

# Simulationssystem zur Optimierung des Antriebsstrangs unter Einbeziehung des Verkehrsflusses

## Teil 1: Ein Simulationsmodell für den Autobahnverkehr

Von Günter Willmerding

Bei dem an der Fachhochschule Ulm entwickelten Verkehrsmodell stehen Aussagen über das Fahrzeug im Vordergrund. Das Modell ermittelt Geschwindigkeitszyklen in Abhängigkeit von der Topografie und den Fahrzeugeigenschaften. Dabei können bis zu fünf Autobahnspuren berücksichtigt werden. Diese Geschwindigkeitszyklen können dann für komplexe Fahrzeugmodelle genutzt werden, die zum Beispiel die Belastungen des Antriebsstrangs detailliert beschreiben.

Der vorliegende Teil 1 berichtet über die Erstellung eines praxisnahen Verkehrsmodells. Der folgende zweite Teil befaßt sich mit dem praktischen Einsatz dieses Modells bei der Entwicklung des Antriebsstrangs.

Die vorliegende Arbeit wurde vom baden-württembergischen Ministerium für Wissenschaft und Kunst gefördert.

### 1 Einleitung

Die Computersimulation hat sich als wichtige Hilfe bei der Entwicklung von Antriebssträngen etabliert, da eine Reduktion von Zeit und Kosten bei der Entwicklung notwendig ist. Auch lassen sich auf diese Weise neuartige Komponenten des Antriebsstrangs untersuchen, ohne daß dazu ein Bauteil hergestellt werden muß.

Bei den bisher üblichen Simulationen wird eine Vorgabe für den Geschwindigkeitsverlauf des Einzelfahrzeugs gemacht, wozu eine Grenzgeschwindigkeit, Wunschgeschwindigkeit oder aber ein gemessener Verlauf der Fahrgeschwindigkeit verwendet wird. Der Verkehrseinfluß ist auf diese Weise nur in dem vorgegebenen Geschwindigkeitsverlauf berücksichtigt. Dies macht sich insbesondere dann unangenehm bemerkbar, wenn Automobile untersucht werden sollen, die in ihren Eigenschaften weit von heute im Verkehr befindlichen abweichen.

Die bisher existierenden Verkehrsmodelle haben primär das Ziel, die im Verkehr auftretenden Phänomene zu beschreiben. Im Vordergrund steht dabei der fließende Verkehr, der mit makroskopischen oder mikroskopischen Modellen beschrieben wird. Makroskopische Modelle beschreiben ein Fahrzeugkollektiv, während mikroskopische Modelle vom Einzelfahrzeug ausgehen und den Verkehr durch das Zusammenwirken der Einzelfahrzeuge zu beschreiben versuchen. Die für die Fahrleistung wichtigen technischen Eigenschaften der einzelnen Fahrzeuge im Verkehr werden jedoch bisher kaum berücksichtigt. Eine zusammenfassende Darstellung ist in [1, 2] gegeben.

Das hier vorgestellte Modell verfolgt das Ziel, mehr Informationen über den An-

triebsstrang, dessen Belastung und Einsatzbedingungen zu gewinnen. Dazu wird eine mikroskopische Lösung eingesetzt, die von den Eigenschaften der Einzelfahrzeuge und der einzelnen Fahrer ausgeht und daraus für jedes Einzelfahrzeug den Geschwindigkeitsverlauf ermittelt.

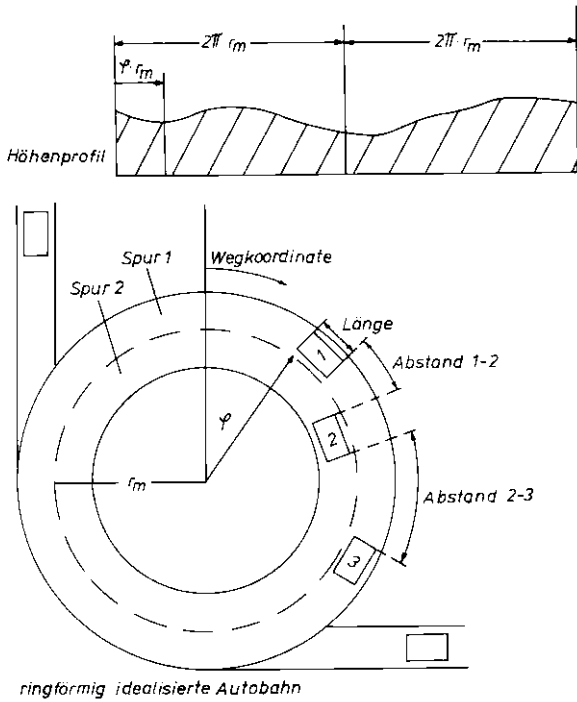
Dieser so erhaltene Geschwindigkeitszyklus kann dann für eine komplexe Simulation eines Einzelfahrzeugs verwendet werden, wozu auf ein mit dem Verkehrsmodell kompatibles Simulationsmodell für den Antriebsstrang zugegriffen wird. Es kann aber auch das komplexe Simulationsmodell in das Verkehrsmodell eingebunden werden, wozu dann allerdings sehr leistungsfähige Rechnerhardware verwendet werden sollte. Besonders geeignet sind hierzu Rechner mit paralleler Architektur.

