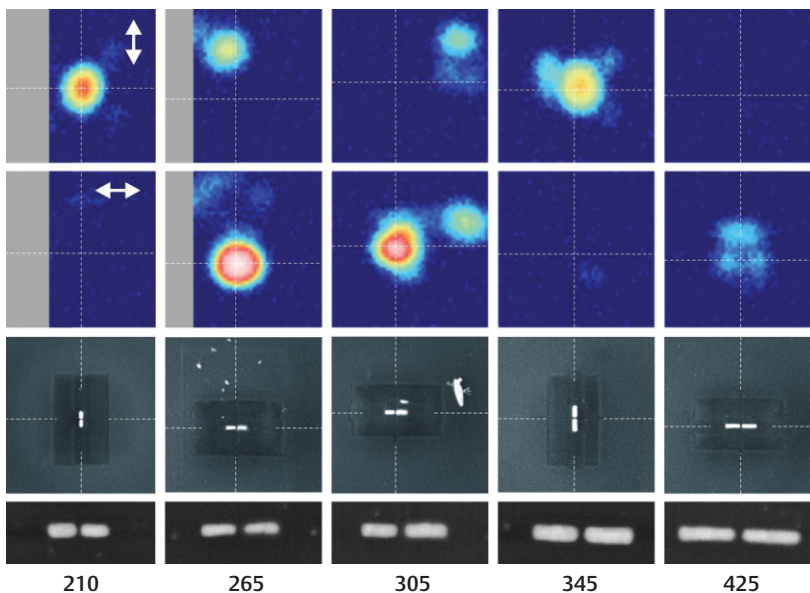


## NANOSTRUKTUREN

## Optische Antennen

Die heutige Telekommunikation basiert großteils auf der effizienten Erzeugung und dem Empfang von elektromagnetischen Wellen. Die relevanten Wellenlängen liegen dabei im Bereich von Kilometern beim Langwellenrundfunk bis hinunter zu wenigen Zentimetern für die mobile Kommunikation. Physikern aus Basel und Lausanne gelang es kürzlich, Antennen für Licht herzustellen.



**Abb. 1** Nichtlineare Emission von optischen Dipolantennen verschiedener Länge und Orientierung. Oben (blau): Anregung mit Polarisation parallel und senkrecht zur Antenne (Pfeile). Unten (grau): Rasterelektronenmikroskop (REM)-Aufnahmen der Antennen (Übersichtsbilder und Vergrößerungen). Die untere Zahlenreihe gibt die Länge der Antenne in Nanometern an. Dimension der quadratischen Felder ist  $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ .

Zur Erzeugung elektromagnetischer Strahlung wird typischerweise eine hochfrequente Wechselspannung an den Spalt zwischen den Stäben einer Dipolantenne angelegt. Die Spannung erzeugt dann in den Antennenarmen Wechselströme, also beschleunigte Ladungen, die elektromagnetische Wellen abstrahlen. Ist die Antennenlänge kleiner als eine Wellenlänge, so ist die Abstrahlung besonders effizient, da die Ströme dann in Phase schwingen.

Beim Empfang elektromagnetischer Wellen wird die Antennenlänge gerade so gewählt, dass die Stromamplitude am Ort des Spalts maximal wird. In diesem Fall ist eine Gesamtlänge ideal, die etwa der halben Wellenlänge der elektromagnetischen

Strahlung entspricht. Über dem Spalt baut sich nämlich genau dann die maximal mögliche Spannung auf.

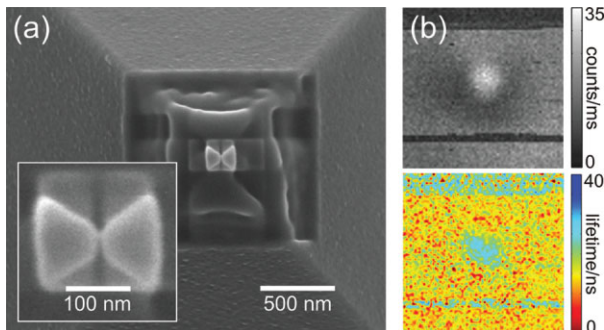
Antennen für Licht versprechen eine Vielzahl von Anwendungen, sind aber wegen der geringen Abmessungen schwer realisierbar. Der Spannungsabfall über dem Antennenzwischenraum entspricht bei optischen Frequenzen einem stark überhöhten und auf Nanometer-Dimensionen lokalisierten Lichtfeld. Damit lässt sich beispielsweise hoch auflösende optische (Rastersonden-) Spektroskopie realisieren, die aufgrund der Verwendung von Antennen sogar die schwachen Signale von einzelnen Molekülen oder Quantenpunkten messbar macht. Die extreme Feldkonzentration im Spalt ließe sich

zum Einfangen von kleinen Partikeln und deren Beobachtung und Manipulation verwenden. Auch als Koppel-elemente zwischen freien Lichtstrahlen und hoch integrierten, plasmonischen Wellenleitern werden optische Antennen in Zukunft wichtige Dienste leisten.

