

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: 68 (1990)

Heft: 6

Artikel: Recherche d'un profil d'indice optimal pour des fibres optiques monomodes = Entwicklung eines optimalen Stufenindexprofils für Monomode-Glasfasern

Autor: Cochet, François / Leuenberger, Bernhard

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-876207>

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: 29.04.2026

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

Recherche d'un profil d'indice optimal pour des fibres optiques monomodes*

Entwicklung eines optimalen Stufenindexprofils für Monomode-Glasfasern*

François COCHET et Bernard LEUENBERGER, Cortaillod

Zusammenfassung. Bei Übertragungen mit Monomode-Glasfaserkabeln im dritten Fenster (1525 nm – 1575 nm) spielen die Faserbiegungen eine nicht unwesentliche Rolle bezüglich der Dämpfung des Lichtes in einem Kabel. Die Autoren haben eine Studie durchgeführt, die die Optimierung der in der Schweiz produzierten Monomode-Glasfasern im zweiten und im dritten Fenster erlaubt. Es wurden zwei Brechzahlprofile gefunden, das eine nicht angepasst, mit kleinem Modenfelddurchmesser, das andere angepasst, mit leicht erhöhtem Modenfelddurchmesser. Die Studie hat gezeigt, welche Biegungen für die Dämpfungszunahme während des Verkabelns oder in einem Temperaturzyklus verantwortlich sind.

Résumé. Lorsqu'on utilise la troisième fenêtre (1525 nm – 1575 nm) pour transmettre des signaux sur des câbles à fibres optiques monomodes, la courbure des fibres joue un rôle non négligeable en ce qui concerne l'affaiblissement de la lumière. Les auteurs ont mené une étude permettant d'optimiser les fibres optiques monomodes produites en Suisse pour les transmissions dans la deuxième et la troisième fenêtre. On a trouvé deux profils de réfraction, l'un non adapté, avec un faible diamètre de champ modal, l'autre adapté, avec un diamètre de champ modal légèrement supérieur. L'étude a montré quelles courbures provoquaient une augmentation de l'affaiblissement pendant le câblage ou durant un cycle de températures.

Ricerca di un profilo d'indice graduale ottimale per fibre ottiche monomodali

Riassunto. Nell'ambito della trasmissione su cavi in fibra ottica monomodale nella terza finestra (1525 nm – 1575 nm), le curvature hanno un influsso importante sull'attenuazione della luce nel cavo. L'obiettivo dello studio realizzato dagli autori è l'ottimizzazione della trasmissione, nella seconda e nella terza finestra, mediante le fibre ottiche monomodali prodotte in Svizzera. Sono stati trovati due profili dell'indice di riflessione: il primo non adattato, con un diametro del campo modale piccolo, e il secondo adattato, con un diametro del campo modale leggermente più grande. Lo studio ha mostrato quali curvature determinano l'aumento dell'attenuazione durante il cablaggio o in un ciclo di temperatura.

1 Introduction

Les fibres optiques monomodes ont été introduites à titre régulier dans le réseau téléphonique des PTT suisses en 1985 et ont fait alors l'objet de spécifications provisoires. Celles-ci portaient uniquement sur les performances des fibres dans la deuxième fenêtre de transmission, pour des longueurs d'onde allant de 1275 à 1325 nm. Les valeurs maximales d'atténuation et de dispersion chromatique étaient fixées à 0,5 dB/km et 6 ps nm⁻¹ km⁻¹. Le diamètre modal et la longueur d'onde de coupure devaient être maintenus dans les limites de 9,5 à 10,5 µm (profil ajusté) et 1100 à 1250 nm respectivement. Plus de 20 000 km de fibres satisfaisant à ces spécifications ont été livrées par *Cabloptic* entre 1985 et 1988.

Depuis lors, les Administrations groupées au sein du Comité consultatif international télégraphique et téléphonique (CCITT) se sont également intéressées à la troisième fenêtre de transmission, de 1525 à 1575 nm. L'atténuation des fibres devait donc être spécifiée et garantie. Comme les producteurs de fibres optiques annoncent actuellement des performances sensiblement plus élevées qu'en 1985, les nouvelles spécifications [1] s'accompagnent d'une réduction de l'atténuation maximale dans la deuxième fenêtre (jusqu'à 0,40 dB/km entre 1285 et 1330 nm, par exemple). En revanche, la spécification de la dispersion chromatique reste pratiquement inchangée. Les mesures effectuées en contrôle de

1 Einleitung

Monomode-Glasfasern werden seit 1985 im Telefonnetz der Schweizerischen PTT-Betriebe eingesetzt. Seit diesem Zeitpunkt besteht ebenfalls ein provisorisches Pflichtenheft für Glasfaserkabel. Die darin festgelegten Spezifikationen betreffen ausschliesslich das zweite optische Übertragungsfenster d.h. den Wellenlängenbereich von 1275 bis 1325 nm. Der maximale Dämpfungskoeffizient wurde seinerzeit auf 0,5 dB/km festgelegt, der Wert für die chromatische Dispersion auf weniger als 6 ps nm⁻¹ km⁻¹. Der Modenfelddurchmesser und die Grenzwellenlänge mussten sich innerhalb der Grenzwerte 9,5 und 10,5 µm (für ein angepasstes Profil) bzw. 1100 und 1250 nm bewegen. Über 20 000 km Glasfasern, die diesen Spezifikationen entsprachen, wurden von *Cabloptic* zwischen 1985 und 1988 geliefert.

In der Zwischenzeit begannen die verschiedenen, beim beratenden Ausschuss der Internationalen Fernmeldeunion (CCITT) zusammengeschlossenen Administrationen sich auch für das dritte Übertragungsfenster im Bereich von 1525 bis 1575 nm zu interessieren. Auch dort musste ein Dämpfungswert spezifiziert und garantiert werden. Da die Glasfaserhersteller heute wesentlich bessere Produkte anpreisen als 1985, sind im neuen Pflichtenheft [1] ebenfalls die Werte für die Faserdämpfung im zweiten optischen Fenster reduziert worden (Dämpfungskoeffizient < 0,40 dB/km im Bereich zwischen 1285 und 1330 nm). Die Spezifikation für die chro-

* Projet partiellement financé par les PTT suisses dans le cadre du programme de recherche

* Die Arbeit wurde von den PTT-Betrieben als Forschungsprojekt mitfinanziert

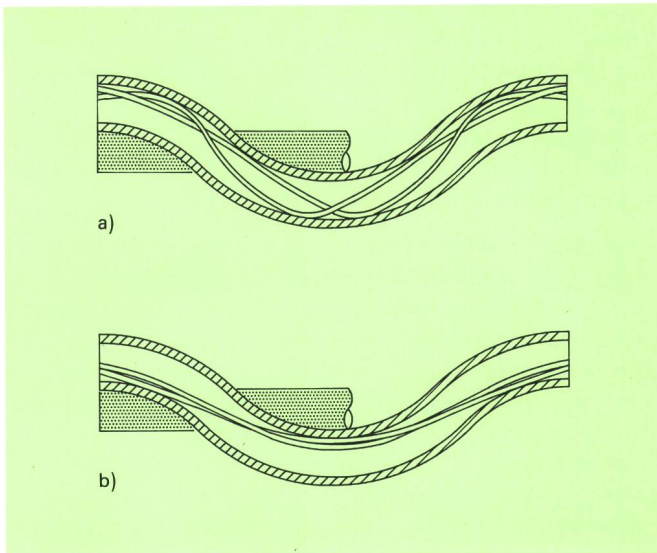


Fig. 1
Comportement mécanique des fibres optiques dans un câble à faisceaux tubés – Mécanisches Verhalten der lose ummantelten Glasfasern in einem Kabel

- a) En compression longitudinale – Unter Längsdruck
- b) En traction – Unter Zug

production à Cabloptic ont montré que les fibres de la génération de 1985 à 1988 avaient déjà de bonnes atténuations à 1550 nm ($< 0,30$ dB/km). Ces valeurs étaient toutefois susceptibles de modifications importantes et imprévisibles lors du câblage. La garantie d'une valeur définie d'atténuation en câble était, jusqu'à nouvel avis, impossible. Le présent travail avait pour but la suppression de cette impossibilité.

2 Problèmes liés aux excès d'atténuation en troisième fenêtre

21 Deux types de courbures influençant la transmission

Dans un câble à structure tubée, les fibres peuvent subir différents types de courbures aléatoires selon l'état mécanique du câble. La figure 1 montre les différentes trajectoires que peuvent suivre deux fibres dans un tube câblé en hélice selon que le câble est en compression ou en traction. Le tableau I résume schématiquement les mécanismes favorisant la courbure des fibres. On distingue habituellement deux types de courbures:

Les *macrocourbures* qui sont des courbures caractérisées par des rayons allant jusqu'à 100 mm engendrant une perte de guidage partielle du mode fondamental. Ce type de courbure peut résulter du câblage ou d'un flambage. Par un choix convenable du pas de l'hélice de câblage on peut limiter l'effet de celui-ci. En revanche, les effets de flambage restent aléatoires et importants.

