

„Chaosphysik“ ist in erster Linie Grundlagenforschung. Doch inzwischen sind an den Randbereichen dieser theoretischen Disziplin, in denen sie sich mit anwendungsorientierter Forschung überschneidet, vielfältige Synergieeffekte entstanden. An der Universität Essen werden diese Bereiche inzwischen gezielt ausgebaut – beispielsweise für die weitere Miniaturisierung von Mikrolasern.

Robuste Smokingfliegen

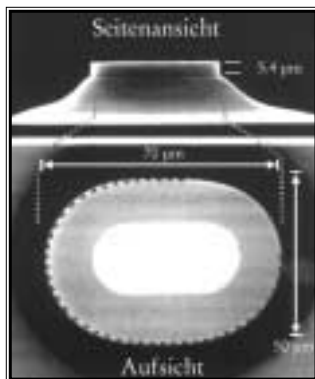
Mikrolaser in chaotischen Resonatoren / Von Gregor Hackenbroich

Das Telefonieren über Glasfaserkabel ist inzwischen alltäglich geworden; Licht wird immer häufiger zur Übertragung von Informationen verwendet. Für diese Form der Informationsübertragung müssen elektrische Signale in Lichtimpulse verwandelt werden. Dies ermöglichen bereits bisher kompakte Halbleiterlaser. Im Wettlauf um weitergehende Miniaturisierungen wird zur Zeit weltweit daran gearbeitet, die für diese Technologie verwendeten Lichtquellen für ihre Verwendung in elektrischen Schaltungen weiter zu verkleinern.

Vor kurzem haben Wissenschaftler der Bell-Laboratorien in Murray Hill einen flachen, leistungsfähigen Halbleiterlaser mit einem Durchmesser von nur etwa einem zwanzigstel Millimeter – der Dicke eines menschlichen Haares – entwickelt [1]. Die Entwicklung dieses Mikrolasers beruht wesentlich auf neuen Ideen aus der Theorie der nichtlinearen Dynamik und des Chaos. Mikrolaser und darauf basierende optische

und optoelektronische Bauelemente könnten zukünftig ein wichtiges Anwendungsfeld für die Chaostheorie werden.

Der neue Mikrolaser ist in Abbildung (1) gezeigt. Er besteht wie alle Laser aus zwei wesentlichen



(1) Elektronenmikroskopische Aufnahmen des neuen ovalen Halbleiterlasers (Seitenansicht und Aufsicht). Das lasierende aktive Material befindet sich etwa 5 tausendstel Millimeter (5 µm) unterhalb der Oberfläche. Der Laser hat einen Durchmesser von etwa 70 tausendstel Millimetern (70 µm) Abbildung: Science 1998 [1]

Komponenten: Zum einen aus einem lichterzeugenden aktiven Material, das von außen zugeführte Energie (etwa elektrischen Strom) in Licht umwandelt. Die zweite Komponente ist ein Resonator, in dem sich das lichterzeugende Material befindet.

Die Bell-Gruppe verwendete als lichterzeugendes Material eine Folge dünner Schichten der Halbleiterlegierungen Gallium- und Aluminium-Indiumarsenid.

Elektronen, die diese Schichten durchlaufen, stürzen eine Folge von Energiestufen hinab. Bei jedem Sprung von einem Zustand höherer in einen Zustand niedriger Energie wird ein Lichtteilchen einer bestimmten Wellenlänge abgegeben. Das Licht muß nun verstärkt werden. Das wird erreicht durch eine geschickte Abfolge der Halbleiterschichten, die gewährleistet, daß sich viele Elektronen in einem Zustand von hoher Energie ansammeln. Von dort gehen sie lawinenartig in einen Zustand mit niedrigerer Energie über, sobald sie von einem Lichtteil-



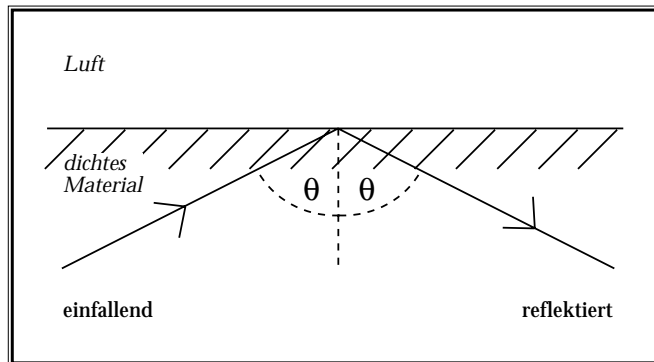
Foto: Tiba Netz

chen getroffen werden. Das dabei schlagartig freiwerdende Licht wird von dem Resonator zu einem Großteil wieder in das aktive Material zurückgeworfen und kann dort neue Lichtteilchen auslösen. Wenn die Verluste im Resonator klein genug sind, verstärkt sich dieser Prozeß selbst, und es kommt zum *Lasern*.

