

3.3 SN in industriellen Anwendungen z.B. Wälzlager

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

Die Folien finden Sie ab Seite 282.

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 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.

3.3.1 Einleitung

Keramische Werkstoffe auf der Basis von Siliciumnitrid (Si_3N_4 , bzw. SN^{\times}) und Siliciumcarbid (SiC bzw. SiC^{\times}) 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.

[×] Chemische Formel bzw. Werkstoffbezeichnung

3.3.2 SN- und SiC-Werkstoffvarianten und deren Eigenschaften

3.3.2.1 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 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 kurzfaserver-

[∇] cold isosatic **p**ressing

[×] Firmenbezeichnung

verstärkten, schädigungstoleranten Compositewerkstoff, da schwindungsbedingte 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 Si_3N_4 -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
				MP	TP	EM***	
Werkstoffe: (z.B.)	N1203	N6204	N7206	N3214	N3220	N3250	N6201
Dichte	> 2,20	> 3,20	3,22	3,23	3,22	3,05	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	-	-
Weißul-Modul	≥ 10	≥ 15	≥ 15	≥ 16	≥ 15	≥ 15	≥ 15
Bruchhärte**	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
Wärmetätigkeit RT	10	30	22	25	30	24	25
Wärmeausdehnung (RT-1000°C)	2,9	3,8	3,4	3,4	3,5	5,1	3,4

* (4-Phl, 40/20 mm)
 ** Fallhöhe
 *** Elektr. Leitfähigk.
 bei 4 10⁷ S/m

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 Baseigenschaften 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-SBSN	ND-SSN	GD-SSN			HIP-SSN
				MP	TP	EM	
Formgebungsverfahren:							
Axiales Pressen	o	o	+	+	o	o	+
Kreisform. 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 kom-

^x Firmenbezeichnung

plexere, 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.

3.3.2.2 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)**^x zu reduzieren versucht, ohne die günstigen tribologischen Eigenschaften negativ zu beeinflussen. Tabelle 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

^x Firmenbezeichnung, nach Norm LPSiC

bisher kaum eingesetzt wird. Eine wichtige Rolle spielt jedoch wiederum das kalt 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

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.

3.3.3 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. 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.

3.3.3.1 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 Wärme- dehnung 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]

3.3.3.2 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 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 approbiert. [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 hohen ökonomischen und ökologischen Nutzen. Prominente Beispiele hierfür sind der Space Shuttle, bei dem die Treibstoffpumpen der Haupttriebwerke bereits seit 1995 mit Hybrid-

lagern 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	Werkzeugspeindellager
Reduzierte Reibung	Turbomolekularpumpen
Verschleißbeständigkeit	Linearföhrungen
Korrosionsbeständigkeit	Zahnbohrturbinen
Temperaturbeständigkeit	Vakuuntechnik
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

3.3.3.3 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-Metallerzeuger 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: ATI- und SN-Bauteile für die Gießereitechnik

3.3.3.4 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 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 5 dargestellt [8].



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

3.3.3.5 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 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 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 bearbeitungstechnisch höchst anspruchsvollen Gleitlagerkomponenten ermöglichen einen langlebigen, zuverlässigen Maschinenbetrieb mit ökonomischen als auch ökologischen Vorteilen. [18]

