



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 698 36 402 T2** 2007.09.20

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 0 902 307 B1**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **G02B 6/036** (2006.01)

(21) Deutsches Aktenzeichen: **698 36 402.3**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **98 115 438.8**

(96) Europäischer Anmeldetag: **17.08.1998**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **17.03.1999**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **15.11.2006**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **20.09.2007**

(30) Unionspriorität:

**58774 P                      12.09.1997                      US**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**AT, CH, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IT, LI, NL, SE**

(73) Patentinhaber:

**Corning Inc., Corning, N.Y., US**

(72) Erfinder:

**Jones, c/o Corning Inc., Peter Christopher,  
Corning, NY 14831, US; Ma, c/o Corning  
Incorporated, Daiping, Corning, NY 14831, US;  
Smith, c/o Corning Incorporated, David Kinney,  
Corning, NY 14831, US**

(74) Vertreter:

**PAe Reinhard, Skuhra, Weise & Partner GbR,  
80801 München**

(54) Bezeichnung: **Optischer Wellenleiter mit niedriger Dämpfung**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

**Beschreibung**

## Allgemeiner Stand der Technik

**[0001]** Die Erfindung betrifft eine optische Wellenleitfaser, die auf eine niedrige Dämpfung hin optimiert ist. Im Speziellen wird die Dämpfung der Wellenleitfaser für beliebige Kern-Brechungsindexprofile reduziert, indem die Variablen des Kern-Brechungsindexprofils geeignet gewählt werden.

**[0002]** Die Abhängigkeit der Wellenleitereigenschaften von der Konfiguration des Brechungsindexprofils wurde in dem bahnbrechenden US-Patent Nr. 4,715,679, Bhagavatula, beschrieben. In jenem Patent werden Kern-Brechungsindexprofile offenbart, die Wellenleitfasern mit vielfältigen Eigenschaften bereitstellen, insbesondere solche mit einer in das Arbeitsfenster bei 1550 nm verschobenen Nulldispersionswellenlänge und solche mit einer relativ konstanten Dispersion auf einem ausgedehnten Wellenlängenbereich wie etwa von 1250 nm bis 1600 nm.

**[0003]** Als Antwort auf die Nachfrage nach spezialisierten Wellenleitfasern, insbesondere hinsichtlich Hochleistungs-Wellenleitern, wurden die Untersuchungen der Kern-Brechungsindexprofile von Wellenleitern intensiviert. Zum Beispiel wird im US-Patent 5,483,612, Gallagher et al., (das „'612-Patent“) ein speziell gestaltetes Kernprofil offenbart, das niedrige Polarisationsmodendispersion, niedrige Dämpfung, eine verschobene Dispersionsnullstelle und ein niedriges Dispersionsgefälle bereitstellt. Andere Kern-Brechungsindexprofile wurden gestaltet, um die Anforderungen von Anwendungsfällen, zu denen die Verwendung von Signalen höherer Leistung oder optischer Verstärker zählen, zu erfüllen.

**[0004]** Ein Problem, das auftreten kann, wenn ein Kernprofil verändert wird, um zu einer gewünschten Eigenschaft zu gelangen, ist, dass diese Eigenschaft auf Kosten einer anderen essentiellen Eigenschaft realisiert wird. Zum Beispiel kann ein auf bestimmte Art gestaltetes Kern-Brechungsindexprofil eine vergrößerte effektive Fläche bereitstellen und somit nichtlineare Verzerrungen des Signals reduzieren. Jedoch kann bei dieser Wellenleitfaser mit großer effektiver Fläche die Biegesteifheit wesentlich beeinträchtigt worden sein. Die Profilgestaltung ist also eine anspruchsvolle Aufgabe, bei welcher der Herstellungsphase in der Produktentwicklung in der Regel Modellstudien vorausgehen.

**[0005]** Die Wechselwirkung der Profilvariablen ist von solcher Art, dass der Fachmann die Auswirkungen einer Änderung an einem Brechungsindexprofil auf Wellenleitereigenschaften wie etwa Biegesteifheit, Dämpfung, Nulldispersionswellenlänge und Gesamtdispersion und Gesamtdispersionsgefälle auf einem gewählten Wellenlängenbereich in der Regel nicht oder nur auf sehr allgemeine Weise vorhersagen kann. Daher umfassen Studien der Brechungsindexprofile von Wellenleitern in der Regel eine Computersimulation des fraglichen Profils oder der fraglichen Familie von Profilen. Anschließend wird für diejenigen Brechungsindexprofile, die die gewünschten Eigenschaften gezeigt haben, eine Fertigungsprüfung ausgeführt.

**[0006]** Bei der Fortführung der im '612-Patent offenbarten Arbeiten wurde eine Familie aus Profilen gefunden, die eine Hochleistungsfaser mit einer Nulldispersionswellenlänge oberhalb eines vorgewählten Wellenlängenbands sowie mit exzellenter Biegesteifheit ergab. Eine Beschreibung dieser Arbeiten findet sich in US-B-6,389,208.

**[0007]** Bei der Fertigstellung weiterer Modellstudien und Fertigungsprüfungen wurde klar, dass

- eine spezielle Familie von Profilen gefunden werden konnte, die einen gewählten Satz von Betriebsparametern bereitstellte, und, was höchst überraschend war, dass
- die Profile der speziellen Familie sich weiter anpassen ließen, um die Dämpfung zu optimieren, ohne dabei die Betriebsparameter wesentlich zu ändern.

**[0008]** Für weiteren Hintergrund wird außerdem hingewiesen auf:

- a) US-A-5,483,612, die unter anderem eine Faser offenbart, die den Oberbegriff von Anspruch 1 unten erfüllt, und
- b) den Beitrag von Y. Takahashi et al., „Attenuation and Bending Loss of VAD Dual Shape Core Dispersion-Shifted Fiber“, International Wire and Cable Symposium Proceedings 1990, Seiten 18–22, der unter anderem eine Faser offenbart, die den Oberbegriff von Anspruch 2 unten erfüllt.

## Definitionen

- Die Radien der Kernbereiche sind über den Brechungsindex definiert. Ein gegebener Bereich verfügt über

einen ersten und einen letzten Brechungsindexpunkt. Der Radius von der Wellenleitermittellinie bis zum Ort dieses ersten Brechungsindexpunktes ist der innere Radius des Kernbereichs bzw. -abschnitts. Entsprechend ist der Radius von der Wellenlängenmittellinie bis zum Ort des letzten Brechungsindexpunktes der äußere Radius des Kernabschnitts. Wo dies praktisch erscheint, können andere Definitionen der Kerngeometrie benutzt werden.

