

Hochenergie- und Plasmaphysik/Quantenoptik

Mikro-Photonik: Lichtkrafteffekte, Frequenzkämme und biologische Sensoren auf einem Chip

Kippenberg, Tobias; Schließer, Albert; Del'Haye, Pascal; Arcizet, Olivier;

Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching
Selbständige Nachwuchsgruppe – Laboratory of Photonics

Korrespondierender Autor

Kippenberg, Tobias

E-Mail: tobias.kippenberg@mpq.mpg.de

Zusammenfassung

Optische Mikrotoroide können resonantes Licht lange speichern. Durch die Empfindlichkeit der Resonanzbedingung eignen sie sich zum Nachweis kleinster Auslenkungen, wie sie durch Brownsche Bewegung oder die Anlagerung biologischer Moleküle hervorgerufen werden. Die resonante Überhöhung der Lichtleistung führt auch zu neuartigen, Lichtkraft-induzierten nichtlinearen Prozessen sowie zu einer extremen Form der Kerr-Nichtlinearität, welche das Licht eines Dauerstrichlasers in einen Frequenzkamm verwandelt.

Abstract

Optical microcavities store resonant light for millions of round-trips. The high sensitivity of the resonance condition enables the direct observation of Brownian motion and the detection of biological molecules. The resonant power enhancement gives rise to novel nonlinear processes due to light forces exerted on the resonator as well as an extreme form of the Kerr nonlinearity, which transforms a continuous-wave laser into a frequency comb.

Im Gebiet der Photonik entwickeln Forscher Methoden aus der Mikroelektronik weiter, um extrem kleine Strukturen herzustellen, die sich für die Erzeugung, Manipulation und Speicherung von Licht eignen. Daraus ergeben sich sowohl Perspektiven für technische Anwendungen als auch neue experimentelle Möglichkeiten für die Untersuchung fundamentaler Fragestellungen.

Im „Laboratory of Photonics“ am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching werden die besonderen Eigenschaften optischer Mikroresonatoren für neuartige Experimente in der Quantenoptik und der Biophysik ausgenutzt. Die hier verwendeten monolithisch erzeugten Glastroide können Licht bei „optischer Resonanz“ sehr lange speichern. Diese Bedingung ist erfüllt, wenn die Strecke, die das Licht bei einem Umlauf im Toroid zurücklegt, ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge beträgt. Das Licht wird dabei auf kleinstem Raum konzentriert, da der Durchmesser des Toroids in etwa dem eines menschlichen Haares entspricht (**Abb. 1a**). Nach einer Methode, die 2003 erstmals am California Institute of Technology (Caltech) erfolgreich erprobt wurde [1], werden diese Strukturen durch eine Kombination von Photolithographie, chemischen Ätzverfahren und einem teilweisen Aufschmelzen des Glases auf einem Silizium-Mikrochip erzeugt.

Ultraempfindliche Messung der Brown'schen Bewegung und mechanischer Moden

Die hohe „Güte“ (diese Größe gibt die Speicherzeit in Einheiten einer optischen Oszillationsperiode an) der optischen Resonanzen in den Glas-Mikrotoroiden ermöglicht es, extrem kleine Änderungen ihrer Ausdehnung oder ihres Brechungsindex zu messen. Änderungen dieser Art können durch äußere Einflüsse entstehen wie beispielsweise durch die Anlagerung eines zusätzlichen Moleküls.

Nach den Gesetzen der Thermodynamik aber gehören solche Schwankungen zu den „intrinsischen“ Eigenschaften dieser Systeme. Alle Moleküle des Toroids führen beispielsweise die sogenannte Brown'sche Bewegung aus, d.h., sie „zittern“ um ihre Gleichgewichtslage im Material. Mithilfe der Elastizitätstheorie lässt sich die Bewegung der Moleküle am einfachsten durch mechanische Schwingungen, - sogenannte „Moden“ - beschreiben, denen bestimmte Auslenkungsprofile und Frequenzen zugeordnet sind. Die Brown'sche Bewegung der Moleküle kann dann als eine thermische Anregung der mechanischen Moden verstanden werden.

