



SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

(11) CH 714 953 B1

(51) Int. Cl.: C03C 17/34 (2006.01)
G02B 1/115 (2015.01)

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-lichtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

(12) **PATENTSCHRIFT**

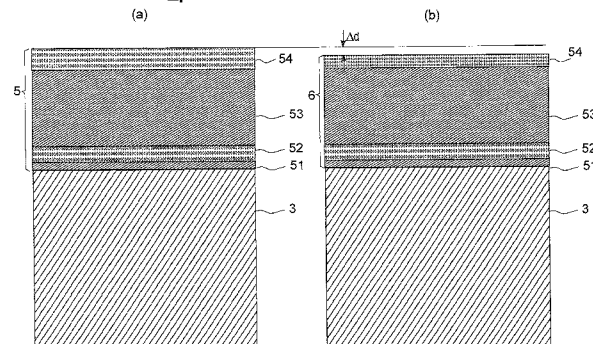
(21) Anmeldenummer:	01105/19	(73) Inhaber:	SCHOTT AG, Hattenbergstrasse 10 55122 Mainz (DE)
(22) Anmeldedatum:	05.03.2018	(72) Erfinder:	Dirk Apitz, 1012 Lausanne (CH) Christian Henn, 55546 Frei-Laubersheim (DE) Ulf Brauneck, 64823 Gross-Umstadt (DE) Sébastien Bourquin, 1510 Moudon (CH)
(43) Anmeldung veröffentlicht:	07.09.2018	(74) Vertreter:	BOVARD AG Patent- und Markenanwälte, Optingenstrasse 16 3013 Bern (CH)
(30) Priorität:	03.03.2017 DE 102017104523.6	(86) Internationale Anmeldung:	PCT/EP 2018/055334
(24) Patent erteilt:	30.11.2021	(87) Internationale Veröffentlichung:	WO 2018/158464
(45) Patentschrift veröffentlicht:	30.11.2021		

(54) **Antireflex-Beschichtung mit stabiler Reflektivität und Farbe unter Winkel und unter Abrasion.**

(57) Ziel der Erfindung ist es, ein mechanisch beständiges Antireflex-System bereit zu stellen. Dazu ist ein Verfahren zur Herstellung eines transparenten Elements (1) vorgesehen sowie das transparente Element (1), umfassend ein transparentes Substrat (3) und auf diesem Substrat (3) eine mehrlagige Antireflex-Beschichtung (5), welche zumindest vier Lagen umfasst, wobei sich Lagen (51, 53) mit hohem Brechungsindex mit Lagen (50, 52, 54) mit niedrigerem Brechungsindex abwechseln, und wobei die Lagen (51, 53) mit höherem Brechungsindex eine größere Härte als die Lagen (50, 52, 54) mit niedrigerem Brechungsindex aufweisen, und wobei die oberste Lage (60) der mehrlagigen Antireflex-Beschichtung (5) eine Lage mit niedrigerem Brechungsindex ist, und wobei die Lagen (51, 54) bei gegebenen Brechungsindizes hinsichtlich ihrer Dicke so ausgewählt sind, dass bei einer Reduktion der Schichtdicke der obersten Lage (60) um 10% oder um 10 Nanometer, je nachdem welcher dieser beiden Fälle die geringere verbleibende Schichtdicke ergibt, zumindest eines der folgenden Merkmale gilt:

- die Farbe der Restreflexion der Antireflex-Beschichtung (5) unter 0° Einfallswinkel bei verminderter Schichtdicke unterscheidet sich von der Farbe unter 0° Lichteinfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke der obersten Lage (60) im CIE xyz-Farbsystem um nicht mehr als $\Delta x=0.05$, $\Delta y=0.05$, bevorzugt nicht mehr als $\Delta x=0.03$, $\Delta y=0.03$, besonders bevorzugt nicht mehr als $\Delta x=0.02$, $\Delta y=0.02$,

- die photopische Reflektivität der Antireflex-Beschichtung (5) unter 0° Einfallswinkel bei verminderter Schichtdicke unterscheidet sich von der photopischen Reflektivität unter 0° Einfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke um nicht mehr als $\Delta R_{ph}=1.5\%$.



Beschreibung

[0001] Antireflektierende Schichtsysteme sind heute Stand der Technik und werden vielfältig eingesetzt. Anwendungsgebiete sind unter anderem Bilderverglasung, optische Komponenten, wie Linsen z.B. für Kameras. Diese Anwendungen sind keiner starken mechanischen Belastung ausgesetzt.

[0002] Die EP 2 492 251 B1 beschreibt die Herstellung von anti-reflektierenden Schichtsystemen für u.a. die Uhrenindustrie. Neben der Antireflex-Wirkung wird hierbei noch die Härte des AR Systems dadurch verbessert, dass als hochbrechende Schicht eine Hartstoffschicht aus Si₃N₄ mit einer Beimischung von Aluminium eingebracht wird. Da Uhren und insbesondere sog. Lupen für die Datumsanzeige, welche auf das Uhrenglas aufgeklebt werden, häufig mechanisch durch Verkratzen belastet werden, ist der Einsatz von herkömmlichen anti-reflektierenden Schichtsystemen nicht sinnvoll, da diese aufgrund der mechanischen Belastung komplett entfernt werden können und die Reflexion des Substratmaterials entsteht. Das harte AR System auf Basis der Entwicklung gemäß der EP 2 492 251 B1 liefert ein Antireflex-System, welches mechanisch deutlich beständiger ist als herkömmliche optische Vergütungen.

[0003] Da im Bereich der Uhrenindustrie häufig Saphir als Uhrenglas verwendet wird, Antireflex-Beschichtungen aber im Allgemeinen deutlich weicher sind als Saphir, wäre es wünschenswert, die Antireflex-Wirkung trotz mechanischer Belastung möglichst gut erhalten zu können, d.h. dass die Restreflexion auch nach mechanischer Belastung möglichst gering bleibt. Dies wird gemäß der EP 2 492 251 B1 durch die Hartstoffschichten gelöst, welche eine hohe Abrasionsbeständigkeit des Schichtsystems und damit auch eine nur geringe Änderung der Schichtdicken bewirken.

[0004] Unter den Hartstoffschichten spielen traditionell Zweistoffsysteme die Hauptrolle. Hier sind vor allem die Oxide und Nitride von Cr, Si, Ti und Zr zu nennen. Diese werden vornehmlich in der Beschichtung von Werkzeugen eingesetzt, müssen also für diese Anwendung nicht transparent sein. Bekannte transparente Hartstoffschichten sind z.B. Al₂O₃, wie in der DE 20106167 beschrieben, und Yttrium stabilisiertes ZrO₂. In der EP 1 453 770 B1 werden Glaskeramikssubstrate beschrieben, die mit Kohlenstoff-dotiertem Siliziumnitrid beschichtet sind.

[0005] In der WO 2009/010180 A1 und DE 10 2008 054 139 A1 werden aluminiumdotierte SiN bzw. SiON-Schichten mit Kratzschutzwirkung als Einzelschichten beschrieben.

[0006] Die DE 10 2016 125 689 A1 und DE 10 2014 104 798 A1 beschreiben AR-Systeme mit veränderter Zusammensetzung der hochbrechenden Schicht, wobei die Schichten gemäß der DE 10 2016 125 689 A1 amorph sind, während die Schichten gemäß der DE 10 2014 104 798 A1 Nano-Kristallite enthält. Nachteilig an bekannten Antireflex-Beschichtungen ist, dass sich unter anderem die Farbe der Restreflektion unter schrägem Lichteinfall Winkel, die Farbe der Restreflektion nach Abrasion und die Farbe der Restreflektion nach Abrasion unter Winkel, sowie die Reflektivität nach Abrasion unter Winkel nicht in Betracht zieht. Es wäre dabei generell wünschenswert, wenn eine Änderung der Reflektivität nach Abrasion reduziert werden kann.

[0007] Ziel der Erfindung ist es daher, ein mechanisch beständiges Antireflex-System bereit zu stellen, welches eine vergleichbare mechanische Resistenz wie der Stand der Technik zu Antireflex-Systemen mit Hartstoffschichten aufweist und darüber optische Eigenschaften (durchschnittliche Reflektivität, photopische Reflektivität, Farbe der Restreflektion) sowohl vor als auch nach Abrasion, sowohl unter normalem Einfallswinkel als auch unter verschiedenen anderen Winkeln optimiert und so z. B. unangenehme Farbeffekte auf Fasen (unter Winkel) und Veränderung von Farbeffekten und Reflektivität durch Abrasion reduziert.

[0008] Die Abrasion kann dabei mit einem Abrasionstest, z. B. dem modifizierten Bayer-Test, angelehnt an ASTM F735-11, vorzugsweise aber mit 2 kg Korundsand und 8000 Zyklen getestet werden. Dieser modifizierte Bayer-Test ist auch in den oben genannten Schriften DE 10 2016 125 689 A1 und DE 10 2014 104 798 A1 beschrieben, deren Offenbarung diesbezüglich auch zum Gegenstand der vorliegenden Anmeldung gemacht wird. Durch einen solchen Test werden von der obersten (letzten) Schicht der Antireflexbeschichtung typischerweise mehr als zehn Nanometer Material entfernt. Diese Menge an Material entspricht bei den typischen Schichtdicken auch mehr als zehn Prozent der Schichtdicke. Versuche haben gezeigt, dass der modifizierte Bayertest angewandt auf in der EP 1 453 770 B1, DE 10 2014 104 798 A1 und DE 10 2016 125 689 A1 beschriebenen Beschichtungen eine solche Materialentfernung an der obersten Schicht bewirkt. So kann beispielsweise die durchschnittliche Schichtdicke durch den Bayertest von 100 nm auf 80 nm reduziert werden. Dabei treten viele Kratzer auf, aber wenn das Reflexionsspektrum großflächig (z. B. auf einer Fläche von 5×5 mm²) gemessen wird, kann man der abradieren Beschichtung eine makroskopische resultierende Reflektivität oder eine makroskopische resultierende Restreflexionsfarbe zuordnen, die dem visuellen Eindruck entspricht.

[0009] Um die Änderung der Restreflexion möglichst unempfindlich gegenüber Abrasion liegt der Erfindung die Idee zugrunde, bei der Auslegung des Schichtsystems Schichtabfolgen miteinander dahingehend zu vergleichen oder auszuwählen, dass eine möglichst geringe Änderung optischer Parameter hinsichtlich Farbe der Restreflexion, deren Winkelabhängigkeit und vor allem der Intensität der Restreflexion vorliegt, wenn die Schichtdicke der obersten Lage des Schichtsystems geändert wird.

[0010] Dazu wird gemäß der Erfindung ein transparentes Element bereitgestellt, umfassend ein transparentes Substrat und auf diesem Substrat eine mehrlagige Antireflex-Beschichtung, welche zumindest vier Lagen umfasst, wobei sich Lagen mit hohem Brechungsindex mit Lagen mit niedrigerem Brechungsindex abwechseln, und wobei die Lagen mit höherem Brechungsindex typischerweise eine größere Härte als die Lagen mit niedrigerem Brechungsindex aufweisen, und wobei

die oberste Lage der mehrlagigen Antireflex-Beschichtung eine Lage mit niedrigerem Brechungsindex ist, und wobei die Lagen bei gegebenen Brechungsindizes hinsichtlich ihrer Dicke so ausgewählt sind, dass bei einer Reduktion der Schichtdicke der obersten Lage um 10% oder 10 nm, je nachdem welcher dieser Fälle die geringere verbleibende Schichtdicke ergibt, so dass die Schichtdicke nach der Reduktion im ersten genannten Fall noch das 0,9-Fache der ursprünglichen Schichtdicke beträgt, zumindest eine der folgenden Merkmale gilt:

- die Farbe der Restreflexion unter 0° Einfallswinkel bei verminderter Schichtdicke unterscheidet sich von der Farbe unter 0° Lichteinfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke der obersten Lage (54) im CIE xyz-Farbsystem um nicht mehr als $\Delta x=0.05$, $\Delta y=0.05$,
- die photopische Reflektivität unter 0° Einfallswinkel bei verminderter Schichtdicke unterscheidet sich von der photopischen Reflektivität unter 0° Einfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke um nicht mehr als $\Delta R_{ph}=1.5\%$.

[0011] Der Unterschied ist dabei betragsmäßig zu verstehen.

[0012] Die Begriffe „höherer Brechungsindex“ und „niedrigerer Brechungsindex“ sind dabei als Vergleich relativ zueinander zu verstehen. Als Lage mit höherem Brechungsindex ist also eine Lage verstanden, deren Brechungsindex höher ist, als eine Lage mit niedrigerem Brechungsindex, ohne dass damit die absoluten Werte der Brechungsindizes beziffert sind.

[0013] Als photopische Reflektivität wird die integrierte Reflektivität bezeichnet, nachdem diese mit der Sensitivitätskurve des menschlichen Auges bei ausreichender Helligkeit (Tagsehen) gewichtet wurde. Für die hierin gemachten Angaben wurde als Lichtquelle nach ISO-Norm 3664 die Normlichtart D65 zugrunde gelegt, eine Strahlungsverteilung mit einer Farbtemperatur von 6504 Kelvin.

[0014] Der Fall einer Reduktion der Schichtdicke um 10 Nanometer ergibt sich bei Schichtdicken der obersten Lage von kleiner als 100 Nanometern.

[0015] Gemäß einer Weiterbildung der Erfindung kann die Antireflex-Beschichtung auch so ausgelegt werden, dass die Farbe der Restreflexion unter 0° Einfallswinkel bei verminderter Schichtdicke sich von der Farbe unter 0° Lichteinfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke der obersten Lage im CIE xyz-Farbsystem um nicht mehr als $\Delta x=0.03$, $\Delta y=0.03$, bevorzugt nicht mehr als $\Delta x=0.02$, $\Delta y=0.02$ unterscheidet.

[0016] Weiterhin können die beiden oben genannten Merkmale $\Delta x=0.05$, $\Delta y=0.05$ und/oder eine Änderung der photopischen Reflektivität um höchstens $\Delta R_{ph}=1.5\%$ gemäß einer Weiterbildung der Erfindung auch bei deutlich größerer Reduktion der Schichtdicke der obersten Lage, nämlich 20%, oder 30%, oder sogar 40% erzielt werden.

[0017] Vorzugsweise sind die Lagen der Antireflex-Beschichtung bei gegebenen Brechungsindizes hinsichtlich ihrer Dicke so ausgewählt, dass die Farbe der Restreflexion unter 30° Einfallswinkel sich bei um 10% verminderter Schichtdicke von der Farbe unter 30° Einfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke im CIE xyz-Farbsystem um nicht mehr als $\Delta x=0.05$, $\Delta y=0.05$ unterscheidet.

[0018] Gemäß einer Weiterbildung ist das Schichtsystem weiterhin so ausgelegt, dass nach der Reduktion der Schichtdicke der obersten Lage auf das 0,9-fache die photopische Reflektivität unter 0° Einfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke um nicht mehr als $\Delta R_{ph}=1\%$, besonders bevorzugt um nicht mehr als $\Delta R_{ph}=0.5\%$, ganz besonders bevorzugt um nicht mehr als $\Delta R_{ph}=0.25\%$ abweicht.

[0019] Gemäß noch einer Weiterbildung der Erfindung sind die Lagen bei gegebenen Brechungsindizes hinsichtlich ihrer Dicke so ausgewählt, dass die Farbe der Restreflexion unter 45° Einfallswinkel sich bei um 10% verminderter Schichtdicke von der Farbe unter 45° Einfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke im CIE xyz-Farbsystem um nicht mehr als $\Delta x=0.05$, $\Delta y=0.05$, bevorzugt $\Delta x=0.03$, $\Delta y=0.03$, besonders bevorzugt $\Delta x=0.02$, $\Delta y=0.02$ unterscheidet.

[0020] Das Schichtsystem kann zusätzlich auch weiter dahingehend abgestimmt werden, dass das transparente Element zumindest eines der folgenden Merkmale, vorzugsweise auch mehrere, insbesondere auch alle Merkmale aufweist:

- die Farbe der Restreflexion an der Antireflex-Beschichtung (5) unter 30° Einfallswinkel unterscheidet sich von der Farbe unter 0° Einfallswinkel im CIE xyz-Farbsystem um nicht mehr als $\Delta x=0.02$, $\Delta y=0.02$,
- die Farbe der Restreflexion unter 45° Einfallswinkel unterscheidet sich von der Farbe unter 0° Einfallswinkel um nicht mehr als $\Delta x=0.05$, $\Delta y=0.05$,
- die photopische Reflektivität unter 0° Einfallswinkel ist kleiner als 1,5%,
- das Maximum der Reflektivität im Wellenlängenbereich zwischen 450 nm und 700 nm, ist unter 0° Einfallswinkel kleiner als 1,5%,
- der Absolutbetrag der Differenz der photopischen Reflektivität unter 30° Einfallswinkel zur photopischen Reflektivität unter 0° Einfallswinkel ist kleiner als 0,5%, bevorzugt kleiner als 0,3% besonders bevorzugt kleiner als 0,1%,
- der Absolutbetrag der Differenz der photopischen Reflektivität unter 45° Einfallswinkel zur photopischen Reflektivität unter 0° Einfallswinkel ist kleiner als 0,5%, bevorzugt kleiner als 0,3% besonders bevorzugt kleiner als 0,1%,
- die durchschnittliche Reflektivität, gemittelt im Wellenlängenbereich zwischen 450 nm und 700 nm unter 0° Einfallswinkel ist kleiner als 1,5%,
- der Absolutbetrag der Differenz der durchschnittlichen Reflektivitäten unter 30° Einfallswinkel und unter 0° Einfallswinkel, gemittelt im Wellenlängenbereich zwischen 450 nm und 700 nm, beträgt weniger als 0,5%, bevorzugt weniger als 0,3% besonders bevorzugt weniger als 0,1%,

- der Absolutbetrag der Differenz der durchschnittlichen Reflektivitäten unter 45° Einfallswinkel und unter 0° Einfallswinkel, gemittelt im Wellenlängenbereich zwischen 450 nm und 700 nm, beträgt weniger als 0,5%
- der Absolutbetrag der Differenz der Maxima der Reflektivitäten im Wellenlängenbereich zwischen 450 nm und 700 nm unter 30° Einfallswinkel und unter 0° Einfallswinkel beträgt weniger als 0,5%, bevorzugt weniger als 0,3% besonders bevorzugt weniger als 0,1%,
- der Absolutbetrag der Differenz der Maxima der Reflektivitäten im Wellenlängenbereich zwischen 450 nm und 700 nm unter 45° Einfallswinkel und unter 0° Einfallswinkel beträgt weniger als 0,5%, bevorzugt weniger als 0,3% besonders bevorzugt weniger als 0,1%,. Als durchschnittliche Reflektivität wird hier der Durchschnittswert der Reflektivität im Wellenlängenbereich von 450 bis 700 nm bezeichnet.

[0021] In Weiterbildung dieser Ausführungsform kann die Beschichtung sogar zumindest eine der folgenden Merkmale erfüllen:

- die photopische Reflektivität unter 0° Einfallswinkel ist kleiner als 1%, vorzugsweise kleiner als 0,8%,
- der Absolutbetrag der Differenz der photopischen Reflektivität unter 30° Einfallswinkel zur photopischen Reflektivität unter 0° Einfallswinkel ist kleiner als 0,1%,
- der Absolutbetrag der Differenz der durchschnittlichen Reflektivität im Wellenlängenbereich zwischen 450 nm und 700 nm unter 30° Einfallswinkel zur durchschnittlichen Reflektivität im Wellenlängenbereich zwischen 450 nm und 700 nm unter 0° Einfallswinkel ist kleiner als 0,1%,
- der Absolutbetrag der Differenz der photopischen Reflektivität unter 45° Einfallswinkel zur photopischen Reflektivität unter 0° Einfallswinkel ist kleiner als 0,2%,
- der Absolutbetrag der Differenz der durchschnittlichen Reflektivität im Wellenlängenbereich zwischen 450 nm und 700 nm unter 45° Einfallswinkel zur durchschnittlichen Reflektivität im Wellenlängenbereich zwischen 450 nm und 700 nm unter 0° Einfallswinkel ist absolut kleiner als 0,2%,
- die durchschnittliche Reflektivität, gemittelt im Bereich zwischen 450 nm und 700 nm unter 0° Einfallswinkel ist kleiner als 1,0%.

