

■ Die Rückkehr des „Staus aus dem Nichts“

Experimentelle Methoden haben Einzug in die Verkehrsphysik gehalten.

So konnten japanische Forscher zeigen, wie in einem Rundparcour spontan Staus entstehen.

Als in den 90er-Jahren die physikalische Verkehrsforschung modern wurde, fing alles mit dem „Stau aus dem Nichts“ an – jener Stauform, der man nachsagte, dass sie ohne eine Ursache wie einen Unfall oder eine Baustelle zustande käme [1]. Die ersten Beobachtungen gehen zurück bis in die 70er-Jahre, als Joseph Treiterer und seine Kollegen Fahrzeugtrajektorien aus Luftaufnahmen rekonstruierten [2]. In den Auswertungen ist zu erkennen, dass sich kleine Störungen schnell zu ausgewachsenen Staus aufschaukeln können, die sich mit 15 ± 5 km/h gegen die Fahrtrichtung ausbreiten.

Physiker interpretierten das Phänomen als Resultat einer linearen Instabilität, die zum Anwachsen beliebig kleiner Störungen führt und von verschiedenen Modellen für mittlere Dichten vorausgesagt wurde. Aber je länger man den Verkehr studierte, desto komplizierter wurde es: Immer mehr verschiedene Verkehrszustände wurden klassifiziert und postuliert – fast wie in der Elementarteilchenphysik. Um Ordnung ins Chaos zu bringen, wurde ein Phasendiagramm der Verkehrszustände vorgeschlagen [3], das bis heute die quantitativ besten Voraussagen macht [4]. Dieses beruht auf dem Instabilitätsdiagramm des Verkehrs, das stabile Bereiche bei niedrigen und hohen Verkehrsdichten sowie linear instabilen Verkehr bei mittleren Dichten voraussagt. Daran grenzen zwei Bereiche bistabilen Verkehrs an, in denen genügend große Störungen anwachsen können, kleine Störungen aber verschwinden.

Allerdings gibt es Zweifler, welche die Instabilität des Verkehrsflusses in Frage stellen. So meint Carlos Daganzo von der University of California, dass Staus immer Ursachen hätten, wie z. B. rücksichtslose Spurwechsel. Ihm zufolge ließe sich der von Treiterer beobachtete Verkehrszusammenbruch auf einen Spurwechsel zurückführen, der di-



PhotoDisc/Getty Images

Oft scheinen Staus aus dem Nichts zu entstehen – ohne Unfall, Straßenverengung oder wilde Spurwechsel. Dieses

Phänomen wurde nun genauer unter die Lupe genommen.

rekt vor einer dicht komprimierten Ansammlung von Autos stattgefunden habe [5]. Andere Forscher behaupten, der Verkehr gelange niemals in einen instabilen Bereich, und Kreisverkehrssimulationen, wie sie Verkehrsphysiker gemacht haben, seien unrealistisch.

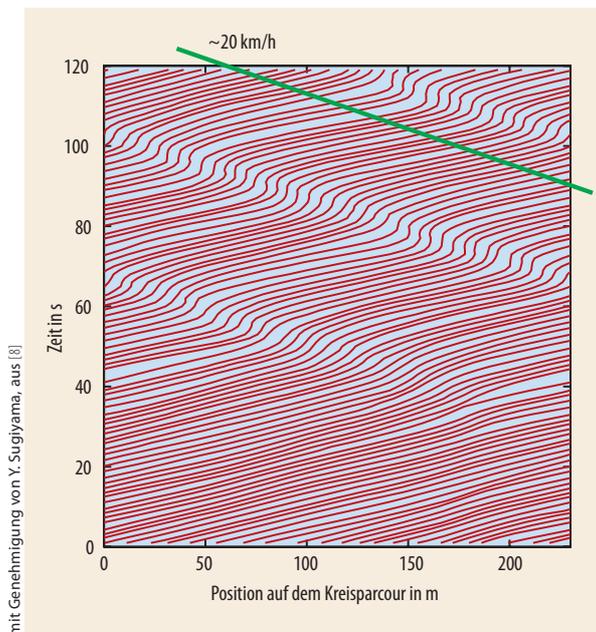
Waren die Erkenntnisse der Verkehrsphysik also wertlos? Nicht unbedingt! Der wesentlich realistischere „Drei-Zutaten-Theorie“ zufolge liegen der Entstehung eines Staus in der Regel drei Elemente zugrunde:

- ein hohes Verkehrsaufkommen,
- eine räumliche Inhomogenität des Streckenverlaufes (z. B. eine Zufahrt, Spurverengung oder Steigung) und
- eine temporäre Störung im Verkehrsfluss, etwa durch einen dichten Fahrzeugpulk oder häufige Spurwechsel.