### 2 Simulationsmodell des Verkehrs

Da eine Zuordnung der Fahrzeugeigenschaften zu den Vorgängen im Antriebsstrang erfolgen sollte, kamen nur Modelle in Frage, bei denen vom Einzelfahrzeug ausgegangen wird. Obwohl bei mikroskopischen Modellen vergleichsweise einfache Annahmen gemacht werden, können doch wichtige Phänomene des Verkehrsgeschehens beschrieben werden. So liefern die bei der Kolonnenfahrt verwendeten Fahrzeugfolgemodelle mit verschiedenen Hypothesen für die Abstandshaltung brauchbare Trends [1, 2].

Es wurde zunächst der Straßenverkehr auf der Autobahn als Aufgabenstellung gewählt, wobei jedoch alle auftretenden Verkehrsdichten berücksichtigt werden sollten. Es ist somit der freie Verkehr, bei dem sich die Fahrzeuge nicht gegenseitig behindern, und der sogenannte

# Simulationsmodell



**Bild 1: Modell der Autobahn mit Fahrzeugen und Höhenprofil, das an der kreisförmigen Autobahn abgewickelt wird**

*Fig. 1: Circular freeway model with cars and relief*

teilgebundene Verkehr mit gegenseitigen Behinderungen und Überholvorgängen zu berücksichtigen.

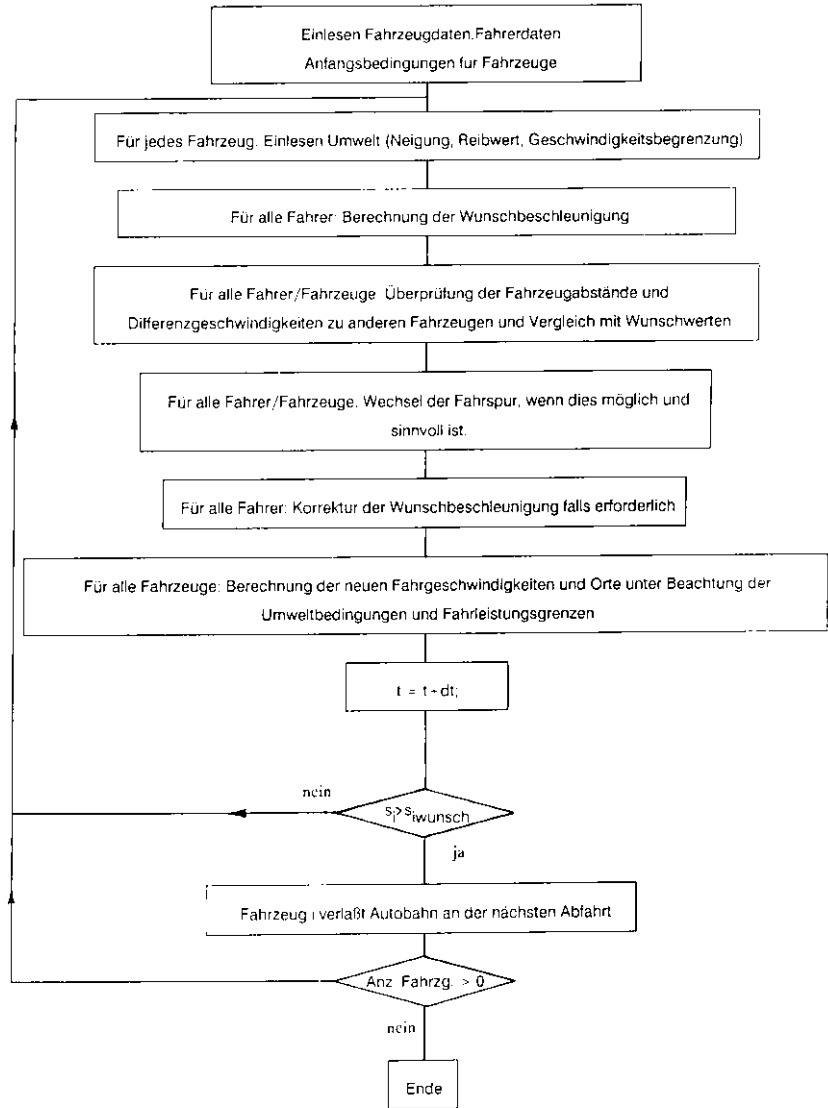
Da der Rechenaufwand für ein derartiges Modell mit der Anzahl der Fahrzeuge beträchtlich ansteigt, wurde das Modell der Fahrzeuge stark vereinfacht, und es wurde eine kreisförmige Autobahn angenommen, um mit einer endlichen Anzahl von Fahrzeugen ein Verkehrsgeschehen simulieren zu können.

Das Höhenprofil wird auf der ringförmigen Autobahn abgewickelt, so daß auch eine Streckenlänge dargestellt werden kann, die größer als der Kreisumfang ist. Mit dem Höhenprofil werden auch andere Umwelteigenschaften – wie der Reibwert der Fahrbahn und Geschwindigkeitsbeschränkungen – mitgeführt, **Bild 1**. Die Autobahn weist je eine Ein- und Ausfahrt auf.