**[0009]** Sofern nicht im Einzelfalle anderweitig angegeben, sind die hier erörterten Indexprofilparameter wie folgt definiert:

- der Radius des mittleren Kernbereichs wird von der axialen Mittellinie des Wellenleiters bis zum Schnitt des extrapolierten mittleren Indexprofils mit der x-Achse gemessen,
- der Radius des zweiten ringförmigen Bereichs wird von der axialen Mittellinie des Wellenleiters bis zur Mitte der Grundlinie des zweiten Kreistrings gemessen, und
- die Breite des zweiten ringförmigen Bereichs ist der Abstand zwischen parallelen Linien, die von den Halbwertspunkten des Brechungsindex zum Wellenleiterradius gezogen werden.

**[0010]** Die Abmessungen des ersten ringförmigen Bereichs werden durch die Differenz zwischen den Abmessungen des mittleren Bereichs und des zweiten kreisförmigen Bereichs bestimmt.

- Der Begriff „Kern-Brechungsindexprofil“ beschreibt die an jedem Punkt entlang einem ausgewählten Radius oder Radiusabschnitt einer optischen Wellenleitfaser definierte Größe des Brechungsindex.
- Ein „mehnteiliges Kern-Brechungsindexprofil“ ist ein Profil, in welchem mindestens zwei gesonderte Abschnitte ausgezeichnet sind.

– Der relative prozentuale Index ( $\Delta$  %) ist:

$\Delta \% = [(n_1^2 - n_0^2)/2n_1^2] \times 100$ , wobei  $n_1$  ein Kernindex und  $n_0$  der minimale Index der Umhüllung ist. Sofern nicht anderweitig angegeben, ist  $n_1$  der maximale Brechungsindex in dem durch einen %  $\Delta$  gekennzeichneten Kernbereich.

– Der Begriff Alphaprofil bezeichnet ein Brechungsindexprofil, das der Gleichung

$n(r) = n_0(1 - \Delta[r/a]^\alpha)$  folgt, wobei  $r$  der Radius ist,  $\Delta$  wie oben definiert ist,  $a$  der letzte Punkt im Profil ist,  $r$  am ersten Punkt des Profils zu null gewählt ist und  $\alpha$  eine reelle Zahl ist. Zum Beispiel ist bei einem dreieckigen Profil  $\alpha = 1$  und bei einem parabolischen Profil  $\alpha = 2$ . Wenn  $\alpha$  größer als ungefähr 6 ist, ist das Profil im Wesentlichen eine Stufe. Zu anderen Indexprofilen zählen ein gestuftes Indexprofil, ein trapezförmiges Indexprofil und ein gerundetes gestuftes Indexprofil, wobei die Rundung auf Dotandendiffusion in Bereichen mit starker Brechungsindexänderung zurückzuführen sein kann.

– Das Profilvolumen ist als  $2 \int_{r_1}^{r_2} (\Delta \% r) dr$  definiert. Das innere Profilvolumen erstreckt sich von der Mittellinie des Wellenleiters,  $r = 0$ , bis zum Übergangsradius. Das äußere Profilvolumen erstreckt sich vom Übergangsradius bis zum letzten Punkt des Kerns. Das Profilvolumen wird in Einheiten von  $\% \mu m^2$  angegeben, weil der Brechungsindex dimensionslos ist.

– Der Übergangsradius lässt sich aus der Abhängigkeit der Leistungsverteilung im Signal bei sich ändernder Signalwellenlänge finden. Über dem inneren Volumen fällt die Signalleistung mit steigender Wellenlänge ab. Über dem äußeren Volumen steigt die Signalleistung mit steigender Wellenlänge an.

– Die Biegesteifheit einer Wellenleitfaser wird als induzierte Dämpfung unter vorgeschriebenen Testbedingungen ausgedrückt. Bei dem Biegetest, auf den hier Bezug genommen wird, handelt es sich um einen Stifanordnungs-Biegetest, der benutzt wird, um die relative Festigkeit der Wellenleitfasern gegen Biegungen zu vergleichen. Zur Durchführung dieses Tests wird der Dämpfungsverlust für eine Wellenleitfaser gemessen, bei der im Wesentlichen kein Biegeverlust induziert wird. Anschließend wird die Wellenleitfaser um die Stifanordnung gewoben und erneut die Dämpfung gemessen. Der durch Biegung induzierte Verlust ist die Differenz zwischen den beiden gemessenen Dämpfungen. Bei der Stifanordnung handelt es sich um zehn zylinderförmige Stifte, die hintereinander in einer Reihe angeordnet sind und auf einer ebenen Oberfläche in einer festen vertikalen Position gehalten werden. Der Mitte-Mitte-Abstand der Stifte beträgt 5 mm. Der Stiftdurchmesser beträgt 0,67 mm. Während des Tests wird die Wellenleitfaser hinreichend gespannt, so dass sie sich an einen Abschnitt der Stiftoberfläche anschmiegt.

Bei dem Biegetest, der in den Modellberechnungen verwendet wurde, handelte es sich um eine einzelne Windung einer Wellenleitfaser um einen Dorn mit 30 mm Durchmesser.

– Der effektive Gruppenbrechungsindex ( $n_{\text{geff}}$ ) ist das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit zur Gruppengeschwindigkeit. Der mathematische Ausdruck für  $n_{\text{geff}}$  in Abhängigkeit vom elektrischen Feld, dem Brechungsindex, der Wellenlänge und der Ausbreitungskonstante leitet sich aus den Maxwell-Gleichungen bzw. spezieller aus der skalaren Wellengleichung ab.

– Die Ausbreitungskonstante  $\beta$ , die auch als effektiver Brechungsindex bezeichnet wird, ist ein elektromagnetischer Feldparameter, der mit der Feldausbreitungsgeschwindigkeit zusammenhängt und sich durch Lösen der skalaren Wellengleichung für einen ausgewählten Wellenleiter finden lässt. Da  $\beta$  von der Wellenleitergeometrie abhängt, darf man erwarten, dass sich  $\beta$  ändert, wenn der Wellenleiter gebogen wird. Ein

Beispiel für eine skalare Wellengleichung, die die von einer speziellen Wellenleitergeometrie unterstützten elektromagnetischen Felder beschreibt, lässt sich in „Optical and Quantum Electronics“, J. P. Meunier et al., 15, (1983), S. 77–85 finden.

#### Kurzdarstellung der Erfindung

**[0011]** Die vorliegende Erfindung zielt daher auf eine optische Wellenleitfaser ab, die ein Kern-Brechungsindexprofil aufweist, das eine vorgewählte Menge von Betriebseigenschaften erzeugt und wobei die Dämpfung für dieses spezielle Brechungsindexprofil optimiert ist.

