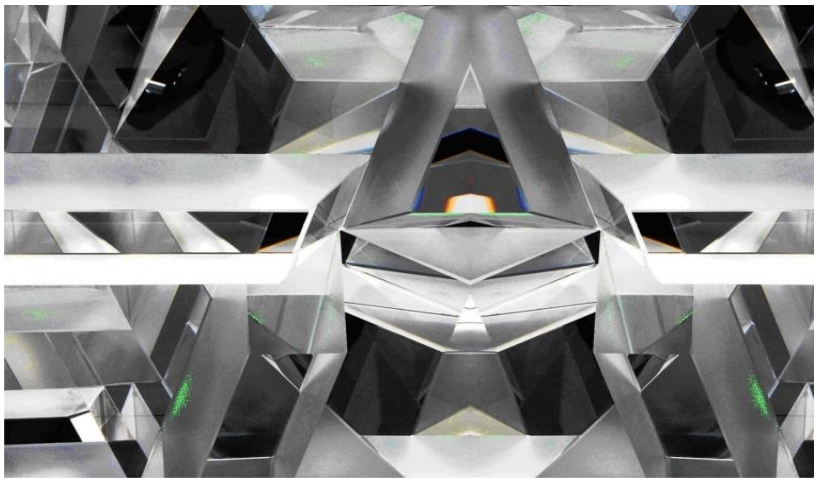
1. Optische Materialien

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.
Glastypen werden primär durch die Hauptbrechzahl n_e (e steht für 546,1 nm = grüne Linie des Hg) und die Abbe-Zahl ν_e charakterisiert, die die Dispersion beschreibt.
Konkret gilt : $\nu_e = (n_e-1)\cdot(n_{F'} - n_{C'})$ F‘ steht dabei für 480 nm = blaue Linie des Cd und C‘ für 643,8 nm = rote Linie des Cd. Eine kleinere Abbe-Zahl bedeutet eine stärkere Dispersion (Farbzerstreuung) durch das Glas.
Es werden die Hauptgruppen Kronglas und Flintglas unterschieden, die wiederum in verschiedene Glastypen eingeteilt sind.

Krongläser (n_d<1,6 ν_d > 55), die eine schwache Brechung und kleine Dispersion aufweisen.

Flintgläser (n_d>1,6 ν_d < 50), die eine größere Lichtbrechung ermöglichen und auch eine stärkere Dispersion aufweisen. Ursprünglich zeichneten sich Flintgläser durch einen höheren PbO-Gehalt aus. Im Bestreben, die Gläser umweltfreundlicher zu produzieren, gibt es heute parallel auch PbO-freie Glasarten (z.B. F2 und N-F2)

Das vorangestellte N (bei Schott) und S (bei Ohara) in der Glasbezeichnung steht für Arsen- und Bleifreiheit des Glases.

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

Gläser der verschiedenen Hersteller können über den **Glascode** untereinander zugeordnet werden. Das ist ein sechsstelliger Code, der sich wie folgt zusammensetzt:
Ziffern 1-3: Brechungsindex-Nachkommastellen 1-3
Ziffern 4-6: Abbe-Zahl mit erster Nachkommastelle

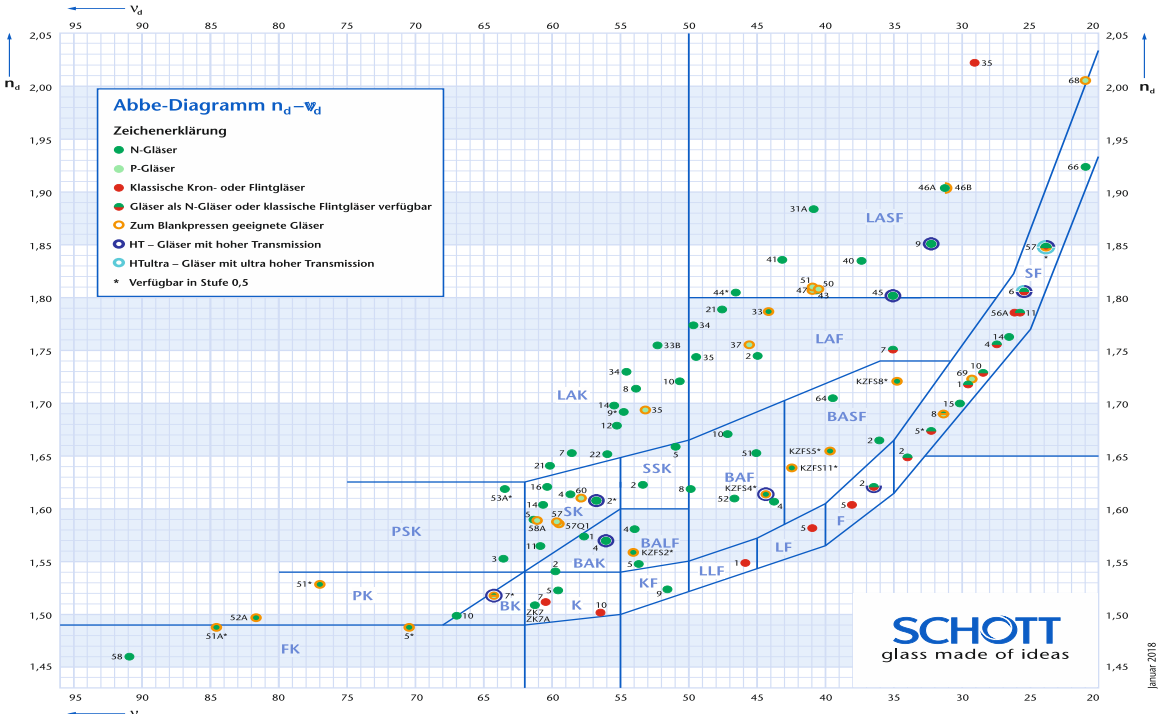
Beispiel N-BK7 von Schott nd = 1,51680, ν_d = 64,17 → mit entsprechender Rundung folgt der Glascode = 517642

