

Glasfasern dünner als Licht

Von Arno Rauschenbeutel

An der Oberfläche ultradünner Glasfasern koppeln Forscher Licht mit Materie. Die Ergebnisse aus ihrem Quantenlabor eröffnen eine ganze Reihe potentieller Anwendungsmöglichkeiten, bis hin zum Quantencomputer.

Glasfasern werden heute in zahllosen Bereichen der Technik eingesetzt und sind aus unserem Leben kaum mehr wegzudenken. Durch ihre enorme Kapazität für die Datenübertragung sind sie zum Rückgrat der Informationsgesellschaft geworden. Aber auch in der Medizin und in der Industrie finden Glasfasern zur Führung und Kontrolle von Licht Verwendung. Angesichts dieser weiten Verbreitung könnte man auf den ersten Blick vermuten, dass die Glasfasertechnologie in ihrem Potenzial im Wesentlichen bereits ausgereizt ist. Tatsächlich ist die Entwicklung und Optimierung neuartiger Glasfasern jedoch ein boomendes Forschungsgebiet und es werden stetig neue Anwendungsgebiete für die Glasfasertechnologie erschlossen.

In diesem Zusammenhang haben sich ultradünne Glasfasern in letzter Zeit als ein vielseitiges Werkzeug etabliert, mit dessen Hilfe die Wechselwirkung von Licht und Materie auf der ultimativ mikroskopischen Skala untersucht, maßgeschneidert und schließlich auch nutzbar gemacht werden kann. Der Durchmesser der Glasfasern beträgt dabei nur einige Hundert Nanometer. Zum Verständnis des Funktionsprinzips dieser „optischen Nano-Fasern“ ist es hilfreich, zunächst die Lichtführung in einer gewöhnlichen Glasfaser zu betrachten (Abb. 1a). Diese besteht aus einem Kern mit einem Durchmesser von typischerweise zehn Mikrometern, der von einem Mantel mit 125 Mikrometern Durchmesser umgeben ist. Kern und Mantel bestehen aus zwei verschiedenen Sorten Glas, wobei der Brechungsindex des Kerns größer ist als der des Mantels. In diesem Fall wird Licht, das unter einem flachen Winkel auf die Grenzschicht zwischen Kern und Mantel trifft, vollständig und im Wesentlichen verlustfrei an dieser reflektiert – man spricht von Totalreflexion. Das Licht kann den Faserkern also nicht verlassen und wird durch fortwährende Totalreflexion in diesem geführt.

Durch lokales Erhitzen und Strecken kann man eine solche Standard-Glasfaser nun verjüngen, bis sich der Durchmesser des Mantels auf weniger als einen Mikrometer reduziert hat. Der ursprüngliche Kern wird dabei so dünn, dass er das Licht nicht mehr führen kann. Bevor es in die ultradünne Taille der verjüngten

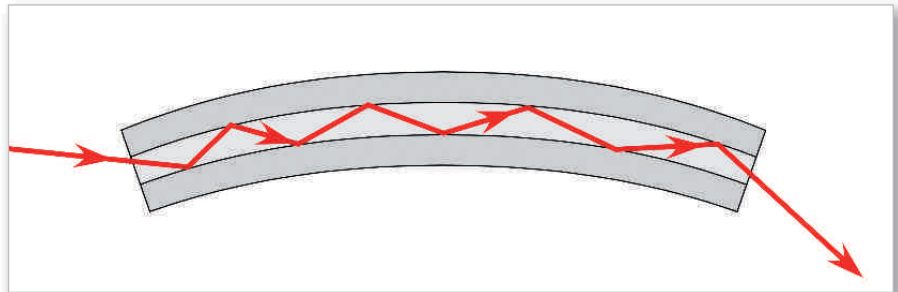
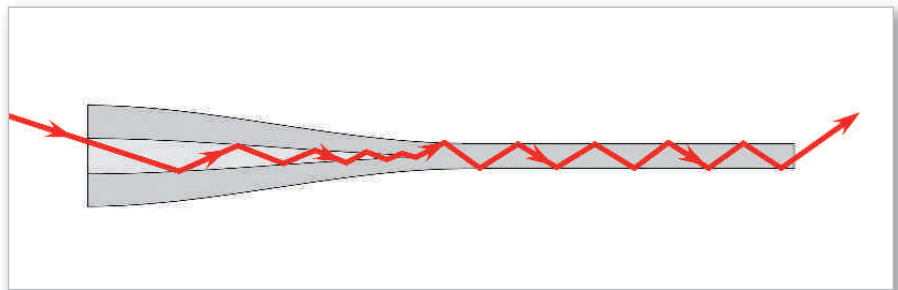


Abbildung 1: a) In einer gewöhnlichen Glasfaser wird das Licht durch fortwährende Totalreflexion im hier heller angedeuteten Faserkern geführt.

