

Verkehrsdynamik und urbane Systeme

Methoden der Nichtlinearen Dynamik und der Statistischen Physik leisten wichtige Beiträge zum Verständnis von Verkehrsphänomenen.

Dirk Helbing und Kai Nagel

Betrachtet man den Fahrzeugstrom auf den Straßen aus dem Blickwinkel der Physik, zeigt sich ein Vielteilchensystem, das überraschende Zustände einnehmen kann. Der Versuch, mit physikalischen Methoden die Entstehung und Auflösung von Staus zu erklären, ist ein entscheidender Schritt, um auch die Dynamik des Gesamtsystems aus Verkehr und Infrastruktur zu verstehen. Neben der Verkehrsprognose könnten so auch die Städteentwicklung und Planung großräumiger Verkehrswege von den Erkenntnissen der „Verkehrphysik“ profitieren.

Verkehrssysteme haben eine relativ nahe liegende Beziehung zur Physik, vor allem der Physik getriebener Vielteilchensysteme.¹⁾ Verkehr spielt sich schließlich im ein-, zwei- oder dreidimensionalen Raum ab, und offensichtlich sind Konzepte wie die „Teilchenzahlerhaltung“ und repulsive Wechselwirkungen anwendbar. Allerdings sind die „Teilchen“ eines Verkehrssystems (also die Reisenden) komplizierter als die Teilchen typischer physikalischer Systeme. Die meisten Reisenden wissen, wo sie hin wollen und wie sie dort hinkommen, und zum Verständnis des Gesamtsystems ist es nötig, auch diese Aspekte zu verstehen. So gelangt man zu den Fragen der Routenwahl, zu Gesetzmäßigkeiten im Reisezeitverhalten und der Verkehrsmittelwahl, und schließlich zur Generierung von synthetischen Tagesplänen von Individuen. Auch die Entwicklung von Städten folgt bestimmten Gesetzmäßigkeiten. So sind z. B. Städte, deren Ränder und einige ihrer Transportsysteme fraktal, also „ausgefranst“. Es liegt nahe, hier zelluläre Automaten für Agglomerationsprozesse einzusetzen.

Schlussendlich kann man all diese Phänomene in einem großen Simulationsmodell koppeln. Simulationen großer Netze mit vielen Millionen Fahrzeugen sind inzwischen sehr viel schneller als in Echtzeit möglich. Auch die Kopplung mit der Routenwahl funktioniert inzwischen recht gut. Aber die Ankopplung der weiteren Module, also z. B. die Generierung von Tagesplänen, ist derzeit noch schwierig. Nichtsdestoweniger erwarten wir, dass die hier angesprochenen Methoden schon in wenigen Jahren Eingang finden werden in die Erstellung langfristiger Infrastrukturpläne.

Verkehrszustände auf Autobahnen

Straßenverkehr wirkt im ersten Moment relativ überschaubar. Im Falle des einspurigen Verkehrs bleibt selbst die Reihenfolge der Fahrzeuge erhalten. Wenn man der Einfachheit halber zunächst davon ausgeht, dass sich alle Autofahrer gleich verhalten, dann lässt sich eine homogene stationäre Lösung konstruieren: Alle Fahrzeuge haben den gleichen Abstand zum Vordermann, der sich als Kehrwert der Fahrzeugdichte ergibt. Dazu gehört eine bevorzugte, abstandsabhängige Geschwindigkeit, die wiederum für alle übereinstimmt. Also könnten sich in diesem System alle Fahrzeuge mit gleicher Geschwindigkeit und immer gleichem Abstand fortbewegen.

Die Frage ist nun, was passiert, wenn man diese Lösung stört. Die meisten Erklärungsansätze, um Verkehrszusammenbrüche zu verstehen, gehen davon aus, dass der Verkehr durch Überreaktion der Fahrer instabil wird, was unter bestimmten Bedingungen zu Kettenreaktion und damit zum Verkehrstillstand führen kann [1]. Dabei stehen Kräftermodelle mit zusätzlichen Antriebs- und Dissipationstermen [2] im Wettbewerb mit zellulären Automaten [3] und schwellenwertgestützten Verhaltensmodellen [4], die verschiedene Einsatzbereiche haben, aber zum Teil qualitativ die gleichen Verkehrszustände reproduzieren und somit in übereinstimmende Universalitätsklassen von Modellen fallen.

Vor kurzem wurden fünf verschiedene behinderte Verkehrszustände vorhergesagt [2, 5], die sich inzwischen alle in Verkehrsdaten nachweisen ließen [6]. Sie scheinen das empirisch beobachtete Spektrum vollständig wiederzugeben, wobei es unter bestimmten Umständen räumliche Abfolgen dieser Zustände oder Übergänge zwischen ihnen gibt. Neben dem bekannten Stop-und-Go-Verkehr und einzelnen Stauwellen gehören dazu – wie in Abbildung 1 zu sehen – ein homogener sowie ein oszillierender zähfließender Verkehrszustand und lokalisierte Zusammenbrüche an Autobahnzufahrten oder Kapazitätsengpässen. Im Bei-



Die verschiedenen Stauformen auf Autobahnen sind inzwischen gut verstanden. Nun geht es darum, durch Simulation ganzer Verkehrsnetze die Routenwahl und die Planung der Infrastruktur zu unterstützen.

1) www.trafficforum.org

Prof. Dr. Dirk Helbing, Institut für Wirtschaft und Verkehr der TU Dresden, Andreas-Schubert-Str. 25, 01062 Dresden, www.helbing.org; Prof. Dr. Kai Nagel, ETH-Zürich, Zentrum HRS H21, 8092 Zürich, Schweiz

spiel des lokalisierten Zusammenbruchs (Abb. 1, oben links) ist sehr gut der vorhergesagte „Bumerang-Effekt“ zu erkennen, der einem Verkehrszusammenbruch vorausgehen kann: Kleine Störungen bewegen sich dabei mit den Fahrzeugen stromabwärts und kehren ihre Ausbreitungsrichtung um, wenn eine bestimmte Amplitude erreicht ist. Die voll ausgeprägte Stauwelle bewegt sich deshalb stromaufwärts, weil an der stromabwärts-

