(19) **Bundesrepublik Deutschland**
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 600 21 839 T2** 2006.06.01

(12) # Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 1 106 586 B1**
(21) Deutsches Aktenzeichen: **600 21 839.2**
(96) Europäisches Aktenzeichen: **00 125 375.6**
(96) Europäischer Anmeldetag: **01.12.2000**
(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **13.06.2001**
(97) Veröffentlichungstag der Patenterteilung beim EPA: **10.08.2005**
(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **01.06.2006**

(51) Int Cl.[8]: ***C03C 21/00*** (2006.01)
C03C 3/064 (2006.01)
C03C 3/091 (2006.01)
C03C 3/097 (2006.01)
G02B 3/00 (2006.01)

(30) Unionspriorität:
34259899 **01.12.1999** **JP**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
DE, FR, GB

(73) Patentinhaber:
Nippon Sheet Glass Co., Ltd., Osaka, JP

(74) Vertreter:
HOFFMANN & EITLE, 81925 München

(72) Erfinder:
Yamaguchi, Jun, Chuo-ku, Osaka, JP; Kittaka, Shigeo, Chuo-ku, Osaka, JP

(54) Bezeichnung: **Gradientenlinse**

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

HINTERGRUND DER ERFINDUNG:

1. Gebiet der Erfindung:

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf eine Linse mit Brechungsindexverteilung (nachstehend als Indexstufenlinse bezeichnet), in der sich der Brechungsindex entlang der radialer Richtung der Stangenlinse verändert. Insbesondere befasst sich die Erfindung mit Indexstufenlinsen, erhältlich durch Unterwerfung des Ausgangsglasmaterials einem Ionenaustauschprozess unter Verwendung von Silber, um eine Brechungsindexverteilung in radialer Richtung zu erhalten.

2. Beschreibung des Standes der Technik:

[0002] Ein optisches Element vom Typ eines Brechungsindex-Verteilungselements, in dem sich der Brechungsindex parabolisch in einem Bereich davon ändert, beginnend im Zentrum entlang des Radius, hat die gleiche gegenstandsbildende Funktion wie die einer sphärischen Linse, auch wenn beide Seiten davon flach sind. Da diese Art des optischen Elements viele Vorteile aufweist, wie beispielsweise, dass die Linsen einen kleinen Durchmesser haben und kurze fokale Abstände aufweisen, die ihre Herstellung einfach machen, wurden sie häufig in optischen Köpfen für Kopierer, Drucker, Faxgeräte und dergleichen oder in anderen Anwendungen verwendet. Solche optischen Brechungsindex-Verteilungselemente beinhalten Indexstufenlinsen und Brechungsindex-Verteilungsfasern.

[0003] Gläser vom verwandten Stand der Technik, die durch Ziehen und anschliessenden Ionenaustauschprozess, durchgeführt durch Eintauchen in geschmolzene Salze, werden für optische Brechungsindex-Verteilungselemente (z.B. Linsen) verwendet, enthaltend die folgenden drei Hauptarten (1) Thallium enthaltende Gläser, (2) Cäsium enthaltende Gläser und (3) Lithium enthaltende Gläser.

[0004] Thallium enthaltende Gläser können zu Indexstufenlinsen führen, die eine extrem grosse, Winkelöffnung haben, da sie eine hohe elektrische Polarisierbarkeit besitzen. Diese Linsen haben jedoch eine erhöhte chromatische Aberration und können daher insbesondere für optische Systeme, die mit Farbbildern zu tun haben, nicht verwendet werden.

[0005] Die Cäsium enthaltenden Gläser haben reduzierte chromatische Aberrationen ungleich der Thallium enthaltenden Gläser. Da es jedoch unmöglich ist, grosse Mengen an Cäsium in Glas zu inkorporieren, sind die Linsen, die aus Cäsium enthaltenden Gläsern erhältlich sind, auf die Linsen limitiert, die kleine Winkelöffnungen haben. Zusätzlich haben diese Gläser den Nachteil, dass sie einen äusserst hohen Schmelzpunkt aufweisen.

[0006] Die Lithium enthaltenden Gläser haben eine reduzierte chromatische Aberration und einen moderaten Schmelzpunkt, weshalb sie häufig verwendet werden. Da jedoch Gläser, die grosse Mengen an Lithiumionen enthalten, sehr dazu neigen, zu entglasen, können abgestufte Linsen, die eine grosse Winkelöffnung aufweisen, daraus nicht hergestellt werden.

[0007] Linsen, die eine grosse Winkelöffnung haben, werden deshalb aus Thallium enthaltenden Gläsern hergestellt. Da Thallium jedoch toxisch ist, ist die Herstellung von Gläsern, die grosse Mengen an Thallium beinhalten, und die Verwendung von geschmolzenem Salz mit grossen Mengen an Thallium vom Standpunkt der Umweltverschmutzung unerwünscht.

[0008] Neben den aufgeführten Ionen nimmt man an, dass Silberionen zur Erlangung einer grossen Brechungsindexdifferenz beitragen können, wie in JP-A-61-261238 und JP-A-62-100451 gezeigt. (Der Ausdruck "JP-A", wie er hier verwendet wird, bedeutet eine "ungeprüfte, veröffentlichte, japanische Patentanmeldung".) Silberionen sind vorteilhaft im Hinblick auf die Herstellung von Linsen, die sich mit farbigen Bildern befassen, da die Verwendung von Silber in verringerter chromatischer Aberration im Vergleich zur Verwendung von Thallium resultiert. Da Silberionen grundsätzlich zur Ausbildung von Kolloiden neigen, wird in den oben genannten Referenzen die Verwendung von Glaszusammensetzungen empfohlen, die einen grossen Anteil an Phosphorkomponenten beinhalten, um die Ausbildung von Silberkolloiden zu inhibieren.

[0009] Da jedoch solche Gläser, die grosse Mengen an Phosphorkomponenten enthalten, eine geringe Wetterfestigkeit aufweisen, sind sie für den praktischen Gebrauch unzureichend. Die Gläser, die grosse Mengen

an Phosphorverbindungen enthalten, haben weiterhin das Problem, dass das Glas während des Ionenaustauschprozesses mit Nitrat reagiert und zur Ausbildung des Entglasungsprodukts auf der Oberfläche führt, und dass das Glas selbst teilweise im geschmolzenen Salz gelöst wird. Wenn die Schmelze eines Salzes abweichend von Nitrat, beispielsweise die Schmelze eines Sulfats oder Halogenids, verwendet wird, tritt ein Problem auf, da eine solche Schmelze zur hochgradigen Korrosion von Metallen und Gläsern führt und ein geeigneter Behälter zum Halten des geschmolzenen Salzes nicht leicht erhältlich ist.

[0010] Eine verbesserte Glaszusammensetzung, vorgeschlagen in JP-A-62-100451, ist die Glaszusammensetzung, offenbart in JP-A-4-2629. Jedoch ist auch diese Glaszusammensetzung in geschmolzenen Salzen immer noch unzureichend stabil und weist eine unzureichende Wetterfestigkeit auf und ist daher für die praktische Anwendung ungeeignet.

[0011] Andererseits ist ein Aluminiumsilicatglas bekannt, das eine Glaszusammensetzung aufweist, die keine Phosphorkomponenten beinhaltet und in der die Silberionen keine Kolloide bilden. Grundsätzlich führt die Inkorporierung von Alkaliionen in Silicatglas zur Spaltung des Silicatgrundgerüsts, das dann zur Bildung von nichtverbrücktem Sauerstoff führt (nachfolgend als "NBO" bezeichnet) und stark an Alkaliionen bindet. Wenn Glas, das NBO enthält, einem Ionenaustauschprozess unterworfen wird, um Silberionen darin zu inkorporieren, werden die eingebauten Silberionen durch das NBP reduziert und bilden Silberkolloide, die dadurch das Glas verfärben. Folglich kann ein solches Glas nicht für Linsen verwendet werden.

[0012] Wird im Gegensatz dazu Al_2O_3 zu Silicatglas hinzugefügt, dann wird Al_2O_3 in Form von AlO_4- inkorporiert und bindet an die Alkaliionen. Aufgrund dieser Tatsache, ist die Menge an NBO im Glas reduziert und die Silberionen neigen dazu, in Ionenform stabil vorzuliegen. Da AlO_4-Alkaliionen in einem Verhältnis von 1:1 bindet, ist die Menge an NBO im Glas minimiert (wird in einigen Gläsern Null) wenn (M)/(Al) 1 ist [(M) und (Al)] sind in molarer Konzentration der Alkaliionen und AlO_4- zugegen bzw. in dem Glas). Folglich sind die Gläser, in denen die Silberionen am stabilsten vorliegen, die Gläser, in denen (M)/(Al) 1 ist.

[0013] Es sei angemerkt, dass zur Vergrösserung der Winkelöffnung einer Linse, die eine radiale Brechungsindexverteilung aufweist, eine Zunahme der radialen Differenz des Brechungsindexes erforderlich ist. Die Differenz des Brechungsindexes ist annähernd proportional zur Konzentration der Silberionen. Um ein Glas mit einer vergrösserten eckigen Blende zu erhalten, sollte dieses daher eine grosse Menge an Alkaliionen enthalten, die durch Silberionen ersetzt werden können. Um es Silberionen zu ermöglichen, stabil in einem Aluminiumsilicatglas vorzuliegen, ist es erforderlich, die Konzentration an Al_2O_3 zu erhöhen, da dadurch die Alkaliionenkonzentration im Glas erhöht wird. Jedoch weisen Gläser mit einer erhöhten Al_2O_3-Konzentration eine steigende Schmelztemperatur auf. Daher sind Glasprodukte mit zufriedenstellender Qualität (Frei von Kratzern, Blasen etc.) schwierig herzustellen. Obwohl eine Technik zur Verringerung der Al_2O_3-Konzentration im Glas möglicherweise nützlich ist, um die Schmelztemperatur zu senken, resultiert dies in einer verringerten Menge an Silberionen, die enthalten sein können, ohne dabei Kolloide auszubilden, was es wiederum unmöglich macht, eine grosse Differenz im Brechungsindex zu erlangen.