[0022] Für das Anpassen des Designs können sogenannte Targets definiert werden. Dies sind Spezifikationen von z. B. Reflektivitätsspektrum, photopischer (integrirter) Reflektivität, Restreflektionsfarbe etc. Diese Targets können für verschiedene Winkel definiert und in ihrer Bedeutung bzw. Priorisierung gewichtet werden. Solche Targets können mit Werten z. B. als Verknüpfungen wie „kleiner als“ oder „so nah wie möglich bei“ festgelegt werden. Farben werden als „so nah wie möglich bei“ dem gewünschten Farbort festgelegt, Reflektivitäten als „kleiner als“ eine gewünschte Grenze. Weiterhin können dann Abweichungen penalisiert und mit diesen Penalierungen die Schichtdicken des Designs derart optimiert werden, dass eine möglichst minimale Penalisierung erreicht wird. Mit Wichtungen können Abweichungen verschiedener Parameter unterschiedlich stark in die Penalisierung eingehen. So kann z. B. die Restreflektionsfarbe oder die Reflektivität unter 45° weniger wichtig gewichtet sein als unter 0°. Die Wichtungen werden bei dem Prozess derart angepasst, so dass gewünschte Ergebnisse der Beschichtungscharakteristika erreicht werden.

[0023] Insbesondere werden mindestens zwei, vorzugsweise mehrere Designs definiert, die in allen Schichtdicken und Schichtmaterialien identisch sind und sich ausschließlich in der Schichtdicke der letzten Schicht unterscheiden. Besteht z. B. eine Beschichtung aus 5 Schichten mit zwei sich abwechselnden Materialien, wobei d_1 , d_2 , ... die Schichtdicken sind und die L und H die beiden Materialien (mit niedrigem und mit hohem Brechungsindex) könnte man ein Beschichtungsdesign (B1) nun folgendermaßen beschreiben:

B1: $d_1[L] d_2[H] d_3[L] d_4[H] d_5[L]$.

[0024] Dabei bezeichnet [L] eine Lage mit niedrigem Brechungsindex, [H] eine Lage mit hohem Brechungsindex, d_1 - d_5 sind die jeweiligen Schichtdicken dieser Lagen.

[0025] Weitere Designs mit veränderter Dicke der letzten Schicht ließen sich nun z. B. folgendermaßen beschreiben

B2: $d_1[L] d_2[H] d_3[L] d_4[H] (d_5-20nm)[L]$ oder

B3: $d_1[L] d_2[H] d_3[L] d_4[H] (d_5-40nm)[L]$.

[0026] Insbesondere kann auch eine Bedingung $d_5 \cdot 0,9[L]$ mit unveränderten Schichtdicken d_1 bis d_4 entsprechend der allgemeinsten Ausführungsform der Erfindung, bei welcher sich die Schichtdicke der obersten Lage um 10% unterscheidet, eingeführt werden.

[0027] Das Verfahren umfasst nun, dass man die oben beschriebenen Targets für jedes dieser Designs definiert und alle Designs gleichzeitig (simultan) anpasst, indem durch Änderung der Schichtdicken d_1 , d_2 , ... sich die Designs nach wie vor nur um die gleichen Schichtdickendifferenzen unterscheiden. Dabei können sich die Targets für die unterschiedlichen Beschichtungsdesigns unterscheiden und unterschiedlich gewichtet sein. So kann z. B. die Restreflektionsfarbe oder die Reflektivität für das Design, bei dem die letzte Schicht in ihrer Dicke um 40 nm reduziert ist, weniger wichtig gewichtet sein als für das Design, bei dem die letzte Schicht in ihrer Dicke nicht reduziert ist.

[0028] Ein automatisches Anpassverfahren welches diesem Vorgehen unterzogen wird, generiert in der Regel mehrere verschiedenen Lösungen, die unterschiedlich optimal oder bzgl. verschiedener Parameter unterschiedlich optimal ist. So kann z. B. eine Lösung die Restreflexionsfarbe unter Reduktion der Dicke der letzten Schicht konstanter halten und eine andere Lösung die eher photopische Reflektivität.

[0029] Das erfindungsgemäße Verfahren zur Herstellung eines transparenten Elements kann wie folgt zusammengefasst werden:

- es wird für mindestens ein Paar von Antireflex-Beschichtungen, welche zumindest vier Lagen umfassen, wobei sich Lagen mit hohem Brechungsindex (51, 53) mit Lagen (50, 52, 54) mit niedrigerem Brechungsindex abwechseln, wobei die Lagen (51, 53) mit höherem Brechungsindex eine größere Härte als die Lagen (50, 52, 54) mit niedrigerem Brechungsindex aufweisen, und wobei die oberste Lage (54) der mehrlagigen Antireflex-Beschichtung (5) eine Lage mit niedrigerem Brechungsindex ist, unter Berücksichtigung des Brechungsindex des Substrats zumindest einer der Parameter
- Farbe der Restreflexion unter 0° Lichteinfallswinkel und
- photopische Reflektivität unter 0° Einfallswinkel berechnet, wobei sich die beiden Antireflex-Beschichtungen nur hinsichtlich der Schichtdicke der obersten Lage unterscheiden, so dass die Schichtdicke bei einer Antireflex-Beschichtung um mindestens einen Faktor 0,9 gegenüber der Schichtdicke der anderen Antireflex-Beschichtung reduziert ist, und wobei überprüft wird, ob für beide Antireflex-Beschichtungen zumindest eine der Bedingungen erfüllt ist:
- die Farbe der Restreflexion unter 0° Einfallswinkel bei verminderter Schichtdicke unterscheidet sich von der Farbe unter 0° Lichteinfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke der obersten Lage im CIE xyz-Farbsystem um nicht mehr als $\Delta x=0.05$, $\Delta y=0.05$,
- die photopische Reflektivität unter 0° Einfallswinkel bei verminderter Schichtdicke unterscheidet sich von der photopischen Reflektivität unter 0° Einfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke um nicht mehr als $\Delta R_{ph}=1.5\%$, und wobei für mindestens ein weiteres Paar die Parameter der Farbe der Restreflexion und der photopischen Reflektivität berechnet und zumindest eine der Bedingungen überprüft wird, wenn für das erste Paar die Bedingung nicht erfüllt wird, und wobei eine Schichtabfolge mit dickerer oberster Lage aus einem Paar von Antireflex-Beschichtungen ausgewählt wird, welches zumindest eine der Bedingungen erfüllt, und wobei eine Antireflex-Beschichtung mit dieser ausgewählten Schichtabfolge auf einem Substrat abgeschieden wird.

[0030] Statt nur einem Paar kann auch eine größere Zahl an Designs in den simultanen Anpassprozess gebracht werden, z. B. vier Designs wobei das zweite in der letzten Schichtdicke, wie eben beschrieben, um 10% reduziert ist, ein drittes, mit 20% Schichtdickenreduktion und ein viertes mit 30% Schichtdickenreduktion.

[0031] Wird eine der Bedingungen nicht erfüllt, wird erfindungsgemäß jedenfalls unter den gefundenen Lösungen weitergesucht. Des Weiteren ist es typischerweise notwendig, die Wichtungen und Werte der Targets zu optimieren, so dass das Anpassen der Designs Lösungen generiert, die die gewünschten Bedingungen erfüllt oder so gut wie möglich erfüllt. Diese Suche unter kann insbesondere auch weitergeführt werden, wenn bereits ein geeignetes Paar von Antireflex-Beschichtungen gefunden ist, entweder, um weitere Bedingungen, die bereits oben genannt sind, zu erfüllen, oder auch um ein möglichst optimales Schichtsystem zu finden. Allgemein kann jedenfalls bei einer Vielzahl von Paaren eine Überprüfung hinsichtlich der oben genannten Bedingungen erfolgen (nämlich des Unterschieds der Farbe der Restreflexion unter 0° Einfallswinkel und/oder des Unterschieds der photopischen Reflektivität unter 0° Einfallswinkel) und unter den untersuchten Paaren das Schichtsystem für die Abscheidung ausgewählt werden, bei welchem der kleinsten Unterschied der der Farbe der Restreflexion unter 0° Lichteinfallswinkel und/oder der kleinste Unterschied der photopischen Reflektivität unter 0° Lichteinfallswinkel vorliegt und dann dieses Schichtsystem abgeschieden wird.

[0032] Die Auswahl eines Antireflex-Schichtsystems aus einem bestimmten Paar von Antireflex-Beschichtungen kann dahingehend erfolgen, ob weitere Bedingungen vorliegen, nämlich insbesondere die oben bereits aufgelisteten Merkmale. So ist in Weiterbildung der Erfindung vorgesehen, dass die Antireflex-Beschichtung (5) so ausgewählt wird, dass

- sich die Farbe der Restreflexion der beiden Antireflex-Beschichtungen (5, 6) eines Paares im CIE xyz-Farbsystem unter 30° Einfallswinkel um nicht mehr als $\Delta x=0,05$, $\Delta y=0,05$ unterscheidet, oder
- sich die Farbe der Restreflexion der beiden Antireflex-Beschichtungen (5, 6) eines Paares im CIE xyz-Farbsystem unter 45° Einfallswinkel um nicht mehr als $\Delta x=0,05$, $\Delta y=0,05$ unterscheidet.

[0033] Insbesondere ist die Erfindung für anorganische Substrate geeignet. Ein bevorzugtes Substrat ist Saphir. Dieses Substrat ist besonders hochwertig, hart und transparent, so dass hier die Vorteile der Erfindung, nämlich ein hochwertiges, hartes und gegenüber Abrasion sehr unempfindliches Antireflex-Schichtsystem bereitzustellen, besonders zur Geltung kommen.

[0034] Besonders geeignet für die Lagen mit hohem Brechungsindex sind Siliziumnitrid (Si_3N_4), Aluminiumnitrid (AlN), Aluminiumoxid (Al_2O_3), sowie Oxinitride ($\text{Al}_w\text{Si}_x\text{N}_y\text{O}_z$) und Mischungen der genannten Materialien. Diese Materialien weisen nicht nur einen hohen Brechungsindex auf, sondern auch eine große Härte. Unter den Nitriden sind insbesondere Aluminiumnitrid und Siliziumnitrid als geeignete Schichtmaterialien zu nennen. Die Materialien können dotiert sein, beziehungsweise müssen nicht in reiner Form vorliegen. So kann Aluminiumnitrid mit einem Anteil Silizium (z.B. zwischen 0,05 und 0,25) oder umgekehrt Silizium mit einem Anteil Aluminium (wiederum z.B. zwischen 0,05 und 0,25) als Material für die höherbrechenden Lagen eingesetzt werden.

[0035] Alle oben genannten Merkmale hinsichtlich Reflektivität und Farbort können gemäß noch einer Weiterbildung der Erfindung auch erfüllt werden, wenn die Schichtdicke der obersten Lage noch weiter reduziert wird, auf höchstens das 0,8-fache, besonders bevorzugt höchstens das 0,7-fache, insbesondere bevorzugt höchstens noch das 0,6-fache der unverminderten Schichtdicke.

Kurzbeschreibung der Figuren:

[0036]

- Fig. 1 zeigt zwei transparente Elemente mit vierlagigen Antireflex-Beschichtungen.
- Fig. 2 zeigt zwei transparente Elemente mit Antireflex-Beschichtungen mit fünflagigen Antireflex-Beschichtungen.
- Fig. 3 zeigt Diagramme des Farborts für verschiedene Antireflex-Beschichtungen mit blauer Restreflexion.
- Fig. 4 zeigt Diagramme des Farborts für verschiedene Antireflex-Beschichtungen mit neutraler, beziehungsweise farbloser Restreflexion,
- Fig. 5 zeigt eine Häufigkeitsverteilung der Schichtdicke des untersten Pairs von Lagen für eine Anzahl von Antireflex-Beschichtungen auf einem Saphir-Substrat.
- In Fig. 6 ist eine entsprechende Häufigkeitsverteilung für Beschichtungen auf einem Borosilikatglas-Substrat dargestellt.
- Fig. 7 zeigt eine Häufigkeitsverteilung des Abstands der drittobersten Grenzfläche von der Oberfläche für eine Anzahl von Antireflex-Beschichtungen auf einem Saphir-Substrat.
- In Fig. 8 ist eine entsprechende Häufigkeitsverteilung für Beschichtungen auf einem Borosilikatglas-Substrat dargestellt.
- Fig. 9 zeigt eine Häufigkeitsverteilung der Differenz der Schichtdicken des obersten Pairs von Lagen und des zweitobersten Pairs von Lagen für eine Anzahl von Antireflex-Beschichtungen auf einem Saphir-Substrat.
- In Fig. 10 ist eine entsprechende Häufigkeitsverteilung für Beschichtungen auf einem Borosilikatglas-Substrat dargestellt.
- Die Fig. 11 bis Fig. 14 zeigen Diagramme, in denen die Schichtdicken der obersten Lagen für verschiedene Typen von erfindungsgemäßen Antireflex-Beschichtungen aufgetragen sind.
- Die Fig. 15 bis Fig. 18 zeigen Diagramme, in denen die Schichtdicken der untersten hochbrechenden Lagen für verschiedene Typen von erfindungsgemäßen Antireflex-Beschichtungen aufgetragen sind.

[0037] Fig. 1 zeigt zwei Teilbilder (a) und (b). Dabei zeigt das Teilbild (a) ein Beispiel eines erfindungsgemäßen transparenten Elements 1. Das transparente Element 1 umfasst ein transparentes, insbesondere anorganisches Substrat 3, beispielsweise aus Glas. Auf dem Substrat 3 ist eine mehrlagige Antireflex-Beschichtung 5 abgeschieden. Diese weist mindestens vier Lagen 51, 52, 53, 54 auf. Dabei sind die Lagen 51, 53 hochbrechend und die Lagen 52, 54 niedrigbrechend, so dass die Lagen 51, 53 einen höheren Brechungsindex als die Lagen 52, 54 aufweisen. Die Schichtmaterialien sind durch verschiedene Schraffuren gekennzeichnet. Wie anhand der Darstellung ersichtlich, wechseln sich Lagen mit höherem Brechungsindex 51, 53 mit Lagen 52, 54 mit niedrigerem Brechungsindex ab. Eine große Härte und Widerstandsfähigkeit der Antireflex-Beschichtung 5 wird insbesondere durch die Lagen 51, 53 mit höherem Brechungsindex bewirkt, die eine größere Härte als die niedrigbrechenden Lagen aufweisen.

[0038] Die Lage 54 bildet die oberste Lage 60 der Antireflex-Beschichtung und ist eine niedrigbrechende Schicht. Demzufolge kann diese Lage 60 leichter durch Abrasion abgetragen werden.

[0039] Das in Teilbild (b) gezeigte transparente Element 1 unterscheidet sich von dem Element 1 gemäß Teilbild (a) nun nur dahingehend, dass bei der Antireflex-Beschichtung 6 die Schichtdicke der obersten Lage 60 um einen Betrag Δd verringert ist. Eine solche Situation kann eintreten, wenn die erfindungsgemäße Antireflex-Beschichtung 5 gemäß Teilbild (a) durch Abrasion im Lauf der Zeit abgetragen wird. Die Schichtdicken der Lagen 51 - 54 können nun erfindungsgemäß so ausgewählt werden, dass bei gegebenen Brechungsindizes der Schichtmaterialien und des Substrats bei einer Abnahme der Schichtdicke gemäß der Änderung zwischen den beiden Teilbildern (a), (b) die Farbe der Restreflexion und/oder die Reflektivität der Oberfläche nahezu unverändert bleibt. Im Speziellen kann die Farbe der Restreflexion unter 0° Einfallswinkel bei verminderter Schichtdicke gemäß Teilbild (b) sich von der Farbe bei unverminderter Schichtdicke der obersten Lage 60 gemessen im CIE xyz-Farbsystem um nicht mehr als $\Delta x=0.05$, $\Delta y=0.05$ voneinander abweichen. Ein weiteres, alternatives oder insbesondere zusätzliches Kriterium ist die photopische Reflektivität unter verschiedenen Lichteinfallswinkeln.

winkeln. Dabei kann die photopische Reflektivität unter 0° Einfallswinkel bei verminderter Schichtdicke sich von der photopischen Reflektivität unter 0° Einfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke um nicht mehr als $\Delta R_{ph}=1.5\%$ unterscheiden. Diese Kriterien sind bei einer Antireflex-Beschichtung 5 auch dann erfüllbar, wenn die Abnahme L der Schichtdicke d mindestens $0,1*d$, also mindestens 10% beträgt.

[0040] Allgemein kann die Antireflex-Beschichtung 5 so ausgelegt werden, dass diese bei unverminderter Schichtdicke der obersten Lage 60 gleichzeitig alle oder die meisten (viele, bevorzugt die meisten, besonders bevorzugt fast alle, ganz besonders bevorzugt alle) folgende Eigenschaften hat:

- a) Die Antireflex-Beschichtung 5 hat unter 0° Einfallswinkel eine Restreflexion einer (z. B. im CIE Farbraum) vordefinierten Farbe, z. B. blau (z. B. $x=0.20 \pm 0.05$, $y=0.20 \pm 0.05$) oder farbneutral (z. B. $x=0.30 \pm 0.05$, $y=0.32 \pm 0.05$).
- b) Die Farbe der Restreflexion der Antireflex-Beschichtung 5 unter 30° Einfallswinkel unterscheidet sich von der Farbe unter 0° Einfallswinkel um nicht mehr als z. B. $\Delta x=0.02$, $\Delta y=0.02$.
- c) Die Farbe der Restreflexion der Antireflex-Beschichtung 5 unter 45° Einfallswinkel unterscheidet sich von der Farbe unter 0° Einfallswinkel um nicht mehr als z. B. $\Delta x=0.05$, $\Delta y=0.05$.
- d) Die photopische Reflektivität der Antireflex-Beschichtung 5 (gewichtet mit der Empfindlichkeitskurve des menschlichen Auges) unter 0° Einfallswinkel ist kleiner als 1,5% (z. B. auch kleiner als 2%, bevorzugt kleiner als 1,5%, besonders bevorzugt kleiner als 1,0%, ganz besonders bevorzugt kleiner als 0,8%).
- e) Die photopische Reflektivität der Antireflex-Beschichtung 5 unter 30° Einfallswinkel unterscheidet sich von dem Wert unter 0° Einfallswinkel um weniger als 0,2%, besonders bevorzugt um weniger als 0,1%.
- f) Die photopische Reflektivität der Antireflex-Beschichtung 5 unter 45° Einfallswinkel unterscheidet sich von dem Wert unter 0° Einfallswinkel um weniger als 0,2%, besonders bevorzugt um weniger als 0,1%.
- g) Die durchschnittliche Reflektivität der Antireflex-Beschichtung 5 (gemittelt im Bereich zwischen z. B. 450 nm und 700 nm) unter 0° Einfallswinkel ist kleiner als 1,5%, bevorzugt kleiner als 1,25%, besonders bevorzugt kleiner als 1,0%.
- h) Die durchschnittliche Reflektivität der Antireflex-Beschichtung 5 unter 30° Einfallswinkel unterscheidet sich von dem Wert unter 0° Einfallswinkel um weniger als 0,5%, bevorzugt um weniger als 0,2%, besonders bevorzugt um weniger als 0,1%.
- i) Die durchschnittliche Reflektivität der Antireflex-Beschichtung 5 unter 45° Einfallswinkel unterscheidet sich von dem Wert unter 0° Einfallswinkel um weniger als 0,5%, bevorzugt um weniger als 0,2%, besonders bevorzugt um weniger als 0,1%.
- j) Die absolute Reflektivität (Maximum im Bereich zwischen z. B. 450 nm und 700 nm) ist unter 0° Einfallswinkel kleiner als 2%, bevorzugt kleiner als 1,5%, besonders bevorzugt kleiner als 1,0%.
- k) die absolute Reflektivität unter 30° Einfallswinkel unterscheidet sich von dem Wert unter 0° Einfallswinkel um weniger als 0,5%, bevorzugt um weniger als 0,2%, besonders bevorzugt um weniger als 0,1%.
- l) die absolute Reflektivität unter 45° Einfallswinkel unterscheidet sich von dem Wert unter 0° Einfallswinkel um weniger als 0,5%, bevorzugt um weniger als 0,2%, besonders bevorzugt um weniger als 0,1%.

