

Optische Fasern – physikalische Grundlagen und Anwendungen

Axel Donges, Isny im Allgäu

Die zunehmende Nutzung von **Online Video, Internet-TV** und **Cloud-Services** (z. B. Dropbox) befeuert die Nachfrage nach superschnellen Breitbandverbindungen. Die herkömmlichen kupferkabelbasierten Netze mit maximalen Geschwindigkeiten von 12–16 Mbit/s werden dem steigenden Kapazitätsbedarf schon lange nicht mehr gerecht. Hingegen bieten **Glasfasernetze** Bandbreiten mit Geschwindigkeiten von 0,1 bis zu 1 Gbit/s.

Behandeln Sie, um der Bedeutung der Glasfaser – nicht nur für die heutige Nachrichtentechnik, sondern z. B. auch für die Medizin (Endoskopie) – gerecht zu werden, das Thema „**optische Faser**“ in Ihrem Unterricht.



Abb. 1: Faserlampe

© Pearl GmbH

II/D

**Mehr als 90 % aller Daten werden
in Glasfasern transportiert.
Pro Sekunde werden weltweit mehr als
1 km Glasfaserkabel neu verlegt!**

Der Beitrag im Überblick

<p>Klasse: 10–12</p> <p>Dauer: 4 Stunden</p> <p>Ihr Plus:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Aktuelles Thema ✓ Fachübergreifender Unterricht (Erdkunde, Biologie) 	<p>Inhalt:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reflexion, Transmission, Totalreflexion • Stufenindex- und Gradientenfaser • Single- und Multimodefaser • TAT-14 • Endoskop
--	---

Fachliche und didaktisch-methodische Hinweise

Geschichtlicher Hintergrund

Schon um 1600 vor Christi Geburt waren den Ägyptern Glasfasern bekannt. Sie fertigten aus einer zähflüssigen Glasschmelze grobe Glasfäden. Diese benutzten sie, um Glasgefäße zu verzieren. Im 16. bis 18. Jahrhundert nach Christi Geburt wurde diese Technik in Venedig weiterentwickelt, wo erstmals Glasstäbe zu dünnen Glasfäden ausgezogen wurden. Die so hergestellten Glasfäden fanden als Zierde für das damalige Filigranglas Verwendung. 1713 wies der Physiker **Ferchault de Reamur** (1683–1757) auf die Möglichkeit hin, feine Glasgarne zu verweben.

Der eigentliche Ursprung der Glasfasertechnik liegt jedoch im Thüringer Wald, wo Kunstglasbläser im 18. Jahrhundert lange, dünne Glasfäden (sog. Feen- oder Engelshaar) im historischen Stabziehverfahren herstellten. 1822 wurde ein Patent für unverbrennbare Lampendochte aus Glasfasern erteilt. Um 1830 wurden die ersten Glasfasern verwebt, um ein Tuch für den Sarg von Napoleon I. herzustellen. 1842 webte **L. Schwabe** in Manchester den ersten Stoff aus Glasfasern. Der Franzose **Jules de Brunfaut** (1852–1942) gründete 1866 in Wien die erste Glasspinnereimanufaktur, wo er Glasfasern mit einem Durchmesser von 6 bis 12 μm herstellte und daraus Perücken, Kappen und Brautschleier herstellte. Erste Textilglasfasern in einer verspin- und verwebbaren Qualität sind seit der Entwicklung des Düsenblasverfahrens 1931 durch die **Owens-Illinois Glas Company in Newark** (Ohio) im Handel. In den 30er-Jahren des 20. Jahrhunderts entwickelte die **Glas-Wolle KG W. Schuller & Co.** im thüringischen Haselbach das Stabtrommelabziehverfahren, mit dem erstmals roll- und spinnbare Glasfasern mit definierten Durchmessern industriell hergestellt werden konnten, die dann zu Glaswolle weiterverarbeitet wurden. Während des Zweiten Weltkriegs setzten die Amerikaner die Glasfaser zur Verstärkung von Kunststoffen ein. Sie fertigten – auf Basis eines deutschen Patents aus dem Jahre 1935 – leichte, aber stabile Benzintanks aus Niederdruckpressharzen. Die Verwendung von Glasfasern ist heute weit verbreitet. Glasfasern werden beispielsweise Beton und Estrich beigemischt. Große Bedeutung haben auch glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK), die in den verschiedensten Bereichen Anwendung finden (z. B. Flugzeuge, Boote, Automobile, Skier, Leiterplatten, Rohre).

