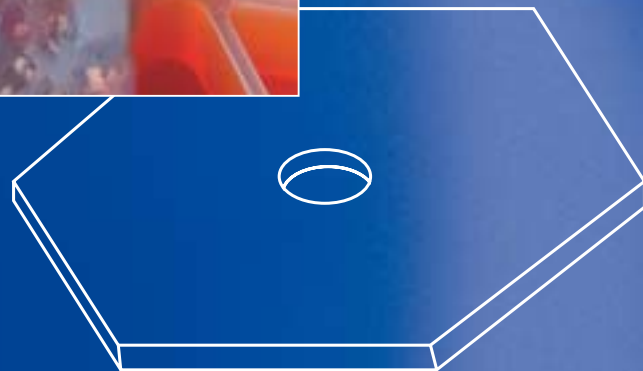


ZERODUR® Glaskeramik

Temperaturstabile Präzision und Qualität in Serie





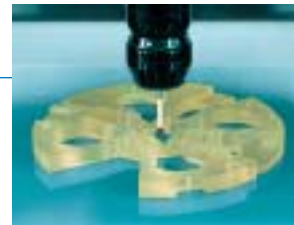
Inhalt



1. ZERODUR® hat außergewöhnliche Eigenschaften 4

2. Thermische Eigenschaften 6

3. Innere Eigenschaften 10



4. Mechanische Eigenschaften 12

5. Optische Eigenschaften 14

6. Elektrische Eigenschaften 16

7. Chemische Eigenschaften 17

8. Heliumpermeabilität 18

9. Lieferformen und Toleranzen 19



10. Notwendige Daten zur Angebotserstellung 20

1. ZERODUR® hat außergewöhnliche Eigenschaften

ZERODUR® ist ein Null-Ausdehnungs-Material mit außergewöhnlichen Eigenschaften. Es kommt überall dort zum Einsatz, wo höchste Form- und Abstandsgenauigkeiten durch Temperaturschwankungen nicht beeinträchtigt werden dürfen. Die wichtigsten Eigenschaften von ZERODUR® sind:

- der extrem niedrige thermische Ausdehnungskoeffizient
- dessen hervorragende Homogenität
- die hohe innere Qualität
- die gute Bearbeitbarkeit
- die hoch genaue Polierbarkeit
- die gute chemische Stabilität.

All diese Eigenschaften lassen sich sowohl in winzigen Elementen als auch in vielen Tonnen schweren

Bauteilen mit jeweils beispielloser Reproduzierbarkeit realisieren. In vielen spektakulären Anwendungen moderner Technik wurde ZERODUR® deshalb zu einem leistungs- und qualitätsbestimmenden Faktor:

- Optische Elemente für Lithographie
- Mechanische Bauteile hoher Präzision
- Spiegelträger astronomischer Großteleskope
- Normale in der Präzisionsmesstechnik
- Spiegelträger und optische Elemente für Röntgenteleskope, Wettersatelliten und Kometensonden

Was ist und wie entsteht ZERODUR®

ZERODUR® ist eine anorganische, porenfreie Glaskeramik. Diese Werkstoffe zeichnen sich dadurch aus, dass sie aus einer Phase von feinverteilten Nano-Kristalliten und einer Restglasphase bestehen. Die Herstellung läuft nach dem folgenden Verfahren ab: Nach den in der Glastechnologie üblichen Methoden wird zunächst aus besonders ausgewählten Rohstoffen ein Glas erschmolzen, geläutert, homogenisiert und schließlich heißgeformt.

Nach dem Abkühlen, Entspannen und einer ersten Bearbeitung des Rohlings folgt eine präzise Temperaturbehandlung, die sogenannte Keramisierung, bei der das Glas durch kontrollierte Volumenkristallisation in eine Glaskeramik überführt wird. Dabei bilden sich im Inneren des Glases Keime, auf denen bei leicht höherer Temperatur winzige Kristalle aufwachsen. Kristall- und Glasphase gemeinsam ergeben dann die Glaskeramik ZERODUR® mit ihren besonderen Eigenschaften.

Die Null-Ausdehnung

ZERODUR® enthält 70 bis 78 Gewichtsprozent kristalline Phase mit Hochquarzstruktur. Diese hat eine negative, die Glasphase eine positive thermische Längenausdehnung. Mit der Keramisierung steuert man den Volumenanteil und die Größe der Nano-Kristallite so, dass sich die

positive Ausdehnung der Restglasphase und die negative Ausdehnung der Kristallite gerade gegenseitig aufheben. So erreicht man die extrem niedrige thermische Ausdehnung, die in bestimmten Temperaturbereichen sogar Null oder leicht negativ werden kann.

Die Prozessschritte der Herstellung von ZERODUR® basieren auf Verfahren, die auch bei der Herstellung von hochhomogenem optischen Glas eingesetzt werden. ZERODUR® ist daher ein Werkstoff höchster Homogenität und zeigt auch in Großstücken mit Abmessungen von mehreren Metern kaum messbare

Schwankungen der thermischen und mechanischen Eigenschaften. Die optimierten Schmelz-, Gieß- und Temperverfahren bilden die Voraussetzung, um ZERODUR® auch in großen Stückzahlen in reproduzierbar hoher Qualität herstellen zu können.

Homogenität und Qualität in Serie



Ein Spiegelträgerguss von 2 m Ø wird in den Abkühlöfen eingebaut.

ZERODUR® hat eine völlig richtungsfreie Struktur und es besitzt eine porenfreie Oberfläche. Kristall- und Glasphase sind bezüglich chemischer Eigenschaften und Härte optischen

Gläsern ähnlich, so dass ZERODUR® mit den gleichen Maschinen und Werkzeugen wie optische Gläser bearbeitbar ist (z.B. Schneiden, Schleifen und Polieren).

ZERODUR® – ungewöhnlich in den Eigenschaften, leicht zu bearbeiten

In der Lithographie sorgen Spiegelträger und andere wichtige optische Komponenten aus ZERODUR® für präzise Abbildungen von Strukturen. In der Mechanik beweist ZERODUR® seine außergewöhnliche thermische Längenstabilität bei der exakten Justierung wichtiger Bauteile. Für astronomische Teleskope und Röntgenteleskope ist ZERODUR® der ideale Spiegelträger, da hier temperaturbedingte Veränderungen des Spiegels die Qualität der Beobachtungsgüte beeinträchtigen würden. ZERODUR® sorgt dafür, dass mit kleineren und leichteren Spiegeln bessere optische Leistungen

erzielt werden können. Bei mehreren Teleskopen der 10 m-Klasse hat SCHOTT seine Fähigkeit unter Beweis gestellt, Serien von Spiegelträgersegmenten von 1 bis 2 m Durchmesser zuverlässig auf gleichbleibend höchstem Qualitäts-Niveau zu liefern. Dies ist eine zwingende Voraussetzung für den Bau von extrem großen Teleskopen mit Spiegeln von 20 bis 100 m Durchmesser. Bei Laser-Gyroskopen bildet ZERODUR® den temperaturunabhängigen Formkörper. Die niedrige Heliumpermeabilität sorgt für eine lange Lebensdauer.

