

*Der Stauforscher und Physiker Michael Schreckenberg diskutiert in seinem Artikel die Auswirkungen, die Elektroautos auf den Verkehr haben. Anhand verschiedener mathematischer und physikalischer Methoden erläutert er die verhältnismäßig junge Disziplin der Verkehrsforschung.*

# Stauforschung und Elektromobilität

Wie wird sich der Verkehr auf unseren Straßen  
durch Elektromobile verändern?

Von Michael Schreckenberg

Die wissenschaftliche Untersuchung von Verkehrsdynamik und den damit unmittelbar zusammenhängenden Stauphänomenen ist keineswegs sehr alt, ja, weniger als halb so alt wie das Automobil selbst. Erst Mitte der fünfziger Jahre des letzten Jahrhunderts begann man sich mit mathematischen Theorien zur Beschreibung von Verkehr zu beschäftigen. Man verglich den Fluss von Fahrzeugen einfach mit der Bewegung von Wasser(wellen) in einem Flussbett. Die daraus resultierende Lighthill-Whitham-Theorie ist zwar in der Lage, die stromaufwärts gerichtete Bewegung von Dichtesprüngen (Stauenden) wiederzugeben, leider aber nicht die spontane

Entstehung von Staus, den eigentlich wichtigsten Aspekt der Verkehrsdynamik.

## Physikalische Grundlagen

Rein hydrodynamisch betrachtet, kann man Verkehr als kompressible Flüssigkeit ansehen. Je mehr man die Fahrzeuge zusammenstaucht, desto langsamer werden sie – bis zum totalen Stillstand, der irgendwann stattfinden muss. Der genaue Zusammenhang zwischen Dichte und Geschwindigkeit ist bis heute eine der großen Herausforderungen der Transporttheorie. Interessanterweise entstand fast zur gleichen Zeit wie die Lighthill-Whitham-Theorie

ein erster Ansatz zur Simulation von Straßenverkehr auf der Basis eines elektrischen Schaltkreises. Fahrzeuge wurden darin durch Spannungstöße simuliert, die sich selbst über komplizierte Kreuzungen bewegen können sollten. Meines Wissens nach ist dieses Konzept aber niemals in die Praxis umgesetzt worden, vielleicht weil der Aufwand doch recht groß gewesen wäre. Anders als bei der kontinuierlichen Beschreibung in der Analogie zu Wasser konnte hier schon zwischen einzelnen Fahrzeugen unterschieden werden und auch die Zeitmessung vollzog sich in diskreten Schritten.

Die Verkehrstheorie ist letztendlich hauptsächlich von den Auto-



Michael Schreckenberg. Foto: Timo Bobert



(1) Stau auf der A3 vor dem Autobahnkreuz Kaiserberg, Richtung Nord.  
Foto: Michael Schreckenberg

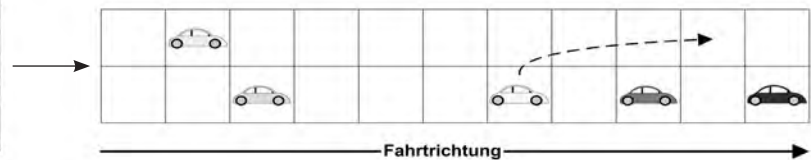


mobilerherstellern vorangetrieben worden, allen voran General Motors (GM). Die bis heute anerkannte „Fahrzeugfolgetheorie“ war ein Meilenstein der Verkehrsforschung und hat nichts von ihrer Faszination verloren. Die mathematische Formulierung psychologischer Aspekte fahrerischen Verhaltens ist nach wie vor ein zentrales Thema der gesamten Verkehrsforschung. Der interdiszi-

Der bekannteste Zellularautomat ist wohl das ‚Game of Life‘ von John Conway, bei dem auf einem Quadratgitter die Evolution von Organismen mit Geburt und Tod simuliert wird. Millionen von seinerzeit teuren Computerrechenstunden sind „verbraten“ worden, um die unterschiedlichen Anfangskonfigurationen auf ihre Überlebensfähigkeit hin zu untersuchen. Viele

für den Straßenverkehr veranschaulicht werden.

Da sich die Dynamik von Zellularautomaten durch Wechselwirkungen endlicher Reichweite auszeichnen, sind sie besonders für Simulationen großer und komplexer Systeme auf leistungsfähigen Computern geeignet. Dabei ist die Dynamik der Zellularautomaten maßgeschneidert für die heutige Rechner-



(2) Modellierung von Straßenverkehr mit Zellularautomaten.

plinäre Charakter dieser Aktivitäten ist immer ein unterschätztes Merkmal gewesen, das aber wesentliche Auswirkungen für die Praxis hatte und hat. Die Fortschritte sind leider nicht schnell zu erwarten, zumal menschliches Verhalten sich nur langsam an Gegebenheiten anpasst.

Die absolute Minimierung des Modellierungsgedankens stellt der Ansatz über Zellularautomaten dar. Wie eine Karikatur mit wenigen markanten Strichen charakteristische Eigenschaften darzustellen vermag oder besser: versucht, so ist genau dies der Grundgedanke von Zellularautomaten, der simpelsten Abbildung von komplexen Phänomenen in mathematische Modelle. Der Automaten-gedanke findet hier Niederschlag in der Diskretisierung von Raum und Zeit: Der Raum besteht aus Zellen und die Zeit schreitet in festen Schritten voran. Die Philosophie ist dabei, dass sich diese Zellen nur mit ihrer unmittelbaren Umgebung austauschen („wechselwirken“) und ansonsten recht einfache Eigenschaften haben, das heißt nur wenige unterschiedliche mögliche Zustände besitzen. Diese Zustände sind am Ende die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge, mehr interessiert ja auch nicht.

mathematische Probleme ließen sich auf diese Weise lösen. Es gibt sogar ernstzunehmende Veröffentlichungen, die ein „digitales Universum“ in Betracht ziehen, bei dem alles Geschehen der Abarbeitung eines Computerprogramms gleicht.

