

4.7. Hochbelastbare SN-Bauteile für den Maschinen- und Motorenbau

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

Die Folien finden Sie ab Seite 586.

Eigenschaften und Anwendungen von Siliciumnitrid- und Siliciumcarbid-Werkstoffen

4.7.1. 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 Si_3N_4 - und SiC-Werkstoffqualitäten, Bauteilen und Anwendungen bei einem mittelständigen Hersteller wie H. C. Starck-Ceramics, 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.

4.7.2. Einleitung

Keramische Werkstoffe auf der Basis von Siliciumnitrid (Si_3N_4 , bzw. SN)^x und Siliciumcarbid (SiC bzw. SIC)^x 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 sind 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.

^x Chemische Formel bzw. Werkstoffbezeichnung

4.7.3. SN- und SiC-Werkstoffvarianten und deren Eigenschaften

4.7.3.1. 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 gepreßtes **SN**, dem **HIPSN**, wobei die Qualitäts- und Komponentenvielfalt noch durch verschiedene einsetzbare Formgebungsverfahren der gleichen Basiszusammensetzung erweitert wird. Tab.1 gibt hierzu einen Überblick der SN-Werkstoffe von H.C.Starck-Ceramics nach Formgebung durch isostatisches Pressen (**CIP**)[∇], deren Charakteristiken sich kurz wie folgt beschreiben lassen:

Das poröse **RBSN** weist entsprechend Tab.1 eine vergleichsweise niedrige Festigkeit bei Raumtemperatur (RT) 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 Reaktionssintern 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 $\leq 1.450^{\circ}\text{C}$ ist dieser „**PM-RBSN**“-Werkstoff[×] exzellent geeignet als Matrixmaterial für einen lang- als auch kurzfaserverstärkten, schädigungstoleranten Compositewerkstoff, da schwin-

[∇] cold isostatic pressing

[×] Firmenbezeichnung

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

Durch Zusatz von Sinterhilfsmitteln kann das **RBSN** bei **Niederdruck** nachgesintert werden („**ND-S**“)^x, wobei das resultierende **ND-SRBSN**^x 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 Si₃N₄-Pulver lassen sich dichte SN-Werkstoffe und -bauteile zu vergleichsweise niedrigen Kosten herstellen (**ND-SSN**)^x. 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**“)^x. Durch die Wahl der Zusammensetzung lassen sich dabei die spezifischen Eigenschaften dieser **GD-SSN**-Qualitäten^x einstellen, wie in Tab.1 aufgeführt. So ist die Qualität N3214^x für Anwendungen unter hohen mechanischen Belastungen, wie z. B. in der Motoren- und Lagertechnik konzipiert.

Speziell für Anwendungen bei Temperaturen über 1.000°C unter oxidierenden und (im begrenzten Maße) korrosiven Einflüssen wurde die Qualität N3220^x 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]

^x Firmenbezeichnung

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

*** Elektr. Leitfähigkeit.

ca. $4 \cdot 10^3$ S/m

* (4-Pkt, 40/20 mm)

** Niihara

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

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 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**“)^x hergestellt werden. Diese Qualität (N8201)^x 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 dem 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

^x Firmenbezeichnung

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 Folien gießen machbar, müssten aber für bestimmte Produkte adaptiert werden.

4.7.3.2. SiC-Werkstoffe

Aufgrund der zu Si_3N_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, siliciuminfiltrierte **SiC (SISiC)**. Typische Eigenschaften dieser beiden Werkstoffvarianten sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Werkstoffklasse:	SSiC	SiSiC	(LPS-SiC)
Dichte [g/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 für 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 Silicium (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 °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. Tabelle 3 zeigt hierzu das Eigenschaftsspektrum einer LPS-SiC-Entwicklungsvariante, die sich wegen ihrer höheren Festigkeit und Bruchzähigkeit bereits in diversen Tests als vorteilhaft erwies. 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 kalisostatische Pressen (CIP) zu möglichst endkonturnahen Teilen. Für all jene Fälle, wo eine Endkonturnähe nicht erreicht wer-

[×] Firmenbezeichnung, nach Norm LPSiC

den 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

Die Grünbearbeitung 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.