[0014] Es ist bekannt, dass die Inkorporierung von B_2O_3 in Glas die Schmelztemperatur effektiv senkt und gleichzeitig das Ausbilden von Kolloiden der Silberionen unterbindet (Glastech. Ber., 65 (8) 199 (1991); Appl. Opt., 31 (25) 5221 (1992); J. Non-Cryst. Solids, 113 37 (1989)). (In Gläsern ist Bor, wie Aluminium, trivalent.) Jedoch führen zu hohe Konzentrationen an B_2O_3 im Glas zu Problemen derart, dass das Glas eine verringerte Beständigkeit und die Rate an Ionenaustauschprozessen an Silberionen gering ist. Folglich ist die Konzentration an B_2O_3, die inkorporiert werden kann, limitiert.

[0015] In JP-A-4-219341 sind BaO, CaO, Ga_2O_3, La_2O_3, MgO, Nb_2O_3, Ta_2O_3, Yb_2O_3, ZnO und ZrO_2 als Inhaltsstoffe angegeben, die anstelle von Al_2O_3 neben B_2O_3 verwendet werden können, und gleichzeitig die Ausbildung von Silberkolloiden unterbinden. Jedoch gibt es darin keine Beschreibung darüber, ob der Ersatz zur Erniedrigung der Schmelztemperatur führt oder nicht.

[0016] US 4 495 299 offenbart Linsen, die eine Brechungsindexverteilung aufweisen und aus Thallium enthaltenden Glaszusammensetzungen hergestellt sind.

[0017] EP 0 918 235 A2 offenbart eine Linse mit einer axialen Brechungsindexverteilung, die durch Ionenaustauschprozesse mit Silber aus einem Glasmaterial der folgenden Zusammensetzung erhältlich ist:
$10 < Na_2O \leq 25$ mol-%;
$8 < Al_2O_3 \leq 25$ mol-%;
$0 \leq MgO \leq 18$ mol-%;

$0 \leq ZnO \leq 18$ mol-%;
$3 \leq B_2O_3 \leq 18$ mol-%;
$35 \leq SiO_2 \leq 55$ mol-%;
$0 \leq La_2O_3 \leq 5$ mol-%;
$0 \leq BaO \leq 5$ mol-%;
$0 \leq Ta_2O_5 \leq 3$ mol-%; und
$0 \leq ZrO_2 \leq 3$ mol-%;
vorausgesetzt, dass
$2{,}5 \leq MgO + ZnO \leq 18$ mol-%.

[0018] Wie oben beschrieben, konnte keine der Techniken, die aus dem verwandten Stand der Technik bekannt waren, eine hochqualitative Linse zur Verfügung stellen, die eine radiale Brechungsindexverteilung mit einer grossen radialen Differenz im Brechungsindex aufweist und zufriedenstellende Eigenschaften besitzt.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG:

[0019] Ziel der Erfindung ist es, bestehende Probleme im Stand der Technik, wie oben beschrieben, zu eliminieren und eine hoch beständige, exzellente Linse mit radialer Brechungsindexverteilung zur Verfügung zu stellen, die für optisches Design notwendig ist und die zufriedenstellende Qualität aufweist, und die insbesondere aus einer Glaszusammensetzung hergestellt werden kann, die eine niedrige Schmelztemperatur aufweist und eine für den praktischen Nutzen ausreichende Menge an Ionenaustauschprozessen zulässt und es Silberionen gewährt, stabil im Glas vorzuliegen.

[0020] Die Erfindung stellt eine Indexstufenlinse bereit, erhältlich durch Unterwerfen eines Ausgangsglasmaterials mit einer Stangenform einem Ionenaustauschprozess, wodurch die in dem Glas enthaltenen Alkaliionen durch Silberionen ersetzt werden, und dann Unterwerfen der Glasstange einem Ionenaustauschprozess, wobei in dem Glas eine Verteilung der Silberionenkonzentration gebildet wird und hierdurch eine parabolische Brechungsindexverteilung gebildet wird, wobei das Ausgangsglasmaterial eine Glaszusammensetzung der folgenden Komponenten umfasst:
$15 < Na_2O \leq 30$ mol-%;
$10 < Al_2O_3 \leq 25$ mol-%;
$27{,}5 \leq SiO_2 \leq 55$ mol-%;
$3 \leq B_2O_3 \leq 18$ mol-%;
$2{,}5 \leq MgO \leq 18$ mol-%;
$0 \leq Ta_2O_5 \leq 5$ mol-%;
$0 \leq La_2O_3 \leq 3$ mol-%;
$0 \leq BaO \leq 3$ mol-%; und
$0 \leq ZrO_2 \leq 3$ mol-%.

[0021] Und zwar gemäss der Erfindung durch Inkorporation von MgO in ein Aluminiumborsilicatglas, wobei die Schmelztemperatur des Glases erniedrigt werden kann bei Beibehaltung hoher Beständigkeit und stabilem Einbau von Silberionen in Form von Ionen in das Glas. Als Ergebnis erhält man eine Linse, in der die notwendige radiale Brechungsindexverteilung realisiert werden kann.

[0022] Es ist bekannt, dass polyvalente Ionen grundsätzlich dazu dienen, die Diffusionsrate an monovalenten Ionen beträchtlich herabzusetzen. Jedoch wurde berichtet, dass MgO und ZnO polyvalente Ionen darstellen, die in relativ geringem Ausmass die Rate an Ionenaustauschprozessen reduzieren (R.H. Doremus, "Glass Science, 2. Auflage, Seite 278, John Wiley & Sons) und dass diese polyvalenten Ionen möglicherweise die NBO in Gläsern verringern (Appl. Opt., 31 (25) 5221 (1992)).

[0023] Jedoch konnte in Experimenten, durchgeführt durch die Erfinder der vorliegenden Anmeldung, gezeigt werden, dass ZnO in Aluminiumborsilicatglas inkorporiert wird und Phasenseparation im Glas auftritt. Die Inkorporierung von MgO führte zu keinerlei derartigen Phasentrennungen.

[0024] Die Erfinder der vorliegenden Anmeldung haben gefunden, dass das Ziel dieser Erfindung durch die Inkorporierung von MgO in Aluminiumborsilicatglas als Glasbestandteil für die Verwendung als Ausgangsglasmaterial, von dem eine Linse erhalten werden kann, die eine radiale Brechungsindexverteilung aufweist, erreicht werden kann. Daher konnte die Erfindung vervollständigt werden.

[0025] In der Erfindung ist die Glaszusammensetzung vorzugsweise wie folgt:

$18 \leq Na_2O \leq 30$ mol-%;
$15 \leq Al_2O_3 \leq 25$ mol-%;
$30 \leq SiO_2 \leq 50$ mol-%;
$5 \leq B_2O_3 \leq 18$ mol-%;
$3 \leq MgO \leq 15$ mol-%;
$0 \leq Ta_2O_5 \leq 3$ mol-%;
$0 \leq La_2O_3 \leq 3$ mol-%;
$0 \leq BaO \leq 3$ mol-%; und
$0 \leq ZrO_2 \leq 3$ mol-%.

[0026] Eine mehr bevorzugte Glaszusammensetzung der Erfindung ist wie folgt zusammengesetzt:
$20 \leq Na_2O \leq 30$ mol-%;
$15 \leq Al_2O_3 \leq 22{,}5$ mol-%;
$30 \leq SiO_2 \leq 45$ mol-%;
$7 \leq B_2O_3 \leq 15$ mol-%;
$5 \leq MgO \leq 12{,}5$ mol-%;
$0 \leq Ta_2O_5 \leq 3$ mol-%;
$0 \leq La_2O_3 \leq 3$ mol-%;
$0 \leq BaO \leq 3$ mol-%; und
$0 \leq ZrO_2 \leq 3$ mol-%.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN:

[0027] Fig. 1 ist eine schematische Darstellung, die den Durchgang eines Lichtstrahls durch eine Indexstufenlinse illustriert;

[0028] Fig. 2 ist eine Darstellung, die eine Methode zur Bestimmung der längslaufenden sphärischen Aberration illustriert;

[0029] Fig. 3 ist eine grafische Darstellung, die die Brechungsindexverteilung einer Indexstufenlinse, wie in Beispiel 1 erhältlich, darstellt;

[0030] Fig. 4A und Fig. 4B sind grafische Darstellungen bzw. zeigen die Brechungsindexverteilungen von Indexstufenlinsen, die aus den Beispielen 2 und 3 erhältlich sind;

[0031] Fig. 5A und Fig. 5B sind grafische Darstellungen bzw. zeigen die Verteilungen des Brechungsindexes von Indexstufenlinsen, die aus den Beispielen 4 und 5 erhältlich sind;

[0032] Fig. 6 ist eine grafische Darstellung, die die Brechungsindexverteilung einer Indexstufenlinse darstellt, die in Beispiel 6 erhältlich ist;

[0033] Fig. 7 ist eine grafische Darstellung, die die längslaufende sphärische Aberration einer Indexstufenlinse darstellt, die in Beispiel 1 erhältlich ist;

[0034] Fig. 8A und Fig. 8B sind grafische Darstellungen bzw. zeigen die längslaufenden sphärischen Aberrationen von Indexstufenlinsen, die aus den Beispielen 2 und 3 erhältlich sind;

[0035] Fig. 9A und Fig. 9B sind grafische Darstellungen bzw. zeigen die längslaufenden sphärischen Aberrationen von Indexstufenlinsen, die aus den Beispielen 4 und 5 erhältlich sind;

[0036] Fig. 10 ist eine grafische Darstellung, die die längslaufende sphärische Aberration von Indexstufenlinsen darstellt, die in Beispiel 6 erhältlich sind.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG:

[0037] Verfahren zur Durchführung der Erfindung werden nachstehend erklärt.

