

Inhaltsverzeichnis

Seminar

Technische Keramik in der Praxis 1999

**München, Stuttgart, Köln
Juni 1999**

- 1. Keramik - der andere Werkstoff
Werkstoffe, Eigenschaften, Nutzen und Systemanalyse**
- 2. Keramikgerechte Bauteilkonstruktion
Bauteiloptimierung aus Fertigungssicht**
- 3. Ausgewählte Beispiele für Verbindungstechniken**
- 4. Kosten- und nutzenorientierte Auswahl silikatischer Werkstoffe**
- 5. Maschinenbau**
 - **Aluminiumoxid in Verschleißschutzanwendungen**
 - **Ausgewählte Beispiele für den Einsatz von Keramik**
- 6. Hochtemperatur**
 - **SISIC in der thermischen Prozeßtechnik**
 - **Oxid- und Nichtoxidkeramische Brennhilfsmittel und Rollensysteme**
- 7. Ökonomische Lösungen für Basisaufgaben**
 - **Anwendungsorientierte Auswahl silikatischer Werkstoffe mit Praxisbeispielen aus der Elektrotechnik**
 - **Keramische Beschichtungen**
- 8. Weitere Aufsätze**

1. Keramik - der andere Werkstoff
Werkstoffe, Eigenschaften, Nutzen und Systemanalyse

Keramik - der andere Werkstoff

Werkstoffe, Eigenschaften, Nutzen und Systemanalyse

Dr. Hans Hoppert

ETEC

Gesellschaft für Technische Keramik mbH

Siegburg

1. Keramik - der andere Werkstoff

Für viele technische Anwendungen weisen keramische Werkstoffe ein hohes Zukunftspotential auf. Sie sind verfügbar, leicht, hart, fest, verschleißfest, hochoberflächentempert, thermisch sehr beständig, formbeständig, korrosionsbeständig, zeigen häufig sehr gute elektrisch und thermisch isolierende Eigenschaften und sind umweltverträglich entsorgbar.

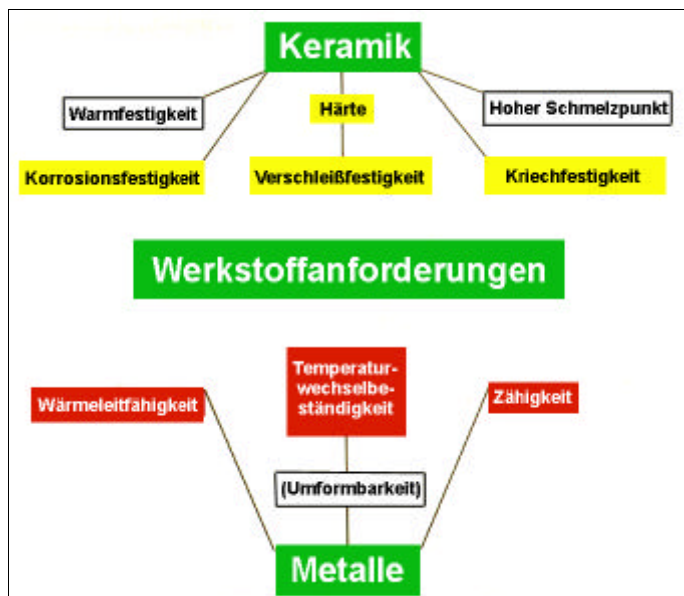


Bild 1.1: Werkstoffvergleich zwischen Keramik und Metallen

Keramik der Werkstoff der Zukunft? Hier ist die Euphorie über mögliche Anwendungen von Keramik der siebziger und achtziger Jahre vorüber, sie ist einer gesunden Skepsis gewichen. Heute besinnt man sich auf die Stärken der Keramik und will nicht mehr unbedingt jede anstehende Aufgabe durch den Einsatz von Keramik lösen. Die überzogene

Erwartungshaltung wurde durch eine realistische Einschätzung ersetzt. Bei diesen Betrachtungen besitzen vor allem Werkstoffverbunde - wie z.B. Metall-Keramik, aber auch Polymer-Keramik und Keramik-Keramik - eine hohe Bedeutung.

