

## QUANTENSPRUNG

Paracelsus,  
Pauling und  
das Vitamin C

Linus Pauling (1901-1994) erhielt 1954 den Nobelpreis für Chemie und 1962 den Friedensnobelpreis. Er ist einer meiner akademischen Helden und einer der beeindruckendsten Wissenschaftler, die ich je getroffen habe.

So freute es mich dann auch, in der letzten Woche die Überschriften in der Presse zu lesen: „Vitamin-C-Injektion tötet Krebszellen ab.“ In einer kürzlich veröffentlichten Studie wurde berichtet, dass direkt in den Körper injiziertes Vitamin C zur Produktion von Wasserstoffperoxid führt und dadurch Krebszellen abtöten könnte, ohne gesunde Zellen zu schädigen. Vitamin C wirkt also in sehr hohen Dosen als Gift.

## AXEL MEYER

Professor für  
Evolutionsbiologie,  
Konstanz



Pauling hatte schon seit Mitte der siebziger Jahre die positive Wirkung des Vitamins propagiert – nicht nur bei Krebs, sondern auch bei Grippe, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Infektionen. Diese Ideen wurden sehr kontrovers diskutiert, aber auch immer wieder untersucht und oft bestätigt.

Unsere Art gehört zu den wenigen Säugetieren, die Vitamin C nicht selber produzieren können. Deshalb müssen wir es mit der Nahrung aufnehmen. Etwa 70 bis 90 Milligramm insgesamt pro Tag scheinen zu genügen, um Skorbut zu verhindern, sprich: Etwa ein Tausendstel eines Gramms Vitamin C pro Kilogramm Körpergewicht ist täglich absolut notwendig. In der neuen Krebsstudie wurden den Mäusen vier Gramm Vitamin C pro Kilogramm Körpergewicht injiziert – also etwa 4000-mal so viel.

Linus Pauling wurde 93 Jahre alt und nahm etwa 18 Gramm Vitamin C pro Tag ein. Das ist mehr als das 300-Fache der empfohlenen Dosis. Paulings letztes Buch „How to live longer and feel better“ beschreibt nicht nur seine Ideen zum Vitamin C, sondern auch seine anderen Theorien zur orthomolekularen Medizin, wie er es nannte.

Nicht nur wegen der freundlichen Inschrift in meiner Kopie seines Buches nehme ich bis zu einem Gramm Vitamin C pro Tag, wenn es vielleicht nicht helfen sollte, schaden wird es sicher nicht. Denn niemand bestreitet die positiven gesundheitlichen Effekte des Vitamins, und tägliche Dosen von 500 Milligramm scheinen auch das Immunsystem zu stimulieren. Wie Paracelsus (1493-1541) schon gesagt haben soll: „Alle Dinge sind Gift, und nichts ohne Gift; allein die Dosis macht, daß ein Ding kein Gift ist.“

wissenschaft@handelsblatt.com

## Die perfekte grüne Welle

Um Staus zu vermeiden, experimentieren Mathematiker mit der Spieltheorie und mit Modellen aus der Evolutionsbiologie

CLAUDIA WESSLING | DÜSSELDORF

Zu Beginn der Sommerferien wird der Weg zur Berliner Stadtautobahn zum Geduldsspiel. Vor der Auffahrt am Hohenzollerndamm drängen sich die Wagen auf der rechten Spur, das Hupkonzert verdrängt auch gelassenen Menschen die Ferienstimmung.

Rund 60 Millionen Autos und Lastwagen drängen sich täglich durch Deutschlands Straßen. Megastädten in Schwellen- und Entwicklungsländern droht angesichts der Autoschwemme der Verkehrskollaps. Wie kann man die bestehenden Straßen besser ausnutzen? Damit befasst sich die Verkehrsoptimierung oder Telematik. Neben leistungsfähigen Rechnern brauchen Verkehrsforscher vor allem mathematisches Know-how.

Autoströme können auf verschiedenen Ebenen beeinflusst werden: Kollektiv durch Parkleitsysteme und intelligent geschaltete Ampeln, individuell über Navigationssysteme oder die von den Autobauern eifrig vorangetriebene „Car2Car-Kommunikation“, bei der sich Fahrzeuge künftig gegenseitig vor Staus und Gefahren warnen sollen.

