

Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

Band: 63 (1985)

Heft: 4

Artikel: Messgerät zum Bestimmen des Berechnungsindexprofils einer Glasfaser = Appareil de mesure du profil de l'indice de réfraction d'une fibre optique

Autor: Pellaux, Jean-Paul / Witschi, Andreas / Bischofberger, Toni

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-875385>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 30.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Messgerät zum Bestimmen des Brechungsindexprofils einer Glasfaser

Appareil de mesure du profil de l'indice de réfraction d'une fibre optique

Jean-Paul PELLAUX¹, Genève, Andreas WITSCHI und Toni BISCHOFBERGER, Bern

Zusammenfassung. Mit der Einführung der optischen Übertragungstechnik im Bereich des Fernmeldewesens ist ein stetig zunehmender Bedarf an Geräten zum Messen der optischen Übertragungseigenschaften der Glasfaser entstanden. Eines dieser Geräte für die Messung des Brechungsindexprofils von Multimode- und Monomodefasern ist in diesem Beitrag vorgestellt. Das Gerät, das aus dem Brechungsindexprofil auch den Kern- und Manteldurchmesser, den Konzentritätsfehler von Kern- und Manteldurchmesser sowie die theoretische numerische Apertur von Multimodefaser bestimmt, wurde im Auftrag der Schweizerischen PTT bei der Promogap SA in Genf entwickelt.

Résumé. Avec l'introduction de la technique de transmission par fibres optiques dans le domaine des télécommunications, des besoins toujours plus nombreux en appareils de mesure des caractéristiques de transmission des fibres sont apparus. Un de ces appareils pour la mesure du profil d'indice de réfraction des fibres multimodes et monomodes est présenté dans cet article. Il permet, en partant du profil d'indice de réfraction, de déterminer le diamètre du cœur et de la gaine, l'erreur de concentricité du cœur et de la gaine, ainsi que l'ouverture numérique théorique, et a été développé par Promogap SA à Genève, à la demande des PTT.

Apparecchio di misura per determinare il profilo dell'indice di rifrazione di una fibra ottica

Riassunto. Con l'introduzione della tecnica di trasmissione ottica nel campo delle telecomunicazioni è aumentato il bisogno di apparecchiature che permettano di misurare le caratteristiche trasmissive delle fibre ottiche. Nell'articolo viene presentato un apparecchio con il quale è possibile misurare il profilo dell'indice di rifrazione delle fibre ottiche multimodali e monomodali. L'apparecchio che può determinare dal profilo dell'indice di rifrazione anche il diametro del nucleo e del mantello, l'errore di concentricità di tali diametri e la teorica apertura numerica delle fibre multimodali è stato sviluppato, su incarico delle PTT svizzere, dalla Promogap SA a Ginevra.

1 Einleitung

Für den Hersteller und den Anwender von Glasfaserkabeln ist es wichtig, die Übertragungseigenschaften der Glasfaser bestens zu kennen. Die Übertragungsqualität von Multimodeglasfasern ist beispielsweise durch folgende Kenngrößen definiert: Bandbreite, Dämpfung, Geometrie, d. h. Kern- und Manteldurchmesser. Bei den Monomodefasern sind es etwa die Dispersion, die Dämpfung, der Modenfelddurchmesser, die Grenzwellenlänge. Die Dämpfung von Multimodefaserpleisungen und Glasfasersteckern ist vorwiegend durch die Geometrie der Glasfaser selbst gekennzeichnet.

Für die Messung der Geometrie hat die Promogap SA, Genf, im Auftrag der PTT ein Gerät zur Ermittlung des Brechungsindexprofils entwickelt. Aus dem Profil können die Geometrie, d. h. Kern- und Manteldurchmesser, Konzentritätsfehler von Mantel- und Kerndurchmesser sowie die numerische Apertur für Multimodefaser bestimmt werden. Der Vorgang beruht auf der refraktiven Nahfeldmethode, die als Referenztestmethode durch internationale Fernmeldeinstitutionen empfohlen wird.

2 Einführung in die Glasfasertechnik

21 Die Glasfaser

Licht, das sich in einem durchsichtigen Material – wie Glas – ausbreitet, pflanzt sich weniger schnell fort als im luftleeren Raum. Der Brechungsindex entspricht dem

1 Introduction

Il est essentiel, pour les producteurs et les utilisateurs des câbles à fibres optiques, de mesurer et de vérifier les caractéristiques optiques et géométriques des fibres. Ainsi, par exemple, la qualité d'une transmission dans une fibre multimode est donnée par la largeur de bande, l'atténuation, les valeurs géométriques, c'est-à-dire les diamètres du cœur et du cladding. Dans le cas des fibres monomodes, il faut, en plus, considérer la longueur d'onde de coupure et le diamètre du mode. La géométrie se constitue d'un ensemble de paramètres ayant un effet sur les pertes de lumière aux raccords entre les fibres. Dans le but de mesurer cette géométrie, les PTT ont demandé à Promogap de développer un appareillage permettant de déterminer le profil d'indice de réfraction de la fibre. Cette opération permet en effet de déduire les diamètres du cœur et du cladding, leur erreur de concentricité et l'ouverture numérique théorique pour les fibres multimodes.

La méthode de mesure mise en œuvre dans cet appareillage est celle du «champ proche réfracté», c'est la méthode de référence recommandée par les institutions de télécommunications internationales.

2 Courte introduction sur la technique des fibres optiques

21 La fibre optique

La lumière qui se propage dans un milieu transparent comme le verre s'y déplace plus lentement que dans

¹ Jean-Paul Pellaux ist Mitarbeiter bei Promogap und in der Gruppe der angewandten Physik an der Universität Genf.

¹ Jean-Paul Pellaux est collaborateur à Promogap et au groupe de physique appliqué de l'Université de Genève.

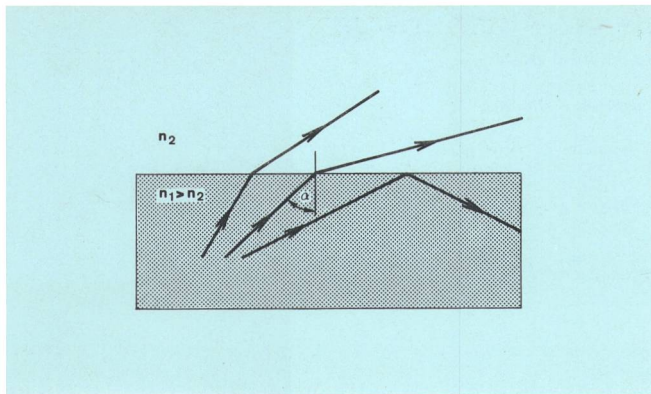


Fig. 1
Brechung und Totalreflexion – Réfraction et réflexion totale
 n_1, n_2 Brechungsindex – Indice de réfraction
 α Brechungswinkel – Angle de réfraction

Verlangsamungsfaktor und ist durch das Verhältnis der Geschwindigkeiten im Glas und in der Luft gegeben:

$$n = \frac{V_{\text{Luft}}}{V_{\text{Glas}}}$$

Wenn sich das Licht zwischen zwei Gläsern mit unterschiedlichem Brechungsindex fortpflanzt, wird nicht nur die Fortpflanzungsgeschwindigkeit geändert, sondern auch die Richtung. Dies ist das Phänomen der Brechung.

Wenn Licht von einem Glas mit einem grösseren Brechungsindex (n_1) in ein Glas mit kleinerem Index (n_2) wechselt, entsteht ein kritischer Winkel (α_c), bei dem das Licht die Übergangsfläche nicht mehr durchlaufen kann (Fig. 1).

Die Totalreflexion entsteht für

$$\alpha \geq \alpha_c = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

Zum Beispiel: wenn $n_2 = 1,457$ (reines Quarzglas) und $n_1 = 1,470$ (dotiertes Quarzglas mit Germanium) sind, erhält man $\alpha_c = 82,4^\circ$.

Die Glasfaser ist nichts anderes als ein Glaszylinder mit einem grösseren Brechungsindex im Kern und einem Mantel aus Glas mit einem kleineren Brechungsindex. Das Licht wird innerhalb des Winkels Θ_c im Faserkern geführt (entsprechend dem kritischen Winkel α_c Fig. 2), und die numerische Apertur (NA) ist durch den Akzeptanzkonus des Lichtes gegeben (Fig. 3).

Für optische Übertragungssysteme werden allgemein drei Faserstrukturen verwendet:

– Die *Stufenindex- oder Multimodefaser* (Fig. 4)

Die Brechung ist konstant über den ganzen Kerndurchmesser (50 μm ...200 μm). Diese Faser wird für kurze Distanzen verwendet.

Die numerische Apertur ist konstant über den ganzen Kerndurchmesser. Sie wird gegeben durch die Beziehung

$$\sin \Theta_c = NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

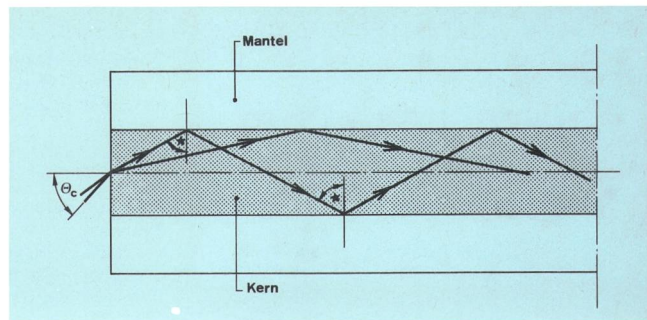


Fig. 2
Lichtleitung in einer Glasfaser – Schéma de la conduction des rayons lumineux
 Mantel – Gaine
 Kern – Cœur
 α_c Kritischer Brechungswinkel – Angle de réfraction critique
 Θ_c Einfallswinkel – Angle d'incidence

l'espace libre. L'indice de réfraction correspond au facteur de ralentissement, il est donné par le rapport des vitesses de propagation dans le verre et dans l'air:

$$n = \frac{V_{\text{air}}}{V_{\text{verre}}}$$

Lorsque la lumière traverse l'interface entre deux verres d'indices de réfraction différents, elle ne subit pas seulement un changement de vitesse, mais aussi un changement de direction. C'est le phénomène de la réfraction.

Si, en particulier, la lumière passe d'un verre d'indice de réfraction élevé à un verre d'indice plus faible, il existe un angle critique α_c au-delà duquel la lumière ne peut plus traverser l'interface (fig. 1). On a la réflexion totale, lorsque

$$\alpha \geq \alpha_c = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

Si, par exemple, $n_2 = 1,457$ (verre de quartz pur) et $n_1 = 1,470$ (verre de quartz dopé au germanium) $\alpha_c = 82,4^\circ$.

