

# Aggression im Straßenverkehr – wie menschliches Fahrverhalten die Stautentstehung beeinflusst

*Martin Treiber*

## 1 Aggression aus der Sicht des Verkehrsmodellierers

Aggressivität und andere Einstellungen von Autofahrern wirken sich auf das Fahrverhalten und mittelbar auf den Verkehrsfluss aus, insbesondere auf die Effizienz des Verkehrs und die Stauneigung. Ist eine moderate Aggressivität der Fahrer immer ungünstig für den Verkehrsfluss oder verursacht es mehr Staus, wenn man bewusst langsam fährt und große Lücken lässt? Kann man durch ein geändertes Fahrverhalten selbst zur Stau-Reduzierung beitragen? Wie verändert sich der Verkehrsfluss in der Zukunft, wenn es immer mehr teilautomatisierte oder sogar autonome Fahrzeuge gibt?

Ein Ansatz um solche und ähnliche Fragen zu beantworten ist die mathematische Modellierung des Fahrverhaltens und die Simulationen dieser Modelle als “Vielteilchensystem” – jedes Fahrzeug und der dazugehörige Fahrer<sup>1</sup> ist ein Teilchen – in verschiedenen Verkehrssituationen.

In diesem Beitrag werden zunächst die für das Fahrverhalten relevanten Dimensionen identifiziert und ein darauf basierendes “Fahrzeugfolgemodell” für die Längsdynamik – also die Modellierung von Beschleunigungs- und Bremsmanövern – vorgestellt. Wir zeigen, wie solch ein Modell mit Hilfe allgemeiner Annahmen über die Risikobereitschaft und Aggressivität im Rahmen einer Maximierung des erwarteten subjektiven Nutzens hergeleitet werden kann. Neben Beschleunigen und Bremsen treffen Autofahrer auch diskrete Entscheidungen wie Spurwechsel, Nutzung einer Lücke zum Einfahren auf eine vor-

---

<sup>1</sup>Zur Vereinfachung der Darstellung wird im Folgenden das generische Maskulinum verwendet. Fahrerinnen sind ausdrücklich mit gemeint.

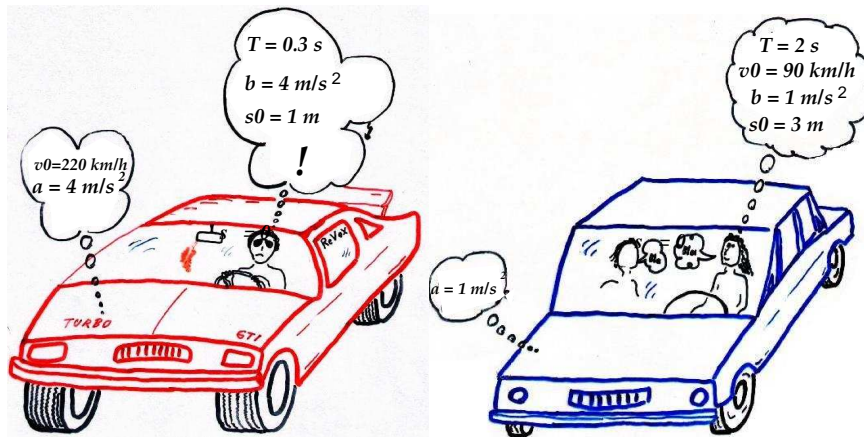


Abbildung 1: Das Fahrverhalten wird durch die Parameter des Fahrzeugfolgmodells bestimmt: Wunschgeschwindigkeit  $v_0$ , Folgezeitlücke  $T$ , Mindestabstand  $s_0$ , Wunsch-Beschleunigung  $a$  und komfortable Bremsverzögerung  $b$ .

fahrtsberechtigte Straße oder Weiterfahren bzw. Halten, wenn man sich einer auf gelb springenden Ampel nähert. Aufbauend auf den Fahrzeugfolgmodellen formulieren wir Modelle dieser Entscheidungssituationen und berücksichtigen zusätzlich den Grad an Altruismus bzw. Egoismus.

Simulationen dieser Modelle zeigen, dass eine geringe Menge an Aggressivität dem Verkehrsfluss eher förderlich ist, ehe es in das Gegenteil umschlägt. Wichtiger zur Stauvermeidung ist aber Agilität, Antizipation (Vorwegnahme der Situation einige Sekunden voraus) sowie Tempolimits an kritischen Stellen und bei hoher Verkehrsbelastung.

## 2 Longitudinale Modellierung: Die fünf Dimensionen des Fahrverhaltens beim Fahrzeugfolgen

Das in Treiber et al. (2000) erstmals vorgestellte *Intelligent-Driver Model* (IDM) ist ein Fahrzeugfolgmodell, welches folgende Dimen-

sionen des Fahrverhaltens in Form von Modellparametern, also “Einstellschrauben” des Modells, berücksichtigt (vgl. Abb. 1):

- Wunschgeschwindigkeit  $v_0$  bzw. genauer das Minimum aus intrinsischer Wunschgeschwindigkeit und Begrenzungen durch Tempolimits oder die Motorisierung
- Folgezeitlücke (“Sicherheitsabstand”)  $T$ . Die Fahrschulregel “Abstand gleich halber Tacho” entspricht  $T = 1.8$  s. Generell werden aber erst Abstände unterhalb “viertel Tacho” als aggressiv empfunden. Neben dem durch die Folgezeitlücke implizierten Abstand gibt es noch einen zwei oder drei Meter betragenden Mindestabstand  $s_0$  bei Stillstand
- Beschleunigungswunsch  $a$ . Typische Alltagswerte liegen um  $2 \text{ m/s}^2$  oder etwas darunter. Eine Beschleunigung “von Null auf Hundert in 10 s” entspricht  $2.8 \text{ m/s}^2$
- Komfortable Bremsverzögerung  $b$ , ebenfalls um  $2 \text{ m/s}^2$ . Je niedriger, desto eher bremst ein Fahrer
- Reaktionszeit  $T_r$ . Diese umfasst alle Stufen einer Reaktion vom Ereignis (z.B. ein über die Straße laufendes Kind ist erstmals sichtbar) über die sensorische Erfassung, Interpretation, Entscheidungsfindung (“Notbremsung!”) bis hin zur Umsetzung (Fuß auf die Bremse, technische Antwortzeit der Bremse) und beträgt typischerweise 1 s und mehr.

