



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la  
communication DETEC  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle  
comunicazioni DATEC

**Bundesamt für Strassen**  
**Office fédéral des routes**  
**Ufficio federale delle Strade**

# **Einfluss von Fahrerassistenzsystemen auf die Leistungsfähigkeit von Strassennetzen**

**Influence des systèmes d'assistance à la conduite  
sur la capacité des réseaux routiers**

**Influence of Driver Assistance Systems on the Efficiency  
of Road Traffic Networks**

**Rapp Trans AG**

**Dr. Peter M. Rapp, ing. dipl. EPF**

**Graciela Christen, Dipl. Ing., NDS Verkehrswesen ETH**

**Thorsten Koy, dipl. Ing ETH**

**Jenni + Gottardi AG**

**Hendrik Werdin, dipl. Ing. ETH/SVI**

**Nataschia Morenzoni, dipl. Ing. ETH**

**Forschungsauftrag 2005/901 auf Antrag des Schweizerischen  
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

**Januar 2008**

.....

---

**Inhaltsverzeichnis**

<b>Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>Résumé</b>	<b>2</b>
<b>Summary</b>	<b>3</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>4</b>
<b>2 Übersicht zu bisherigen und laufenden Forschungsprojekten</b>	<b>5</b>
<b>3 Begriffe und Zusammenhänge</b>	<b>9</b>
3.1 Fahrerassistenzsysteme	9
3.1.1 Gliederung der Fahrerassistenzsysteme	9
3.1.2 Warnende und Informierende Systeme	10
3.1.3 Systeme mit verbindlichen Anweisungen	14
3.1.4 Systeme mit korrigierenden Eingriffen	15
3.1.5 Systeme mit Übernahme von Fahreraufgaben	16
3.2 Leistungsfähigkeit	20
3.2.1 Randbedingungen	20
3.2.2 Definition	20
3.2.3 Einflussfaktoren der Leistungsfähigkeit	23
3.3 Zusammenhang zwischen Fahrerassistenzsystemen und Leistungsfähigkeit	27
3.3.1 Einleitung	27
3.3.2 Literaturübersicht	28
3.3.3 Forschungsinitiative INVENT	30
3.3.4 Einflüsse von Fahrerassistenzsystemen auf die Leistungsfähigkeit	34
<b>4 Wirkungsanalyse</b>	<b>38</b>
<b>5 Fazit der Literaturrecherche</b>	<b>41</b>
<b>6 Aufbau der Modellanwendung</b>	<b>42</b>
6.1 Ziel	42
6.2 Vorgehen	43
6.3 Untersuchungsstrecke	44
6.4 Verkehrsaufkommen	44
6.5 Modellparameter im Referenzszenario	45
6.6 Modellparameter in Szenarien mit FAS-Parametrierung	48
<b>7 Ergebnisse im Bereich der Leistungsgrenze</b>	<b>53</b>
7.1 Effektive Nachfragevariation	53
7.2 Q-V-Diagramm	53
7.3 Abstände zwischen Fahrzeugen	55

---

<b>8</b>	<b>Ergebnisse mit FAS-Parametrierung</b>	<b>56</b>
8.1	Überblick über die Szenarien	56
8.2	Q-V-Diagramme	56
8.3	Interpretation der Ergebnisse	60
8.4	Weiterführende Fragen	60
<b>9</b>	<b>Schlussfolgerungen</b>	<b>63</b>
<b>10</b>	<b>Quellenverzeichnis</b>	<b>66</b>
<b>11</b>	<b>Abkürzungen</b>	<b>72</b>
<b>Anhang A</b>	<b>Kalibrierungsdaten</b>	<b>74</b>

---

### **Projektleitung und Sachbearbeitung**

#### **Rapp Trans AG**

Graciela Christen

Thorsten Koy

Peter M. Rapp, Projektleiter

#### **Jenni + Gottardi AG**

Natascia Morenzoni

Hendrik Werdin

---

## Zusammenfassung

In der vorliegenden Forschungsarbeit ist der Einfluss von Fahrerassistenzsystemen (FAS) auf die Leistungsfähigkeit von Strassennetzen untersucht worden. Die Forschung umfasst eine Literaturrecherche und eine Modellanwendung.

Die heute bekannten FAS zielen auf Sicherheit und Komfort. Viele Systeme sind noch in Entwicklung. Mit der Differenzierung der FAS auf bestimmte Verkehrs- und Fahrsituationen ergibt sich die neue Zielsetzung, die Verkehrsleistung mit Hilfe spezieller FAS zu erhöhen. Das deutsche Forschungsprojekt INVENT bezeichnet sie als Verkehrsleistungsassistenzsysteme. Noch stärker als andere FAS bedürfen sie detaillierter Informationen über das Umfeld des Fahrzeugs, die nicht von fahrzeugeigenen Sensoren ermittelt werden können. Dies führt zu den Themenkreisen der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation, Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation und kooperativen Systeme, die zurzeit intensiv erforscht werden.

Zahlreiche publizierte Arbeiten haben ausgewählte FAS mittels gezielter Parameterveränderungen in Mikrosimulationsmodellen abgebildet, um deren Einfluss auf den Verkehrsablauf zu beschreiben. Dabei besteht die methodische Schwierigkeit, dass zur Abbildung der FAS mit Modellen Annahmen bezüglich der Parameter nötig sind, die weder qualitativ noch quantitativ abgestützt sind, und sich aufgrund der unterschiedlichen Algorithmen nicht vergleichen lassen. Zurückhaltend interpretiert, belegen die analysierten Resultate weder eine eindeutige Tendenz zur Leistungssteigerung, noch eine solche zur Leistungsverminderung.

In der durchgeführten Mikrosimulationsanwendung wurde mittels heuristischer Veränderungen des Fahrverhaltens ausgelotet, welche Änderungen des Fahrverhaltens die Leistungsfähigkeit einer Hochleistungsstrasse spürbar beeinflussen.

Es ergibt sich im Modell, dass eine schnellere und synchrone Reaktion der Fahrzeuge auf Geschwindigkeitsveränderungen bei mittlerem und starkem Verkehrsaufkommen einen Leistungsgewinn bewirkt. Die schnelle und synchrone Reaktion vermindert die Aufschaukelung der Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen. Sie wird durch ein FAS bewirkt, indem dieses die Reaktivität des Systems Fahrer + Fahrzeug erhöht. Dies kommt einem aufmerksameren Fahren gleich. Verhaltensänderungen, die einem sanfteren Fahren oder einem ruppigeren Fahren gleichkommen, erweisen sich als nicht leistungsrelevant.

Bei der Beurteilung der Modellergebnisse müssen die erwähnten methodischen Schwierigkeiten beachtet werden. Es bedarf experimenteller Daten zum dynamischen Fahrverhalten in Gegenwart verschiedener FAS, damit aufgrund der Simulation sichere Aussagen über die künftigen Auswirkungen der FAS auf den Verkehrsfluss gemacht werden können.

In den Schlussfolgerungen bietet der Bericht Anknüpfungspunkte für weiterführende Untersuchungen, die zum besseren Verständnis der Auswirkungen von FAS beitragen würden.

---

## Résumé

Le travail de recherche ci-présent a examiné l'influence des systèmes d'assistance à la conduite (SAC) sur la capacité des réseaux routiers. Il comprend une analyse bibliographique et une modélisation.

Les SAC actuels servent les objectifs de la sécurité et du confort. Une multitude de systèmes est au stade du développement. La différenciation progressive des SAC en fonction de différentes situations de trafic et de conduite a amené les chercheurs à définir un objectif nouveau, celui d'augmenter le débit du trafic au moyen de SAC spéciaux. Plus encore que les SAC en général, ces systèmes spéciaux ont besoin d'informations détaillées sur l'environnement du véhicule, qui ne sauraient être détectées par les capteurs propres au véhicule. Cela amène aux thématiques de la communication entre véhicules, de la communication entre véhicules et infrastructure, et des systèmes coopératifs ; thématiques qui font actuellement l'objet d'intenses recherches.

Un grand nombre de travaux publiés ont entrepris de représenter des SAC choisis en modifiant les paramètres appropriés dans un modèle de microsimulation, afin de décrire les conséquences sur le flux de trafic. La difficulté de méthode est que pour représenter les SAC dans le modèle, on doit recourir à des hypothèses sur le plan qualitatif comme sur le plan quantitatif, qu'on ne peut étayer suffisamment et qui ne sont pas directement comparables entre elles lorsque les modèles utilisent des algorithmes différents. En interprétant avec prudence les résultats analysés, on n'en déduit aucune tendance nette ni vers l'augmentation de capacité, ni vers la baisse de capacité.

La microsimulation effectuée dans le cadre de la recherche a sondé différentes modifications heuristiques du comportement des véhicules, afin d'identifier celles qui ont un impact sensible sur la capacité d'une route à grand débit.

Il résulte dans le modèle que c'est la réaction rapide et synchrone des véhicules aux altérations de vitesse, qui apporte un gain à débit moyen et fort. La réaction rapide et synchrone empêche que les différences de vitesses entre véhicules successifs s'amplifient. Attribuer la réaction rapide et synchrone à un SAC implique que celui-ci doit augmenter la réactivité de l'ensemble conducteur + véhicule. Elle est assimilable à une conduite plus attentive. Les autres modifications de comportement modélisées, assimilables à une conduite plus douce ou au contraire plus agressive, ne donnent pas d'effet significatif sur le débit.

Il faut tenir compte des difficultés de méthode lorsqu'on apprécie les résultats du modèle. Il faudra des données expérimentales sur le comportement dynamique des conducteurs et des véhicules en présence de différents SAC avant qu'en puisse prévoir avec certitude, sur la base de la microsimulation, les futurs impacts des SAC sur le flux de trafic.

La conclusion du rapport propose des points d'entrée pour des prolongements de la recherche, qui contribueraient à une meilleure compréhension des impacts des SAC.

---

## Summary

The present research has investigated the influence of driver assistance systems (DAS) on the capacity of road networks. It comprises a literature research and a model study.

Today's DAS aim at safety and comfort. Many systems are in development. Increasing the differentiation of DAS for determined traffic and driving situations, researchers have identified the new objective of increasing the traffic flow by means of special DAS. Even more than DAS in general, these special systems need detailed information on the environment of the vehicle, which cannot be detected by the vehicle sensors alone. This leads to the thematic areas of vehicle-to-vehicle communication, vehicle-to-infrastructure communication, and cooperative systems; these are active fields of research at pre-sent.

Many published research works have represented selected DAS by modified appropriate parameters in microsimulation models, in order to describe their influence on the traffic flow. Doing this, there is the methodological difficulty that the representation of DAS in a model must be built on hypotheses concerning the parameters, that are insufficiently supported qualitatively as well as quantitatively and that are not comparable when the models use different algorithms. Interpreted with caution, the available results do not support a clear tendency neither towards a gain of capacity nor towards a loss of capacity.

The model study has probed different heuristic modifications of the driving behaviour in order to identify those that have a significant influence on the capacity of a motorway.

The model results show that it is an accelerated and synchronous reaction of the vehicles on speed alterations which brings a gain in traffic flow, at medium and high rates of traffic flow. The quick and synchronous reaction attenuates the amplification of speed differences between subsequent vehicles. It can be caused by a DAS if the DAS increases the reactivity of the system driver + vehicle. It can be assimilated to a more attentive way of driving. Other behaviour modifications, which can be assimilated to a smoother or to a more aggressive way of driving, do not result in any gain in traffic flow.

The methodological difficulties must be considered when appreciating the model results. There is a need for experimental data on dynamic driving behaviour in presence of different DAS, in order to be able to predict the future impact of DAS on traffic flow.

The conclusion of the report proposes themes for further research that would contribute to a better understanding of the impacts of DAS.

---

## 1 Einführung

Eine Vielzahl von Fahrerassistenzsystemen (FAS) wird in Zukunft den Fahrer unterstützen.

Fahrerassistenzsysteme verbessern die Wahrnehmung des Verkehrsablaufs und erleichtern das richtige Fahrverhalten. Zu diesen Systemen gehören:

- Warnende und informierende Systeme (Abstandswarnung inkl. Parkhilfen, Spurassistent, Sichthilfen, Übermittlung von Verkehrssignalen, automatische Fahrzeugdiagnose und Pannruf)
- Systeme mit verbindlichen Anweisungen (Lenkerüberwachung, fahrzeugseitige Umsetzung von Signalen und Tempobeschränkungen)
- Übernahme von Fahreraufgaben (autonome, stabilisierende Systeme, automatische Abstands- und Spurhaltung, umfassende Steuerung der Fahrdynamik, automatische Fahrzeugsteuerung, automatische Fahrzeugortung und -lenkung).

Fahrerassistenzsysteme steigern die Verkehrssicherheit, aber sie beeinflussen auch den Verkehrsfluss und damit die Leistungsfähigkeit der Strassen.

Die Erhöhung der Leistungsfähigkeit stellt zurzeit im Bereich der Verkehrsplanung ein gewichtiges Ziel dar, da Netzerweiterungen aus Finanz- und Umweltgründen nur in den günstigsten Fällen realisierbar sind.

Die vorliegende Forschungsarbeit widmet sich der Frage, ob Fahrerassistenzsysteme, nebst sicherheitsrelevanten Auswirkungen, diesen gewünschten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit haben können.

Es wird versucht, eine Übersicht über diejenigen FAS zu gewinnen, die für die Leistungsfähigkeit relevant sind, und Grundlagen für die Abschätzung des Einflusses von FAS auf die Leistungsfähigkeit zu finden.

Aus der Sicht der Strassenbehörden sowie der Planungsbüros handelt es sich um die Einschätzung einer künftigen Entwicklung, die hauptsächlich von der Automobilindustrie bestimmt wird, denn die FAS, die in absehbarer Zukunft auf den Markt kommen, sind Fahrzeugbordsysteme ohne strassenseitige Komponenten. Für Behörden und Planer geht es in erster Linie darum, die besagte Entwicklung bei der Beurteilung der zukünftigen Leistungsfähigkeit der Strassennetze richtig zu berücksichtigen.

---

## 2 Übersicht zu bisherigen und laufenden Forschungsprojekten

Die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zu Fahrerassistenzsystemen haben sich in den letzten 20 Jahren deutlich intensiviert. In verschiedenen nationalen und internationalen Projekten arbeiten Automobilhersteller, Zulieferindustrie, Forschungsinstitute und Behörden zusammen, um wirkungsvolle und innovative Fahrerunterstützungssysteme zu entwickeln und in der Verkehrspraxis einzuführen.

Wegweisend auf dem Gebiet der Fahrerassistenzsysteme ist vor allem das Forschungsprojekt PROMETHEUS (PROgramME for a european Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety), das im Jahr 1986 im Rahmen des EUREKA<sup>1</sup>-Programms gestartet wurde. Mit PROMETHEUS wurde ein integrativer und interdisziplinärer Lösungsansatz gesucht, mit dem Ziel einer effizienteren Ausnutzung des Verkehrssystems Strasse und einer Reduzierung der negativen Folgewirkungen [17]. Der Schwerpunkt lag auf fahrzeugseitigen Telematiksystemen, es wurden aber auch andere Systeme thematisiert. Erwähnenswert sind insbesondere die entwickelten und getesteten Informations- und Navigationssysteme, die fast zur Serienreife entwickelt worden sind.

Während PROMETHEUS bewusst technologieorientiert war, hat sich das Forschungsprojekt DRIVE (Dedicated Road Infrastructure for Vehicle safety in Europe), welches von 1988 –1991 im Rahmen des 2. EU-Rahmenprogrammes lief, dem Entwerfen von strassenseitigen Verkehrsleitsystemen gewidmet. DRIVE II (1992-1994) beschäftigte sich weiter mit der Umsetzung der entwickelten Telematik-Techniken in Feldversuchen und mit dem Testen von Prototypen.

In Deutschland etablierte sich im Jahr 1996 das Forschungsprogramm MoTiV (MOBilität und Transport im Intermodalen Verkehr) als Initiative der Automobil- und Zulieferindustrie. In seinem Rahmen wurden Grundlagen für neue IT-gestützte Dienste zur Bereitstellung verkehrsträgerübergreifender Informationen entwickelt und die Realisierbarkeit von Telematikanwendungen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit auf der Strasse untersucht [17]. Der für Fahrerassistenzsysteme relevante Teil ist im vom deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekt Netzwerk „Sichere Strasse“ enthalten und umfasst die Themen Abbiege- und Spurwechselassistentz, Adaptive Cruise Control (ACC) im Ballungsraum, Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation, Fahrerassistenzstrategien und Mensch-Maschine-Interaktion.

Zahlreiche Forschungsprojekte, welche die verschiedenen Aspekte der Fahrerassistenzsysteme wie Sicherheit (z.B. PREVENT, APROSYS, APSN) oder Fahrverhalten und Mensch-Maschine-Schnittstelle (z.B. DARWIN, TRAINER) untersuchen, sind noch im Gang oder kürzlich abgeschlossen worden.

Erste Studien, die sich auf europäischer Ebene mit dem Einfluss von Fahrerassistenzsystemen auf den Verkehrsablauf befassen, sind im Zusammenhang mit der Entwicklung des Intelligent Automat (Adaptive Cruise Control ACC) im Rahmen des Forschungsprojektes PROMETHEUS anfangs der 90er-Jahre zu nennen. Auch in der Schweiz widmet sich die Forschung seit Mitte der 90er Jahre dem Thema Fahrerassistenz. Untersucht wurden vor allem die Auswirkungen solcher Systeme auf die Verkehrssicherheit. Der Einfluss von Fahrerassistenzsystemen auf die Leistungsfähigkeit von Strassennetzen ist dabei bisher allerdings noch weitgehend unbeleuchtet geblieben.

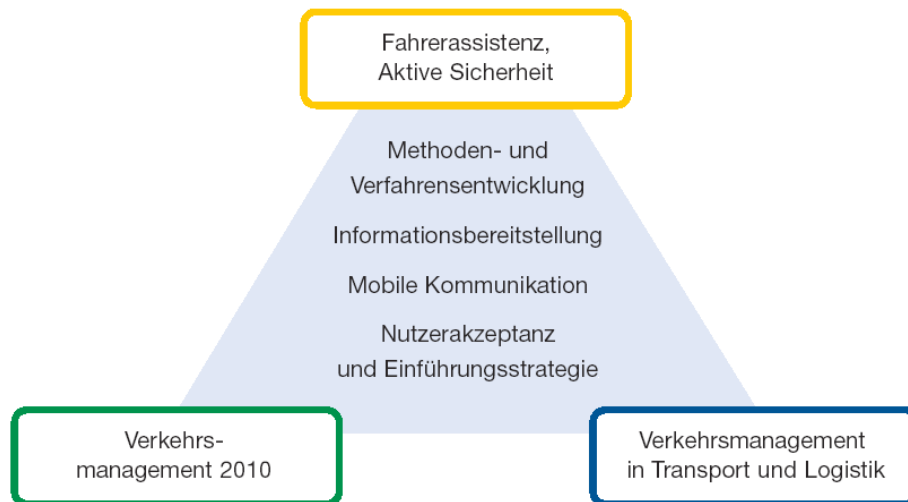
Zu den aktuellsten europäischen Forschungsprojekten, die sich mit dem Thema Fahrerassistenzsysteme und Leistungsfähigkeit befasst hat, gehört das vom deutschen Ministerium für Bildung und Forschung geförderte Forschungsprojekt INVENT (intelligenter Verkehr und nutzgerechte Technik). Von 2001 bis 2005 haben 24 Unternehmen aus der Automobil-, Zuliefer-, Elektronik-, Telekommunikations- und IT-

---

<sup>1</sup> siehe auch Seite 4

Industrie, Logistikdienstleister, Softwarehäuser sowie verschiedene Forschungsinstitute zusammengearbeitet, um neue Lösungen und Technologien zu entwickeln, die ein sicheres, nachhaltiges und umwelt-schonendes Verkehrsmanagement ermöglichen sowie die Verkehrsteilnehmer entlasten und unterstützen [82].

Geforscht wurde in den drei Schwerpunktbereichen Fahrerassistenz und aktive Sicherheit, Verkehrsmanagement 2010 und Verkehrsmanagement in Transport und Logistik (siehe Abbildung 1).



**Abbildung 1:** Schwerpunktbereiche von INVENT [23]

Im Bereich „Fahrerassistenz, Aktive Sicherheit“ befassten sich die Forscher mit der Entwicklung von intelligenten Fahrerassistenzsystemen, die den Fahrer in schwierigen und gefährlichen Verkehrssituationen warnen und bei seiner Reaktion unterstützen. Im Bereich „Verkehrsmanagement 2010“ lag der Schwerpunkt auf der Vermeidung von Stau und der besseren Nutzung des Strassennetzes. Der Bereich „Verkehrsmanagement in Transport und Logistik“ beschäftigte sich mit der Optimierung des Lieferverkehrs.

Diese drei Schwerpunktbereiche untergliedern sich in die folgenden 8 Teilprojekte:

- Fahrumgebungserfassung und Interpretation
- Vorausschauende, aktive Sicherheit
- Stauassistent
- Fahrverhalten und Mensch-Maschine Interaktion
- Verkehrliche Wirkung, Rechtsfragen und Akzeptanz
- Verkehrsleistungsassistent
- Netzausgleich Individualverkehr

- Verkehrsmanagement in Transport und Logistik

Im Teilprojekt **Stauassistent (STA)** lag der Schwerpunkt in der Entwicklung eines Systems, das die Fahrzeugführung in Stausituationen übernehmen kann. Dabei soll der Fahrer sowohl in Bezug auf die Längs- als auch auf die Querführung unterstützt werden. Weiteres Augenmerk lag bei diesem Teilprojekt auf einer entsprechenden Fahrzeugregelung, auf einem geringeren Kraftstoffverbrauch sowie auf einem verbesserten Verkehrsablauf. Die Ergebnisse aus den durchgeführten Simulationen zeigen, dass der Einsatz von Stauassistenten durch die Homogenisierung des individuellen Fahrverhaltens zu einer Homogenisierung des Geschwindigkeitsniveaus führt. Mit geeigneter Auslegung der Regelung und mit einem ausreichenden Ausrüstungsgrad können der Kraftstoffverbrauch und der Verkehrsablauf verbessert werden.

Das Teilprojekt **Verkehrsleistungsassistentz (VLA)** entwickelte Technologien und Anwendungen, die den Verkehrsfluss bei hohem Verkehrsaufkommen und dichtem Verkehr verbessern sollen. Im Vordergrund standen Assistenzsysteme, die Informationen aus dem Fahrzeugumfeld sammeln, dem Fahrer bereitstellen und ihn damit unterstützen. Die Ergebnisse aus der durchgeführten Simulationen und den praktischen Untersuchungen haben gezeigt, dass sich mit Hilfe der „räumlich und zeitlich hochpräzisen Verkehrsinformationen“ [62] und der „Umsetzung in eine dem Verkehrszustand angepasste Fahrweise“ [62] signifikant positive Effekte hinsichtlich der Verkehrsleistung erzielen lassen. Eine detaillierte Erläuterung der Resultate findet sich im Kap. 3.3.3.

Als Teil des 6. Rahmenprogramms der europäischen Kommission „Information Society Technologies and Media“ (2002 – 2006) ist im Januar 2006 das Forschungsprojekt **eIMPACT** gestartet. 13 Partner, die Erstausrüster, Forschungsinstitute und Universitäten vertreten, untersuchen die sozio-ökonomische Auswirkungen sowie die Auswirkungen auf Verkehrssicherheit und -fluss von intelligenten Sicherheitssystemen [79]. Im Work Package 3200 werden mit drei verschiedenen Mikrosimulationsmodellen (VISSIM, FARSI, IST-Modeller), in welche die Fahrerassistenzsysteme integriert werden, für unterschiedliche Szenarien die Auswirkungen auf Verkehrsfluss, Geschwindigkeit und Reisezeit sowie Benzinverbrauch und mögliche Umweltauswirkungen analysiert. Zum derzeitigen Stand sind die Arbeiten zur Algorithmisierung der Funktionalitäten von Fahrerassistenzsystemen gerade im Gange, d.h. die Mikrosimulationen werden gerade um die entsprechenden Verhaltensweisen ausgerüsteter Fahrzeuge erweitert. Simulationsläufe, die Ergebnisse zum Verkehrsablauf liefern, liegen noch nicht vor.

Das zentrale Ziel des europäischen Projekts **CarTALK 2000** (2001 – 2003) besteht in Entwurf, Test und Evaluation von kooperativen Fahrerassistenzsystemen, die auf einer Kommunikation zwischen den beteiligten Fahrzeugen basieren und die Sicherheit aller Verkehrsteilnehmer erhöhen sollen. Dazu sollen diese Systeme dem Fahrer relevante und aktuelle Informationen über die Verkehrssituation liefern [74]. Im Rahmen der drei Arbeitsbereiche Informations- und Warnungsfunktionen, Kommunikationsbasierte Abstands- und Geschwindigkeitskontrolle und kooperative Fahrerassistenz wurden die Auswirkungen von zwei Kommunikationssystemen („basic warning function“ und „early braking“) mit Simulationen untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass im Vergleich zur Situation ohne Kommunikation zwischen den Fahrzeugen weniger abrupt gebremst wird. Dies bewirkt eine Zunahme der Verkehrsstabilität und folglich positive Effekte auf den Verkehrsfluss.

Zu erwähnen ist, dass über die Jahre zahlreiche Arbeiten und Studien durchgeführt worden sind, welche mittels Simulationsprogrammen (z.B. PELOPS, MIXIC, AIMSUN, VISSIM) die Auswirkungen von Fahrerassistenzsystemen auf den Verkehrsfluss mit Übernahme der Längsführung (z.B. ACC und Stop-and-

---

Go) untersucht und analysiert haben. Im Kap. 3.3.3 befindet sich eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse. Weitere Forschungsarbeiten, die im Rahmen des Themas Fahrerassistenzsystemen und Verkehrsablauf die Leistungsfähigkeit nicht direkt untersucht haben, wurden hier nicht weiter bearbeitet.

Im Zusammenhang mit Forschungs- und Entwicklungsprogrammen der europäischen Union (EU) sind zwei Forschungsorganisationen zu erwähnen.

Bei der Forschungsorganisation EUREKA handelt es sich um ein Netzwerk für marktwirtschaftlich orientierte Forschung und Entwicklung. EUREKA wurde im Jahr 1985 als interstaatliche Initiative gegründet, mit dem Ziel die Wettbewerbsfähigkeit Europas zu stärken. Insgesamt gibt es 32 Vollmitglieder und 5 weitere in Projekte eingebundene Länder.

COST (European COoperation in the field of Scientific and Technical Research) ist eine im Jahr 1971 gegründete Initiative zur Forschungskoooperation zwischen verschiedenen Institutionen und Einrichtungen und zählt insgesamt 34 Mitgliedstaaten. COST TRANSPORT und COST TELECOMMUNICATION sind zwei technische Komitees, die Forschungsvorhaben im Bereich der Verkehrstelematik durchführen.

Im Rahmen von COST läuft unter dem Titel „COST 352 Influence of Modern In-Vehicle Information Systems (IVIS) on Road Safety Requirements“ eine Forschungsprojekt in neun europäischen Staaten, darunter auch der Schweiz. Das Hauptziel der Aktion ist es die Verkehrssicherheit hinsichtlich IVIS-Systemen zu untersuchen. Im Working Package IV wird mittels Simulation auch das Verhalten der Fahrer analysiert, allerdings nur hinsichtlich der Sicherheit. Im Working Package V wird mittels Versuchsfahrten ebenfalls nur das sicherheitsrelevante Fahrverhalten ohne und mit Fahrerassistenzsystemen untersucht. Das Thema der Leistungsfähigkeit wird im Rahmen dieses Forschungsprojektes nicht untersucht.

### 3 Begriffe und Zusammenhänge

#### 3.1 Fahrerassistenzsysteme

##### 3.1.1 Gliederung der Fahrerassistenzsysteme

Bei der Bewegung im Strassenverkehr ergibt sich für den Fahrer die Aufgabe, entsprechend seinen Absichten und der vorhandenen Verkehrssituation zu handeln. Ziel der Fahrerassistenz ist es, den Fahrer gemäss dessen Erwartungen und den Regeln des Verkehrs in der Erfüllung seiner Fahraufgaben zu unterstützen [45].

Eine zweckmässige und häufig genutzte Einteilung der Fahreraufgabe erfolgt nach dem 3-Ebenen-Modell [15], das die Navigations-, Bahnführungs- und Stabilisierungsebenen unterscheidet (siehe Abbildung 2). Dabei ist die Aufgabe der Fahrzeugführung in den Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt eingebettet.

