

### 5.2 SN in industriellen Anwendungen z.B. Kugellager

- Dr. Gerhard Wötting  
Dr. Rolf Wagner  
H.C. Starck Ceramics GmbH & Co. KG  
Selb

*Die Folien finden Sie ab Seite 400.*

### Eigenschaften und Anwendungen von Siliciumnitrid- und Siliciumcarbid-Werkstoffen

#### Vorwort

Siliciumnitrid- und Siliciumcarbid-Werkstoffe finden aufgrund ihrer guten mechanischen Eigenschaften sowie ihrer hohen thermischen, korrosiven und abrasiven Beständigkeit bereits vielfältige Anwendungen als hochbelastete Bauteile. Insbesondere die Siliciumnitrid-Werkstoffeigenschaften lassen sich optimal an die jeweiligen Einsatzbedingungen anpassen.

Die vorliegende Arbeit zeigt auf, welches Spektrum an  $\text{Si}_3\text{N}_4$ - und  $\text{SiC}$ -Werkstoffqualitäten, Bauteilen und Anwendungen bei einem mittelständigen Hersteller wie H. C. Starck-Ceramics, Selb, heute vorliegt. Sowohl bezüglich der Eigenschaften als auch der Kosten können maßgeschneiderte Werkstoffe und Bauteile angeboten werden, wobei das Spektrum der Möglichkeiten noch nicht ausgeschöpft ist. Die häufig als Hemmnis für einen breiten Einsatz angeführten Bauteilkosten werden diskutiert.

## 5.2.1 Einleitung

Keramische Werkstoffe auf der Basis von Siliciumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ , kurz SN) und Siliciumcarbid ( $\text{SiC}$ ) weisen eine sehr günstige Kombination von Eigenschaften auf, die sie im Vergleich mit anderen keramischen Werkstoffen für eine Vielzahl technischer Anwendungen qualifizieren oder bestimmte konstruktive oder funktionelle Lösungen erst ermöglichen. Diese Eigenschaftskombination umfasst Charakteristika wie geringe Dichte, hohe Korrosionsbeständigkeit, hohe mechanische Festigkeit bis zu hohen Temperaturen, hohe Härte und Bruchzähigkeit sowie geringe Wärmedehnung, woraus auch eine hohe Thermoschock- sowie Abrasionsbeständigkeit resultiert.

Im Rahmen dieser pauschalen Eigenschaftscharakteristik bieten die SN-Werkstoffe die Möglichkeit, über die Zusammensetzung und Herstellungstechnologie die chemische und strukturelle Beschaffenheit zu modifizieren und bestimmte Eigenschaften "maßzuschneidern" bzw. SN-Werkstoffvarianten für bestimmte Anwendungen zu optimieren. Dies beinhaltet andererseits, dass für jeden Anwendungsfall auch unter Kostenaspekten, die für den praktischen Einsatz eine bedeutende Rolle spielen, günstige Lösungen erarbeitet werden können. Die Kosten für ingenieurkeramische Bauteile werden häufig jedoch weniger von der Art des Werkstoffes bestimmt, sondern von der Komplexität des erwünschten Bauteils, wodurch der Bearbeitungskostenanteil bis zu 80 % der Bauteilherstellkosten betragen kann. Dieser Aspekt der konstruktiven Gestaltung keramischer Bauteile ist somit neben der Werkstoffauswahl von gleichrangiger Bedeutung.

Somit ist als ein zentraler Punkt der Akzeptanz und Verwendung von ingenieurkeramischen Werkstoffen und Bauteilen deren Kosten zu sehen. Über die anwendungsspezifisch günstigste Wahl der Werkstoffvariante und der keramikgerechten Gestaltung des erwünschten Bauteils muss außerdem die kostengünstigste Fertigung angestrebt werden, um die kundenseitige Akzeptanz zu erreichen und im Wettbewerb zu bestehen.

### 5.2.2 SN- und SiC-Werkstoffvarianten und deren Eigenschaften

#### 5.2.2.1 SN-Werkstoffe

Aufgrund langjähriger Entwicklungstätigkeit liegt eine Palette von SN-Werkstoff- und Verfahrensvarianten vor, die praktisch für jeden Kundenwunsch hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Eigenschaftsspektrum des Werkstoffes und Bauteils aber auch der Kosten eine Lösung bietet [1,2]. Diese Palette reicht vom porösen, reaktionsgebundenem SN, dem RBSN, bis zum absolut porenfreien, heißisostatisch verdichteten SN, dem HIP-SSN, wobei die Qualitäts- und Komponentenvielfalt noch durch verschiedene einsetzbare Formgebungsverfahren der gleichen Basiszusammensetzung erweitert wird. Tab.1 gibt hierzu einen Überblick der weitgehend etablierten Werkstoffqualitäten nach Formgebung durch isostatisches Pressen (CIP), deren Charakteristiken sich kurz wie folgt beschreiben lassen:

Das poröse RBSN weist entsprechend Tab.1 eine vergleichsweise niedrige RT-Festigkeit auf, die aber bis zu hohen Temperaturen erhalten bleibt. Es ist gut thermoschockbeständig und wird von einer Vielzahl metallischer Schmelzen nicht benetzt, was es für Anwendungen als Lötunterlagen, Brennhilfsmittel und Schmelztiegel z.B. für Silicium prädestiniert. Vorteilhaft ist bei diesem Werkstoff auch, dass nahezu alle Formgebungsverfahren einsetzbar sind (siehe Tab. 2), die Formkörper im „Grünzustand“ gut bearbeitbar sind und beim Reaktions-sintern kaum Schwindung eintritt, so dass mit vergleichsweise geringem Aufwand auch komplexe Bauteile gefertigt werden können, deren maximale Materialdicke aber prozessbedingt ca. 20 mm nicht überschreiten darf.