Nicht zuletzt können diese Bauteile auch zur Verbesserung der Absorptions- und Emissionseigenschaften von Atomen, Molekülen und Quantenpunkten Verwendung finden. Diese elementaren Emittierer sind im Vergleich zur relevanten Wellenlänge viel zu klein, um Licht effizient zu absorbieren oder abzustrahlen. Die Absorptions- und Emissionsraten von einzelnen Quantenemittern sind daher relativ gering. Durch Positionierung eines einzelnen Quantenemitters im Spalt einer optischen Antenne ist es möglich, einen Super-Absorber oder Super-Emitter mit erheblich erhöhten Übergangsraten und gerichteter Emission zu konstruieren. Diese Eigenschaften sind von erheblicher Bedeutung für die Erzeugung einzelner Photonen wie sie für die Quanten-Informationsverarbeitung benötigt werden.

In unseren Labors gelang es kürzlich, Antennen für Licht herzustellen und deren Funktion zu demonstrieren [1, 2]. Auf einem Glassubstrat wurden Dipolantennen aus Gold mit Hilfe eines fokussierten Ionenstrahls hergestellt, deren Länge entsprechend der Wellenlänge des verwendeten Lichts lediglich 200 bis 400 nm betrug. Der Spalt zwischen den Antennenarmen konnte auf etwa 20 nm begrenzt werden (Abbildung 1).

Um die Empfangseigenschaften zu testen, wurden die Antennen mit rotem Licht (Laserpulse von 8ps Dauer, Wellenlänge 830 nm) bestrahlt und die starke Feldüberhöhung, das heißt die Spannung über dem Spalt, anhand von nichtlinearen optischen Effekten nachgewiesen [1]. Diese machen sich, angeregt durch Mehrphotonenprozesse bei hoher Intensität, in einer spektral sehr breiten, gegenüber der Anregungswellenlänge



**Abb. 2** REM-Aufnahmen des Super-Emitters a) sowie Emission b) und Lebenszeit des angeregten Zustands als Funktion der Antennenposition. In der Mitte der Abbildungen ist erhöhte Emission und verkürzte Lebenszeit deutlich sichtbar.

grün verschobenen Emission bemerkbar. Diese Emission war am stärksten für Antennen mit einer Gesamtlänge von etwa 260 nm (Abbildung 1, 2. Spalte). Bei dieser Länge treffen wir die fundamentale Halbwellenresonanz der optischen Dipolantenne. Sie ist signifikant kürzer als die halbe Wellenlänge des eingestrahnten Lichts. Dies lässt sich mit den dielektrischen Eigenschaften des Substrats und der endlichen Leitfähigkeit von

Gold bei optischen Frequenzen erklären. Ein Kontrollversuch mit Antennen ohne Spalt zeigte keine nichtlinearen Effekte, was die Existenz der Feldüberhöhung und -konzentration zwischen den Antennenarmen eindeutig belegt.

Um die Sendeeigenschaften von optischen Antennen zu untersuchen, bietet es sich an, einen einzelnen Quantenemitter in den Antennenspalt zu bringen. Zu diesem Zweck haben wir eine Schmetterlingsantenne für Licht auf der Spitze eines Kraftmikroskops hergestellt (Abbildung 2a). Hierfür wurde die Antennenspitze mit Hilfe eines Kraftmikroskops über einen einzelnen Quantenemitter geführt und dabei die Veränderung der Abstrahlungseigenschaften des Quantenpunkts beobachtet. Die Ergebnisse bestätigen unsere Erwartungen: Bei Annäherung an den Antennenspalt stieg die Emissionsrate des Emitters stark an. Gleichzeitig sank die Lebenszeit seines angeregten Zustands (Abbildung 2b). Damit wurde erstmals die

Kopplung eines Quantenpunkts an eine Antenne und damit die praktische Realisierbarkeit eines antennenbasierten Super-Emitters demonstriert [2].

