden kann. Dies wird durch die VLA-Fahrstrategie „Fahrt im Engstellenbereich“ bewirkt.



- Die Auswirkung auf den Kraftstoffverbrauch, der in der Mikrosimulation ebenfalls untersucht werden kann, ist geringer als bei der Reisezeit. Das Einsparpotential durch Stauverminderung und -vermeidung liegt im Bereich von ca. 10 Prozent. Der Grund dafür liegt in den geringeren Reisegeschwindigkeiten im Stau, die aufgrund des geringeren Luftwiderstandes zu einem niedrigeren Verbrauch als im freien Verkehr führen, wodurch der Mehrverbrauch durch häufiges Beschleunigen im Stau teilweise kompensiert wird.
- Für eine Potentialabschätzung der verkehrlichen Wirksamkeit der VLA-Fahrstrategie sind zwei Größen relevant: Durch eine dynamische Erhöhung der maximalen freien Kapazität wird ein Verkehrszusammenbruch verzögert bzw. vermieden. Nach einem erfolgten Verkehrszusammenbruch wird eine schnellere Stauauflösung nur durch die Steigerung des Ausflusses (dynamische Kapazität) erreicht. Die verkehrlichen Auswirkungen sind proportional zum VLA-Ausstattungsgrad und manifestieren sich ab etwa 5 Prozent.
- Für eine Erhöhung der dynamischen Kapazität ist es erforderlich, dass die stromabwärts gelegene Staufront lokalisierbar ist, um rechtzeitig in die entsprechende VLA-Strategie zu wechseln. Um nichtstationäre Staufronten und Staufronten auf Grund von temporären Engstellen zuverlässig lokalisieren zu können, sind neben den bordautonom vorliegenden Daten weitere Informationen durch Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation bzw. Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation hilfreich.

2.1.6 Verkehrliche Wirksamkeit der VLA-Fahrstrategie

Nach der Beschreibung des VLA-Modells erfolgte die Untersuchung der Auswirkungen der fahrzeugbasierten Fahrverhaltensanpassung anhand von zwei Verkehrsszenarien. Zunächst wurde ein Streckenabschnitt mit einer Auffahrt als Engstelle und anschließend eine Steigungsstrecke, die ein verkehrsflusserhaltendes Bottleneck repräsentiert, simuliert und mit dem Referenzfall ohne VLA verglichen.

A) Autobahnabschnitt mit Zufahrt

Ein 12 Kilometer langer Streckenabschnitt beinhaltet eine Zufahrt, wobei die Verkehrsnachfrage auf der Hauptfahrbahn innerhalb von fünf Stunden zwischen 1000 und 1600 Fahrzeugen pro Stunde und Spur liegt. Diese wachsende und sinkende Verkehrsnachfrage entspricht einer idealisierten Rush-Hour. Der Zufluss an der Zufahrt wird konstant mit 280 Fahrzeugen pro Stunde und Spur angenommen. Da die Nachfragespitze die statische Kapazität für den Referenzfall übersteigt, kommt es im Laufe der Simulation zu einem Verkehrszusammenbruch an der Engstelle.

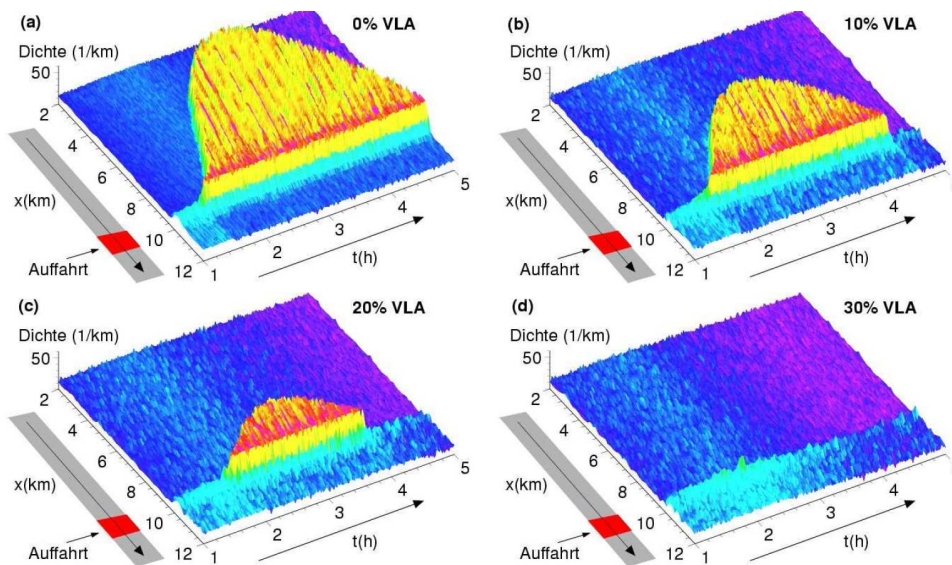


Abbildung 7: Raumzeitliche Darstellungen der Verkehrsdynamik für das Szenario mit Zufahrt

Die raumzeitliche Dynamik des Verkehrszusammenbruchs (Abbildung 7) wurde für verschiedene VLA-Ausstattungsgrade dargestellt. Die zunächst steigende, dann fallende Verkehrsnachfrage führt zu einem anfangs wachsenden Stau, der sich anschließend wieder abbaut. Die stromabwärtige Staufront ist stationär auf der Höhe der Zufahrt. Stromabwärts der Engstelle herrscht freier Verkehr. Deutlich sieht man, dass ein steigender VLA-Anteil den Stau reduziert und, im Fall von 30 Prozent Ausstattung, komplett vermeidet. In der sind die Zeitreihen der aktuellen und akkumulierten Reisezeiten für die Gesamtheit der Fahrzeuge im System dargestellt. Die Reisezeit und damit die Reisezeitverlängerung aufgrund von Verkehrsstörungen ist für den einzelnen Fahrer die wichtigste Qualitätsgröße. Ohne Verkehrsstörung beträgt die Referenzreisezeit auf dem Streckenabschnitt ca. sieben Minuten, durch den mit der Rush-Hour verbundenen Stau erhöht sich die Reisezeit für den einzelnen Fahrer drastisch. Im Referenzszenario ohne VLA-Fahrzeuge gibt es in der Spitze des Staus (nach ca. drei Stunden Simulation) Reisezeiterhöhungen auf knapp 20 Minuten, was fast einer Verdreifachung der Reisezeit auf diesem Abschnitt entspricht. Durch die Erhöhung des VLA-Anteils sieht man deutlich, wie der Verkehrszusammenbruch verzögert wird. Dadurch ergeben sich geringere Warteschlangen im Stau, was sich durch eine geringere maximale Staulänge bemerkbar macht. Die Auswirkungen des Staus auf das Gesamtsystem lassen sich aus der Darstellung der akkumulierten Reisezeit entnehmen. Der Stau verursacht insgesamt 800 Stunden Stauzeit. Bereits bei zehn Prozent VLA-Anteil wird beispielsweise die durch den Stau verursachte Wartezeit um ca. 50 Prozent reduziert.