[0041] Wird die Schichtdicke der erfindungsgemäßen Antireflex-Beschichtung 5 um 10%, bevorzugt um 20%, besonders bevorzugt um 30%, ganz besonders bevorzugt um 40%, oder sogar um 50% reduziert, so dass eine Antireflexbeschichtung 6 erhalten wird, wie sie beispielhaft Teilbild (b) der Fig. 1 zeigt, können folgende Merkmale einzeln oder in Kombination vorliegen:

- m) Die Farbe der Restreflexion der Antireflex-Beschichtung 6 mit verminderter Schichtdicke der Lage 60 unter 0° Einfallswinkel unterscheidet sich von der Farbe der Antireflex-Beschichtung 5 mit unverminderter Schichtdicke der Lage 60 unter 0° Einfallswinkel um nicht mehr als $\Delta x=0,05$, $\Delta y=0,05$, bevorzugt um nicht mehr als $\Delta x=0,03$, $\Delta y=0,03$, besonders bevorzugt um nicht mehr als $\Delta x=0,02$, $\Delta y=0,02$, ganz besonders bevorzugt um nicht mehr als $\Delta x=0,01$, $\Delta y=0,01$.
- n) Die Farbe der Restreflexion unter 30° Einfallswinkel der Antireflex-Beschichtung 6 mit verminderter Schichtdicke der Lage 60 unterscheidet sich von der Farbe der Antireflex-Beschichtung 5 mit unverminderter Schichtdicke der Lage 60 unter 30° Einfallswinkel um nicht mehr als $\Delta x=0.05$, $\Delta y=0.05$, bevorzugt um nicht mehr als $\Delta x=0,03$,

$\Delta y=0,03$, besonders bevorzugt um nicht mehr als $\Delta x=0,02$, $\Delta y=0,02$, ganz besonders bevorzugt um nicht mehr als $\Delta x=0,01$, $\Delta y=0,01$.

- o) Die Farbe der Restreflexion der Antireflex-Beschichtung 6 mit verminderter Schichtdicke der Lage 60 unter 45° Einfallswinkel unterscheidet sich von der Farbe der Antireflex-Beschichtung 5 mit unverminderter Schichtdicke der Lage 60 unter 45° Einfallswinkel um nicht mehr als $\Delta x=0,05$, $\Delta y=0,05$, bevorzugt um nicht mehr als $\Delta x=0,03$, $\Delta y=0,03$, besonders bevorzugt um nicht mehr als $\Delta x=0,02$, $\Delta y=0,02$, ganz besonders bevorzugt um nicht mehr als $\Delta x=0,01$, $\Delta y=0,01$.
- p) Die photopische Reflektivität der Antireflex-Beschichtung 6 mit verminderter Schichtdicke der Lage 60 unter 0° Einfallswinkel unterscheidet sich von der Farbe der Antireflex-Beschichtung 5 mit unverminderter Schichtdicke der Lage 60 unter 0° Einfallswinkel um nicht mehr als $\Delta R_{ph}=1,5\%$, bevorzugt um nicht mehr als $\Delta R_{ph}=1\%$, besonders bevorzugt um nicht mehr als $\Delta R_{ph}=0,5\%$, ganz besonders bevorzugt um nicht mehr als $\Delta R_{ph}=0,25\%$.

[0042] Bei dem in Fig. 1 gezeigten Beispiel besteht die Antireflex-Beschichtung 5 aus insgesamt vier Lagen, wobei die unterste Lage 51 eine hochbrechende Lage ist. Ein solches Schichtsystem ist günstig, wenn der Brechungsindex des Substrates deutlich niedriger ist als der Brechungsindex der höherbrechenden Lagen. Im Falle eines Substrats mit einem Brechungsindex größer als 1,65 ist es hingegen vorteilhaft, in Kontakt mit dem Substrat eine niedriger brechende Lage vorzusehen. Ein solches Beispiel zeigt Fig. 2, ebenfalls mit einem Teilbild (a) mit unverminderter Schichtdicke der obersten Lage 60 und einem Teilbild (b) mit einer gleichartigen Antireflex-Beschichtung 6, bei der aber die oberste Lage 60 in ihrer Dicke auf höchstens das 0,9-fache der Schichtdicke d der in Teilbild (a) gezeigten obersten Lage 60 reduziert ist.

[0043] Allgemein basiert die Ausführungsform der Fig. 2 also darauf, dass ein Substrat 3 mit einer Antireflex-Beschichtung 5 gemäß der Erfindung beschichtet ist, wobei das Substrat 3 einen Brechungsindex über 1,65 aufweist und die Antireflex-Beschichtung 5 eine Folge von mindestens fünf einander abwechselnden Lagen mit niedrigerem und höherem Brechungsindex aufweist, wobei die unterste Lage 50 eine Lage mit niedrigerem Brechungsindex ist.

[0044] Vorzugsweise ist das Substrat 3 dieser Ausführungsform ein Saphir. Das transparente Element kann dann beispielsweise ein Uhrglas oder eine Lupe für ein Uhrglas, wie sie verwendet wird, um die Datumsanzeige zu vergrößern. Als Substratmaterial kann neben Saphir auch Kalk-Natron-Glas, Borofloat-Glas, Aluminosilikatglas, Lithium-Aluminosilikatglas, Glaskeramik, und optisches Glas, beispielsweise Glas mit den Handelsnamen NBK7, D263 oder B270 verwendet werden.

[0045] Bei einer fünfschichtigen Antireflex-Beschichtung auf einem hochbrechenden Substrat, wie sie als Beispiel in Fig. 5 gezeigt ist, kann gemäß zweier Ausführungsformen der Erfindung hinsichtlich der Schichtdicken der einzelnen Lagen die Beschichtung 5 allgemein wie folgt charakterisiert werden:

Fall a) Die Schichtdicken betragen:

Dicke d_1 der ersten Schicht auf dem Substrat 3, also der untersten Schicht 50: 5 nm - 60 nm,

Dicke d_2 der zweiten Schicht 51: 5 nm - 50 nm,

Dicke d_3 der dritten Schicht 52: 10 nm - 200 nm,

Dicke d_4 der vierten Schicht 53: 100 nm - 200 nm,

Dicke d_5 der fünften und obersten Schicht 54: 70 nm - 120 nm,

Fall b) Die Schichtdicken betragen:

Dicke d_1 der ersten Schicht auf dem Substrat 3: 5 nm - 60 nm,

Dicke d_2 der zweiten Schicht 51: 30 nm - 200 nm,

Dicke d_3 der dritten Schicht 52: 10 nm - 200 nm,

Dicke d_4 der vierten Schicht 53: 150 nm - 300 nm,

Dicke d_5 der fünften und obersten Schicht 54: 70 nm - 120 nm.

[0046] Der erste Fall ergibt typischerweise eine Antireflex-Beschichtung mit blauer oder farbneutraler Restreflexion, der zweite Fall ergibt im Allgemeinen eine violette Restreflexion. Die beiden Designs weichen hinsichtlich der Schichtdickenbereiche der zweiten und vierten Schicht voneinander ab.

[0047] In beiden Fällen kann für die Schichtdicken d_1 , d_2 , d_3 , d_4 , d_5 folgende Beziehung gelten:

$D = 85\text{nm} + 1.7 \cdot d_1 + 1.1 \cdot d_2 - 0.9 \cdot d_3 + 0.0138 \cdot (d_3 - 60\text{nm})^2$. Dabei gibt D den Wert der Schichtdicke d4 der vierten Schicht mit einer Abweichung von maximal $\pm 15\%$, vorzugsweise maximal $\pm 10\%$, besonders bevorzugt maximal $\pm 5\%$ an. Antireflex-Beschichtungen mit diesen Merkmalen erweisen sich als besonders günstig hinsichtlich der Stabilität des Farborts der Restreflexion und der Reflektivität unter Abrasion der obersten Lage 54, 60.

[0048] Fig. 3 zeigt als Ausführungsbeispiel der Erfindung vier Diagramme der Farborte der Restreflexion an verschiedenen Antireflexbeschichtungen. Die Beschichtungen sind wie bei dem Beispiel der Fig. 2 als fünfplagige Antireflex-Beschichtungen 5 ausgebildet. Als Substrat 3 dient eine Saphirscheibe. In den Diagrammen der Teilbilder (a) bis (d) sind jeweils drei Punkte eingezeichnet, welche die Farbe der Restreflexion unter 0° , 20° und 40° Lichteinfallswinkel kennzeichnen. Die Werte aller Diagramme sind berechnet.

[0049] Teilbild (a) zeigt die x- und y-Werte der Farbe der Restreflexion bei unverminderter Schichtdicke der obersten Lage 60. Bei Teilbild (b) ist die Schichtdicke der obersten Lage 60 um 10% reduziert, die Schichtdicke der obersten Schicht beträgt also noch das 0,9-fache der Schicht des Beispiels aus Teilbild (a). Bei Teilbild (c) ist die Schichtdicke der obersten Lage 60 um 20% und bei Teilbild (c) um 30% reduziert.

[0050] Ein Vergleich der Farborte zwischen den Teilbildern (a), (b) zeigt, dass die Farbe der Restreflexion unter 0° Einfallswinkel bei verminderter Schichtdicke sich von der Farbe unter 0° Lichteinfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke der obersten Lage 54, 60 im CIE xyz-Farbsystem um nicht mehr als $\Delta x = 0.05$, $\Delta y = 0.05$ unterscheidet. Dies gilt überdies für alle Punkte, also auch für Einfallswinkel von 20° und 40° . Erst bei einer Reduktion der Schichtdicke um 30% gemäß Teilbild (d) findet sich ein einzelner Punkt, der bei einem x-Wert von größer als 0,25 liegt und damit eine Abweichung von etwas mehr als 0,05 aufweist.

[0051] Die photopischen Reflektivitäten (Angaben in Prozent) betragen beim Schichtsystem gemäß Teilbild (a) 1,37 bei 0° , 0,935 bei 20° und 1,148 bei 40° . Bei Teilbild (b) sind die photopischen Reflektivitäten 0,996 bei 0° , 0,985 bei 20° und 1,15 bei 40° . Die Änderungen der photopischen Reflektivitäten betragen:

$$\Delta R_{ph}(0^\circ) = 1,37 - 0,996 = 0,374\%;$$

$$\Delta R_{ph}(20^\circ) = 0,935 - 0,985 = -0,05\%;$$

$$\Delta R_{ph}(40^\circ) = 1,148 - 1,15 = -0,002\%.$$

[0052] Mithin sind alle Unterschiede wie erfindungsgemäß vorgesehen betragsmäßig deutlich kleiner als 1,5%, insbesondere sogar kleiner als 0,5%.

[0053] Damit sind die Änderungen hinsichtlich der photopischen Reflektivität und Farbe der Restreflexion nur sehr klein, wenn eine Antireflex-Beschichtung gemäß Teilbild (a) durch Abrasion eine Ausdünnung der obersten Lage 60 erfährt.

[0054] Die Schichtdicken der Antireflex-Beschichtung gemäß Teilbild (a), also vor einer Reduktion der obersten Lage durch Abrasion sind ähnlich zu einem weiteren Ausführungsbeispiel. Gemäß diesem Ausführungsbeispiel betragen die Schichtdicken im Einzelnen:

- unterste Lage 50 (niedrigerer Brechungsindex): 55 nm,
- daraufliegende Lage 51 (höherer Brechungsindex): 17 nm,
- daraufliegende Lage 52 (niedrigerer Brechungsindex): 80 nm,
- daraufliegende Lage 53 (höherer Brechungsindex): 125 nm,
- oberste Lage 54, bzw. 60 (niedrigerer Brechungsindex): 80 nm.

[0055] Die nachfolgende Tabelle listet für das vorstehend genannte Schichtsystem die berechneten Werte zum CIE Farbort (x,y) unter verschiedenen Lichteinfallswinkeln vor und nach einer Reduktion der Schichtdicke der obersten Lage 54, 60 um 10 nm auf:

Winkel [°]	Reduktion [nm]	Farbwert x	Farbwert y	Änderung des Farbwerts Δx	Änderung des Farbwerts Δy
0	0	0.162	0.145		
15	0	0.162	0.135	0.000	0.010

Winkel [°]	Reduktion [nm]	Farbwert x	Farbwert y	Änderung des Farbwerts Δx	Änderung des Farbwerts Δy
30	0	0.171	0.122	0.009	0.023
45	0	0.211	0.164	0.049	0.019
0	10	0.171	0.099	0.009	0.046
15	10	0.176	0.097	0.014	0.038
30	10	0.197	0.109	0.026	0.013
45	10	0.249	0.171	0.038	0.007

[0056] Die Änderungen der Farbwerte Δx und Δy für die Winkel 15°, 30° und 45° bei einer Reduktion um 0 nm, also bei unverminderter Schichtdicke beziehen sich auf die Farbwerte bei 0° Lichteinfallswinkel. Als Beispiel ist also die Änderung des Farbwerts Δx von 0,009 bei 30° Lichteinfallswinkel die Differenz zum Wert x bei 0° und ebenfalls unverminderter Schichtdicke. Die Änderungen Δx , Δy bei verminderter Schichtdicke und Lichteinfallswinkeln von 15°, 30°, 45° (letzte drei Zeilen der Tabelle) beziehen sich auf die Farbwerte bei gleichem Winkel, aber unverminderter Schichtdicke. Die Änderung Δx von 0,038 in der letzten Zeile der Tabelle ist demgemäß der Absolutbetrag der Differenz der Farbwerte x unter 45° Lichteinfall bei unverminderter und um 10 nm verringerter Schichtdicke.

[0057] Fig. 4 zeigt anhand von Diagrammen der berechneten Farbwerte der Restreflexion ein weiteres erfindungsgemäßes Beispiel. Die Farbe der Restreflexion wurde für Reflexion unter Lichteinfallswinkeln von 0°, 20°, 40° und 60° bestimmt. Teilbild (a) zeigt wieder die Farbwerte bei unverminderter Schichtdicke und die Teilbilder die Farbwerte bei um 20% und um 50% reduzierter Schichtdicke der obersten Lage 60. Hier weicht bei keiner der Teilbilder (b) und (c) einer der Farbwerte von dem Farbwert gemäß Teilbild (a) um mehr als 0,05 ab, was angesichts der deutlichen Reduzierung der obersten Lage 60 bis auf die Hälfte der Schichtdicke bemerkenswert ist.

[0058] Für die photopische Reflektivität wurden folgende Werte bestimmt:

Bei Teilbild (a), unverminderter Schichtdicke liegt die Reflektivität bei Lichteinfallswinkeln von 0°, 20° und 40° bei 1,658, 1,536 und 1,590.

Bei Teilbild (b), Schichtdicke der obersten Lage um 20% reduziert, liegt die Reflektivität bei Lichteinfallswinkeln von 0°, 20° und 40° bei 1,063, 1,076 und 1,480.

Bei Teilbild (c), Schichtdicke der obersten Lage halbiert, liegt die Reflektivität bei Lichteinfallswinkeln von 0°, 20° und 40° bei 3,321, 3,403 und 4,100.

[0059] Zwar nimmt die Reflektivität bei starker Abrasion zu, allerdings bleiben die Farbänderungen nur sehr gering.

[0060] Bei einem weiteren Ausführungsbeispiel mit Schichtdicken ähnlich zu denen der Antireflex-Beschichtung gemäß Fig. 4, Teilbild (a) sind die einzelnen Lagen gegeben durch:

- unterste Lage 50 (niedrigerer Brechungsindex): 35 nm,
- darauffolgende Lage 51 (höherer Brechungsindex): 25 nm,
- darauffolgende Lage 52 (niedrigerer Brechungsindex): 40 nm,
- darauffolgende Lage 53 (höherer Brechungsindex): 135 nm,
- oberste Lage 54, bzw. 60 (niedrigerer Brechungsindex): 100 nm.

[0061] Die nachfolgende Tabelle listet die berechneten Werte zum CIE Farbort (x,y) dieses Ausführungsbeispiels unter verschiedenen Lichteinfallswinkeln vor und nach einer Reduktion der Schichtdicke der obersten Lage 54, 60 um 10 nm auf:

Winkel [°]	Reduktion [nm]	Farbwert x	Farbwert y	Änderung des Farbwerts Δx	Änderung des Farbwerts Δy
0	0	0.298	0.298		

CH 714 953 B1

Winkel [°]	Reduktion [nm]	Farbwert x	Farbwert y	Änderung des Farbwerts Δx	Änderung des Farbwerts Δy
15	0	0.299	0.299	0.001	0.001
30	0	0.297	0.315	0.001	0.017
45	0	0.299	0.347	0.001	0.049
0	10	0.324	0.347	0.026	0.049
15	10	0.322	0.348	0.023	0.049
30	10	0.315	0.374	0.018	0.059
45	10	0.309	0.379	0.010	0.032

[0062] Die Änderungen der Farbwerte Δx und Δy für die Winkel 15°, 30° und 45° bei einer Reduktion um 0 nm, also bei unverminderter Schichtdicke beziehen sich wie bei der vorangegangenen Tabelle auf die Farbwerte bei 0° Lichteinfallswinkel. Als Beispiel ist also die Änderung des Farbwerts Δy von 0,049 bei 45° Lichteinfallswinkel die Differenz zum Wert y bei 0° und ebenfalls unverminderter Schichtdicke. Die Änderungen Δx , Δy bei verminderter Schichtdicke und Lichteinfallswinkeln von 15°, 30°, 45° (letzte drei Zeilen der Tabelle) beziehen sich wie bei der vorigen Tabelle auf die Farbwerte bei gleichem Winkel, aber unverminderter Schichtdicke.

[0063] In der nachfolgenden Tabelle ist ein weiteres Ausführungsbeispiel gemäß der Erfindung einem Vergleichsbeispiel gegenübergestellt. Die Beschichtungen wurden einem modifizierten Bayer-Test, wie er oben genannt wurde, unterzogen, wobei die Reflektivität und der Farbort vor und nach dem Abrasionstest gemessen wurden.

	Design 1 (Vergleichsbeispiel)		Design 2 (erfindungsgemäß)	
Dicke der 1. Lage 50 (niedriger Index)	32.9 nm		15.0 nm	
Dicke der 2. Lage 51 (hoher Index)	25.4 nm		30.0 nm	
Dicke der 3. Lage 52 (niedriger Index)	41.3 nm		27.0 nm	
Dicke der 4. Lage 53 (hoher Index)	152.9 nm		136.0 nm	
Dicke der 5. Lage 54 (niedriger Index)	104.8 nm		92.0 nm	
Berechnete Dicke der 4. Schicht	136.5 nm		134.2 nm	
Abweichung der 4. Schicht	12.1%		1.3%	
photopische Reflektivität vor Abrasion unter 0°	0.89%	OK	1.02%	OK
photopische Reflektivität nach Abrasionstest unter 0°	2.60%	nicht OK	1.89%	OK
Änderung des CIE Farborts unter 0°	0.155	nicht OK	0.016	OK

CH 714 953 B1

	Design 1 (Vergleichsbeispiel)		Design 2 (erfindungsgemäß)	
Änderung der photopische Reflektivität unter 0°	1.71%	nicht OK	0.87%	OK

[0064] Wie anhand der Tabelle ersichtlich, ist das Vergleichsbeispiel hinsichtlich der photopischen Reflektivität vor dem Abrasionstest geringfügig besser als die erfindungsgemäße Beschichtung. Die erfindungsgemäße Beschichtung ändert aber nach abrasiver Einwirkung die Farbe der Restreflexion und die Reflektivität erheblich geringer, als das Vergleichsbeispiel.

[0065] Die Erfindung ist weiterhin nicht auf vier- oder fünflagige Beschichtungen, wie sie beispielhaft die Fig. 2 und Fig. 3 zeigen, beschränkt. Es können auch noch mehr Lagen vorgesehen werden. Bevorzugt wird aber ganz allgemein, dass die Antireflex-Beschichtung 5 höchstens zwölf, besonders bevorzugt höchstens zehn Lagen aufweist, um den Fertigungsaufwand in Grenzen zu halten.