### **Methode der mikroskopischen Simulation: Zellularautomaten**

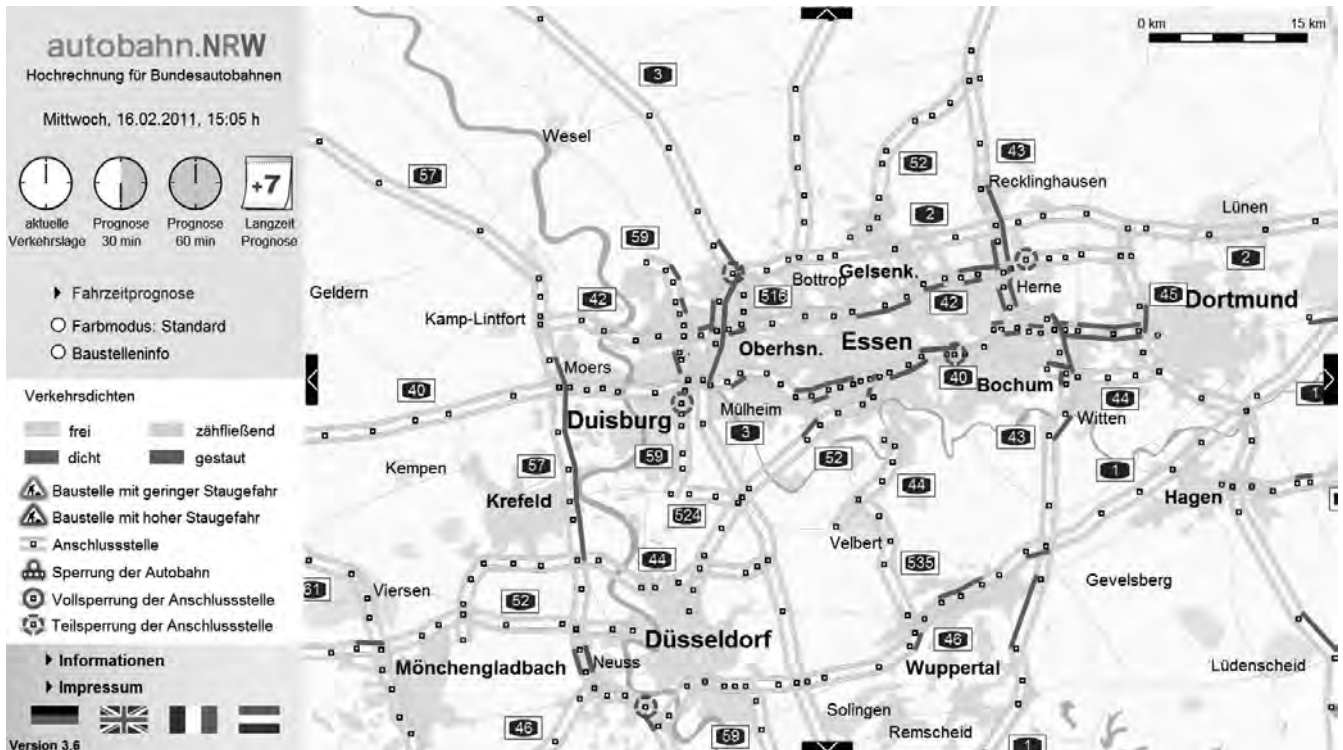
Zur Erläuterung wird im Folgenden die Methode der mikroskopischen Simulation an Hand von Zellularautomaten kurz vorgestellt. Hauptaugenmerk soll dabei nicht auf den Details liegen, die heute immer noch weiter verfeinert werden und Thema der aktuellen Forschung sind, sondern auf der zugrunde liegenden Methodik und der daraus ableitbaren Ergebnisse.

Die erste Anwendung im Bereich der Transportdynamik fand die Methode der Zellularautomaten beim Straßenverkehr. Hier sind für die aktuelle Verkehrslage und kurzfristige Prognosen effiziente Algorithmen gefragt, die Fahrzeug für Fahrzeug die Dynamik des Verkehrs zusammen mit den psychologischen Verhaltenskomponenten der Fahrer im Computer nachstellen. Dies soll

architektur („Turing Maschinen“) und die Programme lassen sich weitgehend parallelisieren. Es ist daher nicht verwunderlich, dass Zellularautomaten als Gerüst zur Simulation physikalischer Systeme nahezu zeitgleich mit der Entwicklung des Computers eingeführt wurden. Sie werden unter anderem benutzt, um Simulationen in der Gasdynamik und in der Hydrodynamik durchzuführen oder um Perkolation, Diffusion, Bakterienwachstum und Evolutionsvorgänge zu modellieren.

### **Historie der Zellularautomaten**

Eigentlich begann die Entwicklung von Zellularautomaten (ZA) in den vierziger Jahren des vorherigen Jahrhunderts. Der berühmte Mathematiker und Computerpionier John von Neumann versuchte eine Maschine zu entwickeln, die auf der Basis von mathematisch-diskreten Netzwerken arbeitet. Das Verhalten der Zellen wurde durch Eigenzustände charakterisiert. Diese Zustände können zum Beispiel durch Zahlen einer endlichen Parametermenge repräsentiert werden. Das Verhalten einer Zelle wird allein von den Nachbarzellen beeinflusst.