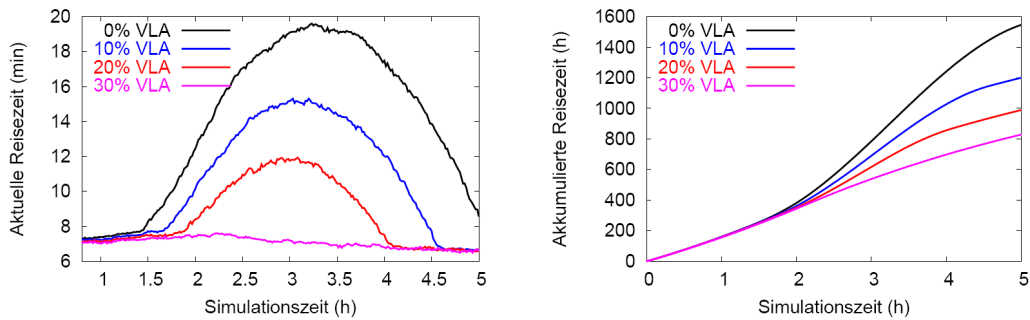


Abbildung 8: Aktuelle und akkumulierte Reisezeiten für verschiedene VLA-Ausstattungsgrade

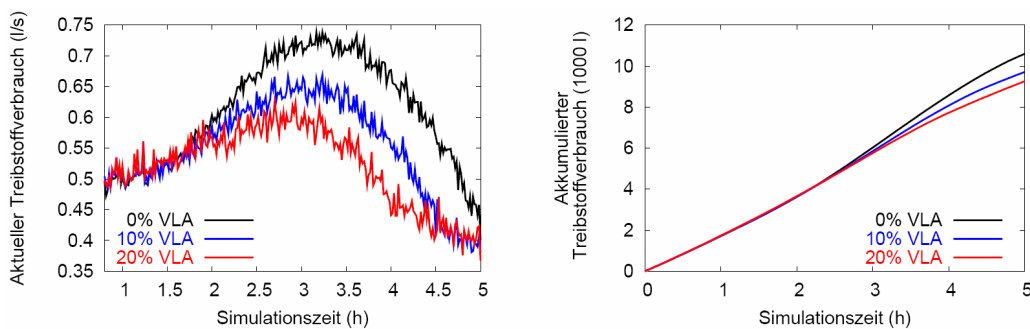


Abbildung 9: Aktuelle und akkumulierte Kraftstoffverbräuche aller sich auf dem Streckenabschnitt befindlichen Fahrzeuge für verschiedene VLA-Ausstattungsgrade

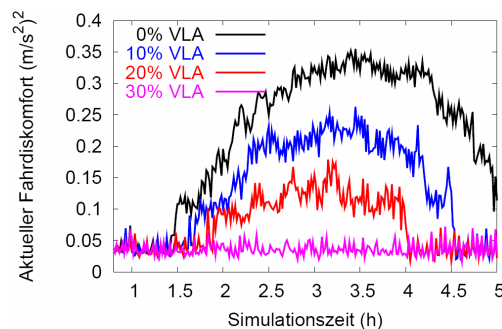


Abbildung 10: Das subjektive Maß "Fahrkomfort" in Form der Beschleunigungsquadrate

Da in der Mikrosimulation die Trajektorien aller Fahrzeuge zur Verfügung stehen, kann man daraus (ein realistisches Fahrzeugfolgemodell vorausgesetzt) den Kraftstoffverbrauch berechnen. In der Abbildung 9 ist der aktuelle und der akkumulierte Kraftstoffverbrauch dargestellt. Dabei wurde stellvertretend für die Fahrzeugflotte ein VW Passat mit 118 kW angenommen. Der Stau verursacht zwar einen erhöhten Kraftstoffverbrauch, aber der Anstieg ist weniger drastisch als bei der Reisezeit. Im Gesamtsystem bewirkt die Vermeidung des Staus eine Einsparung von ca. 10 Prozent (gegenüber einem Faktor 2 bei der Reisezeit). Der geringere Effekt kommt dadurch zustande, dass die Verbrauchskurve ein breites Minimum im Bereich von 50 bis 80 km/h aufweist. Bei höheren Geschwindigkeiten macht sich der quadratische



Einfluss des Luftwiderstands bemerkbar. Insofern kann eine geringe Geschwindigkeit im Stau zunächst eine Kraftstoffeinsparung bewirken. Der tatsächliche Kraftstoffverbrauch hängt dann vor allem von der der Anzahl der Beschleunigungsvorgänge ab, d. h. der Verkehrsstabilität.

Bereits eine moderat erhöhte Kapazität im Bereich der Engstelle verzögert den Verkehrszusammenbruch. Die drastischen Unterschiede in der Stauausbildung und in der Reduktion der Reisezeitverzögerungen (Abbildung 2) kommen dadurch zustande, dass ein Verkehrszusammenbruch mit einem Leistungseinbruch in der Verkehrsleistung von ca. 10 bis 20 Prozent einhergeht (Capacity Drop). Neben der Steigerung der maximalen freien Kapazität bewirkt ein zügiges Anfahren der VLA-Fahrzeuge am Staukopf einen erhöhten Ausfluss aus dem Stau (dynamische Kapazität), der daran zu erkennen ist, dass die stromaufwärtige Staufront mit steigendem VLA-Ausstattungsgrad langsamer wächst.



Abbildung 11: Der 3D-Fahrsimulator mit dem Coffeemeter zur Ruckmessung

Neben der Reisezeit und dem Kraftstoffverbrauch kann auch ein subjektives Kriterium wie der Fahrkomfort betrachtet werden. Als Maß für den Fahrkomfort ist in Abbildung 10 das mittlere Beschleunigungsquadrat aufgetragen. Aus dem Diagramm wird deutlich, dass durch den Stau auch im Mittel mehr beschleunigt und gebremst werden muss als im freien, gebundenen Verkehr, was einem höheren Diskomfort entspricht. Die subjektive Größe des Fahrkomforts hängt aber noch von weiteren Faktoren ab, insbesondere dem Ruck. In einem zusätzliche entwickelten 3D-Simulator kann der durch Beschleunigung und Ruck verursachte Diskomfort durch das so genannte „Coffeemeter“ anschaulich dargestellt werden (Abbildung 11). Sowohl Beschleunigungen als auch der Ruck bewirken ein Schwappen des Kaffees in der Kaffeetasse. Bei starkem Diskomfort schwappt der Kaffee über.

B) Verkehrssimulation mit einer Steigungsstrecke

Eine weitere Untersuchung galt dem Streckenabschnitt mit einer Steigung, die als flusserhaltende Engstelle wirkt. Als Randbedingung für das stromaufwärtige Strecke-



nende wurden Querschnittsdaten der BAB A8 (Ost) in der Nähe von München während der abendlichen Rush-Hour verwendet. Die reduzierte Kapazität der Steigung wird durch eine lokale Erhöhung des IDM-Parameters Zeitlücke um 30 Prozent für alle Fahrzeuge im Bereich von 500 Metern erreicht. Damit wird ein tatsächlich beobachteter Verkehrszusammenbruch im Wesentlichen reproduziert.

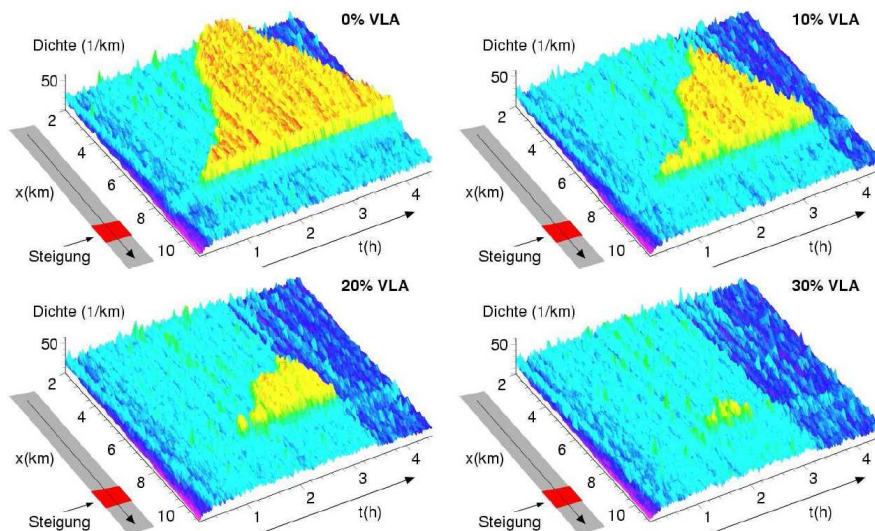


Abbildung 12: Raumzeitliche Darstellungen der Verkehrsdynamik für das Szenario mit Steigung