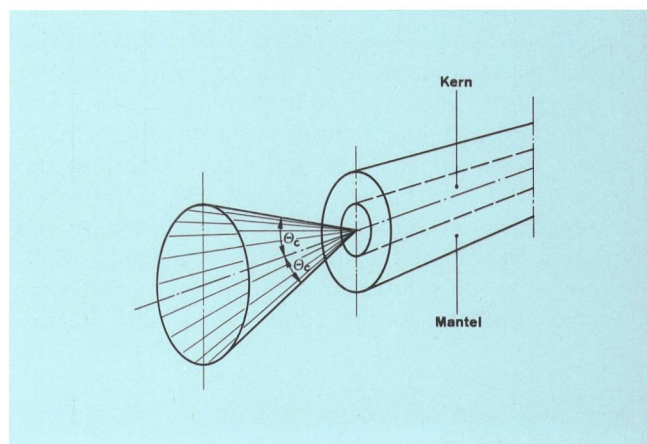
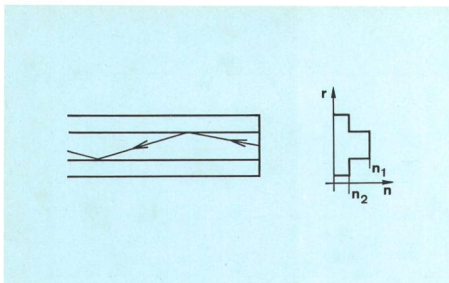
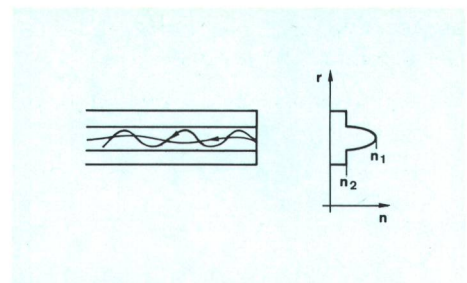


Fig. 3
Einkopplungsbereich einer Glasfaser. Innerhalb des Konus ($2 \cdot \Theta_c$) wird das Licht in der Faser geführt – Cône ($2 \cdot \Theta_c$) dans lequel la lumière peut être injectée dans la fibre
 Mantel – Gaine
 Kern – Cœur
 Θ_c Einfallswinkel – Angle d'incidence



◀
Fig. 4
Stufenindexfaser – Fibre à saut d'indice
 r Radius – Rayon
 n Brechungsindex – Indice de réfraction



▶
Fig. 5
Gradientindexfaser – Fibre à gradient d'indice
 r Radius – Rayon
 n Brechungsindex – Indice de réfraction

– Die Gradienten- oder Multimodefaser (Fig. 5)

Im Kern (typisch 50 μm) weist das Brechungsindexprofil einen parabolischen Verlauf auf. Damit erreicht man, dass die optischen Wege ausgeglichen sind und die Dispersion minimalisiert wird.

Diese Faser wird für mittlere Entfernungen verwendet.

Die maximale numerische Apertur befindet sich in der Mitte der Faser und wird, je näher man an den Rand des Kerns kommt, immer kleiner (gegen Null). Sie wird gegeben durch die Beziehung

$$NA = \sqrt{n^2(r) - n_2^2}$$

– Die Monomodefaser (Fig. 6)

Der Kern (5...10 μm) hat generell ein Stufenindexprofil ($\Delta n \cong 7 \cdot 10^{-3}$). Es ist nur ein optischer Weg möglich (= Monomode).

Diese Faser wird zur Zeit für grosse Entfernungen verwendet.

Ein Teil der Lichtintensität wird im Mantel geführt. Die numerische Apertur ist nur von der Grösse des Lichtpunktes $2w_0$ (Modenfelddurchmesser) und der Wellenlänge (λ) abhängig. $NA = \lambda/\pi w_0$.

Der Aussendurchmesser des Mantels für eine Multimode- und Monomode-Faser ist typisch 125 μm .

22 Herstellen eines Glasfaserkabels

Die Fabrikation eines Glasfaserkabels geschieht in mehreren Etappen. Die wichtigsten sind folgende (Fig. 7):

Vorformherstellung

Die Vorform entspricht einer Faser von makroskopischen Dimensionen. Alle optischen Übertragungseigenschaften sind bereits definiert. Die Vorform ist ein Stab von einigen Zentimetern Durchmesser und einer Länge von 1 m...2 m. Sie entspricht einer Faser von makroskopischen Dimensionen. Alle optischen Übertragungseigenschaften sind bereits definiert. Der vorgesehene Kern der Faser ist bereits auf der Zentralachse abgelagert. Das Basismaterial besteht aus Quarzglas (SiO_2). Um den Brechungsindex zu erhöhen, wird mit Germaniumoxyd und Sauerstoff dotiert. Fluor und Boroxyd

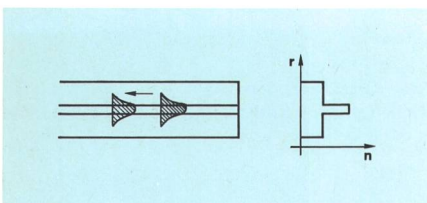


Fig. 6
Monomodefaser – Fibre monomode
 r Radius – Rayon
 n Brechungsindex – Indice de réfraction

La fibre optique n'est autre qu'un cylindre de verre d'indice de réfraction élevé (cœur) entouré d'une gaine en verre d'indice de réfraction plus faible (cladding). La lumière pénétrant dans la fibre sous un angle plus petit que Θ_c (dépendant de l'angle critique α_c) est alors guidée dans le cœur de la fibre (fig. 2).

L'ouverture numérique (NA) est alors donnée par le cône d'acceptance de la lumière (fig. 3).

Trois structures de fibres optiques sont généralement utilisées dans les systèmes de communications optiques.

– Les fibres à saut d'indice (multimodes, fig. 4)

L'indice est constant sur tout le diamètre du cœur (50...200 μm). Ce type de fibre est utilisé dans les liaisons à courte distance.

L'ouverture numérique est constante sur tout le diamètre du cœur, elle est donnée par la relation

$$\sin \Theta_c = NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

– Les fibres à gradient d'indice (multimodes, fig. 5)

Dans le cœur (typiquement 50 μm) l'indice suit une répartition parabolique. Le but en est d'égaliser tous les «chemins optiques» de la lumière et, par là, de minimaliser les phénomènes de dispersion.

Ce type de fibre est utilisé pour les liaisons à moyenne distance.

L'ouverture numérique est maximale au centre, elle diminue et tend vers zéro lorsqu'on s'approche du bord du cœur,

$$NA = \sqrt{n^2(r) - n_2^2}$$

– Les fibres monomodes (fig. 6)

Le cœur (5...10 μm) est généralement un saut d'indice ($\Delta n \cong 7 \cdot 10^{-3}$). Un seul «chemin optique» est possible (monomode). Ce type de fibre est actuellement utilisé dans les liaisons à grande distance.

Une partie de l'intensité lumineuse se propage dans la gaine. L'ouverture numérique ne dépend que de la dimension du spot de lumière $2w_0$ (diamètre du mode) et de sa longueur d'onde λ soit: $NA = \lambda/\pi w_0$.

Le diamètre extérieur de la gaine des fibres multimodes et monomodes est typiquement de 125 μm .

22 Fabrication d'un câble à fibres optiques

La fabrication d'un câble à fibres optiques passe par une succession d'étapes dont les principales sont les suivantes (fig. 7):

senken den Brechungsindex. Die bekanntesten Methoden, den Kern herzustellen sind:

- Modified chemical vapor deposition MCVD (ITT, Western Electric, Cabloptic)
- Plasma chemical vapor deposition PCVD (Philips)
- Outside vapor deposition OVD (Corning)
- Vapor axial deposition VAD (Fujikura, Furukawa, Sumitomo).

Ziehen der Vorform

Das Ziehen ist ein Vorgang, der sämtliche Techniken vereinigt. Die Vorform wird an einem Ende geschmolzen und gezogen. Dies ergibt eine Faserlänge von 4 km...100 km. Es handelt sich um eine einfache Reduktion der Vorformabmessungen um etwa das 100fache. Die gezogene Faser ist mit einem Mikrocoating von 200 µm Durchmesser aus Silikon oder Acrylat beschichtet. Die Verteilung des Brechungsindex bleibt dadurch erhalten.

Feste und lose Ummantelung der Faser

Der Mantel schützt die Faser mechanisch. Die Faser wird mit einer Schutzschicht umgeben. Es gibt die feste (ITT, Sumitomo, Furukawa, Fujikura, Cabloptic) und die lose Ummantelung (Siecor, Felten & Guillaume, Cabloptic). Es besteht auch die Möglichkeit, mehrere Fasern in ein Röhrchen einzuziehen (lose Ummantelung).

Verkabeln der Fasern

Die Glasfasern werden mit den Zugelementen zusammengefasst und dann mit einer Schutzschicht versehen.

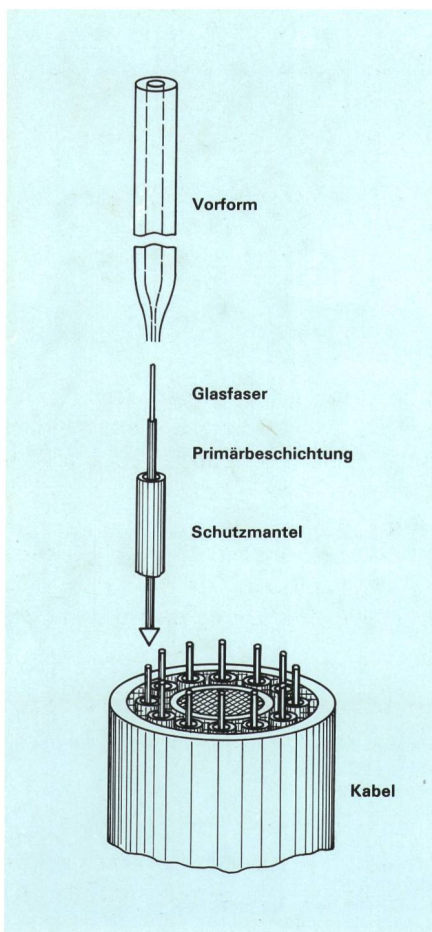


Fig. 7
Fabrikation eines Glasfaserkabels – Etapes de fabrication d'un câble à fibres optiques
 Vorform – Préforme
 Glasfaser – Fibre de verre
 Primärbeschichtung – Couche de protection primaire
 Schutzmantel – Gaine de protection
 Kabel – Câble

Fabrication de la préforme

La préforme constitue la fibre à la dimension macroscopique. Toutes les propriétés optiques de transmission sont déjà définies.

La préforme est un barreau de quelques centimètres de diamètre et de 1...2 m de longueur. Sur l'axe central le cœur prévu de la fibre est déjà déposé. Le matériel de base est du verre de quartz (SiO₂). Pour augmenter l'indice de réfraction on introduit de l'oxyde de germanium (GeO₂), alors que le fluor ou l'oxyde de bore permettent d'abaisser l'indice. Les méthodes de déposition du cœur les plus connues sont:

- Modified chemical vapor deposition
- MCVD (ITT Western Electric, Cabloptic...)
- Plasma chemical vapor deposition PCVD (Philips)
- Outside vapor deposition OVD (Corning)
- Vapor axial deposition VAD (Fujikura, Furukawa, Sumitomo,...).

