

für $N \sim 50$ [4]. Im Wesentlichen kombinieren alle drei Experimente das Einzel-Elektronen-Tunneln in verschiedenen Ansätzen mit mechanischen (phononischen) Schwingungszuständen. Die weitere Suche nach zeitaufgelösten Einzel-Phononen-Schwingungen und quantisierten mechanischen Eigenschaften bleibt also in jedem Fall spannend.

ROBERT H. BLICK

- [1] E. M. Weig und R. H. Blick, *Physik Journal*, Februar 2003, S. 20
- [2] A. Gaidarzhy et al., *Phys. Rev. Lett.* **93**, 030402 (2005)
- [3] A. V. Chaplik und R. H. Blick, *New J. Phys.* **6**, 33 (2004)
- [4] R. G. Knobel und A. N. Cleland, *Nature* **424**, 291 (2003); M. D. LaHaye et al., *Science* **304**, 74 (2004); E. M. Weig et al., *Phys. Rev. Lett.* **92**, 046804 (2004)

Kritische Lawinen im Gehirn

Physik neuronaler Netze im neuen Gewand: Aktivitätslawinen in der Großhirnrinde lassen sich mit Sandhaufenmodellen beschreiben

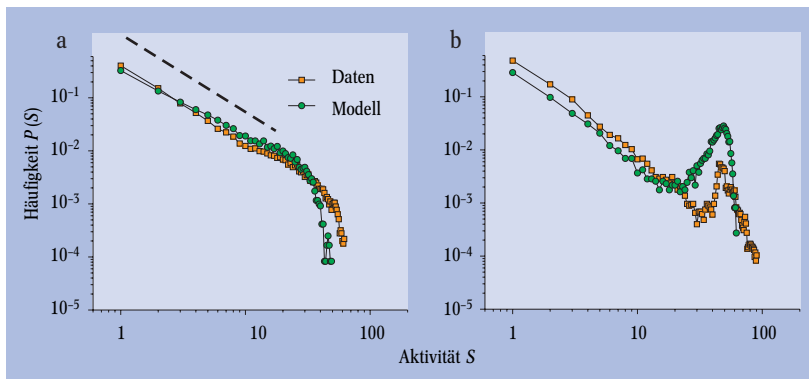
Erst seit kurzem haben wir gesicherte Erkenntnisse über Träume von Tieren: Ratten, die lernen sich in einem Labyrinth zurechtzufinden, träumen nachts von den tagsüber genommenen Wegen [1]. Ein einfacher Trick macht dies beobachtbar: Durch einen Vergleich der zeitlichen Sequenzen großräumiger Aktivitätsmuster des Rattenhirns läßt sich eine Traumsequenz eindeutig einem realen Weg im Labyrinth zuordnen. Jedesmal wenn eine Ratte einen bestimmten Weg durch das Labyrinth läuft, tritt eine spezifische Reihenfolge von neuronalen Aktivitätsmustern auf. Dieselben zeitlichen Folgen findet man wieder, wenn die Ratte schläft: Die Ratte „träumt“ von den Wegen im Labyrinth. Sogar der genaue „geträumte Ort“ der Ratte im Labyrinth ist dann anhand der Messung der Hirnaktivität feststellbar.

Angesichts solch spektakulärer Ergebnisse ist es nicht erstaunlich, daß die experimentelle Messung großräumiger Anregungsmuster des Gehirns derzeit geradezu einen Siegeszug vollführt, wobei die Meßmethoden von Multielektroden (wie im obigen Beispiel) bis zur Kernspintomographie reichen. Ähnliche Experimente am Menschen in Verbindung mit Kognitionsstudien verändern gegenwärtig wie kaum eine andere Methode unser Ver-