Die mechanischen Moden beeinflussen über eine Auslenkung des Materials auch die Größe, und damit die optischen Resonanzen des Toroids. Zwar sind diese Größenfluktuationen extrem klein, sie liegen bei Raumtemperatur typischerweise bei 10^{-15} Meter. Am Max-Planck-Institut für Quantenoptik wurden jedoch, gemittelt über eine Sekunde, bereits Empfindlichkeiten von bis zu 10^{-18} Meter erreicht, das entspricht einem Hundertmillionstel (10^{-8}) des Durchmessers eines Wasserstoffatoms! Diese Genauigkeit erlaubt es, die mechanischen Moden der verwendeten Struktur so detailliert zu analysieren, dass die Ergebnisse mit numerischen Simulationen verglichen werden können (**Abb. 1**).

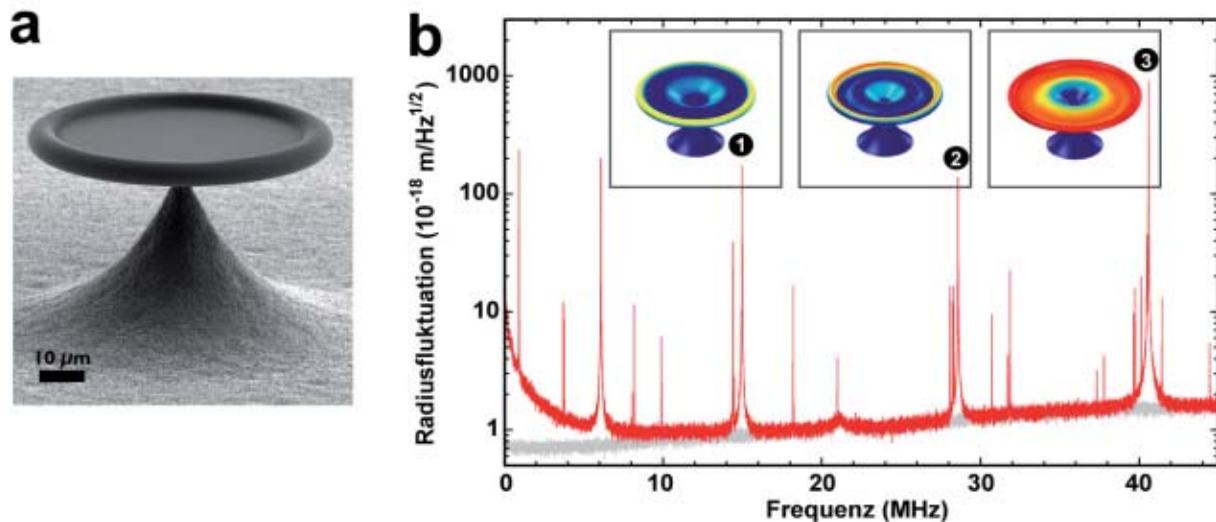


Abb. 1: *a)* Rasterelektronenaufnahme eines am MPQ fabrizierten Mikrotoroids mit ultrahoher optischer und mechanischer Güte. Das Licht zirkuliert im äußersten Rand des Glastorus', welcher von einem dünnen Glasscheibchen auf einer spitz zulaufenden Silizium-Säule gehalten wird.

b) Optisch gemessenes Spektrum der Radiusfluktuationen des Resonators bei Raumtemperatur (rote Kurve). Vor dem extrem niedrigen Messhintergrund (grau), der nur durch das Quantenrauschen des zum Auslesen verwendeten Laserlichts bestimmt ist, sind die hochfrequenten mechanischen Moden deutlich als scharfe Resonanzen zu erkennen. Mithilfe von numerischen Simulationen lassen sich die beobachteten Eigenfrequenzen verschiedenen Moden zuordnen. In den eingeblendeten Kästen werden exemplarisch drei Simulationen illustriert.