Les *microcourbures* consistent en une succession de courbures alternées de rayons continûment variable et de faible amplitude qui engendrent des pertes par fluctuation des conditions de guidage. Ce type de courbures peut se rencontrer lorsqu'une fibre subit des contraintes latérales en s'appuyant sur une surface rugueuse ou sur un objet de dimension comparable au diamètre de la fibre (par exemple une autre fibre). On peut diminuer l'ef-

fective Dispersion hingegen blieb praktisch unverändert. Messungen für die Produktionskontrolle bei Cabloptic haben gezeigt, dass die Fasern aus der Generation 1985 bis 1988 bereits gute Dämpfungswerte bei 1550 nm erreichten ($< 0,30$ dB/km). Allerdings zeigten sich hier und da wesentliche und unvorhersehbare Änderungen nach der Verkabelung der Faser. Eine Garantie für einen bestimmten Dämpfungswert im Kabel konnte vorderhand nicht gegeben werden. Die vorliegend beschriebene Arbeit hatte zum Ziel, dies zu ermöglichen.

2 Probleme im Zusammenhang mit einer zu hohen Dämpfung im dritten Fenster

21 Zwei Arten von Biegungen beeinflussen die Übertragung

Fasern, die sich lose in Röhrcchen befinden, weisen unterschiedliche, zufällige Biegungen auf, je nach dem mechanischen Zustand des Kabels. Figur 1 zeigt verschiedene Wege, denen zwei Fasern in verseilten Röhrcchen folgen können, je nachdem ob das Kabel unter Zug oder unter Druck steht. Tabelle I zeigt schematisch, welche Mechanismen zu Faserbiegungen führen. Gewöhnlich wird zwischen zwei Arten von Biegungen unterschieden:

Die *Makrobiegungen*, die durch Biegeradien bis 100 mm charakterisiert sind und einen teilweisen Verlust der

Tableau I. Comportement mécanique et thermique d'un câble à faisceaux de fibres tubées. Problèmes
Tabelle I. Mechanisches und thermisches Verhalten eines Kabels mit lose ummantelten Fasern

Perturbations sur le câble Einflüsse auf das Kabel	Perturbations sur la fibre Einflüsse auf die Faser	Conséquences Auswirkungen
Contraction thermique (basses températures) Thermisches Zusammenziehen (niedrige Temperaturen) Courbures (sur bobine) Biegungen (auf Haspel)	Compression longitudinale Längsdruck Flambage Starke Biegung	Macrocourbures Makrobiegungen
Allongement sous traction Verlängerung unter Zug Dilatation thermique (hautes températures) Thermische Ausdehnung (hohe Temperaturen) Contraction thermique (basses températures) Thermisches Zusammenziehen (niedrige Temperaturen) Courbures (sur bobine) Biegungen (auf Haspel) Interaction mécanique fibre à fibre Mechanische Faser/Faser-Beeinflussung	Traction ou excès de compression longitudinale Zug oder zu hoher Längsdruck Compression latérale par appui sur une surface présentant des aspérités Seitlicher Druck auf eine raue Oberfläche	Microcourbures Mikrobiegungen

fet de ces contraintes extérieures en jouant sur la structure et les matériaux du revêtement primaire des fibres (par exemple, en utilisant un revêtement acrylique à double couche).

Le *tableau II* résume les différentes solutions applicables soit au niveau de la structure et de la fabrication du câble, pour prévenir l'apparition de macrocourbures et de microcourbures, soit au niveau des caractéristiques de la fibre, pour atténuer l'effet de ces courbures. Pratiquement, la plupart des solutions portant sur le câble ayant déjà été utilisées, l'amélioration du comportement des câbles à fibres optiques ne peut être obtenue qu'en agissant sur les propriétés de guidage de la lumière à l'intérieur des fibres.

22 Influence du diamètre modal sur l'atténuation et la résistance aux courbures des fibres

On sait que la réduction du diamètre modal des fibres à saut d'indice augmente leur résistance aux courbures. En effet, cette réduction conduit à une décroissance plus rapide du champ électromagnétique à l'extérieur du cœur de la fibre. Or c'est dans le manteau optique, à l'extérieur du cœur, que la propagation de la lumière est susceptible d'être perturbée par des courbures. Des tests thermiques de câbles ont confirmé le gain en atténuation que l'on peut obtenir pratiquement dans la troisième fenêtre en réduisant le diamètre du champ modal de 10 à 8,8 μm . En revanche, l'atténuation en deuxième fenêtre se trouve sensiblement augmentée. Cette différence résulte du fait que pour réduire le diamètre modal, on a dû augmenter la différence entre les indices de réfraction du cœur et du manteau optique (*fig. 2*). Or dans le cas des fibres monomodales à profil d'indice ajusté, l'indice du manteau est imposé: c'est celui du tube utilisé pour la fabrication des préformes par la méthode de

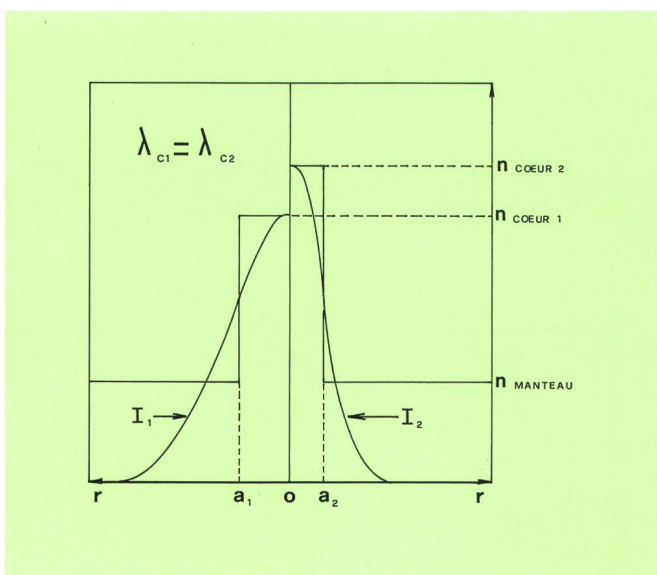


Fig. 2
Influence du profil d'indice sur le confinement du mode fondamental dans une fibre monomodale à saut d'indice. Les deux profils d'indice présentés correspondent à la même longueur d'onde de coupure – Einfluss des Brechzahlprofils auf die Führung des Grundmodes in einer Monomodefaser mit Stufenprofil. Die zwei dargestellten Brechzahlprofile entsprechen derselben Grenzwellenlänge
Cœur – Kern
Manteau – Mantel

Führung des fundamentalen Modes zur Folge haben. Diese Art Biegung kann von der Verkabelung oder einer Knickung des Kabels herrühren. Die entsprechende Wahl des Verseilschritts gestattet, den Einfluss der Verkabelung zu begrenzen, bei einer starken Biegung oder einem Knick hingegen sind die Folgen zuweilen ungewiss und erheblich.

Die *Mikrobiegungen* bestehen aus einer Folge alternierender Biegungen mit verschiedensten Biegeradien und kleiner Amplitude, die Dämpfungsverluste erzeugen, weil die Bedingungen, unter welchen das Licht geführt wird, sich dauernd ändern. Diese Art Biegung entsteht, wenn die Faser seitlich auf eine raue Oberfläche gedrückt wird oder auf ein Objekt von vergleichbarem Durchmesser (z.B. eine andere Faser). Der Einfluss dieser äusseren Randbedingungen lässt sich vermindern, indem man die Struktur und die Art der Faserschutzschicht verbessert (z.B. durch eine doppelschichtige Acrylat-Schutzschicht).

Tabelle II fasst die verschiedenen Lösungen zusammen, die einerseits bei der Struktur und der Herstellung des Kabels ansetzen, um die Entstehung von Mikro- und Makrobiegungen zu verhindern, und andererseits bei den Fasereigenschaften, um die Auswirkungen dieser Biegungen zu vermindern. Da in der Praxis die meisten Lösungsmöglichkeiten, die das Kabel betreffen, bereits in die Tat umgesetzt sind, bleibt zur Verbesserung des Verhaltens der Glasfaserkabel nur die Möglichkeit, die Führungseigenschaften des Lichts innerhalb der Faser zu optimieren.

Tableau II. Comportement mécanique et thermique d'un câble à faisceaux de fibres tubées. Paramètres déterminants
Tabelle II. Mechanisches und thermisches Verhalten eines Kabels mit lose ummantelten Fasern. Bestimmende Parameter

	Fibre – Faser	Câble – Kabel
Macrocourbures Makrobiegungen	Confinement Einschränkung – Diamètre modal Modenfelddurchmesser – Longueur d'onde de coupure Grenzwellenlänge	Surlongueur Überlänge Coefficient de dilatation thermique Thermischer Ausdehnungskoeffizient Rayon de courbure continue Verseilradius Gel
Microcourbures Mikrobiegungen	Confinement Einschränkung – Diamètre modal Modenfelddurchmesser – Longueur d'onde de coupure Grenzwellenlänge Revêtement primaire Primärbeschichtung	Surlongueur Überlänge Armure – Armierung Coefficient de dilatation thermique Thermischer Ausdehnungskoeffizient Rayon de courbure continue Verseilradius Gel Surface des parois intérieures des tubes Oberfläche der inneren Röhrenwand