Etirage de la préforme

L'étirage est une opération commune à toutes les techniques. La préforme est étirée par fusion de l'extrémité, donnant ainsi une longueur de quelques kilomètres de fibre optique (4...100 km). En réalité, il s'agit d'une simple réduction des dimensions de la préforme (environ 100 x). La fibre étirée est recouverte d'une couche de protection (diamètre 200 µm, résine silicone ou acrylate). La distribution de l'indice de réfraction est conservée.

Gainage ou tubage de la fibre

La fibre est enrobée d'une gaine protectrice serrée (ITT, Sumitomo, Furukawa, Fujikura, Cabloptic) ou d'un tube (Siecor, Felten & Guillaume, Cabloptic) qui assure la protection mécanique des fibres. Il est possible d'introduire plusieurs fibres dans un tube.

Câblage

Les fibres optiques sont assemblées avec des éléments de traction puis recouvertes d'une gaine de protection formant le câble.

3 Mesure du profil d'indice

31 Le profil d'indice

Le profil d'indice de réfraction d'une fibre est défini comme l'ensemble des valeurs d'indice de réfraction sur un diamètre d'une section de la fibre. Le profil d'indice permet de connaître la structure d'une fibre, c'est le paramètre fondamental à partir duquel certaines caractéristiques du guidage de la lumière pourraient être déterminées (par exemple la dispersion, l'ouverture numérique, la longueur d'onde de coupure ou le diamètre du champ modal).

32 Les méthodes de mesure

La mesure du profil d'indice d'une fibre optique peut se déduire de l'effet qu'il provoque sur la marche d'un faisceau de lumière lorsqu'il se propage dans la zone de la fibre analysée.

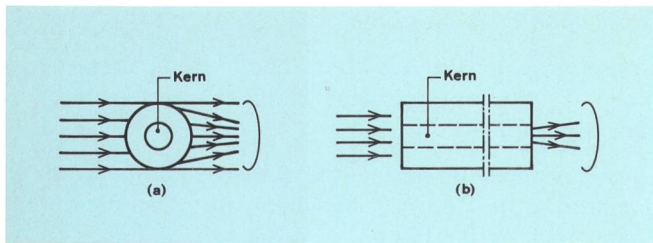


Fig. 8
 Beleuchtung der Faser für die Brechungsindexmessung – Eclairage de la fibre dont on veut mesurer le profil d'indice de réfraction
 a) Quer zur Faserachse – Transversalement
 b) Parallel zur Faserachse – Axialement
 Kern – Coeur

3 Messen eines Brechungsindexprofils

31 Das Brechungsindexprofil

Das Brechungsindexprofil einer Glasfaser besteht aus sämtlichen Werten, die entstehen, wenn der Brechungsindex in Abhängigkeit der Lichtstrahlage im Glasfaserdurchmesser gemessen wird. Das Brechungsindexprofil einer Glasfaserstruktur ist der grundsätzlichs-te Parameter für die Übertragungseigenschaften einer Glasfaser. Ist die Brechungsindexverteilung einer Faser bekannt, so können viele Lichtleitungseigenschaften berechnet werden, z. B. Dispersion, numerische Apertur, Grenzwellenlänge, Modenfelddurchmesser.

32 Die Messmethoden

Die Messung des Brechungsindexprofils kann durchgeführt werden, indem man Licht in die Faser Einkoppelt und dabei dessen Verhalten beim Austritt aus der Faser beobachtet.

Die Beleuchtung der Faser kann quer oder parallel zur Faserachse stattfinden (Fig. 8). Grundsätzlich wird bei der Messung die Indexverteilung auf Amplitude, Phase und räumliche Verteilung des übertragenen Lichtes beobachtet und anschließend durch Berechnung das Brechungsindexprofil bestimmt.

Die bekanntesten Methoden werden wie folgt bezeichnet:

- *Interferenztechnik*: Man misst mit der Interferenzmikroskopie (Fig. 9) oder mit der Analyse-methode der Transfer-Interferometrie (TIM).
- *Technik der räumlichen Filterung*: Man misst die Strahlenabweichung nach der «Fokussierungs-Methode» (Fig. 10).
- *Technik der räumlichen Analyse*: Man misst die geführte Lichtintensität im Faserkern nach der «Nahfeldmethode» (Fig. 11) oder die nichtgeführte Lichtintensität im Faserkern nach der «refraktiven Nahfeldmethode» (Fig. 12).
- *Technik der Reflexionsanalyse des Lichts*: Man misst die reflektierte Lichtintensität, die von der Faserstirnfläche emittiert wird. Diese Methode wendet das Reflexionsgesetz an (Fresnel-Gesetz).

Die Auflösung (bezogen auf den Brechungsindexwert und räumlich) und die Kalibrierung des Brechungsindexwertes sind verschieden, je nach angewandeter Methode. Damit eine gute Indexmessung durchgeführt

L'éclairage peut être appliqué transversalement ou dans l'axe de propagation de la fibre (fig. 8). L'originalité des méthodes de mesure réside dans la mise en évidence des effets du profil d'indice sur l'amplitude, la phase et la distribution spatiale de la lumière transmise, ainsi que dans le calcul nécessaire pour en tirer le profil d'indice.

Les méthodes les plus connues font appel aux techniques suivantes:

Techniques interférométriques: dans l'analyse par microscopie interférentielle (méthode SLAB dans la fig. 9) et dans l'analyse par la méthode interférométrique transverse (TIM).

Techniques d'analyse spatiale transversale: ou mesure de la déflexion des rayons lumineux dans la méthode dite de focalisation (fig. 10).

Techniques d'analyse spatiale longitudinale: ou mesure de l'intensité de la lumière guidée par le cœur de la fibre dans la méthode de «mesure du champ proche» (fig. 11), ou encore mesure de l'intensité de la lumière non guidée par le cœur de la fibre dans la méthode de «mesure du champ proche réfracté» (fig. 12).

Techniques d'analyse par réflexion de la lumière: ou mesure de l'intensité de la lumière réfléchiée par la section de la fibre. Une méthode qui applique simplement les lois fondamentales de la réflexion (lois de Fresnel).

La résolution (en valeur d'indice et spatiale) ainsi que les procédures sont différentes selon les méthodes utilisées. En effet, pour qu'une mesure d'indice de réfrac-

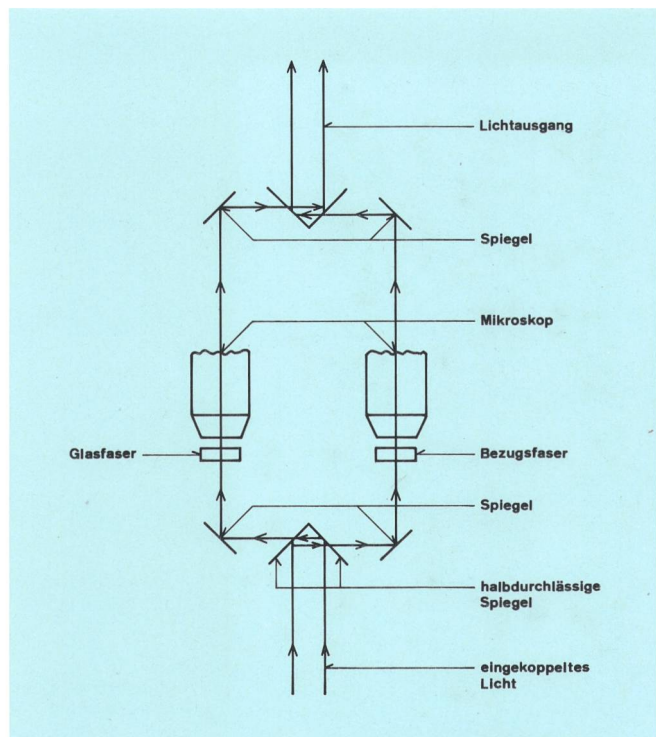


Fig. 9
 Prinzip der interferometrischen Mikroskopie (SLAB) – Principe de la microscopie interférométrique (SLAB)
 Lichtausgang – Sortie de la lumière
 Spiegel – Miroirs
 Mikroskop – Microscope
 Glasfaser – Fibre optique
 Bezugsfaser – Fibre de référence
 Halbdurchlässiger Spiegel – Miroirs semi-transparents
 Einkoppeltes Licht – Lumière incidente

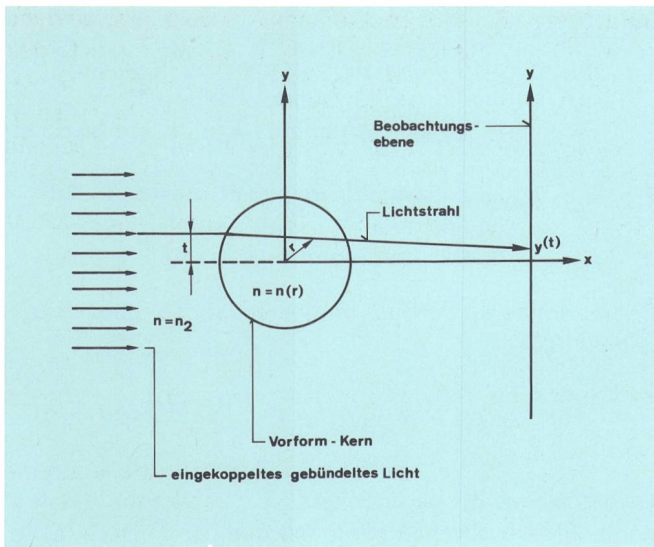


Fig. 10
Geometrische Anordnung der Fokussierungsmethode – Géométrie de la méthode de focalisation
 Eingekoppeltes gebündeltes Licht – Lumière incidente focalisée
 Vorform-Kern – Cœur de la préforme
 Beobachtungsebene – Plan d'observation
 Lichtstrahl – Rayon lumineux

werden kann, wird eine Präzision benötigt, die räumlich besser ist als ein Mikron (μm) und für den Brechungsindexwert im Bereich von 10^{-5} liegt.

Diese Forderung erfüllt die räumliche Analyse des Lichtes mit der refraktiven Nahfeldmethode. Erreicht wird dies dadurch, dass die Faser mit einem Lichtpunkt beleuchtet wird, der eine sehr grosse numerische Apertur hat ($NA \approx 0,8$) (Fig. 12).

