

Das Fahrermodell im Verkehrsflusssimulationsprogramm PELOPS – Modellierung und Applikationsmöglichkeiten

F. Christen

Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen

Q. Huang

Institut für Kraftfahrwesen Aachen, RWTH Aachen

In diesem Beitrag wird zunächst das Verkehrssimulationsprogramms PELOPS vorgestellt. Dabei wird detailliert auf das in PELOPS enthaltene Fahrermodell eingegangen. Das Modell ist in der Lage, sowohl einspuriges Folgeverhalten, als auch das Fahrverhalten beispielsweise bei Spurwechselmanövern realistisch abzubilden. Nach der Beschreibung des Modells wird die Methodik zur Entwicklung und Implementierung neuer Fahrermodellfunktionen erläutert. Hierbei werden die Vor- und Nachteile bei der Erfassung des Fahrerverhaltens anhand von Induktionsschleifen, Videodektionsanlagen, Fahrsimulatoren oder Messfahrzeugen beschrieben. Abschließend umreißt der Beitrag zwei Applikationsmöglichkeiten des Fahrermodells: Zum einen den Einsatz des Fahrermodells im Fahrsimulator und zum anderen die Integration des Fahrermodells als Reglers im Fahrzeug.

1 Das Verkehrsflusssimulationsprogramm PELOPS

Das mikroskopische, fahrzeugorientierte Verkehrsflusssimulationsprogramm PELOPS (Programm zur Entwicklung längsdynamischer, mikroskopischer Prozesse in systemrelevanter Umgebung) wurde an der Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen (fka) in Zusammenarbeit mit der BMW AG entwickelt (Ludmann, 1989 und Diekamp 1995). Es wird heute von der fka vertrieben und gepflegt.

Das Konzept von PELOPS besteht in der Verknüpfung detaillierter submikroskopischer Fahrzeugmodelle mit mikroskopischen verkehrstechnischen Modellen, die sowohl eine Untersuchung des längsdynamischen Fahrzeugverhaltens als auch eine Analyse des Verkehrsablaufs ermöglichen. Im Gegensatz zu klassischen in der Automobilindustrie angewandten Simulationswerkzeugen, die in der Regel nur ein Teilsystem oder ein einzelnes isoliertes Gesamtfahrzeug abbilden, verfolgt der Ansatz in PELOPS daher die Simulation der drei wesentlichen Elemente des Verkehrs - Strecke/Umwelt, Fahrer und Fahrzeug - mit ihren Wechselwirkungen. In einer modularen Programmstruktur werden die genannten Elemente modelliert und durch Schnittstellen abgegrenzt (vgl. Bild 1).

Das Umweltmodell erlaubt bei Bedarf eine detaillierte Beschreibung der Einflüsse einer stationären Verkehrsumgebung. Sowohl der Verlauf der Straße in horizontaler und vertikaler Richtung über Radien und Übergänge, als auch die Anzahl und die Breite der Spuren wird angegeben. Zusätzlich zu diesen geometrischen Daten können Verkehrszeichen sowie Um-

weltbedingungen über Parameter wie Nässe, Glätte etc. vorgegeben werden. Die aktuellen Verkehrsbedingungen für ein Fahrzeug ergeben sich dann aus der Anzahl der umgebenden Fahrzeuge sowie deren Abständen und Geschwindigkeiten. Um bestimmte Verhaltensweisen im Verkehr zu provozieren oder vorgegebene Fahrzyklen nachzufahren, können einzelnen Fahrer-Fahrzeug-Einheiten wahlweise auch bestimmte Geschwindigkeitsprofile vorgegeben werden.

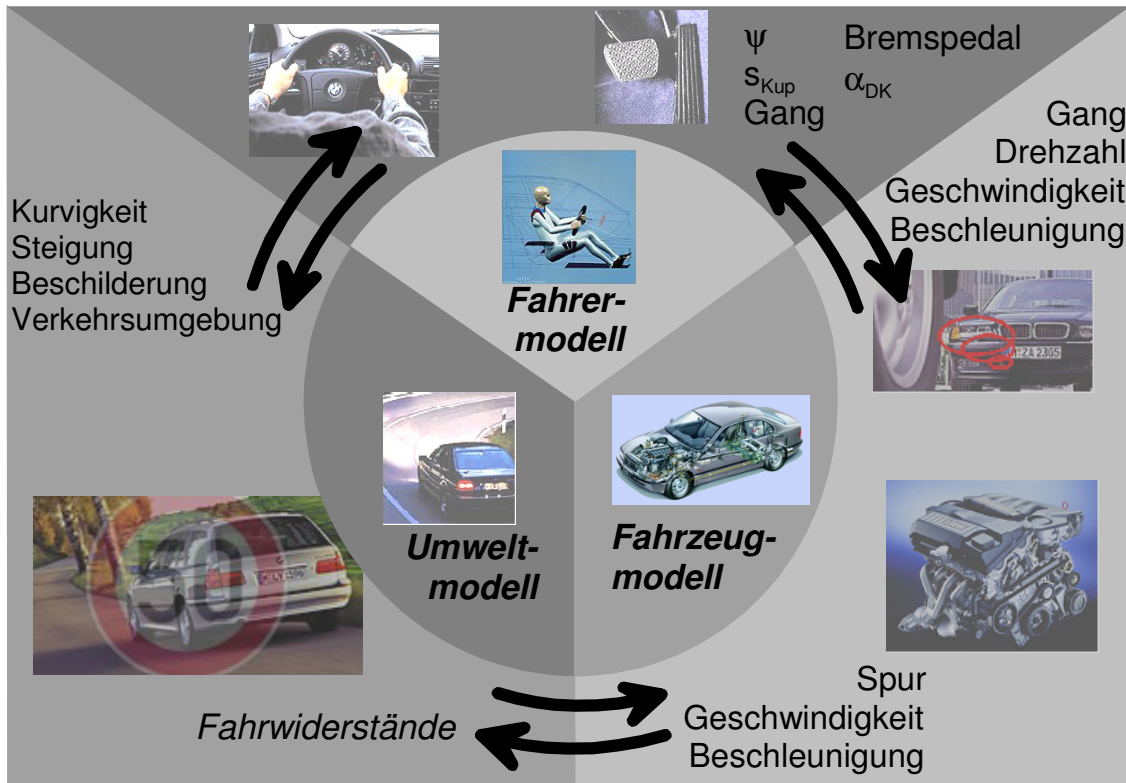


Bild 1: PELOPS-Struktur

Das Fahrzeugmodell basiert auf dem 'Ursache-Wirkungs-Prinzip', bei dem, ausgehend vom Motorbetriebspunkt über Kupplung, Getriebe und Differential eine Berechnung der Antriebskraft zu den Rädern erfolgt, an der diese Antriebskraft dann mit den Fahrwiderständen bilanziert wird. Der Betriebspunkt wird über die Änderung des Motormomentes (Ursache) gewechselt. Aus der dadurch verursachten Beschleunigung und Geschwindigkeitsänderung resultiert unter Berücksichtigung der Elemente des Antriebsstranges die Motordrehzahl (Wirkung). Als Getriebearten sind konventionelle Handschalt- sowie Automatikgetriebe implementiert. Da das Fahrzeugmodell alle Komponenten des Antriebsstrangs abbildet, können auch Parameter wie Gesamtwirkungsgrad und Verbrauch hinreichend genau bestimmt werden. Des Weiteren lässt diese detaillierte Abbildung des Fahrzeugs die Simulation von Fahrerassistenzsystemen wie etwa der Adaptive Cruise Control (ACC) zu.

Die Verbindung zwischen der Fahrzeug- und der Verkehrssimulation stellt das Fahrermodell dar. Es ist in ein Verhaltens- und ein Handlungsmodell gegliedert (vgl. Bild 2). Im Verhaltensmodell werden die Parameter der lokalen Fahrstrategie aus dem aktuellen Fahrzustand und der Fahrzeugumgebung bestimmt. Die Parameter der lokalen Fahrstrategie sind eine vom Fahrer gewünschte Beschleunigung, die Fahrspur und ggf. der einzulegende Fahrgang. Im

Handlungsmodell schließlich werden diese Parameter in fahrzeugseitige Stellgrößen wie Gaspedal, Bremse etc. umgesetzt.