Im Jahre 1870 demonstrierte **John Tyndall** (1820–1893) vor den Mitgliedern der British Royal Society, dass ein Lichtstrahl in einem frei fallenden, gekrümmten Wasserstrahl geführt wird. Da das Phänomen der **Totalreflexion** noch nicht bekannt war, konnte er sein Experiment nicht erklären. Er demonstrierte damit aber die physikalische Grundlage der modernen optischen Nachrichtentechnik. Statt der heute üblichen Glasfaser benutzte er einen Wasserstrahl.

In den folgenden Jahrzehnten versuchten die Wissenschaftler und Techniker, das von Tyndall entdeckte Prinzip auf Glasfasern zu übertragen. In den 1950er-Jahren wurden Glasfasern erfolgreich zur Beleuchtung innerer Organe in der Medizintechnik eingesetzt. Für andere Anwendungen war der Lichtverlust in den Lichtleitern noch zu groß. Der erste Einsatz von Glasfasern in der Nachrichtentechnik erfolgte 1965.

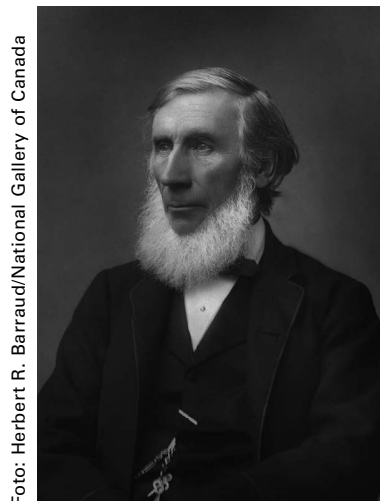
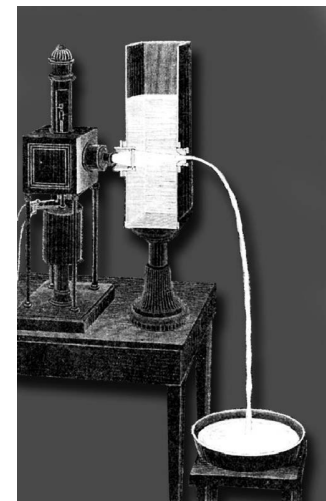


Foto: Herbert R. Barraud/National Gallery of Canada

Abb. 2: John Tyndall (1820–1893)



© Industrial Fiber Optics

Abb. 3: Nachbau des historischen Tyndall-Experiments

Materialübersicht

⌚ V = Vorbereitungszeit SV = Schülerversuch Ab = Arbeitsblatt/Informationsblatt
 ⌚ D = Durchführungszeit LV = Lehrerversuch Fo = Folie WH = Wiederholungsblatt

M 1	Fo	Beispiele für die Anwendung von Glasfasern – Einstieg	
M 2	WH	Reflexion und Brechung – frische dein Wissen auf!	
	⌚ D: 30 min		
M 3	Ab	Die Totalreflexion	
	⌚ D: 45 min		
M 4	SV	Demonstrationsexperimente zur Totalreflexion	
	⌚ V: 15 min	<input type="checkbox"/> Halbzylinder aus Plexiglas mit Haltevorrichtung	<input type="checkbox"/> Gebogener zylindrischer Stab aus Plexiglas
	⌚ D: 15 min	<input type="checkbox"/> Rechtwinkliges Prisma aus Plexiglas	<input type="checkbox"/> Laserpointer
M 5	Ab	Die Stufenindexfaser	
	⌚ D: 30 min		
M 6	Ab, LV	Die Gradientenfaser	
	⌚ V: 15 min	<input type="checkbox"/> Zuckerlösung	<input type="checkbox"/> Küvette
	⌚ D: 5 min	<input type="checkbox"/> Wasser	<input type="checkbox"/> Laser
M 7	Ab	Single- und Multimodefasern	
	⌚ D: 30 min		
M 8	Ab	TAT-14 – ein gigantisches Tiefseekabel	
	⌚ D: 15 min		
M 9	Ab	Endoskopie – ein Blick ins Körperinnere	
	⌚ D: 30 min		

Die Erläuterungen und Lösungen zu den Materialien finden Sie ab Seite 14.