Urheber: Max-Planck-Institut für Quantenoptik

Dabei ist besonders interessant zu untersuchen, bis zu welchem Grad die Näherung zutrifft, dass die Eigenmoden voneinander vollständig unabhängig sind. Denn die mechanischen Moden geben über verschiedene Prozesse Energie an alle andere Moden ab und sind daher schwach aneinander gekoppelt. Obwohl diese „Dissipation“ eine große Rolle bei der Anwendung nano- und mikromechanischer Systeme in der Sensorik und Diagnostik spielen, sind die Forscher heute von ihrem Verständnis noch weit entfernt. Die kontrollierte und reproduzierbare Herstellung von Mikroresonatoren könnte hier zusammen mit numerischen Simulationen und hochempfindlichen Messungen große Fortschritte bringen. Auf Grundlage der neuen Einsichten könnten bereits Strukturen mit mechanischen Moden mit stark verringerter Dissipation entwickelt werden.

Resonator-Optomechanik: Die mechanischen Wirkungen von Licht

Mit der hier erreichten Messempfindlichkeit kann erstmals eine neue Klasse von Phänomenen untersucht werden. Dabei handelt es sich um Effekte, die durch den Impuls hervorgerufen werden, den die Lichtquanten, die sogenannten Photonen, auf ihre Umgebung übertragen. Bisher spielten diese „Lichtkräfte“ eigentlich nur in der Atom- und Molekülphysik eine Rolle, wo sie dazu eingesetzt werden, den Bewegungszustand dieser elementaren Teilchen zu kontrollieren. Zwar sagten theoretische Physiker schon vor über dreißig Jahren vorher [2], dass sich Lichtkrafteffekte bei hochempfindlichen Messungen in optischen Resonatoren bemerkbar machen. Bisher wurde aber lediglich ein Effekt, eine Bistabilität, nachgewiesen [3]. Diese Messung gelang in einem eleganten Experiment schon 1983 in der Gruppe des Laserpioniers Herbert Walther am MPQ.

Optischen Mikroresonatoren profitieren in diesem Zusammenhang nicht nur von der hohen Messempfindlichkeit, sondern auch von der hohen Güte, aufgrund derer die im Resonator zirkulierende Lichtleistung um einen Faktor von etwa 100.000 überhöht wird. Erst dadurch werden „optomechanische“ Effekte und damit verknüpfte Phänomene experimentell zugänglich. Eine besonders interessante Dynamik entsteht infolge der gegenseitigen Kopplung optischer und mechanischer Freiheitsgrade: Während eine mechanische Auslenkung die optische Resonanzbedingung verändert und damit mehr oder weniger Licht im Resonator zulässt, bestimmt die im Toroid gespeicherte Lichtenergie die auf den mechanischen Freiheitsgrad ausgeübte Lichtkraft, welche selbst wieder Auslenkungen hervorruft (**Abb. 2a**). Aus dieser „Rückkopplung“ resultiert eine nichtlineare Dynamik, die beispielsweise zu einer opto-mechanischen Instabilität führen kann [4, 5], in der die mechanische Mode oszilliert – angetrieben nur von einem Lichtstrahl.

