

Realistische Mikrosimulation von Straßenverkehr mit einem einfachen Modell

Martin Treiber und Dirk Helbing
martin@mtreiber.de, helbing@trafficforum.de
Institut für Wirtschaft und Verkehr, TU Dresden
Andreas-Schubert-Straße 23, 01069 Dresden

Kurzfassung

Wir stellen mit dem Intelligent-Driver Model (IDM) ein Mikromodell vor, welches realitätsgetreue Simulationseigenschaften mit Einfachheit verbindet. Seine robuste Dynamik sowie die deterministische und kontinuierliche Abhängigkeit der Beschleunigung von lokalen Einflussgrößen ermöglicht einen Einsatz als Regler in einem Fahrerassistenzsystem. Seine sechs Longitudinalparameter sind alle anschaulich und erlauben eine einfache Modellierung verschiedener Fahrstile und fahrzeugtyp-spezifischer Eigenschaften, variabler Straßen- und Lichtverhältnisse sowie eine Simulation von Linien-Beeinflussungen. Mit Erweiterungen ist auch der menschliche Fahrer modellierbar.

Das IDM wird durch ein allgemein formuliertes Spurwechselmodell ergänzt, welches mit beliebigen Longitudinalmodellen zusammenarbeitet und hier erstmals ausführlich vorgestellt wird. Wie das IDM hat es Parameter, die direkt den Fahrstil beschreiben.

Wir zeigen anhand von Simulationen tatsächlicher Verkehrssituationen, dass das IDM sowohl die beobachtete kollektive Dynamik der Verkehrszusammenbrüche als auch das Longitudinalverhalten einzelner Fahrzeuge (Stichwort Fahrerassistenzsysteme) realistisch wiedergeben kann.

1 Einleitung

Bei der Mikrosimulation von Kfz-Verkehr kann man zwei Stoßrichtungen unterscheiden: Einerseits eine möglichst realitätsnahe Abbildung der tatsächlichen Situation. Dies bedingt komplexe Modelle mit i.A. sehr vielen Parametern und einer komplexen Wenn-Dann-Entscheidungslogik. Hauptvertreter dieser Modellklasse ist das Wiedemann-Modell [1], welches in verschiedenen Variationen auch in vielen Mikrosimulationstools verwendet wird, z.B. im MITSIM-Verkehrssimulator oder im Mikrosimulator VISSIM (PTV AG). Kürzlich wurde von Kerner ein neues Modell dieser Klasse vorgeschlagen, welches die verschiedenen Arten gebundenen Verkehrs berücksichtigen soll [2]. Andererseits bieten auch extrem simplifizierende Modelle Vorteile bei der Untersuchung grundlegender Eigenschaften der kollektiven Dynamik von Straßenverkehr, obwohl sie Vieles, z.B. Beschleunigungen, unrealistisch wiedergeben wie das Optimal-Velocity Modell [3]. Das Gipps-Modell und seiner Erweiterungen [4, 5] bauen auf eine ähnliche Bremsstrategie wie das IDM auf, haben aber keine kontinuierliche Beschleunigungsfunktion und benötigen stochastische Terme für eine

zufriedenstellende Modellierung. Eine gute Übersicht dieser und weiterer Modelle findet sich in [6].

Im Abschnitt 2 stellen wir mit dem Intelligent-Driver Model (IDM) [7] ein Mikromodell vor, welches realitätsgetreue Simulationseigenschaften mit Einfachheit verbindet. Wie bei vielen einfachen Modellen, aber im Gegensatz zum Wiedemann-Modell, gibt es im IDM keine diskreten Fahrdynamik-Bereiche und damit keine verschachtelten Wenn-Dann-Bedingungen. Vielmehr hängt die Beschleunigung kontinuierlich sowie deterministisch von Position und Geschwindigkeit Beschleunigung des Vorderfahrzeugs sowie von der eigenen Geschwindigkeit ab. Damit eignet es sich als Basismodell für adaptive Temporegelungen (Abschnitt 4.1). Mit zusätzlichen Modifikationen, die das Modell nicht wesentlich verkomplizieren, kann es auch als Modell für menschliches Fahrverhalten dienen. In Nachsimulationen tatsächlicher Verkehrszusammenbrüche (Abschnitt 4.2) zeigen wir, dass das IDM auch die beobachtete komplexe kollektive Dynamik reproduzieren kann [7], welche in Reinform durch ein ‘‘Phasendiagramm’’ gestauter Zustände [8] beschrieben werden kann.