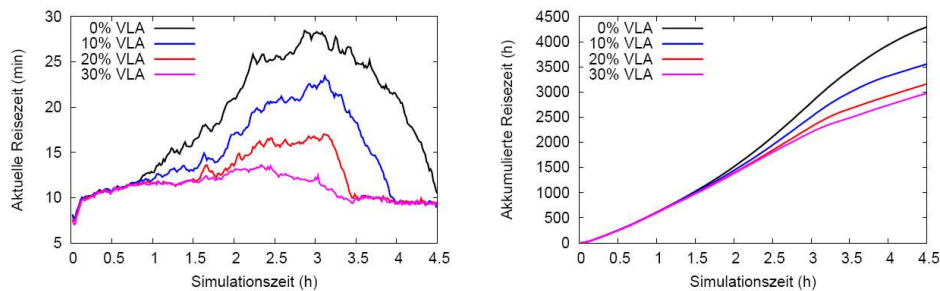


Abbildung 13: Aktuelle und akkumulierte Reisezeiten für verschiedene VLA-Ausstattungsgrade

Die raumzeitliche Darstellung der spurgemittelten Verkehrsdichte in Abbildung 12 und die simulierten Reisezeiten in Abbildung 13 zeigen die positiven Auswirkungen eines steigenden VLA-Anteils auf das Verkehrsgeschehen in der Simulation. Durch die Kapazitätserhöhung im Bereich der Engstelle kann ein Verkehrszusammenbruch verzögert werden. Die positiven Effekte machen sich schon bei sehr geringen Ausstattungsgraden bemerkbar. Im Fall von 30 Prozent VLA-Anteil wird der Verkehrszusammenbruch praktisch vollständig vermieden. Dieses Beispiel verdeutlicht wie schon das Beispiel im letzten Abschnitt die positiven Effekte der fahrzeugbasierten VLA-Fahrstrategie schon bei geringen Ausstattungsgraden auf das Gesamtsystem.



Untersuchung der maximalen Kapazität im freien Verkehr

Wie im letzten Abschnitt gezeigt wurde, führt ein Verkehrszusammenbruch zu deutlichen Einbußen in der Verkehrsleistung, was sich vorrangig in dem drastischen Anstieg in den Reisezeiten auswirkt. Der VLA-Zustand „Fahrt innerhalb einer Engstelle“ zielt daher auf eine Vermeidung oder zumindest auf eine Verzögerung des Verkehrszusammenbruchs, indem bei hohem Verkehrsaufkommen auf der Höhe der Engstelle aufmerksam und zügig gefahren wird. Die automatisierte Fahrstrategie wird durch eine reduzierte Folgezeit (bei einer leicht erhöhten Wunschbeschleunigung) im Bereich der Engstelle umgesetzt, was zu einer dynamischen Homogenisierung der Streckenkapazität führt (vgl. VLA-Matrix in Tabelle 2). Hintergrund ist die mit einer Senkung der Folgezeit einhergehende Kapazitätserhöhung, welche die kapazitätsmindernde Eigenschaft der Engstelle gerade kompensiert. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchung zum Wirkungsmechanismus in Abhängigkeit des Ausstattungsgrades und der Folgezeit gezeigt.

Die Referenzgröße zur Charakterisierung der verkehrlichen Wirksamkeit der VLA-Fahrstrategie „Fahrt innerhalb einer Engstelle“ ist die maximale freie Kapazität bei der es zu einem dynamischen Verkehrszusammenbruch kommt. Dazu wird in der Simulation der Zufluss stündlich um 800 Fahrzeuge pro Stunde gesteigert. Ein Verkehrszusammenbruch wird detektiert, wenn mehr als 10 Fahrzeuge langsamer als 30 km/h fahren. In diesem Fall wird die Simulation abgebrochen und der letzte 1-Minuten-Wert eines stromabwärtigen „virtuellen“ Detektors registriert. Der Verkehrszusammenbruch erfolgt dynamisch innerhalb eines Simulationslaufs. Die resultierende Messung der maximalen freien Kapazität ist daher eine Zufallsgröße, die auch bei identischen Rahmenbedingungen zu unterschiedlichen Resultaten verschiedener Simulationsläufe führt. Wir mitteln daher mit einer Gauss-gewichteten linearen Regression die verschiedenen Realisierungen für den maximalen Fluss und erhalten einen Mittelwert und ein Fehlerband, das Auskunft über die Streuung der Messgröße gibt. Damit können die streuenden Simulationsergebnisse sehr intuitiv erfasst werden (vgl. Abbildung 15).

A) Maximale Kapazität in Abhängigkeit der Folgezeit

Die maximale freie Kapazität ist eine Zufallsgröße, die von der Stabilität und Heterogenität des Verkehrs abhängt. Die statische Kapazität ergibt sich dagegen aus theoretischen Überlegungen vor allem durch die mittlere Zeitlücke, aber auch des effektiven Fahrzeugabstandes sowie der Wunschgeschwindigkeit. Diese Größe entspricht der Spitze im Fundamentaldiagramm, d.h. dem Verkehrsfluss-Dichte-Diagramm. Die Realisierungen der maximalen freien Kapazität sind typischerweise kleiner als die maximale theoretische Kapazität.

In Abbildung 14 ist die maximale freie Kapazität als Funktion der Folgezeit für verschiedene IDM-Parametersätze dargestellt. Durch die Kurven wird die Abhängigkeit sowohl der statischen als auch der freien Kapazität von der Folgezeit deutlich. Der Referenzwert für PKW liegt z. B. bei einer Folgezeit von 1,5 Sekunden. Durch eine Erhöhung der IDM-Beschleunigung wird das System stabilisiert, was sich in einer deutlichen Erhöhung der freien Kapazität gegenüber dem Referenzfall ausdrückt.



Der Parameter der IDM-Wunschverzögerung hat dagegen lediglich einen geringen Einfluss.

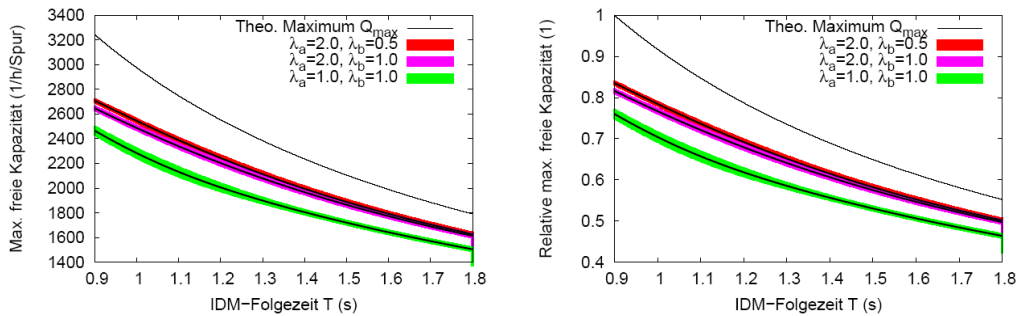


Abbildung 14: Die maximale freie Kapazität in Abhängigkeit der Folgezeit

B) Maximale freie Kapazität als Funktion des VLA-Ausstattungsgrades

Im Folgenden wird die maximale freie Kapazität in Abhängigkeit des VLA-Ausstattungsgrades betrachtet. In der Abbildung 15 sind beispielhaft die einzelnen Simulationsläufe und die Mittelung mit Streuband für das Szenario mit Zufahrt für 0 und 10 Prozent LKW-Anteil dargestellt. Durch den LKW-Anteil wird die Heterogenität der Simulation erhöht, was zu einer größeren Streuung der Simulationsergebnisse führt. Durch die Mehrspursimulation und die Detektormessungen streut die freie Kapazität bereits bei reinem PKW-Verkehr.

