



Photo Foto: SCHOTT/C. Costard

# ACCURATE PREDICTIONS PRÄZISE VORHERSAGE

A new mathematical model for calculating the strength of ZERODUR® glass-ceramic components developed by SCHOTT optics expert, Dr. Peter Hartmann, provides even better performance data. Customers in such fields as aeronautics, astronomy and lithography stand to benefit thanks to the higher operational reliability, dependability and efficiency of these components.

Ein neues mathematisches Modell des SCHOTT Optik-Experten Dr. Peter Hartmann zur Berechnung der Festigkeit von ZERODUR® Glaskeramik-Komponenten liefert verbesserte Kennzahlen. Kunden aus den Bereichen Raumfahrt, Astronomie und Lithografie profitieren: durch erhöhte Betriebssicherheit, Zuverlässigkeit und Effizienz der Bauteile.

CHRISTINE FUHR

A rocket must travel at a minimum speed of eight kilometers per second in order to resist the earth's gravitational pull. Lift off takes place based on the so-called recoil principle: gases are produced by burning fuel, which then propel the rocket into the sky at incredible speeds under high pressure. Thrust, acceleration, pressure, and vibration exert enormous physical forces on the rockets

Um ins All zu starten, ohne gleich wieder auf den Boden aufzuschlagen, muss eine Rakete mit einer Geschwindigkeit von mindestens acht Kilometern pro Sekunde die Anziehungskraft unseres Planeten überwinden. Das Abheben funktioniert nach dem sogenannten Rückstoß-Prinzip: Durch Verbrennung des Treibstoffs entstehen Gase, die mit großer Geschwindigkeit und



Measurement of a lightweight ZERODUR® mirror 1.2 meters in diameter that weighs only 45 kilograms (left). The triangular-shaped pockets on the backside allow for up to 90 percent weight reduction. High demands are placed on the strength of these filigree mirror substrates. After all, they must be able to withstand the incredibly high physical forces that result when satellites or space telescopes are launched (above).

Vermessung eines ZERODUR® Leichtgewichtsspiegels mit 1,2 Metern Durchmesser und nur 45 Kilogramm Gewicht (links). Die dreieckigen Ausfräsungen auf der Rückseite ermöglichen eine Gewichtsreduktion von bis zu 90 Prozent. An die Festigkeit der filigranen Spiegelträger werden hohe Anforderungen gestellt, denn beim Start von Trägerraketen für Satelliten oder Weltraumteleskope (oben) gilt es, enormen physikalischen Kräften standzuhalten.

and instrument payloads, such as satellites or space telescopes, for example. An exact understanding of the physical properties of all the materials employed is of extreme importance for those who develop the sophisticated devices that orbit the earth, take high resolution photographs, and perform precise measurements in outer space. Ideally, they require extremely low failure probability of the respective components under maximum stress. This reduces the frustration of the failure of costly high-tech instruments to withstand extreme environmental stresses.

### Glass and glass-ceramic: brittle, yet stable and hard

Strength is a decisive factor when it comes to using brittle glass and glass-ceramic materials in more sophisticated technical applications. The glass expert and technology company SCHOTT has been working intensely for many years in the area of research and development on such topics as strength and bending stress. The goal is to make glass much stronger (See also solutions 1/2013, p. 30).

Due to their strong atomic bonds, glass and glass-ceramic materials theoretically resist high bending stresses. In reality, however, these capabilities deteriorate quite considerably after shaping with diamond grinding tools introduces microcracks in the surface. If they are deep too, they can lead to breakage and thus cause entire components to fail. For this reason, it is obviously very important for developers to understand accurately when this will happen.

