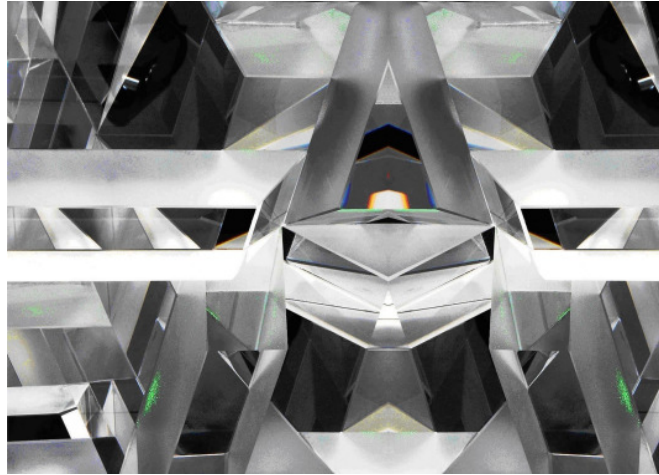


1. Optische Materialien

1.1. Optische Gläser

1.1.1. Optische Standardgläser



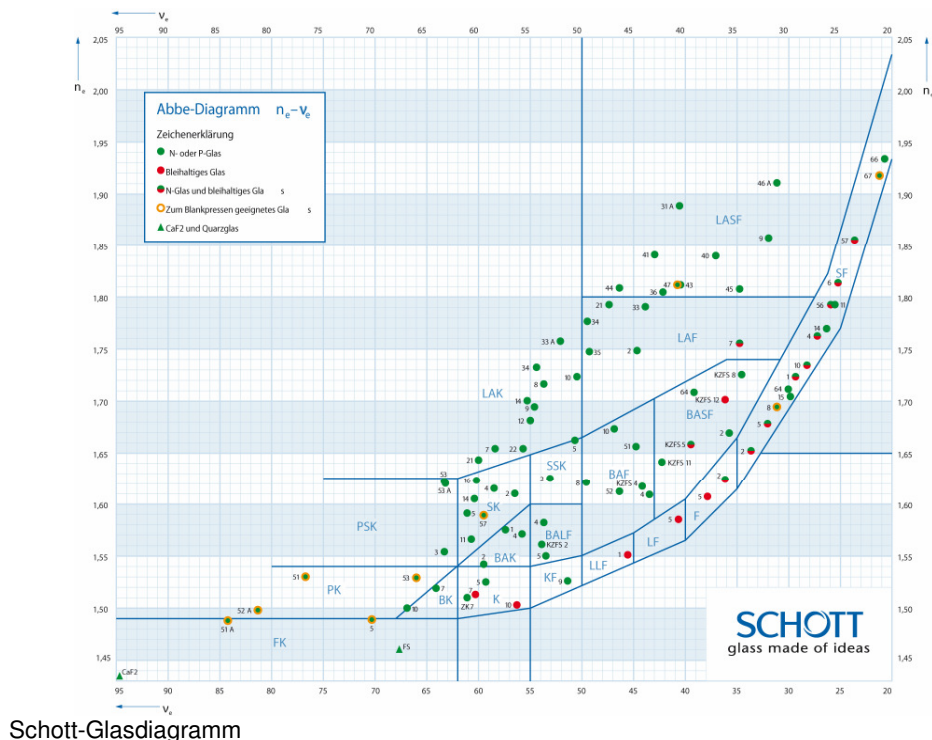
Optische Gläser sind anorganische Schmelzprodukte, die erstarren ohne zu kristallisieren und somit eine amorphe, homogene Struktur aufweisen. Sie besitzen eine hohe Transmission im sichtbaren Spektralbereich. Es werden die Hauptgruppen Kronglas und Flintglas unterschieden, die wiederum in verschiedene Glastypen eingeteilt sind. Glastypen werden durch die Hauptbrechzahl und die Abbesche Zahl, die die Dispersion im sichtbaren Spektralbereich beinhaltet, charakterisiert. Eine übersichtliche Darstellung der Einteilung liefert das Glasdiagramm. Die beiden Hauptgruppen unterscheiden sich primär durch die abbesche Zahl ($<$ bzw. > 50)

1. Krongläser ($v_e > 55$), die eine schwache Brechung und kleine Dispersion aufweisen.

2. Flintgläser ($v_e < 50$), die Bleioxid enthalten und eine größere Dispersion besitzen.

Dazwischen liegen noch einige Übergangsguppen.