Durch Zusatz eines Si-organischen Polymers zum relativ preiswerten Silicium Ausgangspulver lässt sich die Dichte steigern und das gesamte Eigenschaftsniveau anheben. Derartige Ausgangsmischungen lassen sich neben den in Tab. 2 genannten Formgebungsverfahren auch durch Warmpressen und Foliengiessen verarbeiten. Aufgrund der minimalen Schwindung und der vergleichsweise niedrigen Sintertemperatur von  $\leq 1.450$  °C ist dieser „PM-RBSN“-Werkstoff exzellent geeignet als Matrixmaterial für einen Lang- als auch Kurzfaserverstärkten, schädigungstoleranten Compositewerkstoff, da schwin-

bedingte mechanische als auch thermische Schädigungen der Fasern weitgehend vermieden werden. [3]

| Werkstoffklasse:         | RBSN   | ND-SRBSN | ND-SSN | GD-SSN |       |       | HIP-SSN |
|--------------------------|--------|----------|--------|--------|-------|-------|---------|
|                          |        |          |        | MF     | TF    | EM*** |         |
| Werkstoffnr. (z.B.)      | N1203  | N5204    | N7205  | N3214  | N3220 | N3250 | N8201   |
| Dichte                   | > 2,20 | > 3,20   | 3,22   | 3,23   | 3,22  | 3,85  | 3,24    |
| Porosität                | ≤ 20   | < 1      | < 1    | < 1    | < 1   | < 1   | < 1     |
| Biegefestigkeit* RT      | > 200  | 750      | > 750  | 1000   | 800   | 750   | 1050    |
| Biegefestigkeit* 1000 °C | > 250  | 500      | > 450  | 800    | 750   | 650   | 750     |
| Biegefestigkeit* 1200 °C | > 250  | 300      | 250    | 550    | 650   | -     | 400     |
| Biegefestigkeit* 1350 °C | 220    | -        | -      | 300    | 500   | -     | -       |
| Weibull-Modul            | ≥ 10   | ≥ 15     | ≥ 15   | ≥ 18   | ≥ 15  | ≥ 15  | ≥ 15    |
| Bruchzähigkeit**         | 4,0    | 6,5      | 6,7    | 6,5    | 7,5   | 6,0   | 6,0     |
| Härte (HV10)             | 5,0    | 15,0     | 15,0   | 15,3   | 15,5  | 15,0  | 15,0    |
| E-Modul RT               | 120    | 290      | 300    | 320    | 320   | 335   | 300     |
| Wärmeleitfähigkeit RT    | 10     | 30       | 22     | 25     | 30    | 24    | 25      |
| Wärmedehnung (RT-1000°C) | 2,9    | 3,8      | 3,4    | 3,4    | 3,5   | 5,1   | 3,4     |

\* (4-Pkt, 40/20 mm)  
 \*\* Niihara  
 \*\*\* Elektr. Leitfähigk. ca. 4·10<sup>3</sup> S/m

**Tabelle 1:** SN-Werkstoffe von H. C. Starck-Ceramics und deren Eigenschaften

Durch Zusatz von Sinterhilfsmitteln kann das RBSN bei Niederdruck nachgesintert werden („ND-S“), wobei das resultierende ND-SRBSN eine kostengünstige Variante der dichten SN-Werkstoffe darstellt und die Vorteile der guten Formbarkeit von RBSN mit den spezifischen Eigenschaften der dichten Werkstoffe kombiniert. Damit ist es für eine Vielzahl von komplex geformten Bauteilen von Interesse, die nicht höchsten Belastungen unterliegen z.B. Entgasungsrotoren für Al-Schmelzen. [4] Die Beschränkung auf Materialdicken < 20 mm bleibt bei dieser Variante erhalten.

Auch durch Verwendung kostengünstiger aber qualitativ akzeptabler  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -Pulver lassen sich dichte SN-Werkstoffe und -bauteile zu vergleichsweise niedrigen Kosten herstellen (ND-SSN). Diese Produkte sind insbesondere interessant für großvolumige Bauteile, wie sie z.B. in der Metallurgie benötigt werden, aber auch für Serienteile, die wiederum nicht höchsten Beanspruchungen unterliegen.

Die leistungsfähigsten SN-Werkstoffqualitäten erfordern dagegen beste Rohstoffe und ein aufwändiges Processing inklusive eines (Gas-)Druck-unterstützten Sinterverfahrens („GD-S“). Durch die Wahl der Zusammensetzung lassen sich dabei die spezifischen Eigenschaften dieser GD-SSN-Qualitäten einstellen, wie in Tab.1 aufgeführt. So ist die Qualität N3214 für Anwendungen unter hohen mechanischen Belastungen, wie z.B. in der Motoren- und Lagertechnik konzipiert.

Speziell für Anwendungen bei Temperaturen über  $1.000^\circ\text{C}$  unter oxidierenden und (im begrenzten Maße) korrosiven Einflüssen wurde die Qualität N3220 entwickelt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Beständigkeit von den speziellen Umgebungsbedingungen bestimmt wird. Die gute Hochtemperaturfestigkeit sowie Kriech- und Oxidationsbeständigkeit kann nur mit einem Kompromiss bezüglich der RT-Festigkeit erzielt werden. [5,6]

Durch Verfolgung des Composite-Konzepts eröffnen sich weitere Möglichkeiten, spezifische Eigenschaften einzustellen [7]. Beispiele hierfür sind Zusammensetzungen, die zu deutlich höheren Härten führen oder Zusätze von elektrisch leitfähigen Substanzen. Letzteres ist im Werkstoff N3250 realisiert, der bei RT eine elektrische Leitfähigkeit der Größenordnung  $10^3 \text{ S/m}$  aufweist, was eine elektroerosive Bearbeitung ermöglicht, ohne dass die günstigen Basiseigenschaften durch die notwendigen Zusätze in unakzeptablem Maße verschlechtert werden.

Eine mechanisch ganz besonders feste und verschleißbeständige Qualität kann durch ein sehr aufwändiges Processing und Heiß-Isostat-Pressen/Sintern („HIP-S“) hergestellt werden. Diese Qualität (N8201) bietet die insbesondere bei Wälzlageranwendungen erforderliche Dauerfestigkeit auch bei den hohen dynamischen Flächenpressungen der Überrollbeanspruchung. Sie ist von allen führenden Lagerherstellern für besonders hoch beanspruchte Hybrid- oder Vollkeramiklageranwendungen freigegeben.

Das Spektrum der aus diesen Werkstoffen herstellbaren Bauteilgeometrien ist unterschiedlich, da nicht jedes Formgebungsverfahren für jeden Werkstofftyp verfügbar oder kostenmässig sinnvoll ist, wie in Tabelle 2 dargestellt ist.

| Werkstoffklasse:           | RBSN | ND-SRBSN | ND-SSN | GD-SSN |    |    | HIP-SSN |
|----------------------------|------|----------|--------|--------|----|----|---------|
|                            |      |          |        | MF     | TF | EM |         |
| Formgebungsverfahren:      |      |          |        |        |    |    |         |
| Axiales Pressen            | o    | o        | +      | +      | o  | o  | +       |
| Kaltisostat. Pressen (CIP) | +    | +        | +      | +      | +  | +  | +       |
| Spritzguss                 | +    | +        | +      | +      | o  | o  | +       |
| Schlickerguss              | +    | o        | +      | +      | -  | -  | -       |

**Tab. 2:** Formgebungsverfahren  
(+ = Standard, o = möglich, - = nicht möglich oder sinnvoll)

So ist neben den beschriebenen CIP-Qualitäten praktisch bei allen Varianten auch ein klassisches axiales Pressen für relativ einfache Serienteile möglich bzw. Produktionsstandard. Werden dagegen komplexere, durch Zwischen- oder Endbearbeitung kaum oder nur durch hohen Aufwand realisierbare Geometrien gefordert, so bietet sich das Spritzgussverfahren zur Formgebung an [8]. Dieses ist heute nicht für alle Werkstoffvarianten verfügbar, es wird jedoch für bestimmte Qualitäten serienmässig eingesetzt, wie noch näher ausgeführt wird.