(3) Die offizielle Seite der Landes NRW zur Verkehrslage auf den Autobahnen.  
Quelle: [www.autobahn.nrw.de](http://www.autobahn.nrw.de)

In diskreten Zeitschritten wird dazu eine Aktualisierung des Systems durchgeführt. Das Vorhaben von Neumanns scheiterte an der damals nicht zu bewältigenden Komplexität, da die Computertechnologie noch am Anfang stand.

Erst 1970 wurde, wie oben berichtet, die Idee eines ZA wieder von H. J. Conway aufgegriffen. Er nannte sein System ‚Game of Life‘. Hier wurde das Verhalten einer Zelle durch seine direkten Nachbarn bestimmt. Als mögliche Zustände einer Zelle waren nur 0 (‚unbesetzt‘) und 1 (‚besetzt‘) erlaubt. Erste Ansätze von Selbstorganisation konnten in diesem Modell beobachtet werden.

Stephan Wolfram untersuchte in den achtziger Jahren die Eigenschaften von eindimensionalen Zellularautomaten mit zwei Zuständen (‚binär‘). Das Verhalten der Zellen hängt auch hier nur von den nächsten Nachbarn ab. Für die zeitliche Entwicklung gibt es viele mögliche Regeln. Die Ergebnisse lassen sich mit Hilfe verschiedener Gruppen

charakterisieren. Dies kann zum Beispiel die Bildung eines homogenen, stabilen Endzustandes oder die Bildung von nicht periodischen, komplexen Strukturen sein, wie sie bei chaotischen Systemen zu beobachten sind.

### Wie funktioniert ein Zellularautomat?

Das Verhalten eines ZA hängt wesentlich von der gewählten Regelstruktur ab. Es wird zwischen vier elementaren Arten der zeitlichen Anordnung der Regeln unterschieden. Diese sind:

- *Parallel Update*: Bei diesem Update werden alle Zellen parallel, das heißt gleichzeitig, in ihrem inneren Zustand (d. h. die Geschwindigkeit) aktualisiert. Ein großer Vorteil dieser Methode ist, dass keine Zufallszahlen bestimmt werden müssen, um immer wieder eine neue Update-Reihenfolge zu bestimmen. Das bedeutet einen erheblichen Gewinn an Rechenzeit und eine eindeutige Zeitskala und ist damit von den hier

beschriebenen Updatearten in der Physik am sinnvollsten.

- *Random sequential Update*: Bei dieser Update-Art werden die Zellen in einer immer wieder neu zu bestimmenden Reihenfolge aktualisiert. Hier werden zwei Unterarten unterschieden:

- *Random sequential Update (normal)*: Hier wird zunächst eine durch Ziehung einer Zufallszahl bestimmte Zelle aktualisiert. Nachdem für diese Zelle das Update durchgeführt worden ist, wird eine neue Zelle aus allen vorhandenen Möglichkeiten durch Zufall bestimmt. Dabei kann es vorkommen, dass eine Zelle mehrfach hintereinander ausgewählt wird. Bei dieser Updateart gibt es keine Korrelationen. Daher sind so gewonnene Ergebnisse zum Teil unphysikalisch.

- *Random sequential Update (shuffled)*: Im Gegensatz zur ersten Variante wird hier darauf geachtet, dass erst alle Zellen einmal aktualisiert worden sind, bevor eine Zelle ein zweites Update durchführt. Das

heißt, die Zufallszahlen werden hier aus allen Zellen, die in einem Durchgang noch kein Update durchlaufen haben, gezogen. Im Gegensatz zu den Ergebnissen der anderen Art des sequential Update kommt es hier zu Korrelationen und Clusterbildung (Kolonnen, Staus).

- *Sequential Update*: Hier werden alle Zellen in einer festen Reihenfolge, entweder nach ihrer Nummerierung aufsteigend oder absteigend, aktualisiert. Die Reihenfolge des Updates wird in allen folgenden Zeitschritten beibehalten.
- *Untergitter Update*: Beim Untergitter Update wird zur Bestimmung der Update-Reihenfolge ein Untergitter definiert. Das könnte zum Beispiel jede zweite Zelle sein. Nachdem diese ein Update durchlaufen haben, werden die übrigen Zellen aktualisiert.

### Mikroskopische, mesoskopische und makroskopische Simulation

Die Verkehrsphysik befasst sich hauptsächlich mit makroskopischen Eigenschaften großer Kollektive von individuell agierenden Verkehrsteilnehmern. Daher sind Modellansätze zur effizienten Simulation solcher Systeme in der Verkehrsphysik von größter Bedeutung.

Die Idee, Erkenntnisse über den Straßenverkehr mittels Simulationen zu gewinnen, ist, wie oben beschrieben, nicht neu. Schon im Jahre 1955 wurde ein Beitrag veröffentlicht, in dem es um die Benutzung von Special-Purpose-Computern zur Lösung von Verkehrsproblemen ging. Unter anderem werden in der Veröffentlichung Baupläne für elektronische Schaltungen mit logischen Komponenten zur Simulation des Verkehrs an Kreuzungen gezeigt. Die Verzögerung von Fahrzeugen auf Strecken zwischen Kreuzungen wurde durch das Schreiben und Lesen an verschiedenen Stellen auf ein Magnetband, wie im Kassettenrekorder, realisiert.

Durch die Weiterentwicklung der Computertechnologie verbesserten

sich natürlich auch die Modelle. Sie können grob in drei Kategorien aufgeteilt werden: mikroskopische, mesoskopische und makroskopische. Die makroskopischen Modelle beschränken sich auf das kollektive Verhalten von Objekten und beschreiben diese, wie in der Hydrodynamik kompressibler Flüssigkeiten, durch Druck und Dichte. Dem am häufigsten verwendeten Ansatz liegt die Kontinuitätsgleichung zugrunde.

