

## Weiteres zur Quanten-Optomechanik

NIKOLAI KIESEL | WITLIF WIECZOREK | SIMON GRÖBLACHER | MARKUS ASPELMEYER

Dieses Dokument ist eine Ergänzung zum Artikel „Licht macht Druck“ in **Physik in unserer Zeit**, 42. Jahrgang 2011, Nr. 6, S. 276.

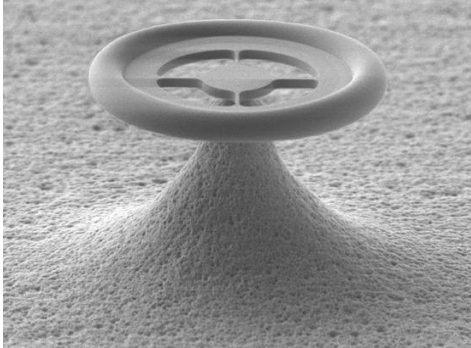
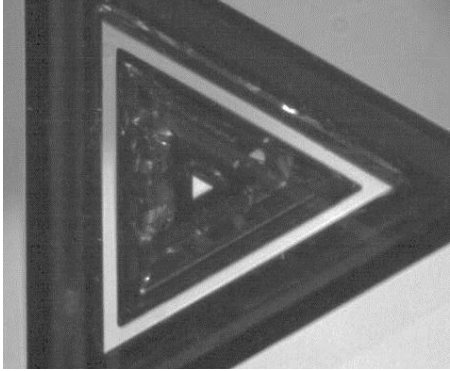
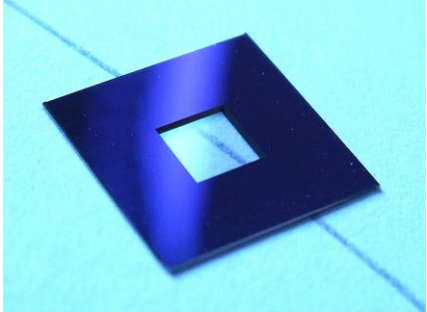
### Geschichte der Optomechanik

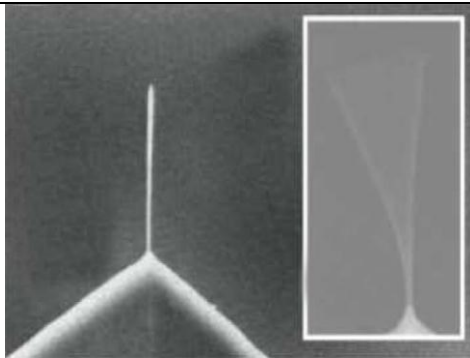
- 1619 Johannes Kepler erklärt in seinem Werk „De cometis“ die Ablenkung von Kometenschweiften weg von der Sonne durch eine von Licht vermittelte mechanische Kraft (Strahlungsdruck).
- 1873 James Clerk Maxwell sagt mit Hilfe der Maxwellschen Gleichungen den Strahlungsdruck voraus.
- 1876 Adolfo Bartoli leitet die Existenz des Strahlungsdrucks aus thermodynamischen Überlegungen ab.
- 1901 Pjotr Nikolajewitsch Lebedev weist den Strahlungsdruck experimentell nach, in seinen „Untersuchungen über die Druckkraft des Lichts“. Unabhängig davon zeigen dies auch die Experimente von Ernest Fox Nichols und Gordon Ferrie Hull: „A preliminary communication on the pressure of heat and light radiation“.
- 1909 Albert Einstein zeigt anhand eines Gedankenexperiments mit Strahlungsdruck, dass Licht sowohl Wellen- als auch Teilchencharakter haben muss.
- 1933 Otto Frisch zeigt experimentell, dass Atome, die Photonen emittieren, einen Rückstoß erfahren. Dies war die Geburtsstunde der Laserkühlung von Atomen.
- 1970 Arthur Ashkin beschleunigt und fängt makroskopische Teilchen mit Hilfe von Strahlungsdruck. Die „optische Pinzette“ ist erfunden.
- 1970 Vladimir Braginski, Farid Ya Khalili und weitere Physiker zeigen auf, dass mechanische Eigenschaften mit Hilfe von retardierten Strahlungsdruckkräften manipuliert werden können.
- 1983 Strahlungsdruckbasierte Instabilitäten in optischen Resonatoren werden experimentell nachgewiesen.

