

Visualisierung der fahrzeugbezogenen und verkehrlichen Dynamik mit und ohne Beeinflussungs-Systeme

Martin Treiber*
TU Dresden

Dirk Helbing†
TU Dresden

Zusammenfassung

Jeder hat aus eigener Anschauung einen reichen Erfahrungsschatz für die Straßenverkehrsdynamik. Damit ist bei der Entwicklung von Mikromodellen für Beschleunigung und Spurwechsel ein 3d-Verkehrssimulator unumgänglich. Dies gilt sowohl für das Nachmodellieren menschlicher Fahrer als auch für die Entwicklung sicherer, effizienter und komfortabler Beschleunigungsregler (Adaptive Cruise Control, ACC). Wir stellen eine Visualisierung vor, die simultane Simulation und Darstellung von dichtem Verkehr und Stop-and-Go Verkehr sowohl von der Fahrerperspektive als auch vom Hubschrauber aus ermöglicht. Neben einem Tacho besitzen unsere virtuellen Fahrzeuge auch einen "Coffeemeter" genannten Sensor für die Beschleunigung und den Ruck – eine simple Kaffeetasse, aus der der Kaffee bei zu ungestümer Fahrweise überschwappt. Zur Demonstration lassen wir ein mit verschiedenen Modellen getriebenes Testfahrzeug im Verkehrsstrom "mitschwimmen" und vergleichen die von den Modellen generierten "Fahrstile". Außerdem visualisieren wir die verkehrliche Wirkung von ACC-Fahrzeugen bei verschiedenen Ausstattungsgraden.

1 Einleitung

Die Modellierung der Verkehrsdynamik auf mikroskopischer Ebene und insbesondere die Nachbildung des Fahrverhaltens menschlicher Fahrer ist ein kontroverses Thema [BM99, Hel01]. Unumstritten ist nur, dass für die Fahrverhaltens-Modellierung nur zeitkontinuierliche Mikromodelle und keine zelluläre Automaten in Frage kommen, da bei letzteren die Beschleunigung nicht definiert ist.

Neben sehr einfachen "mechanischen" Modellen wie dem Newell-Modell [New61] und dem Optimal-Velocity Modell (OVM) [BHN⁺95] gibt es auch Modelle wie das von Wiedemann [Wie74], welche das menschliche Fahrverhalten sehr detailliert beschreiben und auch Spurwechsel enthalten. Abwandlungen des Wiedemann-Modells sind in kommerzieller Simulations-Software wie VISSIM und PELOPS implementiert.

Mit dem Aufkommen von automatisierten Temporeglern für die Longitudinalbewegung (Adaptive Cruise Control, ACC) wird es zunehmend wichtig, nicht nur das menschliche

*Fakultät Verkehrswissenschaften "Friedrich List", Institut für Wirtschaft und Verkehr, Andreas-Schubert-Str. 23, D-01062 Dresden, Germany

†Fakultät Verkehrswissenschaften "Friedrich List", Institut für Wirtschaft und Verkehr, Andreas-Schubert-Str. 23, D-01062 Dresden, Germany

Fahrverhalten nachzubilden, sondern auch sichere, komfortable und effiziente ACC-Regler zu entwickeln und deren verkehrliche Auswirkungen zu simulieren. In den wenigen, bisher durchgeführten Untersuchungen gab es einander widersprechende Ergebnisse. Teils wurde eine erhebliche Reduktion der Stauwahrscheinlichkeit gefunden [TH01], teils aber auch das Gegenteil.

Regler haben gegenüber menschlichen Fahrern den Vorteil vernachlässigbarer Reaktionszeit und fehlerarmer Messung von Geschwindigkeiten und Abständen, können aber nicht, wie der Mensch, zukünftige Situationen antizipieren oder z.B. auf übernächste Nachbarn reagieren. Daher ist es gar nicht so leicht, komfortable und gleichzeitig verkehrlich effiziente Regler zu entwerfen. Um den Fahrkomfort überhaupt zu bestimmen und um zu beurteilen, ob die Fahrweise des Reglers "natürlich" wirkt, ist eine Visualisierung unumgänglich. Dasselbe gilt für die Entwicklung von Modellen für das menschliche Fahrverhalten. Eine zweidimensionale Draufsicht, die zur Darstellung von verkehrlichen Auswirkungen sehr nützlich ist [App], reicht dann nicht mehr aus.