4.7.4. 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. Dabei setzt sich bezüglich letzterem mehr und mehr die Berücksichtigung der "life-cycle costs" durch, in die auch Aufwände für Instandhaltung und Reparatur mit eingehen. Relevante Einsatzbereiche umfassen die Luft- und Raumfahrt, 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.

4.7.4.1. SN im Maschinen- und Motorenbau sowie der Verfahrens- und Fertigungstechnik

Aufgrund der günstigen Kombination von Eigenschaften – wie hoher mechanischer Festigkeit und Bruchzähigkeit bei Raumtemperatur bis zumindest 1.000°C, niedrigem spezifischen Gewicht, geringer Wärmedehnung 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 kürzere 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]

4.7.4.2. 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 das hinsichtlich seines Reibungs- und Verschleißverhaltens optimierte heißisostatisch gepresste Siliciumnitrid (HIPSN) eingesetzt, wobei die Endbearbeitungs- und Prüftechnik für hochpräzise SN-Kugeln beherrscht wird. Diese Produkte sind bei führenden Lagerherstellern erprobt. [15]

Die Einsatzmöglichkeiten für keramische Komponenten in Rollen- und Kugellagern sind vielfältig. Man findet sie zunehmend in schnell drehenden 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 hohem ökonomischem und ökologischem 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 36.000 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

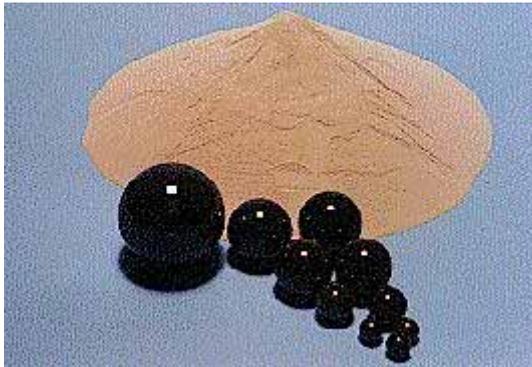


Bild 3: Hochpräzise SN-Wälzlagerkugeln

4.7.4.3. 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 auf 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 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 4 dargestellt [8].

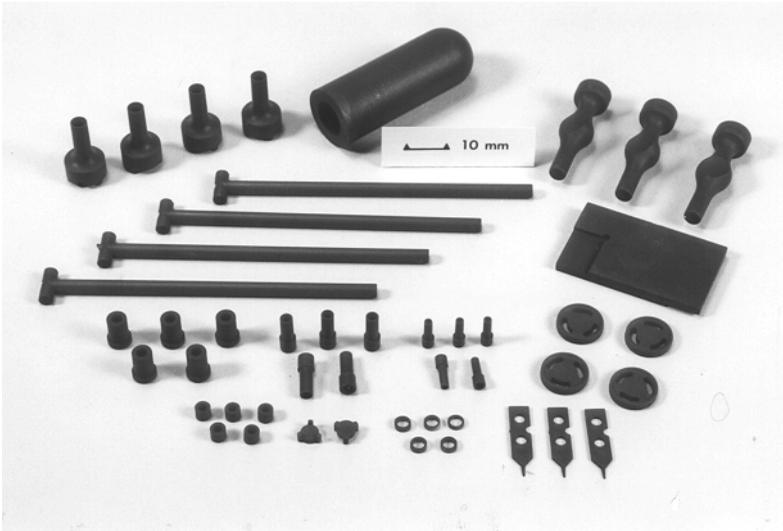


Bild 4: Endkonturnah spritzgegossene SN-Teile für u. a. die Medizintechnik

4.7.4.4. 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 Exzentrerschnecken-Pumpen, Düsen und Mundstücke, Dosierkolben und -büchsen, Sichterräder zum Klassieren und Homogenisieren von hochabrasivem Mahlgut, Mühlenauskleidungen, Brenner- und Wärmetauscher-Rohre und vieles mehr. Die Herstellung derart komplexer Bauteile wie Sichterräder, 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 millionenfach in Pkw-Wasserpumpen verbaut werden. Hohe Nachfrage besteht ferner für die hochpräzisen, flüssigkeitsgeschmierten Dichtsysteeme 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 bearbeitungstechnisch höchst anspruchsvollen Gleitlagerkomponenten ermöglichen einen langlebigen, zuverlässigen Maschinenbetrieb mit ökonomischen als auch ökologischen Vorteilen. [18]