ZERODUR® – vielseitig in der Anwendung

2. Thermische Eigenschaften

Mittlerer Koeffizient der thermischen Längenausdehnung

Die wichtigsten und herausragenden Eigenschaften der Glaskeramik ZERODUR® sind der verschwindend kleine Koeffizient der thermischen

Für einzelne ZERODUR® Stücke kann der mittlere thermische Längenausdehnungskoeffizient α im Temperaturbereich 0° bis 50° C in folgenden drei Dehnungsklassen geliefert werden:

Dehnungsklasse 0 $0 \pm 0,02 \cdot 10^{-6}/K$

Dehnungsklasse 1 $0 \pm 0,05 \cdot 10^{-6}/K$

Dehnungsklasse 2 $0 \pm 0,10 \cdot 10^{-6}/K$

Wenn nicht ausdrücklich anders verlangt, wird Material bis Dehnungsklasse 2 geliefert. Engere Toleranzen auf Anfrage.

Der charakteristische Verlauf des Koeffizienten der thermischen

Längenausdehnung sowie die Homogenität dieses Koeffizienten im gesamten Werkstück.

Längenausdehnung α ist in Abbildung 1 dargestellt. Im gesamten Temperaturbereich zeigt ZERODUR® eine sehr geringe Längenänderung, sie ist besonders gering im Bereich der Raumtemperatur.

Die Messunsicherheit bei der α -Messung im Temperaturbereich 0° bis 50° C beträgt $\pm 0,01 \cdot 10^{-6}/K$, die Wiederholgenauigkeit der Einzelmessung ist $\pm 0,005 \cdot 10^{-6}/K$ (95 %-Niveau).

Auf Anfrage können Einzelmessungen mit höherer Wiederholgenauigkeit durchgeführt werden.

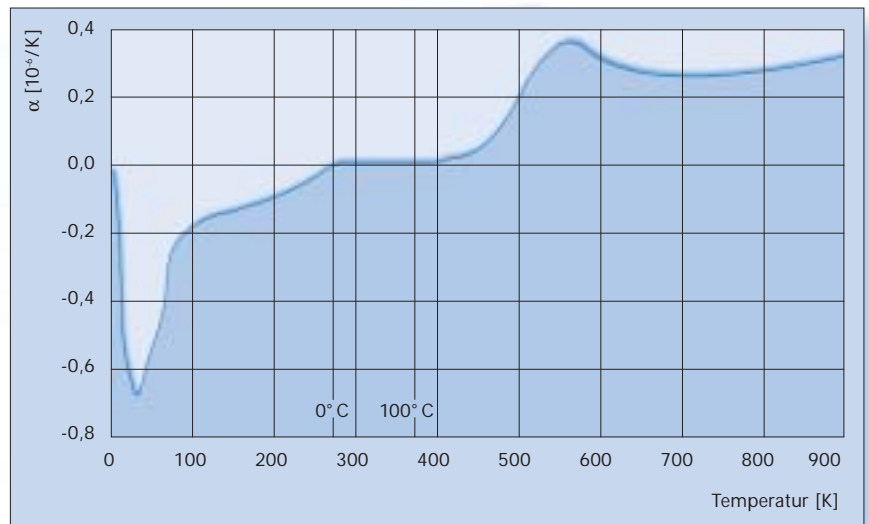


Abb. 1: Der Koeffizient der thermischen Längenausdehnung von ZERODUR® in Abhängigkeit von der Temperatur

Homogenität des Koeffizienten der thermischen Längenausdehnung

Die Abbildung 2 zeigt eine Auswertung der Homogenität des Längenausdehnungskoeffizienten von über 200 ZERODUR® Spiegelträgern. Aufgetragen wurde die Häufigkeit der Abweichung der auf dem Spiegel verteilten Einzelmessung vom Mittelwert der Scheibe. 95,5 % der Einzelmesswerte liegen in

einem Intervall von $\pm 0,007 \cdot 10^{-6}/K$ um den Mittelwert. Dieses Intervall ist nur geringfügig größer als allein aufgrund der Wiederholgenauigkeit der Einzelmessung zu erwarten wäre. Das bedeutet, dass die tatsächliche Homogenität von ZERODUR® in vielen Fällen besser als die Nachweisgrenze der Messmethodik ist.

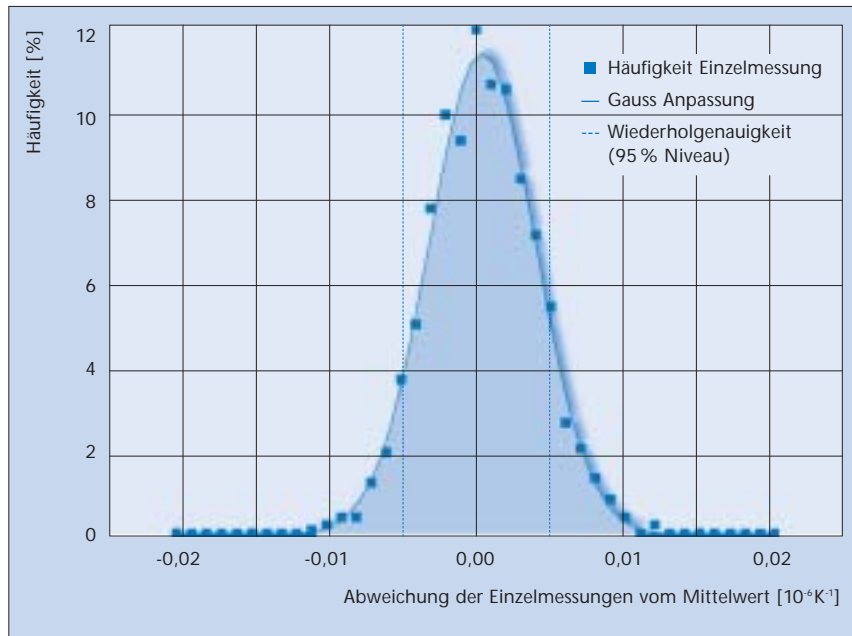


Abb. 2: Homogenität des Längenausdehnungskoeffizienten: Einzelmessungen von mehr als 200 Spiegelträgern mit 1 bis 2 m Größe