Der Ablauf der Simulation erfolgt in der Weise, daß aus einer Anfangsbedingung heraus mit einer Zeitschrittweite von zur Zeit  $dt = 0,5\text{ s}$  für alle Fahrer und Fahrzeuge jeweils neue Orte und Geschwindigkeiten berechnet werden. Dabei versucht jeder Fahrer mit einer individuellen Strategie seine Wunschgeschwindigkeit unter Beachtung der Orte und Geschwindigkeiten der anderen Fahrzeuge zu erreichen. Das grobe Ablaufschema des Simulationsprogramms zeigt **Tafel 1**.

**Tafel 1: Grobes Ablaufschema des Simulationsprogramms**

*Table 1: Flow-chart of the computer-program of traffic simulation*



## A Simulation System to Optimize the Drive-Line – Part 1

by Günter Willmerding

Computer-programs for the design of power-trains have been developed since 1984 by the "Steinbeis-centre New Technologies in the field of traffic". Computer simulations have shown that you can receive realistic information about fuel consumption, road performance and assumed lifetime of driveline components.

First, however, you need given data concerning speed cycles which normally are measured.

To avoid the expensive measurement of speed-cycles the Fachhochschule Ulm have designed a traffic model that can be used in combination with simulation models to predict the fuel consumption and lifetime of components. Part 1 reports about the traffic-model, part 2 about the simulation-model.

Kennzeichen der Beschleunigungsphase ist, daß das Automobil mit annähernd konstanter, hoher Leistung bis nahe an die Wunschgeschwindigkeit fährt. Dabei wird die Wunschbeschleunigung nach Gl. (5) so berechnet, daß die verfügbare Leistung voll zur Beschleunigung genutzt wird.

In der Verzögerungsphase wird unterstellt, daß (wenn keine anderen Fahrzeuge stören) der Fahrer zwei bevorzugte Verzögerungen nutzt. Für den Fall, daß die Ereignisse für ihn vorhersehbar sind, gilt Gl. (6). Sind die Ereignisse nicht vorhersehbar, so gilt Gl. (7), wobei  $bv1$  und  $bv2$  fahrerabhängige Größen sind.

Die bisher beschriebenen Gleichungen des Fahrermodells liefern eine Wunschbeschleunigung für die aktuelle Fahr-situation, ohne daß der Einfluß durch andere Fahrzeuge berücksichtigt wurde.

Wenn andere Fahrzeuge vorhanden sind, sind zusätzliche Kriterien zu berücksichtigen. Die wichtigsten werden beschrieben.

Zur Vermeidung von Kollisionen beobachtet jeder Fahrer ein Vorausschauintervall in seiner Fahrspur, das durch Gl. (8) definiert ist.

Dabei stellt  $Aw_v$ , einen Wunschabstand dar, auf den später noch eingegangen wird. Befindet sich vor dem Fahrzeug innerhalb dieses Intervalls  $svor$ , in der gleichen Fahrspur kein anderes Fahrzeug und ist ein nachfolgendes Fahrzeug um mehr als den hinteren Wunschabstand  $Aw_h$ , entfernt und hat der Fahrer kein „Sozialverhalten“, so wird die Wunschbeschleunigung nach den Gl. (1) bis (7) gewählt. Der Fahrer verhält sich dann so, als sei er allein auf der Straße.

Fährt im Vorausschauintervall ein Fahrzeug mit geringerer Geschwindigkeit, so reagiert das Fahrzeug, wenn kein Spurwechsel möglich ist, mit einer Verzögerung, die aus der Differenzgeschwindigkeit, dem Differenzabstand und dem Wunschabstand nach Gl. (9a) und (9b) berechnet wird.

Physikalisch bedeutet dies, daß mit einer Verzögerung gebremst wird, die zur Erreichung des Wunschabstands erforderlich ist. Ist der Wunschabstand bereits unterschritten, wird mit der Verzögerung gebremst, die bei nicht vorhersehbaren Ereignissen auftritt. Zur Entscheidung über einen Spurwechsel wird geprüft, ob eine ausreichende Lücke in der Zielfahrspur vorliegt. Als ausreichend wird dabei angesehen, wenn diese Lücke größer als die Summe aus  $Aw_v$ ,  $Aw_h$  und der Fahrzeuglänge ist. Diese Abstände werden mit Gl. (10) und (11) berechnet, deren Koeffizienten für jeden Fahrer vorgegeben sind.