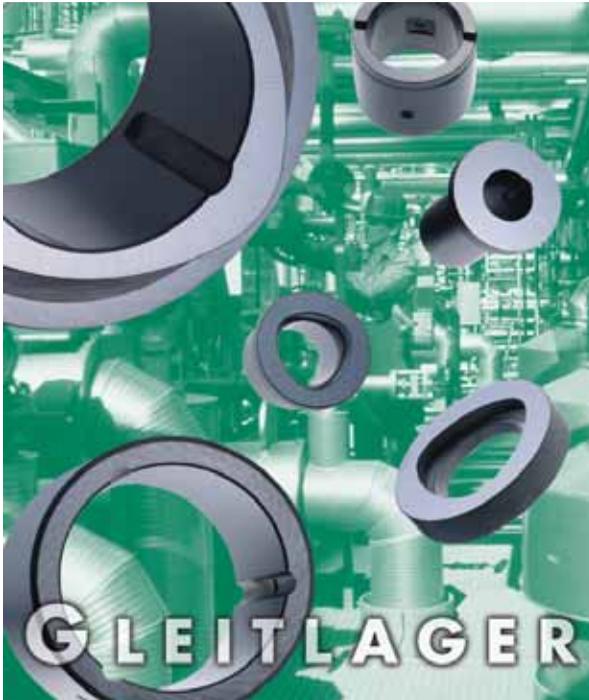


Bild 6: Hochpräzise SiC-Gleitlager

4.7.5. 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. Zur Optimierung der Kosten wurden bei Rohstoffen 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 keramikkonforme 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 Si₃N₄-
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.:
Pre-ceramic-Modified Reaction-Bonded Silicon Nitride (PM-RBSN)
Cer. Eng. Sci. Proc. Vol. 21 (2000) Issue 4, 575 - 582
- [4] Wötting, G.; Hagemeyer, M.; Müller, W.; Heusler, L.; Greil, P.:
Kostengünstiges, komplex geformtes Siliciumnitrid – Bauteil zur Reini-
gungsbehandlung 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 Silicium-
nitrid-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-Si₃N₄ Particle Composites
Trans. ASME, Vol. 122 (2000) 8-12
- [8] Schönfelder, L.; Roth, S.; Wötting, G.; Gugel, E.:
Injection Moulded Si₃N₄ Structural Components
cfi/Ber. DKG 74 (1997) 141-145
- [9] Prechtl, 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 Formgebungs-
verfahren für Klein- und Mittelserien
Fortschrittber. DKG, Band 16 (2001) Heft 2, 41 - 45
- [11] Wötting, G.; Hennicke, J.; Feuer, H.; Thiemann, K. H.; u.a.:
Reliability And Reproducibility Of Silicon Nitride Valves:
Experiences Of A Field Test
Proc. 7th. 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 Ver-
kehrstechnik", 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.; Dwuletzi, 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] Schicktanz, 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 17) finden sich auf den
folgenden Seiten.

