



**Fraunhofer** Institut  
Werkstoffmechanik

# Jahresbericht 2002

Kugelstrahlen von Keramik:  
Auf dem Weg in die Anwendung

Leistungsbereich  
Randschichttechnologien

Dr. Wulf Pfeiffer  
Wöhlerstraße 11  
79108 Freiburg  
Telefon +49 (0) 761/51 42-166  
pfeiffer@iw.fraunhofer.de



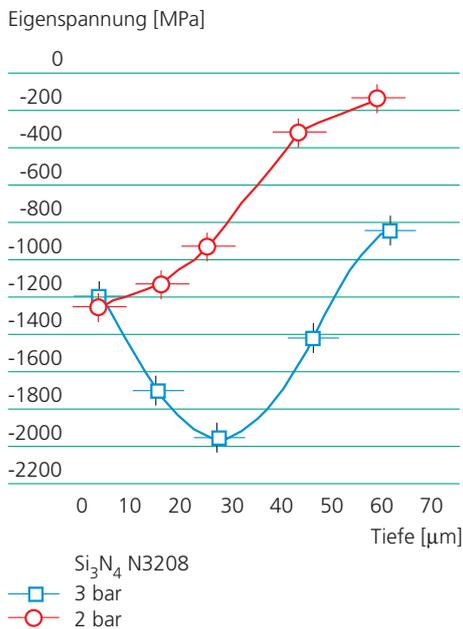


Abb. 1  
Tiefenwirkung der Kugelstrahlbehandlung mit 2 bar und 3 bar Strahldruck

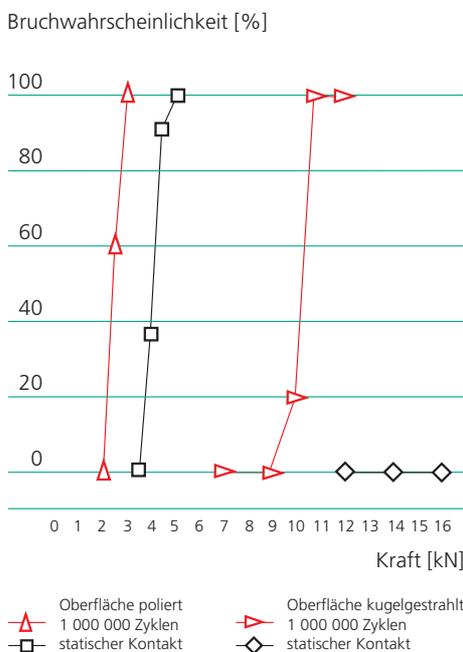


Abb. 2  
Statistische Verteilung der Tragfähigkeit im statischen und zyklischen Kugel-Platte Versuch

## Kugelstrahlen von Keramik: Auf dem Weg in die Anwendung

Einen bei Keramiken einzigartigen Weg zur Einbringung von hohen oberflächennahen Druckeigenspannungen und damit einer Festigkeitssteigerung zeigt ein im Fraunhofer IWM entwickeltes und patentiertes mechanisches Verfahren zur Randschichtverfestigung auf. Im Wesentlichen wird dabei ein auf keramische Werkstoffe abgestimmtes Kugelstrahlverfahren verwendet. Das Kugelstrahlen ist eine mechanische Oberflächenbehandlung bei der kugelförmiges Strahlmittel auf die Oberfläche des zu behandelnden Werkstücks geschleudert wird und dort lokale plastische Verformungen und Druckeigenspannungen bewirkt.

### Shot-peening of ceramics: on the path to application

*The Fraunhofer IWM has developed a unique patented mechanical technique for introducing high compressive residual stresses into ceramics that dramatically increases their load bearing capacity. The method is based on a shot-peening process that has been modified to meet the special requirements of brittle ceramics. During the shot-peening process small beads are accelerated to a high velocity and then strike the ceramic surface. This results in local plastic deformation and the development of compressive residual stresses.*

Leistungsbereich Randschicht-  
technologien  
Department Surface Engineering

Dr. Wulf Pfeiffer  
Telefon +49 (0) 7 61/51 42-1 66  
pfeiffer@iwm.fraunhofer.de

Dipl.-Phys. Tobias Frey  
Telefon +49 (0) 7 61/51 42-2 08  
frey@iwm.fraunhofer.de

### Aufgabenstellung

Neben den Werkstoffkennwerten wie Risszähigkeit und Elastizitätsmodul sind Eigenspannungen in der Randschicht von wesentlicher Bedeutung für die Festigkeit, da diese sich den Belastungen additiv überlagern. So wirken Druckeigenspannungen in der Regel festigkeitssteigernd, Zugeigenspannungen festigkeitsmindernd. Im Hinblick auf die industrielle Verwertung des Verfahrens ist besonders die Wirtkentiefe der Strahlbehandlung und die Beständigkeit der eingebrachten Eigenspannungen unter zyklischer Belastung wichtig. Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist die Anwendbarkeit des Verfahrens auf »technische« Oberflächen. Damit gemeint sind die Oberflächenbereiche keramischer Bauteile, in die durch vorangegangene Herstellungs- und Bearbeitungsverfahren in einem gewissen Umfang bereits festigkeitsmindernde Schädigungen eingetragen wurden. Hier könnte das Kugelstrahlverfahren auch kostenintensive Finishverfahren überflüssig machen, mit denen die geschädigten Randschichten bislang abgetragen werden müssen.