**[0012]** Das neuartige Kern-Brechungsindexprofil weist einen Kernbereich und eine umgebende Umhüllungs- bzw. Mantelschicht auf, die zusammen eine Wellenleitfaser ausbilden.

**[0013]** Um Licht in der Faser einzuschließen, muss mindestens ein Anteil des Kernindexprofils einen höheren Brechungsindex aufweisen als mindestens ein Anteil der Umhüllungsschicht. In der Regel ist das Indexprofil der Umhüllungsschicht eine einzelne Stufe, auch wenn nützliche Entwürfe mit modifiziertem Umhüllungsindex gemacht worden sind.

**[0014]** Das oben definierte Kern-Brechungsindexprofil ist ein an jedem Punkt entlang einem spezifischen Anteil des Wellenleiterradius definierter Brechungsindexwert. Somit lässt sich das Kernindexprofil ausdrücken als Indexwert  $n(r)$  an Punkten entlang eines Radius, der bei 0, der Mitte des Wellenleiters, beginnt und sich bis zu einem Radius  $r_0$  erstreckt. Dieses Kernindexprofil wird derart gestaltet, dass es eine vorgewählte Menge von Wellenleitfaser-Betriebseigenschaften erzeugt. Die Betriebseigenschaften können jeweils Toleranzgrenzen aufweisen, so dass eine Familie oder Menge von Kern-Brechungsindexprofilen existiert, die diese Wellenleiter-Betriebseigenschaften erzeugen. Selbst im Falle eines Modells, bei dem die Betriebseigenschaften alle jeweils auf einen einzelnen Wert festgelegt sind, lässt sich eine Menge oder Familie von Brechungsindexprofilen finden, die die Eigenschaften bereitstellen.

**[0015]** Die Menge von Kern-Brechungsindexprofilen, die die vorgewählten Wellenleiter-Betriebseigenschaften bereitstellen, kann durch Angabe der zulässigen Brechungsindexvariation  $\delta n(r)$  an jedem radialen Ort  $r$  des Brechungsindexprofils und der zulässigen Variation des Gesamtradius  $\delta r_0$  spezifiziert werden.

**[0016]** Durch Modellstudien mit der Familie oder Menge zulässiger Brechungsindexprofile wurde eine Teilmenge von Profilen gefunden, die eine niedrigere Dämpfung aufweist als die anderen Mitglieder der Menge. Die Wellenleitereigenschaften, durch die sich diese hochgradig bevorzugte Teilmenge auszeichnet, sind der effektive Gruppenbrechungsindex  $n_{\text{geff}}$  und die Ausbreitungskonstante  $\beta$ . Insbesondere hat diese hochgradig bevorzugte Teilmenge aus Brechungsindexprofilen mit niedrigster Dämpfung den geringsten Wert von  $n_{\text{geff}}$  unter allen anderen Mitgliedern der Menge und zeigt außerdem die geringste Änderung der quadratischen Ausbreitungskonstanten  $\beta^2$  bei Biegung des Wellenleiters. Zur Berechnung der biegungsinduzierten Änderung von  $\beta^2$  kann ein beliebiges aus einer Reihe von Biegungsmodellen herangezogen werden. Ein Biegungsmodell, das in dem hier beschriebenen Fall benutzt wird, ist ein Modell, bei dem der Wellenleiter eine Windung um einen Dorn mit 30 mm Durchmesser vollführt.

**[0017]** Die Familie oder Menge aus Brechungsindexprofilen mit niedrigster Dämpfung wurde für Einzelmoden-Wellenleitfasern mit gestuftem Indexprofil, mit trapezförmigem Indexprofil, mit gerundetem gestuftem Indexprofil und mit aus Kombinationen daraus bestehenden mehrteiligen Indexprofilen gefunden. Es wird daher angenommen, dass es sehr wahrscheinlich ist, dass so gut wie jede Familie bzw. Menge von Profilen Mitglieder hat, die eine niedrigste Dämpfung zeigen, und dass diese Mitglieder durch den im Vergleich zu allen anderen Mitgliedern der Menge oder Familie von Profilen tiefsten Wert von  $n_{\text{geff}}$  und die im Vergleich niedrigste Änderung von  $\beta^2$  bei Biegung gekennzeichnet sind.

**[0018]** In den erfindungsgemäßen Brechungsindexprofilen sind  $N$  Abschnitte definiert. Jeder Abschnitt hat einen  $\Delta\%$ -Wert und eine Form. Es werden diverse Breiten und Radien (siehe den obigen Abschnitt mit Definitionen) der Abschnitte definiert, bis die komplette Geometrie des mehrteiligen Kerns spezifiziert worden ist. Zum Beispiel kann für jeden Abschnitt der äußere Radius, gemessen von der Wellenleitermitte bis zum äußersten Punkt des jeweiligen Kern-Brechungsindexabschnittes, spezifiziert werden. Ein bevorzugtes Arbeitswellenlängenband reicht von 1200 nm bis 1750 nm und schließt die Arbeitsfenster bei 1300 nm und 1550 nm ein.

**[0019]** Unter einem ersten Aspekt der Erfindung hat der Kern drei Abschnitte. Dieser Aspekt wird nachstehend im Einzelnen erörtert. Das zur Berechnung der Struktur und der Eigenschaften der Wellenleitfaser ver-

wendete Modell lässt sich dahingehend anpassen, dass es einen Abfall des Brechungsindex auf der Mittellinie berücksichtigt. Falls an der Mittellinie eine gewisse Dotandenverarmung vorliegt, wird die untere Grenze für  $\Delta_1$  % um ca. 15 % abgesenkt. Zwar ist es möglich, eine Dotandenkompensation vorzunehmen, um die Verarmung an der Mittellinie zu eliminieren, doch ist es weniger zeitaufwendig und kostengünstiger, die Verarmung durch Anpassen anderer Profilparameter zu kompensieren. Es werden die oben angeführten Definitionen befolgt:  $r_3$  ist der zur Mitte der Grundlinie des dritten Abschnitts gezogene Radius, und  $w_3$  ist die Breite zwischen den Halbwertspunkten des relativen Brechungsindex des dritten Abschnitts.

**[0020]** Insbesondere wird unter dem ersten Aspekt der Erfindung eine Faser gemäß Anspruch 1 unten geschaffen.

**[0021]** Eine bevorzugte Ausführungsform dieses dreiteiligen Kern-Brechungsprofils wird in Tabelle 1 angegeben. Die Wellenleiterparameter in Tabelle 1 stellen die in Tabelle 2 angeführten Wellenleitfaser-Eigenschaften bereit.