In dieser Arbeit wird ein Simulations- und Visualisierungstool vorgestellt, in dem ACC-Regler oder Modelle für menschliches Fahren flexibel untersucht sowie der Grad des Fahrkomforts mit einem speziellen Feature ("Coffeemeter") verdeutlicht werden kann [mov]. Das Tool stellt das Verhalten des Fahrermodells oder des Reglers aus der Fahrersicht, aus der Sicht benachbarter Fahrzeuge (wichtig für die Entwicklung von Spurwechselmodellen) oder aus der Hubschrauberperspektive dar. Außerdem berechnet es verkehrliche Aspekte wie Kapazität und Stabilität des Verkehrsflusses, Zusammenbruchwahrscheinlichkeit, Reisezeiten, Kraftstoffverbräuche etc. Der Simulator wird hier mit dem Intelligent-Driver Model (IDM) [THH00] als Longitudinalmodell und dem MOBIL Prinzip ("Minimizing Overall Braking Induced by Lane changing") [TH02] als Spurwechselmodell demonstriert. Das IDM ist deterministisch, hat anschauliche Parameter und weist in nahezu allen Situationen realistische Beschleunigungen auf, so dass es sich als Basismodell für einen Regler eignet. Es lässt sich auch um Aspekte menschlichen Verhaltens wie den "Resignationseffekt" nach langer Staufahrt erweitern [TH03].

Im nächsten Abschnitt werden die Modelle IDM und MOBIL vorgestellt, im Abschnitt 3 das Simulationstool selbst. In Abschnitt 4 wird mit dem Tool ein (realer) menschlicher Fahrer mit der Fahrdynamik des IDM verglichen sowie die verkehrlichen Auswirkungen eines ACC-Reglers untersucht. Abschnitt 5 schließt mit einer Diskussion und dem Ausblick.

2 Modelle für die Fahrdynamik

2.1 Longitudinalmodell

In dieser Arbeit wird für alle Fahrzeuge das IDM verwendet. Im IDM hängt die Beschleunigung \dot{v} von der Geschwindigkeit v , dem Nettoabstand s zum Vorderfahrzeug

(Stoßstange zu Stoßstange) sowie der Annäherungsrate Δv an das Vorderfahrzeug ab:

$$\dot{v} = a \left[1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^4 - \left(\frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 \right]. \quad (1)$$

Dies ist eine kontinuierliche Interpolation zwischen der Beschleunigung auf die Wunschgeschwindigkeit v_0 mit einer maximalen Beschleunigung a auf freier Strecke und einer Wechselwirkungs-Verzögerung $-a(s^*/s)^2$, die gegenüber der Beschleunigung überwiegt, wenn der Abstand zu gering ist oder die Annäherungsrate zu groß wird. Der effektive Wunschabstand,

$$s^*(v, \Delta v) = s_0 + vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}}, \quad (2)$$

enthält neben der gewünschten Zeitlücke T und einem Mindestabstand s_0 auch einen dynamischen Anteil proportional zur Annäherungsrate, der das "intelligente" Bremsverhalten realisiert und die Verzögerung, wenn möglich, auf die Wunschverzögerung b beschränkt.

2.2 Spurwechselmodell MOBIL

Basis ist die Beurteilung der lokalen Verkehrs-Situation, d.h. der Positionen und Geschwindigkeiten der maximal sechs nächsten Nachbarn (bei drei oder mehr Spuren).

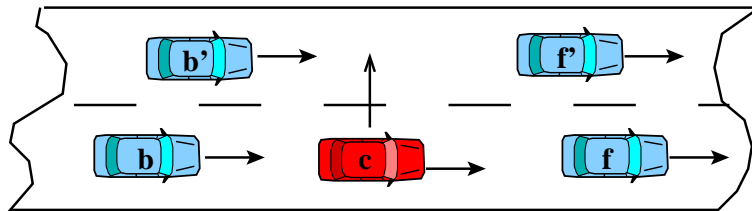


Abbildung 1: Anordnung der Fahrzeuge zur Erklärung des Spurwechselmodells MOBIL

Als *Sicherheitskriterium* wird die nach einem zunächst fiktiven Wechsel erforderliche Bremsverzögerung $a_{b'c}$ des Hinterfahrzeugs auf der Zielspur herangezogen:

$$a_{b'c} \geq -b_{\text{save}} \quad (3)$$

Hierbei ist

$$a_{\alpha\beta} = a^{\text{IDM}}(v_\alpha, s_{\alpha\beta}, v_\alpha - v_\beta) \quad (4)$$

die mit dem IDM oder mit anderen Longitudinalmodellen berechnete Beschleunigung des Fahrzeugs α , wenn Fahrzeug β im Nettoabstand $s_{\alpha\beta}$ vor ihm fahren würde. Aufgrund der Abhängigkeit der IDM-Beschleunigung von der Annäherungsrate wird die in der Praxis sehr wichtige Abhängigkeit von der Geschwindigkeitsdifferenz automatisch berücksichtigt.