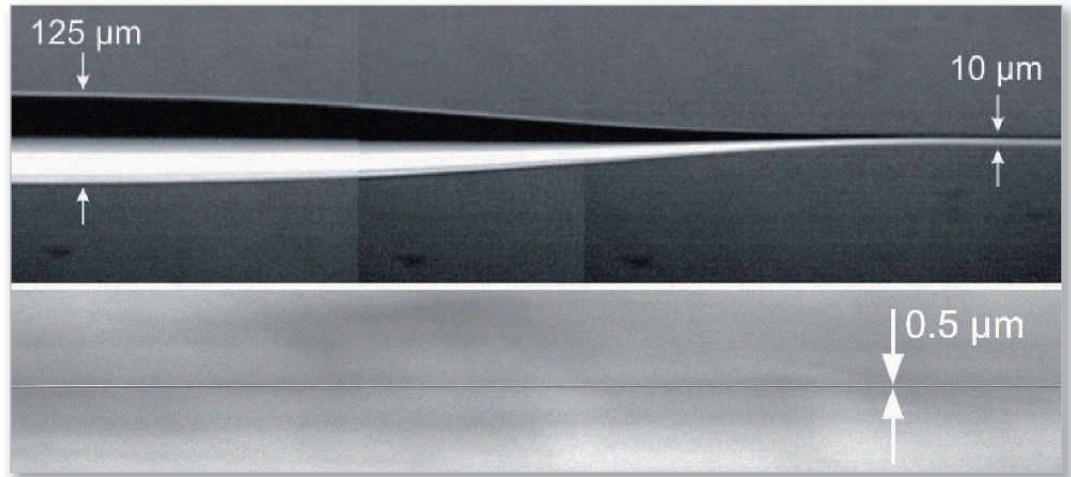


b) Verjüngt man eine solche Glasfaser, so verlässt das Licht an einem Punkt den Faserkern und wird fortan im Fasermantel geführt (hier dunkler angedeutet).

Glasfaser gelangt, geht das Licht deshalb vom Kern in den Mantel über (Abb. 1b). Ist dieser nun von einem Medium mit einem geringeren Brechungsindex als Glas umgeben (zum Beispiel Vakuum, Luft oder Wasser), so tritt an dieser Grenzschicht wiederum Totalreflexion auf und das Licht wird entlang der Fasertaille geführt. In diesem Bereich verhält sich der ursprüngliche Fasermantel also wie ein Faserkern, der von einem Mantel aus Vakuum, Luft oder Wasser umgeben ist.

Allerdings beschreibt das einfache Bild der Lichtstrahlen aus Abbildung 1 die Lichtführung in der ultradünnen Fasertaille nicht mehr korrekt. Da der Durchmesser der Fasertaille vergleichbar mit der oder sogar kleiner als die Wellenlänge des geführten Lichtes ist (Abb. 2), darf man nämlich nicht vernachlässigen, dass sich Licht wie eine Welle verhält. Eine entscheidende Konsequenz aus dieser Tatsache ist, dass sich das Licht nicht auf das Innere der Fasertaille beschränkt, sondern seitlich aus dieser herausragt. Man spricht dabei von einem evaneszenten Feld, welches sich

Abbildung 2: Oben: Lichtmikroskopaufnahme einer Glasfaser, die durch Erhitzen und Strecken um etwa einen Faktor Zehn verjüngt wurde. Unten: Elektronenmikroskopische Aufnahme der Taille einer ultradünnen verjüngten Glasfaser, deren Durchmesser mit nur $0,5 \mu\text{m}$ vergleichbar ist mit der Wellenlänge sichtbaren Lichts.



über einen Bereich von wenigen Hundert Nanometern jenseits der Oberfläche der Fasertaille erstreckt (Abb. 3). Bemerkenswerterweise kann man also Materie in Form von Atomen, Molekülen oder anderen mikroskopischen Teilchen an das entlang der Fasertaille propagierende Licht koppeln, indem man sie einfach in die unmittelbare Nähe der Oberfläche der Fasertaille bringt. Zudem wirkt der starke räumliche Einschluss des Lichts wie eine extreme Fokussierung und verstärkt die Licht-Materie-Wechselwirkung.