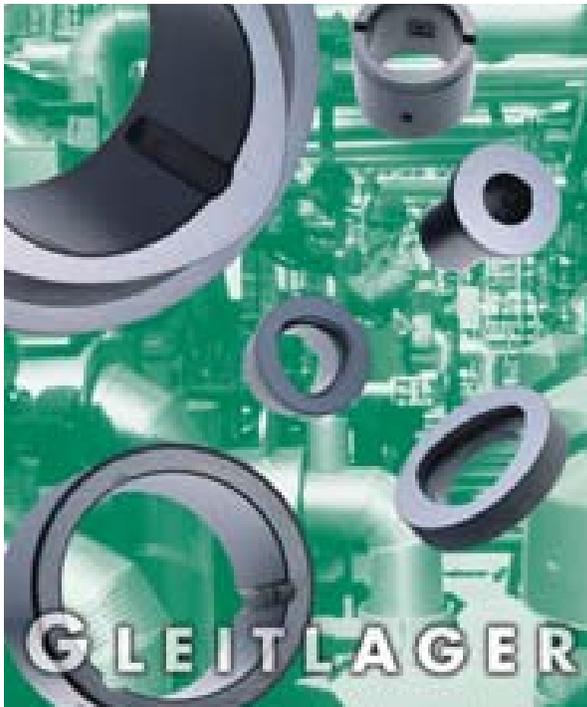


Bild 6: Hochpräzise SiC-Gleitlager

3.3.4 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 zerstörungsfreien 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 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_3N_4 -
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 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] 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 Formgebungs-
verfahren für Klein- und Mittelserien
Fortschrittber. DKG, Band 16 (2001) Heft 2, 41 - 45
- [11] Wötting, G.; Henicke, 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.; Dwuletzki, 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.

Maschinenbau

**SN in industriellen Anwendungen
z.B. Wälzlager**

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 ₃ N ₄ + 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-/ Verdichtungsverfahren



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



Charakteristische Eigenschaften von SN-Keramik

Werkstoffklasse:	R60SN	ND-SR605W	ND-S6N	GO-S6N		HP-S6N
				MF N03114	TF N0225	
Stromstoffe (z.B.)	Ni2O3	Ni2O4	Ni2O5	NiO	NiO	NiO
Dichte	> 2,20	> 3,20	3,22	3,23	3,22	3,24
Porosität	≤ 20	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Biegefestigkeit* RT	> 250	750	> 750	1000	800	1050
Biegefestigkeit* 1000 °C	> 250	500	> 450	600	750	750
Biegefestigkeit* 1350 °C	> 250	300	250	350	450	400
Biegefestigkeit* 1350 °C	220	-	-	300	300	-
Werkstoff-Modul	2-10	2-15	2-15	2-16	2-15	2-15
Bruchschlag* ¹⁾	4/5	6/5	6/7	6/5	7/5	6/0
Härte (HV10)	5/9	15/0	15/0	15/3	15/3	15/0
E-Modul	120	250	300	320	320	300
Wärmeleitfähigkeit	19	30	32	25	30	24
Wärmeausdehnung (RT-1000° C)	2,9	3,8	3,4	3,4	3,5	3,4

* (4-PR, 40/20 mm)
 ** Testiers

Elektr. Leitfähig.
ca. 4 · 10¹¹ S/cm

Formgebungsverfahren für SN-Bauteile



Etabliert:

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

Möglich:

- Extrudieren
- Folienguss

Sonderverfahren:

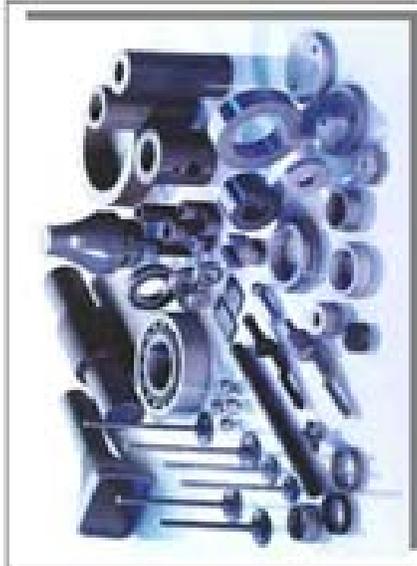
- CIP + Grünbearbeitung

**Herstellung eines komplexen Bauteils
durch Grünbearbeitung**



think green
Green Production

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



Ventile
Führungen
Bolzen

→

Ventile
CR-
Komponenten

→

Halierungen
Ziehforme
Walzen

→

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



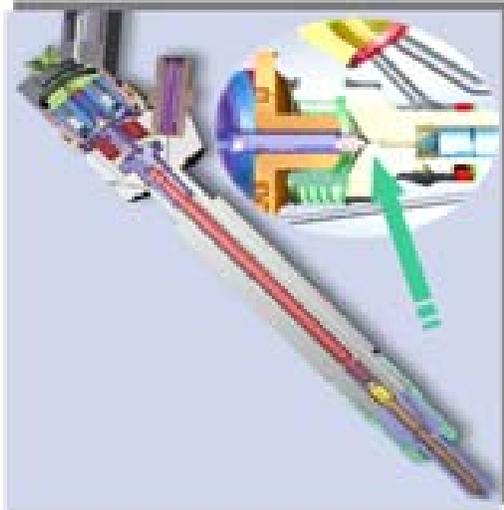
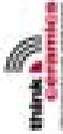
Anwendungsbeispiele von SN-Bauteilen (2): Spritzgessene Bauteile u.a. für Medizintechnik



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

Anwendungsbeispiele von SM-Bauteilen (3):

Kraftstoff-Einspritzsysteme



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



Anwendungsbeispiele von SN-Bauteilen (4): Wälzlagerkomponenten



Vorteile und Einsatzbereiche von SN-Wälzlagerkomponenten

Vorteile mit SN-
Lagerkomponenten
Geringes Gewicht
Bestimmte Hubweg
Verschleißfestigkeit
Korrosionsbeständigkeit
Temperaturbeständigkeit
Niedrige Reibigkeit
Hohe Dämpfung
Einsatz auch in verschleißempfindlichen
Technologien

Einsatzbereiche
Werkzeugmaschinen
Turboaufladungen
Linearführungen
Zahnradtriebwerke
Verfahrenstechnik
Nahrungsmittelindustrie
Chemieanlagen
Metallurgie
Flugzeuge

Beispiel: Haupttriebwerke des Spaceshuttles



Pratt & Whitney
High-Pressure Turbopumps
Low Reynolds Number Jet for the Space Shuttle Main Engine

Pratt & Whitney
Space Shuttle Main Engine

Model	5D
Year	1969
Weight	10,000 lb (4,500 kg)
Thrust	45,000 lbf (200 kN)
Specific Impulse	465 s
Efficiency	70%
Operating Temperature	3,000 K
Operating Pressure	100 atm
Operating Speed	10,000 rpm
Operating Voltage	28 VDC
Operating Current	100 A
Operating Power	2,800 W
Operating Frequency	1,000 Hz
Operating Lifetime	10,000 hours
Operating Environment	Space
Operating Conditions	High Temperature, High Pressure, High Speed
Operating Materials	Aluminum, Steel, Titanium, Inconel, Ceramic
Operating Components	Compressor, Turbine, Impeller, Nozzle, Thrust Chamber
Operating Applications	Space Shuttle Main Engine
Operating Manufacturers	Pratt & Whitney

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

Anwendungsbeispiele von SN-Bauteilen (5):

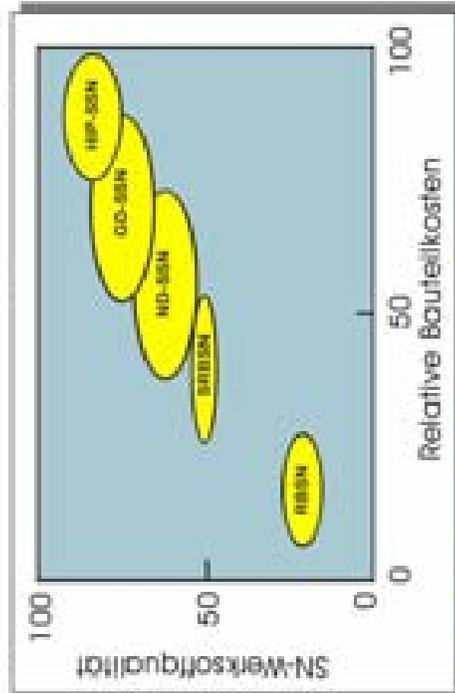
Gießertechnik



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

Kosten von SN-Bauteilen

Werkstoffqualität und Herstellungstechnologie



• Hartbearbeitungs-Aufwand: bis 80 %

• Deshalb:

- Endkontur nahe 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