In den folgenden Gewichtsklassen je Einzelteil können die angegebenen Grenzwerte der Homogenität für die Längenausdehnung gewährleistet werden, wenn der Durchmesser der

Teile mindestens doppelt so groß ist wie ihre Dicke:

bis 18,0 Tonnen $\leq 0,03 \cdot 10^{-6}/K$

bis 6,0 Tonnen $\leq 0,02 \cdot 10^{-6}/K$

bis 0,3 Tonnen $\leq 0,01 \cdot 10^{-6}/K$

In besonderen Anwendungsfällen ist der Betrag der maximalen Längenänderung eines ZERODUR® Teils in einem vorgegebenen Temperaturintervall für seine Funktion ausschlaggebend (z. B. Laser Gyroskope). Im Bereich von -50° bis $+100^{\circ}$ C ist er in der Regel kleiner als $10 \cdot 10^{-6}$, bezogen auf die Gesamtlänge des Teils. Auf Anfrage ist ZERODUR®

auch mit kleineren Werten lieferbar. Die typische relative Längenänderung $\Delta l/l$ von ZERODUR® bezogen auf 0° C zeigt die Abbildung 3. Die Messungen wurden von CSIRO (National Measurement Laboratory in Sydney, Australien) im Temperaturbereich 2 bis 125 K und von SCHOTT im Temperaturbereich 90 bis 900 K durchgeführt.

Maximale Längenänderung in einem vorgegebenen Temperaturintervall

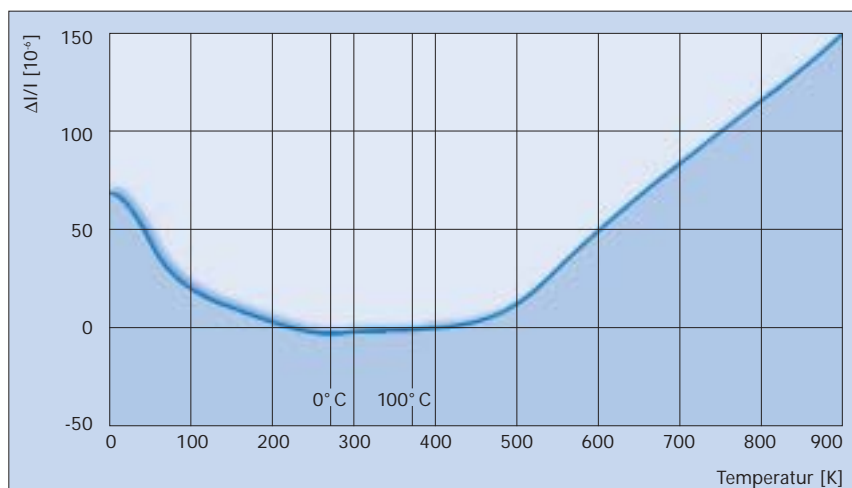


Abb. 3: Die relative Längenänderung von ZERODUR® in Abhängigkeit von der Temperatur

Wärmeleitfähigkeit

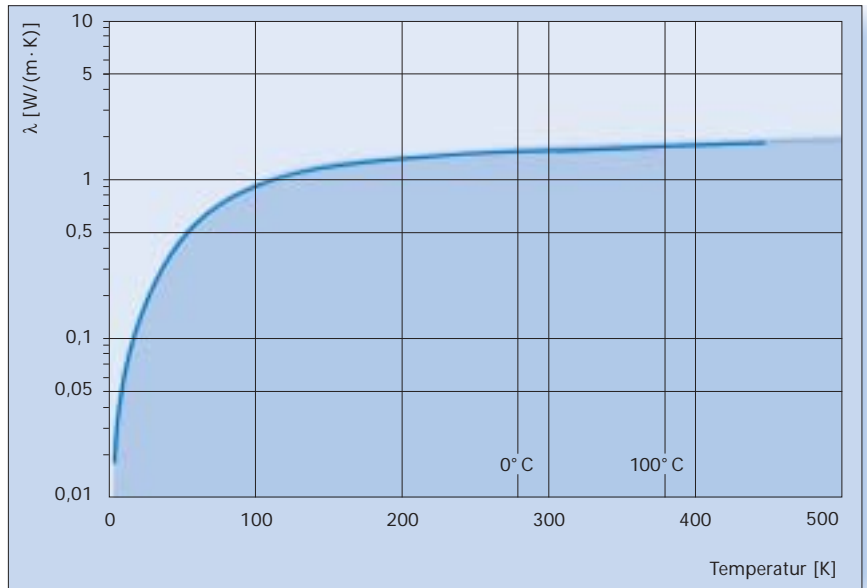


Abb. 4: Die Wärmeleitfähigkeit von ZERODUR® in Abhängigkeit von der Temperatur

Wärmeleitfähigkeit λ bei 20° C [W/(m·K)]	1,46
Temperaturleitzahl a bei 20° C [10^{-6} m ² /s]	0,72