Das IDM wird durch das allgemein formulierte Spurwechselmodell MOBIL ergänzt, welches mit beliebigen mikroskopischen Longitudinalmodellen zusammenarbeitet und in Abschnitt 3 vorgestellt wird. Auch eine Verallgemeinerung auf Zelluläre Automaten ist denkbar und führt auf Spurwechselregeln, die beispielsweise denen in Referenz [9] ähneln. Wie das IDM hat MOBIL Parameter, die direkt den Fahrstil beschreiben, insbesondere einen ‘‘Höflichkeitsfaktor’’, der im Vorfeld von Spurwechseln die eigene Behinderung gegenüber möglichen Behinderungen benachbarter Fahrzeuge abwägt. Einen Eindruck von Java-basierten Online-Simulationen auf der Basis des Fahrzeugfolgmodells IDM und des Spurwechselmoduls MOBIL kann sich der interessierte Leser unter <http://www.mtreiber.de/MicroApplet/> verschaffen.

2 Das Intelligent-Driver Modell

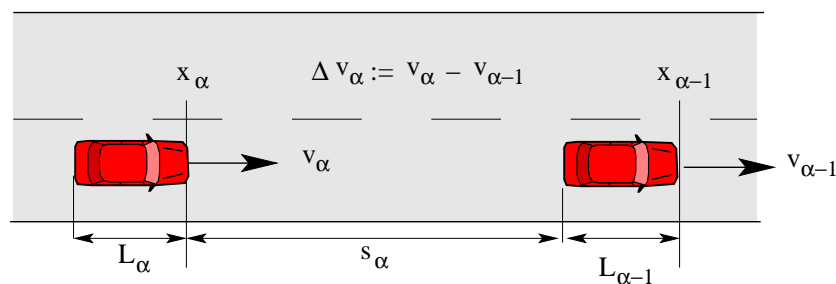


Abbildung 1: Zur Formulierung des IDM

Die Beschleunigung eines Fahrer-Fahrzeug-Systems α im Intelligent-Driver Modell (IDM) hängt von der eigenen Geschwindigkeit v_α sowie vom Nettoabstand s_α zum und der Annäherungsrate Δv_α an das Vorderfahrzeug ab,

| Modellparameter | Typischer Wert |
|--|----------------------|
| Wunschgeschwindigkeit v_0 | 120 km/h |
| Zeitlicher Sicherheitsabstand T | 1.4 s |
| Maximale Beschleunigung a | 1.2 m/s ² |
| Komfortable Bremsverzögerung b | 1.5 m/s ² |
| Minimaler Abstand zum Vorderfahrzeug s_0 | 2 m |

Tabelle 1: IDM-Modellparameter mit typischen Werten

$$\dot{v}_\alpha^{\text{IDM}}(v_\alpha, s_\alpha, \Delta v_\alpha) = a \left[1 - \left(\frac{v_\alpha}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(v_\alpha, \Delta v_\alpha)}{s_\alpha} \right)^2 \right]. \quad (1)$$

Dieser Ausdruck setzt sich aus einem Beschleunigungsanteil $a_f(v) := a[1 - (v/v_0)^\delta]$ auf freier Strecke sowie aus einer Brems-Wechselwirkung $a_{\text{int}}(v, s, \Delta v) = -a[s^*(v, \Delta v)/s]^2$ zusammen. Letzterer wirkt sich vor allem aus, wenn der Abstand zum Vorderfahrzeug zu gering oder die Annäherungsrate zu hoch ist. Die Wechselwirkung ergibt sich dabei durch Vergleich des tatsächlichen Nettoabstands s_α mit einem *effektiven Wunschabstand*