Die psychologischen Verhaltensdimensionen beeinflussen i.A. mehrere dieser Parameter, insbesondere wird ein aggressiver Fahrer durch hohe Werte von  $v_0$ ,  $a$  und  $b$  und niedrige Werte von  $T$  und  $s_0$  charakterisiert, ein unsicherer Fahrer durch niedrige Werte von  $v_0$  und  $a$  und hohe Werte von  $b$ , ein erfahrener Fahrer durch niedrige Werte von  $b$  und ein agiler Fahrer zusätzlich durch hohe Beschleunigungen  $a$  und eher niedrige Folgezeiten  $T$ . Schließlich hat ein aufmerksamer Fahrer eine niedrige Reaktionszeit. Weitere Aspekte wie Schätzfehler oder auch Episoden mangelnder Aufmerksamkeit werden hier nicht besprochen, aber auch dafür gibt es Modelle (Treiber et al., 2006).

Wie viele andere Fahrzeugfolgemodelle (siehe z.B. das Lehrbuch Treiber and Kesting (2013)) beschreibt das IDM Autos und ihre Fahrer als Teilchen, welche im Prinzip Newton’sche Bewegungsgleichungen der Art “Kraft gleich Masse mal Beschleunigung” gehorchen, nur dass die Masse =1 gesetzt wird und die physikalischen Kräfte durch *soziale*

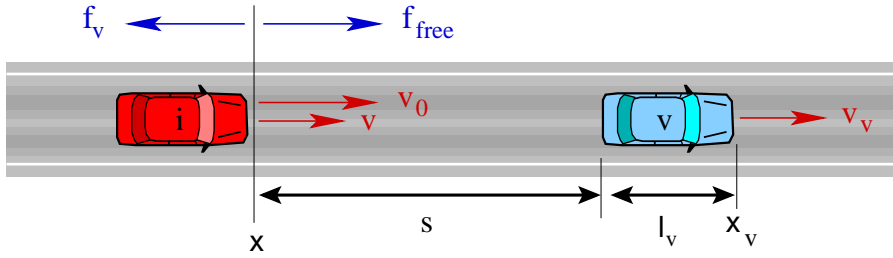


Abbildung 2: Die wichtigsten Einflussgrößen der Längsdynamik (Beschleunigen und Bremsen): Geschwindigkeiten  $v$  und  $v_v$  des betrachteten und des Vorderfahrzeugs, Lücke  $s$  zum Vorderfahrzeug und Wunschgeschwindigkeit  $v_0$ .

Kräfte ersetzt werden:

$$a_{\text{IDM}} = f_{\text{free}} + f_v = a \left[ 1 - \left( \frac{v}{v_0} \right)^4 \right] - a \left( \frac{s^*}{s} \right)^2. \quad (1)$$

Die soziale Kraft  $f_{\text{free}}$  ist die Triebkraft, um die Wunschgeschwindigkeit  $v_0$  zu erreichen. Sie resultiert bei freiem Verkehr anfänglich in eine Beschleunigung  $a$ , welche erst kurz vor Erreichen der Wunschgeschwindigkeit bis auf Null abnimmt. Bei gestauten Verkehr würde dies natürlich zu Kollisionen mit dem Vorderfahrzeug  $v$  führen. Deshalb bremst der zweite Summand  $f_v = -a(s^*/s)^2$  das Auto wieder ab, so dass letztendlich ein Wunschabstand resultiert, der angenähert durch

$$s^* = \max \left( 0, s_0 + vT + \frac{v(v - v_v)}{2\sqrt{ab}} \right) \quad (2)$$

gegeben ist. Im Wesentlichen ist  $s^*$  gleich dem aus der Folgezeit  $T$  resultierenden Abstand  $vT$ . Hinzu kommt ein kleiner Mindestabstand  $s_0$  und ein dynamischer Beitrag, der zu verstärkter Bremsung führt, wenn das Vorderfahrzeug langsamer als das betrachtete Fahrzeug ist. Will man zusätzlich eine Reaktionszeit  $T_r$  simulieren, werden die rechten Seiten der Gleichungen nicht zur Zeit  $t$ , sondern zur vergangenen Zeit  $t - T_r$  berechnet.

Um das Modell zu testen, zeigt Abb. 3 eine typische innerstädtische Situation: Zur Zeit  $t = 0$  wird die erste Ampel grün und die dahinter wartende Kolonne setzt sich zur nächsten roten Ampel in Bewegung. Alle Fahrzeuge haben die Modellparameter  $v_0 = 15 \text{ m/s} = 54 \text{ km/h}$ ,