Ein *Anreizkriterium* für einen Wechsel ist dann gegeben, wenn nach einem zunächst fiktiven Wechsel die Summe aus der eigenen (IDM-)Beschleunigung und die mit einem Höflichkeitsfaktor p gewichteten Beschleunigungen der beteiligten Nachbarfahrzeuge um mindestens die Wechselschwelle δ höher ist als zuvor (MOBIL-Prinzip). Im einfachsten symmetrischen Fall ergibt dies die Bedingung

$$\underbrace{a_{cf'} + p(a_{b'c} + a_{bf})}_{\text{nach dem Wechsel}} > \underbrace{a_{cf} + p(a_{bc} + a_{b'f'})}_{\text{vor dem Wechsel}} + \delta.$$

Im Simulator wurde MOBIL um einen stetigen Spurwechsel mit einer endlichen Spurwechselzeit von 2-3 s erweitert. Erweiterungen auf unsymmetrische Verhältnisse (z.B. Rechtsfahrgebot) sind leicht möglich. Verallgemeinerungen auf Longitudinal-Transversal-Kopplungen wie "Auf-Lücke Fahren", Einscheren nach dem "Reißverschluss-Verfahren", Beschleunigung in Antizipation von Spurwechseln oder auch Beachten des Rechtsüberholverbots werden zur Zeit entwickelt.

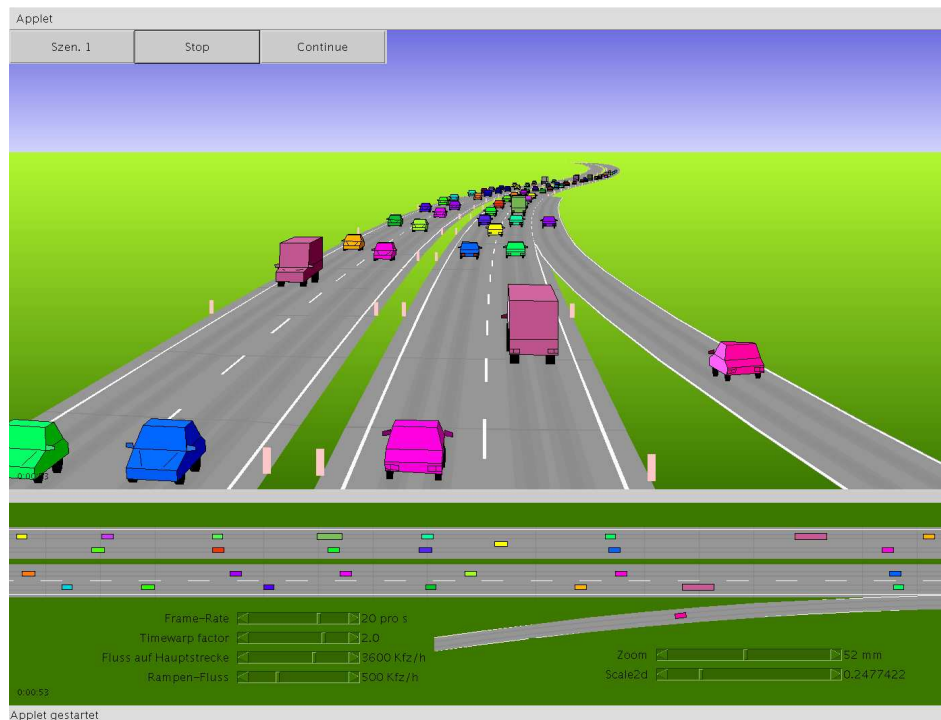


Abbildung 2: Visualisierung der Stautenstehung aus der Hubschrauberperspektive

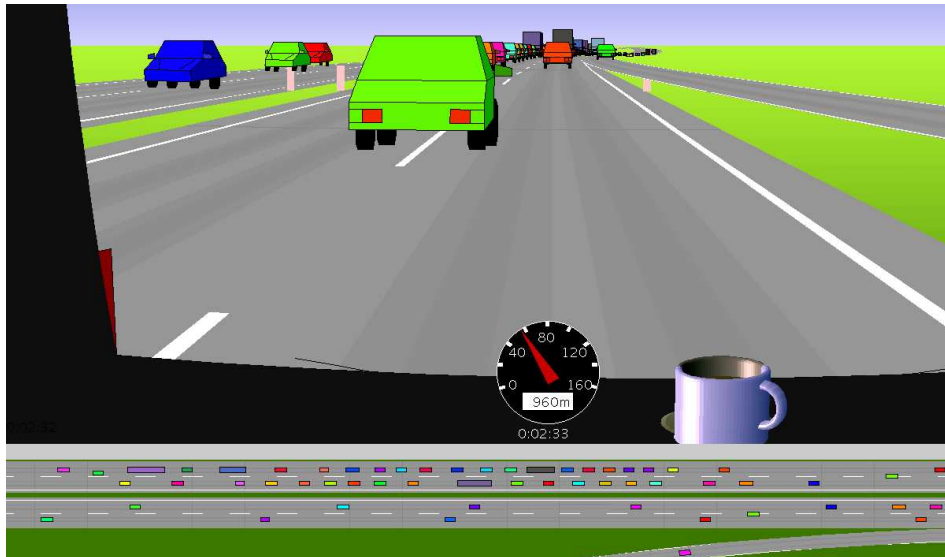


Abbildung 3: Visualisierung der Stautenstehung aus der Fahrerperspektive. Das "Coffeemeter" zeigt verschütteten Kaffee, was auf eine sehr unsanfte Fahrweise mit ruckhaften Beschleunigungen und/oder Spurwechseln hinweist. Das (rote) Bezugsfahrzeug hinter dem einschlerenden Fahrzeug ist unten auch in der Vogelperspektive erkennbar.