$$bw_i = \frac{Pv_i}{m_i \cdot V_i} \cdot \frac{Vw_i - V_i}{Vw_i} \cdot Fm_i \quad (1)$$

$$Pv_i = P_i - Pr_i - Pl_i - Ps_i \quad (2)$$

$$bw_i = Ga_i \cdot \frac{\mu_n}{m_i} \quad (3)$$

$$\mu_n = \mu \cdot Fm_i \quad (4)$$

$$bw_i = \frac{Pv_i}{m_i \cdot V_i} \cdot Fm_i \quad (5)$$

$$bw_i = -bv1 \cdot Fm_i \quad (6)$$

$$bw_i = -bv2 \cdot Fm_i \quad (7)$$

$$svor_i = caw_i \cdot Aw_v_i \quad (8)$$

wenn  $Ai_v_i > Aw_v_i$  (9a)

$$Aerf_i = -1/2 \cdot dv_i^2 / (Ai_v_i - Aw_v_i)$$

wenn  $Ai_v_i < Aw_v_i$  (9b)

$$Aerf_i = -bv2 \cdot Fm_i$$

$$Aw_v_i = (a0_i + a1_i \cdot V_i + a2_i \cdot V_i^2) \cdot \frac{1}{Fm_i \cdot \mu} \quad (10)$$

$$Aw_h_i = (b0_i + b1_i \cdot V_i + b2_i \cdot V_i^2) \cdot \frac{1}{Fm_i \cdot \mu} \quad (11)$$

$$Fm_i = 0,5 \cdot Fmp_i + 0,5 \cdot Fme_i \quad (12)$$

$$Fme_i = (t_i - tw_i) / t_i \quad (13)$$

Ein Teil der Fahrer, die ein „Sozialverhalten“ haben, prüfen, ob durch einen Spurwechsel, der dem eigenen Fahrzeug keinen Vorteil bringen muß, anderen Fahrzeugen Platz gemacht werden kann, um ihnen einen Spurwechsel oder das Einfädeln auf die Autobahn zu ermöglichen.

Zur Vermeidung von ständigem Spurwechsel (Oszillation) wurde die Spurwechselerbeit und die Spurwechselleistung eingeführt. Dabei wird davon ausgegangen, daß ein Spurwechsel sowohl geistige als auch mechanische Arbeit erfordert, die vom Fahrer zu erbringen ist. Dem steht eine individuelle Leistungsfähigkeit (= Anzahl Spurwechsel pro Zeiteinheit) des Fahrers gegenüber. Vor je-

dem Spurwechsel wird aus der Leistungsfähigkeit des Fahrers, der bereits erbrachten Spurwechselleistung und der Differenz von Wunschgeschwindigkeit und Ist-Geschwindigkeit eine Entscheidung errechnet. Auf diese Weise wird ein Spurwechselverhalten erreicht, das plausibel erscheint.

Da die mit dem Verkehrsmodell berechneten Geschwindigkeitsverläufe als Eingangswerte für Simulationsrechnungen verwendet werden, die Aussagen über Kraftstoffverbrauch und Lebensdauer ermöglichen sollen, muß auch eine der wichtigsten Einflußgrößen, der Fahrer, in möglichst großer Vielfalt berücksichtigt werden.

**Verwendete Formelzeichen**

- $a0, a1, a2$  Koeffizienten zur Berechnung des Wunschabstands vorn
- $Aerf$  notwendige Beschleunigung aufgrund anderer Fahrzeuge
- $Ai_v$  Ist-Abstand des Fahrzeugs zum Vordermann
- $Ai_h$  Ist-Abstand zum nachfolgenden Fahrzeug
- $ALPHA(s)$  Neigungswinkel der Fahrbahn als Funktion des Weges
- $AQ$  Querschnittsfläche des Fahrzeugs
- $Aw_v$  Wunschabstand zum Vordermann
- $Aw_h$  Wunschabstand zum nachfolgenden Fahrzeug
- $b$  Ist-Beschleunigung
- $b0, b1, b2$  Koeffizienten zur Berechnung des Wunschabstands hinten
- $bw$  Beschleunigung, die der Fahrer zu erreichen wünscht
- $bv1$  Wunschverzögerung bei vorhersehbaren Ereignissen
- $bv2$  Wunschverzögerung bei nicht vorhersehbaren Ereignissen
- $c$  Koeffizient zur Berechnung des Vorausschauintervalls
- $caw$  Faktor zur Berechnung des Vorausschauintervalls
- $c_w$  Luftwiderstandsbeiwert
- $ds_{i,j}$  Abstand der Fahrzeuge i und j

- $dv$  Differenzgeschwindigkeit zum vorausfahrenden Fahrzeug
- $F0$  Rollwiderstandsbeiwert
- $Fm$  Motivationsfaktor gesamt
- $Fmp$  anlagebedingter Motivationsfaktor
- $Fme$  ereignisabhängiger Motivationsfaktor
- $Ga$  Achslast des Fahrzeugs
- $i$  Nummer des Fahrzeugs
- $L$  Länge des Fahrzeugs
- $m$  Masse des Fahrzeugs
- $\mu$  Reibwert
- $\mu_n$  ausgenutzter Reibwert
- $P$  max. Antriebsleistung des Fahrzeugs
- $Pr, Pl, Ps$  Leistung des Roll-, Luft-, Steigungswiderstands
- $R$  Radius der Bahnkurve des Fahrzeugs
- $V$  Ist-Geschwindigkeit des Fahrzeugs
- $Vw$  Wunschgeschwindigkeit des Fahrers im Fahrzeug
- $s$  Ortskoordinate
- $svor$  Vorausschauintervall
- $t$  Fahrzeit
- $tw$  Wunschfahrzeit
- $Wr, Ws, Wl$  Roll-, Luft-, Steigungswiderstand

# Simulationsmodell

## 2.1 Modelleigenschaften des Fahrzeugs

Die Beschreibung der Fahrzeuge ist einfach, um den Aufwand der erforderlichen Daten, aber auch die Rechenzeit vertretbar zu halten. Für jedes einzelne Automobil – es werden zur Zeit maximal 100 Fahrzeuge gleichzeitig berücksichtigt – werden folgende Größen benötigt:

Masse, statische Achslasten, Schwerpunktlage, maximale Motorleistung, Rollwiderstandsbeiwert, Luftwiderstandsbeiwert, Querschnittsfläche und Länge.