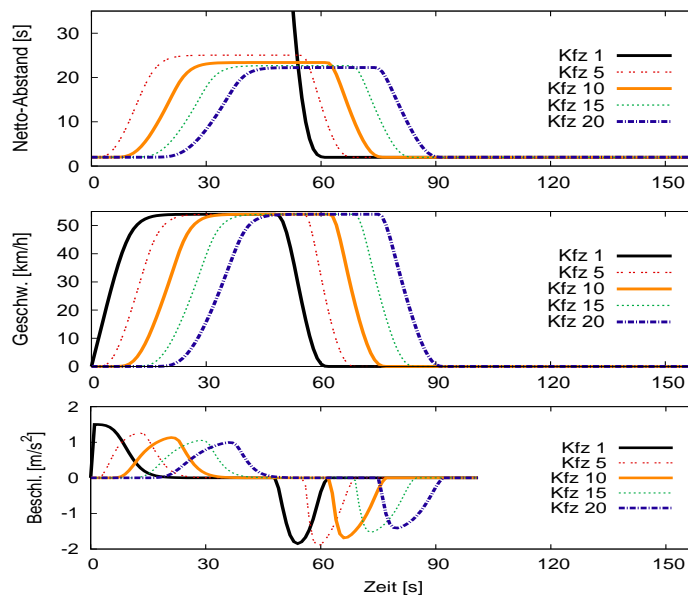
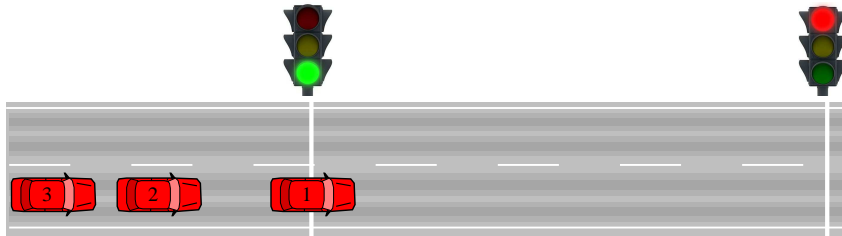


Abbildung 3: Modelltest des leicht modifizierten IDM nach den Gln. (1) und (2) in einer innerstädtischen Start-Stopp-Situation.

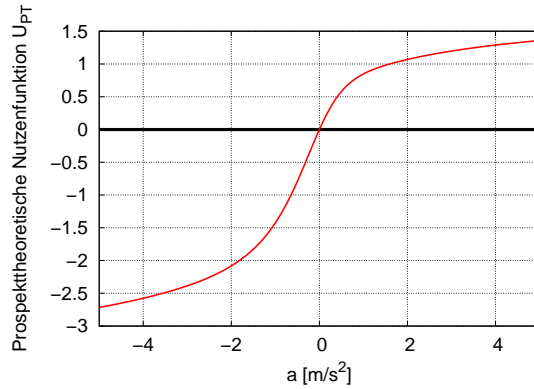


Abbildung 4: Eine Realisierung der prospekttheoretischen Funktion von Kahneman und Tversky.

$T = 1.2$  s,  $s_0 = 2$  m, und  $a = b = 1.5$  m/s<sup>2</sup>. Die rote Ampel wird durch ein stehendes *virtuelles* Fahrzeug auf der Position der Haltelinie abgebildet. Eine Extra-Modellierung ist also nicht nötig.

In der beiden obersten Zeitreihen sieht man, dass sich die Geschwindigkeit auf die Wunschgeschwindigkeit und der Abstand auf  $s_0 + v_0 T = 20$  m einpendelt, bevor vor der nächsten Ampel abgebremst wird. Schließlich stehen die Fahrzeuge mit einer Lücke  $s_0 = 2$  m voneinander. In der untersten Zeitreihe sieht man, dass die maximale Beschleunigung  $= a$  ist und die maximalen Bremsverzögerungen aller Autos in etwa bei der komfortable Verzögerung  $b$  liegen. Das Modell bildet also das Fahrverhalten hinreichend realistisch ab und könnte auch als Beschleunigungsregler in autonomen Fahrzeugen verwendet werden.

### 3 Modellierung und Simulation von Risikobereitschaft und Aggressivität

Konventionelle Fahrzeugfolgemodelle berücksichtigen zwar phänomenologisch einige Aggressivitätsmerkmale wie zu dichtes Auffahren, zu hohe Geschwindigkeit oder Bremsen im letzten Augenblick. Sie enthalten aber folgende wichtige fahrpsychologische Merkmale nicht explizit:

- Nutzenbewertung einer langsameren oder schnelleren Fahrt,

- Risikobewertung und Unsicherheit,
- Fehlende Objektivität (*bounded rationality*).

Um konventionelle Fahrzeugfolgemodelle auf eine empirisch-psychologische Basis zu stellen, betrachten wir die Beschleunigungsentscheidung (die auch negative Beschleunigungen, also Bremsen enthält), als eine Maximierung des Mittelwertes eines subjektiv empfundenen Nutzens bei zwei möglichen Ausgängen (Hamdar et al., 2008):

1. Kein Crash: In diesem Fall resultieren hohe Beschleunigungen in hohe Geschwindigkeiten und man kommt schneller vorwärts. Nach der *Prospect Theory* von Tversky and Kahneman (1982) ist der subjektiv empfundenen Nutzen allerdings nichtlinear: Ein negativer Nutzen (negative Beschleunigung) wird stärker gewichtet als ein positiver. Zusätzlich ist die Sensitivität nahe der Referenz (Beschleunigung gleich Null) am größten. Der Nutzen dieses Szenarios als Funktion der Beschleunigung sieht etwa wie in Abb. 4 aus.
2. Crash: Hier gibt es einen hohen Zeitverlust und Schaden, der um den Faktor  $w_c \gg 1$  höher ist als eine durch die Abbildung 4 definierte Nutzeinheit (NE). Allerdings fällt dieser Schaden nur mit einer sehr kleinen Wahrscheinlichkeit  $p_{\text{crash}} \ll 1$  an. Diese Wahrscheinlichkeit steigt aber in dichtem Verkehr stark mit der Beschleunigung  $a$  an.