Andere makroskopische Modelle basieren auf der Gas-Kinetik, in der die Wahrscheinlichkeitsdichte der Anzahl der Objekte, deren Position und Geschwindigkeit beschrieben wird. Modelle dieser Art sind in der Regel recht leistungsfähig, nur fehlen ihnen wichtige Informationen zu den einzelnen Objekten.

Die mikroskopischen Modelle simulieren die Objekte einzeln aufgelöst. Damit sind alle wichtigen Informationen über die Objekte wie Geschwindigkeitsprofile, Routen und das Richtungsverhalten direkt einsehbar. Ihre Leistungsfähigkeit war am Anfang aber nicht zufriedenstellend. Erst mit der Einführung der ZA-Simulationsmodelle Mitte der Achtziger wurde es möglich, eine ähnliche rechnerische Geschwindigkeit zu erreichen wie bei den makroskopischen Modellen.

Mesoskopische Modelle interpolieren zwischen beiden Ansätzen und benutzen vergrößerte Zellen. Diese umfassen dann eine größere Anzahl mikroskopischer Zellen. Hier kommen dann häufig auch Warteschlangenmodelle zum Einsatz.

### Das Nagel-Schreckenberg-Modell

Das erste ZA-Modell für den Straßenverkehr, das in der Lage war, einige Hauptmerkmale des Straßenverkehrs, wie zum Beispiel spontane Staubildung zu modellieren, ist das von Nagel und Schreckenberg entwickelte so genannte „Nagel-Schreckenberg“, kurz NaSch-Modell. Hier wird eine Straße in Zellen mit einer Länge von 7,5 Metern einge-

teilt. Eine Zelle enthält entweder genau ein Fahrzeug (im Durchschnitt belegt ein im Stau stehendes Fahrzeug 7,5 m) oder ist leer.

Das NaSch-Modell besteht im Wesentlichen aus vier einfachen Regeln. Diese beschreiben das Beschleunigen, das Bremsen, das Trödeln und die eigentliche Bewegung. Bei den Regeln ist  $x_n$  die Position (Zellennummer) des  $n$ -ten Fahrzeuges,  $\Delta x_n$  die Anzahl leerer Zellen in Front und  $v_n$  die Geschwindigkeit (Zellen pro Sekunde):

- Beschleunigen:  $v_n^{(1)} = \min(v_{max}, v_n + 1)$

- Bremsen:  $v_n^{(2)} = \min(x_n, v_n^{(1)})$

- Trödeln:  $v_n^{(3)} = \begin{cases} \max(0, v_n^{(2)} - 1), \\ v_n^{(2)}, \end{cases}$

mit Wahrscheinlichkeit  $p$  sonst:

- Bewegen:  $x_n = x_n + v_n^{(3)}$

Dabei ist zu beachten, dass alle Parameter und Variablen dimensionslos sind. Ein Auto kann sich, wenn kein Sicherheitsabstand definiert ist, maximal so viele Zellen nach vorne bewegen, wie freie Zellen vorhanden sind. Es bremst bei Bedarf so weit ab, dass es nicht auf das Vorderfahrzeug auffährt. Mit einer Wahrscheinlichkeit  $p$  (in der Regel zwischen 0,1 und 0,5) trödelt das Fahrzeug, das heißt, es bremst um eine diskrete Einheit ab.

Für die Dynamik und das Spurwechselverhalten müssen weitere Regeln eingeführt werden. Mit diesen ist es dann möglich, ZA-Modelle für Autobahnen zu realisieren. Die ZA-Modelle können noch weiter verfeinert werden. So kann zum Beispiel die Zellenlänge auf 1,5 Meter verringert werden. Allerdings ist dann zu beachten, dass ein Auto mehrere fortlaufende Zellen belegt. Das neueste ZA-Modell ist in der Lage, alle in empirischen Daten enthaltenen Verkehrszustände sowie die Übergänge zwischen ihnen mikroskopisch korrekt wiederzugeben.

Für die Simulation des Verkehrs in einem so komplexen Straßennetz-



werk, wie dem Autobahnnetz in Nordrhein-Westfalen, hat es sich als notwendig herausgestellt, ein eigenes simulationsfähiges Georeferenzformat zu entwickeln. Dieses stellt das an der Universität Duisburg-Essen entwickelte Format OTDF (OLSIM Track Data Format) dar. Neben dem Datenformat mussten Regeln für das Verhalten an Auf- und Abfahrten entwickelt werden. Ein neuer Ansatz ist das Drei-Abschnitts-Konzept. Hierbei wird die Beschleunigungsspur in drei Sektoren aufgeteilt.

Jeder Sektor hat eine spezifische Aufgabe. Diese sind in Fahrtrichtung der Reihe nach:

- *Sektor 1:* Beschleunigen,
- *Sektor 2:* Orientieren,
- *Sektor 3:* Spurwechsel.

Eine Auffahrt hat eine Standardlänge von 220 Metern. Der Drei-Abschnitts-Ansatz lässt sich jedoch ohne Probleme auf verschiedene Typen von Auffahrten übertragen. Man erhält so ein Baukastensystem, aus dem ein Straßennetz zusammengesetzt werden kann.