ständnis des Gehirns. Während die Messung der Aktivität großräumiger Kortextbereiche für sich genommen vor allem phänomenologischen Charakter hat, bietet ihre statistische Betrachtung überraschende Zugänge zu grundlegenden Fragen der Vernetzung und der Dynamik des Nervengewebes. So haben Langzeitmessungen interessante statistische Eigenschaften kortikaler Aktivität aufgezeigt. Ein Beispiel ist die Eigendynamik der Großhirnrinde einer Ratte. Dünne Scheiben von Rattenhirngewebe sind auch außerhalb des lebenden Tiers, beliefert mit Sauerstoff und Nährstoffen, viele Tage lebensfähig und verhalten sich weitgehend wie ein Teil eines lebenden Gehirns. Langzeitmessungen mit einem 60-Elektroden-Array an einer so kultivierten Rattenhirnprobe belegen eine andauernde Eigenaktivität [2]. Jede Elektrode zeigt die Aktivität einer Neuronengruppe in ihrer Umgebung an, und die Gesamtheit der Elektroden geben jeweils eine Momentaufnahme gleichzeitig aktiver Neuronengruppen an. Die Abfolge solcher Momentaufnahmen, quasi ein „Blinkmuster“ wechselnd aktiver Neuronengruppen,

aller Größenordnungen auf seinen Flanken. Die Verteilung von Lawinengrößen der neuronalen Aktivitätslawinen zeigt ein entsprechendes Skalenverhalten. Zum zweiten zeigen die Messungen wiederkehrende metastabile Anregungsmuster, die den Gedächtnisreihenfolgen der Ratten im Labyrinth ähneln. Diese Beobachtungen deuten auf Grundmechanismen der Dynamik von Neuronengruppen und ihrer Rolle beim Gedächtnis hin.

Physiker an der Indiana Universität, die teilweise auch an der experimentellen Studie beteiligt waren, haben nun ein Modell vorgeschlagen, mit dem sich die Beobachtungen quantitativ modellieren und daraus Hypothesen über die Arbeitsweise des Gedächtnisses ableiten lassen [3]. Ausgangspunkt war die Beobachtung, daß die experimentell gefundene transiente Neuronendynamik einem kritischen Verzweigungsprozeß ähnelt, daß also das „Feuern“ einer Neuronengruppe im Mittel genau eine weitere Gruppe aktiviert. Ein unterkritischer Prozeß, bei dem im Mittel weniger als eine weitere Gruppe aktiviert wird, würde schnell zur Ruhe



Verteilung der Lawinengrößen neuronaler Aktivität S in Experiment und Modell. S bezeichnet die Zahl der Neuronengruppen, die an einer Aktivitätslawine teilnehmen (= Zahl der aktiven Elektroden). In normalem Gewebe (a) nimmt die Häufigkeit von Aktivitätslawinen mit einer Potenz der Größe, $P(S) \propto S^{-3/2}$, und

in Übereinstimmung mit einem Modell mit kritischer Dynamik ab. Unter dem Einfluß einer Droge (Picrotoxin), die zu erhöhter Aktivitätsweiterleitung führt, bildet sich ein Maximum bei einer mittleren Lawinengröße von 50 heraus (b), das von einem Modell im überkritischen Bereich wiedergegeben wird.

bezeichnet man als Aktivitätslawine. Diese endet früher oder später, bis durch spontane Aktivität eine neue Lawine gestartet wird. Die beobachteten Aktivitätslawinen zeigen zwei charakteristische statistische Signaturen [2]: Zum einen variiert die Lawinengröße über einen weiten Bereich, ähnlich wie dies von Sandhaufenmodellen her bekannt ist. Ein Sandhaufen, der wie in einer Sanduhr von oben her beschickt wird, baut einen kritischen Schüttwinkel auf und zeigt dann Lawinen

kommen, während ein überkritischer Prozeß, bei dem eine aktive Neuronengruppe mehr als eine weitere Gruppe triggert, schnell zu einer systemweiten Ausbreitung jeder Anregung führen würde (ähnlich einer Kettenreaktion in der Kernspaltung). Das Modell stellt den Aktivierungszustand der Neuronengruppen mit binären Zustandsvariablen dar (feuern oder inaktiv), die sich über einen sog. Perkolationsprozeß gegenseitig aktivieren. Die Wechselwirkungsnachbarschaft