[0038] Zunächst ist eine Erläuterung bezüglich der Glaszusammensetzung des Ausgangsglasmaterials zur Verwendung in dieser Erfindung angegeben.

[0039] Wenn die Konzentration an MgO, die in der Glaszusammensetzung enthalten ist, niedriger als 2,5 mol-% ist, dann ist die Wirkung der Schmelzpunkterniedrigung, die damit dem Glas eine zufriedenstellende Qualität verleiht, unzureichend. Konzentrationen an MgO, die 18 mol-% übersteigen, sind unpraktisch, da so hohe MgO-Konzentrationen in einer geringen Stabilität der Silberionen im Glas resultieren. Folglich ist die Konzentration an MgO 2,5 ≤ MgO ≤ 18 mol-%, bevorzugt 3 ≤ MgO ≤ 15 mol-%, mehr bevorzugt 5 ≤ MgO ≤ 12,5 mol-%.

[0040] Die geeignetsten Alkaliionen, die durch Silberionen ersetzt werden und die eine Brechungsindexverteilung hervorrufen, sind Natriumionen, die einen hohen Koeffizienten an wechselseitiger Diffusion mit Silberionen aufweisen und durch Silberionen in einer kurzen Ionenaustauschprozesszeit ausgetauscht werden können. Wenn die Konzentration an Natriumionen kleiner als 15 mol-% ist, kann die erforderliche Differenz des Brechungsindexes nicht erhalten werden. Wenn die Konzentration davon 30 mol-% übersteigt, weist das Glas eine verringerte Beständigkeit auf und ist für den praktischen Nutzen ungeeignet. Folglich ist die Konzentration an Na_2O 15 < Na_2O ≤ 30 mol-%, bevorzugt 18 < Na_2O ≤ 30 mol-%, mehr bevorzugt 20 < Na_2O ≤ 30 mol-%.

[0041] Al_2O_3 ist ein essentieller Bestandteil, der notwendig ist, um Silberionen zu befähigen, stabil im Glas zugegen zu sein. Wie oben dargestellt, ist (Na)/(Al) bevorzugt 1 vom Standpunkt der Eliminierung von NBO im Glas. In der Erfindung jedoch befähigt der Einbau von B_2O_3 und MgO in das Glas die Silberionen dazu, stabil im Glas vorzuliegen, auch wenn (Na)/(Al) nicht 1 ist.

[0042] Zu hohe Konzentrationen an Al_2O_3 resultieren in zu hohen Schmelztemperaturen und führen daher zu Schwierigkeiten bei der Produktion des Glases in zufriedenstellender Qualität. Folglich ist die Konzentration von Al_2O_3 10 < Al_2O_3 ≤ 25 mol-%, bevorzugt 15 < Al_2O_3 ≤ 25 mol-%, mehr bevorzugt 15 < Al_2O_3 ≤ 22,5 mol-%.

[0043] B_2O_3 dient dazu, die Schmelztemperatur des Glases herabzusetzen, um damit die Produktion des Glasprodukts in ausreichender Qualität zu ermöglichen. B_2O_3 ist zudem wirksam, um Glas vor der Ausbildung von Rissen aufgrund des Ionenaustauschprozesses zu bewahren. Ist jedoch die Konzentration an B_2O_3 niedriger als 3 mol-%, dann sind diese Effekte unzureichend. Wenn die Konzentration davon 18 mol-% übersteigt, dann weist das Glas eine verringerte Beständigkeit auf und ist für die praktische Anwendung ungeeignet. Folglich ist die Konzentration an B_2O_3 3 ≤ B_2O_3 ≤ 18 mol-%, bevorzugt 5 ≤ B_2O_3 ≤ 18 mol-%, mehr bevorzugt 7 ≤ B_2O_3 ≤ 15 mol-%.

[0044] SiO_2 ist der Hauptbestandteil, der das Netzwerk der Glasstruktur bildet. Wenn die Konzentration an SiO_2 niedriger als 27,5 mol-% ist, dann hat das Glas eine beträchtlich reduzierte chemische Beständigkeit. Wenn die Konzentration davon 55 mol-% übersteigt, dann ist nicht nur der Gehalt an Oxid, der zur Bildung der Brechungsindexverteilung beiträgt, und der Gehalt an anderen Oxiden beschränkt, sondern das Glas weist auch eine zu hohe Schmelztemperatur auf, was es schwierig macht, das Glasprodukt in zufriedenstellender Qualität zu erhalten. Folglich ist die Konzentration an SiO_2 27,5 ≤ SiO_2 ≤ 55 mol-%, bevorzugt 30 ≤ SiO_2 ≤ 50 mol-%, weiter bevorzugt 30 ≤ SiO_2 ≤ 45 mol-%.

[0045] Ta_2O_5 kann in der Erfindung zum Zweck der Modifizierung des Brechungsindexes und der Brechungsindexverteilung des Mutterglases hinzugefügt werden und führt dadurch zu einem erhöhten Freiheitsgrad des Linsendesigns. Jedoch werfen zu hohe Konzentrationen an Ta_2O_5 im Glas die Probleme auf, dass die Austauschrate zwischen Silberionen und Natriumionen gering wird und Phasentrennung im Glas auftritt. Folglich ist die Konzentration an Ta_2O_5 5 mol-% oder niedriger, bevorzugt 3 mol-% oder niedriger.

[0046] Al_2O_3 und BaO können gleichermassen wie Ta_2O_5 zum Zweck der Modifizierung des Brechungsindexes und der Brechungsindexverteilung im Mutterglas hinzugefügt werden. Jedoch führen Al_2O_3 und BaO zu dem Problem, dass diese Inhaltsstoffe noch wirksamer als Ta_2O_5 zur Erniedrigung der Austauschrate zwischen Silberionen und Natriumionen beitragen und dass hohe Konzentrationen an Al_2O_3 und BaO in einer Phasentrennung im Glas resultieren. Folglich ist die Konzentration an Al_2O_3 und BaO jeweils 3 mol-% oder niedriger.

[0047] ZrO_2 kann in der Erfindung hinzugesetzt werden, um die Beständigkeit des Mutterglases zu verbessern. Jedoch werfen hohe Konzentrationen an ZrO_2 im Glas das Problem auf, dass das Glas einen zu hohen Schmelzpunkt aufweist und die Austauschrate zwischen Silberionen und Natriumionen zu gering ist. Folglich ist eine Konzentration an ZrO_2 von 3 mol-% oder kleiner wünschenswert.

[0048] Weiterhinkönnen Nb_2O_5, Sb_2O_3, WO_3, und Y_2O_3 hinzugefügt werden, so lange deren Zugabe nicht nachteilig die Eigenschaften der Linsen, die eine radiale Brechungsindexverteilung aufweisen, beeinflussen. Die Menge an diesen Inhaltsstoffen, basierend auf der Gesamtmenge der Hauptinhaltsstoffe, wie oben be-

schrieben, sollte wie folgt sein: $0 \leq Nb_2O_5 \leq 3$ mol-%, $0 \leq Sb_2O_3 \leq 1$ mol-%, $0 \leq WO_3 \leq 1$ mol-% und $0 \leq Y_2O_3 \leq 1$ mol-%.

[0049] Die erhaltenen Gläser wurden bezüglich ihrer Beständigkeit bewertet (Wasserresistenz und Säureresistenz). Für diese Bewertung wurde die Pulvermethode verwendet, die eine Standardmethode darstellt, die von Japan Optical Glass Industry Association angewendet wird. Die Linsen, die eine radiale Brechungsindexverteilung gemäss der Erfindung aufweisen, werden nach der folgenden Methode hergestellt.

[0050] Zunächst wird ein zylindrisches Ausgangsglasmaterial, das ausgehend von der oben beschriebenen Zusammensetzung hergestellt wird, einem Ionenaustauschprozess ausgesetzt, beispielsweise durch Eintauchen in ein geschmolzenes Salz, um dadurch alle enthaltenen Alkaliionen im Glas durch Silberionen zu ersetzen. Beispiele für geschmolzenes Salz zur Verwendung in diesem Verfahren beinhalten eine Schmelze von Salzmischungen, die 5 bis 30 mol-% Silbernitrat und 95 bis 70 mol-% Natriumnitrat enthalten und eine Schmelze einer Salzmischung, die 50 bis 100 mol-% Silberchlorid, 0 bis 50 mol-% Zinkchlorid und 0 bis 30 mol-% Silbersulfid enthält. Vom Standpunkt der Korrosivität jedoch ist die Verwendung einer geschmolzenen Salzmischung bevorzugt, die Silbernitrat enthält. Bedingungen für dieses Verfahren sind geeigneterweise aus dem Temperaturbereich von 300 bis 420°C für geschmolzene Salzmischungen, die Silbernitrat enthalten, auszuwählen, oder von 450 bis 550°C für geschmolzene Salzmischungen, die Silberchlorid enthalten, bei einer Behandlungsdauer von 3 bis 30 Tagen.

[0051] Die Glasstange, in der alle Alkaliionen durch Silberionen ersetzt wurden, wird Ionenaustauschprozessen ausgesetzt, beispielsweise durch nochmaliges Eintauchen der Stange in geschmolzenes Salz, um im Glas eine Verteilung der Silberionenkonzentration und damit eine parabolische Brechungsindexverteilung zu erreichen. Beispiele für geschmolzenes Salz zur Verwendung in diesem Verfahren beinhalten Natriumnitrat und Natriumchlorid. Vom Standpunkt der Korrosivität jedoch ist die Verwendung von geschmolzenem Natriumnitrat bevorzugt. Bedingungen für das Verfahren mit geschmolzenem Natriumnitrat sind geeignet aus dem Temperaturbereich von 350 bis 550°C auszuwählen, und die Behandlungsdauer reicht von 1 bis 20 Tagen.