Für die verfügbare Zugkraft am Rad wird angenommen, daß die Motorleistung bei jeder Fahrgeschwindigkeit vollständig zur Verfügung steht. Die übertragbaren Umfangskräfte werden durch eine am Reibwert der Fahrbahn orientierte Kraftschlußausnutzung begrenzt. Steigungs-, Roll- und Luftwiderstand werden berücksichtigt, **Bild 2**. Damit ist eine einfache Beschreibung des Fahrzeugs erfolgt, die aber doch wesentliche Eigenschaften wie die Beschleunigungs- und Bremsfähigkeit berücksichtigt.

## 2.2 Das Fahrermodell

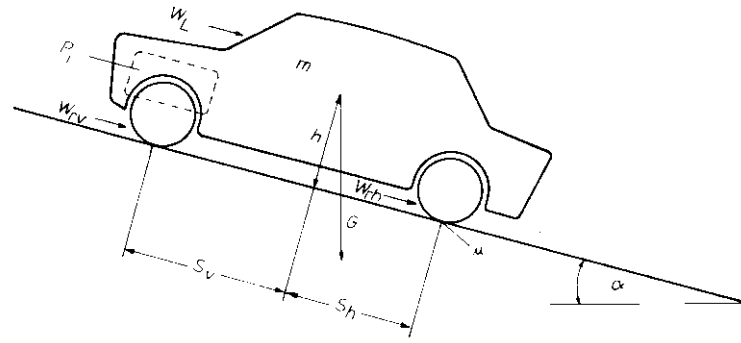
Es existieren viele Modelle, die das Verhalten von Fahrern im Straßenverkehr beschreiben. Insbesondere für das Folgeproblem, bei dem ein Fahrzeug dem anderen nachfährt, existieren die verschiedensten Ansätze für das entsprechende Fahrerverhalten [3, 4].

Ebenfalls existieren umfangreiche Untersuchungen auf empirischer Basis, in denen zum Beispiel die Abstände von Fahrzeugen in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit, die Häufigkeit von Überholvorgängen oder die auftretenden Beschleunigungen beschrieben und statistisch ausgewertet werden.

In der vorliegenden Arbeit wurden viele dieser Überlegungen aufgegriffen und für ein Simulationsmodell für den Verkehr auf Autobahnen verwendet, bei dem zusätzlich die Eigenschaften des Automobils im Hinblick auf die Belastungen des Antriebsstrangs berücksichtigt werden.

Um die Brauchbarkeit des Modells zu überprüfen, wurden statistische Daten des Verkehrs – wie der Fahrzeugdurchsatz der Straße in Abhängigkeit von Verkehrsdichte und Fahrgeschwindigkeit – durch Simulation ermittelt und mit Meßergebnissen und Daten aus [1, 2, 3] verglichen. Es lagen auch teilweise sehr detaillierte Meßdaten von Einzelfahrzeugen im Fahreinsatz vor, wobei allerdings zusätzlich nur eine grobe Information über die Verkehrsdichte und das vorausfahrende und das folgende Fahrzeug vorlag.

Prinzip des Fahrermodells ist, daß es eine für jeden Fahrer/Fahrzeug vorgegebene Wunschgeschwindigkeit  $V_w$  unter Beachtung der physikalischen Eigen-



**Bild 2: Fahrzeugersatzmodell des Einzelfahrzeugs**

Fig. 2: Computer variations of a given model

schaften des eigenen Fahrzeugs, der Orte und Geschwindigkeiten der anderen Fahrzeuge, der Umwelt (Neigung und Reibwert der Fahrbahn) und der Geschwindigkeitsbeschränkungen zu erreichen versucht. Als Wunschgeschwindigkeit wird dabei die Geschwindigkeit bezeichnet, die der Fahrer auf freier Strecke fahren würde. Das Fahrermodell errechnet daraus eine Wunschbeschleunigung, die in das Fahrzeugmodell ein- geht.

Wie diese Wunschbeschleunigung erhalten wird, soll zunächst an dem einfachsten Fall, daß ein Fahrer ungehindert von anderen Verkehrsteilnehmern einen vorgegebenen Wunschgeschwindigkeitsverlauf erreichen will, beschrieben werden.

Eine Einteilung des Fahrzyklus in drei Phasen hat sich – insbesondere im Hinblick auf das später zu behandelnde komplexe Modell des Einzelfahrzeugs – als sinnvoll erwiesen, **Bild 3**:

- Beschleunigungsphase (positive Beschleunigung)
- Konstantfahrt
- Verzögerungsfahrt (negative Beschleunigung).