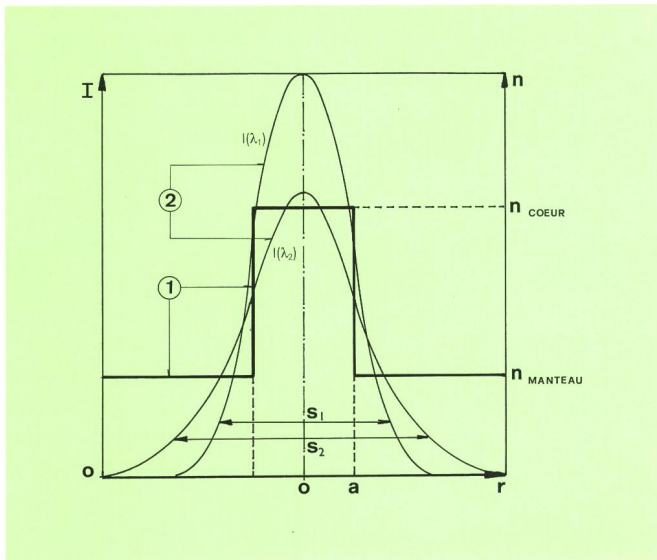


Fig. 3
Extension du mode fondamental d'une fibre optique en fonction de la longueur d'onde de la lumière guidée – Ausdehnung des Grundmodes einer Glasfaser in Abhängigkeit der Lichtwellenlänge
 (Intensités $I(\lambda_1)$, $I(\lambda_2)$ où $\lambda_2 < \lambda_1$) – (Intensitäten $I(\lambda_1)$, $I(\lambda_2)$ wo $\lambda_2 < \lambda_1$)
 Cœur – Kern
 Manteau – Mantel
 S_1 : Spot pour λ_1 – Modenfelddurchmesser bei λ_1
 S_2 : Spot pour λ_2 – Modenfelddurchmesser bei λ_2
 ① Profil d'indice – Brechzahlprofil
 ② Distribution du champ modal – Verteilung des Modenfeldes

manchonnage MCVD. L'indice du cœur est obtenu par dopage au germanium, ce qui provoque une augmentation des pertes en transmission par diffusion de Rayleigh. D'autre part, le coétirage de deux qualités de silice aux dopages trop largement différents engendre des fluctuations de géométrie du cœur de la fibre, difficiles à prévenir. Ces deux effets sont à l'origine de l'augmentation d'affaiblissement constatée.

23 Solution apportée par les fibres optiques à profil d'indice dépressé

Une solution pour réduire à la fois l'atténuation et le diamètre du champ modal des fibres consiste à abaisser simultanément l'indice de réfraction du cœur et celui du manteau. Ce faisant, on peut diminuer la concentration d'oxyde de germanium dans le cœur tout en maintenant la différence d'indice cœur-manteau constante. Pratiquement, l'indice du manteau peut-être abaissé par dopage au fluor. L'indice de réfraction du tube utilisé pour la fabrication des préformes étant, dans l'état actuel de la technique, fixé (indice de la silice pure), on obtient finalement ce qu'il est convenu d'appeler un profil dépressé (fig. 4).

24 Amélioration des fibres à profil d'indice ajusté

Une autre solution consiste à réduire dans une moindre mesure le diamètre modal et à relever simultanément la longueur d'onde de coupure de la fibre. Ce compromis permet d'améliorer le confinement du champ électromagnétique aux grandes longueurs d'ondes, c'est-à-dire

22 Einfluss des Modenfelddurchmessers auf die Dämpfung und die Biegeempfindlichkeit der Fasern

Es ist bekannt, dass die Herabsetzung des Modenfelddurchmessers bei Fasern mit Stufenprofil die Biegeempfindlichkeit vermindert. Dies geschieht, weil die Reduzierung des Modenfelddurchmessers zu einem schnelleren Abfall des elektromagnetischen Feldes ausserhalb des Faserkerns führt. Die Störung der Lichtfortpflanzung durch Biegung der Faser geschieht ausserhalb des Kerns im optischen Mantel. Temperaturtests von Glasfaserkabeln haben gezeigt, dass eine Verbesserung der Dämpfungseigenschaften im dritten Fenster durch die Reduktion des Modenfelddurchmessers von 10 auf 8,8 μm erreicht werden kann. Hingegen wird dadurch die Dämpfung im zweiten Fenster beträchtlich erhöht. Dieser Unterschied rührt daher, dass für die Verkleinerung des Modenfelddurchmessers die Brechzahl-differenz zwischen Kern und Mantel erhöht werden musste (Fig. 2). Im Fall von Monomodefasern mit angepasstem Brechzahlprofil ist die Brechzahl des Mantels vorgegeben, es ist jene des Quarzrohrs, das für die Herstellung der Vorform nach dem Umhüllungsverfahren (MCVD) Verwendung findet. Die Dotierung mit Germanium bestimmt die Brechzahl des Kerns, je höher die Dotierung desto höher sind auch die Verluste durch die Rayleigh-Streuung. Weiter bewirkt das gleichzeitige Ausziehen von zwei verschiedenen Quarzqualitäten mit zu hohem Dotierungsunterschied Schwankungen in der Kerengeometrie, die schwierig zu unterdrücken sind. Diese zwei Effekte sind die Ursache für die festgestellte Dämpfungserhöhung.

23 Lösung des Problems durch nicht angepasstes Brechzahlprofil

Um gleichzeitig die Dämpfung und den Modenfelddurchmesser zu reduzieren, kann die Brechzahl des Kerns und des Mantels herabgesetzt werden. Dies bedeutet eine kleinere Konzentration von Germaniumoxyd im Kern bei gleichbleibender Brechzahl-differenz zwischen Kern und Mantel. Eine Reduktion der Brechzahl im Mantel erreicht man in der Praxis mit einer Fluordotierung. Da die Brechzahl des Rohrs, das zur Produktion der Vorform verwendet wird, gegeben ist, entsteht ein Brechzahlprofil, das üblicherweise als nicht angepasstes Profil bezeichnet wird (Fig. 4).

24 Verbesserung von Fasern mit angepasstem Brechzahlprofil

Eine andere Lösung besteht darin, den Modenfelddurchmesser etwas weniger zu verkleinern und gleichzeitig die Grenzwellenlänge der Glasfaser anzuheben. Diese Kompromisslösung erlaubt eine bessere Einschränkung des elektromagnetischen Feldes bei grossen Wellenlängen, d. h. eine geringere Biegeempfindlichkeit im dritten Fenster, ohne die Dämpfung im zweiten und im dritten Fenster wesentlich zu erhöhen. Es lässt sich zeigen, dass die Lichtverteilung im Mode verbreitert wird, wenn sich der Abstand zwischen Grenzwellenlänge (oberhalb dieser Wellenlänge führt die Faser nur einen Mode) und Arbeitswellenlänge vergrössert. Dieser Effekt ist in Figur 3 illustriert.

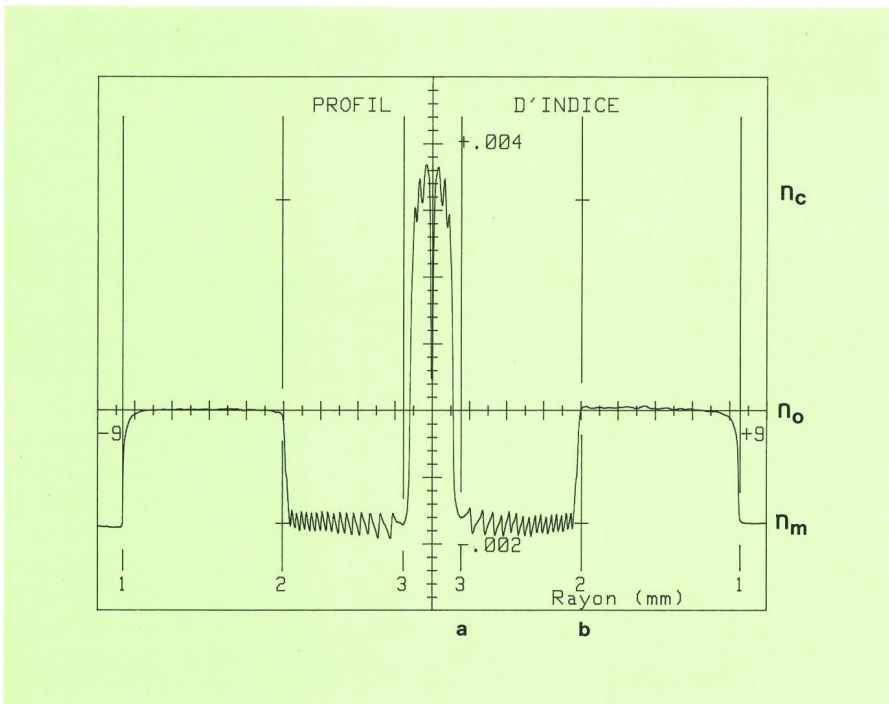


Fig. 4
Profil d'indice de type «dépressé» mesuré sur
une préforme manchonnée – Brechzahlprofil
«nicht angepasst» an einer MCVD-Vorform
gemessen
 Profil d'indice – Brechzahlprofil
 Rayon – Radius

d'améliorer la résistance aux courbures de la fibre dans la troisième fenêtre sans occasionner une augmentation d'affaiblissement trop importante dans la deuxième et la troisième fenêtre. En effet, on peut montrer que la distribution du mode (lumière transportée) dans la fibre s'étale lorsque l'écart entre la longueur d'onde de travail et la longueur d'onde de coupure (longueur d'onde au-delà de laquelle la fibre ne conduit plus qu'un seul mode) augmente. Ce phénomène est illustré à la figure 3.

3 Divers essais thermiques des câbles à fibres optiques

L'essai en cycle thermique d'un câble terminé constitue le seul moyen de vérifier l'aptitude d'un type de fibre à résister aux courbures rencontrées dans ce câble. Toutefois, ce type d'essais est onéreux et n'apporte des résultats qu'après une longue attente due aux délais de fabrication de la fibre et du câble. Il est donc indispensable de pouvoir effectuer des essais après chaque étape de fabrication. Le tableau III résume les différents essais qui sont effectués pour caractériser la résistance aux courbures des fibres. L'essai sur fibres tubées, tubes non câblés (B), est particulièrement utile pour caractériser la résistance aux courbures associées au flambage d'une ou de plusieurs fibres dans les tubes, parce que la contraction thermique des tubes est importante. Les résultats obtenus dans ce travail ont par ailleurs montré qu'il était nécessaire d'aller jusqu'à ce stade de la fabrication pour caractériser valablement la résistance des fibres aux macrocourbures effectivement rencontrées dans les câbles.