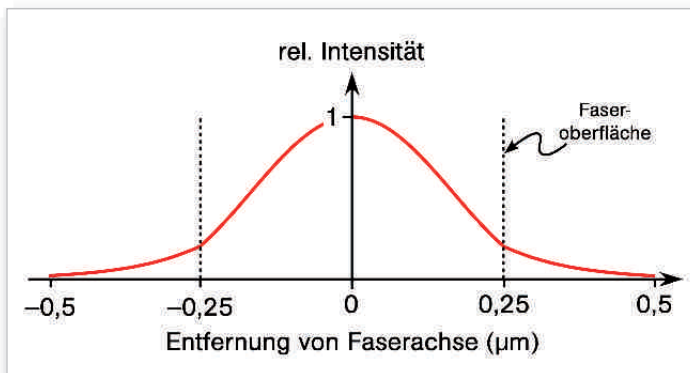
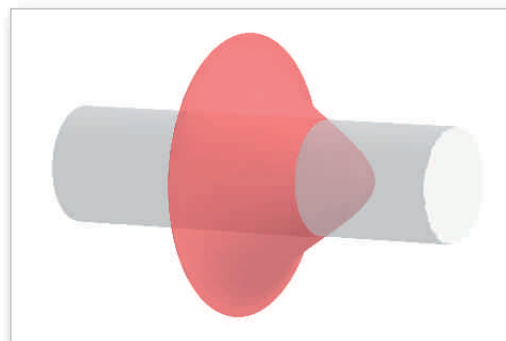


Abbildung 3: a) Intensitätsverlauf von Licht mit einer Wellenlänge von $0,85 \mu\text{m}$ innerhalb und außerhalb einer ultradünnen Glasfaser mit einem Durchmesser von $0,5 \mu\text{m}$.

b) Ein Lichtfeld, das entlang einer ultradünnen Glasfaser geführt wird, ragt also ein Stück weit in den Raum hinein (schematische Darstellung).



Ultradünne Glasfasern können deshalb zum Beispiel als hochempfindliche Sensoren dienen. Um dies zu demonstrieren, haben wir in einem Experiment eine Fasertaille von nur $0,5 \mu\text{m}$ Durchmesser mit Farbstoffmolekülen bedampft. Die aufgedampften Moleküle absorbieren charakteristische spektrale

Komponenten, so dass ihre Anwesenheit anhand des veränderten Spektrums von durch die verjüngte Faser transmittiertem Weißlicht nachgewiesen werden kann (Abb. 4). Eine solche Oberflächen-Absorptionsspektroskopie kann man natürlich auch durchführen, indem man eine ebene Glasoberfläche mit Molekülen bedampft und dann die Absorption von Licht misst, das diese Oberfläche senkrecht durchstrahlt. Wir konnten jedoch zeigen, dass die Empfindlichkeit unserer faserbasierten Methode im Vergleich zu diesem einfachen Ansatz bis zu zehntausend Mal größer ist. Der Grund hierfür lässt sich leicht anschaulich verstehen: Da das Licht entlang der Fasertaille propagiert und die Moleküle sozusagen wie auf einer Perlschnur hintereinander auf dieser aufgereiht sind, tritt das Licht mit jedem Molekül in Wechselwirkung und kann so viel stärker absorbiert werden.

Ersetzt man die Moleküle durch Atome, welche mit Methoden der so genannten Laserkühlung auf Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt abgekühlt werden und sich in der Nähe der Oberfläche der Fasertaille aufhalten, so erhöht sich die Empfindlichkeit noch einmal drastisch. Obwohl Atome nur einen Durchmesser von etwa einem Zehntausendstel Mikrometer haben, absorbieren sie nämlich genauso viel Licht wie ein schwarzes Scheibchen mit einem Durchmesser von etwa $0,6 \mu\text{m}$. Dies ist vergleichbar mit dem Durchmesser der Taille unserer ultradünnen Glasfasern selbst (Abb. 5). Man würde also erwarten, dass schon ein einzelnes Atom in der Nähe der Oberfläche der Fasertaille zu einer signifikanten Verringerung der Transmission führt. Tatsächlich konnten wir diesen Effekt in einem Experiment nachweisen. Dabei nahm die Transmission der ultradünnen Glasfaser um mehr als 20 Prozent ab, obwohl sich im evaneszenten Feld um die Fasertaille im Mittel nur etwa ein Atom befand.

Dieses Ergebnis belegt eindrucksvoll, wie stark Licht mit Materie an der Oberfläche ultradünner Glasfasern gekoppelt werden kann. Eine solche starke Kopplung eröffnet eine Reihe faszinierender Möglichkeiten.