**[0022]** Unter einem zweiten Aspekt der Erfindung wird eine Faser gemäß Anspruch 2 unten geschaffen. Eine bevorzugte Ausführungsform dieser Faser ist in Tabelle 3 angegeben. Die Wellenleitfaser mit Parametern wie in Tabelle 3 angegeben führt ebenfalls zu den Wellenleitfaser-Eigenschaften aus Tabelle 2.

#### Kurze Beschreibung der Zeichnungen

**[0023]** [Fig. 1](#) ist eine allgemeine Darstellung der diversen Profiltypen.

**[0024]** [Fig. 2](#) ist eine Darstellung der Ausführungsform mit einem aus drei Abschnitten bestehenden mehrteiligen Kern.

**[0025]** [Fig. 3](#) ist eine Darstellung der Ausführungsform mit einem aus zwei Abschnitten bestehenden mehrteiligen Kern.

**[0026]** [Fig. 4](#) ist ein Schaubild der Dämpfung bei 1550 nm über dem effektiven Gruppenindex.

**[0027]** [Fig. 5](#) ist ein Schaubild der Dämpfung bei 1550 nm über der biegungsinduzierten Änderung von  $\beta^2$ .

#### Beschreibung der bevorzugten Ausführungsformen

**[0028]** Neue Studien an den Kern-Brechungsindexprofilen optischer Wellenleitfasern haben zur Beschreibung einer großen Anzahl von Kernprofilen geführt, die einzigartige und vorteilhafte Wellenleitereigenschaften bereitstellen. Beispiele sind das US-Patent Nr. 4,715,679, Bhagavatula, und das US-Patent Nr. 5,483,612, Gallagher, in denen die offenbarten Kernindexprofile gezielt eingestellt wurden, um eine Gesamtdispersion, eine Nulldispersionswellenlänge und ein Gesamtdispersionsgefälle bereitzustellen, die gut zu einer konkreten Faseranwendung passen. Diese Untersuchungen zeigten im Zusammenspiel mit weiteren Arbeiten an diversen Mengen von Brechungsindexprofilen, dass es möglich war, Wellenleitfasern für Ultrahochleistungssysteme zu entwerfen. Beispielsweise wurden Wellenleitfasern entwickelt, auf denen Telekommunikationssysteme betrieben werden können, die zu hohen Informationsübertragungsraten fähig sind und Hochleistungslaser und optische Verstärker benutzen.

**[0029]** Bei der Arbeit mit neuartigen Kernindexprofilen haben Forscher herausgefunden, dass allgemein ein gewünschter Satz funktionaler Wellenleitereigenschaften durch einen beliebigen Profiltyp aus einer oder mehreren Mengen von Profiltypen bereitgestellt werden konnte. Die Entscheidung, welches Profil benutzt werden soll, wurde durch einfache Herstellung, niedrige Kosten und Unanfälligkeit der Wellenleiterfunktion gegen normale Schwankungen bei der Wellenleiterherstellung gesteuert.

**[0030]** Neuere Arbeiten haben gezeigt, dass bei der Beurteilung, welches Profil sich am Besten für den beabsichtigten Einsatzzweck und die Herstellung mit hoher Effizienz bei niedrigen Kosten eignet, ein weiterer Faktor berücksichtigt werden muss. Insbesondere dienten diese neueren Arbeiten dazu, Teilmengen bzw. Unterfamilien außergewöhnlicher Kernindexprofile zu identifizieren, die sich dadurch auszeichnen, dass sie im Vergleich zu anderen Mitgliedern der Profilmengen bzw. -familien eine minimale Dämpfung bereitstellen.

**[0031]** Experimente an hergestellten Wellenleitern mit Kern-Brechungsindexprofilen sowohl aus der Familie als auch aus der Unterfamilie mit niedriger Dämpfung haben gezeigt, dass der Unterschied bei der Dämpfung

nicht auf Fertigungsschwankungen, Rayleigh-Streuung oder -OH-Gehalt zurückzuführen ist. Vielmehr rührt der Unterschied bei der Dämpfung zwischen der Profilmenge und der zugehörigen Profil-Teilmenge von den Details der Profilform her und wird daher als „Profildämpfung“ bezeichnet.

**[0032]** Das neuartige Merkmal der hier offenbarten und beschriebenen Kern-Brechungsindexprofile besteht darin, dass sie Mitglieder ihrer jeweiligen Teilmengen mit minimaler Profildämpfung sind.

**[0033]** Parameter-Modellierungsstudien und Experimente an hergestellten Wellenleitfasern haben gezeigt, dass die Profildämpfung mit dem effektiven Gruppenbrechungsindex  $n_{\text{geff}}$  und der Ausbreitungskonstante  $\beta$  korreliert. Spezieller haben die Studien gezeigt, dass Wellenleitfasern mit minimaler Profildämpfung einen minimalen Wert von  $n_{\text{geff}}$  sowie eine minimale Änderung von  $\beta^2$  bei Biegung des Wellenleiters aufweisen. Dieses unerwartete Ergebnis bietet ein weiteres wichtiges Werkzeug bei der Gestaltung optimaler Kern-Brechungsindexprofile für im Wesentlichen alle Typen von Telekommunikationsanwendungen.

**[0034]** In [Fig. 1](#) wird der allgemeine Kern-Brechungsindexprofiltyp dieser Erfindung veranschaulicht. Es ist zu beachten, dass die Referenz für diesen relativen Index der Index der Umhüllungs- bzw. Mantelschicht ist. Das durchgezogene gezeichnete Indexprofil weist einen Mittelpunkt **24** mit einem vergleichsweise niedrigen relativen prozentualen Index  $\Delta$  % auf. Der Profilanteil **6** mit höherem  $\Delta$  % kann zum Beispiel ein  $\alpha$ -Profil oder ein gerundetes gestuftes Profil sein. An einen ebenen Profilanteil **14** schließt sich ein weiterer Anteil **18** mit niedrigem  $\Delta$  % an, dessen relativer Index negativ ist. An den Bereich **18** schließt sich ein weiterer Bereich **20** mit z.B. einem  $\alpha$ -Profil oder einem gerundeten gestuften Profil an. Die Punkte **22** zeigen an, dass das Profil weitere ringförmige Bereiche umfassen kann. Die gestrichelten Linien **8** und **10** zeigen alternative Profilformen in der Nähe der Kernmitte an. Die gestrichelte Linie **2**, ein gestuftes Indexprofil, ist eine Alternative zu der  $\alpha$ -Profilform **6**. Die gestrichelten Linien **12** und **16** zeigen alternative Profilformen für den Bereich des Profils mit negativem  $\Delta$  %.