Eine übersichtliche Darstellung der Einteilung liefern die Glasdiagramme.

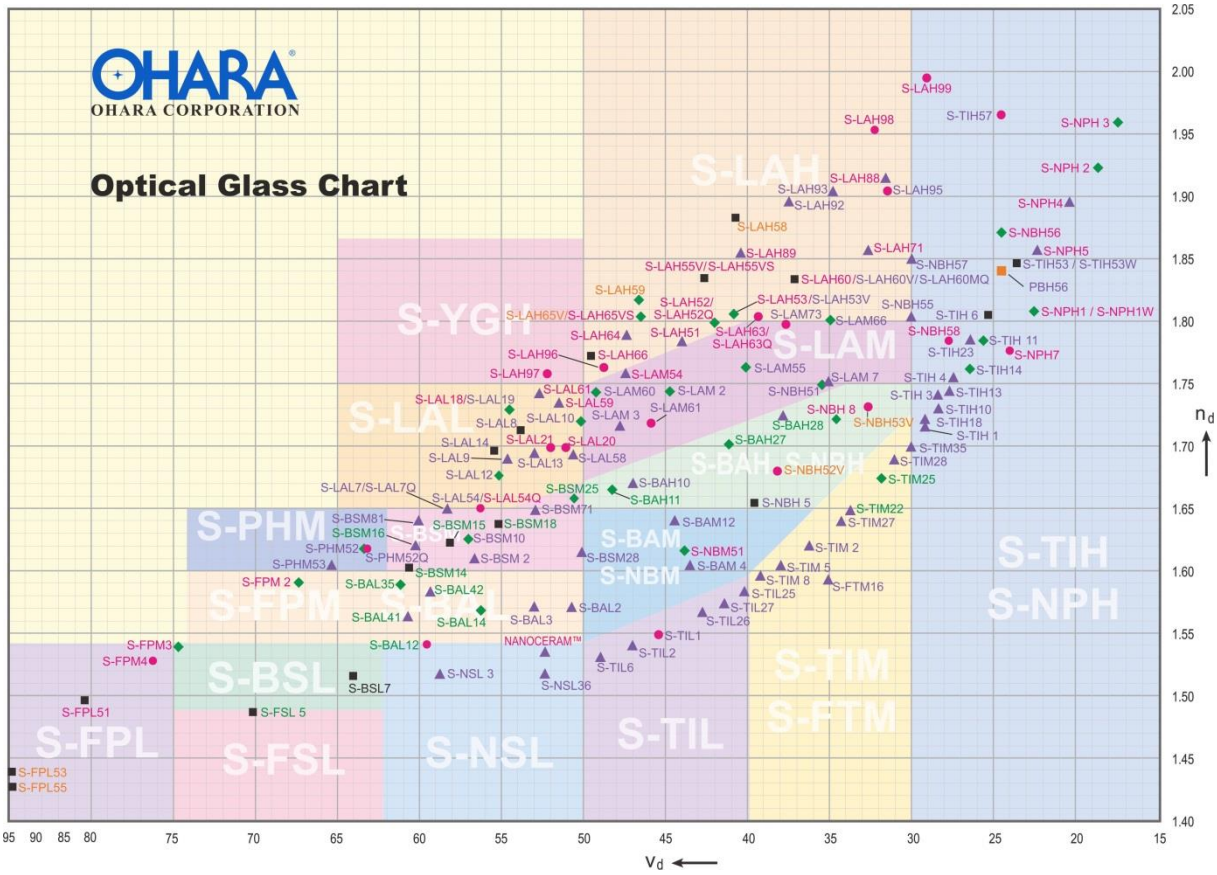
Bezeichnung der Schott-Glasarten und Ihre Abkürzungen:

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

Schott-Glasdiagramm



Ohara-Glasdiagramm



Eigenschaften ausgewählter Gläser aus dem SCHOTT-Sortiment :

Material	Dichte	Brechungsindex n_e (546,1 nm)	Abbe Zahl v_e (546,1 nm)
N-BK7	2,51 gcm^{-3}	1,51872	63,96
N-BAK1	3,19 gcm^{-3}	1,57487	57,27
N-BAK4	3,05 gcm^{-3}	1,57125	55,70
N-SK2	3,55 gcm^{-3}	1,60994	56,37
N-SK5	3,30 gcm^{-3}	1,59142	61,02
N-LaK10	3,69 gcm^{-3}	1,72341	50,39
F5	3,47 gcm^{-3}	1,60718	37,77
N-SF10	3,05 gcm^{-3}	1,73430	28,31
N-SF57	3,53 gcm^{-3}	1,85504	23,59
N-SF66	4,00 gcm^{-3}	1,93322	20,70

Auswahl Glasbezeichnungen wichtiger Hersteller

Glascode	SCHOTT	OHARA	CDGM	HOYA
517642	N-BK7	S-BSL7	H-K9L	BSC7
569560	N-BAK4	SBAL14	H-BaK7	BAC4
589613	N-SK5	S-BAL35	H-ZK3	BACD5
720503	N-LAK10	S-LAL10	H-Lak8A	LAC10
603380	F5	PBM5	F1	F5
673322	N-SF5	S-TIM25	H-ZF2	E-FD5
847238	N-SF57	S-TIH53	H-ZF52A	FDS90

1.1.2. Optische Spezialgläser

Die Standardgläser von Schott und Ohara werden durch Glasvarianten mit speziell optimierten Eigenschaften ergänzt.

a) Höhere Transmission

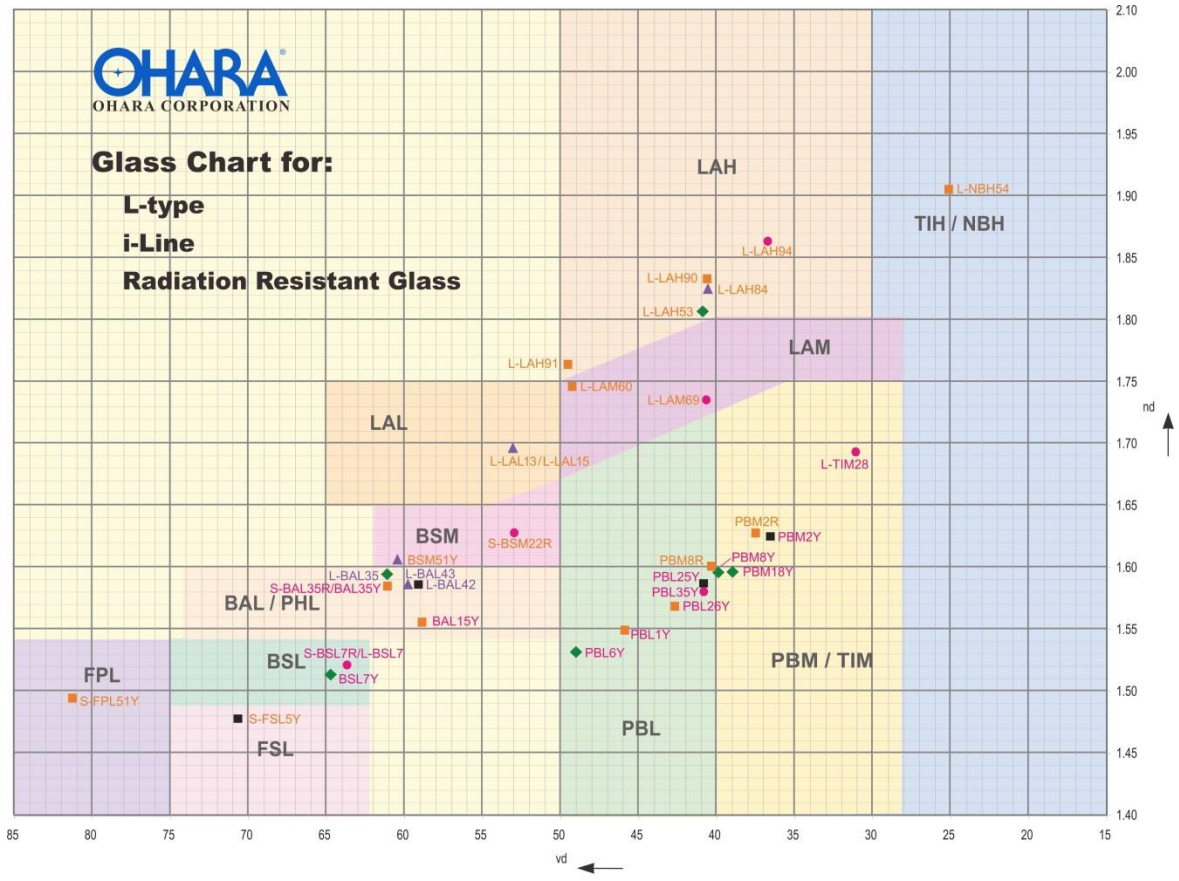
Bei Schott werden diese Glasvarianten mit dem Zusatz "HT" oder "HTultra" gekennzeichnet.