Maschinenbau

**Hoch belastbare Siliciumnitrid Bauteile
für den Maschinen- und Motorenbau**

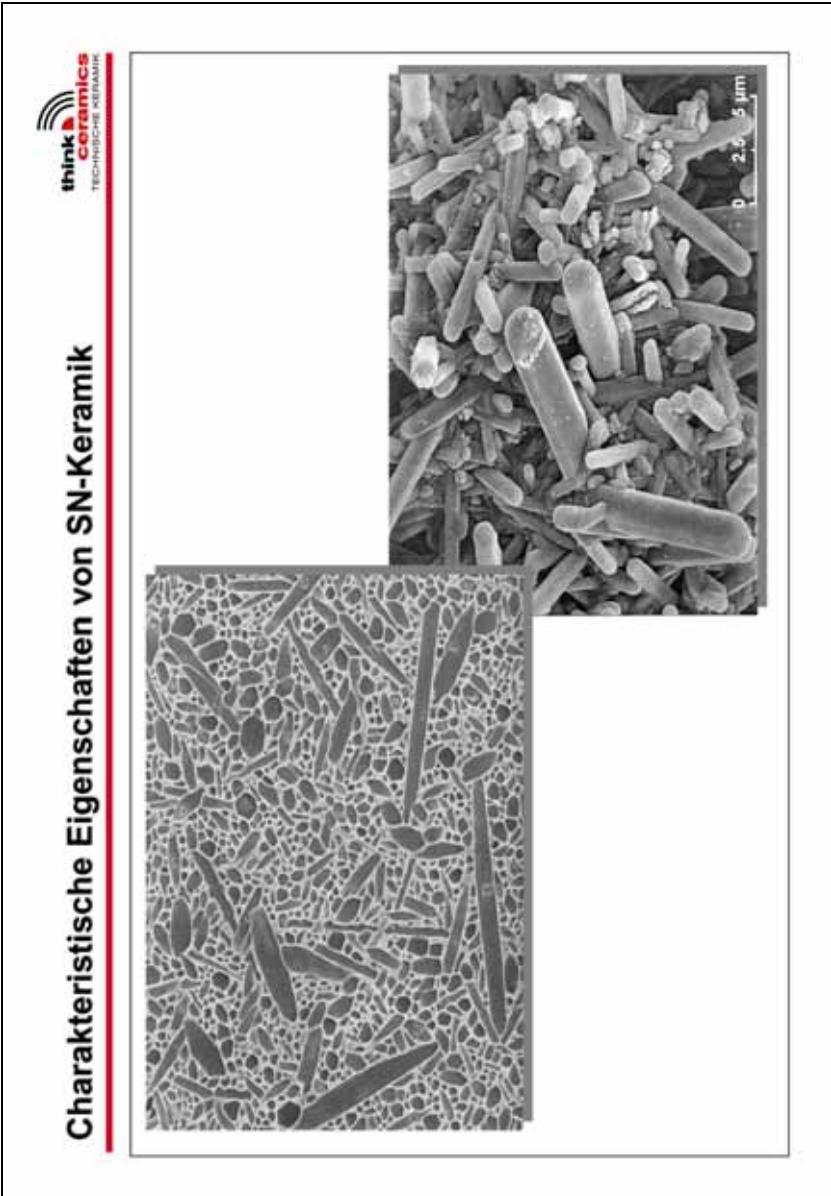
Dr. Rolf Wagner
H.C. Starck Ceramics GmbH & Co. KG
Selb



Die Siliciumnitrid-Familie:

- umfasst poröse bis hochdichte Werkstoffe
- resultierend aus verschiedenen Technologien

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



4.7. SN-Bauteile - Folie 3

Charakteristische Werkstoffeigenschaften von dichten SN-Werkstoffen

- Niedrige Dichten
 - Hohe Festigkeit von RT bis $>1000\text{ °C}$
 - 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:

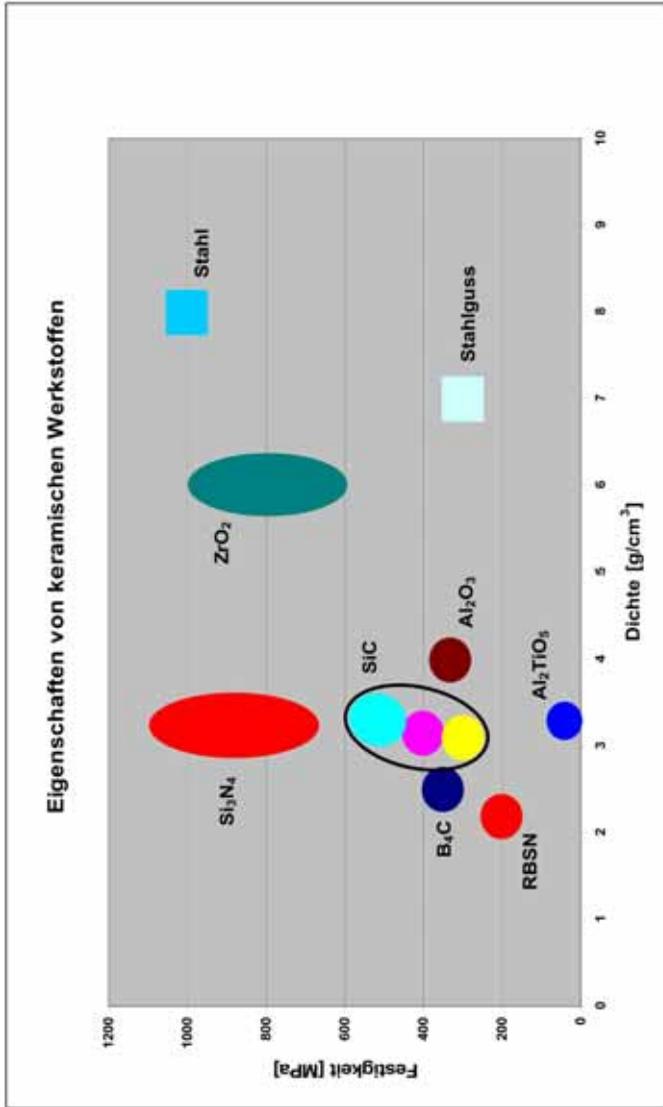


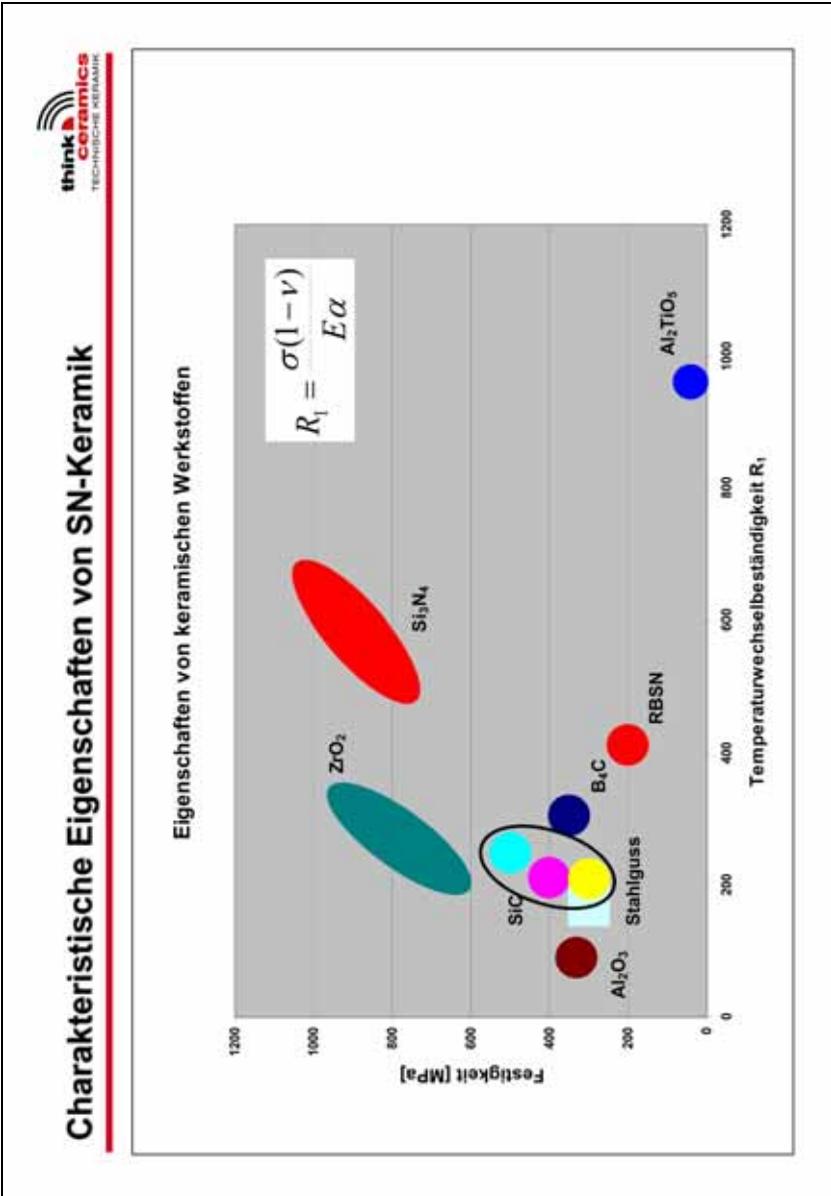
- Qualität (Kosten) des SN-Pulvers
- Art und Menge von Sinterhilfsmitteln
- Art, Menge und Charakteristika von Drittphasen
- Sintern-/ Verdichtungsverfahren