**[0035]** [Fig. 1](#) zeigt außerdem die hier verwendeten Definitionen der Radien und Breiten. Der Radius **3** des Mittelprofils ist die Linie, die sich von der Mittellinie des Kerns bis zu dem Punkt erstreckt, an dem das extrapolierte Profil **6** auf die x-Achse trifft. Die Radien der ringförmigen Bereiche, die das Mittelprofil umgeben, werden im Allgemeinen von der Kernmitte bis zu der Mitte eines ringförmigen Bereichs gemessen, wie durch den Radius **7** des Kreistrings **20** veranschaulicht wird. Die Breite eines ringförmigen Bereichs wird an den Halbwertspunkten von  $\Delta$  % genommen, wie von der Breite **5** des Kreistrings **20** veranschaulicht.

**[0036]** An dem in [Fig. 2](#) veranschaulichten Profil erfolgten umfassende Modell- und Fertigungsstudien. In Tabelle 1 sind die Parameter der Teilmenge des Profils in [Fig. 2](#) mit niedriger Dämpfung angeführt:

Tabelle 1

Parameter	Obere Grenze	Untere Grenze
$\Delta_1$ %	1,30	0,77
$r_1$ ( $\mu\text{m}$ )	3,41	2,04
$\Delta_2$ %	0,16	0
$\Delta_3$ %	0,51	0
$r_3$ ( $\mu\text{m}$ )	10,21	5,53
$w_3$ ( $\mu\text{m}$ )	5,76	0
Inneres Profilvermögen ( $\%\mu\text{m}^2$ )	3,62	2,67
Äußeres Profilvermögen ( $\%\mu\text{m}^2$ )	7,86	1,00

**[0037]** Die Fälle, in denen entweder  $\Delta_3$  oder  $w_3$  null sind, sind einfach zusätzliche Beispiele mit optimaler Dämpfung für den in [Fig. 3](#) veranschaulichten Kernbrechungsindex. Die Definitionen der in Tabelle 1 angegebenen Parameter finden sich in [Fig. 2](#). Das  $\alpha$ -Profil in der Mitte mit einem  $\alpha$  von 1 ist als Kurve **30** gezeigt. Der Brechungsindex auf der Mittellinie **28** ist kleiner als der maximale Index des  $\alpha$ -Profils **30**. Die gestrichelte Linie **26** zeigt an, dass das Profil in Fällen modelliert werden kann, bei denen der maximale Index auf der Wellenlei-

termittellinie liegt. Der relative Index von **30** ist  $\Delta_1$  %, und der Radius **31** ist  $r_1$ . Der relative Index von Bereich **32** ist  $\Delta_2$  %. Der relative Index der gerundeten Stufe **34** ist  $\Delta_3$  %, der Radius **33** ist  $r_3$ , und die Breite **35** ist  $w_3$ . Das Kern-Brechungsindexprofil mit den in Tabelle 1 gezeigten Parametern kann die in Tabelle 2 angegebenen funktionalen Wellenleitereigenschaften erzeugen. Es wurden über 700 aus Tabelle 1 entnommene Kern-Brechungsindexprofile gefunden, die die in Tabelle 2 angegebenen erforderlichen funktionalen Eigenschaften aufweisen. Es versteht sich, dass nicht alle Kombinationen der Parameter aus Tabelle 1 die in Tabelle 2 angegebenen funktionalen Eigenschaften erzeugen.

Tabelle 2

Wellenleitereigenschaft	Obere Grenze	Untere Grenze
Dispersionsnullstelle (nm)	1595	1575
Dispersionsgefälle (ps/nm <sup>2</sup> -km)	0,10	-
Modenfelddurchmesser (nm)	9,1	7,9
Kritische Wellenlänge (nm)	1500	-
Biegungsverlust (Stifanordnung, dB)	8	-
Dämpfung 1550 (dB/km)	0,203	-

**[0038]** Die in Tabelle 2 gezeigten Wellenleitereigenschaften sind für eine Wellenleitfaser zum Einsatz in einem multiplexierten Telekommunikationssystem mit hoher Eingangsleistung charakteristisch. Die Wahl dieses Beispiels erfolgte der Einfachheit halber; weder definiert sie die Erfindung, noch schränkt sie die Erfindung auf irgendeine Weise ein.

**[0039]** Eine weitere Kern-Brechungsindexprofilform wurde modelliert, um Parametergrenzen zu finden, die die in Tabelle 2 angegebenen Wellenleitereigenschaften bereitstellen. Die Form dieses zweiten Kern-Brechungsindexprofils ist in [Fig. 3](#) gezeigt. Wiederum wurde für das Mittelprofil eine Form gewählt, bei der der Index der Mittellinie **38** niedriger als der maximale Index des  $\alpha$ -Profils **40** ist, wobei  $\alpha = 1$ . Die gestrichelte Linie **36** zeigt an, dass das Profil modelliert werden kann, ohne dass auf der Mittellinie ein niedriger Brechungsindex vorliegt. Das in [Fig. 2](#) gezeigte Kern-Brechungsindexprofil besteht aus zwei Abschnitten. Der Mittelabschnitt **40** hat den relativen Index  $\Delta_1$  % und den Radius **41**, der in Tabelle 3 mit  $r_1$  bezeichnet ist. Der gestufte Anteil des Indexprofils **42** hat den Radius **43**, der in Tabelle 3 mit  $r_2$  bezeichnet ist. Der relative Index von Abschnitt **42** ist  $\Delta_2$  %. Es ist zu beachten, dass der äußere Endpunkt von  $r_2$  ermittelt wird, indem der abfallende Anteil von Abschnitt **42** zur horizontalen Achse bzw. x-Achse extrapoliert wird.

Tabelle 3

Parameter	Obere Grenze	Untere Grenze
$\Delta_1$ %	1,25	1,02
$r_1$	2,38	1,84
$\Delta_2$ %	0,10	0,03
$r_2$	10,54	6,50
Inneres Profilvolumen (% $\mu\text{m}^2$ )	3,35	2,76
Äußeres Profilvolumen (% $\mu\text{m}^2$ )	7,77	2,24

**[0040]** Nicht alle möglichen Kombinationen der Parameter aus Tabelle 3 stellen Wellenleiter mit den in Tabelle 2 angegebenen Eigenschaften bereit. Jedoch stellten in der Modellstudie über 200 Brechungsindexprofile, bei denen es sich um Kombinationen aus den Parametern der Tabelle 3 handelte, einen Wellenleiter bereit, dessen Eigenschaften in den in Tabelle 2 gezeigten Bereichen lagen. Die Indexprofile aus [Fig. 2](#) erzeugten im All-

gemeinen ein flacheres Dispersionsgefälle, das im Mittel ca. 0,01 ps/nm<sup>2</sup>-km unter dem Gefälle der von [Fig. 3](#) veranschaulichten Profile lag.