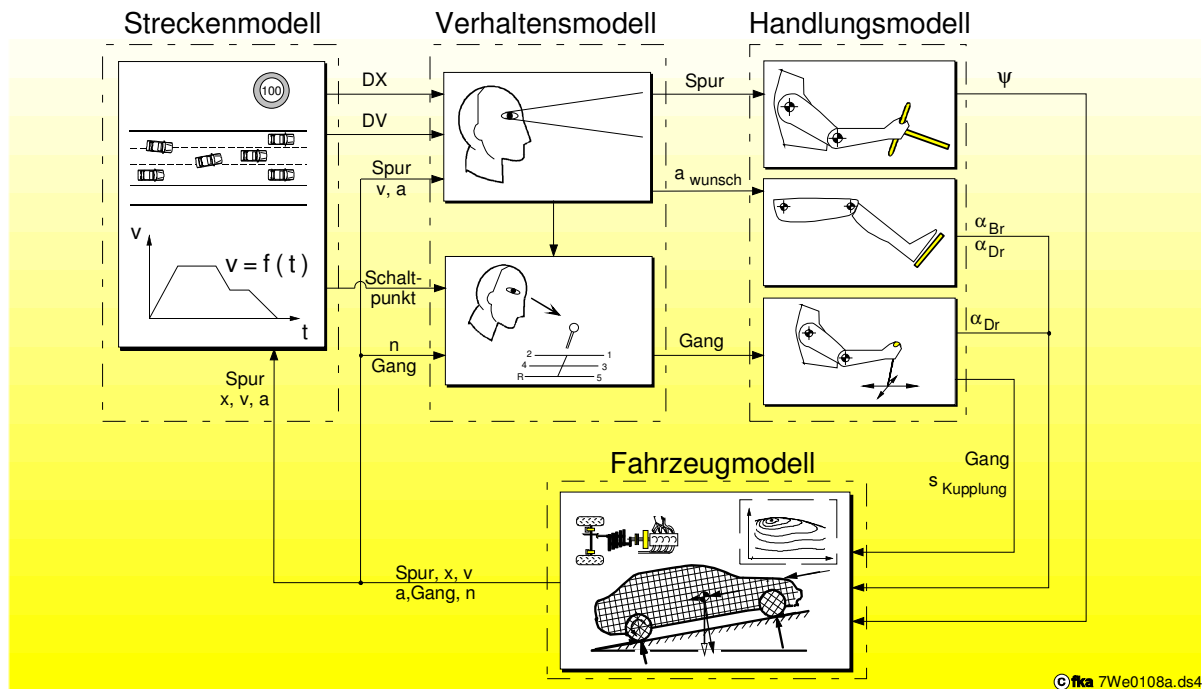


Bild 2: Entscheidungs- und Handlungsteil des Fahrermodells

Im folgenden Kapitel wird detailliert auf die Modellierung des Fahrermodells eingegangen.

2 Modellierung des Fahrermodells

Im Kapitel 2.1 wird das Fahrermodell beschrieben. Dabei wird neben dem ursprünglichen Modell auch auf die Erweiterungen am Folge- und Spurwechselmodell eingegangen. Die Methodik zur Entwicklung und Implementierung neuer Funktionen wird im Kapitel 2.2 erläutert.

2.1 Beschreibung des Folge- und Spurwechselmodells

Zur Ermittlung des Fahrerverhaltens arbeitet PELOPS mit einem psycho-physischen Folgemodell, das auf den Arbeiten von Wiedemann (1974) beruht. Beim Annähern an einem Vorderfahrzeug reagiert der Fahrer erst ab einem von verschiedenen Faktoren (Differenzgeschwindigkeit, Fahrertyp etc.) abhängigen Abstandsschwellwert auf dieses Vorderfahrzeug. Zunächst wird im Bereich des Annäherns die Differenzgeschwindigkeit abgebaut. Dies dauert solange an, bis ein zweiter abstands- und differenzgeschwindigkeitsabhängiger Schwellwert unterschritten wird, der in den Bereich Folgen überführt. Im Bereich Folgen oszilliert der Abstand zum Vorderfahrzeug, d.h. der Fahrer hält keinen konstanten Abstand ein, sondern nähert sich dem Vorderfahrzeug an und entfernt sich wieder von diesem. Diese Oszillation wird durch einen unteren und oberen Folgeabstand begrenzt (siehe Bild 3 oben). Für die Anwendung in PELOPS wurde dieses Modell angepasst und signifikant weiterentwickelt (Ehmanns, 2002; Ludmann, 1998; Neunzig, 1996; Weilkes, 2000). Da das ursprüngliche Folgemodell nur die Reaktion auf Fahrzeuge berücksichtigt, die auf derselben Spur fahren, wurde zusätzlich ein taktisches Verhaltensmodell entwickelt, das ein realistisches Fahrerverhalten in Bezug auf den Streckenverlauf auch bei mehrspurigen Strecken abbildet. Dieses taktische Ver-

halten beinhaltet beispielsweise die Reaktion auf langsame Fahrzeuge auf den Nachbarspuren, auf die verschiedenen Schilder und Knotenpunktsformen und ein situationsabhängiges Spurwechselmodell, das auf der Betrachtung der Zufriedenheiten eines Fahrers auf den einzelnen Spuren beruht.