33 Die refraktive Nahfeldmethode

Gemessen wird, indem man eine Faser in eine Flüssigkeit taucht, deren Brechungsindexwert (n_l) wesentlich grösser als jener des Fasermantels (n_{cl}) ist. Die Fasersektion wird mit einem kleinen Lichtpunkt abgetastet, der einen grossen Öffnungswinkel hat. Diesen fokussiert man auf die Faserstirnfläche. Das nicht geführte Licht im Faserkern verlässt den Mantel der Faser in die Flüssigkeit. Der Winkel, unter welchem dieses Licht in die Flüssigkeit eintritt, ist vom Brechungsindexwert abhängig, der durch die Position des Lichtpunktes auf der Fa-

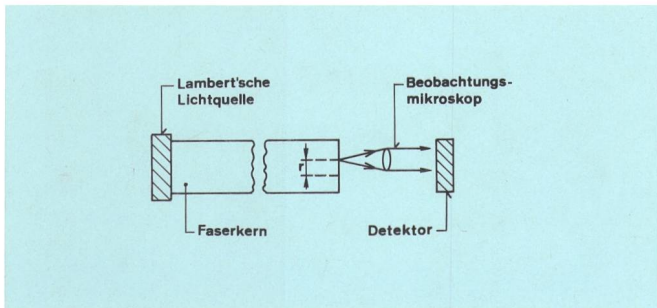


Fig. 11
Nahfeld-Messmethode – Méthode d'analyse du champ proche d'une fibre
 Lichtquelle nach Lambert – Source lumineuse lambertienne
 Faserkern – Cœur de la fibre
 Beobachtungsmikroskop – Microscope d'observation
 Detektor – Détecteur

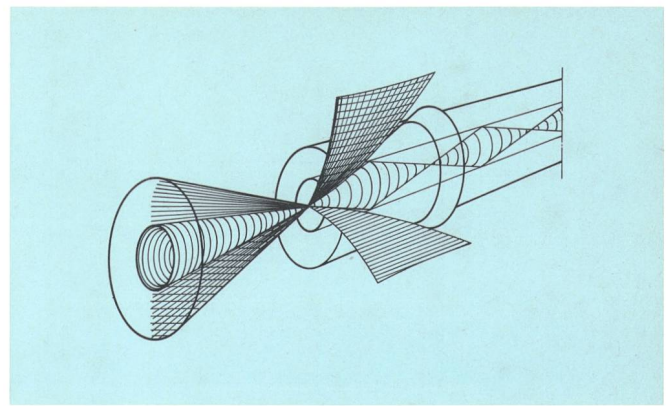


Fig. 12
 Beim refraktiven Nahfeld verlässt das Licht den Fasermantel, wenn die Lichteinkopplung unter einem grösseren Öffnungswinkel als Θ_c geschieht und die Faser in einer Anpassflüssigkeit ist – Champ proche réfracté extrait de la gaine lorsque l'injection est plus grande que l'acceptance Θ_c et lorsque la fibre est immergée dans un liquide d'indice

tion puisse être efficacement exploitée, il est nécessaire que la précision spatiale soit meilleure que le micron et que la valeur d'indice soit mesurée avec une précision de 10^{-5} .

Pratiquement la méthode répondant le mieux à ces exigences est l'analyse spatiale de la lumière non guidée dans la fibre (champ proche réfracté), alors que l'on éclaire celle-ci sous une ouverture numérique très grande ($NA \approx 0,8$, fig. 12).

33 La méthode du champ proche réfracté

La mesure est réalisée sur un échantillon de fibre plongée dans un liquide dont l'indice de réfraction n_l est plus grand que celui de la gaine optique de la fibre n_{cl} . La section de la fibre est balayée par un spot de lumière de faible diamètre obtenu par la focalisation d'un faisceau laser sous une grande ouverture. La partie de la lumière non guidée dans le cœur de la fibre sort de la gaine de la fibre dans le liquide. L'angle sous lequel la lumière émerge dans le liquide dépend de la valeur de l'indice au niveau du spot de lumière. Plus l'indice de réfraction en ce point est élevé plus l'angle de sortie α est faible. L'ouverture maximale du faisceau de lumière est donc modifiée selon la valeur de l'indice du point de mesure. La figure 13 montre, par exemple, deux cas pour $n(r)$ grand et pour $n(r)$ petit.

En plaçant un écran opaque dans le cône de lumière réfractée et en collectant la lumière en arrière de l'écran, la variation d'ouverture du cône de lumière (donc d'indice de réfraction) est enregistrée sur le détecteur comme une variation d'intensité lumineuse (fig. 14).

Le diamètre de l'écran est choisi de façon à ne laisser passer que les modes réfractés, il fixe le cône intérieur de lumière. Selon l'indice de réfraction au point de focalisation, le cône extérieur de lumière est plus ou moins ouvert. La variation de lumière collectée sur le détecteur est quasi proportionnelle à la variation d'indice de réfraction. On l'obtient par la relation suivante:

$$n_l^2 - n^2(r) \approx K \cdot \frac{P_l - P(r)}{P_l}$$

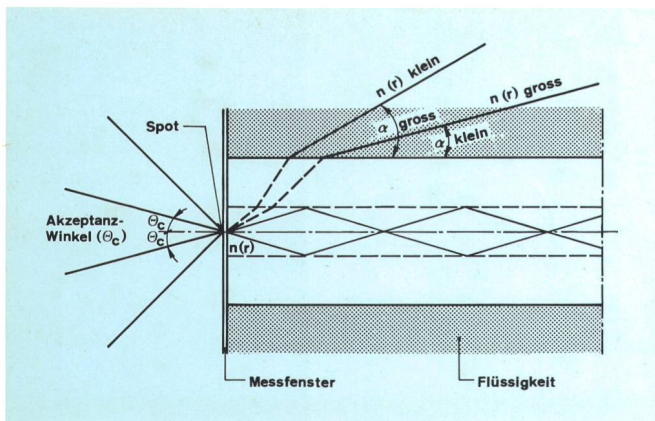


Fig. 13 Winkel (α) des Lichtes beim Austritt aus dem Fasermantel bei der refraktiven Nahfeld-Methode – Angle de sortie (α) du champ proche réfracté

- α Brechungswinkel – Angle de réfraction
- θ_c Einfallswinkel – Angle d'incidence
- Akzeptanz-Winkel – Angle d'acceptance
- klein – petit
- gross – grand
- Faserindex $n(r)$ – Fibre d'indice $n(r)$
- Messfenster – Fenêtre de mesure
- Flüssigkeit – Liquide
- α Brechungswinkel – Angle de réfraction
- θ_c Angle d'incidence

serstirnfläche gegeben wird. Je grösser der Brechungsindex an diesem Punkt ist, desto kleiner wird der Winkel α . Die maximale Öffnung des Lichtstrahls wird also gemäss dem Indexwert der Faser am Messpunkt geändert. Ein Beispiel zeigt *Figur 13* für die Fälle mit $n(r)$ gross und $n(r)$ klein.

Durch Anordnen eines undurchsichtigen Schirmes in den Konus des gebrochenen Lichtes und Sammeln des Lichtes hinter dem Schirm erhält man eine Änderung des Lichtöffnungswinkels (also des Brechungsindex), die vom Detektor wie eine Intensitätsänderung registriert wird (*Fig. 14*).

Der Durchmesser des Schirms ist so gewählt, dass er nur die gebrochenen Moden passieren lässt. Er fixiert den internen Konus des Lichtes. Entsprechend dem Brechungsindex am Fokussierpunkt wird der Konus des externen Lichtes mehr oder weniger geöffnet. Die Änderung des gesammelten Lichtes auf dem Detektor ist quasiproportional zur Änderung des Brechungsindex. Man erhält sie mit folgender Beziehung

$$n_1^2 - n^2(r) \cong K \cdot \frac{P_1 - P(r)}{P_1}$$

Es sind

- n_1 Brechungsindexwert der Flüssigkeit
- $n(r)$ Gesuchter Brechungsindexwert
- $P(r)$ Lichtleistung gemessen in Funktion von r
- P_1 Lichtleistung gemessen in der Flüssigkeit
- K Proportionalitätskonstante

Dies ergibt, wenn man sehr kleine Indexänderungen betrachtet (0,01):

$$\Delta n(r) = n_1 - n(r) \cong K' \cdot \frac{P_1 - P(r)}{P_1}$$

Die Konstante K' erhält man durch Kalibration. Sie wird bestimmt, indem der mit einem Refraktometer von *Abbe*

où

- n_1 est l'indice de réfraction du liquide
- $n(r)$ l'indice de réfraction à déterminer
- $P(r)$ la puissance lumineuse mesurée en fonction de r
- P_1 la puissance lumineuse mesurée dans le liquide seul
- K constante de proportionnalité

Ce qui donne en considérant les variations d'indice très faibles (0,01)

$$\Delta n(r) = n_1 - n(r) \cong K' \cdot \frac{P_1 - P(r)}{P_1}$$

La détermination de la constante K' constitue l'étalonnage. Elle est obtenue par le fait que l'on mesure facilement n_1 , l'indice du liquide (qui dépend de la longueur d'onde et de la température du liquide) au moyen d'un réfractomètre de *Abbe* et que l'on connaît l'indice de réfraction d'un point de la fibre, par exemple n_{cl} , celui de la silice pure du cladding (MCVD). K' est alors donné par

$$K' = \frac{(n_1 - n_{cl}) \cdot P_1}{P_1 - P_{cl}}$$

L'étalonnage peut être ainsi réalisé.

4 Concept de l'appareillage de mesure

41 Dispositif optique (*fig. 15*)

a) Le spot de lumière d'analyse est obtenu par la focalisation d'un faisceau parallèle d'un laser He-Ne. Sa dimension est de l'ordre de $0,6 \mu\text{m}$, l'ouverture maxi-

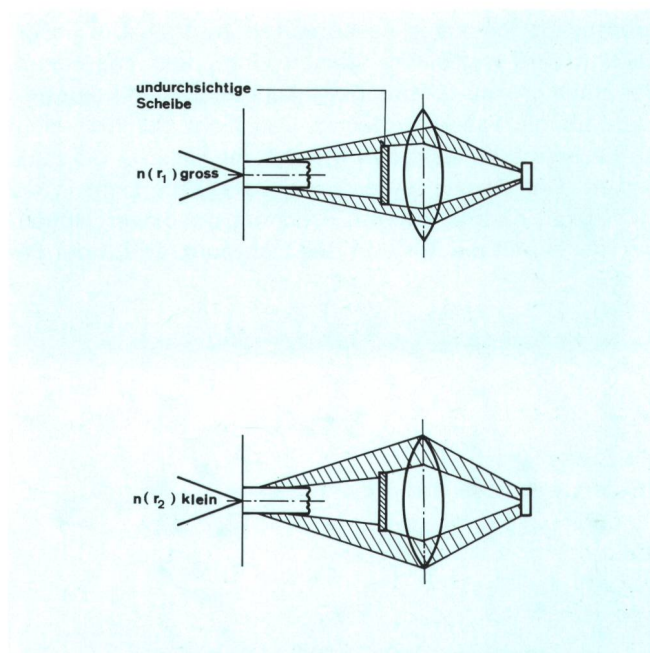


Fig. 14 Prinzip der Intensitätsmessung – Principe de la mesure de l'intensité
Gross – Grand
Klein – Petit
Undurchsichtige Scheibe – Ecran opaque
Schwach intensitätssignal – Faible intensité de signal
Grosses intensitätssignal – Grande intensité de signal

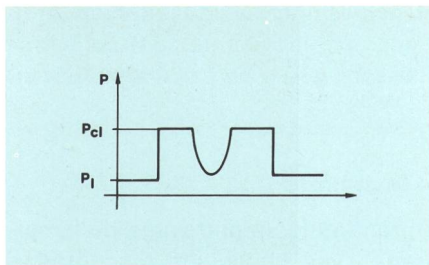


Fig. 15
Eichung – Etalonnage
Erläuterungen im Text – Explications des signes dans le texte

gemessene Brechungsindex n_1 der Flüssigkeit (er ist abhängig von der Wellenlänge und der Temperatur der Flüssigkeit) und der Brechungsindex an einem bekannten Punkt der Faser (zum Beispiel mit dem Wert des reinen Quarzglas [SiO₂ = n_{cl}] des Fasermantels [MCVD]) bekannt sind. K' erhält man also mit:

$$K' = \frac{(n_1 - n_{cl}) \cdot P_1}{P_1 - P_{cl}}$$

Anschliessend kann die Eichung stattfinden.