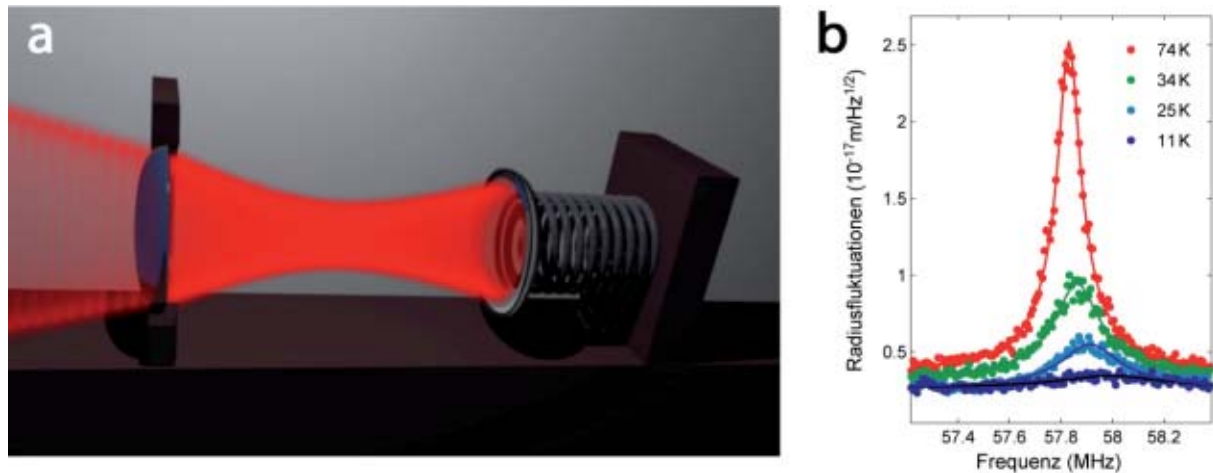


Abb. 2: a) Generisches optomechanisches System: Ein optischer Resonator, der hier einfach aus zwei Spiegeln besteht, nimmt (nah-) resonantes Licht auf. Ist die Güte des Resonators sehr hoch, wird die zirkulierende Leistung um ein Vielfaches (in der Realität oft >100.000 -fach) der eingestrahelten Leistung überhöht. Dadurch kann die auf die Spiegel ausgeübte Lichtkraft so groß werden, dass ein beweglicher Spiegel, wie im Bild mit der Feder angedeutet, ausgelenkt wird. Dies führt zur einer beobachtbaren opto-mechanischen Kopplung, die auch Quantenphänomene aufzeigen sollte.

b) Optisches Kühlen einer mechanischen Mode bei 57.8 MHz. Durch die Einkopplung von Laserlicht in einen Mikrotoroiden werden die thermischen Schwankungen des Resonatorradius reduziert (Punkte), wie durch die Theorie vorhergesagt (Linien). Je höher die eingekoppelte Laserleistung, desto kleiner sind die Fluktuationen (von rot nach dunkelblau wird die Leistung etwa versiebenfacht). Für die höchste Laserleistung wird eine effektive Temperaturabsekkung auf etwa 11 K erreicht.

Urheber: Max-Planck-Institut für Quantenoptik

Laserkühlen von makroskopischen Objekten

Noch faszinierender für die Forscher auf dem jungen Gebiet der Optomechanik ist jedoch die Tatsache, dass diese Rückkopplung auch negativ sein kann in dem Sinne, dass die Bewegungen der mechanischen Moden durch Licht gedämpft werden. Dabei reduziert diese Dämpfung sogar die thermische Anregung. Daher spricht man auch von „Laserkühlung“, da sich die Moden durch die Einwirkung des Lichts in einem Bewegungszustand befinden, der einer niedrigeren Temperatur entspricht. Dieser Effekt wurde erstmalig 1977 von dem russischen Physiker Vladimir Braginsky vorhergesagt, entzog sich aber fast drei Jahrzehnte lang einer experimentellen Beobachtung.

Als einem der ersten Labors weltweit ist es dem „Laboratory of Photonics“ gelungen, das Laserkühlen mechanischer Systeme nachzuweisen [6] und zu zeigen, dass der Kühleffekt im Fall von Mikrotoroiden tatsächlich einzig durch die von den gespeicherten Photonen ausgeübte Lichtkraft zustande kommt (**Abb. 2b**). Zusammen mit den experimentellen Daten wurde ein schlüssiges theoretisches Modell vorgestellt, welches die Ergebnisse akkurat und über weite Parameterbereiche vorhersagen kann. Die erzielte effektive Verringerung der Temperatur um den Faktor 30 kann als eine erfolgreiche Demonstration eines neuen Effekts gelten, aber auch als Einführung einer neuen experimentellen Methode: der Laserkühlung makroskopischer Objekte.

