

Aus dunkel mach hell:

Geschickt gestapelte Metall-Nanoteilchen werden plötzlich durchsichtig und führen zu einem Quantensprung in der Nanosensorik

Metalle reflektieren Licht. Das weiß jeder, der morgens in den Badezimmerspiegel schaut und danach den Müsliöffel betrachtet. Metalle können aber auch Licht verschlucken. Dieser Effekt ist weniger bekannt als die Reflektion und wird zum Beispiel benutzt, um farbige Kirchenfenster herzustellen. Die leuchtenden Farben stammen von winzig kleinen Gold- oder Silberteilchen, die dem Glas beigemischt sind. Man spricht von Metall-Nanoteilchen.

Schon die alten Römer verstanden es, die Farben zu ändern, in dem sie die Menge des zugesetzten Metalls und die Dauer des Glasschmelzens variierten. Dabei ändert sich die Größe der Metallnanoteilchen, und ihre Absorption wird vom roten Teil des Lichtspektrums ins Blaue verschoben.

Man sieht also, dass die Zusammensetzung und Größe der Teilchen ihre optischen Eigenschaften deutlich verändern kann. Normalerweise werden die Teilchen jedoch immer das Licht verschlucken oder reflektieren.

Mit dieser jahrhundertealten Erkenntnis haben Forscher der Universitäten Stuttgart und Kaiserslautern jetzt gebrochen (Nature Materials, 5. Juli 2009). Überraschenderweise kann man eine Gruppe von Goldteilchen durchsichtig machen, wenn man drei von ihnen in einer trickreichen Anordnung nebeneinander legt. Das ist umso erstaunlicher, wo doch jedes Teilchen für sich undurchsichtig ist.

Wie kann so etwas geschehen? Dazu muß man sich vergegenwärtigen, was in den einzelnen Metall-Nanoteilchen passiert, wenn Licht auf sie fällt. Das Licht ist eine elektromagnetische Welle und kann die Elektronen im Metall, die normalerweise für die Stromleitung sorgen, in Schwingungen versetzen. Man kann sich das so vorstellen, als stünde man an einer Schaukel auf dem Kinderspielplatz und würde sie anschubsen. Die ganze Energie aus den Armen geht dann zur Schaukel, die nach einiger Zeit aufgrund der Reibung nicht mehr schwingen wird. Das gleiche passiert wenn die Energie vom Licht in das Metallnanoteilchen übergeht und durch Ohm'sche Reibung Wärme erzeugt. Man sagt, dass ein Partikel-Plasmon angeregt und dann gedämpft wird. Dieses Partikel-Plasmon ist eine kollektive Schwingung der Elektronen im Metall, wie das Wasser in einem Glas, das man leicht hin und her bewegt und das sich wieder beruhigt.

Wie kann man jetzt verstehen, wieso eine Gruppe von geschickt nebeneinander angeordneten Nanoteilchen das Licht durchlassen kann? Der entscheidende Trick dabei ist, mehrere Schwingungen zusammenzukoppeln. Das ist so, als wenn man auf dem Kinderspielplatz mehrere Schaukeln mit Gummibändern zusammenbinden würde.

Die Kunst besteht jetzt darin, die Schaukellängen und die verbindenden Gummibänder so auszuwählen, dass die Schaukeln genau entgegengesetzt schwingen. Der Fachmann spricht dann von einer gegenphasigen Schwingung oder auch von destruktiver Interferenz. Dabei kann fast keine Energie an das schwingende System übertragen werden.

Der Trick bei den Metallteilchen, den sich die Forscher ausdachten, besteht darin, zwei winzige Metallstangen von nur 200 Nanometer (Millionstel Millimeter) Länge nebeneinander und eines quer darüber anzuordnen. Der Abstand zwischen den Teilchen beträgt dabei weniger

als 100 Nanometer. Diese hochfeinen Strukturen werden mit modernster Nanotechnologie, sogenannter Elektronenstrahl-Lithographie, von der Doktorandin Na Liu in der Gruppe von Prof. Harald Giessen hergestellt. Die Kaiserslauterer Theoretiker Jürgen Kästel und Michael Fleischhauer haben die Form und den Abstand der Strukturen berechnet und vorhergesagt, was die ideale Anordnung ist. Der physikalische Effekt besteht darin, eine breite Dipolresonanz in dem einzelnen Metalldraht an die schmale Quadrupolresonanz der Doppeldrähte bei gleicher Wellenlänge zu koppeln.