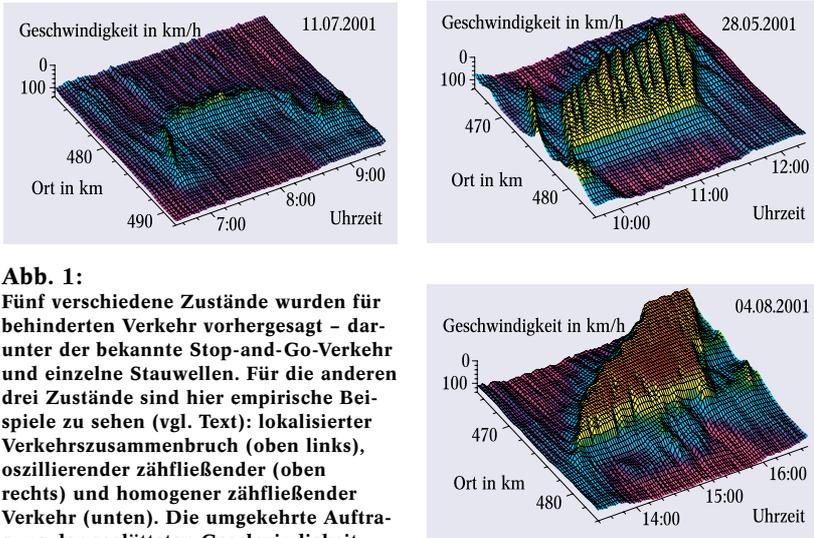


Abb. 1: Fünf verschiedene Zustände wurden für behinderten Verkehr vorhergesagt – darunter der bekannte Stop-and-Go-Verkehr und einzelne Stauwellen. Für die anderen drei Zustände sind hier empirische Beispiele zu sehen (vgl. Text): lokalisierter Verkehrszusammenbruch (oben links), oszillierender zähfließender (oben rechts) und homogener zähfließender Verkehr (unten). Die umgekehrte Auftragung der geglätteten Geschwindigkeit gibt eine gute Vorstellung von der räumzeitlichen Fahrzeugdichte. (Quelle: M. Schönhof)

gen Front Fahrzeuge aus dem Stau herausfahren, während am Stauende neue Fahrzeuge hinzukommen. Sie wird aber zuweilen am Ort einer Zufahrt eingefangen (im Beispiel bis 8:40 Uhr).

Das überraschende Andauern einer Verkehrsstörung an einer Engstelle ist in Abb. 1, oben rechts, zu sehen: Oszillierender zähfließender Verkehr tritt häufig in der Rushhour oder im Urlaubsreiseverkehr auf. Hier bricht der Verkehr an einer Autobahnzufahrt zusammen, nachdem dort eine stromaufwärts laufende Störung eintrifft. Der Zusammenbruch ist durch die Vergrößerung der Zeitlücken im behinderten Verkehr bedingt, welche die effektive Straßenkapazität verringert.

Seltener findet man homogenen zähfließenden Verkehr (Abb. 1, unten). Er entsteht meistens durch Sperrung nach einem Unfall, wenn die Engstelle also gravierend ist. Der Rückstau wächst zunächst, weil mehr Fahrzeuge eintreffen als abfließen können, und verkürzt sich erst wieder nach Räumung der Unfallstelle.

Diese Beobachtungen stimmen gut mit Verkehrsmodellen überein, die einen deterministischen Instabilitätsmechanismus aufgrund verzögerter Reaktionen auf Änderungen in der Verkehrssituation besitzen und zudem bistabile Dichtebereiche, in denen der resultierende Verkehrszustand (zusammengebrochener oder freier Verkehr) von der Größe der Störung des homogenen Verkehrsflusses abhängt [2, 5]. Auch für die kontrovers diskutierten erratischen Variationen des Zusammenhangs zwischen Verkehrsfluss und Fahrzeugdichte [7] konnte inzwischen eine plausible Erklärung gefunden werden [8, 4]. Demnach sind sie eine Folge variierender Fahrzeug- oder Verhaltensparameter, die zu starken Fluktuationen der mittleren Zeitlücken führen. Weiterhin ist es gelungen, die Form des repulsiven Interaktionspotentials zwischen Fahrzeugen

zu ermitteln [9, 10], das in die oben genannten Kräfte-Modelle eingeht. Hierbei haben Konzepte aus der Statistischen Physik, die aus der Theorie der Zufallsmatrizen (Random Matrix Theory) bekannt sind, zum entscheidenden Durchbruch geführt. Sie erlauben es, die Wechselwirkungskraft aus den dichteabhängigen Abstandsverteilungen für „Fahrzeugensembles“ im stationären Gleichgewicht zu ermitteln, für die im statistischen Durchschnitt eine Energieerhaltung gilt. Damit nutzt das Verfahren die Variation der Fahrzeugabstände aus, welche durch die Gauß-Verteilung der Geschwindigkeiten bedingt ist und Probleme bei der Bestimmung der Wechselwirkungskräfte nach konventionellen Methoden verursacht. Es hat sich herausgestellt, dass das Verhalten der Autofahrer im freien und behinderten Verkehr unterschiedlich, aber jeweils in sich konsistent ist [10] (Abb. 2). Fahrer-Fahrzeug-Einheiten weisen also situationsspezifische Wechselwirkungen auf. Insofern sind sie adaptiver als physikalische Teilchen, was nicht ganz überrascht.