Ein Blick auf die Atomphysik, in der die Laserkühlung einige der größten physikalischen Fortschritte der letzten Jahrzehnte ermöglicht hat, genügt, um das schnell wachsende Interesse an der Laserkühlung größerer Objekte nachzuvollziehen. Tatsächlich arbeiten mittlerweile Gruppen aus aller Welt auf diesem neuen Gebiet, unter ihnen beispielsweise das Laboratoire Kastler Brossel an der École Normale Supérieure in Paris, das Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Boston oder die Universität von Yale.

Besondere Aufmerksamkeit gilt dabei neuartigen Quanteneffekten in optomechanischen Systemen. Die Kombination der neuen Laserkühlung mit leistungsfähigen klassischen kryogenen Techniken könnte es beispielsweise ermöglichen, mechanische Moden so stark zu dämpfen, dass das fundamentale quantenmechanische Limit für ihre Anregung – der Quanten-Grundzustand – erreicht wird. Nach den Gesetzen der Quantenmechanik sollte die Eigenschwingung dann immer noch eine fundamentale kleinste, von Null verschiedene Amplitude besitzen. In Zusammenarbeit mit der Gruppe von Willhelm Zwerger an der Technischen Universität München wurde am MPQ eine detaillierte Analyse eines solchen Ansatzes durchgeführt [7], deren Ergebnisse für die Auslegung der geplanten Experimente von grundlegender Bedeutung sind: Für das Laserkühlen in den Grundzustand ist es unabdingbar, dass die Photonen Speicherzeit im Resonator wesentlich länger ist als die Schwingungsperiode der mechanischen Mode. Diese Bedingung stellt eine experimentelle Herausforderung da, der derzeit nur sehr wenige optomechanische Systeme gewachsen sind. Jüngste Experimente am MPQ haben jedoch gezeigt, dass Mikrotoroide auch in diesen Bereich vordringen können [8]. Damit sind diese Strukturen viel versprechende Kandidaten, um zu Temperaturen in der Nähe des quantenmechanischen Grundzustands vorzustoßen.

Während quanten-optomechanische Effekte seit Jahren von Theoretikern große Aufmerksamkeit erfahren, gilt ihre Beobachtung noch immer als Herausforderung für Experimentalphysiker ganz unterschiedlicher Fachrichtungen wie der Gravitationswellen-Astronomie, der Quantenoptik und der Nano- und Mikromechanik. Ihre Motivation liegt teilweise in anwendungsspezifischen Fragestellungen – zum Beispiel der nach den fundamentalen Empfindlichkeitsgrenzen interferometrischer Längenmessung –, jedoch nicht minder in der Faszination einer Quantenmechanik im wörtlichen Sinne.

Frequenzkammerzeugung in Mikroresonatoren

Auch in der Frequenzmetrologie können Mikroresonatoren neue Beiträge leisten. Auf diesem Gebiet haben optische Frequenzkämme im letzten Jahrzehnt die Messung von Naturkonstanten mit bis dahin unerreichbarer Präzision ermöglicht [9]. Dem Erfinder dieser revolutionären Technik, Theodor Hänsch vom MPQ, wurde 2005 der Nobelpreis für Physik gemeinsam mit John Hall vom NIST (National Institute of Standards and Technology) verliehen. Zur Erzeugung dieser Frequenzkämme werden bisher hauptsächlich gepulste Laserquellen verwendet. Per Fouriertransformation lässt sich mathematisch zeigen, dass das Licht einer gepulsten Laserquelle nicht nur eine Frequenz (jede Lichtfrequenz entspricht einer bestimmten Farbe) sondern viele diskrete Frequenzen enthält. Der Abstand zwischen den verschiedenen Frequenzen ist exakt gleich, so dass man sich das Licht eines gepulsten Lasers im Frequenzbereich als einen Kamm aus äquidistanten Linien vorstellen kann. Die Frequenz jeder Linie eines solchen Kamms lässt sich exakt aus nur zwei Variablen bestimmen: dem Abstand zwischen den einzelnen Linien und der Position einer beliebigen Kammkomponente. Wie die äquidistanten Striche der Skala eines Lineals lässt sich der optische Frequenzkamm nutzen, um unbekannte Frequenzen zu messen. Hierzu wird das Licht unbekannter Frequenz dem Licht des Frequenzkamms überlagert. Analog zu der Schwebungsfrequenz, die man hört, wenn man zwei leicht verstimmt Stimmgabeln anschlägt, ergibt sich hier eine Schwebung, die der Differenz der unbekannt Frequenz und der nächstgelegenen Frequenzkammlinie entspricht und mit Photodetektoren gemessen werden

