

# **Modellgestützte Prädiktive Regelung zur Längsführung von Kraftfahrzeugen im niedrigen Geschwindigkeitsbereich**

## **Model based Predictive Control for the Longitudinal Guidance of Vehicles in Low Velocity Range**

**N. Zambou, F. Richert, A. Schloßer, D. Abel**, IRT RWTH Aachen;  
**D. Sandkühler**, fka Aachen;

### **Kurzfassung**

In diesem Beitrag wird ein Modellgestützter Prädiktiver Regler (MPR) vorgestellt, der es ermöglicht, die Geschwindigkeit eines Kraftfahrzeugs unter Einhaltung des gesetzlich vorgeschriebenen Mindestabstands zum unmittelbar vorausfahrenden Fahrzeug zu regeln. Eine Situationsidentifikation und die Kenntnis des situationsspezifischen Fahrerverhaltens werden in den Reglerentwurf integriert, um ein komfortables und sicheres Regelverhalten zu erzielen. Das Regelungsverfahren wird in der Simulation entwickelt, und auf einem Versuchsträger appliziert. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten interdisziplinären Forschungsprogramms „intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik“ (invent) arbeitet das Institut für Regelungstechnik (IRT) der RWTH Aachen zusammen mit der Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen (fka) im Unterauftrag des invent-STA (Stauassistent)-Konsortiums an der Entwicklung von automatisch agierenden Assistenzsystemen für die Fahrzeuglängsführung im niedrigen Geschwindigkeitsbereich.

### **Abstract**

This paper presents a model based predictive controller (MPC), which enables the control of vehicle velocity subject to keep an obligatory minimal distance to the preceding vehicle. An algorithm for situation identification and the knowledge of situation specific driver behaviour are integrated into the controller design. The control method is developed in the simulation and applied to an experimental vehicle. Within the framework of the interdisciplinary research program „intelligent traffic and user-friendly technology“ (invent), supported by the German Federal Ministry of Education and Research, the Institute of Automatic Control (IRT) of the RWTH Aachen University along with the Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen (fka) in subcontract of the invent-STA (Congestion Assistant)-consortium is working

on the development of an automatically acting assistance system for the longitudinal guidance of vehicles in low velocity range.

## **1. Einleitung**

Systeme zur Adaptiven Abstands- und Geschwindigkeitsregelung (ACC) von Kraftfahrzeugen bei der Fahrt auf Autobahnen und Landstraßen werden zur Zeit für die obere Fahrzeugklasse angeboten. Diese Systeme sind u.a. dadurch gekennzeichnet, dass sie sich selbsttätig beim Unterschreiten einer Mindestgeschwindigkeit deaktivieren, d.h. automatisiertes Anhalten und Anfahren ist nicht möglich. Um den Fahrer zukünftig auch in diesem niedrigen Geschwindigkeitsbereich bis hinunter in den Stillstand unterstützen zu können, wird das ACC zu einem so genannten Stauassistenten weiterentwickelt. Als Ergebnis einer Voruntersuchung [5] liegt eine sog. Situationsklassifizierung vor. Sie definiert verschiedene Anfahr-, Anhalte- und Folgesituationen im Stau, die durch spezielle Fahrerverhaltensweisen gekennzeichnet sind. Mit der Kenntnis dieses situationsspezifischen Fahrerverhaltens ist es möglich, eine an die Verkehrssituation angepasste Geschwindigkeitstrajektorie zu erzeugen, die unter Berücksichtigung aller Nebenbedingungen, die sich aus Sicherheits- und Komfortansprüchen ergeben, einzuhalten ist.

Schwerpunkt der durchgeführten Forschungsarbeiten ist der Entwurf eines modellgestützten Regelungskonzeptes sowie die Erprobung dieses Konzeptes in der Simulation und im Versuchsträger. Das übergeordnete Regelungsziel ist die Bereitstellung des gewünschten Motor- oder Bremsmomentes. Kriterien zur Beurteilung des Verhaltens des Reglers sind die Robustheit gegenüber äußeren Störungen (Wind, Steigung), Parametervariationen (veränderliche Fahrzeugmasse) sowie der Komfort in unterschiedlichen Verkehrssituationen. Die analytische Zugänglichkeit bei der Optimierung sowie die erforderliche Rechenzeit des resultierenden Algorithmus und dessen Aufwand zur Adaptierbarkeit an verschiedene Regelstrecken sind weitere wichtige Kriterien.