Eine Anwendung von Zellularautomaten im Straßenverkehr bildet die Online-Simulation OLSIM-BAB ([www.autobahn.nrw.de](http://www.autobahn.nrw.de)). Hier wird der Verkehr auf allen Autobahnen in Nordrhein-Westfalen simuliert. Dieses ist notwendig um Aussagen über das Verkehrsaufkommen auf allen Autobahnen geben zu können, da nicht flächendeckend auf den rund 2.250 Kilometern Autobahnen Detektionseinrichtungen installiert sind. Jedes sich auf der Autobahn befindende Fahrzeug wird im Computer nachgebildet und bewegt sich nach bestimmten Regeln. Damit die Simulation realistisch ist, werden Daten von über 4.500 Induktionsschleifen minütlich in der Simulation verarbeitet. Diese Induktionsschleifen sind in der Lage, unter anderem Fahrzeugtyp und Fahrzeuggeschwindigkeit zu bestimmen.

Durch die effizienten Algorithmen, die durch Zellularautomatenmodelle ermöglicht werden, kann man Aussagen über den zukünftigen Verkehr zu machen. Dazu

fahren die Fahrzeuge im Computer schneller als in Echtzeit. Zusammen mit Heuristiken wird so eine Prognosegenauigkeit von über 80 Prozent bei einer Stundenprognose möglich.

Die aktuelle Verkehrslage, eine 30- und eine 60-Minuten Prognose und Informationen über Baustellen und Sperrungen werden in einem Applet grafisch aufbereitet. Dem Nutzer ist es so möglich, einen Überblick über das Verkehrsaufkommen zu erhalten und seine Route entsprechend zu planen.

Der Service autobahn.NRW wurde im September 2002 frei geschaltet. Seitdem ist das System sukzessive verbessert worden. Im August 2003 wurde autobahn.NRW um die 30-Minuten-Prognose und im Dezember 2003 um die 60-Minuten-Prognose erweitert. Momentan werden neben den Verkehrszuständen auch Reisezeiten veröffentlicht und bei Bedarf dem Nutzer Informationen über Alternativrouten gegeben.

In einem aktuellen Projekt mit TomTom versuchen wir, das „Routing“ individueller zu gestalten. Trotz gleicher Hardware, gleicher Datenlage und gleichem Zielpunkt werden verschiedene Routen angeboten. Die grundsätzliche wissenschaftliche Frage dabei ist, ob dies nur zentral oder auch über autonome Systeme geschehen kann. Das wissen wir einfach noch nicht. Dabei werden oft Strategien von Tierschwärmen in die Diskussion gebracht. Diese haben über tausende von Jahren ihr Verhalten optimiert. Davon können wir nur lernen. Durch Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation ist hier viel nachzuahmen, ohne die menschliche Zeitverzögerung von einer Sekunde berücksichtigen zu müssen.

### **Die Verkehrsentwicklung heute und morgen**

Die Herausforderungen an den Verkehr von morgen sind enorm. Obwohl die Prognosen fast einstim-

mig nur noch geringes Wachstum oder gar einen Rückgang im Pkw-Verkehr in den nächsten 40 Jahren voraussagen, so ist beim Gütertransport mit einer erheblichen Steigerung zu rechnen. Diese Vorhersagen hängen sehr stark von der Bevölkerungsentwicklung ab. So geht man in Deutschland in den nächsten 50 Jahren von einem deutlichen Rückgang auf lediglich noch 70 Millionen Einwohnern aus, während zum Beispiel Frankreich bevölkerungsmäßig wächst und schließlich Deutschland überflügelt. Die Auswirkungen auf den Verkehr sind klar: der Binnengüterverkehr geht zurück aufgrund geringeren Konsums, der Transitgüterverkehr wächst stark an, Zahlen von 60 Prozent und mehr werden dabei genannt.

Bei allen diesen Prognosen muss man aber sehr vorsichtig sein. Der ADAC hat sich mal die Mühe gemacht, einen Vergleich zwischen alten Prognosen für heute und dem tatsächlich eingetretenen Zustand anzustellen. Das Ergebnis war ernüchternd, insbesondere weil in den meisten Berechnungen schon die Bevölkerungsentwicklung vollkommen falsch abgeschätzt wurde.

Die heutigen Fakten sprechen aber eine eigene Sprache. So werden pro Jahr auf unseren Straßen ungefähr 520 Milliarden Kilometer zurückgelegt, wovon ungefähr 10 Prozent auf den Gütertransport entfallen (obwohl nur 5% der über 55 Mio. zugelassenen Fahrzeuge Lkw sind, diese sind aber aus verständlichen Gründen fast ständig unterwegs). Die Bewegung der Fahrzeuge wird aber häufig durch Staus stark eingeschränkt. Alle 82 Millionen Deutsche stehen zusammen etwa 4,7 Milliarden Stunden im Stau, was anders ausgedrückt 537.000 Jahre heißt! Dies klingt dramatisch, bedeutet es am Ende doch nur zehn Minuten pro Tag oder 58 Stunden pro Jahr. Wo diese Stauzeit stattfindet, ist nicht ganz klar, ob auf der Autobahn oder in der Stadt. Dabei muss natürlich genau festgelegt werden, was ein Stau ist und wann man sich

in ihm befindet. Da ist sich selbst die Wissenschaft nicht ganz einig, haben doch auch Staus eine interne Dynamik, realisiert durch das bekannte „Stop-and-Go“.