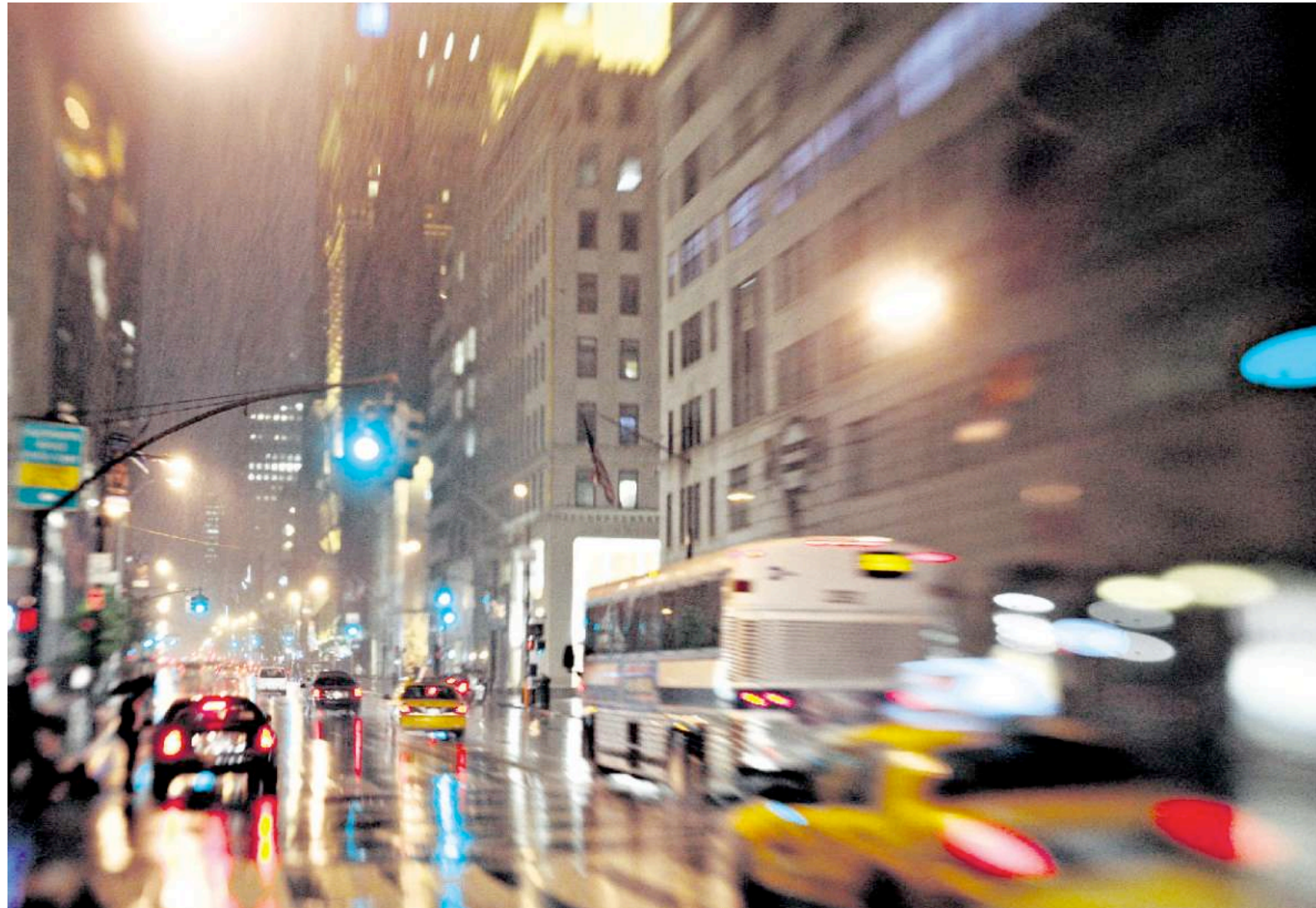
Doch bevor man den Verkehr steuern kann, braucht man ein Modell zur Simulation des Geschehens: Autofahrer, die auf dem Berliner Stadtring Richtung A2 rasen, kann man als Kolonne mit gleichgerichtetem Interesse interpretieren. Mit sogenannten Fluss-Algorithmen lässt sich vor allem in der Rush-Hour gut berechnen, welche Geschwindigkeit optimal ist für ein schnelles Durchschleusen der Fahrzeuge.