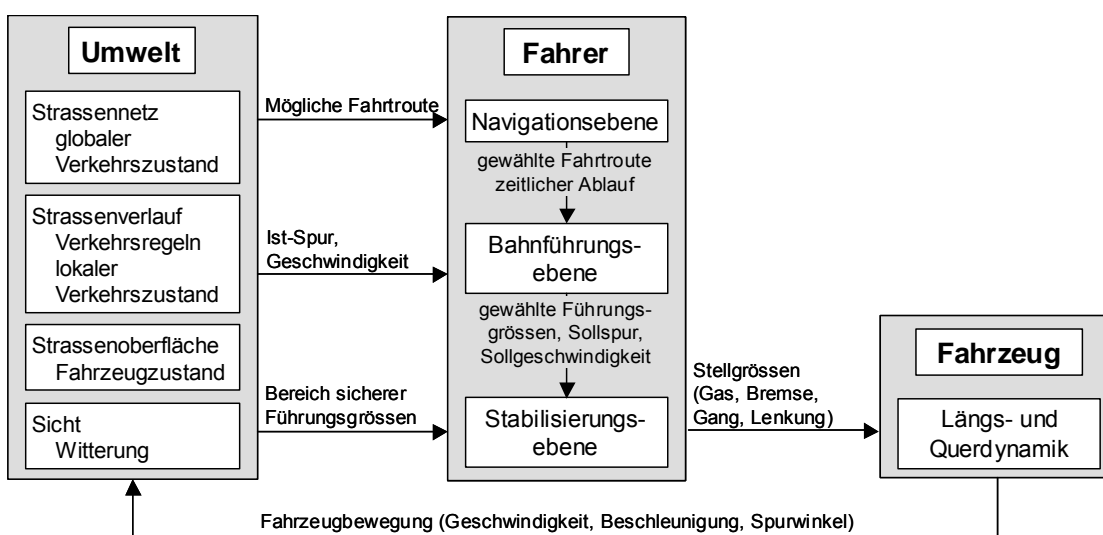


Abbildung 2: 3-Ebenen-Modell der Fahrzeugführung gemäss Donges [15]

In der Navigationsebene wird die Fahrtroute innerhalb des bestehenden Strassennetzes ausgewählt. Die Festlegung der Route erfolgt oft vor der Fahrt und berücksichtigt verschiedene Aspekte wie z.B. erwartete Fahrtzeit, Fahrtzweck und Wünsche von Mitfahrern. Beim Auftreten von Störungen (z.B. Stau, Baustellen, Umleitungen) während der Fahrt, kann sich für den Fahrer die Aufgabe ergeben, eine Alternativroute zu bestimmen.

Auf der Bahnführungsebene erfolgt die Umsetzung der Fahrtroute. Der Fahrer muss seine Fahrweise dem wahrgenommenen Strassenverlauf, den Verkehrsregeln sowie den anderen Verkehrsteilnehmern anpassen. Die Führungsgrössen (Soll-Spur, Soll-Geschwindigkeit) sind vom Fahrer so zu wählen, dass er sich konfliktfrei im Strassenraum bewegen kann.

In der Stabilisierungsebene werden die gewählten Führungsgrössen in Bezug auf Quer- und Längsführung in Fahrzeuga-bewegungen umgesetzt. Dazu werden vom Fahrer die vorhandenen Stellglieder wie Lenkrad, Gas- und Bremspedal genutzt.

---

Bei einem Vergleich der verschiedenen Tätigkeiten fällt insbesondere auf, dass, ausgehend von der Navigationsebene, die für die Bearbeitung der einzelnen Aufgaben zur Verfügung stehenden Zeit abnimmt und die Frequenz der Tätigkeit zunimmt. Können für die Navigationsaufgabe beim Auffinden eines Zieles in einer fremden Stadt mehrere Stunden in Anspruch genommen werden, so stehen auf Bahnführungsebene für Überholvorgänge nur wenige Minuten und für Stabilisierungsreaktionen (z.B. Ausweichmanöver) nur Bruchteile von Sekunden zu Verfügung [16].

Gemäss Wallentowitz et al. [63] können Fahrerassistenzsysteme einerseits einsprechend der Ebene der Fahraufgabe und andererseits entsprechend dem Grad der Fahrerunterstützung gegliedert werden. Eingeteilt nach dem Grad der Fahrerunterstützung ergeben sich:

- Informationen und Warnungen (siehe Kap. 3.1.2),
- Verbindliche Anweisungen (siehe Kap. 3.1.3),
- Korrigierende Eingriffe (siehe Kap. 3.1.4),
- Übernahme von Fahreraufgaben (siehe Kap. 3.1.5).

Ein weiterer Aspekt, der bei der Klassifizierung von Fahrerassistenzsystemen zu berücksichtigen ist, ist die Art des Informationsgewinns bzw. der genutzten Informationsquellen. Einerseits ist die fahrzeugautonome Ermittlung möglich, bei der das System die notwendigen Informationen durch die im Fahrzeug vorhandenen Sensoren bezieht. Informationen über das Umfeld lassen sich durch Radarsensoren, Digitalkameras, Regensensoren usw. gewinnen. Andererseits nutzt das Fahrerassistenzsystem als Informationslieferanten externe Infrastruktureinrichtungen (z.B. Baken oder Schleifen) oder sogar einzelne Fahrzeuge. Die Kombination von fahrzeugautonomen und infrastrukturgestützten Systemen verspricht eine deutlich gesteigerte Leistungsfähigkeit für neue Telematiksysteme [63]. Ein Beispiel solcher kombinierter Systeme stellen die „Automated Highways“ (AHS) dar, welche selbstfahrende Einzelfahrzeuge in einem Verbund zusammenschliessen, um den Verkehrsraum optimal auszunutzen.

### 3.1.2 Warnende und Informierende Systeme

Informierende und warnende Systeme unterstützen den Fahrer in entsprechenden Situationen mit einem Hinweis. Im Gegensatz zu informierenden Systemen, die eine rein informierende Funktion ausweisen (z.B. die Aussentemperaturanzeige), erfolgt das Warnen nur in Gefahrensituationen und ist in seiner Ausprägung so beschaffen, dass der Warnhinweis die Aufmerksamkeit des Fahrers auf sich zieht (akustisch, optisch oder haptisch<sup>2</sup>). Der Fahrer ist bei beiden Assistenzsystemen das ausführende Organ und behält somit den vollen Entscheidungs- und Verantwortungsfreiraum [27]. Beispiele hierzu sind:

#### 3.1.2.1 Abstandswarner

Abstandswarner benutzen fahrzeugseitige Sensoren zur Messung und Anzeige von Abständen zu anderen Fahrzeugen oder Hindernissen vorn, hinten und seitlich. Der Fahrer wird auf die Gefahrensituationen akustisch und optisch nur aufmerksam gemacht, es erfolgt aber keine automatische Reaktion auf die Gefahrensituation durch das Fahrzeug selbst [61].

---

<sup>2</sup> Haptische Warnung: Warnhinweis mit Vibration z.B. des Steuerrades oder des Sitzes

Dynamische Systeme, welche die Funktionen der Abstandswarnung erweitern, sind bereits auf dem Markt (z.B. Adaptive Cruise Control ACC) oder in Entwicklung (z.B. Stauassistent).

### 3.1.2.2 Einparkhilfe

Diese Systeme arbeiten mit Ultraschallsensoren, die sich im seitlichen und hinteren Bereich der Stossstangen befinden und das Umfeld des Fahrzeugs überwachen. Sobald der Fahrer den Rückwärtsgang eingelegt hat, unterstützt ihn die elektronische Einparkhilfe beim Manövrieren in die Parklücke. Dies erfolgt mit optischen und akustischen Warnsignalen, falls das Fahrzeug dem Hindernis zu nahe kommt. Während der Fahrer bei dieser Variante das Lenkrad selbst steuern muss, wird bei der Einparkhilfe der nächsten Generation mit Knopfdruck das Lenken durch das System übernommen.

Diese Systeme werden hier nicht weiter betrachtet, da so gut wie kein Zusammenhang zum Thema Leistungsfähigkeit auf Autobahnen besteht.

### 3.1.2.3 Spurassistent

Der Spurassistent (lane departure warning) warnt den Fahrer eines Fahrzeugs, wenn Gefahr besteht, von der Fahrbahn abzukommen. Hierbei sind unterschiedliche optische Systeme im Einsatz, welche die Fahrspurmarkierungslinien erfassen und die Fahrzeugposition in Bezug auf die Fahrspurbegrenzung auswerten. Die Fahrspurerkennung wird häufig durch ein Kamerasystem (z.B. Lane Guard System von MAN [83]) oder durch Infrarotsensoren am Unterboden des Fahrzeugs (z.B. AFIL im Citroën C4, Citroën C5 und Citroën C6 [75]) realisiert. Sobald das Fahrzeug die Fahrspur langsam in einem bestimmten Winkel verlässt, wird der Fahrer optisch, akustisch oder haptisch gewarnt. Bei MAN-Nutzfahrzeuge ertönt ein "Nagelbandrattern" aus den jeweiligen Radiolautsprechern und bei Citroën wird der Fahrer haptisch durch Vibrationsmotoren im Fahrersitz aufmerksam gemacht.

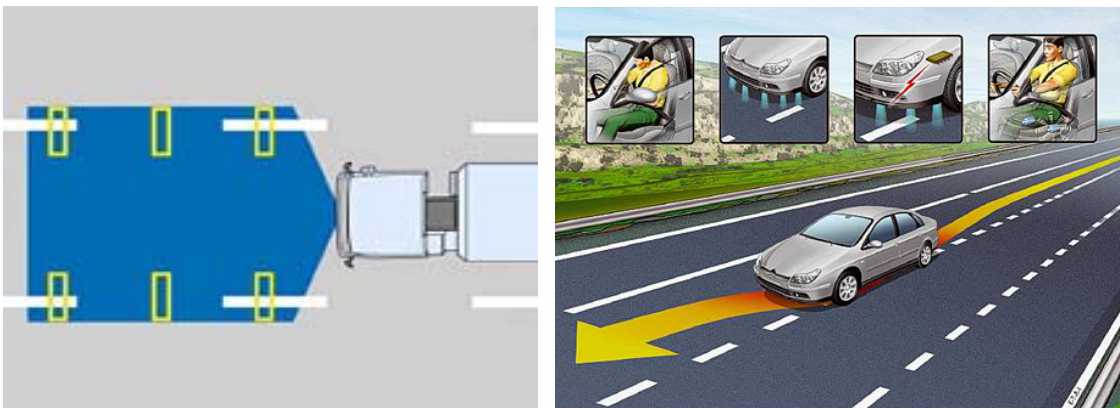


Abbildung 3: Spurassistent gemäss MAN (links) [83] und Citroen (rechts) [75]

### 3.1.2.4 Tote-Winkel-Überwachung (Blind Spot detection)

Dieses System warnt den Autofahrer, wenn sich ein Fahrzeug im toten Winkel zwischen Rückspiegel und Auto aufhält. Sie werden eingesetzt, um den Fahrer bei kritischen Situationen z.B. bei Überholmanöver zu warnen. Auf dem Markt sind unterschiedliche Konzepte vorhanden, um die Fahrzeugumgebung im Bereich des toten Winkels aufzunehmen:

- mit Bilderfassungssystemen, in der Regel im Rückspiegel integrierte Kameras (z.B. Blind Spot Detection von Siemens [87] oder BLIS von Volvo [89]),
- mit Radarsensoren (z.B. Blind Spot Detection von VRS [88]).

Befindet sich ein Fahrzeug im toten Winkel, wird es vom System erkannt. Je nach System wird der Fahrer entweder mit einem Tonsignal, einem Symbol im Aussenspiegel oder einer Anzeige im Cockpit darüber informiert.

### 3.1.2.5 Spurwechselassistent

Der Spurwechselassistent unterstützt den Fahrer beim Wechseln der Fahrspuren. Ergänzend zu dem toten Winkel (siehe Tote-Winkel-Überwachung) wird der Raum hinter dem Fahrzeug mit Radarsensoren, Kameras oder Laserscannern überwacht. Befindet sich auf der Nachbarspur ein Fahrzeug oder nähert sich eines von hinten mit einer Geschwindigkeit, die für einen Spurwechsel kritisch ist, wird der Fahrer gewarnt. Warnungen werden optisch durch Leuchtanzeigen im Bereich des Aussenspiegels oder im Cockpit, akustisch oder haptisch durch Vibration des Lenkrads oder des Blinkerhebels ausgegeben.

Eine Weiterentwicklung stellt die Spurwechselunterstützung dar (siehe Kap. 3.1.5).

### 3.1.2.6 Sichthilfen (Enhanced Vision)

Enhanced Vision Systeme verbessern die Sicht des Fahrers in bestimmten Situationen z.B. bei eingeschränkter Sicht durch Nebel, Regen, Schnee oder Dunkelheit. Diese Systeme sehen den Einsatz von fahrzeugseitiger Ausrüstung zur Erkennung und Visualisierung von Hindernissen im Blickfeld des Fahrers vor, wie z.B. „intelligente“ Scheinwerfer oder Nachtsichtgeräte.

Das adaptive Kurvenlicht (auch Adaptive Light Control genannt) ist ein System, das im Gegensatz zu herkömmlichen Scheinwerfern über horizontal schwenkbare „intelligente“ Scheinwerfer verfügt, welche die Kurven optimal ausleuchten, sobald der Fahrer in sie einlenkt. Verfügbar auf dem Markt ist zum Beispiel das dynamische Kurvenlicht der Firma Hella KG [81], das automatisch zugeschaltet wird, sobald das Fernlicht eingeschaltet ist und das Fahrzeug in eine Kurve gelenkt wird. Dabei werden die Daten eines Gierratensensors, der die Querbewegung des Fahrzeugs misst, ausgewertet und sobald das Fahrzeug eine gerade Strecke erreicht hat, werden die zusätzlichen Kurvenscheinwerfer ausgeschaltet. Hinter der intelligenten Lichtsteuerung Adaptive Light Control von BMW [72] verbirgt sich ein System, das anhand von Daten des GPS-Satellitensystems und digitalisierter Strassenkarten erkennt, in welchem Abschnitt des Strassennetzes sich das Fahrzeug befindet. Zusammen mit Informationen über Geschwindigkeit, Lenkwinkel und Querbewegung werden schwenkbare Kurvenscheinwerfer gesteuert und der Strassenverlauf in Kurven ausgeleuchtet.

Nachtsichtsysteme basieren auf Infrarotstrahlen, die für das menschliche Auge unsichtbar sind. Diese werden an der Fahrzeugfront in zwei Laserscheinwerfern erzeugt und in Fächerform ausgestrahlt. Die Lichtverteilung und die Reichweite von rund 150 m entsprechen dabei etwa einem Fernlichtscheinwerfer. Eine Infrarot-Kamera nimmt das Bild der Strasse auf und erzeugt eine schwarz-weiße Abbildung, die im Blickfeld des Fahrers in einem Monitor für den Fahrer sichtbar gemacht (siehe Abbildung 4) oder in einem Head-up-Display direkt in die Frontscheibe projiziert wird. Da mit diesem System auch Wärmestrahlung und Bewegung übermittelt werden können, können beispielweise Fußgänger detektiert werden (siehe Abbildung 4).



Abbildung 4: Nachtsichtsystemen von Mercedes Benz (links) [84] und BMW (rechts) [72]

### 3.1.2.7 Objektwarnsysteme

Objektwarnsysteme sind passive Systeme, die Informationen über den Strassenzustand wie z.B. „Eisglätte“, „nasse Fahrbahn“ oder „Unfall hinter der Kurve“ sammeln. Um den Fahrer frühzeitig über die Gefahrensituationen auf dem vorausliegenden Strassenabschnitt zu informieren bzw. zu warnen, werden die mittels Infrastruktursensoren gesammelten Informationen dem Bordcomputer übermittelt [27]. Zur Übermittlung von Informationen ist ebenfalls die Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation möglich. Dabei erfasst das vorausfahrende Fahrzeug seine Umgebung und gibt dem nachfolgenden Fahrzeug wertvolle Informationen bezüglich Verkehrssituation, Strassenzustand, mögliche Hindernisse oder lokale Witterungsbedingungen weiter [66].

### 3.1.2.8 Automatische Fahrzeugdiagnose<sup>3</sup>

Die On-Board-Diagnose (OBD) ist eine in den Fahrzeugen integrierte Diagnose, die während der Fahrt alle abgasrelevanten Bauteile und Systeme überwacht. Auftretende Fehler werden dem Fahrer über eine Warnlampe angezeigt und im jeweiligen Steuergerät dauerhaft gespeichert. Die Fehlermeldungen können dann später in einer Werkstatt über eine Kabelverbindung mit einem Scantool abgefragt werden.

In der EU ist die OBD für Fahrzeuge mit Benzinmotor ab Modelljahr 2001 und für Fahrzeuge mit Dieselmotoren ab Modelljahr 2004 erforderlich. Die nächsten Schritte bestehen zuerst in der Verwendung mobiler Datenübertragung, die auch eine Ferndiagnose ermöglicht, und dann in der Übertragung angepasster Software zur Pannenbehebung [27].

### 3.1.2.9 Informationsübermittlung von Verkehrssignalen und Geschwindigkeitsbegrenzungen

Diese Systeme sehen die Übermittlung von Verkehrssignalen und Geschwindigkeitsbegrenzungen in das Fahrzeug vor. Der Fahrer wird dabei optisch und akustisch gewarnt, die übermittelte Information hat jedoch keinen Einfluss auf das Fahrzeug.

Die Übermittlung der Informationen kann gemäss [27] beispielweise mittels strassenseitiger Ausrüstung der Verkehrssignale mit Transpondern und Empfänger im Fahrzeug oder durch Zugreifen des Systems auf Strassenkarten mit Verkehrssignalen und Geschwindigkeitsbeschränkungen erfolgen. Der Fahrer wird dann bei einer Überschreitung der Geschwindigkeitslimite mit einer Anzeige informiert.

<sup>3</sup> Auf die automatische Fahrzeugdiagnose wird im Folgenden nicht weiter eingegangen, da sie im Sinne der vorliegenden Untersuchung nicht als Fahrerassistenzsystem zu betrachten ist. Sie wird von Autoherstellern oft zu den Fahrerassistenzsystemen gezählt.

---

### 3.1.3 Systeme mit verbindlichen Anweisungen

Bei den verbindlichen Anweisungen werden die Informationen so ausgewertet und aufbereitet, dass dem Fahrer lediglich die Auswahl der Systemreaktion überlassen wird [63].

#### 3.1.3.1 Systeme zur Lenkerüberwachung

Zu den Systemen zur Lenkerüberwachung zählen alle Geräte, die den physischen Zustand des Fahrers messen (z.B. Schläfrigkeit, Aufmerksamkeitsmangel, Grad der Alkoholbeeinträchtigung, vermittelt z.B. über Augenbewegungen und Herzfrequenz) und das eventuelle Risiko bei einem abnormalen Zustand abschätzen. Wenn die sichere Weiterfahrt aufgrund des physischen Zustandes des Fahrers nicht mehr gewährleistet ist, ertönt z.B. ein Warnzeichen. Es sind aber auch Systeme in Diskussion, die gegebenenfalls das Zündschloss vor der Abfahrt blockieren oder zu einem kontrollierten Anhalten führen (siehe auch [27] und [46]).

#### 3.1.3.2 Fahrzeugseitige Umsetzung von Verkehrssignalen und Geschwindigkeiten

Die Übermittlung von Verkehrssignalen und Geschwindigkeitsvorschriften erfolgt wie in Kap. 3.1.2 beschrieben mit fahrzeugseitiger Ausrüstung der Verkehrssignale oder digitalen Strassenkarten. Bei diesen Systemen erfolgt aber eine fahrzeugseitige Umsetzung der übermittelten Informationen, wobei unterschieden werden muss zwischen [27]:

- Komfortsysteme (z.B. intelligenter Tempomat), die vom Fahrer ausgeschaltet werden können
- Systeme zur zwangsweisen Verkehrsbeeinflussung, auch Intelligent Speed Adaption (ISA) genannt. ISA unterstützt den Fahrer bei der Einhaltung der Geschwindigkeitslimiten, indem es die Fahrzeuggeschwindigkeit auf die Höchstgeschwindigkeit des gerade befahrenen Strassenabschnittes anpasst.

#### 3.1.3.3 Verkehrszeichenerkennung

Die elektronische Verkehrszeichenerkennung unterstützt der Fahrer bei Einhaltung der Geschwindigkeitslimiten. Eine Kamera überwacht kontinuierlich die Strasse vor dem Fahrzeug und liefert die Daten an einen Bordcomputer, der Geschwindigkeitsbeschränkungen auf Verkehrsschildern erkennt. Je nach Systemanbieter können ausserdem die erfassten Daten mit den Informationen eines Navigationssystems abgeglichen werden. Fährt der Fahrer zu schnell, wird dies für ihn gut sichtbar, z.B. im Tachometer oder im Head-up-Display eingeblendet.

Das System zur Verkehrszeichenerkennung von Siemens VDO [87] (Traffic Sign Recognition TSR) bietet ausserdem die Möglichkeit, bei einem entsprechenden Fahrerwunsch, die Geschwindigkeit mit einem automatischen Eingriff zu reduzieren, der vom Fahrzeuglenker allerdings korrigiert werden kann. Die erwünschte Tempodrosselung wird vom im Vorfeld eingestellten Abstandsregeltempomat ACC (siehe Kap. 3.1.5) durchgeführt. Das TSR wurde im Rahmen von „pro.pilot“, dem Fahrerassistenzsystem-Netzwerk von Siemens VDO, entwickelt und wird voraussichtlich im Jahr 2008 in Serie gehen.



Abbildung 5: Verkehrszeichenerkennung von Siemens VDO [87]

### 3.1.4 Systeme mit korrigierenden Eingriffen

Systeme mit korrigierendem Eingriff werden bisher nur auf Stabilisierungsebenen eingesetzt und leiten die zur Realisierung des als optimal identifizierten Bewegungsablaufs notwendigen Führungsgrößen direkt an das Fahrzeug weiter. Mit Ausnahme der Aktivierung und Deaktivierung des Systems, hat dabei der Fahrer keine Eingriffsmöglichkeit. Beispiele dafür sind:

#### 3.1.4.1 Antiblockier-System (ABS)

Das ABS ist das älteste stabilisierende, autonome System und verhindert das Blockieren der Räder bei einer Vollbremsung. Raddrehzahlsensoren überwachen ständig alle Räder. Neigt ein Rad zum Blockieren, greift ABS sofort ein und reduziert den Bremsdruck an diesem Rad, so dass es nicht vollständig zum Stehen kommt. Da dadurch das Fahrzeug lenkbar bleibt, kann der Fahrer Hindernissen ausweichen. Weltweit sind ca. 70% der Neufahrzeuge mit ABS ausgestattet [73] und seit Mitte 2004 dürfen in der EU nur noch Autos mit ABS neu zugelassen werden.

#### 3.1.4.2 Antriebsschlupfregelung (ASR)

Nach der Einführung von ABS wurde das System zur ASR weiterentwickelt. Bei der ASR registrieren Raddrehzahlsensoren ein Durchdrehen (Schlupf) der Räder und das Antriebsmoment des Motors wird durch gezielte Brems- und / oder Motormanagementeingriffe reguliert. So kann die Traktion und die Fahrstabilität während der Anfahr- und der Beschleunigungsphase auf gerader Strecke als auch bei Kurvenfahrt gewährleistet werden.

#### 3.1.4.3 Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP)

Das ESP ist seit dem Jahr 1995 in Fahrzeugen verfügbar (Serienmässig z.B. in der S-Klasse von Mercedes-Benz) und baut auf der Technik von ABS und ASR auf. Während ABS und ASR die Längsdynamik des Fahrzeugs beeinflussen, verbessert ESP zusätzlich die Querdynamik und sorgt damit für ein stabiles Fahrverhalten in allen Richtungen. Durch den permanenten Vergleich der mit Sensoren erfassten Daten

(Querbewegung, Gierverhalten<sup>4</sup>, Raddrehzahlen) erkennt das ESP, ob der tatsächliche Kurs dem gewünschten entspricht. Ist das nicht der Fall, bremst das ESP die Räder individuell, reduziert die Motorleistung und verbessert so die Stabilität und Kontrollierbarkeit des Fahrzeugs. Einen hohen Bekanntheitsgrad erlangte das ESP in Zusammenhang mit dem „Elchtest“, bei dem im Jahr 1997 in Schweden das Kippen der neuen A-Klasse von Mercedes-Benz getestet wurde. Von da an wurde in die A-Klasse ein ESP eingebaut.

#### 3.1.4.4 Bremsassistent (BA)

Unfallauswertungen haben ergeben, dass viele Fahrer in Notsituationen bei Vollbremsungen, zwar schnell reagieren, aber viel zu schwach oder zu zögerlich auf das Bremspedal treten. Der BA unterstützt den Fahrer, wenn dieser bei einer Notbremsung nicht stark genug aufs Bremspedal tritt. Ein Sensor erkennt den Versuch der Vollbremsung und erhöht der Bremsdruck auf das mögliche Maximum, so dass der Bremsweg verkürzt wird. Unterstützend zum Bremsassistent arbeitet das ABS, welcher eine optimale Verzögerung ohne Blockieren der Räder bewirkt.

#### 3.1.4.5 Active-Body-Control-System (ABC)

Das ABC wurde erstmals im Jahr 1999 in Fahrzeugen eingesetzt und hat die Aufgabe, die Freiheitsgrade (Wank- und Nickbewegungen, Niveaustabilität, Dämpfung) des Fahrzeugs zu regeln. Mit Hilfe von Sensoren werden die Niveaulage des Fahrzeugs und die Karosseriebeschleunigung überwacht. Damit werden Bewegungen der Karosserie erkannt und innerhalb von Millisekunden korrigiert. Dies geschieht durch hydraulisch regelbare Stellzylinder (Plungerkolben), welche die Federwirkung je nach Karosseriebewegung beeinflussen. Wie gross der Druck auf die Feder sein muss und wie lange er dauert, hängt von den Sensorsignalen über die aktuelle Niveaulage und Beschleunigung der Karosserie ab. Auf diese Weise reduziert das ABC die Aufbaubewegungen beim Anfahren, bei der Kurvenfahrt und beim Bremsen (je nach Modell) um mehr als 60%.

#### 3.1.4.6 Störgrössenkompensation

In Entwicklung ist bei der Gruppe MAN Nutzfahrzeuge [83] die sogenannte Störgrössenkompensation. Dieses System stabilisiert den Fahrkurs durch Ausregelung von Querkrafteinflüssen (z.B. Seitenwind oder Spurrillen). Hierzu ist ein Eingriff in die Lenkung erforderlich. Der Kompensationsregler korrigiert die Störungen und gibt eine Gegenkraft auf das Lenksystem. Dadurch wird das Fahrzeug ohne Zutun des Fahrers auf Kurs gehalten.

### 3.1.5 Systeme mit Übernahme von Fahreraufgaben

Die Übernahme der Fahreraufgabe stellt die Endstufe des automatischen Fahrens dar [27]. Der Fahrer hat eine rein überwachende Funktion und die Fahrzeugführung wird vollständig vom Assistenzsystem übernommen<sup>5</sup>. Bei dieser Form beeinflusst das automatische System die Längs- und die Querverführung sowie die Kombination aus diesen beiden. Ein in heutigen Fahrzeugen verfügbares System ist der konventionelle Fahrgeschwindigkeitsregler (Tempomat), der eine vom Fahrer vorgegebene Geschwindigkeit einregelt.

#### 3.1.5.1 Adaptive Cruise Control (ACC)

Die adaptive Abstands- und Geschwindigkeitsregelung unterstützt den Fahrer vor allem auf Autobahnen und gut ausgebauten Landstrassen bei der längsdynamischen Steuerung des Fahrzeugs. Diese Systeme

<sup>4</sup> Gierverhalten = Drehebewegung des Fahrzeugs um die Vertikalachse

<sup>5</sup> Die Wiener Konvention sieht vor, dass der Fahrzeugführer jederzeit die Kontrolle über sein Fahrzeug haben muss. Diese Regel bleibt auch gültig, wenn FAS „mit Übernahme von Fahreraufgaben“ vorhanden sind.

erweitern die Funktion des Abstandswarners, indem sie die Kontrolle der Geschwindigkeit und der Sicherheitsabstände übernehmen. Der Fahrer gibt seinen Tempowunsch und den Abstand zum Vorderfahrzeug ein und das System hält auf einer freien Strecke das Tempo konstant. Bei Annäherung an ein langsamer vorausfahrendes Fahrzeug, wird automatisch gebremst falls der Sicherheitsabstand zu gering wird. Wenn der Abstand wieder grösser wird, beschleunigt das Fahrzeug automatisch (siehe Abbildung 6). Heutige ACC können bei Geschwindigkeiten zwischen 30 km/h und 180 km/h aktiviert werden

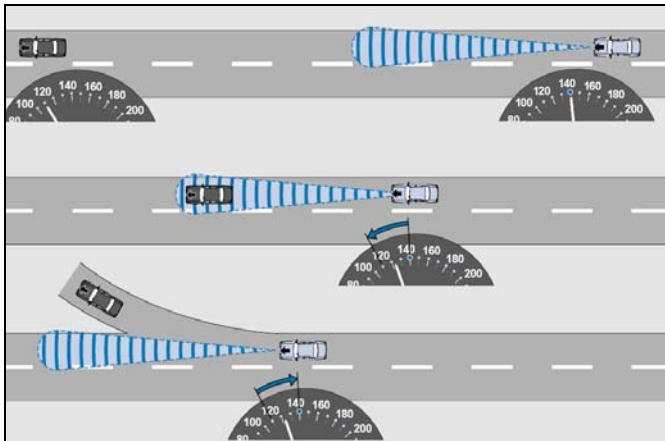


Abbildung 6: Funktion des ACC-Systems gemäss Bosch [73]

Kernstück von ACC-Systeme sind Radarsensoren zur Erfassung der Fahrumgebung. Die Reichweiten betragen je nach Sensortyp 120 bis 250 m bei Erfassungswinkeln zwischen 6 und 8 Grad [41]. Objekt- und Fahrzeuginformationen werden einem Regelungssystem zugeführt. Dieses steuert Motor, Getriebe und Bremse, so dass der gegebene, in der Regel geschwindigkeitsabhängige Abstand (i.a. zwischen 1 und 2 Sekunden wählbare Zeitlücke) eingeregelt oder die vom Fahrer bestimmte Geschwindigkeit nicht überschritten wird. Das Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten wird damit vom Fahrzeug übernommen.