kann. Mit Hilfe dieser Frequenzkamm-Messtechnik bestimmte die Gruppe von Prof. Hänsch beispielsweise die $1s-2s$ Übergangsfrequenz des Wasserstoffatoms am Max-Planck-Institut für Quantenoptik bis auf 14 Stellen genau, in Übereinstimmung mit den (weniger genau) berechneten theoretischen Werten.

Das „Laboratory of Photonics“ hat nun gezeigt, dass sich – statt mit einem makroskopischen modengekoppelten Laser – mit den schon beschriebenen Glas-Mikroresonatoren ebenfalls optische Frequenzkämme erzeugen lassen (**Abb. 3**) [10].

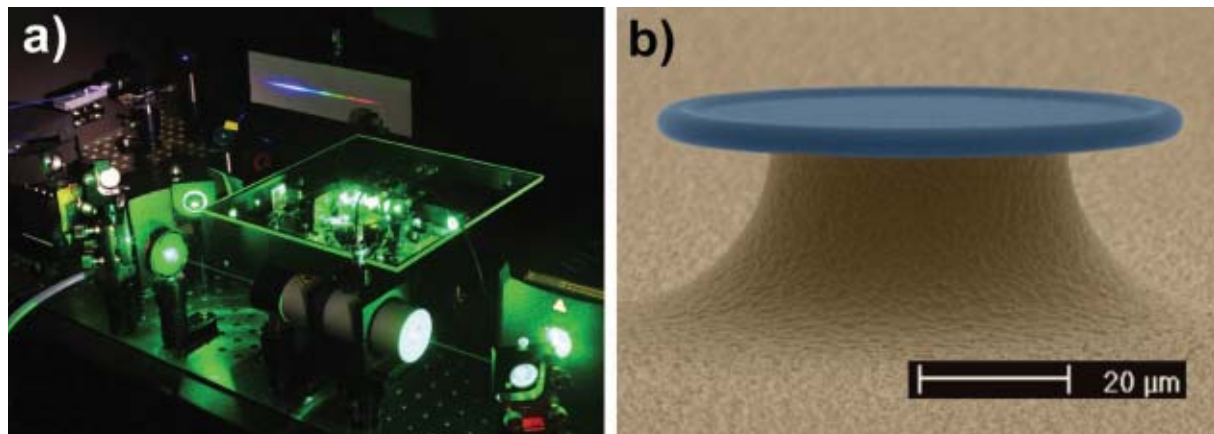


Abb. 3: Vergleich zwischen herkömmlichem Titan-Saphir Frequenzkammgenerator (a) und dem neuartigen Mikrotoroid-Frequenzkammgenerator aus Glas (b). In diesem Mikroskopbild ist die Glasstruktur mit blauer Farbe hervorgehoben. Laserlicht kann über eine Glasfaser in den Toroid eingekoppelt werden und wird dort durch fortlaufende Reflektion an der Innenwand gespeichert. Der Mikrotoroid ist etwa 10000-mal kleiner als ein Titan-Saphir Frequenzkammgenerator.