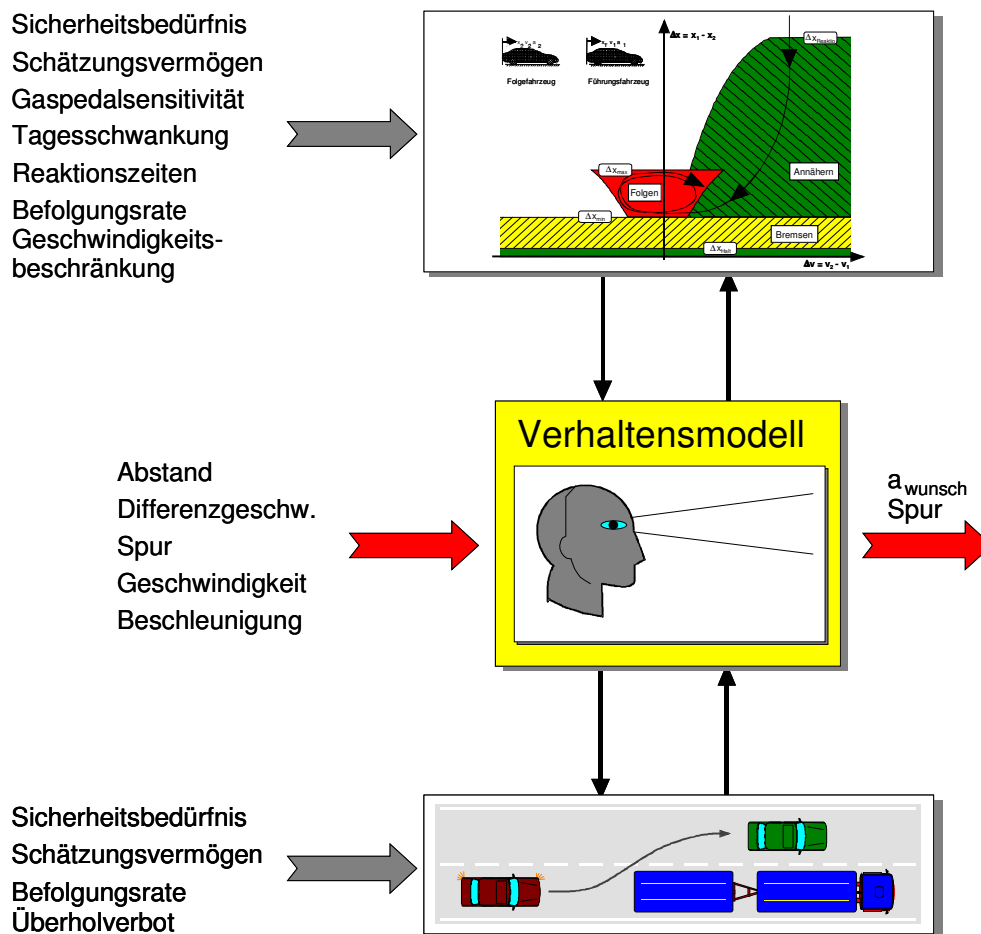


Bild 3: Verhaltensmodell von PELOPS

Fahrerabhängige Einflussgrößen für das Verhaltensmodell sind beispielsweise das Sicherheitsbedürfnis oder das Schätzvermögen von Abständen und Geschwindigkeiten. Durch diese Parameter ist es bereits möglich, verschiedene Fahrercharaktere (z.B. "sportlicher Fahrer") abzubilden (Bild 3). Das "Sicherheitsbedürfnis" ist der wichtigste Parameter des Fahrermodells: Es beeinflusst alle abstandsabhängigen Verhaltensweisen. Ein hohes Sicherheitsbedürfnis bedeutet einen größeren Folgeabstand. Die Größe der Lücke auf der Nachbarspur, welche für einen Überhol- oder Spurwechselvorgang erforderlich ist, steigt ebenfalls mit höherem Sicherheitsbedürfnis. Zusätzlich wird die Geschwindigkeitswahl beeinflusst. Die Parameter Schätzvermögen, Gaspedalsensibilität und Tagesschwankungen dienen als Modelleingangsgrößen zur Beschreibung von Unzulänglichkeiten des Fahrers bei der Einschätzung von Abständen bzw. Differenzgeschwindigkeiten und bei der Bedienung der Fahrzeugstellgrößen Gaspedal, Bremse und Lenkung. Reaktionszeiten werden für die vier Kategorien Normalfahrt, Reaktion auf potentiell gefährliche Bremsmanöver, Spurwechsel und Anfahren des Vorfahrenden unterschieden. Zusätzlich verarbeitet das Fahrermodell individuelle Befolgungsgrade für Überholverbote (z.B. für das Rechtsüberholen) und Geschwindigkeitsbeschränkungen.

Ein sportlicher Fahrer kann in der Simulation mit PELOPS beispielsweise durch ein niedriges Sicherheitsbedürfnis, gutes Schätzvermögen und hohe Gaspedalsensibilität bei niedrigen Tagesschwankungen beschrieben werden. Ein niedriges Sicherheitsbedürfnis bedeutet bei einem sportlichen Fahrer, dass grundsätzlich niedrigere Abstände gefahren werden und Lücken, die der Fahrer für seinen Spurwechsel nutzt, erheblich kleiner sind als bei einem durchschnittlichen Fahrer. Gleichzeitig ist der so parametrisierte sportliche Fahrer bereit, kleine Abstände und Lücken zu akzeptieren, die ihm durch den umgebenden Verkehr aufgeprägt werden. Gutes Schätzvermögen und hohe Gaspedalsensibilität bedeuten in diesem Zusammenhang eine gute Kontrollierbarkeit der eigenen Aktionen. Diese beiden Parameter haben aber nur einen geringen Einfluss auf das modellierte Fahrverhalten und sind im Vergleich zum Sicherheitsbedürfnis nur wenig bedeutsam. Weiterhin wird der sportliche Fahrer durch eine entsprechende Parametrisierung der Größen "Reaktionszeit" und "Befolgungsrate" beschrieben. Seine Reaktionszeiten sind möglicherweise niedrig, ebenso seine Befolgungsrate für Geschwindigkeitsbeschränkungen (d.h. er fährt sehr viel schneller als erlaubt). Analog zu diesem Beispiel können andere "Fahrertypen" (sicherheitsbetont, sparsam etc.) durch eine geeignete Wahl der Fahrerparameter "eingestellt" werden. Insgesamt steht für die Simulation ein validierter Satz von mehreren hundert Standardfahrertypen in statistischer Verteilung zur Verfügung (Weilkes, 2000).

Insgesamt verfügt das PELOPS-Fahrermodell über die folgenden Parameter zur Anpassung des Fahrerverhaltens:

- Wunschgeschwindigkeit
- Sicherheitsbedürfnis
- Schätzvermögen
- Überholverbotsbefolgung
- Tempolimitbefolgung
- maximal realisierbare Verzögerung
- maximale Ausnutzung der Fahrzeugbeschleunigung
- Präferenzspur
- normale Reaktionszeit
- Bremsreaktionszeit
- Spurwechselreaktionszeit
- Anfahrreaktionszeit

Für eine detaillierte Beschreibung dieser Parameter und deren Eingang in die Berechnungsvorschriften des Fahrermodells sei hier auf die Quellen Ehmanns (2002), Ludmann (1998) und Neunzig (1996) verwiesen.

Das Fahrermodell verfügt über die folgenden wesentlichen Ausgangsgrößen:

- die aktuelle Wunschbeschleunigung beziehungsweise -verzögerung
- die aktuelle Wunschgeschwindigkeit als ein an die aktuellen Umgebungsbedingungen angepasster, gegenüber der maximalen Wunschgeschwindigkeit des betreffenden Fahrers reduzierter Wert
- die momentane, durch die Fahrerfähigkeiten bestimmte Sichtweite und die für die aktuelle Situation geltenden Parameter des Fahrermodells wie etwa Folgeabstände oder Wahrnehmungsschwellen
- gewünschte Blinker-, Licht- und Hupsignal-Betätigungen

Neben dem soeben beschriebenen Folgemodell beinhaltet das PELOPS-Fahrermodell auch ein Spurwechselmodell. Typische Verhaltensmuster bei Fahrstreifenwechsel sind anhand von Fahreruntersuchungen identifiziert worden. Der Aufbau aller klassischen Spurwechselmodelle in zeitschrittgesteuerten Simulationsprogrammen basiert auf demselben Schema. Der Spurwechselvorgang lässt sich dabei in verschiedene Phasen unterteilen. Zunächst wird ein Spurwechselwunsch abhängig von der Zufriedenheit auf der Fahrspur gebildet. Anschließend wird die Durchführbarkeit überprüft. Schließlich beginnt bei positivem Ergebnis der Spurwechsel. Bild 4 fasst diese Phasen zusammen.

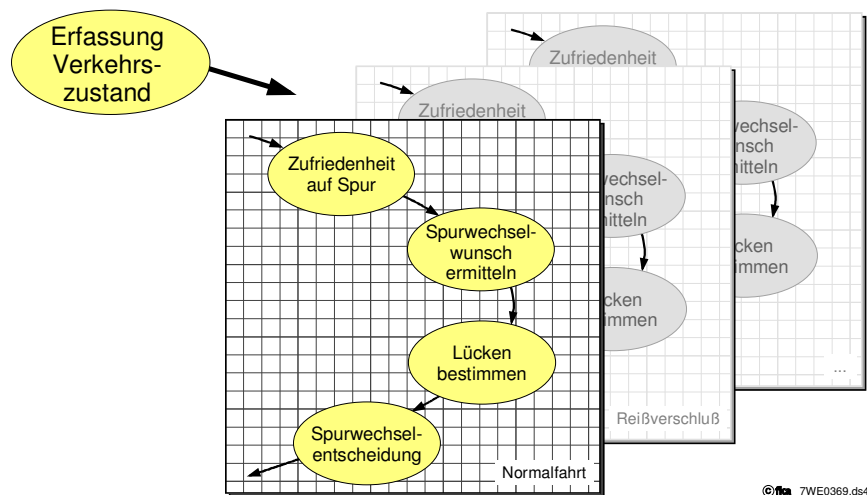


Bild 4: Struktur des Spurwechsels

Einem Spurwechsel kann eine Vielzahl von Beweggründen zugrunde liegen. Das Verfolgen einer bestimmten Route und das Überholen sind zwei wichtige Motivationen. Aber auch taktische Erwägungen führen zu einem Spurwechsel. Nähert sich ein schnelleres Fahrzeug von hinten, so kann dies unter Umständen einen Spurwechsel auf die rechte Spur motivieren. Um die Art und Zahl der abbildbaren Spurwechselmotivationen flexibel zu halten, wurde eine Struktur für das Spurwechselmodell gewählt, bei der alle Beweggründe in einen Faktor münden. Ferner sollen verschiedene Fahrertypen auch im Spurwechselverhalten abgebildet werden können. Der Faktor, der die Spurwechselmotivationen zusammenfasst, lässt sich als Zufriedenheit interpretieren. In jedem Zeitschritt wird diese Zufriedenheit für jeden Fahrer bestimmt. Einflussgrößen sind die fahrerindividuelle Wunschgeschwindigkeit im Vergleich zur aktuellen eigenen Geschwindigkeit und der Geschwindigkeit auf den Nachbarspuren. Das zu Beginn beschriebene schnellere Fahrzeug, das sich von hinten nähert, reduziert die Zufrieden-

heit auf der eigenen Spur und erhöht die Zufriedenheit auf der rechten Spur. Die Summierung der einzelnen Zufriedenheiten mündet in einen Wert, der die Gesamtsituation beschreibt. Die Zufriedenheit ist fahrerabhängig, da die Wunschgeschwindigkeit eine fahrerabhängige Größe ist.