3 Das Simulations- und Visualisierungstool

Das Tool wurde in Java programmiert und simuliert auf einem Laptop etwa 300 Fahrzeuge in Echtzeit. Verkehrsflüsse auf der Hauptstrecke und den Zufahrten sowie die Aufteilung auf Fahrer-Fahrzeugklassen bzw. Mikromodelle sind interaktiv per Schieberegler oder per Datei steuerbar. Fahrer-Fahrzeugklassen können z.B. PKWs oder LKWs mit verschiedenen Fahrertypen (vorsichtige, aggressive, erfahrene ...) oder auch mit ACC-Reglern ausgestattete Fahrzeuge sein, wobei man für letztere die Auswirkungen verschiedener Einstellungen von Wunschgeschwindigkeit und Folgezeitlücken untersuchen kann.

Neben Auffahrten können weitere Streckeninhomogenitäten wie Spursperrungen, Steigungen, Engstellen oder Zonen mit Tempolimits simuliert werden. Neue Longitudinalmodelle und Spurwechselmodelle können unkompliziert durch "Implementieren" der "Java-Interfaces" `MicroModel` bzw. `LaneChange` integriert werden. Je nach Version gibt es gleichzeitig bis zu drei Darstellungsarten,

- die Fahrerperspektive mit "Coffeemeter" und Verbrauchsanzeige,
- die Hubschrauberperspektive,
- und eine schematische Draufsicht ("Vogelperspektive").

Das Bezugsfahrzeug für die Fahrerperspektive kann durch einfachem Mausclick in jedem der Fenster neu gewählt werden. In allen Fenstern kann navigiert und gezoomt werden. Im Folgenden werden die für die Modellentwicklung und -bewertung wichtigen Elemente "Coffeemeter" und Verbrauchsanzeige vorgestellt.

3.1 Das "Coffeemeter"

Ein voller Becher Kaffee veranschaulicht auf plastische Weise die simulierten Beschleunigungen sowie die als "Ruck" empfundenen Ableitungen der Beschleunigungen in Longitudinalrichtung und bei Spurwechseln in transversaler Richtung. Durch Bestimmen der maximalen Kaffee-Füllhöhe, bei der gerade noch kein Überschwappen auftritt, erhält man ein *quantitatives Maß* für den Fahrkomfort.

Die hydrodynamischen Gleichungen der Kaffeeoberfläche in einer Tasse mit Durchmesser $2r$ werden erstaunlich realistisch durch die eines getriebenen harmonischen Pendels in zwei Freiheitsgraden ϕ_x und ϕ_y angenähert:

$$\ddot{\phi}_x + \frac{2\pi}{\tau} \dot{\phi}_x + \omega_0^2 \phi_x + \frac{\ddot{x}}{r} = 0, \quad (5)$$

$$\ddot{\phi}_y + \frac{2\pi}{\tau} \dot{\phi}_y + \omega_0^2 \phi_y + \frac{\ddot{y}}{r} = 0. \quad (6)$$

Dabei bedeuten ϕ_x und ϕ_y die Winkel der Normalen der Kaffeeoberfläche mit der Senkrechten und \ddot{x} und \ddot{y} die Fahrzeug-Beschleunigungen in longitudinaler und transversaler Richtung. Die Kreisfrequenz ist $\omega_0 = \sqrt{g/r}$ (g ist die Gravitationsbeschleunigung). Die Dämpfungszeit τ wurde empirisch zu $\tau = 12$ s bestimmt.

3.2 Die Verbrauchsanzeige

Auf ebener Strecke hängt bei gegebenen Motor- und Fahrzeugparametern (Motorkennfeld, -leistung, -temperatur, c_w -Wert des Fahrzeugs, Zuladung ...) der Treibstoffverbrauch im Wesentlichen ab

- von der Geschwindigkeit,
- von der Beschleunigung
- und vom Gang.

