

Stochastische Resonanz: Rauschen macht sensibel

Die tägliche Erfahrung lehrt uns: Rauschen stört bei der Übertragung von Information und der Wahrnehmung von Signalen eher, als dass es sie begünstigt. In der Tat stimmen wir unser Autoradio so ab, dass das Rauschen minimiert wird und zahlen viel Geld für einen möglichst rauschfreien Handy-Empfang. Physiker und Ingenieure investieren viel Zeit und Fleiß, um solche Störungen mit optimalen Rauschfiltern möglichst zu unterdrücken. Wie ein Kollege mal süffisant bemerkte: „Mein ganzes Labor ist voll mit Filtern – einer steckt sogar in meiner Kaffeemaschine“.

Um so überraschender sind die Forschungsergebnisse der letzten zehn Jahre, wonach Rauschen unter gewissen Umständen die Wahrnehmung konstruktiv beeinflusst. Dieser Effekt, bekannt als *Stochastische Resonanz* (SR) [1, 2], hat großes Interesse in Physik, Chemie, Elektrotechnik hervorgerufen und seit einigen Jahren vermehrt auch in Biologie und Medizin. Stochastische Resonanz bedeutet, dass zufällige Fluktuationen schwache Signale verstärken können. Das Phänomen lässt sich am Beispiel einer Murre in einem Eierkarton erklären [1]: Wenn die Murre durch eine schwach oszillierende Kraft behutsam geschaukelt wird, kann sie die Schwelle zu einer benachbarten Mulde nicht überwinden. Wird diese Bewegung nun zusätzlich von einem zufälligen Rütteln überlagert, so kann mitunter ein zufälliger „Kick“ im richtigen Augenblick ausreichen, die Murre über die Schwelle zu heben. Eine statistische Rechnung zeigt, dass zwei miteinander konkurrierende Mechanismen die Antwort bestimmen [2]: Ein anwachsender Rauschpegel erlaubt – korreliert mit dem externen schwachen Signal – zusehends Exkursionen über die Schwelle hinweg; andererseits schwindet die Empfindlichkeit der Antwort mit zunehmendem Rauschpegel. Somit ergibt sich eine optimale Rauschstärke für den Austritt aus der Mulde. Der Effekt wurde bisher in vielen physikalischen Systemen vorausgesagt und beobachtet, so z. B. bei einem bistabilen Ring-Laser sowie in elektronischen, supraleitenden und magnetischen multistabilen Systemen [2]. Weil das Phäno-

men der Stochastischen Resonanz nur auf drei Elementen beruht – erstens auf Rauschen, zweitens auf einem unterschwelligem Signal und drittens auf einer Nichtlinearität in Form einer Schwelle – ist es allgegenwärtig. Sinneszellen in der Natur zeigen genau dieses Verhalten. Sie feuern Signale nur ab, wenn der Sinnesreiz eine gewisse Schwelle überschreitet. Provokant lautet deshalb die Frage an die biologische Wissenschaftsgemeinde: **Schärft Rauschen die Sinne?**

Experimente an Haarzellen von Flusskrebse, die 1993 in der Arbeitsgruppe von Frank Moss durchgeführt wurden, brachten erste Hinweise, dass eine verrauschte Umgebung die Empfindlichkeit von Mechanorezeptoren in den Haarzellen steigern kann [3]. Ein ähnliches Experiment an Sinneszellen von Heuschrecken, die kleinste Windgeschwindigkeiten wahrnehmen können, wurde in der Gruppe von John Levin 1996 in Berkeley ausgeführt. Ergebnis: Die neuronale Wahrnehmung von unterschwelligem, zufälligen, breitbandigen Windsignalen, wie sie eine heranfliegende feindliche Wespe verursacht, konnte mit Hilfe von Rauschen erheblich verbessert werden. Mittlerweile gibt es auch beim Menschen Hinweise für ein positives SR-Phänomen. In der Bostoner Gruppe von John Collins wurde gezeigt, dass der Tastsinn des Menschen durch elektrisches oder mechanisches Rauschen sensibilisiert werden kann. Menschen, deren Tastsinn in Füßen oder Händen nach einem Schlaganfall oder Unfall geschädigt ist, kann demnach mit speziellen Socken oder Handschuhen geholfen werden, die den Rezeptoren ein Rauschen aufprägen.