4 Premières constatations faites dans le cadre du projet

Les premières fibres optiques fabriquées dans le cadre de ce projet étaient à petit diamètre modal (9 μm) et à

3 Verschiedene Temperaturversuche mit Glasfaserkabeln

Die Prüfung eines fertiggestellten Kabels in einem Temperaturzyklus ist die einzige Möglichkeit, die Widerstandsfähigkeit der Fasern gegenüber Biegungen, wie sie im Kabel auftreten, zu prüfen. Es handelt sich da al-

Tableau III. Divers essais de résistance aux courbures
Tabelle III. Verschiedene Versuche über die Biegunsempfindlichkeit

a) Sur fibres nues – Fasern ohne Sekundärürmhüllung

Macrocourbures – Makrobiegungen	Microcourbures – Mikrobiegungen
1- CCITT (COM XV-R 20-E) 100 spires \varnothing 75 mm pertes à 1550 nm <1 dB/km CCITT (COM XV-R 20-E) 100 Windungen \varnothing 75 mm Verlust bei 1550 nm <1 dB/km	Essai au papier de verre 1 m de fibre papier grit 150 1 ou 2 faces charge: 1 à 6 kg Versuch mit Glaspapier 1 m Faser Korngrösse 150 1 oder 2 Seiten Belastung: 1 bis 6 kg
2- Variante (PTT suisses) 100 spires \varnothing 60 mm pertes à 1550 nm <0,5 dB/km Variante (Schweizerische PTT) 100 Windungen \varnothing 60 mm Verlust bei 1550 nm <0,5 dB/km	

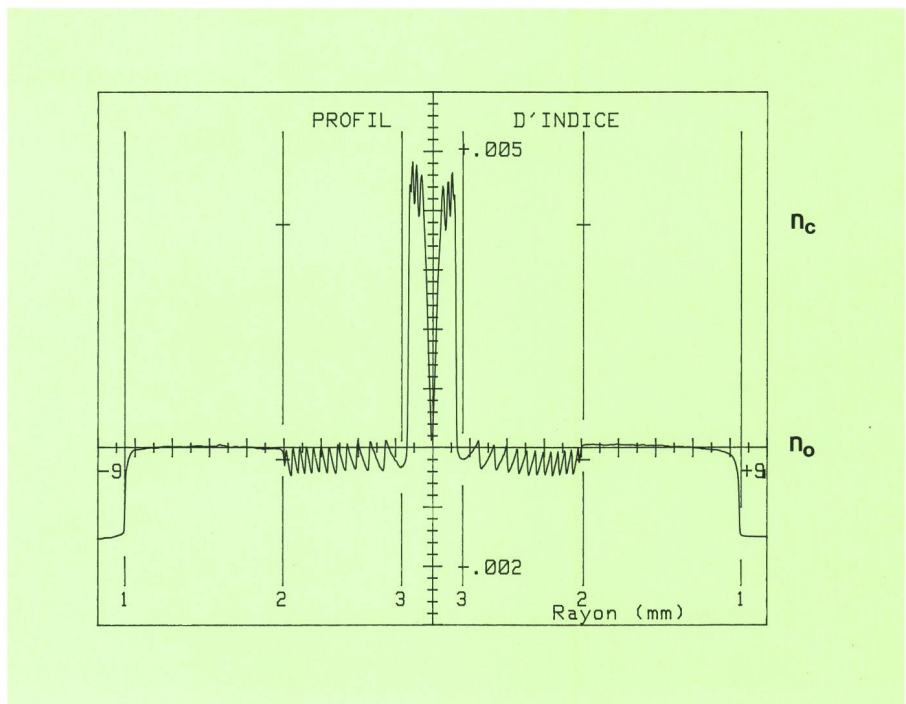
b) Sur fibres tubées, tubes pratiquement droits (rayon de courbure constant 600 mm)
 Fasern in Röhrchen, Röhrchen fast gerade (konstanter Biegeradius 600 mm)

Mesure de l'atténuation en fonction de la température dans une plage de température restreinte (-5 °C à +45 °C)
 Messung der Dämpfung in Abhängigkeit der Temperatur in einem eingeschränkten Temperaturbereich (-5 °C bis +45 °C)

c) Sur fibres tubées, tubes assemblés, câble terminé (rayon de courbure constant 100 mm)
 Fasern in Röhrchen, Röhrchen verseilt, fertiges Kabel (konstanter Biegeradius 100 mm)

Mesure de l'atténuation en fonction de la température dans une plage de température étendue (-40 °C à +60 °C)
 Messung der Dämpfung in Abhängigkeit der Temperatur in einem ausgedehnten Temperaturbereich (-40 °C bis +60 °C)

Fig. 5
 Profil d'indice de type «ajusté» mesuré sur
 une préforme manchonnée – Brechzahlprofil
 «angepasst» an einer MCVD-Vorform gemessen
 Profil d'indice – Brechzahlprofil
 Rayon – Radius



profil dépressé. La figure 4 montre un profil d'indice typique de ces fibres.

La figure 6 permet de comparer la résistance aux macrocourbures d'une de ces fibres avec celle d'une fibre standard à profil d'indice ajusté et à diamètre modal de 10 μm (fig. 5). On ne constate une sensible amélioration de la résistance aux macrocourbures que pour des rayons compris entre 10 et 20 mm. La figure 7 montre, en revanche, une nette amélioration de la résistance aux microcourbures pour la fibre à petit spot et à profil dépressé.

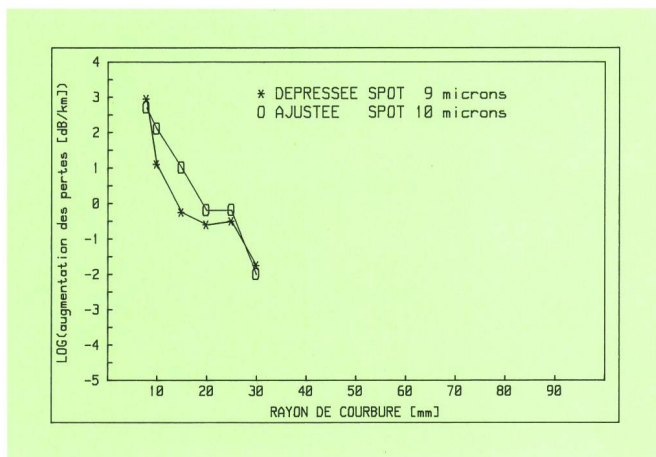


Fig. 6
 Comparaison des résistances aux macrocourbures d'une fibre à profil d'indice ajusté (spot 10 μm) et d'une fibre à profil d'indice dépressé (spot 9 μm). Les essais ont été effectués sur des fibres nues – Vergleich der Makrobiegungsempfindlichkeit einer Faser mit angepasstem Profil (Modenfelddurchmesser 10 μm) und einer Faser mit nicht angepasstem Profil (Modenfelddurchmesser 9 μm). Die Versuche wurden mit Fasern ohne Sekundärhülle durchgeführt
 LOG (augmentation des pertes [dB/km]) – LOG (Erhöhung der Verluste [dB/km])
 Dépressée, spot 9 μm – Nicht angepasst, Modenfelddurchmesser 9 μm
 Ajustée, spot 10 μm – Angepasst, Modenfelddurchmesser 10 μm
 Rayon de courbure (mm) – Biegeradius (mm)

lerdings um eine kostspielige Prüfung, die zudem noch, der Anzahl Fabrikationsschritte wegen, mit langen Wartezeiten verbunden ist. Es ist deshalb unumgänglich, nach jedem Fabrikationsschritt die Biegeempfindlichkeit zu prüfen. Tabelle III fasst die verschiedenen Prüfverfahren zusammen. Besonders geeignet, um eine praxisbezogene Biegeempfindlichkeit zu prüfen, sind Fasern in noch nicht verkabelten Röhrchen (B), weil da deren thermische Ausdehnung gross ist. Die im Rahmen dieser Untersuchung gewonnenen Ergebnisse haben gezeigt, dass es nötig ist, bis zu diesem Fabrikationsschritt zu gehen, um die Widerstandsfähigkeit der Fasern gegen Makrobiegungen, wie sie im Kabel letztlich auftreten, aussagekräftig zu prüfen.

4 Erste Feststellungen im Rahmen des Projekts

Bei den ersten Glasfasern, die im Rahmen dieses Projekts hergestellt wurden, handelte es sich um solche mit kleinem Modenfelddurchmesser (9 μm) und nicht angepasstem Brechzahlprofil. Fig. 4 zeigt ein typisches Brechzahlprofil dieser Fasern.

Fig. 6 zeigt den Vergleich der Makrobiegungsempfindlichkeit einer solchen Faser und einer mit angepasstem Brechzahlprofil und einem Modenfelddurchmesser von 10 μm (Fig. 5). Eine entscheidende Verbesserung der Makrobiegungsempfindlichkeit stellt man nur für Radien zwischen 10 und 20 mm fest. Hingegen zeigt Fig. 7 eine deutliche Verbesserung bei der Mikrobiegungsempfindlichkeit für Fasern mit nicht angepasstem Brechzahlprofil und kleinem Modenfelddurchmesser.