[0066] Nachfolgend werden weitere Ausführungsbeispiele erläutert. Die nachstehende Tabelle listet für fünf Beispiele die optischen Eigenschaften vor und nach Abrasion der obersten Schicht und unter schrägem Lichteinfall auf. Die Beispiele 3 bis 5 sind nicht nur auf gegenüber Abrasion möglichst unempfindliche optische Eigenschaften unter senkrechtem Lichteinfall, sondern zusätzlich auch unter schrägem Lichteinfall optimiert. Die Beispiele 1 und 2 erfüllen jeweils nur eines der beiden Kriterien einer unter Abrasion geringen Farbänderung und Änderung der photopischen Reflektivität, wohingegen die Beispiele 3 bis 6 beide Kriterien erfüllen, nämlich, dass erstens die Farbe der Restreflexion unter 0° Einfallswinkel bei verminderter Schichtdicke sich von der Farbe unter 0° Lichteinfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke der obersten Lage 54 im CIE xyz-Farbsystem um nicht mehr als $\Delta x=0.05$, $\Delta y=0.05$ und zweitens die photopische Reflektivität unter 0° Einfallswinkel bei verminderter Schichtdicke sich von der photopischen Reflektivität unter 0° Einfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke um nicht mehr als $\Delta R_{ph}=1.5\%$ unterscheidet. Die Beispiele wurden auf einen Farbort der Restreflexion in der Nähe von $x=0,331$, $y=0,331$ optimiert.

Tabellen: optische Eigenschaften vor und nach Abrasion

Beispiel 1

CIE Farbort (x,y)

[0067]

Einfallswinkel [°]	Reduktion oberste Schicht [nm]	photopische Reflektivität [%]	x	y	$\Delta(xy)$	Kommentar
0	0	0,33	0,330	0,321	0,010	0°, 100% Schicht (neu) OK, R gering
15	0	0,35	0,368	0,322	0,038	
30	0	0,53	0,428	0,307	0,100	starke Farbabweichungen unter Betrachtungswinkel
45	0	1,47	0,419	0,315	0,089	
60	0	5,45	0,377	0,332	0,046	
0	10	0,83	0,403	0,327	0,072	starke Farbabweichungen nach Abrieb
15	10	0,91	0,411	0,348	0,082	
30	10	1,32	0,423	0,318	0,093	
45	10	2,68	0,416	0,334	0,085	
60	10	7,34	0,380	0,347	0,052	
0	30	3,60	0,336	0,287	0,044	
15	30	3,77	0,343	0,291	0,042	

CH 714 953 B1

Einfallswinkel [°]	Reduktion oberste Schicht [nm]	photopische Reflektivität [%]	x	y	$\Delta(xy)$	Kommentar
30	30	4,45	0,361	0,308	0,038	
45	30	6,35	0,374	0,336	0,043	
60	30	11,72	0,363	0,352	0,038	

Beispiel 2

[0068]

Einfallswinkel [°]	Schicht-Reduktion [nm]	photopische Reflektivität [%]	x	y	$\Delta(xy)$	
0	0	0,33	0,334	0,321	0,010	0°, 100% Schicht (neu) OK
15	0	0,34	0,377	0,325	0,046	
30	0	0,54	0,491	0,305	0,162	starke Farbabweichungen unter Betrachtungswinkel
45	0	1,92	0,517	0,333	0,186	
60	0	7,61	0,458	0,365	0,131	
0	10	0,91	0,412	0,419	0,120	starke Farbabweichungen nach Abrieb
15	10	0,97	0,436	0,405	0,128	
30	10	1,40	0,446	0,383	0,126	
45	10	3,45	0,494	0,374	0,169	
60	10	10,27	0,504	0,374	0,178	
0	30	3,77	0,329	0,321	0,010	
15	30	3,91	0,345	0,325	0,015	
30	30	4,76	0,390	0,342	0,060	starke Farbabweichungen unter Betrachtungswinkel nach Abrieb
45	30	7,83	0,423	0,366	0,098	
60	30	15,72	0,399	0,376	0,082	

Beispiel 3

[0069]

Einfallswinkel [°]	Schicht-Reduktion [nm]	photopische Reflektivität [%]	x	y	$\Delta(xy)$	
0	0	0,80	0,331	0,331	0,000	0°, 100% Schicht (neu) OK
15	0	0,85	0,339	0,342	0,014	
30	0	1,08	0,352	0,363	0,038	

CH 714 953 B1

Einfallswinkel [°]	Schicht-Reduktion [nm]	photopische Reflektivität [%]	x	y	$\Delta(xy)$	
45	0	2,02	0,348	0,357	0,031	sehr geringe Farbabweichungen unter Betrachtungswinkel
60	0	5,85	0,330	0,337	0,006	
0	10	1,52	0,360	0,372	0,050	sehr geringe Farbabweichungen nach Abrieb
15	10	1,60	0,361	0,374	0,052	
30	10	1,95	0,359	0,372	0,050	
45	10	3,08	0,347	0,355	0,029	
60	10	7,23	0,331	0,336	0,005	
0	30	4,12	0,332	0,348	0,017	
15	30	4,22	0,332	0,347	0,016	
30	30	4,62	0,332	0,343	0,012	
45	30	5,93	0,330	0,335	0,004	sehr geringe Farbabweichungen unter Betrachtungswinkel nach Abrieb
60	30	10,38	0,326	0,329	0,008	

Beispiel 4

[0070]

Einfallswinkel [°]	Schicht-Reduktion [nm]	photopische Reflektivität [%]	x	y	$\Delta(xy)$	
0	0	0,75	0,314	0,336	0,018	0°, 100% Schicht (neu) OK
15	0	0,77	0,317	0,334	0,015	
30	0	0,96	0,326	0,330	0,005	
45	0	1,85	0,338	0,333	0,007	sehr geringe Farbabweichungen unter Betrachtungswinkel
60	0	5,67	0,341	0,338	0,012	
0	10	1,28	0,339	0,334	0,009	sehr geringe Farbabweichungen nach Abrieb
15	10	1,35	0,341	0,334	0,010	
30	10	1,67	0,345	0,335	0,014	
45	10	2,79	0,348	0,339	0,019	
60	10	6,93	0,345	0,342	0,018	
0	30	3,58	0,319	0,310	0,024	
15	30	3,69	0,321	0,312	0,021	
30	30	4,13	0,325	0,318	0,014	

CH 714 953 B1

Einfallswinkel [°]	Schicht-Reduktion [nm]	photopische Reflektivität [%]	x	y	$\Delta(xy)$	
45	30	5,48	0,329	0,326	0,008	sehr geringe Farbabweichungen unter Betrachtungswinkel nach Abrieb
60	30	9,95	0,330	0,332	0,003	

Beispiel 5

[0071]

Einfallswinkel [°]	Schicht-Reduktion [nm]	photopische Reflektivität [%]	x	y	$\Delta(xy)$	
0	0	0,51	0,308	0,334	0,023	0°, 100% Schicht (neu) OK
15	0	0,54	0,311	0,331	0,020	sehr geringe Farbabweichungen unter Betrachtungswinkel
30	0	0,70	0,314	0,326	0,018	sehr geringe Farbabweichungen unter Betrachtungswinkel
45	0	1,47	0,318	0,331	0,013	sehr geringe Farbabweichungen unter Betrachtungswinkel
60	0	4,95	0,318	0,328	0,013	sehr geringe Farbabweichungen unter Betrachtungswinkel
0	10	1,07	0,347	0,339	0,018	sehr geringe Farbabweichungen nach Abrieb
15	10	1,14	0,344	0,336	0,014	sehr geringe Farbabweichungen unter Betrachtungswinkel nach Abrieb
30	10	1,41	0,338	0,337	0,009	sehr geringe Farbabweichungen unter Betrachtungswinkel nach Abrieb
45	10	2,36	0,332	0,336	0,005	sehr geringe Farbabweichungen unter Betrachtungswinkel nach Abrieb
60	10	6,21	0,327	0,328	0,005	sehr geringe Farbabweichungen unter Betrachtungswinkel nach Abrieb
0	30	3,65	0,318	0,307	0,027	sehr geringe Farbabweichungen nach Abrieb
15	30	3,73	0,319	0,311	0,023	sehr geringe Farbabweichungen unter Betrachtungswinkel nach Abrieb
30	30	4,06	0,323	0,321	0,013	sehr geringe Farbabweichungen unter Betrachtungswinkel nach Abrieb

CH 714 953 B1

Einfallswinkel [°]	Schicht-Reduktion [nm]	photopische Reflektivität [%]	x	y	$\Delta(xy)$	
45	30	5,18	0,328	0,326	0,008	sehr geringe Farbabweichungen unter Betrachtungswinkel nach Abrieb
60	30	9,50	0,331	0,324	0,009	sehr geringe Farbabweichungen unter Betrachtungswinkel nach Abrieb

Beispiel 6

[0072]

Einfallswinkel [°]	Schicht-Reduktion [nm]	photopische Reflektivität [%]	x	y	$\Delta(xy)$	
0	0	0,48	0,329	0,329	0,003	0°, 100% Schicht (neu) OK
15	0	0,50	0,332	0,337	0,006	sehr geringe photopische Reflektivität; sehr geringe Farbabweichungen unter Betrachtungswinkel
30	0	0,67	0,328	0,334	0,004	sehr geringe Farbabweichungen unter Betrachtungswinkel
45	0	1,46	0,333	0,330	0,003	sehr geringe Farbabweichungen unter Betrachtungswinkel
60	0	5,06	0,337	0,328	0,006	sehr geringe Farbabweichungen unter Betrachtungswinkel
0	10	1,15	0,354	0,355	0,033	sehr geringe Farbabweichungen nach Abrieb
15	10	1,22	0,349	0,350	0,026	sehr geringe photopische Reflektivität; sehr geringe Farbabweichungen unter Betrachtungswinkel nach Abrieb
30	10	1,50	0,341	0,344	0,016	sehr geringe Farbabweichungen unter Betrachtungswinkel nach Abrieb
45	10	2,53	0,346	0,342	0,019	sehr geringe Farbabweichungen unter Betrachtungswinkel nach Abrieb
60	10	6,63	0,346	0,335	0,016	sehr geringe Farbabweichungen unter Betrachtungswinkel nach Abrieb
0	30	3,97	0,312	0,311	0,028	sehr geringe Farbabweichungen nach Abrieb
15	30	4,05	0,313	0,313	0,025	sehr geringe photopische Reflektivität; sehr

Einfallswinkel [°]	Schicht-Reduktion [nm]	photopische Reflektivität [%]	x	y	$\Delta(xy)$	
						geringe Farbabweichungen unter Betrachtungswinkel nach Abrieb
30	30	4,41	0,320	0,323	0,013	sehr geringe Farbabweichungen unter Betrachtungswinkel nach Abrieb
45	30	5,71	0,336	0,336	0,007	sehr geringe Farbabweichungen unter Betrachtungswinkel nach Abrieb
60	30	10,45	0,344	0,336	0,014	

[0073] . Die Beispiele 1 bis 5 sind Antireflex-Beschichtungen auf einem Saphir-, beziehungsweise Al₂O₃-Substrat. Bei Beispiel 6 handelt es sich um eine Beschichtung auf einem Borosilikatglas, das unter dem Handelsnamen Borofloat vertrieben wird.

[0074] Die Schichtdicken der einzelnen Lagen der Antireflex-Beschichtungen sind wie folgt (in der Reihenfolge jeweils von der untersten Lage zur obersten Lage):

Beispiel 1: 35 nm, 35 nm, 23 nm, 78 nm, 86 nm.

Beispiel 2: 6,7 nm, 129 nm, 183 nm, 34 nm, 101 nm.

Beispiel 3: 20,5 nm, 32 nm, 25,6 nm, 133 nm, 79 nm.

Beispiel 4: 15,4 nm, 34 nm, 25 nm, 144 nm, 83 nm.

Beispiel 5: 38 nm, 13,9 nm, 105 nm, 18 nm, 26 nm, 100 nm, 80 nm.

Beispiel 6: 142 nm, 38 nm, 32 nm, 29 nm, 104 nm, 79 nm.

[0075] Das transparente Substrat dieser Beispiele ist ein Substrat mit einem Brechungsindex im Bereich von 1,7 bis 1,8, beispielsweise ein Saphir-, beziehungsweise Aluminiumoxid-Substrat.

[0076] Die unterste Lage ist jeweils eine Lage mit niedrigem Brechungsindex. In den Beschichtungen wechseln sich Lagen mit niedrigem Brechungsindex mit Lagen mit hohem Brechungsindex jeweils ab. Vorzugsweise werden, auch ohne Beschränkung auf die vorstehenden Ausführungsbeispiele zwei sich abwechselnde Materialien mit unterschiedlichen Brechungsindizes verwendet, so dass der Brechungsindex von Lage zu Lage zwischen zwei Werten alterniert.

[0077] Die niedrigbrechenden Schichten weisen ohne Beschränkung auf die Ausführungsbeispiele gemäß einer Ausführungsform einen Brechwert bei einer Wellenlänge von 550 nm im Bereich von 1,3 bis 1,6, bevorzugt 1,45 bis 1,5 und die hochbrechenden Schichten einen Brechwert bei einer Wellenlänge von 550 nm im Bereich von 1,8 bis 2,3, bevorzugt 1,95 bis 2,1 auf.

[0078] Im Folgenden werden Merkmale der Schichtdicken erfindungsgemäßer Antireflex-Beschichtungen beschrieben. Es zeigt sich, dass sich erfindungsgemäße mehrlagige Antireflex-Beschichtungen 5 mit bestimmten Abfolgen von Schichtdicken realisieren lassen. Dazu wurden in den Beispielen der Fig. 5, Fig. 7 und Fig. 9 81 verschiedene erfindungsgemäße Antireflex-Beschichtungen auf einem Substrat mit einem Brechungsindex zwischen 1,7 und 1,8, speziell auf einem Saphirsubstrat betrachtet. Die Menge an Antireflex-Beschichtungen enthält sowohl Schichtsysteme mit fünf, als auch mit sieben Lagen.

[0079] Fig. 5 zeigt die Häufigkeitsverteilung der kombinierten Schichtdicken der beiden untersten Lagen, also der Lage mit niedrigem Brechungsindex, die auf dem Substrat aufgebracht ist, und die nachfolgende Lage mit hohem Brechungsindex. Bei den in Fig. 1 gezeigten Beispielen wären dies die Lagen 51 und 52. Auf der Abszisse sind die in Klassen unterteilten Schichtdicken des untersten Paares, auf der Ordinate deren Häufigkeit aufgetragen. Wie anhand von Fig. 5 ersichtlich, reichen die vorkommenden Schichtdicken von etwa 10 nm bis 360 nm. Dabei sind aber die Schichtdickenbereiche (a) und (b), die etwa von 80nm bis 130 nm (Bereich (a)) und von 240 nm bis 280 nm reichen (Bereich (b)), ausgenommen. Die Beispiele sind Antireflex-Beschichtungen auf Saphir-Substraten.

[0080] Fig. 6 zeigt eine entsprechende Verteilung für Antireflex-Beschichtungen auf einem Substrat mit niedrigem Brechungsindex zwischen 1,45 und 1,55, im Speziellen einem Borosilikatglas-Substrat. Das Substrat hat einen Brechungsindex von 1,47 bei 550 nm. Auch hier zeigt sich ein entsprechender ausgenommener Bereich „(a)“ der Schichtdicke für

das unterste Paar von Lagen, innerhalb dem sich keine Antireflex-Beschichtungen mit guten optischen Eigenschaften hinsichtlich einer Invarianz gegen einer Abrasion der obersten Schicht findet. Dieser Bereich reicht hier von 65 nm bis 120 nm.

[0081] Kombiniert ergibt sich für die Bereiche (a) und (a') ein ausgenommener Wellenlängenbereich von 80 nm bis 120 nm, der allenfalls wenig abhängig vom Brechungsindex des Substrats ist.

[0082] In Fig. 7 ist die Häufigkeitsverteilung des Abstands der drittobersten Grenzfläche zur Oberfläche, also des Abstands der Grenze zwischen der drittobersten und viertobersten Lage (bei dem Beispiel der Fig. 1 wäre dies die Grenzfläche zwischen den Lagen 52 und 53) für Beschichtungen auf Saphir dargestellt. Wie ersichtlich, kann der Abstand in einem weiten Bereich zwischen 70 nm und 500 nm liegen. Dabei sind aber Bereiche zwischen 95 nm und 126 nm (Bereich (c)) und zwischen 374 nm und 480 nm (Bereich (d)) ausgenommen.

[0083] Fig. 8 zeigt eine entsprechende Verteilung für erfindungsgemäße Antireflex-Beschichtungen auf Borosilikatglas. Auch hier zeigen sich zu den Bereichen (c) und (d) korrespondierende Bereiche (c'), (d'). Der Bereich (c') liegt zwischen 100 nm und 120 nm und damit ähnlich wie der Bereich (c). Demnach ist gemäß einer Ausführungsform der Erfindung der Schichtdickenbereich von 100 nm bis 120 nm für den Abstand der drittobersten Grenzfläche, im Wesentlichen unabhängig vom Brechungsindex des Substrats ausgenommen.

[0084] Der andere Bereich (d') ist gegenüber dem Bereich (d) zu niedrigeren Dicken verschoben. Der Faktor der Verschiebung kann, wenn ein Dickenintervall betrachtet wird, das etwas enger als der gesamte ausgesparte Bereich ist, sehr gut durch einen Faktor $(n/n(\text{Al}_2\text{O}_3))^2$ angenähert werden. Dabei bezeichnet n den Brechungsindex des verwendeten Substrats und $n(\text{Al}_2\text{O}_3)$ den Brechungsindex eines Saphirsubstrats, insbesondere $n(\text{Al}_2\text{O}_3)=1,76$. Damit ergibt sich ein ausgesparter Dickenbereich von $380 \text{ nm} \cdot (n/n(\text{Al}_2\text{O}_3))^2$ bis $470 \text{ nm} \cdot (n/n(\text{Al}_2\text{O}_3))^2$.

[0085] Fig. 9 zeigt noch ein weiteres typisches Kriterium erfindungsgemäßer Antireflex-Beschichtungen. Hier ist die Häufigkeitsverteilung der Differenz der Schichtdicken des obersten Paares von Lagen und des zweitobersten Paares von Lagen dargestellt, also mit anderen Worten die Verteilung des Terms [(oberste Lage + zweitoberste Lage) - (drittoberste Lage + viertoberste Lage)]. Die Differenz kann demnach in einem weiten Bereich zwischen -350 nm und +320 nm liegen, wobei Bereiche von -250 nm bis -150 nm (Bereich (e)), von -50 nm bis +10 nm (Bereich (f)) und von +230 nm bis +270 nm (Bereich (g)) ausgenommen sind.

[0086] Bei der in Fig. 10 gezeigten entsprechenden Verteilung der Differenz der Schichtdicken des obersten und zweitobersten Paares von Lagen zeigt sich ein fast deckungsgleicher ausgenommener Bereich (g'). Demgemäß ist in Weiterbildung der Erfindung vorgesehen, dass im Wesentlichen unabhängig vom Brechungsindex des Substrats bei der Differenz der Schichtdicken des obersten Paares und des zweitobersten Paares ein Bereich von +230 nm bis +270 nm ausgenommen ist.

Zwei Beispiele der Schichtdicken von Antireflex-Beschichtungen aus der Menge der Beschichtungen, von denen die Häufigkeitsverteilungen der Fig. 5, Fig. 7, Fig. 9 gewonnen wurden, sind (in der Reihenfolge jeweils von der untersten Lage zur obersten Lage):

Beispiel 7: 8,8 nm, 30 nm, 7,1 nm, 116 nm, 87 nm.

Beispiel 8: 13,5 nm, 12,6 nm, 13,5 nm, 30 nm, 25 nm, 153 nm, 92 nm.

[0087] In den Diagrammen der Fig. 6, Fig. 8 und Fig. 10 sind zwei weitere Beispiele mit folgenden Schichtdicken (ebenfalls in der Reihenfolge jeweils von der untersten Lage zur obersten Lage) gekennzeichnet:

Beispiel 9: 155 nm, 30 nm, 30 nm, 122 nm

Beispiel 10: 25 nm, 15 nm, 147 nm, 13,5 nm, 10 nm, 77 nm.

[0088] Die Lagen der beiden Beispiele in den Häufigkeitsverteilungen der Fig. 5, 7, 9 sind mit „(7)“, beziehungsweise „(8)“ und die Lagen der Beispiele in den Fig. 6, 8, 10 mit „(9)“, und „(10)“ als gestrichelte Linien gekennzeichnet.