**[0041]** In [Fig. 4](#) und [Fig. 5](#) werden experimentelle Ergebnisse aus Dämpfungsmessungen an Wellenleitern mit vier unterschiedlichen Profiltypen gezeigt. Bei den Wellenleitertypen A, C und D handelt es sich um Varianten des in [Fig. 2](#) gezeigten Profils. Bei allen handelt es sich um dispersionsverschobene Einzelmode-Wellenleitfasern. Der Wellenleiter des Typs A wird in Tabelle 1 näher charakterisiert. Die Wellenleitfaser B ist eine Einzelmode-Wellenleitfaser mit gestuftem Index.

**[0042]** In [Fig. 4](#) ist für die einzelnen Wellenleiter die Dämpfung bei 1550 nm über dem effektiven Gruppenindex  $n_{\text{geff}}$  aufgetragen. Der Vorgang wurde sorgfältig gesteuert, und alle Datenstreuungen aufgrund von Fertigungsvariablen wurden entfernt. Datenstreuungen aufgrund von -OH-Gehalteffekten und Rayleigh-Streuung wurden ebenfalls entfernt. Somit zeigen die Punktecluster für die einzelnen Wellenleitertypen die auf eine Änderung des Indexprofils, welche sich als Änderung des effektiven Gruppenindex manifestiert, zurückzuführende Änderung der Dämpfung. Die durch dunkle Quadrate **44** bezeichneten Wellenleiter B mit gestuftem Indexprofil zeigen für die gezeigte Änderung von  $n_{\text{geff}}$  eine Variation der Profildämpfung von ungefähr 0,013 dB/km. Desgleichen zeigen die Wellenleiter A (dunkle Diamanten **48**) eine Änderung von 0,02 dB/km, die Wellenleiter C (dunkle Dreiecke **46**) eine Änderung von 0,015 dB/km und die Wellenleiter D (helle Dreiecke **47**) eine Änderung der Dämpfung von ca. 0,017 dB/km.

**[0043]** [Fig. 5](#) zeigt dieselben Daten, nur dass die Änderung der Dämpfung über der Änderung von  $\beta^2$  aufgetragen ist, die durch eine einzelne Windung des Wellenleiters um einen 30-mm-Dorn induziert wird. Die Wellenleiter mit gestuftem Indexprofil B (dunkle Quadrate **54**) zeigen hier ungefähr die gleiche Änderung wie zuvor. Die Wellenleiter des Typs A, deren Profil dem Profil aus [Fig. 2](#) ähnelt (dunkle Diamanten **52**), zeigen eine wesentlich größere Änderung der Dämpfung bei biegeinduzierten Änderungen von  $\beta^2$  als die übrigen Profile vom Typ der [Fig. 2](#), d.h. als der Typ C (dunkle Dreiecke **56**) und der Typ D (helle Dreiecke **50**).

**[0044]** Die hauptsächliche Erkenntnis aus den in [Fig. 4](#) und [Fig. 5](#) dargelegten experimentellen Daten lautet, dass:

- bei sehr verschiedenen Profilformen Profildämpfung auftritt und
- die Profildämpfung eng mit  $n_{\text{geff}}$  und der Änderung von  $\beta^2$  bei Biegung zusammenhängt. Auf Basis dieser Ergebnisse gelangt man zu der Schlussfolgerung, dass es sich bei der Profildämpfung im Wesentlichen um ein universales Phänomen handelt.

Beispiele – Hergestellte Wellenleiter des in [Fig. 2](#) veranschaulichten Typs

**[0045]** Es wurden zwei separate Zieh-Vorformen gemäß dem in [Fig. 2](#) gezeigten Kern-Brechungsindexprofil hergestellt. Die Parameter der beiden Profile sind in Tabelle 4 angeführt.

Tabelle 4

Parameter	1. Zieh-Vorform	2. Zieh-Vorform
$\Delta_1$ %	0,868	0,864
$r_1$ (nm)	2,773	2,781
$\Delta_2$ %	0,023	0,025
$\Delta_3$ %	0,258	0,216
$r_3$ (nm)	6,71	7,51
$w_3$ (nm)	0,67	0,64
Inneres Volumen (% $\mu\text{m}^2$ )	3,02	3,08
Äußeres Volumen (% $\mu\text{m}^2$ )	3,90	4,01

**[0046]** Die optischen Eigenschaften der aus diesen Zieh-Vorformen hergestellten Wellenleiter lagen gut innerhalb der vorgegebenen Grenzen, die in der in Tabelle 3 gezeigt sind. In Tabelle 5 sind einige der Wellenlei-



termessungen gezeigt. Man beachte die äußerst niedrige Dämpfung in beiden Arbeitsfenstern bei 1310 nm und bei 1550 nm. Diese Wellenleiter gehören somit der Teilmenge von Wellenleitern mit niedriger Profildämpfung an.

Tabelle 5

Wellenleitereigenschaften	1. Vorform	2. Vorform
Dispersionsnullstelle (nm)	1582,5	1584,5
Dispersionsgefälle (ps/nm <sup>2</sup> -km)	0,077	0,073
Modenfelddurchmesser (nm)	8,34	8,22
Kritische Wellenlänge (nm)	1186	1190
Dämpfung 1310 nm (dB/km)	0,371	0,372
Dämpfung 1550 nm (dB/km)	0,199	0,201

**[0047]** Diese Ergebnisse demonstrieren deutlich die Exaktheit und Integrität des Modells und die exzellente Reproduzierbarkeit des Vorgangs. Es wurde das Vorhandensein einer Teilmenge mit niedriger Profildämpfung nachgewiesen und ein Mittel zur Herstellung von dieser Teilmenge angehörenden Wellenleitern vorgestellt.

**[0048]** Zwar wurden hier bestimmte Ausführungsformen der Erfindung offenbart und beschrieben, aber nichtsdestotrotz wird die Erfindung nur durch die folgenden Ansprüche beschränkt.