Jedem der beiden Ausgänge wird eine subjektive Wahrscheinlichkeit  $(1-p_{\text{crash}})$  bzw.  $p_{\text{crash}}$  zugeordnet. Die in diesem Modell angenommene Beschleunigung entspricht der Maximierung des erwarteten Nutzens zuzüglich eines Zufallsnutzens  $\epsilon$ :

$$U(a) = (1 - p_{\text{crash}})U_{\text{PT}}(a) + p_{\text{crash}}(a)w_c + \epsilon = \max! \quad (3)$$

Nimmt man zur Berechnung der Crash-Wahrscheinlichkeit einen Zeithorizont von  $\tau = 4$  s an, in welchem sich die Beschleunigungen aller beteiligten Fahrzeuge nicht ändern, ferner einen Schätzfehler bei der Geschwindigkeitsbestimmung von  $\alpha = 8\%$ , eine Schadenshöhe  $w_c = 100\,000$  Nutzeinheiten (NE) und eine Standardabweichung des Zufallsnutzens in der Höhe  $0.2$  NE, bekommt man erwartete Beschleunigungen und Beschleunigungsverteilungen wie in Abbildung 5: Im Plot (a) sieht man, wie aufgrund der hohen Schadensgewichtung  $w_c$  der



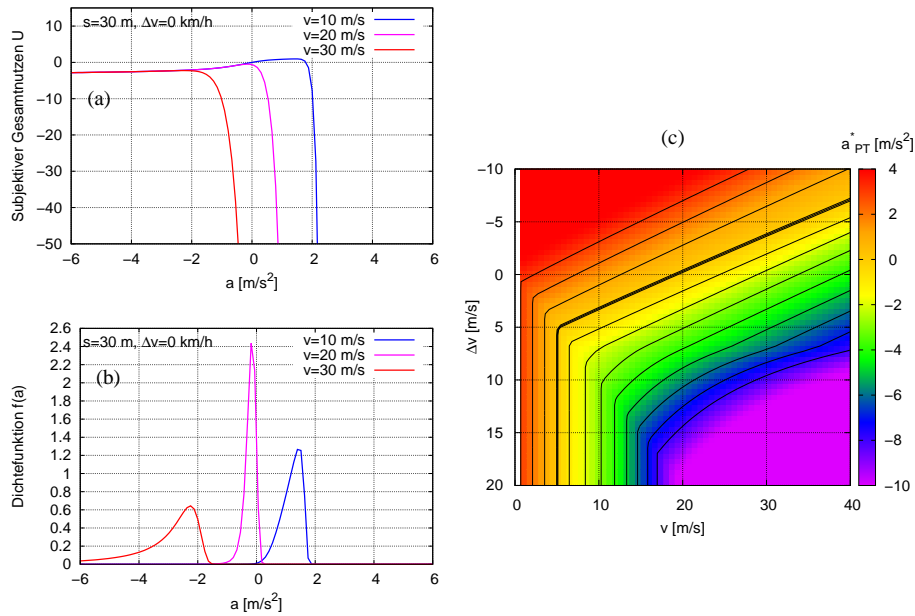


Abbildung 5: Eigenschaften des Prospekttheoretischen Modells (3):  
 (a) Erwartungswert des Gesamtnutzens als Funktion der Eingangsgrößen; (b) Dichtefunktion der aus der Maximierung des Gesamtnutzens resultierende Beschleunigung; (c) Erwartungswert der Beschleunigung als Funktion von Geschwindigkeit und Annäherungsrate  $\Delta v$  bei einem Abstand  $s = 30$  m.

Gesamtnutzen ab einer gewissen Beschleunigung in den Keller geht. Plot (b) zeigt, dass die Unsicherheit der resultierenden Beschleunigung nahe der Referenz  $a = 0$  am geringsten ist. Schließlich zeigt Plot (c), dass bei gegebenem Abstand die Beschleunigung mit der Annäherungsrate und der Geschwindigkeit abnimmt, was plausibel ist. Schließlich definiert in diesem Plot die schwarze Linie (Beschleunigung Null) eine nahezu konstante Folgezeit, welche sich analytisch durch

$$T \approx \alpha\tau\sqrt{2 \ln w_c}$$

annähern lässt. Je pessimistischer man ist (man kann während des Zeithorizonts  $\tau$  nichts ändern), je unsicherer man seine Schätzfähigkeiten beurteilt (großes  $\alpha$ ) und je größer der befürchtete Unfall-Schaden ist (defensive Einstellung entspricht hohem  $w_c$ ), desto höher ist die Folgezeit. Umgekehrt führt Aggressivität (kleine Werte von  $\tau$ ,  $\alpha$  und  $w_c$ ) zu einer kleinen Folgezeit. Damit führt dieses Modell die beobachtbare Größe “Folgezeit” auf fahrpsychologische Attribute, insbesondere Aggressivität, zurück. Bei den angegebenen Parametern beträgt sie 1.5 Sekunden.

Schließlich zeigt der selbe Modelltest wie beim “Intelligent-Driver Model”, dass auch dieses Modell ein komplettes innerstädtisches “Von Ampel-zu-Ampel”-Szenario abbilden kann (Abb. 6).

## 4 Aggressivität bei Spurwechsel und anderen diskreten Entscheidungen

Ein Autofahrer kann neben den kontinuierlichen Aktionen Beschleunigen und Bremsen auch diskrete Entscheidungen tätigen, insbesondere

- Spurwechsel (Abb. 7): rechts, links oder gar nicht wechseln,
- Annähern an eine gelb werdende Ampel (Abb. 8): weiterfahren oder anhalten,
- Einbiegen in eine vorfahrtsberechtigten Straße oder eine solche queren: eine gegebene Lücke nutzen oder warten (Abb. 8).