In herkömmlichen Resonatoren wandern die Lichtteilchen zwischen zwei Spiegeln hin und her. Ein Problem bereiten jedoch häufig die schlechten Spiegel: Bei jeder Reflexion „sickert“ ein Teil des Lichts durch die Spiegel nach außen und geht so dem Laserprozeß verloren. Um diese Verluste auszugleichen, muß das verstärkende aktive Material mindestens einige Millimeter lang sein. Dies verhinderte bisher eine weitere Miniaturisierung der Laser. Für die erfolgreiche Realisierung ultrakleiner Mikrolaser mußten daher neue Wege beschritten werden.

Verlustarme Reflexionen

Der Resonator der Bell-Gruppe beruht auf dem Prinzip der *Totalreflexion*. Das Phänomen ist Aquarienbesitzern und Tauchern wohlbekannt. Es ist dargestellt in Abbildung (2): Lichtstrahlen, die sich unter Wasser ausbreiten und unter einem flachen Winkel auf die Wasseroberfläche treffen, werden vollständig refle-



(2) Totalreflexion und Brechung an der Grenzfläche zwischen einem (optisch) dichten Medium (unten) und Luft (oben). Der Lichtstrahl kommt aus dem dichten Medium. Hier trifft er in einem *flachen* Winkel auf die Grenzfläche und wird total reflektiert

tiert und können nicht in die umgebende Luftschicht eindringen. Das gleiche Prinzip liegt modernen Glasfaserkabeln zugrunde: Licht im Inneren der Glasfaser wird am Rand des Kabels total reflektiert und geht damit nicht nach außen verloren. Dies erlaubt es, Lichtimpulse mit geringen Verlusten über weite Strecken zu transportieren. Ebenso wie Licht an der Wasseroberfläche oder in einer Glasfaser total reflektiert wird, werden Lichtstrahlen im Mikrolaser am Rand des neu entwickelten Resonators reflektiert. Sie verbleiben nahezu verlustfrei lange Zeit im Inneren des Resonators. Dies ermöglicht das Lasern bereits mit sehr geringen Mengen von aktivem Material und

ist die Voraussetzung für die spektrale Miniaturisierung des Lasers.

Allerdings wird keineswegs die Gesamtheit des erzeugten Lichts im Inneren des Mikrolasers total reflektiert. Totalreflexion findet nur für Strahlen statt, die *flach* auf den Rand treffen. Im Unterschied dazu, können Strahlen, die unter einem *spitzen* Winkel auf den Rand des Resonators einfallen, ganz oder teilweise aus dem Resonator entkommen. In Abbildung (3) ist dies wieder am Beispiel eines Lichtstrahls im Wasser veranschaulicht: Der dort skizzierte Strahl wird nur zu einem Teil an der Wasseroberfläche reflektiert. Der andere Teil kann sich in der umgebenden Luftschicht, wenn auch unter einem anderen Winkel, weiter ausbreiten. Man spricht in diesem Fall von der *Brechung von Licht*.

Welche Lichtstrahlen werden total reflektiert und welche werden gebrochen? Die Antwort darauf gibt das sogenannte Brechungsgesetz. Dieses Gesetz wurde etwa zur Zeit Galileo Galileis entdeckt. Damals begann man, mit Brillengläsern zu experimentieren, um mit ihrer Hilfe Fernrohre herzustellen. Als erster erkannte der Mathematiker und Astronom Johannes Kepler, daß die Lichtbrechung von einer einzigen Konstanten, dem Brechungsindex n , abhängt. Jedes Material hat einen bestimmten, charakteristischen Bre-

chungsindex, der i. a. auch von der Wellenlänge des Lichts bestimmt wird. Luft hat den Brechungsindex 1, dichtere Medien haben in der Regel einen Brechungsindex, der größer als 1 ist. So beträgt der Brechungsindex von Wasser 1,3, der des Mikrolasers der Bell-Gruppe etwa 3,3.