Urheber: Max-Planck-Institut für Quantenoptik

Das Laserlicht wird hier nicht über einen extern gepumpten Titan-Saphir Kristall verstärkt, sondern im Mikrotoroid durch nichtlineare optische Prozesse direkt auf die einzelnen Kammlinien verteilt. Dies geschieht durch das sogenannte entartete „Vier-Wellen-Mischen“ (engl. Four-wave-mixing),

bei dem zwei Photonen des Pumplasers in zwei zur ursprünglichen Frequenz symmetrische Seitenbänder gestreut werden. Da der Prozess unter Energieerhaltung stattfindet, sind die Abstände zu den so erzeugten Seitenbändern exakt gleich. Durch weitere Wechselwirkung der Seitenbänder untereinander und einen lawinenartigen Multiplikations-Prozess können Frequenzkämme mit mehr als 100 einzelnen Linien erzeugt werden. **Abbildung 4a** zeigt eine künstlerische Darstellung der Frequenzkammerzeugung in einem Mikrotoroid. Im Gegensatz zu herkömmlichen Frequenzkammgeneratoren gehört die Linie des Pumplasers zu den Frequenzkammlinien.

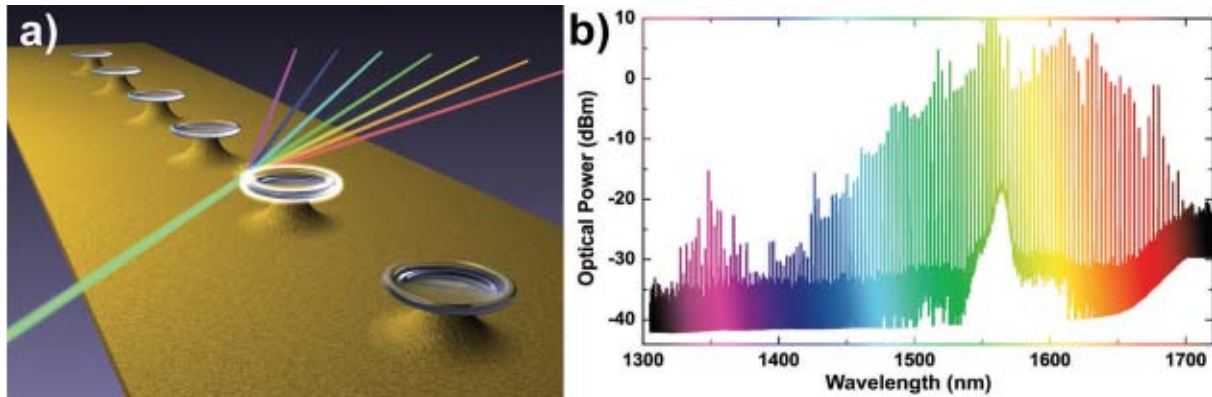


Abb. 4: a) Künstlerische Darstellung der Frequenzkammerzeugung in einem Mikrotoroid. Von der linken Bildhälfte kommend wird Laserlicht (im Bild grün dargestellt) in den Resonator eingekoppelt. Durch nichtlineare Effekte im Mikrotoroid wird ein Frequenzkamm aus verschiedenfarbigen Laserlinien erzeugt. **(b)** zeigt das im Resonator erzeugte optische Spektrum. Das dargestellte (Optische Leistung (power) in Abhängigkeit von der Wellenlänge (wave length)) Spektrum wurde im infraroten Lichtbereich erzeugt und ist für das menschliche Auge unsichtbar. Der so erzeugte Frequenzkamm besteht aus mehr als 130 einzelnen Linien.

Urheber: Max-Planck-Institut für Quantenoptik

Die Äquidistanz der Linien des neuartigen Frequenzkammes wird durch einen Vergleich mit einem herkömmlichen Frequenzkamm nachgewiesen. Hierzu werden die beiden optischen Frequenzkämme räumlich überlagert. Die entstehenden Schwebungsfrequenzen liegen im Radiobereich und können mit elektronischen Frequenzzählern mit hoher Genauigkeit bestimmt werden. Dabei ergab sich, dass die Abstände zwischen den einzelnen Kammkomponenten um höchstens 1,4 Milli-Hertz (0,0014 Hz) voneinander abweichen. Bei einer optischen Pumpfrequenz von etwa 200 Terahertz ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$) entspricht dies einer relativen Abweichung von weniger als 10^{-17} .