[0089] Ohne Beschränkung auf die speziellen Ausführungsbeispiele sieht die Erfindung damit gemäß einem Aspekt der Erfindung ein transparentes Element 1 vor, umfassend ein transparentes Substrat 3 und auf diesem Substrat 1 eine mehrlagige Antireflex-Beschichtung 5, welche zumindest vier, insbesondere zumindest fünf Lagen umfasst, wobei sich Lagen mit hohem Brechungsindex 51, 53 mit Lagen 50, 52, 54 mit niedrigerem Brechungsindex abwechseln, und wobei die Lagen 51, 53 mit höherem Brechungsindex vorzugsweise eine größere Härte als die Lagen 50, 52, 54 mit niedrigerem Brechungsindex aufweisen, und wobei die oberste Lage 60 der mehrlagigen Antireflex-Beschichtung 5 eine Lage mit niedrigerem Brechungsindex ist, und wobei für die Schichtdicken der Lagen 51 - 54 zumindest eines der folgenden Merkmale gilt:

- (i) das unterste Paar von Lagen weist eine Schichtdicke im Bereich von 10 nm bis 360 nm auf, wobei Schichtdicken im Bereich von 80nm bis 120 nm ausgenommen sind,

- (ii) der Abstand der drittobersten Grenzfläche zur Oberfläche beträgt zwischen 70 nm und 500 nm, wobei zumindest einer der Bereiche zwischen 100 nm und 120 nm und zwischen $380 \text{ nm} \cdot (n/n(\text{Al}_2\text{O}_3))^2$ bis $470 \text{ nm} \cdot (n/n(\text{Al}_2\text{O}_3))^2$ ausgenommen ist, wobei n der Brechungsindex des Substrats und $n(\text{Al}_2\text{O}_3)$ einen Brechungsindex von 1,76 bezeichnen,
- (iii) die Differenz der Schichtdicken des obersten Paares von Lagen und des zweitobersten Paares von Lagen liegt in einem Bereich zwischen -350 nm und +320 nm, wobei ein Bereich von +230 nm bis +270 nm ausgenommen ist. Im Falle eines Substrats mit einem Brechungsindex im Bereich von 1,7 bis 1,8, insbesondere eines Saphirsubstrats können in Weiterbildung bei der Differenz der Schichtdicken des obersten Paares von Lagen und des zweitobersten Paares von Lagen zusätzlich Bereiche von -250 nm bis -150 nm und von -50 nm bis +10 nm ausgenommen sein, entsprechend den Bereichen (e) und (f) in Fig. 9.

[0090] Die Merkmale der Schichtdickenbereiche gelten insbesondere bei einer Wellenlänge von 550 nm im Bereich von 1,3 bis 1,6, bevorzugt 1,45 bis 1,5 für die Lagen mit niedrigerem Brechungsindex und einem Brechungsindex bei einer Wellenlänge von 550 nm im Bereich von 1,8 bis 2,3, bevorzugt 1,95 bis 2,1 für die Lagen mit höherem Brechungsindex.

[0091] Anhand der folgenden Figuren werden weitere Merkmale erfindungsgemäßer Antireflex-Beschichtungen anhand der beiden Datensätze von Schichtdicken für Antireflex-Beschichtungen auf Saphir und Borosilikatglas beschrieben.

[0092] Die Fig. 11 bis Fig. 14 zeigen vier Diagramme, in denen die Schichtdicken der obersten Lagen für vier verschiedene Typen von erfindungsgemäßen Antireflex-Beschichtungen nebeneinander aufgetragen sind. Auf der Ordinate ist die Schichtdicke in Nanometern aufgetragen. Die Abzisse ist ein fortlaufender Index, welcher die verschiedenen Schichtsysteme durchnummeriert. Fig. 11 zeigt die Schichtdicke der obersten Lage für verschiedene fünfplagige Antireflex-Beschichtungen auf Saphir. In Fig. 12 sind die Schichtdicken für erfindungsgemäße Antireflex-Beschichtungen auf Saphir mit sieben Lagen gezeigt.

[0093] Fig. 13 zeigt die Schichtdicken der obersten Lage von vierlagigen Antireflex-Beschichtungen und Fig. 14 die Schichtdicken der obersten Lage für sechslagige Beschichtungen, beide auf Borosilikatglas als Substrat. Anhand der Fig. 11 bis 14 ist ersichtlich, dass die Schichtdicke der obersten Lage in einem engen Bereich zwischen 60 nm und 130 nm liegt, sieht man von einem einzelnen Beispiel bei den vierlagigen Antireflex-Beschichtungen auf Borosilikatglas mit deutlich geringerer Schichtdicke, Fig. 13, ab. Der Dickenbereich ist offensichtlich im Wesentlichen unabhängig von der Art des Substrats oder der Anzahl der Lagen der Antireflex-Beschichtung. Gemäß einer Weiterbildung der Erfindung ist daher vorgesehen, dass die oberste Lage der Antireflex-Beschichtung die oben genannte Schichtdicke im Bereich von 60 nm bis 130 nm aufweist.

[0094] Die Fig. 15 bis Fig. 18 zeigen Diagramme, in denen die Schichtdicken der untersten hochbrechenden Lage für verschiedene Typen von erfindungsgemäßen Antireflex-Beschichtungen aufgetragen sind. Die Darstellung der Werte entspricht den Fig. 11 bis 14. Die unterste hochbrechende Lage kann die unterste oder auch die zweitunterste Lage der Antireflex-Beschichtung 5 sein. Vorzugsweise ist bei einem Substrat 3 mit hohem Brechungsindex die unterste Lage eine Lage mit niedrigerem Brechungsindex und folglich die zweitunterste Lage die unterste Lage mit hohem Brechungsindex. Bei einem Substrat mit niedrigem Brechungsindex, wie etwa einem Borosilikatglas-Substrat ist die unterste Lage der Antireflex-Beschichtung vorzugsweise auch die unterste Lage mit hohem Brechungsindex. Fig. 15 zeigt die Schichtdicken der untersten Lage mit hohem Brechungsindex verschiedener Ausführungsbeispiele von fünfplagigen Antireflex-Beschichtungen 5 auf einem Saphir-Substrat. Fig. 16 zeigt entsprechende Beispiele für siebenplagige Antireflex-Beschichtungen 5 auf einem Saphir-Substrat. Die Fig. 17 und 18 zeigen die Schichtdicken der untersten hochbrechenden Lage für vierlagige (Fig. 17) und sechslagige (Fig. 18) Antireflex-Beschichtungen auf Borosilikatglas als Substrat. Ähnlich wie bei dem Histogramm der Fig. 5 zeigen sich Bereiche, die günstig für die erfindungsgemäße Invarianz gegenüber Abrasion sind und Bereiche, in denen sich keine Beispiele für erfindungsgemäße Beschichtungen finden. Im Speziellen sind ein Schichtdickenbereich zwischen 50 nm und 100 nm und ein Schichtdickenbereich zwischen 180 nm und 220 nm ausgenommen. Demgemäß sieht die Erfindung in Weiterbildung vor, dass die unterste Lage mit hohem Brechungsindex eine Schichtdicke zwischen 4 nm und 350 nm aufweist, wobei eine Schichtdicke im Bereich zwischen 180 nm und 220 nm und/oder im Bereich zwischen 180 nm und 220 nm ausgenommen ist.

[0095] Die vorstehend anhand der Beispiele der Fig. 5 bis 18 erläuterten Ausführungsformen erfindungsgemäßer Antireflex-Beschichtungen 5 können für das Verfahren zur Herstellung eines transparenten Elements 1, beziehungsweise beim Design eines geeigneten Schichtsystems besonders vorteilhaft sein, da diese Ausführungsformen als Nebenbedingungen beim Erstellen des Designs die Möglichkeiten zur Auswahl der Schichtdicken herangezogen werden können. Dies reduziert die Anzahl der Möglichkeiten und damit auch den Berechnungsaufwand erheblich. Demgemäß ist in Weiterbildung des Verfahrens vorgesehen, dass mindestens eine der Antireflex-Beschichtungen 5, 6, für welche zumindest einer der Parameter Farbe der Restreflexion unter 0° Lichteinfallswinkel und photopische Reflektivität unter 0° Einfallswinkel berechnet wird, so ausgewählt wird, dass wenigstens eine der folgenden Bedingungen erfüllt ist:

- das unterste Paar von Lagen weist eine Schichtdicke im Bereich von 10 nm bis 360 nm auf, wobei Schichtdicken im Bereich von 80 nm bis 120 nm und von 225 nm bis 280 nm ausgenommen sind,

- der Abstand der drittobersten Grenzfläche zur Oberfläche beträgt zwischen 70 nm und 500 nm, wobei zumindest einer der Bereiche zwischen 100 nm und 120 nm und zwischen $380 \text{ nm} \cdot (n/n(\text{Al}_2\text{O}_3))^2$ bis $470 \text{ nm} \cdot (n/n(\text{Al}_2\text{O}_3))^2$ ausgenommen ist, wobei n der Brechungsindex des Substrats und $n(\text{Al}_2\text{O}_3)$ einen Brechungsindex von 1,76 bezeichnen,
- die Differenz der Schichtdicken des obersten Paares von Lagen und des zweitobersten Paares von Lagen liegt in einem Bereich zwischen -350 nm und +320 nm, wobei ein Bereich von +230 nm bis +270 nm ausgenommen ist
- die oberste Lage der Antireflex-Beschichtung weist eine Schichtdicke im Bereich von 60 nm bis 130 nm auf,
- die unterste Lage mit hohem Brechungsindex weist eine Schichtdicke zwischen 4 nm und 350 nm auf, wobei eine Schichtdicke im Bereich zwischen 180 nm und 220 nm und im Bereich zwischen 180 nm und 220 nm ausgenommen ist.

[0096] Die Erfindung kann überall dort genutzt werden, wo spezielle Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften von Antireflex-Beschichtungen gestellt werden. Neben der Applikation als Uhrenlinsen oder Lupen für Uhrenlinsen lässt sich die Erfindung auch im Bereich Architektur, Consumerelektronik und für optische Komponenten einsetzen. Im Bereich der Consumer-Elektronik eignet sich die Erfindung besonders für Deckgläser von Smartphones, Notebooks, LCD Displays.

[0097] Die Erfindung ist nicht auf die Ausführungsbeispiele beschränkt, sondern kann im Rahmen des Gegenstands der Ansprüche vielfältig variiert werden. Dabei können verschiedene Ausführungsbeispiele auch miteinander kombiniert werden. So kann auf einem scheibenförmigen Substrat beidseitig eine Antireflex-Beschichtung aufgebracht werden. Die Antireflex-Beschichtungen können dann auch unterschiedliche Farben der Restreflexion aufweisen, etwa gemäß den Beispielen der Fig. 3 und Fig. 4.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung eines transparenten Elements (1) mit den Schritten:
 - es wird für mindestens ein Paar von Antireflex-Beschichtungen (5, 6), welche zumindest vier Lagen umfassen, wobei sich Lagen (51, 53) mit hohem Brechungsindex mit Lagen (50, 52, 54) mit niedrigerem Brechungsindex abwechseln, wobei die Lagen (51, 53) mit höherem Brechungsindex eine größere Härte als die Lagen (50, 52, 54) mit niedrigerem Brechungsindex aufweisen, und wobei eine oberste Lage (60) der mehrlagigen Antireflex-Beschichtung (5) eine Lage mit niedrigerem Brechungsindex ist, unter Berücksichtigung des Brechungsindex eines Substrats (3) zumindest einer der Parameter
 - Farbe der Restreflexion unter 0° Lichteinfallswinkel und
 - photopische Reflektivität unter 0° Lichteinfallswinkel
 berechnet, wobei sich die beiden Antireflex-Beschichtungen nur hinsichtlich der Schichtdicke der obersten Lage (60) unterscheiden, so dass die Schichtdicke bei einer Antireflex-Beschichtung (6) um mindestens 10% oder um 10 Nanometer gegenüber der Schichtdicke der anderen Antireflex-Beschichtung (5) reduziert ist, und wobei überprüft wird, ob für beide Antireflex-Beschichtungen (5, 6) zumindest eine der Bedingungen erfüllt ist:
 - die Farbe der Restreflexion unter 0° Lichteinfallswinkel bei verminderter Schichtdicke unterscheidet sich von der Farbe der Restreflexion unter 0° Lichteinfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke der obersten Lage (60) im CIE xyz-Farbsystem um nicht mehr als $\Delta x=0.05$, $\Delta y=0.05$,
 - die photopische Reflektivität unter 0° Lichteinfallswinkel bei verminderter Schichtdicke der obersten Lage (60) unterscheidet sich von der photopischen Reflektivität unter 0° Lichteinfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke um nicht mehr als $\Delta R_{ph}=1.5\%$, und wobei für mindestens ein weiteres Paar von Anti-Reflexbeschichtungen die Parameter der Farbe der Restreflexion und der photopischen Reflektivität berechnet und erneut zumindest eine der Bedingungen überprüft wird, wenn für das erste Paar von Anti-Reflexbeschichtungen die Bedingung nicht erfüllt wird, und wobei eine Anti-Reflexbeschichtung mit dickerer oberster Lage (60) aus einem Paar von Antireflex-Beschichtungen ausgewählt wird, welche zumindest eine der Bedingungen erfüllt, und wobei diese Antireflex-Beschichtung (5) auf dem Substrat (3) abgeschieden wird.
2. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass unter einer Vielzahl von Paaren von Anti-Reflexbeschichtungen eine Überprüfung hinsichtlich der Bedingungen des Unterschieds der Farbe der Restreflexion unter 0° Lichteinfallswinkel oder des Unterschieds der photopischen Reflektivität unter 0° Lichteinfallswinkel erfolgt und unter den untersuchten Paaren der Anti-Reflexbeschichtungen für die Abscheidung ausgewählt wird, bei welchem der kleinsten Unterschied der Farbe der Restreflexion unter 0° Lichteinfallswinkel und/oder der kleinste Unterschied der photopischen Reflektivität unter 0° Lichteinfallswinkel vorliegt und dann diese Anti-Reflexbeschichtung abgeschieden wird.
3. Verfahren gemäß Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Antireflex-Beschichtung (5) so ausgewählt wird, dass
 - sich eine Farbe der Restreflexion der beiden Antireflex-Beschichtungen (5, 6) eines Paares im CIE xyz-Farbsystem unter 30° Lichteinfallswinkel um nicht mehr als $\Delta x=0,05$, $\Delta y=0,05$ unterscheidet, oder
 - sich eine Farbe der Restreflexion der beiden Antireflex-Beschichtungen (5, 6) eines Paares im CIE xyz-Farbsystem unter 45° Lichteinfallswinkel um nicht mehr als $\Delta x=0,05$, $\Delta y=0,05$ unterscheidet.
4. Verfahren gemäß einem Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine der Antireflex-Beschichtungen (5, 6), für welche zumindest einer der Parameter Farbe der Restreflexion unter 0° Lichteinfallswinkel und

photopische Reflektivität unter 0° Lichteinfallswinkel berechnet wird, so ausgewählt wird, dass wenigstens eine der folgenden Bedingungen erfüllt ist:

- das unterste Paar von Lagen als Ganzes weist eine Schichtdicke im Bereich von 10 nm bis 360 nm auf, wobei Schichtdicken im Bereich von 80 nm bis 120 nm und von 225 nm bis 280 nm ausgenommen sind,
- der Abstand der drittobersten Grenzfläche zur Oberfläche beträgt zwischen 70 nm und 500 nm, wobei zumindest einer der Bereiche zwischen 100 nm und 120 nm und zwischen $380 \text{ nm} \cdot (n/n(\text{Al}_2\text{O}_3))^2$ bis $470 \text{ nm} \cdot (n/n(\text{Al}_2\text{O}_3))^2$ ausgenommen ist, wobei n der Brechungsindex des Substrats und $n(\text{Al}_2\text{O}_3)$ einen Brechungsindex von 1,76 bezeichnen,
- die Differenz der Schichtdicken des obersten Paares von Lagen als Ganzes und des zweitobersten Paares von Lagen als Ganzes liegt in einem Bereich zwischen -350 nm und +320 nm, wobei ein Bereich von +230 nm bis +270 nm ausgenommen ist
- die oberste Lage der Antireflex-Beschichtung weist eine Schichtdicke im Bereich von 60 nm bis 130 nm auf,
- die unterste Lage mit hohem Brechungsindex weist eine Schichtdicke zwischen 4 nm und 350 nm auf, wobei eine Schichtdicke im Bereich zwischen 180 nm und 220 nm ausgenommen ist.

5. Transparentes Element (1), hergestellt nach einem Verfahren gemäss einem der Ansprüche 1 bis 4, umfassend ein transparentes Substrat (3) und auf diesem Substrat (3) eine mehrlagige Antireflex-Beschichtung (5), welche zumindest vier Lagen umfasst, wobei sich Lagen (51, 53) mit hohem Brechungsindex mit Lagen (50, 52, 54) mit niedrigerem Brechungsindex abwechseln, und wobei die Lagen (51, 53) mit höherem Brechungsindex eine größere Härte als die Lagen (50, 52, 54) mit niedrigerem Brechungsindex aufweisen, und wobei eine oberste Lage (60) der mehrlagigen Antireflex-Beschichtung (5) eine Lage mit niedrigerem Brechungsindex ist, und wobei die Lagen (51 - 54) bei gegebenen Brechungsindizes hinsichtlich ihrer Dicke so ausgewählt sind, dass bei einer Reduktion der Schichtdicke der obersten Lage (60) um 10% oder um 10 Nanometer, je nachdem welcher dieser beiden Fälle die geringere verbleibende Schichtdicke ergibt, zumindest eines der folgenden Merkmale gilt:
 - eine Farbe der Restreflexion der Antireflex-Beschichtung (5) unter 0° Lichteinfallswinkel bei verminderter Schichtdicke der obersten Lage (60) unterscheidet sich von einer Farbe unter 0° Lichteinfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke der obersten Lage (60) im CIE xyz-Farbsystem um nicht mehr als $\Delta x=0.05$, $\Delta y=0.05$, bevorzugt nicht mehr als $\Delta x=0.03$, $\Delta y=0.03$, besonders bevorzugt nicht mehr als $\Delta x=0.02$, $\Delta y=0.02$,
 - eine photopische Reflektivität der Antireflex-Beschichtung (5) unter 0° Lichteinfallswinkel bei verminderter Schichtdicke der obersten Lage (60) unterscheidet sich von einer photopischen Reflektivität unter 0° Lichteinfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke der obersten Lage (60) um nicht mehr als $\Delta R_{ph}=1.5\%$.
6. Transparentes Element (1) gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Lagen (51 - 54) bei gegebenen Brechungsindizes hinsichtlich ihrer Dicke so ausgewählt sind, dass die Farbe der Restreflexion der Antireflex-Beschichtung (5) unter 30° Lichteinfallswinkel sich bei um 10% verminderter Schichtdicke der obersten Lage (60) von der Farbe der Restreflexion unter 30° Lichteinfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke der obersten Lage (60) im CIE xyz-Farbsystem um nicht mehr als $\Delta x=0,05$, $\Delta y=0,05$ unterscheidet.
7. Transparentes Element (1) gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Lagen (51 - 54) bei gegebenen Brechungsindizes hinsichtlich ihrer Dicke so ausgewählt sind, dass die Farbe der Restreflexion der Antireflex-Beschichtung (5) unter 45° Lichteinfallswinkel sich bei um 10% verminderter Schichtdicke der obersten Lage (60) von der Farbe unter 45° Lichteinfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke der obersten Lage (60) im CIE xyz-Farbsystem um nicht mehr als $\Delta x=0,05$, $\Delta y=0,05$ unterscheidet.
8. Transparentes Element (1) gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Lagen (51 - 54) bei gegebenen Brechungsindizes hinsichtlich ihrer Dicke so ausgewählt sind, dass bei einer Reduktion der Schichtdicke der obersten Lage (60) derart, dass die Schichtdicke nach der Reduktion noch das 0,9-Fache der ursprünglichen Schichtdicke, beträgt, die photopische Reflektivität der Antireflex-Beschichtung (5) unter 0° Lichteinfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke um nicht mehr als $\Delta R_{ph}=1\%$, besonders bevorzugt um nicht mehr als $\Delta R_{ph}=0.5\%$, ganz besonders bevorzugt um nicht mehr als $\Delta R_{ph}=0.25\%$ abweicht.
9. Transparentes Element (1) gemäß Anspruch 8, gekennzeichnet durch zumindest eines der folgenden Merkmale:
 - die Farbe der Restreflexion der Antireflex-Beschichtung (5) unter 0° Lichteinfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke unterscheidet sich von der Farbe der Restreflexion unter 0° Lichteinfallswinkel im CIE xyz-Farbsystem um nicht mehr als $\Delta x=0.05$, $\Delta y=0.0$ bei Reduktion der Schichtdicke der obersten Lage (60) um 20%, vorzugsweise 30%, besonders bevorzugt 40%,
 - die photopische Reflektivität der Antireflex-Beschichtung (5) unter 0° Lichteinfallswinkel bei um 20%, vorzugsweise um 30%, besonders bevorzugt um 40% verminderter Schichtdicke der obersten Lage (60) unterscheidet sich von der photopischen Reflektivität unter 0° Lichteinfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke um nicht mehr als $\Delta R_{ph}=1.5\%$,
 - die Farbe der Restreflexion der Antireflex-Beschichtung (5) unter 30° Lichteinfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke der obersten Lage (60) unterscheidet sich von der Farbe der Restreflexion unter 0° Lichteinfallswinkel im CIE xyz-Farbsystem um nicht mehr als $\Delta x=0.02$, $\Delta y=0.02$,
 - die Farbe der Restreflexion der Antireflex-Beschichtung (5) unter 45° Lichteinfallswinkel unterscheidet sich von der Farbe der Restreflexion unter 0° Lichteinfallswinkel um nicht mehr als $\Delta x=0.05$, $\Delta y=0.05$,