Standardmäßig verwenden wir optische Gläser von Schott und Ohara. Es können aber auf Kundenwunsch auch Gläser anderer Hersteller verwendet werden.



| Krongläser | | Flintgläser | |
|-------------------------|------|-------------------|------|
| Kron | K | Flint | F |
| Schwerkron | SK | Schwerflint | SF |
| Schwerstkron | SSK | Leichtflint | LF |
| Bor-Kron | BK | Doppelleichtflint | LLF |
| Fluor-Kron | FK | Tiefflint | TIF |
| Phosphat-Kron | PK | Kurzflint | KzF |
| Phosphat-Schwerkron | PSK | Kron-Flint | KF |
| Fluophosphat-Schwerkron | FPSK | Barit-Flint | BaF |
| Lanthan-Kron | LaK | Barit-Leichtflint | BaLF |
| Lanthan-Schwerkron | LaSK | Barit-Schwerflint | BaSF |
| Barit-Kron | BaK | Lanthan-Flint | LaF |

Eigenschaften ausgewählter Gläser aus dem SCHOTT-Sortiment :

| Material | Dichte | Mittlerer Ausdehnungskoeffizient (20 –300 °C) | Brechungsindex n_e (546,1 nm) |
|----------|------------------------|---|---------------------------------|
| N-BK7 | 2,51 gcm ⁻³ | 8,3·10 ⁻⁶ / K | 1,51872 |
| N-BAK1 | 3,19 gcm ⁻³ | 8,6·10 ⁻⁶ / K | 1,57487 |
| N-BAK4 | 3,05 gcm ⁻³ | 7,9·10 ⁻⁶ / K | 1,57125 |
| N-SK2 | 3,55 gcm ⁻³ | 7,1·10 ⁻⁶ / K | 1,60994 |
| N-SK5 | 3,30 gcm ⁻³ | 6,5·10 ⁻⁶ / K | 1,59142 |
| N-LaK10 | 3,69 gcm ⁻³ | 6,8·10 ⁻⁶ / K | 1,72341 |
| F5 | 2,51 gcm ⁻³ | 8,3·10 ⁻⁶ / K | 1,51872 |
| N-SF10 | 3,05 gcm ⁻³ | 10,8·10 ⁻⁶ / K | 1,73430 |
| N-SF56 | 3,28 gcm ⁻³ | 10,0·10 ⁻⁶ / K | 1,79179 |

1.1.2. Optische Spezialgläser

Spezielle optische Gläser sind bezüglich bestimmter Anforderungen optimiert und besitzen meist eine exponierte Eigenschaft, die sie von den durchschnittlichen Werten der Standardgläser unterscheiden.

Borosilikatglas besteht zu 70-80 % aus Siliziumdioxid (SiO₂) und enthält einen hohen Anteil (ca. 13 %) an Bortrioxid (B₂O₃). Das Glas zeichnet sich durch seinen geringen Ausdehnungskoeffizienten (~5 × 10⁻⁶ /°C für 20°C) und eine gute Temperaturbeständigkeit aus. Der Borgehalt bedingt eine hohe Beständigkeit gegenüber chemischen Verbindungen. Im optischen Bereich sind die Verwendung des Glases als Spiegelsubstrat und für optische Fenster wesentlich.

Borofloat®33 ist ein spezielles Borosilikatglas von SCHOTT. Der Name des Glases setzt sich aus Borosilikatglas und dem Micro-Floatverfahren, nach dem das Glas hergestellt wird, zusammen. Das Glas ist durch die geringe Eigenfluoreszenz im gesamten Lichtspektrum und eine hohe Tempera-

turabschreckfestigkeit charakterisiert. Es ist hochresistent gegenüber Wasser, starken Säuren, Laugen sowie organischen Substanzen.

D263T Dünnglas ist ein farbloses Borosilikatglas der Firma Schott, hergestellt unter Verwendung reiner Rohmaterialien. Es ist in extrem dünnen Dicken verfügbar und weist eine leichte Biegsamkeit auf. Das Glas besitzt eine gleichmäßige optische Durchlässigkeit im sichtbaren Bereich, ist aber auch für den IR-Bereich bis ca. 3 µm einsetzbar.

Pyrex® ist ein CORNING Borosilikatglas. Es ist wie das Borofloat prädestiniert für Anwendungen, bei denen hohen Temperaturen und Temperaturschwankungen eine Rolle spielen.