Als weiteres Formgebungsverfahren ist das Schlickergießen von überwiegend großvolumigen Hohl- aber auch Vollteilen möglich, wobei die Nachfrage nach derartigen Teilen bisher begrenzt ist und dieses somit nur für wenige Werkstoffvarianten realisiert ist. Prinzipiell sind auch sonstige Formgebungsverfahren wie Extrudieren oder Foliengießen machbar, müssten aber für bestimmte Produkte adaptiert werden.

### 5.2.2.2 SiC-Werkstoffe

Aufgrund der zu  $\text{Si}_3\text{N}_4$  unterschiedlichen Sintermechanismen von SiC sind die Variationsmöglichkeiten bezüglich Gefügebeschaffenheit und spezifischer Eigenschaften begrenzter. Neben dem bezüglich seines Eigenschaftsspektrums eher zu den Feuerfestwerkstoffen zu zählenden rekristallisierten SiC sind die Hauptvertreter im Bereich der Hochleistungskeramik das gesinterte SiC (SSiC) sowie das reaktionsgesinterte, Si-infiltrierte SiC (SiSiC). Typische Eigenschaften dieser beiden Werkstoffvarianten sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

| Werkstoffklasse:  | SSiC | SiSiC | (LPS-SiC) |
|---|------|-------|-----------|
| Dichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]                             | 3,1  | 3,1   | 3,3       |
| Porosität [%]   | ---  | ---   | <1        |
| Biegefestigkeit* RT [MPa]                                     | 400  | 360   | 600       |
| Weibull-Modul (RT)  | >10  | >10   | >10       |
| Bruchzähigkeit [ $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ]            | 3,0  | 3,6   | 4         |
| Härte (HV10) [GPa]  | 25   | 20    | 22        |
| E-Modul (RT) [GPa]  | 395  | 380   | 370       |
| Wärmeleitfähigkeit (RT), [ $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ] | 100  | 110   |           |
| WAK (RT-1000°C), [ $\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ]           | 4,5  | 4,0   |           |

**Tabelle 3:** Werkstoffeigenschaften von SiC und SN

Das SSiC ist gekennzeichnet durch eine mittlere Festigkeit, die allerdings bis nahe 1.500 °C konstant bleibt, eine hohe Härte, Verschleiß-, Korrosions- und Oxidations-Beständigkeit. Herausragend ist das gute tribologische Verhalten bei Gleitbeanspruchung, was den Einsatz von SiC als Dichtringe und Gleitlagerkomponenten prädestiniert. Die gute Korrosionsbeständigkeit ermöglicht den Einsatz solcher Bauteile in einer Vielzahl von aggressiven Medien, u. a. auch in der Halbleiter-Industrie.

Eine bei niedrigeren Prozesstemperaturen herstellbare aber trotzdem dichte SiC-Variante stellt das SiSiC dar, das darüber hinaus noch den Vorteil aufweist, dass bei dessen Herstellung, ähnlich wie beim RBSN, praktisch keine Schwindung auftritt. Dadurch können komplexe Geometrien am Rohling eingestellt und weitgehend formgetreu nach der Sinterung erhalten werden. Auch für großvolumige Bauteile ist dieses

Verhalten vorteilhaft, da keine schwindungsbedingten Spannungen aufgebaut werden.

Auch das SISIC weist exzellente Gleiteigenschaften auf, die sich durch den Gefügebau in gewissem Umfang gezielt beeinflussen lassen. So werden bei hohen Drücken, Gleitgeschwindigkeiten und Temperaturen bei grobkörnigen Qualitäten bessere Gleiteigenschaften gefunden als bei feinkörnigerem SISIC. Bedingt durch den Gehalt an freiem Si wird die Korrosions- als auch die Temperaturbeständigkeit limitiert auf den pH-Bereich  $<11$  und auf Temperaturen unterhalb der Si-Schmelztemperatur von ca.  $1.400\text{ °C}$ . [9]

Ein Nachteil von SiC- gegenüber dichten SN-Werkstoffen ist die geringere Bruchzähigkeit und die u. a. daraus resultierende hohe Sprödigkeit. Dies wurde in den letzten Jahren durch die Entwicklung eines Flüssigphasen-gesinterten SiC (LPS-SiC) zu reduzieren versucht, ohne die günstigen tribologischen Eigenschaften negativ zu beeinflussen. Tab. 3 zeigt hierzu das Eigenschaftsspektrum einer LPS-SiC-Entwicklungsvariante, die sich bereits in diversen Tests als vorteilhaft erwies infolge ihrer höheren Festigkeit und Bruchzähigkeit. Weitere Optimierungsmöglichkeiten diesbezüglich erscheinen realisierbar.

Auch das aus diesen SiC-Werkstoffen herstellbare Bauteilspektrum ist durch den Einsatz verschiedener Formgebungsverfahren sehr breit. Industriell etabliert sind das axiale Trockenpressen für z. B. Wasserpumpen-Dichtringe für PKWs und das Schlickergiessen für großvolumige Brennerrohre, während das Spritzgiessen für SiC-Teile bisher kaum eingesetzt wird. Eine wichtige Rolle spielt jedoch wiederum das isostatische Pressen (CIP) zu möglichst endkonturnahen Teilen. Für all jene Fälle, wo eine Endkonturnähe nicht erreicht werden kann und demzufolge die Herstellung des Fertigteils einen enorm hohen Endbearbeitungsaufwand erfordern würde, bietet sich eine Bearbeitung im ungesinterten Zustand an.



**Bild 1:** Herstellungsschritte eines komplizierten SiC-Bauteiles durch Grünbearbeitung

Dieses Keramiken i.A. zunächst widerstrebende Formgebungsverfahren wird mittlerweile im großen Umfang zur Herstellung komplex geformter hochwertiger Bauteile eingesetzt, die sich auf anderem Wege technisch und/oder kostenmäßig nicht darstellen lassen [10]. Die einzelnen Schritte dieses Verfahrens sind in Bild. 1 dargestellt. Die korrekte Einstellung der Festigkeit und „Zähigkeit“ der CIP-Hubel durch Zusatz geeigneter organischer Hilfsmittel ermöglicht eine Bearbeitung

ähnlich der von Metallen mit spanabhebenden Verfahren wie Drehen, Bohren, Fräsen etc., was bei gesinterter Keramik nicht mehr möglich ist. Die Hartbearbeitung durch Schleifen, Trennen etc., die mit Diamantwerkzeugen erfolgen muss, kann dadurch auf die Einstellung spezieller Oberflächenbeschaffenheiten sowie Form- und Lagetoleranzen beschränkt werden. Damit ermöglicht dieses Verfahren eine kostengünstige, individuelle und damit hochflexible Fertigung von geometrisch anspruchsvollen SiC-Bauteilen.