- die photopische Reflektivität der Antireflex-Beschichtung (5) unter 0° Lichteinfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke der obersten Lage (60) ist kleiner als 1,5%,
 - ein Maximum der Reflektivität der Antireflex-Beschichtung (5) im Wellenlängenbereich zwischen 450 nm und 700 nm, ist unter 0° Lichteinfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke der obersten Lage (60) kleiner als 1,5%,
 - ein Absolutbetrag der Differenz der photopischen Reflektivität der Antireflex-Beschichtung (5) unter 30° Lichteinfallswinkel zur photopischen Reflektivität unter 0° Lichteinfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke der obersten Lage (60) ist kleiner als 0,5%, bevorzugt kleiner als 0.3% besonders bevorzugt kleiner als 0.1%,
 - ein Absolutbetrag der Differenz der photopischen Reflektivität der Antireflex-Beschichtung (5) unter 45° Lichteinfallswinkel zur photopischen Reflektivität unter 0° Lichteinfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke der obersten Lage (60) ist absolut kleiner als 0,5%, bevorzugt kleiner als 0.3% besonders bevorzugt kleiner als 0.1%,
 - eine durchschnittliche Reflektivität der Antireflex-Beschichtung (5), gemittelt im Wellenlängenbereich zwischen 450 nm und 700 nm unter 0° Lichteinfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke der obersten Lage (60) ist kleiner als 1,5%,
 - ein Absolutbetrag der Differenz der durchschnittlichen Reflektivitäten der Antireflex-Beschichtung (5) unter 30° Lichteinfallswinkel und unter 0° Lichteinfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke der obersten Lage (60), gemittelt im Wellenlängenbereich zwischen 450 nm und 700 nm, beträgt absolut weniger als 0,5%, bevorzugt weniger als 0.3% besonders bevorzugt weniger als 0.1%,
 - ein Absolutbetrag der Differenz der durchschnittlichen Reflektivitäten der Antireflex-Beschichtung (5) unter 45° Lichteinfallswinkel und unter 0° Lichteinfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke der obersten Lage (60), gemittelt im Wellenlängenbereich zwischen 450 nm und 700 nm, beträgt weniger als 0,5%, bevorzugt weniger als 0.3% besonders bevorzugt weniger als 0.1%,
 - ein Absolutbetrag der Differenz der Maxima der Reflektivitäten der Antireflex-Beschichtung (5) im Wellenlängenbereich von 450 nm bis 700nm unter 30° Lichteinfallswinkel und unter 0° Lichteinfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke der obersten Lage (60) beträgt weniger als 0,5%, bevorzugt weniger als 0.3% besonders bevorzugt weniger als 0.1%,
 - eine Differenz der absoluten Reflektivitäten der Antireflex-Beschichtung (5) unter 45° Lichteinfallswinkel und unter 0° Lichteinfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke der obersten Lage (60) beträgt absolut weniger als 0,5%, bevorzugt weniger als 0.3% besonders bevorzugt weniger als 0.1%.
10. Transparentes Element (1) gemäß dem Anspruch 9, gekennzeichnet durch zumindest eines der Merkmale:
- die photopische Reflektivität der Antireflex-Beschichtung (5) unter 0° Lichteinfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke der obersten Lage (60) ist kleiner als 1%, vorzugsweise kleiner als 0,8%,
 - der Absolutbetrag der Differenz der durchschnittlichen Reflektivität der Antireflex-Beschichtung (5) im Wellenlängenbereich zwischen 450 nm und 700 nm unter 30° Lichteinfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke der obersten Lage (60) zur durchschnittlichen Reflektivität im Wellenlängenbereich zwischen 450 nm und 700 nm unter 0° Lichteinfallswinkel ist kleiner als 0,1%,
 - die Differenz der photopischen Reflektivität der Antireflex-Beschichtung (5) oder der durchschnittlichen Reflektivität unter 45° Lichteinfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke der obersten Lage (60) zur photopischen Reflektivität unter 0° Lichteinfallswinkel ist absolut kleiner als 0,2%,
 - die durchschnittliche Reflektivität der Antireflex-Beschichtung (5), gemittelt im Bereich zwischen 450 nm und 700 nm unter 0° Lichteinfallswinkel bei unverminderter Schichtdicke der obersten Lage (60) ist kleiner als 1,0%.
11. Transparentes Element (1) gemäß einem der Ansprüche 5 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass das Substrat (3) ein Saphirsubstrat ist.
12. Transparentes Element (1) gemäß einem der Ansprüche 5 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass das Substrat (3) einen Brechungsindex über 1,65 aufweist und die Antireflex-Beschichtung (5) eine Folge von mindestens fünf einander abwechselnden Lagen (50 - 54) mit niedrigerem und höherem Brechungsindex aufweist, wobei die unterste Lage (50) eine Lage mit niedrigerem Brechungsindex ist.
13. Transparentes Element gemäß dem Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass für die Schichtdicken d1, d2, d3, d4, d5 der Lagen (50, 51, 52, 53, 54) der Antireflex-Beschichtung (5) gemäß einem ersten Fall gilt:
- die Dicke d1 der ersten Lage auf dem Substrat (3), also der untersten Lage (50) beträgt 5 nm bis 60 nm,
 - die Dicke d2 der zweiten Lage (51) beträgt 5 nm - 50 nm,
 - die Dicke d3 der dritten Lage (52): 10 nm bis 200 nm,
 - die Dicke d4 der vierten Lage (53) beträgt 100 nm bis 200 nm,
 - die Dicke d5 der fünften, obersten Lage (54) beträgt 70 nm bis 120 nm,
- oder gemäß einem zweiten Fall gilt:
- die Dicke d1 der ersten Lage auf dem Substrat (3), also der untersten Lage (50) beträgt 5 nm bis 60 nm,
 - die Dicke d2 der zweiten Lage (51) beträgt 30 nm bis 200 nm,
 - die Dicke d3 der dritten Lage (52): 10 nm bis 200 nm,
 - die Dicke d4 der vierten Lage (53) beträgt 150 nm bis 300 nm,
 - die Dicke d5 der fünften, obersten Lage (54) beträgt 70 nm bis 120 nm,
- wobei in beiden Fällen für die Schichtdicken weiterhin gilt:

CH 714 953 B1

$D = 85\text{nm} + 1.7 \cdot d_1 + 1.1 \cdot d_2 - 0.9 \cdot d_3 + 0.0138 \cdot (d_3 - 60\text{nm})^2$, wobei D den Wert der Schichtdicke d_4 der vierten Schicht (53) mit einer Abweichung von maximal $\pm 15\%$, vorzugsweise maximal $\pm 10\%$, besonders bevorzugt maximal $\pm 5\%$ angibt.

14. Transparentes Element (1) gemäß einem der Ansprüche 5 bis 13, gekennzeichnet, durch Lagen (51, 53) mit hohem Brechungsindex aus zumindest einem der Materialien Siliziumnitrid Si_3N_4 , Aluminiumoxid Al_2O_3 , Aluminiumnitrid AlN , oder Aluminiumsiliziumnitrid $\text{Al}_w\text{Si}_x\text{N}_y\text{O}_z$.
15. Transparentes Element (1) gemäß einem der Ansprüche 5 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass die Antireflex-Beschichtung (5) höchstens zwölf, bevorzugt höchstens zehn Lagen aufweist.
16. Transparentes Element (1) gemäß einem der Ansprüche 1 bis 15, wobei bei einer Wellenlänge von 550 nm die Lagen mit niedrigerem Brechungsindex einen Brechungsindex im Bereich von 1,3 bis 1,6 und die Lagen mit hohem Brechungsindex einen Brechungsindex im Bereich von 1,8 bis 2,3 aufweisen, dadurch gekennzeichnet, dass für die Schichtdicken der Lagen (51 - 54) zumindest eines der folgenden Merkmale gilt:
 - (i) das unterste Paar von Lagen weist als Ganzes eine Schichtdicke im Bereich von 10 nm bis 360 nm auf, wobei Schichtdicken im Bereich von 80 nm bis 120 nm und von 225 nm bis 280 nm ausgenommen sind,
 - (ii) der Abstand der drittobersten Grenzfläche zur Oberfläche beträgt zwischen 70 nm und 500 nm, wobei zumindest einer der Bereiche zwischen 100 nm und 120 nm und zwischen $380 \text{ nm} \cdot (n/n(\text{Al}_2\text{O}_3))^2$ bis $470 \text{ nm} \cdot (n/n(\text{Al}_2\text{O}_3))^2$ ausgenommen ist, wobei n der Brechungsindex des Substrats und $n(\text{Al}_2\text{O}_3)$ einen Brechungsindex von 1,76 bezeichnen,
 - (iii) die Differenz der Schichtdicken des obersten Paares von Lagen als Ganzes und des zweitobersten Paares von Lagen als Ganzes liegt in einem Bereich zwischen -350 nm und +320 nm, wobei ein Bereich von +230 nm bis +270 nm ausgenommen ist.
17. Transparentes Element (1) gemäß einem der Ansprüche 5 bis 16, dadurch gekennzeichnet, dass die oberste Lage (60) der Antireflex-Beschichtung eine Schichtdicke im Bereich von 60 nm bis 130 nm aufweist.
18. Transparentes Element (1) gemäß einem der Ansprüche 5 bis 17, dadurch gekennzeichnet, dass die unterste Lage mit hohem Brechungsindex eine Schichtdicke zwischen 4 nm und 350 nm aufweist, wobei eine Schichtdicke im Bereich zwischen 180 nm und 220 nm ausgenommen ist.
19. Transparentes Element (1) gemäß einem der Ansprüche 5 bis 18, ausgebildet als Uhrenglas oder Lupe eines Uhrenglases.

