

- [1] B. Dollet, M. Aubouy und F. Graner, Phys. Rev. Lett. **95**, 168303 (2005)
- [2] B. Dollet et al., Phys. Rev. E **71**, 031403 (2005)
- [3] M. Aubouy et al., Granular Matter **5**, 67 (2003)

## Synchronisierte Fußgänger

Unmittelbar nach der Eröffnung der Millenium Bridge im Sommer 2000 in London strömten Tausende Besucher über die rund 300 m lange, reine Fußgängerbrücke über die Themse (Abb. 1). Zur Überraschung aller versetzten die Fußgänger bei ihrem Spaziergang jedoch die zunächst ruhig in ihren Trageseilen hängende Brücke langsam in transversale Schwingungen, deren Amplitude so groß wurde, dass die Behörden die Brücke zwei Tage später sperrten und eine eingehende Untersuchung anordneten. Ein offensichtlicher Konstruktionsfehler konnte jedoch zunächst nicht entdeckt werden. Was also war geschehen?

Um diese Frage zu beantworten, schauen wir zurück in das Jahr 1665. Der holländische Physiker Christian Huygens beschäftigt sich mit der Konstruktion präziser Pendeluhrn, die auch für die Seefahrt geeignet sind. Als er krank im Bett liegt, beobachtet er zwei Uhren, die an der Wand seines Zimmers angebracht sind, und bemerkt, dass sie exakt gegenphasig schwingen. Nun sind seine Uhren zwar echte „Hightech-Produkte“ ihrer Zeit, aber Huygens weiß auch, dass sie nicht so genau übereinstimmen können, um über längere Zeit exakt im Gleichtakt zu bleiben. Schnell findet er jedoch die richtige Erklärung für diese „Sympathie der beiden Uhren“: Die Uhrenschwingungen beeinflussen sich gegenseitig durch kaum wahrnehmbare, durch die Wandbalken übertragenen Schwingungen, was bei hinreichend guter Übereinstimmung der Pendeluhrn zu einem Gleichtakt führt. Diese Beschreibung gilt heute als eine der ersten Beobachtungen eines Synchronisationsphänomens in der Physik.

Wie ein Autorenteam um den amerikanischen Mathematiker Steven Strogatz und den Marburger Physiker Bruno Eckhardt jetzt nachgewiesen hat, spielte Synchronisation auch bei den sich aufschaukelnden Oszillationen der Millenium

Bridge eine entscheidende Rolle [1]. Wieder sind es kaum wahrnehmbare Einflüsse, die zu dem beobachteten Effekt führen: Zunächst zufällige, kleine Schwankungen der Brücke beeinflussen die Gangart der Fußgänger, die (natürlich unbewusst) ihre Schritte der Brückenschwingung anpassen. Dadurch wird die Brückenschwingung verstärkt, was wiederum dazu führt, dass die Passanten nun umso mehr mit ihrem Gang auf die Oszillationen reagieren. Es entsteht also ein sich selbst verstärkender Kreislauf, durch den am Ende (fast) alle Fußgänger (ohne militärisches Kommando!) im Gleichtakt marschieren und so die Brücke zu gefährlichen Schwingungsamplituden treiben. Ein spontaner Synchronisationsprozess, der, wie Experimente auf der Brücke und das folgende mathematische Modell zeigen, jedoch erst ab einer gewissen kritischen Personenzahl auftritt.

In dem Modell wird die angeregte transversale Schwingungsmode der Brücke (Masse  $M$ , Federkonstante  $K$ , Dämpfungskonstante  $B$ ) durch einen schwach gedämpften harmonischen Oszillator beschrieben

$$M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx = G \sum_{i=1}^N \sin\theta_i, \quad (1)$$

der von den Schritten der  $i=1, \dots, N$  Fußgänger durch seitliche (transversale) Kräfte  $G \sin(\theta_i)$  angetrieben wird. Jede Phase  $\theta_i(t)$  nimmt dabei während einer Links-Rechts-Schrittfolge um  $2\pi$  zu und folgt ohne Beeinflussung durch die Brückenschwingungen der Differentialgleichung