### **5.2.3 Anwendungen von Bauteilen aus SN- und SiC-Keramik**

In vielen Bereichen der Technik stellen hochbelastbare Keramiken Lösungen zur Überwindung belastungs- oder kostenseitig erreichter Grenzen dar. Zusätzliche Motivationen sind Bestrebungen zum Leichtbau oder zu längerer Lebensdauer von Teilen bzw. Konstruktionen, wobei sich bezüglich letzterem mehr und mehr die Berücksichtigung der "life-cycle cost" durchsetzt, in die auch Aufwände für Instandhaltung und Reparatur mit eingehen. Relevante Einsatzbereiche umfassen mit der Luft- und Raumfahrt über die Automobiltechnik, den allgemeinen Maschinenbau und die Verfahrenstechnik, die Lagertechnik, die Metallbearbeitung und Metallurgie bis hin zur Medizintechnik nahezu alle Bereiche der Technik. Deshalb kann im folgenden nur auf einige spezielle Anwendungen und aktuelle Entwicklungen eingegangen werden, für weitergehende Informationen wird auf die zitierte Literatur verwiesen.

#### **5.2.3.1 SN im Maschinen- und Motorenbau sowie der Verfahrens- und Fertigungstechnik**

Aufgrund der günstigen Kombination von Eigenschaften wie hoher mechanischer Festigkeit und Bruchzähigkeit von Raumtemperatur bis zumindest 1.000°C, niedrigem spezifischen Gewicht, geringer Wärmeausdehnung und hoher abrasiver und korrosiver Beständigkeit weisen Bauteile aus dichten SN-Werkstoffen eine sehr hohe Einsatzbreite im gesamten Maschinen- und Motorenbau auf (Bild. 2). Zu nennen sind hier Hülsen, Führungen, Bolzen, Platten etc. die im Einsatz hohen mechanischen, und/oder abrasiven Belastungen ausgesetzt sind.



**Bild 2:** SN-Bauteile für Maschinen- und Motorenbau

Im Motorenbau stand lange Zeit das SN-Ventil im Zentrum des Interesses, das zwar bisher aus wirtschaftlichen Gründen nicht realisiert wurde, dessen nachgewiesene Eignung aber durchaus als Beispiel der Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit dieser SN-Werkstoffklasse anzusehen ist, [11,12]

In modernen Diesel-Direkteinspritzsystemen für Lkws und Pkws geben SN-Bauteile in den Hochdruckpumpen eine hohe Einsatzsicherheit über die geforderte Lebensdauer und ermöglichen enorme Leistungssteigerungen der Motoren bei maßgeblich reduziertem Energieverbrauch und damit gleichzeitig reduzierter Umweltbelastung.

Im Bereich der Fertigungs- und Umformtechnik ermöglichen SN-Komponenten eine Reduzierung von Maschinenkosten durch eine längere Lebensdauer, höhere Zuverlässigkeit sowie gesteigerter Produktivität durch schnellere Taktzeiten. Hinzu kommt häufig eine verbesserte Qualität des erzeugten Produktes. Erfolgreiche Anwendungen gibt es im

Bereich der Zerspanung, des Schweißens und Lötens in Form von Unterlagen, Halterungen und Positionierstiften, des Umformens mittels Zieh- und Biegedornen und auch zunehmend als Einsätze in hochbelasteten Bereichen von Zieh- und Schmiedewerkzeugen sowie zum Walzen von Blechen, Bändern, Rohren und Drähten. Dabei erweist sich auch eine verminderte Adhäsion der zu verarbeitenden Metalle gegenüber SN-Werkzeugen im Vergleich zu konventionellen Werkzeugen als vorteilhaft.[13,14]

### 5.2.3.2 SN in Wälzlagern

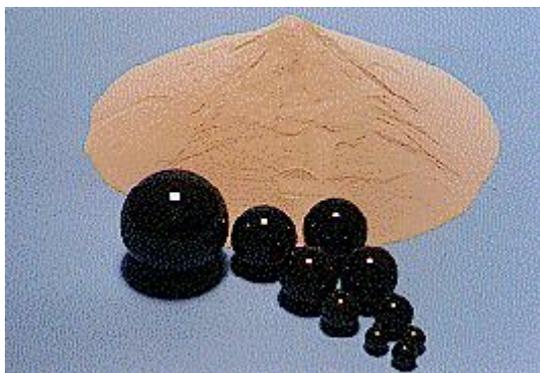
Wegen des niedrigen Gewichts, der geringen Reibung, der hohen Härte und Festigkeit sowie der hohen Temperaturbeständigkeit erweisen sich SN-Materialien mehr und mehr als Werkstoff der Wahl zur Herstellung hochbelasteter, verschleißfester Kugel- und Rollenlager, selbst unter Mangelschmierungs-Bedingungen. Einen generellen Überblick der Vorteile von SN-Lagerkomponenten und von Einsatzmöglichkeiten unter Nutzung dieser Vorteile gibt Tab. 4. Gebaut werden entweder Hybridlager mit keramischen Wälzkörpern und metallischen Laufringen oder vollkeramische Lager (Bild. 3). Hierfür wird nahezu ausschließlich der hinsichtlich seines Reibungs- und Verschleißverhaltens optimierte HIP-SSN-Werkstoff eingesetzt, wobei die Endbearbeitungs- und Prüftechnik für hochpräzise SN-Kugeln beherrscht wird. Diese Produkte sind bei führenden Lagerherstellern approbiert. [15]

Die Einsatzmöglichkeiten für keramische Komponenten in Rollen- und Kugellagern sind vielfältig. Man findet sie zunehmend in schnelldrehenden Werkzeugmaschinen-Spindeln, im Maschinen-, Fahrzeug-, Flugzeug- und Apparatebau sowie in der chemischen Verfahrenstechnik. Sie sind auf dem besten Wege, Metalllager in zahlreichen Einsätzen zu verdrängen und ermöglichen völlig neue konstruktive Lösungen mit hohen ökonomischen und ökologischen Nutzen. Prominente Beispiele hierfür sind der Space Shuttle, bei dem die Treibstoffpumpen der Haupttriebwerke bereits seit 1995 mit Hybridlagern arbeiten, die lediglich mit flüssigem Sauerstoff bzw. Wasserstoff geschmiert mit bis zu 36000 U/min rotieren. Die rechnerische Lebensdauer der Aggregate konnte durch die Keramikanwendung auf 240 Missionen gesteigert werden, während die herkömmlichen Vollmetall-Lager nach jeder Mission ausgetauscht werden mussten. H. C. Starck-Ceramics ist durch die

