

werden. Der Kontrast der Interferenzstreifen hängt von der Richtung und von der relativen Lage von Einhüllenden und Oszillation ab.

Vor mehr als 200 Jahren hatte Thomas Young der Wellennatur des Lichtes durch sein Doppelspaltexperiment zum Durchbruch verholfen. Dabei ist interessant, dass schon 100 Jahre früher Francesco Maria Grimaldi die Beugung an zwei Lochblenden beobachtet hat. Seitdem hat das Doppelspaltexperiment viele revolutionäre Ideen geboren. Das neue Attosekunden-Doppelspaltexperiment eröffnet einzigartige Perspektiven auf dieser Reise in die mikroskopische Welt.

WOLFGANG P. SCHLEICH

- [1] J. A. Wheeler und K. Ford, Geons, Black Holes and Quantum Foam, Norton, New York (1998)
- [2] J. A. Wheeler und W. H. Zurek, Quantum theory and measurement, Princeton University Press, Princeton (1983)
- [3] O. Nairz, M. Arndt und A. Zeilinger, Am. J. Phys. **71** (4), 319 (2003)
- [4] M. O. Scully, B.-G. Englert und H. Walther, Nature **351**, 111 (1991)
- [5] F. Lindner et al., Phys. Rev. Lett. **95**, 040401 (2005)

## Quantenchaos in neuer Optik

**Vertikal emittierende Laser haben Anwendungspotenzial in Datenkommunikation und Spektroskopie, sind aber auch eine Fundgrube für die Grundlagenforschung. Jetzt bringen sie auch Quantenchaos ans Licht.**

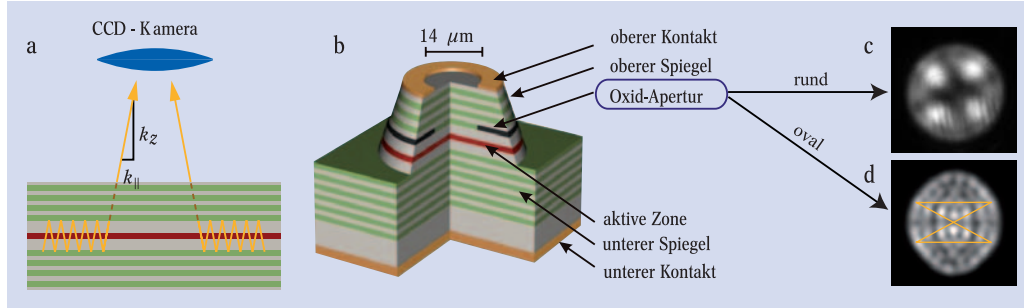
Ein Billardtisch mit der Form eines Stadions ist ein typisches System, in dem klassisches Chaos auftritt. Reflexionen an der Berandung koppeln die beiden Freiheitsgrade der Billardkugel miteinander, sodass die Trajektorien irregulär werden, d. h. zunächst benachbarte Trajektorien entfernen sich exponentiell voneinander. Da der Begriff der Trajektorie in der Quantenmechanik keinen Sinn macht, stellt sich die Frage, wie sich das klassische Chaos in dem entsprechenden quantenmechanischen System manifestiert. Eine Analogie zwischen der Schrödinger-Gleichung für ein quantenmechanisches Teilchen und der Helmholtz-Gleichung für das elektrische Feld erlaubt es, dieser Frage nachzugehen, indem man die stehenden Wellen untersucht, die sich bei diskreten Werten einer zweidimensionalen

Wellenzahl  $k_{\parallel}$  in billardförmigen Mikrowellen-Resonatoren ausbilden [1]. Dieser Zusammenhang zwischen chaotischen Bahnen und Wellen ist das Thema des Quantenchaos; er kristallisiert sich heraus, wenn die effektiven Wellenlängen  $\lambda_{\parallel} = 2\pi/k_{\parallel}$  klein im Vergleich zu den Abmessungen der Berandung sind.