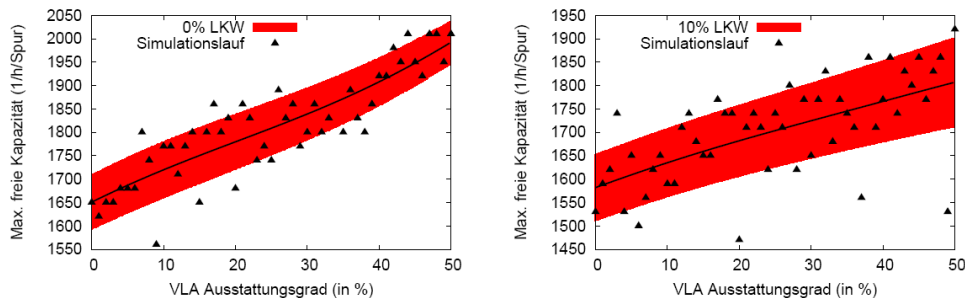


Abbildung 15: Die maximale freie Kapazität als Funktion des VLA-Ausstattungsgrades für das Verkehrsszenario mit "Auffahrt als Engstelle"

Für den VLA-Zustand „Fahrt innerhalb einer Engstelle“ wurden unter Verwendung der IDM-Parameter Referenzszenario (siehe Tabelle 2) und deren Variation die verkehrlichen Effekte simuliert und mit dem Referenzszenario verglichen. Abbildung 16 zeigt folgende Ergebnisse:

- Die maximale Wunschbeschleunigung hat einen sehr geringen Effekt auf die maximale Kapazität. Die drei Mittelwerte {1; 1,5; 2} resultieren bei konstanter Zeitlücke in etwa gleichen Werten für die freie Kapazität. Die geringe Sensitivität bezüglich der maximalen Wunschbeschleunigung ist eine Folge des LKW-



Anteils. Die langsameren LKWs dominieren die PKWs und die Kapazität kann deshalb vor allem durch geringere Abstände (Zeitlücke), nicht aber durch Beschleunigen, effektiv erhöht werden.

- Die Folgezeit hat einen großen Einfluss auf die freie Kapazität. Eine konstante Folgezeit führt erwartungsgemäß zu keiner Steigerung der freien Kapazität. Eine weitere Verringerung der Folgezeit macht sich bei höheren Ausstattungsgraden deutlich bemerkbar.

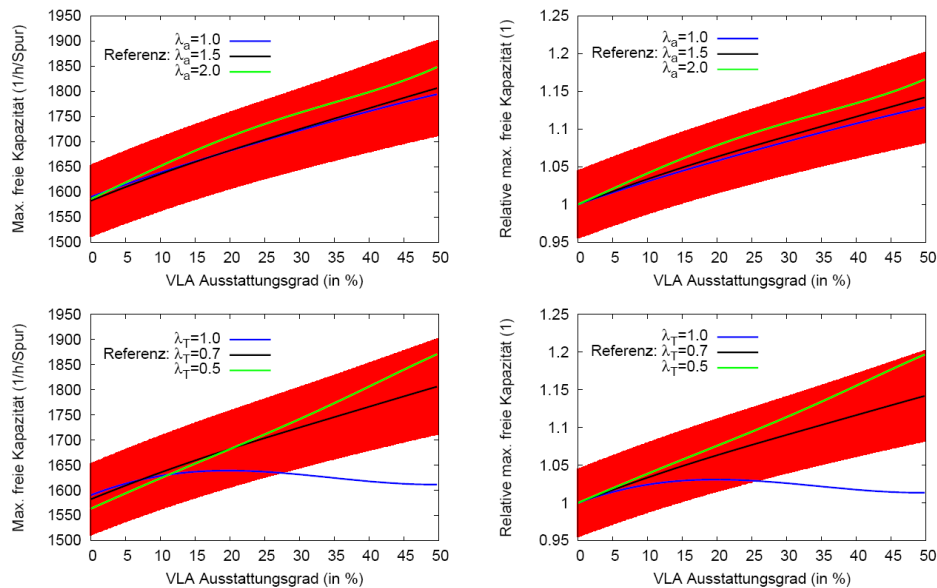


Abbildung 16: Variation der maximalen Wunschbeschleunigung und der Folgezeit im VLA-Zustand "Fahrt in Engstelle" mit dem entsprechenden IDM-Parametersatz (vgl. Tabelle 2)

Untersuchung der Kapazität bei zusammengebrochenem Verkehr

Nach einem erfolgten Verkehrszusammenbruch bestimmt lediglich die Differenz zwischen dem Zufluss stromaufwärts (d. h. der Verkehrsnachfrage) und Abfluss aus dem Stau die Ausbildung des Staus. Da eine gegebene Nachfrage nur durch eine veränderte Verkehrsumlegung im Verkehrsnetz beeinflusst werden kann, kann man die Stauauflösung kurzfristig nur durch die Erhöhung des Abflusses fördern. Dies ist das Ziel des VLA-Zustands „Ausfahrt aus dem Stau“, bei dem die Beschleunigung erhöht und die Folgezeit verringert wird, so dass am Staukopf zügig angefahren wird. Die relevante Messgröße ist die dynamische Kapazität, die in Abhängigkeit vom VLA-Ausstattungsgrad und der Parametrierung der VLA-Matrix untersucht wird. Weiterhin wird die Qualität der Detektion einer nichtstationären Staufront untersucht.

A) Dynamische Kapazität bei Kenntnis der Staufront

Für die Messung der dynamischen Kapazität wurde ein Verkehrszusammenbruch auf einer zweispurigen Straße provoziert und anschließend der Verkehrsfluss an einem Querschnitt stromabwärts mit Hilfe eines „virtuellen“ Detektors gemessen. Für den VLA-Zustand "Ausfahrt aus dem Stau" wird angenommen, dass der Ort der stro-



mabwärtigen Staufront abschätzbar ist. Wie Untersuchungen von realen Verkehrszusammenbrüchen auf der A5 in der Nähe von Frankfurt gezeigt haben, sind die meisten Staufronten an permanenten Engstellen lokalisiert, so dass man mittels einer entsprechend attribuierten Karte die Lage der Staufront bordautonom ermitteln kann. Bei nicht-stationären Staufronten oder Staufronten an temporären Engstellen kann man durch eine Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation die Staufront zuverlässig schätzen. Der ideale Fall besteht natürlich darin, dass beide Datenquellen zur Verfügung stehen und die Daten fusioniert werden können.

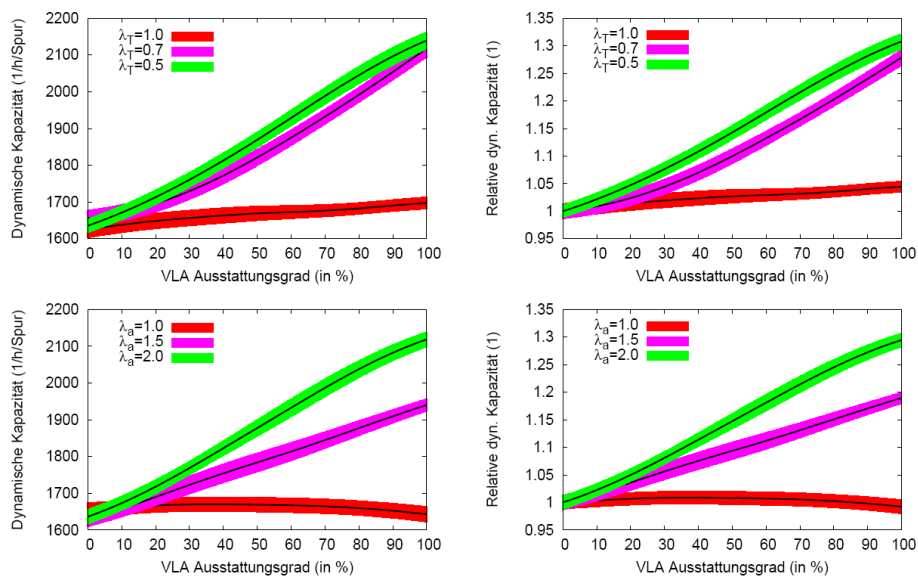


Abbildung 17: Verschiedene Parametrierungen des VLA-Zustands "Ausfahrt aus Stau" bei Kenntnis der Staufront auf einer zweispurigen Autobahn

In der Abbildung 17 sind die Faktoren der VLA-Matrix für den Zustand „Ausfahrt aus dem Stau“ bei einem konstanten LKW-Anteil von 10 Prozent variiert worden. Aus den Simulationsergebnissen wird deutlich, dass die dynamische Kapazität von der maximalen Wunschbeschleunigung und zu einem etwas geringeren Anteil von der Folgezeit beeinflusst wird. Am effektivsten ist eine Kombination der beiden Parameter, wodurch ein zügiges, rechtzeitiges Anfahren aus dem Stau realisiert wird.

