

■ Plasmonen – pädagogisch wertvoll

Ein Doppelspaltexperiment mit Oberflächenplasmonen offenbart die starke Analogie zwischen der Ausbreitung von Licht und der von Oberflächenplasmonen.

Eines der bekanntesten klassischen Experimente zum Nachweis der Wellennatur von Licht ist das von Thomas Young im Jahre 1802 durchgeführte Doppelspaltexperiment. Dabei interferiert das durch die beiden Spalte tretende kohärente Licht und führt zu dem dafür typischen Streifenmuster der räumlichen Intensitätsverteilung des Lichtes. Rashid Zia und Mark L. Brongersma von der Stanford University haben dieses klassische Experiment nun auch in der Plasmonen-Optik realisiert [1]. Aus dem Alltag ist das Phänomen der Plasmonen vor allem bekannt von prächtigen Kirchenfenstern, wo sie für das intensive Farbenspiel sorgen.¹⁾

Die Plasmonen-Optik basiert auf sog. Oberflächen-Plasmon-Polaritonen (SPPs) – kurz Oberflächenplasmonen genannt. Dabei handelt es sich um Oszillationen des Elektronengases in Metallen, die sich entlang der Oberfläche wellenartig ausbreiten. Die Frequenz dieser Oszillationen liegt im sichtbaren bzw. nahen infraroten Spektralbereich. Außerhalb des Metalls, also im angrenzenden Dielektrikum, sind diese Elektronenoszillationen von einem elektromagnetischen Feld begleitet, das mit der Frequenz sichtbaren Lichts oszilliert. Oberflächenplasmonen können also als hybride Zustände von Elektronenoszillationen im Metall (dort als hochfrequenter elektrischer Strom) und elektromagnetischen Feldern außerhalb des Metalls (mit der Frequenz von Licht) verstanden werden. Einerseits sind Oberflächenplasmonen an die Metalloberfläche gebunden, andererseits breiten sie sich entlang dieser Oberfläche mit nahezu Lichtgeschwindigkeit aus. Diese Eigenschaften machen Oberflächenplasmonen zu ausgesprochen interessanten Studienobjekten: Im Gegensatz zu Licht, das sich in drei Dimensionen ausbreitet, sind Oberflächenplasmonen – wie der Name schon sagt – an eine Oberfläche und somit an eine materielle

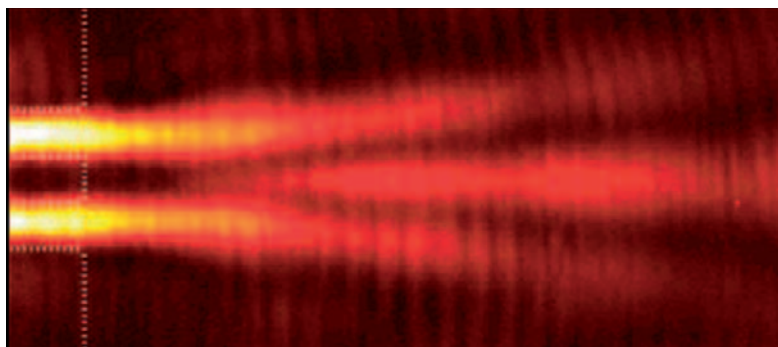


Abb. 1 Die optische Nahfeldaufnahme, aufgenommen mit einem Rasternahfeldmikroskop, zeigt die Ausbreitung, Beugung und Interferenz der Ober-

flächenplasmonen im Doppelspalt-Experiment. Die horizontale Ausdehnung beträgt $25\ \mu\text{m}$, die vertikale $15\ \mu\text{m}$.

Struktur gebunden. Da sich die Ausbreitung der Plasmonen durch eine geeignete Strukturierung der Metalloberfläche manipulieren lässt, sind alle Voraussetzungen für eine zweidimensionale „optische“ Technologie gegeben.

Ein gewisses Problem besteht allerdings darin, dass sich Oberflächenplasmonen nicht einfach durch Einstrahlen von Licht auf eine glatte Metalloberfläche anregen lassen. Denn die Wellenzahlvektoren von Licht und Plasmon stimmen unter keinem Einstrahlwinkel überein. An geometrischen Störstellen der Metalloberfläche, wie z. B. Kanten, Vertiefungen oder Erhebungen, ist zwar das Einkoppeln von Lichtenergie in Oberflächenplasmonen zu einem geringen Prozentsatz möglich. Doch erst durch folgenden Trick gelingt eine Anpassung der Wellenzahlvektoren: Fällt das anregende Licht durch ein Glasprisma auf die Rückseite eines dünnen Metallfilms, so kann durch eine geeignete Kombination von Brechzahl des Glases und Einfallswinkel die Phasengeschwindigkeit des Lichtfeldes an jene des Oberflächenplasmons an der gegenüberliegenden Metall-Luft-Grenzfläche angepasst werden. Mit diesem als „Attenuated Total Reflection“ (ATR) bezeichneten Verfahren lassen sich Kopplungseffizienzen von bis zu 100 Prozent erreichen [2].