Mediathek

Internet-Adressen

zu **M 1** und **M 2**:

<http://www.walter-fendt.de/ph14d/brechung.htm>

zu **M 3** und **M 4**:

http://www.wfu.edu/physics/demolabs/demos/avimov/optics/fiber_optics/lighttie.mpg

II/D



M 1 Beispiele für die Anwendung von Glasfasern – Einstieg

Optische Fasern werden heute hauptsächlich

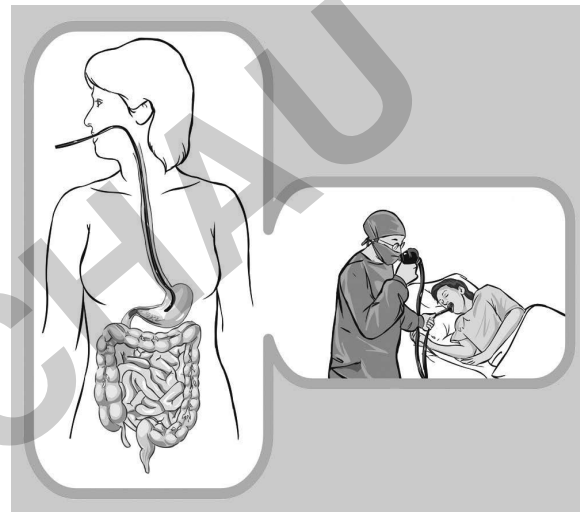
- zu Beleuchtungszwecken (a),
- zur Bildübertragung (b),
- in der Messtechnik (c) oder
- in der optischen Nachrichtentechnik (d) eingesetzt.

Dabei bildet das zuletzt genannte Gebiet den Anwendungsschwerpunkt.



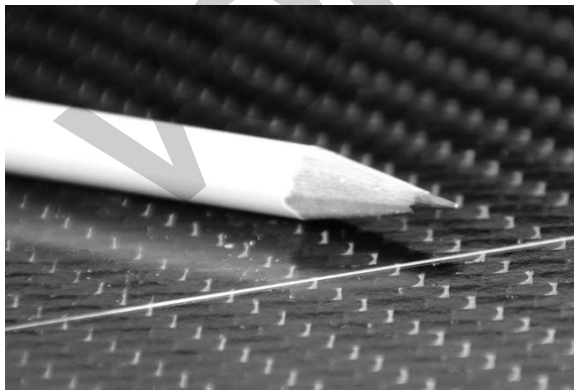
© Pearl GmbH

Abb. 4: Beispiel zu a: Faserlampe



© Thinkstock/Hemera

Abb. 5: Beispiel zu b: Anwendung optischer Fasern in der Endoskopie



© Foto: fos4X

Abb. 6: Beispiel zu c: Ein Faser-Bragg-Sensor (Glasfaser mit integrierten Bragg-Reflektoren) verändert sein wellenlängenabhängiges Reflexionsvermögen, wenn er einer mechanischen Zugbelastung ausgesetzt wird.



© Rainer Grothues – Fotolia.com

Abb. 7: Beispiel zu d: Ohne Lichtwellenleiter wäre der heutige Datenverkehr nicht mehr zu bewältigen.

II/D

M 5 Die Stufenindexfaser

Der im letzten Experiment (M 4) verwendete gebogene, transparente Zylinder stellt bereits einen **Lichtleiter** dar. Das Licht wird dank der Totalreflexion an der Grenzfläche zur umgebenden Luft im Zylinder geführt.

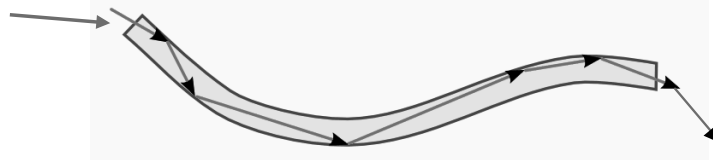


Abb. 13: Ein (verbogener) Plexiglasstab wirkt als Lichtleiter. Ursache ist die Totalreflexion an der Grenzfläche zur umgebenden Luft.

Wird dieser Lichtleiter mit einem nicht transparenten Schutzmantel umhüllt oder in der Erde verlegt, findet keine Totalreflexion mehr statt. Um dies zu vermeiden, besitzen Lichtleiter immer einen transparenten Außenmantel, dessen Brechzahl geringer ist als die des Kerns. So werden immer die gleichen optischen Eigenschaften der Faser garantiert. Eine solche Faser heißt **Stufenindexfaser**.

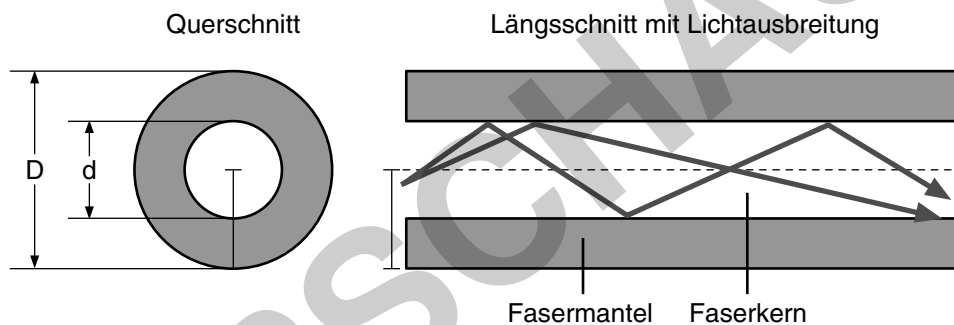


Abb. 14: Eine Stufenindexfaser besteht aus einem Faserkern (Durchmesser d und Brechzahl n_K) und einem Fasermantel (Durchmesser D und Brechzahl n_M). Typische Werte sind beispielsweise: $n_K = 1,48$, $n_M = 1,46$, $d = 100 \mu\text{m}$, $D = 140 \mu\text{m}$.