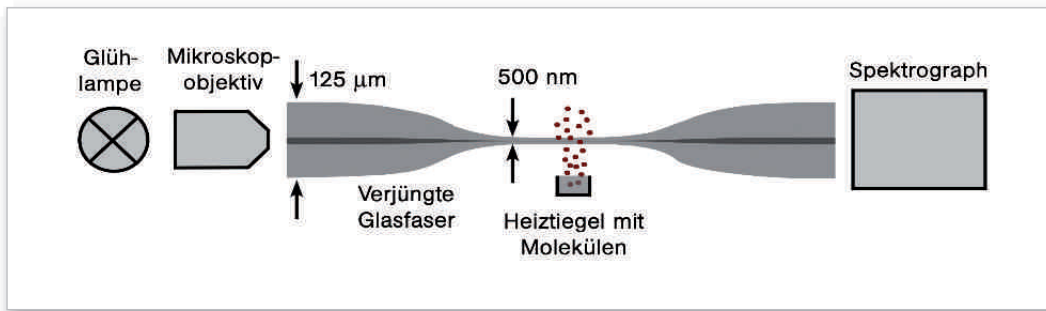


Abbildung 4: Werden Moleküle auf die Taille einer ultradünnen Glasfaser aufgedampft, so kann deren charakteristische Absorption nachgewiesen werden, indem man das durch die Faser transmittierte Weißlicht spektral analysiert.

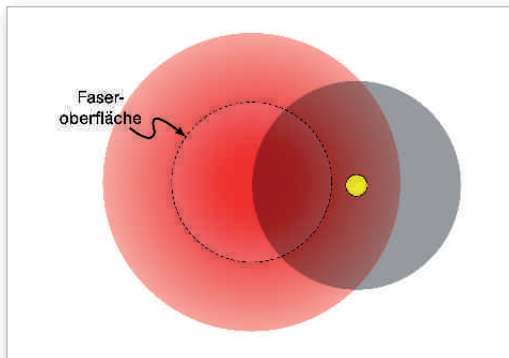


Abbildung 5: Ein einzelnes Atom nahe der Oberfläche einer ultradünnen Glasfaser absorbiert so viel Licht, wie es dem grau angedeuteten Scheibchen entspricht. Dies resultiert schon bei einem Atom in einer merklich reduzierten Transmission von Laserlicht (hier rot angedeutet) durch die Glasfaser.

Potenzielle Anwendungen liegen zum Beispiel im ultrahochempfindlichen Nachweis von Molekülen für chemische und biologische Nano-Untersuchungen. Aber auch so fortgeschrittene Anwendungen wie Transistoren für Licht könnten mit ultradünnen Glasfasern realisiert werden. Hierbei handelt es sich um Schaltelemente, in denen ein sehr kleines Lichtsignal den Durchlass eines deutlich größeren Lichtstroms steuert. Im Extremfall, in dem das Steuersignal nur noch aus einzelnen Lichtquanten – so genannten Photonen – besteht, könnten solche Komponenten unter bestimmten Voraussetzungen auch Information nach den Gesetzen der Quantenmechanik verarbeiten und so in einem zukünftigen Quantencomputer Verwendung finden.

■ Summary

Light is a wave and cannot be focused down to a spotsize smaller than its wavelength, i.e. one micrometer in the visible domain, using lenses and mirrors. When forcing visible light into a glass fiber with a sub-micron diameter, the light therefore projects slightly over the sides of the fiber. This enables light fields to be coupled with microscopic particles such as atoms or molecules on the surface of such ultra-thin glass fibers, thereby paving the way to the realization of exciting experiments and applications.



Univ.-Prof. Dr. Arno Rauschenbeutel

Arno Rauschenbeutel wurde am 25. Mai 1971 in Düsseldorf geboren. Diplomstudium Physik von 1991 bis 1997 an der Universität Düsseldorf, dem Imperial College London und der Universität Bonn. Doktorarbeit in Experimentalphysik von 1997 bis 2001 am Laboratoire Kastler Brossel der Ecole Normale Supérieure in Paris. Von 2001 bis 2005 wissenschaftlicher Assistent am Institut für Angewandte Physik der Universität Bonn, anschließend dort Vertretung einer W3-Professur für Experimentelle Physik. Seit 2006 W2-Professor für Experimentelle Quantenoptik (Lichtenberg Stiftungsprofessur der Volkswagen-Stiftung) am Institut für Physik der Johannes Gutenberg-Universität Mainz. Derzeitige Forschungsschwerpunkte: Nano-Photonik und Quantenoptik.

■ Kontakt

Univ.-Prof. Dr. Arno Rauschenbeutel
 Abteilung Quanten-, Atom- und Neutronenphysik
 Institut für Physik
 Johannes Gutenberg-Universität Mainz
 Staudingerweg 7
 D-55128 Mainz
 Tel. +49 (0) 61 31-39 20 203
 Email: Arno.Rauschenbeutel@uni-mainz.de