Solche Entscheidungen hängen stark vom Verhalten beim Beschleunigen und Bremsen ab. Fährt man als aggressiver Fahrer dicht auf

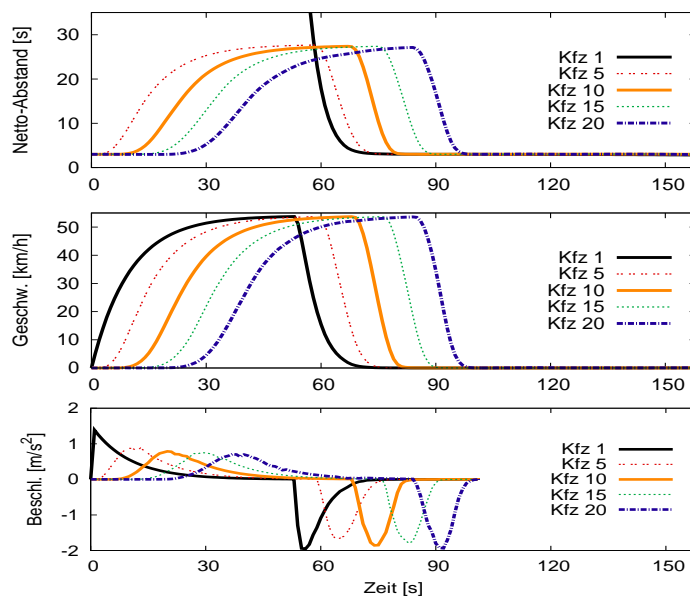
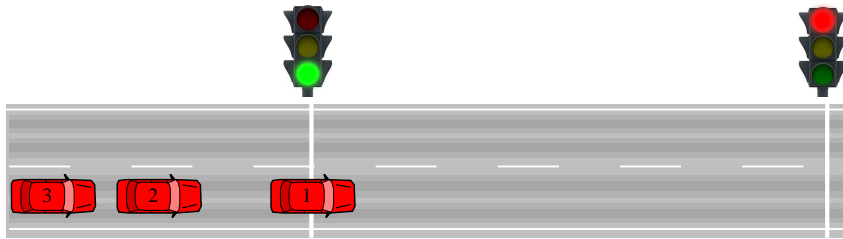


Abbildung 6: Modelltest des prospekttheoretischen Modells im selben Start-Stop-Szenario wie in Abb. 3.

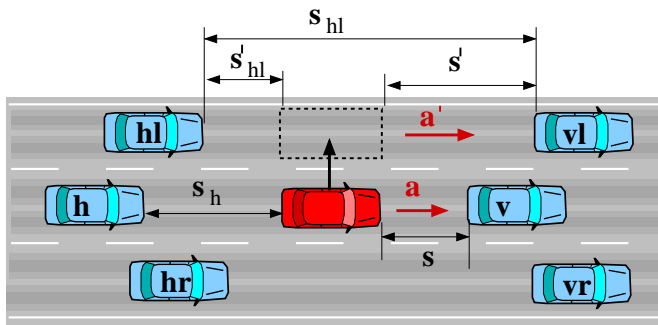


Abbildung 7: Die im Spurwechselmodell MOBIL betrachtete Situation. Je nach Höflichkeitsfaktor wird der eigene Vorteil mit Behinderungen anderer Fahrer abgewogen

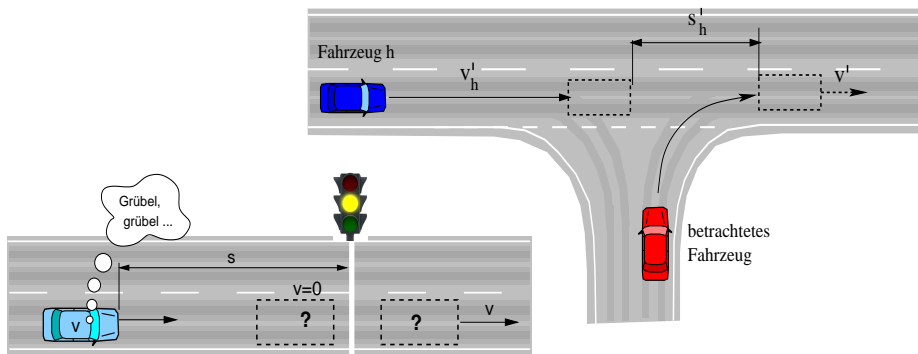


Abbildung 8: Andere Entscheidungssituationen, deren Ausgänge von der Aggressivität des Fahrers abhängen.

und beschleunigt stark, wird man tendenziell auch kleinere Lücken nutzen sowie anderen Fahrern beim Spurwechseln stärkere Bremsmanöver abverlangen. Es liegt daher nahe, diskrete Fahr-Entscheidungen auf Basis der Fahrzeugfolgemodelle zu formulieren. Auf diese Weise überträgt sich der in den Folge Modellen dargestellte Fahrstil automatisch auch auf die diskreten Entscheidungen.

Wir werden dies nun am Beispiel der wichtigsten diskreten Entscheidung, dem Spurwechsel, darstellen. Zunächst ist ein Spurwechsel ein dreistufiger Prozess:

- Strategische Komponente: Die gewählte Route gibt vor, wo aufgrund Richtungsänderungen spurgewechselt werden muss.
- Taktische Komponente: Steht ein Spurwechsel (strategische Komponente) an bzw. geht auf dem eigenen Fahrstreifen zu langsam voran, wird dieser durch Suchen einer Lücke sowie einem Kooperationswunsch (Blinken) vorbereitet.
- Operative Komponente: Durchführung des Wechsels, wenn die in der taktischen Phase gefundene Lücke groß genug ist.