1998 brachte beispielweise Mercedes-Benz unter dem Namen DISTRONIC zum ersten Mal einen Abstandsregeltempomat in der S-Klasse auf den Markt [84]. In der Zwischenzeit können diese Systeme bei der Mehrheit der Fahrzeughersteller für Fahrzeuge der oberen Klasse bestellt werden.

### 3.1.5.2 Stauassistent

Der Stauassistent erweitert das ACC-System um die Stop-and-Go Funktion. Dies ermöglicht eine automatische Abstandskontrolle bei langsamen Geschwindigkeiten (0 – 30 km/h) bzw. bei zähflüssigem Verkehr (z.B. im Stadtverkehr) und wird durch eine Ausweitung der Systeminformation (z.B. Vergrößerung des Öffnungswinkels bei Radarsensoren) erreicht.

Der Stauassistent übernimmt die folgenden Fahraufgaben:

- Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug einhalten
- Halten des Fahrzeugs in der Fahrspur
- Automatisches Abbremsen bis zum Stillstand hinter dem vorausfahrenden Fahrzeug

- Fahreraktiviertes Anfahren

Im Jahr 2005 kam bei DaimlerChrysler [78] die zweite Generation des Abstandsregeltempomat, das DISTRONIC Plus, als Stauassistent bis zum Stillstand zum Einsatz. Ebenfalls seit 2005 bietet Nissan [85] die Erweiterung zum Stauassistenten an.

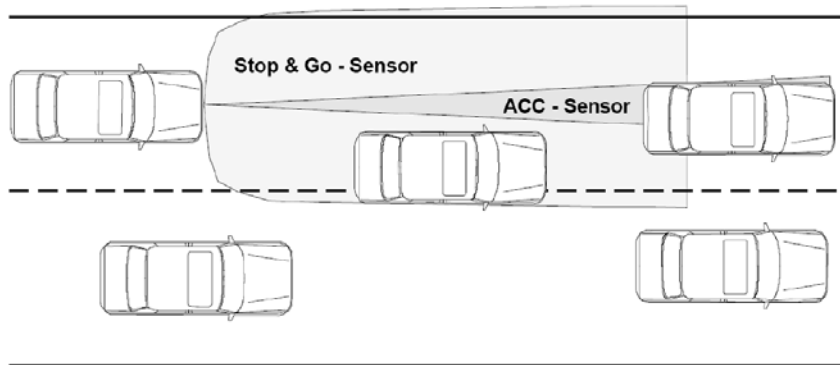


Abbildung 7: Stauassistent, Erfassungsprobleme bei einschierenden Fahrzeuge [16]

### 3.1.5.3 Spurwechselunterstützung und Ausweichassistent

Spurwechselunterstützung und Ausweichassistenten sind eine Erweiterung des Spurwechselassistenten (siehe Kap. 3.1.2). Diese Systeme unterstützen den Fahrer beim Spurwechsel und bei Ausweichvorgängen und führen auf Wunsch des Fahrers einen automatischen Spurwechsel durch. Dazu wird die Verkehrssituation rund um das Fahrzeug mit Sensoren erfasst. Der Ausweichassistent (z.B. in MAN Nutzfahrzeugen [83]) unterstützt den Fahrer bzw. übernimmt die Fahraufgaben wie folgt:

1. Warnung, wenn er einen Spurwechsel beabsichtigt und ein Fahrzeug links neben dem Fahrzeug fährt oder sich von hinten nähert,
2. Spurwechselempfehlung, wenn bei der Annäherung an ein langsames Fahrzeug ein Spurwechsel möglich ist,
3. akustische Warnung des Fahrers beim Auffahren auf ein vorausfahrendes Fahrzeug,
4. automatischer Spurwechsel, wenn der Fahrer die Spurwechselempfehlung bestätigt.

### 3.1.5.4 Automatische Notbremsung

Ziel der automatischen Notbremsung ist die Reduktion der Unfälle und Unfallschwere in kritischen Situationen. Dazu wird in der Regel der Abstand zu vorausfahrenden Fahrzeugen automatisch gemessen. Bei Unterschreiten eines kritischen Abstandes, der eine Kollision unvermeidlich macht, wird eine automatische Notbremsung durch den Bordcomputer veranlasst.

Ein solches System wird heute bereits bei einzelnen Lastwagenherstellern als Standardausrüstung angeboten. Das Active Brake Assist (ABA) System von Mercedes Benz [84] leitet eine Vollbremsung ein, wenn der Fahrer einen drohenden Auffahrunfall nicht erkennt. Der Bremsassistent verhindert nicht immer einen Zusammenstoß, kann aber bei einer Kollision die Geschwindigkeit des auffahrenden Lastwagens deutlich reduzieren und die Unfallfolgen so minimieren. Das auf dem Radar der Abstandsregelung basierende System erkennt 7 bis 150 Meter vor dem Lastwagen fahrende Verkehrsteilnehmer und ermittelt

ständig die Differenzgeschwindigkeiten zum vorausfahrenden Fahrzeug. Bei Gefahr wird der Fahrer mit einem akustischen Signal gewarnt. Verschärft sich die Situation, reagiert das System mit einer Teilbremsung. Reagiert der Fahrer immer noch nicht, leitet der Assistent eine Vollbremsung ein.

### 3.1.5.5 Kollisionswarnsystem

Kollisionswarnsysteme, die in Notsituationen die volle Kontrolle über das Fahrzeug übernehmen und selbstständig Brems- und Ausweichmanöver durchführen, sind erst für die Zukunft geplant. Zurzeit sind aber zahlreiche Technologien in Entwicklung, die ausgehend von der ACC-Unterstützung, die Position und die Geschwindigkeit der anderen Fahrzeuge erfassen und kritische Situationen sowohl im innerstädtischen Verkehr (z.B. parkierte Fahrzeuge) als auch auf Autobahnen (z.B. plötzlich auftretender Stau) vor dem Fahrer erkennen sollen. Ist dies der Fall, werden Warnsignale ausgelöst.

Beispiele dazu sind z.B. Systeme zur Vermeidung von Kollisionen im Knotenbereich, welche sich der Kreuzung nähernde Fahrzeuge überwachen und den Fahrer bei einer Nicht-Einhaltung des Rechtsvortrittes warnen, oder Systeme zur Erkennung von Hindernissen auf der Fahrbahn.

### 3.1.5.6 Umfassende Fahrzeuglenkung

Mit dem Begriff „umfassende Fahrzeuglenkung“ werden Systeme zur automatischen Fahrzeugortung und -lenkung gemeint. Diese Systeme sehen den Einsatz von strassenseitigen elektronischen Leiteinrichtungen, welche auf bestimmten Strecken oder innerhalb spezieller Gebiete mit dafür ausgerüsteten Fahrzeugen kommunizieren. Da mit der fahrzeugseitigen Ausrüstung auch die Kommunikation mit anderen Fahrzeugen möglich ist, wird das Fahrverhalten des Fahrzeuges optimiert. Die Koordination, die Steuerung und die Leitung der ausgerüsteten Fahrzeuge wird von einer übergeordneten Leitstelle übernommen [27].

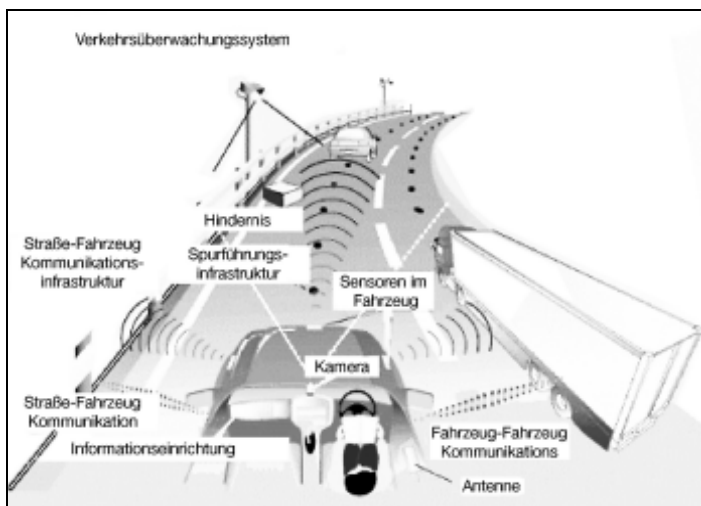


Abbildung 8: Systemausstattung zum automatischen Fahren [63]

In den Vereinigten Staaten wurde schon in den 1980-er Jahren mit Projekten zur Entwicklung von Systemen zum automatischen Fahren begonnen (z.B. seit 1986 das Projekt PATH Partners for Advanced Transit and Highways). Heute wird vor allem in Japan zu diesem Thema geforscht. Aber im Gegensatz zu den inzwischen kaum mehr weiter verfolgten Projekten aus den USA, wird hier das automatische Fahren höchstens noch als langfristiger Entwicklungsschritt gesehen. Der Schwerpunkt liegt in den Bereichen Information und Überwachung des Fahrverhaltens [40].

---

Die Vorstellungen und Möglichkeiten eines organisierten Verkehrsablaufes auf Autobahnen werden mit dem Begriff „Automated Highway Systems“ (AHS) erfasst. Die Zielvorstellungen gehen davon aus, dass es in Zukunft möglich sein wird, selbstfahrende Fahrzeuge in einem Verbund zusammenzuschliessen und den Verkehrsraum optimal auszunutzen [63]. Da nach der Einführung von solchen Systemen für einen Zeitraum von mehreren Jahren noch mit einem Anteil nicht ausgerüsteter Fahrzeuge zu rechnen ist, sollen die vollautomatischen Fahrzeuge entweder mit dem „normalen“ Verkehr oder auf einer eigenen Fahrbahn geführt werden. Die Trennung der automatischen Fahrzeuge vom „normalen“ Verkehr könnte notwendig sein, da die automatischen Fahrzeuge noch nicht so weit entwickelt sind, dass sie auch mit plötzlich auftretenden Situationen und mit der Unberechenbarkeit der anderen Verkehrsteilnehmer umgehen können.

Die Frage, wie die AHS gestaltet werden sollen, wird u.a. im Rahmen der Plattform des „Intelligent Transportation Systems“ (ITS) verfolgt. Die amerikanischen und japanischen Modelle haben die Machbarkeit der autonomen Spurführung untersucht und gezeigt. Im Bereich des Mischbetriebs wird ebenfalls geforscht. Es sind aber noch Zusatzausstattungen zu entwickeln, die konventionell geführte Fahrzeuge erfassen und bewerten. Ausserdem bedarf es auch zusätzlicher Einrichtungen zur Hinderniserkennung. Aus diesen Gründen werden diese Anwendungen pilotmässig auf speziellen Gebieten (z.B. Flughafen oder Industrieareale) durchgeführt [27].

## **3.2 Leistungsfähigkeit**

### **3.2.1 Randbedingungen**

Gegenstand der vorliegenden Forschungsarbeit sind Kapazitätsgewinne und -verluste im dynamischen Verkehrsfluss für freie Strecken auf Hochleistungsstrassen. Kapazitätsverluste infolge von Unterbrüchen und Unfällen werden nicht betrachtet. Wenn letztere als Folge von Fahrerassistenzsystemen abnehmen, besteht auch hier eine positive Auswirkung von Fahrerassistenzsystemen auf die Leistungsfähigkeit von HLS.

Die Überlegungen in den folgenden Kapiteln beziehen sich somit nur auf freie Strecken auf Autobahnen.

### **3.2.2 Definition**

Der Begriff „Leistungsfähigkeit“ wird in der Literatur [4], [28] je nach Zusammenhang wie folgt unterschieden:

- ideale Leistungsfähigkeit, auch Kapazität genannt. Man geht dabei vom Idealzustand sowohl der Fahrbahn als auch der Verkehrs- und Umweltbedingungen aus. Da auf der idealen Fahrbahn alle Einflüsse, welche zur Reduktion der Leistungsfähigkeit führen können, ausgeschaltet sind, überschätzt die „ideale Leistungsfähigkeit“ die realen Verhältnisse.
- mögliche Leistungsfähigkeit. Dabei werden die im Einzelfall vorliegenden Fahrbahn-, Fahrzeug-, Fahrer-, Verkehr- und Umweltbedingungen berücksichtigt (siehe Kap. 3.2.3).
- praktische Leistungsfähigkeit, auch Entwurfsleistungsfähigkeit genannt. Hier werden zusätzlich noch Anforderungen an die Qualität des Verkehrsflusses gestellt, d.h. an Geschwindigkeit, Be-

wegungsfreiheit (Möglichkeit zum Fahrstreifenwechsel) und Sicherheit. Die „praktische Leistungsfähigkeit“ entspricht somit bei der Dimensionierung von Verkehrsanlagen der Qualitätsstufe C oder D [28].

In der Schweizer Norm SN 640 017a [49] wird die Leistungsfähigkeit einer Verkehrsanlage definiert. Diese Definition ist mit der „möglichen Leistungsfähigkeit“ (siehe oben) vergleichbar. Mit Leistungsfähigkeit einer Verkehrsanlage wird in der Norm „die grösstmögliche Verkehrsstärke verstanden, von der erwartet werden kann, dass sie einen Abschnitt einer Verkehrsanlage während eines gegebenen Zeitintervalls  $t$ , bei gegebenen Strassen-, Verkehrs- und Betriebsbedingungen durchfahren kann“ [49]. Mit gegebenen Strassen-, Verkehrs- und Betriebsbedingungen werden die wichtigsten Einflussfaktoren der Leistungsfähigkeit bezeichnet (siehe dazu Kap. 3.2.3). Die Leistungsfähigkeit entspricht somit der grösstmöglichen Verkehrsstärke, die eine Verkehrsanlage bewältigen kann.

Eine gute Visualisierung der verschiedenen Parameter und Abhängigkeiten ergibt sich dabei mit dem Fundamentaldiagramm d.h. die graphische Darstellung des Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke  $q$ , Verkehrsdichte  $k$  und mittlerer Geschwindigkeit  $v$  eines Verkehrsstroms (siehe Abbildung 9). Die Leistungsfähigkeit stellt dabei das Maximum des Fundamentaldiagramms dar und kennzeichnet den Übergangsbereich zwischen dem freien, stabilen und dem zusammengebrochenen, instabilen Verkehrszustand.

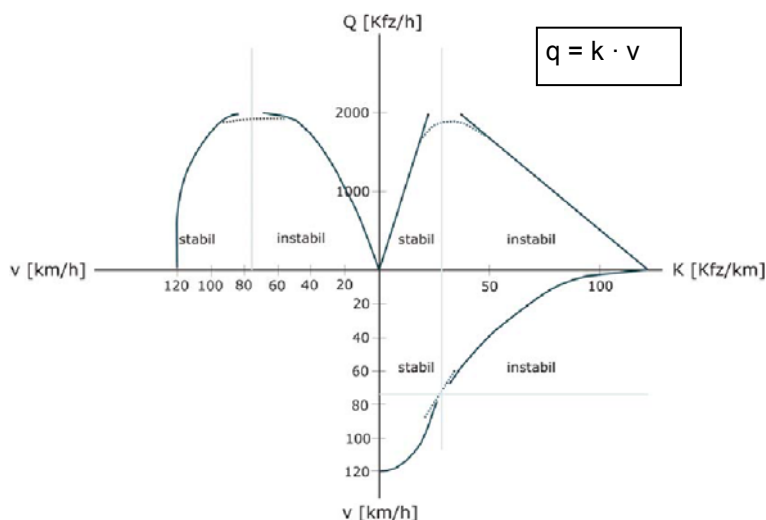


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Fundamentaldiagramms [44]

Von besonderer Bedeutung bei Leistungsuntersuchungen ist das  $q$ - $v$ -Diagramm. Dieses betrachtet die Entwicklung des Geschwindigkeitsniveaus in Abhängigkeit der Verkehrsstärke über den gesamten Wertebereich und dient als Grundlage zur Dimensionierung von Strassenquerschnitten.

Der Fahrer muss sein Verhalten von anderen Verkehrsteilnehmern abhängig machen und zu einem oder mehreren vorausfahrenden Fahrzeugen den geschwindigkeitsabhängigen korrekten Abstand wählen. Sein Verhalten wird also massgeblich von der momentan herrschenden Verkehrsdichte beeinflusst. Aus dem  $k$ - $v$ -Diagramm ist ersichtlich, dass:

- Bei einer Verkehrsdichte  $k$ , die nahezu 0 ist, kann der Fahrer seine Geschwindigkeit frei wählen. Die freie Geschwindigkeit hängt dann z.B. von der Fahrzeugart und vom Strassentyp mit seinen Ausbauparametern ab.
- Bei geringen Dichten kann noch mit freien Geschwindigkeiten gefahren werden, da eine gegenseitige Beeinflussung der Fahrzeuge kaum auftritt. Mit zunehmender Dichte nimmt aufgrund der Beeinflussung der Fahrzeuge untereinander auch die Geschwindigkeit ab. Die maximale Dichte auf der Strasse wird erreicht, wenn die Fahrzeuge im Stau stehen, d.h. bei einer Geschwindigkeit  $v = 0$  stellt sich die maximale Dichte ein.

Das Fundamentaldiagramm ist die Basis von vielen Verkehrsflusstheorien und -modellen. Grundsätzlich können die verschiedenen entwickelten Modelltypen wie folgt eingeteilt werden [4]:

- Mikroskopische Modelle. Sie beschreiben die Lage und die Bewegung von den einzelnen Fahrzeugen im Kollektiv und lassen sich in fahrdynamische, Fahrzeugfolge- und psychophysische Modelle unterteilen. Das verwendete Simulationsmodell zur Untersuchung des Einflusses von Fahrerassistenzsystemen auf die Leistungsfähigkeit gehört zu diesen Modellen.
- Makroskopische Modelle. Sie beschreiben das Verhalten von ganzen Fahrzeugkollektiven mit Hilfe mathematischer Gesetzmässigkeiten (z.B. Zustandsgleichung von Abbildung 9).

Der direkte Zusammenhang zwischen Leistungsfähigkeit und Verkehrsqualität ist unter anderem im amerikanischen Highway-Capacity-Manual (HCM) [51] beschrieben worden. Dabei wird der Verkehrsfluss in Klassen unterschiedlicher Verkehrsqualität eingeteilt. Diese Klassifizierung beschreibt qualitativ den Verkehrszustand auf einer Strasse, charakterisiert durch Geschwindigkeit, Reisezeit, Bewegungsfreiheit, Verkehrsstörungen, Bequemlichkeit und Sicherheit. Die Grenzen zwischen den Qualitätsklassen werden über die mittleren Fahrzeuggeschwindigkeiten und über die Verkehrsdichte definiert. Unterschieden werden dabei sechs Qualitätsstufen (Level-of-service, LOS):

- A: Freier Verkehrsfluss: Fahrzeuge beeinflussen sich untereinander praktisch nicht. Eine freie oder fast freie Wahl der Geschwindigkeit ist möglich, die Bewegungsfreiheit ist sehr hoch.
- B: Stabiler, stetiger Verkehrsfluss: die Anwesenheit anderer Fahrzeuge wird spürbar, wirkt sich aber noch nicht auf die Geschwindigkeitswahl aus. Lediglich die Bewegungsfreiheit ist gegenüber LOS A etwas eingeschränkt.
- C: Noch stabiler, stetiger Verkehrsfluss: Die Bewegung der Fahrzeuge beginnt durch die Interaktion mit anderen Fahrzeugen beeinflusst zu werden. Dies betrifft nun auch die Wahl der Geschwindigkeit. Die Bewegungsfreiheit ist weiter eingeschränkt, Fahrstreifenwechsel verlangen erhöhte Aufmerksamkeit.
- D: Sehr dichter, aber noch stabiler Verkehrsfluss: Die Geschwindigkeitswahl und die Bewegungsfreiheit sind stark eingeschränkt. Geringe Erhöhungen der Verkehrsstärke können zu Störungen führen.
- E: Die Verkehrsstärke erreicht die mögliche Leistungsfähigkeit und wird instabil. Die Geschwindigkeiten sind niedrig, die Bewegungsfreiheit ist sehr stark eingeschränkt, Fahrstreifenwechsel müssen erzwungen werden. Geringe Erhöhungen der Verkehrsstärke führen zu Verkehrszusammenbrüchen. Der Verkehr bewegt sich zwischen Stabilität und Instabilität.

- 
- F: Die Nachfrage ist grösser als die Kapazität. Die Verkehrsanlage ist überlastet. Extrem unstabiler Verkehrsfluss, kurze Phasen mit mäßiger Geschwindigkeit wechseln ab mit totalem Stillstand (Stop-and-Go-Verkehr).

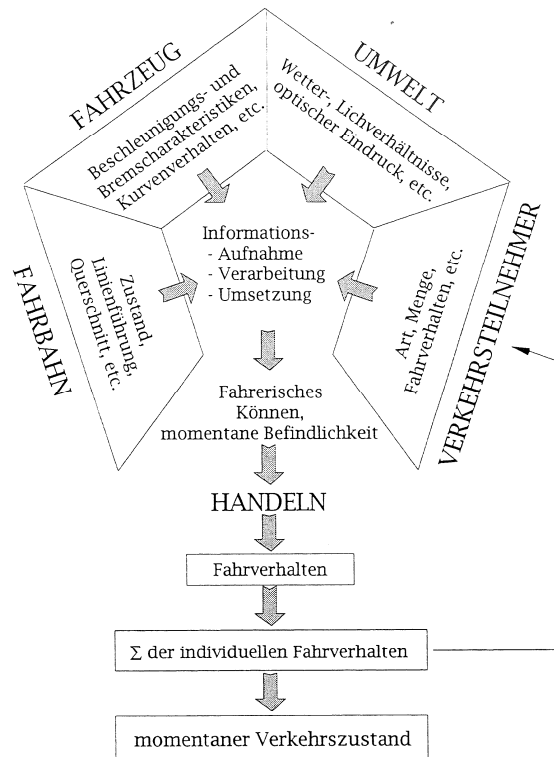
Im Hinblick auf das Forschungsziel werden die Veränderungen des Verkehrsflusses untersucht, die sich aus der Einführung von Fahrerassistenzsystemen ergeben und die sich auf die Leistungsfähigkeit einer freien Strecke auswirken. Gemäss Erfahrungen aus früheren Untersuchungen (siehe Literaturlauswertung in den Kapiteln 2.3.2 und 2.3.3) können Fahrerassistenzsysteme nicht nur die Leistungsfähigkeit der Strecke sondern auch die Homogenisierung und die Stabilisierung des Verkehrsflusses beeinflussen.

Mit dem Begriff homogener Verkehrsfluss wird die räumliche und zeitliche Gleichmässigkeit eines Verkehrsflusses bezeichnet [48]. Eine allgemein übliche Definition und Abgrenzung des Begriffes gibt es jedoch nicht. Ein harmonischer Verkehrsfluss mit z.B. kleineren Geschwindigkeitsunterschieden zwischen den Verkehrsteilnehmern und folglich weniger Spurwechseln bedeutet ein angenehmeres Fahren. Da aber dieser Nutzen subjektiv empfunden wird, ist er nicht leicht quantifizierbar. Trotzdem spielt die Homogenität eines Verkehrsflusses eine grosse Rolle, da sie Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit und auf die Kapazität einer Strecke hat. Die Homogenisierung eines Verkehrsflusses kann zu einer Senkung der Unfallzahlen sowie zu einer Stabilisierung des Verkehrsflusses führen [48].

### 3.2.3 Einflussfaktoren der Leistungsfähigkeit

Der Verkehrsablauf und damit auch die Leistungsfähigkeit unterliegen unterschiedlichen Einflussfaktoren. Im vorherigen Kap. 3.2.2 wurden die wesentlichen Einflüsse durch Verkehrsstärke und Verkehrsdichte auf den Verkehrsablauf beschrieben. Hinzu kommen zyklische Schwankungen im Verkehrsablauf, die nicht von den Verkehrsbelastungen abhängig sind, sondern mit dem unterschiedlichen Fahrverhalten der Verkehrsteilnehmer begründet werden können [18]. Dieses wiederum hängt von endogenen Einflussfaktoren ab, die direkt auf das System Fahrer-Fahrzeug-Fahrbahn wirken und auch die Verkehrsbeziehungen zwischen den Verkehrsteilnehmern beeinflussen [4].

Die endogenen Einflussfaktoren stehen in wechselseitiger Beziehung und können teilweise nicht voneinander getrennt betrachtet werden. Der dauernde Prozess von Informationstausch und –umsetzung zwischen den endogenen Einflussfaktoren und dessen wichtigsten Wirkungen ist in der nachfolgenden Abbildung 10 dargestellt.



**Abbildung 10:** Informationsaustausch und –umsetzung im System Fahrer-Fahrzeug-Fahrbahn [4]

Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, können die endogenen Einflussfaktoren in fahrbahnbedingte, fahrzeugbedingte, fahrerbedingte, verkehrsbedingte und umweltbedingte Einflussfaktoren gegliedert werden. Dabei handelt es sich um zeitlich konstante oder variable Einflussgrössen, die entweder direkt messbar oder nur quantitativ bzw. qualitativ abschätzbar sind. Da folglich nicht jede dieser Einflussgrössen dieselbe Bedeutung hat, wird wie in der Norm SN 640 018a [50] zwischen massgebenden und übrigen Einflussfaktoren unterschieden.

Die Fahrbahnbedingungen sind zeitlich konstante Einflussfaktoren, die in bauliche und betriebliche Parameter unterteilt werden können. Die baulichen Einflussfaktoren spielen eine wichtige Rolle beim Einfluss auf das Verkehrsgeschehen, so sind z.B. zwei- und dreistreifige Fahrbahnen getrennt zu betrachten. Die seitliche Hindernisfreiheit beeinflusst zwar den Verkehrsablauf und die Leistungsfähigkeit, konnte aber in der Forschungsarbeiten zur Leistungsfähigkeitsnorm [28] nicht isoliert quantifiziert werden. In der Schweiz herrschen auf Autobahnabschnitten mit reduzierten Ausbaugrössen in der Regel auch geringere Höchstgeschwindigkeiten, die in der Kombination in den analysierten Fällen kein Absinken der Leistungsfähigkeit erkennen liessen.

Unter Betriebsbedingungen werden alle Anordnungen zur Steuerung oder Regelung des Verkehrsablaufes verstanden [49]. Für die freien Strecken auf Autobahnen sind es die Geschwindigkeitsbeschränkungen und die Überholverbote für Lastwagen. Geschwindigkeitsbeschränkungen können bis zu einem bestimmten Wert der Verkehrsstärke eine Homogenisierung des Verkehrsflusses bewirken und den fließenden Verkehr aufrechterhalten [44]. Gemäss SN 640 018a [50] kann der Einfluss des Überholverbotes für Lastwagen in Abhängigkeit der Verkehrsstärke auf die Leistungsfähigkeit auf schweizerischen Autobahnstrecken nicht zuverlässig abgeschätzt werden. Gemäss HBS 2001 [19] und Brilon [7] haben aber Überholverbote für Lastwagen insbesondere in Steigungs- und Gefällstrecken einen Einfluss auf die Qualität des Verkehrsablaufs.

Der Einflussfaktor „Lage im Netz“ ist mit den verkehrsbedingten Einflussfaktoren eng verknüpft, da je nach Lage des Streckenabschnittes bestimmte Fahrer- und Fahrzeugkollektive sowie Verkehrszwecke (z.B. Berufspendler, Freizeitreise, Ferntransporte) dominant sind. So tritt z.B. auf Autobahnen in der Nähe von Ballungsräumen überwiegend Berufsverkehr auf, der mit der örtlichen Situation vertraut ist und die Verkehrssituation sowie die zu erwartenden Reisegeschwindigkeiten gut einschätzen kann. In Ballungsräumen sind auch die Zeitlücken zwischen den Fahrzeugen in der Regel geringer, so dass die realen Belastungen während den Spitzenstunden höher als auf ländlichen Strecken sind. Ausserdem sind im Agglomerationsverkehr vermehrt Aus- und Einfahrten sowie erhöhte Spurwechselraten anzutreffen, was die möglichen Belastungen auf der Autobahn sowohl erhöhen als auch verringern kann [28].

Das Kollektiv der Fahrer und der Fahrzeuge wird von den fahrer- und fahrzeugbedingten Einflussfaktoren bestimmt. Auf Grund der vielfältigen Ausprägungen, die diese Einflussfaktoren je nach Ort und Zeit annehmen können, kann das Fahrerkollektiv nicht normiert werden. In der Norm SN 640 018a [50] wird deshalb von einem überwiegenden Anteil von Berufspendlerverkehr als Arbeitshypothese ausgegangen.