Angesichts dieser Ergebnisse durfte man erwarten, dass sich bei Temperaturversuchen im Röhrchen die neue Faser mindestens so gut wie die Standardfaser verhalten würde. Dem ist jedoch nicht so, wie Fig. 8 zeigt. Die Fasern mit kleinem Modenfelddurchmesser und nicht angepasstem Profil verhalten sich weniger gut als

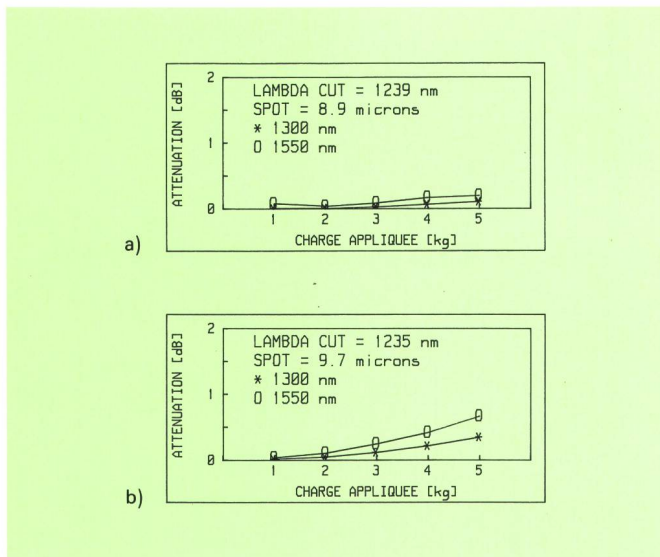


Fig. 7
Comparaison des résistances aux microcourbures – Vergleich der Mikrobiegeempfindlichkeit

- a) Fibre à profil d'indice ajusté (spot 9,7 μm) – Faser mit angepasstem Brechzahlprofil (Modenfelddurchmesser 9,7 μm)
 b) Fibre à profil d'indice dépressé (spot 8,9 μm). Essais au papier de verre sur fibres nues. Les pertes sont représentées en fonction de la charge mesurée en kilogrammes – Faser mit nicht angepasstem Brechzahlprofil (Modenfelddurchmesser 8,9 μm). Versuch mit Glaspapier auf primärbeschichteten Fasern. Die Verluste sind in Abhängigkeit der Belastung (in kg) dargestellt

Atténuation (dB) – Dämpfung (dB)

Lambda cut = Longueur d'onde de coupure – Grenzwellenlänge

Spot = Diamètre du champ modal – Modenfelddurchmesser

Charge appliquée (kg) – Belastung (kg)

Au vu de ces résultats, on pouvait s'attendre à ce que, lors d'un essai thermique en tube, la nouvelle fibre se comporte au moins aussi bien qu'une fibre standard. Or, les résultats de ces essais représentés à la figure 8 mon-

Standardfasern. Dies lässt sich durch Biegungen mit grossem Radius ($R > 30 \text{ mm}$) erklären, die bei tiefen Temperaturen entstehen und durch eine schwierig zu messende höhere Biegeempfindlichkeit für diese Radien. Die Verkleinerung des Modenfelddurchmessers bewirkt keine Verbesserung.

5 Abschätzung für biegeinduzierte Verluste

5.1 Verlustmechanismen für stetig gebogene Glasfasern

Bei Untersuchungen über die Fortpflanzung des Lichts in Monomode-Glasfasern setzt man voraus, dass die Wellenfront stets senkrecht zur Ausbreitungsrichtung in der Faser steht. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellenfront ist auf der Aussenseite der Biegung grösser, auf der Innenseite kleiner und dies proportional zum Abstand r , gemessen vom Zentrum des Faserkerns aus (Fig. 9). Man findet deshalb immer einen kritischen Radius r_c , auch Grenzradius genannt, bei dem die Geschwindigkeit der Wellenfront gleich gross wird wie jene einer ebenen Welle im asymptotischen Bereich (Quarz). Als asymptotischen Bereich definiert man die Zone, in der das Modenfeld asymptotisch gegen Null verläuft. Dann lässt sich zeigen, dass jenseits dieses Radius der Mode nicht mehr geführt, sondern abgestrahlt wird. Je grösser der Grenzradius ist, desto kleiner sind die hier betrachteten Verluste.

Die Situation kann auch beschrieben werden, indem man eine Profilverformung einführt oder umgekehrt von einer lokalen effektiven Brechzahl $n_{\text{eff}}(r)$ des Modes spricht. Die effektive Brechzahl eines Modes einer geradlinigen Faser ist definiert als jene Brechzahl eines homogenen Mediums, in welchem eine ebene Welle dieselbe Ausbreitungsgeschwindigkeit aufweist wie die

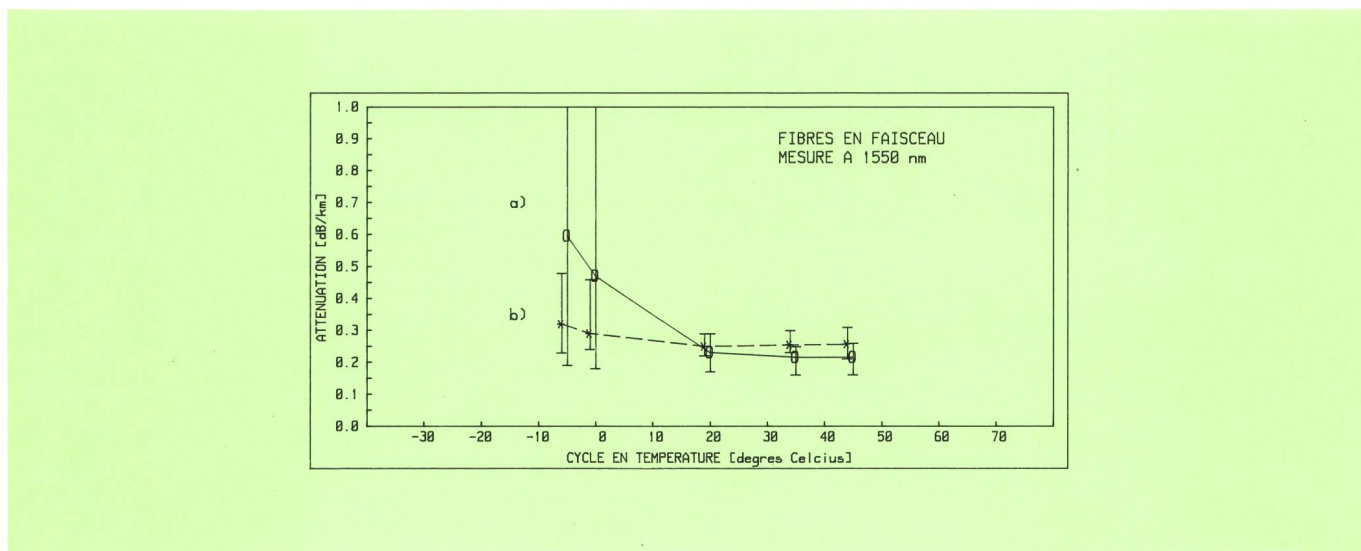


Fig. 8
Comportement thermique observé pour des fibres monomodales tubées. Test effectué dans la troisième fenêtre (1550 nm) – Thermisches Verhalten von Monomodefaseren im Röhrchen. Test wurde im dritten Fenster durchgeführt (1550 nm)

- a) Fibres à profil d'indice dépressé de diamètre modal moyen 9,3 (9,2 à 9,5) μm . $\lambda_{c \text{ moyen}} = 1190$ (1150 à 1270) nm – Fasern mit nicht angepasstem Brechzahlprofil und einem mittleren Modenfelddurchmesser von 9,3 μm (9,2 bis 9,5 μm). $\lambda_{c \text{ mittel}} = 1190$ nm (1150 bis 1270 nm)
 b) Fibres à profil d'indice ajusté de diamètre modal moyen 10,0 (9,8 à 10,4) μm . $\lambda_{c \text{ moyen}} = 1180$ (1130 à 1240) nm – Fasern mit ange-

passtem Brechzahlprofil und einem mittleren Modenfelddurchmesser von 10,0 μm (9,8 bis 10,4 μm). $\lambda_{c \text{ mittel}} = 1180$ nm (1130 bis 1240 nm)

Atténuation (dB/km) – Dämpfung (dB/km)

Fibres en faisceau – Fasern im Röhrchen

Mesure à 1550 nm – Messung bei 1550 nm

Cycle en température ($^{\circ}\text{C}$) – Temperaturzyklus ($^{\circ}\text{C}$)

trent au contraire que les fibres à petit diamètre modal et profil dépressé se comportent moins bien que les fibres standard. Cela s'explique par l'apparition de courbures de grand rayon ($R > 30$ mm) dans les tubes portés à basse température et par une sensibilité élevée, difficile à mesurer, des nouvelles fibres à ce genre de courbures, à laquelle une diminution du diamètre du champ modal n'apporte pas d'amélioration.