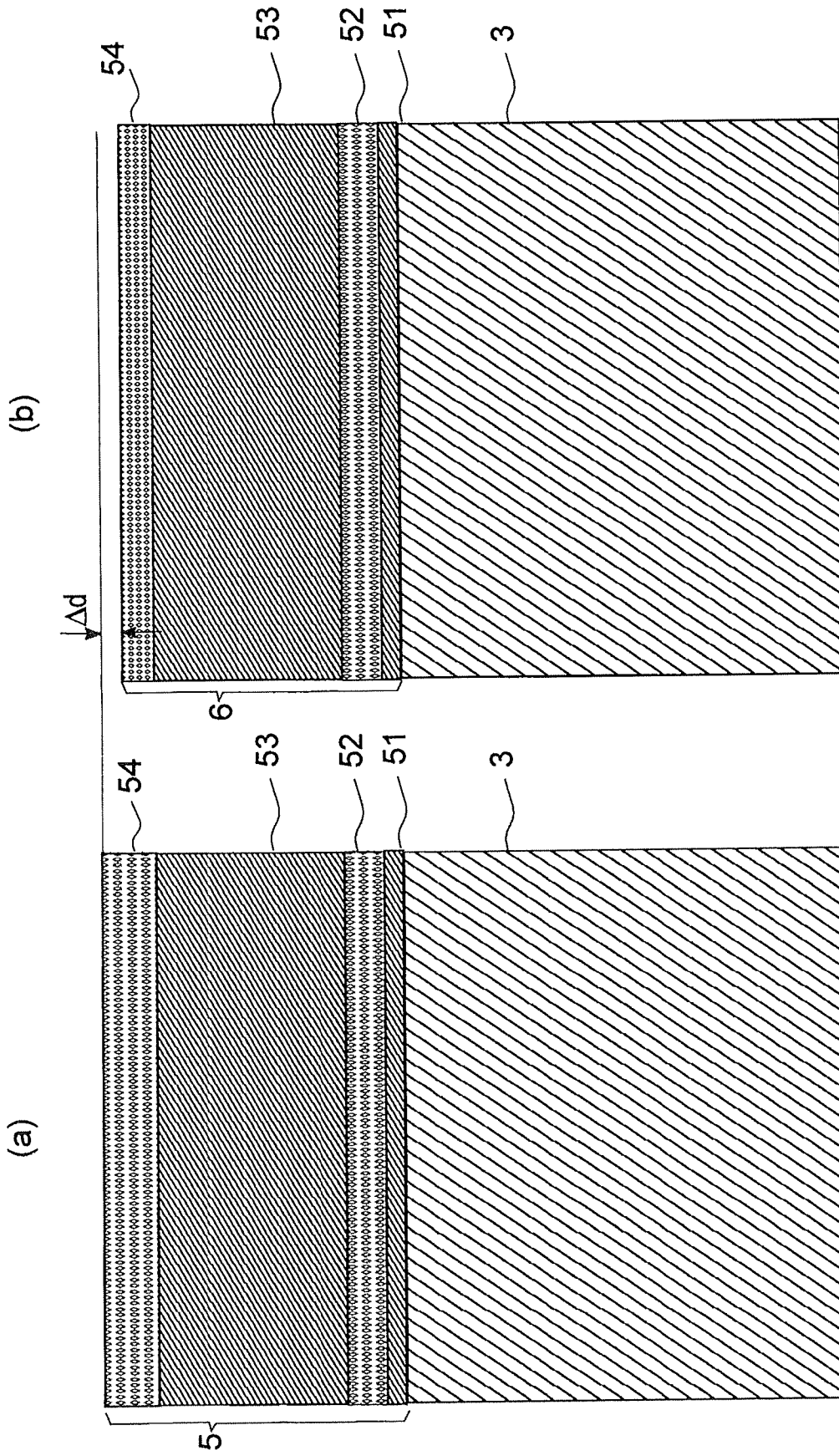


Fig. 1

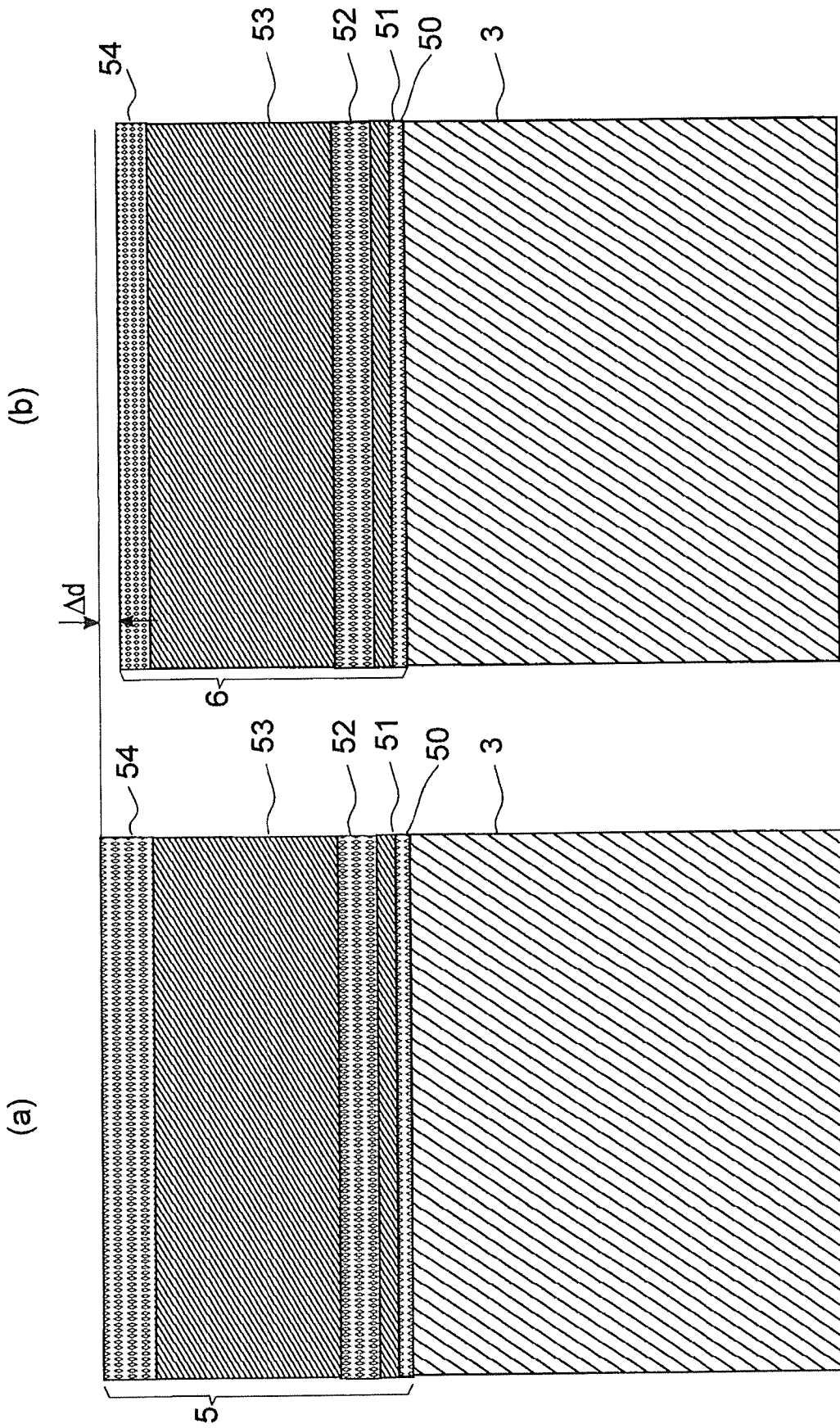


Fig. 2

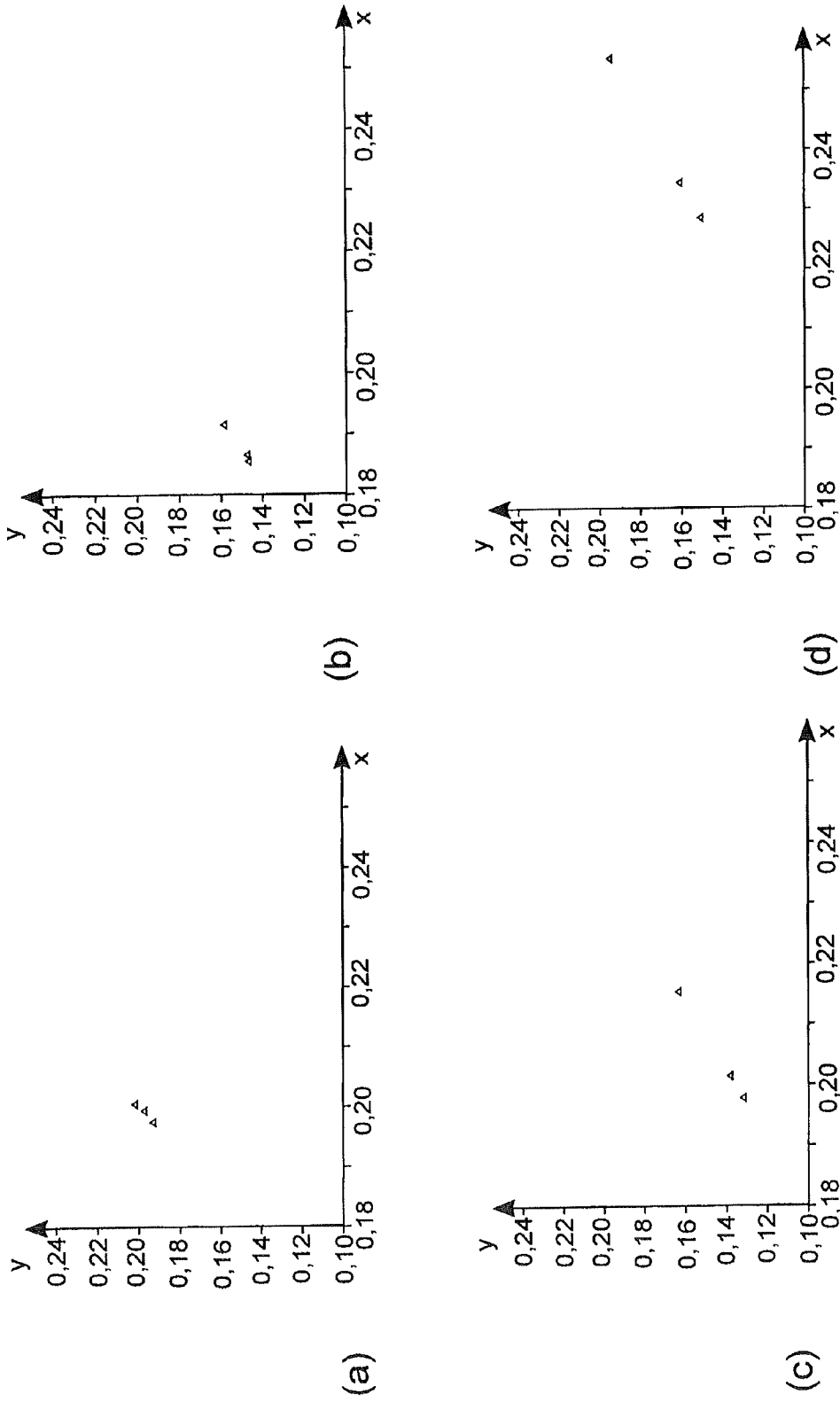
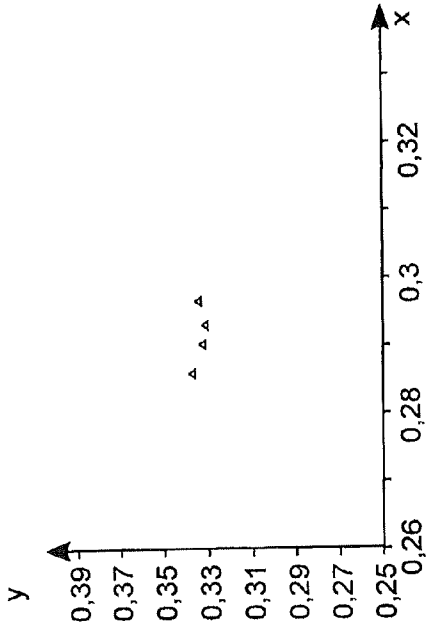
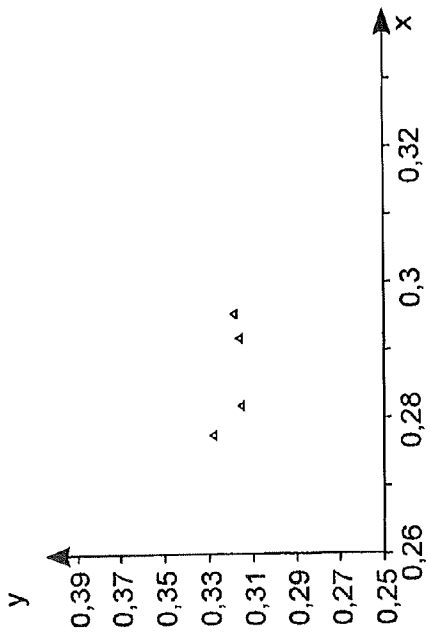


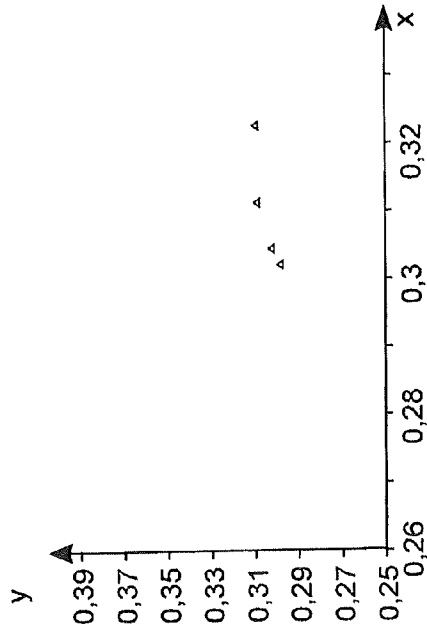
Fig. 3



(b)



(a)



(c)