NASA für die zerstörungsfreie Prüfung dieser SN-Kugeln zertifiziert [16].

| Vorteile mit SN-Lagerkomponenten | Einsatzbereiche         |
|----------------------------------|-------------------------|
| Geringes Gewicht                 | Werkzeugspindellager    |
| Reduzierte Reibung               | Turbomolekularpumpen    |
| Verschleißbeständigkeit          | Linearführungen         |
| Korrosionsbeständigkeit          | Zahnbohrturbinen        |
| Temperaturbeständigkeit          | Vakuumtechnik           |
| Hohe Steifigkeit                 | Nahrungsmittelindustrie |
| Hohe Dämpfung                    | Chemiepumpen            |
| Elektrisch isolierend            | Metallurgie             |
| Nichtmagnetisch                  | Fluglager               |

**Tab. 4:** Generelle Vorteile von SN-Lagerkomponenten und deren Einsatzbereiche



**Bild 3:** Hochpräzise SN-Wälzlagerkugeln

### 5.2.3.3 SN in der Gießereitechnik

In diesem von rauen Umgebungsbedingungen geprägten Einsatz setzt sich SN zunehmend wegen hoher Lebensdauer sowie Verschleiß-, Korrosions- und Thermoschockbeständigkeit durch und bewährt sich beim Fördern, Dosieren und Kontrollieren von Aluminiumschmelzen infolge guter thermischer Beständigkeit und geringer Benetzung. Dies

ermöglicht den Gießereien, die gestiegenen Anforderungen der Kunden in Bezug auf die Qualität der Gussprodukte und der Wirtschaftlichkeit der Prozesse zu erfüllen. SN-Werkstoffe finden dabei trotz höheren Stückpreise in zahlreichen Anwendungen zunehmend Akzeptanz gegenüber anderen, weniger beständigen Materialien infolge stärkerer Beachtung der „life-cycle-costs“ [17].

Zu den Kunden zählen insbesondere Automobilzulieferer, darunter die führenden Rädergießer (Niederdruck-Kokillenguss), sowie Anlagenhersteller von Hochleistungs-Gießsystemen und allgemein die NE - Metall-erzeuger und Verarbeiter. Ein stark wachsendes Gebiet sind Fahrwerkskomponenten aus Aluminiumguss. Auch hierbei unterstützt die technische Keramik die Realisierung immer anspruchsvollerer Herstellungsprozesse. Hauptprodukte sind relativ große Bauteile bis 200 mm Durchmesser und 1,2 m Länge bevorzugt aus den relativ kostengünstigen ND-SSN-Werkstoffen für Thermoelementschutzrohre zur Temperaturüberwachung, Dosier- und Steigrohre in pneumatisch fördernden Öfen, Düsen und Schieber zur Durchflussregelung, Schutzhülsen und Rotorelemente zur Schmelzebehandlung sowie Füllrohre, Tiegel und sonstige Spezialanfertigungen (Bild 4).

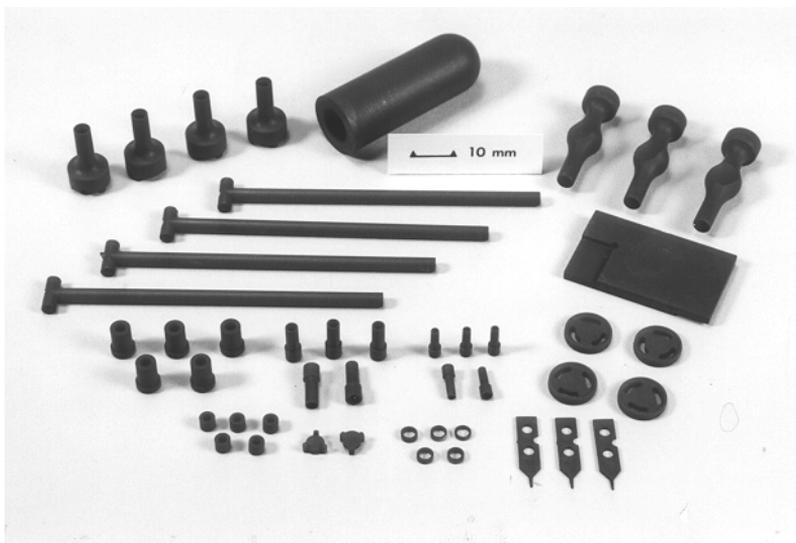


**Bild 4:** AT- und SN-Bauteile für die Gießereitechnik

#### **5.2.3.4 Komplex geformte SN-Bauteile für z.B. die Medizintechnik**

In vielen Bereichen der Geräte- und Apparatechnik besteht ein Bedarf an komplex geformten, mechanisch-thermisch und/oder korrosiv hochbeanspruchbaren Bauteilen. Dies trifft auch auf die Medizintechnik zu,

insbesondere den Bereich der minimalinvasiven Operationstechniken. Unter Kostengesichtspunkten müssen diese meist kleinen Bauteile endkonturnah hergestellt werden und gestatten allenfalls einen geringen Endbearbeitungsaufwand. Hierfür bietet sich das Spritzgussverfahren an, mit dem nahezu beliebig komplex geformte Bauteile, ähnlich wie in der Kunststofftechnik hergestellt werden können. Zusätzliche Forderungen an die Keramik sind im Bereich der Medizintechnik eine Beständigkeit gegen Körperflüssigkeit und Sterilisierungsmittel, aber auch thermische Beständigkeit und Isolationsvermögen bei Endoskopen mit Heizdrähten oder Plasmaflammen. Beispiele für derartige spritzgegossene SN-Kleinteile sind in Bild 5 dargestellt [8].



**Bild 5:** Endkonturnah spritzgegossene SN-Teile für u. a. die Medizintechnik

### 5.2.3.5 SiC-Werkstoffe im Maschinenbau und der Verfahrenstechnik

Aufgrund hoher Härte, Abrasions- und Korrosionsbeständigkeit finden SiC-Werkstoffe und Bauteile breite Anwendung im gesamten Maschinenbau und der Verfahrenstechnik. Beispiele für derartige Anwendungen sind Buchsen und Hülsen zum Führen von Wellen und Achsen, Schnecken für Extruder, Rotoren für Exzenter-schnecken-Pumpen, Düsen und Mundstücke, Dosierkolben und -büchsen, Sicherterräder zum Klassieren und Homogenisieren von hochabrasivem Mahlgut, Mühlenauskleidungen, Brenner- und Wärmetauscher-Rohre und vieles mehr. Die Herstellung derart komplexer Bauteile wie Sicherterräder, Pumpen- und Extrusions-Schnecken etc. ist dabei unter Kostengesichtspunkten nur durch das beschriebene Verfahren der Grünbearbeitung wirtschaftlich möglich.