Einflussfaktoren	Massgebend gemäss Norm	Übrige
------------------	---------------------------	--------

Einflussfaktoren		Massgebend gemäss Norm	Übrige
<b>Fahrbahn</b>	Längsneigung	<b>X</b>	
	Anzahl Fahrstreifen	<b>X</b>	
	Fahrstreifenbreite	<b>X</b>	
	Seitliche Hindernisfreiheit	x	
	Lage im Netz - innerorts / ausserorts	x	
	Geschwindigkeitsbeschränkung	<b>X</b>	
	Überholverbote für LW	x	
<b>Fahrzeug</b>	Fahrzeugtyp - Abmessung - Gewicht - Motorleistung		(x)
	Fahreigenschaften - Höchstgeschwindigkeit - Beschleunigungs- und Bremsvermögen		(x)
	Fahrzeugzustand - Reifen, Beladung, Motor		(x)
<b>Fahrer</b>	Geschwindigkeitsverhalten - Geschwindigkeit im freien Fluss		(x)
	Abstandsverhalten - Zeitabstand zwischen Fahrzeugen - max. Verkehrsdichte		(x)
	Spurwechselverhalten - Verteilung auf Fahrstreifen - Fahrstreifenwechselhäufigkeit		(x)
	Reaktionszeit		(x)
	Fahreigenschaften - Reisezweck - Fahrkönnen - physische und psychische Leistungsfähigkeit - Sehvermögen		(x)
<b>Verkehr</b>	Fahrerkollektiv - Berufsverkehr - Freizeitverkehr	x	
	Fahrzeugkollektiv - LW-Anteil	<b>X</b>	
<b>Umwelt</b>	Witterung - Regen, Schnee, Nebel, Eis	x	
	Lichtverhältnisse - Gegenlicht - Dämmerung - Dunkelheit	x	

**Tabelle 1:** Einflussfaktoren der Leistungsfähigkeit von freien Strecken auf Autobahnen

---

Die in den Normen und Richtlinien angegebenen Werte für die Leistungsfähigkeit gelten in der Regel für trockene Fahrbahnen bei Tageslicht. Da sie sehr unregelmässig auftreten, entziehen sich gemäss SN 640 018a [50] die Witterungs- und Lichtverhältnisse einer Normierung. Regen, Schnee, Nebel und Eis können aber einen sehr starken Einfluss ausüben, insbesondere in Kombination mit der Dunkelheit. Für die Einflüsse von Schnee und Nebel liegen keine Schätzungen vor. Bei Nässe kann von einer Reduktion der Leistungsfähigkeit von rund 10% ausgegangen werden [50]. Bei Dunkelheit wird bis zu 5 Km/h langsamer gefahren [19].

### 3.3 Zusammenhang zwischen Fahrerassistenzsystemen und Leistungsfähigkeit

#### 3.3.1 Einleitung

Aufgrund der allgemeinen Verkehrszunahme in den letzten Jahren sowie der weiter steigenden Verkehrsnachfrage treten zunehmend Überlastungen des Strassennetzes auf. Zurzeit werden grosse Anstrengungen unternommen, um die Verkehrsprobleme durch bauliche und betriebliche Massnahmen (z.B. Rampenbewirtschaftung oder dynamische Geschwindigkeitsbeschränkungen) zu entschärfen. Diese stossen jedoch oft an räumliche oder finanzielle Grenzen. Bedingt durch die steigenden Anforderungen an die Fahrer werden vermehrt Systeme entwickelt, die bei der Bewältigung der Fahraufgabe unterstützen und die auch zum Lösen von Verkehrsproblemen einen Beitrag leisten können.

Während Automobilkonzerne Fahrerassistenzsysteme entwickeln, mit dem Ziel Fahrsicherheit und Fahrkomfort zu erhöhen, sind einige dieser Fahrhilfen wegen ihres Einflusses auf den Verkehrsablauf auch für die Strassenbetreiber von grossem Interesse. Seit einigen Jahren sind ACC-Systeme (siehe Kap. 3.1.5) in Fahrzeugen der oberen Klassen erhältlich, welche die Geschwindigkeit des Fahrzeugs auf Autobahnen regeln und den Sicherheitsabstand gegenüber einem vorausfahrenden Fahrzeug bestimmen. Da solche Fahrzeuge ein anderes Verkehrsverhalten als jene ohne Assistenzsysteme aufweisen, sind direkte Auswirkungen auf den Verkehrsablauf zu erwarten.

Aus theoretischer Sicht ist der Fall eines Verkehrs mit ausschliesslich ACC-Fahrzeugen interessant, weil sich hierdurch vollständig stabile Situationen und eine Erhöhung der Kapazität ergeben können. Das ACC-System stellt den stabilen Zustand ein, wenn entweder die Sollgeschwindigkeit gefahren werden kann oder sich das Fahrzeug genau im geschwindigkeitsabhängigen Sollabstand befindet, während die Relativgeschwindigkeit zum vorausfahrenden Fahrzeug gleich 0 ist. Da in diesen Situationen keine Beschleunigungsvorgänge mehr stattfinden, ist theoretisch ein stationärer Verkehr auf unendlich langer Strecke über unendlich lange Zeit [18] möglich. In diesem Zustand kann mit einem kleineren Sollabstand gefahren werden, was eine Erhöhung der Kapazität zur Folge hat.

Dieses Szenario sowie die Vision von automatischen Fahrzeugen, die in der Lage sind, auf einer Autobahn autonom zu fahren, stellen aber ein langfristiges Ziel dar<sup>6</sup>. Kurzfristig von Interesse ist jedoch der schrittweise Übergang mit nur teilweiser Ausstattung der Fahrzeuge mit Fahrerassistenzsystemen.

Das nächste Kapitel bietet eine Übersicht über die zahlreichen bis heute erstellten Studien zu ACC-Systemen. Die Auswirkungen auf den Verkehrsfluss sind soweit mit Modellen bearbeitet und zumeist so simuliert worden, dass das Verhalten der ausgerüsteten Fahrzeuge über Parameter des Fahrzeugfolge-

---

<sup>6</sup> Die langfristige Vision stellt auch höchste Anforderungen an die Verlässlichkeit und Funktionssicherheit der Systeme, die heute nicht gewährleistet werden sind.

---

modells<sup>7</sup> abgebildet wurde. Die Schwierigkeit besteht darin, das Verhalten der ausgerüsteten Fahrzeuge und deren Fahrer realistisch abzubilden. Einzelne Untersuchungen stützen sich ausserdem auf Versuche mit Testfahrern in Fahrsimulatoren. Die meisten nehmen ein idealisiertes Verhalten an.

### 3.3.2 Literaturübersicht

Zahlreiche Simulationsstudien haben versucht, die Auswirkungen von Fahrerassistenzsystemen und insbesondere ACC auf den Verkehrsablauf und damit auf die Leistungsfähigkeit zu quantifizieren. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse dieser Dokumente ist aber nicht möglich, da die Studien verschiedene Algorithmen zur Abbildung der ACC-Funktionalitäten und verschiedene Fahrermodelle verwenden. So haben z.B. Wang und Rajamani [60] in ihrer Arbeit gezeigt, dass für dasselbe Abstandsverhalten je nach gewählten Randbedingungen (z.B. angenommene Anzahl Ein- und Ausfahrten von einer Autobahnstrecke) verschiedene Resultate für die Verkehrsstabilität zu erwarten sind.

Trotz dieser Differenzen können aus diesen Studien gemeinsame Tendenzen und qualitative Erklärungen abgeleitet werden.

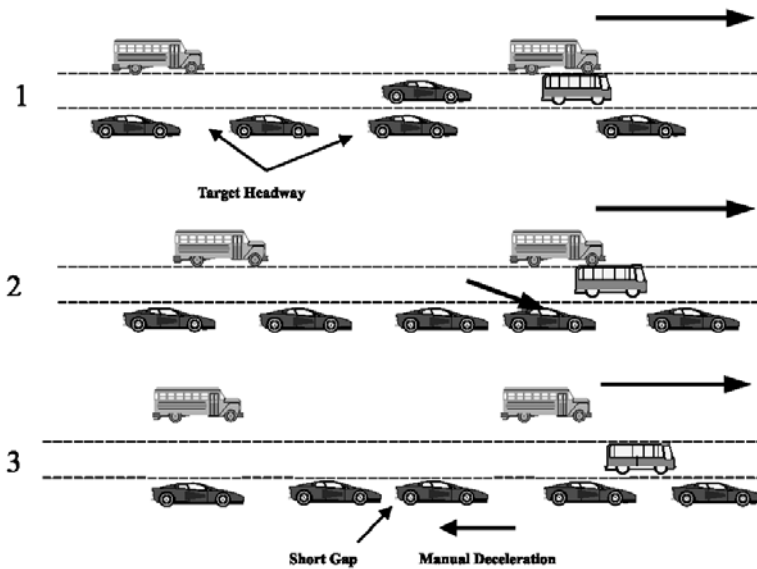
Mehrere Studien schliessen auf eine erhöhte Stabilität des Verkehrsflusses, wodurch der Verkehrszusammenbruch bei hoher Verkehrsbelastung hinausgezögert wird. Treiber und Helbing [57] haben prognostiziert, dass bei einem ACC-Ausstattungsgrad von 20% nahezu alle Verkehrszusammenbrüche auf der deutschen Autobahn A8-Ost eliminiert werden können. Zum selben Schluss kommt auch Davis [12]. Dieser hat im übrigen noch beschrieben, dass ein Ausstattungsgrad von weniger als 10% keinen signifikanten Nutzen in der Staureduktion zeigt.

Huang und Ren [22] sowie Zwanefeld [68] haben als weiteren Gewinn von ACC-Systemen für die Verkehrsstabilität die Abnahme der Geschwindigkeitsunterschiede bei steigender Ausstattungsrate festgehalten. Dies ist auf die automatisch einstellbaren Sollabstände, auf das Spurwechselverhalten sowie auf die tieferen (mittleren) Geschwindigkeiten der Fahrzeuge zurückzuführen [68].

In ihren Arbeiten haben van Arem et al. [59] [60] und Minderhoud und Bovy [36] [37] einige potenzielle Probleme aufgezeigt, die mit der Einführung von ACC-Systeme verbunden sind. Insbesondere haben die beiden Studien eine Abnahme der durchschnittlichen Geschwindigkeit auf der Autobahn festgestellt, die auf den ACC-bedingten Zusammenbruch der Geschwindigkeit auf der schnelleren Fahrbahn zurückzuführen ist. Dies ist besonders für Zeitabstände von 1.4 s und mehr erkennbar, da die grösseren Zeitlücken unausgerüstete Verkehrsteilnehmer veranlassen, Spurwechsel durchzuführen und sich vor ACC-Fahrzeuge einzugliedern. Hierauf reagiert das Assistenzsystem mit einer Wiederherstellung des vorgegebenen Zielabstandes und entsprechendem Abbremsen. Weitere Simulationen von Minderhoud und Bovy [37] mit Zeitabständen bis zu 0.8 s haben einen Kapazitätsgewinn von 4% gezeigt. Keine grossen oder bedeutenden Änderungen wurden hingegen bei Zeitabständen von 1.2 s beobachtet.

---

<sup>7</sup> Je nach Fahrzeugfolgemodell z.B. Zeitlücke zwischen Fahrzeuge, Wunschgeschwindigkeit, Reaktionszeit.



**Abbildung 11:** Wirkungskette beim Verkehrszusammenbruch auf schnelleren Fahrbahnen (Studie aus Grossbritannien mit Linksverkehr) [35]

Marsden et. al [35] haben die Grenzen von derartigen mikroskopischen Simulationen aufgezeigt, da genaue Kenntnisse über die Interaktion zwischen Verkehrsteilnehmer und Fahrerassistenzsystem in bestimmten Verkehrssituationen fehlen. Es wird bemängelt, dass mögliche Änderungen des Fahrverhaltens durch die Assistenzsysteme nicht berücksichtigt werden. Um diesen Aspekt abzuklären, haben Marsden et. al [35] während den Spitzenzeiten Testfahrten auf englischen, französischen und deutschen Autobahnenstrecken mit grossen Geschwindigkeitsunterschieden und vielen Spurwechseln durchgeführt. Die Testfahrten haben gezeigt, dass ACC-Systeme ironischerweise in diesen kritischen Situationen, während denen der Fahrer am meisten Unterstützung braucht, möglicherweise ausgeschaltet werden. Die Abnahme der Beschleunigungsvorgänge um 44% bis 52% bestätigen hingegen die Komfortfunktion von ACC-Systemen.

Davis hat in seinen Arbeiten [12], [13] die Auswirkungen von ACC-Systemen auf den Verkehrsfluss im Bereich von Autobahnzufahrten simuliert. Er hat aufgezeigt, dass mit einem Ausstattungsgrad von 50% nur eine leichte Zunahme der Kapazität auf der Autobahn stattfindet, auch wenn die mittleren Geschwindigkeiten auf der Strecke vor der Zufahrt kleiner sind. Gemäss Davis [12] besteht bei der Einfahrt von der Rampe her das potentielle Problem, dass auf der Autobahn die Zeitlücke vor einem ACC kontrollierten Fahrzeug zu klein ist, um ein sicheres Einspuren zu ermöglichen. Auch geben ACC-Fahrzeuge keinen Vortritt, wie das viele Fahrzeuglenker tun.

Van Arem et. al [60] haben die Auswirkungen von kooperativen ACC (CACC) auf den Verkehrsfluss auf Autobahnen bzw. im Bereich von Autobahnzufahrten untersucht. CACC-Systeme erweitern die Funktionen von ACC, indem ein Informationsaustausch zwischen den einzelnen Fahrzeugen (z.B. mit Wireless-Technologie) möglich wird. Die Ergebnisse von Van Arem et. al [60] zeigen, dass CACC in der Lage sind, die Leistungsfähigkeit auf Autobahnen zu erhöhen. Dies hängt aber stark von der vorhandenen Verkehrssituation und von der CACC-Ausstattungsrate ab. Bedeutende positive Auswirkungen auf den Verkehrsfluss sind ab einem Ausrüstungsgrad von 60% und bei grossen Verkehrsbelastungen zu erwarten. Da bei grossen Verkehrsmengen die Interaktion der Fahrzeuge am wirkungsvollsten ist, wird die Formation von CACC-Konvois (sog. Platooning) begünstigt. Dies führt einerseits zu einer Reduzierung der Zeitlücken zwischen den Fahrzeugen und zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit. Die Simulationen von van

Arem et. al [60] zeigen ausserdem, dass bei tieferen Ausstattungsraten (< 40%) auf CACC-Fahrbahnen eine Abnahme der Leistungsfähigkeit zu erwarten ist, was auf tiefere mittlere Geschwindigkeiten, grössere Geschwindigkeitsschwankungen und häufigere Stosswellen zurückgeführt werden kann.

Davis [13] hat die Wirkung von CACC-Systemen auf den Verkehrsfluss im Bereich von Autobahnzufahrten untersucht. Er hat gezeigt, dass die Interaktion zwischen Fahrzeugen auf der Autobahn und Fahrzeugen auf der Rampe positive Effekte auf den Verkehrsablauf haben kann. Wenn 50% der Fahrzeuge miteinander kommunizieren können, wird die Kapazität auf der Autobahn sowie auf der Zufahrtsrampe um 4% erhöht. Im Vergleich zum Szenario ohne Kooperation kann ausserdem eine bedeutende Abnahme der Stauerscheinungen auf der Autobahn beobachtet werden, auch wenn diese nicht vollständig vermieden werden können.

### 3.3.3 Forschungsinitiative INVENT

#### 3.3.3.1 Teilprojekt Verkehrsleistungsassistenz (VLA)

Ziel des Teilprojektes Verkehrsleistungsassistenz (VLA) war, neuartige Lösungsansätze und Strategien zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit auf Autobahnen zu entwickeln und die Funktionsweise derartiger Systeme zu demonstrieren [62].

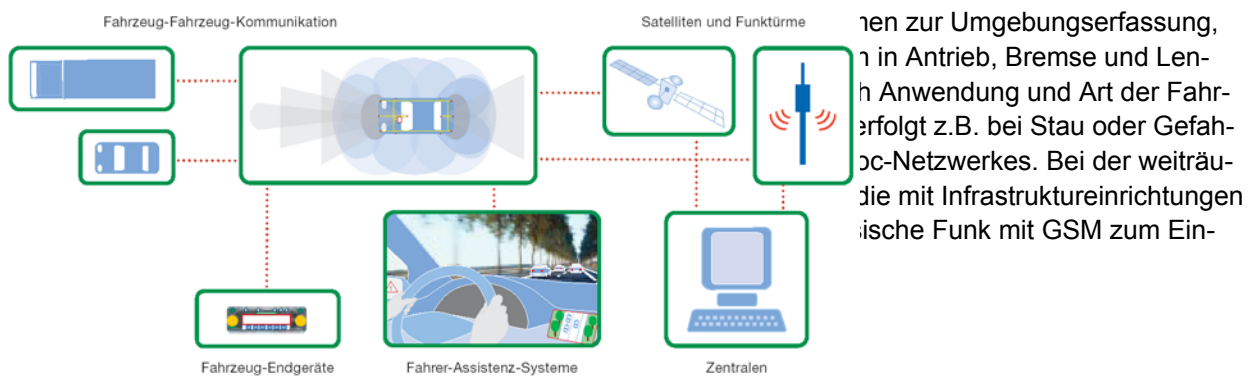


Abbildung 12: Komponenten der Verkehrsleistungsassistenz [23]

Um die Konzepte zur Verkehrsleistungssteigerung zu entwickeln und deren Potential abzuschätzen, wurden in einem ersten Schritt die relevanten Verkehrssituationen analysiert und modelliert. Dabei ergab sich, dass für die Zunahme der Verkehrsleistung die Erhöhung des Stauabflusses (d.h. die Erhöhung des Verkehrsdurchsatzes bei zusammengebrochenem Verkehr) und die Verhinderung bzw. Verzögerung der Verkehrszusammenbrüche an Engpässen (d.h. die Erhöhung des Verkehrsdurchsatzes im Bereich noch nicht zusammengebrochenen Verkehr) essentiell sind.

In einem weiteren Schritt wurden 5 Fahrstrategien zur Verkehrsleistungssteigerung festgelegt (siehe Tabelle 2) und diese in einem ACC-System umgesetzt. Das ACC-System wurde somit um eine Komponente zur autonomen und automatischen Wahl einer verkehrsadaptiven Fahrstrategie erweitert, d.h. einer Anpassung des Fahrverhaltens an die aktuelle Verkehrssituation [62].

Verkehrszustand	Fahrverhalten	Verkehrliche	Modellumsetzung
-----------------	---------------	--------------	-----------------

		Wirkung	
<b>Freier Verkehr</b>	Standard	Neutral	Referenzparameter
<b>Stauannäherung</b>	Frühzeitiges, sanftes Bremsen	Sicherheits- und Komfortgewinn	Verringerung der Wunschverzögerung
<b>Stau</b>	Standard	Neutral	Referenzparameter
<b>Engstellenbereich</b>	Aufmerksames und zügiges Fahren	(lokale) Steigerung der Kapazität	Verringerung der Folgezeit
<b>Stauausfahrt</b>	Rechtzeitiges und kräftiges Beschleunigen	Steigerung des Ausflusses aus Stau	Verringerung der Folgezeit und Erhöhung der max. Beschleunigung

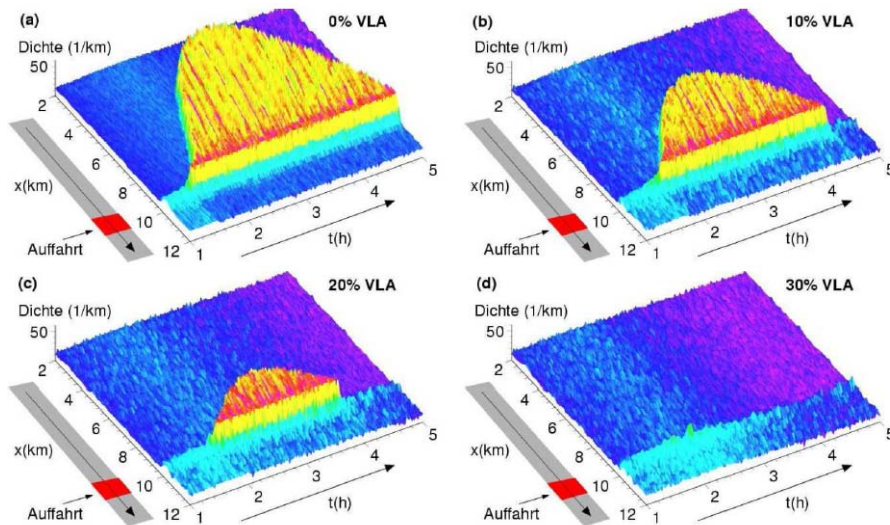
**Tabelle 2:** Übersicht der VLA-Fahrstrategien [62]

Die Abschätzung der verkehrlichen Wirkungen erfolgte dann mittels mikroskopischer Verkehrssimulationen (siehe dazu Kap. 3.2.2). Anhand zweier Verkehrsszenarien, ein Autobahnabschnitt mit Zufahrt und eine Steigungsstrecke, hat sich gezeigt, dass positive Auswirkungen auf das Verkehrsgeschehen mit einem steigenden Anteil ausgerüsteter Fahrzeuge zu erwarten sind.

Das Szenario „Autobahnabschnitt mit Zufahrt“ zeigt deutlich, dass ein steigender VLA-Anteil den Stau reduziert und bei einer Ausstattung von 30% gar kein Stau mehr auftritt (siehe Abbildung 13). Die Erhöhung des VLA-Anteil bewirkt ausserdem eine Verzögerung des Verkehrszusammenbruchs. Dies ist auf die automatisierte Fahrstrategie zurückzuführen, die eine Reduzierung der Folgezeit (bei einer leicht höheren Wunschbeschleunigung) im Bereich der Engstellen nach sich zieht und zu einer Homogenisierung der Streckenkapazität führt. Hintergrund dabei ist die mit der Senkung der Folgezeit einhergehende Kapazitätserhöhung, welche die kapazitätsmindernde Eigenschaft der Engstelle kompensiert [62]. Dadurch ergeben sich ausserdem geringere maximale Staulängen und kürzere Reisezeiten.

Beim Szenario mit Steigungsstrecke wird durch die Kapazitätserhöhung (dank angepasster Fahrweise) im Bereich der Engstelle der Verkehrszusammenbruch verzögert. Positive Auswirkungen sind schon mit einem geringen VLA-Anteil bemerkbar. Mit einer Ausstattungsrate von 30% wird der Verkehrszusammenbruch sogar praktisch vermieden.

Bei beiden Szenarien verkürzen sich die Reisezeiten in Situationen mit und ohne Stau um einen Faktor von 2 bis 3.



**Abbildung 13:** Ergebnisse VLA für einen Autobahnabschnitt mit Zufahrt [62]

Für die Potentialabschätzung der verkehrlichen Wirksamkeit der VLA Fahrstrategie wurden ausserdem die maximale freie Kapazität und die dynamische Kapazität untersucht. Die maximale freie Kapazität ist eine Zufallsgrösse, die von der Stabilität und Homogenität des Verkehrs abhängt und durch deren dynamische Erhöhung ein Verkehrszusammenbruch vermieden wird. Nach einem Verkehrszusammenbruch wird eine schnellere Stauauflösung nur durch die Steigerung des Abflusses (dynamische Kapazität) erreicht. Die durchgeführten Untersuchungen haben ergeben, dass die positiven verkehrlichen Wirkungen proportional zum VLA-Ausstattungsgrad sind und ab ungefähr 5% erkennbar sind [62].

Für die Erhöhung der dynamischen Kapazität ist es erforderlich, dass die stromabwärts gelegene Staufront lokalisierbar ist, um die entsprechende VLA-Fahrstrategie zu ändern. Die Untersuchungen zeigen, dass für die zuverlässige Lokalisierung von nichtstationären Staufronten und Staufronten auf Grund von temporären Engstellen neben den bordautonomen Daten weitere Informationen durch Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation bzw. Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation hilfreich sind.

Die Ergebnisse aus der Simulation sowie die in der Praxis durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass sich mit Hilfe von räumlich und zeitlich präzisen Informationen und mit einer am Verkehrszustand angepassten Fahrweise positive Effekte auf den Verkehrsablauf erzielen lassen. Gemäss dem INVENT-Ergebnisbericht [23] besteht jedoch noch Forschungsbedarf bei der Anwendung von VLA auf Strassennetzen. Insbesondere gilt es, die künftigen Systeme so zu gestalten, dass

- die Organisation und der Verlauf des Verkehrs durch Kooperation verbessert wird und
- ein kooperatives Fahrverhalten der Verkehrsteilnehmer gefördert wird.

### 3.3.3.2 Teilprojekte Stauassistent (STA) und Verkehrliche Wirkung, Rechtsfragen und Akzeptanz (VRA)

Das im Teilprojekt „Stauassistent“ (STA) geschaffene Fahrerassistenzsystem wurde im Rahmen des Teilprojekts „Verkehrliche Wirkung, Rechtsfragen und Akzeptanz“ (VRA) anhand von Verkehrssimulationen bezüglich seiner verkehrlichen Auswirkungen bewertet.

Für das Teilprojekt STA untersuchten die Projektpartner das Reglerverhalten des Stauassistenten beim Annähern an ein Stauende, während der Fahrt im Stau und bei der Stauausfahrt. Dabei galten jeweils die folgenden Anforderungen [23]

- beim Annähern an ein Stauende: Vermeidung von starkem Bremsen.
- beim Fahren innerhalb eines Staus: „angenehmer“ Geschwindigkeitsverlauf, der unnötiges Beschleunigen und Verzögern sowie unüblich grosse Abstände vermeidet.
- bei der Ausfahrt aus einem Stau: zügiger Abfluss.

Diese wurden bei den Simulationen mit verschiedenen Reglerparametrierungen berücksichtigt. Des Weiteren wurden Simulationen mit unterschiedlichem STA-Ausstattungsgrad (0%, 5%, 20%, 40%, 100%) durchgeführt.

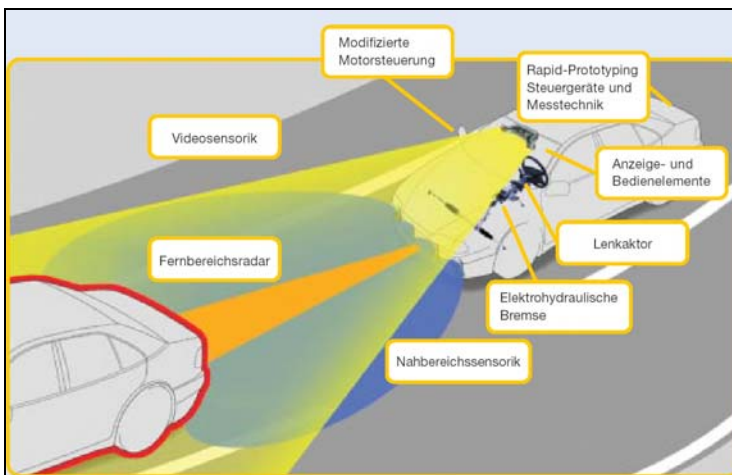


Abbildung 14: Prinzipbild der Stauassistent-Komponenten [23]

Die folgenden Ergebnisse stellen die verkehrlichen Auswirkungen der STA-Parametrisierung für die Fahrt im Stau bei einem Ausstattungsgrad von 100% dar. Auch wenn dieser Ausrüstungsgrad nur langfristig realistisch erscheint, soll er die Tendenz einer STA-Konfiguration verdeutlichen [20].

- Das Szenario mit einer STA-Zeitlücke von 1.0 s führt zu einer Verstärkung der Stop-and-Go-Wellen und zu ausgedehnten Stillstandsphasen. Grössere Zeitlücken (z.B. 1.8 s) bewirken hingegen ein Abklingen der Stop-and-Go-Wellen und eine Minimierung der Stillstandsphasen.
- Die untersuchten Anfahrbedingungen (automatisches Anfahren, automatisches Anfahren nach einem Stillstand, fahrerinitiiertes Anfahren) haben gezeigt, dass die Einführung von STA-Systemen mit einem steigenden Ausrüstungsgrad zu einer Harmonisierung des Verkehrs führt. Dies ist auf den Abbau der Geschwindigkeitsschwankungen zurückzuführen.
- Die Simulationen ergeben, dass die Einbeziehung der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation je nach Situation gute Ansätze zeigt, teilweise aber auch negative Auswirkungen haben kann. Einerseits führt eine Parameterschaltung (Herabsetzung der Zeitlücke von 3.0 s auf 1.0 s) am

---

Staukopf<sup>8</sup> zu einer schnelleren Stauauflösung, andererseits kann das Anpassen der Geschwindigkeiten eine Pulkbildung bewirken. Die Art und Weise, wie die Daten aus der Kommunikation in die Regelung einbezogen werden, muss hier noch optimiert werden.

Die hier dargestellten Ergebnisse beschreiben die verkehrlichen Auswirkungen des Szenarios, welches primär die Fahrt im Stau beschreibt. Gemäss [20] hat die Untersuchung weiterer Szenarien gezeigt, dass die STA-Konfiguration (insbesondere die eingestellte Zeitlücke) je nach Verkehrsszenario sehr unterschiedliche Auswirkungen hat. Es gibt folglich keine STA-Konfiguration, die in allen Verkehrslagen positive Auswirkungen auf den Verkehrsablauf hat.

### 3.3.4 Einflüsse von Fahrerassistenzsystemen auf die Leistungsfähigkeit

Aufbauend auf den in den vorangehenden Kapiteln gewonnenen Erkenntnissen sind in Tabelle 3 die direkten und indirekten Einflüsse von Fahrerassistenzsystemen auf die gemäss Kapitel 3.2.3 massgebenden Einflussfaktoren der Leistungsfähigkeit dargestellt.

Aus Tabelle 3 ist ersichtlich, dass die meisten Fahrerassistenzsysteme mit einer (direkten und/oder indirekten) Auswirkung auf die Einflussfaktoren der Leistungsfähigkeit ausschliesslich die fahrerbedingten Einflussgrössen beeinflussen.