Aufgabe

Wir betrachten eine Stufenindexfaser mit $n_K = 1,48$, $n_M = 1,46$.

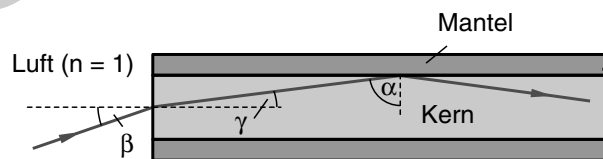


Abb. 15

- Welchen Einfallswinkel $\alpha_{1,\text{max}}$ darf ein Lichtstrahl beim Auftreffen auf den Fasermantel nicht überschreiten, damit er im Faserkern durch Totalreflexion weitergeleitet wird?
- Welchen Winkel β darf ein Lichtstrahl beim Auftreffen auf die Stirnfläche der Stufenindexfaser nicht überschreiten, damit im Faserkern Totalreflexion auftritt? Außerhalb des Lichtleiters ist Luft mit einer Brechzahl von 1,0.

Zur Erinnerung:

Totalreflexion

$$\sin(\alpha_{1,\text{max}}) = \frac{n_2}{n_1} < 1$$

Bemerkung:

Der im Aufgabenteil b) berechnete maximale Einfallswinkel heißt **Akzeptanzwinkel**.

II/D

Erläuterungen und Lösungen

M 1 Beispiele für die Anwendung von Glasfasern – Einstieg

Glasfasern spielen im Alltag eine bedeutende Rolle. Zeigen Sie Ihren Schülern, wo.

M 2 Reflexion und Brechung – frische dein Wissen auf!

$$\sin(\alpha_2) = \frac{n_1}{n_2} \sin(\alpha_1) \quad \text{mit} \quad \frac{n_1}{n_2} = \frac{1,0}{1,5} = 0,6\bar{6}$$

α_1 in °	0	20	40	60	80
α_2 in °	0,0	13,2	25,4	35,3	41,1

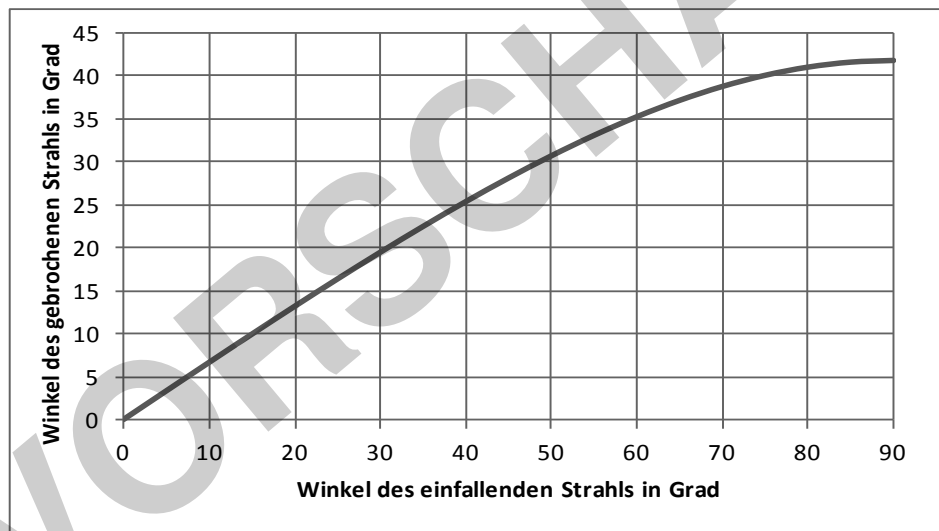


Abb.27

M 3 Die Totalreflexion

$$1. \quad \frac{n_1}{n_2} = 1,5; \quad \sin(\alpha_2) = 1,5 \sin(\alpha_1)$$

α_1 in °	0	10	20	30	40	50	60	70	80
α_2 in °	0,0	15,1	30,9	48,6	74,6	keine Lösung	keine Lösung	keine Lösung	keine Lösung