Ein weiteres Kriterium für den Einsatz von SiC ist dessen günstiges tribologisches Verhalten, das insbesondere von den Herstellern von Gleitringdichtungen genutzt wird. SiC ermöglichte hierbei erstmals den Einsatz gleichartiger, hocheffizienter Paarungen, da aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit von SiC die im Spalt entstehende Reibungswärme abgeführt wird. Abrasive Partikel, die in den Spalt gelangen, können SiC aufgrund seiner hohen Härte nicht schädigen und es ist gegenüber einer Vielzahl von korrosiven Medien chemisch beständig. Dies begründet, dass SiC-Dichtringe in Millionen-Anzahl in Pkw-Wasserpumpen verbaut werden. Hohe Nachfrage besteht ferner für die hochpräzisen, flüssigkeitsgeschmierten Dichtsysteme und für Gasdichtungen für den Pumpen- und Kompressorenbau, die in weiten Bereichen der Fluid- und Fördertechnik zum Einsatz kommen (Bild 6). Zum Stand der Technik zählen hierbei Einsätze von Gleitlagern in gekapselten Chemiepumpen, sowie Düsen in Rauchgas-Entschwefelungsanlagen, nahezu unabhängig von Zusammensetzung und pH-Wert der Fördermedien. Diese arbeitungstechnisch höchst anspruchsvollen Gleitlagerkomponenten ermöglichen einen langlebigen, zuverlässigen Maschinenbetrieb mit ökonomischen als auch ökologischen Vorteilen. [18]



**Bild 6:** Hochpräzise SiC-Gleitlager

### 5.2.4 Zusammenfassung

Hinter den Produktbezeichnungen Siliciumnitrid und Siliciumcarbid stehen heute eine Vielzahl von spezifisch optimierten Werkstoffvarianten, die in weiten Bereichen der Technik maßgeschneiderte Lösungen ermöglichen. Dies betrifft sowohl das geforderte Eigenschaftsspektrum inkl. der Zuverlässigkeit der Werkstoffe und Bauteile als auch deren Kosten. Eine hohe Zuverlässigkeit kann heute durch Einsatz hochgenauer zerstörungsfreier Prüfverfahren (zFP) gewährleistet werden.

Bezüglich der Bauteilkosten wurden seitens der Rohstoffe und Fertigungstechnologie große Fortschritte erzielt, was die Akzeptanz im Markt deutlich fördert.

Zu den Bauteilkosten tragen jedoch auch wesentlich die Art und der Umfang der notwendigen Hartbearbeitung bei, die durch eine keramikgerechte Konstruktion, durch Beachtung einfacher Gestaltungsprinzipien sowie durch Vorwegnahme eines Großteils der Bearbeitung vor der Sinterung deutlich reduziert werden können. Zur Design- und Konstruktionsoptimierung stehen heute komfortable Rechenverfahren zur Verfügung, deren Einsatz in Kooperation mit dem Werkstoff- bzw. Bauteilhersteller empfohlen wird.

Neben etablierten und sich in der Praxis bewährten SN- und SiC-Werkstoffqualitäten gibt es eine Reihe von Weiterentwicklungen, um bei spezifischen Beanspruchungen die Leistungsfähigkeit der eingesetzten Keramik noch weiter zu steigern. Diesbezüglich werden Entwickler und Konstrukteure ermutigt, mit den Werkstoff- und Bauteilherstellern frühzeitig Kontakt aufzunehmen, um gemeinsam die werkstoff- und kostenmäßig günstigste konstruktive Lösung zu erarbeiten. Derartig optimierte Bauteile sollen letztendlich dazu beitragen, beim Anwender wirtschaftliche und technologische Fortschritte zu ermöglichen und damit die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern sowie mit Blick auf die Ökologie begrenzte Energie- und Materialressourcen zu schonen.

## Literatur

- [1] Wötting, G.; Frassek, L.; Leimer, G.; Schönfelder, L.:  
Application-Oriented Development of High-Performance Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-  
Materials and Components  
cfi/Ber. DKG 70 (1993) 287-294
- [2] Lange, H.; Wötting, G.; Winter, G.:  
Siliciumnitrid - vom Pulver zum keramischen Werkstoff  
Angew. Chemie 103 (1991) 1606-1625
- [3] Wötting, G.; Herzog, A.; Schönfelder, L.:  
Preceramic-Modified Reaction-Bonded Silicon Nitride (PM-RBSN)  
Cer. Eng. Sci. Proc. Vol. 21 (2000) Issue 4, 575 - 582

- [4] Wötting, G.; Hagemeier, M.; Müller, W., Heusler, L., Greil, P.: Kostengünstiges, komplex geformtes Siliciumnitrid – Bauteil zur Reinigungsbehandlung von Aluminiumschmelzen  
Tagungsband 3. Symp. „Neue Werkstoffe in Bayern“  
München, 2000, S. 149 – 165; Hrsg. FZ-Jülich, NMT
- [5] Wötting, G.; Frassek, L.; Schubert, Ch.; Klemm, H.; Nietfeld, G.; Entwicklung von langzeit- und hochtemperaturbeständigen Siliciumnitrid-Werkstoffen  
Werkstoffwoche '96/Symp. 3: Werkstoffe für die Energietechnik, H. W. Grünling (Hrsg.), DGM-Verlag, 1997, 183-188
- [6] Wötting, G.; Gugel, E.: Influence Of The Grain-Boundary Phase Amount On Properties Of Dense Silicon Nitride  
cfi/Ber. DKG, 74 (1997) 239-244
- [7] Wötting, G.; Caspers, B.; Gugel, E.; Westerheide, R.: High-Temperature Properties of SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Particle Composites  
Trans. ASME, Vol. 122 (2000) 8-12
- [8] Schönfelder, L.; Roth, S.; Wötting, G.; Gugel, E.: Injection Moulded Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Structural Components  
cfi/Ber. DKG 74 (1997) 141-145
- [9] Prechtel, W.: Technische Keramik für Pumpen und Armaturen  
Ker. Z. 45 (1993) 197 f
- [10] Janosovits, U.; Pohlmann, H. J.; Lang, G.: Die Grünbearbeitung von Strukturkeramik als flexibles Formgebungsverfahren für Klein- und Mittelserien  
Fortschrittber. DKG, Band 16 (2001) Heft 2, 41 - 45
- [11] Wötting, G.; Hennische, J.; Feuer, H.; Thiemann, K. H.; u.a.: Reliability And Reproducibility Of Silicon Nitride Valves: Experiences Of A Field Test  
Proc. 7<sup>th</sup>. Int. Conf. on „Ceramic Materials & Components for Engines“, Goslar 2000, S. 181 - 185; Hrsg.: J. Heinrich, F. Aldinger, WILEY-CH, Weinheim, 2001
- [12] Lindner, H.A. et al: Entwicklung einer Prüfsystematik zur Bewertung der Einsatzsicherheit von Ventilen aus Siliciumnitrid-Keramik im Kfz-Motor  
Werkstoffwoche '96, Stuttgart Symposium 2: "Werkstoffe für die Verkehrstechnik", DGM-Verlag (1997) 79-86