[0052] Die hergestellte Indexstufenlinse wurde auf ihre optischen Eigenschaften untersucht, insbesondere auf die radiale Brechungsindexverteilung und die sphärische Aberration. Die verwendeten Bewertungsverfahren sind die folgenden.

[0053] Die radiale Brechungsindexverteilung in einer Linse, die eine radiale Brechungsindexverteilung besitzt, kann durch die folgende Gleichung ausgedrückt werden:

$$n(r)^2 = n_0^2 \cdot \{1 - (g \cdot r)^2 + h_4 \cdot (g \cdot r)^4 + h_6 \cdot (g \cdot r)^6 + ...\}$$

worin r die Distanz der optischen Achse ist,
n(r) ist der Brechungsindex, in einer Position beabstandet von der optischen Achse in einem Abstand r gemessen,
n_0 ist der Brechungsindex, der in der optischen Achse gemessen wurde,
r_0 ist der Radius, der im wirksamen Bereich der Linse liegt,
g ist ein Koeffizient zweiter Ordnung der Brechungsindexverteilung, und
h_4, h_6, ... sind Koeffizienten vierter, sechster, ...Ordnung des Brechungsindexes.

[0054] Die Brechungsindexverteilung der hergestellten Linse wurde grob durch Berechnung der Verteilung der Silberkonzentration in der nachfolgend beschriebenen Weise bestimmt. Der Brechungsindex n_0 des Linsenzentrums und der Brechungsindex des peripheren Bereichs der Linse wurden gemessen und die radiale Verteilung der Silberkonzentration in der Linse wurde durch einen Röntgenmikroanalysator bestimmt. Die Brechungsindexverteilung in der Linse wurde unter der Annahme berechnet, dass die Brechungsindexverteilung proportional zur Silberkonzentrationsverteilung war.

[0055] Die Lichtstrahlen fallen parallel mit einer optischen Achse, die sich periodisch durch die Linse schlängelt, auf die stangenförmige Linse ein, wie in **Fig. 1** dargestellt. Die Länge einer Periode P in einer paraaxialen Region ist wie in der folgenden Gleichung definiert:

$$P = 2\pi/g$$

[0056] Wenn die Länge der stangenförmigen Linse auf P/4 eingestellt ist, dann können Strahlen, die parallel auf das Ende der Linse einfallen, am anderen Ende konvergiert werden.

[0057] Die erhaltene längslaufende sphärische Aberration der Stange (Länge, P/4) wurde durch das folgende Verfahren bestimmt (siehe Fig. 2).

(1) Die Länge der Stangenlinse wurde als P/4 angenommen.

(2) Der He-Ne-Laserstrahl (Wellenlänge 632,8 nm) wurde erzeugt, um ein Ende der Linse, das parallel zur optischen Achse steht, an einer Position abseits der optischen Achse mit einem Abstand H zu treffen.

(3) Die Abstände D_1 und D_2 zwischen dem Zentrum des Laserstrahls und der optischen Achse wurden in einer Position bestimmt, die abseits vom anderen Ende der Linse mit Abständen von L_1 bzw. L_2 ist.

(4) Der Wert für die sphärische Aberration SA der Lichtstrahlhöhe h ist berechnet von L_1, L_2, D_1 und D_2.

[0058] Die Erfindung wird nachfolgend detailliert unter Bezugnahme auf Beispiele und Vergleichsbeispiele erläutert.

BEISPIEL 1

[0059] Ein Glasmaterial, das die in Tabelle 1 gezeigte Zusammensetzung aufweist, wurde durch Heizen bei 1.450°C in einem Platintiegel geschmolzen und dann gegossen.

[0060] Die Beständigkeit des Glases wurde nach der Pulvermethode bestimmt. Daraus ergab sich, dass die Wasserresistenz und die Säureresistenz davon im zweiten bzw. dritten Grad liegen. Diese Ergebnisse zeigen, dass der Einbau von MgO in das Glas die Stabilität eher verbessert als beeinträchtigt.

[0061] Eine Glasstange, die einen Durchmesser von 25 mm hat, wurde durch Herausschneiden aus dem Glasblock erhalten. Diese Stange wurde erhitzt und gezogen, um daraus eine Glasstange zu erhalten, die einen Durchmesser von 1 mm hat. Diese Stange wurde 6 Tage in eine 400°C heisse, geschmolzene Salzmischung eingetaucht, die aus 20 mol-% Silbernitrat und 80 mol-% Natriumnitrat besteht, um die Natriumionen, die im Glas enthalten sind, durch Silberionen, die im geschmolzenen Salz enthalten sind, zu ersetzen. Der Grad des Austauschs durch diese Behandlung lag bei 98 %.

[0062] Dieses Glas wurde durch 16-stündiges Eintauchen in 400°C heisses, geschmolzenes Salz, das ausschliesslich aus Natriumnitrat besteht, behandelt. Auf diese Weise wurde eine Linse erhalten, die eine radiale Brechungsindexverteilung aufweist.

[0063] Die Brechungsindexverteilung dieser Linse wurde durch das oben beschriebene Verfahren bestimmt und wurde als nahezu parabolisch, wie in Fig. 3 gezeigt, gefunden. Diese Brechungsindexverteilung war nachweislich für Linsen geeignet, die eine radiale Brechungsindexverteilung besitzen.

[0064] Die Ergebnisse der optischen Bewertung dieser Linse sind in Tabelle 2 dargestellt und zeigen die Werte n_0 und g, die bei einer Wellenlänge von 632,8 nm bestimmt wurden. Fig. 7 zeigt die Ergebnisse der Bestimmung der längslaufenden sphärischen Aberration.

BEISPIELE 2 UND 3

[0065] Glasmaterialien der genannten Zusammensetzung, die sich allerdings in der MgO-Konzentration der Glaszusammensetzung des Beispiels 1, wie in Tabelle 1 gezeigt, unterscheiden (MgO wurde in Beispiel 2 durch B_2O_3 und in Beispiel 3 durch Al_2O_3 ersetzt), wurden durch Erhitzen auf 1.450°C bzw. 1.400°C in einem Platintiegel geschmolzen und dann gegossen.

[0066] Die erhaltenen Gläser wurden auf ihre Beständigkeit hin mittels der Pulvermethode untersucht. Dies ergab, dass die Wasserresistenz und die Säureresistenz eines jeden Glases jeweils im zweiten Grad liegt. Diese Gläser zeigen daher höhere Wetterfestigkeit.

[0067] Aus jedem erhaltenen Glasblock wurde eine Glasstange mit einem Durchmesser von 25 mm herausgeschnitten. Diese Glasstange wurde in eine 360°C heisse, geschmolzene Salzmischung eingetaucht, bestehend aus 20 mol-% Silbernitrat und 80 mol-% Natriumnitrat, und zwar für 10 Tage (Beispiel 2) oder 11 Tage (Beispiel 3), um so die Natriumionen, die im Glas enthalten sind, durch Silberionen des geschmolzenen Salzes auszutauschen. Der Austauschgrad durch diese Behandlung lag bei 94 % (Beispiel 2) und 95 % (Beispiel 3).

[0068] Dieses Glas wurde durch Eintauchen in geschmolzenes Salz, bestehend aus Natriumnitrat, bei nur 400°C für 17,5 Stunden gemäss Beispiel 2 oder bei 380°C für 22 Stunden gemäss Beispiel 3 behandelt. Auf diese Weise konnten Linsen mit einer radialen Brechungsindexverteilung erhalten werden.

[0069] Die gebildeten Brechungsindexverteilungen, erhalten in Beispiel 1, waren nahezu parabolisch, wie in den Fig. 4A (Beispiel 2) und 4B (Beispiel 3) gezeigt. Diese Brechungsindexverteilungen sind nachweislich für Linsen geeignet, die eine radiale Brechungsindexverteilung aufweisen. Die Werte für n_0 und g und für die längensphärische Aberration wurden in der gleichen Weise wie in Beispiel 1 bestimmt und sind in Tabelle 2 und Fig. 8A (Beispiel 2) bzw. Fig. 8B (Beispiel 3) gezeigt.

BEISPIELE 4 UND 5

[0070] Glasmaterialien, die die beschriebene Zusammensetzung aufweisen, unterscheiden sich von der Glaszusammensetzung des Beispiels 1, wie in Tabelle 1 gezeigt, durch die Na_2O-Konzentration, wurden durch Erhitzen auf 1.450°C (Beispiel 4) bzw. 1.425°C (Beispiel 5) in einem Platintiegel geschmolzen und dann gegossen.

[0071] Die erhaltenen Gläser wurden auf ihre Beständigkeit mittels der Pulvermethode untersucht. Daraus ergab sich, dass die Wasserresistenz und die Säureresistenz des Glases, das in Beispiel 4 erhalten wurde, beide im zweiten Grad liegen, und die des Glases, das in Beispiel 5 erhalten wurde, beide im dritten Grad lagen.

[0072] Aus jedem der erhaltenen Glasblöcke wurde eine Glasstange mit einem Durchmesser von 25 mm herausgeschnitten. Diese Stange wurde erhitzt und gezogen, um so eine Glasstange mit einem Durchmesser von 1 mm zu erhalten. Diese Stange wurde in eine 360°C heisse, geschmolzene Salzmischung, bestehend aus 20 mol-% Silbernitrat und 80 mol-% Natriumnitrat, eingetaucht, und zwar für 13 Tage (Beispiel 4) oder 10 Tage (Beispiel 5), um die Natriumionen, die im Glas enthalten sind, gegen Silberionen des geschmolzenen Salzes auszutauschen. Der Grad des Austausches durch diese Behandlung lag bei 91 % (Beispiel 4) und 96 % (Beispiel 5).