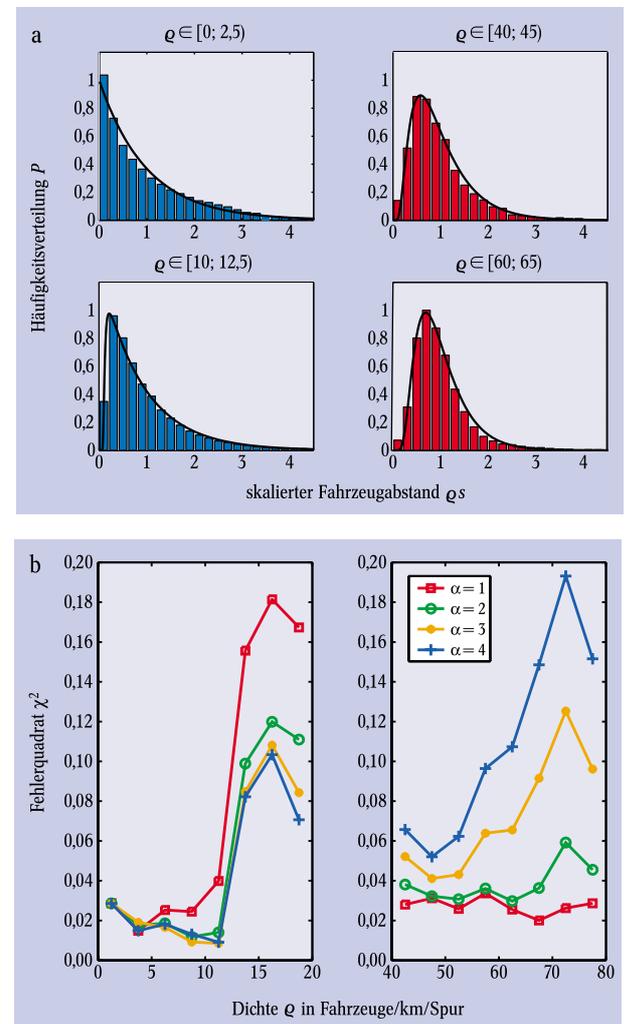


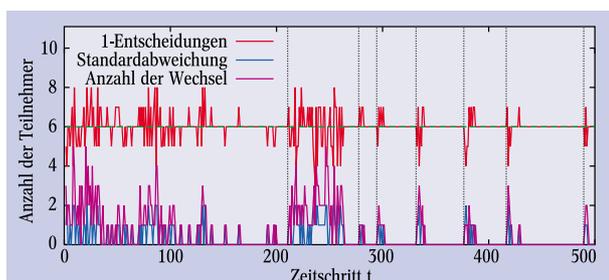
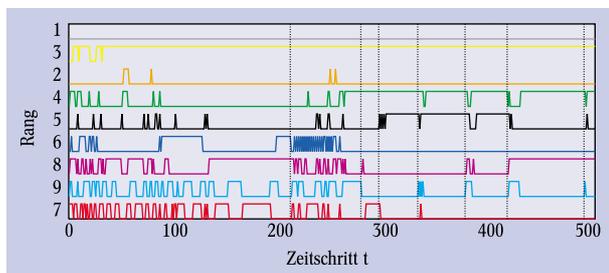
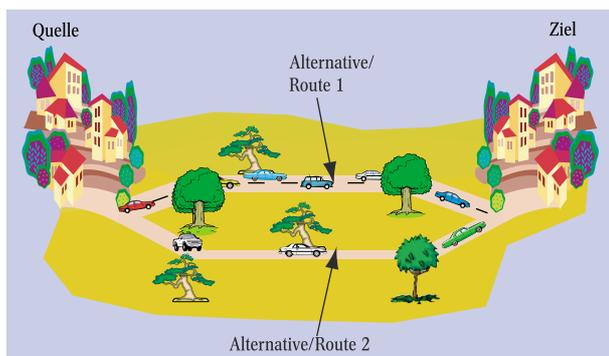
Abb. 2:
 ► a) Balkendiagramme der empirischen Verteilung der Nettofahrzeugabstände s für verschiedene Bereiche der Fahrzeugdichte q im Vergleich mit der theoretischen Verteilung für das vorwärts gerichtete Interaktionspotential $U(s) \propto s^{-\alpha}$ (durchgezogene Linien).
 ► b) Die kumulative quadratische Abweichung χ^2 zwischen den theoretischen und den empirischen Daten ist minimal für den Exponenten $\alpha=1$ im behinderten Verkehr (rechts), aber für $\alpha \approx 4$ im freien Verkehr (links), was ein Hinweis auf adaptives Verhalten ist. (nach [10])

Routenwahlverhalten

Nach dem Verständnis der Verkehrsdynamik auf einzelnen Straßen stellt sich nun die Frage, wie sich die überlastete Straßeninfrastruktur effizienter nutzen lässt, d. h. wie man den Verkehr so über Alternativrouten verteilen kann, dass die Fahrtzeiten minimal werden und auf den Alternativrouten fairerweise gleich ausfallen. Im Unterschied zu Wettervorhersagen reagieren Fahrer auf Verkehrsprognosen, sodass deren Grundlage hinfällig wird. Wenn man jedoch die Reaktion auf Verkehrsinformationen mathematisch modellieren kann, dann lassen sich mit einem iterativen Verfahren Prognosen erstellen, welche die Fahrerreaktionen bereits antizipieren [11]. Ein solches Verfahren wird bereits in Irvine, Kalifornien, eingesetzt.

In bestimmten Fällen kann man noch effizienter vorgehen: Auf Basis einer Verkehrsbelastungsanalyse lässt sich ermitteln, welchen Prozentsatz an Fahrern man auf eine Alternativroute umleiten müsste, um geringe und gleiche Fahrtzeiten auf beiden Routen zu erreichen. Dann werden, zum Beispiel per SMS, so viele individuelle Wechselempfehlungen ausgegeben, wie zum Erreichen dieses Zustands erforderlich sind – unter der Berücksichtigung des Prozentsatzes, mit dem die Empfehlungen befolgt werden. Entscheidend für den besonderen Erfolg dieser „gemischten Strategien“ ist, dass im Unterschied zum Radio nicht alle Fahrer die gleiche Empfehlung erhalten, sondern nur ein bestimmter Prozentsatz.

Jüngste Routenwahlexperimente im Labor haben außerdem zu wichtigen Erkenntnissen über die Entscheidungsdynamik und Koordination von Individuen geführt [12, 13], wenn diese auf aggregierte Informatio-



nen wie die mittleren Fahrtzeiten oder mittleren Geschwindigkeiten reagieren. Während die Anpassung an das Nutzergleichgewicht (in dem alle mit der gleichen Geschwindigkeit vorankommen) im Mittel gelingt, gibt es doch erhebliche Schwankungen um diesen Wert, die zu einer ineffizienten Nutzung vorhandener Ressourcen (d. h. der Straßeninfrastruktur) führen. Die Erfolge der Individuen (hier: die Geschwindigkeiten) fallen also geringer als möglich aus, was im Straßenverkehr zu unnötig hohen Fahrtzeiten und Staus führt.

Der Grund sind Koordinationsprobleme [13]. Sobald einige Individuen bestrebt sind, besser abzuschneiden als die anderen, wird das Nutzergleichgewicht von Zeit zu Zeit in der Hoffnung auf bessere Ergebnisse verlassen. Dies führt zu einer Störung des Gleichgewichts, welche Gegenreaktionen mit dem Ziel hervorruft, das Nutzergleichgewicht wieder herzustellen. Allerdings fühlen sich hier alle Beteiligten angesprochen, und keiner weiß, wieviele Leute ihre Entscheidung ändern werden, also die Route wechseln. Die zu verschiedenen Zeiten getroffenen Entscheidungen des in Abb. 3 gezeigten Routenwahl-experiments entsprechen der gewählten Route an verschiedenen Tagen auf der Basis der Fahrtzeiten im vorausgegangenen Zeitschritt.

Bemerkenswert ist, dass nach ruhigen, wechselfreien Phasen im Nutzergleichgewicht turbulente Perioden mit zahlreichen Umentscheidungen auftreten, ausgelöst durch einzelne Wechsel (gestrichelte senkrechte Linien in Abb. 3). Diese Überreaktionen ähneln sehr den turbulenten Phasen (sog. Volatilitätsclustern) an Aktienmärkten, an denen viele Teilnehmer ebenfalls auf aggregierte Informationen reagieren, nämlich Aktienindizes.