Die Zufriedenheitswerte werden über der Zeit aufsummiert und mit einem Vergessensfaktor gewichtet, was einen hypothetischen Vergessensprozess simuliert, der in ähnlicher Weise beim Fahrer angenommen werden kann. Je länger die Fahrsituation zurückliegt, desto kleiner ist der Einfluss auf das aktuelle Verhalten. Die Zufriedenheitswerte für die aktuelle Spur und die beiden Nachbarspuren werden miteinander verglichen. Dabei wird eine Hysterese (variable Schaltstufen bei Zustandsänderungen, damit ständiges Hin- und Herwechseln vermieden wird) berücksichtigt, um instabiles Spurwechselverhalten zu vermeiden. Instabiles Spurwechselverhalten zeigt sich z.B., wenn die Verkehrssituation auf allen Spuren annähernd identisch ist. Eine marginale Änderung auf der Nachbarspur würde zu einem Spurwechsel führen. Wird eine Hysterese eingeführt, so muss die Situation auf der Nachbarspur um den Wert der Hysterese besser sein, um beim Fahrer einen Spurwechselwunsch auszulösen. Ist die Situation über einen längeren Zeitraum geringfügig besser, so führt das Aufsummieren der Zufriedenheiten dazu, dass die Hystereseschwelle nach einer gewissen Zeit überschritten wird und der Fahrer die Spur wechseln will.

Zur Umsetzung des Spurwechselwunsches wurde ein mehrstufiges Beschleunigungsverhalten mit dem Zielen auf eine Lücke realisiert. Es wird also zusätzlich zu der Querverführung die Längsdynamik betrachtet. Dabei ist einem Spurwechselvorgang bereits eine Beschleunigungsphase vor dem Ausscheren zuzuordnen, wenn sie zum Erreichen einer geeigneten Lücke bzw. zur Geschwindigkeitsanpassung an die relevanten Fahrzeuge auf der Zielspur dient. Insgesamt wird also die herkömmliche Betrachtung des reinen Spurwechselvorgangs um das taktische Fahrerverhalten, beschrieben durch den Beschleunigungsverlauf, ergänzt (Ehmanns, 2002).

2.2 Methodik zur Entwicklung/Implementierung neuer Funktionen

Soll das Fahrermodell um eine neue Funktion erweitert werden, muss zunächst das Fahrerverhalten erfasst und beschrieben werden. Die Erfassung des Fahrerverhaltens kann anhand von Induktionsschleifen, Videodektionsanlagen, Fahrsimulatoren oder Messfahrzeugen erfolgen. Der Einsatz von Induktionsschleifen, die in den Straßenbelag eingelassen sind, ist bei der Verkehrsdetektion weit verbreitet. Neben Einzelfahrzeugdaten können auch makroskopische Daten bereitgestellt werden. Nachteilig ist, dass die Datenerfassung ortsfest und ohne örtliche Ausbreitung durchgeführt wird. Häufig ist jedoch erforderlich, dass die Erfassung über einen zeitlich und räumlich ausgedehnten Bereich erfolgt, beispielsweise bei der Analyse des Fahrerverhaltens bei einem Fahrstreifenwechsel. Das taktische Fahrerverhalten einzelner Fahrer wird durch das Verkehrsumfeld beeinflusst. Daher ist zu einer vollständigen Beschreibung des Fahrerverhaltens die Erfassung der gesamten Verkehrssituation notwendig.

Im Gegensatz zu Induktionsschleifen kann die Verkehrssituation mit Videodetektion unter mehr Gesichtspunkten analysiert werden. Der Verkehrsablauf kann einerseits durch Betrachter, andererseits automatisch interpretiert werden. Durch einen hohen Anbringungsort der Kameras oberhalb der Fahrbahn wird ein langer Streckenabschnitt aufgezeichnet. Bild 5 zeigt einen Streckenabschnitt aus der Sicht der Kamera.

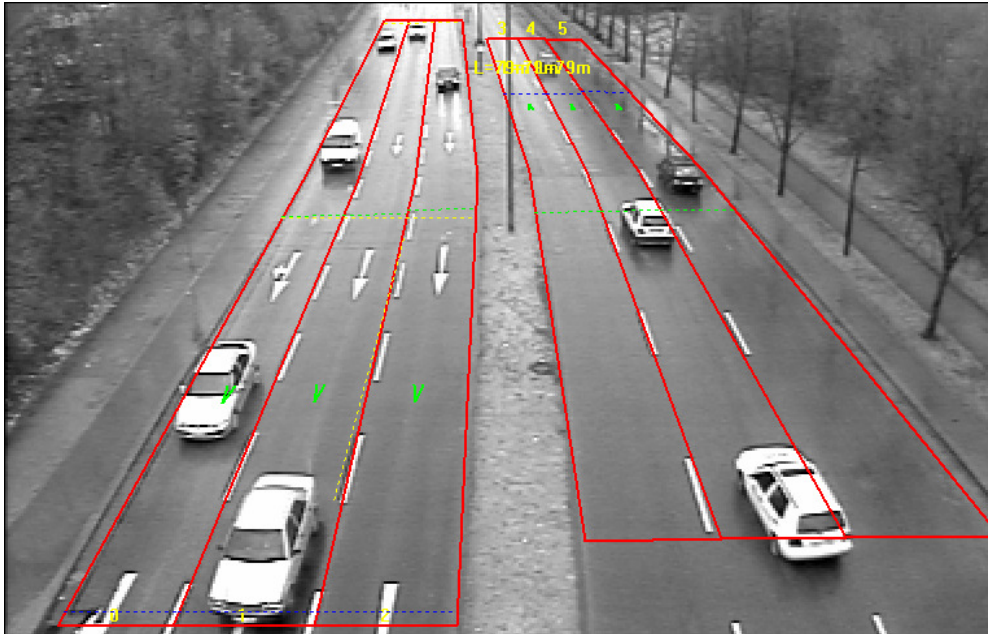


Bild 5: Sichtfeld einer Videodetektionsanlage (Ehmanns, 2002)

Die Videodetektion zeigt klare Stärken bei der statistischen Verkehrsbeschreibung. Erfassungsgrößen des Systems sind Verkehrsfluss, aufgeteilt nach Fahrzeugart (Pkw/Lkw), Durchschnittsgeschwindigkeiten, Warteschlangenlängen, Wartezeiten und Reisezeiten für den betrachteten Streckenabschnitt. Dieser Streckenabschnitt kann bei einem solchen System bis zu 500 m umfassen.

Zudem können einzelne besondere Verhaltensmuster identifiziert und den herrschenden Situationen zugeordnet werden. Das Individualverhalten anhand von Beschleunigungsverläufen o. ä. ist aufgrund mangelnder Genauigkeit nicht erfassbar. Zudem sind die Beobachtungen nicht einzelnen Fahrergruppen zuzuordnen, da man ihr Verhalten nur in einer bestimmten Situation, nicht aber während eines gesamten Fahrverlaufs aufnimmt. Die mit diesem System aufgezeichneten Daten können somit nur zur Vervollständigung der Datenbasis dienen.

Im Gegensatz dazu zeichnen sich Fahrsimulatoren durch die Verfügbarkeit aller Bewegungsdaten aus. Für jedes Fahrzeug, sowohl für das simulierte als auch für die Umgebungsfahrzeuge, liegen die genauen Bewegungsgrößen (z. B. Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Gierwinkel) vor. Sie werden - im Gegensatz zum Realversuch - nicht durch Ungenauigkeiten der Sensorerfassung beeinflusst.