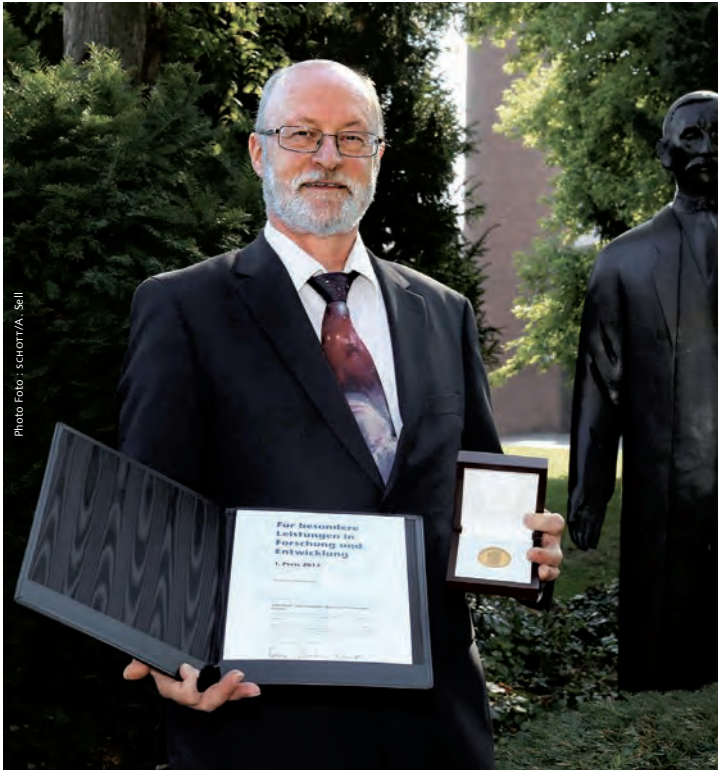
unter hohem Druck ausströmen und die Rakete nach oben bewegen. Die physikalischen Kräfte, die durch Schub, Beschleunigung, Druck und Vibration sowohl auf die Trägerrakete als auch auf die mitgeführten Instrumente – wie beispielsweise Satelliten oder Weltraumteleskope – einwirken, sind enorm. Wichtig für die Entwickler der hochwertigen Geräte, die in der Erdumlaufbahn oder im All hochauflösende Aufnahmen und präzise Messungen durchführen, ist die möglichst genaue Kenntnis der physikalischen Eigenschaften aller eingesetzten Werkstoffe. Gefordert ist idealerweise eine möglichst geringe Ausfallwahrscheinlichkeit der jeweiligen Komponenten bei maximaler Belastung – denn nichts ist ärgerlicher, als wenn die kostspieligen Hightech-Instrumente den hohen Umgebungsbelastungen nicht standhielten.

### Glas und Glaskeramik: spröde, aber stabil und hart

Beim Einsatz von spröden glas- und glaskeramischen Werkstoffen in anspruchsvollen technischen Anwendungen ist Festigkeit ein entscheidender Faktor. Mit dem Thema Festigkeit bzw. Biegespannung setzt sich der Glasspezialist und Technologiekonzern SCHOTT seit vielen Jahren in Forschung & Entwicklung intensiv auseinander – das Ziel: Glas noch fester zu machen (s. auch solutions 1/2013, S. 30).

Theoretisch halten Glas und glaskeramische Werkstoffe aufgrund ihrer starken atomaren Bindungen hohen Biegespannungen stand. In der Praxis verringern sich diese allerdings nach der formgebenden Bearbeitung mit Diamant-Schleifwerkzeugen. Diese führen zu Mikrorissen in der Oberfläche, die mit zunehmender Tiefe zum Bruch und damit zu komplettem Bauteilversagen führen können. Für Anwender ist es verständlicherweise wichtig, möglichst genau zu erfahren, wann dies eintritt. Für die ZERODUR® Glaskeramik mit extrem niedriger thermischer Ausdehnung können SCHOTT Materialexperten jetzt optimierte Daten zur Festigkeit liefern.