B) Dynamische Kapazität bei einer Stop-and-Go-Welle

In einem weiteren Schritt wurde ein Verkehrszusammenbruch untersucht, der mit einer Stop-and-Go-Welle einhergeht. Im dichten Verkehr mit einem Fluss von 2000 Fahrzeugen pro Stunde und Spur und mit einem LKW-Anteil von 20 Prozent gibt es zu einem gewissen Zeitpunkt einen Unfall, in dessen Folge ein Fahrzeug auf der rechten Spur eine Vollbremsung ausführt und für 27 Sekunden zum Stehen kommt, bevor es anschließend wieder anfährt. Dadurch wird eine Stop-and-Go-Welle ausgelöst, die sich mit der charakteristischen Geschwindigkeit von ca. 15 km/h gegen den Verkehrsstrom ausbreitet. Untersucht wurde, inwieweit die Stauwelle durch die VLA-Fahrstrategie gedämpft werden kann.



In dieser Untersuchung zeigte sich, dass die stromabwärtige „wandernde“ Staufrent und damit der VLA-Zustand „Ausfahrt aus dem Stau“ im Gegensatz zur stationären Staufrent nur mit Hilfe der bordautonomen Verkehrszustandserfassung nicht zuverlässig geschätzt werden kann, da sie sich gegen den Verkehrsstrom bewegt. Als Folge wird der Zustand „Ausfahrt aus Stau“ etwas verzögert detektiert. Die Verzögerung liegt in der Größenordnung von bspw. vier Sekunden. Diese Verzögerung wirkt sich sehr drastisch auf die dynamische Kapazität aus. In der Abbildung 18 ist das gleiche Szenario wie im vorherigen Abschnitt simuliert worden, wobei in diesem Fall die stromabwärtige Staufrent ohne Kenntnis der Lage der Staufrent leicht verzögert detektiert wird. Das Ergebnis ist, dass sich die dynamische Kapazität durch eine leicht verzögerte Detektion quasi nicht steigern lässt! Durch eine sensitivere bordautonome Detektion kann man die dynamische Kapazität geringfügig steigern, das Problem einer lokalen und damit zeitverzögerten Detektion ist damit aber immer noch vorhanden. Für eine effiziente Stauauflösung ist es vielmehr entscheidend, antizipativ und damit rechtzeitig den Zustand „Ausfahrt aus dem Stau“ anzunehmen. Diese Fahrverhaltensregel ist analog zum Verhalten an einer Lichtsignalanlage (LSA) im Stadtverkehr, die von Rot auf Grün schaltet. Da die Fahrer aufgrund des Lichtsignals bereits erwarten, dass jetzt gleich zügig angefahren werden kann, ist der Abfluss aus Warteschlange der LSA relativ hoch. Diese Fahrstrategie kann sehr effektiv von einem „intelligenten“ ACC-Regler umgesetzt werden, der sich vorsorglich im „richtigen“ VLA-Zustand befindet. Die Kenntnis über den Ort einer nicht-stationären, stromabwärtigen Staufrent kann z. B. über Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation gewonnen werden.

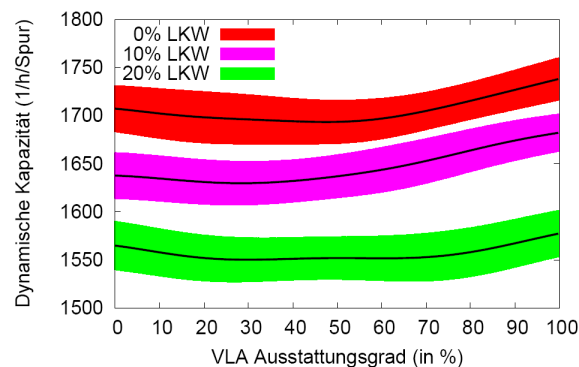


Abbildung 18: Einfluss der bordautonomen Detektion des VLA-Zustands "Ausfahrt aus dem Stau"

Abschließend wird der positive Effekt einer Erhöhung der dynamischen Kapazität auf die Auflösung der Stauwelle anhand des vorgestellten Szenarios demonstriert. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Staufrent bekannt ist und der entsprechende VLA-Zustand rechtzeitig angenommen wird. In Abbildung 19 sind beispielhaft drei repräsentative Simulationsläufe mit verschiedenen VLA-Ausstattungsgraden dargestellt. In den Raum-Zeit-Diagrammen ist die Geschwindigkeit der rechten Spur farb-codiert eingetragen. Man sieht deutlich die Entstehung der Stop-and-Go-Welle und ihre anschließende Propagation durch das System. Mit wachsendem VLA-Anteil wird



die Stauwelle zunehmend gedämpft und löst sich praktisch auf. Zu Veranschaulichung sind die 100 Simulationenläufe gemittelt und mit einem „Fehlerband“ dargestellt worden. Ab einem Ausstattungsgrad von ca. 30 Prozent löst sich die Stauwelle effektiv auf.

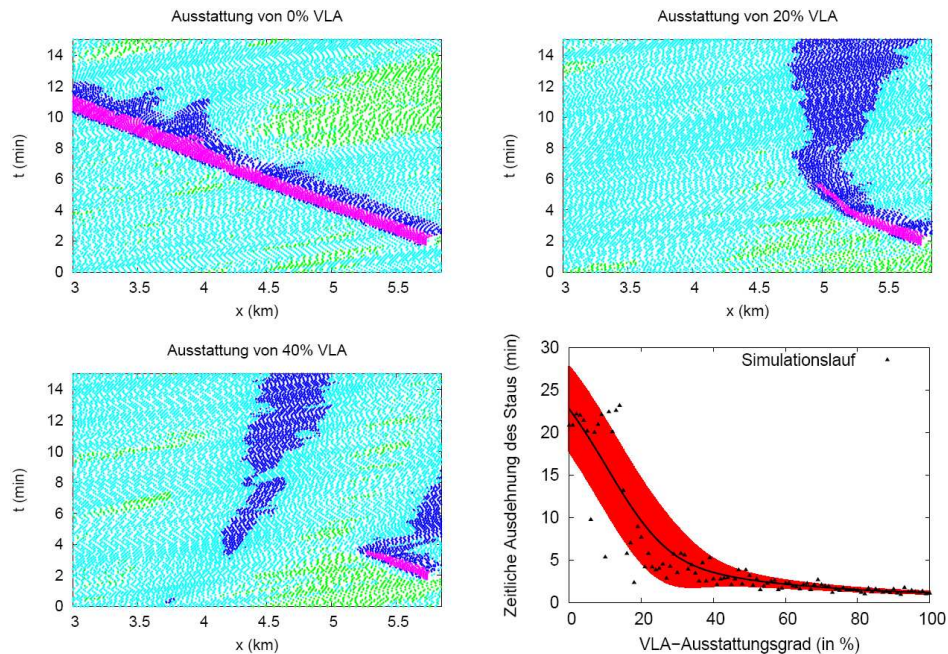


Abbildung 19: Simulationsläufe für drei verschiedene Ausstattungsgrade in einem Szenario mit einer Stauwelle, wobei die farbliche Kodierung (Pink, Blau, Türkis, Grün) den Verlauf von niedriger zu hoher Geschwindigkeit repräsentiert

Ebenfalls in Abbildung 19 ist die Zeitdauer der Propagation der Stauwelle durch das System in Abhängigkeit des VLA-Ausstattungsgrades aufgetragen. Man erkennt deutlich die Stochastizität dieser Größe im Bereich von 10 bis 30 Prozent VLA-Ausstattungsgrad. Ab ca. 30 Prozent Ausstattungsgrad wird die Stauwelle zuverlässig durch das zügige und rechtzeitige Beschleunigen der VLA-Fahrzeuge am Staukopf aufgelöst.