Diese Experimente mit biologisch realistischen, aperiodischen Signalen überzeugten einige Biologen, dass das Rauschen für die Natur vielleicht doch von Nutzen sein könnte. Dennoch ist die Mehrheit der Biologen und Mediziner eher skeptisch. Das liegt zum einen daran, dass die Stochastische Resonanz für viele nicht intuitiv zu verstehen ist. Zum anderen fordert man einen Beweis, dass Lebewesen äußere Rauschquellen tatsächlich ausnutzen, um Funktionen und Verhalten zu optimieren. Plakativ formuliert: Wie viele Heuschrecken und Flusskrebse haben durch Stochastische Resonanz ihr Leben ge-

rettet? Um diesen Einwand zu entkräften, sind vor kurzem zwei Versuche vorgenommen worden [3, 4], die die funktionelle Stochastische Resonanz auf den Prüfstand zwingen. In einem ersten Experiment untersuchte die Gruppe von Frank Moss das Fressverhalten von jungen Löffelstören auf Stochastische Resonanz. Dieser Fisch besitzt einen langen, antennenförmigen Stirnfortsatz, bestückt mit Tausenden von Elektrozeporen, mit dem er Zooplankton ausfindig machen kann. Die Forscher stellten fest, dass der Löffelstör durch das mittelstarke elektrische Rauschen, wie es Plankton-Schwärme verursachen, auch weiter entferntes tierisches Plankton von 1–2 mm Durchmesser orten kann.

Eine weitere höchst interessante, klinische Anwendung der Stochastischen Resonanz wurde jüngst von japanischen Physiologen publiziert [4]. Sie gingen der Frage nach, ob Rauschen dem menschlichen zentralen Nervensystem helfen kann, gewisse Körperfunktionen zu verbessern. Dabei konzentrierten sie sich auf das zur Blutdruckregelung dienende „Baroreflex-System“. Dieses negative Rückkopplungsschema erhöht (erniedrigt) die Herzfrequenz des Menschen, wenn der Blutdruck abfällt (anstiegt). Das System enthält zwei Arten von Druckrezeptoren: Die einen spre-



chen in Venen auf Schwankungen des Blutdrucks an, die anderen in Arterien. Bei dem Versuch wurden Testpersonen auf einem schwenkbaren Tisch fixiert, der rhythmisch mit einer Periode von ca. 38,5 Sekunden leicht auf und ab geschaukelt wurde. Das stimulierte die Venenrezeptoren im Brustbereich. Diese Störung alleine war allerdings zu schwach, um das Baroreflex-System zum Gegensteuern zu aktivieren. Nun wurden gleichzeitig die Druckrezeptoren der Arterie durch eine Manschette im Halsbereich zufälligen Druckstörungen ausgesetzt. Mit der Folge, dass der Herzschlag bei einer bestimmten Rauschstärke jetzt optimal auf die periodischen Blutdruckschwankungen in den Venen reagierte. Im Unterschied zu

Löffelstöre besitzen einen mit Tausenden von Elektrozeporen bestückten Stirnfortsatz, mit dem er Plankton-Schwärme ausfindig machen kann. Das von dem Plankton verursachte elektrische Rauschen schärft seine Sinne und hilft ihm bei der Ortung der Schwärme.