Auch in der Laser-Optik kann man Billards realisieren, sodass sich dem Quantenchaos insbesondere in Mikrolasern neue Anwendungsbereiche eröffnen [2]. Experimentalphysiker in Darmstadt haben sich zusammen mit Theoretikern in Turin speziell den Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers (VCSELs) zugewandt [3]. Die extreme Präzision der Halbleiter-Epitaxie wird in VCSELs voll ausgeschöpft, indem nicht nur die lichtverstärkende „aktive Region“, sondern zugleich auch die zur Rückkopplung nötigen Spiegel als dünne planare Schichten zu einem Sandwich aufgestapelt werden (Abb.). Da sich auf diese Weise Bragg-Reflektoren mit Transmission im Promille-Bereich herstellen lassen, reicht zum Überschreiten der Laserschwelle in VCSELs eine sehr geringe Pump-Leistung.

Prof. Dr. Wolfgang P. Schleich, Abt. Quantenphysik, Universität Ulm, Albert-Einstein-Allee 11, 89081 Ulm

Da die Spiegel im VCSEL dicht übereinander liegen, ist die vertikale Wellenvektorkomponente  $k_z$  aller Moden auf einen gemeinsamen Wert quantisiert. Einen Resonator mit diskretem Wellenlängenspektrum bekommt man aber erst, wenn ein dreidimensional eingeschnürtes Wellenfeld erzwungen wird, indem



Schematischer Strahlengang (a) und lithographische Struktur (b) eines VCSELs. Gegenläufige Wellenzüge, die vom seitlichen Rand reflektiert werden, überlagern sich zu stehenden Wellen im transversalen Profil. Diese Intensitätsverteilung wird durch die Öffnung im oberen Kontakt emittiert und von einer

CCD-Kamera abgebildet. Als seitliche Barriere für das Licht fungiert eine Oxid-Schicht, die eine Apertur besitzt. Wenn die Oxid-Apertur kreisrund ist, bilden sich in ihr reguläre Muster (c), während eine ovale Apertur zu Wellenformen führt, die den Übergang zum Strahlenchaos ankündigen (d). (nach [3])

liche Wellenformen (Abb. c). Sie lassen sich systematisch anhand der Zahl ihrer radialen und azimuthalen Knotenlinien numerieren – ein Lehrbuch-Beispiel sowohl in der Laserphysik als auch in der Quantenmechanik.

Wird hingegen der Querschnitt des VCSELs oval ausgelegt, so las-

erz beschreiben, einem aus der Kernphysik stammenden Hilfsmittel zur Beschreibung von Kernen, für die das Schalenmodell versagt [5]. Die hier behandelten VCSELs erlauben es gerade, das Übergangsbereich zwischen einem Schalenmodell (reguläre Orbitale) und dem Quantenchaos zu untersuchen – unter gewissen Aspekten eine *terra incognita*, selbst in der Kernphysik.

Ein bemerkenswerter Erfolg der an den VCSELs angewandten Methodik besteht darin, dass sich der von den Zufallsmatrizen vorhergesagte Unterschied zwischen rundem und ovalem Billard in der spektralen Statistik experimentell nachweisen ließ. Dies ist in bisherigen Studien zum Quantenchaos in *seitlich* emittierenden Lasern nicht gelungen [4], da sich zuviele Resonator-Moden wegen ihrer Strahlungsverluste einer Zählung entziehen. Vergleiche mit numerischen Simulationen auf der Basis eines dreidimensionalen Lasermodells zeigen, dass für die VCSEL-Struktur die statistische Auswertung in der Tat möglich und die Analogie zum Quantenchaos in zweidimensionalen Billards zu rechtfertigen ist.

JENS UWE NÖCKEL

Prof. Jens Uwe Nöckel, Department of Physics, University of Oregon, Eugene, USA

man die laterale Translationsinvarianz unterbricht. Die dadurch ins Zentrum zurückgeworfenen Wellen (vgl. Abb.) können sich zu komplizierten Stehwellen-Mustern überlagern, die man als transversale Moden bezeichnet. Bei Reflexionen an einer seitlichen Berandung bleibt in guter Näherung  $k_z$  erhalten, sodass sich die vertikale Wellenausbreitung von der transversalen Modenform entkoppelt betrachten lässt.