1990'er-Jahre	Erste Veröffentlichungen nutzen die Analogie zur Quantenoptik und diskutieren explizit die Erzeugung von Quanteneffekten durch Strahlungsdruck in einem optischen Resonator.
1999	Experimentell wird das Kühlen einer Bewegungsmode eines mechanischen Spiegels durch Strahlungsdruck mit Hilfe aktiver Rückkopplung gezeigt.
2003	Experimentelle Demonstration der optischen Feder.
2004	Experimentelle Demonstration eines Analogons zum Laserkühlen an einem mikromechanischen Oszillator mit photothermischen Kräften.
2005	Experimentelle Demonstration der optischen Kraftmaschine („parametrisches Treiben“).
2006	Experimentelle Demonstrationen der mechanischen Laserkühlung mit Strahlungsdruck in optomechanischen Resonatoren.
2010	Experimentelle Beobachtung eines Gigahertz- mikromechanischen Oszillators im Grundzustand.
2011	Laserkühlung mikro- und nanomechanischer Systeme in den Grundzustand.

### Optomechanische Systeme

	<p>Gravitationswelleninterferometer verwenden Spiegel mit Massen im Kilogramm-Bereich, um über große Distanzen extrem genaue Längenmessungen durchzuführen. Diese Spiegel sind selbst harmonische Oszillatoren und unterliegen optomechanischer Wechselwirkung.</p> <p><a href="#">Leibniz Universität Hannover, Deutschland</a></p>
	<p>Ein Siliziumnitrid-Kantilever als mechanischer Oszillator – darauf ein kreisförmiger Spiegel. Er oszilliert mit einer Resonanzfrequenz von ca. 1 MHz auf und ab. Der Spiegel bildet einen der beiden Spiegel eines Fabry-Perót-Resonators und vermittelt so die optomechanische Wechselwirkung.</p> <p><a href="#">VCQ, Universität Wien, Österreich</a></p>

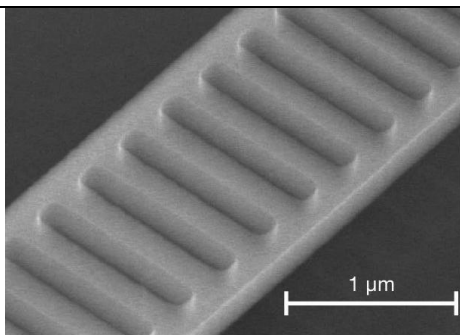
 <p><a href="#">Science 330, 1520 (2010)</a></p>	<p>Ein Silikatoroid-Mikroresonator als optomechanisches System. Schwingungen des Toroids modifizieren das Licht, das um den Toroiden propagiert – und umgekehrt.</p> <p><a href="#">MPI für Quantenoptik, Garching, Deutschland.</a> <a href="#">EPFL, Lausanne, Schweiz</a></p>
 <p><a href="#">Comptes Rendus Physique 1, 1 (2011)</a></p>	<p>Ein Mikropfeiler als mechanischer Oszillator hoher Qualität. Der Pfeiler wird durch eine Membran in seiner Mitte festgehalten. Die Kompressionsmode des Pfeilers führt zu keiner Bewegung an der Membran und ist damit von der Umgebung isoliert.</p> <p><a href="#">CNRS Paris, Frankreich</a></p>
 <p><a href="#">Nature 452, 72 (2008)</a></p>	<p>Siliziumnitrid-Membranen sind mechanische Oszillatoren hoher Güte. Als dispersives Element in einem optischen Fabry-Pérot-Resonator führt die Bewegung der Membran zu einer Modifikation der optischen Resonatorlänge, womit es zu einer optomechanischen Kopplung kommt.</p> <p><a href="#">Yale University, USA</a> <a href="#">Università degli Studi di Camerino, Italien</a></p>



[Optics Express 17, 12813 \(2009\)](#)

Auch Kohlenstoff-Nanostäbchen können in einen optischen Resonator eingebracht werden und als dispersives Element dienen. Diese Nanostäbchen zeichnen sich grundsätzlich durch eine hohe mechanische Qualität aus.

[LMU München, Deutschland](#)



[Nature 462, 78 \(2009\)](#)

Photonische Kristalle sind Beispiele für optomechanische Strukturen, die auf Lichtwellenleitung basieren. Hier können sehr große Kräfte mit sehr kleinen Strukturen kombiniert werden, was zu einer unübertroffenen Wechselwirkung zwischen Licht und Mechanik führt.

[California Institute of Technology, USA](#)