### Patentansprüche

1. Optische Wellenleitfaser für eine Einzelmode, die auf eine niedrige Dämpfung hin optimiert ist, mit:  
 einem Kernglasbereich mit einem Brechungsindexprofil;  
 einer ringförmigen Umhüllungs- bzw. Mantelglasschicht, die den Kernglasbereich umgibt und mit ihm in Kontakt steht, wobei die Umhüllungsglasschicht ein Brechungsindexprofil aufweist, in welchem mindestens ein Teil des mittigen Kernindexprofils größer als mindestens ein Teil des Umhüllungsschichtindexprofils ist; wobei der Kernbereich folgendes aufweist:  
 einen Mittelabschnitt mit einem Außenradius  $r_1$ , einem relativen Index  $\Delta_1$  % und einer Mittellinie mit einem relativen Index,  
 einen ersten ringförmigen Abschnitt, der den Mittelabschnitt umgibt und mit ihm in Kontakt steht, mit einem relativen Index  $\Delta_2$  %, und  
 einen zweiten ringförmigen Abschnitt, der den ersten ringförmigen Abschnitt umgibt und mit ihm in Kontakt steht, mit einem Mittelradius  $r_3$ , einem relativen Index  $\Delta_3$  %, und einer Breite  $w_3$ ;  
 wobei,

$$\Delta_1 \% > \Delta_3 \% \geq \Delta_2 \% \geq 0;$$

und der Mittelabschnitt ein  $\alpha$ -Profil aufweist, für das  $\alpha = 1$  ist, das Indexprofil des ersten ringförmigen Abschnitts eine Stufe ist und das Indexprofil des zweiten ringförmigen Abschnitts eine gerundete Stufe ist;  
 der relative Index der Mittellinie kleiner als oder gleich  $\Delta_1$  % ist und in dem Bereich von 0,2 % bis 1,3 % liegt,  $\Delta_1$  % in dem Bereich von 0,77 % bis 1,30 % liegt,  $r_1$  in dem Bereich von 2,04  $\mu\text{m}$  bis 3,41  $\mu\text{m}$  liegt,  $\Delta_2$  % in dem Bereich von 0 bis 0,16 % liegt,  $\Delta_3$  % in dem Bereich von 0 bis 0,51 % liegt und  $w_3$  in dem Bereich von 0 bis 5,76  $\mu\text{m}$  liegt; und  
 einem inneren und einem äußeren Profilvermögen, wobei das äußere Volumen in dem Bereich von 1,00 % $\mu\text{m}^2$  bis 7,85 % $\mu\text{m}^2$  liegt,  
 wobei,

die Kombinationen von Profilparametern, die aus den zuvor beschriebenen Bereichen ausgewählt sind, einen Einzelmode-Wellenleiter schaffen, der ein totales Dispersionsgefälle  $\leq 0,10$  ps/nm<sup>2</sup>-km, einen Modenfelddurchmesser im Bereich von 7,9  $\mu\text{m}$  bis 9,1  $\mu\text{m}$  und eine kritische Wellenlänge  $\leq 1500$  nm aufweist, worin das Profilvermögen als  $2 \int_{r_1}^{r_2} (\Delta \% r \, dr)$  definiert ist, sich das innere Profilvermögen von der Wellenleitermittellinie,  $r = 0$ , zum Übergangsradius erstreckt, sich das äußere Profilvermögen vom Übergangsradius zum letzten Punkt des Kerns erstreckt und der Übergangsradius aus der Abhängigkeit der Leistungsverteilung im Signal bei einer Signalwellenlängenänderung ermittelt wird, wobei die Signalleistung über dem inneren Volumen abnimmt, wenn die Wellenlänge zunimmt, und die Signalleistung über dem äußeren Vo-

lumen zunimmt, wenn die Wellenlänge zunimmt,

**dadurch gekennzeichnet**, dass:

$r_3$  in dem Bereich von  $5,53 \mu\text{m}$  bis  $10,21 \mu\text{m}$  liegt,

das innere Volumen in dem Bereich von  $2,67 \mu\text{m}^2$  bis  $3,62 \mu\text{m}^2$  liegt, und die Gegebenheiten der aus den zuvor beschriebenen Bereichen ausgewählten Profilparameter einen Einzelmode-Wellenleiter schaffen, der bei  $1550 \text{ nm}$  eine Dämpfung kleiner als oder gleich  $0,203 \text{ dB/km}$ , eine Null-Dispersionswellenlänge von  $1575 \text{ nm}$  bis  $1595 \text{ nm}$  und eine durch Pinfeldkrümmung induzierte Dämpfung kleiner als oder gleich  $8 \text{ dB}$  aufweist.

2. Optische Wellenleitfaser für eine Einzelmode, die auf eine niedrige Dämpfung hin optimiert ist, mit:

einem Kernglasbereich mit einem Brechungsindexprofil;

einer ringförmigen Umhüllungsglasschicht, die den Kernglasbereich umgibt und mit ihm in Kontakt steht, wobei die Umhüllungs- bzw. Mantelglasschicht ein Brechungsindexprofil aufweist, in welchem mindestens ein Teil des zentralen Kernindexprofils größer als mindestens ein Teil des Umhüllungsschichtindexprofils ist; wobei der Kernbereich einen Mittelabschnitt mit einem relativen Index  $\Delta_1 \%$  und einem Außenradius  $r_1$  und einer Mittellinie mit einem relativen Index aufweist,

einem ringförmigen Abschnitt mit einem relativen Index  $\Delta_2 \%$  und einem Radius  $r_2$ , gemessen von der Mittellinie des Wellenleiters zur äußeren Kante des ersten ringförmigen Abschnitts, wobei

der relative Index der Mittellinie kleiner als oder gleich  $\Delta_1 \%$  ist,

der Mittelabschnitt ein  $\alpha$ -Profil aufweist und das Indexprofil des ersten Abschnitts ein gestuftes Indexprofil ist,  $r_1$  in dem Bereich von  $1,84 \mu\text{m}$  bis  $2,38 \mu\text{m}$  liegt,  $\Delta_2 \%$  in dem Bereich von  $0,03 \%$  bis  $0,10 \%$  liegt und  $r_2$  in dem Bereich von  $6,50 \mu\text{m}$  bis  $10,54 \mu\text{m}$  liegt,

wobei

die Kombinationen von Profilparametern, die aus den zuvor beschriebenen Bereichen ausgewählt sind, einen Einzelmode-Wellenleiter schaffen, der ein totales Dispersionsgefälle  $\leq 0,10 \text{ ps/nm}^2\text{-km}$  und eine kritische Wellenlänge  $< 1500 \text{ nm}$  aufweist,