Das Problem besteht in der unzureichenden Information, die zu Koordinationsproblemen bei der optimalen Verteilung begrenzter Ressourcen führt. Zwar erlernen die Betroffenen erstaunlicherweise individuelle Reaktionsmuster auf identische Informationen, indem manche bei einem Ungleichgewicht eher wechseln als andere. Einige Individuen entwickeln sogar entgegengesetzte Reaktionsweisen, sodass die Anpassungsleistung der Gruppe insgesamt erstaunlich hoch ist. Dennoch hängt diese Anpassungsleistung sehr stark von kleinen Details ab, welche Informationen wie an die Teilnehmer weitergegeben werden. Hier gibt es daher noch ein großes Potenzial bei Systemen zur Entscheidungsunterstützung. Am besten hat es sich in Experimenten bewährt, den Betroffenen individuelle Empfehlungen zu geben, welche Entscheidung sie treffen sollten, die auf der Grundlage einer Prognose über den zu erwartenden Systemzustand und der Befol-

Abb. 3:

In diesem Beispiel für ein Routenwahlproblem (oben schematisch dargestellt) haben neun Testpersonen die Wahl zwischen zwei Wegen. Ihre jeweiligen Entscheidungen sind in der Reihenfolge wachsender Wechselfrequenz dargestellt (Mitte). Das Ranking gibt den mittleren Erfolg – definiert durch die mittlere Geschwindigkeit – der einzelnen Spieler über alle Zeitschritte an. Teilnehmer mit geringer Wechselrate schnitten demnach eher besser ab als solche, die oft wechselten. Die Anzahl der „1-Entscheidungen“, d. h. die Nutzungshäufigkeit der Route 1 (rot), entspricht im Mittel dem Nutzergleichgewicht (grün), in dem die Geschwindigkeiten auf beiden Strecken gleich ausfallen (unten). Man findet jedoch eine Überreaktion beim Wechselverhalten, da die Anzahl der Wechsel größer ausfällt als die (Standard-)Abweichung der 1-Entscheidungen vom Nutzergleichgewicht. Letztere entspricht der Anzahl der Wechsel, die zum Erreichen des Nutzergleichgewichts tatsächlich erforderlich wären. (nach [13])

gungsrates von Empfehlungen ausgegeben werden [13].

Auf diese Weise lassen sich Überreaktionen minimieren und unter Umständen sogar die Ergebnisse aller Individuen verbessern, indem die verfügbaren Ressourcen effizienter genutzt werden! Diese Resultate sind nicht nur für die Optimierung des Straßenverkehrs relevant. Sie sind in sämtlichen Situationen von Bedeutung, in denen Individuen um begrenzte Ressourcen konkurrieren und diese so effizient wie möglich verteilt werden sollen.

Gesetzmäßigkeiten im Reisezeitverhalten

Um den Verkehrsfluss in Straßennetzen zuverlässig zu simulieren, benötigt man unter anderem Daten über die Verkehrsmittelwahl und die Reiseweiten oder Reisezeiten in Alltags- und Urlaubssituationen. Die Verkehrsströme hat man schon frühzeitig mit physikalischen Ansätzen zu beschreiben versucht, wie die Anwendung des „Gravitationsgesetzes“

$$V_{ij} = V(d_{ij}) = \frac{m_i m_j}{d_{ij}} \quad (1)$$

zeigt [14]. Hierin bedeuten V_{ij} das Verkehrs- oder Güteraufkommen oder die Umzugsrate von Stadt i nach Stadt j , m_i bzw. m_j die entsprechenden Einwohnerzahlen und d_{ij} die (effektive) Distanz zwischen beiden Städten. Spätere Studien haben Formeln für das wahrscheinlichste Verkehrsaufkommen V_{ij} mit einer Maximierung der „Entropie-Funktion“

$$-\sum_{i,j} V_{ij} \ln V_{ij} \quad (2)$$

unter Nebenbedingungen begründet. Die Nebenbedingungen sind die Kompatibilität mit dem gemessenen „Quellenverkehrsaufkommen“ $Q_i = \sum_j V_{ij}$ und dem gemessenen „Zielverkehrsaufkommen“ $Z_j = \sum_i V_{ij}$, sowie weiteren Größen, etwa der mittleren Zahlungsbereitschaft $K = k \sum_{i,j} d_{ij} V_{ij} / \sum_{k,l} V_{kl}$ für die Fortbewegung, wobei die Reisekosten $k_{ij} = k d_{ij}$ beispielsweise proportional zur Distanz d_{ij} angenommen werden [15].

Aber auch energetische Gesichtspunkte stellen sich als wesentlich heraus. Bekanntlich legt man zu Fuß im Durchschnitt kürzere Strecken als mit dem Fahrrad

und mit diesem kürzere als mit dem Auto zurück. Eine genauere Analyse empirischer Daten zeigt, dass die durchschnittliche Reisezeit bei der alltäglichen Fortbewegung mit erstaunlicher Genauigkeit umgekehrt proportional zum körperlichen Energieverbrauch ist, den die jeweilige Reiseaktivität (z.B. beim Laufen, Rad- oder Autofahren) erfordert (dies hat also nichts mit dem Energieverbrauch des jeweiligen Fahrzeugs zu tun). Dabei wird im Mittel ein bestimmtes Energiebudget für die Fortbewegung aufgewandt, das für jede Fortbewegungsart gilt. Mehr noch: Skalieren wir die Reisezeiten für unterschiedliche Fortbewegungsarten (zu Fuß, per Fahrrad, per Bus, als Autofahrer, als Beifahrer, etc.) um den jeweiligen körperlichen Energieverbrauch pro Zeiteinheit, so erhalten wir aus den unterschiedlichen Reisezeitverteilungen im Rahmen der statistischen Schwankungen eine universelle Reiseenergieverteilung [16]. Diese Energieverteilung entspricht im Wesentlichen einer kanonischen Verteilung, aber kurze Wege kommen interessanterweise wesentlich seltener vor als erwartet (Abb. 4). Die Interpretation der mathematischen Formel für die Reisezeitverteilung legt nahe, dass Reisen im Durchschnitt gar nicht erst angestrebt werden, wenn der zusätzliche Energieaufwand für ihre Vorbereitung (d. h. Schuhe und Jacke anziehen, zur Garage gehen etc.) bei über 20% liegt und damit nicht mehr in einem vernünftigen Verhältnis zum Aufwand für die Durchführung der Reise steht.

Ein solches universelles Reiseenergiegesetz hat mehrere Vorzüge: Im Vergleich mit bisherigen Modellen kommt es mit weniger, besser bestimmbar Parametern aus, die ihrerseits über Planungszeiträume von 20 bis 30 Jahren anwendbar sind. Weiterhin ermöglicht es ein theoretisches Verständnis des Reiseverhaltens und erlaubt quantitative Schlüsse über Routenverteilungen, Verkehrsmittelwahl und induzierten Verkehr. Dies ist insbesondere von Bedeutung, wenn man die Wechselwirkung zwischen der zeitlichen Entwicklung von Siedlungs- bzw. Stadtstrukturen und Transportsystemen verstehen will. Außerdem dient es der Bewertung des Akzeptanzwachses öffentlicher Verkehrsmittel, wenn der Reisekomfort erhöht wird. Es erlaubt auch die Vorhersage der Nutzung neuer Transportmittel und der Marktpotenziale neuer Mobilitätsprodukte sowie der Veränderung des durchschnittlichen Reiseverhaltens in einer alternden Gesellschaft.