Die vorwiegend vertikale Emission des VCSEL ist ideal zum direkten Vermessen der transversalen Wellenform geeignet. Schon vor einigen Jahren wurden in Würzburg [4] exotische Formen wie z. B. „photonische Moleküle“ hergestellt. Diese Namensgebung kommt daher, dass die beobachteten transversalen Feldverteilungen als stehende Wellen in der zweidimensionalen Querschnittsebene zu verstehen sind, die wie in Mikrowellen-Billard einer Art Schrödinger-Gleichung gehorchen und daher quantenmechanischen Orbitalen ähneln.

Um nun aber von „photonischen Orbitalen“ zum Regime des Quantenchaos zu gelangen, haben Gentsy und Kollegen VCSELs betrachtet, deren Querschnitt vergleichsweise groß ist, so dass sich viele verschiedene transversale Moden ausbilden können [3]. Die Form dieser „photonischen Billards“ lässt sich dank der ausgereiften Technologie im Detail kontrollieren. Bei kreisrundem Seitenrand zeigen sich orbital-ähn-

sen sich irreguläre Wellenmuster finden (Abb. d). Erstes Indiz für den Übergang zum Strahlenchaos ist hier das Fehlen von eindeutig abzählbaren Knotenlinien. Des Weiteren kann sogar die Entstehung einer „Bowtie“-Mode („Frackfliege“) erahnt werden [2], der eine durch Bifurkation geborene Strahlentrajektorie zugrunde liegt (orange).

Darüber hinaus manifestiert sich Quantenchaos insbesondere in der statistischen Verteilung der quantisierten Energieniveaus, deren Rolle im vorliegenden Fall den diskreten Werten  $k_{\parallel}^2$  zufällt. Diese Statistik lässt sich mithilfe der Zufallsmat-

## KURZGEFASST...

### ■ Frequenzkamm im EUV-Bereich

Mit modengekoppelten Lasern lassen sich beliebig lange Ketten aus extrem kurzen Laserpulsen erzeugen, die man z. B. für eine noch präzisere Zeitmessung nutzen könnte. Ein Physikerteam vom MPI für Quantenoptik in München hat nun einen solchen „Frequenzkamm“ im extrem ultravioletten Spektralbereich (EUV) realisiert. Die Forscher entwickelten dafür eine Laserquelle, mit der sich die bisher auftretenden Energieverluste durch Speicherung und Verstärkung der Laserpulse vermeiden lassen. Ch. Gohle et al., Nature 456, 234 (2005)

### ■ Maser am Himmel

Astronomen haben erstmals direkt nachgewiesen, dass in interstellaren Hydroxyl-(OH)-Wolken Radiostrahlung ähnlich wie beim Maser verstärkt wird. J. Weisberg et al. beobachteten dafür den Pulsar B1641-45, dessen Radiopuls alle 0,455 Sekunden die

Erde überstreicht, wobei er eine interstellare OH-Wolke durchquert. Durch Vergleich der Spektrallinien der vier OH-Grundzustände während und nach dem Radiopuls zeigte sich, dass eine Linie durch stimulierte Emission verstärkt wird. J. M. Weisberg et al., Science 309, 106 (2005)

### ■ Antineutrinos aus den Tiefen

Mit dem japanischen KamLAND-Detektor ist es gelungen, die Energien von Antineutrinos zu messen, die beim radioaktiven Zerfall von  $^{238}\text{U}$  und  $^{232}\text{Th}$  im Erdinneren entstehen. Geophysiker schätzen, dass etwa die Hälfte der von der Erde abgestrahlten Wärmeleistung von rund 44 Terawatt aus diesen radioaktiven Zerfällen stammt. Anhand der Antineutrino-Messungen lässt sich dafür nun immerhin 60 TW als Obergrenze angeben. Für genauere Abschätzungen gilt es nun, den störenden Neutrino-Untergrund (etwa aus Kernreaktoren) zu reduzieren. T. Araki et al., Nature 456, 499 (2005)