Hierfür drei Beispiele:

- Rührwerk für Rührwerkskugelmühlen: Verbund Keramik/Stahl (**Bild 1.2**)
- Antriebsrollen für Förderbänder: Verbund Keramik/Gummi/Stahl (**Bild 1.3**)
- Einlauf eines Hydrozyklons: Verbund Keramik/Keramik (**Bild 1.4**)

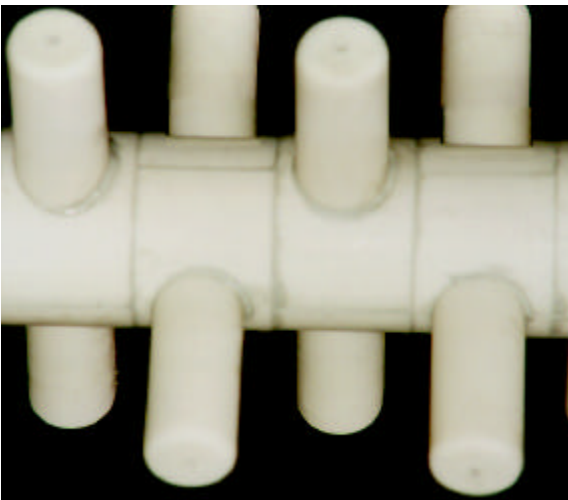


Bild 1.2: Rührwerkskugelmühle

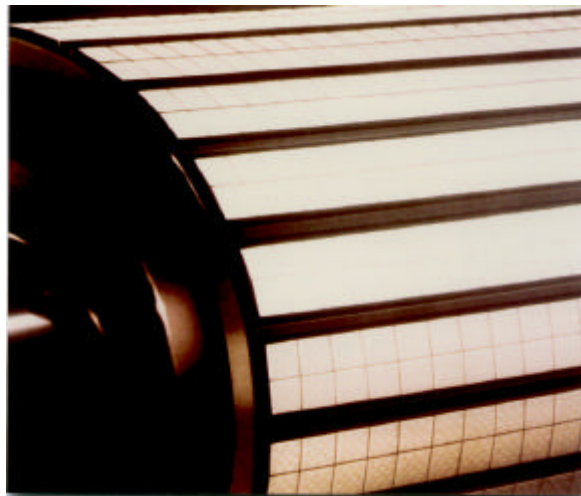


Bild 1.3: Antriebsrolle für Förderbänder

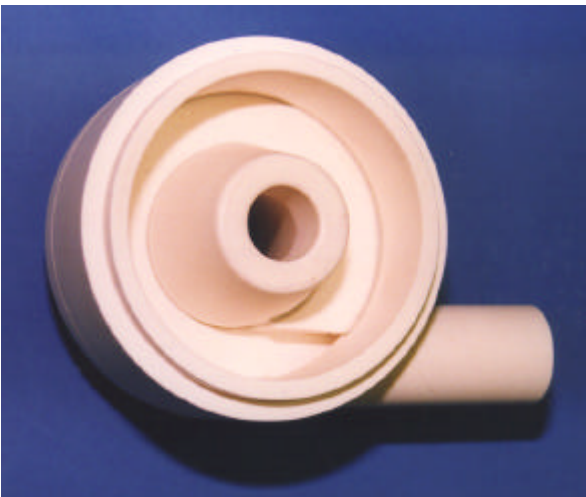


Bild 1.4: Einlauf eines Hydrozyklons

Keramik wird heute als Konstruktionswerkstoff für eine Vielzahl von Anwendungen eingesetzt oder in Betracht gezogen. Bei der Produktinnovation ist das Zusammenwirken von Werkstoff, Verarbeitung und Funktion von entscheidender Bedeutung. Je nach Einsatzzweck werden

unterschiedliche Werkstoffeigenschaften bzw. Eigenschaftskombinationen benötigt. Produktfindung und Produkterhaltung sind dabei nicht immer an neue Werkstoffe und neue Verarbeitungsverfahren gebunden. Vornehmlich in der Kombination von bekannten Werkstoffen und Verfahren liegt ein noch breiter, ungenutzter Spielraum für neue Problemlösungen. Die heutigen Aktivitäten richten sich verstärkt auf die Gewährleistung einer hohen Zuverlässigkeit. Um diese Ziele zu erreichen müssen die bei Keramik möglichen Versagensursachen berücksichtigt werden:

- **der spröde Bruch**
- **relativ niedrige Temperatur-Schockbeständigkeit**
- **das unterkritische Rißwachstum**
- **die Ermüdung**
- **das Kriechen**
- **Oxidation und Korrosion**

Oxidation und Korrosion sind in der Regel beim Einsatz von Keramik von geringer Bedeutung. Sie werden durch die chemische Zusammensetzung des Werkstoffs und durch das Umgebungsmedium bestimmt.

Ermüden und **Kriechen** sind keine keramikspezifischen Versagensmechanismen, sie treten auch bei Metallen und Polymeren auf.

Von Wichtigkeit ist das **sprödelastische Bruchverhalten** der Keramik, d.h. katastrophaler Bruch, unterkritisches Rißwachstum und Thermoschockempfindlichkeit.

Der **Sprödbbruch** kann nach den Gesetzen der Bruchmechanik durch die Griffithgleichung beschrieben werden:

$$\sigma_b = K_{Ic}/Y \cdot (\pi \cdot a_c)^{-1/2}$$

Danach ergibt sich die Bruchfestigkeit σ_b aus der Bruchzähigkeit K_{Ic} des Werkstoffes und der Größe des bruchauslösenden Defekts a_c . Y ist ein Geometriefaktor, der auch die Form und die Größe der bruchauslösenden Defekte beschreibt.

Metalle reagieren bei Belastung zunächst mit elastischer Verformung, dann mit plastischer Verformung. Daraus resultiert, daß lokale Spannungsspitzen durch plastische Verformung abgebaut werden können.

Bedingt durch den hohen Elastizitätsmodul und die daraus resultierende geringe Dehnung bei mechanischer Belastung ist dieser Mechanismus bei Keramik nicht möglich. Keramik reagiert auf Belastung zuerst mit elastischer Verformung, dann mit unterkritischem Rißwachstum und schließlich beim Erreichen hoher Rißfortschrittschwindigkeiten mit katastrophalem Bruch:

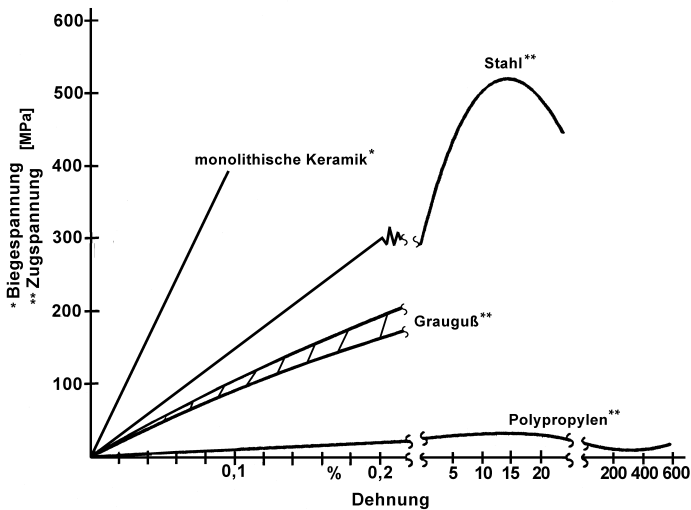


Bild 1.5 Bruchverhalten

Die Berücksichtigung des Spröbruchverhaltens bei der Konstruktion ist für die Anwendung von Keramik ein entscheidender Parameter. Eine Maßzahl hierfür ist der K_{Ic} - Faktor.

Das Bruchverhalten von Polymeren ist durch ihre Viskoelastizität bestimmt. Zu berücksichtigen ist die mit der Zeit auftretende Versprödung.