Bisher wurde zur Vorhersage der Festigkeit von Glaskeramik standardmäßig die "2-parametrische-Weibull-Verteilung" angewendet. Bei dieser wird die Bruchspannung (in Megapascal/MPa) und die Ausfallwahrscheinlichkeit von Proben aus einem Doppelringversuch dargestellt und extrapoliert. Wie der SCHOTT Optik-Experte Dr. Peter Hartmann in seiner Arbeit „ZERODUR®: Deterministic Approach for Strength Design“ anhand größerer Stichprobendaten nachgewiesen hat, ist dieses konventionelle Verfahren nicht ausreichend, sondern muss durch einen modifizierten (Weibull-) Ansatz mit drei Parametern ergänzt werden. Dieser neue Ansatz liefert einen Mindestfestigkeitswert für definierte Oberflächenbedingungen und ermöglicht die Berechnung der Lebensdauer bei vorgegebener Spannung unter Berücksichtigung der Werkstoff-Ermüdung unter Belastung. Weiterer Vorteil: Das Modell verringert bisherige statistische Unsicherheiten sowie zu konservativ angesetzte Sicherheitsfaktoren und erlaubt damit in der Konsequenz deutlich höhere zulässige mechanische Belastungen von ZERODUR® Komponenten als bisher. Davon profitieren Kunden aus Astronomie, Raumfahrt und Lithografie, die ZERODUR®



The optics expert Dr. Peter Hartmann was awarded the 2013 SCHOTT Prize for special achievements in the area of research and development for his work on the strength of temperature resistant ZERODUR® glass-ceramic.

Optik-Experte Dr. Peter Hartmann erhielt für seine Arbeit über die Festigkeit von temperaturstabiler ZERODUR® Glaskeramik den SCHOTT Preis für besondere Leistung in Forschung und Entwicklung 2013.

bei immer höheren statischen und dynamischen Belastungsprofilen einsetzen wollen. Und dies jetzt auch können – dank präziser Vorhersage der Festigkeit.

Mit ZERODUR® Glaskeramik werden u. a. filigrane Leichtgewichtsspiegelträger für Satelliten oder Weltraumteleskope hergestellt, bei denen durch dreieckige Ausfräsungen auf der Rückseite eine Gewichtsreduktion von bis zu 90 Prozent erreicht wird.

Now, the material experts at SCHOTT are in a position to offer better data on strength for the extremely low thermal expansion material ZERODUR® glass-ceramic. In the past, the “two-parameter Weibull distribution” method was normally used to predict the strength of a glass-ceramic. Here, the breaking stress and probability of sample failure generated in a double ring test are displayed in megapascal (MPa) and extrapolated. As SCHOTT optics expert Dr. Peter Hartmann was able to prove in his work “ZERODUR®: Deterministic Approach for Strength Design” that included a considerable amount of sample data, this conventional approach no longer suffices, but rather must be enhanced by using a modified (Weibull) approach that takes three parameters into account. This new approach provides a minimum strength value for defined surface conditions and allows the service life to be calculated under specified stress while taking into consideration material fatigue under stress. There is another advantage to the approach over the previous one. This model reduces statistical uncertainties and overly conservative safety facts, and thus allows substantially higher mechanical stresses to be applied to ZERODUR® components.

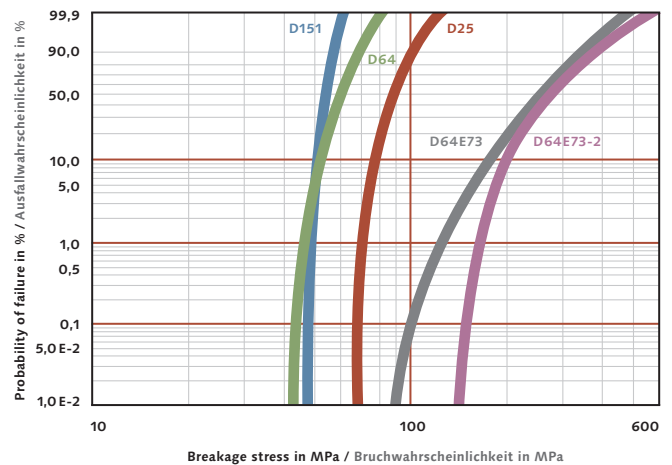
Customers in the fields of astronomy, aeronautics and lithography who are interested in using ZERODUR® glass-ceramic with significantly higher static and dynamic stress profiles will now be able to do so thanks to more accurate predictions of its strength. ZERODUR® glass-ceramic is used to manufacture filigree light-weight mirror substrates for satellites and space telescopes. Their weight can even be reduced by up to 90 percent by carving out triangular-shaped structures from the backside. ZERODUR® components also perform high-precision tasks in electronics and the semiconductor industry. They are used as mirror substrates in li-