Informierende und warnende Systeme haben nur dann einen Einfluss auf die Faktoren der Leistungsfähigkeit, wenn der Fahrer die Informationen und Warnungen beachtet und umsetzt. Ausgehend davon hat der Abstandswarner (siehe Kap. 3.1.2.1) neben dem offensichtlichen direkten Einfluss auf das Abstandsverhalten eine indirekte Auswirkung auf das Geschwindigkeitsverhalten, wenn zur Wahrung des Sicherheitsabstandes zum vorausfahrenden Fahrzeug gebremst (oder beschleunigt) wird.

Die primäre Funktion von Systemen zur Überwachung des toten Winkels (siehe Kap. 3.1.2.4) ist, den Fahrer zu informieren, wenn sich ein Fahrzeug im toten Winkel befindet. Das Spurwechselverhalten wird von diesen Systemen nur dann beeinflusst, wenn als Folge der Warnung ein vorgesehener Spurwechsel unterbrochen wird. Spurwechselassistenten (siehe Kap. 3.1.2.5) hingegen haben einen direkten Einfluss auf das Spurverhalten, da sie den Fahrer bei Spurwechselmanövern gezielt mit einem Warnhinweis auf eine gefährliche Situation oder auf einen nicht möglichen Spurwechsel aufmerksam machen. Dies führt zu einer Homogenisierung des Verkehrsablaufes, da wenige kritische Spurwechselmanöver stattfinden.

Mit Sichthilfen (siehe Kap. 3.1.2.7) werden die Lichtverhältnisse bei sogenannten nicht idealen Umfeldbedingungen<sup>9</sup> verbessert. Die bessere Sicht des Strassenfeldes vor dem Fahrzeug führt zu einer Fahrweise, die im Vergleich zum Zustand ohne Fahrerassistenzsystem dem Fahrverhalten in idealen Situationen ähnlicher ist. So werden auch das Abstands- und das Geschwindigkeitsverhalten angepasst und damit die Leistungsfähigkeit.

---

<sup>8</sup> In Fahrtrichtung vorderster Teil der verlangsamten Verkehrsmenge

<sup>9</sup> Ideale Umfeldbedingungen: trockene Fahrbahn bei Tageslicht

Einflussfaktoren		Information und Warnung									Verbindliche Anweisungen		
		Abstandswarner	Einparkhilfe	Spurassistent	Tote-Winkel-Überwachung	Spurwechselassistent	Sichthilfen	Objektwarnsystem	Automatische Fahrzeugdiagnose	Informationsübermittlung (Verkehrssignale und Geschwindigkeit)	Systeme zur Lenkerüberwachung	Fahrzeugseitige Umsetzung von verkehrssign. und Geschw.	Verkehrszeichenerkennung
Fahrbahn	Längsneigung												
	Anzahl Fahrstreifen												
	Fahrstreifenbreite												
	seitliche Hindernisfreiheit												
	Lage im Netz												
	Geschwindigkeitsbeschränkung												
	Überholverbote für LW												
Fahrzeug	Fahrzeugtyp												
	Fahreigenschaften												
	Fahrzeugzustand												
Fahrer	Abstandsverhalten	<b>X</b>						x	x			x	x
	Geschwindigkeitsverhalten	x						x	x	<b>X</b>		<b>X</b>	<b>X</b>
	Spurwechselverhalten				x	<b>X</b>		x					
	Reaktionszeit											x	x
Verkehr	Fahrerkollektiv	x			x	x	x	x		x		x	x
	Fahrzeugkollektiv												
Umwelt	Witterung												
	Lichtverhältnisse							<b>X</b>					

**X** = direkter Einfluss des Fahrerassistenzsystems auf die Leistungsfähigkeit  
 x = indirekter Einfluss des Fahrerassistenzsystems auf die Leistungsfähigkeit

Einflussfaktoren		Korrigierende Eingriffe						Übernahme von Fahreraufgaben					
		Antiblockiersystem (ABS)	Antriebschlupfregelung (ASR)	Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP)	Bremsassistent (BA)	Active Body Control (ABC)	Störgrößenkompensation	Adaptative Cruise Control (ACC)	Stauassistent	Spurwechselunterstützung / Ausweichassistent	Automatische Notbremsung	Kollisionswarmsysteme	Umfassende Fahrzeuglenkung
Fahrbahn	Längsneigung												
	Anzahl Fahrstreifen												
	Fahrstreifenbreite												
	seitliche Hindernisfreiheit												
	Lage im Netz												
	Geschwindigkeitsbeschränkung												
	Überholverbote für LW												
Fahrzeug	Fahrzeugtyp												
	Fahreigenschaften	0	0	0	0	0	0						0
	Fahrzeugzustand												
Fahrer	Abstandsverhalten	x	x	x		x		X	X				X
	Geschwindigkeitsverhalten	x	x	x		x		X	X				X
	Spurwechselverhalten							x		X			X
	Reaktionszeit							X	X	x			X
Verkehr	Fahrerkollektiv												
	Fahrzeugkollektiv												
Umwelt	Witterung												
	Lichtverhältnisse												

X = direkter Einfluss des Fahrerassistenzsystems auf die Leistungsfähigkeit  
x = indirekter Einfluss des Fahrerassistenzsystems auf die Leistungsfähigkeit  
0 = nicht leistungsrelevanter Einfluss im Normalbetrieb

Tabelle 3: Einflüsse von FAS auf die Einflussfaktoren der Leistungsfähigkeit

---

Nachdem Objektwarnsysteme (siehe Kap. 3.1.2.7) eine Warnung über den kritischen Zustand der Fahrbahn (z.B. bei Eisglätte) oder einen Unfall auf dem folgenden Strassenabschnitt übermittelt haben, passen die Fahrer ihre Fahrweise an. Grössere Abstände und tiefere Geschwindigkeiten sind die Folge. Bei der infrastrukturseitigen Übermittlung von Verkehrssignalen und Geschwindigkeiten (siehe Kap. 3.1.2.9) wird hingegen ausschliesslich der Einflussfaktor „Geschwindigkeitsverhalten“ in direkter Weise beeinflusst. Auf die Leistungsfähigkeit bei normalen Verhältnisse hat dies kaum Einfluss.

Systeme zur fahrzeugseitigen Umsetzung von Verkehrssignalen (siehe Kap. 3.1.3.2) und Systeme zur Verkehrszeichenerkennung (siehe Kap. 3.1.3.3) beeinflussen das Geschwindigkeitsverhalten direkt, da sie nach Erkennung der Geschwindigkeitsbeschränkung sofort die Fahrzeuggeschwindigkeit entsprechend anpassen. Diese Geschwindigkeitsanpassung führt zu einer Veränderung des Abstandsverhaltens. Ob die Abstände zwischen den Fahrzeugen kürzer oder grösser werden, hängt von vielen Faktoren ab, wie zum Beispiel Verkehrssituation und Ausstattungsgrad und ist noch ein Forschungsthema [34], [51]. Da die Erkennung und die Umsetzung der Geschwindigkeitsbeschränkungen dem System überlassen werden, kann eventuell die Reaktionszeit verkürzt werden.

Alle Fahrerassistenzsysteme, die in die Stabilisierungsebene eingreifen, weisen einen direkten Einfluss auf die Fahreigenschaften, da damit beispielweise Bremsvermögen verbessert wird. Sie haben aber keine Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit gemäss Definition von 3.2.2. In verschiedenen Studien (z.B. [2], [47]) ist nachgewiesen worden, dass ABS (siehe Kap. 3.1.4.1) das Abstands- und Geschwindigkeitsverhalten der Fahrer teilweise verändert. Ein Teil der Fahrzeuglenker fährt im Vertrauen auf die bessere Bremstechnik aggressiver. Die Folge sind kürzere Abstände und höhere Geschwindigkeiten. Da ASR (siehe Kap. 3.1.4.2), ESP (siehe Kap.3.1.4.3) und ABC (siehe Kap. 3.1.4.5) eine Weiterentwicklung vom ABS sind, ist anzunehmen, dass diese Systeme ähnliche Auswirkungen auf das Fahrverhalten haben wie die ABS-Systeme.

Wie in den Kapiteln 3.3.2 und 3.3.3 bereits beschrieben, haben ACC-Systeme und Stauassistenten einen bedeutenden Einfluss auf das Fahrverhalten, da sie direkt in die Abstands- und Geschwindigkeitsregelung eingreifen. Da die Reaktionszeit dieser Assistenzsysteme bedeutend kürzer ist als die Reaktionszeit des Menschen, ist es theoretisch möglich, mit einem kürzeren, aber ebenso sicheren Zeitabstand zwischen den Fahrzeugen zu fahren und damit die Kapazität eines Streckenabschnitts zu erhöhen. Ausserdem können ACC-Systeme das Spurwechselverhalten beeinflussen, indem das Bedürfnis die Spur zu wechseln auf grund des homogeneren Verkehrsflusses verringert wird [35].

Die Spurwechselunterstützung und der Ausweichassistent (siehe Kap. 3.1.5.3) weisen vergleichbare Auswirkungen auf das Spurwechselverhalten wie der Spurwechselassistent auf. Da zudem nach einer Bestätigung durch den Fahrer ein automatischer Spurwechsel durchgeführt wird, beeinflussen diese Systeme auch die Reaktionszeit.

Die Systeme zur umfassenden Fahrzeuglenkung (siehe Kap. 3.1.5.6) fassen die Auswirkungen aller in diesem Kapitel beschriebenen Fahrerassistenzsysteme zusammen.

---

## 4 Wirkungsanalyse

Für eine bessere Beurteilung der Zusammenhänge ist eine Differenzierung in Form von Wirkungsketten zweckmässig. Schwerpunkt der Wirkungsanalyse sind Systeme, welche die Fahreraufgaben übernehmen. Die Auswirkungen von informierenden und warnenden Systemen binden zwar den Fahrer in die Reaktion ein, da aber die Anweisungen unverbindlich sind, ist kein direkter Eingriff in die Steuerung vorhanden. Die Wirkungen sind dann oftmals nicht sehr gross und beeinflussen den Verkehrsfluss noch nicht in der erwarteten Art und Weise [27].

Die Wirkungsketten in den folgenden Abbildungen (Abbildung 15 und Abbildung 16) zeigen beispielhaft die mutmasslichen respektive möglichen Wirkungen der Geschwindigkeits- und Abstandsregelung (ACC-Systeme) auf verschiedenen Ebenen und die Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit. Für diese Betrachtung wurden diese Systeme gewählt, weil sie einerseits seit einigen Jahren auf dem Markt verfügbar sind und folglich das Szenario mit einer tiefen Ausstattungsrate bereits heute auf dem Strassennetz gilt und andererseits weil diese gemäss Kap. 0 einen sehr ausgeprägten (positiven oder negativen) Einfluss auf die Leistungsfähigkeit von Hochleistungsstrassen haben können.

Das Szenario mit einem Ausstattungsgrad von 100% (vgl. Abbildung 15) bewirkt eher positive als negative Effekte auf den Verkehrsfluss, da das System mit seinen Sensoren die Situation auf der Strasse genauer und schneller als der Fahrer beurteilen kann. Diese Systeme sind sehr komplex und wirken sich nicht nur auf die Leistungsfähigkeit aus, sondern auch auf die Verkehrssicherheit und den Fahrkomfort. So können beispielsweise aufgrund der Übernahme der Längsführungsaufgaben vom Fahrer erzeugte Fahrfehler vermieden oder dessen negative Auswirkungen (schwere Unfälle) vermindert werden. Da ACC-Systeme erst seit kurzer Zeit verfügbar sind und oft noch in Entwicklung stehen, können viele Effekte nur vermutet werden.

Die Auswirkungen einer (vergleichsweise tiefen) Teilausstattungsrate mit ACC-Systemen berücksichtigt die Problematik des Aufeinandertreffens von ausgerüsteten und nicht ausgerüsteten Fahrzeugen. Die Wirkungsweise der ACC-Systeme muss dem Rechnung tragen und es können neben positiven auch negative Effekte entstehen, die in ungünstigen Fällen sogar überwiegen.





---

## 5 Fazit der Literaturrecherche

Die Literaturrecherche hat gezeigt, dass viele unterschiedliche Systeme zur Unterstützung der Fahrer vorhanden oder in Entwicklung sind. Die heute bekannten Fahrerassistenzsysteme zielen vor allem auf Sicherheit und Komfort.

In Anbetracht des technischen Fortschrittes und der immer feineren Differenzierung der Fahrerassistenzsysteme auf bestimmte Verkehrs- und Fahrsituationen hat sich eine neue Zielsetzung herausgeschält, die Verkehrsleistung mit Hilfe spezieller Fahrerassistenzsysteme zu erhöhen. INVENT [23] bezeichnet sie als Verkehrsleistungsassistenzsysteme. Für unterschiedliche Verkehrssituationen gibt es da entsprechend unterschiedliche Assistenzsysteme. Zum Beispiel postuliert INVENT [23] unter anderen ein Fahrerassistenzsystem für das zügige Fahren im Engstellenbereich und eines für das rechtzeitige und kräftige Beschleunigen bei der Stauausfahrt. Solche Systeme müssen die spezielle Verkehrssituation im Umfeld des Fahrzeugs sehr genau kennen, um wirkungsvoll zu sein. Noch stärker als andere Fahrerassistenzsysteme bedürfen sie sehr detaillierter Informationen über das Umfeld des Fahrzeugs, die nicht von den fahrzeugeigenen Sensoren ermittelt werden können. Dies führt zu den Themenkreisen der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation, Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation und kooperativen Systeme, die zurzeit noch intensiv erforscht werden.

Die Literaturlauswertung hat zahlreiche Arbeiten zutage gefördert, in denen ausgewählte Fahrerassistenzsysteme (oft ACC-Systeme) mit Hilfe von gezielten Veränderungen der Parameter im Fahrer-Fahrzeug-Modell abgebildet worden sind und damit Aussagen über deren Einfluss auf die Leistungsfähigkeit und den Verkehrsablauf zu ermöglichen. Dabei besteht die methodische Schwierigkeit, dass zur Abbildung der Fahrerassistenzsysteme mit Modellen Annahmen bezüglich der Parameter nötig sind, die weder qualitativ noch quantitativ abgestützt sind. Da die Folgerungen für die Leistungsfähigkeit stark von diesen Annahmen abhängen, haben sich gewisse Untersuchungen auf Versuche mit Testfahrern in Fahr-simulatoren gestützt. Die meisten nehmen aber ein idealisiertes Verhalten an.

Bei der Untersuchung der Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit mittels Simulationen besteht ausserdem das Problem, dass die Ergebnisse der verschiedenen Arbeiten miteinander nicht vergleichbar sind, da zur Abbildung der FAS-Funktionalitäten verschiedene Algorithmen sowie verschiedenen Fahrermodelle verwendet worden sind.

Die Einflüsse von Fahrerassistenzsystemen auf die Verkehrsleistung sind folglich, auf Grund der Literaturlauswertung, noch unklar. So lässt sich beispielweise dann eine Kapazitätserhöhung nachweisen, wenn der Fahrzeugabstand stark reduziert wird. Wird jedoch mit vorsichtigen Annahmen gearbeitet, kann es sowohl zu kapazitätserhöhenden als auch –vermindernden Effekten kommen. Trotz dieser Differenzen wird oft gefolgert, dass mit Fahrerassistenzsystemen der Verkehrsfluss stabiler wird, da der Verkehrszusammenbruch bei hoher Belastung hinausgezögert wird. Ausserdem ist eine Homogenisierung des Verkehrsablaufes aufgrund kleinerer Geschwindigkeitsunterschiede bei steigender Ausstattungsrate festgestellt worden.

Bei vielen der vorhandenen Studien ist auch zu bedenken, dass sie unter Mitwirkung von FAS-Herstellern entstanden sind, was einen gewissen Effekt auf die Beurteilung der Ergebnisse gehabt haben kann. Zurückhaltend interpretiert, belegen die analysierten Resultate weder eine eindeutige Tendenz zur Leistungssteigerung, noch eine solche zur Leistungsverminderung.

---

## 6 Aufbau der Modellanwendung

### 6.1 Ziel

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung bezweckt die Anwendung des Mikrosimulationsmodells zu sondieren, welche Änderungen des Fahrverhaltens durch FAS einen spürbaren Einfluss auf die Leistungsfähigkeit von HLS haben, und in welche Richtung dieser Ansatz geht.

Zu diesem Zweck wird ein heuristischer Ansatz verfolgt:

1. Verschiedene Parameterverschiebungen werden ins Modell eingespielen. Sie stellen unterschiedliche Verhaltensänderungen des Systems Fahrer+Fahrzeug dar, die von FAS potenziell erwartet werden können. Sie erzeugen unterschiedliche Auswirkungen auf den Verkehrsablauf und die Leistungsfähigkeit.
2. Diejenigen Parameterverschiebungen, welche zu einer Änderung der Leistungsfähigkeit führen, werden interpretiert. Welche Verhaltensänderung des Systems Fahrer+Fahrzeug ist es, die für die höhere Leistung ausschlaggebend ist?

Die Wahl dieses Ansatzes gründet auf den methodischen Schwierigkeiten mit der Nachbildung der realen Veränderungen, die die FAS herbeiführen. Im Fazit der Literaturrecherche ist auf diese Schwierigkeiten hingewiesen worden (Kap.5).

- Es fehlen heute noch qualitative und quantitative experimentelle Kenntnisse über das menschliche Fahrverhalten in Fahrzeugen, die mit FAS ausgerüstet sind.
- Über heute erhältliche FAS (ACC-Systeme, Abstandsregeltempomaten, ...) liegen Testberichte vor. Die Systeme sind noch neu und verhalten sich sehr unterschiedlich. Es ergibt sich noch kein klares Gesamtbild über die technischen Eigenschaften von Fahrzeugen mit FAS.
- Die Nachbildung des Fahrer- und Fahrzeugverhaltens in Gegenwart eines FAS im Mikrosimulationsmodell ist komplex. Selbst unter Ausschluss der menschlichen Faktoren können die Regelgrößen eines FAS nicht direkt mit den Parametern eines Mikrosimulationsmodells zur Deckung gebracht werden.

Im hier verfolgten heuristischen Ansatz werden zu den ersten beiden Punkten keine festen Annahmen gemacht, sondern verschiedene Möglichkeiten im Sinne einer Sondierung abgebildet. Der dritte Punkt muss mit der Interpretation überbrückt werden.

## 6.2 Vorgehen

Aus dem Modellansatz folgt ein Vorgehen in zwei Phasen:

1. Das Referenzszenario dient zur Kalibrierung des Modells und zur Evaluierung der Modellergebnisse im Bereich der Leistungsgrenze.
2. Die Szenarien mit FAS-Parametrierung loten die Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit aus, die aus verschiedenen durch FAS potenziell induzierten Verhaltensänderungen hervorgehen könnten.

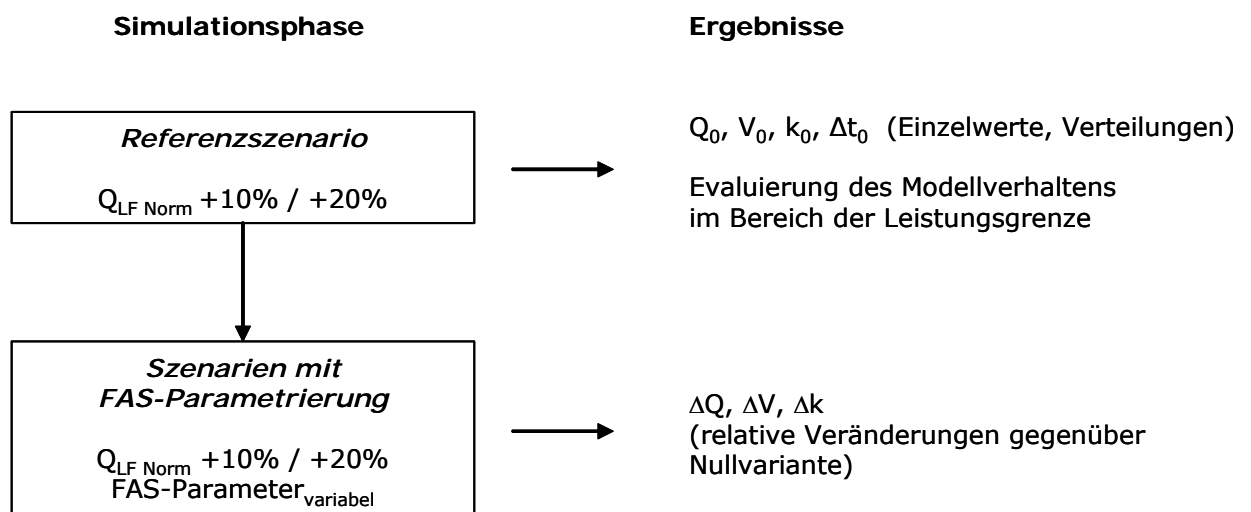


Abbildung 17: Ablauf der Modellanwendung.

Die Darstellung der Modellergebnisse im vorliegenden Bericht folgt diesem Vorgehen:

- Kapitel 7: Ergebnisse des Referenzszenarios. Daraus ist das Verhalten des Modells im Bereich der Leistungsgrenze ersichtlich.
- Kapitel 8: Ergebnisse der Szenarien mit FAS-Parametrierung. Es werden die Abweichungen vom Referenzszenario interpretiert.

Zur Kalibrierung des Referenzszenarios werden Vergleichsdaten der AVZ-Messstelle Gunzgen herangezogen (vgl. Anhang A).

### 6.3 Untersuchungsstrecke

Es wird der Verkehrsfluss auf der freien Strecke mit zwei Fahrstreifen untersucht.

Die Untersuchungsstrecke ist 5 km lang. Die signalisierte Höchstgeschwindigkeit beträgt 120 km/h. Die normale Fahrzeit beträgt 2,5 Minuten.

Die Untersuchungsstrecke ist im Modell durch eine Zufluss-, eine Vorlauf- und eine Auslaufstrecke ergänzt. Diese Ergänzungen sind ein modelltechnisches Bedürfnis.<sup>10</sup>

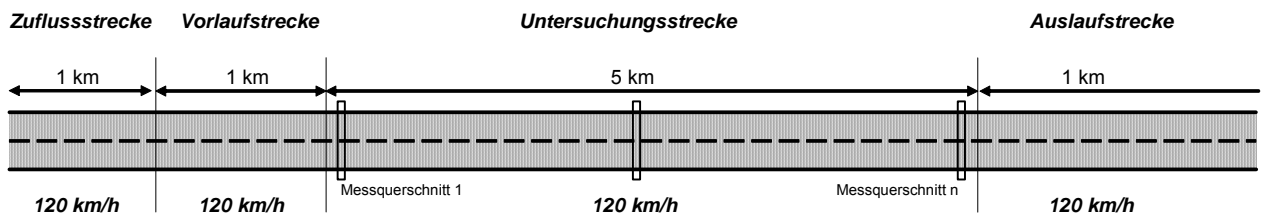


Abbildung 18: Aufbau der Untersuchungsstrecke im Modell.

An den Messquerschnitten werden jeweils Verkehrsstärke, Geschwindigkeit und Dichte registriert. Sie werden über 5-Minutenintervalle aggregiert.

Im Folgenden beziehen sich sämtliche Werte auf den mittleren Messquerschnitt, der sich auf halber Länge der Untersuchungsstrecke befindet.

Die Untersuchungsstrecke stellt einen Referenzfall dar, der mit Kalibrierungsdaten verglichen werden kann. Die streckenbezogenen Einflussfaktoren der Leistungsfähigkeit (namentlich Steigung und Gefälle, vgl. Tabelle 1, Abschnitt 3.2.3) werden in der Modellanwendung nicht weiter untersucht.

### 6.4 Verkehrsaufkommen

Der Verkehr ist aus den Fahrzeugklassen Personenwagen (PW) und Lastwagen (LW) zusammengesetzt.

Der LW-Anteil beträgt 10 %.

Es wird eine Nachfragevariation simuliert, die sich über 7 Std. erstreckt. Der Zufluss variiert in 15-Minuten-Schritten. Für die Auswertung werden für jeden 15-Minutenschritt drei 5-Minutenintervalle gebildet.

<sup>10</sup> Die Zufluss- und Auslaufstrecken bieten Raum für modelltechnische Vorgaben im Zusammenhang mit der Fahrzeugeinspeisung und mit künstlichen Stauwurzeln. Die Vorlaufstrecke stellt sicher, dass sich zwischen der Einspeisung und dem Beginn der eigentlichen Untersuchungsstrecke ein ungestörter Verkehrsfluss einstellt.

Zweck der Nachfragevariation ist, in kleinen Schritten von einem freien zu einem gebundenen Verkehrsfluss und dann zu einem deutlichen Nachfrageüberhang überzugehen.

Als Richtwert für den Übergang zu einem Nachfrageüberhang kann der Richtwert der Leistungsfähigkeit nach SN 640 018a [50] herangezogen werden. Für die zweistreifige freie Strecke mit zulässiger Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h und Schwerverkehrsanteil zwischen 5 und 15 % beträgt er 3'800 Fz/h.

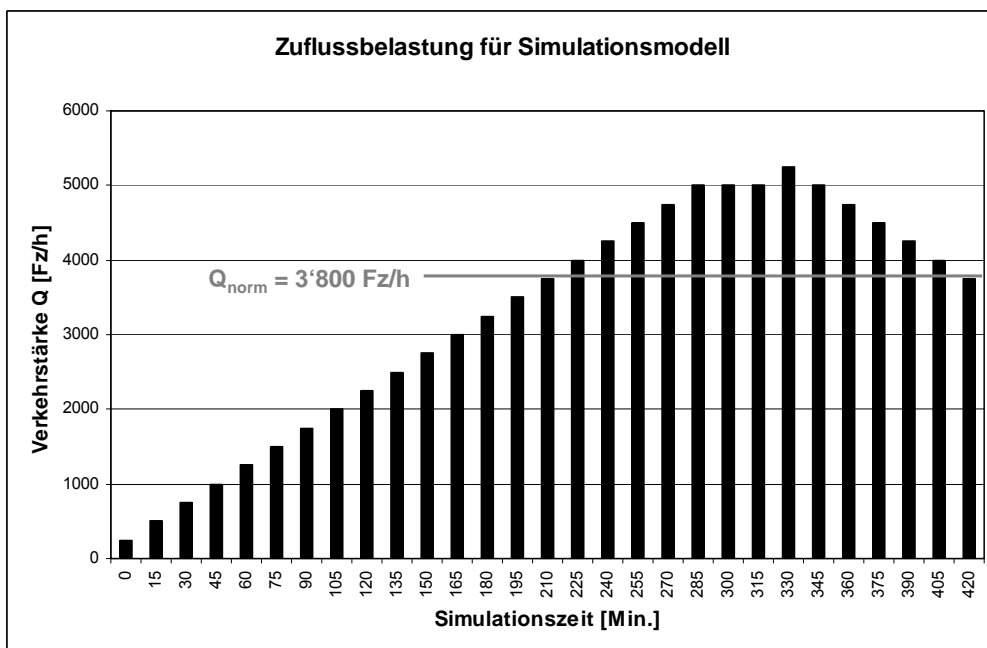


Abbildung 19: Darstellung der Nachfragevariation für die Simulation.

## 6.5 Modellparameter im Referenzszenario

Es wird das Mikrosimulationsmodell AIMSUN v5.1.3 (2007) verwendet.<sup>11</sup>

Für den Verkehrsfluss auf Hochleistungsstrassen sind die wichtigsten Parameter, die das Verhalten eines Fahrzeugs in AIMSUN bestimmen, in der folgenden Tabelle gegeben.

Die Werte gelten für das Referenzszenario. Sie bestimmen die Zufallsverteilung der Fahrzeugparameter, nach der die Parameter für jedes Fahrzeug individuell gesetzt werden.

<sup>11</sup> Es sind verschiedene ausgereifte Mikrosimulationsmodelle erhältlich. Sie unterscheiden sich in der Wahl der grundlegenden Fahrzeugparameter und im Aufbau der Gesetzmässigkeiten, welche das Fahrzeugverhalten im Verkehr beschreiben. In neueren schweizerischen Forschungen zum Verkehrsfluss auf Hochleistungsstrassen sind z.B. AIMSUN (Projekt ASTRA 2003/005) und VISSIM (Projekt VSS 2000/337) zur Anwendung gekommen.

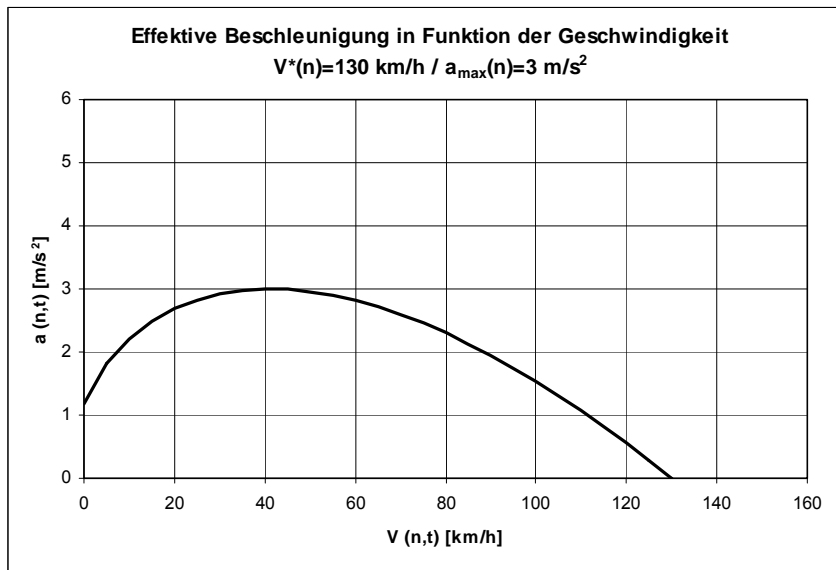
	Fahrzeugklasse	PW				LW							
		Mittelwert	Standard-abweichung	Unter-grenze	Ober-grenze	Mittelwert	Standard-abweichung	Unter-grenze	Ober-grenze				
Parameter mit Normalverteilung	<b>Max. Wunschgeschwindigkeit</b> [km/h]	130	25	110	150	95	20	80	110				
	<b>Max. Beschleunigung</b> [m/s <sup>2</sup> ]	3	0.2	2.6	3.4	1	0.5	0.6	1.8				
	<b>Normalverzögerung</b> [m/s <sup>2</sup> ]	4	0.25	3.5	4.5	3.5	1	2.5	4.8				
Parameter mit diskreter Verteilung	<b>Reaktivität</b>												
	Wert [s]	0.75	1.5	2.25	3			0.75	1.5	2.25	3	3.75	4.5
	Häufigkeit [%]	60	20	10	10			10	40	20	10	10	10

**Tabelle 4:** Wichtigste Fahrzeugparameter im Referenzszenario. Die Werte beschreiben die Zufallsverteilung, nach der die Parameter für jedes Fahrzeug individuell bestimmt werden. Man beachte die Kommentare im Text.