- [13] Wötting, G.; Leimer, G.:  
Siliciumnitrid-Keramik, deren Eigenschaften und Anwendungen  
in der Umformtechnik  
Tagungsband des 16. Umformtechnischen Kolloquiums Hannover, 1999
- [14] Wötting, G.; Wagemann, A.; Dwuletcki, H.; Tepper, B.; Barnert, L.:  
Development And Performance Evaluation Of Silicon Nitride Inserts In  
Hot-Forging Tools  
Proceedings Werkstoffwoche 2000
- [15] Frassek, L.; Wötting, G.:  
Siliciumnitrid – der keramische Wälzlagerwerkstoff  
TAE-Publikation „Keramiklager“, Techn. Akademie Esslingen, 2001
- [16] Ojard, G.; Hennicke, J.; Lindner, H.A.; Thoma, H.; et al.:  
Ultrasonic Evaluation Of Ceramic Rolling Elements  
Proc. 1996 JANNAF Conf., Albuquerque, NM,
- [17] Feuer, H.:  
Silicon Nitride – The Ultimate Material For Molten Metal Treatment?  
CFI-interne Schrift, 2001
- [18] Schick Tanz, R.; Scherer, H. G.; Matz, B.:  
Einsatz von Hochleistungskeramik in hermetisch dichten  
Permanentmagnetantrieben  
Ker. Z. 51 (1999) 1058 – 1063

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 15) finden sich auf den folgenden Seiten.

# Mechanik und Elektronik

**SN in der Technik**

Dr. Gerhard Wötting,  
Dr. Rolf Wagner  
H.C. Starck-Ceramics GmbH & Co. KG  
Selb



# Siliciumnitrid-Keramik

( $\text{Si}_3\text{N}_4$  bzw. SN)

## Eigenschaften und Anwendungen

Dr. Gerhard Wötting,  
Dr. Rolf Wagner  
H.C. Starck-Ceramics GmbH & Co. KG  
Selb

## Die Siliciumnitrid-Familie:

- umfasst poröse bis hochdichte Werkstoffe
- resultierend aus verschiedenen Technologien

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| - porös: Ausgangspulver            | = Si  |
| Prozess                            | = Reaktionssintern                                |
| Produkt                            | = „RBSN“  |
| - dicht: Ausgangspulver            | = Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> + Sinteradditive |
| Prozess                            | = Flüssigphasen-Sintern                           |
| Produkt                            | = „SSN“ (ND, GD, HIP)                             |
| - Sonderfall: Nachsintern von RBSN |   |
| Ausgangsprodukt                    | = RBSN + Sinteradditive                           |
| Prozess                            | = Flüssigphasen-Sintern                           |
| Produkt                            | = „SRBSN“   |

## Charakteristische Werkstoffeigenschaften von dichten SN-Werkstoffen

- Niedrige Dichten
- Hohe Festigkeit von RT bis >1000 °C
- Hohe Bruchzähigkeit
- Mittlerer E-Modul
- Geringe Wärmedehnung
- Mittlere Wärmeleitfähigkeit



- Vergleichsweise geringe Sprödigkeit
- Hohe Abrasions- und Korrosions-Beständigkeit
- Hohe Thermoschock-Beständigkeit

**Möglichkeiten des „Maßschneiderns“  
von SN-Eigenschaften:**



- Qualität (Kosten) des SN-Pulvers
- Art und Menge von Sinterhilfsmitteln
- Art, Menge und Charakteristika von Drittphasen
- Sintern-/ Verdichtungs-Verfahren



- Gefügebeschaffenheit
- Eigenschaften wie:
  - RT- u. HT-Festigkeit
  - Härte
  - Korrosions-Beständigkeit
  - Elektrische Leitfähigkeit
- Werkstoff-/ Bauteil-Kosten

## Charakteristische Eigenschaften von SN-Keramik

| Werkstoffklasse:           | RBSN   | ND-SRBSN | ND-SSN | GD-SSN |       |       | HIP-SSN |
|----------------------------|--------|----------|--------|--------|-------|-------|---------|
|                            |        |          |        | MF     | TF    | EM*** |         |
| Werkstoffnr. (z.B.)        | N1203  | N5204    | N7205  | N3214  | N3220 | N3250 | N8201   |
| Dichte                     | > 2,20 | > 3,20   | 3,22   | 3,23   | 3,22  | 3,85  | 3,24    |
| Porosität                  | ≤ 20   | < 1      | < 1    | < 1    | < 1   | < 1   | < 1     |
| Biegefestigkeit* RT        | > 200  | 750      | > 750  | 1000   | 800   | 750   | 1050    |
| Biegefestigkeit* 1000 ° C  | > 250  | 500      | > 450  | 800    | 750   | 650   | 750     |
| Biegefestigkeit* 1200 ° C  | > 250  | 300      | 250    | 550    | 650   | -     | 400     |
| Biegefestigkeit* 1350 ° C  | 220    | -        | -      | 300    | 500   | -     | -       |
| Weibull-Modul              | ≥ 10   | ≥ 15     | ≥ 15   | ≥ 18   | ≥ 15  | ≥ 15  | ≥ 15    |
| Bruchzähigkeit*            | 4,0    | 6,5      | 6,7    | 6,5    | 7,5   | 6,0   | 6,0     |
| Härte (HV10)               | 5,0    | 15,0     | 15,0   | 15,3   | 15,5  | 15,0  | 15,0    |
| E-Modul                    | 120    | 290      | 300    | 320    | 320   | 335   | 300     |
| Wärmeleitfähigkeit         | 10     | 30       | 22     | 25     | 30    | 24    | 25      |
| Wärmedehnung (RT-1000 ° C) | 2,9    | 3,8      | 3,4    | 3,4    | 3,5   | 5,1   | 3,4     |

\* (4-PM, 40/20 mm)