4 Konzept der Messapparatur

41 Optische Vorrichtung (Fig. 15)

- Den Lichtpunkt zur Analyse erhält man, indem ein paralleler Lichtstrahl eines He-Ne-Lasers fokussiert wird. Seine Grösse ist ungefähr 0,6 μm , und die maximale numerische Apertur des Lichtstrahls liegt im Bereiche von $NA \approx 0,8$. Ein Lichtteiler erlaubt den Strahl in die Richtung der Messzelle (C) zu orientieren. Ein Teil des Lichtes wird auf den Detektor (A) gegeben, der verwendet wird, um die Emission des Lasers zu stabilisieren (Fig. 16).
- Die Messzelle (C) erlaubt, die Faser vertikal gegen ein 0,17 mm dickes Fenster aus Glas zu positionieren. Sie enthält die Flüssigkeit und auch die Vorrichtung für die Detektion.
- Die Detektionsvorrichtung (D) ist ein einfacher Ringdetektor, der in die Messzelle eingebaut ist. Der Durchmesser des Lochs im Zentrum wurde so berechnet, dass nur das gebrochene Licht detektiert wird.
- Die Visualisationsvorrichtung (V) verwendet den unteren Weg des Strahlenteilers. Diese optische Vorrichtung enthält einen optischen Filter, der das Laserlicht eliminiert, und eine Linse, die ein Bild auf die TV-Kamera gibt. Die Beleuchtung des Faserkerns erhält man durch Einkoppeln von Weisslicht in Q.

42 Datenerfassung

Die Messfläche der Faser (Fenster) muss mit dem Laserstrahl zusammen positioniert werden. Die ganze Messzelle wird danach mit Hilfe von Schrittmotoren horizontal über die Faser bewegt, wobei die Schritte 0,1 μm betragen. Die Datenerfassung des detektierten Signals und der Position wird von einem Mikroprozessor gesteuert, der mit einem Rechner über den IEEE-488-Bus verbunden ist.

43 Messvorbereitungen

Zu den Vorbereitungen zählt man das Reinigen der Messzelle, das Auffüllen der Messzelle mit Anpassflüs-

male du faisceau est de l'ordre de 0,8. Un beam-splitter permet de l'orienter en direction de la cellule de mesure C, l'autre partie de la lumière étant mesurée par un détecteur en A, dans le but de stabiliser le niveau de l'émission laser (fig. 16).

- La cellule de mesure C permet de positionner la fibre verticalement contre une fenêtre de verre dont l'épaisseur est de 0,17 mm. Cette cellule contient le liquide et aussi le dispositif de détection.
- Le dispositif de détection D est un simple détecteur annulaire immergé dans la cellule. Le diamètre du trou central a été calculé de façon que seuls les modes réfractés soient collectés.
- Le dispositif de visualisation V utilise la voie inférieure du beam-splitter, cette partie du dispositif optique contient un filtre optique éliminant la lumière du laser et une lentille permettant de former une image sur la caméra TV. L'éclairage de la fibre est obtenu en injectant de la lumière blanche en Q.

42 Acquisition des données

Le plan d'analyse de la fibre (fenêtre) doit être positionné dans le plan focal de l'objectif du microscope. La cellule complète est ensuite déplacée horizontalement de façon à balayer la section de la fibre. Ce déplacement est réalisé par pas de 0,1 μm au moyen de microdépla-

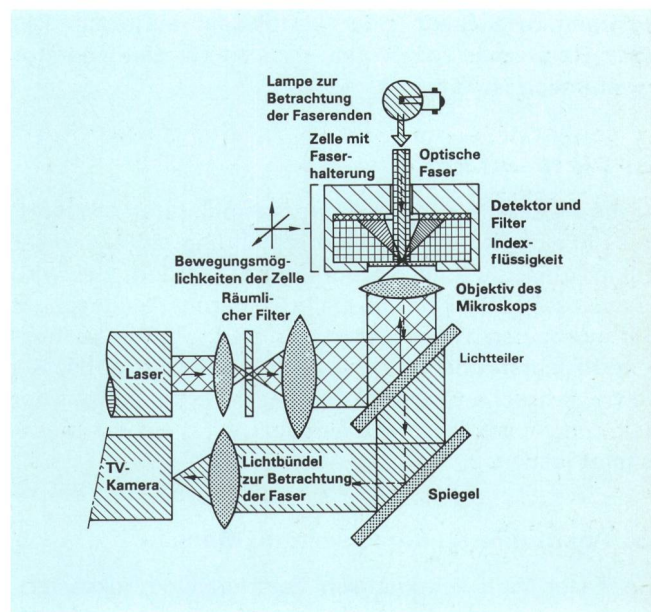


Fig. 16
Optische Vorrichtung zum Messen des Brechungsindex – Dispositif optique de mesure de l'indice de réfraction

- Lampe zur Betrachtung der Faserenden – Lampe pour l'examen des extrémités des fibres
 Glasfaser – Fibre optique
 Zelle mit Faserhalterung – Cellule avec dispositif de fixation de la fibre
 Bewegungsmöglichkeiten der Messzelle – Possibilités de déplacement de la cellule de mesure
 Detektor und Filter – Détecteur et filtre
 Indexflüssigkeit – Liquide d'indice de réfraction
 Objektiv des Mikroskops – Objectif du microscope
 Laser – Laser
 Räumlicher Filter – Filtre spatial
 Messstrahl – Faisceau de mesure
 Lichtteiler – Partiteur de lumière
 TV-Kamera – Caméra TV
 Lichtbündel zur Betrachtung der Faser – Faisceau de lumière pour examen de la fibre
 Spiegel – Miroirs

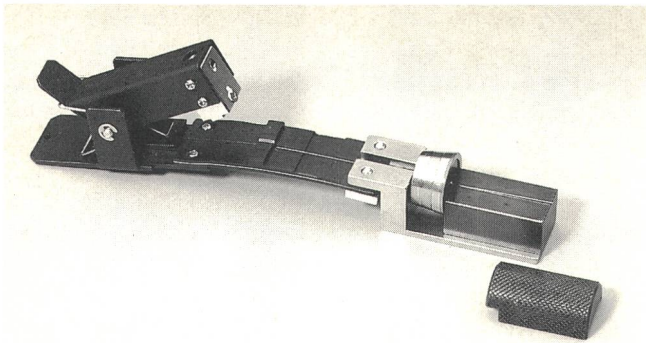


Fig. 17
Faserhalterung und Faserbrechinstrument – Porte objet et pince à
casser les extrémités de fibres

sigkeit, das Preparieren, Fokussieren und Zentrieren der
Messfaser.

431 Die Messzelle

Eine optische Messung setzt eine saubere Messzelle
voraus. Das Fenster muss vor jedem Auffüllen mit An-
passflüssigkeit gereinigt werden. Mit einer Füllung las-
sen sich jedoch viele Fasern messen.

432 Die Anpassflüssigkeit

Beim Arbeiten mit der Flüssigkeit dürfen keine Verunrei-
nigungen, wie Staub oder Luftblasen, auftreten. Die
Flüssigkeit wurde so gewählt, dass sie für den Operator
ungefährlich ist.

433 Die Messfaser

Ist die Messzelle auf den Mikromanipulatoren montiert,
so kann eine von der Primärbeschichtung befreite Faser
von einigen Zentimetern vorbereitet werden. Sie wird
anschliessend in eine spezielle Halterung eingespannt
und auf beiden Seiten gebrochen (Fig. 17). Die zu mes-
sende Faserstirnfläche muss rechtwinklig zur optischen
Achse gebrochen werden. Die Faser wird dann mit der
Halterung in die Messzelle eingebaut und auf das Mess-
fenster justiert.

434 Positionieren der Faser zum Messen

Die Faser wird automatisch zentriert und fokussiert,
wenn der Detektor ein Signal von der Faser empfängt.
Dazu ist eine manuelle Justierung nötig, die auf einem
Monitor überwacht wird. Ist die Faser darauf nicht sicht-
bar, so hat man die Möglichkeit, sie automatisch zu su-
chen.

5 Praktische Messungen und Ergebnisse

51 Messung des Brechungsindexprofils

In einem ersten Schritt wird die Lichtintensität des re-
fraktiven Nahfeldes auf einem Ringdetektor in Abhän-
gigkeit der Faserposition gemessen (Fig. 18). Die relative
Intensitätsänderung eines jeden Messpunktes ist direkt
proportional zur Brechungsindexänderung. Sind die Bre-
chungsindexwerte der Anpassflüssigkeit (n_1) und des Fa-

cerents motorisés. L'acquisition du signal détecté et le
positionnement des microdéplacements sont comman-
dés par un microprocesseur relié à un ordinateur par un
bus IEEE 488.

43 Préparation de la mesure

Sont inclus dans les préparatifs: le nettoyage de la cel-
lule et son remplissage avec un liquide d'adaptation
d'indice, la préparation, la focalisation et le centrage de
l'échantillon de la fibre à mesurer.

431 Cellule de mesure

Dans le contexte optique de la mesure, une très grande
propreté est indispensable. La fenêtre doit être nettoyée
lors de chaque remplissage. Un remplissage de liquide
permet cependant de mesurer un grand nombre de
fibres.

432 Liquide d'adaptation d'indice

Pendant la manutention, le liquide ne doit pas subir de
pollutions par des poussières ou des bulles d'air. Le
liquide a été choisi pour être sans danger pour l'opéra-
teur.