In den vergangenen Jahren haben eine Reihe von Arbeiten

die praktische Umsetzung dieses Konzepts einer zweidimensionalen Plasmonen-Optik beschrieben [3, 4]. Das aktuelle Experiment von Zia und Brongersma ist ein besonders eindrucksvolles Beispiel, das in nahezu lehrbuchhafter Klarheit die Analogie zwischen herkömmlicher Optik und Plasmonen-Optik verdeutlicht. Das Plasmonen-Experiment spielt sich nur in zwei Dimensionen ab und unterscheidet sich damit wesentlich vom klassischen Youngschen Doppelspaltexperiment, doch stimmen die Ergebnisse beider Experimente davon abgesehen vollkommen überein.

Abb. 1 zeigt ein optisches Nahfeldbild zweier miteinander interferierender Plasmonen, die links außerhalb des gezeigten Bildausschnitts mittels ATR-Kopplung angeregt wurden. Am linken Bildrand sind zwei helle Streifen zu sehen. Dabei handelt es sich um zwei Goldstreifen mit einer Breite von $2\ \mu\text{m}$. Diese fungieren als Wellenleiter für Oberflächenplasmonen, die Plasmonen von links nach rechts führen und an der Position der senkrechten Punktlinie in eine ausgedehnte Metallfläche speisen. Diese Position entspricht den zwei Spaltblenden im Young-Experiment. Aufgrund von Beugung breiten sich die beiden nunmehr ungeführten Plasmonen divergent aus und beginnen sich schon nach wenigen Mikrometern zu überlagern. Völlig analog zum bekannten Doppelspalt-

1) vgl. Physik Journal, Dezember 2006, S. 52

experiment von Young kommt es zur Interferenz, wie sich an den drei Maxima der Nahfeldintensität in vertikaler Richtung erkennen lässt.

Dieses Experiments hat – wie die Autoren selbst betonen – einen hohen pädagogischen Wert, da es grundlegende Phänomene der Plasmonen-Optik wie Beugung und Interferenz höchst anschaulich demonstriert. Wäre es ein paar Monate früher veröffentlicht worden, hätte es in dem unlängst erschienenen Standardwerk „Plasmonics. Fundamentals and Applications“ [5] sicherlich nicht gefehlt. Das Doppelpaltexperiment mit Plasmonen ist sozusagen ein idealer Einstiegs-

punkt in diesen sich neu entwickelnden Zweig der Optik [2, 6].

Obwohl es in der Plasmonik vorerst darum geht, die theoretischen und experimentellen Grundlagen zu erarbeiten, hat die Suche nach sinnvollen Anwendungen bereits begonnen. Die Führung plasmonischer Moden entlang metallischer Nanostrukturen unterliegt keinem Abbe-Limit und erlaubt es daher, die optische Signalleitung zu miniaturisieren. Damit eröffnen Oberflächenplasmonen der Anwendung vielversprechende Möglichkeiten. So sind sie schon jetzt in der Biosensorik im Einsatz, aber auch die Effizienz von Leuchtdioden können

sie steigern. Darüber hinaus wird diskutiert, ob Plasmonen sich für den Transport optischer Signale in künftigen Computerchips eignen.

Franz Aussenegg und
Harald Ditlbacher

- [1] R. Zia und M. L. Brongersma, *Nature Nanotechnology* **2**, 426 (2007)
- [2] F. Aussenegg und H. Ditlbacher, *Physik in unserer Zeit* **5/2006**, S. 220
- [3] H. Ditlbacher et al., *Appl. Phys. Lett.* **81**, 1762 (2002)
- [4] A. Hohenau et al., *Opt. Lett.* **30**, 893 (2005)
- [5] S. A. Maier, *Plasmonics. Fundamentals and Applications*, Springer, Berlin (2007)
- [6] H. A. Atwater, *Spektrum der Wissenschaft*, Juni 2007, S. 58

Prof. Dr. Franz Aussenegg und Dr. Harald Ditlbacher, Institut für Experimentelle Physik der Karl-Franzens-Universität Graz und Erwin Schrödinger Institut für Nanoforschung, Universitätsplatz 5, A-8010 Graz, Österreich

■ Blitzschnell schalten

Zirkular polarisierte Laserpulse können in Femtosekunden die Magnetisierung umschalten und erlauben damit eine optische Speicherung von Daten.