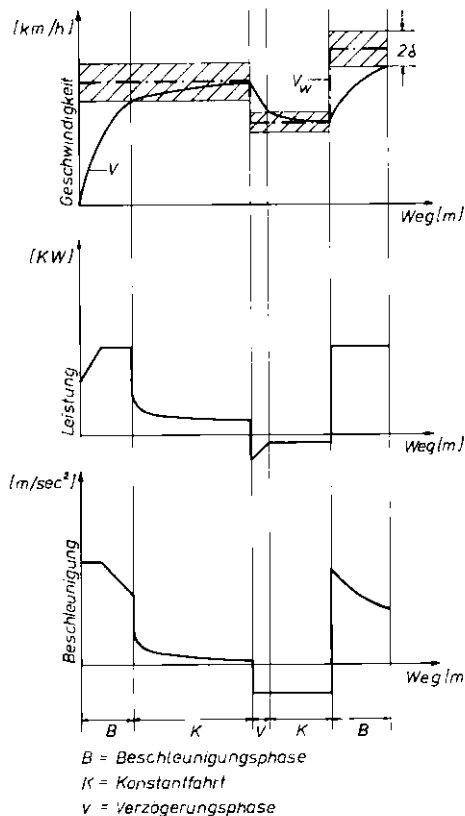
Die Konstantfahrt ist so definiert, daß die Ist-Geschwindigkeit von der Wunschgeschwindigkeit nicht mehr als einen bestimmten Prozentsatz – als günstig haben sich 5% erwiesen – abweicht. In diesem Bereich wird mit geringer Beschleunigung die Wunschgeschwindigkeit angestrebt, oder es erfolgt ein Pendeln um diese.

Die Wunschbeschleunigung des Fahrzeugs  $i$  wird dabei mit Gl. (1) und (2) berechnet.

Dabei ist  $P_v$ , die Überschussleistung, die nach Abzug der Leistungen für die Fahrwiderstände verbleibt. Der Faktor  $F_m$ , charakterisiert den Fahrer und wird als Motivationsfaktor bezeichnet. Er nimmt Werte zwischen 0 und 1 an, wobei 0 den Wunsch nach keiner Fortbewegung, 1 den Wunsch nach möglichst schneller Fortbewegung kennzeichnet. Für einen realistischen Fahrbetrieb liegen die Werte zwischen 0,7 und 1.

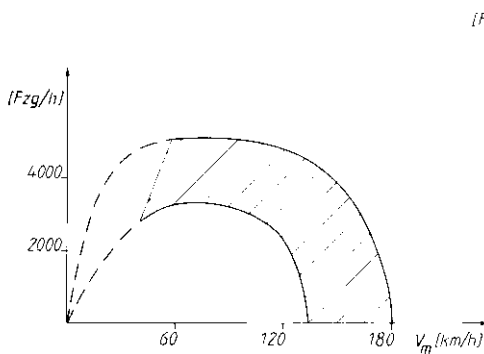
Übersteigt der zur Realisierung der Wunschbeschleunigung erforderliche Reibwert  $\mu$  die Kraftschlußausnutzung  $\mu_n$ , so wird die Wunschbeschleunigung  $b_w$ , nach Gl. (3) und (4) begrenzt.

Das Fahrermodell hat in den einzelnen Phasen des Zyklus damit folgende Eigenschaften. Bei der Konstantfahrt nähert sich – wird es nicht durch andere Fahrzeuge gestört – die Ist-Geschwindigkeit asymptotisch an die Wunschgeschwindigkeit an.



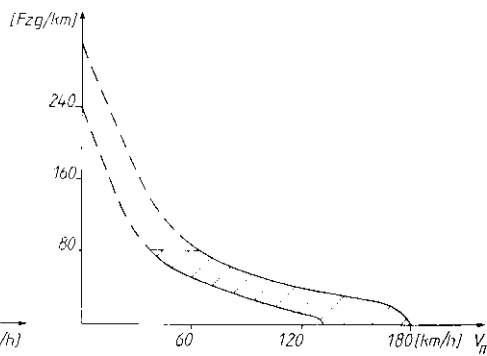
**Bild 3: Verlauf von Wunsch- und Ist-Geschwindigkeit, Leistung und Beschleunigung in den einzelnen Phasen des Fahrzyklus**

Fig. 3: Linkage of desired speed  $V_w$ , actual speed  $V$ , power and acceleration during particular phases of the speed-distance-profile



**Bild 4: Berechnete Anzahl der Fahrzeuge pro Stunde auf einer zweispurigen Autobahn als Funktion der mittleren Fahrgeschwindigkeit aller Fahrzeuge**

*Fig. 4: Computed traffic counts of vehicles as a function of their mean speed on a two-lane-freeway*



**Bild 5: Berechnete Fahrzeugdichte auf einer zweispurigen Autobahn als Funktion der mittleren Fahrgeschwindigkeit aller Fahrzeuge**

*Fig. 5: Computed traffic density of vehicles as function of their mean speed on a two-lane-freeway*

Dies erfolgt über eine Motivationsfunktion, die den Motivationsfaktor  $F_m$  liefert, der bereits in den Gl. (1) bis (6) verwendet wurde.  $F_{m_i}$  nimmt Werte zwischen 1 und 0 an. Liegt der Wert  $F_{m_i} = 1$  vor, so wird unter Ausnutzung der maximalen Leistung gefahren. Der Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug reduziert sich, und die Kraftschlußgrenze wird ausgenutzt. Der Motivationsfaktor geht somit in Kraftstoffverbrauch, Fahrzeit und Lebensdauer ein.