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

Der statische Anteil $s_0 + vT$ des Wunschabstands ist dabei im Wesentlichen durch die Folgezeit T bestimmt, zu der noch ein kleiner Mindestabstand s_0 im Stau addiert wird. Der dynamische Anteil implementiert ein intelligentes und kontinuierliches Bremsverhalten mit folgenden Grenzfällen:

- Annäherung an ein stehendes Hindernis: Liegt die nötige "kinematische" Verzögerung $b_k := v^2/(2s)$ bei gleichmäßigem Bremsen unterhalb (bzw. oberhalb) der "komfortablen Verzögerung" b , so wird derart mit einer Verzögerung oberhalb (bzw. unterhalb) der kinematischen Verzögerung gebremst, dass sich im Verlauf die kinematische sowie die tatsächliche Verzögerung dynamisch, kontinuierlich und ohne Überschwingen der Wunschverzögerung angleicht.
- Folgeverhalten einschließlich Annähern an ein langsames Fahrzeug: Die eigene Geschwindigkeit wird ohne Überschwingen an die sich dynamisch ändernde "sichere" Geschwindigkeit nach [5] angepasst. Dabei fungiert T als Reaktionszeit.
- Das Vorderfahrzeug entfernt sich: Auch bei Abständen unterhalb $s_0 + vT$ erfolgt nahezu keine Bremsreaktion, in Vorwegnahme des zukünftigen größeren Abstandes.

3 Ein allgemeines Spurwechselmodell

Im folgenden wird das Grundkonzept der Spurwechselstrategie MOBIL vorgestellt. Basis ist die Beurteilung der lokalen Verkehrs-Situation, d.h. der Positionen und Geschwindigkeiten der maximal sechs nächsten Nachbarn (vgl. Abb. 2). Wie bei anderen Spurwechselm-

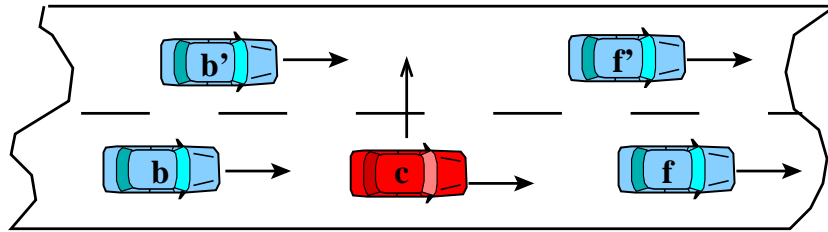


Abbildung 2: Einflussgrößen des Spurwechselmodells MOBIL

odellen wird ein (instantaner) Spurwechsel dann durchgeführt, wenn er (i) sicher ist, und (ii) ein Anreiz für den Wechsel gegeben ist. Als *Sicherheitskriteriums* 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 berücksichtigt: Ein sicheres Einscheren vor einem sich schnell nähernden Fahrzeug (z.B. auf der Überholspur) bedarf ja i.A. eines sehr viel größeren Abstandes!

Für das *Anreizkriterium* werden ebenfalls Beschleunigungen herangezogen: Ein Anreiz für einen Wechsel ist dann gegeben, wenn nach einem zunächst fiktiven Wechsel die Summe aus der eigenen (IDM-)Beschleunigung und die mit einem Höflichkeitsfaktor gewichteten Beschleunigungen der beteiligten Nachbarfahrzeuge um mindestens die Wechselschwelle δ höher ist als zuvor. Anders ausgedrückt: Die summierten Bremsverzögerungen werden minimiert (MOBIL=“Minimizing Overall Braking Induced by Lane-Changes”). Im einfachsten symmetrischen Fall ergibt dies für einen R→L-Spurwechsel:

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

Für egoistische Fahrer ($p = 0$) reduziert sich dieses Kriterium auf $a_{cf'} > a_{cf} + \delta$. Erweiterungen dieses Basismodells beinhalten insbesondere die