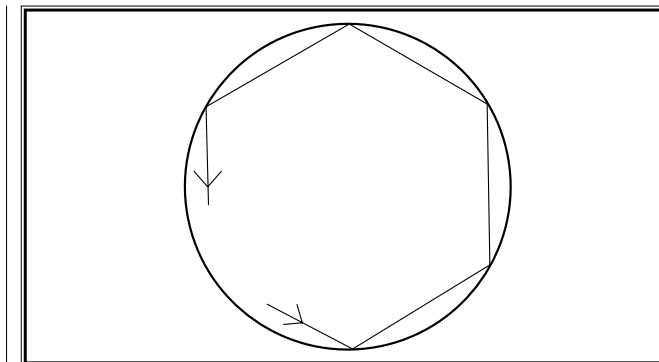
Das Brechungsgesetz besagt, daß einfallender und gebrochener Strahl durch die Beziehung

$$n \sin \theta = \sin \theta'$$

zusammenhängen, wobei θ und θ' die Winkel bezeichnen, die der einfallende bzw. der gebrochene Strahl mit dem Lot an der Grenzfläche einschließen. Ein interessanter Fall ergibt sich, wenn für den einfallenden Strahl $n \sin \theta$ größer als 1 ist. Da der Sinus des Winkels θ' niemals größer als 1 werden kann, ist in diesem Fall eine Brechung unmöglich. Statt dessen wird der einfallende Strahl total reflektiert. Die Bedingung $n \sin \theta_c$ legt den sogenannten kritischen Winkel θ_c für Totalreflexion fest. Im Fall des neuen Halbleiters beträgt der kritische Winkel etwa 18 Grad. Alle Lichtstrahlen, die unter einem flacheren Winkel (mit $\theta > \theta_c$) auf den Rand des Resonators treffen, werden total reflektiert.

Runde „Flüstergalerien“

Die ersten Laser, die Gebrauch vom Prinzip der Totalreflexion machten,



(4) In einem runden Billard – oder Raum – treffen die Bahnen von Billardkugeln, Lichtstrahlen oder Schallwellen den Rand stets im gleichen Winkel. In der Flüstergalerie kann so ein wandnahes Flüstern an der gegenüberliegenden Wand gut verstanden werden – im Inneren ist es unhörbar

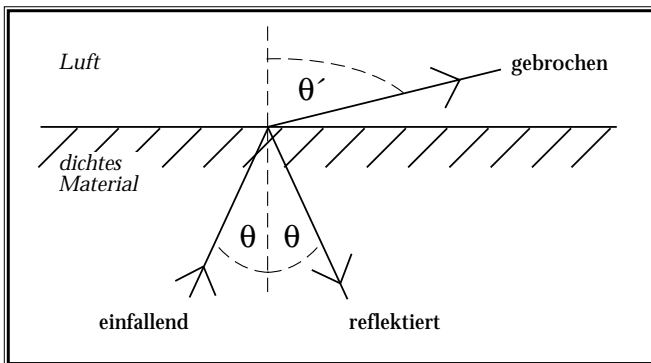
waren die sogenannten *Flüstergalerielaser*. In diesen Lasern läuft das Licht nahe am Rand eines runden Resonators umher (siehe Abbildung 4) und wird bei jedem Auftreffen am Rand total reflektiert. Auf die gleiche Weise breiten sich auch Schallwellen in runden Gebäuden aus. Ein berühmtes Beispiel dafür ist die Flüstergalerie in der St.-Paul's-Kathedrale in London: Ein Flüstern an der Wand der Kathedrale kann noch an der gegenüberliegenden Wand gut verstanden werden, während es im Inneren der Halle unhörbar ist. Wie der Schall in der Flüstergalerie, so kann sich auch das Licht in einem Flüstergalerielaser nahezu verlustfrei am Rand ausbreiten. Der Laser

benötigt daher nur sehr geringe Mengen an aktivem Material. Dies ermöglicht heutzutage die Herstellung der weltweit kleinsten Laser mit Durchmessern von nur dem Millionsten Teil eines Meters.