2.2 Informationsbereitstellung

Eine grundlegende Voraussetzung für das Funktionieren und die Wirksamkeit von VLA-Systemen ist die Versorgung mit verkehrlich relevanten Daten aus unmittelbarer oder mittelbarer Umgebung. So wurde entsprechend der Lösungsansätze aus dem Abschnitt 2.1 Methoden und Verfahrensentwicklung die Informations- und Datenbereitstellung untersucht. Wesentliche Punkte waren die

- Einbeziehung von Fahrzeugdaten, die bordautonom ermittelt werden, die
- Einbeziehung von Fahrzeugdaten, die von anderen Fahrzeugen ermittelt und kommuniziert werden und die
- Kommunikation der Daten zwischen den Fahrzeugen.



Es wurde gezeigt, dass die Daten, die bordautonom erfasst werden und im Fahrzeug zur Verfügung stehen, für die Umsetzung der VLA-Funktionalität einbezogen werden können. Es handelt sich zum einen um Informationen über den Zustand des Fahrzeuges (z. B. Geschwindigkeit) und zum anderen um Informationen über das Fahrzeugumfeld (Differenzgeschwindigkeit und Abstand zu Vorderfahrzeug), die für die Umsetzung eines VLA-Reglers notwendig sind. Zusätzlich ist für den VLA eine Verkehrszustandsschätzung notwendig, die auf Grundlage der genannten primären Daten arbeitet.

Die Einbeziehung von Informationen aus anderen Fahrzeugen wurde in Teilprojekt übergreifenden Arbeiten diskutiert. So wurde beispielsweise der Inhalt und der Aufbau von Protokollen zu Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation erarbeitet, die zur Übertragung von VLA-relevanten Informationen dienen. Als Übertragungsmedium für diese mobile Form der Datenübertragung wurde beispielhaft die WLAN-Kommunikation eingesetzt.

Ein wesentlicher Aspekt der Informationsbereitstellung ist neben den Inhalten die Betrachtung der Informationsausbreitung. In Untersuchungen wurde dargestellt, unter welchen Bedingungen eine Information zu einem bestimmten Ort übertragen wird. Dabei spielen Übertragungswahrscheinlichkeiten unter Berücksichtigung von zeitlichen Restriktionen eine besondere Rolle.

2.3 Nutzerakzeptanz und Einführungsstrategie

Aus Basis der oben aufgeführten Erkenntnisse wurde eine Akzeptanzprognose zur Verkehrsleistungsassistenz durchgeführt. Innerhalb von zwei, jeweils vierstündigen Fokusgruppen wurden insgesamt 20 Personen befragt.

Es zeigt sich, dass auf der kognitiven Ebene Akzeptanz für VLA zu erwarten ist (siehe

Abbildung 20 und Abbildung 21), wenn das System und die Rahmenbedingungen hinreichend erklärt werden. Auf der emotionalen Ebene zeigen sich stärkere Vorbehalte (Stichwort: Bevormundung), die vermutlich in erster Linie über die Erfahrung aufgehoben werden können. Darüber hinaus sollten Informationsmaßnahmen gezielt die emotionale Komponente ansprechen und hier Anreize schaffen, z.B. über Imagebildung, schaffen positiver sozialer Werte etc. Allgemein sollte die Kommunikation des Systems mit realistischen, konkreten Bildern unterstützt (z. B. realitätsnahe Simulationen von Verkehrsströmen an bekannten Knotenpunkten) und so „erfahrbar“ wie möglich gemacht werden. Darüber hinaus sollte die Kommunikation aufbauen auf den gegenwärtigen (und zukünftig zunehmenden) Verkehrsproblemen.

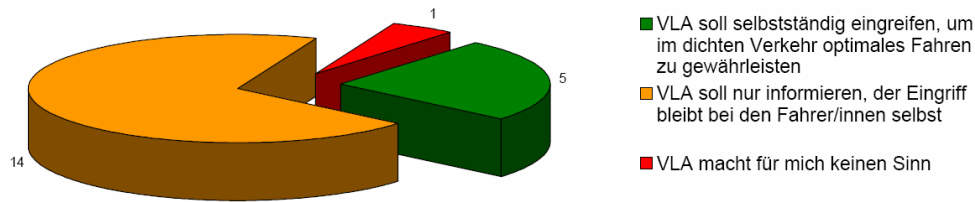


Abbildung 20: Befragungsergebnis zur Frage, wie VLA funktionieren sollte.

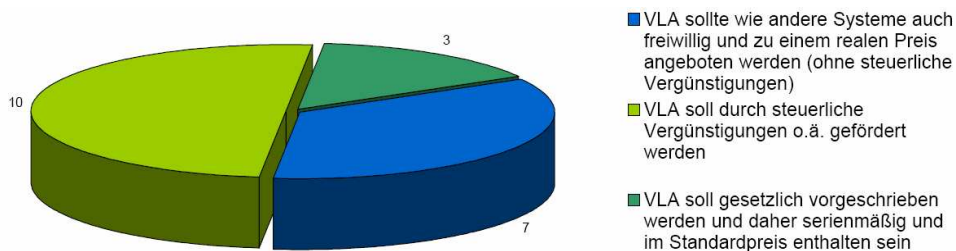


Abbildung 21: Befragungsergebnis zur Frage, wie VLA eingeführt werden sollte.

Wichtig ist ebenfalls die Kooperation zwischen Mensch und Maschine derart anzusprechen, dass der Mensch sich nicht unterlegen fühlt, sondern anerkennt, dass im Falle von Verkehrsproblemen auf der Straße ein System wie VLA eine Hilfe ist, die (für alle Beteiligten) maximalen Freiraum ermöglicht. Darüber hinaus wäre es sehr hilfreich, durch Selbstverpflichtungen/Vorausleistungen der Automobilhersteller und/oder staatliche Anreize einen schnellen Einstieg in den Markt zu erreichen. Denn aufgrund der vorliegenden Ergebnisse ist davon auszugehen, dass der gesamtverkehrliche Ansatz durchaus akzeptiert wird, wenn erkennbar ist, dass das System funktioniert.

2.4 Demonstratoren

Im Sinne einer anschaulichen Präsentationsmöglichkeit der erzielten Erkenntnisse wurden innerhalb des Projektes zwei Demonstratoren aufgebaut. Dabei handelt es sich zum einen um unterschiedliche Formen der Simulation von Verkehrssituationen und die praktische Umsetzung des entwickelten VLA-Reglers bis hin zur Implementierung in einen Versuchsträger.

2.4.1 Verkehrssimulation

Um die Zusammenhänge zwischen adaptiven Fahrverhalten und Verkehrsleistungssteigerung zu verdeutlichen wurden Simulations-Applets erstellt. Da die verkehrlichen Effekte gut einer zweisepurigen Richtungsfahrbahn mit einer integrierten (Autobahn-)Zufahrt dargestellt werden können, wurde dieses Szenario beispielhaft verwendet. Die Simulationen wurden mit



- 3D-Fahrer-Perspektive,
- 3D-Vogelperspektive und
- 2D-Vogel-Perspektive

realisiert. Während man durch die Fahrer-Perspektive den realen Fahr-Eindruck bekommt, der in der jeweiligen Verkehrssituation vorherrscht, bietet die Vogelperspektive einen guten Überblick über das gesamte Verkehrsgeschehen. Mit Hilfe von interaktiven Elementen lassen sich nicht nur die Parameter der Simulation manipulieren, sondern auch die Ansicht-Eigenschaften der Simulation ändern. Abbildung 22 zeigt den 3D-Simulator in der Fahrer- und Vogel-Perspektive.