Der hier eingesetzte Modellgestützte Prädiktive Regler (MPR) basiert auf dem Generalized-Predictive-Control-Ansatz (GPC) [1] und verwendet für die Prädiktion ein Zustandsraummodell [2],[3],[4]. Zur Korrektur des Zustandsvektors wird ein mit einem Kalman-Filterentwurf ausgelegter Beobachter benutzt. Durch die Verwendung der quadratischen Programmierung kann die Kostenfunktion mit Nebenbedingungen gelöst werden, so dass eine deterministische Rechenzeit für das Steuergerät garantiert werden kann.

Die Simulationsumgebung besteht aus einer Kopplung des Verkehrsflusssimulationsprogramms PELOPS [6] und der Simulationssoftware Matlab/Simulink®.

## 2. Regelkreisstruktur

In Bild 1 ist die Prinzipskizze der Regelkreisstruktur für die automatische Längsführung eines Kraftfahrzeugs unter Einhaltung des gesetzlich vorgeschriebenen Mindestabstands zum unmittelbar vorausfahrenden Fahrzeug dargestellt.

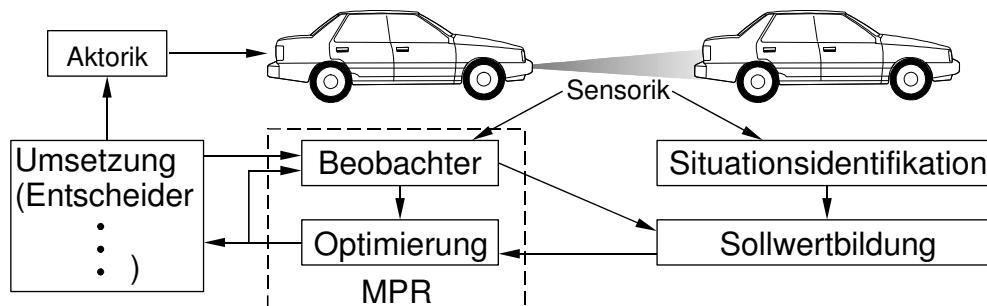


Bild 1: Regelkreisstruktur der automatischen Längsführung

Für die automatische Längsführung eines Fahrzeugs können je nach Konfiguration der Sensorik die Zustandsdaten des eigenen sowie die des unmittelbar vorausfahrenden Fahrzeugs bei der Situationsidentifikation, der Sollwertbildung und der Berechnung der Fahrzeugstellgröße berücksichtigt werden. Innerhalb der Situationsidentifikation wird die aktuelle Verkehrslage erfasst, analysiert und einer vordefinierten Situationsklasse zugeordnet. Diese Information wird zur Berechnung einer Geschwindigkeitstrajektorie unter Berücksichtigung des menschlichen Fahrverhaltens in der Sollwertbildung verwendet. Im Beobachter werden bei gleichzeitiger Unterdrückung von Messrauschen und nicht messbaren Einflüssen die Zustände des Eigenfahrzeugs geschätzt und diese weiteren Komponenten des Regelkreises zur Verfügung gestellt. Der Optimierer bestimmt die Fahrzeugstellgröße, so dass die vorgegebene Geschwindigkeitstrajektorie und Begrenzungen der Eigenfahrzeugzustände und -eingänge eingehalten werden. Der Umsetzer steuert die Weitergabe der Reglerausgangsgröße an die Aktorik des Fahrzeugs (Motor oder Bremse).