Wir betrachten nun nur die operative Phase in der in Abb. 7 skizzierten Situation aus Sicht des Fahrers im roten Fahrzeug: Ist ein Wechsel auf die gestrichelte Position sicher und vorteilhaft? Im Spurwechselmodell MOBIL (Kesting et al., 2007) wird, gemäß seinem Akronym *Minimizing Overall Braking decelerations Induced by Lane changes*, nicht nur die Sicherheit und der eigene Vorteil bedacht. Vielmehr führt das Modell auch einen *Höflichkeitsfaktor*  $p$  ein, welcher die Situation der von der Spurwechsel-Entscheidung betroffenen Nachbarn berücksichtigt. Im Modell MOBIL werden Spurwechsel sofort durchgeführt, wenn folgende Kriterien gleichzeitig zutreffen:

**Sicherheitskriterium:** Beim Wechsel ergibt sich weder ein direkter Crash (seitliche Kollision) noch wird der Folge-Fahrer auf der Zielspur (im Bild hinten links, hl) so stark behindert, dass er mit mehr als der kritischen Verzögerung  $b_{\text{safe}}$  bremsen muss. Die Verzögerung wird dabei mit dem Fahrzeugmodell IDM berechnet. Die kritische Verzögerung kann als eigener Modellparameter aufgefasst werden, oder man rezykliert den Parameter  $b$  des Folge Modells IDM, indem man  $b_{\text{safe}} = b$  setzt.

**Wunschkriterium:** Zunächst muss der Wechsel für einem selbst vorteilhaft sein. Der Vorteil wird dabei durch die *Beschleunigungsdifferenz* gemäß dem IDM berechnet:

$$V = a'_{\text{IDM}} - a_{\text{IDM}}$$

wobei  $a_{\text{IDM}}$  und  $a'_{\text{IDM}}$  die IDM-Beschleunigungen des betrachteten Fahrzeugs vor und nach einem potenziellen Wechsel (rote Pfeile in Abb. 7) bezeichnen.

Egoistischen Fahrer wechseln, wann immer das Sicherheitskriterium erfüllt und der Vorteil  $V$  positiv ist. Mehr oder weniger “höfliche” Fahrer hingegen wiegen den eigenen Vorteil mit dem – mit einem Höflichkeitsfaktor  $p$  gewichteten – Nachteil ab, welcher durch den Wechsel anderen Fahrern aufgezwungen wird. Der Nachteil  $N$  wird wieder durch die Beschleunigungen der beteiligten Fahrer vor- und nach dem Wechsel quantifiziert, z.B. für einen Wechsel nach links wie im Bild:

$$N = a_{\text{IDM}}(h) + a_{\text{IDM}}(hl) - (a'_{\text{IDM}}(h) + a'_{\text{IDM}}(hl))$$

Der Nachteil ist also gegeben durch die Differenz zwischen den Beschleunigungen vor und nach dem Wechsel für die betroffenen Hinterfahrzeuge  $h$  und  $hl$ . Damit lautet das MOBIL-Wunschkriterium

$$V - pN > 0.$$

Für eine konkreten Simulation werden auf die rechte Seite noch Wechselschwellen hinzugefügt, welche ein zu hektisches Hin- und Herwechseln verhindern. Ferner gibt es eine Karenzzeit zwischen zwei Wechseln und ein Wechsel wird verboten, wenn das Vorderfahrzeug gerade wechselt. Auch Verkehrsregelungen wie das Rechtsfahrgebot können durch einen weiteren Beitrag auf der rechten Seite (positiv für Wechsel nach links, negativ für rechts) modelliert werden.

Dieser Formulierung der operativen Spurwechselentscheidungen hat zwei wünschenswerte Eigenschaften:

- Der Fahrstil des Fahrzeugfolgemodells wird automatisch vom Fahrzeugfolgemodell übernommen: Fahrer, welche aggressiv beschleunigen und bremsen, führen auch Spurwechsel aggressiv durch.
- Die Entscheidung hängt automatisch nicht nur von der Größe der Lücke und der Geschwindigkeit ab, sondern auch von Geschwindigkeitsdifferenzen wie in Abb. 9 dargestellt.

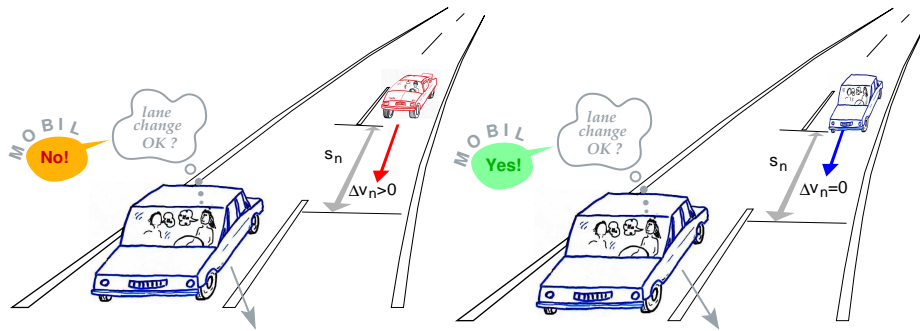


Abbildung 9: Die Spurwechselentscheidung hängt nicht nur vom Abstand und der Geschwindigkeit, sondern auch vom Fahrstil und der Annäherungsrate des schnelleren Hinterfahrzeugs ab.

Schließlich erlaubt es der Höflichkeitsfaktor, ein ganzes Spektrum an Stufen der Kooperation abzubilden, von egoistisch ( $p = 0$ ) zu verkehrsoptimal ( $p = 1$ ) bis hin zu ausgeprägt altruistisch ( $p > 1$ ) oder sogar schulmeisterhaft-bösartig ( $p < 0$ ). In der Praxis ist man meist doch sich selbst der Nächste und gewichtet die anderen geringer, beispielsweise mit  $p = 0.2$ .