Eine weitere Besonderheit des mit dem Mikrotoroid erzeugten Frequenzkammes ist der vergleichsweise große Abstand zwischen den einzelnen „Zacken“, also Kammkomponenten. Üblicherweise liegt der Frequenzabstand bei modengekoppelten Lasern im Bereich von einigen hundert Megahertz (10^8 Hz). Wegen der geringen Ausmaße des Mikrotoroids vergrößert sich der freie Spektralbereich zwischen den Kammlinien auf etwa 100 Gigahertz ($1 \text{ GHz} = 10^9 \text{ Hz}$) bis zu mehr als einem Terahertz, abhängig vom Durchmesser des verwendeten Toroids. Der große Abstand zwischen den einzelnen Moden erlaubt eine Reihe von neuen Anwendungen für Frequenzkämme. So ist der Linienabstand groß genug, um ihn mit optischen Spektrometern aufzulösen, was im Umkehrschluss bedeutet, dass Spektrometer mit Hilfe der bekannten Frequenzen des Kamms extrem genau kalibriert werden können. Andererseits ist der Modenabstand von etwa 100 Gigahertz und die vergleichsweise hohe Leistung pro Kammkomponente (mehr als 1 Milliwatt kann problemlos erreicht werden) ideal für die nächste Generation von Hochgeschwindigkeits-Telekommunikationsgeräten geeignet. Hier könnte ein einzelner Mikrotoroid mehr als 100 Laserquellen ersetzen

Literaturhinweise

- [1] Armani, D. K., T. J. Kippenberg, S. M. Spillane, and K. J. Vahala
Ultra-high-Q toroid microcavity on a chip
Nature **421**, 925–928 (2003).
- [2] Braginsky, V. B.
Measurement of Weak Forces in Physics Experiments
University of Chicago Press, Chicago, 1977
- [3] Dorsel, A., J. D. McCullen, P. Meystre, E. Vignes, and H. Walther
Optical Bistability and Mirror Confinement Induced by Radiation Pressure
Physical Review Letters **51**, 1550–1553 (1983)
- [4] Kippenberg, T. J., H. Rokhsari, T. Carmon, A. Scherer, and K. J. Vahala,
Analysis of Radiation-Pressure Induced Mechanical Oscillation of an Optical Microcavity
Physical Review Letters **95**, 033901 (2005).
- [5] Schliesser, R. Ma. A., P. Del'Haye, A. Dabirian, G. Anetsberger, and T. J. Kippenberg
Radiation-pressure-driven vibrational modes in ultrahigh-Q silica microspheres,
Optics Letters **32**, 2200–2202 (2007)
- [6] Schliesser, A, P. Del'Haye, N. Nooshi, K. J. Vahala, and T. J. Kippenberg,
Radiation pressure cooling of a micromechanical oscillator using dynamical backaction
Physical Review Letters **97**, 243905 (2006)
- [7] Wilson-Rae, I., N. Nooshi, W. Zwerger, and T. J. Kippenberg,
Theory of Ground State Cooling of a Mechanical Oscillator Using Dynamical Backaction
Physical Review Letters **99**, 093902 (200)
- [8] Schliesser, A., R. Rivière, G. Anetsberger, O. Arcizet, and T. J. Kippenberg
Resolved Sideband Cooling of a Mechanical Oscillator
arXiv:0709.4036 (2007)
- [9] Udem, T., R. Holzwarth, and T. W. Hansch,
Optical frequency metrology
Nature **416**, 233–237 (2002)
- [10] Del Haye, P., A. Schliesser, O. Arcizet, T. Wilken, R. Holzwarth, and T. J. Kippenberg
Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator
Nature **450**, 1214–1217 (2007)