B270 Superwite ist ein farbloses, universell einsetzbares, kostengünstiges Kronglas (modifiziertes Kalk - Natron - Glas) mit hoher und gleichmäßiger optischer Durchlässigkeit im sichtbaren und nahen Infrarotbereich.

| Glasart | Borofloat 33 | B270 Superwite | D263T |
|---|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Mittlerer thermischer Ausdehnungskoeffizient (20 °C - 300 °C) | 3,25·10 ⁻⁶ /K | 9,4·10 ⁻⁶ /K | 7,2·10 ⁻⁶ /K |
| Dichte | 2,2 gcm ⁻³ | 2,55 gcm ⁻³ | 2,51 gcm ⁻³ |
| Transformationstemperatur | 525 °C | 533 °C | 557 °C |
| Brechungsindex n_e (546,1 nm) | 1,47311 | 1,5230 | 1,5231 |
| Abbesche Zahl v_e | 65,41 | 58,3 | 55 |

1.1.3. Farb- und Filtergläser

Farb- und Filtergläser zeichnen sich durch die selektive Absorption im optischen Wellenlängenbereich aus. Nach dem Schott-Katalog lassen sich

die Farbgläser entsprechend dem Transmissionsbereich in folgende Gruppen einteilen :

| | |
|------|---|
| UG | Schwarz- und Blaugläser mit Durchlässigkeit im UV-Bereich |
| BG | Blau-, Blaugrün- und Bandengläser |
| VG | Grünläser |
| GG | Nahezu farblose Gläser bis Gelbgläser mit IR-Durchlässigkeit |
| OG | Orangegläser mit IR-Durchlässigkeit |
| RG | Rote und schwarze Gläser mit IR-Durchlässigkeit |
| N-WG | Farblose Gläser mit unterschiedlichen Kantenlagen im UV-Bereich |
| KG | Nahezu farblose Gläser mit hoher Durchlässigkeit im Sichtbaren und mit effektiver Absorption im IR (Wärmeschutzfilter<) |
| NG | Neutralgläser mit gleichmäßiger Strahlungsschwächung im Sichtbaren |

Funktional können die Farbgläser in folgende Gruppen eingeteilt werden :

- **Bandpassfilter** bieten selektive Durchlässigkeit im gewünschten Wellenlängenbereich
- **Langpassfilter** sperren ungewünschte kürzerwellige Bereiche
- **Kurzpassfilter** sperren ungewünschte längerwellige Bereiche

- **Neutralfilter** weisen insbesondere im sichtbaren Bereich eine nahezu konstante Durchlässigkeit auf.

Farbgläser werden oftmals auch in Kombination mit dielektrischen Schichten verwendet, um spezielle modifizierte Transmissionseigenschaften zu erzeugen.

1.2. Glaskeramik

Glaskeramik ist ein Material, das eine kristalline Phase und eine Restglasphase enthält. Glaskeramiken besitzen eine hohe Homogenität und einen extrem niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Die Transmission liegt im Bereich 600 nm – 2000 nm bei etwa 90 %. Damit eignet sich das Material weniger für transmissive Optik, jedoch ist eine direkte Prüfung der inneren Qualität auf

Blasen, Schlieren oder Einschlüsse möglich. Durch seine Eigenschaften und die gute maschinelle Bearbeitbarkeit sind Glaskeramiken ein hervorragend geeignetes Material für präzise Spiegelsubstrate und werden daher z.B. bei reflektiven Komponenten in astronomischen Teleskopen verwendet.

Eigenschaften der Glaskeramik ZERODUR® (Schott) :

| | | |
|---|-----------------------------|------------------------------|
| Mittlerer thermischer Ausdehnungskoeffizient (0°C – 50°C) | Dehnungsklasse 0 | $0 \pm 0,02 \cdot 10^{-6}/K$ |
| | Dehnungsklasse 1 | $0 \pm 0,05 \cdot 10^{-6}/K$ |
| | Dehnungsklasse 2 (Standard) | $0 \pm 0,10 \cdot 10^{-6}/K$ |
| Dichte | 2,53 gcm ⁻³ | |
| Brechungsindex n _e (546,1 nm) | 1,5447 | |
| Abbesche Zahl | 55,9 | |