## 5 Simulationen

Wir werden nun mittels Simulationen die Eingangsfragen beantworten, welche wie folgt zusammengefasst werden können: Wie wirken sich verschiedene Dimensionen des Fahrverhaltens und insbesondere Aggressivität auf die Stabilität und Leistungsfähigkeit des Verkehrsflusses aus?

Die Webseite [traffic-simulation.de](http://traffic-simulation.de) ermöglicht es, die vorgestellten Modelle in sechs verschiedenen Situationen (Symbole rechts oben) interaktiv zu simulieren: Ringstraße, Straße mit Auffahrt, Abfahrt, stauverursachende Baustelle, Steigung und eine Umleitungssituation. Abbildung 10 zeigt einen Screenshot des Szenariums "Auffahrt". Die Symbole "Autobahn +" und "Autobahn -" erlauben eine Änderung der Fahrstreifenzahl. Der Nutzer kann auch zusätzlich Ampeln auf die Straße setzen und diese schalten oder einzelne Fahrstreifen durch

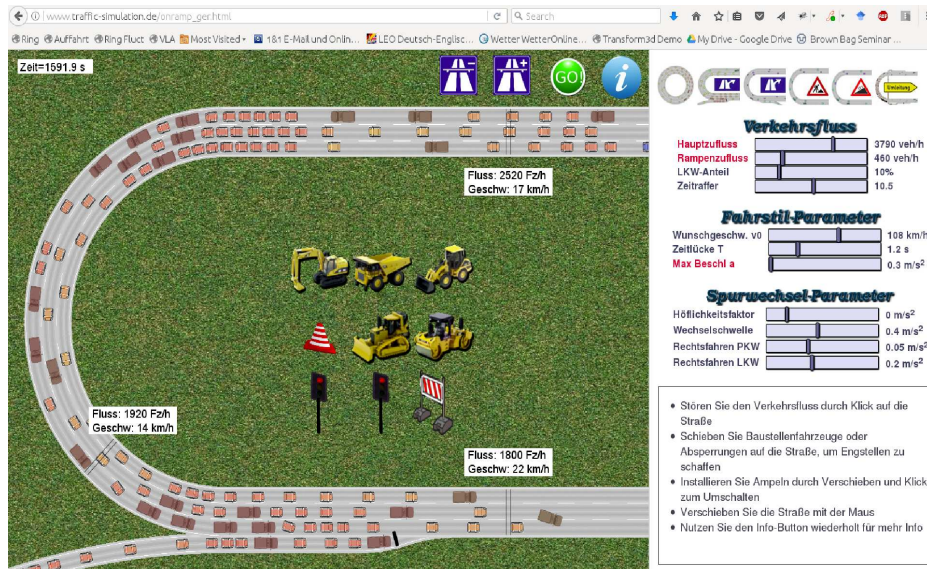


Abbildung 10: Simulation von durch eine Zufahrt verursachten Stauwellen mit dem Online-Simulator [www.traffic-simulation.de](http://www.traffic-simulation.de). Je nach Einstellung der Fahrverhaltensparameter verwandeln sich die Stauwellen in gleichmäßig gestauten Verkehr oder der Stau verschwindet sogar ganz.



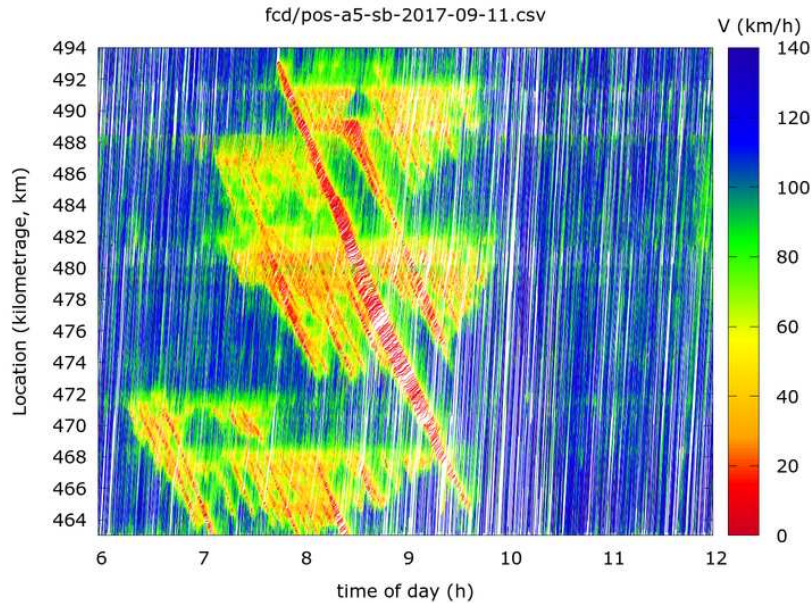


Abbildung 11: Stop-and-Go-Wellen auf der Autobahn A5 bei Frankfurt.

Baumaschinen sperren, um weitere Engstellen zu schaffen (Ziehen der Objekte von der Mitte der Simulation auf die Straße). Schließlich erlauben es die Schieberegler, die Verkehrsstärke und -zusammensetzung und vor allem das mittlere Fahrverhalten einschließlich der Aggressivität zu regeln und die Auswirkungen auf den Verkehrsfluss unmittelbar zu sehen.