Generierung von Reiseplänen

Alternativ zum „Gravitationsgesetz“ und der „Entropiemaximierung“ lässt sich die Nachfrage nach Verkehr auch mit so genannten Aktivitätsplänen generieren. Hierfür muss man zuvor auf der Grundlage von Zensus-Informationen eine synthetische Bevölkerung erzeugen. Die Ausgabe besteht aus zufällig erzeugten Haushalten, für die bestimmte demographische Charakteristika bekannt sind, wie z. B. die Zusammensetzung des Haushalts, das Einkommen, Autobesitz etc. Abgesehen von statistischen Fluktuationen entsprechen die aggregierten Merkmale der synthetischen Haushalte exakt dem originalen Zensus. Beispielsweise wird man in einem Bezirk die richtige Anzahl von weiblichen/männlichen Personen finden, oder die richtige Altersstruktur. Was aus Gründen des Datenschutzes häufig fehlt, ist die Korrelationsstruktur, also z. B. wieviele der Männer einer bestimmten Altersgruppe angehören. Diese Art von Information ist normalerweise nur für größere geographische Einheiten vorhanden, in

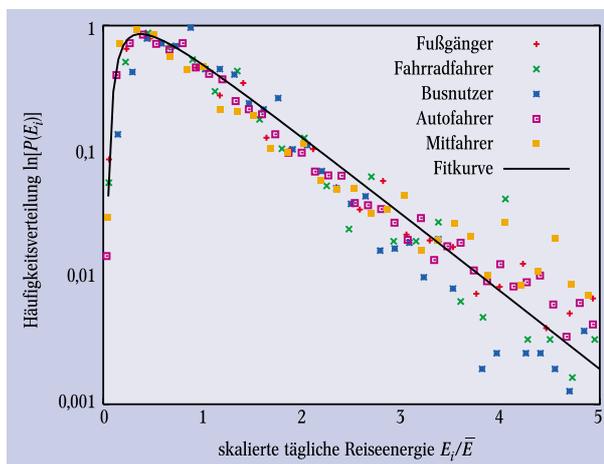


Abb. 4: Skalierte Reiseenergieverteilungen für verschiedene Fortbewegungsarten (nach [16]). Innerhalb der statistischen Variation sind alle empirischen Verteilungen mit der universellen Funktion $P(E_i) \approx N \exp[-\alpha \bar{E} E_i - E_i / (\beta \bar{E})]$ und den zwei einheitlichen Parametern $\alpha = 0,2$, $\beta = 0,7$ sowie der Normierungskonstante $N(\alpha, \beta) = 2,5$ vereinbar.

denen mehrere Zensus-Bezirke zusammengefasst werden. Unter der Annahme, dass die Korrelationsstruktur in allen zugehörigen Bezirken identisch ist, kann man die fehlenden Informationen jedoch rekonstruieren (z.B. [17]).

Bei Aktivitätsplänen denkt man am einfachsten an die Berechnung eines vollständigen Tagesplanes, einschließlich Schlafen, Frühstück, Arbeiten, Einkaufen usw. Dies ist das Aktivitätsmuster. Als nächstes wird jeder Aktivität ein Ort zugeordnet. Aktivitäten, die an unterschiedlichen Orten ausgeführt werden, erzeugen somit implizit eine Fahrt. Als letztes wird dann ein genauer Zeitplan erzeugt, welcher sagt, zu welcher Zeit der Gesamtplan begonnen wird und wie lange jede einzelne Aktivität benötigt.

Dabei werden die jeweiligen Einzelentscheidungen an die demographischen Daten des Individuums angepasst. Das macht diese Methode erheblich leistungsfähiger als die Entropie- oder die Gravitationsmodelle, da hier nichtlineare Effekte berücksichtigt werden können. Dieses ganze Themengebiet ist momentan Gegenstand intensiver Forschung, sodass die Methode nur an Beispielen illustriert werden kann. Derzeit funktionierende Implementationen beruhen meistens auf Varianten der so genannten Discrete-Choice-Theorie [18], in deren einfachster Ausprägung Wahrscheinlichkeiten für Entscheidungsoptionen i die formale Gestalt

$$p_i \propto \exp[\sum_k \beta_k x_{ik}] \quad (3)$$

haben, welche an die kanonische Verteilung erinnert. Dabei sind die x_{ik} entweder Attribute der Person, wie z. B. Einkommen, oder Attribute der Option, wie z. B. die Fahrzeit. Die β_k sind Gewichtungsfaktoren, die via Maximum-Likelihood-Schätzung oder anderen Methoden aus Befragungen gewonnen werden.

Discrete-Choice-Modelle, wie eben am Beispiel aufgeführt, sind die am besten etablierten Modelle zur quantitativen Charakterisierung von menschlichem Verhalten in sozio-ökonomischen Kontexten. Sie werden auch im Marketing eingesetzt. Diese Modelle haben allerdings dann ihre Grenzen, wenn man sich weit vom Arbeitspunkt entfernt, sodass die Werte für die x_{ik} zu weit auseinander liegen. Dies wird dann klar, wenn man den Logarithmus von Gl. (3) nimmt: $\log p_i \propto \sum_k \beta_k x_{ik}$. Beispielsweise würde also der Logarithmus der Wahrscheinlichkeit, das Auto statt der Straßenbahn zu nehmen, linear vom Einkommen abhängen; dies ist nur plausibel für Einkommen, die nicht zu weit entfernt von einem mittleren Einkommen liegen. In solchen Bereichen wird man menschliches Verhalten möglicherweise nur dann noch richtig beschreiben können, wenn Restriktionen des Systems, d. h. etwa Kapazitätsengpässe oder auch Energiebudgets wie in Abb. 4, die Dynamik dominieren. Ansätze, die mögliche Tagespläne innerhalb solcher Restriktionen generieren, sind z. B. genetische Algorithmen [19].

Auch in Bezug auf Aktivitäten spielt das Lernverhalten, wie schon für die Routenwahl, eine wichtige Rolle: Wenn ein Tagesplan die Erwartungen nicht erfüllt, dann wird vermutlich für den Folgetag oder für die nächste Woche eine andere Alternative ausprobiert. Gezielte Befragungen zeigen, dass das Generieren und Adaptieren von Aktivitätsplänen auf Zeitskalen von wenigen Sekunden (spontane Entscheidung) bis hin zu mehreren Monaten (Urlaubsplanung) geschieht [20]. Computer-Implementationen solchen Verhaltens werden derzeit an mehreren Orten der Welt erprobt.