Prof. Dr. Peter Hänggi, Institut für Physik der Universität Augsburg, Universitätsstr. 1, 86135 Augsburg

anderen Experimenten wanderte die Information des periodischen Venen-Signals und das Rauschen der arteriellen Rezeptoren auf *verschiedenen* Wegen in den Hirnstamm. Erst dort wurden die Signale addiert und das Ergebnis auf einem gemeinsamen Weg in den Herzmuskel geleitet. In diesem Fall ist die Stochastische Resonanz also nicht direkt in den peripheren Rezeptoren, sondern auf einer *höheren* Ebene des Nervensystems wirksam (im Hirnstamm). Diese Erkenntnis stützt die Vermutung, dass das interne Rauschen, wie es Neuronen ständig erzeugen, die Funktionsweise des Gehirns nutzbringend unterstützt.

Quo vadis Stochastische Resonanz in der Physik? Neben interessanten medizinischen Anwendungen wurden jüngst auch wichtige Meilensteine in der physikalischen SR-Forschung gesetzt. Einer internationale Kollaboration [5] ist es gelungen, die Stärke der Stochastischen Resonanz mit einem Kontrollschema gezielt zu *steuern*. Beispielsweise lässt sich damit die Wirkung von vermutlich schädlichem elektromagnetischem Smog auf neuronales Gewebe minimieren. Die Arbeitsgruppe um Lutz Schimansky-Geier von der Humboldt Universität in Berlin hat kürzlich auch aufschlussreiche Zusammenhänge zwischen Stochastischer Resonanz und statistischer Phasensynchronisation entdeckt [6]. Auch auf der Ebene des Quantenrauschens erfährt die Stochastische Resonanz gegenwärtig einen starken Aufschwung. Die gängige Literaturmeinung [2], dass bei Fehlen eines exponentiellen thermischen Boltzmann-Faktors (wie etwa dem Faktor für das detaillierte Gleichgewicht) die Tunneldynamik für Quantenübergänge eine Quanten-SR konsequenterweise nur in Systemen mit *asymmetrischen* Potentialgebirgen erlaubt, wurde unlängst mit expliziten Quantenrechnungen für symmetrische Doppelmuldenpotentiale widerlegt [7]. Darüber hinaus ließ sich zeigen, dass mittels *paralleler* Einheiten, d. h. wenn Signale von unabhängigen, parallel angeordneten SR-Einheiten summiert werden, Quanten-SR auftritt, obwohl die einzelne Einheit keine Stochastische Resonanz zeigt! Das ist ein reiner Quanten-Effekt, der klassisch nicht existiert. In diesem Zusammenhang hat eine Dresdner Gruppe vom MPI für komplexe

Systeme Quanten-SR bezüglich der kohärenten Dynamik an einem Zwei-Niveau-Atom in einer dissipativen Kavität demonstriert [8]. Fazit: Die Stochastische Resonanz gewinnt über die Grenzen der klassischen Physik hinaus auch im Rahmen der Quantenmechanik an Bedeutung, so z. B. für die Optimierung quantenmechanischer Informationsübertragung.

PETER HÄNGGI

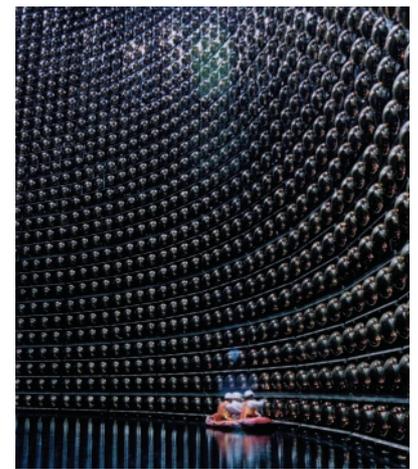
- [1] P. Jung, P. Hänggi, Physik. Bl., November 1991, S. 1005.
- [2] L. Gammaitoni, P. Hänggi, P. Jung, F. Marchesoni, Rev. Mod. Phys. **70**, 223 (1998).
- [3] D. F. Russel, L. A. Wilkens, F. Moss, Nature **402**, 291 (1999).
- [4] I. Hidaka, D. Nozaki, Y. Yamamoto, Phys. Rev. Lett. **85**, 3740 (2000).
- [5] M. Löcher et al., Phys. Rev. E **62**, 317 (2000).
- [6] J. A. Freund, A. B. Neiman, L. Schimansky-Geier, Europhys. Lett. **55**, 8 (2000).
- [7] I. Goychuk, P. Hänggi, New J. Physics **1**, 14 (1999).
- [8] T. Wellens, A. Buchleitner, Phys. Rev. Lett. **84**, 5118 (2000).