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

Charakteristische Eigenschaften von SN-Keramik





think ceramics
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DUISBURG

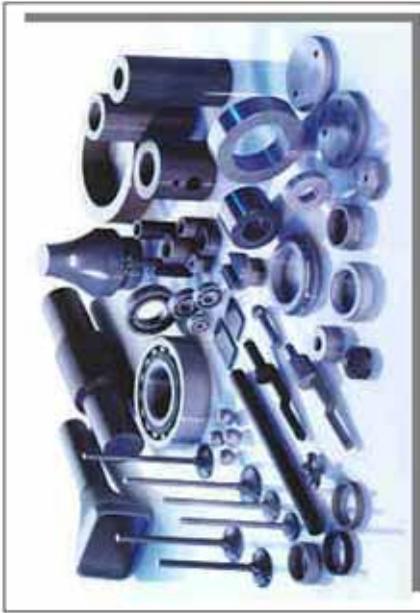
4.7. SN-Bauteile - Folie 7

Anwendungsbeispiele von SN-Bauteilen (1): Spritzgeessene Bauteile u.a. für Medizintechnik



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

Anwendungsbeispiele von SN-Bauteilen (2): Maschinen- und Motorenbau



Ventile
Führungen
Bolzen →

Ventile
CR-
Komponenten →

Halterungen
Ziehdoorne
Walzen →

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

**Anwendungsbeispiele von SN-Bauteilen (3):
Extrudieren mit Keramik**



**Extruder- und Spritzguss-
Schnecken**



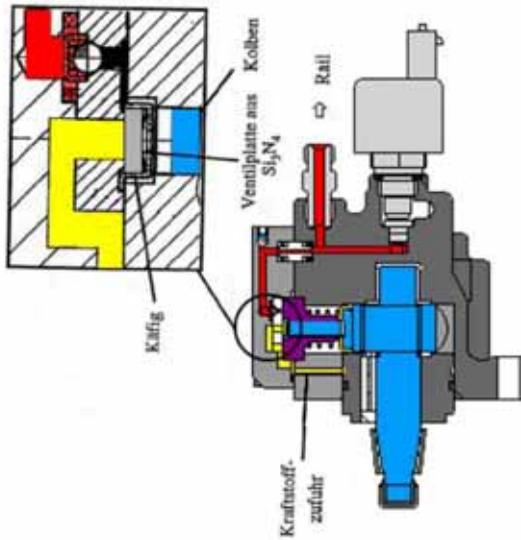
Inliner für Extruder

Anwendungsbeispiele von SN-Bauteilen (4):

Walzen mit Keramik

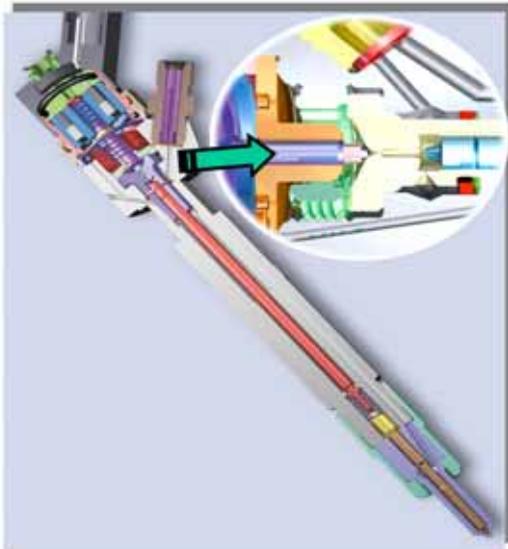


Anwendungsbeispiele von SN-Bauteilen (5): Kraftstoff-Einspritzsysteme



Anwendungsbeispiele von SN-Bauteilen (6):