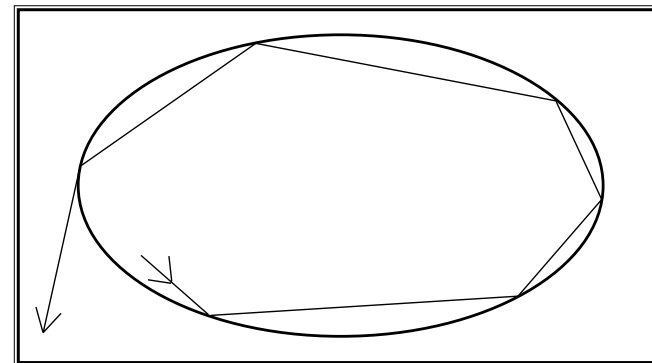
Leider waren Flüstergalerielaser für technische Anwendungen wenig geeignet. Zum einen ist die von ihnen abgestrahlte Leistung zu gering. Zum anderen geben sie das Laserlicht nicht als gerichteten Strahl ab, so wie es für praktische Anwendungen wünschenswert wäre, sondern gleichmäßig in alle Richtungen.

Das ovale Billard

Die entscheidende Verbesserung brachte ein Vorschlag, den die Theoretiker A. Douglas Stone und Jens Nöckel [2] zusammen an der Yale-Universität im amerikanischen New Haven erarbeiteten: Durch Computerechnungen zeigten sie, daß bei bestimmten Krümmungen das Laserlicht einen *ovalen* Resonator nur an wenigen Stellen als gerichteter Strahl verläßt. Sie schlugen daher vor, die bisher runden Flüstergalerielaser durch Laser von ovaler Form zu ersetzen. Anleiten ließen sich Stone und Nöckel dabei von der Idee, daß Lichtteilchen in einem Resonator sich ebenso verhalten wie Billardkugeln auf einem Billardtisch – und Billards sind einer der Schwerpunkte



(3) Totalreflexion und Brechung an der Grenzfläche zwischen einem (optisch) dichten Medium (unten) und Luft (oben). Hier trifft er die Grenzfläche in einem *spitzen* Winkel, er wird nur zum Teil reflektiert. Der andere Teil wird gebrochen



(5) In einem ovalen Billard schwankt der Auftreffwinkel. Lichtstrahlen in einem ovalen Resonator können aus dem Resonator entkommen, wenn ihr Auftreffwinkel (gemessen relativ zum Lot an den Rand) größer als der kritische Winkel für die Totalreflexion wird

moderner Chaosforschung. Die hier vorliegenden Ergebnisse gaben die entscheidenden Hinweise für das neuartige ovale Design.

So ist aus der Theorie des Chaos bekannt, daß die Bewegung der Billardkugeln wesentlich von der Form des Billards abhängt. Abbildung (4) zeigt, daß Kugeln in einem runden Billardtisch stets unter dem gleichen Winkel auf den Rand treffen. Anders ist dies bei dem ovalen Billard in Abbildung (5). Hier kann der Auftreffwinkel von einem Stoß zum nächsten stark schwanken. Die genauere Analyse zeigt, daß kleine Änderungen des Auftreffwinkels bereits nach wenigen Kollisionen der Kugel mit der Bande zu völlig verschiedenen Bahnen führen. Diese extreme Störanfälligkeit ist charakteristisch für eine chaotische Bewegung – in einem ovalen Billard bewegen sich Kugeln in der Regel in chaotischer Weise. Das gleiche gilt auch für Laserlicht in ovalen Resonatoren.

Wie kann man aber trotz Chaos und der damit verbundenen extremen Störanfälligkeit vorhersagen, an welchen Stellen das Laserlicht den Resonator verläßt? Glücklicherweise gibt es Lichtstrahlen, die vom Einfluß des Chaos weitgehend verschont bleiben. Der Verlauf dieser „robusten“ Strahlen kann selbst in einem ovalen Resonator weitgehend vorhergesagt werden. Ein Beispiel sind die Strahlen in der Flüstergalerie nahe am Rand. Zwar schwankt, anders als im Kreis, ihr Auftreffwinkel auf den Rand. Diese Schwankungen sind im Unterschied zu chaotischen Strahlen aber vergleichsweise klein. In der Regel wird deshalb ein Lichtstrahl, der im ersten Schritt flach – wie in Abbildung 2 dargestellt – reflektiert wird, auch im nächsten auf diese Weise gespiegelt. Der Strahl wandert also unter mehrfachen Reflexionen im Resonator, bis sein Auftreffwinkel schließlich größer als der kritische Winkel für die Totalreflexion wird. An dieser Stelle kann das Licht den Resonator verlassen (Abb. 5).