[0073] Dieses Glas wurde durch Eintauchen in geschmolzenes Salz, das ausschliesslich aus Natriumnitrat besteht, eingetaucht und bei 420°C für 14 Stunden wie in Beispiel 4 oder bei 440°C für 8,5 Stunden wie in Beispiel 5 behandelt. Auf diese Weise konnten Linsen mit einer radialen Brechungsindexverteilung erhalten werden.

[0074] Die gebildete Brechungsindexverteilung war nahezu parabolisch, genau wie auch in Beispiel 1 erhalten, wie in den Fig. 5A (Beispiel 4) und Fig. 5B (Beispiel 5) gezeigt. Die Werte für n_0 und g und für die längensphärische Aberration sind in Tabelle 2 und in den Fig. 9A (Beispiel 4) bzw. Fig. 9B (Beispiel 5) gezeigt. Die Linse, die gemäss Beispiel 5 erhalten werden konnte, hatte einen geringfügig höheren g-Wert als die anderen.

BEISPIEL 6

[0075] Ein Glasmaterial, das eine Zusammensetzung aufweist, die von der Glaszusammensetzung von Beispiel 1 abweicht, in der Weise, dass es zusätzlich Ta_2O_5 als Brechungsindexmodifikator enthält, wie in Tabelle 1 gezeigt (Ta_2O_5 wurde anstelle von Al_2O3 hinzugegeben), wurde durch erhitzen auf 1.425°C in einem Platintiegel geschmolzen und dann gegossen. Der erhaltene Brechungsindex des Glases war um 0,02 höher als der in Beispiel 1. Das erhaltene Glas wurde hinsichtlich der Beständigkeit mittels der Pulvermethode untersucht. Daraus ergab sich, dass die Wasserresistenz und die Säureresistenz des Glases im zweiten bzw. dritten Grad liegen.

[0076] Aus dem erhaltenen Glasblock wurde eine Glasstange mit einem Durchmesser von 25 mm herausgeschnitten. Diese Stange wurde erhitzt und gezogen, um so eine Glasstange mit einem Durchmesser von 1 mm zu erhalten. Diese Stange wurde in eine 400°C heisse, geschmolzene Salzmischung, bestehend aus 20 mol-% Silbernitrat und 80 mol-% Natriumnitrat, für 9 Tage eingetaucht, um im Glas enthaltene Natriumionen gegen Silberionen aus den geschmolzenen Salzen zu ersetzen. Der Grad des Austauschs durch diese Behandlung lag bei 93 %.

[0077] Dieses Glas wurde durch Eintauchen in eine Salzlösung, die ausschliesslich aus Natriumnitrat besteht, bei 360°C für 26 Stunden behandelt. Auf diese Weise konnte eine Linse mit einer radialen Brechungsindexverteilung erhalten werden.

[0078] Die so erhaltene Brechungsindexverteilung der Linse war nahezu parabolisch, ähnlich der, die in Beispiel 1 gebildet wurde, wie in Fig. 6 dargestellt. Die Brechungsindexverteilung war nachweislich für Linsen mit einer radialen Brechungsindexverteilung geeignet. Die Werte für n_0 und g und die längensphärische Aberration sind in Tabelle 2 bzw. Fig. 10 dargestellt.

VERGLEICHSBEISPIELE 1 UND 2

[0079] Ausgangsglasmaterial, das die Zusammensetzung gemäss Tabelle 1 aufweist, wurde in einem Platintiegel geschmolzen und dann gegossen. Die für dieses Schmelzen benötigten Temperaturen lagen bei 1.550°C (Vergleichsbeispiel 1) und 1.525°C (Vergleichsbeispiel 2) und liegen dabei um 100 bis 150°C höher als die Temperaturen, die für das Schmelzen in den Beispielen verwendet wurden.

[0080] Die erhaltenen Gläser wurden auf ihre Beständigkeit mittels der Pulvermethode untersucht. Daraus ergab sich, dass die Wasserresistenz und die Säureresistenz des jeweiligen Glases beide im dritten Grad liegen. Diese Gläser zeigen daher eine geringere Beständigkeit als die Gläser, die in den Beispielen erhalten werden konnten.

TABELLE 1

Zusammensetzung (mol-%)		Beispiel						Vergleichs-beispiel	
		1	2	3	4	5	6	1	2
Na_2O		25	25	25	20	30	25	25	25
Al_2O_3		20	20	15	15	20	18	25	23
MgO		5	7,5	10	5	10	5		2
B_2O_3		12,5	10	10	15	10	12,5	12,5	12,5
SiO_2		37,5	37,5	40	45	30	37,5	37,5	37,5
Ta_2O_5							2		
Gesamt		100	100	100	100	100	100	100	100
Beständig-keit	Säureresistenz	2	2	2	2	3	2	3	3
	Wasserresistenz	3	2	2	2	3	3	3	3
Zum Schmelzen erforderliche Temperatur (°C)		1.450	1.450	1.400	1.450	1.425	1.425	1.550	1.525

TABELLE 2

	n_0	g (ℓ/mm)
Beispiel 1	1,6383	0,613
Beispiel 2	1,6403	0,628
Beispiel 3	1,6488	0,632
Beispiel 4	1,6013	0,562
Beispiel 5	1,6668	0,855
Beispiel 6	1,6583	0,568

[0081] Wie oben beschrieben, ist es erfindungsgemäss nun möglich geworden, eine hochqualitative Linse mit einer radialen Brechungsindexverteilung durch Inkorporieren von MgO in ein Aluminiumborsilicatglas in einem entsprechenden Verhältnis zu erhalten. Die Linse hat eine Brechungsindexverteilung, die für optische Designs notwendig ist und besitzt ausgezeichnete Eigenschaften, einschliesslich einer zufriedenstellenden Beständigkeit. Das Ausgangsglasmaterial, aus dem die Linse hergestellt wird, besitzt eine niedrige Schmelztemperatur und eine Ionenaustauschrate, die für die praktische Anwendung ausreichend ist und es ermöglicht Silberionen darin stabil vorzulegen.

Patentansprüche

1. Indexstufenlinse mit einer radialen Brechungsindexverteilung, erhältlich durch Unterwerfen eines Ausgangsglasmaterials mit einer Stangenform einem Ionenaustauschprozess, wodurch die in dem Glas enthaltenen Alkaliionen durch Silberionen ersetzt werden, und dann Unterwerfen der Glasstange einem Ionenaustauschprozess, wobei in dem Glas eine Verteilung der Silberionenkonzentration gebildet wird und hierdurch eine parabolische Brechungsindexverteilung gebildet wird, wobei das Ausgangsglasmaterial eine Glaszusammensetzung der folgenden Komponenten umfasst:
$15 < Na_2O \leq 30$ mol-%;
$10 < Al_2O_3 \leq 25$ mol-%;
$27{,}5 \leq SiO_2 \leq 55$ mol-%;
$3 \leq B_2O_3 \leq 18$ mol-%;
$2{,}5 \leq MgO \leq 18$ mol-%;
$0 \leq Ta_2O_5 \leq 5$ mol-%;
$0 \leq La_2O_3 \leq 3$ mol-%;
$0 \leq BaO \leq 3$ mol-%; und
$0 \leq ZrO_2 \leq 3$ mol-%.

2. Indexstufenlinse nach Anspruch 1, wobei die Glaszusammensetzung die folgenden Komponenten umfasst:
$18 \leq Na_2O \leq 30$ mol-%;
$15 \leq Al_2O_3 \leq 25$ mol-%;
$30 \leq SiO_2 \leq 50$ mol-%;
$5 \leq B_2O_3 \leq 18$ mol-%;
$3 \leq MgO \leq 15$ mol-%;
$0 \leq Ta_2O_5 \leq 3$ mol-%;
$0 \leq La_2O_3 \leq 3$ mol-%;
$0 \leq BaO \leq 3$ mol-%; und
$0 \leq ZrO_2 \leq 3$ mol-%.

3. Indexstufenlinse nach Anspruch 1 oder 2, wobei die Glaszusammensetzung die folgenden Komponenten umfasst:
$20 \leq Na_2O \leq 30$ mol-%;
$15 \leq Al_2O_3 \leq 22{,}5$ mol-%;
$30 \leq SiO_2 \leq 45$ mol-%;
$7 \leq B_2O_3 \leq 15$ mol-%;
$5 \leq MgO \leq 12{,}5$ mol-%;
$0 \leq Ta_2O_5 \leq 3$ mol-%;

$0 \leq La_2O_3 \leq 3$ mol-%;
$0 \leq BaO \leq 3$ mol-%; und
$0 \leq ZrO_2 \leq 3$ mol-%.

4. Indexstufenlinse nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei die Glaszusammensetzung weiterhin die folgenden Komponenten umfasst:
$0 \leq Nb_2O_5 \leq 3$ mol-%;
$0 \leq Sb_2O_3 \leq 1$ mol-%;
$0 \leq WO_3 \leq 1$ mol-% und
$0 \leq Y_2O_3 \leq 1$ mol-%,
in bezug auf 100 mol-% der Gesamtmenge von Na_2O, Al_2O3, SiO_2, B_2O_3, MgO, Ta_2O_5, La_2O_3, BaO und ZrO_2.