Keramische Werkstoffe sind **thermoschockempfindlich**, d.h. plötzliche Temperaturänderungen können zum Versagen führen. Ursache hierfür ist ihr hoher Elastizitätsmodul bzw. die daraus resultierende geringe Verformbarkeit und Sprödigkeit. Die Berechnung bzw. die Abschätzung von auftretenden Thermospannungen sind ein wichtiger Schritt bei der Auswahl und der Dimensionierung von Bauteilen. Sie lassen sich unter anderem durch die Thermoschockempfindlichkeits-Parameter R'_s und R''''_s charakterisieren:

$$R'_s = \lambda \cdot \sigma_b (1-\nu) / \alpha \cdot E$$

$$R''''_s = (K_{Ic} / \sigma_c)^2$$

Neben der Bruchfestigkeit σ_b und der Bruchfestigkeit K_{Ic} bestimmen die Wärmeleitfähigkeit λ , der Elastizitätsmodul E , die Querkontraktionszahl ν und vor allem der Wärmeausdehnungskoeffizient α die Thermoschockbeständigkeit.

	Al ₂ O ₃	MgO	ZrO ₂	SiC	Si ₃ N ₄ :		BeO	Al ₂ TiO ₅
					HPSN	RBSN		
α [$10^{-6}/K$]	8	12	11	4	3.2	2.5	8.0	1.8
E [GPa]	400	270	200	350	300	180	360	30
ν	0.22	0.17	0.25	0.20	0.28	0.23	0.25	0.2
λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	30	30	2.5	100	35	10	300	2.5
ρ [g/cm ⁻³]	3.9	3.5	6.0	3.2	3.3	2.4	3.0	3.6
C [Jg ⁻¹ K ⁻¹]	1.0	1.0	0.5	1.0	0.7	0.7	1.3	0.7
σ_c [MPa]	300	180	950	360	660	200	180	65
K_{Ic} [MPa \sqrt{m}]	4.5	3.0	10.0	4.0	7.0	2.0	4.8	
R_s [K]	73	46	324	206	495	342	47	962
R_s^I [KW/m]	2.19	1.38	0.81	20.6	17.3	3.42	14.1	2.41
R_s^{II} [Wcm ² g ⁻¹ K]	5.6	3.9	2.7	66	75	20	36	9.6
R_s^{III} [mm]	0.23	0.28	0.11	0.12	0.11	0.10	0.71	

Tabelle 1.1 Eigenschaften von Keramikwerkstoffen

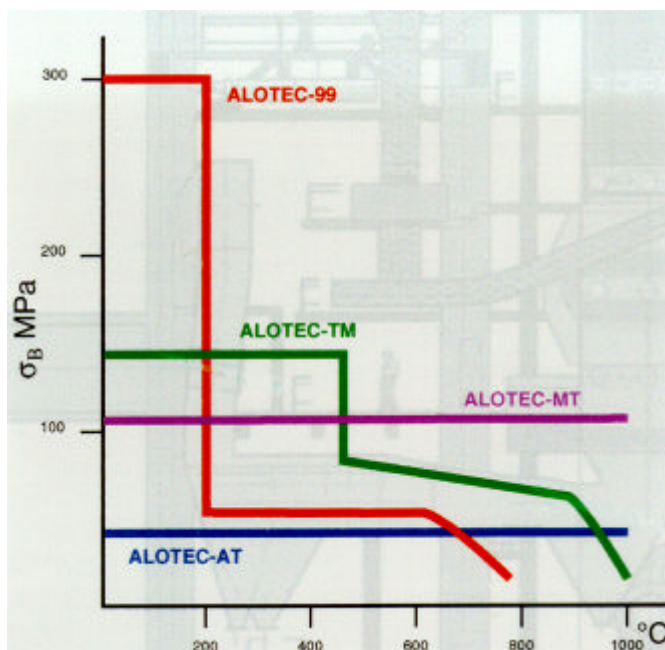


Bild 1.6 Thermoschockbeständigkeit (nach Hasselmann)