Man kann diese einfache Überlegung weiter verfolgen, um zu ermitteln, wo das Laserlicht aus dem Resonator abgestrahlt wird. Durch das Zeichnen einiger Bahnkurven kann sich der Leser selbst davon überzeugen, daß das Licht bevorzugt an *den Stellen stärkster Krümmung* austreten wird, da dort der Auftreffwinkel am größten wird. Genau dieses Verhalten wird auch im Experiment beobachtet, wenn die Form des Lasers nur wenig von der Kreisform abweicht.

Robuste Smokingfliegen

Für das *Lasern* in dem neuen Mikrolaser der Bell-Gruppe sind jedoch keine Flüstergaleriestrahlen verantwortlich. Statt dessen bewegt sich das Laserlicht im Inneren des Resonators wie in Abbildung (6) gezeigt: entlang einer geschlossenen Bahn, die den Umriß einer Smokingfliege hat. Diese Bahn ist ebenso wie die Flüstergaleriebahn robust gegen das Chaos, kann aber anders als diese bei der stark ovalen Form des Resonators leichter zum *Lasern* angeregt werden. Der Laserstrahl tritt stark fokussiert an vier Stellen aus dem Resonator aus; das infrarote Laserlicht liefert dabei eine Leistung von zehn Milliwatt. Dieser Wert übertrifft die Leistung herkömmlicher Flüstergalerielaser um mehr als das Tausendfache und ist kaum schwächer als ein Diodenlaser in einem CD-Player. Die starke Leistung und die gerichtete Abstrahlung des Laserlichts machen ovale Mikrolaser zu vielversprechenden Kandidaten für technische Anwendungen.

Kann man die *Richtung und die Intensität* des abgegebenen Laserlichts vorhersagen? Kann man dieses Wissen ausnutzen, um die Form des Resonators für Anwendungen zu optimieren? Diese Fragen werden zur Zeit in meiner Arbeitsgruppe an der Universität GH Essen untersucht. Dabei hat sich herausgestellt, daß man zu ihrer Beantwortung weit über die bisher skizzierten Untersu-

chungsmethoden hinausgreifen muß – und daß faszinierende Zusammenhänge zwischen den oben genannten Fragen und grundlegenden Problemen der Quantenmechanik bestehen. Ein solcher Zusammenhang läßt sich am Beispiel des bereits erwähnten Billards beschreiben.

Quantenmechanisches Tunneln

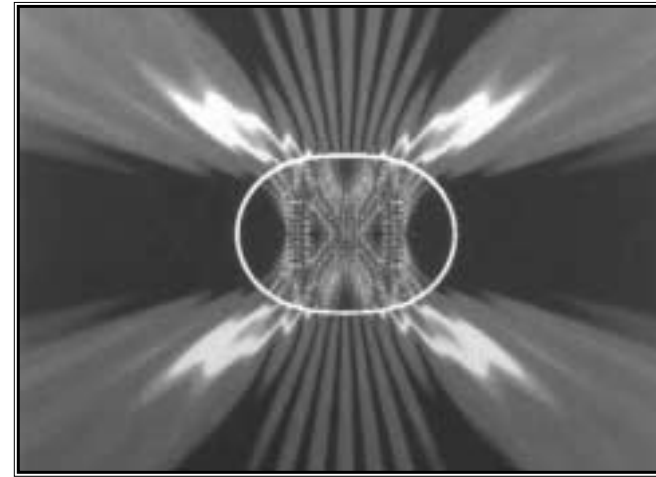
Auf die Analogie zwischen chaotischen Billardkugeln und chaotischen Lichtstrahlen wurde bereits hingewiesen. Die Analogie ist aber noch weitreichender. Die Bewegung von Billardkugeln wird durch die klassische Newtonsche Mechanik beschrieben. Diese ist der Spezialfall einer tieferliegenden, mikroskopischen Theorie, nämlich der Quantenmechanik. Ebenso ist die Beschreibung von Licht durch sich geradlinig ausbreitende Strahlen ebenfalls nur der Spezialfall einer grundlegenden Theorie, in diesem Fall der Theorie der Elektrodynamik. So wie klassische Mechanik und Strahlenoptik einander entsprechen, gibt es eine weitreichende Analogie zwischen der Quantenmechanik von Billardkugeln und der Elektrodynamik von Licht in flachen Resonatoren. Manifest wird diese Analogie der mikroskopischen Theorien darin, daß sowohl Licht als auch die Billardkugeln zugleich teilchen- und wellenartigen Charakter haben. Der Wellencharakter tritt erst dann zutage, wenn Licht oder Quanten an Objekten streuen, deren Ausdehnung etwa von der Größe der Wellenlänge ist. Für ein Atom ist die Wellenlänge so unvorstellbar klein, so daß seine Wellennatur nur selten eine Rolle spielt. Anders im Mikrolaser, dessen infrarotes Laserlicht eine Wellenlänge von etwa fünf tausendstel Millimeter hat. Dieses Maß ist zwar verglichen mit Gegenständen unseres täglichen Lebens auch bereits sehr klein, aber es ist nur zehnmal kleiner als der Durchmesser des Mikrolasers selbst. Das ist der Grund, weshalb in Mikrolasern der Wellencha-

rakter des Lichts wichtig wird. Er manifestiert sich in *quantenmechanischen Tunneln*.