Abbildung 22: 3D-Simulator in der Fahrer und Vogelperspektive mit Einstellmöglichkeiten für verkehrliche und visuelle Parameter

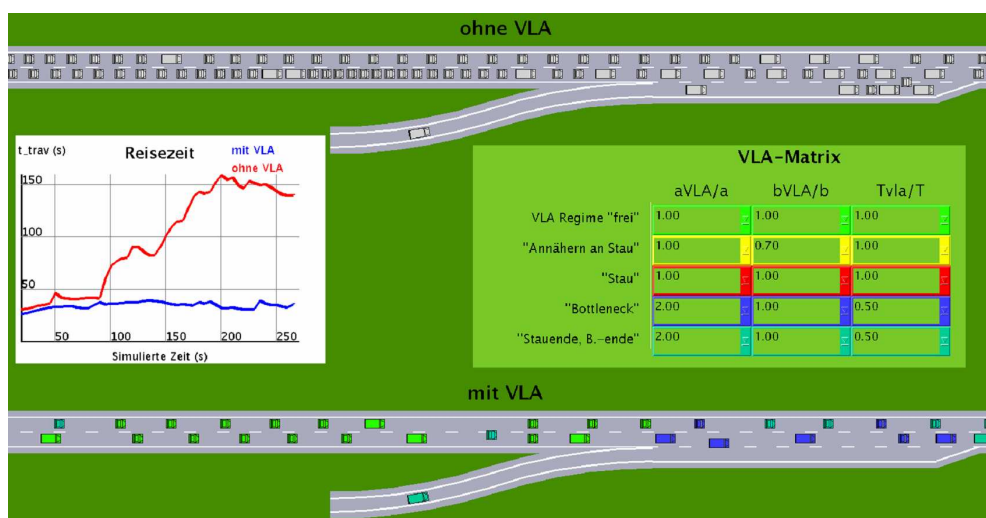


Abbildung 23: Demonstrator der 2D-Verkehrssimulation



Der 2D-Simulator wurde dazu verwendet, eine zeitgleiche Gegenüberstellung der verkehrlichen Situation mit bzw. ohne VLA zu zeigen, wobei im Szenario mit VLA der Ausstattungsgrad entsprechend variiert werden konnte. In Abbildung 23 ist der 2D-Simulator abgebildet. Neben der Fahrbahn ohne VLA (oben) und der Fahrbahn mit VLA (unten) sind ein Diagramm zum Vergleich der Reisezeit, die interaktive VLA-Strategie-Matrix und die Schieberegler zur Änderung der verkehrlichen Eingangsgrößen erkennbar.

So ist es in der gezeigten Version des 2D-Simulators bspw. möglich, den Zufluss der Hauptfahrbahn und der Zufahrt, den LKW-Anteil und den VLA-Ausstattungsgrad zu variieren.

2.4.2 Implementierung und Erprobung im Fahrzeug

Die VOLKSWAGEN AG hat ein Fahrzeug aufgebaut, das über VLA-Komponenten insbesondere zur Längsregelung verfügt und das auch im realen Fahrbetrieb demonstriert werden kann. Das Fahrzeug wurde während der Projektbearbeitungszeit als Versuchsfahrzeug eingesetzt, um theoretische VLA-Ansätze zur Längsregelung auf Umsetzungsfähigkeit und Praxistauglichkeit untersuchen zu können. Die Auswirkungen dieses Systems im Verkehr werden anhand des Verkehrssimulations-Demonstrators (siehe oben) demonstriert.

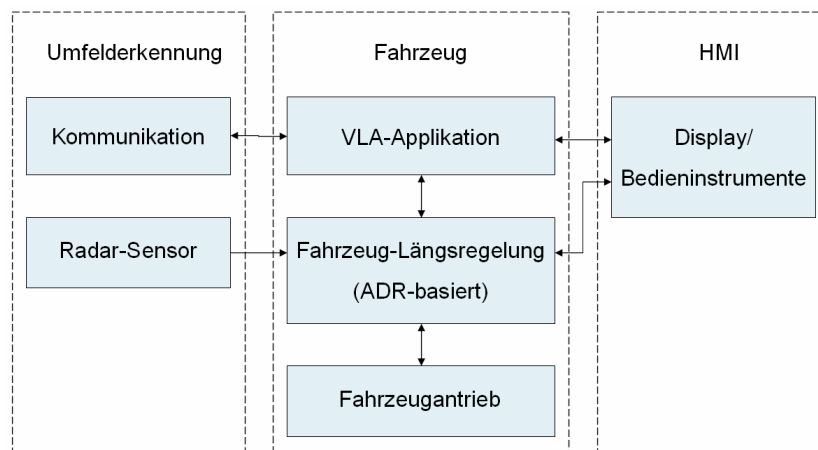


Abbildung 24: Architektur des VLA-Systems im Demonstrator-Fahrzeug

Der Demonstrator umfasst folgende Komponenten, die auch in Abbildung 25 dargestellt sind:

- ein um den entwickelten Regler erweitertes Geschwindigkeits- und Abstandsregelsystem, basierend auf dem Volkswagen ADR System (Adaptive Distanzregelung),
- erforderliche Sensorik



- Bedien- und Anzeigeeinstrumente
- Modul zur Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation (Kommunikationsmodul) zum Senden/Empfangen von VLA-relevanten Daten

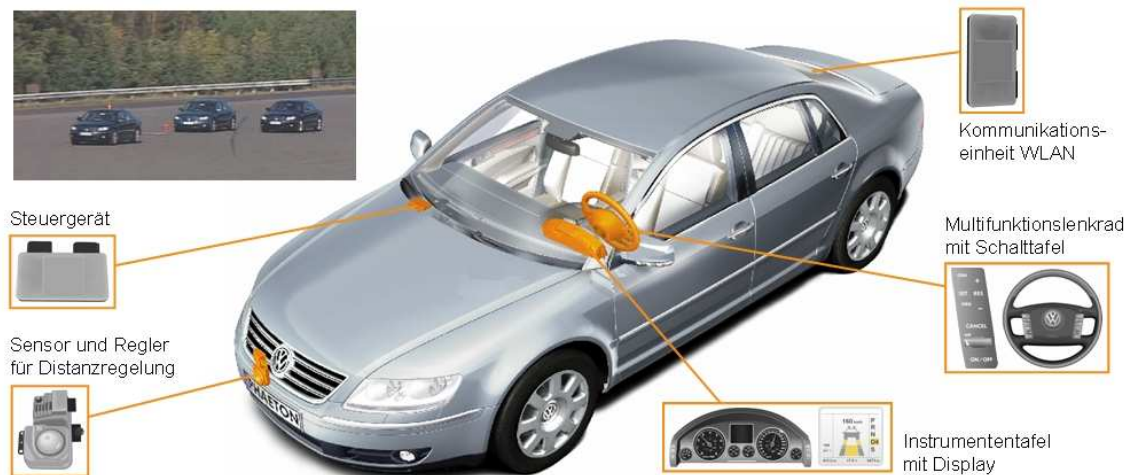


Abbildung 25: Komponenten des VLA-Demonstratorfahrzeuges

In umfangreichen Untersuchungen wurden die Aspekte Komfort und Sicherheit im realen Fahrzeug betrachtet um damit die Einsatzfähigkeit des verkehrsoptimierten Reglers zu gewährleisten. Dabei wurden zielgerichtet Szenarien gewählt, die zum den Situationen einer „normalen Fahrt“ bzw. Situationen im Grenzbereich wie bspw. kritische Einschervorgänge widerspiegeln. Die Versuche wurden unter Variation der o. g. Modellparameter durchgeführt. Es zeigte sich, dass der im Rahmen des Projektes entwickelte Regler einem konventionellen ACC-Regler um nichts nachsteht und zusätzlich verkehrliche Aspekte berücksichtigt. Das Kriterium des verkehrsoptimierten Fahrens schließt demnach den Komfort und die Sicherheit keineswegs aus.