Weitere Vorteile beim Einsatz von Fahrsimulatoren ist die Reproduzierbarkeit von Verkehrssituationen. Diese können vom Versuchsleiter eingestellt werden. Durch eine mögliche Steuerung eines Umgebungsfahrzeugs durch den Versuchsleiter kann auch gezielt während des Versuchs von außen eingegriffen werden. Individuelle Verhaltensmuster können durch die identischen Verkehrssituationen für unterschiedliche Probanden unter gleichen Randbedingungen verglichen werden. Des Weiteren können kritische Manöver bzw. Verkehrssituationen ohne Gefährdung der Versuchspersonen durchgeführt werden.

Auf der anderen Seite steht als Hauptnachteil das künstliche Umfeld. Trotz der mittlerweile erreichten sehr hohen Darstellungsgüte von Simulatoren kann die Realität nur in Grenzen abgebildet werden. Das Fahrzeugverhalten wird durch Modelle nachgebildet und unterliegt

somit Einschränkungen gegenüber der Realität. Trotz der hohen Modellgenauigkeit sind künstliche Fahrzeugreaktionen für die Versuchsperson spürbar.

Anhand von Versuchsfahrten mit einem Messfahrzeug lässt sich das Fahrerverhalten im realen Verkehr erfassen. Wie bereits erwähnt, ist die Erfassung des Verkehrsumfeld von Bedeutung. Daher muss das Messfahrzeug neben der Eigenbewegung auch Abstände und Geschwindigkeiten der Umgebungsfahrzeuge messen und aufzeichnen. Bild 6 verdeutlicht beispielhaft den Erfassungsbereich des von Ehmanns (2002) eingesetzten Messfahrzeugs zur Analyse des taktischen Fahrerverhaltens bei Spurwechselvorgängen.

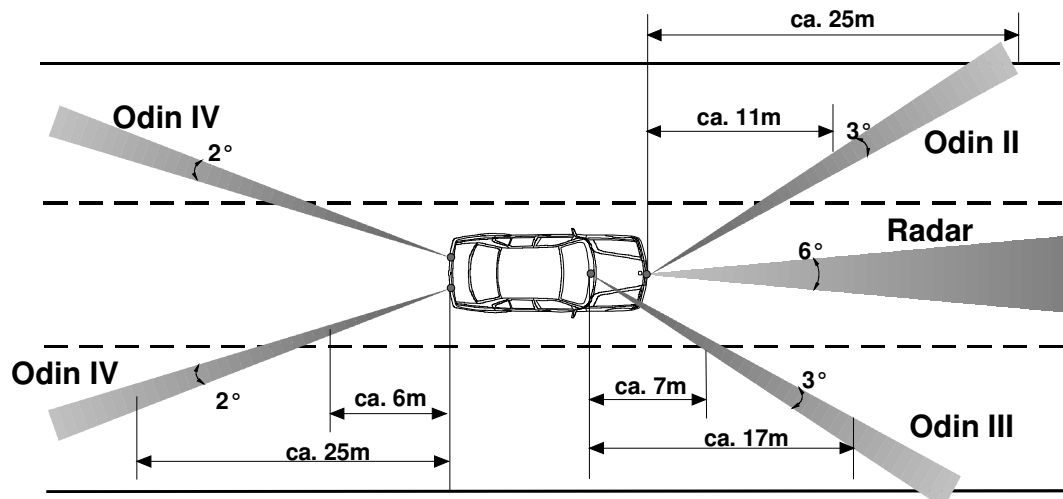


Bild 6: Übersicht über den Erfassungsbereich mit der eingesetzten Sensorik (Ehmanns, 2002)

Um die Umgebungssituation vollständig interpretieren zu können, wird die Erfassung des Umgebungsverkehrs durch zwei Videokameras vervollständigt, die im Fahrzeug nach vorne und hinten ausgerichtet sind. Beide sind für den Umgebungsverkehr möglichst schlecht sichtbar angebracht, um Irritationen anderer Verkehrsteilnehmer zu vermeiden. Den Vorteilen stehen Nachteile wie fehlerbehaftete Sensorergebnisse und eingeschränkte Sensorsichtweiten gegenüber. Des Weiteren ist der Mess- und Auswerteaufwand bei realen Messfahrten hoch (Ehmanns, 2002).

Nachdem das Fahrerverhalten erfasst und beschrieben worden ist, erfolgt die Umsetzung im Simulationsprogramm. Hierbei sollte darauf geachtet werden, dass die unterschiedlichen Funktionen möglichst modular integriert werden. Somit können u.a. Funktionen leichter ergänzt oder gänzlich ersetzt werden. Abschließend muss die neue Funktion an sich und im Zusammenspiel mit den restlichen Fahrermodellkomponenten validiert werden.

Nachdem in diesem Kapitel das Folge- und Spurwechselmodell sowie die Methodik zur Entwicklung und Implementierung neuer Funktionen erläutert wurden, wird im nachfolgenden Kapitel auf weitere Applikationsmöglichkeiten des Fahrermodell eingegangen.

3 Applikationsmöglichkeiten des Fahrermodells

Neben dem Einsatz als Teil der Verkehrsflusssimulation kann das Fahrermodell beispielsweise auch als eigenständiges Modul im Fahrsimulator oder als Regler im Fahrzeug eingesetzt werden.

3.1 Einsatz des Fahrermodells im Fahrsimulator

Klassische Fahrsimulatoren sind in vielen Bereichen aus der Forschung und Entwicklung nicht mehr wegzudenken. Mit relativ wenig Aufwand lassen sich erste Erkenntnisse gewinnen z.B. über die Qualität von Mensch-Maschine-Schnittstellen (MMS). Bei klassischen Fahrsimulatoren fahren die umgebenden Fahrzeuge starre Zyklen, d.h. sie reagieren nicht auf die Fahrmanöver der Testperson im Fahrsimulator. Auf diese Weise ist es beispielsweise möglich, im Fahrsimulator durch Fahrzeuge hindurchzufahren. Der Vorteil dieser klassischen Fahrsimulatoren liegt in der Reproduzierbarkeit der Szenarien und damit der Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Im Leistungsumfang ist ein klassischer Fahrsimulator also vergleichbar mit einem Prüfstand.

Allerdings ist bei der Entwicklung von Fahrzeugen der Fahrversuch, also die Untersuchung in einer realen Verkehrsumgebung, ebenfalls von großer Bedeutung. Die Überlegung liegt nahe, auch im Fahrsimulator eine reale Verkehrsumgebung abzubilden. Die umgebenden Fahrzeuge sollen auf die Fahrmanöver der Testperson im Fahrsimulator reagieren. Damit lassen sich die möglichen Untersuchungen im Fahrsimulator um zwei wichtige Aspekte erweitern. Zum einen lässt sich eine Beeinflussung des Verkehrs durch das Fahrverhalten der Testperson bewerten. Zum anderen erlebt die Testperson im Fahrsimulator eine reale Fahrsituation mit einer realen Belastung durch die Aufgabe des Fahrzeuglenkens. Somit können psychologische Aspekte der Fahrzeugführung wie beispielsweise Ablenkung oder Reizüberflutung, sowie die Auswirkung von Assistenzsystemen und MMS auf Fahrverhalten und Fahrsicherheit ebenfalls bewertet werden.

Dieser intelligente Fahrsimulator lässt sich nur realisieren, wenn die umgebenden Fahrzeuge nicht mehr einem starren Zyklus folgen, sondern von einem Modell des menschlichen Fahrverhaltens gesteuert werden. Die Forderung nach einer Reaktion der umgebenden Fahrzeuge auf das Verhalten der Testperson macht einen Datenaustausch zwischen dem Fahrsimulator und dem Fahrermodell nötig. Hier müssen zwei Aspekte berücksichtigt werden: welche Größen liefert der Fahrsimulator einerseits und welche Größen benötigt das Fahrermodell auf der anderen Seite. Die Forderung nach einer real erscheinenden Fahrsituation für die Testperson erfordert vom Fahrermodell eine so realitätsnahe Abbildung des menschlichen Fahrverhaltens, dass der Proband die Fahrmanöver der umgebenden - vom Fahrermodell gesteuerten - Fahrzeuge als realistisch empfindet.