### THE STRENGTH OF ZERODUR®

Breakage probability for different surface conditions

### FESTIGKEIT VON ZERODUR®

Bruchwahrscheinlichkeit bei unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheit



The three parameter Weibull curves all drop to zero breakage probability depending on the surface conditions. The minimum values are now much higher than the previously used 10 MPa, which means that ZERODUR® can be used with higher mechanical loads in the future.

Die dreiparametrischen Weibull-Kurven fallen alle zu einer Bruchwahrscheinlichkeit von Null, abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit. Die Minimalwerte liegen jetzt wesentlich höher als die bisher verwendeten 10 MPa, was künftig den Einsatz von ZERODUR® bei höheren mechanischen Belastungen ermöglicht.

ZERODUR® Komponenten übernehmen ebenso Präzisionsaufgaben in der Elektronik- und Halbleiterindustrie: als Spiegeloptiksubstrat in Lithografiegeräten zur Herstellung Tausender oder gar Millionen von Schaltkreisen für die Farbgestaltung bei LCD-

thography devices for manufacturing thousands or even millions of circuits for controlling the colors that LCD monitors display, as well as in chip manufacturing, where the structural sizes will continue to become smaller and shrink to just a few nanometers in the years to come. Essentially, ZERODUR® glass-ceramic components are found in applications that require the highest precision, reliability and operational security of the components used in order to ensure that these complex processes run smoothly. “Thanks to this optimized calculation model and reliable data on strength, we have been able to prove that ZERODUR® glass-ceramic is even stronger and more stable under severe conditions than we had first assumed. This opens up new prospects for designers in building their instruments and devices,” explains Dr. Peter Hartmann, who was awarded the SCHOTT R&D Prize for his model.

“This work documents a high degree of scientific and technical professionalism and demonstrates the outstanding material and technological expertise SCHOTT has,” explained SCHOTT Board Member Dr. Hans-Joachim Konz at the award ceremony. “Furthermore, this work underscores our goal of offering benefits to our customers through our profound understanding of materials. This is thus an example of the successful link between science on the one hand and technical marketing on the other,” he added. < [peter.hartmann@schott.com](mailto:peter.hartmann@schott.com)

Bildschirmen. Oder in der Chipproduktion, bei der die Strukturgrößen in den nächsten Jahren auf wenige Nanometer schrumpfen. Kurz: Anwendungen, bei denen höchste Präzision, Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit der Komponenten von größter Bedeutung für das reibungslose Funktionieren komplexer Prozesse sind. „Mit dem optimierten Berechnungsmodell und belastbaren Daten zur Festigkeit konnte nachgewiesen werden, dass ZERODUR® Glaskeramik unter verschärften Umständen fester und stabiler ist als bisher angenommen. Das eröffnet Anwendern neue Perspektiven bei der Konstruktion ihrer Instrumente und Geräte“, erklärt Dr. Peter Hartmann, der für sein Modell mit dem SCHOTT F&E-Preis ausgezeichnet wurde.