Bei der Berechnung des Motivationsfaktors wird von einem personenbezogenen Anteil  $F_{m_p}$  und einem ereignisabhängigen Anteil  $F_{m_e}$  ausgegangen, die sich nach Gl. (12) zu einem Wert addieren.

$F_{m_p}$  stellt dabei die Veranlagung des Fahrers dar, die sich während einer Fahrt nicht verändert.  $F_{m_e}$  ist ein ereignisabhängiger Wert, der aus der Differenz von Wunschfahrzeit und Ist-Fahrzeit mit Gl. (13) ermittelt wird.

Dabei ist  $t_i$  aktuelle Fahrzeit des Fahrzeugs  $i$  am aktuellen Ort  $s_i$ ,  $t_w$  die Wunschfahrzeit, die sich ergibt, wenn

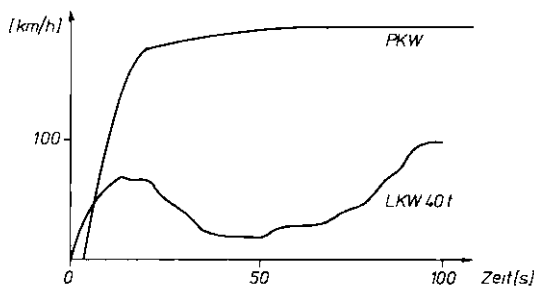
mit der Wunschgeschwindigkeit gefahren würde. Dieser Motivationsfaktor wird nicht kontinuierlich, sondern in festen Intervallen von fünf bis zehn Minuten neu berechnet.

Das hier nur kurz skizzierte Fahrermodell ist einerseits bereits recht umfangreich, und die erforderlichen Eingabedaten sind komplex. Gemessen an der Realität ist das Modell jedoch sehr einfach, da wesentliche Phänomene (Querdynamik, Lichtzeichen) überhaupt nicht berücksichtigt wurden.

### 3 Ermittlung der Eingabedaten

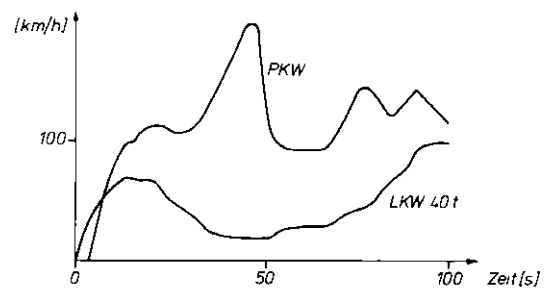
Zur Durchführung von Simulationen sind viele Eingabedaten erforderlich. Die Ermittlung von Fahrzeugdaten ist vergleichsweise einfach, und auch eine statistisch brauchbare Abschätzung der am Verkehr beteiligten Fahrzeuge ist möglich.

Am schwierigsten war die Festlegung der Modelldaten für die Fahrer, die ja in



**Bild 6: Geschwindigkeitsverlauf eines Lkw und eines Sportwagens auf einer freien Autobahn mit zwei Spuren**

*Fig. 6: Speed profiles of a truck and a sports car in freely flowing traffic on a two-lane-freeway*



Geschwindigkeitsverlauf 20 Fahrzeuge pro km

**Bild 7: Berechneter Geschwindigkeitsverlauf des Lkw und des Sportwagens aus Bild 6 bei einer Verkehrsdichte von 20 Automobilen pro km auf einer dreispurigen Autobahn**

*Fig. 7: Calculated speed-profile of the truck and the sports car in constrained traffic (20 veh/km) on a three-lane-freeway*

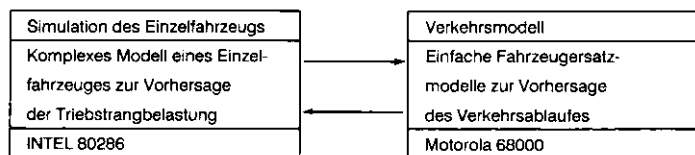
der Realität nicht meßbar sind. Die Koeffizienten für das Modell der Abstandshaltung wurden so gewählt, daß möglichst alle im Verkehr anzutreffenden Verhaltensweisen vom zu dichten Auffahren bis zur defensiven Abstandshaltung abgedeckt werden. Das Vorausschauintervall wurde mit dem Drei- bis Fünffachen des Wunschabstands vorn gewählt, der Wunschabstand hinten wurde gleich dem Wunschabstand vorn gewählt.