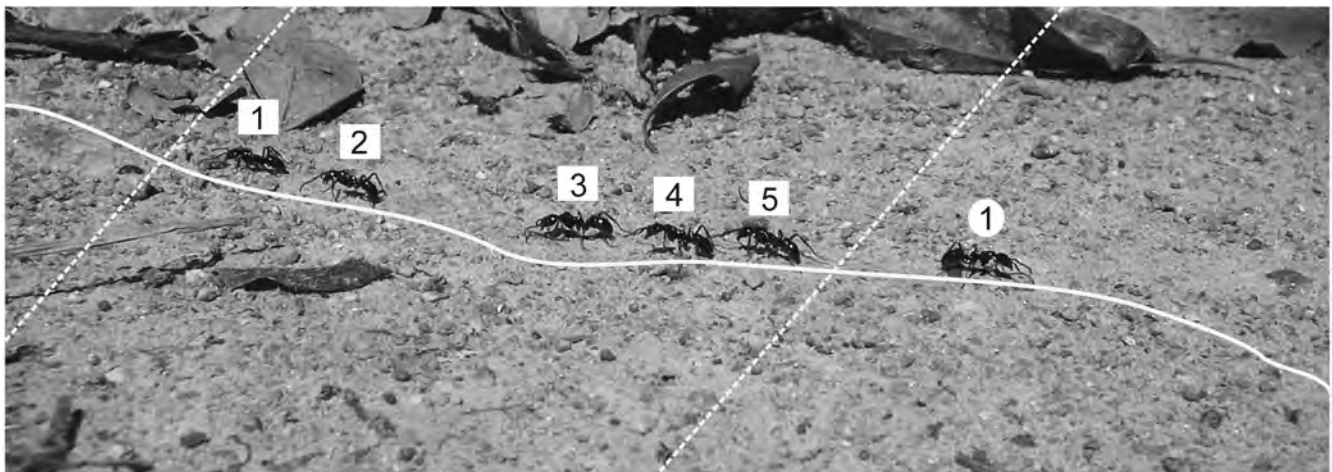
Diese Verkehrskennzahlen werden immer wieder gerne in volkswirtschaftlichen Schaden umgerechnet. Eine Studie von BMW ergab vor vielen Jahren einen Gesamtverlust von 100 Milliarden Euro pro Jahr, in der jüngeren Vergangenheit einigte man sich im Bundestag auf etwas mehr als zwölf Milliarden Euro. Vorstellen kann man sich das am einfachsten an einem einzigen Stau, zum Beispiel

Zusammenhang des Öfteren gezweifelt, neben der Wirtschaft gibt es eben auch andere Abhängigkeiten.

Eine wichtige Abhängigkeit, die in vielen (wirtschaftlichen) Studien fast vollkommen außer Acht gelassen wurde (und wird), ist die der technischen Entwicklung, insbesondere bezogen auf den Antrieb. Wann immer der „Peak-Oil“, also der Punkt der höchsten Förderung von Erdöl, erreicht sein wird (oder schon erreicht worden ist?), man spricht von 2018, spielt keine wesentliche Rolle, er findet aber irgendwann statt und wird nachhaltigen Einfluss auf die Mobilität haben. Bei der Suche

Reichweite? Wo kann ich laden? Wie lange wird das Laden dauern?

Der angemessene Umgang mit dem Thema wird noch einige Zeit erfordern. Große Summen werden in die Forschung investiert, vor allem in die Speichertechnologie. Gibt es dort keine wesentlichen Fortschritte, muss man befürchten, dass die Aktivitäten wie vor 20 Jahren zu keinen sichtbaren Ergebnissen führen werden: Was wir heute sehen, ist fast eine Kopie der Vorgänge von damals. Die Hoffnung ist, dass für das Speicherproblem eine radikal neue Lösung gefunden wird. Die Natur hat uns anhand von Erdöl



(4) Das Schwarmverhalten von Ameisen als Vorlage für Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation.

Quelle: Schadschneider, A., Chowdury, D., Nishinari, K.: Stochastic Transport in Complex Systems, Elsevier, Amsterdam, 2011

auf der A40 wegen einer Baustelle, mit einer Länge von vier Kilometern über zwei Spuren und drei Stunden Dauer. Setzt man einen Stundenlohn (nur für die Fahrer) von 35 Euro an, so kommt man schon auf fast 100.000 Euro, nur für diesen einen Stau. Selbst bei fünf Euro pro Stunde sind es immer noch fast 15.000 Euro!

Die Verkehrsprognosen sind deshalb so schwierig, weil so viele Faktoren dort eine Rolle spielen. Häufig wird angenommen, dass die wirtschaftliche Entwicklung stark an die Verkehrsentwicklung gekoppelt ist. Anfang 2009 in den Zeiten der Krise konnte man das sehr eindrucksvoll sehen: auf den Autobahnen ging der Pkw-Verkehr um zwei Prozent, der Lkw-Verkehr sogar um elf Prozent zurück! Heute wird an diesem

nach Alternativen stößt man natürlich sofort auf Elektrofahrzeuge, die sowohl rein elektrisch wie auch als Hybrid daher kommen können (s. a. den Artikel von Ferdinand Dudenhöffer in diesem Heft).

### Elektromobilität – viele Fragen

Wie aber wird die Elektromobilität unseren Verkehr verändern? Da reichen die externen Verkehrsinformationen an sich nicht aus, das Fahrzeug selbst wird zu einem wichtigen Informationsgeber. Aufgrund der auch heute trotz aller wissenschaftlichen Anstrengungen noch recht geringen Reichweite wegen der begrenzten Speicherkapazität der Akkus, stehen plötzlich neue Frage im Vordergrund. Wie groß ist meine

vorgemacht, wie man effizient Energie speichert. Wir haben das bisher leider nicht adäquat kopieren können.

Solange kann man sich aber mit Technologien behelfen, die eben nicht einen rein elektrischen Antrieb bedeuten, sondern Mischformen. Ob Range-Extender (bei denen die Akkus unterwegs mit Verbrennungsmotoren „nachgeladen“ werden), ob Hybrid-Fahrzeuge unterschiedlicher Ausformung oder sogar Brennstoffzellenfahrzeuge, mit einem Bein steht man bei allen diesen Ansätzen in der Elektromobilität, das zweite Bein wird dann hoffentlich irgendwann hinzu kommen.

