

■ Spektrometer der Kompaktklasse

Ein Flüstergalerie-Resonator ermöglicht es, hochauflösende Spektroskopie im Infraroten in einer sehr kompakten Bauform zu betreiben.

Spektroskopische Verfahren haben schon lange einen Siegeszug angetreten – nicht nur in der Grundlagenforschung, sondern auch in der Analytik. Ob es sich um Untersuchungen in der Umweltphysik, Biologie, Medizin oder den Werkstoffwissenschaften handelt: Die Absorption von Licht abhängig von der Wellenlänge verrät viel über die Eigenschaften und Zusammensetzung der untersuchten Medien. Die hochauflösende Spektroskopie ermöglicht es, selbst kleinste Unterschiede in der Zusammensetzung von Materialien oder in einem ablaufenden Prozess zu erkennen. Hierfür sind verstimmbare schmalbandige Lichtquellen nötig. Verstimmbare Laserquellen führten in letzter Zeit zu großen Fortschritten. Oftmals sind aber größere Verstimmbereiche nötig, als Laserquellen alleine erreichen können.

Eine Alternative bieten verstimmbare optisch parametrische Oszillatoren (OPO). Bei einem OPO führt die nichtlineare Antwort eines optischen Materials auf ein Pumplicht zu zwei Lichtstrahlen größerer Wellenlänge. Dazu ist ähnlich wie bei einem Laser ein Resonator nötig, der das nichtlineare optische Material umgibt. Übersteigt die Pumpleistung einen Schwellwert, treten Oszillationen auf. Aufgrund der Energieerhaltung sind die Wellenlängen der erzeugten Lichtstrahlen größer als die der Pumpe. Der Prozess benötigt dabei eine Phasenanpassung der Oszillationen.^{#)}

Die hochauflösende Spektroskopie erfordert eine geringe Bandbreite, die mit einer großen Pulslänge einhergeht – der Idealfall wäre Dauerstrichbetrieb. Dazu sind aber hohe Pumpleistungen nötig, welche die nichtlinearen optischen Materialien thermisch schädigen können und kompakte Quellen verhindern. Bei gepulsten Systemen bleibt die Pumpleistung dagegen moderat. Als optische nichtlineare Kristalle kommen meist Lithiumniobat oder

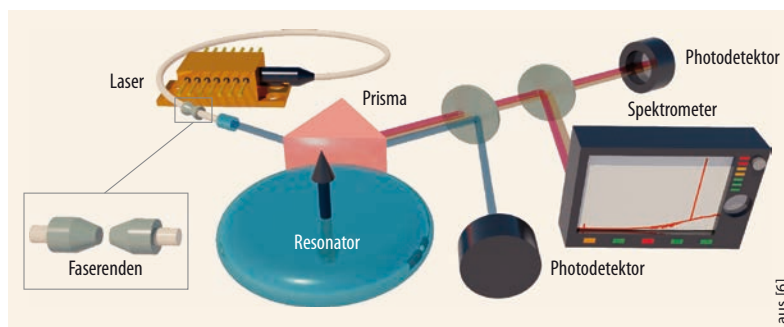


Abb. 1 Der Flüstergalerie-Resonator (blau) ist das Herzstück eines kompakten hochauflösenden Spektrometrieaufbaus. Die Pumpleistung des Lasers lässt sich durch den Abstand der Faserenden variieren. Das Prisma (rot) koppelt das Licht

in den Resonator ein. Die Photodetektoren und das Spektrometer dienen der Analyse der erzeugten Lichtstrahlen. Der Aufbau ist nicht maßstabsgerecht dargestellt.

Kaliumtitanylphosphat zum Einsatz. Diese absorbieren aber Licht mit Wellenlängen von $5\ \mu\text{m}$ und mehr sehr stark – also in einem Bereich, der für die hochauflösende Spektroskopie sehr interessant ist. Die Absorption einer Vielzahl von Vibrationsmoden ergeben zusammen einen charakteristischen Fingerabdruck, der zur Identifikation der Moleküle dienen kann. Als Alternative bieten sich nichtlineare Kristalle wie Silbergalliumselenid an. Bereits existierende gepulste OPO-Systeme, die mit kurzen Pulsen arbeiten, eignen sich aufgrund der großen Bandbreite nicht für hochauflösende Messungen. Daher schafft eine neuartige Technologie Abhilfe, die in den letzten Jahren entwickelt wurde: optisch parametrische Oszillatoren in nichtlinearen kristallinen Flüstergalerie-Resonatoren [1–3].

Aus der Akustik in die Optik

Flüstergalerien führen Schallwellen sehr effizient durch Reflexion innerhalb einer runden Struktur, wie es z. B. in der Galerie der St. Pauls-Kathedrale in London der Fall ist. Nach Studien in der Akustik folgten Untersuchungen, ob auch Radiowellen und Licht dieses Verhalten zeigen. Im Fall von Licht ist es möglich, die Strahlung durch interne Totalreflexion innerhalb eines rund geformten Dielektrikums zu füh-

ren. Voraussetzung dafür ist eine glatte Oberfläche, die beispielsweise durch geeignete Diamantdreh- und polierverfahren möglich ist. Im Allgemeinen beschränkt die Absorption in den Kristallen die Güte der nichtlinearen Resonatoren, die mit $Q = 10^8$ sehr hohe Werte erreichen kann.