Ähnlich wie die Verkehrssimulation erfordert auch der Fahrsimulator die Anbindung des Fahrermodells an ein oder mehrere Fahrzeugmodelle und an ein Umgebungsmodell. Fahrzeug- und Umgebungsmodell im Fahrsimulator beinhalten dabei neben den physikalischen und geometrischen Modellparametern auch zahlreiche Parameter zur Beschreibung der optischen Beschaffenheit und der graphischen Darstellung der Fahrzeugumgebung und der darin befindlichen Fahrzeuge.

Um ein universelles Fahrermodell sowohl in der Verkehrssimulation wie im Fahrsimulator gleichermaßen einsetzen zu können, war es notwendig, das Fahrermodell von den im jeweiligen Anwendungsfeld verwendeten spezifischen Fahrzeug- und Umgebungsmodellen zu entkoppeln. Um dies zu erreichen, wurde das ursprünglich für das Verkehrssimulationsprogramm PELOPS in der Programmiersprache Fortran realisierte Fahrermodell neu in C++ im-

plementiert und weiterentwickelt. Dabei wurden die nachfolgend beschriebenen neuen Konzepte realisiert.

Bei der Neuimplementation des Fahrermodells in C++ wurde im Rahmen eines objektorientierten Ansatzes ein "Model-View"-Konzept gewählt:

Das Fahrermodell erhält die benötigten Informationen über die Fahrumgebung nicht durch direkten Zugriff auf die Daten eines für die jeweilige Anwendung spezifischen Fahrzeug- oder Umgebungsmodells, sondern in Form von für jeden Fahrer und jeden Zeitschritt aufgebauten fahrerbezogenen Ansichten ("Views") dieser Modelle.

Diese Ansichten beinhalten alle für das Fahrverhalten wichtigen Parameter (z. B. Streckeninformationen und Verkehrsschilder, Relativabstände und -geschwindigkeiten sowie relative Spurlagen) in einer vom spezifischen Umgebungsmodell unabhängigen Form und ohne Kenntnis der modellinternen Implementierung. Die Ansichten werden softwaretechnisch über einen "Adapter" erzeugt, welcher aus dem applikationsspezifischen Umgebungsmodell für jeden Fahrer seine persönliche, fahrerrelative Ansicht dieser Umgebung in einen separaten Satz von Datenstrukturen extrahiert.

Die Informationen über Fremdfahrzeuge und über das eigene Fahrzeug werden ebenfalls in Form von Ansichten bereitgestellt, welche nur die für das Fahrermodell relevanten, nach außen sichtbaren Fahrzeugparameter in Form modellunabhängiger Datenstrukturen beinhalten.

Basierend auf dem aktuellen View zum Zeitpunkt t_n und dem alten Fahrerzustand zum Zeitpunkt t_{n-1} wird in jedem Zeitschritt ein "Update" des Fahrerzustandes auf den aktuellen Zeitschritt t_n durchgeführt. Die dabei errechneten Wunschparameter des Verhaltensmodells beziehungsweise die Aktuatorikstellparameter des Handlungsmodells werden vom Fahrermodell in einer Ausgangsdatenstruktur bereitgestellt und können anschließend von den in den jeweiligen Anwendungen verwendeten Fahrzeugmodellen übernommen werden.

Aufgrund der großflächigen, realitätsnahen Visualisierung des Fremdverkehrs in Echtzeit kann der Fahrer im Fahrsimulator das beobachtete Fahrverhalten des Fremdverkehrs sofort mit seinen auf eigener Fahrerfahrung basierten Erwartungen abgleichen. Limitationen im Fahrermodell wie etwa bislang noch nicht modellierte Einflussfaktoren und Zusammenhänge werden so unmittelbar erlebt und führen schnell zu Hypothesen über zweckmäßige Erweiterungen der Fahrermodellierung.

Daher führte die Anwendung des Fahrermodells in der Simulatorumgebung zu weiteren Überarbeitungen und Erweiterungen des Modells, deren Auswirkungen auf den verkehrlichen Gesamteindruck im Simulator ebenfalls sofort erlebt und mit der eigenen Fahrerfahrung abgeglichen werden konnte. Infolge der Universalität des Modells stehen die so entstandenen Erweiterungen auch dem Verkehrssimulationsprogramm PELOPS ohne Mehraufwand zur Verfügung. Auf diese Weise konnte und kann weiterhin eine ständige Verbesserung des Fahrermodells erreicht werden und die erzielten Fortschritte kommen beiden Anwendungsbereichen wechselseitig zugute (Hochstädter u.a., 2000).

Das PELOPS-Fahrermodell wird seit dem Jahr 2000 als eigenständiges Modul im BMW-Fahrsimulator eingesetzt. Darüber hinaus kommt das Fahrermodell seit dem Jahr 2004 im

statischen Fahrsimulator¹⁾ der RWTH Aachen zum Einsatz. Zur Zeit wird das Fahrermodell als eigenständiges Modul in den dynamischen Fahrsimulator²⁾ der RWTH Aachen integriert.

3.2 Das Fahrermodell als Regler im realen Fahrzeug

Die Entkopplung des Fahrermodells von den restlichen PELPOS-Modellen im Rahmen der Integration des Fahrermodells im Fahrsimulator ermöglicht eine Reihe von weiteren Applikationen. Beispielsweise der nachfolgend beschriebene Einsatz des Fahrermodells als Regler im realen Fahrzeug.

Die Umsetzung des vorgestellten Fahrermodells als längsdynamisches und laterales Fahrerassistenzsystem im Fahrzeug erfolgt im ersten Schritt über eine Hardware-in-the-Loop-Schnittstelle (HiL-Schnittstelle) von PELOPS. Hierbei wird die mittels Sensoren erfasste Fahrzeugumgebung in die virtuelle Welt von PELOPS (Umgebungsfahrzeuge und Umweltmodell: Kurvigkeit, Steigungsverlauf, Beschilderung etc.) übertragen. Für die Umsetzung des Fahrermodells im Fahrzeug liefern in diesem ersten Realisierungsschritt die Fahrzeugsensoren Informationen über andere Fahrzeuge auf der Straße. Diese Informationen werden an das PELOPS-Fahrermodell gesendet, das eine Situationsbewertung und -klassifizierung vornimmt und die dazugehörige Reaktion bestimmt. Diese Reaktion wird wiederum im Fahrzeug in eine Gas- und Bremspedalstellung, sowie in eine Lenkwinkelstellung umgewandelt, wie in Bild 7 zu sehen ist.



Bild 7: PELOPS Fahrermodell als Regler im Versuchsfahrzeug

¹⁾ Der statische Fahrsimulator der RWTH Aachen wurde vom Zentrum für Lern- und Wissensmanagement und Lehrstuhl Informatik im Maschinenbau (ZLW/IMA) mit Unterstützung der fka und der MAN AG errichtet.

²⁾ Der dynamische Fahrsimulator der RWTH Aachen wurde vom Institut für Kraftfahrwesen Aachen und dem ZLW/IMA mit Unterstützung von CAE und EADS errichtet.