5 Estimation des pertes des fibres courbées

51 Mécanisme des pertes de lumière provoquées par des courbures continues

Lorsque l'on étudie la propagation de la lumière dans une fibre monomodale courbée, on suppose que le front d'onde du mode reste toujours perpendiculaire à l'axe de la fibre. La vitesse de propagation du front d'onde augmente à l'extérieur de la courbe et diminue du côté opposé proportionnellement à la distance r , comptée à partir de l'axe du cœur (fig. 9). On trouve donc toujours un rayon critique r_c , appelé aussi rayon caustique, pour lequel la vitesse du front d'onde égale la vitesse de transmission d'une onde plane dans le milieu asymptotique (silice). On définit le milieu asymptotique comme étant la zone où le champ modal tend asymptotiquement vers zéro. On montre qu'au-delà de ce rayon le mode n'est plus confiné mais qu'il rayonne à l'extérieur de la courbure, d'où les pertes considérées ici. On montre aussi que plus la caustique s'éloigne de l'axe de la fibre, plus les pertes radiatives diminuent.

La situation peut être décrite en terme de déformation du profil d'indice ou réciproquement en terme d'indice effectif local, $n_{\text{eff}}(r)$, du mode. L'indice effectif d'un mode d'une fibre rectiligne est défini comme celui du milieu homogène dans lequel une onde plane se propagerait exactement à la même vitesse que le front d'onde du mode. On peut considérer que dans une fibre courbée l'indice effectif diminue du côté extérieur à la courbure jusqu'à évaluer celui de la silice au rayon caustique, r_c ; c'est ce qui est représenté par une ligne traitillée inclinée à la figure 9b. L'inclinaison de la droite représentant l'indice effectif est proportionnelle à la courbure, $1/R$, où R est le rayon de courbure continu.

Dans le cas de courbures de grand rayon, la caustique est située dans la zone asymptotique du profil d'indice. C'est la situation décrite par la figure 10 qui montre intuitivement que:

- Un accroissement de l'indice de réfraction asymptotique au-delà du rayon $r = b$, faisant de la fibre optique une fibre à profil d'indice dépressé, rapproche la caustique de l'axe du profil et augmente ses pertes en courbure.
- Cet effet peut être compensé en augmentant l'indice effectif du mode de la fibre. Pour cela il faut augmenter la différence d'indice cœur-cladding déposé. On éloigne ainsi la caustique et l'on diminue les pertes en courbures de la fibre.

La différence d'indice $h = n_{\text{eff}} - n_{\text{tube}}$, où n_{tube} est l'indice de réfraction asymptotique, constitue le paramètre essentiel dont dépend la résistance de la fibre aux grands rayons de courbure.

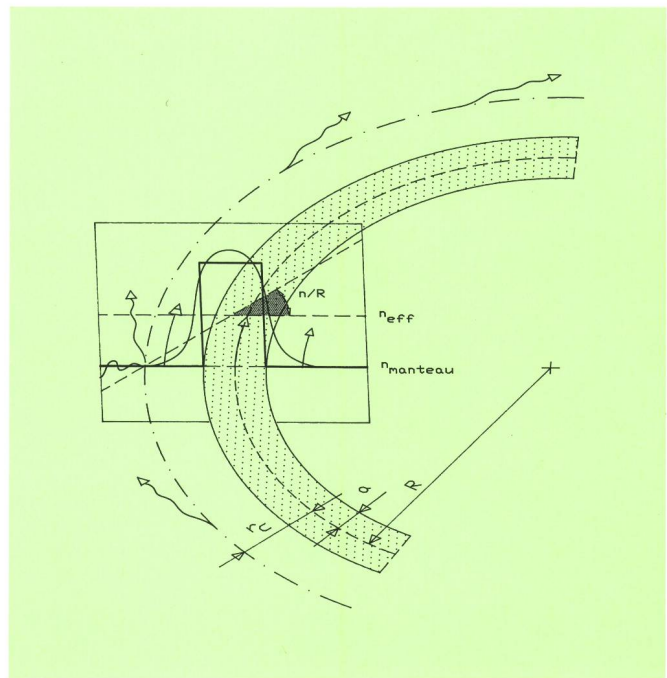


Fig. 9
Définition des paramètres caractérisant une fibre optique courbée. La partie du mode entraînée par le front d'onde à une vitesse excédant la vitesse de la lumière dans la silice pure est rayonnée. Le rayon critique, r_c est appelé «rayon caustique» - Définition der Parameter, die eine gebogene Glasfaser charakterisieren. Der Teil des sich fortpropagierenden Modes, dessen Wellenfront eine grössere Geschwindigkeit aufweist als die Geschwindigkeit des Lichtes im reinen Quarzglas, wird abgestrahlt. Der kritische Radius r_c wird Grenzzadius genannt
 $n_{\text{manteau}} - n_{\text{Mantel}}$

Wellenfront des Modes. Dies lässt sich nun so darstellen, dass die effektive Brechzahl gegen die Aussenseite der Biegung hin abnimmt bis zum Grenzzadius r_c , wo sie denselben Betrag aufweist wie die Brechzahl des Mantels. Dies ist in Figur 9b durch die geneigte, gestrichelte Linie dargestellt. Die Neigung dieser effektiven Brechzahl ist proportional der Biegung $1/R$, wo R der Biegeradius ist.

Im Fall von grossen Biegeradien ist der Grenzzadius in der asymptotischen Zone des Brechzahlprofils. Diese Situation ist in Figur 10 beschrieben, aus der sich folgendes intuitiv herauslesen lässt:

- Eine Erhöhung der asymptotischen Brechzahl ausserhalb von $r = b$, was der Schaffung eines nicht angepassten Profils entspricht, verkürzt den Grenzzadius und erhöht somit die biegungsinduzierten Verluste.
- Dieser Effekt kann kompensiert werden, indem man die effektive Brechzahl erhöht. Dazu ist die Brechzahldifferenz zwischen Kern und abgelagertem Mantel zu erhöhen. Damit verlängert sich der Grenzzadius, und die biegungsinduzierten Verluste werden kleiner.

Die Brechzahldifferenz $h = n_{\text{eff}} - n_{\text{Quarzglas}}$, wo $n_{\text{Quarzglas}}$ die asymptotische Brechzahl bedeutet, ist der entscheidende Parameter für die Biegeempfindlichkeit bei grossen Radien.

Die relative Biegeempfindlichkeit einer Glasfaser lässt sich numerisch durch die Berechnung eines WKB-Integrals bestimmen [2]. Figur 11 zeigt das Ergebnis einer solchen Rechnung. Hier wurde der Einfluss einer Er-

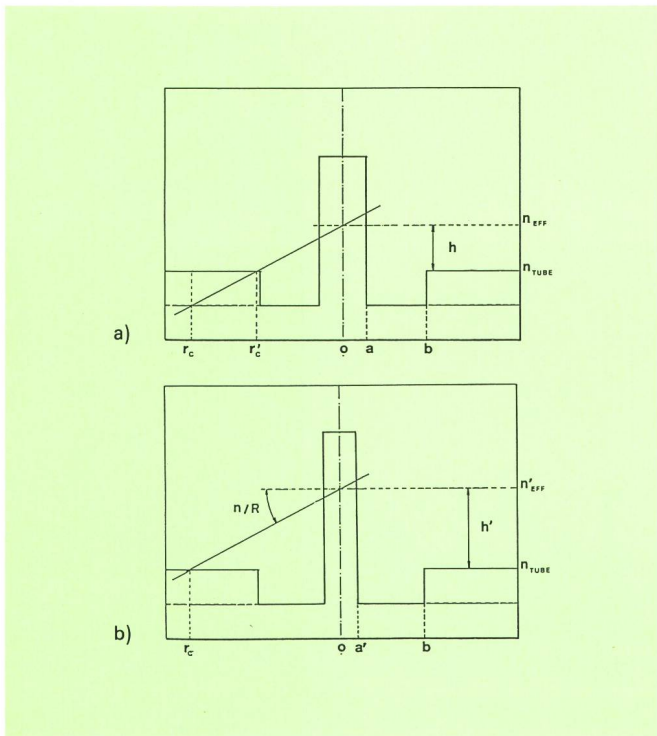


Fig. 10
Emplacement de la caustique pour une fibre à profil dépressé – Lage des Grenzradius für eine Faser mit nicht angepasstem Profil

- a) L'effet de la dépression est de rapprocher la caustique de r_c en r'_c et d'augmenter ainsi les pertes radiatives – Die Brechzahlerniedrigung führt zu einer Verschiebung des Grenzradius von r_c nach r'_c und einer Erhöhung der Strahlungsverluste
- b) Pour éloigner la caustique jusqu'en r_c , il faut augmenter l'indice effectif du mode n'_{eff} en augmentant la différence d'indice du cœur – Eine Erhöhung der effektiven Brechzahl n'_{eff} durch Vergrössern der Brechzahldifferenz im Kern führt zu einer Verschiebung des Grenzradius nach r_c

$n_{tube} = n_{Quarzgl\ddot{a}s}$

La sensibilité relative d'une fibre optique aux courbures peut être estimée par le calcul d'une intégrale WKB [2]. La figure 11 montre le résultat d'un tel calcul. On a éva-

lué l'augmentation de la courbure. L'augmentation de la courbure est évaluée par la variation de la courbure. L'augmentation de la courbure est évaluée par la variation de la courbure. L'augmentation de la courbure est évaluée par la variation de la courbure.

52 Auswahl der Fasern aufgrund des Parameters h

Die Aussagen des obigen Abschnitts wurden mit Erfolg auf die Auswertung der Temperaturversuche mit den ersten im Rahmen dieses Projekts hergestellten Fasern angewendet.