$$\dot{\theta}_i = \Omega_i \quad (2)$$

mit personenbezogenen, konstanten Gangfrequenzen  $\Omega_i$ , die gemäß einer Dichte  $P(\Omega)$  zufällig verteilt sind. Der entscheidende Schritt besteht nun darin, den Einfluss der Brückenschwingung  $x(t) = A(t) \sin\Psi(t)$  auf den Gang und die Zeitentwicklung von  $\theta_i(t)$  zu berücksichtigen. Hierbei sind  $A(t)$  die Amplitude,  $\Psi(t) = \Omega_0 t + \phi(t)$  die Phase und  $\Omega_0 = (K/M)^{1/2}$  die Resonanzfrequenz der Brücke, wobei  $A(t)$  und  $\phi(t)$  langsam veränderliche Variablen sind. Um die Rückwirkung der Brücke auf den Gang zu erfassen, ergänzen Strogatz et al. jede Phasengleichung (2) mit einem Antriebsterm

$$\dot{\theta}_i = \Omega_i + CA \sin(\Psi - \theta_i + \alpha), \quad (3)$$

der insbesondere von der Differenz der Brückenschwingungsphase  $\Psi(t)$  und der Phase  $\theta_i(t)$  des jeweiligen

Fußgängers abhängt. Der Parameter  $C$  repräsentiert dabei die Empfindlichkeit der Fußgänger gegenüber den Brückenschwingungen<sup>\*)</sup> und  $\alpha$  ist eine Phasenverschiebung.

Durch die Wechselwirkung der Differentialgleichung (1) für die Brückenschwingung mit den Bewegungsgleichungen (3) der Fußgänger erhält man ein System gekoppelter Oszillatoren, dessen Verhalten u. a. wesentlich von der Personenzahl  $N$  abhängt. Nach der Sperrung der Millenium Bridge wurde die Personenzahl auf der Brücke bei gezielten Experimenten systematisch gesteigert. Dabei zeigte sich, dass die Schwingungen erst ab einer kritischen Anzahl von ca. 150 Fußgängern auftreten. Strogatz et al. gelang es, dieses experimentelle Ergebnis mit Hilfe ihres Modells in einer Simulation zu reproduzieren

\*) Der Einfachheit halber wird von gleicher Sensibilität aller Passanten ausgegangen.



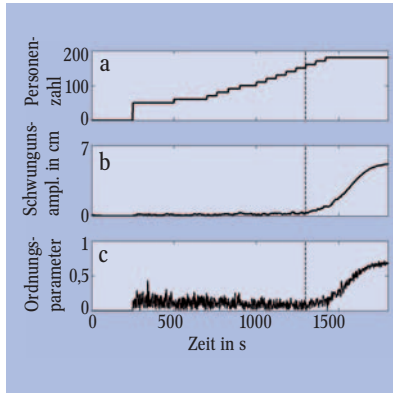
(Abb. 2). Abb. 2c zeigt als Maß für die Kohärenz der Gangarten den Betrag des komplexen mittleren Feldes  $R(t) = (1/N) \sum_{j=1}^N \exp(i\theta_j(t))$ , der ebenfalls mit Einsetzen der Synchronisation ansteigt und als Ordnungsparameter aufgefasst werden kann.

Die von den Autoren gewählte Beschreibungsform (3) für die Bewegung der Fußgänger ist inspiriert durch die mathematische Modellierung biologischer Rhythmen, bei denen ebenfalls kohärente Dynamik und Synchronisation auftreten können. Bereits in den 60er-Jahren des 20. Jahrhunderts untersuchte der theoretische Biologe A. Winfree Systeme gekoppelter Oszillatoren, um so z. B. das synchrone Blinken vieler hundert Glühwürmchen in Südostasien zu beschreiben [2]. Auch hier leuchten die einzelnen Würmchen zunächst mit leicht unterschiedlichen, individuellen Frequenzen. Sieht jedoch ein Glüh-

**Abb. 1:** Die Millenium Bridge in London wurde inzwischen mit Dämpfungselementen ausgestattet, die ein Aufschaukeln verhindern.