Vergleich der inneren Transmission bei 400 nm von Schott Standard und HT-Gläsern (Werte für 10 mm Dicke)			
N-BK7	0,997	N-BK7HT	0,998
N-SK2	0,994	N-SK2HT	0,996
N-BAK4	0,992	N-BAK4HT	0,993
F2	0,994	F2HT	0,996
N-SF6	0,820	N-SF6HT	0,880
		N-SF6HTultra	0,890
N-SF57	0,730	N-SF57HT	0,790
		N-ASF57HTultra	0,830

b) i-Linien-Gläser

In der Lithografie spielt die als i-Linie bezeichnete Emissionslinie bei 365 nm der Quecksilberdampf-lampe eine wichtige Rolle. Daher wurde eine Gruppe von Gläsern mit einer speziell hohen Transmission bei 365 nm entwickelt.
Schott verwendet die Bezeichnung Glas-HTi (z.B N-BK7HTi) und Ohara fügt ein Y zur Glasbezeichnung hinzu. Neben der guten UV-Transmission bringen diese Gläser auch die für die Lithografie oder Astronomie erforderliche hohe Brechzahlhomo-genität mit (typisch < 5 ppm). Die Brechzahlschwankungen innerhalb der Glas-Charge liegen bei $\Delta n < 5 \times 10^{-5}$.

Vergleich der inneren Transmission bei 365 nm von Ohara Standard und i-line-Gläsern (Werte für 10 mm Dicke)			
S-FPL51	0,982	S-FPL51Y	0,997
S-BSL7	0,988	S-BSL7Y	0,998



1.1.3. Technische Gläser

Borosilikatglas besteht zu 70-80 % aus Silziumdioxid (SiO_2) und enthält einen hohen Anteil (ca. 13 %) an Bortrioxid (B_2O_3). 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 findet das Glas als Spiegelsubstrat und für optische Fenster Anwendung.

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 Transmission im Bereich UV-VIS-NIR charakterisiert. Es ist hochresistent gegenüber Wasser, starken Säuren, Laugen sowie organischen Substanzen.

D263T Dünnglas ist ein farbloses Borosilikatglas der Firma Schott, hergestellt unter Verwendung reinster Rohmaterialien. Es ist in extrem geringen Dicken verfügbar (0,03 – 1,1 mm) 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 höhere Temperaturen und große Temperaturschwankungen eine Rolle spielen.

B270 i Superwhite ist ein farbloses, universell einsetzbares, kostengünstiges Kronglas (modifiziertes Kalk - Natron - Glas) mit hoher und gleichmäßiger optischer Durchlässigkeit im sichtbaren und nahen Infrarotbereich. Es ist gut einsetzbar im Bereich 350 nm bis ca. 2,5 µm. Vorrangig wird B270 für Spiegelsubstrate verwendet.

Glasart	Borofloat 33	B270i Superwite	D263T eco
Dichte	2,23 gcm^{-3}	2,56 gcm^{-3}	2,51 gcm^{-3}
Mittlerer thermischer Ausdehnungskoeffizient (20°C - 300°C)	$3{,}25 \cdot 10^{-6}$/K	$9{,}4 \cdot 10^{-6}$/K	$7{,}2 \cdot 10^{-6}$/K
Transformationstemperatur	525 °C	542 °C	557 °C
Brechungsindex n_e (546,1 nm)	1,47311	1,5251	1,5255
Abbesche Zahl v_e	65,41	58,3	55

1.1.4. 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	Grüngläser
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-Bereich (Wärmeschutzfilter)
NG	Neutralgläser mit gleichmäßiger Strahlungsschwächung im VIS-Bereich

Funktional können die Farbgläser in folgende Gruppen eingeteilt werden :

Bandpassfilter bieten selektive Durchlässigkeit im gewünschten Wellenlängenbereich. Die Filter werden vor allem durch die Zentralwellenlänge und die Halbwertsbreite charakterisiert. Die HWB wird durch den spektralen Abstand der beiden 50 %-Punkte der maximalen Transmission des Filters definiert.