Für die Beschreibung der Gesetzmässigkeiten des Modells und der genauen Bedeutung der Parameter wird auf [69] verwiesen. Folgende Kommentare sind zu beachten:

- Aus der maximalen Wunschgeschwindigkeit wird eine effektive Wunschgeschwindigkeit abgeleitet. Diese hängt auch von der signalisierten Höchstgeschwindigkeit ab. Der Kompromiss zwischen der maximalen Wunschgeschwindigkeit und der signalisierten Höchstgeschwindigkeit wird von einem zusätzlichen Parameter bestimmt („Akzeptanz der Geschwindigkeitsbeschränkung“).
- Aus der maximalen Beschleunigung und der Normalverzögerung wird die *effektive Beschleunigung resp. Verzögerung* abgeleitet. Letztere sind geschwindigkeitsabhängig; das Beschleunigungsvermögen der Fahrzeuge nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit ab. Abbildung 20 zeigt eine beispielhafte Beschleunigungskurve.

Tabelle 5 enthält verschiedene Vergleichswerte zur Beschleunigung. Aus den Werten ist ersichtlich, dass das Beschleunigungsvermögen der Fahrzeuge im Modell wie in Wirklichkeit stark gestreut ist, und dass die Wertebereiche übereinstimmen. Es kann vermutet werden, dass die Längsdynamik der simulierten Fahrzeuge eher auf der sportlichen Seite liegt, während sie bei realen marktgängigen ACC-Systemen tendenziell auf der komfortablen Seite liegen dürfte.



**Abbildung 20:** Abhängigkeit der effektiven Beschleunigung von der Geschwindigkeit für ein Fahrzeug mit Wunschgeschwindigkeit 130 km/h und maximaler Beschleunigung 3 m/s<sup>2</sup> im Modell AIMSUN.

<p><b>Effektive Beschleunigung der Fahrzeuge im Modell</b></p> <p>Momentangeschwindigkeit 100 km/h  Wunschgeschwindigkeit zwischen 110 und 150 km/h  Max. Beschleunigung zwischen 2,6 und 3,4 m/s<sup>2</sup></p> <p>[69]</p>	<p><b>1,5 m/s<sup>2</sup></b> (Mittelwert)</p> <p><b>0,6 – 2,4 m/s<sup>2</sup></b> (Minimum / Maximum)</p>
<p><b>Mittlere Beschleunigung marktgängiger Fahrzeuge bei Geschwindigkeiten um 100 km/h</b></p> <p>Beschleunigung von 80 auf 120 km/h  Modelle mit Leistung zwischen 68 und 260 PS  Messwerte aus Automobilzeitschriften</p> <p>[70]</p>	<p><b>0,3 – 2,1 m/s<sup>2</sup></b></p>
<p><b>Mittlere Beschleunigung marktgängiger ACC-Systeme in Kolonnenfahrt</b></p> <p>Messwerte aus Automobilzeitschriften</p> <p>[70]</p>	<p><b>0,7 – 1 m/s<sup>2</sup></b></p>
<p><b>Richtwert der Beschleunigung für die Bemessung des Beschleunigungsstreifens</b></p> <p>Einfahrt in eine HLS mit Projektierungsgeschwindigkeit &gt; 80 km/h</p> <p>[71]</p>	<p><b>1 m/s<sup>2</sup></b></p>

**Tabelle 5:** Vergleichswerte zum Beschleunigungsvermögen.

- Die *Reaktivität* bedeutet in AIMSUN das minimale Zeitintervall zwischen zwei Verhaltensänderungen desselben Fahrzeugs. Aufgrund des Modellalgorithmus ist der Zahlenwert zwangsläufig ein ganzes Vielfaches des elementaren Zeitschritts der Simulation.

Eine Reaktivität von 0,75 Sek. bedeutet, dass ein Fahrer alle 0,75 Sek. aufgrund seines momentanen Umfelds eine neue Beschleunigung oder Verzögerung wählt oder die Gelegenheit zu einem Spurwechsel neu beurteilt. Im 3-Ebenen-Modell von Abbildung 2 wäre dieses minimale Zeitintervall auf der untersten Ebene zu situieren (Stabilisierungsebene).

Der Parameter Reaktivität ist nicht gleichbedeutend mit der Reaktionszeit: diese bezeichnet üblicherweise die Dauer, die für den Ablauf Erkennen-Entscheiden-Handeln erforderlich ist. Sie bewegt sich zwischen 0.5 und 5 Sekunden. Die Reaktionszeit existiert im Mikrosimulationsmodell nicht explizit.

## 6.6 Modellparameter in Szenarien mit FAS-Parametrierung

Die Szenarien mit FAS-Parametrierungen stellen Verhaltensänderungen des Systems Fahrer + Fahrzeug dar, die durch FAS potenziell induziert werden können.

Bei der Szenarienbildung werden drei Richtungen verfolgt (vgl. Abbildung 21):

### Richtung 1: Aufmerksames Fahren

Der Parameter Reaktivität wird verändert. Die Werte werden vermindert, was schnellere Geschwindigkeitsanpassungen zur Folge hat (siehe 6.5) Dies kommt einer höheren Aufmerksamkeit des Fahrers gleich.

Die Plausibilität dieser Verschiebung liegt darin, dass ein FAS die Reaktivität verbessern kann: Es kann Geschwindigkeitsschwankungen des Vorderfahrzeugs schneller feststellen und dem Fahrer übermitteln als dessen eigenes Auge, und es kann die Geschwindigkeitsanpassung selbständig einleiten, bevor die Hände und Füße des Fahrers soweit sind.

### Richtung 2: Sanfteres Fahren

Die Parameter Beschleunigung und Verzögerung werden verändert. Beide werden vermindert, was bei gleicher Geschwindigkeitsdifferenz zum Vorderfahrzeug eine sanftere Geschwindigkeitsanpassung zur Folge hat.

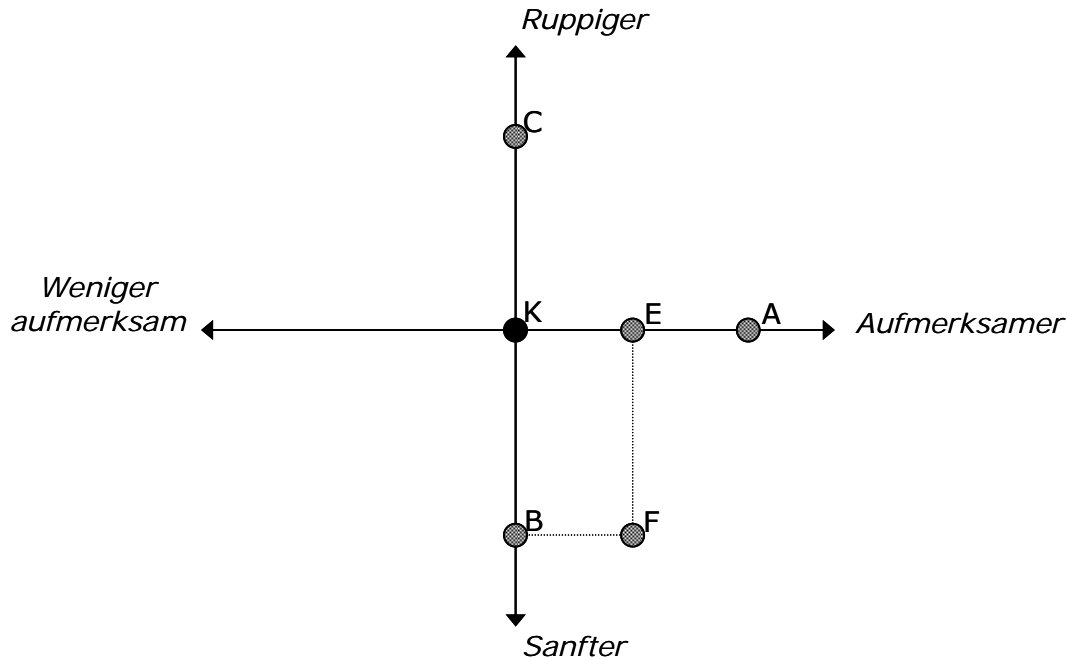
Die Plausibilität dieser Verschiebung liegt darin, dass ein FAS durch eine automatische Geschwindigkeitsanpassung der Reaktion des Fahrers zuvorkommen kann und dieser auf die eigenhändige Intervention verzichtet; bei geeigneter Parametrierung fällt die automatische Anpassung sanfter aus als die, die der Fahrer vorgenommen hätte.

### Richtung 3: Ruppigeres Fahren

Dies ist die Gegenrichtung zum „Sanfteren Fahren“. Die Parameter Beschleunigung und Verzögerung werden erhöht, was bei gleicher Geschwindigkeitsdifferenz zum Vorderfahrzeug eine ruppigere Geschwindigkeitsanpassung zur Folge hat.

Die Plausibilität dieser Verschiebung liegt wie im Fall B; bei geeigneter Parametrierung fällt die automatische Anpassung entschiedener und heftiger aus als die, die der Fahrer vorgenommen hätte.

Die Szenarien ergeben sich aus diesen Richtungen bzw. Kombinationen davon. Das Prinzip der Szenarienbildung ist im folgenden Diagramm dargestellt.



**Abbildung 21:** Prinzip der Szenarienbildung. Die Fahrzeugparameter werden entlang dreier Grundrichtungen verändert. Die veränderten Parameter stellen Verhaltensänderungen des Systems Fahrer + Fahrzeug dar, die von FAS potenziell induziert werden können.

Die Modellierung wurde im ersten Schritt für die Szenarien A, B und C durchgeführt. Auf ein Szenario D (weniger aufmerksames Fahren) wurde verzichtet. Auf Begehren der Begleitkommission wurde im zweiten Schritt das Szenario E hinzugefügt, da das Szenario A als drastisch empfunden wurde. Ebenso wurde im zweiten Schritt durch das Szenario F die Kombination von aufmerksamerem und sanfterem Fahren ausgelotet.

Das Referenzszenario wird im Folgenden mit **K** bezeichnet (**Kalibriert**).

Die folgenden Tabellen zeigen für jedes Szenario diejenigen Parameter, die vom Referenzszenario abweichen. Nicht aufgeführte Parameter behalten den Wert, den sie im Referenzszenario haben.

	Max. Beschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]	PW				LW			
		Mittelwert	Standardabweichung	Untergrenze	Obergrenze	Mittelwert	Standardabweichung	Untergrenze	Obergrenze
Parameter mit Normalverteilung	Szenario K	3	0.2	2.6	3.4	1	0.5	0.6	1.8
	Szenario A	3	0.2	2.6	3.4	1	0.5	0.6	1.8
	Szenario B	<b>2.7</b>	0.2	2.6	3.4	<b>0.7</b>	0.5	0.6	1.8
	Szenario C	<b>3.3</b>	0.2	2.6	3.4	<b>1.7</b>	0.5	0.6	1.8
	Szenario E	3	0.2	2.6	3.4	1	0.5	0.6	1.8
	Szenario F	<b>2.7</b>	0.2	2.6	3.4	<b>0.7</b>	0.5	0.6	1.8

Tabelle 6: Verteilung der maximalen Beschleunigung in den Szenarien mit FAS-Parametrierung

	Normal-verzögerung [m/s <sup>2</sup> ]	PW				LW			
		Mittelwert	Standardabweichung	Untergrenze	Obergrenze	Mittelwert	Standardabweichung	Untergrenze	Obergrenze
Parameter mit Normalverteilung	Szenario K	4	0.25	3.5	4.5	3.5	1	2.5	4.8
	Szenario A	4	0.25	3.5	4.5	3.5	1	2.5	4.8
	Szenario B	<b>3.6</b>	0.25	3.5	4.5	<b>2.6</b>	1	2.5	4.8
	Szenario C	<b>4.4</b>	0.25	3.5	4.5	3.5	1	2.5	4.8
	Szenario E	4	0.25	3.5	4.5	3.5	1	2.5	4.8
	Szenario F	<b>3.6</b>	0.25	3.5	4.5	<b>2.6</b>	1	2.5	4.8

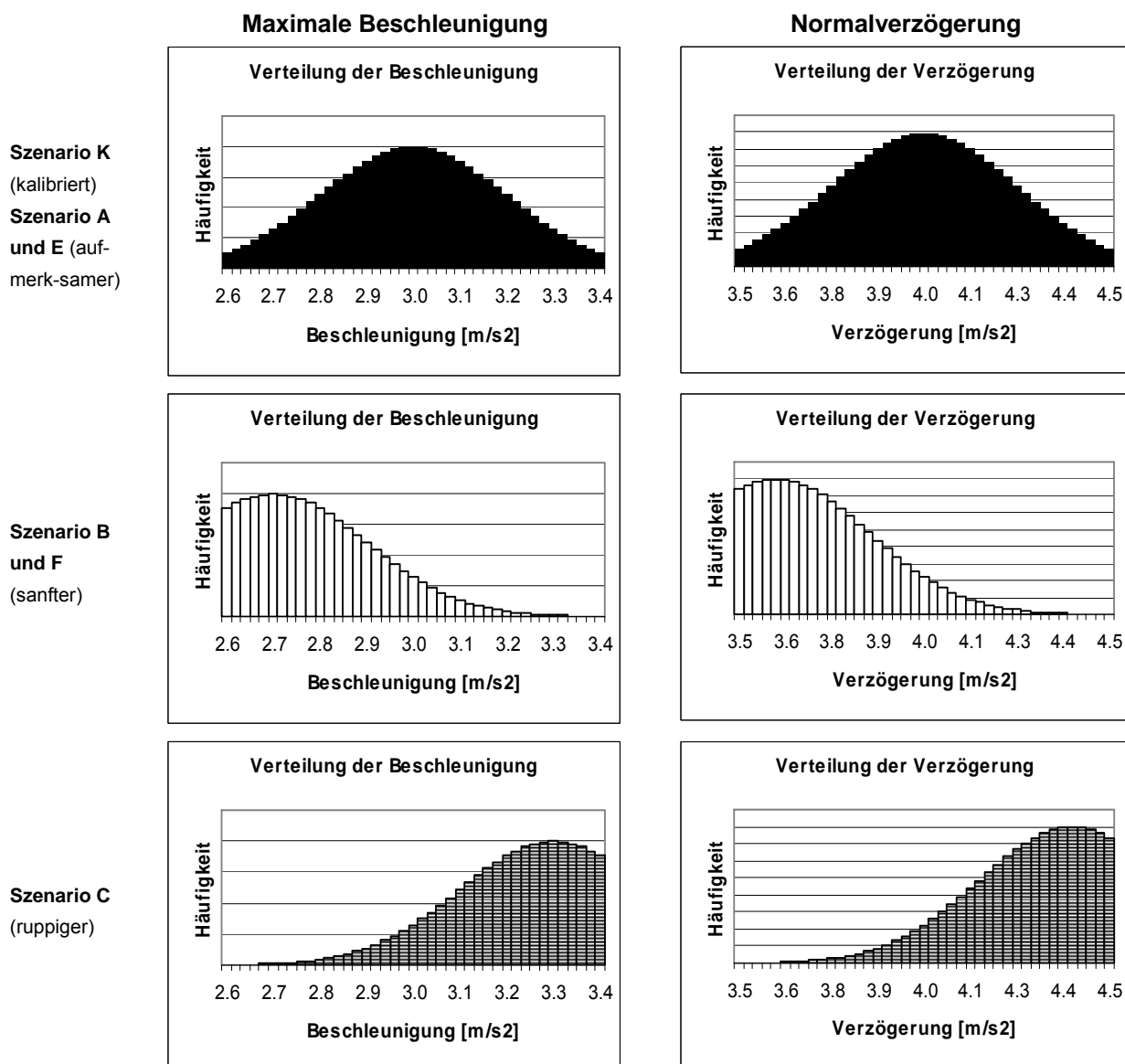
Tabelle 7: Verteilung der Normalverzögerung in den Szenarien mit FAS-Parametrierung

	Reaktionszeit	PW						LW					
		0.75	1.5	2.25	3	3.75	4.5	0.75	1.5	2.25	3	3.75	4.5
Parameter mit diskreter Verteilung	<b>Szenario K</b>												
	Wert [s]	0.75	1.5	2.25	3			0.75	1.5	2.25	3	3.75	4.5
	Häufigkeit [%]	60	20	10	10			10	40	20	10	10	10
	<b>Szenario A</b>												
	Wert [s]	0.75	1.5	2.25	3			0.75	1.5	2.25	3	3.75	4.5
	Häufigkeit [%]	<b>100</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>			<b>80</b>	<b>20</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
	<b>Szenario B</b>												
	Wert [s]	0.75	1.5	2.25	3			0.75	1.5	2.25	3	3.75	4.5
	Häufigkeit [%]	60	20	10	10			10	40	20	10	10	10
	<b>Szenario C</b>												
	Wert [s]	0.75	1.5	2.25	3			0.75	1.5	2.25	3	3.75	4.5
	Häufigkeit [%]	60	20	10	10			10	40	20	10	10	10
	<b>Szenario E</b>												
	Wert [s]	0.75	1.5	2.25	3			0.75	1.5	2.25	3	3.75	4.5
	Häufigkeit [%]	<b>80</b>	<b>10</b>	<b>5</b>	<b>5</b>			<b>40</b>	<b>30</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
	<b>Szenario F</b>												
	Wert [s]	0.75	1.5	2.25	3			0.75	1.5	2.25	3	3.75	4.5
	Häufigkeit [%]	<b>80</b>	<b>10</b>	<b>5</b>	<b>5</b>			<b>40</b>	<b>30</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Tabelle 8: Verteilung der Reaktionszeit in den Szenarien mit FAS-Parametrierung

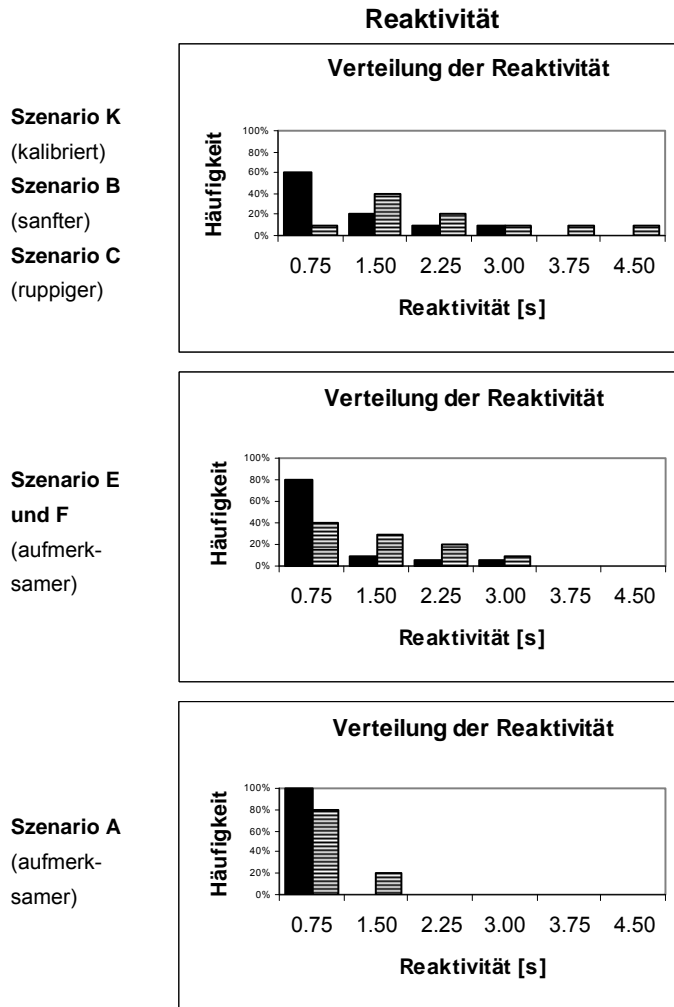
Die Ober- und Untergrenzen der Wertebereiche der Parameterverteilungen bleiben unverändert, damit garantiert ist, dass die veränderten Parameter die technischen und physiologischen Grenzen des Systems Fahrer + Fahrzeug nicht überschreiten.

Die Parameterverschiebungen sind in den folgenden Abbildungen verdeutlicht.



**Abbildung 22:** Verteilung der maximalen Beschleunigung und der Normalverzögerung in den Szenarien mit FAS-Parametrierung.

Das Gewicht der Verteilung von Beschleunigung und Verzögerung verschiebt sich in den Szenarien B und F zu kleineren, in Szenario C zu grösseren Werten. Der zulässige Wertebereich ist in allen Szenarien derselbe.



**Abbildung 23:** Verteilung der Reaktivität in den Szenarien mit FAS-Parametrierung (schwarz: PW / schraffiert: LW).

Das Gewicht der Verteilung der Reaktivität verschiebt sich in den Szenarien E, F und A zu kleineren Werten. Gleichzeitig nimmt die Streuung der Verteilung ab, was eine tendenzielle Vereinheitlichung des Verhaltens der verschiedenen Fahrzeuge mit sich bringt.

## 7 Ergebnisse im Bereich der Leistungsgrenze

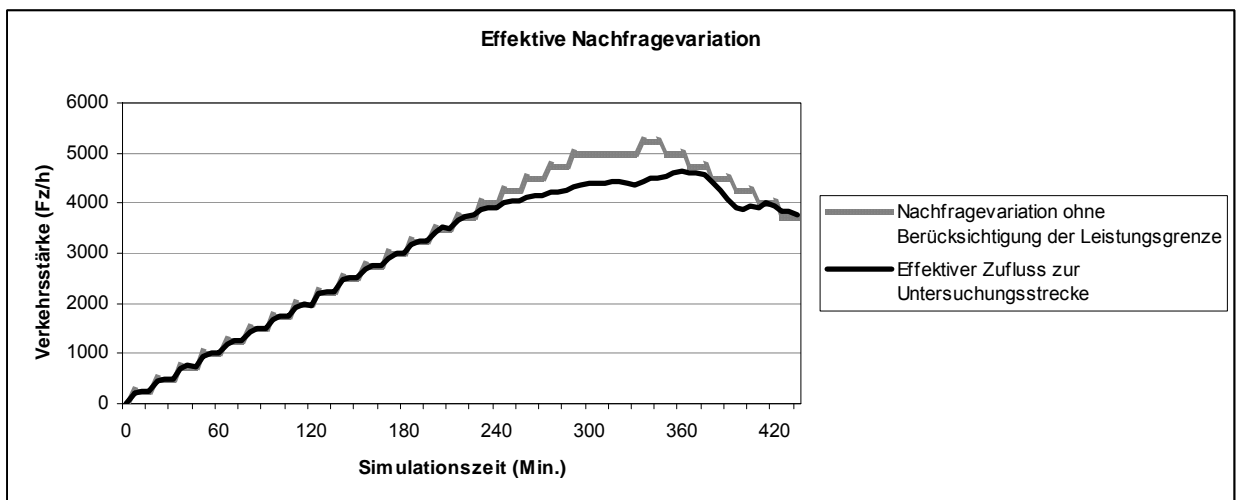
### 7.1 Effektive Nachfragevariation

Abbildung 24 zeigt den effektiven Zufluss zur Untersuchungsstrecke in einem Simulationsdurchlauf des Referenzszenarios. Der effektive Zufluss liegt unter der gewünschten Nachfragevariation (siehe Kap. 6.4).

Es zeigt sich, dass die vordefinierte Nachfragevariation über eine eingebaute Kapazitätsgrenze des Modells hinausgeht. Die Nachfrage kann nicht vollumfänglich eingespielt werden, weil dazu die Mindestabstände unterschritten werden müssten, die aus den Gesetzmässigkeiten des Modells hervorgehen. Die überzähligen Fahrzeuge werden vom Modell nicht eingespielt.

Der maximale effektive Zufluss, der in verschiedenen Simulationsdurchläufen des Referenzszenarios registriert wurde, liegt bei 4'800 Fz/h.

Es ist zu beachten, dass theoretische Kapazität der Untersuchungsstrecke auf der ganzen Länge gleiche ist. Würden die überzähligen Fahrzeuge auf einem dritten Fahrstreifen eingespielt, würde vor der Verengung auf zwei Fahrstreifen ein Stau auftreten; also nicht auf der Untersuchungsstrecke, sondern vorher.



**Abbildung 24:** Der effektive Zufluss zur Untersuchungsstrecke liegt unter der gewünschten Nachfragevariation, weil diese über die Kapazitätsgrenze des Modells hinausgeht.

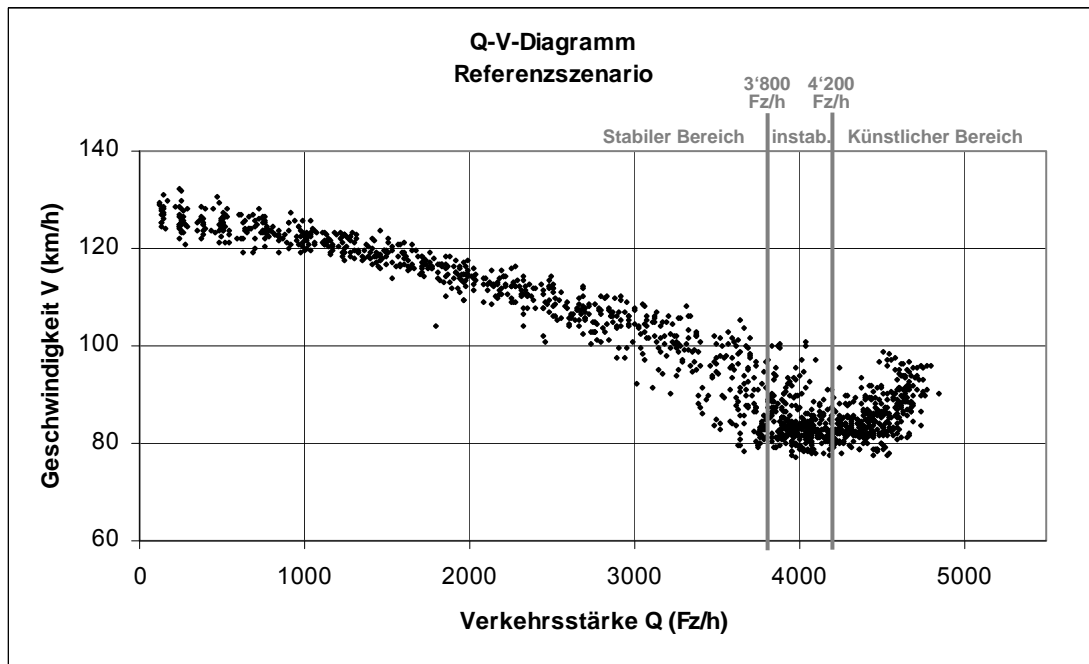
### 7.2 Q-V-Diagramm

Abbildung 25 zeigt das Q-V-Diagramm über 15 Durchläufe<sup>12</sup> des Referenzszenarios. Jeder Punkt stellt die mittlere Verkehrsstärke und die mittlere Geschwindigkeit über ein 5-Minuten-Intervall dar

Die Punkteverteilung lässt sich wie folgt charakterisieren:

<sup>12</sup> Die Simulationsdurchläufe unterscheiden sich durch den Zufallswurf, der die Parameter jedes Einzelfahrzeugs bestimmt. Um zu verhindern, dass die Simulationsergebnisse durch eine seltene Zufallskonstellation verzerrt werden, werden die Mittelwerte aus mehreren Durchläufen ausgewertet.

- Solange die Geschwindigkeit mit zunehmender Verkehrsstärke sinkt (bis  $Q \approx 4'200$  Fz/h), entspricht die Verteilung dem „oberen Ast“ des Fundamentaldiagramms.
- Über  $Q \approx 4'200$  Fz/h finden sich bei sehr hohen Verkehrsstärken wieder höhere Geschwindigkeiten. Dieser „künstliche“ Bereich hat im realen Fundamentaldiagramm keine Entsprechung.
- Es fehlt der „untere Ast“ des Fundamentaldiagramms.



**Abbildung 25:** Q-V-Diagramm über 15 Durchläufe des Referenzszenarios. Jeder Punkt stellt die mittlere Verkehrsstärke und die mittlere Geschwindigkeit über ein 5-Minuten-Intervall. Diskussion siehe Text.

#### Diskussion:

Im stabilen Bereich des Fundamentaldiagramms bis  $Q_{\text{norm}} \approx 3'800$  Fz/h<sup>13</sup> steht das Modell in guter Entsprechung zu den Kalibrierungsdaten.