Tau-Neutrinos bevorzugt

Etwas mehr als zwei Jahre nach dem aufsehenerregenden ersten Hinweis, dass Neutrinos massebehaftet sind [1], gelang dem japanisch-amerikanischen Super-Kamiokande-Experiment ein weiterer Durchbruch, der für das Verständnis der noch immer weitgehend rätselhaften Eigenschaften der Neutrinos äußerst wichtig ist. Die kürzlich publizierten Untersuchungen [2] stehen in engem Zusammenhang mit der Frage, ob neben den drei bekannten „aktiven“ Neutrino-Arten (dem Elektron-Neutrino ν_e , dem Myon-Neutrino ν_μ und dem erst im Sommer 2000 nachgewiesenen Tau-Neutrino ν_τ) noch weitere, so genannte „sterile“ Neutrinos existieren. Sterile Neutrinos ν_s sind bislang rein hypothetische Elementarteilchen, die an keiner der fundamentalen Wechselwirkungen (außer der Gravitation) teilhaben sollten. Ihr experimenteller Nachweis hätte sehr viel weitreichendere Konsequenzen für das Standardmodell der Teilchenphysik als der Nachweis der Neutrino-Masse, sodass das Interesse an den neuen Resultaten entsprechend groß ist.

In dem mit 50 000 Tonnen Wasser gefüllten Super-Kamiokande-Detektor in der 1 km tiefen Kamioka-Mine in Japan (s. Abb.) werden seit April 1996 die Wechselwirkungen von Neutrinos aus der Erdatmosphäre untersucht. Nach dreijähriger Messzeit wurden knapp 10 000 Ereignisse nachgewiesen (erste Ergebnisse wurden u. a. in [3] vorgestellt). Atmosphären-Neutrinos entstehen beim Zerfall von Pionen und Myonen, die ihrerseits beim Aufprall der kosmischen Strahlung auf die obere Atmosphäre produziert werden. Bei diesen Prozessen entstehen Myon- und Elektron-Neutrinos im Verhältnis von 2:1. Sie lassen sich experimentell durch ihre unterschiedlichen Signaturen im Detektor trennen.

Vergleicht man die Anzahl der nachgewiesenen Neutrinoarten, stellt man ein deutliches Defizit an Myon-Neutrinos fest, während die Elektron-Neutrino-Rate der Erwartung entspricht. Dieser Effekt lässt sich erklären, falls Neutrinos massebehaftete Teilchen sind, sodass sich unterschiedliche Neutrino-Arten durch die so genannten Neutrino-Oszillationen ineinander umwandeln können. Oszilliert ein atmosphärisches ν_μ auf dem Weg von der Quelle zum Detektor in ein ν_τ



In der japanischen Kamioka-Mine sind 11 000 Photodetektoren an den Wänden eines Wassertanks befestigt. Sie registrieren Cerenkov-Strahlung von Myonen und Elektronen, die im Stoß von Neutrinos mit dem Sauerstoff des Wassers entstehen. (Foto: Univ. Tokyo)

($\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ -Kanal), beobachtet man ein ν_μ -Defizit. Dass dieses Defizit durch Oszillationen entsteht, kann durch dessen charakteristische Abhängigkeit vom gemessenen Zenithwinkel gezeigt werden. Hierbei spielt die Geometrie der Neutrino-Quelle eine zentrale Rolle: Atmosphären-