Simulation großer Verkehrsnetze

Wenn man sich das bisher Gesagte im Licht der Erfahrungen aus der Statistischen Physik ansieht, dann kommt man schnell auf die Idee, dass man nun eine teilchen-basierte Mikro-Simulation braucht, welche all die individuellen Entscheidungen und Restriktionen im großen Maßstab implementiert. Zum Beispiel könnte man sich eine Simulation von ganz Europa vorstellen, die den synthetischen Reiseweg jeder Person und jedes Frachtgutes nachzeichnet. Vorzugsweise sollte eine solche Simulation um ein Vielfaches schneller als Echtzeit laufen, um Vorhersagen zulassen, Steuerungsalternativen optimieren oder große Planungsstudien durchführen zu können.

Europa umfasst ca. 400 Millionen Einwohner. Zusammen mit Fracht benötigen wir also eine Simulation von 10^9 Teilchen, und wenn wir Zeitschritte von einer Sekunde annehmen, dann brauchen wir 10^5 Zeitschritte zur Simulation eines Tages. Ein solches Problem ist zwar deutlich kleiner als die typischerweise in der Physik vorgefundenen 10^{23} Teilchen, liegt aber durchaus im Bereich von anspruchsvollen Molekulardynamik-Simulationen. Hinzu kommt, dass unsere „Teilchen“ deutlich mehr interne Komplexität besitzen, die zusätzliche Computerzeit kostet.

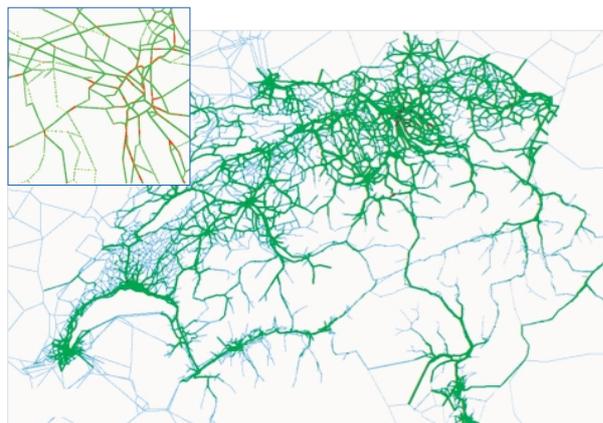


Abb. 5: Realistischer Verkehr in der Schweiz um acht Uhr morgens. Jedes Fahrzeug ist einzeln simuliert. Rote Bereiche weisen auf Staus hin. (aus [26])

Auf dem Weg zu solchen großen mikroskopischen Verkehrssimulationen haben verschiedene Arbeitsgruppen unterschiedliche Schwerpunkte gesetzt. Beispielsweise werden an der Universität Duisburg zum Zweck der Echtzeit-Vorhersage derzeit Online-Daten aus Zählschleifen in ganz Nordrhein-Westfalen gesammelt und in ein mikroskopisches Zellularautomaten-Modell eingespeist. Die Resultate werden dann auf dem Web angezeigt.²⁾ Ein ähnliches Modell existiert für Duisburg.³⁾ Die jetzige Version verwendet die Simulation vor allem zur Zustandsschätzung, also zur Erzeugung von dynamisch konsistenten (Pseudo-)Daten auf Autobahnstücken, auf denen sich keine Zählschleifen befinden. Selbst dies führt bereits auf manchmal unerwartete Probleme. Was macht man beispielsweise, wenn die Sensoren mehr Autos anzeigen als die Simulationen? Für kontinuierliche Modelle gibt es hierfür bekannte und gut verstandene Methoden, z. B. den Kalman-Filter. Für diskrete Modelle ist dies weniger gut verstanden, z. B. muss man die Fahrzeuge so einfügen, dass dadurch nicht ein virtueller Stau ausgelöst wird. Seit kurzem wird das Modell auch zur Berechnung von Kurzzeitprognosen eingesetzt.

Ein etwas anderer Weg wurde an der ETH Zürich eingeschlagen. Dort beschränkt man sich derzeit auf offline-Daten und auf extrem einfache (aber immer

2) www.autobahn.nrw.de

3) www.traffic.uni-duisburg.de/OLSIM

noch mikroskopische) Modelle, simuliert damit allerdings sehr schnell extrem große Szenarien. Derzeit benötigt die Verkehrssimulation von allen sieben Millionen Einwohnern der Schweiz noch nicht einmal drei Minuten, um den gesamten Verkehr eines ganzen Tages zu berechnen (Abb. 5). Die Technologie dahinter besteht aus 64 Pentium-CPU's mit Myrinet-Kommunikation [21]. Mit deutlich mehr CPU's, aber ansonsten gleicher Technologie könnte man wahrscheinlich ganz Europa mit gleicher Rechengeschwindigkeit simulieren.⁴⁾

Selbstorganisation bei der Stadtentwicklung

Bisher haben wir nur diskutiert, wie sich das System verhält, wenn die Bevölkerung und die Landnutzung festgelegt sind. Es ist aber klar, dass sich auch das System selbst verändert: Menschen ziehen um; Fabriken schließen oder werden neu eröffnet; Einkaufs- und Freizeitmöglichkeiten verlagern sich. Dies ist offensichtlich ein räumlicher Strukturbildungs-Prozess.

Von besonderem Interesse für die Physik ist hier, dass Städte fraktale Struktur zeigen, sowohl in der Beziehung zwischen Fläche und Radius als auch in der Beziehung zwischen Fläche und Perimeter [22]. Dies legt nahe, dass man versuchen sollte, Städtewachstum durch ein Modell mit lokalen Regeln zu beschreiben, also durch ein Modell mit Zellen, bei dem das Verhalten einer Zelle nur von ihren unmittelbaren Nachbarn abhängt. Neben Versuchen, das fraktale Verhalten durch Variationen von in der Physik bekannten Modellen zu erzeugen [23], konzentriert man sich auch auf solche, welche das Wachstum realer Städte nachvollziehen

[24]. Dabei stellt sich heraus, dass Städte nicht aufgrund rein lokaler Regeln wachsen. Der Bau eines großen Einkaufszentrums oder eines Golfplatzes hängt sicher davon ab, ob sich *irgendwo* in der Stadt bereits eine solche Einrichtung befindet. Dies führt dazu, dass letztendlich alle Zellen von allen anderen Zellen abhängen, was zu komplizierten Modellen und langen Rechenzeiten führt. Eine neue Entwicklung ist der Versuch, systematischere Regelsysteme zu finden, insbesondere in Bezug auf die langreichweitigen Wechselwirkungen [25]. Dies wird erreicht durch eine Hierarchie von Umgebungen: In der unmittelbaren Nachbarschaft zählt jede Zelle einzeln. Mit weiterer Entfernung werden mehr und mehr Zellen zusammengefasst in ihrer Wirkung. Bezüglich der anderen Seite der Stadt interessiert also nur noch, wie hoch die Dichte der Golfplätze ist, während in der unmittelbaren Nachbarschaft auch deren genaue Position wichtig ist. Diese Methode ist nicht unähnlich den Multipol-Methoden bei Teilchensimulationen.