würmchen den Blitz eines Nachbarn, so kann es selbst gleichzeitig aufleuchten, sodass nun beide Würmchen synchron blinken und auf diese Weise weitere Artgenossen „mitziehen“, bis schließlich alle Glühwürmchen in einer gewissen Umgebung in den Blinkrhythmus einbezogen sind. Um so z. B. zu blinkenden Bäumen zu gelangen, muss jedoch auch hier die Koppelung in Form der Lichtblitze einen

**Abb. 2:** Bei zunehmender Personenzahl auf der Brücke (a) steigt ab einer kritischen Anzahl (ca. 150) die Schwingungsamplitude  $A$  stark an (b). Ursache ist eine zunehmende Synchronisation der Fußgängerbewegungen, die durch einen Anstieg des Betrags des mittleren Feldes  $R$  charakterisiert ist (c).



gewissen Schwellenwert überschreiten. Dieses Verhalten lässt sich sehr gut mit Hilfe eines Modells des japanischen Physikers Y. Kuramoto erklären, das die Wechselwirkung von  $N$  Phasenoszillatoren

$$\dot{\Theta}_i = \Omega_i + \epsilon K \sin(\Theta - \Theta_i), \quad (4)$$

durch ihr mittleres Feld  $R(t) = K \cdot \exp(i\Theta(t)) = (1/N) \sum_{j=1}^N \exp(i\Theta_j(t))$  beschreibt [3, 4]. Ersetzt man in Gl. (3) die Amplitude  $A$  und die Phase  $\Psi - \alpha$  der Brückenschwingung durch Betrag  $K$  und Phase  $\Theta$  des mittleren Feldes  $R = K \exp(i\Theta)$ , so wird die enge Verwandtschaft der Fußgänger-Brücken-Dynamik mit dem Kuramoto-Modell (4) deutlich. Letzteres wurde als Prototyp für schwach gekoppelte periodische Oszillatoren ausführlich untersucht und z. B. auch zur Beschreibung von Synchronisationsphänomenen in Josephson-Kontakten [6] herangezogen.

Wie sich in den vergangenen Jahren gezeigt hat, sind Synchronisationsphänomene jedoch nicht auf periodische Schwingungen beschränkt. Auch chaotische Systeme können auf verschiedene Weise synchronisieren [7–9] und (trotz sensitiver Abhängigkeit von den Anfangswerten) im Gleichtakt aperiodisch schwingen. Hier kann die Synchronisation zu neuen funktionalen Beziehungen zwischen den Zustandskomponenten der beteiligten Systeme führen (Verallgemeinerte Synchronisation und

Phasensynchronisation), Muster und Strukturen erzeugen und die Funktionalität biologischer und technischer Prozesse maßgeblich beeinflussen.

340 Jahre nach Huygens Beobachtung, deren Bedeutung trotz seines Vortrags vor der Royal Society of London zunächst nicht von seinen Zeitgenossen erkannt wurde, erweist sich Synchronisation immer mehr als universelles Organisationsprinzip der Natur, dessen Verständnis für die Erforschung komplexer Systeme unverzichtbar ist.

ULRICH PARLITZ

- [1] S. H. Strogatz et al., *Nature* **438**, 43 (2005)
- [2] A. T. Winfree, *The Geometry of Biological Time*, 2. Aufl., Springer, New York (2001)
- [3] Y. Kuramoto, *Chemical Oscillators, Waves and Turbulence*, Springer, Berlin (1984)
- [4] A. Pikovsky, M. Rosenblum und J. Kurths, *Synchronization – A Universal Concept in Nonlinear Sciences*, Cambridge University Press, Cambridge (2001)
- [5] S. Strogatz, *Nature* **410**, 268 (2001)
- [6] K. Wiesenfeld et al., *Phys. Rev. Lett.* **76**, 404 (1996)
- [7] L. Pecora und T. Carroll, *Phys. Rev. Lett.* **64**, 821 (1990)
- [8] L. Kocarev und U. Parlitz, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 5028 (1995)
- [9] M. Rosenblum, A. Pikovsky und J. Kurths, *Phys. Rev. Lett.* **76**, 1804 (1996)