## 3. Situationsidentifikation und Sollwertbildung

Im Vorlauf der hier vorgestellten Arbeit wurde zunächst eine Analyse des menschlichen Fahrverhaltens speziell im niedrigen Geschwindigkeitsbereich vorgenommen. Der Fokus lag dabei auf der Untersuchung des Fahrerverhaltens im Stau auf der Autobahn. Ziel dieser Analyse war es, innerhalb des Staus verschiedene Situationsklassen zu identifizieren, in denen sich ein Fahrer in typischer, für die jeweilige Situation charakteristischer und reproduzierbarer Weise verhält. Im Vordergrund der Arbeiten zur Situationsidentifikation stand die subjektive Sichtweise des Fahrers. Zunächst wurde also die Frage beantwortet,

wie ein Fahrer verschiedene Verkehrssituationen einordnet und anhand welcher Parameter er diese unterscheidet. Erst in einem zweiten Schritt wurden Messdaten hinzugezogen und überprüft, ob die gefundene fahrerbasierte Situationsklassifizierung auch anhand der im Fahrzeug verfügbaren Sensorinformationen vorgenommen werden kann.

Als Datenbasis standen Messdaten von umfangreichen Versuchsfahrten zur Verfügung, die auf staugefährdeten Abschnitten auf der Autobahn und im Innenstadtbereich durchgeführt wurden. Als Ergebnis dieser Versuchsfahrten lagen für die Auswertung zwei wesentliche „Datenpools“ vor. Auf der einen Seite ist die subjektive Einschätzung der Verkehrssituation Stau verfügbar, wie sie der Proband geäußert hat. Diese beinhaltet eine Anzahl von Situationen, die der Proband anhand von Videobändern und seiner während der Fahrt gemachten Aussagen identifiziert hat. Außerdem hat er verschiedene Parameter genannt, anhand derer er die identifizierten Situationen unterscheidet. Dieser erste „Datenpool“ repräsentiert ausschließlich die subjektive Sicht des Fahrers auf den „erlebten“ Straßenverkehr. Der zweite „Datenpool“ beinhaltet die während der Versuchsfahrt in großem Umfang mit Hilfe der Fahrzeugsensorik aufgezeichneten Messdaten.

Die fahrerbasierte Situationsklassifizierung, die das Ergebnis der Nachbesprechung der Versuchsfahrten darstellt („Datenpool 1“), wurde nun dazu verwendet, eine systematische Unterscheidung von Situationen vorzunehmen. Dabei sollten der subjektive Eindruck und die subjektiven Unterscheidungskriterien des Fahrers die maßgeblichen Parameter zur Definition der Situationen sein.

Im nächsten Schritt wurde der zweite „Datenpool“, nämlich die aufgezeichneten Messdaten, in die Analyse einbezogen. Zur Situationsidentifikation mussten subjektive Fahrersicht und im Fahrzeug verfügbare Sensorinformationen zur Überdeckung gebracht werden. Die datenbasierte Identifikation von Situationen sollte dabei sowohl zeitlich als auch inhaltlich der fahrerbasierten entsprechen. Ausgangspunkt dieses Teils der Datenauswertung waren die Aussagen der Probanden. Die Angaben zu Parametern, anhand derer der Proband Situationen unterscheidet, waren jedoch nicht vollständig auf die Messdatenanalyse übertragbar, da diese teilweise messtechnisch nicht erfassbar sind. Hier mussten messtechnisch erfassbare Analogien gefunden werden, sodass eine Situationsidentifikation anhand der Messdaten möglich wurde. Das Ergebnis ist ein messdatenbasierter Regelsatz zur Identifikation verschiedener Situationen. Dieser Regelsatz wurde in einem weiteren Schritt in einen Algorithmus überführt, der eine Situationsidentifikation anhand der verfügbaren Sensorinformationen im Fahrzeug ermöglicht. Die gefundene Situationsklassifizierung unterscheidet grundsätzlich zwischen Anhalte-, Anfahr- und Folgesituationen. Diese Hauptgruppen gliedern sich nochmals in verschiedene Ausprägungen. So hat die

Datenanalyse beispielsweise ergeben, dass zwei Ausprägungen der Situation Anhalten zu unterscheiden sind, in denen das Fahrerverhalten sich stark unterscheidet.