- Berücksichtigung des Rechtsfahrgebots durch zusätzliche Terme $\pm\Delta$ auf den rechten Seiten der Anreizkriterien für den $R \rightarrow L$ - bzw. den $L \rightarrow R$ -Wechsel,
- Berücksichtigung der subjektiven Abneigung gegen die rechte Spur (aufgrund der “Gefahr des Ausgebremstwerdens” durch LKWs und Probleme des Zurückwechslens auf die Überholspur) durch stärkere Gewichtung der Behinderung ($-a_{\text{int}}$) auf der rechten Spur,
- Longitudinal-Transversal-Kopplung aufgrund des Rechtsüberholverbots auf den meisten europäischen Autobahnen.

4 Simulationsergebnisse

4.1 Verhalten von Einzelfahrzeugen

Die IDM-Beschleunigung ist kontinuierlich und auch in extremen Situationen kollonnenstabil. Abbildung 3 zeigt die simulierte Beschleunigung einer Kolonne von Fahrzeugen als Reaktion auf eine Vollbremsung ($a_1 = -8 \text{ m/s}^2$) des vordersten Fahrzeuges 1 bis zum Stillstand. Auch bei den hier gewählten extremen Einstellungen (Folgezeit 0.7 s) und der simulierten extremen äußeren Störung ist die Beschleunigung der Kolonne schwingungsfrei und geht nach einigen Fahrzeugen auf die komfortable Verzögerung von $b = 2 \text{ m/s}^2$ zurück.

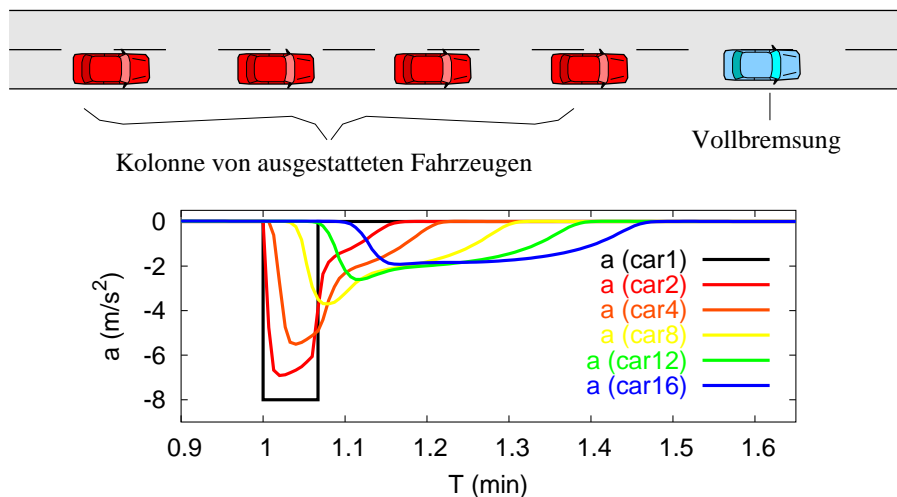


Abbildung 3: Simulation zur Demonstration der Kollonnenstabilität des IDM

4.2 Nachsimulation eines komplexen Stau-Szenarios

In Abb. 4 (oben) wurde zunächst ein tatsächlich beobachteter Stau mit dem IDM nachsimuliert. Ein zusätzlicher, von der stromabwärtigen Seite in den Simulationsabschnitt laufender Stau [7] wurde ignoriert, indem wir die gemessenen Detektordaten nur bei den stromaufwärtigen Randbedingungen berücksichtigten. Auf Spurwechsel sowie auf die Modellierung spezifisch menschlichen Fahrverhaltens wurde verzichtet. Die Modellparameter wurden so eingestellt, dass der simulierte Verkehrszusammenbruch an derselben Stelle und zur selben Zeit stattfand wie der tatsächliche. Abb. 4 (unten) zeigt das Ergebnis, wenn man bei 20% der Fahrzeuge die Folgezeit von 1.5 s auf 1.0 s reduziert.