Prof. Robert H. Blick, Laboratory for Molecular Scale Engineering, Electrical and Computer Engineering, University of Wisconsin-Madison, 1415 Engineering Drive, Madison WI, USA

Prof. Dr. Stefan Bornholdt, Institut für Theoretische Physik, Universität Bremen, Otto-Hahn-Allee, 28354 Bremen

zwischen den Gruppen wird als ein asymmetrisch verbundener Zufallsgraph angenommen. Die Übertragungswahrscheinlichkeiten werden zufällig gewählt und so normiert, daß das Modell einem kritischen Verzweigungsprozeß entspricht. Ähnlich einem kritischen Sandhaufen beobachtet man in diesem Modell Aktivitätslawinen aller Größenordnungen mit einer Statistik, die sich mit den experimentellen Hirndaten deckt (Abb. a). Bringt man das Hirngewebe mit Hilfe einer Droge in einen hyperaktiven Zustand, so erhält man im Experiment eine Lawinenverteilung, die durch den überkritischen Bereich des Modells reproduziert wird (Abb. b). Außerdem reproduziert das Modell die charakteristischen metastabilen Zustände der Neuronenanregungen, aus denen sich die „Traumsequenzen“ zusammensetzen. Insgesamt lassen sich damit die wesentlichen Eigenschaften der Messungen an Neuronengruppen des Rattenkortex durch ein vergleichsweise einfaches Modell beschreiben.

Weitere Simulationen des Modells erlauben Spekulationen über die Bedeutung des kritischen Punktes im Hinblick auf die Funktion des Gehirns. Variiert man den Verzweigungsparameter des Modells, so findet man, daß die Zahl der metastabilen Zustände genau dann maximal ist, wenn die Aktivität einem kritischen Verzweigungsprozeß gehorcht. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, daß der kritische Punkt eine gute Wahl ist, weil dies beispielsweise die Speicherkapazität des neuronalen Gewebes optimieren könnte. Solch weitgehende Schlüsse sind nach dieser einzelnen Studie sicher noch nicht möglich. Mit der erfolgreichen quantitativen Kombination großskaliger neuronaler Aktivitätsmessungen mit theoretischen Ansätzen aus Perkolations- und nichtlinearer (diskreter) Dynamik stößt diese Arbeit jedoch ein methodisches Fenster auf, das uns einen neuen Blickwinkel und vielleicht neue Werkzeuge auf dem Weg zum Verständnis neuronaler Informationsverarbeitung an die Hand gibt.

STEFAN BORNHOLDT

- [1] K. Louie und M. A. Wilson, *Neuron* **29**, 145-156 (2001)
- [2] J. M. Beggs und D. Plenz, *J. Neurosci.* **23**, 11167 (2003)
- [3] C. Haldemann und J. M. Beggs, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 058101 (2005)

Ordnung dank Chaos

Nichtzerfließende elektronische Wellenpakete auf Kepler-Bahnen

Die Tatsache, dass quantenmechanische Wellenpakete zerfließen, wird uns bei der ersten Begegnung mit der Quantenmechanik im Studium als unumstößliche Wahrheit eingefloßt – mit einer Ausnahme, dem harmonischen Oszillator. Dafür hatte Schrödinger bereits 1926 „pendelnde Wellengruppe(n) als undulationsmechanisches Bild des Massenpunktes“ konstruiert, die sich im Laufe der Zeit *nicht* auf ein immer größeres Raumgebiet ausdehnen [1]. Diese Wellengruppen kennen wir heute unter dem Namen „kohärente Zustände“. Schrödingers Arbeit endet mit einer bemerkenswerten Vorhersage, die uns freilich vor dem Hintergrund unserer überlegenen Kenntnis befremdlich erscheint: in gleicher Weise ließen sich Wellengruppen konstruieren, „welche auf hochquantigen Keplerellipsen umlaufen und das undulationsmechanische Bild des Wasserstoffelektrons sind“, lediglich habe man hier mit größeren „rechen-technischen Schwierigkeiten“ zu rechnen. Natürlich wissen wir, dass es derartige Wellengruppen nicht geben kann – wegen der Anharmonizität des Coulomb-Spektrums. Und so musste Schrödinger bei der Durchführung seines Programms scheitern.