Für einen effizienten OPO-Betrieb in diesen nichtlinearen Flüstergalerie-Resonatoren ist eine Phasenanpassung des Pumplichts und der zwei emittierten, niedrigenergetischen Lichtstrahlen wichtig. In der runden Struktur der Flüstergalerie existieren Eigenmoden als Lösungen der Maxwell-Gleichungen, die von der geometrischen Form des Resonators abhängen. Das dielektrische Material gibt durch seine Form die Randbedingungen vor, unter denen sich elektromagnetische Felder ausbreiten können. Die Lösungen der Maxwell-Gleichungen ähneln den mathematischen Lösungen der Wellenfunktionen in einem Wasserstoffatom. In der Tat entspricht ähnlich wie bei Atomübergängen die Phasenanpassung in den Flüstergalerie-Resonatoren einer Drehimpulserhaltung der Moden.

Die Führung des Lichts durch interne Totalreflexion hängt kaum von der Wellenlänge ab und erlaubt immer eine vollständige Reflexion, solange der Resonator transparent

^{#)} Der Prozess gleicht dem Anschwingen einer Schaukel: Ein Parameter – bei der Schaukel die effektive Länge des Pendels – wird oszillatorisch mit der richtigen Phasenlage angepasst, sodass sich eine Schwingung aufbauen kann.

ist. Im Gegensatz zu einem Fabry-Pérot-Resonator, dessen nutzbarer Wellenlängenbereich von der Beschichtung der Spiegel abhängt, lassen sich daher mit Totalreflexion Eigenmoden des Resonators für den gesamten Bereich finden. Der OPO-Betrieb findet unter dreifacher Resonanz aller beteiligten Lichtmoden statt. Zusammen mit den hohen Güten in den Flüstergalerie-Resonatoren ergeben sich außergewöhnlich niedrige Schwellwerte für das Pumplicht [1]. Die Führung durch Totalreflexion und die besondere Phasenanpassung ermöglichen eine sehr gute Verstimmbarkeit über einen sehr großen Wellenlängenbereich. Für die Atomspektroskopie im nahen Infrarotbereich gibt es bereits darauf basierende schmalbandige verstimmbare Quellen [4, 5], die sich auch als Einzelphotonenquellen in der Quantenoptik betreiben lassen [4].

Die interne Totalreflexion und der niedrige Schwellwert des

Pumplichts in Flüstergalerie-Resonatoren ermöglichten einer Gruppe aus Freiburg einen Durchbruch im Betrieb von OPOs jenseits einer Wellenlänge von $5,5 \mu\text{m}$, die sich für die hochauflösende Spektroskopie eignet [6].⁺⁾ Sie benutzten einen Silbergalliumselenid-Kristall im Dauerstrichbetrieb bei moderaten Pumpleistungen und verstimmten ihn gezielt über einen weiten Bereich. Eine geeignete Wahl der Pumpwellenlänge und das Anpassen der Brechungsindizes durch leichte Temperaturänderungen erlaubte es, den OPO über einen weiten Verstimmbereich bei Wellenlängen von $5,5 \mu\text{m}$ und mehr zu betreiben.

Darüber hinaus passten die Forscher den Bereich der Pumpwellenlängen so an, dass ein verstimmbarer „Distributed-Feedback“-Laser als Pumpplaser zum Einsatz kommen konnte. Diese Laserdioden sind gleichzeitig kompakt und preisgünstig. Zusammen mit dem millimeterkleinen Resonator re-

sultierte ein sehr kompakter OPO, der nur eine geringe Leistung benötigt (Abb. 1). Experimentell gelang es, den verstimmbaren Bereich bis $8 \mu\text{m}$ nachzuweisen, während Simulationen Bereiche über $10 \mu\text{m}$ hinaus vorhersagen.

Diese neue weit verstimmbare Quelle kombiniert eine hohe Auflösung mit einer sehr kompakten Bauform. Ihre Anwendungen gehen weit über den Laborbereich hinaus bis hin zu portablen Quellen für die Lebenswissenschaften.

Christoph Marquardt

- [1] J. Füst et al., Phys. Rev. Lett. **105**, 263904 (2010)
- [2] D. V. Strekalov et al., J. Opt. **18**, 123002 (2016)
- [3] I. Breunig, Laser Photon. Rev. **10**, 569 (2016)
- [4] G. Schunk et al., Optica **2**, 773 (2015)
- [5] C. S. Werner et al., Opt. Lett. **40**, 772 (2015)
- [6] S.-K. Meisenheimer et al., Optica **4**, 189 (2017)

⁺⁾ Die Erstautorin der Veröffentlichung, Frau Sarah-Katharina Meisenheimer, ist am 11. Januar 2017 plötzlich und völlig überraschend verstorben.

Priv.-Doz. Dr. Christoph Marquardt,
Max-Planck-Institut
für die Physik des
Lichts, Staudtstr. 2,
91058 Erlangen