Die implementierte Lösung benötigt neben einem Rechner (handelsübliches Notebook) für die PELOPS-Simulation drei Mikrocontroller (Infineon C167). Einer davon dient als Schnittstelle zwischen PELOPS und dem Fahrzeug. Die beiden anderen Mikrocontroller beinhalten die unteren Reglerebenen der Aktuatorik. Zum einen wird aus der in PELOPS ermittelten Wunschbeschleunigung eine Drosselklappenstellung ermittelt. Zum anderen wird der Soll-lenkwinkel im Lenkaktuator umgesetzt. Alle Hardwareelemente dieses Regelungskreises kommunizieren hierbei über einen im Fahrzeug zusätzlich angebrachten CAN-Bus. Die von PELOPS generierten Nachrichten werden mittels eines USB-CAN Adapters in CAN-Nachrichten umgewandelt und an den Schnittstellen-Mikrocontroller gesendet. In der ersten Implementierung dieses Ansatzes werden nicht alle in PELOPS benötigten Informationen via Sensorik ermittelt, sondern nur die für die grundlegende Regelung notwendigen. Diese sind:

- Position des Fahrzeuges innerhalb der Spur
- eigene Geschwindigkeit
- eigene Beschleunigung
- eigene Gierrate
- Entfernung zum Zielfahrzeug
- Geschwindigkeit des Zielfahrzeuges
- Beschleunigung des Zielfahrzeuges
- Position des Zielfahrzeuges innerhalb der Spur

Die restlichen Informationen, wie beispielsweise Beschilderung, Steigungsverlauf und weitere umgebende Fahrzeuge werden zunächst vernachlässigt. Für die Ermittlung der eigenen Geschwindigkeit, Beschleunigung und Gierrate werden fahrzeuginterne Sensoren genutzt. Die Signale müssen jedoch nachbearbeitet werden um eine gute Regelqualität zu erreichen (Filterung, dynamische Offset-Korrektur etc). Die Position des eigenen Fahrzeuges innerhalb der Spur wird mittels eines Bildverarbeitungssystems ermittelt, das sich an der Spurmarkierung orientiert. Die Informationen über das Zielfahrzeug liefert ein 77 Ghz Radarsensor, der an der Fahrzeugfront montiert ist.

Das vorgestellte Konzept ermöglicht die automatische Fahrt hinter einem Vorderfahrzeug im gesamten Geschwindigkeitsbereich (Höchstgeschwindigkeit bis Stillstand). Bild 8 zeigt die bei einem solchen Folgemanöver aufgezeichneten Signale (die eigene und die Vorderfahrzeuggeschwindigkeit und den Abstand). Das Vorderfahrzeug beschleunigt zunächst aus dem Stand auf eine Geschwindigkeit von etwa 9 m/s und hält diese für eine kurze Zeit. Danach verzögert es auf etwa 4 m/s und beschleunigt anschließend wieder auf 12 m/s. Zum Abschluss des Manövers verzögert das Vorderfahrzeug bis in den Stillstand. Das von dem PELOPS-Fahrermodell geregelte Fahrzeug folgt bei diesem Manöver dem Vorderfahrzeug und hält zum Schluss etwa sechs Meter hinter diesem an.

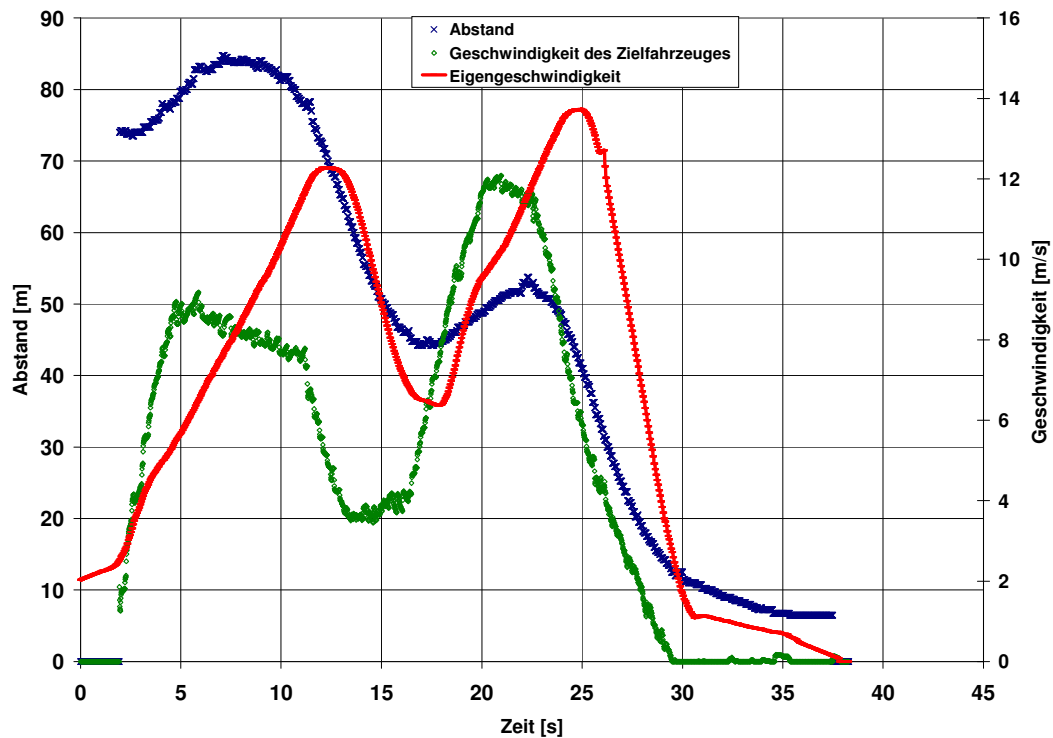


Bild 8: Folgemanöver im realen Fahrversuch: Abstand und Geschwindigkeiten (Benmimoun, 2004)

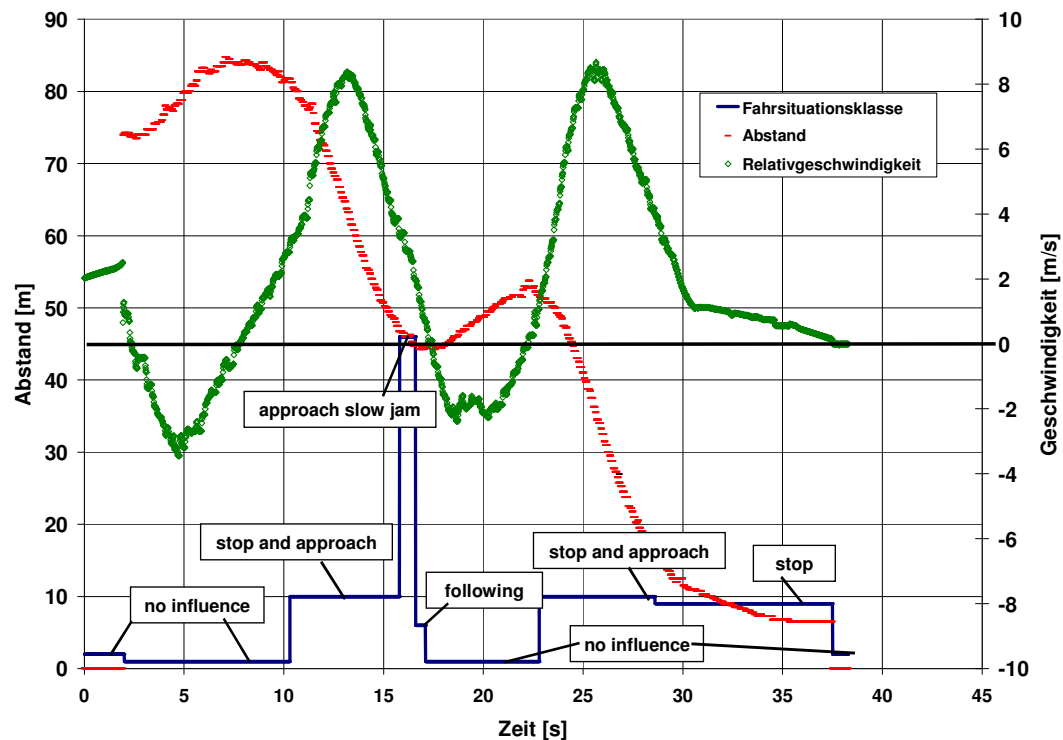


Bild 9: Folgemanöver im realen Fahrversuch: Situationsklassifizierung, Abstand und Relativgeschwindigkeit (Benmimoun, 2004)