Spezifische Wärmekapazität

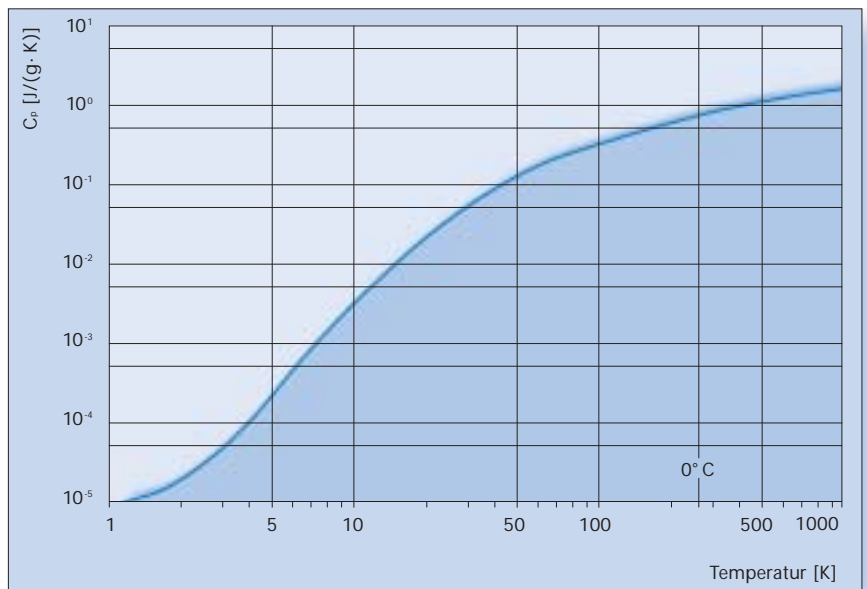
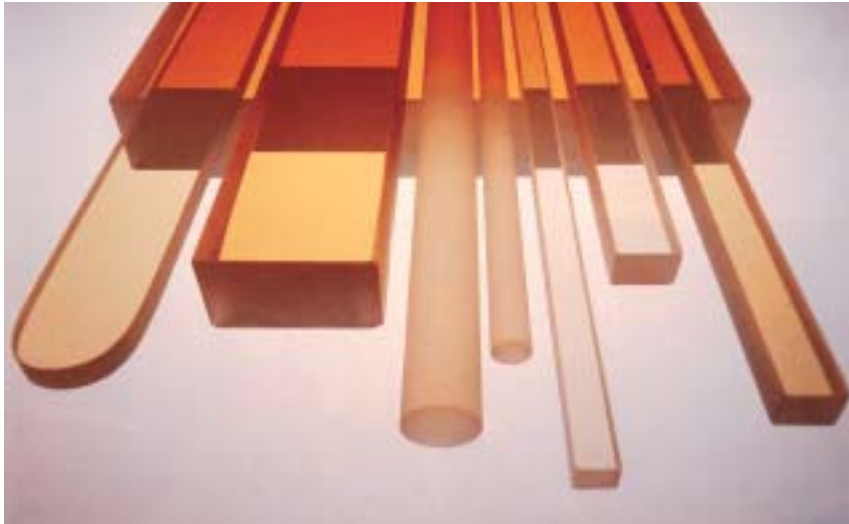


Abb. 5: Die spezifische Wärmekapazität von ZERODUR® in Abhängigkeit von der Temperatur

Spezifische Wärmekapazität c_p bei 20° C [J/(g·K)]	0,80
--	------



*Verschiedene Substratformen
für die Präzisionsmesstechnik*

Bei Verwendung von ZERODUR® als mechanischem Bauteil sind Temperaturen bis 600° C zulässig. Bei Bauteilen mit höchster optischer Präzision können sich geringfügige Änderungen des thermischen Längenausdehnungskoeffizienten α (0° C, 50° C) einstellen, die auf kunden- oder anwenderseitige

Temperaturbehandlungen zurückzuführen sind. Weicht die Endkühlrate RE von der Primärkühlrate RP insbesondere im Temperaturbereich 320° C bis 130° C ab, kann eine Veränderung des thermischen Längenausdehnungskoeffizienten α (0° C, 50° C) mit folgender Beziehung abgeschätzt werden:

$$\Delta \alpha (0^\circ \text{ C}, 50^\circ \text{ C}) = 0,025 \cdot \log_{10} \left\{ \frac{R_E}{R_P} \right\} \cdot 10^{-6} / \text{K}$$

Bei der Herstellung wird ZERODUR® in der Regel größenabhängig mit einer Primärkühlrate zwischen 1°/h und 6°/h gekühlt. Eine Änderung des thermischen Längenausdehnungskoeffizienten erfolgt nicht, wenn die Abkühlung von Temperaturen über

320° C analog der Primärkühlrate erfolgt. Bis 130° C kann die Glaskeramik ZERODUR® abweichenden Temperaturbehandlungen unterworfen werden, ohne dass Änderungen des Längenausdehnungskoeffizienten α (0° C, 50° C) erfolgen.

Lassen sich bei höchsten Anforderungen an die thermische Längenausdehnung während der Weiterbearbeitung oder im Gebrauch von ZERODUR® im kritischen Temperaturbereich andere Abkühlgeschwindigkeiten als die Primärkühlrate nicht vermeiden,

so wird um Rückfrage gebeten. Wenn die Kühlrate durch den Kunden nicht beeinflusst werden kann, empfiehlt es sich, den Einsatz von ZERODUR® M, einer Materialvariante von ZERODUR®, zu prüfen.

Maximale Anwendungstemperatur

ZERODUR® M

3. Innere Eigenschaften

Die innere Qualität von ZERODUR® wird im wesentlichen bestimmt durch:

- Einschlüsse
- Körperspannung
- Schlieren

Einschlüsse

Einschlüsse in ZERODUR® lassen sich nicht völlig vermeiden. In der Regel handelt es sich dabei hauptsächlich um Blasen und vereinzelt um feste Einschlüsse. Auf die Funktion des ZERODUR® als mechanisches Bauteil oder Trägermaterial für Flächen höchster Güte haben sie keine Auswirkung, sofern sie vollständig im Volumen liegen. Die Wahrscheinlichkeit, dass einzelne Einschlüsse in der optisch bearbeiteten Endfläche liegen, ist sehr gering. Sie lässt sich weiter senken durch die Angabe des Volumenbereiches, in dem die funktionstragende Fläche zu liegen kommt. Bei der Angabe dieses kritischen Volumens

werden ZERODUR® Teile so ausgesucht und bearbeitet, dass erhöhte Anforderungen erfüllt werden. Bei der Prüfung der ZERODUR® Teile werden alle Einschlüsse mit einem Durchmesser > 0,3 mm berücksichtigt. Auf Anforderung können andere Grenzen festgelegt werden. Wenn ein Einschluss eine andere als die Kugelform aufweist, dann wird der aus der Längs- und Querschnittsberechnete mittlere Durchmesser gewertet. Einschlüsse in ZERODUR® werden nach den Stufen „Standard“ und Klasse 0 bis 4 unterschieden. Die Grenzwerte dieser Qualitätsstufen sind in Tabelle 1 angegeben.