Seit Jahrzehnten verwenden wir in unseren Computern Festplatten, in denen Daten kodiert als magnetische Bits abgelegt sind. In konventionellen Festplatten lassen sich die magnetischen Bits durch Anlegen kurzer magnetischer Feldpulse schreiben. In magneto-optischen Laufwerken dient dazu eine Kombination von Magnetfeld und Laserpuls. Dabei heizt ein Laserpuls das Medium fast bis auf die Curie-Temperatur. Dadurch reduziert sich lokal die zum Umschalten erforderliche Feldstärke drastisch, sodass ein relativ schwaches Magnetfeld ausreicht, um ein Bit zu schreiben. In beiden Fällen löst das Anlegen eines magnetischen Feldes, das der Richtung der Magnetisierung entgegen gesetzt ist, den eigentlichen Ummagnetisierungsprozess aus.

Die Magnetisierung ist mit dem Drehimpuls der Elektronen verbunden. Kehrt sich die Magnetisierungsrichtung um, so muss aufgrund der Erhaltung des Drehimpulses dieser von einer Quelle zur Verfügung gestellt und transferiert werden. Diese Aufgabe übernimmt das angelegte Magnetfeld, das den Drehimpuls mit einer Rate überträgt, die durch den Präzessionsterm $M \times H$ in der Bewe-

gungsgleichung der Magnetisierung gegeben und damit endlich ist. Dies verleitet zu der Annahme, dass es mit praktikablen Feldstärken (bis zu einigen Tesla) ausgeschlossen ist, Schreibzeiten unterhalb von einigen Pikosekunden zu erreichen.

Allerdings ist es möglich, intensive Lichtblitze mit einer Dauer von wenigen Femtosekunden (fs) in Ultrakurzzeitlasersystemen zu erzeugen. Prinzipiell ist es daher vorstellbar, dass ein solcher Laserpuls die Magnetisierung auch direkt beeinflusst (Abb. 1). In einer Reihe von Experimenten hat eine Gruppe von der Universität Nijmegen in Zusammenarbeit mit Physikern des Ioffe-Instituts, St. Petersburg, zeigen können, dass sich durch Beleuchten einer magnetischen Probe mit zirkular polarisierten fs-Laserpulsen die Magnetisierung direkt auf optischem Weg beeinflussen lässt [1, 2]. So wurde zunächst an magnetischen Isolatoren wie dem Orthoferriten $DyFeO_3$ und dem Garnet $Y_3Fe_5O_{12}$ nachgewiesen, dass ein ultrakurzer Laserpuls mit zirkularer Polarisation die Magnetisierung genau wie ein Magnetfeldpuls anregen kann. Die damit verbundene Magnetisierungsdynamik wurde anhand der Faraday-Rotati-

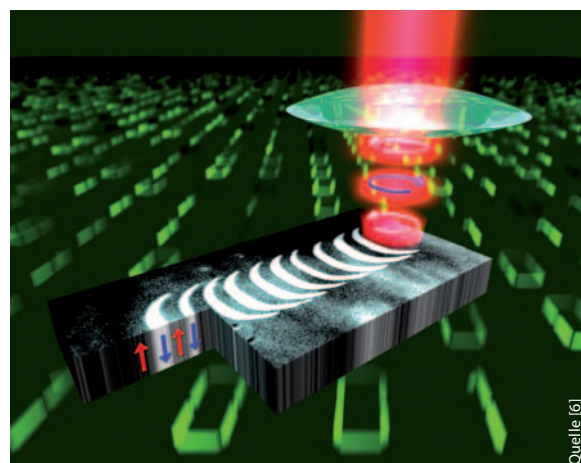


Abb. 1 Schon ein einzelner Femtosekunden-Laserpuls reicht für die optische Datenspeicherung aus. Als Medium wird hier der metallische Ferrimagnet CoFeGd verwendet, der eine senkrechte Magnetisierung aufweist. Die im Bit geschriebene Magnetisierung (up bzw. down) der Probe hängt dabei von der Helizität des anregenden Lichts ab.

on gemessen und manifestiert sich in einer exponentiell gedämpften Oszillation der Magnetisierung (Abb. 2). Eine Umkehr der Helizität des Lichts führt dazu, dass sich die Phase der beobachteten Oszillationen um 180 Grad verschiebt, was einem Vorzeichenwechsel des effektiv induzierten Magnetfelds entspricht.

Das optisch induzierte Magnetfeld ist parallel oder antiparallel zur Ausbreitungsrichtung des