Fig. 4

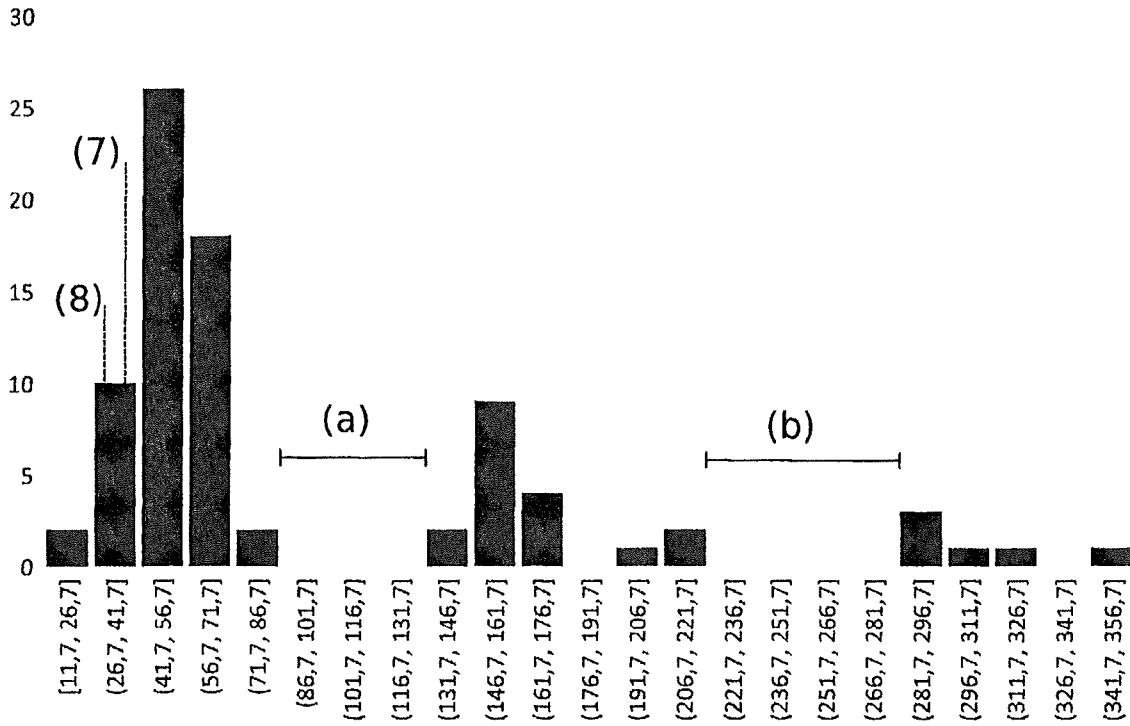


Fig. 5

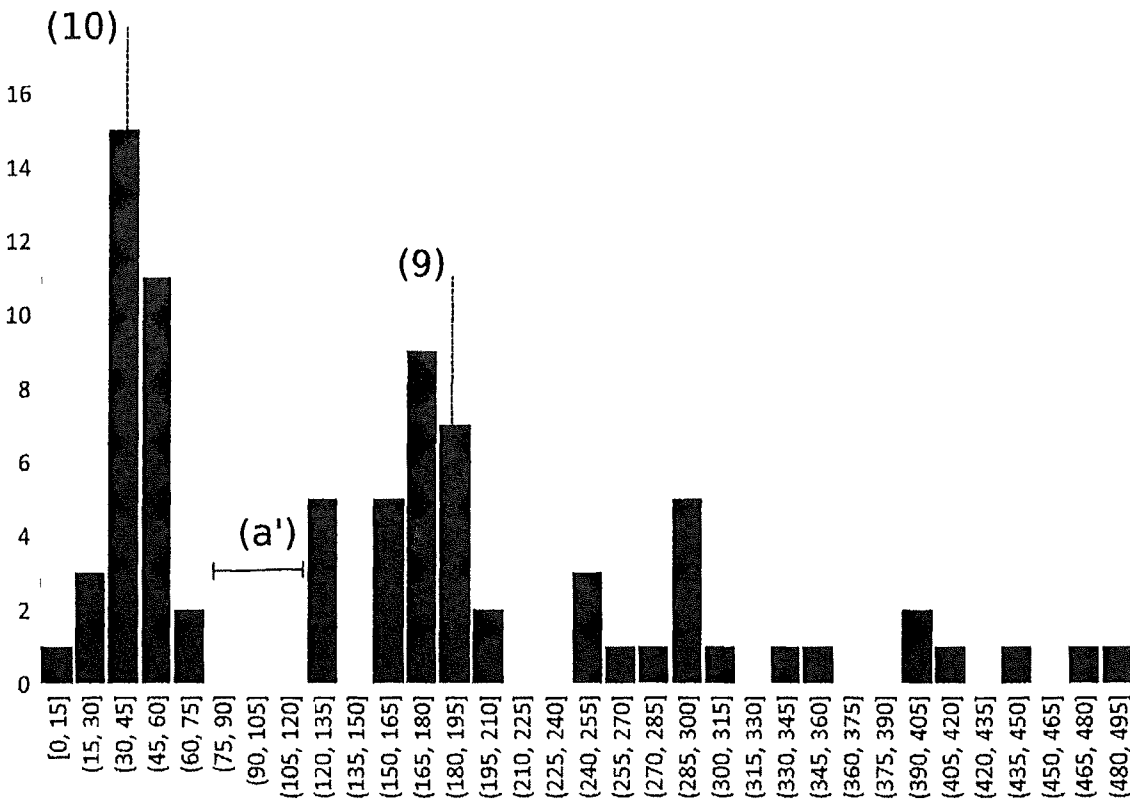


Fig. 6

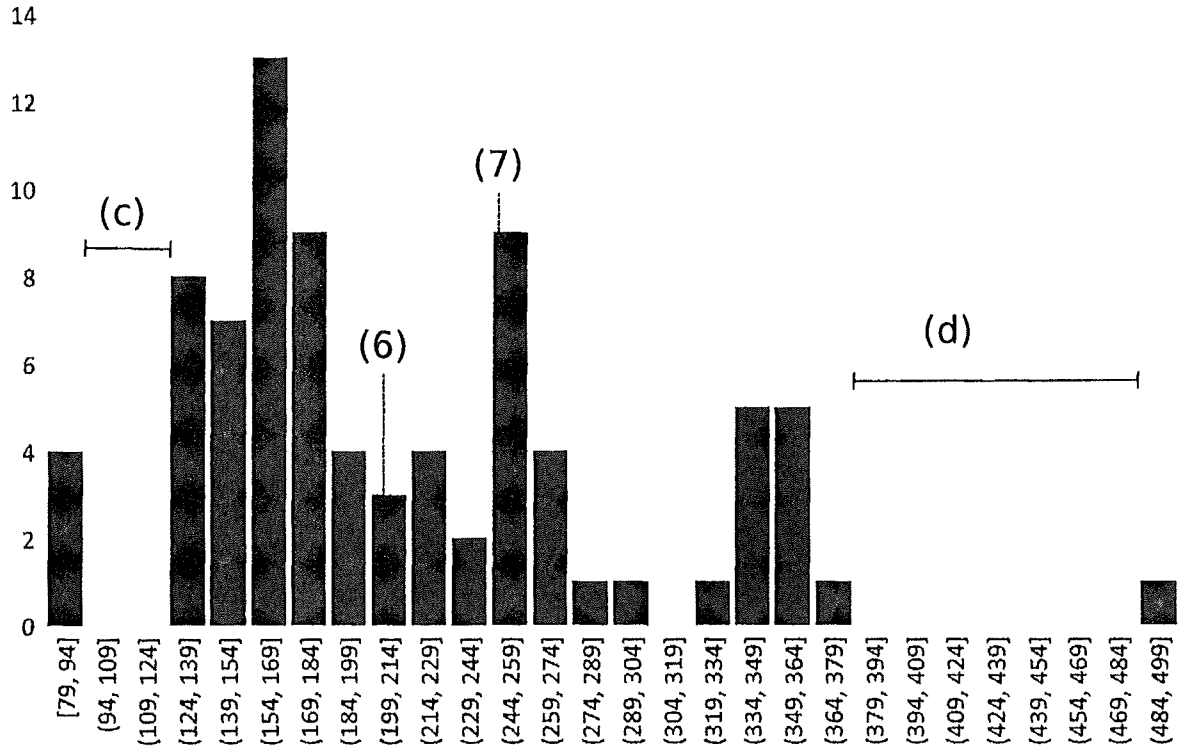


Fig. 7

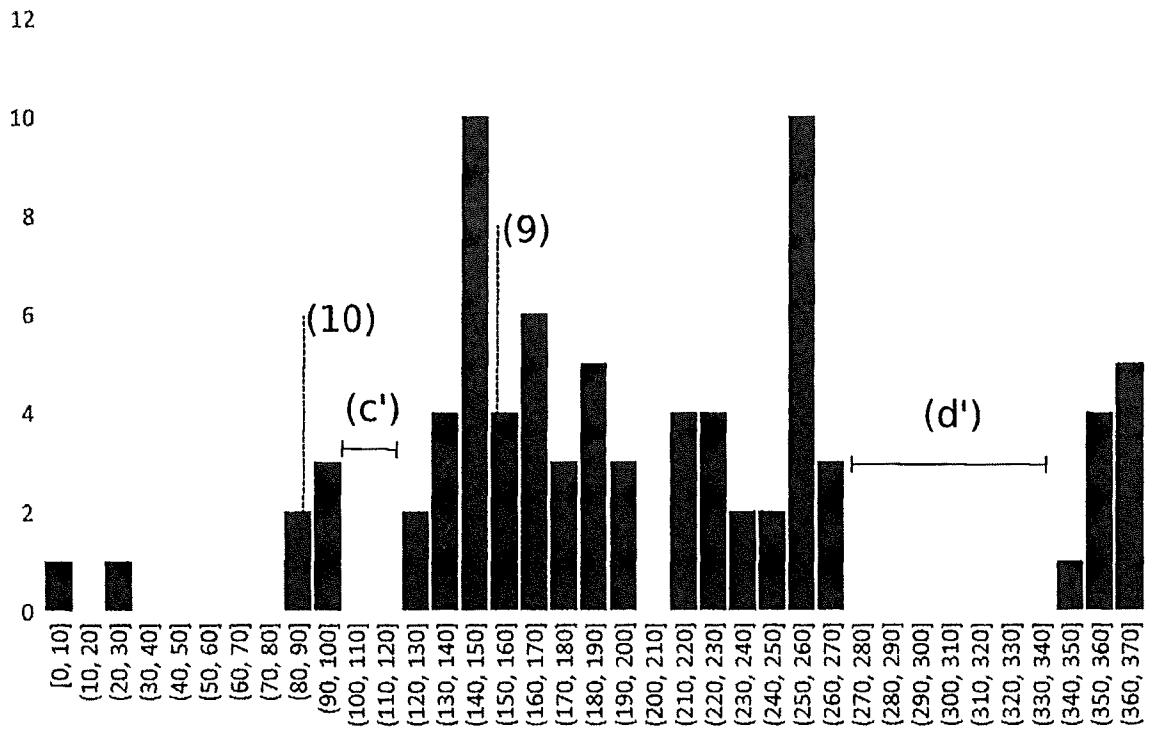


Fig. 8

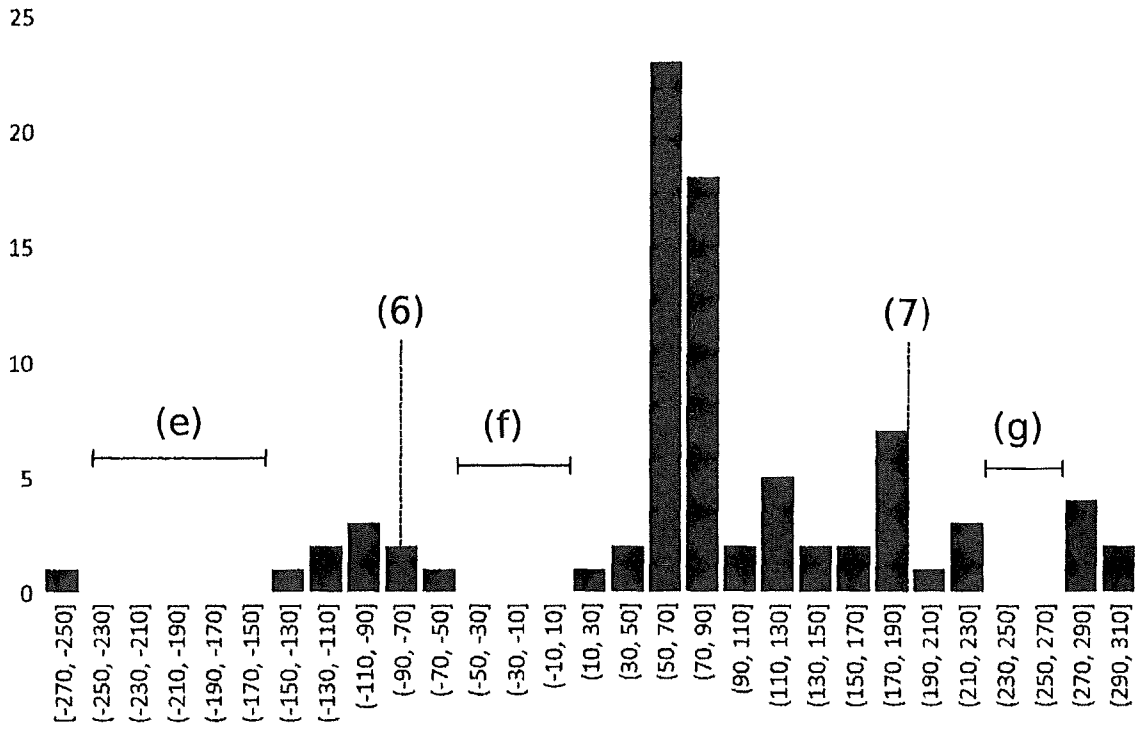


Fig. 9

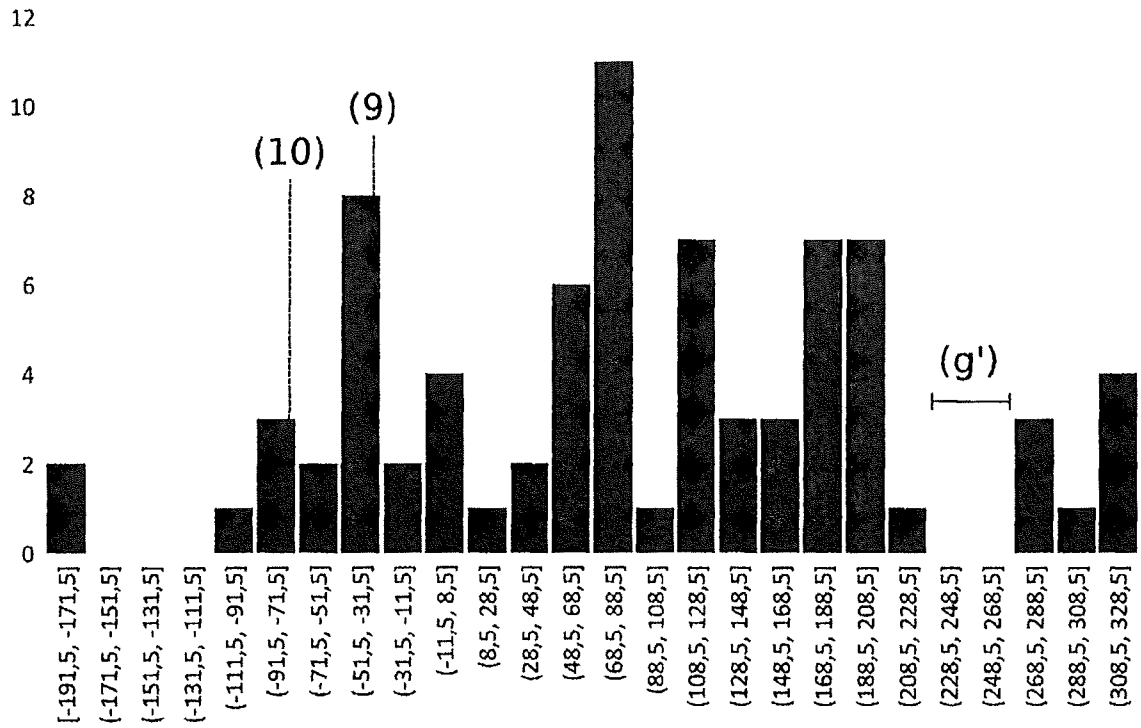


Fig. 10

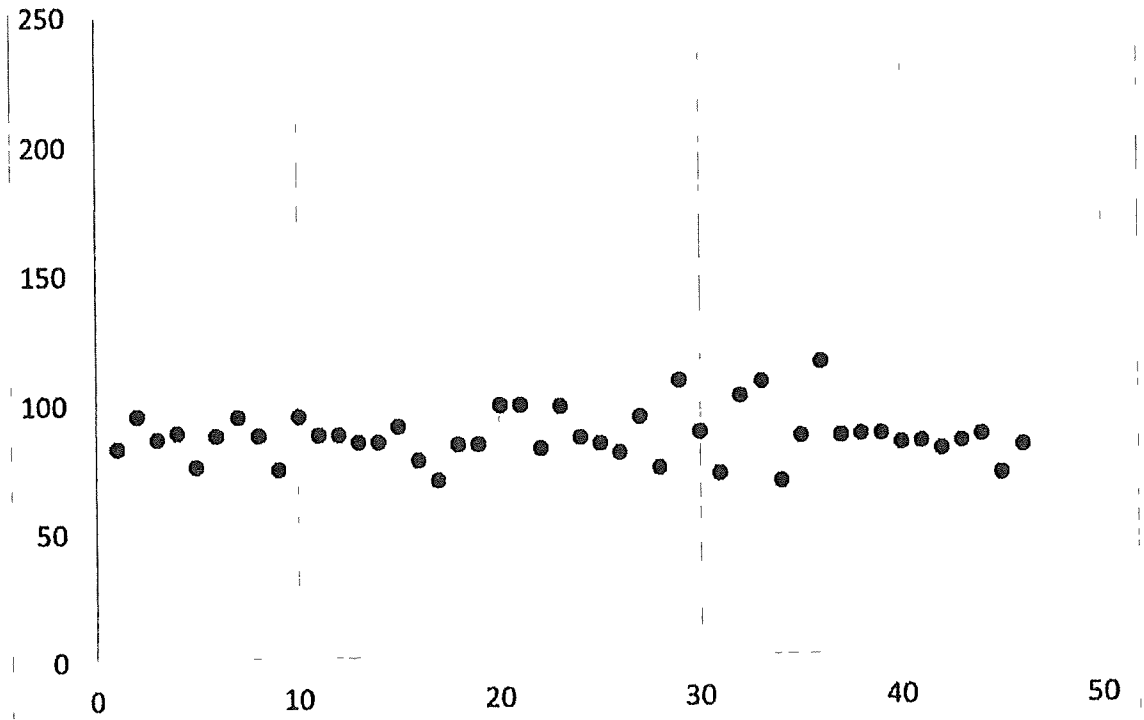


Fig. 11

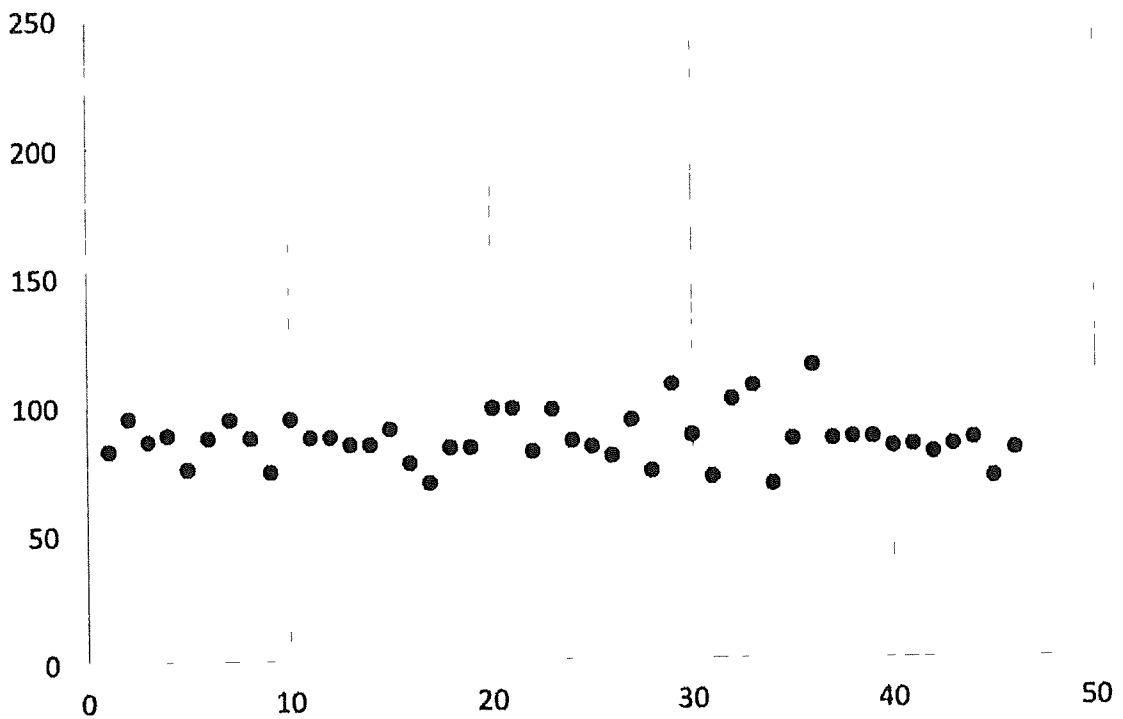


Fig. 12

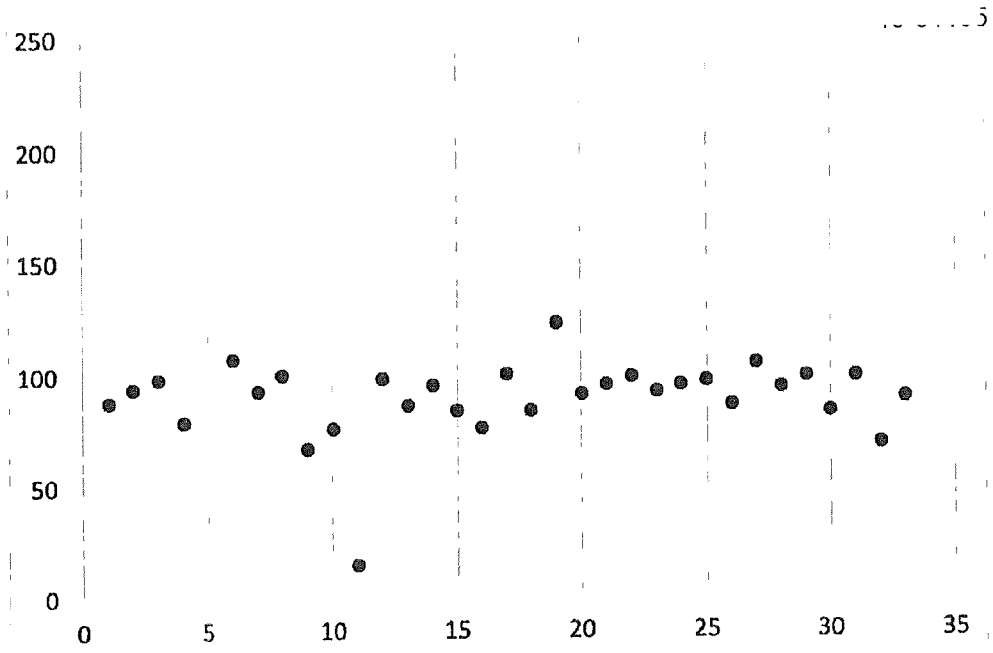


Fig. 13

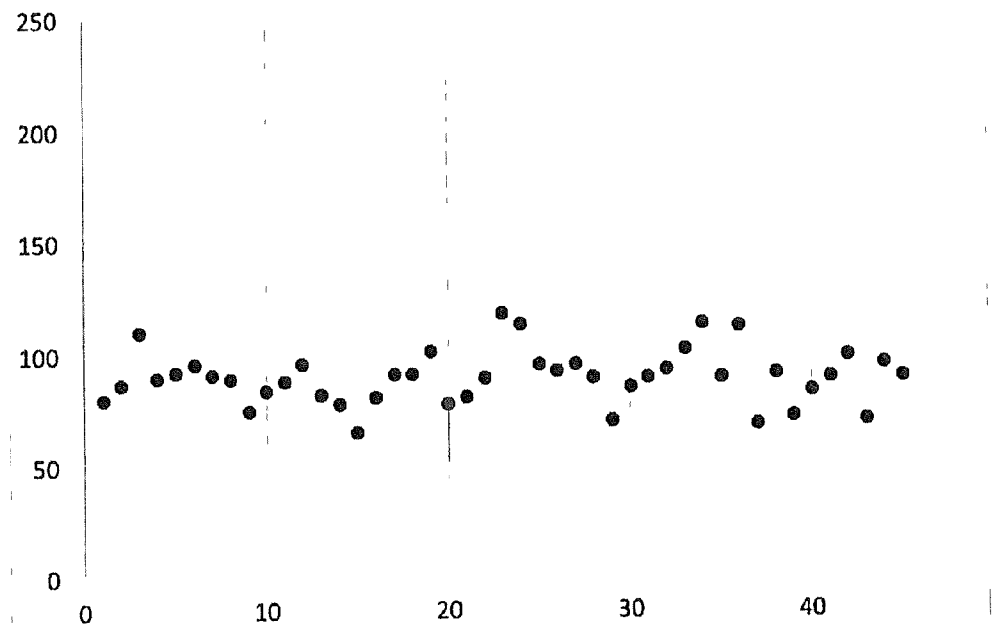


Fig. 14

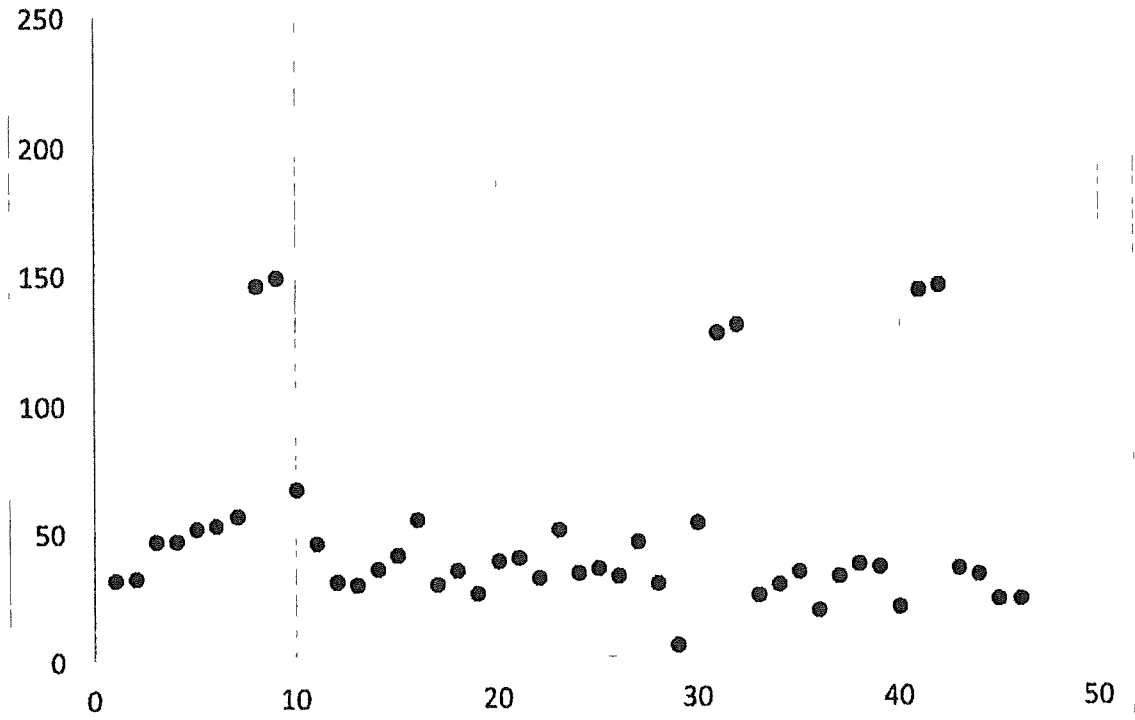


Fig. 15

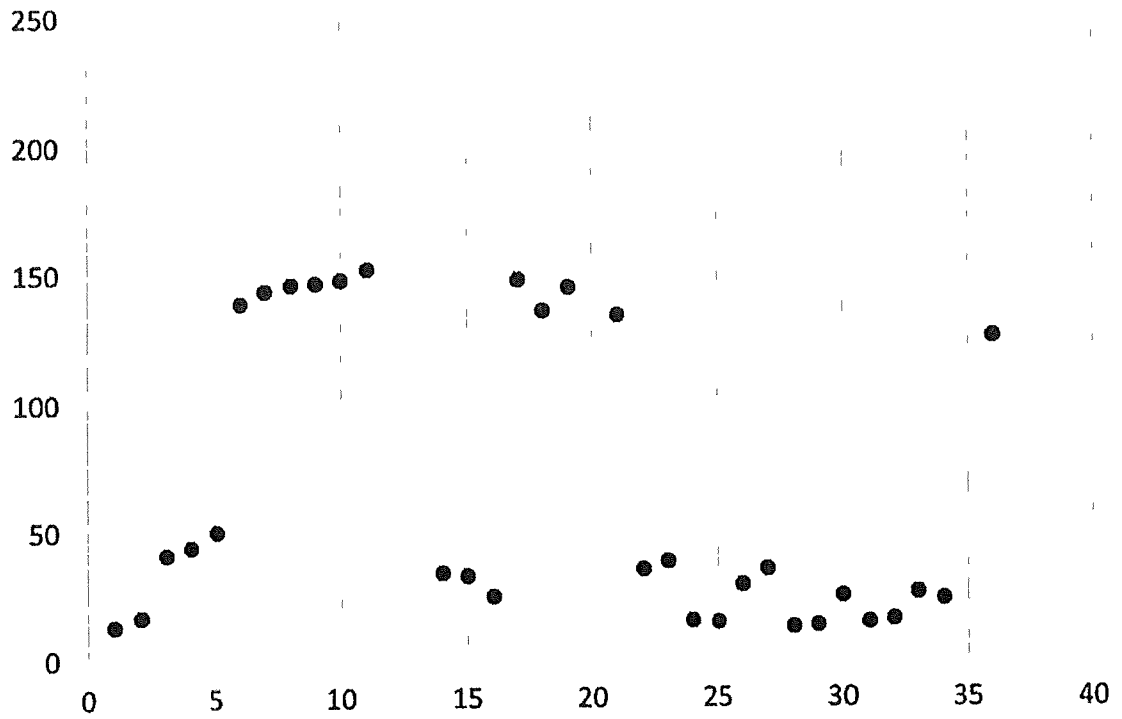


Fig. 16

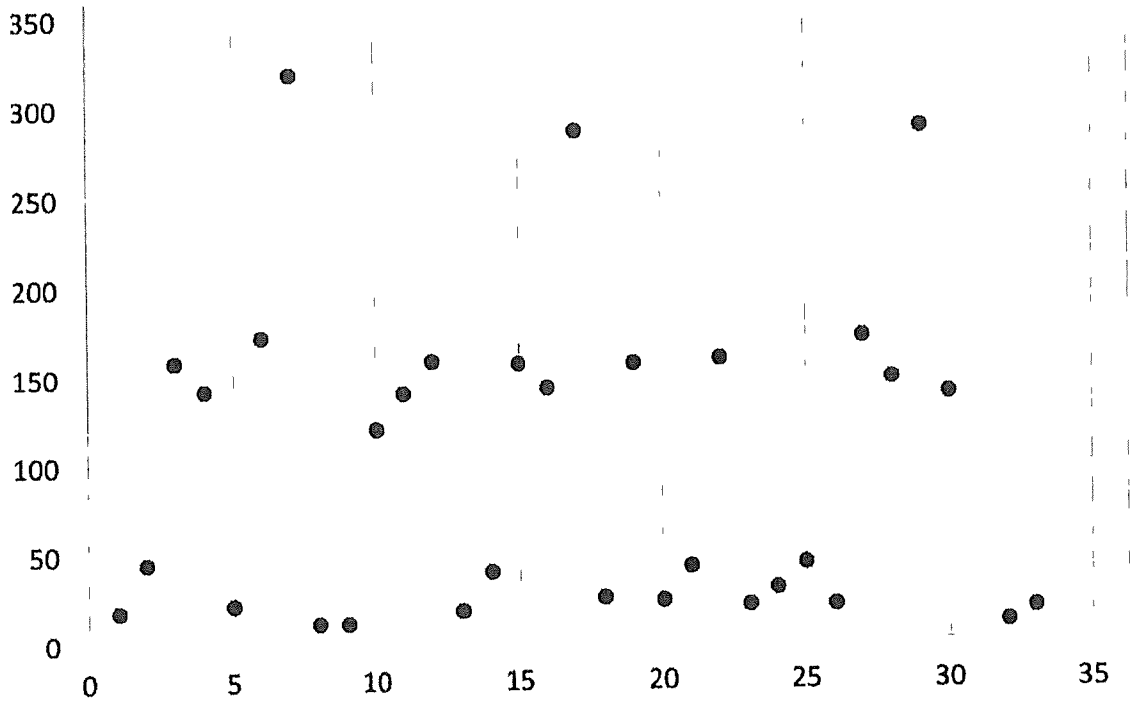


Fig. 17

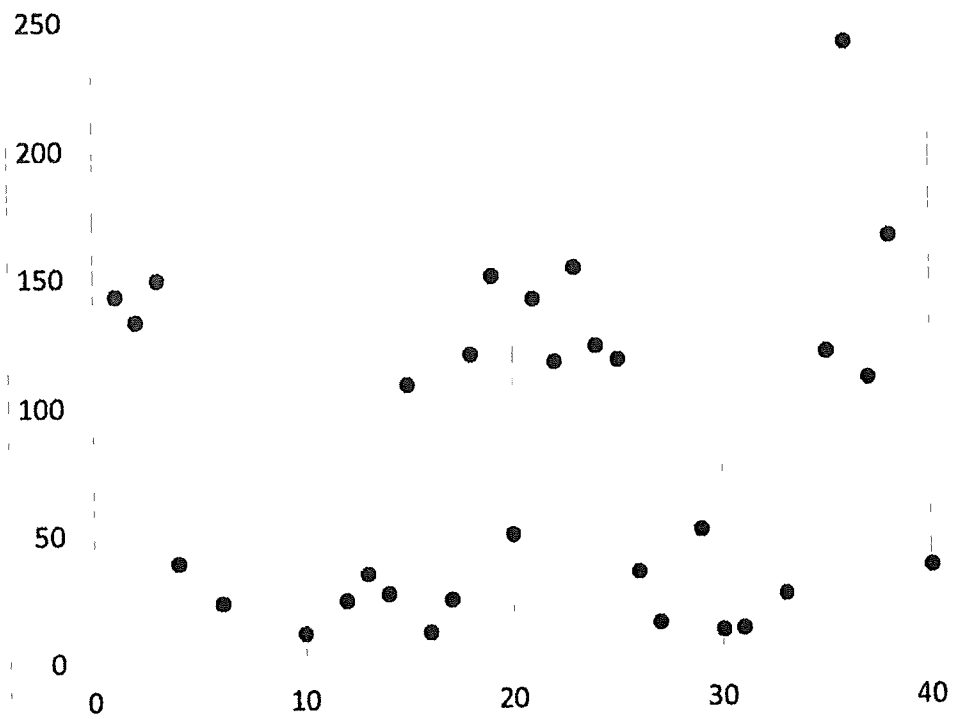


Fig. 18