	Standard	Klasse 4	Klasse 3	Klasse 2	Klasse 1	Klasse 0
mittlere Anzahl Einschlüsse pro 100 ccm Material	5	5	4	3	2	1
maximaler Durchmesser einzelner Einschlüsse in mm bei verschiedenen Durchmessern bzw. Diagonalen des Teils						
im kritischen Volumen						
< 500 mm	1,4	1,2	1,0	0,8	0,6	0,4
< 2.000 mm	2,0	1,8	1,6	1,5	1,2	1,0
< 4.000 mm	3,0	2,5	2,0	1,8	1,6	1,5
im unkritischen Volumen						
< 500 mm	3,0	2,0	1,5	1,0	0,8	0,6
< 2.000 mm	6,0	5,0	4,0	3,0	3,0	3,0
< 4.000 mm	10,0	8,0	6,0	6,0	6,0	6,0

Tab. 1: Qualitätsstufen für Einschlüsse in ZERODUR®

Körperspannung

Alle ZERODUR® Teile werden im Rahmen der Keramisierung einer Präzisionskühlung unterzogen, um eine kleine Körperspannung und zugleich eine symmetrische Spannungsverteilung zu erzielen. Die Körperspannung bewirkt eine optische Spannungsdoppelbrechung, die als Gangunterschied gemessen werden kann. Die Messung des Gangunterschiedes erfolgt bei Stäben und

Rundscheiben in axialer Richtung bei 5 % des Durchmessers vom Rand. Bei rechteckigen Platten wird die Messung in der Mitte der längeren Seite senkrecht zur Plattenfläche durchgeführt. Der Randabstand des Messpunktes beträgt 5 % der Plattenbreite. Die Körperspannung wird in zwei Qualitätsstufen für verschiedene Größenklassen der ZERODUR® Teile in Tabelle 2 angegeben.

Spannungsdoppelbrechung [nm/cm] für Teile mit Durchmesser oder Diagonale		
	Standard	Klasse 4
< 500 mm	6	4
< 2.000 mm	12	10
< 4.000 mm	15	12

Tab. 2: Qualitätsstufen für Körperspannungen in ZERODUR®

Schlieren sind örtlich eng begrenzte, transparente Bereiche, die sich in ihrer Zusammensetzung nur sehr wenig vom Grundstoff unterscheiden. Sie sind im allgemeinen räumlich ausgedehnte bandförmige Schlieren, manchmal aber auch lokal und fadenförmig. Die Schlierenqualität von ZERODUR® wird mit einer spannungsoptischen Methode geprüft und bei fadenförmigen Schlieren als Gangunterschied in nm pro Schliere angegeben. Die in Tabelle 3 angegebenen

Schlierenspannungen gelten als Maximalwerte für 5 Qualitätsstufen bei verschiedenen Durchmessern bzw. Diagonalen des ZERODUR® Teiles. Bei bandförmigen Schlieren wird der Gangunterschied in nm/cm Schlierenlänge angegeben. In diesem Fall gelten die in der Tabelle 4 angegebenen Spannungsstufen. Bei verschärften Schlierenforderungen wird mit einem Schattenverfahren geprüft, dessen Empfindlichkeit es erlaubt, feine in Prüfrichtung sichtbare Schlieren zu finden.

Schlieren

Schlierenspannung für Teile mit Durchmesser oder Diagonale	Standard	Klasse 4	Klasse 3	Klasse 2	Klasse 1
< 500 mm	60	45	30	5	
< 2.000 mm	60	45	30*	30*	5*
< 4.000 mm	60	45	30*	30*	30*

* gilt nur für das kritische Volumen im Bereich funktionstragender Oberflächen.
Außerhalb wie Klasse 4

Tab. 3: Qualitätsstufen für Schlierenspannung in ZERODUR®

Schlierenspannung (in nm/cm Schlierenlänge) für Teile mit Durchmesser oder Diagonale	Standard	Klasse 4	Klasse 3	Klasse 2	Klasse 1
< 500 mm	2,5	2	1,5	0	0
< 2.000 mm	2,5	2	1,5	1	0
< 4.000 mm	2,5	2	1,5	1	0

Tab. 4: Qualitätsstufen für Schlierenspannung (bandförmige Schlieren) in ZERODUR®

Bei Anforderungen, die über die genannten für Einschlüsse, Schlieren, Körperspannungen hinausgehen, wird um Anfrage gebeten. Wenn

bei Auftragserteilung keine anderen Qualitäten spezifiziert werden, so wird ZERODUR® in Standard-Qualität geliefert.

Sonderanforderungen (Höhere Qualitätsstufen)

4. Mechanische Eigenschaften

Zeitliche Längenstabilität

Seit 1973 sind 400 mm lange Endmaße aus ZERODUR® interferometrisch bei der PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) direkt an ein internationales Wellenlängennormal angeschlossen. Die Stäbe lagern bei 20° C und verkürzen sich sehr wenig, jedoch gesetzmäßig. Interpolationsformeln, die aus den

bisherigen Messungen und mit Hilfe von theoretischen Betrachtungen abgeleitet wurden, gestatten Voraussagen für zu erwartende Längenänderungen von ZERODUR® in Abhängigkeit von der Zeit. In formaler Analogie zum thermischen Längenausdehnungskoeffizienten α gilt:

$$l = l_0 (1 + A \cdot \Delta t)$$

Der Wert von A ist bei isothermer Lagerung stets negativ. Er hängt vom Kühlprozess und vom Alter der

Probe ab und hat die Größenordnung $|A| < 10^{-7}/a$.

Elastizitätsmodul E

Der Elastizitätsmodul ist in Abbildung 6 für eine typische Schmelze als Funktion der Temperatur angegeben.

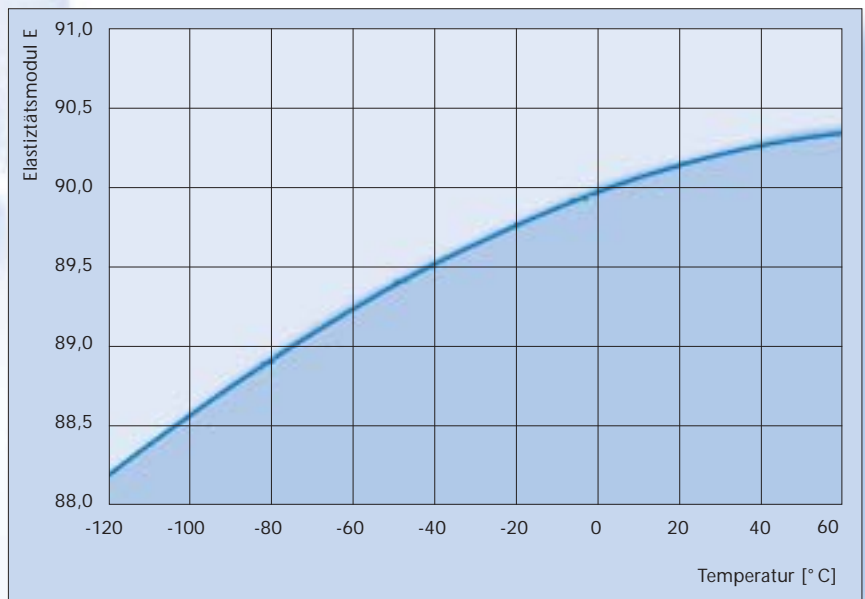


Abb. 6: Der Elastizitätsmodul von ZERODUR® in Abhängigkeit von der Temperatur

Elastizitätsmodul E bei 20° C [GPa]-Mittelwert

90,3

Die praktische Biegefestigkeit von Gläsern und Glaskeramiken ist keine Materialkonstante. Sie hängt insbesondere von folgenden Faktoren ab:

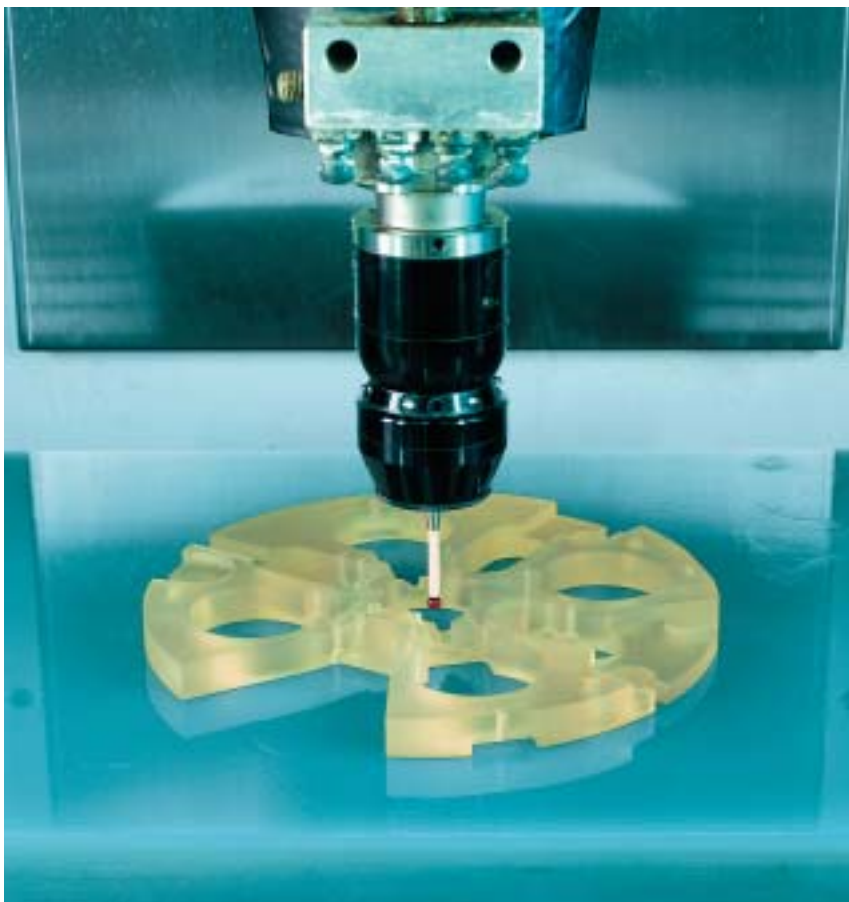
- mechanischer Bearbeitungszustand der zugbeanspruchten Oberfläche
- Größe der zugbeanspruchten Oberfläche
- zeitlicher Verlauf der Prüfspannungen
- umgebendes Medium, in der Regel Luft

In der Regel wird die Biegefestigkeit als Bruchwahrscheinlichkeit angegeben. Zur Beschreibung des statistischen Bruchverhaltens hat sich die Weibull-Verteilung bewährt. Messdaten für verschiedene Oberflächenzustände und weitere Informationen über die Festigkeit von Zerodur® können wir zur Verfügung stellen. In vielen Anwendungsfällen kann als Berechnungskennwert für die Biegefestigkeit ein Wert von 10 MPa angenommen werden. Dies gilt z. B. für kleine Objekte mit kratzerfreien Oberflächen.

Biegefestigkeit

Poisson Zahl μ	0,243
Dichte ρ [g/cm ³]	2,53
Knoophärte HK 0,1/20 nach ISO 9385	620

Weitere mechanische Eigenschaften



Messkopf einer hochpräzisen Bearbeitungsmaschine für komplexe Strukturen

5. Optische Eigenschaften

Brechzahlen Abbe-Zahlen

Wellenlänge [nm]	Bezeichnung	Brechzahl n	Abbe-Zahl v
656,3	C	1,5394	
643,8	C'	1,5399	
587,6	d	1,5424	56,1
546,1	e	1,5447	55,9
486,1	F	1,5491	
480,0	F'	1,5497	
435,8	g	1,5544	

Tab. 5: Brechzahlen und Abbe-Zahlen von ZERODUR®

Hauptdispersion

$n_F - n_C$	0,00967
$n_{F'} - n_{C'}$	0,00975

Temperaturkoeffizient der Lichtbrechung

$\Delta n/\Delta T$ ist von der Wellenlänge λ , von der Temperatur T und vom Luftdruck p abhängig. Man unterscheidet zwei Möglichkeiten, diese Abhängigkeiten anzugeben:

- beim relativen Temperaturkoeffizienten $\Delta n_{\text{relativ}}/\Delta T$ besitzen der Werkstoff und die umgebende Luft die gleiche Temperatur. Die Angaben gelten für den Luftdruck $p = 0,10133 \text{ MPa}$.
- der absolute Temperaturkoeffizient $\Delta n_{\text{absolut}}/\Delta T$ gilt für Vakuum.

Beide Koeffizienten werden für verschiedene Temperaturbereiche und Wellenlängen in Tabelle 6 angegeben. Diese Angaben sind Richtwerte.

Da ZERODUR® eine Restglasphase von etwa 22 bis 30 Gewichtsprozent enthält, lassen sich Brechzahl und Dichte mit der Kühlgeschwindigkeit im Kühlgebiet beeinflussen. Der Effekt ist geringer als beim reinen Glas.