Abbildung 10 zeigt, wie in der Simulation rückwärts sich ausbreitende Stauwellen entstehen, die durch die Störungszone auf Höhe der Auffahrt verursacht werden. Das Ergebnis ist konsistent mit echten Autobahndaten, z.B. von der Autobahn A5 bei Frankfurt, Abb. 11: Hier fungieren Anschlussstellen und Autobahnkreuze bei Kilometer 468, 472, 480, 487 und 491 als ortsfeste Verursacher von Stauwellen, genau wie die Auffahrt in Abb. 10. In der Standardeinstellung der Simulation entstehen die Stauwellen nach einiger Zeit. Mit Hilfe der Regler kann man nun zeigen:

- Reduziert man die Zeitlücke  $T$  oder erhöht die Wunschgeschwindigkeit  $v_0$ , fließen zwar mehr Fahrzeuge aus dem Stau aus (der

angezeigte Fluss am Detektor stromabwärts der Ausfahrt steigt), die Stauwellen verstärken sich jedoch und der Verkehr wird insgesamt unruhiger: Eine maßvolle Erhöhung der Aggressivität *erhöht* also die Leistungsfähigkeit des Verkehrsflusses, aber auf Kosten von zunehmend hektischen Fahrmanövern.

- Ähnliche Ergebnisse erhält man, wenn die Spurwechselfparameter aggressiver eingestellt werden, v.A. durch Reduktion des Höflichkeitsfaktors und der Wechselschwelle.
- Erhöht man die Agilität der Fahrer durch Erhöhung des Parameters  $a$ , erhält man neben einer Flusserhöhung auch ruhigeren Verkehr: Bei weiterer Erhöhung verschwinden zuerst die Stauwellen und dann der Stau als solcher sogar ganz.

Instruktiv ist auch das Szenario “Baustelle” (Baustellensymbol klicken): Die Baustelle bewirkt eine Fahrstreifensperrung. Beim Start ist ein Tempolimit von 80 km/h aktiv und alle Fahrer schaffen es rechtzeitig, von der gesperrten auf die durchgehende Spur zu wechseln. Erhöht man hingegen mittels des Schieberegler das Tempolimit oder schafft “freie Fahrt”, wird es aufgrund der Geschwindigkeitsdifferenzen zunehmend schwieriger, zu wechseln, bis es ein Fahrzeug nicht mehr schafft, hinter der Sperrung stehenbleiben muss und spätestens beim Versuch, einzufahren einen Stau verursacht. Auch hier hilft eine Erhöhung der Agilität, den Stau zu verzögern oder zu vermeiden. Bei weniger Verkehrsaufkommen (obere Schieberegler herunterregeln) hingegen kommt es unabhängig von Tempolimits nicht zum Stau. Aus Sicht der Stauvermeidung sind Tempolimits daher nur zu Zeiten erhöhten Verkehrsaufkommens und vor Stör- und Engstellen wirksam.

## 6 Schlussbemerkung

Welcher Fahrstil ist der beste? Was für Auswirkungen hat Aggressivität auf den Verkehrsfluss und die Stauentstehung? Kann ich selbst zur Stabilisierung des Verkehrsflusses und Stauvermeidung beitragen? Wie werden autonome Fahrzeuge den Verkehr in Zukunft verändern? Dieser Beitrag zeigt auf, wie man solche Fragestellungen aus Sicht des Verkehrsfluss-Modellierers mit Hilfe von Simulationen beantworten kann. Generell ist ein “agiler” Fahrstil, also eine schnelle Reaktion

auf sich ändernde Verkehrsverhältnisse und Vorwegnahme der Situation einige Sekunden voraus aus Sicht des Verkehrsflusses optimal. Ferner sollte die Lücke zum Vorderfahrzeug nicht größer als der erforderliche Mindest-Sicherheitsabstand sein. Eine gewisse Aggressivität *erhöht* also die Leistungsfähigkeit des Verkehrsflusses. Die Simulationen zeigen aber auch, dass aggressive Spurwechsel (Höflichkeitsfaktor null, sehr kleine Wechselschwelle, sehr hohe kritische Beschleunigung im Sicherheitskriterium) starke Störungen nach sich ziehen, die letztendlich zum Stau führen. Das Gleiche passiert auch, wenn einzelne Autofahrer unvermittelt kurzzeitig stark bremsen (Klick in der Simulation auf einzelne Autos). Das Tückische daran ist, dass der oder die eigentlichen Stauverursacher (die nach dem Klick markierten Fahrzeuge) in der Regel dem Stau entkommt, ja in den meisten Fällen die Fahrer nicht einmal mitbekommen, was sie “angerichtet” haben.

Schließlich kann man mit den vorgestellten Methoden untersuchen, ob (teil-)autonome Fahrzeuge den Verkehrsfluss positiv oder negativ beeinflussen und von welchen Einflussfaktoren dies abhängt. Der Längsregler des autonomen Fahrzeugs ersetzt dabei das bisherige Fahrzeugfolgemodell, und die Spurwechselentscheidungs-Heuristik das bisherige Spurwechselmodell.

## Literatur

- Hamdar, S., Treiber, M., Mahmassani, H., and Kesting, A. (2008). Modeling driver behavior as sequential risk-taking task. *Transportation Research Record*, 2088:208–217.
- Kesting, A., Treiber, M., and Helbing, D. (2007). General lane-changing model MOBIL for car-following models. *Transportation Research Record*, 1999:86–94.
- Treiber, M., Hennecke, A., and Helbing, D. (2000). Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical Review E*, 62:1805–1824.
- Treiber, M. and Kesting, A. (2013). *Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation*. Springer, Berlin.
- Treiber, M., Kesting, A., and Helbing, D. (2006). Delays, inaccuracies

and anticipation in microscopic traffic models. *Physica A*, 360:71–88.

Tversky, A. and Kahneman, D. (1982). The framing of decisions and the psychology of choice. In Hogarth, R. M., editor, *Question Framing and Response Consistency*, pages 3–36. Jossey Bass, San-Francisco.