Im Bereich zwischen 3'800 und 4'200 Fz/h, der in der Realität instabil ist, bleibt der modellierte Verkehrsfluss stabil. Die spontane Staubildung, d.h. das Aufschaukeln von dichtem Auffahren und Verlangsamen durch einzelne Fahrzeuge zu einer Verdichtung und Verlangsamung des gesamten Verkehrsflusses, findet im Modell nicht statt. Dies ist eine Abweichung zur Realität.

Eine ergänzende Variante im Rahmen der vorliegenden Untersuchung hat gezeigt, dass sich Punkte auf dem unteren Ast des Fundamentaldiagramms ergeben (d.h. dass der Verkehrszusammenbruch im Modell stattfindet), wenn auf der Auslaufstrecke eine künstliche Stauwurzel platziert wird. In diesem Fall bildet sich der Stau stromaufwärts von der Auslauf- auf die Untersuchungsstrecke zurück.

<sup>13</sup> Leistungsfähigkeit nach SN 640 018a [50] für die freie Strecke mit zulässiger Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h und Schwerverkehrsanteil zwischen 5 und 15 %.

---

Anstelle des realen Phänomens des spontanen Zusammenbruchs zeigt die Visualisierung, dass sich im Modell das Phänomen eines strikte gebundenen Verkehrsflusses einstellt. Man beobachtet gleichförmige Geschwindigkeiten, kurze und regelmässige Abstände, und keinerlei Spurwechselmanöver mehr. Je dichter der Verkehr wird, desto vollständiger stellt sich dieses Regime ein, und desto mehr steigt die mittlere Geschwindigkeit mit zunehmender Verkehrsstärke wieder an.<sup>14</sup>

Es lässt sich folgern, dass das Modell den Verkehrsfluss bis zur normalen Leistungsgrenze bei  $Q \approx 3'800$  Fz/h sowohl im fließenden wie im gestauten Zustand korrekt reproduziert. Im instabilen Bereich zwischen 3'800 und 4'200 Fz/h wird die innere Instabilität des Verkehrsflusses ungenügend reproduziert, und es beginnt der Übergang zu einem strikte gebundenen Verkehrsfluss. Im Bereich über 4'200 Fz/h stellt das Modell das künstliche Phänomen des strikte gebundenen Verkehrs dar.

### 7.3 Abstände zwischen Fahrzeugen

Das mittlere Zeitintervall zwischen Fahrzeugen eines Fahrzeugpulk im modellierten Verkehrsfluss beträgt auf dem linken Fahrstreifen 1,4 s. Bei 90 km/h entspricht dies einem Abstand von 35 m (Vorderkante zu Vorderkante). Dieser Wert wurde für Fahrzeugpulk von mindestens 7 Fahrzeugen mit nahezu gleicher Geschwindigkeit ermittelt.

Auf dem rechten Fahrstreifen ist das mittlere Zeitintervall länger, weil die Pulkbildung wegen der Präsenz der Lastwagen weniger stark ist.

Diskussion:

Zur Beurteilung des Zeitintervalls können Messergebnisse des IVT aus dem Jahr 2006 herangezogen werden (linker Fahrstreifen)<sup>15</sup>:

- 15 % der gemessenen Zeitlücken sind kleiner oder gleich 1 Sekunde
- 43 % der gemessenen Zeitlücken sind kleiner als 2 Sekunden.

Die Abstände zwischen Fahrzeugen im modellierten Verkehrsfluss können demnach als realistisch beurteilt werden.

---

<sup>14</sup> In Wirklichkeit können sporadische Punkte im äusseren Grenzbereich des Fundamentaldiagramms beobachtet werden, welche dem strikte gebundenen Verkehrsfluss entsprechen. Es sind z.B. am Baregg durch Wissenschaftler der ETH schon Verkehrsstärken von 5'000 Fz/h auf zwei Fahrstreifen gemessen worden, welche sich über Intervalle von einigen Minute aufrechterhalten haben.

<sup>15</sup> Quelle: Ergebnisse der Analysen zum Geschwindigkeits- und Abstandsverhalten auf Autobahnen, Fortschreibung 1997-2006, IVT, ETH Zürich, 2006

## 8 Ergebnisse mit FAS-Parametrierung

### 8.1 Überblick über die Szenarien

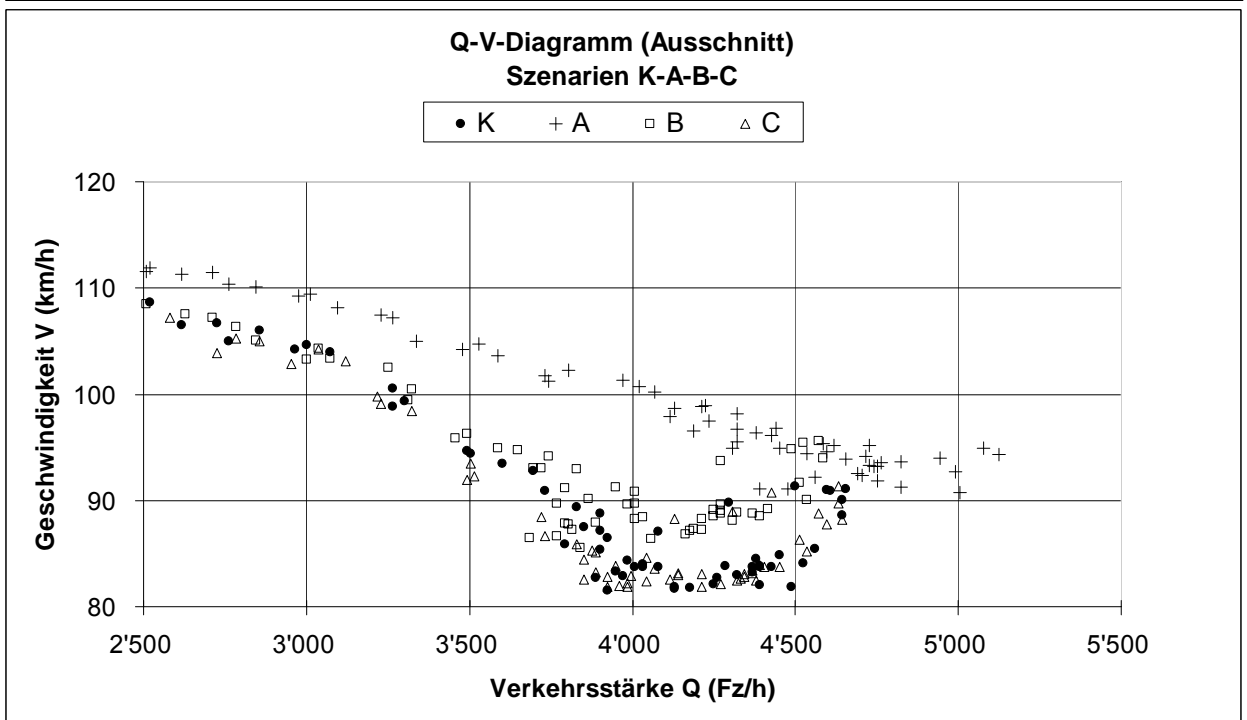
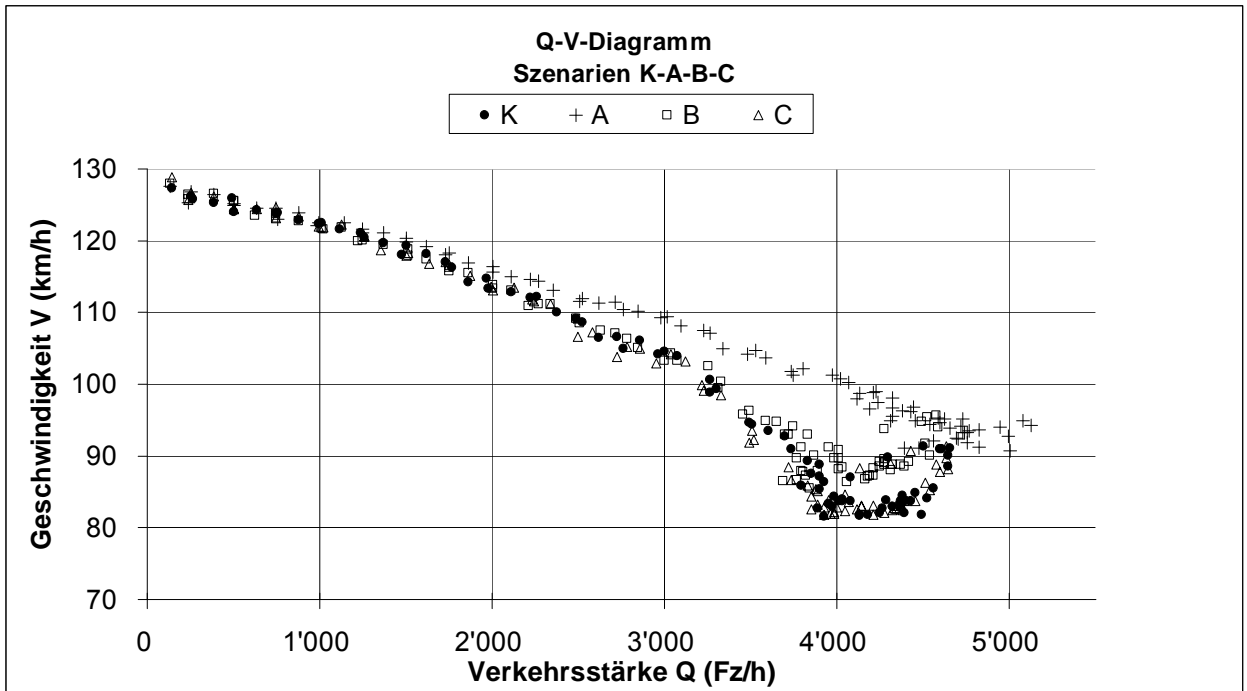
	<b>Ausrichtung</b>	<b>Parametrierung</b>
<b>K</b>	Referenzszenario	siehe Abschnitt 6.6
<b>A</b>	Erhöhte Reaktivität (extrem)	siehe Abschnitt 6.6
<b>B</b>	Sanfte Reaktion	siehe Abschnitt 6.6
<b>C</b>	Ruppige Reaktion	siehe Abschnitt 6.6
<b>E</b>	Erhöhte Reaktivität (mässig)	siehe Abschnitt 6.6
<b>F</b>	Erhöhte Reaktivität und sanfte Reaktion	siehe Abschnitt 6.6

### 8.2 Q-V-Diagramme

Abbildung 26 zeigt das Q-V-Diagramm für das Referenzszenario und die Szenarien A, B und C. Jeder Punkt stellt den Mittelwert eines 5-Minutenintervalls über 15 Durchläufe dar.

Charakterisierung:

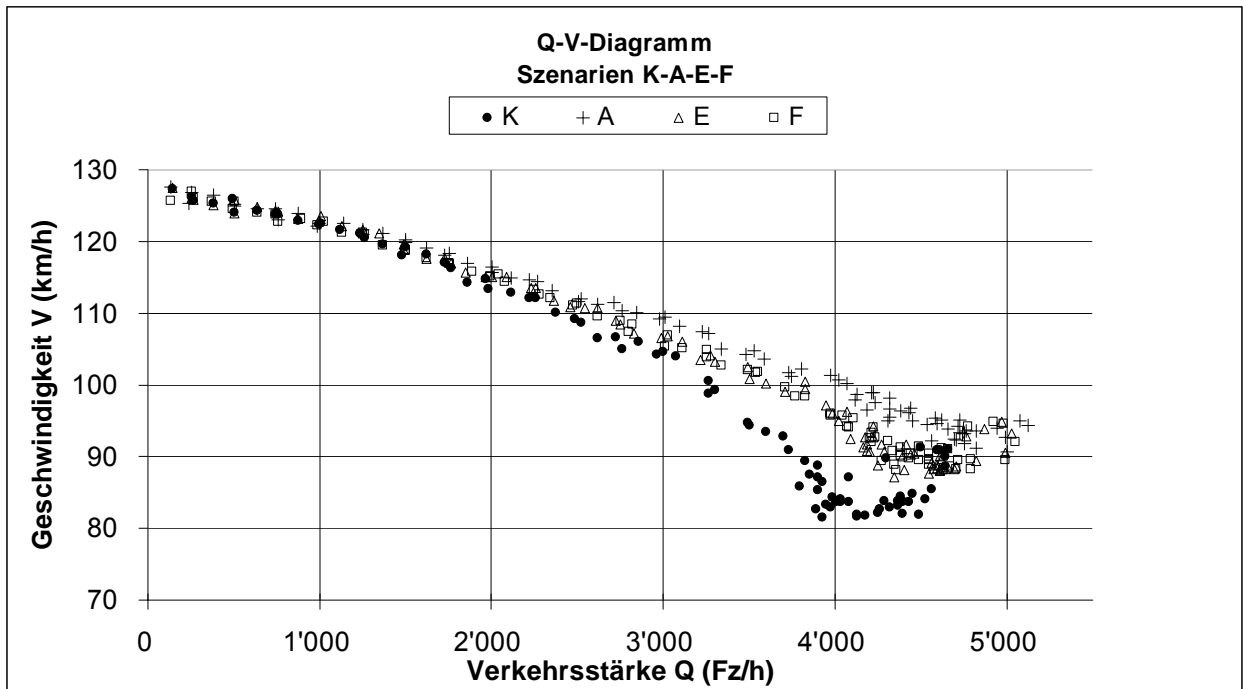
- Verlauf des Referenzszenarios: siehe Abschnitt 7.2.
- Die Szenarien B und C weichen im stabilen Bereich ( $Q \leq 3'800$  Fz/h) nicht vom Referenzszenario ab.
- Im instabilen ( $3'800$  Fz/h  $\leq Q \leq 4'200$  Fz/h) und im künstlichen Bereich ( $Q \leq 4'200$  Fz/h) verläuft Szenario C wie das Referenzszenario. Szenario B weist eine geringe Abweichung zu höheren Geschwindigkeiten auf.
- Szenario A weist im stabilen Bereich ab mittleren Verkehrsstärken ( $Q \approx 2'000$  Fz/h) deutlich höhere Geschwindigkeiten auf.
- Beim Übergang zum künstlichen Bereich ist bei Szenario A kein Wiederanstieg der Geschwindigkeiten zu beobachten, sondern wie im stabilen und instabilen Bereich eine monotone Abnahme. Hingegen zieht sich die Kurve zu deutlich höheren Verkehrsstärken (Maximum bei  $Q \approx 5'100$  Fz/h).



**Abbildung 26:** Q-V-Diagramm für das Referenzszenario und die Szenarien A, B und C. Jeder Punkt stellt den Mittelwert eines 5-Minutenintervalls über 15 Durchläufe dar. Diskussion siehe Text.

Abbildung 27 zeigt das Q-V-Diagramm für das Referenzszenario und die Szenarien A, E und F. Jeder Punkt stellt den Mittelwert eines 5-Minutenintervalls über 15 Durchläufe dar.

- Diskussion von Referenzszenario und Szenario A: siehe oben
- Die Szenarien E und F unterscheiden sich nicht wesentlich. Die Kurve verläuft zwischen Referenzszenario und Szenario A.



**Abbildung 27:** Q-V-Diagramm für das Referenzszenario und die Szenarien A, E und F. Jeder Punkt stellt den Mittelwert eines 5-Minutenintervalls über 15 Durchläufe dar. Diskussion siehe Text.

Abbildung 28 zeigt dieselben Resultate in Abhängigkeit der Dichte.

- Bei gleicher Dichte herrscht in Szenario A eine höhere Verkehrsstärke und eine höhere Geschwindigkeit als im Referenzszenario.
- Die maximale Dichte ist in Szenario A und im Referenzszenario gleich.

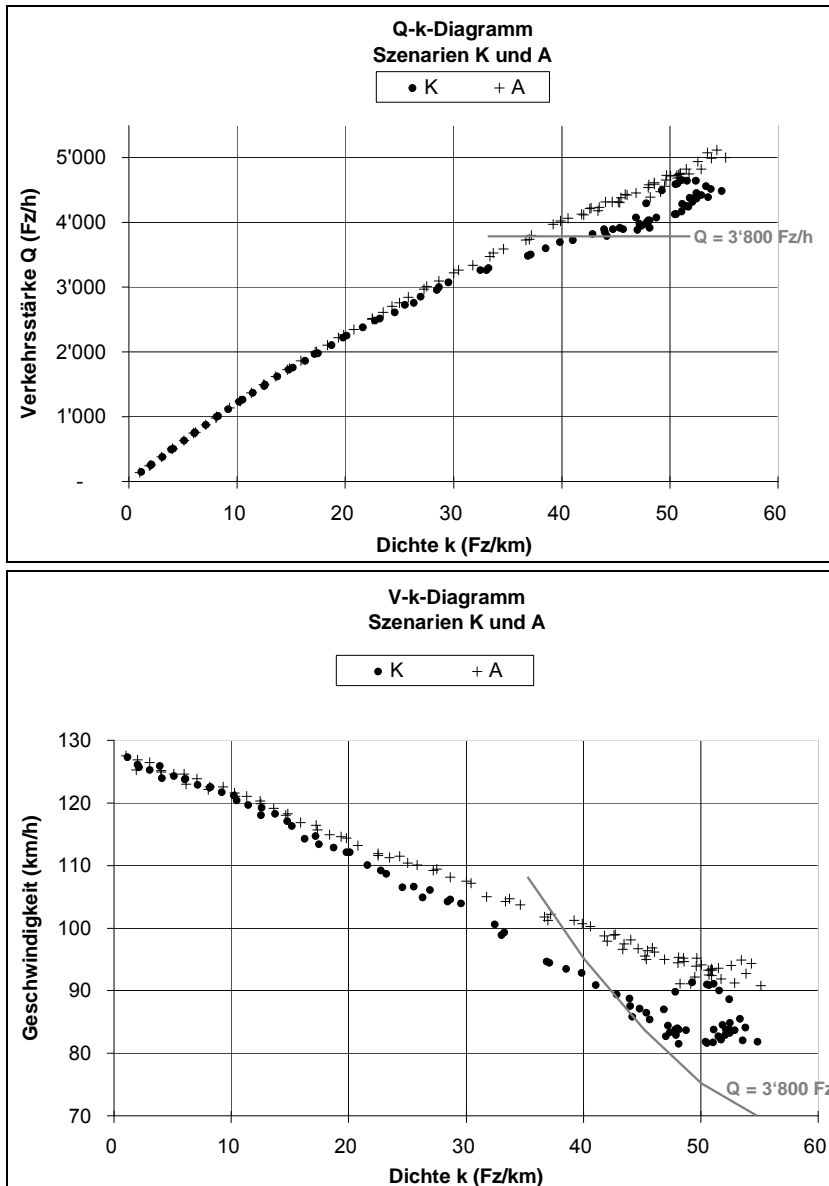


Abbildung 28: Alternative Darstellungen des Q-V-Diagramms für das Referenzszenario und Szenario A. Der Leistungsfähigkeitsgewinn in Szenario A führt dazu, dass bei gleicher Dichte eine höhere Verkehrsstärke und eine höhere Geschwindigkeit herrschen. Die Punkte oberhalb der Grenze  $Q = 3'800 \text{ Fz/h}$  befinden sich im instabilen bzw. künstlichen Bereich.

---

### 8.3 Interpretation der Ergebnisse

Szenario A bringt bei Auslastung über 50 % einen deutlichen Leistungsgewinn, indem die gleiche Verkehrsstärke bei grösserer Geschwindigkeit abgewickelt wird. Der Übergang vom Referenzszenario über Szenario E zu Szenario A zeigt, dass der Trend kontinuierlich ist, der mit höherer Reaktivität eine höhere Leistung bringt.

Bei der Definition der Szenarien ist die Annahme einer erhöhten Reaktivität damit begründet, dass das System Fahrer + Fahrzeug dank einem FAS schneller reagiert. Es ist hier wichtig zu bemerken, dass die Parameterverschiebung, die das Szenario definiert, nicht nur eine Verkürzung der Reaktionszeit<sup>16</sup> darstellt, sondern vor allem eine schnellere Wiederholung des Reaktionsvorgangs, also eine Erhöhung der Aufmerksamkeit. Zudem ist die Streuung der Reaktivität unter den Fahrzeugen reduziert, d.h. dass eine Synchronisierung der Reaktionen angenommen worden ist.

Demnach ist es in den Szenarien A und E die **schnelle und synchrone** Reaktion der Fahrzeuge, welche den Leistungsgewinn bewirkt.

Die schnelle und synchrone Reaktion der Fahrzeuge vermindert die Aufschaukelung der Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen. Sie mildert das starke Abbremsen einzelner Fahrzeuge und zögert somit das Auftreten von tiefen Geschwindigkeiten und einzelnen grossen Zeitlücken hinaus.

In den Szenarien B und C (gegenüber K) sowie F (gegenüber E) führen bei gleicher Reaktivität weder das sanftere Bremsen und Beschleunigen noch das ruppigere Bremsen und Beschleunigen zu einem Leistungsgewinn. Es sei daran erinnert, dass die Parameter in diesen Szenarien nur innerhalb der üblichen Minima/Maxima des Mikrosimulationsmodells verschoben wurden. Innerhalb dieses Wertebereichs erweist sich die mehr oder weniger grosse Ausschöpfung des dynamischen Spielraums der Fahrzeuge nicht als leistungsrelevant.

Szenario B bringt im strikte gebundenen Regime einen leichten Gewinn, der aber nicht reell ist, da es sich um den künstlichen Bereich des modellierten Verkehrsflusses handelt.

### 8.4 Weiterführende Fragen

Von welchen realen FAS kann die erhöhte Reaktivität erwartet werden?

Der Leistungsfähigkeitsgewinn in den modellierten Szenarien entsteht durch die Erhöhung der Reaktivität, und diese ist im Modell hauptsächlich für das Fahrzeugfolgeverhalten im dichten Verkehr bestimmend. In Wirklichkeit entspricht dies FAS, die die Längsdynamik im dichten Verkehr beeinflussen: sogenannte ACC-Systeme, Abstandsregeltempomaten u.ä. Daneben bestimmt die Reaktivität im Modell auch das Spurwechselverhalten. An zweiter Stelle können in Wirklichkeit also auch Spurwechselassistenten zum modellierten Verhalten beitragen.

Um beurteilen zu können, ob diese realen FAS in Art und Ausmass so wirken wie modelliert, müssen die Wirkungsmechanismen der FAS auf die Reaktivität des **Systems Fahrer+Fahrzeug**

---

<sup>16</sup> Dauer des Vorgangs Erkennen-Entscheiden-Handeln.

---

vertieft untersucht werden. Welche Wirkungsmechanismen erhöhen die Reaktivität, und welche Wirkungsmechanismen synchronisieren die Reaktionen? Fallen die Wirkungen quantitativ so stark aus, wie in den Szenarien angenommen?

An dieser Stelle kann nur vermutet werden, dass die modellierten Parameterveränderungen in Wirklichkeit Systeme voraussetzen, die in der normalen Fahrsituation aktiv sind, und den Fahrer in der normalen Fahrsituation entlasten; das heisst Systeme im Sinne einer Übernahme von Fahreraufgaben. Dies gilt insbesondere für die Synchronisierung der Reaktionen. Dabei steht ausser Frage, dass die Gesamtverantwortung für das Fahrzeug sowohl in normalen wie in kritischen Fahrsituationen gänzlich beim Fahrer liegen muss.

Lassen sich die Wirkungen der Synchronisierung und der Erhöhung der Reaktivität im Modell unterscheiden?

Die vorliegende Untersuchung ergibt einen Leistungsgewinn für die Szenarien A und E, denen eine veränderte Verteilung des Parameters Reaktivität zugrunde liegt.

Wie in Abbildung 23 ersichtlich, wurde die Verteilung sowohl zu kurzen Zeiten verschoben (d.h. der Mittelwert des Parameters nimmt ab) als auch verschmälert (d.h. die Streuung des Parameters nimmt ab). Die Verschiebung zu kurzen Zeiten stellt eine generelle Erhöhung der Aufmerksamkeit dar („schnelle Reaktion“), während die Verschmälerung eine generelle Anpassung der Fahrzeuge aneinander darstellt („synchrone Reaktion“).

Durch eine Verfeinerung der Szenarien in der Verlängerung der vorliegenden Untersuchung liesse sich abklären, ob diese beiden Effekte unterschieden werden können, und ob der Leistungsgewinn einem der beiden Effekte im Besonderen zuzuschreiben ist.

Wo liegt die Grenze des stabilen Bereichs in den Szenarien mit FAS-Parametrierung?

Bei der Diskussion des Referenzszenarios wurden aufgrund des Vergleichs mit realen Messdaten und der Visualisierung des modellierten Verkehrsflusses ein stabiler, ein instabiler und ein künstlicher Bereich unterschieden. In den Szenarien mit FAS weisen die Modellergebnisse (Visualisierung, Q-V-Diagramme) auf einen kontinuierlichen Übergang vom dichten Verkehr mit gewöhnlichen Verkehrsstärken ( $Q \approx 3'800$  Fz/h) zum strikte gebundenen Verkehr mit real nicht beobachteten Verkehrsstärken ( $Q$  bis  $5'500$  Fz/h). Es fehlen entsprechende Messdaten, aufgrund derer sich die tatsächliche Grenze des stabilen Bereichs festlegen liesse.

Es lässt sich die These aufstellen, dass sich die Grenze des stabilen Bereichs in den Szenarien A und E dank der schnellen und synchronen Reaktion der Fahrzeuge zu einem höheren  $Q$  verschiebt. Die Ausweitung des stabilen Bereichs ist plausibel, weil in Szenario A der Abfall der mittleren Geschwindigkeit und der Dichte bei Annäherung an die Norm-Leistungsfähigkeit ( $Q = 3'800$  Fz/h) ausbleibt, der im Referenzszenario zu beobachten ist und dem Verkehrszusammenbruch vorausgeht.

---

In diesem Zusammenhang ist die Modellanwendung aus dem Forschungsprojekt VSS 2000/337 erwähnenswert, wo der Verkehrszusammenbruch mittels Mikrosimulation untersucht wurde. In dieser Forschung wurde der Verkehrszusammenbruch im Modell durch eine künstliche Unaufmerksamkeit erzeugt, d.h. durch einen Anteil von Fahrzeugen mit sehr schlechter Reaktivität.

Dies weist darauf hin, dass in Mikrosimulationsmodellen ein breiterer Zusammenhang zwischen der (In-)Homogenität der Reaktivität der Fahrzeuge (von breiter Streuung der Reaktivität bis zu „synchronem“ Verhalten) und spontanem Verkehrszusammenbruch bestehen könnte.

Wie wird sich der wachsende Ausrüstungsgrad mit FAS auswirken?

Der Ausrüstungsgrad mit FAS ist in den Szenarien der vorliegenden Untersuchung nicht explizit abgebildet. Es wurde darauf verzichtet, den Fahrzeugpark im Modell in die Klassen „ausgerüstet“ und „nicht ausgerüstet“ zu unterteilen, und jeder Klasse spezielle Parameter zuzuweisen. Ein solches Vorgehen würde nicht nur voraussetzen, dass die Systeme verschiedener Hersteller sich gleich verhalten, sondern auch dass der menschliche Faktor im Verhalten des Elements Fahrer + Fahrzeug dann vernachlässigt werden könnte.

Vielmehr stellen die Szenarien Trends dar, die durch die zunehmende Verbreitung von FAS begünstigt werden könnten. Vom Standpunkt der vorliegenden Untersuchung ist demnach die Frage, welche Trends bezüglich des dynamischen Fahrverhaltens sich aus der wachsenden Verbreitung aller in Kapitel 3.1 besprochenen Typen von FAS über den gesamten Fahrzeugpark ergeben. Für die Quantifizierung dieser Trends fehlen zurzeit die Grundlagen.

Wie wirkt sich eine tiefere Richtgeschwindigkeit auf die Resultate aus?

In der vorliegenden Untersuchung galt für alle Szenarien 120 km/h als zulässige Höchstgeschwindigkeit.

Aus der Erfahrung mit Verkehrsleitsystemen ist bekannt, dass sich der Verkehrszusammenbruch bei Verkehrsstärken im Bereich der Leistungsgrenze oft hinauszögern lässt, indem die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf 100 bzw. 80 km/h heruntersetzt wird. Durch die Geschwindigkeitsreduktion ergibt sich eine Harmonisierung des Verkehrsflusses.

Die Geschwindigkeitsreduktion mittels VLS und die schnellere und synchrone Reaktion mittels FAS haben demnach ähnlich gelagerte Auswirkungen. Zur Abklärung des Zusammenhangs zwischen diesen beiden Wirkungsmechanismen könnte es in der Verlängerung der vorliegenden Untersuchung aufschlussreich sein, kombinierte Szenarien (FAS und Höchstgeschwindigkeit 80 km/h) zu untersuchen.

---

## 9 Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Forschungsarbeit ist der Einfluss von Fahrerassistenzsystemen (FAS) auf die Leistungsfähigkeit von Strassennetzen untersucht worden. Die Forschung umfasst eine Literaturrecherche und eine Modellanwendung.

Die Literaturrecherche hat gezeigt, dass viele unterschiedliche Systeme zur Unterstützung der Fahrer vorhanden oder in Entwicklung sind. Die heute bekannten Fahrerassistenzsysteme zielen vor allem auf Sicherheit und Komfort.