433 Echantillon de fibre à mesurer

Après avoir monté la cellule sur les microdéplacements,
un échantillon de fibre de quelques centimètres sans
premier coating peut-être préparé. Il est glissé dans le
porte-objet ad hoc et ses deux extrémités sont simple-
ment cassées (fig. 17). La cassure de la section qui sera
mesurée doit être perpendiculaire à l'axe optique de la
fibre et d'une qualité de surface raisonnable. La fibre et
son porte-objet sont ensuite positionnés sur la cellule de
mesure. La fibre est alors poussée contre la fenêtre de
la cellule, puis immobilisée.

434 Positionnement de la fibre à mesurer

Un centrage et une focalisation automatiques de la fibre
sont réalisés dès l'instant où le détecteur détecte la pré-
sence de la fibre. Cet ajustage grossier se fait manuelle-
ment en observant l'extrémité de la fibre sur un moni-
teur TV. Parfois, elle n'apparaît pas sur le moniteur TV,

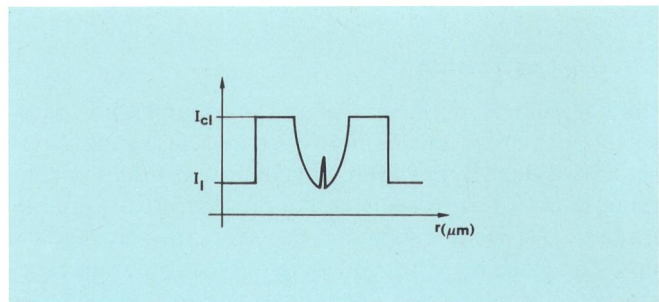


Fig. 18
Lichtintensitätsprofil des refraktiven Nahfeldes auf dem Ringdetek-
tor. Beispiel: Gradientenindexfaser – Profil d'intensité du champ
proche réfracté sur le détecteur circulaire. Exemple: fibre gradient
d'indice

I_{cl} Lichtintensität im Mantel – Intensité lumineuse dans la gaine

I_1 Lichtintensität in der Flüssigkeit – Intensité lumineuse dans le liquide

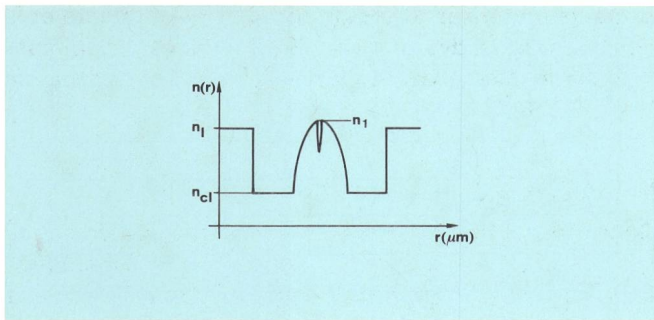


Fig. 19
Brechungsindexprofil der Gradientenfaser – Profil d'indice de réfraction de la fibre à gradient d'indice
 n_1 Brechungsindex der Flüssigkeit – Indice de réfraction du liquide

sermantels (n_{cl}) bekannt, so kann nach der Kalibrierung das Lichtintensitätsprofil in ein Brechungsindexprofil umgewandelt werden (Fig. 19).

52 Brechungsindexprofile unterschiedlicher Faserarten

Der Verlauf eines Brechungsindexprofils einer Glasfaser wird auch durch die Methode der Vorformherstellung bestimmt. Jede Methode hat ihre ganz spezifischen Eigenarten (Fig. 20...25), die sich im Brechungsindexprofil widerspiegeln. Nachfolgend werden zu den Vorformherstellungsmethoden die Indexprofile gezeigt.

521 Verschiedene Gradientenindexfaserprofile

Der Kern einer Gradientenindexfaser hat ungefähr ein parabelförmiges Brechungsindexprofil.

Innenabscheideverfahren (Fig. 20, 21a und 21b). Der Mantelbrechungsindex ist durch den Brechungsindex des Substratrohres aus Quarzglas (SiO_2) gegeben. Die Beschichtung beginnt mit einem Innenmantel. Im Falle von MCVD werden die einzelnen Schichten nacheinander abgelagert ($\approx 70\text{...}100$ Schichten). Nach jeder Schicht wird der Brechungsindex erhöht.

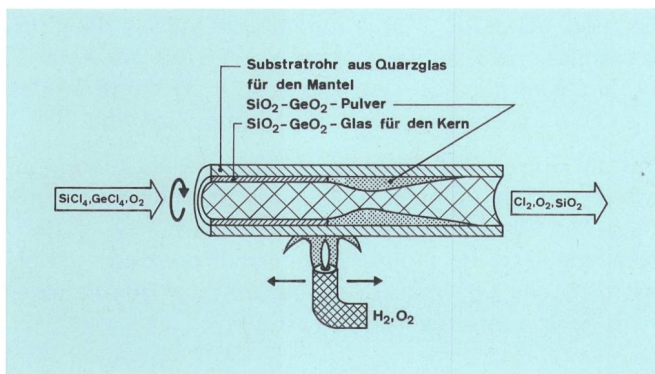


Fig. 20
Herstellen einer Faservorform. Beim PCVD-Verfahren wird die Flamme (Wärme) durch einen RF-Generator ersetzt – Fabrication d'une préforme par le procédé de la déposition interne. Dans la déposition PCVD, la flamme (chaleur) est remplacée par un générateur RF
 $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$ -Glas für den Kern – Verre $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$ pour le cœur
 $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$ -Pulver – Poudre de $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$
 Substratrohr aus Quarz für den Mantel – Tube de substrat en quartz pour la gaine

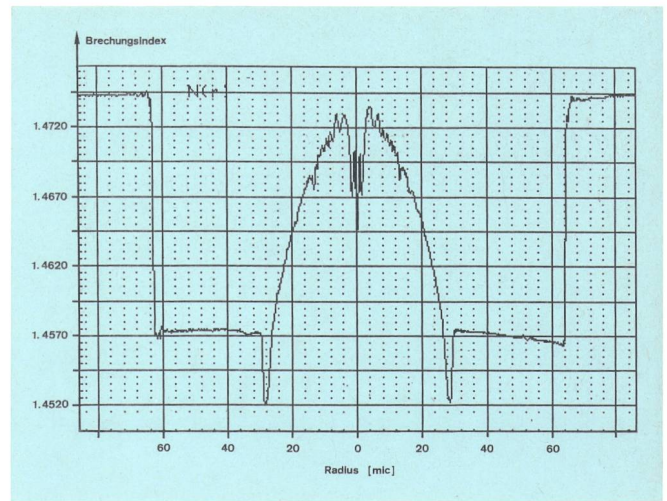


Fig. 21 a
Faserprofil einer MCVD-Vorform – Profil d'une fibre obtenue par la méthode MCVD
 Substratstab – Tige de substrat
 Pulver für Kern und Mantel – Poudre pour le cœur et la gaine

dans ce cas une procédure de recherche automatique peut aider l'opérateur à amener la fibre dans son champ de vision.

5 Mesures pratiques et résultats

51 Mesure du profil d'indice de réfraction

Dans une première phase, l'intensité de la lumière du champ proche réfracté est mesurée, sur le détecteur annulaire, en fonction de la position de la fibre (fig. 18). La variation relative de l'intensité en chaque point est directement proportionnelle à la variation de l'indice de réfraction. Comme les valeurs d'indice de réfraction du liquide (n_l) et du cladding (n_{cl}) sont connues, il est alors possible de réaliser un étalonnage et de tirer le profil d'indice de réfraction à partir du profil d'intensité détecté (fig. 19).

52 Profils d'indice de plusieurs types de fibres

La forme du profil d'indice de réfraction d'une fibre dépend aussi de la méthode de fabrication des préformes. Chaque procédé de fabrication présente ses propres caractéristiques (fig. 20...25), qui sont identifiables dans chaque profil. L'influence des différents procédés sur les profils d'indice est illustrée ci-après.

521 Différents profils de fibres à gradient d'indice

Le cœur d'une fibre à gradient d'indice présente un profil d'indice quasi parabolique.

Procédés de déposition interne (fig. 20, 21a et 21b). L'indice de réfraction du cladding est donné par l'indice de réfraction du substrat (tube) en verre de quartz (SiO_2). La première couche est un cladding intérieur. Dans le procédé MCVD les couches sont déposées l'une après l'autre (environ 70...100 couches). L'indice de chaque couche est augmenté par rapport à celui de la couche précédente de façon à obtenir le profil désiré.

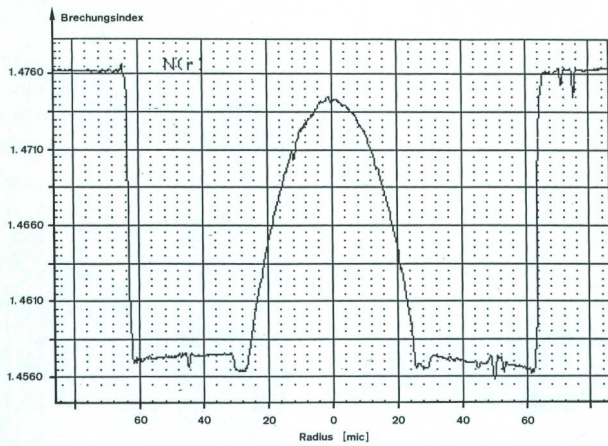


Fig. 21 b
Faserprofil einer PCVD-Vorform – Profil d'une fibre obtenue par la méthode PCVD

Im Falle von PCVP wächst die Schicht kontinuierlich. Nach der Abscheidung wird das Rohr zum kreisrunden Stab kollabiert. Während des Kollabierens kann ein Teil der Dotierung von der letzten Schicht verdampfen. Dies hat zur Folge, dass in der Mitte des Kerns eine Indexänderung entsteht (Fig. 21a).