Interessant ist hier insbesondere die Trennung zwischen „Nah- und Fernverkehr“. Im Nahverkehr auf



kurzen Distanzen in den Städten und darum herum ist der Elektroantrieb von großem Nutzen, während im Fernverkehr Unterstützung durch weitere Energiezufuhr – wie auch immer geartet – notwendig ist. So werden reine Elektrofahrzeuge in der ersten Phase wohl eher die Ausnahme bleiben, auch aufgrund der geringen Geschwindigkeit und der damit zu erwartenden Überholmanöver durch Lkw.

In solch einer Situation kommt der Forschung eine ganz besondere Rolle, ja die entscheidende zu. Noch unter der alten Bundesregierung wurde ein 115 Millionen Euro umfassendes Forschungspaket zur elektrischen Mobilität aufgelegt. In acht Modellregionen soll über die möglichen Probleme und deren Lösung bei der Umsetzung von Elektromobilität in den Alltag nachgedacht werden. Meine Arbeitsgruppe ist in der Region Rhein-Ruhr bei dem Projekt „Simply E-Mobility“ mit am Start. Hier geht es nicht (nur) darum, einige elektrische Testfahrzeuge auf die Straße zu bringen, sondern auf der ganz großen Skala mit einigen Tausend Elektrofahrzeugen auf die Fahrt zu gehen, allerdings vorerst nur in Simulationen.

### Etwas Geschichte

Schaut man in die Geschichte der Fahrzeugentwicklung, so stellt man erstaunt fest, dass die Elektrofahrzeuge in der Tat älter sind als die Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, deren 125. Geburtstag ja in diesem Jahr gefeiert wird. Dem Jubiläum der Elektrofahrzeuge wurde vor fünf Jahren überhaupt nicht gedacht.

Im Jahre 1800 erfand Alessandro Volta die Batterie und 1830 Joseph Henry den Gleichstrommotor, bevor 1881 das erste wirkliche Elektroauto mit Blei-Akku, entwickelt von Gustave Trouvé, auf die elektrische Reise ging. Zur Erinnerung: Bertha Benz ging erst 1888 auf ihre berühmte Ausflugsfahrt. Sogar schon 1834 gab es Elektrofahrzeuge mit nicht wieder aufladbaren Batterien. Auch der erste Geschwindigkeitsrekord mit über 100



(5) Das Rekordauto „La Jamais Contente“ von Camille Jenatzky auf der IAA 2009 in Frankfurt.  
Foto: Michael Schreckenberger

Kilometern pro Stunde wurde elektrisch erzielt.

Camille Jenatzky, ein belgischer Automobilrennfahrer und Konstrukteur, erreicht 1899 mit seinem Elektrofahrzeug über 105 Kilometer pro Stunde.

Man sollte auch erwähnen, dass um 1900 30 Prozent aller Fahrzeuge in den USA – in New York sogar 50 Prozent – elektrisch angetrieben wurden. Der Siegeszug der Verbrennungsmotoren war aber dennoch nicht aufzuhalten, da ihre Reichweite das schlagende Argument schlechthin bedeutete. Die zu geringe Speicherkapazität war auch vor über 20 Jahren der Knackpunkt bei dem Versuch, Elektrofahrzeuge ernsthaft markttauglich zu machen. Die Konzepte und Fahrzeuge waren vollständig entwickelt, wurden aber niemals wirklich auf den Markt gebracht.

In der Zwischenzeit hat sich bei der Akku-Technik einiges getan. Mit der Lithium-Ionen-Technik wurden erst die Handys und Laptops heutiger Bauart möglich. Ein folgerichtiger Schritt ist es dann natürlich, mit dieser Technik auch in Elektrofahrzeuge zu gehen. Wie weit der Ansatz trägt, wird die Zukunft zeigen.

Markttauglich scheinen dagegen heute schon Elektro-Fahrräder und Scooter zu sein. Ein Elektroroller schafft 90 bis 120 Kilometer mit einer Ladung (mehr fährt man sowieso wahrscheinlich nicht am Stück), der Preis ist moderat und man kann sie tatsächlich kaufen. In China sind schon 140 Millionen elektrisch angetriebene Zweiräder unterwegs, ja, es gibt große Städte, wo nur diese erlaubt sind. Auch zyklische Fahrten wie beispielsweise zum Austeilen von Zeitungen bieten sich an, da dort geplant werden kann. Spontaneität muss man in diesen Fällen wohl erstmal hintenan stellen.

### Herausforderung für die Verkehrswissenschaft

Für einen Verkehrswissenschaftler ergeben sich hier ganz neue Probleme und Fragestellungen, zu deren Lösung viel Kreativität gefragt ist. Das Problem der endlichen Reichweite setzt wesentlich detaillierte Planungen voraus. Man wird es auf jeden Fall mit liegen gebliebenen Elektrofahrzeugen aufgrund leerer Akkus zu tun haben, wenn die Marktdurchdringung wächst. Streng

genommen dürfen diese Fahrzeuge, da ja sonst intakt, nicht abgeschleppt werden, da dies nur bei Fahrzeugen mit technischen Pannen zulässig ist. Im Fall eines leeren Akkus wäre das gezogene Fahrzeug als „Anhänger“ anzusehen, und der Vorgang hieße dann „Schleppen“ und nicht „Abschleppen“. Dies ist aber nur mit einer Ausnahmegenehmigung durch die Straßenverkehrsbehörden erlaubt. Der Gesetzgeber wird sich da bestimmt noch etwas einfallen lassen (müssen).