Ein anderer Ansatz postuliert jedoch eine Vielzahl metastabiler Zustände und kritisiert, dass die

weit verbreiteten Modelle mit einer fundamentalen Relation zwischen Verkehrsfluss und Dichte nicht mit empirischen Daten vereinbar seien [6]. Bei dieser Kritik werden aber zusätzliche Effekte vernachlässigt, wie komplizierte Autobahndesigns mit kombinierten Zu- und Abfahrten, Steigungen, Verkehrsbeeinflussungsanlagen, Messverfahren und verschiedene Fahrzeugklassen (PKWs und LKWs), welche die Verkehrsdynamik verändern. Natürlich müssten sie fairerweise ebenfalls modelliert werden.

In der Tat zeigt z. B. eine detaillierte Analyse, dass „Elefantenrennen“ häufig Staus auslösen [4]: Bei langwierigen Überholmanövern von LKWs bilden sich wachsende Fahrzeugpuls hinter den LKWs, die das Spurwechseln in der Nähe von Zu- und Abfahrten von Autobahnen erschweren und schließlich Störungen verursachen. Im Ergebnis bricht der Verkehr zusammen, und es bildet sich oft Stop-and-Go-



Die roten Linien zeigen die Trajektorien der im Kreis fahrenden Autos. Zunächst fahren die Autos gleichmäßig, nach rund 40 s taucht die erste Unregelmäßigkeit auf. Die „Stufen“ in den Trajektorien schließlich zeigen, dass die Autos abbremsen müssen. Diese Inhomogenität wird zu einer Stauwelle, die sich entgegen der Fahrtrichtung der Autos ausbreitet.

Verkehr aus. Das macht deutlich, wie komplex die Verkehrsdynamik ist und dass theoretisch vorausgesagte Effekte infolge der Vermengung vieler Einflussfaktoren in empirischen Daten nicht immer klar zu belegen oder zu widerlegen sind.

Daher war es von Yuki Sugiyama et al. nur konsequent, erstmals ein Experiment durchzuführen, in dem sich die Einflussfaktoren kontrollieren lassen [7]. Die japanischen Forscher untersuchten die Fahrzeugdynamik auf einer Kreisstrecke, wobei sie Zufahrten oder andere Streckeninhomogenitäten sowie Effekte verschiedener Fahrzeugklassen ausschlossen. Dazu ließen sie eine variierende Zahl von Autos über eine Rundstrecke mit einer Länge von 230 Metern fahren. Die Fahrzeugdynamik wurde mit einem Fischaugen-Objektiv aufgezeichnet. Alle Fahrzeuge starteten mit gleichem Abstand zum vorausfahrenden Auto, und alle Fahrer waren angehalten, eine Geschwindigkeit von 30 km/h sowie einen sicheren Abstand zum Vordermann zu halten. Ein Video des Experiments dokumentiert, dass der Verkehr anfangs reibungslos dahin floss.^{+) Doch da nicht alle Fahrer exakt die gleiche Geschwindigkeit beibe-}

hielten, veränderte sich der Abstand zwischen den Autos schließlich geringfügig. Nach einer gewissen Zeit tauchten die ersten Beeinträchtigungen auf, die Autos stauten sich auf einem kleinen Abschnitt auf der Strecke. Fahrer mussten bremsen, um nicht zu dicht auf den Vordermann aufzufahren und anschließend beschleunigen, um dem entstandenen Cluster aus (in diesem Fall) fünf dicht gedrängten Autos zu entkommen. Hierbei war eine Stop-and-Go-Welle zu beobachten, die sich mit einer Geschwindigkeit von rund 20 km/h entgegen der Fahrtrichtung ausbreitete und die ganz ohne störende Einflüsse wie einen Spurwechsel zustande kam (Abb. rechts). Die kritische Zahl von Autos lag auf dem 230-m-Rundparcour bei 22 Fahrzeugen: Fuhren weniger Autos auf der Strecke, konnte sich der Stau wieder auflösen.