Tom Gallagher und sein Team von der University of Virginia liefern nun jedoch den (experimentellen!) Gegenbeweis [2]: In der vorliegenden Arbeit, die frühere Ergebnisse [3, 4] geschickt zu einem

vollständigen Bild zusammensetzt, zeigen sie, dass es in der Tat möglich ist, Schrödingers Desiderat zu erfüllen, wenn man nur eine geeignete, zeitlich periodische Störung des Systems zulässt. Über diese fundamentale Einsicht hinaus eröffnen die Resultate völlig neue Perspektiven für eine *robuste* kohärente Quantenkontrolle.

Der experimentelle Zugang von Gallagher ist ebenso einfach wie elegant: Man nehme Lithium-Atome (oder ein beliebiges anderes Einelektronen-System), rege das Valenzelektron in einen Rydberg-Zustand an, setze diese einem nahresonanten Mikrowellenfeld aus und ionisiere schließlich das System mittels eines elektrischen Feldimpulses, dessen zeitliche Dauer kurz verglichen mit der Kepler-Periode des gewählten Rydberg-Zustands ist. Der Feldimpuls liefert einen Schnappschuss des quantenmechanischen Elektrons – genauer: seiner Wahrscheinlichkeitsdichte – auf dem anfänglich präparierten Kepler-Orbit. Und das überraschende Ergebnis besteht nun darin, dass ein mehrmaliges solches „Anblitzen“ des Elektrons während einer Kepler-Periode eine klare Korrelation zwischen der Position des Elektrons entlang der Trajektorie und dem Zeitpunkt, zu dem der Auslöser gedrückt wurde, liefert. Mit anderen (bzw. mit Schrödingers) Worten: Die elektronische Wahrscheinlichkeitsdichte hält dauernd zusammen und breitet sich *nicht* im Laufe der Zeit auf ein immer größeres Raumgebiet (entlang der Kepler-Ellipse) aus – dies führte ja zu einem Verlust der beobachteten Korrelation.

KURZGEFASST...

■ Dunkle Galaxie entdeckt

Astronomen haben Hinweise auf eine Galaxie entdeckt, die fast ausschließlich aus Dunkler Materie besteht. Die „dunkle Galaxie“ VIRGOHI21 befindet sich im 50 Millionen Lichtjahre entfernten Virgo-Haufen und rotiert wie eine gewöhnliche Galaxie. Mit einem Radioteleskop ließ sich VIRGOHI21 nur aufgrund der darin enthaltenen Wasserstoff-Wolke nachweisen. Anhand der Rotationsgeschwindigkeit schätzten die Astronomen ab, dass die Gesamtmasse etwa 10^{11} Sonnenmassen beträgt, tausendmal mehr als diejenige des beobachteten Wasserstoffs. Da keine Sterne zu beobachten sind, vermuten die Forscher, dass der Rest der Galaxie aus Dunkler Materie bestehen muss. R. Minchin et al., *Astrophys. J.* **622**, L21 (2005)

■ Heißer Kollaps

Bei der sog. Sonolumineszenz emittieren durch Schallwellen getriebene Gasblasen Licht, wenn sie kollabieren. Dabei können die Blasen extreme Temperaturen erreichen, die nun erstmals von amerikanischen Physikern gemessen wurden. Indem sie für ihr Sonolumineszenz-Experiment Edelgase wie Argon und Xenon und konzentrierte Schwefelsäure verwendeten, erzeugten die Physiker über tausendmal mehr Photonen als bei Sonolumineszenz in Wasser. Damit waren sie in der Lage, anhand der Details der beobachteten Spektren auf eine Temperatur von 15 000 K an der Oberfläche der kollabierenden Blase zu schließen – eine Temperatur, wie sie etwa auf der Oberfläche von Sternen herrscht. D. J. Flannagan und K. S. Suslick, *Nature* **434**, 52 (2005)