Aussenabschleifverfahren (Fig. 22 und 23). Mantel und Kern werden mit einzelnen Schichten hergestellt. Diese lagert man auf einen Keramikstab als Substrat ab. Der Übergang Mantel/Kern ist nicht genau definiert. Der

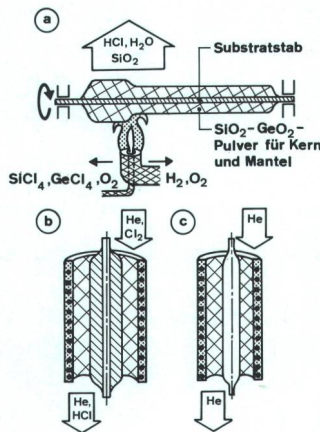


Fig. 22
Herstellen einer Faservorform nach dem Aussenabschleifverfahren (a) mit anschließendem Trocknen (b) und Sintern (c) – Fabrication d'une préforme par un procédé de déposition externe (a), déshydratation au chlore (b), fermeture (c)

Substratstab – Tige de substrat

Pulver für Kern und Mantel – Poudre pour le cœur et la gaine

Cl ₂	Chlor – Chlore
GeCl ₄	Germaniumtetrachlorid – Tétrachlorure de Germanium
H ₂	Wasserstoff – Hydrogène
HCl	Chlorwasserstoff – Acide chlorhydrique
He	Helium – Hélium
O ₂	Sauerstoff – Oxygène
SiCl ₄	Siliziumtetrachlorid – Tétrachlorure de silicium
SiO ₂	Siliziumdioxid – Dioxyde de silicium

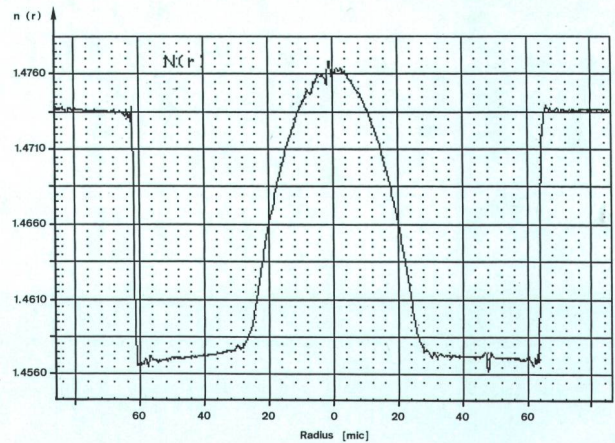


Fig. 23
Profil einer OVD-Vorform – Profil d'une fibre obtenue par la méthode OVD

Dans le processus PCVD la couche déposée croît de façon continue. La déposition terminée, le tube est collapsé pour devenir un barreau. Pendant cette opération une partie du dopage de la dernière couche peut être évaporé. Cet effet provoque un changement brusque d'indice de réfraction au centre du cœur (fig. 21a).

Procédés de déposition externe (fig. 22 et 23). Le cladding et le cœur sont déposés par couches successives sur un fin bâton de céramique agissant comme substrat. La frontière cladding-cœur n'est pas définie exactement. L'indice de réfraction du cladding dépend du dopage. Cette méthode ne provoque aucun saut d'indice.

Procédés de déposition axiale (fig. 24 et 25). Cœur et cladding sont déposés simultanément. Le substrat est un disque tournant. Remarquons que les profils OVD et VAD se ressemblent beaucoup. Le profil d'indice donne indirectement une information sur la qualité de la transmission, principalement sur la bande passante.

522 Profil des fibres monomodes

En règle générale, la fibre monomode utilisée dans des transmissions avec de la lumière à 1,3 μm présente un profil à saut d'indice. Les figures 26 et 27 montrent des formes de profil typiques d'une fibre monomode.

Partant du profil d'indice de réfraction il est théoriquement possible de calculer tous les paramètres de guidage des fibres (longueur d'onde de coupure λ_c, dispersion, diamètre du mode). L'important pour ces calculs est d'obtenir une mesure de qualité pour que l'étalonnage puisse être réalisé sans erreur.

53 Mesures des paramètres géométriques d'une fibre optique

Afin de déterminer les diamètres du cœur et du cladding, toute une série de balayages doivent être effectués sur la même section de la fibre. La figure 28 montre schématiquement comment se réalise cette mesure.

Brechungsindex des Mantels hängt von der Dotierung ab.

Axialabscheideverfahren (Fig. 24 und 25). Kern und Mantel werden gleichzeitig hergestellt. Das Substrat ist eine runde Scheibe. Die Profile von OVD und VAD sind ähnlich. Das Brechungsindexprofil sagt indirekt etwas über die Übertragungsgüte der Bandbreite einer Glasfaser aus.

522 Monomodeglasfaserprofile

Im allgemeinen besitzt die Monomodefaser für eine Übertragungswellenlänge von $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$ ein Stufenindexprofil. Die Figuren 26 und 27 zeigen deren typische Profilformen.

Aus einem Brechungsindexprofil kann man theoretisch alle Wellenleiterparameter berechnen (Grenzwellenlänge λ_c , Dispersion, Modenfelddurchmesser $2w_0$). Voraussetzung für diese Berechnung ist eine gute Brechungsindexprofilmessung, damit die Eichung ohne Fehler vorgenommen werden kann.

53 Messen der geometrischen Eigenschaften einer Glasfaser

Zur Bestimmung der Kern- und Manteldurchmesser wird eine ganze Schar von Brechungsindexprofilen an derselben Glasfaser gemessen. Fig. 28 zeigt schematisch, wie eine solche Messung durchgeführt wird.

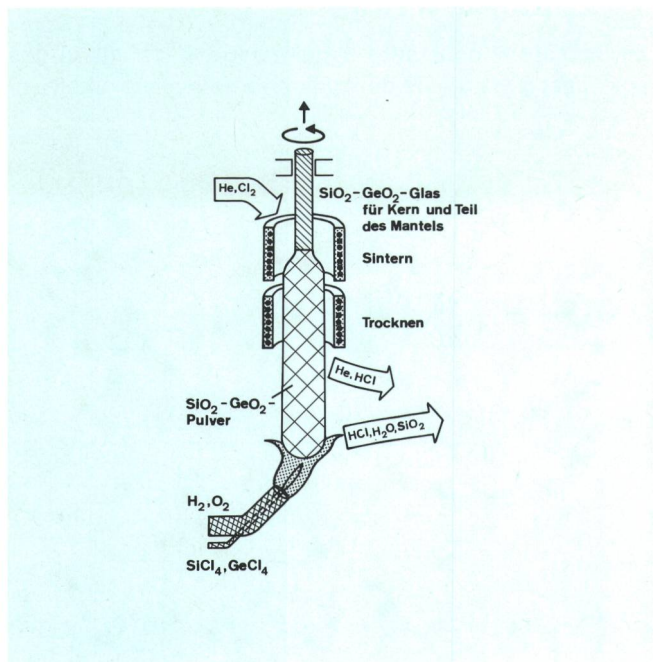


Fig. 24
Herstellen einer Faservorform nach dem Axialabscheideverfahren – Fabrication d'une préforme selon le procédé de déposition axiale
Glas für Kern und Teil des Mantels – Verre pour le cœur et une partie de la gaine

Sintern – Frittage
Trocknen – Séchage
Pulver – Poudre

Cl Chlor – Chlore
GeCl₄ Germaniumtetrachlorid – Tétrachlorure de Germanium
H₂ Wasserstoff – Hydrogène
HCl Chlorwasserstoff – Acide chlorhydrique
He Helium – Hélium
O₂ Sauerstoff – Oxygène
SiCl₄ Siliziumtetrachlorid – Tétrachlorure de silicium

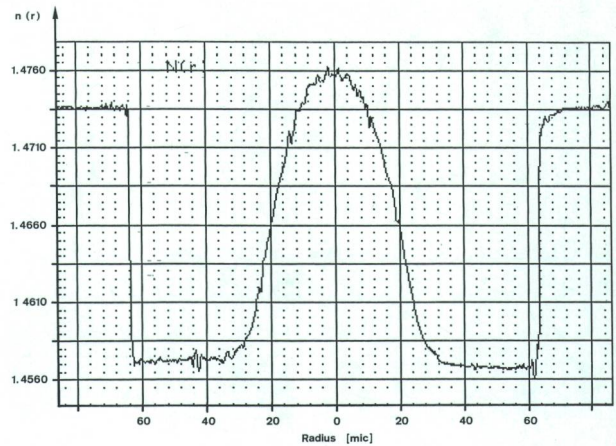


Fig. 25
Faserprofil einer VAD-Vorform – Profil d'une fibre obtenue par la méthode VAD

531 Diamètre du cladding

Tous les points de mesure donnant le bord du cladding ont été choisis à 50 % de la différence d'indice de réfraction entre le liquide et le cladding. Chaque point est donné par ses coordonnées, l'appareillage permet des pas de coordonnées de $0,1 \mu\text{m}$ (fig. 29).

532 Diamètre du cœur

Le diamètre du cœur d'une fibre multimode est défini par la plus petite surface inscrite dans une ligne de niveau d'indice de réfraction donnée comme suit: $n = n_2 + k(n_1 - n_2)$; ou n_1 est l'indice maximal du cœur et n_2 l'indice du cladding dans le voisinage proche du cœur, k est une constante avec la valeur de 0,05 (fig. 30).

La face de la section de la fibre est balayée dans les directions x et y. A chaque balayage correspond un profil d'indice de réfraction. Après chaque mesure, on cherche le passage entre le liquide et le cladding et en-

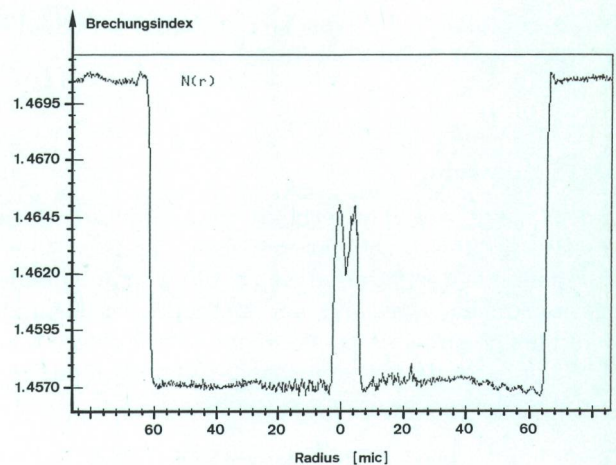


Fig. 26
Angepasstes Profil. Brechungsindex von Mantel- und Kernzone sind angepasst – Profil adapté. Les indices de réfraction de la gaine et du cœur sont adaptés

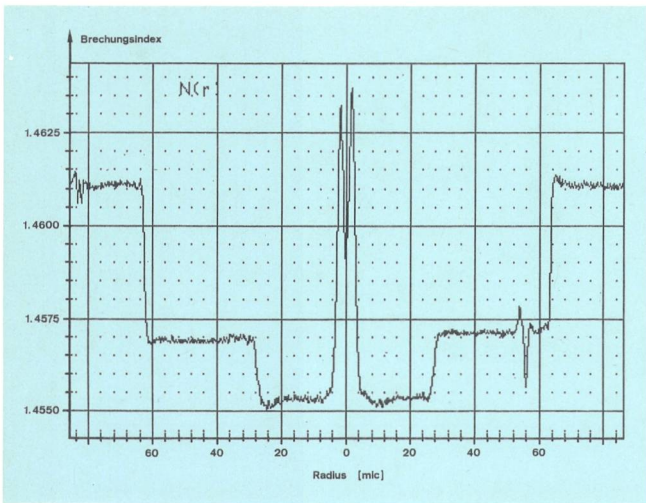


Fig. 27
Vertieftes Profil einer Monomode-Faser. Brechungsindex von Mantel- und Kernzone sind nicht angepasst – Profil à gaine enfoncée d'une fibre monomode. Les indices de réfraction de la gaine et du cœur ne sont pas adaptés

531 Manteldurchmesser

Alle Messpunkte des Mantels werden bei 50 % der Brechungsindexdifferenz von Mantel und Anpassflüssigkeit bestimmt. Das Gerät erlaubt einen Koordinatenschritt von $0,1 \mu\text{m}$ (Fig. 29).