Neben der Situationsidentifikation wurde zur Beschreibung der Fahrerreaktion in bestimmten Situationen eine statistische Aufbereitung der Messdaten durchgeführt. Alle der gleichen Klasse zuzuordnenden Situationen wurden für jede Versuchsfahrt zusammengefasst und charakteristische Größen grafisch dargestellt. Daraus konnte das fahrerspezifische Verhalten für jede Situation genauso identifiziert werden wie das über die gesamte Probandenpopulation gemittelte situationsspezifische Verhalten. Als Ergebnis lag damit eine Reihe von Datensätzen vor, die das Fahrerverhalten situationsspezifisch beschreiben. Dadurch ergaben sich sowohl fahrertypische als auch über die gesamte Probandenpopulation gemittelte, situationsspezifische Verhaltensweisen. Diese können als „Regelsätze zur Beschreibung der Fahrerreaktion“ bezeichnet werden.

In Analogie zum zuvor für die Situationsidentifikation bereits dargestellten Vorgehen wurde die beschriebene Datengrundlage dazu verwendet, einen Sollwertgenerator für den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten MPR-Ansatz zu entwickeln. Der Sollwertgenerator stellt für jede identifizierte Situationsklasse einen der Situation angepassten Algorithmus zur Verfügung, der als Ergebnis eine Geschwindigkeitstrajektorie liefert, die der MPR als Sollgröße bereitgestellt wird. Dadurch ist es möglich, das gefundene Fahrerverhalten in der automatischen Fahrzeuglängsführung zu berücksichtigen. Zur Berechnung der Geschwindigkeitstrajektorie werden neben der aktuellen Verkehrssituation die Bewegungsdaten des eigenen und des relevanten Zielfahrzeugs herangezogen. Ähnlich wie ein menschlicher Fahrer jederzeit aufs Neue seine Geschwindigkeit an die Verkehrssituation anpasst, muss auch der Sollwertgenerator zyklisch eine neue Geschwindigkeitstrajektorie ermitteln. Die zuvor berechnete Trajektorie wird dabei vollständig verworfen. Dadurch ist sichergestellt, dass das automatische System auf plötzliche und sicherheitskritische Veränderungen der Verkehrssituation, wie beispielsweise eine starke Verzögerung des Vorderfahrzeugs, unmittelbar zu reagieren in der Lage ist.

#### **4. Regelungskonzept**

Die Modellgestützte Prädiktive Regelung bezeichnet eine Klasse von Verfahren, die ein Modell des Prozesses nutzen, um das Verhalten relevanter Prozessgrößen unter Verwendung aktueller und vergangener Prozessdaten sowie Stellgrößen in die Zukunft zu prädictieren. Der hier eingesetzte Modellgestützte Prädiktive Regler (MPR) basiert auf dem Generalized-Predictive-Control-Ansatz (GPC) [1] und benutzt für die Prädiktion ein Zustandsraummodell [2],[3],[4]. Dafür müssen drei wichtige Kenngrößen festgelegt werden:  $N_1$  und  $N_2$

(unterer und oberer Prädiktionshorizont) beschreiben den Zeitraum (Prädiktionfenster), in dem die Regelgröße betrachtet wird.  $N_u$  (Stellhorizont) entspricht der Anzahl der Stellgrößenschritte, mit denen der gewünschte Regelgrößenverlauf erzeugt werden soll (Bild 2). Zur Bestimmung des Stellgrößenverlaufs wird ein Gütefunktional angesetzt, das es zu minimieren gilt:

$$J = \gamma \sum_{j=N_1}^{N_2} (w_{k+j} - \hat{y}_{k+j})^2 + \lambda \sum_{j=1}^{N_u} (\Delta u_{k+j-1})^2 = \min \quad (1)$$