Unsere Experimente illustrieren das Potenzial von präzise hergestellten Nanostrukturen für die Manipulation von Licht auf der Nanometerskala. Eine verbesserte Strukturierung verspricht noch wesentliche Steigerungsmöglichkeiten. So hängt beispielsweise die Intensität im Spalt quadratisch von dessen inverser Breite ab. Eine Reduktion um einen Faktor zehn hätte somit eine um einen Faktor hundert erhöhte Intensität im Spalt zur Folge.

**Literatur**

- [1] P. Mühlischlegel et al., Science **2005**, 308, 1607.
- [2] J. N. Farahani et al., Phys. Rev. Lett. **2005**, 95, 017402.

*Bert Hecht, Hans-Jürgen Eisler, Dieter W. Pohl, Universität Basel; Olivier J.F. Martin, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne*

**PHYSICS NEWS**

**Neutrinos aus dem Innern der Erde** hat ein japanisch-amerikanisches Team mit dem Kamland-Detektor (Kamioka Liquid-scintillator Anti-Neutrino Detector) nachgewiesen. Im Laufe von zwei Jahren registrierten sie etwa 25 Elektron-Antineutrinos, die beim Zerfall von Uran und Thorium entstehen. Daraus berechneten die Forscher einen Beitrag zur gesamten Erdwärme zwischen 35 und 50 %. Dieser Bereich ist wegen der geringen Zahl nachgewiesener Neutrinos noch sehr ungenau. Die Methode lässt sich zukünftig aber noch erheblich verbessern (T. Araki et al., Nature **2005**, 436, 499, vgl. E. Huenges, Physik in unserer Zeit **2004**, 35, 282).

+++

**Die internationale Fusionsanlage ITER wird in Cadarache, Südfrankreich, gebaut.** Diese Entscheidung fiel nach zweijährigen Verhandlungen. Zuvor hatte Japan sein Standortangebot Rokkasho zurückgezogen. Im Gegenzug wurden Japan Vorzugsbedingungen eingeräumt: An die

japanische Industrie gehen Fertigungsaufträge im Umfang von 20 % der Kosten, wobei die Hälfte aus dem europäischen Kostenbeitrag finanziert wird. Auch 20 % der wissenschaftlichen Mitarbeiter kann Japan stellen ([www.ipp.mpg.de/ippcms/de/presse/pi/09\\_05\\_pi.html](http://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/presse/pi/09_05_pi.html)).

+++

**Die Lamb-Verschiebung des Grundzustandes von  $U^{91+}$  mit bisher unerreichter Genauigkeit** hat eine internationale Gruppe um Thomas Stöhlker von der GSI in Darmstadt gemessen. Demnach beträgt sie  $(460,2 \pm 4,6)$  eV, in hervorragender Übereinstimmung mit der Vorhersage der Quantenelektrodynamik. Die totale Bindungsenergie des Grundzustands beträgt 131 816 keV. Um die jüngsten QED-Rechnungen zu überprüfen, ist eine Genauigkeit von etwa 1 eV nötig (A. Gumberidze et al., Phys. Rev. Lett. **2005**, 94, 223001, [www.ap.gsi.de/Thomas/ap\\_html\\_research/gsi-qed\\_2.htm](http://www.ap.gsi.de/Thomas/ap_html_research/gsi-qed_2.htm)).

+++

**Der Staub im E-Ring des Saturn stammt von dessen Mond Enceladus.** Obwohl der Trabant einen Durchmesser von nur 500 km besitzt, gibt es an seinem Südpol offenbar Kryovulkanismus, durch den Eisteilchen aus dem Boden austreten und in den E-Ring gelangen. Die Messung, an der Physiker des Max-Planck-Instituts für Kernphysik in Heidelberg beteiligt waren, gelang mit der Raumsonde Cassini ([www.mpg.de/bilderBerichteDokumente/dokumentation/pressemitteilungen/2005/pressemitteilung20050805](http://www.mpg.de/bilderBerichteDokumente/dokumentation/pressemitteilungen/2005/pressemitteilung20050805)).

+++

**Das Landegebiet der Raumsonde Huygens auf dem Saturnmond Titan liegt in Form eines Reliefs vor.**

Das 1,5 mal 3,5 km<sup>2</sup> große Terrain besitzt Höhenunterschiede bis zu 200 m ([www.esa.int/SPECIALS/Cassini-Huygens/SEM08G808BE\\_0.html](http://www.esa.int/SPECIALS/Cassini-Huygens/SEM08G808BE_0.html)).