„Wir modellieren die Verkehrsinfrastruktur als gerichteten Graphen, durch den sich Agenten – wie etwa Autofahrer – bewegen“, erklärt der Mathematiker Tobias Harks von der Technischen Universität Berlin. Harks will Veränderungen des Verkehrsaufkommens über die Zeit stärker berücksichtigen.

Wie wirken sich Aktionen der einzelnen Fahrer aus – wenn sie etwa den Stau umfahren, sich hinten anstellen oder eine Abkürzung nehmen? Eine solche dynamische Situation lässt sich für große Graphen bislang nicht schnell genug berechnen. Die Spieltheorie soll hier helfen: Autofahrer werden als Spieler interpretiert, die durch individuelle Aktionen versuchen zu gewinnen – also ihre Fahrzeit zu verkürzen.

„Wir suchen stabile Zustände, in denen keiner der Agenten durch eine Strategieänderung seine Fahrzeit noch weiter verkürzen kann, indem er zum Beispiel einen anderen Weg einschlägt“, sagt Harks. Nash-Gleichgewichte nennen die Mathematiker solche Zustände, benannt nach dem Mathematiker John Nash.

Adaptive Verkehrslenkung, etwa durch Ampeln oder Geschwindigkeitsbegrenzungen, soll diejenigen Nash-Gleichgewichte herstellen, die die kürzeste Fahrzeit garantieren. Noch ist der Ansatz Grundlagenforschung. „Vor dem Schritt in die Realität sollte man schon genau wissen, ob das Modell auch funktioniert“, sagt Harks.



Freie Fahrt für die gelben Taxis: grüne Welle auf der nächtlichen 5th Avenue in New York.

tät sollte man schon genau wissen, ob das Modell auch funktioniert“, sagt Harks.

Jürgen Mück hat den Schritt in die Realität schon lange hinter sich. Er ist bei der Siemens-Verkehrssparte Traffic-Solutions dafür zuständig, Ampeln auf die perfekte grüne Welle zu trimmen. Früher wurden die Lichtsignalanlagen mit Programmen gesteuert, in denen der Wechsel zwischen Rot, Gelb und Grün fest getaktet war. Heute regeln verkehrsbahngestützte Steuerungen die Schaltungen an einzelnen Kreuzungen – basierend auf Erfahrungswerten wie etwa der Auslastung zu bestimmten Tageszeiten.

Hohes Verkehrsaufkommen macht bei diesem Ansatz jedoch die schönste grüne Welle kaputt. Für besonders befahrene Verkehrsknotenpunkte entwickeln Mück und sein Team deshalb sogenannte netzadaptive Steuerungen, mit denen die Ampel je nach aktuellem Verkehrsgeschehen anders geschaltet wird. Im Asphalt eingegossene Induktionsschleifen oder andere Messverfahren liefern Daten über den Verkehr; die Siemens-Software optimiert in Echtzeit. Alle fünf bis 15 Minuten werden Daten über Warteschlangen, Fahrgeschwindigkeit und Abbieger im Verkehrsrechner durchkalkuliert.

„Die Modellbildung in der Verkehrstechnik ist extrem schwierig“, sagt Mück. Die Suche nach der optimalen Ampelschaltung gleicht einem

Ausflug in die Weiten des Alls: Rechnet man alle theoretisch möglichen Schaltungen zusammen, ergeben sich schon für nur zehn Signalanlagen  $4 \times 10^{10}$  Lösungen. Zum Vergleich: Die Zahl der Atome im Universum wird derzeit auf  $10^{80}$  geschätzt. Diese Lösungen alle zu betrachten ist mit den heute bekannten Rechnerarchitekturen nicht möglich.

Um in der Praxis dennoch gute Varianten für die Ampelschaltung zu finden, experimentieren die Forscher mit Verfahren, in denen der Zufall zum Zuge kommt. Dabei kommen auch Algorithmen aus der Evolutionsbiologie zum Einsatz: Aus mehreren willkürlich gewählten Lösungsmöglichkeiten (Individuen) werden meh-

rere gute selektiert. Diese werden neu kombiniert (gekreuzt) oder verändert (mutiert). Es gelten die Gesetze der Selektion: Gute Lösungen haben bessere Überlebenschancen und setzen sich durch.