Der Wert des Parameters h wurde für jede Faser aufgrund des auf der Vorform gemessenen Brechzahlprofils geschätzt. Die bei 1550 nm gemessenen maximalen Dämpfungszunahmen während den im Kapitel 4 beschriebenen Temperaturversuchen wurden in Funktion des Parameters h aufgetragen (Fig. 12). Aus dieser Verteilung geht hervor, dass nur jene Fasern mit einem Wert von $h \leq 0,8 \cdot 10^{-3}$ ein stabiles Verhalten während der Versuche gewährleisten. Eine Auswahl von ohne Zusatzdämpfung verkabelbaren Fasern kann getroffen werden, indem man einen Mindestwert von h verlangt.

Betrachtet man in Figur 11 die Kurven für $h = 1 \cdot 10^{-3}$ und $0,5 \cdot 10^{-3}$, so stellt man fest, dass die Biegungsempfindlichkeit sich nur für Radien > 30 mm wesentlich ändert. Diese Tatsache bestätigt, dass die Ursache der Dämpfungszunahme der Fasern in Röhrrchen bei Biegeradien von 30 bis 100 mm liegt.

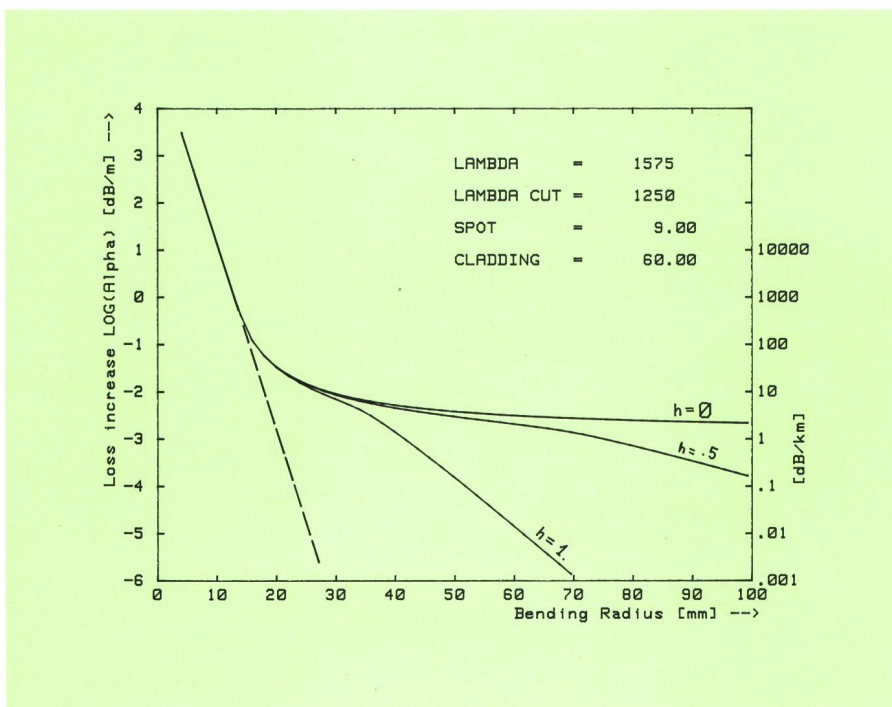


Fig. 11
Estimation théorique des pertes par courbure des fibres monomodales à profil dépressé – Theoretische Bestimmung der Biegeverluste von Monomodefasern mit nicht angepasstem Profil

Le paramètre h est défini par $h = n_{eff} - n_{tube}$. Le diamètre de la dépression et le diamètre modal sont tenus constants
 Der Parameter h ist definiert durch $h = n_{eff} - n_{Quarzgl\ddot{a}s}$. Die Durchmesser der Erniedrigung und des Modenfeldes sind konstant
 Lambda = Longueur d'onde – Wellenlänge
 Lambda cut = Longueur d'onde de coupure – Grenzwellenlänge
 Spot = Diamètre modal – Modenfelddurchmesser
 Cladding = Manteau – Mantel
 Loss increase LOG (Alpha) [dB/m] = Augmentation des pertes – Erhöhung der Verluste LOG (Alpha) [dB/m]
 Bending Radius (mm) = Rayon de courbure – Biegeradius (mm)

lué l'effet d'un accroissement de l'indice de réfraction asymptotique au-delà d'un rayon constant pour un cœur de profil fixe. On constate qu'en doublant la valeur de h , on peut réduire de trois ordres de grandeur les pertes pour un rayon de courbure de 70 mm. En revanche, h n'influence pratiquement pas les pertes pour des rayons inférieurs à 30 mm. Les caractéristiques des fibres à profil dépressé tendent vers celles d'une fibre à profil d'indice ajusté (en traitillé sur la fig. 11) lorsque h se rapproche de la valeur $n_{\text{eff}} - n_{\text{tube}}$.

52 Sélection des fibres sur la base du paramètre h

Les considérations du paragraphe précédent ont été appliquées avec succès à l'analyse des essais thermiques des premières fibres testées dans le cadre du projet.

La valeur du paramètre h a été estimée pour chaque fibre à partir de son profil d'indice mesuré sur préforme. La prise d'atténuation maximale observée à 1550 nm au cours de l'essai thermique décrit au chapitre 4 a ensuite été reportée en fonction de ce paramètre (fig. 12). De cette distribution il ressort que seules les fibres caractérisées par un paramètre h inférieur à $0,8 \cdot 10^{-3}$ n'ont pas offert une garantie totale de stabilité au cours de l'essai. Une sélection de fibres « câblables » sans risque d'augmentation d'affaiblissement peut être obtenue en exigeant une valeur minimale du paramètre h .

En se reportant à la figure 11 et en comparant les courbes correspondant à $h = 1 \cdot 10^{-3}$ et $h = 0,5 \cdot 10^{-3}$, on remarque qu'une sensible différence de résistance aux courbures n'apparaît que pour des rayons supérieurs à 30 mm. Ce fait confirme que c'est dans la gamme de courbures de 30 à 100 mm qu'il faut chercher l'origine des prises d'affaiblissement des fibres tubées.

6 Essais de fibres monomodales optimisées pour la deuxième et troisième fenêtre de transmission

61 Fibres à diamètre modal réduit et profil dépressé

Un câble composé de fibres à profil dépressé et de diamètre modal voisin de $9 \mu\text{m}$ a d'abord été testé. Les fibres avaient été sélectionnées préalablement sur la base d'une valeur minimale du paramètre $h = 0,8 \cdot 10^{-3}$, de manière à garantir leur résistance à des courbures de grand rayon.

La figure 13a montre les résultats du test thermique de ce câble. On constate une très bonne stabilité des valeurs d'affaiblissement en troisième fenêtre, la valeur maximale de l'écart moyen d'atténuation pour tout le cycle de -40°C à $+60^\circ\text{C}$ étant de 0,01 dB/km. Ainsi, l'efficacité du nouveau mode de sélection envisagé est prouvée.

62 Fibres à profil d'indice quasi ajusté

Une alternative permettant d'obtenir des fibres résistantes aux courbures consiste à réduire légèrement le diamètre modal (typiquement jusqu'à $9,4 \mu\text{m}$) et à augmenter la longueur d'onde de coupure tout en garantissant

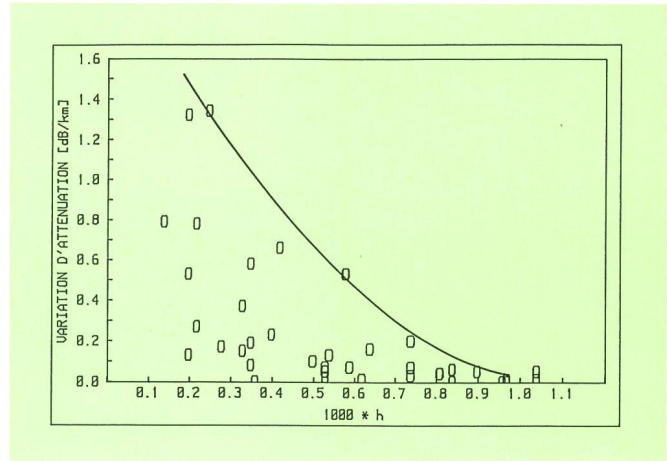


Fig. 12 Mise en évidence expérimentale d'une corrélation entre la valeur du paramètre h et la prise d'atténuation à basse température de fibres optiques tubées – Experimentelle Resultate zeigen eine Korrelation zwischen dem Wert des Parameters h und der Dämpfungänderung von loseummantelten Glasfasern bei niedriger Temperatur
L'indice effectif du mode a été calculé à partir du profil d'indice de chaque fibre – Die effektive Brechzahl des Modes wurde für jede Faser aus dem Brechzahlprofil berechnet
Variation d'atténuation (dB/km) – Änderung der Dämpfung (dB/km)

6 Prüfung von Fasern, die für das zweite und dritte Fenster optimiert sind

61 Fasern mit nicht angepasstem Brechzahlprofil und kleinem Modenfelddurchmesser

Als erstes wurde ein Kabel geprüft, das Fasern mit nicht angepasstem Brechzahlprofil mit einem Modenfelddurchmesser von $\approx 9 \mu\text{m}$ enthielt. Um keine Biegeverluste aufgrund von grossen Radien zu erhalten, wurden vorgängig die Fasern derart ausgewählt, dass der minimale Wert für $h = 0,8 \cdot 10^{-3}$ betrug.

Figur 13a zeigt die Ergebnisse des Temperaturtests dieses Kabels. Im dritten Fenster ist eine sehr gute Stabilität der Dämpfungswerte festzustellen, beträgt doch das Maximum der Mittelwerte der Dämpfungsänderungen lediglich 0,01 dB/km für den ganzen Zyklus von -40°C bis $+60^\circ\text{C}$. Damit ist die Wirksamkeit des angestrebten Auswahlverfahrens bewiesen.