Da Geschwindigkeit und Beschleunigungen simuliert werden, kann bei gegebenem Schaltschema der aktuelle Verbrauch direkt angezeigt werden. In Abb. 4 wurde aus den Daten eines Mittelklassefahrzeugs die Fahrzeug-Verbrauchscharakteristik für eine *verbrauchsoptimale* Gangwahl errechnet. Man bekommt dabei neben der Verbrauchsanzeige auch Informationen über die aktuelle Drehzahl und über die Zeitpunkte des Schaltens (z.B. Runterschalten, wenn beschleunigt werden soll), was akustisch umgesetzt werden könnte. Beachtenswert ist in Abb. 4 der große Bereich an Geschwindigkeiten und Beschleunigungen, die jenseits der Motorleistung liegen. Einfache Modelle wie das OVM liefern jedoch regelmäßig solche "verbotenen" Arbeitspunkte.

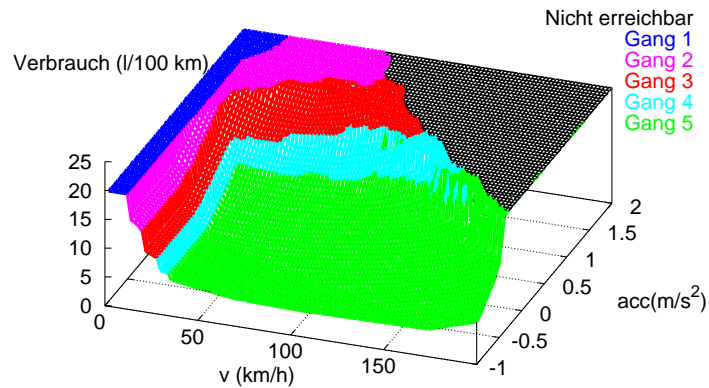


Abbildung 4: Verbrauchsoptimale Gangwahl und dazugehörige Fahrzeug-Verbrauchscharakteristik für einen VW Passat mit Benzinmotor (85 kW) auf ebener Fahrbahn als Basis für die Verbrauchsanzeige. Die Darstellung wurde bei 20 l/100 km abgeschnitten. Der Bereich rechts hinten entspricht höheren Leistungen oder Drehmomenten als vom Motor bereitgestellt werden kann.

4 Anwendungsbeispiele

4.1 Modelltest an einzelnen Testfahrzeugen

In diesem Beispiel wird die Fahrweise eines Versuchsfahrers bei Fahrt in dichtem Stadtverkehr mit Ampelstopps mit der vom IDM generierten Dynamik verglichen. Die Testfahrt liegt in Form von Zeitreihen für die Geschwindigkeit und die Beschleunigung sowie für den Nettoabstand zum Vorderfahrzeug vor und wurde bereits mit verschiedenen Modellen verglichen [TH98]. Interessant ist hier, dass direkt menschliches Fahrverhalten visualisiert werden kann. Obwohl das IDM eher einem ACC-Regler als einem menschlichen Fahrer entspricht, zeigt es nach Kalibrierung sowohl im Abstands- als auch im Geschwindigkeitsverlauf eine gute Übereinstimmung (vgl. Abb. 5). Einzig beim Anfahren lässt der menschliche Fahrer im Vergleich mit dem IDM einen etwas größeren Abstand. Die kalibrierte IDM-Wunschgeschwindigkeit beträgt $v_0 = 57$ km/h, die Folgezeit $T = 1.2$ s, die Beschleunigung $a = 2$ m/s² und die komfortable Verzögerung erstaunlich geringe 0.8 m/s². Aufgrund des Vorderfahrzeugs muss das IDM-Fahrzeug dennoch mit bis zu 1.8 m/s² abbremsen. Die Kaffeetasse schwappt jedoch, im Gegensatz zu der des menschlichen Fahrers, im Simulationsverlauf nie über. Abb. 5(e) zeigt darüberhinaus, dass das IDM mit diesen Einstellungen kolonnenstabil ist. Simuliert man eine Kolonne aus IDM-Fahrzeugen hinter dem Testfahrzeug, werden die Beschleunigungskurven immer glatter. Das siebte Fahrzeug verzögert z.B. mit maximal 1.1 m/s².