Bild 9 zeigt die bei dem beschriebenen Manöver von PELOPS ermittelten Situationen basierend auf den Sensorinformationen. Zu Beginn wird der Zustand “no influence” gesetzt, da das Zielfahrzeug stärker beschleunigt als das eigene Fahrzeug, wie man anhand der Relativge-

schwindigkeit sehen kann. Eine negative Relativgeschwindigkeit bedeutet, dass das Zielfahrzeug sich entfernt. Die Situation „no influence“ heißt, dass keine anderen Fahrzeuge berücksichtigt werden müssen und das Fahrermodell versucht die eingestellte Wunschgeschwindigkeit zu erreichen. Da das Vorderfahrzeug anschließend seine Beschleunigungsphase beendet und verzögert, kommt das geregelte Fahrzeug näher. Nachdem die Relativgeschwindigkeit und der Abstand die fahrerindividuellen Schwellwerte unterschritten haben, wird die Situation „stop and approach“ detektiert. Für den Wechsel der Situation sind nicht nur Abstand und Relativgeschwindigkeit wichtig, sondern auch die Relativbeschleunigung. Da sich die Relativgeschwindigkeit sehr schnell ändert, wechselt das Fahrermodell nicht in die Situation „approach“ (Annäherung), sondern „stop and approach“. Das heißt, es wird eine Verzögerung des Vorderfahrzeugs bis in den Stillstand erwartet. Anschließend wird die Situation „approach slow traffic or traffic jam“ gesetzt, die auf kriechenden Verkehr voraus hinweist. Danach wird für eine kurze Phase die Situation „following“ erkannt, da der Abstand annähernd konstant bleibt. Als das Zielfahrzeug wieder beschleunigt, wird wieder die Situation „no influence“ gesetzt. Zum Schluss bremst das Zielfahrzeug bis in den Stillstand. Das Fahrermodell detektiert daraufhin die Situation „stop and approach“ und anschließend bis zum Stillstand die Situation „stop“. Die Situationserkennung ist durchgehend stabil und weist keine Schwingungen auf, auch wenn die Signalqualität schlechter ist, als in der reinen Simulation.

Neben der längsdynamischen Assistenz ist auch die laterale Fahrerassistenz in Form einer Spurhaltefunktion im Versuchsfahrzeug implementiert. Die hierfür vom Fahrermodell benötigten Informationen sind: Position des Fahrzeuges innerhalb der Spur, laterale Geschwindigkeit, Gierrate, Gierwinkel und der Kurvenradius voraus. Da das im Versuchsfahrzeug installierte Bildverarbeitungssystem nicht in der Lage ist eine Kurveninformation zur Verfügung zu stellen, wird der Kurvenradius vernachlässigt. Dies hat jedoch vor allem bei höheren Geschwindigkeiten einen negativen Einfluss auf die Regelungsqualität.

Das Fahrermodell verarbeitet die empfangenen Informationen und berechnet anhand eines kennfeldbasierten Regelungsansatzes den Solllenkwinkel, der ins Versuchsfahrzeug übertragen wird und dort als Eingangssignal für den Lenkaktuator dient.

Die hiermit realisierte Spurhaltefunktion wurde auf der ika-Teststrecke untersucht. Auf der Teststrecke ist ein Fahrstreifen mit einer Breite von drei Meter aufgezeichnet. Dieser verläuft zunächst gerade und mündet dann anschließend in einer Rechtskurve mit einem Radius von etwa 300 m.

Bild 10 zeigt die Position des Fahrzeugs innerhalb der Spur, die Gierrate und die Geschwindigkeit, die während des Fahrtests aufgezeichnet wurden. Die maximale Abweichung von der Spurmitte beträgt hierbei etwa 30 cm. Bei höheren Geschwindigkeiten als 20 km/h wird der Fahrermodellregler aufgrund der fehlenden Kurveninformation instabil und beginnt zu schwingen, sodass das Fahrzeug die Spur verlässt. Mit einem besseren Bildverarbeitungssystem, das auch die Kurvigkeit voraus detektieren kann, lassen sich dann auch höhere Geschwindigkeiten stabil regeln (Benmimoun, 2004).

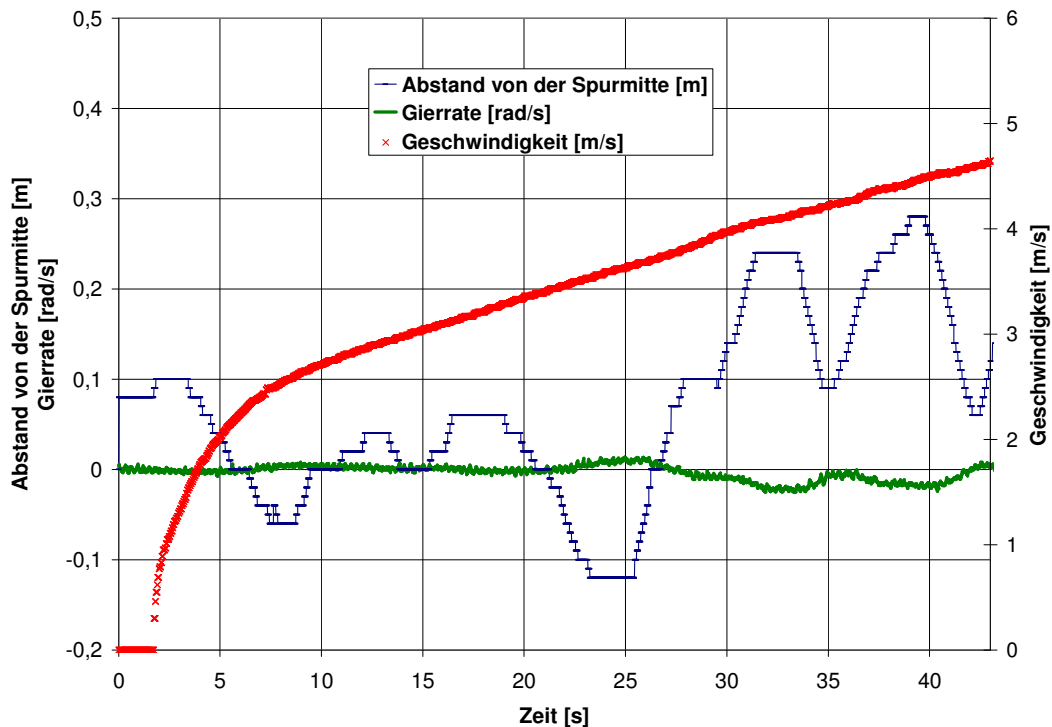


Bild 10: Abstand des Fahrzeuges innerhalb der Spur (positiv: links von der Spurmitte, negativ: rechts von der Spurmitte), Gierrate und Geschwindigkeit während des Fahrversuchs (Benmimoun, 2004).

4 Literatur

- Benmimoun, A. (2004). Der Fahrer als Vorbild für Fahrerassistenzsysteme? Ein Fahrermodell-basierter Ansatz zur Entwicklung von situationsadaptiven FAS. Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik Oktober 2004. Aachen.
- Diekamp, R. (1995). Entwicklung eines fahrzeugorientierten Verkehrsflusssimulationsprogramms. Dissertation am Institut für Kraftfahrwesen Aachen, RWTH Aachen.
- Ehmanns, D. (2002). Modellierung des taktischen Fahrerverhaltens bei Spurwechselvorgängen. Dissertation am Institut für Kraftfahrwesen Aachen, RWTH Aachen.
- Hochstädter, A.; Zahn, P.; Breuer, K. (2000) Ein universelles Fahrermodell mit den Einsatzbeispielen Verkehrssimulation und Fahrsimulator. Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik Oktober 2000. Aachen.
- Ludmann, J. (1989). Konzept eines Verkehrssimulationsprogramms. Diplomarbeit am Institut für Kraftfahrwesen Aachen, RWTH Aachen.
- Ludmann, J. (1998). Beeinflussung des Verkehrsablaufs auf Straßen – Analyse mit dem fahrzeugorientierten Verkehrssimulationsprogramm PELOPS. Dissertation am Institut für Kraftfahrwesen Aachen, RWTH Aachen.
- Neunzig, D. (1996). Erweiterung des Simulationsprogramms PELOPS zur Abbildung von Verkehrsabläufen in Verdichtungsräumen. Diplomarbeit am Institut für Kraftfahrwesen Aachen. RWTH Aachen.
- Weilkes, M. (2000). Auslegung und Analyse von Fahrerassistenzsystemen mittels Simulation. Dissertation am Institut für Kraftfahrwesen Aachen, RWTH Aachen.
- Wiedemann (1974). Simulation des Straßenverkehrsflusses. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Band 8. Karlsruhe.