\*\* Nihara

Elektr. Leitfähig.  
ca.  $4 \cdot 10^{-13}$  S/m

## Formgebungsverfahren für SN-Bauteile



### Etabliert:

- Axiales Pressen
- Kaltisostatisches Pressen (CIP)
- Spritzguss
- Schlickerguss

### Möglich:

- Extrudieren
- Folienguss

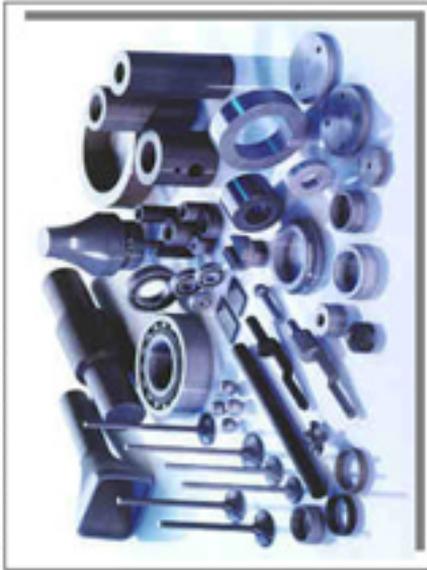
### Sonderverfahren:

- CIP + Grünbearbeitung

**Herstellung eines komplexen Bauteils  
durch Grünbearbeitung**



## Anwendungsbeispiele von SN-Bauteilen (1): Maschinen- und Motorenbau



Ventile  
Führungen  
Bolzen

→

Ventile  
CR-  
Komponenten

→

Halterungen  
Ziehdoorne  
Walzen

→

**Mechanische Festigkeit  
Abrasions- und Korrosions-Beständigkeit  
Gewicht**

## Anwendungsbeispiele von SN-Bauteilen (2): Wälzlagerkomponenten



### Vorteile und Einsatzbereiche von SN-Wälzlagerkomponenten

| Vorteile mit SN-Lagerkomponenten |
|----------------------------------|
| Geringes Gewicht                 |
| Reduzierte Reibung               |
| Verschleißbeständigkeit          |
| Korrosionsbeständigkeit          |
| Temperaturbeständigkeit          |
| Hohe Steifigkeit                 |
| Hohe Dämpfung                    |
| Elektrisch isolierend            |
| Nichtmagnetisch                  |

| Einsatzbereiche         |
|-------------------------|
| Werkzeugspindelager     |
| Turbomolekularpumpen    |
| Linearfahrungen         |
| Zahnbohrturbinen        |
| Vakuumtechnik           |
| Nahrungsmittelindustrie |
| Chemiepumpen            |
| Metallurgt              |
| Fluglager               |

## Beispiel: Haupttriebwerke des Spaceshuttles



**PRATT & WHITNEY**  
**HIGH PRESSURE TURBOPUMPS**  
*Line Replaceable Units for the Space Shuttle Main Engine*

| Fuel Turbopump           |                        | Oxidizer Turbopump       |                        |
|--------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|
| Propulsion               | 1 Liquid Rocket Engine | Propulsion               | 1 Liquid Rocket Engine |
| Weight                   | 66,300 gpm             | Weight                   | 23,400 gpm             |
| Discharge Pressure (max) | 4,800 psi              | Discharge Pressure (max) | 3,700 psi              |
| Rated Discharge          | 11,000 gpm             | Rated Discharge          | 17,000 gpm @ 1,500 rpm |
| Rated Discharge          | 11,000 gpm             | Rated Discharge          | 17,000 gpm             |
| Rated Inlet Temperature  | 1,800 °R               | Rated Inlet Temperature  | 1,800 °R               |
| Service Life             | 400 Missions           | Service Life             | 400 Missions           |
| Design Life              | 300 Missions           | Design Life              | 300 Missions           |

**Pratt & Whitney**  
 1111 North Central Expressway  
 Prattville, AL 36078

**Space Shuttle Award Process**  
 1981-1988



Einsatz von keramischen Rollen und Kugeln in Triebwerken für das Space-Shuttle

## Anwendungsbeispiele von SN-Bauteilen (3):

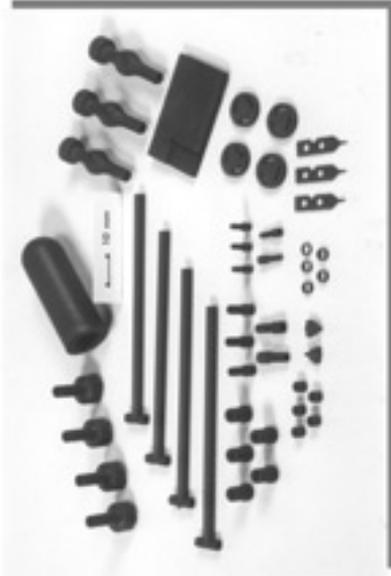
### Gießertechnik



- Geringe Benetzung durch NE-Schmelzen
- Festigkeit
- Thermoschock-Beständigkeit
- Lebensdauer

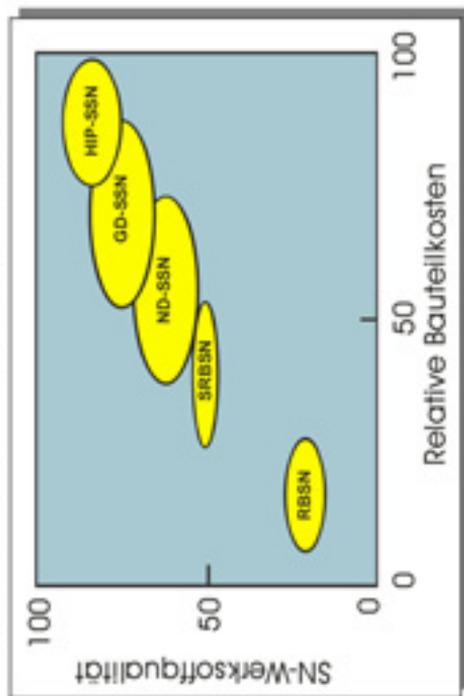


## Anwendungsbeispiele von SN-Bauteilen (4): Spritzgegossene Bauteile u.a. für Medizintechnik



- Korrosionsbeständigkeit gegen Körperflüssigkeiten u. Sterilisierungsmittel
- Thermische u. Thermoschock-Beständigkeit
- Festigkeit u. elektrische Isolation
- Bauteil-Kosten

## Kosten von SN-Bauteilen Werkstoffqualität und Herstellungstechnologie



- Hartbearbeitungs-Aufwand: bis 80 %
- Deshalb:
  - Endkonturnahe Fertigung
  - Beschränkung auf Funktionsflächen
  - Keramikgerechte Konstruktion

## Zusammenfassung

- Bauteile aus dichtem SN sind in vielen technischen Anwendungen etabliert
- Werkstoffeigenschaften und Bauteilkosten sind weit variierbar, insbesondere durch reduzierten Hartbearbeitungsaufwand
- Bauteilzuverlässigkeit kann durch zerstörungsfreie Prüfung gewährleistet werden

**=> Dichtes SN ist Werkstoff der Wahl für hochbeanspruchte, zuverlässige Bauteile**