### Vorgehensweise

Zur Untersuchung der Tiefenverteilung der Eigenspannungen wurden Kugelstrahlbehandlungen mit den Strahlrücken 2 und 3 bar ausgewählt, die auch für Wälzlagerkomponenten An-

wendung finden. Da die zur Eigenspannungsermittlung verwendete Röntgenstrahlung nur eine Eindringtiefe von etwa 10 µm hat, mussten die Proben zur Bestimmung der Tiefenverteilungen schrittweise abpoliert werden. Zur Ermittlung der zyklischen Tragfähigkeit von kugelgestrahlten Platten wurden Kugeldruckversuche bei verschiedenen Laststufen und 60 Be- und Entlastungen pro Minute durchgeführt. Je Laststufe wurden 1 Million Belastungen durchgeführt, anschließend wurden die Platten auf Rissbildung geprüft. Für eine statistische Auswertung, wurden je Laststufe mehrere verschiedene Stellen der Probe getestet. Für die Untersuchungen der Wirksamkeit des Kugelstrahlens auf verschiedenen bearbeiteten Oberflächen standen keramische Rollen aus einem Rollenlager zur Verfügung. Neben dem polierten Endzustand wurden auch vorgeschliffene Rollen kugelgestrahlt. Das heißt, diese vorgeschliffene Rollen wurden vorzeitig, ohne Endbearbeitung, aus dem Produktionsprozess entnommen. Die Rollen wurden auf der Mantelfläche kugelgestrahlt und dort mit dem statischen Kugeldruckversuch auf die Tragfähigkeit hin untersucht.

### Ergebnisse

Die ermittelten Tiefenverläufe nach dem Kugelstrahlen sind in Abb. 1 aufgetragen. Die Verläufe unterscheiden sich deutlich. Während in der äußersten Randschicht für beide Strahl-drücke Druckeigenspannungen von ca. 1200 MPa gemessen werden, zeigt die Strahlbehandlung mit 2 bar einen kontinuierlichen Abfall innerhalb der ersten 50 µm auf ca. 100 MPa. Der Tiefenverlauf der mit 3 bar Strahl-druck behandelten Probe dagegen weist in einer Tiefe von etwa 25 µm unterhalb der Oberfläche ein Maximum der Druckeigenspannungen von 2000 MPa auf. Selbst in einer Tiefe von 60 µm

sind noch über 800 MPa hohe Druckeigenspannungen messbar. Abb. 2 zeigt die Ergebnisse des zyklischen Kugel-Platte Versuchs. Dargestellt ist die Bruchwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der zur Rissbildung erforderlichen Kraft für den statischen (1 Be- und Entlastungszyklus) und für den zyklischen Kontakt (1 000 000 Zyklen). Die zyklische Tragfähigkeit konnte durch die Kugelstrahlbehandlung von 2,5 kN (bei 50% Bruchwahrscheinlichkeit) für die polierte Referenzfläche auf über 10 kN angehoben werden. Im Fall der statischen Kontaktbelastung zeigt sich, dass selbst bei Belastungen bis zu 16 kN kein Riss auf der Oberfläche zu erkennen ist. Bei diesen hohen Belastungen durch die Indenterkugel treten dagegen bereits plastische Verformungen der gestrahlten Oberflächen auf – ein für spröde keramische Werkstoffe bislang nicht erreichtes Werkstoffverhalten. Die Tragfähigkeit von vorgeschliffenen, polierten und kugelgestrahlten Siliciumnitrid-Wälzlagerrollen ist in Abb. 3 in einem Weibull-Diagramm dargestellt. Aufgetragen ist die Bruchwahrscheinlichkeit als Funktion der Tragfähigkeit. Die Tragfähigkeit für eine vorgeschliffene Rolle beträgt 1660 N. Für eine endbearbeitete polierte Rolle, welche mit diesem Randschichtzustand in vollkeramischen Lagern eingesetzt wird, steigt die Tragfähigkeit auf 3230 N an. Durch die Kugelstrahlbehandlung gelingt es, die Tragfähigkeit der grob bearbeiteten, vorgeschliffenen Rolle über diejenige der endbearbeiteten polierten Rolle auf ca. 6200 N anzuheben. Auf etwa das gleiche hohe Niveau wird die Tragfähigkeit von polierten und danach kugelgestrahlten Rollen gesteigert. Die Kugelstrahlbehandlung kann demnach die durch vorangegangene Hartbearbeitungsschritte verursachten Festigkeitsverluste mehr als kompensieren.

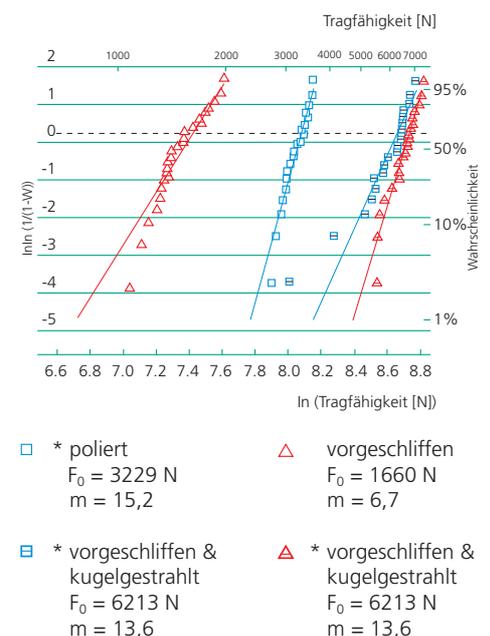


Abb. 3  
Statistische Verteilung der statischen Tragfähigkeit vorgeschliffener, polierter und nachträglich kugelgestrahlter Rollen ( $F_0$ ,  $m$  Weibullparameter)