Es gibt also tatsächlich den „Stau aus dem Nichts“, wie Modelle es vor vielen Jahren schon vorausgesagt haben. Die aktuellen Ergebnisse vertragen sich darüber hinaus gut mit der oben erwähnten Drei-Zutaten-Theorie, welche impliziert, dass temporäre Inhomogenitäten wie Kondensationskeime wirken. Die von Wissenschaftlern und Automobilindustrie entwickelten Verkehrsleitungsassistenzsysteme, die kooperatives Fahren unterstützen, machen folglich Sinn [8].

Damit ist eine lange, kontroverse Debatte endlich entschieden,

vorausgesetzt natürlich, dass die Fahrer tatsächlich ihr Bestes gegeben haben, gleichmäßig zu fahren. Im Ergebnis lässt sich festhalten, dass nach der Modellierung und Simulation in der Verkehrsphysik im Laufe der Jahre empirische Daten und endlich auch Experimente Einzug gehalten haben. Der damit verbundene technische und personelle Aufwand übersteigt den früheren Aufwand allerdings erheblich. Fortschritte dieser Art erfordern Forschungsinvestitionen in Größenordnungen, wie wir sie aus den experimentellen Natur- und Ingenieurwissenschaften kennen. Dies verlangt dringend eine Anpassung der wissenschaftlichen Förderstrategie.

Dirk Helbing

- [1] K. Nagel und M. Schreckenberg, *J. Phys. I France* **2**, 2221 (1992); B. S. Kerner und P. Konhäuser, *Phys. Rev. E* **48**, R2335 (1993)
- [2] J. Treiterer und J. A. Myers, in: D. Buckley (Hrsg.), *Proc. 6th Intl. Symp. on Transportation and Traffic Theory*, Reed, London (1974), S. 13
- [3] D. Helbing, A. Hennecke und M. Treiber, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 4360 (1999)
- [4] M. Schönhof und D. Helbing, *Transportation Science* **41**, 135 (2007)
- [5] C. F. Daganzo, *Transportation Research B* **36**, 131 (2002)
- [6] B. S. Kerner, *The Physics of Traffic*, Springer, Berlin (2004)
- [7] Y. Sugiyama et al., *New Journal of Physics* **10**, 033001 (2008)
- [8] A. Kesting, M. Treiber, M. Schönhof, und D. Helbing, *Transportations Research Record* **2000**, 16 (2007)

KURZGEFASST

■ **Neue Klasse von Supraleitern**

Kein Goldrausch, sondern ein Eisenerausch scheint ausgebrochen zu sein, seit im Februar japanische Forscher gezeigt haben, dass die Verbindung $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ bei einer Temperatur von 26 K supraleitend wird. Inzwischen sind weitere supraleitende Beispiele dieser neuen Materialklasse von geschichteten Eisenverbindungen bekannt, und die japanische Gruppe hat gezeigt, dass obige Verbindung bei einem Druck von 4 GPa sogar bereits bei 43 K supraleitend wird – damit weisen nur noch die Hochtemperatur-Supraleiter auf Kuprat-Basis höhere Sprungtemperaturen auf. In Preprints berichten chinesische Gruppen bereits von einer Sprungtemperatur jenseits von 50 K in Verbindungen, die

Samarium oder Gadolinium statt Lanthan enthalten.

H. Takahashi et al., *Nature* doi: 10.1038/nature06972

■ **Gigantischer Piezowiderstand**

Piezoelektrische Materialien zeichnen sich dadurch aus, dass ihr elektrischer Widerstand von einer mechanischen Verzerrung abhängt. Ein Hybridmaterial aus je einer dünnen Schicht Silizium bzw. Aluminium hat nun den Rekord gebrochen: Der darin gemessene dimensionslose *gauge factor*, ein Maß für die Widerstandsänderung, ist mit einem Wert von rund 900 fast einen Faktor 10 höher als bei üblichen Piezoelementen aus Silizium allein. A. C. H. Rowe et al., *Phys. Rev. Lett.* **100**, 145501 (2008)

+) Zwei Videos finden sich unter www.iop.org/EJ/mmedia/1367-2630/10/3/033001

Prof. Dr. Dirk Helbing, ETH Zürich, Lehrstuhl für Soziologie, insbesondere Modellierung und Simulation, UNO D 11, Universitätstraße 41, 8092 Zürich, Schweiz