Mit *Tunneln* werden in der Quantenphysik Verhaltensweisen eines Quantenobjekts bezeichnet, die nach den Regeln der klassischen Physik verboten wären. So kann ein Quant beispielsweise aus einer tiefen Talmulde nach außen sickern, obwohl es nach klassischer Anschauung den umgebenden Berg nicht überwinden kann. Ein analoger *Tunnelprozeß* in Mikrolasern sorgt dafür, daß Licht, das nach dem Brechungsgesetz total reflektiert werden

tischen Wert. Die Berechnung der Intensität mit Hilfe des naiven Strahlenmodells liefert deshalb erwartungsgemäß ein falsches Ergebnis.

Konkrete Erkenntnisse wie im dargestellten Fall können also wichtige Anhaltspunkte für das Design neuer, noch leistungsfähigerer Mikrolaser liefern. Gleichzeitig ist der wissenschaftliche Ansatzpunkt, die Verknüpfung einer Theorie von Mikrolasern mit den Fragen der Quantenmechanik, von hohem Interesse für den theoretischen Physiker. Mithin wird mit diesem kurzen Einblick in die wissenschaftliche



(6) Muster des Laserlichts innerhalb und außerhalb des Lasers (gewonnen aus einer Computerrechnung). Hell ummantelte Bereiche entsprechen hoher Intensität, dunkle Bereiche niedriger Intensität. Das Laserlicht kann nur an vier Stellen aus der „Smokingfliege“ entkommen

sollte, durch Tunneln aus dem Resonator entkommen kann. Dies gilt besonders für Licht, welches in der Nähe des kritischen Winkels für die Totalreflexion auf den Rand auftrifft. Für solches Licht ist die Beschreibungsweise der Strahlenoptik grob falsch; das Tunneln muß berücksichtigt werden, wenn man die Intensität des abgestrahlten Lichts berechnen will. Daß Tunnelprozesse auch in der Realität bedeutsam sind, zeigt eben auch das Experiment der Bell-Gruppe: Das Licht „in der Smokingfliege“ trifft den Rand mit einem Winkel nahe am kri-

Praxis auch ein oft geleugnetes Ergebnis deutlich: der Synergieeffekt zwischen einer vermeintlich praxisfernen Grundlagenforschung und einer praxisorientierten Weiterentwicklung von Zukunftstechnologien.

Zusammenfassung

Ideen der Chaosforschung haben zu der Konzeption und experimentellen Realisierung neuartiger ultrakleiner Halbleiterlaser geführt. In diesen Lasern wird Licht am Rand eines ovalen Resonators total reflektiert. Der

Laser strahlt das Laserlicht stark fokussiert in wenige Richtungen aus. Theoretische Modelle zeigen, daß die Lichtteilchen im Inneren des Lasers sich so verhalten wie chaotische Billardkugeln. Die Quantenaspekte solcher Billardkugeln sind wichtig für die Intensität des abgegebenen Laserlichts.

Summary

New ideas of chaos theory have triggered the design and realization of a novel class of semiconductor microlasers. These lasers exploit the total internal reflection of light at the boundary of a resonator with oval shape. The new lasers are characterized by high output power and strongly directional emission. Theoretical models show that light inside the laser behaves like chaotic billiard-balls. The quantum aspects of such billiards become important for the intensity of the emitted light.

Der Autor:

Gregor Hackenbroich studierte Physik in Bonn und München. Er promovierte 1993 bei Professor Herbert Wagner in München. Anschließend folgten Postdoc-Aufenthalte bei Hans A. Weidenmüller in Heidelberg und bei A. Douglas Stone an der Yale University. Seit Anfang 1998 leitet er eine Forschungsgruppe an der Universität GH Essen.

Literatur:

- [1] Science, Bd. 280, S. 1556, 1998
- [2] Nature, Bd. 385, S. 45, 1997