Es folgen 8 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG. 1

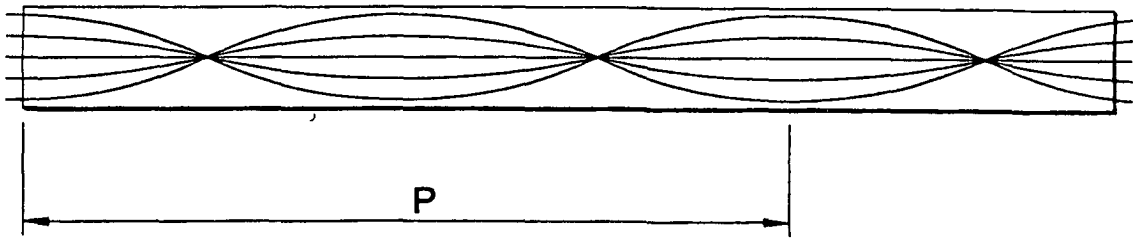


FIG. 2

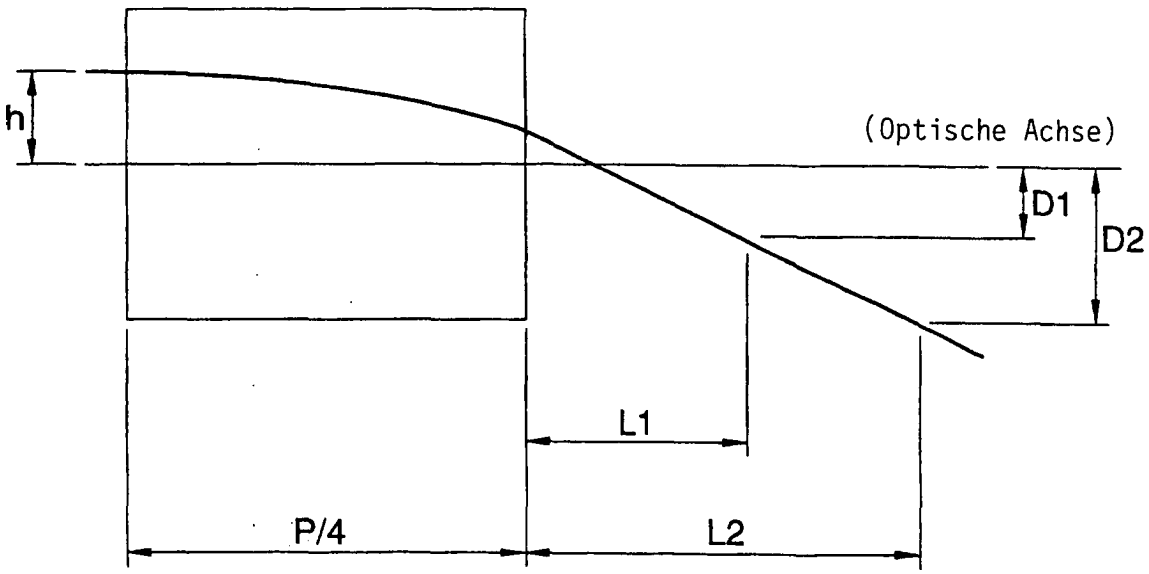


FIG. 3

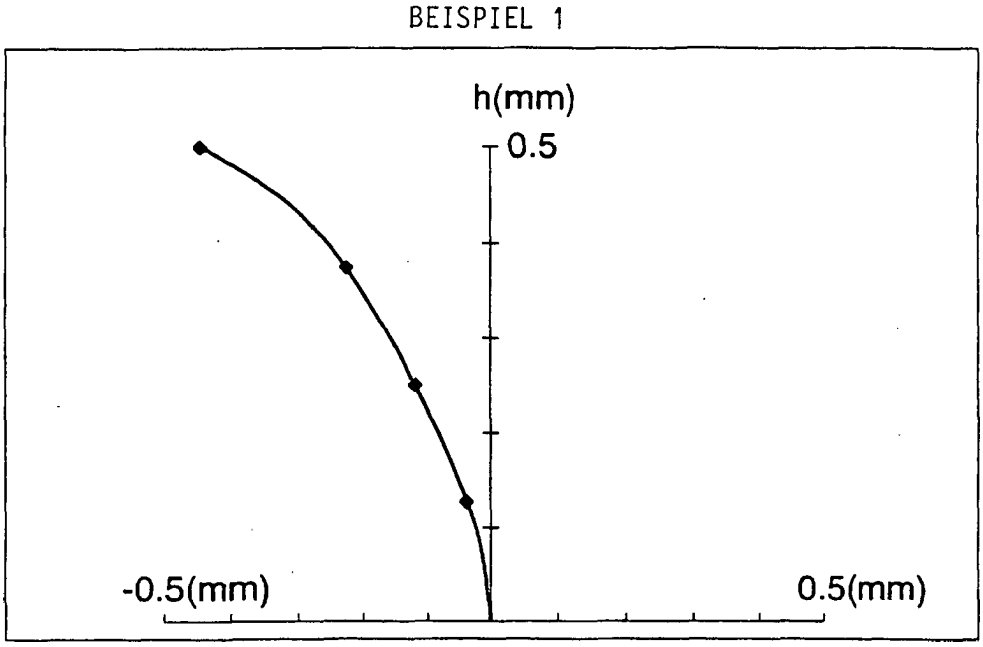


FIG. 4A

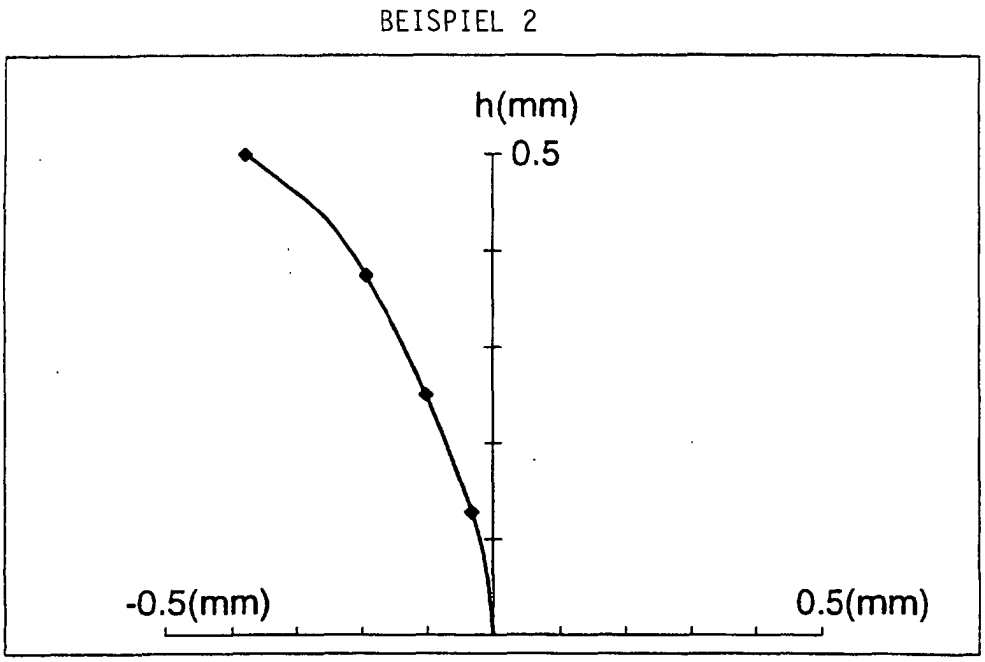


FIG. 4B

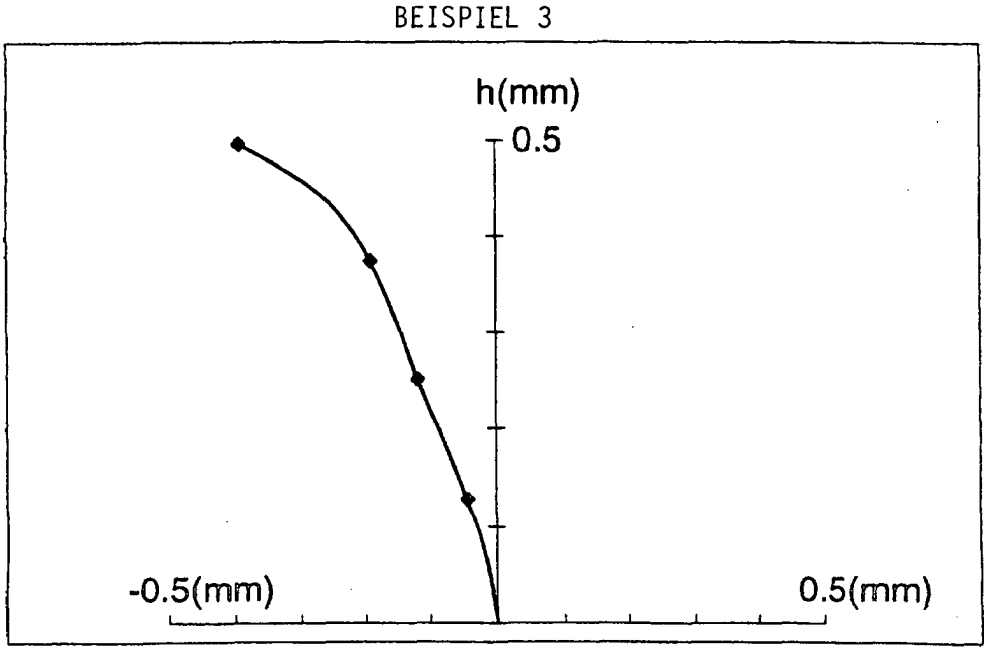


FIG. 5A

BEISPIEL 4

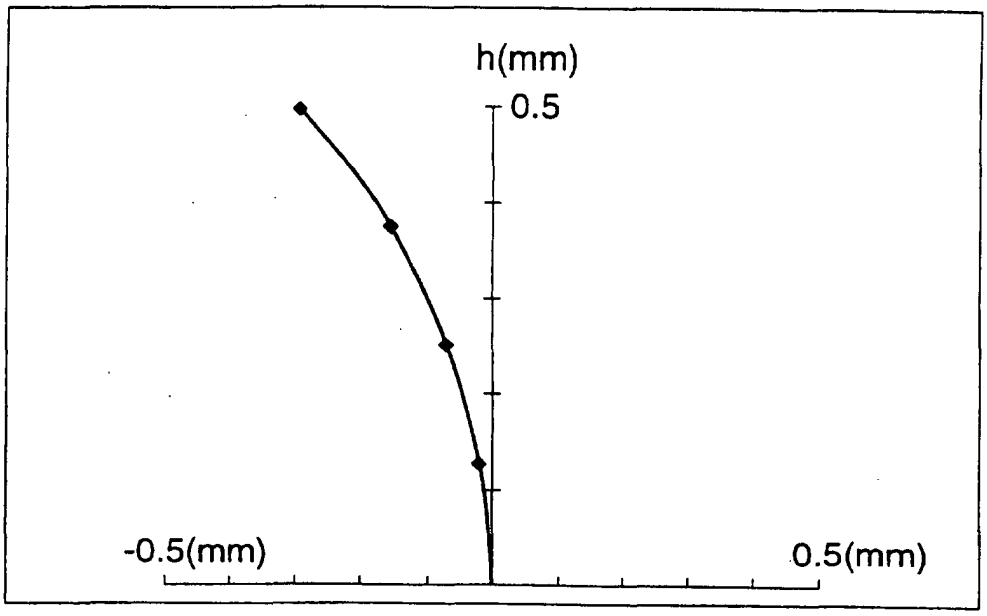


FIG. 5B

BEISPIEL 5

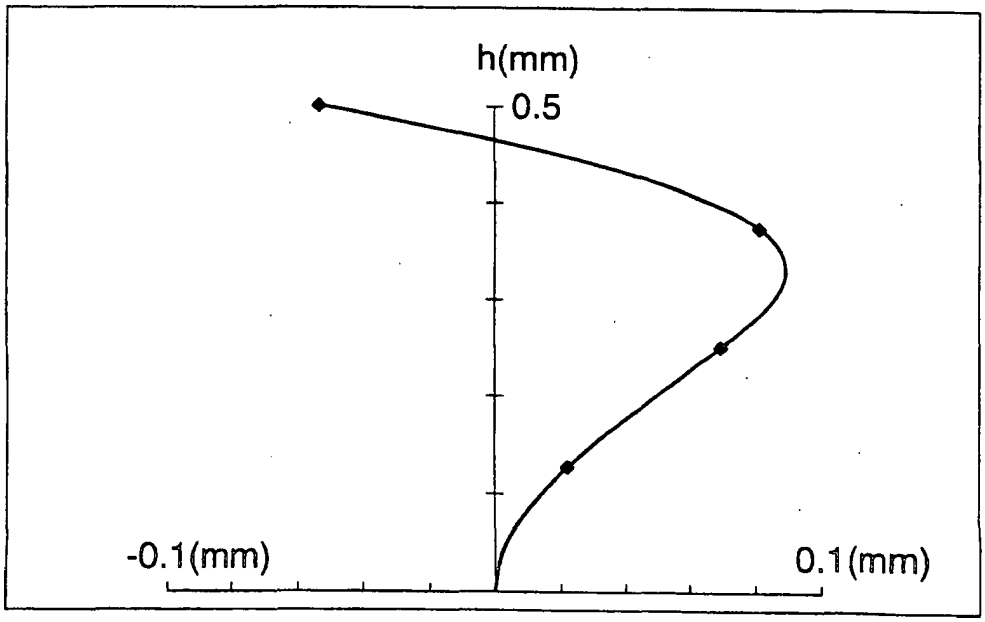


FIG. 6