Die Analyse von Stadtentwicklung erhält insbesondere in den USA zusätzliche Relevanz durch die inzwischen erkannte Problematik der Zersiedelung („urban sprawl“). „Smart growth“⁵⁾ also der Versuch, das bei zunehmender Bevölkerung und zunehmenden Wohnraumwünschen unvermeidbare Städtewachstum intelligent zu gestalten, wird inzwischen nicht mehr nur von Umweltschützern und ähnlichen Gruppen angesprochen, sondern gehört zum Mainstream.

Verkehr und Infrastrukturentwicklung

Bisher haben wir verschiedene Ansätze besprochen, unterschiedliche Aspekte regionaler Systeme zu beschreiben. Dies reflektiert in etwa die historische Entwicklung dieses Gebietes. Es sollte aber intuitiv auch klar sein, dass diese Systeme hierarchisch strukturiert sind (Abb. 6). Abbiegewahrscheinlichkeiten an Kreuzungen werden durch Routen bedingt; Routen werden durch Zielwahl generiert; Start-/Zielpunkte werden durch täglichen Aktivitätsketten bedingt; mögliche Start-/Zielpunkte werden durch die Landnutzung generiert; die Landnutzung wiederum reagiert auf das gesamte ökonomische und kulturelle Umfeld usw. Dies legt den Versuch nahe, diese Prozesse explizit zu koppeln oder zu integrieren. In den Wirtschaftswissenschaften nennt man dies „Endogenisierung von Externalitäten“, in den Naturwissenschaften vielleicht eher „Multi-Skalen-Phänomene“. In einfachen Modellen hält man alle Zeitskalen außer der zu untersuchenden fest („Separation der Zeitskalen“). So kann man z. B. die Routenwahl unter der Annahme untersuchen, dass sowohl Start- und Zielpunkt (langsamere Zeitskala) als auch der Verkehr (schnellere Zeitskala) feststehen. In einem nächsten Schritt versucht man, die Prozesse auf den schnelleren Skalen zu parametrisieren; so parametrisieren die Modelle für Stadtentwicklung die Prozesse, die die Qualität eines Standortes definieren.

Es scheint, dass man vieles davon systematischer als bisher angehen könnte. Statt die Qualität eines Standortes aus plausiblen ad-hoc-Annahmen herzuleiten, könnte man eine Simulation des Wohnungsmarktes durchführen, welche selbstkonsistent entscheidet, wo zu welchem Preis Nachfrage für urbanen Raum besteht. Ein Modell täglicher Aktivitäten wiederum könnte die Qualität verschiedener möglicher Wohnorte für die Bewohner durchtesten und somit die Wohnungswahl unterfüttern. Daraus ergeben sich zwei wichtige Forschungsrichtungen:

► Die mikroskopische Begründung makroskopischer Prozesse: Ganz im Sinne der Statistischen Physik wäre es schön, wenn man die ad-hoc Annahmen für Parametrisierungen durch systematisch generierte Modelle ersetzen könnte. Dies ist bisher wohl am ehesten im Verkehrsbereich gelungen: Die kinetische Theorie baut eine Brücke von mikroskopischen Fahrregeln zu fluid-dynamischen Gleichungen. Aber es erscheint im Prinzip auch möglich, die Attraktivität und den Preis eines Grundstückes aus dem generellen Layout der Stadt herzuleiten – oder wenigstens sollte es möglich sein, auf systematische Weise die wichtigsten Einflussgrößen zu finden.

► Die Kopplung von Simulationsmodellen verschiedener Skalen: Wie in anderen Wissenschaften auch, stößt die Parametrisierung mikroskopischer Prozesse auf ihre Grenzen, wenn diese Prozesse stark nicht-linear sind. Dies ist bei urbanen Prozessen sicher der Fall, da sie sehr stark z. B. auf Störungen durch die natürliche Topographie reagieren. Dies legt Modelle nahe, die alle Aspekte von der mikroskopischen Fahrdynamik (etwa zur Berechnung von Emissionen) bis hin zur Raumplanung integrieren. Praktische Ansätze hierzu werden z. B. von TRANSIMS oder ILUMAS⁶⁾ verfolgt.

Dies steckt dann auch den Rahmen für die politische Relevanz der erwähnten Arbeiten ab. Infrastruktur-Projekte und regionale Entwicklung beeinflussen sich gegenseitig: Ein neu gebauter schneller Zugang wird urbane Nutzungen anziehen; neue oder verdichte-

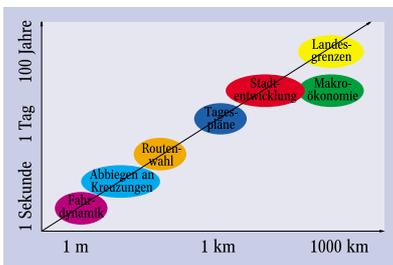


Abb. 6: Die verschiedenen Prozesse im Verkehr und der Infrastrukturentwicklung spielen sich auf sehr unterschiedlichen Zeit- und Längenskalen ab.

4) Ähnliche Projekte mit einem unterschiedlichen Schwerpunkt sind z.B. PARAMICS (www.paramics-online.com), TRANSIMS (www.transims.net) oder SUMO (ivf.dlr.de/berlin/projekte).

5) www.smartgrowthamerica.com

6) www.transims.net, ivf.dlr.de/berlin/projekte/ilumas.htm

te urbane Nutzungen verlangen nach entsprechend bemessenen Verkehrszugängen. In Deutschland gibt es den Bundesverkehrswegeplan, welcher ungefähr alle zehn Jahre erstellt wird und alle wesentlichen Verkehrsinfrastrukturprojekte für die folgende Dekade auflistet. Diesem geht ein mehrjähriger Abstimmungsprozess voraus, in dem zunächst die Bewertungsmethodik festgelegt wird, gefolgt von einer Priorisierung eingereicherter Projekte aufgrund dieser Methodik. Es versteht sich von selbst, dass jegliche Bewertung sich beschränken muss auf die Effekte, die sie tatsächlich abbildet. Mikroskopische Modelle, welche Raumplanung, Verkehrsplanung, Emissionsvorhersage und ökonomische Analyse zusammenführen, erscheinen hier als ein wissenschaftlich zwingend notwendiger Ansatz zur Unterstützung kompetenter Entscheidungen in Fragen der Raum-, Stadt- und Infrastrukturentwicklung.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit Methoden aus der Statistischen Physik und der Nichtlinearen Dynamik ist es in den letzten Jahren gelungen, viele Phänomene im Straßenverkehr zu verstehen. Die im Verkehr gefundenen Instabilitäts-, Stau-, Segregations-, Zusammenbruchs- und Aggregationsmechanismen können als Paradigma verstanden werden für ähnliche Phänomene in der Physik von Kolloiden und granularen Medien, in der biologischen Physik (soziale Insekten), der Medizin (Massenpaniken, Thrombosebildung) und der Ökonomie (Wirtschaftszyklen, Optimierung von Produktionsprozessen). Neuere empirische Erkenntnisse belegen, dass physikalische Konzepte wie Energie- und Entropieansätze oder Intermittenz auch zum Verständnis des Reiseverhaltens sowie der Routen- und Verkehrsmittelwahl von Bedeutung sind. Sie sind daher entscheidend, wenn es um großflächige Verkehrssimulationen mit dem Ziel kurz- oder langfristiger Verkehrsprognosen geht. Diese sind insbesondere erforderlich, um wahrscheinliche Szenarien der Infrastruktur- und Stadtentwicklung simulieren zu können. Dahinter steht die Idee, dass politische Entscheidungen im Großen von Sachzwängen bestimmt werden und im Kleinen dezentral ablaufen, so dass die Stadtentwicklung im Wesentlichen als Selbstorganisationsphänomen unter bestimmten Anfangs- und Randbedingungen verstanden werden kann.