„Die Arbeit dokumentiert einen hohen Grad an wissenschaftlich-technischer Professionalität und demonstriert die hervorragende Material- und Technologiekompetenz bei SCHOTT“, erklärt Vorstandsmitglied Dr. Hans-Joachim Konz bei der Preisverleihung. „Zudem unterstreicht die Arbeit unseren Anspruch, Kundennutzen durch exzellentes Materialverständnis zu schaffen. Sie ist Beispiel für die gelungene Verknüpfung zwischen Wissenschaft einerseits und technischem Marketing andererseits.“ < [peter.hartmann@schott.com](mailto:peter.hartmann@schott.com)

---

## EXTREMELY LOW THERMAL EXPANSION

ZERODUR® glass-ceramic, which consists mainly of the ingredients lithium oxide, aluminum oxide and silicon oxide (LAS), is melted as glass and then transformed into a glass-ceramic through the process of ceramization. Here, the glass is first heated to a temperature that initiates the cultivation of seed crystals, which are then grown in a second step. After it has cooled, it leaves behind a material that consists of nanometer sized crystallites that are embedded in a residual glass phase. By cleverly selecting the type of crystal and having precise knowledge of how seeds form and crystals grow, the properties of these glass-ceramics can be precisely controlled. The negative thermal expansion of the LAS crystals compensates for the positive thermal expansion of the residual glass and makes ZERODUR® from SCHOTT an extremely homogeneous, zero-expansion material. Here, the “zero” is meant in terms of physical/technical properties, and is expressed physically in a range of error. For scientists and engineers, the narrowest tolerance degree available for ZERODUR® is  $\pm 0.007 \times 10^{-6}/K$ . This equates to a  $CTE^*$  (Coefficient of Thermal Expansion) that is 1000 times lower than that of conventional glasses and roughly 2000 times lower than metals. If necessary, ZERODUR®'s expansion behavior can be adjusted to suit the actual temperature progression in a customer's application. <

\* $CTE$  (0°C; 50°C) describes the median coefficient of linear thermal expansion ( $CTE$ ) within the temperature range 0°C to 50°C.

---

## EXTREM NIEDRIGER AUSDEHNUNGSKOEFFIZIENT

ZERODUR® Glaskeramik mit den Hauptbestandteilen Lithiumoxid, Aluminiumoxid und Siliciumoxid wird als Glas geschmolzen und durch die sogenannte Keramisierung in die Glaskeramik überführt. Dazu wird das Glas in einem ersten Schritt auf eine Temperatur erwärmt, in der gezielt Kristallkeime gezüchtet und in einem zweiten Schritt zum Wachsen gebracht werden. Nach Abkühlung ist ein Material aus nanometergroßen Kristalliten entstanden, die in einer Restglasphase eingebettet sind. Durch geschickte Wahl des Kristalltyps und die genaue Kenntnis von Keimbildung und Kristallwachstum ist es möglich, die Eigenschaften der Glaskeramiken gezielt einzustellen. Die negative thermische Ausdehnung der LAS-Kristalle kompensiert die positive thermische Ausdehnung des Restglases und macht ZERODUR® von SCHOTT zu einem äußerst homogenen Nullausdehnungsmaterial – die Null ist hier physikalisch-technisch gemeint und daher als solche nicht mathematisch exakt, sondern physikalisch mit einer Fehlerbandbreite angegeben. Für Experten: Der engste verfügbare Toleranzgrad für ZERODUR® mit  $\pm 0,007 \times 10^{-6}/K$  entspricht einem 1000-mal niedrigeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten  $CTE^*$  (Coefficient of Thermal Expansion) bei konventionellen Gläsern und einem etwa 2000-mal geringeren bei Metallen. Bei Bedarf kann man das Ausdehnungsverhalten von ZERODUR® auf den konkreten Temperaturverlauf der Kundenanwendung einstellen. <

\* $CTE$  (0°C; 50°C) beschreibt den mittleren thermischen Längenausdehnungskoeffizienten ( $CTE$ ) im Temperaturbereich 0°C bis 50°C.