Langpassfilter sperren ungewünschte kürzerwellige Bereiche und werden auch als cut-on-Filter bezeichnet, charakterisiert durch die cut-on-Wellenlänge, bei der die Transmission 50 % erreicht.

Kurzpassfilter sperren ungewünschte längerwellige Bereiche und werden auch als cut-off-Filter bezeichnet, charakterisiert durch die cut-off-Wellenlänge bei der die Transmission auf 50 % gefallen ist.

Neutraldichtefilter weisen insbesondere im sichtbaren Bereich eine nahezu konstante Durchlässigkeit auf. Diese Filterart wird oft über die optische Dichte OD charakterisiert.

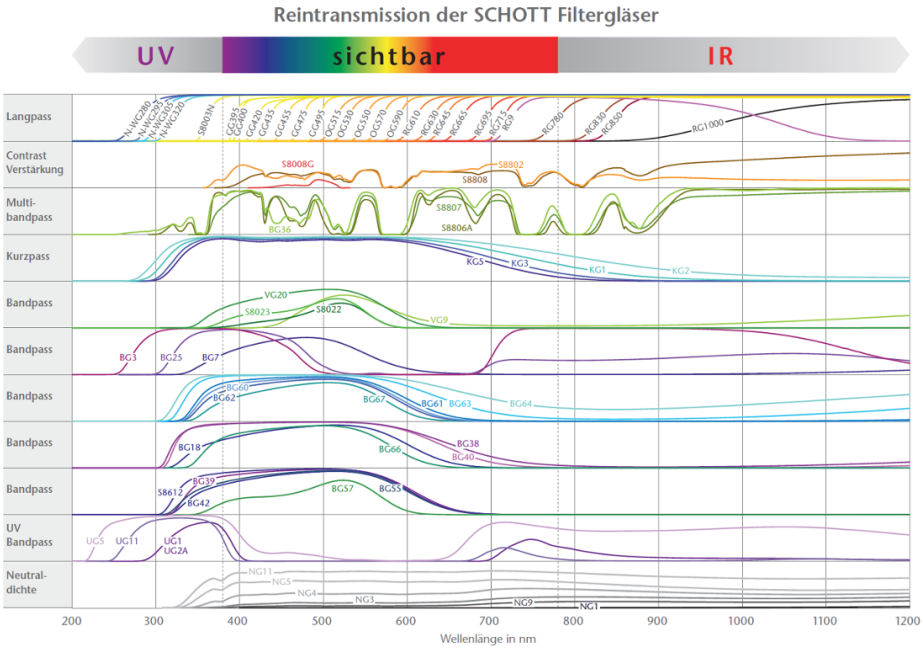
$$\mathrm{OD} = lg\frac{I_0}{I} = lg\frac{1}{\tau} = lg\frac{T}{100}$$

Beispiel : Eine NG-Platte lässt T = 50 % der auftreffenden Strahlung I_0 durch, dann beträgt das Verhältnis I_0/I = 2 bzw. der Transmissionsgrad τ =0,5. Die resultierende OD liegt bei 0,3.

τ	0,5	0,1	0,01	0,001
OD	0,3	1	2	3

Blockungsfilter sind funktionell negative Bandpassfilter, d.h. die Strahlung wird für einen bestimmten Spektralbereich abgeschwächt. Der Grad der Abschwächung wird auch über die optische Dichte spezifiziert.

Die spektralen Eigenschafen von Filtern werden oftmals durch die Kombination eines Farbglases mit einer dielektrischen Beschichtung eingestellt.



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.
Besondere Bedeutung haben diese Materialgruppen in der EUV-Lithografie (z.B. Waferplattformen (wafer stages), Reflexionsoptiken in Steppern).