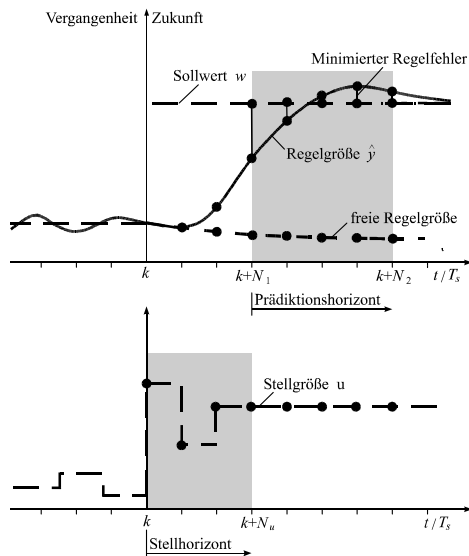


Bild 2: Grundprinzip der prädiktiven Regelung

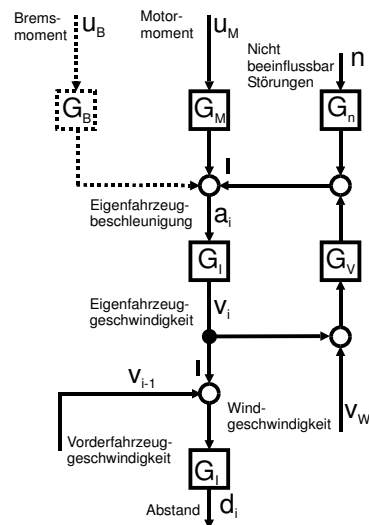


Bild 3: Lineares Streckenmodell

Dieses Gütefunktional bewertet innerhalb des jeweiligen Betrachtungshorizontes die jeweils mit  $\gamma$  und  $\lambda$  gewichteten Quadrate der vorausgesagten Regelgrößenabweichung und der Stellgrößenänderung. Die Minimierung dieses Gütefunktionals in Abhängigkeit von der Stelländerung  $\Delta u$  stellt ein Optimierungsproblem dar. Bei prädiktiven Regelungsverfahren lassen sich durch die Beschreibung im Zeitbereich Prozessbegrenzungen berücksichtigen. Typische Prozessbegrenzungen sind Begrenzungen der Stellgrößen, der Stellgrößenänderungen, der Zustandsgrößen und der Ausgangsgrößen. Sämtliche Begrenzungen werden als Ungleichungen formuliert und zu einem linearen Ungleichungssystem der Form  $(N\Delta m \geq g)$  zusammengefasst (siehe [3]). Andere Randbedingungen können, wenn sie auch als lineare Ungleichungen darstellbar sind, auf die gleiche Weise berücksichtigt werden. Durch die Nebenbedingungen wird das quadratische Optimierungsproblem (1) so erweitert, dass keine geschlossene Lösung mehr existiert. In der Literatur (siehe [8]) findet man zahlreiche Algorithmen, basierend auf der Quadratischen Optimierung zur Lösung dieses Problems. Sie machen aufgrund der recht hohen erforderlichen Rechenleistung den Einsatz

leistungsfähiger Prozessoren im für die Fahrzeugapplikation vorgesehenen Steuergerät erforderlich. Das Strukturbild des Modellbasierten Prädiktiven Reglers mit Nebenbedingungen ist in Bild 4 dargestellt.

Bei einem linear angenommenen Streckenmodell (Bild 3) und unbeschränkten Stell- und Regelgrößen lässt sich eine analytische Lösung finden [7]. Aufgrund des wesentlich geringeren Rechenzeitbedarfs ist sie für fahrzeugtypische Steuergeräte geeigneter. Eine Untersuchung des Fahrzeugübertragungsverhaltens vom Motor-  $u_M$  bzw. Bremsmoment  $u_B$  zur Fahrzeugbeschleunigung  $a_i$  hat gezeigt, dass die identifizierten Übertragungsfunktionen  $G_M$  und  $G_B$  deutlich unterschiedlich sind. Hierbei lässt sich das nichtlineare Übertragungsverhalten vom Motormoment zur Fahrzeugbeschleunigung  $G_M$  gut durch  $PT_1$ -Verhalten mit dem Verstärkungsfaktor  $K_M$  und der Zeitkonstante  $T_M$  und das Übertragungsverhalten vom Bremsmoment zur Fahrzeugbeschleunigung  $G_B$  gut durch  $P$ -Verhalten mit dem Verstärkungsfaktor  $K_B$  beschreiben. Des Weiteren werden die Übertragungsverhalten der nicht beeinflussbaren Eingangsgrößen  $G_n$  und der geschwindigkeitsproportionalen Störungen  $G_v$  jeweils durch  $P$ -Verhalten mit den Verstärkungsfaktoren  $K_n$  und  $K_v$  beschrieben. Die Übertragungsfunktion  $G_i$  (integrierendes Verhalten) beschreibt die kinematischen Zusammenhänge zwischen der Fahrzeugbeschleunigung  $a_i$  und seiner Geschwindigkeit  $v_i$  sowie zwischen der Relativgeschwindigkeit zwischen zwei Fahrzeugen und ihrem Abstand.