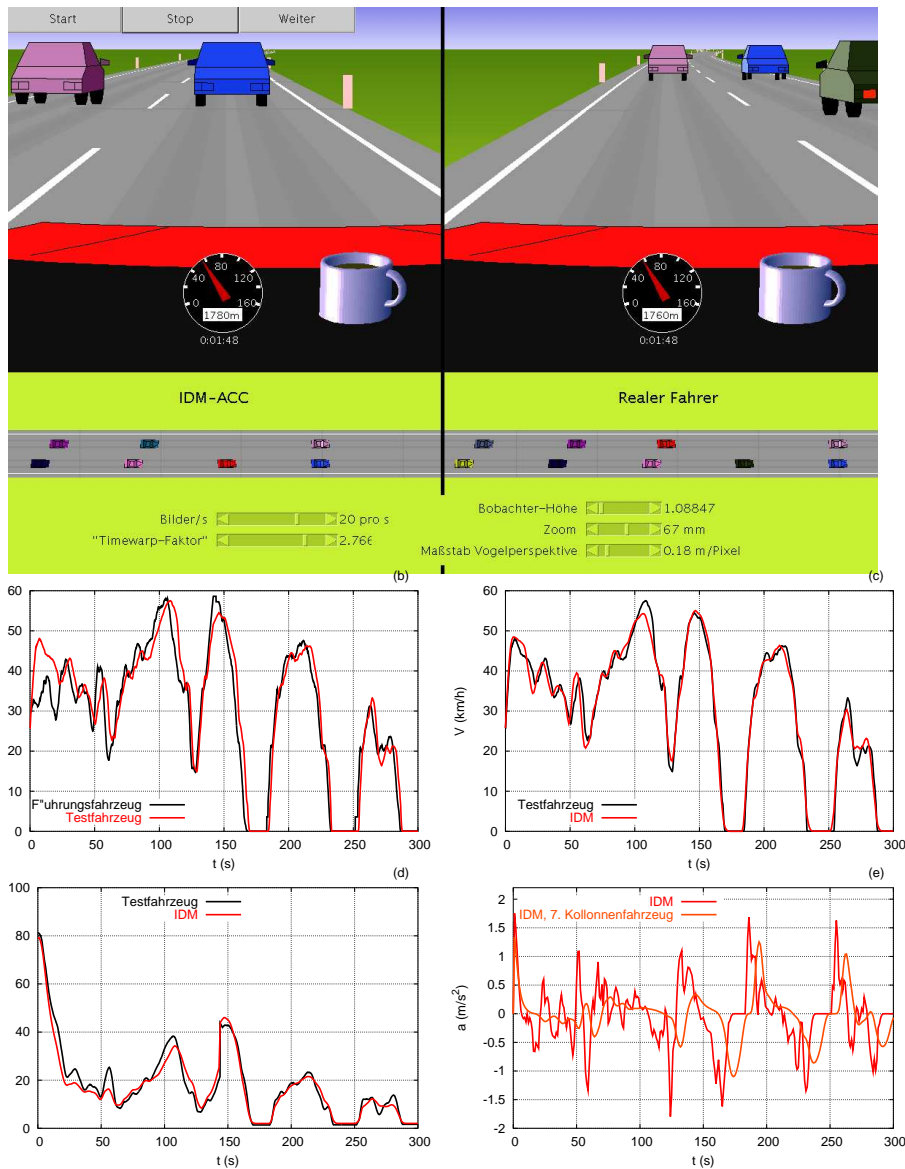


Abbildung 5: Simulation einer Testfahrt im Stadtverkehr Vaihingens. Oben: Der reale und der IDM-Fahrer. In der Vogelperspektive ist das Fahrzeug jeweils rot. (b) Geschwindigkeiten des Test- und Führungsfahrzeugs bei der Testfahrt, (c) Vergleich der tatsächlichen mit der simulierten Geschwindigkeit des Testfahrzeugs, (d) Vergleich der Abstände, (e) simulierte Beschleunigungen.

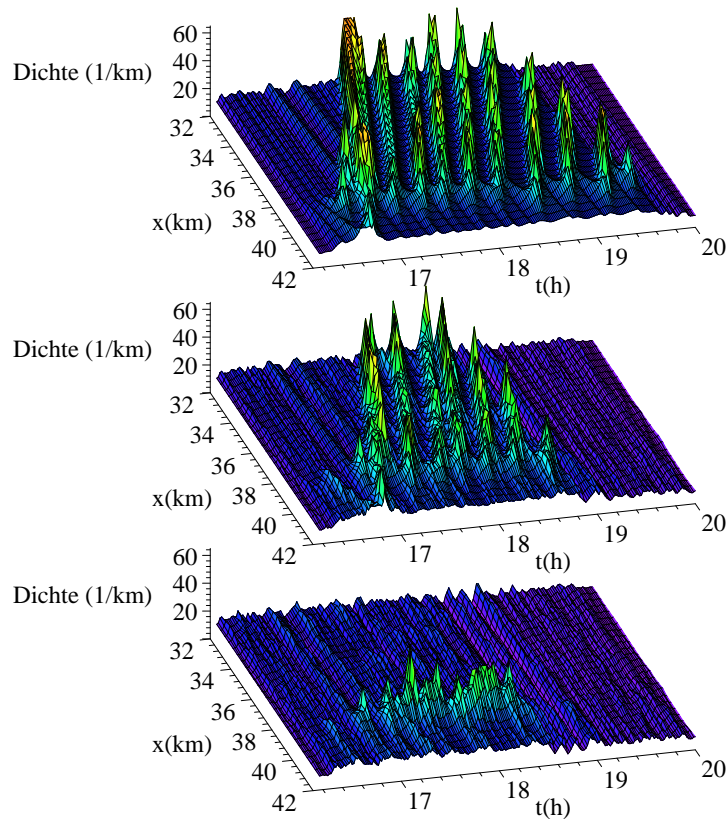


Abbildung 6: Raumzeitlicher Verlauf der simulierten Verkehrsdichte ohne ACC-Fahrzeuge (oben), für einen Ausstattungsgrad von 10% (Mitte) und 20% (unten).