Eigenschaften der Glaskeramik ZERODUR® (Schott) :

Mittlerer thermischer Ausdehnungskoeffizient (0°C – 50°C)	Dehnungsklasse 0	$0 \pm 20 \cdot 10^{-9}$/K
	Dehnungsklasse 1	$0 \pm 50 \cdot 10^{-9}$/K
	Dehnungsklasse 2 (Standard)	$0 \pm 100 \cdot 10^{-9}$/K
Thermische Leitfähigkeit (5°C – 35°C)	1,46 W/(mK)	
Dichte	2,53 g/cm^3	
Brechungsindex n_d (546,1 nm)	1,5424	
Abbesche Zahl v_d	56,1	

Eigenschaften der Glaskeramik CLEARCERAM^{TM}-Z (Ohara) :

	Clearceram-Z HS	Clearceram –Z Regular
Mittlerer thermischer Ausdehnungskoeffizient (0°C – 50°C)	$0 \pm 20 \cdot 10^{-9}$/K	$0 \pm 100 \cdot 10^{-9}$/K
Dichte		
Thermische Leitfähigkeit (5°C – 35°C)	1,54 W/(m·K)	1,51 W/(m·K)
Brechungsindex n_e (546,07 nm)	1,54662	1,54607
Abbesche Zahl v_e	54,6	55,2

Eigenschaften der Glaskeramiken von Corning :

	ULE® (Code 7972)	TSG
Mittlerer thermischer Ausdehnungskoeffizient (0°C – 50°C)	$0 \pm 30 \cdot 10^{-9}$/K	$0 \pm 100 \cdot 10^{-9}$/K
Thermische Leitfähigkeit (5°C – 35°C)	1,31 W/(m·K)	1,31 W/(m·K)
Dichte	2,21 g/cm^3	2,21 g/cm^3
Brechungsindex n_D (589,29 nm)	1,4828	--
Abbesche Zahl v_d	53,1	--

1.3. Quarzglas / 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 Material, 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 hergestellt werden, daher auch die englischen Bezeichnung *fused quartz.*
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 Zerstörschwelle 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) :

	Suprasil-Familie	Infrasil / HOQ
Mittlerer thermischer Ausdehnungskoeffizient (0°C – 50°C)	$590 \cdot 10^{-9}$/K	
Dichte	2,20 g/cm^3	
Thermische Leitfähigkeit (20°C)	1,38 W/(m·K)	
Brechungsindex n_e (546,07 nm)	1,4585	1,4586
Abbesche Zahl v_e	67,8	
Erweichungstemperatur	1600 °C	1730 °C
Max. Temperatur für kontinuierliche Anwendung	950 °C	1150 °C

Standardmäßig verwenden wir Quarzgläser von Heraeus und Corning. Es können aber auf Kundenwunsch auch Quarzgläser anderer Hersteller verwendet werden.

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.

Suprasil® 3001 und -3200
Einsatz im NIR-Bereich, z.B. 946 nm-Laserdioden

Suprasil® 311 und 312
Einsatz für IR-Laser (z.B. Nd:YAG oder Faserlaser mit 1064 & 1030 bzw. 1070 nm)

INFRASIL® 301 und 302
Die INFRASIL-Sorten werden ebenfalls aus natürlichem, kristallinem Quarz gewonnen und in elektrisch heizbaren Öfen aufgeschmolzen. Sie weisen einen sehr geringen OH-Gehalt auf. Dadurch wird die durch das OH bedingte Absorptionsbande bei 2,8-2,9 µm reduziert und die Gläser eignen sich somit gut für den Einsatz im IR-Spektralbereich.

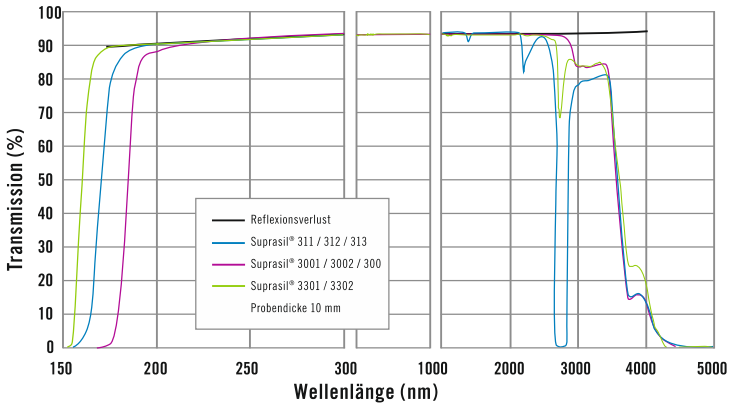
Bei **Corning** gibt es eine analoge Einteilung (HPFS-7980 für den UV-VIS-Bereich und HPFS-7979 und 8655 für den VIS-IR-Bereich).

Ohara bietet mit dem SK-1300 ebenfalls ein hochwertiges Quarzglas an. Es wird durch das VAD-Verfahren (vapour-phase axial deposition) hergestellt und zeichnet sich durch ein hohe Reinheit und einen geringen OH-Gehalt aus.