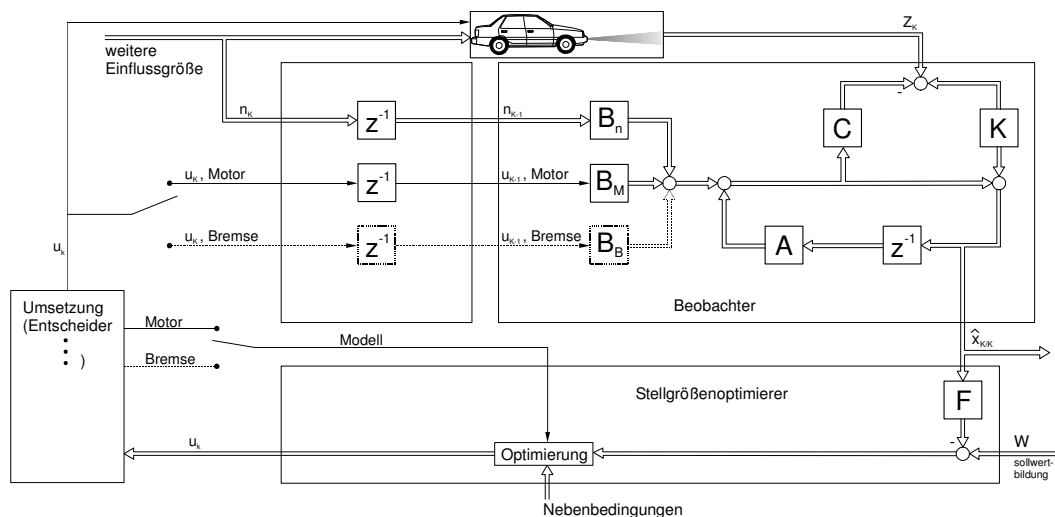


Bild 4: Struktur des Modellbasierten Prädiktiven Reglers

Betrachtet man die Motor/Bremsen-Strecken des linearen Fahrzeugmodells als MISO-Prozesse und erweitert den oben beschriebenen Algorithmus entsprechend, so wird in der Optimierung in bestimmten Situationen eine gleichzeitige Motor- und Bremsenbetätigung als die optimale Lösung zur Minimierung des Gütekriteriums (1) ermittelt. Ein solches

Regelverhalten erfüllt jedoch nicht die Komfortanforderungen für eine automatische Fahrzeuglängsführung. Das Problem kann durch eine Überführung in eine SISO-Betrachtung ähnlich wie bei Heizen/Kühlen-Strecken [2] gelöst werden. Des Weiteren kann durch eine vorgesteuerte Kompensation des rotatorischen Anteils des Beschleunigungswiderstands das nichtlineare Verhalten des Antriebstranges in die Modellbildung einbezogen werden. Durch die Zustandsraumdarstellung wird der Einsatz einer sogenannten Einschnitt-Prädiktor-Korrektor Beobachterstruktur ermöglicht, die das Verfahren robust gegen Modellunsicherheiten, Störungen und Messrauschen gestaltet.

## 5. Simulation

Bild 5 zeigt das Simulationsergebnis einer Kolonnenfahrt unter Verwendung des vorgestellten Reglerkonzepts. Die Simulationen wurden durchgeführt mit Hilfe einer Co-Simulation von Matlab/Simulink und PELOPS [6] (**P**rogrammsystem zur **E**ntwicklung längsdynamischer mikroskopischer Verkehrs**p**rozesse in **s**ystemrelevanter Umgebung). Das Verkehrsflusssimulationswerkzeug PELOPS stellt dabei hochauflösende Modelle für Fahrzeug und Umgebung zur Verfügung, während Matlab/Simulink das Modell des Längsregler, bestehend aus Situationsidentifikation, Sollwertbildung und MPR, enthält. Über eine adaptierbare Netzwerkschnittstelle tauschen beide Simulationswerkzeuge Daten aus.