Eigenschaften der Glaskeramik CLEARCERAM-Z (Ohara) :

| | | |
|---|-----------------------|------------------------------|
| Mittlerer thermischer Ausdehnungskoeffizient (0°C – 50°C) | Clearceram-Z HS | $0 \pm 0,02 \cdot 10^{-6}/K$ |
| | Clearceram –Z Regular | $0 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}/K$ |
| Brechungsindex n _e (546,1 nm) | Clearceram-Z HS | 1,54899 |
| | Clearceram –Z Regular | 1,54841 |
| Abbesche Zahl | Clearceram-Z HS | 55,0 |
| | Clearceram –Z Regular | 55,5 |

Eigenschaften der Glaskeramik ULE® (Corning) :

| | |
|---|--------------------------------|
| Mittlerer thermischer Ausdehnungskoeffizient (5°C – 35°C) | $0 \pm 0,30 \cdot 10^{-7} / K$ |
| Dichte | $2,21 \text{ gcm}^{-3}$ |
| Brechungsindex n_e (546,1 nm) | 1,4828 |
| Abbesche Zahl | 53,1 |

1.3. Quarz / Fused Silica

Quarz zeichnet sich insbesondere durch eine gute Transparenz vom UV- bis zum mittleren IR-Bereich aus. Das Material wird in zwei strukturellen Zuständen für optische Komponenten genutzt.

1. kristallines SiO_2 (kristalliner Strukturzustand, optische Eigenschaften abhängig von der Kristallorientierung)
2. amorphes SiO_2 (glasig erstarrte Schmelze - Quarzglas)

Quarzglas ist ein Glas, das im Gegensatz zu den gebräuchlichen Gläsern keine Beimengungen von Soda oder Calciumoxid enthält, also aus reinem Siliziumdioxid (SiO_2) besteht. Es kann durch Aufschmelzung und Wiedererstarrung von Quarz oder Quarzsand oder künstlich hergestellt werden, daher

auch die englischen Bezeichnung *fused quartz* oder *fused silica*.

In der Präzisionsoptik wird vorrangig synthetisches Quarzglas (**Fused Silica**) eingesetzt, das einen hohen Reinheitsgrad und geringen Blasengehalt aufweist. Fused Silica hat einen geringen Ausdehnungskoeffizienten und ist beständig gegen die meisten chemischen Verbindungen. Weitere Vorteile sind eine hohe Zerstörungsschwelle gegenüber optischer Belastung (hohe Laserleistungsdichten) und die hohe Anwendungstemperatur von ca. 1.200°C.

Kristallines Quarz unterscheidet sich in seinen optischen Charakteristika gegenüber dem Quarzglas durch seine piezoelektrischen Eigenschaften, der optischen Aktivität und der Doppelbrechung (siehe auch unter 1.4. Kristalle).

Eigenschaften des Quarzglases (Daten der Heraeus Quarzglas GmbH) :

| | | |
|--|--------------------------|---------|
| Mittlerer thermischer Ausdehnungskoeffizient (0°C - 300°C) | $0,59 \cdot 10^{-6} / K$ | |
| Dichte | $2,20 \text{ gcm}^{-3}$ | |
| Brechungsindex n_e (546,1 nm) | Suprasil-Familie | 1,46008 |
| | Herasil / Infrasil | 1,46018 |
| Abbesche Zahl v_d | 67,8 | |
| Erweichungstemperatur | Suprasil-Familie | 1600 °C |
| | Herasil / Infrasil | 1730 °C |
| Max. Temperatur für kontinuierliche Anwendung | Suprasil-Familie | 950 °C |
| | Herasil / Infrasil | 1150 °C |

Aus unterschiedlichen Herstellungsverfahren resultierend, lassen sich die Quarzgläser der einzelnen Hersteller in verschiedene Sorten unterteilen. Die Heraeus Quarzglas GmbH fasst die einzelnen Sorten entsprechend ihren Grundeigenschaften in Familien zusammen.

SUPRASIL®

Die SUPRASIL-Familie beinhaltet die synthetischen Quarzglas-Sorten. Sie sind alle praktisch frei von Blasen und Einschlüssen und zeichnen sich durch besonders hohe optische Durchlässigkeit im UV- und im sichtbaren Spektralbereich aus.

HERASIL®

Die HERASIL-Familie umfasst das klassische aus dem Bergkristall in der Knallgasflamme geschmolzene Quarzglas.

HOMOSIL® ist die Sorte mit der höchsten optischen Qualität. Es wird aus gezüchteten Kristallen in der Knallgasflamme geschmolzen und ist praktisch frei von Blasen und Einschlüssen und gleichzeitig äußerst homogen und optisch isotrop.