4.2 Verkehrliche Auswirkungen von VLA-Fahrzeugen

In diesem Szenario werden die Auswirkungen von Temporeglern auf die Kapazität und Stabilität des Verkehrsflusses sowie auf verkehrliche Folgen wie die Stauwahrscheinlichkeit, die Reisezeiten und den Treibstoff-Verbrauch untersucht. Das Ergebnis hängt vor allem von den Einstellungen des Reglers und vom Anteil an ACC-Fahrzeugen (Ausstattungsgrad) ab. Im Folgenden wird für eine Sorte von Fahrzeugen ('ACC-Fahrzeuge') eine gegen über den sonstigen Fahrzeugen geringeren Folgezeit von 1 s statt 1.5 s und eine etwas erhöhte Beschleunigung angenommen. Beide Fahrzeugtypen werden mit dem IDM simuliert.

Der simulierte Streckenabschnitt wurde der A8-Ost im Bereich des Irschenbergs (Autobahn-Kilometer 32 bis 42) nachempfunden. Die Steigung und das anschließende Gefälle werden durch eine sog. "flusserhaltende Engstelle" modelliert, in der durch Erhöhung der Folgezeit um einen für alle Fahrzeuge wirksamen Faktor 1.3 die Kapazität

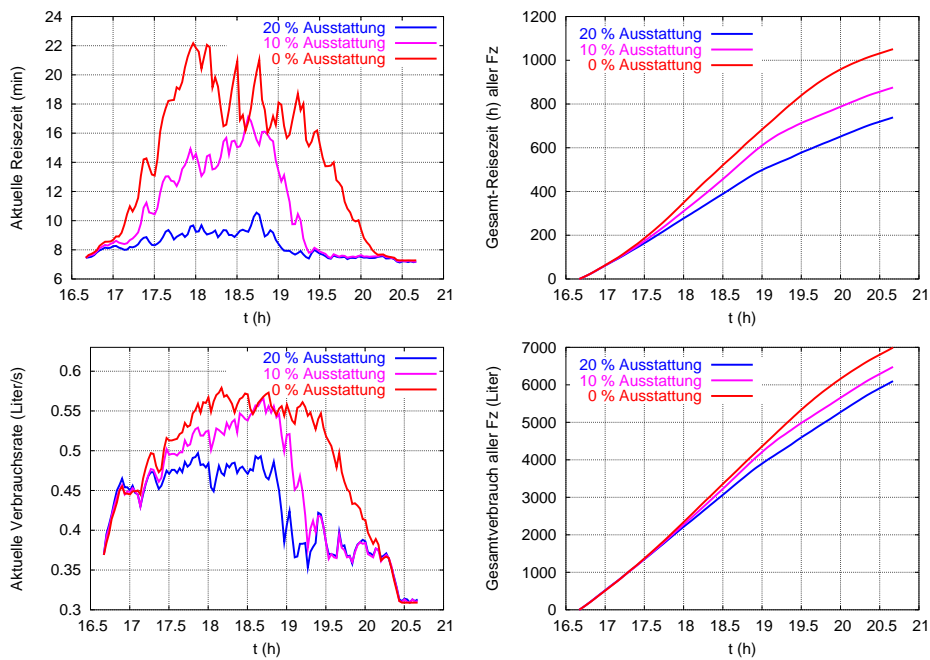


Abbildung 7: Verkehrliche Wirkung von ACC-Fahrzeugen in der in Abb. 6 gezeigten Simulation. Obere: Aktuelle Reisezeit (links) und Gesamtreisezeit aller simulierten Fahrzeuge (rechts) für drei verschiedene Ausstattungsgrade. Unten: Rate des Treibstoffverbrauchs aller auf dem Abschnitt befindlichen Fahrzeuge (links) sowie während der gesamten Simulation auf der Strecke verbrauchter Treibstoff für ein Mittelklassefahrzeug bei verbrauchsoptimaler Gangwahl (rechts). Die Verbrauchsberechnung basiert auf der Verbrauchscharakteristik von Abb. 4.

lokal reduziert wurde.¹ Das Verkehrsaufkommen entspricht realen Detektordaten in einem Zeitraum von 16:00 h bis 20:00 h an einem Tag, an dem es einen Stau gab, der in etwa jenem im Referenz-Szenario entsprach (Abbildung 6 oben).

Es wird mit staufreiem Verkehr gestartet und am Ende der Simulation hat sich der Stau aufgelöst. Dadurch wird gewährleistet, dass in jeder Simulation gleich viele Autos die Strecke durchfahren haben, so dass die Gesamtzeiten und Gesamt-Kraftstoffverbräuche vergleichbar sind.