Literatur

- [1] *D. Helbing*, *Rev. Mod. Phys.* **73**, 1067 (2001); *K. Nagel*, *P. Wagner* und *R. Woesler*, *Operations Research* (im Druck); *D. Jost* und *K. Nagel*, *Transportation Research Board Annual Meeting 2003*, paper number 03-4266, www.trb.org; *Carlos F. Daganzo*, *M. J. Cassidy* und *R. L. Bertini*, *Transpn. Res. A* **33**, 365 (1999)
- [2] *D. Helbing*, *Phys. Bl.*, Januar 2001, S. 27
- [3] *K. Nagel* und *M. Schreckenberg*, *J. Phys. I France* **2**, 2221 (1992); *D. Chowdhury*, *L. Santen* und *A. Schadschneider*, *Phys. Rep.* **329**, 199 (2000)
- [4] *B. S. Kerner*, *S. L. Klenov* und *D. E. Wolf*, *J. Phys. A: Math. Gen.* **35**, 9971 (2002); *R. Wiedemann*, *Simulation des Straßenverkehrsflusses*, Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe (1974)
- [5] *D. Helbing*, *A. Hennecke* und *M. Treiber*, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 4360 (1999)
- [6] *D. Helbing*, in: *Alwyn Scott* (Hrsg.) *Encyclopedia of Nonlinear Science*, Fitzroy Dearborn, London (im Druck)
- [7] *B. S. Kerner* und *H. Rehborn*, *Phys. Rev. E* **53**, R4275 (1996)
- [8] *K. Nishinari*, *M. Treiber* und *D. Helbing*, *cond-mat/0212295*
- [9] *P. Seba* und *M. Krbalek*, *J. Phys. A* **33**, L229 (2000); *M. Krbalek*, *P. Seba* und *P. Wagner*, *Phys. Rev. E* **64**, 066119 (2001)
- [10] *M. Krbalek* und *D. Helbing*, *cond-mat/0301484*
- [11] *J. Bottom*, *Consistent anticipatory route guidance*, Ph.D. thesis, MIT, Cambridge, MA (2000)
- [12] *M. Schreckenberg* et al., www.trafficforum.org/journalArticles/tf01080701.pdf
- [13] *D. Helbing*, *M. Schönhof* und *D. Kern*, *New J. Phys.* **4**, 33.1 (2002)
- [14] *G. K. Zipf*, *Am. Soc. Rev.* **11**, 677 (1946)
- [15] *A. G. Wilson*, *Transpn. Res. A* **1**, 253 (1967); *M. P. Dacey* und *A. Norcliffe*, *Env. Plan. A* **8**, 299 (1976)
- [16] *R. Koelbl* und *D. Helbing*, *cond-mat/0301386*.
- [17] *R. J. Beckman*, *K. A. Baggerly* und *M. D. McKay*, *Transpn. Res. A* **30**, 415 (1996)
- [18] *M. Ben-Akiva* und *S. R. Lerman*, *Discrete Choice Analysis*, MIT Press, Cambridge, MA (1985)
- [19] *D. Charypar*, *Genetic algorithms for activity planning*, Term project, ETH Zürich, (2002), siehe www.inf.ethz.ch/~nagel/papers
- [20] *S. T. Doherty* und *K. W. Axhausen*, in: *Verkehr und Mobilität*, Institut für Stadtbauwesen, Technische Universität Aachen, Nr. 66 in Stadt Region Land (1998)
- [21] *N. Cetin* und *K. Nagel*, „A Large-Scale Agent-Based Traffic Microsimulation Based on Queue Model“, *Swiss Transport Research Conference* (2003), siehe www.strc.ch
- [22] *P. Frankhauser*, *La fractalité des structures [sic] urbaines*, *Anthropos*, Paris (1994); *M. Batty* und *P. Longley*, *Fractal Cities: A Geometry of Form and Function*, Academic Press (1994)
- [23] *H. Makse* et al., *Phys. Rev. E* **58**, 7054 (1998); *F. Schweitzer* und *J. Steinbrink*, in: *F. Schweitzer* (Hrsg.) *Self-organization of complex structures: From individual to collective dynamics*, Gordon and Breach, London (1997), S. 501
- [24] *R. White*, *G. Engelen* und *I. Uljee*, *Environment and Planning B* **24**, 323 (1997)
- [25] *C. Andersson* et al., *Phys. Rev. E* **66**, 026204 (2002)
- [26] *B. Raney* et al., *Networks and Spatial Economics* **3**, 23 (2003)

Die Autoren

Dirk Helbing (Jahrgang 1965) studierte Physik in Göttingen. Er promovierte an der Universität Stuttgart, wo er sich auch zur Physik der Fußgängerströme und Verkehrsdynamik habilitierte. Seit 2000 leitet er das Institut für Wirtschaft und Verkehr der TU Dresden. Am liebsten beschäftigt er sich mit der Grundlagenforschung für neue Anwendungsgebiete, z. B. der Biologie, der Entscheidungstheorie und dem Management von Supply Networks. **Kai Nagel** (Jahrgang 1965) studierte Physik und Meteorologie an den Universitäten zu Köln und Paris 6. Nach Forschungsaufhalten am Los Alamos National Laboratory, am Santa Fe Institute und am Brookhaven National Laboratory promovierte er an der Universität zu Köln über schnelle mikroskopische Verkehrssimulationen. Nach vierjähriger Mitarbeit am TRANSIMS-Projekt in Los Alamos ist er seit 1999 Assistenzprofessor für Informatik (wissenschaftliches Rechnen) an der ETH Zürich. Sein Interesse gilt den mikroskopischen Simulationen „intelligenter“ Systeme.