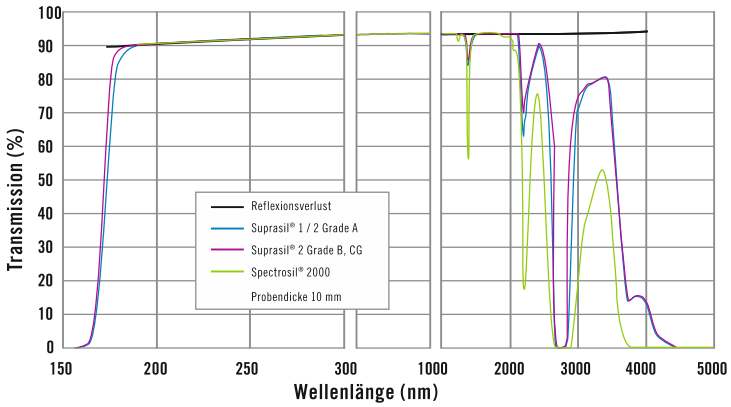
Transmissionskurven für Heraeus Quarzgläser

Typische Transmissionswerte und Fresnel-Reflexion (1-R)2

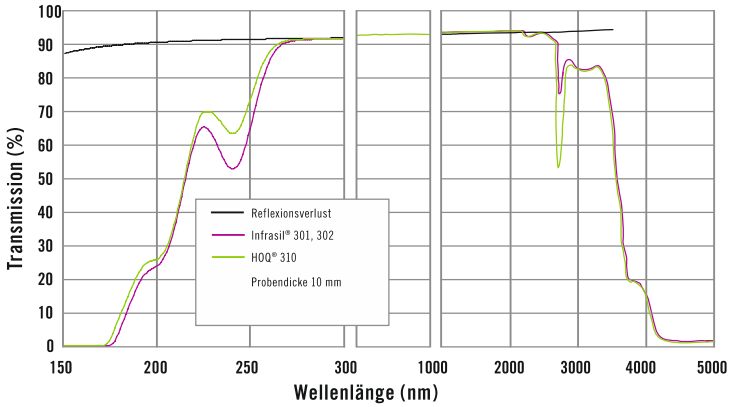
Suprasil® 311, 312, 313
Suprasil® 3001, 3002, 300
Suprasil® 3301 / 3302



Suprasil® 1, 1 ArF / KrF
Suprasil® 2 Grade A, 2 ArF / KrF
Suprasil® 2 Grade B, Suprasil® CG
Spectrosil® 2000