Temperatur °C	$\Delta n_{\text{relativ}}/\Delta T [10^{-6}/K]$					$\Delta n_{\text{absolut}}/\Delta T [10^{-6}/K]$				
	C'	d	e	F'	g	C'	d	e	F'	g
-100/-80	12,2	12,4	12,5	12,8	13,2	8,6	8,7	8,8	9,1	9,4
-80/-60	12,4	12,6	12,7	13,0	13,4	9,4	9,6	9,7	10,0	10,3
-60/-40	12,7	12,9	13,0	13,4	13,8	10,3	10,4	10,5	10,9	11,2
-40/-20	13,1	13,3	13,4	13,8	14,2	11,0	11,2	11,3	11,7	12,1
-20/0	13,5	13,7	13,9	14,3	14,7	11,8	11,9	12,1	12,5	12,9
0/20	14,0	14,1	14,3	14,7	15,2	12,4	12,6	12,8	13,2	13,6
20/40	14,4	14,6	14,8	15,2	15,7	13,1	13,2	13,4	13,9	14,3
40/60	14,8	15,0	15,2	15,7	16,0	13,6	13,8	14,0	14,5	14,9
60/80	15,2	15,4	15,6	16,1	16,6	14,2	14,4	14,6	15,0	15,5
80/100	15,6	15,8	16,0	16,5	17,0	14,6	14,9	15,1	15,6	16,1
100/120	15,9	16,1	16,3	16,9	17,4	15,4	15,3	15,5	16,0	16,6
120/140	16,2	16,7	16,7	17,2	17,8	15,4	15,7	15,9	16,4	17,0

Tab. 6: Der relative und absolute Temperaturkoeffizient der Lichtbrechung von ZERODUR® im Bereich -100° C bis +140° C

ZERODUR® ist ein transparentes Material. Die Kristallphase führt zu einem wellenlängenabhängigen Streuverhalten, wie es für die Rayleigh-Streuung typisch ist.

Dargestellt ist dies in Tabelle 7 mit Hilfe der R_{90} -Werte. Sie sind ein Maß für den Anteil des unter 90° gestreuten Lichtes pro Wellenlänge des beobachteten Primärstrahls.

Rayleigh-Streuung

Wellenlänge [nm]	R_{90} [$10^{-3}/\text{cm}$]
404,7	23
435,8	16
546,1	6
578,1	5

Tab. 7: Rayleigh-Streuung von ZERODUR®

Die hohe Lichttransmission von ZERODUR® im sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich ist in Abbildung 7 dargestellt. Diese Angaben sind Richtwerte.

Transmission

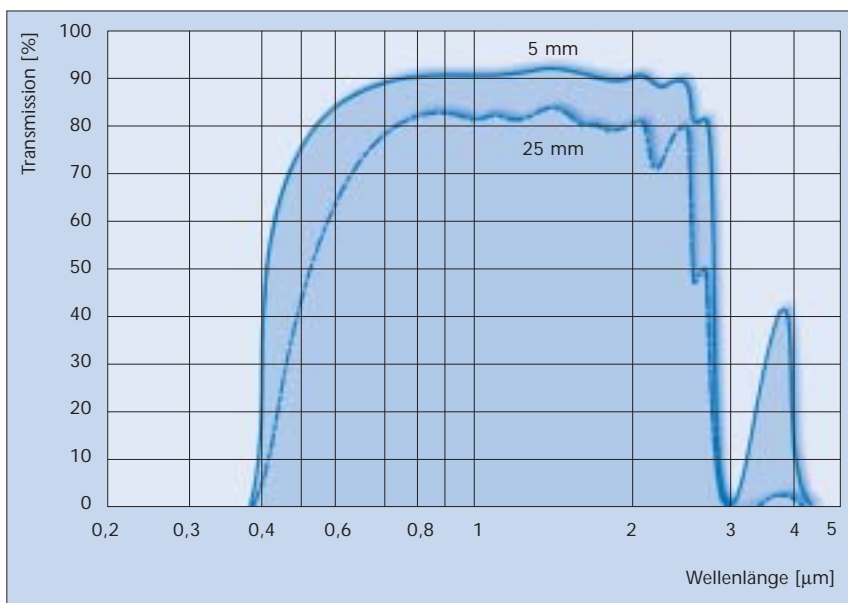


Abb. 7: Die Lichttransmission von ZERODUR® bei 5 und 25 mm Probendicke

K bei $\lambda = 589,3 \text{ nm}$ [10^{-6} MPa^{-1}]

3,0

Spannungsoptischer Koeffizient K

6. Elektrische Eigenschaften

Spezifischer elektrischer Widerstand

Der spezifische elektrische Widerstand ρ ist für unterschiedliche Temperaturen in Tabelle 8 angegeben.

Temperatur [°C]	spezifischer Widerstand ρ [$\Omega \cdot \text{cm}$]
20	$2,6 \cdot 10^{13}$
100	$1,3 \cdot 10^{10}$
200	$3,5 \cdot 10^7$
300	$7,4 \cdot 10^5$
400	$4,9 \cdot 10^4$
500	$6,6 \cdot 10^3$
600	$1,4 \cdot 10^3$

Tab. 8: Der spezifische elektrische Widerstand von ZERODUR®

t_{k100} [°C], Temperatur für $\rho = 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$

178

Dielektrische Eigenschaften bei 20° C

Tab. 9: Dielektrische Eigenschaften von ZERODUR®

	bei 1kHz	bei 1MHz
Dielektrizitätszahl ϵ	8,0	7,4
Verlustfaktor $\tan \delta$	$29 \cdot 10^{-3}$	$15 \cdot 10^{-3}$

Gewichtserleichterte Spiegelträger:
leicht und stabil



7. Chemische Eigenschaften

<u>Gieß-Wasserbeständigkeitsklasse (ISO 719)</u>	HGB 1	Hydrolytische Beständigkeit
<u>Säureresistenzklasse (ISO 8424)</u>	1.0	Säureresistenz (SR)
<u>Alkaliresistenzklasse (ISO 10629)</u>	1.0	Alkaliresistenz (AR)
<u>Klimaresistenzklasse</u>	1	Klimaresistenz
<u>Fleckenresistenzklasse</u>	0	Fleckenresistenz

Bei Raumtemperatur hinterlassen Säuren (mit Ausnahme von Flusssäure), Laugen, Salze und Farblösungen keine bleibenden Spuren auf ZERODUR® Oberflächen (Einwirkungszeit 170 h). Konzentrierte Schwefelsäure greift bei höherer Temperatur den Werkstoff an.

Die Bau- und Isolierstoffe Glimmer, Schamotte, MgO und SiO₂ reagieren mit ZERODUR® bei Temperatur bis 600° C bei 5 Stunden Einwirkungszeit noch nicht merklich. Dagegen reagiert Emaille ab 560° C unter Zerstörung der Oberfläche.