Abbildung 7 zeigt, dass das Einsparpotenzial durch Stauvermeidung bei den Reisezeiten deutlich größer ist als beim Kraftstoffverbrauch. Bei der vorliegenden Simulation ergaben sich für ein Szenario mit 20% ACC-Anteil (nahezu kein Stau) gegenüber dem Referenz-Szenario (Stau in etwa 50% des raumzeitlichen Gebiets) bei verbrauchsoptimaler Gangwahl (Abb. 4) eine um etwa 35% geringere Gesamtreisezeit bei einem etwa 10% geringeren Gesamtverbrauch. Simuliert man die ACC-Fahrzeuge mit derselben Folgezeit wie die übrigen (d.h. nur die Beschleunigung ist höher), braucht man einen etwa doppelt so hohen Ausstattungsgrad, um vergleichbare Verbesserungen zu erzielen.

5 Diskussion und Ausblick

Ziel der vorliegenden Visualisierung ist nicht ein neues "Videospiel", sondern eine quantitative und physikalisch korrekte Darstellung der Fahrdynamik zur Entwicklung von realistischen Modellen für menschliche Fahrer, sowie von sicheren, komfortablen und verkehrlich effizienten ACC-Reglern. Einen wichtigen und unmittelbaren Eindruck über den Komfort gibt dabei das "Coffeemeter", das sowohl auf Beschleunigungen als auch auf deren Ableitung ("Ruck") in longitudinaler und transversaler Richtung anspricht.

In den Untersuchungen zeigte sich, dass, im Unterschied zum IDM, die meisten Mikromodelle entweder sehr unkomfortabel sind (vereinzelt sogar die durch die Motorleistung und die Haftkraft der Räder bedingten physikalischen Grenzen überschreiten), oder aber sehr instabil sind. Dies wird meist nur durch hohe Folgezeiten vermieden, die jedoch negative verkehrliche Auswirkungen auf die Kapazität implizieren. Speziell die Visualisierung der Spurwechsel zeigt den Entwicklungsbedarf an realistischen Spurwechselmodellen, denn bis jetzt gibt es noch kein Modell, welches das in jahrelanger Erfahrung gewonnene Antizipationsvermögen menschlicher Fahrer (Beschleunigen/Bremsen im Vorfeld des Wechsels, Reißverschlussverhalten, Antizipation der für den Wechsel benötigten Zeit etc.) realistisch nachbildet.

Abschließend möchten wir uns noch für Unterstützung vom BMBF-Projekt "Invent", von der Volkswagen AG sowie der Robert-Bosch GmbH bedanken.

¹Eine Reduktion der Geschwindigkeit würden einen vergleichbaren Effekt bringen.

Literatur

- [App] Ein interaktives Java Applet zur Verkehrssimulation mit dem IDM und MOBIL ist unter der URL www.mtreiber.de/MicroApplet/ verfügbar.
- [BHN⁺95] M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata und Y. Sugiyama. *Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation*. Phys. Rev. E, 51:1035–1042, 1995.
- [BM99] M. Brackstone und M. McDonald. *Car-following: a historical review*. Transp. Res. F, 2:181–196, 1999.
- [Hel01] D. Helbing. *Traffic and Related Self-Driven Many-Particle Systems*. Review of Modern Physics, 73:1067–1141, 2001.
- [mov] Filme von Simulationsläufen sind unter der URL www.mtreiber.de/movie3d/ verfügbar.
- [New61] G.F. Newell. *Nonlinear effects in the dynamics of car following*. Operations Research, 9:209, 1961.
- [TH98] B. Tilch und D. Helbing. *Generalized force model of traffic dynamics*. Phys. Rev. E, 58:133–138, 1998.
- [TH01] M. Treiber und D. Helbing. *Microsimulations of freeway traffic including control measures*. Automatisierungstechnik, 49:478–484, 2001.
- [TH02] Martin Treiber und Dirk Helbing. *Realistische Mikrosimulation von Straßenverkehr mit einem einfachen Modell*. In: Djamshid Tavangarian und Rolf Grützner, Hrsg., *Frontiers in Simulations - 16. Symposium "Simulationstechnik" ASIM 2002 Rostock, 10.09 -13.09.2002*, S. 514–520. SCS-European Publishing House, Delft, 2002.
- [TH03] M. Treiber und D. Helbing. *Memory effects in microscopic traffic models and wide scattering in flow-density data*. Phys. Rev. E, 68:046119, 2003.
- [THH00] M. Treiber, Ansgar Hennecke und D. Helbing. *Congested Traffic States in Empirical Observations and Microscopic Simulations*. Physical Review E, 62:1805–1824, 2000.
- [Wie74] R. Wiedemann. *Simulation des Straßenverkehrsflusses*. In: Heft 8 der Schriftenreihe des IfV. Institut für Verkehrswesen University of Karlsruhe, 1974.