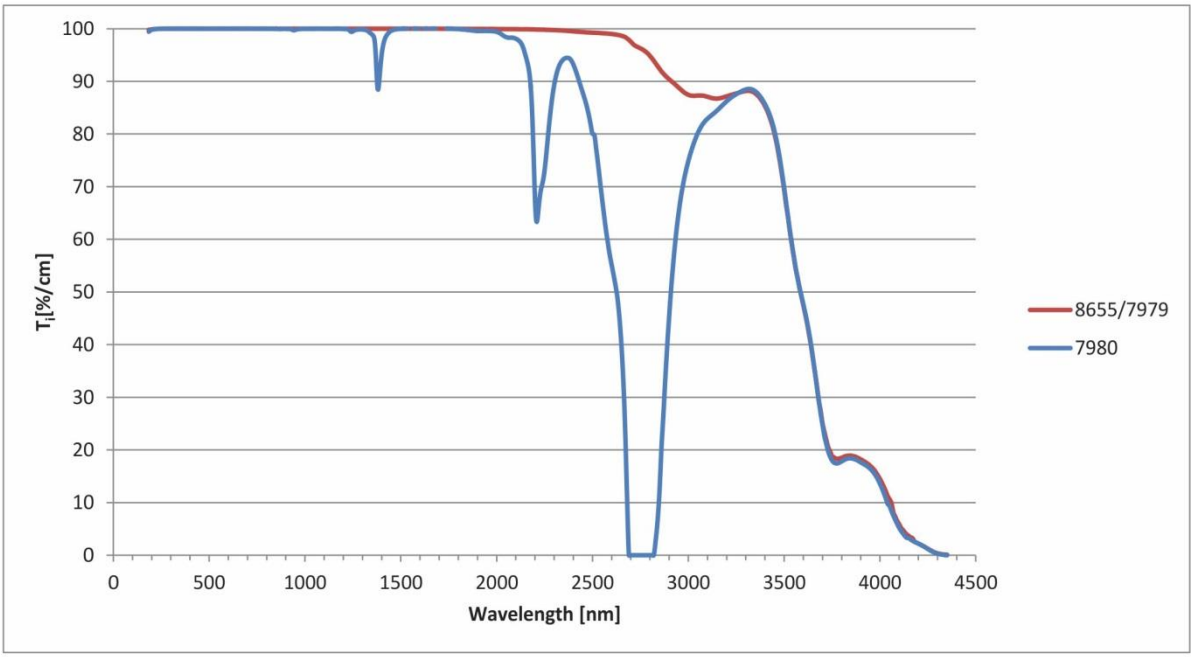
HOQ® 310
Infrasil® 301, 302



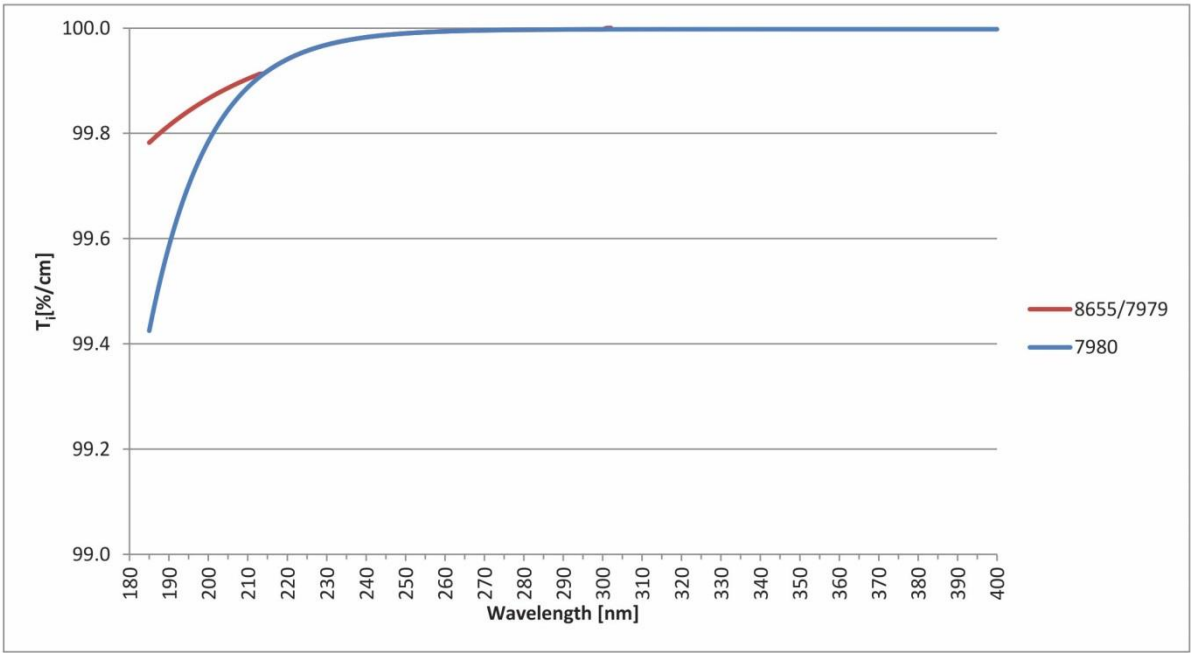
Die jeweils oberste Kurve der Transmissionsspektren gibt die berechneten Fresnel-Reflexionsverluste für zwei unbeschichtete Oberflächen wieder.

Transmissionskurven für Corning Quarzgläser

Broad Spectrum Internal Transmittance



UV Internal Transmittance



1.4. Optische Kristalle

Der wesentliche Unterschied zu den optischen Gläsern mit ihrer amorphen, isotropen Struktur ist durch den gitterförmigen und (abgesehen von kubischen Kristallen) damit anisotropen Aufbau gegeben. Die Kristallsysteme mit ihren jeweiligen Symmetrieachsen und –ebenen bewirken, eine Abhängigkeit des Brechungsindex vom Polarisationszustand und der Ausbreitungsrichtung des einfallenden Lichtes und generieren somit neue Eigenschaften, die in Optiksystemen genutzt werden.

Ein Beispiel ist die **Doppelbrechung**, d. h. die Aufspaltung von Licht, das auf den Kristall trifft, in einen ordentlichen und einen außerordentlichen Strahl, die sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit durch das Kristallmedium bewegen.

Durch die sog. **optische Aktivität** wird die Polarisationsebene linear polarisierten Lichtes um einen Winkel gedreht, der proportional zur im Kristall zurückgelegten Strecke ist.

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	Schmelz-temperatur	Transmissions-bereich	Brechungsindizees
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 mm - 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_2O_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
Kaliumdihydrogen-phosphat (KDP)	KH_2PO_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_2PO_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
Kaliumtitanyl-phosphat (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