2.4.3 Kurzfristige Anpassung des Fahrverhaltens an ein Verkehrereignis

Neben den umfangreichen Untersuchungen zu Komfort und Sicherheit wurde gemeinsam mit den Projektpartnern im Teilprojekt INVENT-VLA die kollektive, kurzfristige und automatische Anpassung des Fahrverhaltens an ein relevantes Ereignis unter Verwendung von Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation im Rahmen eines Feldversuches demonstriert. Dabei wurde mit Hilfe eines Fahrzeuges, das sich einige Kilometer stromabwärts des Straßenverlaufes befand, eine künstliche Meldung über ein Stauende generiert. Diese Meldung wurde über einen LKW im Gegenverkehr stromaufwärts transportiert und den Fahrzeugen, für die die Meldung relevant ist, übergeben. Nach Auswertung der Information im Fahrzeug wurde im Versuchsfahrzeug der VOLKSWAGEN AG zunächst eine Meldung über das Ereignis eingeblendet und die Anpassung der Geschwindigkeit für den Fahrer angekündigt. Nach Erreichen des Stauendes wurde die Geschwindigkeit im Fahrzeug automatisch auf einen empfohlenen Wert angepasst und das Stauende passiert. Abbildung 26 zeigt die Bedien-



oberfläche für die dazugehörige Anwendung, die neben den für den Fahrer relevanten Informationen auch eine Reihe von Systeminformationen enthält, die für die Systementwicklung benötigt werden.

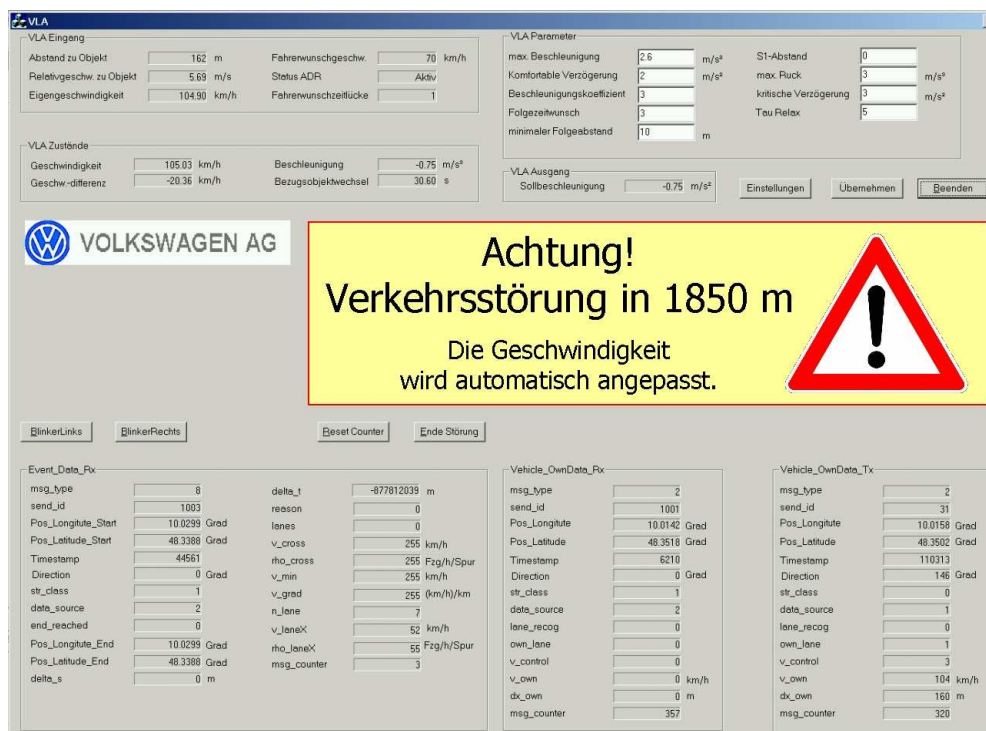


Abbildung 26: Die über Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation übermittelten Daten werden dem Fahrer angezeigt und zur automatischen Anpassung der Geschwindigkeit eingesetzt

Mit diesem Feldversuch konnte gezeigt werden, dass die zeitnahe und räumlich präzise Information über ein Ereignis sehr gut zur Information des Fahrers eingesetzt und gleichzeitig sinnvoll zur automatischen Anpassung des Fahrverhaltens durch einen erweiterten Geschwindigkeits- und Abstandsregler im Fahrzeug verwendet werden kann.

2.5 Voraussichtlicher Nutzen und die Verwertbarkeit des Ergebnisses

Die Ergebnisse aus der Simulation und den praktischen Untersuchungen zeigen, dass sich mit Hilfe der räumlich und zeitlich hochpräzisen Verkehrsinformationen und der Umsetzung in eine dem Verkehrszustand angepasste Fahrweise signifikant positive Effekte hinsichtlich der Verkehrsleistung erzielen lassen. Mit der Bearbeitung dieses Projektes wurden demzufolge wesentliche Voraussetzungen geschaffen, um die zukünftige individuelle Mobilität zu sichern.

Bei der Verkehrsleistungsassistenz ist allerdings zwischen dem individuellen und dem kollektiven Nutzen der Verkehrsteilnehmer zu unterscheiden. Der individuelle Nutzen jedes einzelnen Fahrers besteht im Komfortgewinn sowie in Reisezeit- und Kraft-



stoffesparungen, die mit einem Verkehrsleistungsassistenzsystem erreicht werden. Demgegenüber steht der kollektive Nutzen, der beispielsweise in der Steigerung der dynamischen Kapazität einer Strecke, der Unfallvermeidung und Emissionsminderung liegt. Dabei wird durch das angepasste Verhalten einzelner Verkehrsteilnehmer ein Nutzen für andere Verkehrsteilnehmer erzielt, z. B. durch die Vermeidung eines Verkehrsstaus.

Die Steigerung des Verkehrsflusses stellt damit ein Zusatzkriterium eines ACC-Systems dar, und kann zukünftig ohne Beeinträchtigung der bisherigen Kriterien bei der Systementwicklung berücksichtigt werden.

Im Rahmen des Teilprojekts VLA wurden im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans seitens der VOLKSWAGEN AG keine Schutzrechte angemeldet.

2.6 Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Dem Zuwendungsempfänger sind während der Durchführung des Projektes keine Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen bekannt geworden.

Unabhängig davon wird der Einfluss von konventionellen ACC-Systemen auf die Stabilität des Verkehrsablaufs und die Kapazität von Straßen mittlerweile kritisch betrachtet, was bei einer Marktdurchdringung solcher Systeme insbesondere in dichten Verkehrssituationen ausgesprochen relevant ist.

2.7 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die folgende Liste beinhaltet sowohl Veröffentlichungen der VOLKSWAGEN AG als auch von Unterauftragnehmern

A. Kesting, M. Treiber, M. Schönhof, F. Kranke and D. Helbing: *Jam-avoiding adaptive cruise control (ACC) and its impact on traffic dynamics*, Traffic and Granular Flow 2005, Vortrag, Berlin 2005

M. Schönhof, A. Kesting, M. Treiber and D. Helbing: *Inter-vehicle communication on highways: statistical properties of information propagation*, Traffic and Granular Flow 2005, Vortrag, Berlin 2005

A. Kesting, M. Treiber, M. Schönhof and F. Kranke: *'Intelligent' adaptive cruise controllers and their impact on traffic dynamics*, 20. Internationale Verkehrswissenschaftliche Tage, Postervortrag, Dresden 2005

M. Schönhof, M. Treiber and A. Kesting: *Information propagation in an ad-hoc car-to-car network enhancing road traffic performance*, 20. Internationale Verkehrswissenschaftliche Tage, Postervortrag, Dresden 2005



F. Kranke, M. Treiber und A. Kesting: *Implementierung und Erprobung eines adaptiven und verkehrsleistungssteigernden Geschwindigkeitsreglers*, 20. Internationale Verkehrswissenschaftliche Tage, Vortrag, Dresden 2005

A. Kesting, M. Treiber, M. Schönhof, D. Helbing, H.J. Stauss und F. Kranke: *Auswirkungen von ACC-Systemen auf den Verkehrsablauf*, Vortrag im Ausschuss 3.18 Theoretische Grundlagen des Strassenverkehrs der FGSV, 2005

A. Kesting, M. Treiber and D. Helbing: *MOBIL - A realistic lane change strategy for microscopic traffic modelling*, Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG), Vortrag, Berlin 2004

INVENT: *Verkehrsleistungsassistenz VLA*, Kurzdarstellung des Teilprojektes VLA als ergänzende Information zur INVENT-Broschüre, 2002

INVENT: *Verkehrsleistungsassistenz VLA*, Ergebnisbericht des Teilprojektes VLA, 2005