Die Situationsabfolge, wie sie die automatische Situationsidentifikation liefert, ist am oberen Bildrand in Abbildung 5 dargestellt. Das Ergebnis der Sollwertgenerierung ist aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht abgebildet.

Die Abbildung zeigt den Geschwindigkeitsverlauf des relevanten Zielobjekts (rote Linie). Diese Trajektorie ist den in Kapitel 3 erwähnten Versuchsfahrten entnommen und wurde dem in PELOPS abgebildeten Zielfahrzeug als Geschwindigkeitszyklus aufgeprägt. Dadurch wird es möglich, eine reale Verkehrssituation in der Simulation nachzubilden und so das reale Fahrerverhalten mit dem der automatischen Längsführung zu vergleichen. Dieser Vergleich ist in Bild 5 am Beispiel einer typischen Situationsabfolge dargestellt. Zu diesem Zweck sind die gemessene Eigengeschwindigkeit (magenta Linie) und der gemessene Abstand (dunkelblaue Linie) dargestellt. Die grüne und die hellblaue Linie zeigen die korrespondierenden Messgrößen als Ergebnis der Simulation.

Besonders auffällig ist die große Abweichung im Abstandsignal. Grund hierfür ist die Parametrierung der Sollwertbildung. Die Sollwertbildung orientiert sich am durchschnittlichen Verhalten der untersuchten Fahrerpopulation. Der von diesem Fahrer in der dargestellten Situation gewählte Abstand ist jedoch extrem gering. Durch eine entsprechende Veränderung der Sollwertbildung wäre es möglich, dem gemessenen Fahrerverhalten auch

in dieser Situation nahe zu kommen. Damit würde aber ein spezieller Fahrertyp das Auslegungskriterium des Reglerverhaltens darstellen, was dem Ziel der Auslegung anhand des durchschnittlichen Fahrerverhaltens widerspricht. Neben dieser akzeptanzrelevanten Fragestellung spielen hier auch Gesichtspunkte der Systemsicherheit eine wichtige Rolle.