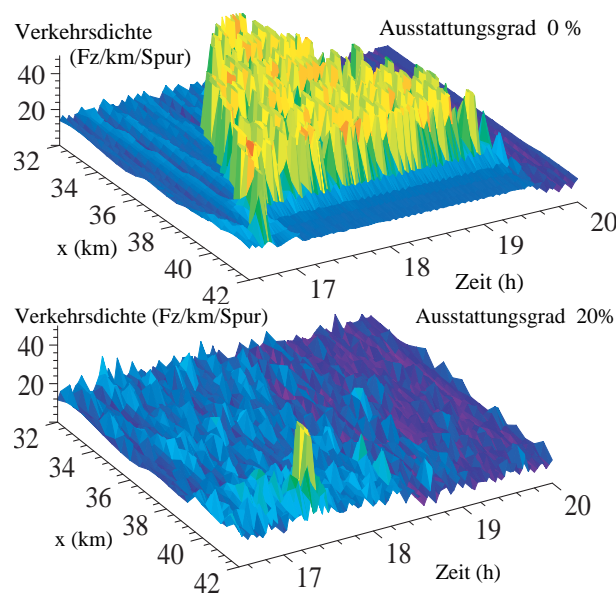


Abbildung 4: Potentieller Einfluss der Reduktion der Folgezeit auf die Staubildung

5 Diskussion

Mit der kontinuierlichen Beschleunigungsfunktion (vgl. Abb. 3), den lokalen Einflussgrößen und der überaus stabilen Fahrdynamik eignet sich das IDM als Basismodell für Regler in Fahrerassistenzsystemen.

Aufgrund der wenigen und anschaulichen Modellparameter eignet sich das IDM aber auch als Basismodell für die Simulation menschlichen Fahrverhaltens. Beispielsweise wird ein aggressiver Fahrer durch hohe Werte von a und niedrige Folgezeiten charakterisiert, ein vorausschauender Fahrer durch niedrige Werte von b , ein vorsichtiger durch niedriges v_0 und hohes T , ein LKW durch niedrige Werte von v_0 , a und b , usw. Im IDM nicht enthalten sind weitere menschliche Eigenschaften wie das Antizipationsverhalten (die Reaktion auf

mehrere Vorderfahrzeuge) sowie "Frustrationseffekte". Diese zusätzlichen Eigenschaften, die z.B. für eine realistische Beurteilung des globalen Einflusses von ausgestatteten Fahrzeugen auf den Verkehrsfluss notwendig sind, werden zur Zeit untersucht.

Literatur

- [1] *Wiedemann, R.*: Simulation des Straßenverkehrsflusses, Schriftenreihe des IfV Vol. 8, Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe (1974).
- [2] *Kerner B.S. and Klenov, S.L.*: A microscopic model for phase transitions in traffic flow, *J. Phys. A: Math. Gen.* **35** (2002), pp. L31-L43.
- [3] *Bando, M, et. al.*: "Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation," *Phys. Rev. E* 51 (1995), pp. 1035–1042.
- [4] *Gipps P.G.*, *Transp. Res.* 20 B (1986), pp. 403–414.
- [5] *Krauß, S.*: "Towards a unified view of microscopic traffic modelling," in *Transportation Systems* (M. Papageorgiou and A. Pouliezios, eds.), II, p. 941, Chania, Greece: International Federation of Automatic Control, 1997.
- [6] *Helbing, D.*: "Traffic and related self-driven many-particle systems," *Review of Modern Physics* 73 (2001), pp. 1067–1141.
- [7] *Treiber, M, Hennecke, A und Helbing, D.*: "Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations," *Physical Review E* 62 (2000), pp. 1805–1824.
- [8] *Treiber, M, Hennecke, A und Helbing, D.*: "Phase diagram of traffic states in the presence of inhomogeneities," *Phys. Rev. Lett.* 82 (1999), pp. 4360–4363.
- [9] *Chowdhury, D, Wolf, D, und Schreckenberg, M.* *Physica A* 235 (1997), p. 417.