In Simulationen kann man sich nun schon anschauen, wie Elektrofahrzeuge sich auf die Verkehrsströme auswirken können. In der Fahrcharakteristik sind zwei wesentliche Punkte festzuhalten: das große Beschleunigungsvermögen und die geringere Höchstgeschwindigkeit. Das letzte bezieht sich allerdings nicht auf Hybridfahrzeuge, die auf längeren Strecken mit normalem Verbrennungsmotor fahren.

Die große Beschleunigung ist von Bedeutung beim Auflösen von Staus oder beim Anfahren an Ampeln. Ist allerdings ein langsames Fahrzeug in der Kolonne, so wird dies die nachfolgenden natürlich behindern und zu langsamer Beschleunigung zwingen. Interessant ist der Einfluss auf Autobahnen. Rein elektrisch angetriebene Fahrzeuge sind in erster Näherung mit Lkw vergleichbar, trotz größerer Beschleunigungsfähigkeit. Man hat hier aufgrund vergleichbarer Maximalgeschwindigkeit einen entsprechend höheren Anteil von Fahrzeugen mit Geschwindigkeiten um oder unter 100 Stundenkilometern. Dies führt zu einer effizienteren Ausnutzung der rechten Spur, die heute oft nur von Lkw bei größeren Dichten befahren wird. Dieser „Inversions-effekt“ würde somit abgeschwächt werden. Die quantitativen Untersuchungen durch Simulationen sind noch im Gange.

Als Fazit kann man feststellen, dass Elektromobile eine wichtige Rolle einnehmen können. Und zwar insbesondere bei planbaren Verkeh-

ren, wo man weiß, nach wie vielen Kilometern ein Ladevorgang nötig und möglich ist. Ad-hoc-Verkehre im privaten Bereich werden in der ersten Phase wohl nicht dazugehören.

Es wird wohl auf eine Trennung von Nah- und Fernverkehr, auch im privaten Bereich, hinauslaufen. Dazu ist allerdings ein Umdenken notwendig. Das „Allroundfahrzeug“ würde dann der Vergangenheit angehören. Diese Trennung ist im öffentlichen Verkehr schon verwirklicht. Darin liegt die große Chance recht kurzfristig bei der Elektromobilität. Man kann nur hoffen, dass die Speicheraggregate sich entsprechend entwickeln und diesmal der Marktreife und dem Erfolg nicht im Wege stehen.

### Summary

Traffic research is a quite young scientific discipline. One of the main goals is the understanding of traffic dynamics and the occurrence of the “jam out of the blue”. Today it is possible to model and simulate the movement of thousands of cars in large traffic networks very accurately and, on this basis, to make traffic forecasts for one hour or even several days. The main input for the calculations comes from the measurements of 4,500 inductive loops on the highway network of North-Rhine Westphalia. These data are stored for more than ten years in order to establish a historical database. Electric vehicles pose a new challenge to traffic management and traffic forecasts. The behaviour of the users has to be directly connected to the abilities of the vehicles. Planning of routes has to be more careful and take into account the distance it is possible to travel before the vehicles need to be recharged. Up to now only a few

electric vehicles are on the roads. Therefore one can only look into the future with simulations.

### Literatur:

- Kerner, B.: *The Physics of Traffic*, Springer, Berlin, New York, 2004.
- Kerner, B.: *Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control: The Long Road to Three-Phase Traffic Theory*, Springer, Berlin, New York, 2009.
- Lee, H.K., Barlovic, R., Schreckenberg, M., Kim, D.: Mechanical restriction versus human overreaction triggering congested traffic states, *Phys. Rev. Lett.* 92, 238702 (2004).
- Nagel, K., Schreckenberg, M.: A cellular automaton model for freeway traffic, *J. Physique I* 2, 2221 (1992).
- Ratzenberger, R.: Überprüfung ausgewählter langfristiger Verkehrsprognosen, ADAC Studie zur Mobilität, München, 2005.
- Schadschneider, A., Chowdury, D., Nishinari, K.: *Stochastic Transport in Complex Systems*, Elsevier, Amsterdam, 2011.
- Schreckenberg, M., Selten, R. (Hrsg.): *Human behaviour and traffic networks*, Springer, Heidelberg, 2004.
- Selten, R., Chmura, T., Pitz, T., Kube, S., Schreckenberg, M.: Commuters Route choice behaviour, *Games and Economic Behavior* 58, 394 (2007).
- Wallentowitz, H., Freialdenhoven, A., Olschewski, I.: *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges*, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2010.

### Der Autor

Michael Schreckenberg, geboren 1956 in Düsseldorf, studierte Theoretische Physik an der Universität zu Köln, an der er 1985 in Statistischer Physik promovierte. 1994 wechselte er zur damaligen Universität Duisburg, seit 2003 Duisburg-Essen, wo er 1997 die erste deutsche Professur für Physik von Transport und Verkehr erhielt. Seit fast 20 Jahren arbeitet er an der Analyse, Modellierung, Simulation und Optimierung von Transportsystemen in großen Netzwerken, besonders Straßenverkehr, und dem Einfluss von menschlichem Verhalten darauf. Seine aktuellen Aktivitäten umfassen Online-Verkehrsprognosen des Autobahnnetzwerkes von Nordrhein-Westfalen, die Reaktion von Autofahrern auf Verkehrsinformationen, die Entwicklung individueller Navigationssysteme, die Möglichkeiten der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation sowie die praktische Umsetzung von Elektromobilität. Schreckenberg wurde im März 2011 in die Europäische Akademie der Wissenschaften und Künste in Salzburg berufen.

# DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN

*Offen im Denken*

ub | universitäts  
bibliothek

Dieser Text wird über DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

**DOI:** 10.17185/duepublico/73877

**URN:** urn:nbn:de:hbz:464-20210205-123912-7

Alle Rechte vorbehalten.