Um die Zufälle zu lenken, machen die Straßenverkehrsplaner dem Algorithmus Vorgaben, wie Florian Weichenmeier, Leiter der Abteilung für Verkehrsforschung und Grundlagenentwicklung der Softwarefirma Gevas, sagt. Der Durchsatz an Fahrzeugen auf der betreffenden Strecke soll erhöht, Warteschlangen einer bestimmten Länge sollen vermieden werden. Die Gevas setzte in einem Projekt mit der Technischen Universität München und der Audi AG zwei Jahre lang gene-

tische Algorithmen an 46 Ampeln im bayerischen Ingolstadt ein. Mit Erfolg: Den Auswertungen der Forscher zufolge konnte die Reisezeit der Fahrzeuge über den Tag um durchschnittlich 18 Prozent verringert werden, im Schnitt kamen sie fünfmal weniger zum Stehen als vorher.

Jürgen Mück stellte bei Tests mit ähnlichen Verfahren in Münster allerdings einen Nachteil fest: Durch die Zufallskomponente der Algorithmen sah die grüne Welle an einem Tag oft anders aus als am Vortag. „Die Autofahrer fanden das nicht gut, sie wollen wissen, was sie erwartet, und vorausschauend fahren können.“ Die Evolution lässt sich eben nur bedingt kontrollieren.

## UNSERE THEMEN

MO ÖKONOMIE

DI ESSAY

MI GEISTESWISSENSCHAFTEN

DO NATURWISSENSCHAFTEN

FR LITERATUR

Fußball und  
das Gesetz der  
großen Zahl

MICHAEL JOSWIG | DARMSTADT

Schon vor Beginn der Bundesliga am Wochenende rätseln Wettverrückte über Meister und Absteiger. Ihr wichtigstes Spielzeug ist die Statistik: Wer hat wie viele Ecken herausgeholt? Wie viele Torschüsse gab es zwischen der 15. und 30. Minute?

Doch welche Daten sind wirklich wichtig? Möglicherweise zählt vor allem das Geld. Auf www.transfermarkt.de ist aufgelistet, wie viel die Spieler jeder Mannschaft im Durchschnitt wert sind. Dies bewegte sich vor der letzten Saison zwischen knapp 8,7 Mill. (FC Bayern) und etwas mehr als 730 000 Euro (Hansa Rostock). Der Vergleich mit der Abschlussabelle zeigt: Die ersten drei Plätze stimmen überein, zwei der drei Absteiger gehören zu den billigsten Mannschaften.

Wie aber passt das zur EM? Zwar hatte der Europameister den teuersten Kader, doch von den sechs Teams, deren Spieler im Schnitt mehr als zehn Millionen Euro wert sind, schafften es nur Spanien und Deutschland ins Halbfinale. Die Antwort ist das „Gesetz der großen Zahl“: In einer langen Saison lassen sich Niederlagen durch spätere Erfolge wieder ausgleichen, in der K.O.-Runde eines Turniers nicht. Geld kann nicht jedes Spiel entscheiden, setzt sich aber auf lange Sicht oft durch. Konkret: Die Bayern werden zwar nicht immer Herbstmeister, aber am Ende reicht es doch meistens für die Schale.

Auf welche Absteiger sollte man also setzen? Nach aktuellen Transferdaten auf Hoffenheim, Bielefeld und Cottbus. Es sei denn, die Trainer schlagen der Statistik ein Schnippchen.

## Die prophetische Medizin

Gentests, Ultraschall oder Blutuntersuchungen: Ärzte blicken in unsere Zukunft und wollen schon heute die Krankheiten von morgen erkennen. Einigen Menschen können sie so das Leben retten, für andere werden die Testergebnisse zur Belastung.

## Weitere Themen im Heft:

**Die Ästhetik des Essens** – Mit allen Sinnen zu genießen und häufiger mal etwas Neues zu probieren bringt nicht nur mehr Spaß beim Essen – sondern auch etwas fürs Gehirn.

**Halluzinationen** – Keine Panik: Wer Trugbilder sieht, muss nicht verrückt sein. Sie sind ganz normal.



**JETZT  
AM KIOSK!**

Abonnieren Sie unter:  
www.zeit-wissen.de oder 0180/52 52 909\*

\*14 Cent/Min. aus dem deutschen Festnetz, Mobilfunkpreise können abweichen.