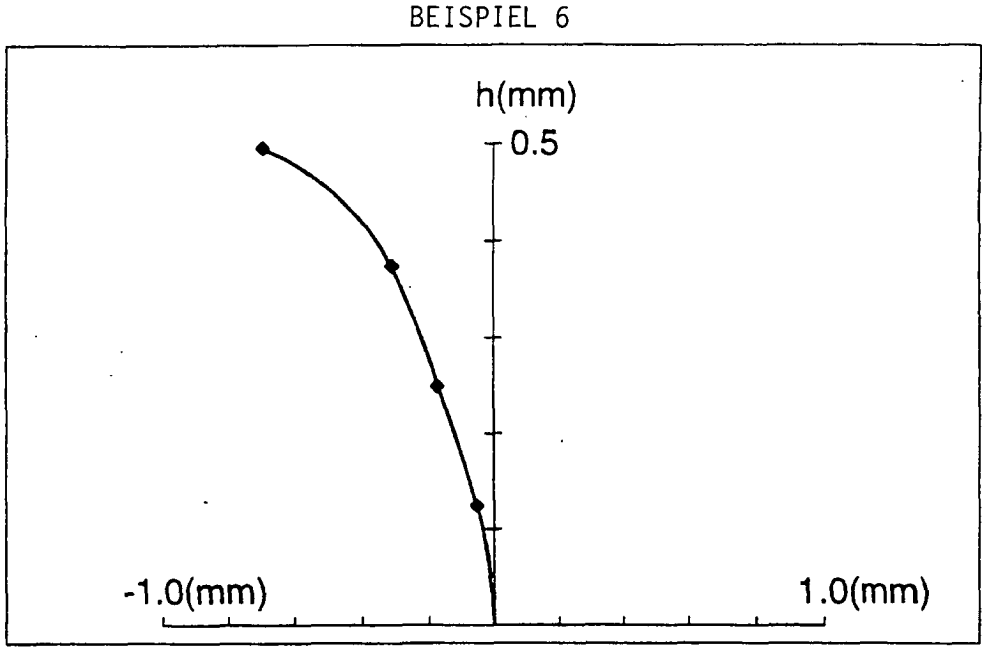

BEISPIEL 6
h(mm)
0.5
-1.0(mm)
1.0(mm)

FIG. 7

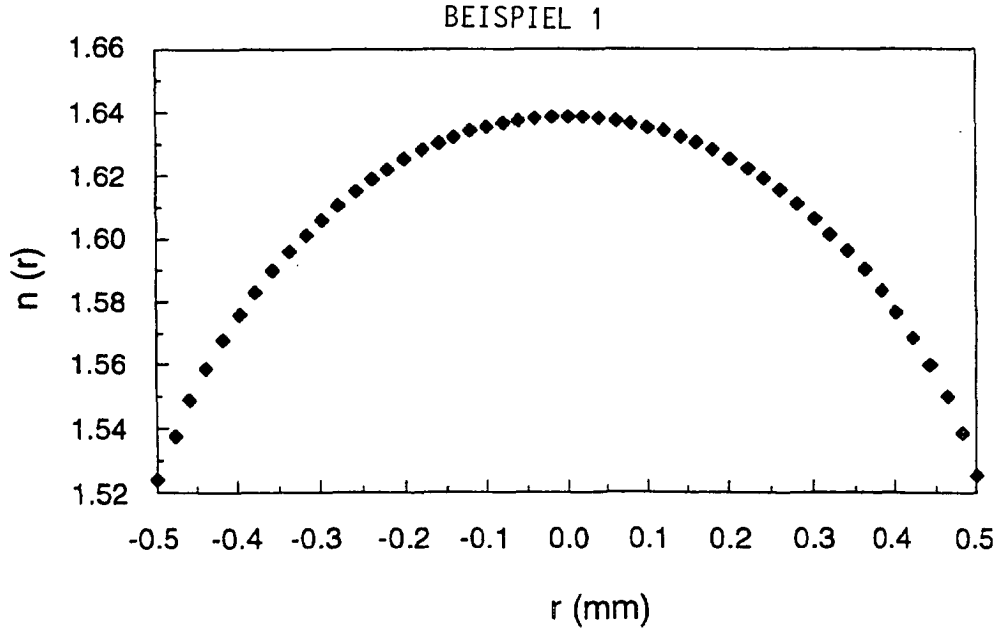

BEISPIEL 1
1.66
1.64
1.62
1.60
1.58
1.56
1.54
1.52
n (r)
-0.5
-0.4
-0.3
-0.2
-0.1
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
r (mm)

FIG. 8A

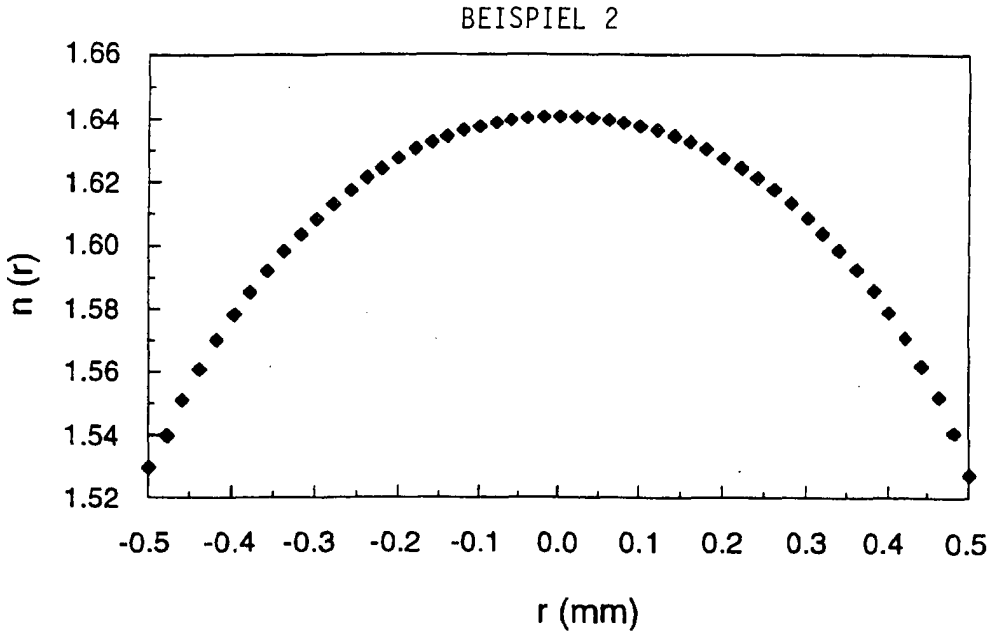

BEISPIEL 2
n (r)
1.66
1.64
1.62
1.60
1.58
1.56
1.54
1.52
-0.5 -0.4 -0.3 -0.2 -0.1 0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5
r (mm)