62 Fasern mit fast angepasstem Profil

Eine Alternative, um biegungsunempfindliche Fasern zu erhalten, besteht darin, dass der Modenfelddurchmesser leicht verkleinert (typisch bis $9,4 \mu\text{m}$) und die Grenzwellenlänge erhöht wird, ohne die Monomode-Eigenschaft der verkabelten Fasern im zweiten Fenster in Frage zu stellen. Diese Möglichkeit ist in verschiedener Weise interessant. Weil keine Erniedrigung der Brechzahl des abgelagerten Mantels verlangt wird, hat man automatisch keine Biegeempfindlichkeit für grosse Radien, und die grössere Mikrobiegeempfindlichkeit kann zum grössten Teil mit einer doppelten Primärschutzschicht kompensiert werden. Die geprüften Fasern wurden wie folgt ausgewählt: $9,7 \mu\text{m}$ für den Modenfelddurchmesser und eine Grenzwellenlänge zwischen 1200

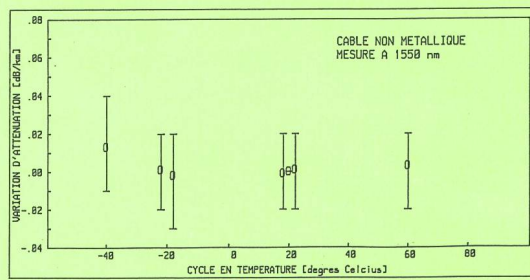
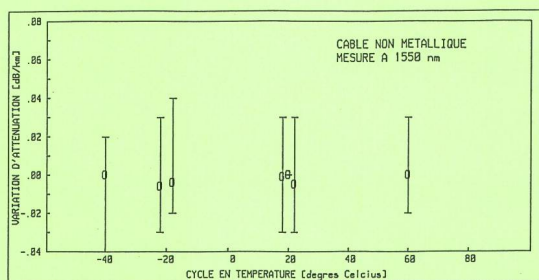


Fig. 13
Comportement thermique de deux câbles composés de fibres monomodales optimisées pour la deuxième et la troisième fenêtre de transmission – Thermisches Verhalten zweier Kabel mit Monomodefaseren, optimiert für das zweite und das dritte Übertragungsfenster

- a) Fibres à profil d'indice dépressé sélectionnées en fonction du critère: $h = n_{\text{eff}} - n_{\text{tube}} \geq 0,8 \cdot 10^{-3}$. Diamètre modal moyen 9,1 (8,7 à 9,4) μm . $\lambda_{\text{c moyen}} = 1245$ (1165 à 1310) nm – Fasern mit nicht angepasstem Brechzahlprofil, ausgewählt nach dem Kriterium: $h = n_{\text{eff}} - n_{\text{Quarzglas}} \geq 0,8 \cdot 10^{-3}$. Mittlerer Modenfelddurchmesser 9,1 μm (8,7 bis 9,4 μm). $\lambda_{\text{c mittel}} = 1245$ nm (1165 bis 1310 nm)
- b) Fibres à profil d'indice quasi ajusté. $h \geq 0,8 \cdot 10^{-3}$. Diamètre modal moyen 9,6 (9,4 à 9,9) μm . $\lambda_{\text{c moyen}} = 1230$ (1200 à 1280) nm – Fasern

mit fast angepasstem Brechzahlprofil. $h \geq 0,8 \cdot 10^{-3}$. Mittlerer Modenfelddurchmesser 9,6 μm (9,4 bis 9,9 μm). $\lambda_{\text{c mittel}} = 1230$ nm (1200 bis 1280 nm)

Câble non métallique – Nichtarmiertes Kabel

Mesure à 1550 nm – Messung bei 1550 nm

Variation d'atténuation (dB/km) – Änderung der Dämpfung (dB/km)

Cycle en température (°C) – Temperaturzyklus (°C)

sant la monomodicité des fibres câblées dans la deuxième fenêtre. Cette approche est intéressante à plus d'un titre, car en n'exigeant pas de dépression d'indice du cladding déposé, elle garantit automatiquement à la fibre une excellente résistance aux courbures de grand rayon. La moins bonne résistance de ces fibres aux microcourbures peut être compensée en grande partie par l'utilisation d'un revêtement primaire double. Les fibres testées ont été sélectionnées avec un diamètre modal moyen de 9,7 μm et des longueurs d'ondes de coupure de 1200 à 1280 nm. La *figure 13b* montre les variations d'affaiblissement de ce câble en cours de cycle thermique. La valeur maximale de l'écart moyen de 0,02 dB/km pour le cycle -40 °C à $+60$ °C reste dans des limites tout à fait acceptables.

7 Conclusions

L'étude, conduite à Cabloptic avec la collaboration de l'Entreprise des PTT suisses, a permis l'optimisation de la fibre monomodale produite en Suisse de manière à garantir son fonctionnement dans les deuxième et troisième fenêtres de transmission.

Deux profils d'indice optimaux ont été trouvés, l'un dépressé et de petit diamètre modal (9 μm) et l'autre ajusté et d'un diamètre modal légèrement plus grand (9,7 μm). Ces deux types de fibres présentent sensiblement les mêmes atténuations pour des longueurs d'ondes de coupure égales. Ils sont tous deux susceptibles de répondre au nouveau cahier des charges des PTT.

Les travaux ont mis en évidence sans ambiguïté la nature des courbures responsables de l'augmentation d'atténuation des fibres à 1550 nm au moment de leur câblage ou en cycles thermiques. La présence de microcourbures ne semble pas être en cause, mais l'essentiel de l'effet est dû à des courbures de grand rayon allant jusqu'à 60 ou 80 mm.

und 1280 nm. Die *Figur 13b* zeigt die Dämpfungsschwankungen dieses Kabels im Temperaturtest. Das Maximum der Mittelwerte der Dämpfungsänderungen im Bereich von -40 °C bis $+60$ °C bleibt innerhalb der sehr akzeptablen Grenze von 0,02 dB/km.

7 Schlussfolgerungen

Die von Cabloptic mit Unterstützung der Schweizerischen PTT-Betriebe durchgeführte Studie erlaubte die Optimierung der in der Schweiz produzierten Monomode-Glasfasern im zweiten und im dritten Übertragungsfenster.

Es wurden zwei Brechzahlprofile gefunden, das eine nicht angepasst mit kleinem Modenfelddurchmesser (9 μm), das andere angepasst und mit leicht erhöhtem Modenfelddurchmesser (9,7 μm). Diese zwei Fasertypen zeigen für die gleiche Grenzwellenlänge etwa die gleiche Dämpfung. Beide genügen dem neuen PTT-Pflichtenheft.

Die Arbeiten haben zweifelsfrei gezeigt, welche Biegungen für die Dämpfungszunahme während des Verkabelns oder in einem Temperaturzyklus verantwortlich sind. Die Ursachen sind nicht die Mikrobiegungen, sondern die Biegungen mit grossen Radien (60 bis 80 mm).

Während der Untersuchungen kam ein Kriterium zum Einsatz, das eine Auswahl der biegungsunempfindlichen Fasern vor ihrer Verkabelung erlaubte. Die Verwendung dieses Kriteriums bedingt allerdings die Kenntnis des Brechzahlprofils der Vorform und die Berechnung der effektiven Brechzahl der Modes. Die Wirksamkeit einer solchen Auswahlmethode wurde klar demonstriert.

Zum Schluss sei noch bemerkt, dass die CCITT die Entwicklung einer für grosse Wellenlängen biegungsunempfindlichen Glasfaser wesentlich erleichtert hat, in-

Au cours des recherches on a utilisé un critère permettant la sélection de fibres résistantes aux courbures avant leur câblage. L'application de ce critère nécessite toutefois la connaissance du profil d'indice de la préforme et le calcul de l'indice effectif du mode. L'efficacité d'une telle sélection a été clairement démontrée.

Remarquons pour finir que l'introduction par le CCITT d'une longueur d'onde de coupure de référence λ_{cc} mesurée en câble, remplaçant la longueur d'onde de coupure λ_c mesurée avant câblage, a considérablement simplifié la conception de fibres optiques résistantes aux courbures aux grandes longueurs d'ondes en permettant l'augmentation de λ_c de presque 100 nm.

Adresse des auteurs: Cabloptic SA, av. François-Borel, 2016 Cortaillod.

dem die Grenzwellenlänge λ_c der Faser durch die Grenzwellenlänge der verkabelten Faser λ_{cc} ersetzt wurde. Dies erlaubt die Erhöhung von λ_c um fast 100 nm.

Adresse der Autoren: Cabloptic SA, av. François-Borel, 2016 Cortaillod.

Bibliographie

- [1] Cahier des charges pour la fabrication et la livraison de câbles à fibres optiques pour le réseau des PTT, PTT 840.03, édition IV 89.
- [2] *Andreasen S. B.* «New Bending Loss Formula explaining bends on loss curves», Electronics Letters 23 (1987) 21 pp 1137-38.

Die nächste Nummer bringt unter anderem:

Vous pourrez lire dans le prochain numéro:

7/90

Jaquier J.-J.	ETSI – L'institut européen de normalisation dans le domaine des télécommunications
Rosenberg F.	Die langfristige Planung der PTT für ihre Fernmeldedienste Planification à long terme pour les services des télécommunications des PTT
Lévy Ph.	Eine schwache, protektionistische EG nützt weder sich selbst noch ihren Handelspartnern