## Die Jagd nach dem Gral der Photosynthese

Grüne Pflanzen, Algen und Cyanobakterien nutzen etwa 0,1 % des auf die Erde einfallenden Sonnenlichts und produzierenden Kohlenhydrate und Sauerstoff. Die jährliche Produktion, etwa je zur Hälfte in den Ozeanen und auf den Kontinenten, ist gewaltig. Sie wird auf  $5 \cdot 10^{17}$  g  $O_2$  geschätzt, das ist der 2000-ste Teil des Sauerstoff-Gehalts der heutigen Atmosphäre. Quelle des Sauerstoffs ist Wasser [1], dem vier Elektronen entzogen werden gemäß der Bilanzgleichung:



Diese Reaktion ist für das irdische Leben entscheidend und auch technisch bedeutsam als Einstieg in eine photosynthetische Wasserstofftechnologie. Die Natur hat einen chemischen Mechanismus gefunden, bei dem die hoch-reaktiven Zwischenprodukte der Wasseroxidation

durch Abschirmung und Kurzlebigkeit an schädlichen Nebenreaktionen mit der Reaktionsumgebung gehindert sind. Das Verständnis des Reaktionsmechanismus wurde bislang dadurch erschwert, dass diese Zwischenprodukte trotz erheblicher Bemühungen nicht nachweisbar waren. Die Jagd nach diesem „holy grail of photosynthesis“ hat begonnen, die Strukturaufklärung des katalytischen Zentrums schreitet voran, und reaktionskinetische Untersuchungen haben erste Hinweise auf Zwischenprodukte geliefert.

Die Reaktion vom Wasser zum Sauerstoff läuft in dem katalytischen metallorganischen Komplex  $Mn_4CaY$  ab, wobei  $Y$  für die redoxaktive Aminosäure Tyrosin steht. Dieser Komplex ist in ein photochemisches Reaktionszentrum, genannt Photosystem II (PSII), eingebettet (Abb. auf S. 19). Die grobe atomare Struktur wurde kürzlich von mehreren Gruppen in Umrissen (Auflösung  $\geq 3,2 \text{ \AA}$ ) bestimmt [2]. Die Absorption von Lichtquanten durch PSII löst eine Sequenz von Ladungstrennungen aus, wobei das katalytische Zentrum der Wasseroxidation (abgekürzt mit  $S$ ) ausgehend vom niedrigsten Oxidationszustand ( $S_0Y$ ) um jeweils eine Stufe hoch oxidiert wird:



Der Index  $i$  gibt dabei die Oxidationsstufe an. Mithilfe verschiedener spektroskopischer Methoden (UV/VIS, EPR und Röntgen) ist es gelungen, die durch kurze Laserpulse ausgelösten Reaktionsstufen zu charakterisieren. In den ersten drei Oxidationszuständen des katalytischen Zentrums bis hin zu  $S_3Y$  sind die beiden Sauerstoff-liefernden Wassermoleküle erstaunlicherweise in Millisekunden austauschbar. Dies wurde durch zeitaufgelöste Massen-Spektroskopie u. a. von Johannes Messinger (jetzt am MPI für Bioorganische Chemie in Mülheim) nachgewiesen [1, 3]. Es scheint keine Teiloxidation des Wassers zu geben, vielmehr sind die schrittweise höheren Oxidationszustände des Metallzentrums metastabil. Erst wenn nach Absorption des vierten Lichtquants der am höchsten oxidierte Zustand,  $S_3Y^{ox}$ , in weniger als  $1 \mu s$  erreicht worden ist, läuft die Reaktionskette bis hin zum freigesetzten Sauerstoff ab. Dabei wird der Ausgangszustand des katalytischen Zentrums ( $S_0Y$ ) wieder hergestellt:

Prof. Dr. Ulrich Parlitz, III. Physikalisches Institut, Universität Göttingen, Friedrich-Hund-Platz 1, 37077 Göttingen