FIG. 8B

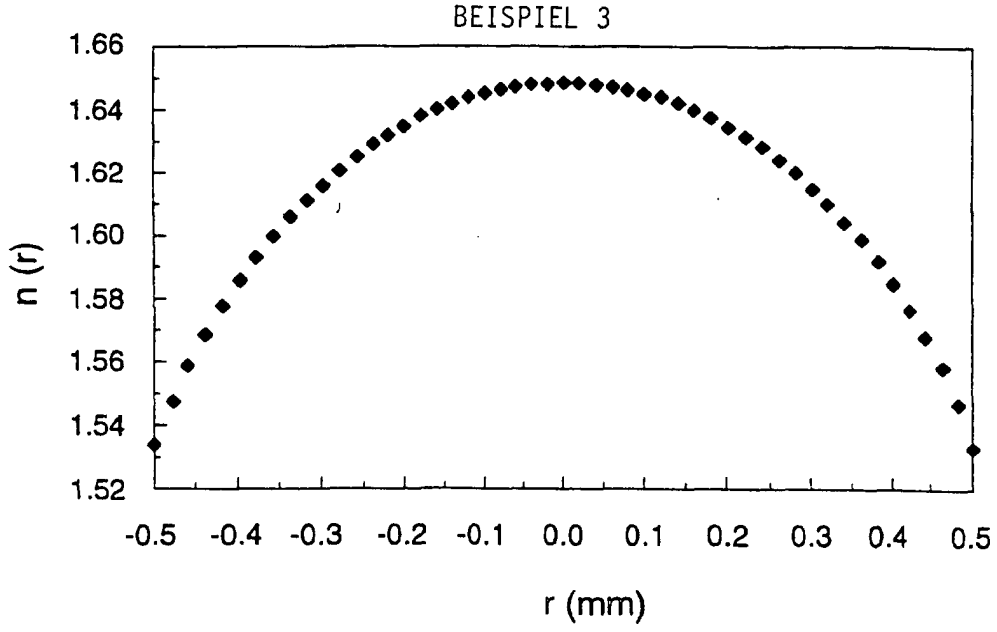

BEISPIEL 3
n (r)
1.66
1.64
1.62
1.60
1.58
1.56
1.54
1.52
-0.5 -0.4 -0.3 -0.2 -0.1 0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5
r (mm)

FIG. 9A

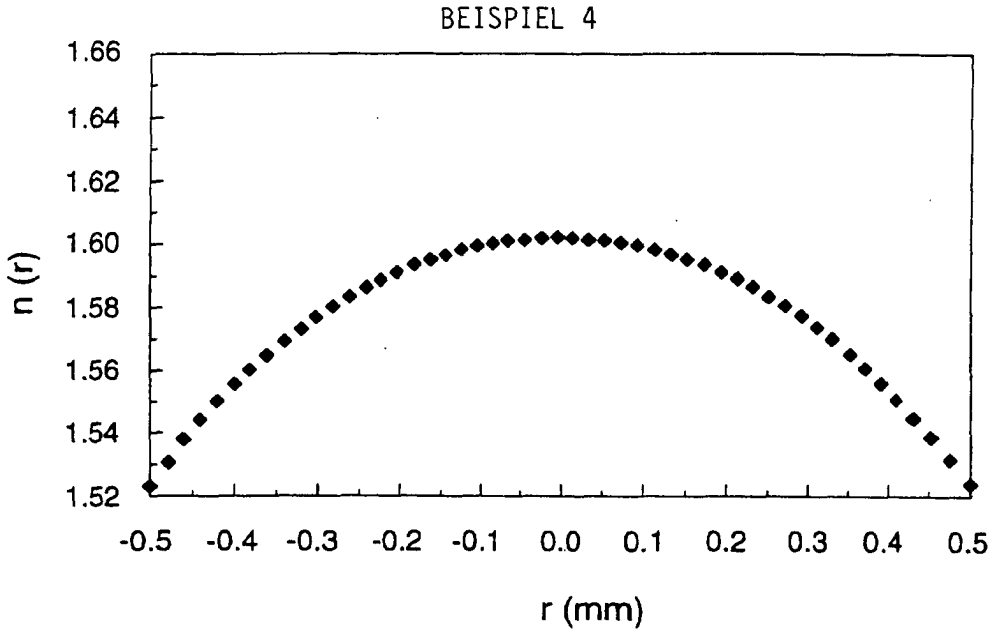

BEISPIEL 4
n (r)
1.66
1.64
1.62
1.60
1.58
1.56
1.54
1.52
-0.5 -0.4 -0.3 -0.2 -0.1 0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5
r (mm)

FIG. 9B

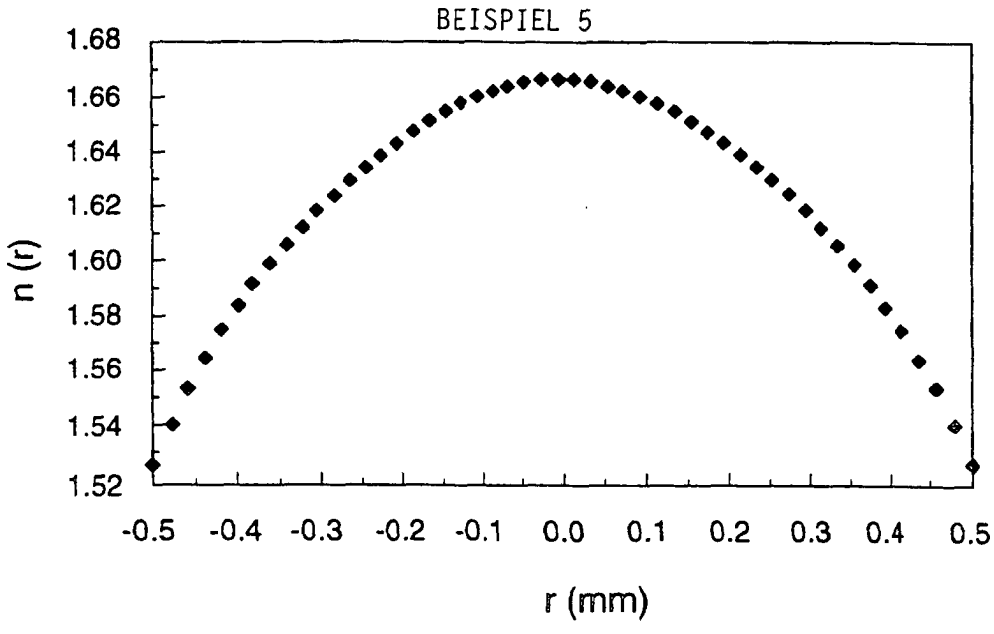
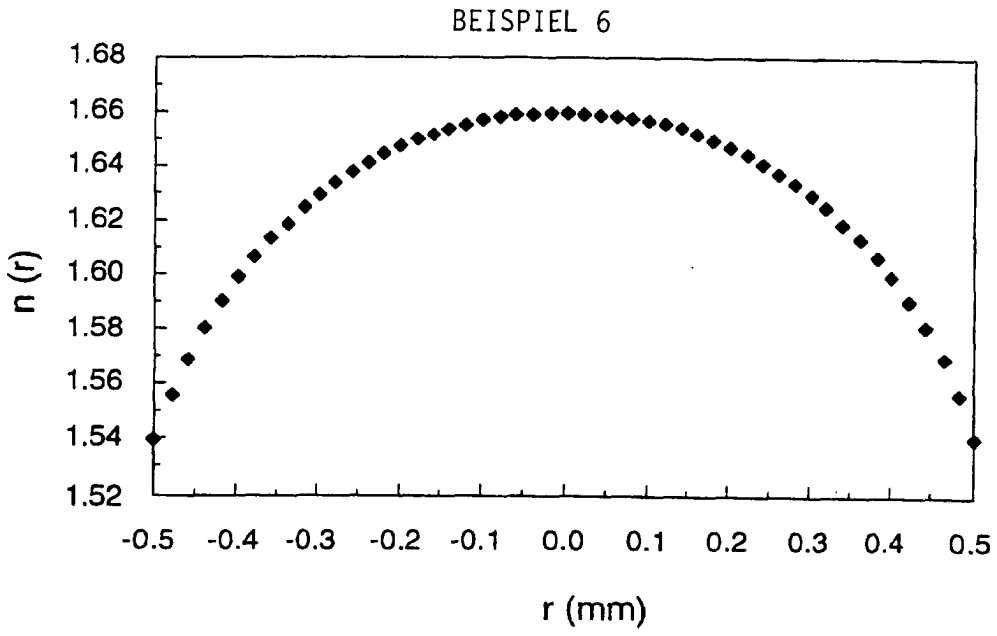

BEISPIEL 5
n (r)
1.68
1.66
1.64
1.62
1.60
1.58
1.56
1.54
1.52
-0.5 -0.4 -0.3 -0.2 -0.1 0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5
r (mm)

FIG. 10


BEISPIEL 6
1.68
1.66
1.64
1.62
1.60
1.58
1.56
1.54
1.52
n (r)
-0.5
-0.4
-0.3
-0.2
-0.1
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
r (mm)