In Anbetracht des technischen Fortschrittes und der immer feineren Differenzierung der Fahrerassistenzsysteme auf bestimmte Verkehrs- und Fahrsituationen hat sich eine neue Zielsetzung herausgeschält, die Verkehrsleistung mit Hilfe spezieller Fahrerassistenzsysteme zu erhöhen. Das deutsche Forschungsprojekt INVENT [23] bezeichnet sie als Verkehrsleistungsassistenzsysteme. Für unterschiedliche Verkehrssituationen gibt es da entsprechend unterschiedliche Assistenzsysteme. Zum Beispiel postuliert INVENT unter anderen ein Fahrerassistenzsystem für das zügige Fahren im Engstellenbereich und eines für das rechtzeitige und kräftige Beschleunigen bei der Stauausfahrt. Solche Systeme müssen die spezielle Verkehrssituation im Umfeld des Fahrzeugs sehr genau kennen, um wirkungsvoll zu sein. Noch stärker als andere Fahrerassistenzsysteme bedürfen sie sehr detaillierter Informationen über das Umfeld des Fahrzeugs, die nicht von den fahrzeugeigenen Sensoren ermittelt werden können. Dies führt zu den Themenkreisen der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation, Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation und kooperativen Systeme, die zurzeit noch intensiv erforscht werden.

Die Literaturlauswertung hat zahlreiche Arbeiten zutage gefördert, in denen ausgewählte Fahrerassistenzsysteme (oft ACC-Systeme) mit Hilfe von gezielten Veränderungen der Parameter im Fahrer-Fahrzeug-Modell abgebildet worden sind, um damit Aussagen über deren Einfluss auf die Leistungsfähigkeit und den Verkehrsablauf zu ermöglichen. Dabei besteht die methodische Schwierigkeit, dass zur Abbildung der Fahrerassistenzsysteme mit Modellen Annahmen bezüglich der Parameter nötig sind, die weder qualitativ noch quantitativ abgestützt sind. Ausserdem sind die Ergebnisse verschiedener Arbeiten oftmals nicht vergleichbar, da zur Abbildung der FAS-Funktionalitäten verschiedene Algorithmen sowie verschiedenen Fahrermodelle verwendet worden sind.

Die Einflüsse von Fahrerassistenzsystemen auf die Verkehrsleistung sind folglich, auf Grund der Literaturlauswertung, noch unklar. So lässt sich beispielweise dann eine Kapazitätserhöhung nachweisen, wenn der Fahrzeugabstand stark reduziert wird. Wird jedoch mit vorsichtigen Annahmen gearbeitet, kann es sowohl zu kapazitätserhöhenden als auch –vermindernden Effekten kommen. Trotz dieser Differenzen wird oft gefolgert, dass mit Fahrerassistenzsystemen der Verkehrsfluss stabiler wird, da der Verkehrszusammenbruch bei hoher Belastung hinausgezögert wird. Ausserdem ist eine Homogenisierung des Verkehrsablaufes aufgrund kleinerer Geschwindigkeitsunterschiede bei steigender Ausstattungsrate festgestellt worden.

Bei vielen der vorhandenen Studien ist auch zu bedenken, dass sie unter Mitwirkung von FAS-Hersteller entstanden sind, was einen gewissen Effekt auf die Beurteilung der Ergebnisse gehabt haben kann. Zurückhaltend interpretiert, belegen die analysierten Resultate weder eine eindeutige Tendenz zur Leistungssteigerung, noch eine solche zur Leistungsverminderung.

In der hier durchgeführten Modellanwendung ist der Verkehrsfluss auf einer Hochleistungsstrasse in einer Mikrosimulation dargestellt worden. Mittels heuristischer Veränderungen des Fahrzeugverhaltens wurde auszuloten versucht, welche Änderungen des Fahrverhaltens einen spürbaren Einfluss auf die Leistungsfähigkeit von HLS haben.

Es ergibt sich im Modell, dass eine **schnellere und synchrone Reaktion** der Fahrzeuge auf Geschwindigkeitsveränderungen bei mittlerem und starkem Verkehrsaufkommen einen Leistungsgewinn bewirkt. Die schnelle und synchrone Reaktion vermindert die Aufschaukelung der Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen. Sie mildert das starke Abbremsen einzelner Fahrzeuge und zögert somit das Auftreten von tiefen Geschwindigkeiten und einzelnen grossen Zeitlücken hinaus. Die schnellere und synchrone Reaktion wird durch ein FAS bewirkt, indem es die Reaktivität des Systems Fahrer + Fahrzeug erhöht. Dies kommt einem **aufmerksameren Fahren** gleich.

Andere Verhaltensänderungen, die einem sanfteren Fahren oder einem ruppigeren Fahren gleichkommen, erweisen sich als nicht leistungsrelevant.

Im Bereich der Leistungsgrenze lässt sich mit dem Mikrosimulationsmodell ein strikte gebundener Verkehrszustand mit sehr hohen Verkehrsstärken darstellen, die in Wirklichkeit nur ansatzweise über kurze Zeitintervalle beobachtet werden können.

Die Ergebnisse der Modellanwendung sind mit Vorsicht zu beurteilen, da die methodischen Schwierigkeiten, die in der Literaturlauswertung erwähnt worden sind, auch hier beachtet werden müssen:

- Es fehlen qualitative und quantitative Kenntnisse über das menschliche Fahrverhalten in Fahrzeugen, die mit FAS ausgerüstet sind.<sup>17</sup>
- Es ergibt sich noch kein einheitliches Bild über die Wirkungsweise der heute erhältlichen FAS (ACC-Systeme, Abstandsregeltempomaten, ...). Die Systeme sind noch neu und unterschiedlich parametrisiert.
- Die genaue Nachbildung des Fahrer- und Fahrzeugverhaltens im Mikrosimulationsmodell (mit und ohne FAS) ist schwierig, da die Regelgrössen eines FAS nicht direkt mit den Parametern der „Bewegungsgesetze“ eines Mikrosimulationsmodells zur Deckung gebracht werden können.

Es ist zu hoffen, dass im Rahmen der Forschungs- und Entwicklungsbemühungen zum Thema FAS in den nächsten Jahren vermehrt experimentelle Daten zum dynamischen Fahrverhalten in Gegenwart verschiedener FAS und in verschiedenen Fahrsituationen gesammelt und zugänglich werden. Erst wenn sich die Richtigkeit des modellierten Verhaltens der Einzelfahrzeuge (mit und ohne FAS) anhand experimenteller Daten erhärten lässt, können aufgrund der Simulation sichere Aussagen über die künftigen Auswirkungen der FAS auf den gesamten Verkehrsfluss gemacht werden.

Im Bereich der Leistungsgrenze weisen die Modellergebnisse darauf hin<sup>18</sup>, dass der spontane Verkehrszusammenbruch in der Mikrosimulation mit der Streuung der Reaktionszeiten in Zusammenhang steht. Es könnte sich daraus ein verfolgenswerter Ansatz zur vertieften Untersuchung des spontanen Verkehrszusammenbruchs mittels Mikrosimulation ergeben.

## Aussichten

<sup>17</sup> Im Rahmen des COST-Projekts IVIS mit Beteiligung der ETH Zürich (IVT) werden solche Messungen im Bezug auf sicherheitsrelevante FAS angestrebt.

<sup>18</sup> vgl. VSS 2000/337.

---

Die Verbreitung der FAS wird rasch zunehmen. Man kann diesen Systemen offen und fördernd gegenüberstehen, da sie sowohl der Sicherheit wie der Leistungsfähigkeit nützen werden.

Die positive Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit wird erst spürbar werden, wenn die Systeme mit zunehmender Verbreitung und Reife eine grosse Funktionssicherheit und eine gewisse Einheitlichkeit der Wirkungsweise aufweisen werden. Der Verkehrsfluss wird berechenbarer, und Sicherheitszuschläge bei ACC-Systemen, die heute berechtigterweise gefordert werden können, können abgebaut werden.

Überlegungen zur Kompensation der Effekte („je aufmerksamer das Fahrzeug, desto unaufmerksamer der Fahrer“) gelten für den Aspekt der Verkehrsleistung ebenso wie für den Aspekt der Verkehrssicherheit. Die Kompensation wird den Gewinn nicht auf Null reduzieren. Wichtig ist in diesem Zusammenhang auch, dass die Fahrer richtig verstehen, wie das FAS funktioniert. Nur wer das System richtig versteht, beurteilt richtig, in welchen Situationen die Automatismen des Systems tauglich sind, und in welchen Situationen das System übersteuert werden muss.

Jeder Sicherheitsgewinn durch FAS bringt auch einen indirekten Leistungsgewinn, indem durch die Verminderung der Unfälle die unfallbedingten vorübergehenden Fahrbahnsperrungen abnehmen. Dieser Effekt wurde in der vorliegenden Forschungsarbeit nicht näher untersucht.

Die Normierung befasst sich zurzeit auf europäischer Ebene hauptsächlich mit den HMI-Aspekten der Fahrerassistenzsysteme. Dabei ist der schweizerische Einfluss gering. Die internationale Normierung hätte sicher auch eine Rolle zu spielen, wenn die Wirkungsweise der FAS im Interesse der Leistungsfähigkeit eine gewisse Vereinheitlichung erfahren sollte. Eine solche Bestrebung kann angesichts des weiteren Entwicklungspotenzials der Systeme heute erst am Anfang stehen. Aus Schweizer Sicht ist zu empfehlen, die Entwicklung der „Verkehrsleistungsassistentz“ (und ihrer technologischen Aspekte: Fahrzeug-Fahrzeug- und Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation) in den nächsten Jahren aufmerksam weiterzuverfolgen. Anforderungen im Rahmen der nationalen Fahrzeugzulassung sind frühestens dann in Betracht zu ziehen, wenn sich Prüfkriterien und Messverfahren auf internationale Normen abstützen lassen. Andernfalls würden sie hohe Kosten nach sich ziehen, die Verbreitung der Systeme behindern, und das Risiko einer Minderung der Gesamtwirkung mit sich bringen, wenn in- und ausländische Fahrzeuge in derselben Situation nach unterschiedlichen Regeln reagieren würden.

Der vorliegende Bericht bietet verschiedene Anknüpfungspunkte für weiterführende Untersuchungen, die zum besseren Verständnis der Auswirkungen von FAS beitragen würden. Dabei sind neben verkehrstechnischen Aspekten auch psychologische und regelungstechnische Aspekte des Systems Fahrer + Fahrzeug zu beleuchten. Es könnte lohnend sein, weiterführende Untersuchungen zu diesem Thema interdisziplinär durchzuführen.

---

## 10 Quellenverzeichnis

- [1] Alkim P., Schuurman H.: *Effects of External Cruise Control and Co-operative Following on Highways: an Analysis with the MIXIC Traffic Simulation Model*, Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2000, Dearborn (USA), 3. – 5. Oktober 2000.
- [2] Aschenbrenner, K. M., Biehl, B. & Wurm, G. W.: *Mehr Verkehrssicherheit durch bessere Technik? Felduntersuchungen zur Risikokompensation am Beispiel des Antiblockiersystems (ABS)*, Abschlussbericht an die Bundesanstalt für Strassenwesen zum Forschungsprojekt 8323: Einfluss der Risikokompensation auf die Wirkung von Sicherheitsmassnahmen. Mannheim, 1982
- [3] Baker M., Van Aerde M.: Evaluation of Transportation impacts arising from ACC system Deployment, IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, Boston, November, 1997.
- [4] Bischofberger N. G.: Zur Leistungsfähigkeit in Verkehrssystemen, Schriftenreihe des IVT Nr. 113, Zürich, Juli 1997.
- [5] Bose A., Ioannou P.: Mixed manual/semi-automated traffic: a macroscopic analysis, Transportation Research, Part C 11, SS. 439 – 462, 2003.
- [6] Bose A., Ioannou P.: Analysis of Traffic Flow With Mixed Manual and Semiautomated Vehicles, IEEE Transactions on intelligent Transportation Systems, Vol. 4, No. 4, SS. 173 – 188, Dezember 2003.
- [7] Brilon W., Grossman M., Blanke H.: Verfahren zur Berechnung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufes auf Strassen, Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 669, Bonn, 1993.
- [8] Brilon W., Regler M., Geistefeldt J.: Zufallscharakter der Kapazität von Autobahnen und praktische Konsequenzen, Strassenverkehrstechnik Heft 3 und Heft 4, 2005.
- [9] Broqua F., Lerner G., Mauro V., Morello S.: *Cooperative driving: basic concepts and first assessment of intelligent cruise control strategies*, Proceedings of DRIVE Conference, ERTICO, Bruxelles, 1991.
- [10] Broucke M., Varaya P.: A Theory of Traffic Flow in Automated Highway Systems, Transportation Research, Vol. 4, No. 4, SS. 181 – 210, 1996.
- [11] Darbha S., Rajagopal K.R.: Intelligent cruise control systems and traffic flow stability, Transportation Research Part C7, SS. 329 – 352, 1999.
- [12] Davis L.C.: Effect of adaptive cruise control systems on traffic flow, Phys. Rev. E 69, 2004.
- [13] Davis L.C.: Effect of adaptive cruise control systems on mixed traffic flow near an on-ramp, Phys. Rev. E 69, 2005.
- [14] De Bruin D., Kroon J., van Klaveren R., Nelisse M.: Design and Test of a Cooperative Adaptive Cruise Control System, Intelligent Vehicles Symposium, Parma, 14. – 17 Juni 2004.

- 
- [15] Donges , E: Ein regelungstechnisches Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhalten im Kraftfahrzeugen, Zeitschrift für Verkehrssicherheit 24, TÜV-Verlag Köln, 1978.
- [16] Ehmanns D., Wallentowitz H., Gelau C., Niklisch F.: Zukünftige Entwicklungen von Fahrerassistenzsystemen und Methoden zu deren Bewertung, 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentchnik, 2000.
- [17] Factum Chaloupka & Risser OHG: Verkehrstelematik – der Mensch und die Maschine, Überblick über Verkehrstelematiksysteme, psychologische und sozialwissenschaftliche Überlegungen zum Thema Verkehr und Telematik, Wien, 2004.
- [18] FGSV: Begriffsbestimmungen, Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb, FGSV e.V., Köln, 2000
- [19] Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen: Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen (HBS 2001), Köln, 2001
- [20] Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH: Forschungsinitiative INVENT, Schlussbericht, Teilprojekt VRA – Verkehrliche Wirkung, Rechtsfragen, Akzeptanz, Aachen, März 2006.
- [21] Hochstädter A.; Ludmann J.: Stabilität von Fahrzeugkolonnen und verkehrliche Auswirkungen der Abstandsregelung, Forschungsgesellschaft Kraftwesen mbH Aachen, Vortrag Haus der Technik, Essen, Dezember 1999
- [22] Huang S., Ren W.: Autonomous intelligent vehicle and its performance in automatet traffic systems, International Journal of Control, Vol. 72, No. 18, SS. 1665 – 1668, 1999.
- [23] INVENT: Ergebnisbericht INVENT „erfahren“ – mobil mit 8 Sinnen, Projektlaufzeit 2001 – 2005, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2005.
- [24] Ioannou P., Chien C.: Autonomous Intelligent Cruise Control, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 42, No. 4, SS. 657 – 672, November 1993.
- [25] Ioannou P., Xu Z., Eckert S., Clemons D., Sieja T.: Intelligent Cruise Control: Theory an Experiment, Proceedings of the 32nd on Decision and Control, San Antoni (Texas, December 1993.
- [26] Ioannou P., Stefanovic M.: Evaluation of ACC Vehicles in Mixed Traffic: Lane Change Effects ans Sensitivity Analysis, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 6, No. 1, März 2005.
- [27] Jenni + Gottardi AG: Systeme für die Fahrzeugführerunterstützung zur Erhöhung der Verkehrssicherheit, Wirksamkeit und Eignung, Forschungsauftrag VSS 1999/307 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleuten (VSS), Bern, Februar 2005.
- [28] Jenni + Gottardi AG, SNZ Ingenieure und Planer AG: Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit auf Autobahnen, Forschungsauftrag VSS 2000/337 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleuten (VSS), Bern, Oktober 2004.

- 
- [29] Kerner B. S.: *Control of spacial-temporal congested traffic patterns at highway bottlenecks*, cond-mat/0309017, e-print im elektronischen Archiv <http://arxiv.org/abs/co-nd-mat/0309017>, 2003
- [30] Kesting A., Treiber M., Schönhof M., Kranke F., Helbing D.: Jam-avoiding adaptive cruise control (ACC) and its impact on traffic dynamics, *Traffic and Granular Flow 2005*, Vortrag, Berlin 2005
- [31] Kun L., Ioannou P.: Modeling of Traffic Flow of Automated Vehicles, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation systems*, Vol. 5, No. 2, Juni 2004.
- [32] Li P., Shrivastava A.: Traffic flow stability by constant time headway policy for adaptive cruise control vehicles, *Transportation research Part C* 10, SS. 275 – 301, 2002.
- [33] Legat W.: PROMETHEUS – aus der Sicht der europäischen Verkehrspolitik, VDI-Gesellschaft Fahrzeugtechnik: Elektronik im Kraftfahrzeug; Tagung Baden-Baden, 8. und 9. September 1988, VDI-Bericht 687, SS. 87-96, Düsseldorf, 1988.
- [34] Ma X., Andréasson I.: *Predicting the effect of various ISA penetration grades on pedestrian safety by pedestrian crossing*, Center for Traffic Simulation Research, Department of Transportation and Logistics, Royal Institute of Technology, Sweden, 2005
- [35] Marsden G., McDonald M., Brackstone M.: Towards an understanding of adaptive cruise control, *Transportation Research, Part C*, SS 33 – 51, 2001.
- [36] Minderhoud M., Bovy P.: Impact of intelligent cruise control strategies and equipment rate on road capacity, *Proceedings of the Fifth Annual World Congress on ITS*, Korea, 1998.
- [37] Minderhoud M., Bovy P.: Impact of intelligent cruise control on motorway capacity, *78th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, 1999.
- [38] Minderhoud M., Hansen I.: Simulation Study After Traffic Flow Quality near Toll-Lane Merging Areas, *IEEE 5th International Conference in Intelligent Transportation Systems*, Singapore, 3. – 6. September 2002.
- [39] Minderhoud M., Zuurbier F.: Empirical Data Behaviour of Stop-and-Go Traffic, *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, University of Parma, 14 – 17 Juni 2004.
- [40] Mühlethaler F., Arend M., Axhausen K., Martens S., Steierwald M.: *Das vernetzte Fahrzeug - Verkehrstelematik für Strasse und Schiene*, TA-DT 33/2003, Bern, 2003
- [41] Naab K.: *Automatisierung bei der Fahrzeugführung im Strassenverkehr*, *Automatisierungstechnik* 48, 2000.
- [42] Nöcker G., Metzger K., Kerner B.: Vorausschauende Fahrerassistenzsysteme, *3rd Walting workshop on Driver Assistance Systems*, Walting (d), 6 – 8- April 2005.
- [43] Rajamani R., Levinson D., Michalopoulos P., Wang J., Santhanakrishnan K., Zou X.: *Adaptive Cruise Control System Design and Its Impact on Traffic Flow*; Department of Civil Engineering University of Minnesota, *Intelligent Transportation Systems Institute*, April 2005.

- 
- [44] Regler M.: Verkehrsablauf und Kapazität auf Autobahnen, Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswesen Ruhr-Universität Bochum, Heft 28, Bochum, 2004.
- [45] Reichart G.: Einsatz der Telekommunikation für fahrzeugunterstützende Systeme, In: G. Siegle (Hrsg.) Telematik im Verkehr, SS. 193 - 206, R. v. Decker's, Heidelberg, 1996.
- [46] Risser R., Petica S.: SAVE System for effective Assessment fo the driver Project state and Vehicle control in Emergency situations, Transport Telematics No: TR 1047, 1998.
- [47] Sagberg, F. Fosser, S. & Saetermo, I.F. (1997). An investigation of behavioral adaption to airbags and antilock brakes among taxi drivers. *Accident Analysis and Prevention*, 29, 293-302.
- [48] Schick P: Einfluss von Streckenbeeinflussungsanlagen auf die Kapazität von Autobahnabschnitte sowie auf die Stabilität des Verkehrsflusses, Universität Stuttgart, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Juni 2003.
- [49] SN 640 017a, Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit, herausgegeben von der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS), Zürich, Dezember 1998.
- [50] SN 640 018a, Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit, Freie Strecke auf Autobahnen, herausgegeben von der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS), Zürich, August 2006.
- [51] SINTEF, TRG, STRATEG: *STARDUST, Deliverable 10, Evaluation of Scenarios to Deployment of ADAS/AVG Systems in Urban Contexts*, Working Package 80, 2004
- [52] Suzuki H., Nakatsuji T.: Effect of adaptive cruise control (ACC) on traffic throughput: numerical example on actual freeway corridor, *JSAE Review* 24, SS. 403 – 410, 2003.
- [53] Swaroop D., Rajagopal K.R.: Intelligent cruise control systems and traffic flow stability, *Transportation Research, Part C7*, SS. 329 – 352, 1999.
- [54] Swaroop D., Rajagopal K.R.: A review of Constant Time Headway Policy for Automatic Vehicle Following, *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings*, Oakland (USA) 25. – 29. August 2001.
- [55] Tampère C., van Arem B.: Traffic flow theory and its applications in automated vehicle control: a review, *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings*, Oakland (USA), 25 - 29. August 2001.
- [56] Transportation Research Board: *Highway Capacity Manual (HCM) 2000*, Washington D. C. 2000
- [57] Treiber M., Helbing D.: Microsimulations of Freeway Traffic Including Control Measures, *Automatisierungstechnik*, Vol. 49, SS. 478 – 484, 2001.
- [58] Treiber M., Kesting A., Helbing D.: Understanding widely scattered traffic flow, the capacity drop, platoons, and time-collision as effects of variance-driven time gaps, *Phys. Rev. E* 74, 016123, 2006.

- 
- [59] van Arem B., Hogema J., Smulders S.: The impact of autonomous intelligent cruise control on traffic flow, Proceedings of the Third Annual World Congress on ITS Orlando, 1996.
- [60] van Arem B., van Driel C., Visser R.: The impact of Cooperative Adaptive Cruise Control on Traffic-Flow Characteristic, IEE Transactions on intelligent transportation systems, Vol. 1, No. 4, SS. 429 – 436, December 2006.
- [61] VESIPO: Erarbeitung der Grundlagen für eine Strassenverkehrssicherheitspolitik des Bundes, Schlussbericht, Forschungsauftrag ASTRA 200/477 auf Antrag des ASTRA, Bern, Mai, 2002.
- [62] Volkswagen AG: Forschungsinitiative INVENT, Schlussbericht VM 2010, Wolfsburg, 28. Februar 2006.
- [63] Wallentowitz H., Ehmanns D., Nuenzig D., Weilkes M.: Sicherheitsanalyse der Systeme zum Automatischen Fahren, Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen, heft F35, Bergisch Gladbach, Mai 2001.
- [64] Wang J., Rajamani R.: Adaptive Cruise Control System Design and Its Impact on Highway Traffic Flow, Proceeding of the American Control Conference, Anchorage, 8 – 10 Mai 2002.
- [65] Wang J., Rajamani R.: Should Adaptive Cruise-Control Systems be Designed to Maintain a Constant Gap Between Vehicles?, IEEE Transaction on vehicular technology, Vol. 53, No. 5, September 2004.
- [66] Zapp K.: Fahrerassistenzsysteme: Was gibt es, was kommt?: internationales Strassenverkehrswesen, Nr. 53, SS. 155 – 156, 4/2001.
- [67] Zou W., Levinson D.: Simulation and Analysis of Mixed adaptive Cruise Control / Manual Traffic, Transportation Research Board Conference, Washington DC (Session 514), 12. – 16. Januar 2003.
- [68] Zwaneveld P.J., van Arem, B.: Traffic effects of Automated Vehicle Guidance. A literature survey, Report Inro/VVG 1997-17, TNO Inro, Delft, Dezember 1997.
- [69] AIMSUN 5.1 Microsimulator User's Manual Version 5.1.2, TSS-Transport Simulation Systems, October 2006
- [70] Auto Motor und Sport, 24/2006
- [71] K. Dietrich, M. Rotach, E. Boppert, Strassenprojektierung, IVT der ETH Zürich, 1998

---

### **Webseiten (URL's)**

- [72] <http://www.bmw.de>
- [73] <http://www.bosch.com>
- [74] <http://www.cartalk2000.net>
- [75] <http://www.citroen.de>
- [76] <http://cordis.europa.eu>
- [77] <http://www.cost.esf.org>
- [78] <http://www.daimlerchrysler.com>
- [79] <http://www.eimpact.info>
- [80] <http://www.eureka.dom.de>
- [81] <http://www.hella.com>
- [82] <http://www.invent-online.de>
- [83] <http://www.man-mn.com>
- [84] <http://www.mercedes-benz.de>
- [85] <http://www.nissan.de>
- [86] <http://www.pelops.de>
- [87] <http://www.siemensvdo.de>
- [88] <http://www.valeoraytheon.com>
- [89] <http://www.volvocars.de>

---

## 11 Abkürzungen

ABA	Active Brake Assist
ABC	Active Body Control
ABS	Antiblockier-System
ACC	Adaptive Cruise Control
AHS	Automated Highway Systems
ANB	Automatische Notbremsung
APROSYS	Advanced Protection Systems
APSN	Network of Excellence on Advanced Passive Safety
ARE	Bundesamt für Entwicklung
ASR	Antriebsschlupfregelung
BA	Bremsassistent
CACC	Cooperative Adaptive Cruise Control
COST	European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research
DARWIN	Driving in Adverse Weather and visibility conditions
DRIVE	Dedicated Road Infrastructure for Vehicles in Europe
EDS	Elektronische Differenzialsperre
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
EUREKA	European Research Coordination Agency
FAS	Fahrerassistenzsystem
HCM	Highway-Capacity-Manual
INVENT	Intelligenter Verkehr und nutzgerechte Technik
IT	Informationstechnologien
ISA	Intelligent Speed Adaption
IST	Intelligent Transportation System
IVIS	In-Vehicle Information System
k	Verkehrsdichte, Masseinheit Fahrzeug pro Kilometer (Fz/km)
LF	Leistungsfähigkeit

---

LW	Lastwagen
LOS	Level-of-service
MIXIC	Microscopic Modell für Simulation of Intelligent Cruise Control
MOTIV	Mobilität und Transport im Verkehr
OBD	On-Board-Diagnose
PELOPS	Programmsystem zur Entwicklung Längsdynamischer mikroskopischer Verkehrsprozesse in Systemrelevanter Umgebung
PREVENT	Preventive Safety
PROMETHEUS	Programme for a european Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety
PW	Personenwagen
Q	Verkehrsstärke, Masseinheit Fahrzeug pro Stunde (Fz/h)
STA	Stauassistent
TRAINER	System for driver Training and Assesment using Interactive Evaluationtools and Reliable methodologies
TSR	Traffic Sign Recognition
V	Geschwindigkeit, Masseinheit km/h
VLA	Verkehrsleistungsassistent
VLS	Verkehrsleitsystem

## Anhang A Kalibrierungsdaten

Zur Plausibilisierung des modellierten Verkehrsablaufs im Referenzzustand werden Vergleichsdaten der AVZ-Messstelle Gunzgen A1 des Bundesamts für Strassen beigezogen. Die folgende Abbildung zeigt ein typisches Q-V-Diagramm aus dem Jahr 2005.

Diese Messstelle eignet sich als Vergleich für die vorliegende Modellanwendung, da sie auf einem permanent hoch belasteten Überlandsquerschnitt ausserhalb des Einflussbereichs von Ein- und Ausfahrten liegt, auf dem der Verkehr sich häufig im Bereich der Leistungsgrenze bewegt, so dass für alle Bereiche des Q-V-Diagramms genügend Daten vorhanden sind.

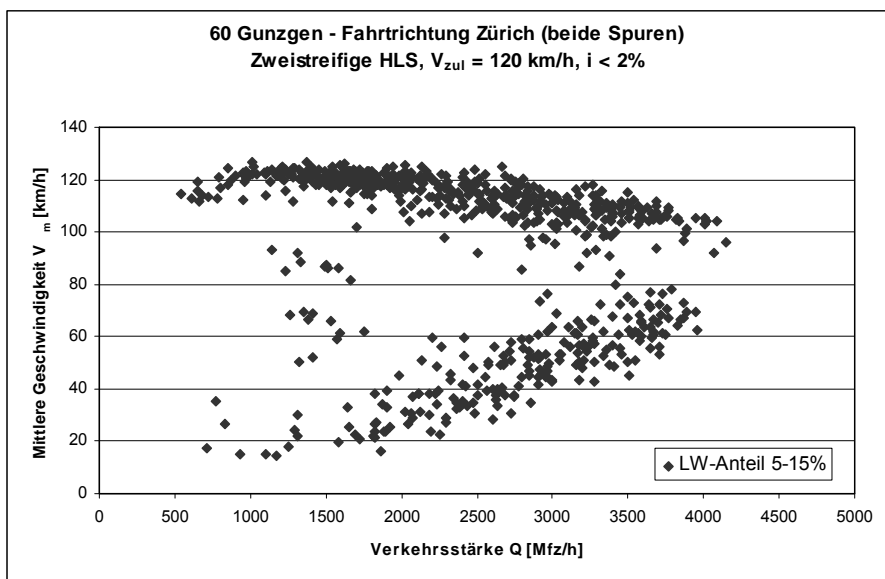


Abbildung 29: Q-V-Diagramm von der AVZ-Messstelle Gunzgen A1. Jeder Punkt entspricht einem 5-Minuten-Intervall.