Scheint man Licht auf diese Probe, so tritt das neue Phänomen auf: die gesamte Struktur lässt bei einer ganz bestimmten Wellenlänge das Licht fast komplett durch!

Diese Wellenlänge gehört zu einer bestimmten Farbe, und das Fenster im Lichtspektrum ist sehr schmal innerhalb der breiten plasmonischen Absorption. Die Forscher vergleichen diesen Effekt mit einem klassischen Analogon der sogenannten elektromagnetisch-induzierten Transparenz, die schon länger in Atomen bekannt ist. Der Stuttgarter Atomphysiker Tilman Pfau, der ebenfalls Mitglied des Forscherteams ist, hatte die Gruppe auf diese Idee gebracht.

Was kann man nun mit dieser Entdeckung anfangen? Stefan Maier, Professor für Nanosensorik am berühmten Imperial College in London, schreibt in einem Kommentar in der Zeitschrift Nature Materials, dass das Forscherteam aus Stuttgart und Kaiserslautern, dem auch noch der Doktorand Thomas Weiss und der Diplomand Lutz Langguth angehören, einen revolutionären Durchbruch auf dem Gebiet der plasmonischen Sensorik erzielt habe. Alle früheren Forschergruppen, die kleine Metallteilchen für die Nanosensorik eingesetzt haben, waren bisher durch die sogenannte strahlende Dämpfung limitiert.

Dieser Effekt kommt dadurch zustande, dass die schwingenden Elektronen in den Metallnanoteilchen nicht nur durch die Ohm'sche Reibung gedämpft werden, sondern auch wie eine kleine Antenne elektromagnetische Strahlung aussenden, die ebenfalls zu einem Energieverlust führt. Dies führt dazu, dass die lokalisierten Partikelplasmon-Resonanzen, die man bisher für die Sensorik kleinster Flüssigkeitsmengen oder sogar weniger Moleküle eingesetzt hat, relativ breit waren. Diese Resonanzen verschieben sich leicht, wenn man ein Gas, eine Flüssigkeit, oder Moleküle in die direkte Umgebung der Nanoteilchen bringt. Bei breiten Resonanzen lässt sich die Verschiebung jedoch nicht so leicht detektieren.

Dieses Problem konnte Harald Giessen mit seinem Team jetzt elegant lösen. Die neue Struktur ist nur noch durch die nichtstrahlende Dämpfung im Metall limitiert, und die Gruppe zeigt sogar einen Weg auf, diesen Wert noch weiter zu verkleinern. Aufgrund der schmalen Resonanz wird der sogenannte LSPR (localized surface plasmon resonance) Sensor wesentlich empfindlicher sein als bisher.

Stefan Maier aus London sagt vorher, dass man in Zukunft mithilfe dieser Technologie neuartige molekulare Sensoren bauen könnte, die auch kleinste Flüssigkeitsmengen, vielleicht sogar einzelne Moleküle, detektieren können. Auch für die Speicherung von Lichtsignalen bei der optischen Datenübertragung durch so genanntes „langsames Licht“ wäre ein möglicher Einsatzbereich für die neuen Strukturen zu finden. Zu guter Letzt könnte vielleicht ein altes Problem bei den Metamaterialien gelöst werden, die kürzlich für Furore auf den Gebieten des negativen Brechungsindex und der optischen Tarnkappen gesorgt haben: dort sind nämlich die Verluste ein großes Problem, und eine Forschergruppe aus den USA und Griechenland hat bereits einen Weg gefunden, die neuen Strukturen aus Stuttgart für wesentlich bessere und verlustarme Metamaterialien einzusetzen.

Die Forscher jedenfalls freuen sich, dass die Gelder, die die Deutsche Forschungsgemeinschaft, die Landesstiftung Baden-Württemberg und das Bundesministerium für Bildung und Forschung bei den Forschergruppen investiert haben, die Nanotechnologie und Optik in Deutschland um ein gutes Stück vorangebracht hat.

Nature Materials – <http://dx.doi.org/10.1038/NMAT2495>

Kontakt: Prof. Dr. Harald Giessen
Email: giessen@physik.uni-stuttgart.de
Internet: www.pi4.uni-stuttgart.de
Tel: 0711/6856 5110