532 Kerndurchmesser

Der Kern einer Multimodefaser ist der zentrale Bereich, der für die Lichtübertragung vorgesehen ist (Fig. 30). Er ist definiert durch die kleinste Querschnittfläche, die von einer Linie umschlossen wird, für die die Brechzahl $n = n_2 + k(n_1 - n_2)$ ist. Dabei ist n_1 die grösste Brechzahl im Kern, n_2 die Brechzahl im Mantel in unmittelbarer Umgebung des Kerns und k eine Konstante mit dem Wert 0,05.

Die Glasfaseroberfläche wird in X- und Y-Richtung abgetastet. Bei jeder Abtastung entsteht ein Brechungsindexprofil. Nach jeder Messung wird untersucht, wo die Übergänge Kern/Mantel und Anpassflüssigkeit/Mantel sind. Dies ergibt die Messpunkte für Kern und Mantel einer Glasfaser mit den Koordinaten x, y (Fig. 31).

533 Auswertung

Figur 31 zeigt die Punkteschar, die den Kern-beziehungsweise den Manteldurchmesser darstellt. Dieser wird dadurch bestimmt, dass in die entsprechenden Messpunkte ein Kreis mit der Methode des kleinsten Quadrates gelegt wird. Damit können der mittlere Manteldurchmesser (D), der statistische Fehler und das Zentrum des Mantels bestimmt werden.

Der Kerndurchmesser wird dadurch bestimmt, dass in die entsprechenden Messpunkte eine Ellipse oder ein Kreis mit der Methode des kleinsten Quadrates gelegt wird. Dadurch erhält man den Kerndurchmesser (d), den statistischen Fehler und das Zentrum des Kerns.

tre le cladding et le cœur. Cela donne les points de mesure pour les bords du cœur et du cladding, exprimés par leurs coordonnées x et y (fig. 31).

533 Mise en valeur des résultats

La figure 31 présente l'ensemble des points qui marquent les bords du cladding et du cœur à partir desquels les diamètres seront déterminés. Dans le cas du cladding, on détermine le meilleur cercle passant par tous les points, en utilisant la méthode des moindres carrés. Cela permet de calculer le diamètre moyen D , l'erreur statistique et les coordonnées du centre.

Dans le cas du cœur, on détermine le meilleur cercle ou la meilleure ellipse par la méthode des moindres carrés. On obtient alors le diamètre moyen du cœur (d), son erreur statistique ainsi que les coordonnées du centre.

534 Erreur de concentricité cœur-cladding

Comme les coordonnées des centres sont connues, il est aussi possible de calculer l'erreur de concentricité cœur-cladding. C'est la distance entre le centre optique du cœur (cercle de diamètre d) et le centre géométrique du cladding (cercle de diamètre D). Elle doit être plus petite ou égale à $3 \mu\text{m}$.

54 Ouverture numérique maximale (NA) d'une fibre à gradient d'indice

En utilisant la constante d'étalonnage K' définie ci-dessus, il est possible de déterminer la valeur maximale (n_1)

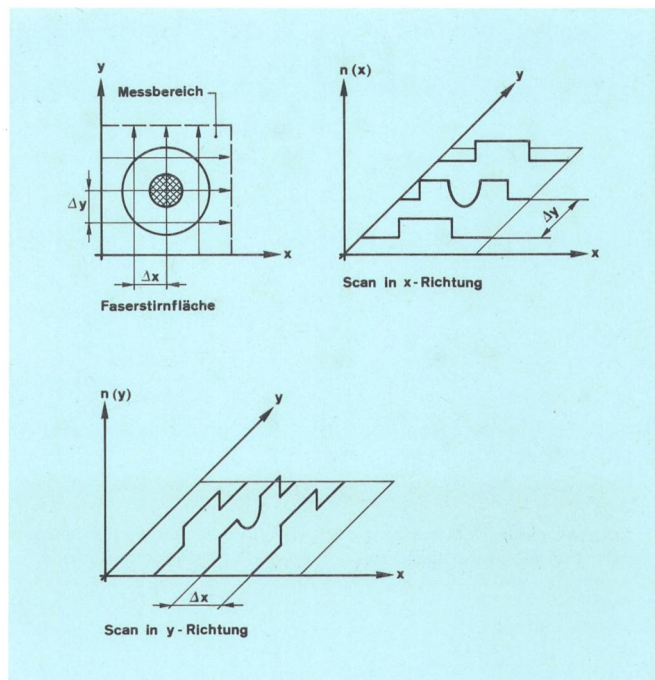


Fig. 28
Mehrfachabtastung – Balayages multiples
Messbereich – Plage de mesure
Faserstirnfläche – Surface frontale de la fibre
Scan in X-Richtung – Relevé selon l'axe X
Scan in Y-Richtung – Relevé selon l'axe Y

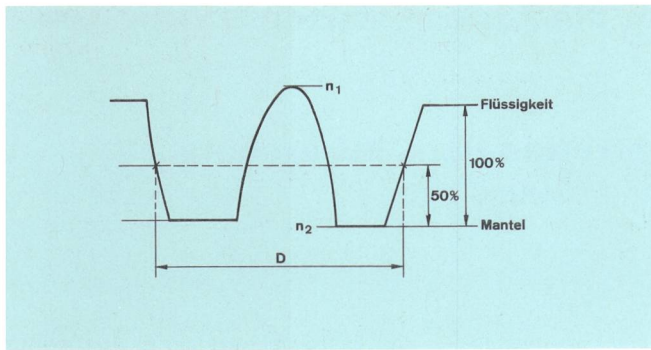


Fig. 29
Définition des Manteldurchmessers – Definition du diamètre de la gaine
 Flüssigkeit – Liquide
 Mantel – Gaine

534 Konzentritätsfehler von Mantel- und Kerndurchmesser

Sind die Koordinatenpunkte der Kern- und Mantelmitten bekannt, so kann der Konzentritätsfehler von Mantel- und Kerndurchmesser berechnet werden. Der Abstand zwischen dem optischen Zentrum des Kerns, d. h. dem Zentrum des Kreises mit Durchmesser (d), und dem geometrischen Zentrum des Mantels soll kleiner oder gleich $3 \mu\text{m}$ sein.

54 Maximale numerische Apertur (NA) einer Gradientenindexfaser

Ist die Kalibrierungskonstante (K) eines Gradientenindexfaserprofils bekannt, so lässt sich der maximale Brechungsindex des Faserkerns (n_1) bestimmen (Definition der numerischen Apertur in Abs. 21).

Aus dem Brechungsindexwert des Kerns (n_1) und des Mantels (n_2) kann die maximale numerische Apertur (NA) einer Gradientenindexfaser berechnet werden (siehe auch Fig. 30).

6 Schlussbemerkungen

Die Messung des Brechungsindexprofils einer Glasfaser war bis vor kurzem nur unter labormässigen Voraussetzungen durchführbar. Das vorgestellte Gerät macht es möglich, gleich gute Messresultate mit einem industriell gefertigten Gerät zu erhalten. Die empfindlichsten Messvorgänge sind in diesem Gerät automatisiert. Dadurch erhält man eine gute Reproduzierbarkeit des Messresultates und eine kurze Messzeit.

Die Entwicklung eines solchen Gerätes entstand in Zusammenarbeit von Industrie und PTT und führte zu einem Produkt, das auch exportiert werden kann.

Bibliographie

- Marcuse D. and Presby H. M. Index Profile Measurements of Fibers and their Evaluation Proceedings of the IEEE, New York 68 (1980) 6, p. 666.
- Nachrichtenübertragung mit Licht. Telecom Report, München, 6 (1983); Beiheft.

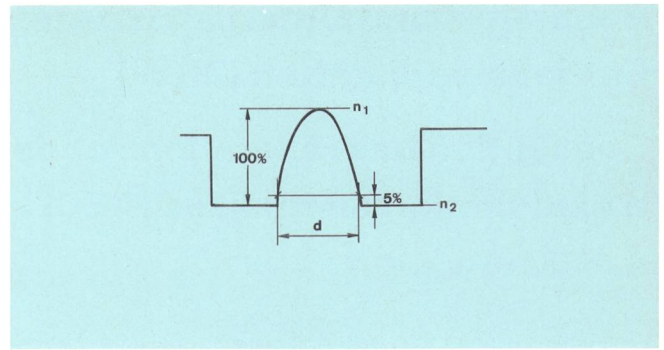


Fig. 30
Définition des Kerndurchmessers – Definition du diamètre du cœur

de l'indice de réfraction au centre du cœur (pour la définition de NA voir 21).

De cette valeur d'indice et connaissant celle du cladding (n_2) on calcule alors la valeur d'ouverture numérique maximale de la fibre (voir aussi fig. 30).

6 Conclusions

La mesure de profil d'indice de réfraction d'une fibre était considérée, il n'y a guère de temps, comme une manipulation de laboratoire. On a voulu montrer dans cet article qu'il est aussi possible d'obtenir un bon résultat avec un appareillage industriel. Les opérations difficilement maîtrisables ont été automatisées pour garantir une bonne reproductibilité des résultats et obtenir un temps de mesure relativement court.

La réussite d'un tel appareillage est le fruit d'une collaboration entre l'industrie et les PTT, elle a conduit à la réalisation d'un produit d'exportation.

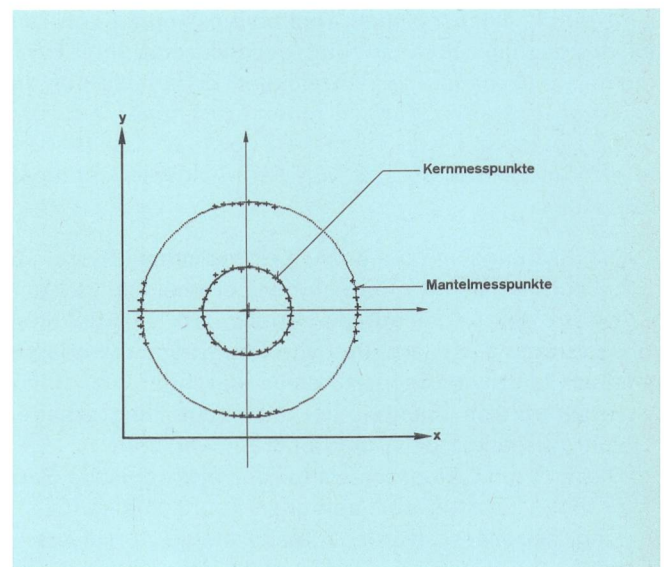


Fig. 31
Messpunkte für Kern- und Mantelgeometrie – Points de mesures pour le cœur et la gaine
 Kernmesspunkte – Points de mesure du cœur
 Mantelmesspunkte – Points de mesure de la gaine