**ZEIT WISSEN**  
DRS WILL ICH WISSEN

Klimawandel bedroht jede fünfte  
Pflanzenart in Deutschland

Eine Computersimulation zeigt dramatische Folgen selbst bei moderater Erwärmung

TINKA WOLF | DÜSSELDORF

Ein Großteil der in Deutschland heimischen Pflanzenarten ist durch den Klimawandel bedroht. Das schreiben Forscher im Magazin „Biology Letters“. Selbst bei geringer Erwärmung könnten viele einheimische Pflanzen bis zum Jahr 2080 große Teile ihres Verbreitungsgebietes verlieren, heißt es in der Studie.

Die Forscher um Sven Pompe vom Leipziger Helmholtz-Institut für Umweltforschung (UFZ) hatten in einer Computersimulation die Verbreitungsgebiete von 845 europäischen Pflanzenarten untersucht, davon 550 Arten, die in Deutschland heimisch sind. In drei verschiedenen Szenarien mit Temperaturanstiegen von 2,2 bis 3,8 Grad Celsius versuchten sie vorherzusagen, wie sich die Verbreitung der Pflanzen ändern könnte.

„Selbst bei einem moderaten Szenario mit einem Temperaturanstieg von 2,2 Grad Celsius könnten 15 bis 19 Prozent der untersuchten Arten örtlich verlorengehen“, schreiben Pompe und seine Kollegen. Etwa sieben Prozent der Arten könnten sogar zwei Drittel ihres Verbreitungsgebietes verlieren. Je mehr die Temperatur stieg, desto deutlicher wurden die Effekte: Bei ei-

nem Anstieg um 2,9 Grad Celsius wären es schon elf Prozent, bei einer Erwärmung um 3,8 Grad Celsius sogar 20 Prozent.

Generell erkannten die Klimaforscher in ihrer Simulation einen Trend zu kleineren Verbreitungsgebieten der Pflanzen. Außerdem wanderten Arten aus Mittel- und Südeuropa ein, die in Deutschland bisher nicht heimisch sind. „Diese Spezies werden starke Veränderungen in der Artzusammensetzung verursachen“, schreiben die Forscher.

Besonders betroffen seien der Nordosten und der Südwesten des Landes. Demnach könnten das Saarland, Rheinland-Pfalz und Hessen besonders viele Arten verlieren, außerdem die Tieflandebenen in Brandenburg, Sachsen und Sachsen-Anhalt. In diesen Regionen seien die Verbreitungsgebiete der Pflanzen kleiner, schreiben die Forscher. Dadurch sind die Pflanzen anfälliger, zum Beispiel für eine weitere Fragmentierung ihrer ohnehin schon kleinen Lebensräume.

In den Mittelgebirgen von Baden-Württemberg, Bayern, Thüringen und Sachsen rechnen die Wissenschaftler dagegen mit einem Zuwachs dank einwandernder Pflanzenarten – sofern diese es bis an den neuen Standort

schaffen. Das setzt allerdings voraus, dass die Pflanzen sich rechtzeitig an die veränderten Bedingungen anpassen und in die neuen Verbreitungsgebiete mitwandern.

Besonders gefährdet sind in der Regel Arten, die in einer engen Nische leben, also zum Beispiel nur sehr geringe Abweichungen der Temperatur oder Lichtverhältnisse vertragen. Solche Pflanzen bezahlen die perfekte Anpassung an ihren Lebensraum mit geringer Flexibilität: Wenn der Lebensraum sich ändert, kann das ihre Ausrottung bedeuten.

„Viele Pflanzen könnten zum Beispiel ihre Nischen im Gebirge oder in Mooren verlieren“, erklärt Sven Pompe. Zu den Verlierern des Klimawandels gehören zum Beispiel die Sumpfdotterblume und die Fichte, die kühle und feuchte Luft bevorzugt.

Die Forscher betonen, dass Computersimulationen wie diese keine genauen Vorhersagen seien. Sie könnten allenfalls dazu dienen, Maßnahmen zum Naturschutz zu stützen, aber nicht zu bestimmen. Angesichts der Ergebnisse jedoch unterstützen Pompe und seine Kollegen das Ziel des Kyoto-Protokolls, die Klimaerwärmung nach Möglichkeit auf zwei Grad Celsius im globalen Mittel zu beschränken.