Ergebnisse aus Messungen des Verkehrsflusses [1-3] – wie der Durchsatz der Straße in Fahrzeugen pro Stunde in Abhängigkeit von der mittleren Geschwindigkeit oder der Anzahl der Fahrspurwechsel in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte [3] – erlaubten eine Eingrenzung der Modellparameter.

Aus Meßergebnissen an Einzelfahrzeugen lagen Daten der Fahrgeschwindigkeit und anderer Größen des Triebstrangs vor, aus denen bevorzugte Verzögerungen ermittelt werden konnten. Weiterhin waren Belastungskollektive des Motors bekannt, die einen weiteren Vergleich mit dem Simulationsmodell ermöglichten. Eine durch Simulation erhaltene Abhängigkeit wichtiger Parameter des Verkehrs zeigen die **Bilder 4 und 5**, bei denen ein Bereich angegeben ist, in dem – je nach Eingabedaten für Fahrer und Fahrzeuge – die Ergebnisse lagen.

### 4 Simulationsergebnisse

Besonderes Interesse besteht an den Geschwindigkeitsverläufen für die Einzelfahrzeuge, aus denen dann die Belastungen des Antriebsstrangs berechnet werden sollen. Dazu wurde das Verhalten zweier Fahrzeuge, ein Lkw mit 40 t Gesamtgewicht und ein Pkw, mit identischen Fahrerdaten auf einer sonst völlig freien, bergigen Autobahn in **Bild 6** dargestellt. Da die Autobahn zweispurig ist, behindern sich die Fahrzeuge nicht gegenseitig. Die relativ niedrige Fahrgeschwindigkeit des Lkw resultiert aus der großen Steigung der Fahrstrecke.



**Tafel 2: Aufteilung der Rechenleistung zwischen zwei Prozessoren eines Rechners**

Table 2: Partitioning of the traffic-model to two processors

Der Einfluß des Verkehrs auf die Geschwindigkeitszyklen der beiden Fahrzeuge ist aus **Bild 7** ersichtlich. Dort sind die Geschwindigkeitszyklen für eine Verkehrsdichte von 20 Fahrzeugen pro km angegeben. Der Lkw wird kaum in seinem Geschwindigkeitszyklus beeinträchtigt, die Darstellung für den gut motorisierten Pkw ändert sich erheblich.

## 5 Vorgänge im Antriebsstrang

Die Untersuchung der Vorgänge im Antriebsstrang von Automobilen wird durch das vorliegende Verkehrsmodell unterstützt, indem die simulierten Geschwindigkeitszyklen als Eingabe für eine Simulation des Antriebsstrangs verwendet werden. Diese „Off-Line“-Kopplung mit dem Simulationsmodell kann nur in der Weise erfolgen, daß der berechnete Geschwindigkeitsverlauf des Verkehrsmodells als Wunschgeschwindigkeitsverlauf interpretiert und nachgefahren wird. Eine bessere Lösung ist die „On-Line“-Kopplung, bei der eines der am Verkehrsmodell beteiligten Fahrzeuge in seiner Komplexität berücksichtigt wird. Um vertretbare Rechenzeiten zu erreichen, wird diese Kopplung zur Zeit auf einem Rechner mit zwei Prozessoren, die einen Datenaustausch betreiben, **Tafel 2**, programmiert.

Eine kritische Bewertung der Einsatzmöglichkeiten des Verkehrsmodells zeigt, daß besonders dann, wenn Grenzwertabschätzungen gefordert werden, Simulationen mit unterschiedlichen Verkehrsdichten interessant werden. Als Ergänzung zu meßtechnisch erhaltenen Zyklen läßt sich damit die Treffsicherheit von Vorhersagen zum Kraftstoffverbrauch und Lebensdauer erhöhen. Die Verbindung des Verkehrsmodells mit einem Modell zur Antriebsstrangsimulation wird im Teil 2 beschrieben.

## Literaturhinweise

- [1] Leutzbach, W.: Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses. Springer-Verlag 1972, ISBN 3-540-05724-2
- [2] Leutzbach, W.: Introduction to the theory of traffic flow. Springer-Verlag 1988, ISBN 3-540-17114-4
- [3] Leutzbach, W.: Probleme der Kolonnenfahrt. Straßenbau und Verkehrstechnik Heft 44, 1966. Herausgeber: Bundesminister für Verkehr
- [4] Leutzbach, W. und V. Papavasiliou: Wahrnehmungsbedingungen und sicheres Verhalten im Straßenverkehr: Wahrnehmung in konkreten Verkehrssituationen. Bericht zum Projekt 8306 der Bundesanstalt für Straßenwesen, April 1988
- [5] Ruwenstroth, G., E.-C. Kuller und F. Radder: Untersuchungen zu Determinanten der Geschwindigkeitswahl, Bericht 3: Situationsangemessene Geschwindigkeitswahl auf Außerortsstraßen (ohne BAB). Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Projekt 8525, Bereich Unfallforschung, Februar 1988
- [6] Grimm, G.: Wahrnehmungsbedingungen und sicheres Verhalten im Straßenverkehr: Situationsübergreifende Aspekte. Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Projekt 8306, Bereich Unfallforschung, April 1988

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr.-Ing. Günter Willmerding  
Rosenstraße 5  
D-7908 Oberstotzingen