Reaktionsfähigkeit in Kontakt mit anderen Stoffen

ZERODUR® lässt sich z. B. mit Aluminium verspiegeln. Aufgrund der guten chemischen Resistenz des Materials kann die Spiegelschicht mehrfach abgelöst, die polierte Fläche gereinigt und wieder bedampft

werden. Für die Ablösung der Spiegelschichten und Reinigung der polierten Oberflächen wurde ein Verfahren optimiert (siehe Produktinformation Nr. 3097).

Mehrfachverspiegelung

8. Heliumpermeabilität

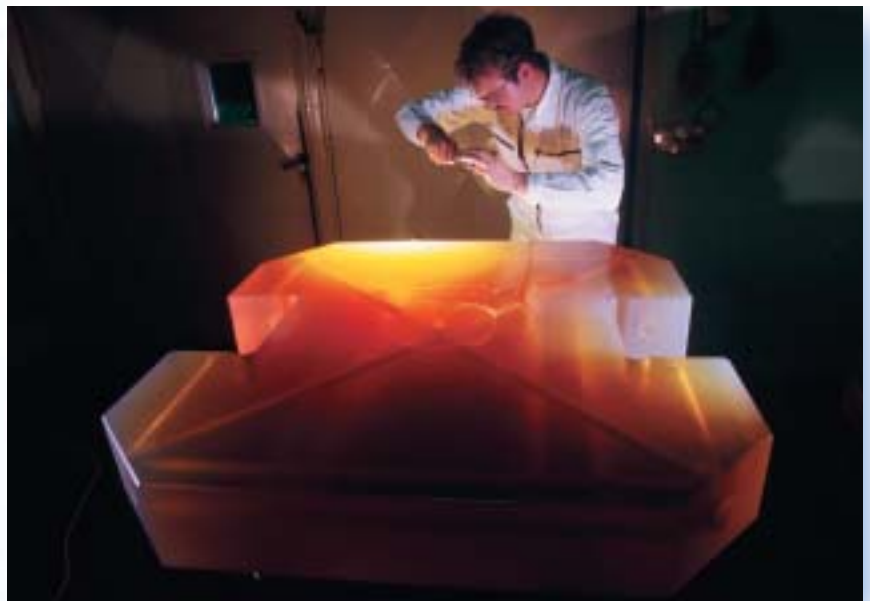
Ein wichtiges Anwendungsgebiet von ZERODUR® sind Lasergyroskope. Diese Technik der Winkelmessung in der Navigation von Flugzeugen, Hubschraubern, Raketen, Schiffen und anderen Verkehrsmitteln basiert auf dem Sagnac-Effekt und erfordert Gehäusebauteile mit einer besonders geringen Durchlässigkeit für

Heliumatome. Die Gasfüllung soll über einen möglichst großen Zeitraum erhalten bleiben. Wegen der außergewöhnlich geringen Heliumpermeabilität und wegen des geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten ist die Glaskeramik ZERODUR® für diese Anwendung besonders geeignet.

Heliumpermeabilität [Atome/(cm · s · bar)]

bei 20° C	$1,6 \cdot 10^6$
bei 100° C	$5,0 \cdot 10^7$
bei 200° C	$7,2 \cdot 10^8$

Die geringe Heliumpermeabilität macht ZERODUR® zum bevorzugten Material für Lasergyroskope.



9. Lieferformen und Toleranzen

ZERODUR® ist lieferbar in Form von Rundscheiben bis zu einem Durchmesser von 2,5 m und in Form von Quadern, Prismen, Stäben und Zuschnitten mit Maßen bis ca. 2,5 m. Die Technologie der Fertigung größerer Volumina wird beherrscht. Bei Bedarf größerer Abmessungen erbitten wir eine Anfrage. Spezielle Formen und Vorbearbeitungen sind möglich und erleichtern so

Je nach Geometrie werden einfache Rundscheiben und Platten mit Standardtoleranzen von $\pm 0,5$ mm hergestellt. Selbstverständlich können auch deutlich engere Toleranzen angeboten werden. Hier sind unter anderem Toleranzen für Winkel, Ebenheiten, Flächenformen, Rundläufe und ggf. andere Form- und Lagemerkmale anzufragen. Bei Bestellung von Teilen, deren Geometrie nicht durch die einfache Angabe von Länge, Breite, Dicke

den direkten Einsatz bei unseren Kunden. Moderne CNC-Bearbeitungsmaschinen, leistungsfähige Diamantwerkzeuge und hohes Know-how in der Bearbeitung erlauben es, eine Vielzahl geometrischer Formen zu erzeugen. Bohrungen, Hinterschliffe, Sacklöcher und Freiformflächen sind nur einige Beispiele aus den herstellbaren Geometrien.

bzw. Durchmesser und Dicke zu beschreiben ist, wird eine entsprechende Zeichnung erstellt.

Alle Teile werden mit einer Facette zum Schutz gegen Kantenbeschädigungen versehen. Die Oberflächen der Teile sind üblicherweise so bearbeitet, dass Rauheitswerte von $Ra \leq 3,5 \mu\text{m}$ erreicht werden. Werden feinere Oberflächen benötigt, wird um Anfrage gebeten.

Maß- und Formtoleranzen



Moderne Koordinatenmesstechnik in der Endprüfung von ZERODUR®

10. Notwendige Daten zur Angebotserstellung

Um ein schnelles Angebot zu erhalten, sollten die folgenden Details bei einer Anfrage geklärt sein. Zwingend notwendige Angaben sind blau hinterlegt.

	Wert	Toleranz
Länge [mm] alt. Durchmesser [mm]		
Breite [mm]		
Dicke [mm]		
Stückzahl		
Dehnungsklasse (DK)*		
Einschlussklasse (BK)*		
Schlierenklasse (SK)*		
Spannungsklasse (SDBK)*		
* wenn besser als Standard		
Sonstige Geometrie- und Formtoleranzen		
Sonstige Materialeigenschaften wie Transmission, Homogenität usw.		
nach Möglichkeit Zeichnung/Skizze anhängen		

Optics for Devices
SCHOTT AG
Hattenbergstraße 10
55122 Mainz
Germany
Tel.: +49 (0) 61 31/66-38 35
Fax: +49 (0) 61 31/66-19 98
E-Mail: info.optics@schott.com
www.schott.com/optics_devices

SCHOTT
glass made of ideas