Kraftstoff-Einspritzsysteme



- mechanische Festigkeit
- geringes Gewicht
- Verschleißbeständigkeit
- geringe Reibung
- Bauteil-Kosten

Anwendungsbeispiele von SN-Bauteilen (7): Wälzlagerkomponenten



Vorteile mit SN-Lagerkomponenten

- Geringes Gewicht
- Reduzierte Reibung
- Verschleißbeständigkeit
- Korrosionsbeständigkeit
- Temperaturbeständigkeit
- Hohe Steifigkeit
- Hohe Dämpfung
- Elektrisch isolierend
- Nichtmagnetisch

Einsatzbereiche

- Werkzeugspindellager
- Turbomolekularpumpen
- Linearfürhungen
- Zahnbohrturbinen
- Vakuumtechnik
- Nahrungsmittelindustrie
- Chemiepumpen
- Metallurgie
- Fluglager

Beispiel: Haupttriebwerke des Spaceshuttles

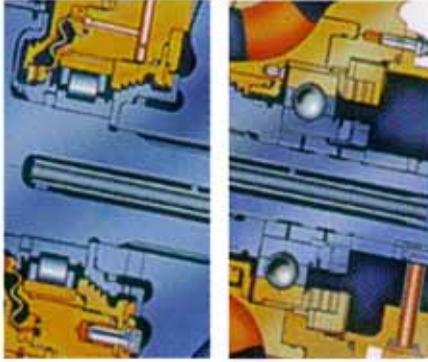


PRATT & WHITNEY
HIGH PRESSURE TURBOPUMPS
Line Replaceable Units for the Space Shuttle Main Engine

Fuel Turbopump		Oxidizer Turbopump	
Population	1 Liquid Hydrogen Turbopump	Population	1 Liquid Oxygen Turbopump
Weight	46,400 lbs (21,000 kg)	Weight	5,000 lbs (2,270 kg)
Discharge Pressure (max)	642 PSIG (4,430 kPa)	Discharge Pressure (max)	1,370 PSIG (9,530 kPa)
Flow	71,000 gph (267,000 gpm)	Flow	21,300 gph (76,600 gpm)
Shaft Horsepower	1,800 hp (1,340 kW)	Shaft Horsepower	1,300 hp (960 kW)
Turbine Inlet Temperature	405 Maximum	Turbine Inlet Temperature	897 Maximum
Service Life	250 Missions	Service Life	240 Missions
Design Life	250 Missions	Design Life	240 Missions

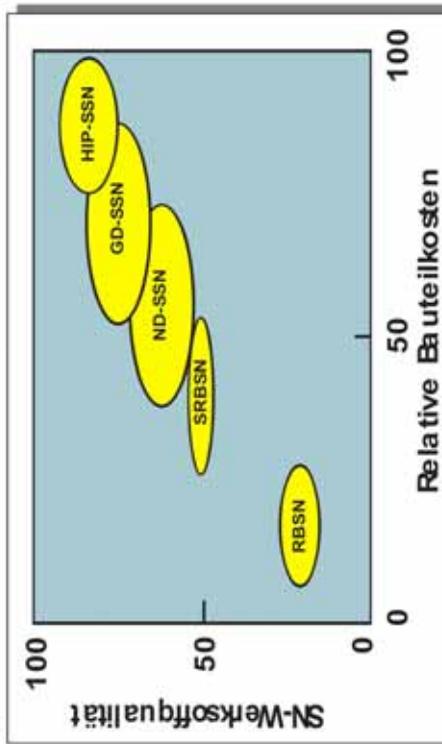
Pratt & Whitney
 Engine & Turbopump Division
 465 New York Avenue, N. Springfield, MA 01105
 410-232-2222

Space Shuttle
 AIRCRAFT



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

Kosten von SN-Bauteilen Werkstoffqualität und Herstellungstechnologie



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

Zusammenfassung



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

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