INFRASIL®

Die INFRASIL-Sorten werden ebenfalls aus natürlichem, kristallinem Rohstoff, allerdings im elektrisch beheizten Ofen geschmolzen. Sie weisen einen sehr geringen OH-Gehalt auf und sind daher das bevorzugte Material für den IR-Spektralbereich.

Neben dem Heraeus-Material verwenden wir standardmäßig auch das HPFS7980 der Firma Corning. Es können aber auf Kundenwunsch auch Quarzgläser anderer Hersteller verwendet werden.

1.4. Optische Kristalle

Eine Auswahl der Kristallmaterialien, aus denen unsere optischen Komponenten gefertigt werden, ist nachfolgend aufgeführt. Zu beachten ist, dass die Werte für den Brechungsindex nur der Orientierung dienen sollen. Die Angaben der Kristallhersteller

weichen geringfügig voneinander ab. Der konkret nutzbare Transmissionsbereich hängt letztlich auch von den Randbedingungen für die jeweilige Komponente im optischen System ab.

| Kristall | Formel | Dichte | Schmelztemperatur | Transmissionsbereich | Brechungsindizes |
|----------------------------------|---------------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|--|
| Lithiumfluorid | LiF | 2,64 gcm ⁻³ | 870 °C | 0,12 - 6,5 µm | 0,5 µm - 1,39 5,0 µm - 1,33 |
| Kalziumfluorid | CaF ₂ | 3,18 gcm ⁻³ | 1418 °C | 0,15 - 9,0 µm | 0,5 µm - 1,44 5,0 µm - 1,40 10,0 µm - 1,30 |
| Bariumfluorid | BaF ₂ | 4,89 gcm ⁻³ | 1354 °C | 0,18 - 12µm | 0,5 µm - 1,48 5,0 µm - 1,45 10,0 µm - 1,40 |
| Magnesiumfluorid | MgF ₂ | 3,18 gcm ⁻³ | 1255 °C | 0,13 - 7,0 µm | 0,5 µm - 1,38 5,0 µm - 1,34 |
| Quarz | SiO ₂ | 2,64 gcm ⁻³ | 1740 °C | 0,4 - 4,5 µm | 0,5 µm - 1,55 5,0 µm - 1,42 |
| Saphir | Al ₂ O ₃ | 3,98 gcm ⁻³ | 2053 °C | 0,17 - 5,0 µm | 0,5 µm - 1,77 1,0 µm - 1,64 |
| Kalkspat | CaCO ₃ | 2,71 gcm ⁻³ | 1339 °C | 0,22 - 3,0 µm | 0,5 µm - 1,66 1,0 µm - 1,75 |
| Zinkselenid | ZnSe | 5,26 gcm ⁻³ | 1520 °C | 0,55 - 18 µm | 1,0 µm - 2,49 5,0 µm - 2,43 10,0 µm - 2,41 |
| Zinksulfid | ZnS | 4,09 gcm ⁻³ | 1827 °C | 1,8 - 12,5 µm | 1,0 µm - 2,30 5,0 µm - 2,24 10,0 µm - 2,20 |
| Germanium | Ge | 5,33 gcm ⁻³ | 936 °C | 1,8 - 23 µm | 2,0 µm - 4,10 5,0 µm - 4,02 10,0 µm - 4,00 |
| Silizium | Si | 2,33 gcm ⁻³ | 1420 °C | 1,2 - 15 µm | 2,0 µm - 3,45 5,0 µm - 3,43 |
| Kaliumdihydrogenphosphat (KDP) | KH ₂ PO ₄ | 2,33 gcm ⁻³ | Zersetzung ab 253 °C | 0,18 - 1,5 µm | Für λ = 1064 nm n _o = 1,49 n _e = 1,46 |
| Kaliumdideuterio-phosphat (KDDP) | KD ₂ PO ₄ | 2,35 gcm ⁻³ | | 0,2 - 2,0 µm | Für λ = 1064 nm n _o = 1,49 n _e = 1,46 |
| Lithiumniobat | LiNbO ₃ | 4,61 gcm ⁻³ | 1530 °C | 0,35 - 5,5 µm | Für λ = 1064 nm n _o = 2,22 n _e = 2,15 |
| Kaliumtitanylphosphat (KTP) | KTiOPO ₄ | 3,01 gcm ⁻³ | 1150 °C | 0,35 - 4,5 µm | Für λ = 1064 nm n _x = 1,74 n _y = 1,75 n _z = 1,83 |