dadurch gekennzeichnet, dass

$\alpha = 1$ ,

$\Delta_1 \%$  in dem Bereich von  $0,86 \%$  bis  $1,25 \%$  liegt, und

die Faser ein inneres und ein äußeres Profilvolumen aufweist, bei dem das innere Volumen in dem Bereich von  $2,76 \mu\text{m}^2$  bis  $3,35 \mu\text{m}^2$  liegt und das äußere Volumen in dem Bereich von  $2,24 \mu\text{m}^2$  bis  $7,77 \mu\text{m}^2$  liegt,

die Kombinationen der aus den zuvor beschriebenen Bereichen ausgewählten Profilparameter einen Einzelmode-Wellenleiter schaffen, der bei  $1550 \text{ nm}$  eine Dämpfung kleiner als oder gleich  $0,203 \text{ dB/km}$ , eine Null-Dispersionswellenlänge von  $1575 \text{ nm}$  bis  $1595 \text{ nm}$ , einen Modenfelddurchmesser in dem Bereich von  $7,9 \mu\text{m}$  bis  $9,1 \mu\text{m}$  und eine durch Pinfeldkrümmung induzierte Dämpfung kleiner als oder gleich  $8 \text{ dB}$  aufweist, worin das Profilvolumen als  $2 \int_{r_1}^{r_2} (\Delta \% r \text{ dr})$  definiert ist, sich das innere Profilvolumen

von der Wellenleitermittellinie,  $r = 0$ , zum Übergangsradius erstreckt, sich das äußere Profilvolumen vom Übergangsradius zum letzten Punkt des Kerns erstreckt und der Übergangsradius aus der Abhängigkeit der Leistungsverteilung im Signal bei einer Signalwellenlängenänderung ermittelt wird, wobei die Signalleistung über dem inneren Volumen abnimmt, wenn die Wellenlänge zunimmt, und die Signalleistung über dem äußeren Volumen zunimmt, wenn die Wellenlänge zunimmt.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

FIG. 2

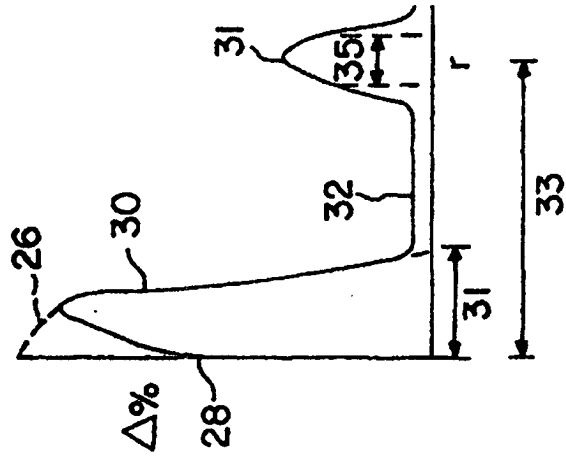


FIG. 1

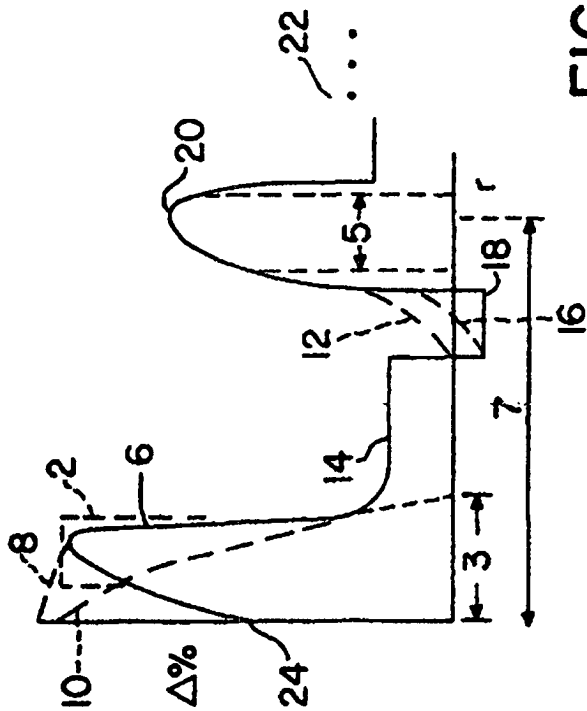


FIG. 3

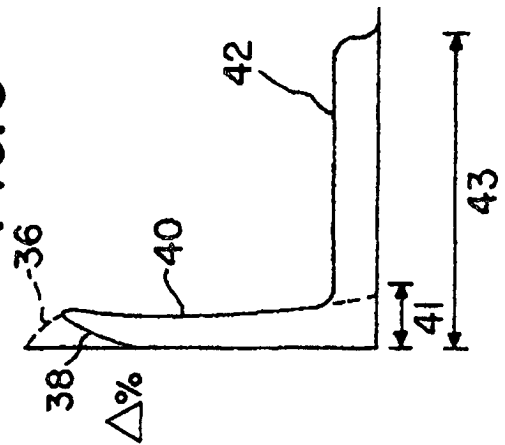


FIG. 5

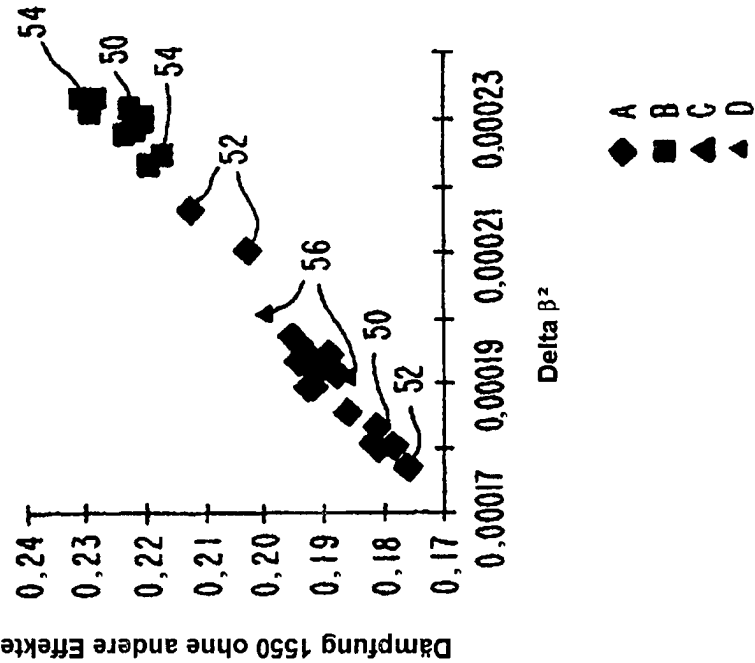


FIG. 4