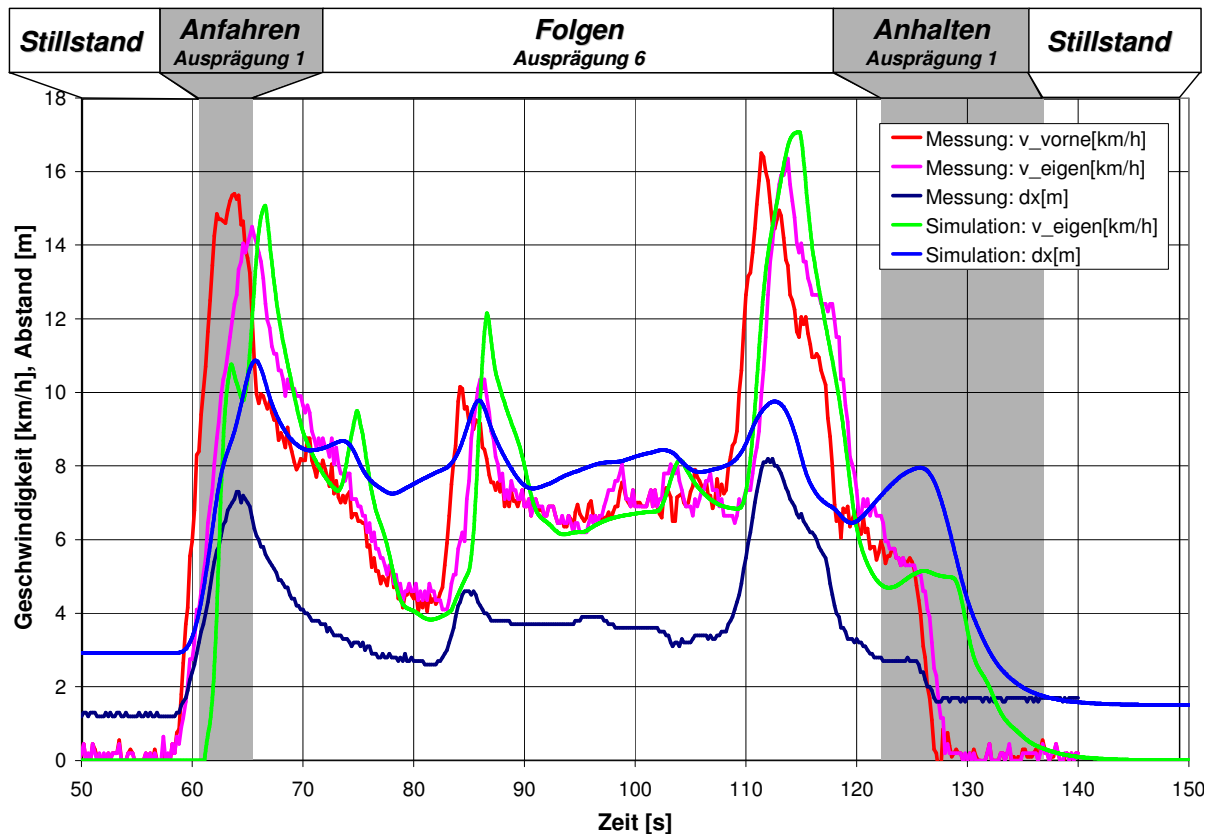


Bild 5: Simulationsergebnis unter Verwendung einer realen Vorderfahrzeuggeschwindigkeitstrajektorie

## 6. Zusammenfassung

Das Fahren auf der Autobahn im Stau stellt für den Fahrer eine belastende und ermüdende Verkehrssituation dar. Um den Fahrer auch in diesem niedrigen Geschwindigkeitsbereich bis hinunter in den Stillstand unterstützen zu können, wird das ACC zu einem so genannten Stauassistenten weiterentwickelt. Der Stauassistent soll den Fahrer nicht nur vom ständigen Anfahren und Bremsen entlasten und für mehr Fahrtkomfort sorgen, sondern auch durch einen gleichmäßigeren Fluss und homogenere Fahrzeugabstände den Verkehr effizienter und sicherer machen. Der Stau kann sich schneller auflösen und das Risiko von Auffahrunfällen sinkt. Um die genannten Ziele zu erreichen, wurde ein Modellgestütztes Prädiktives Regelungsverfahren für den Entwurf eines Längsreglers verwendet. Als Werkzeug zur Entwicklung der automatischen Längsführung kam eine Co-Simulation von

Matlab/Simulink und dem Verkehrsflusssimulationsprogramm PELOPS zum Einsatz. Anhand von Beispielen wurde das Verhalten des eingesetzten Regelungsverfahrens dargestellt.

## 7. Literatur

- [1] Clarke, D. W.; Mohtadi, C.; Tuffs, P. S.: Generalized Predictive Control - Part I and Part II, Automatica, Volume 23, Nr. 2, 1987.
- [2] Hücker, Jan: Selbsteinstellende und prädiktive Kompaktregler. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 855, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2000.
- [3] Krauss, Peter: Prädiktive Regelung mit linearen Prozessmodellen im Zustandsraum, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 560, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995.
- [4] Zambou, N.; Manfred, E.; Abel, D.: Längsdynamikregelung eines Fahrzeugkonvois mit Hilfe der Modellgestützten Prädiktiven Regelung, Telematik 2003, VDI-Berichte 1785, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2003.
- [5] Sandkühler, D.: Analyse von Stausituation für die Entwicklung eines Stauassistenten im Rahmen von Invent, unveröffentlichter Abschlussbericht, November 2002.
- [6] [www.pelops.de](http://www.pelops.de): Internet-Seite zum Verkehrsflusssimulationsprogramm Pelops, Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen (fka), 2003
- [7] Lee, J.H; Morari,M.; Garcia, C.E.; State-space Interpretation of Model Predictive Control, Automatica, Vol. 30, No. 4, pp. 707-717, Elsevier Science Ltd, 1994.
- [8] Maciejowski J.: Predictive Control with Constraints, Addison Wesley Longman Dezember 2001 ISBN: 0201398230