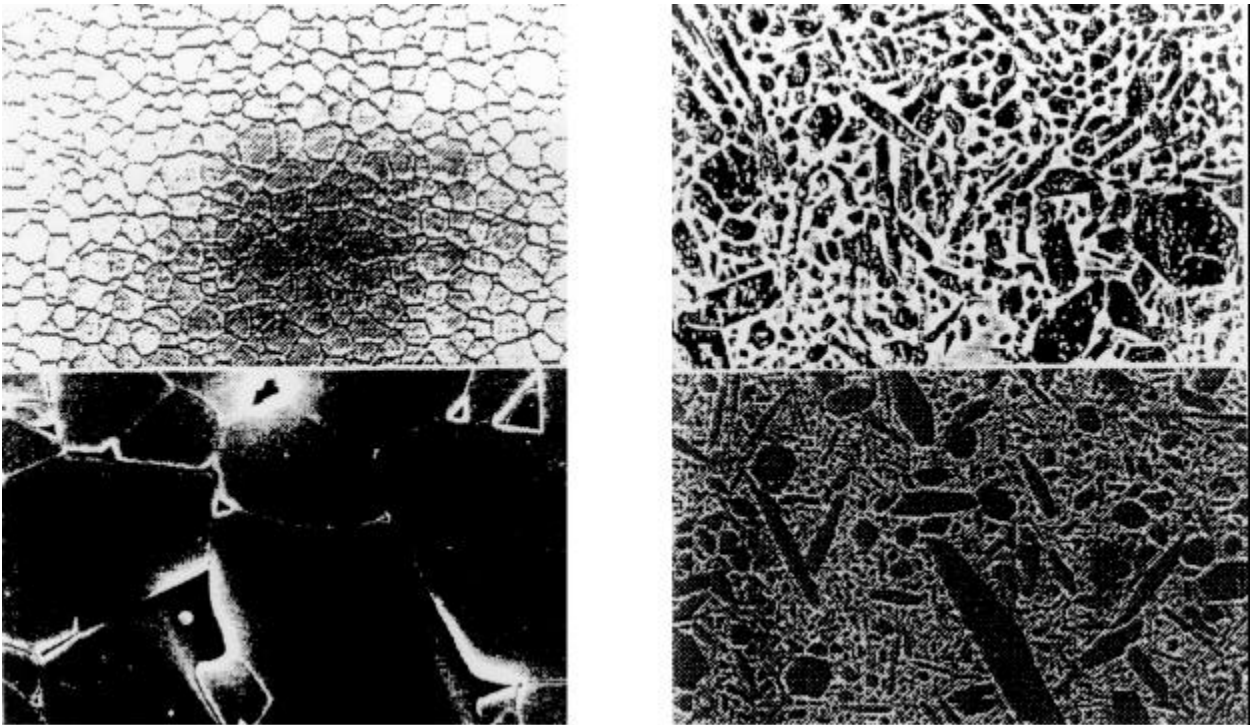


Bild 1.7 Einfluß des Gefüges auf TWB

Während sich Metalle als gutmütige Konstruktionswerkstoffe erweisen - sie verzeihen durch ihre Duktilität Konstruktionsfehler - sind bei den Keramikwerkstoffen strenge Konstruktionsrichtlinien zu beachten. Ein erprobtes Metallbauteil läßt sich in den seltensten Fällen erfolgreich auf Keramik übertragen. Die Gründe hierfür liegen in den unterschiedlichen Eigenschaften und den daraus resultierenden Versagensmechanismen der beiden Werkstoffgruppen.

Auf einige wesentliche Punkte bei der Anwendung von Keramik muß an dieser Stelle noch hingewiesen werden. Im Unterschied zu den Metallen erfolgt die Formgebung bei der Keramik vor dem Brand. Erst beim Sintern entstehen die für die Keramik charakteristischen Eigenschaften. Umformprozesse oder Nachhärten - wie bei Metallen üblich - sind bei Keramik nicht möglich. Selbst ein Nachbrennen ist keine Garantie für eine Verbesserung der Werkstoffeigenschaften.

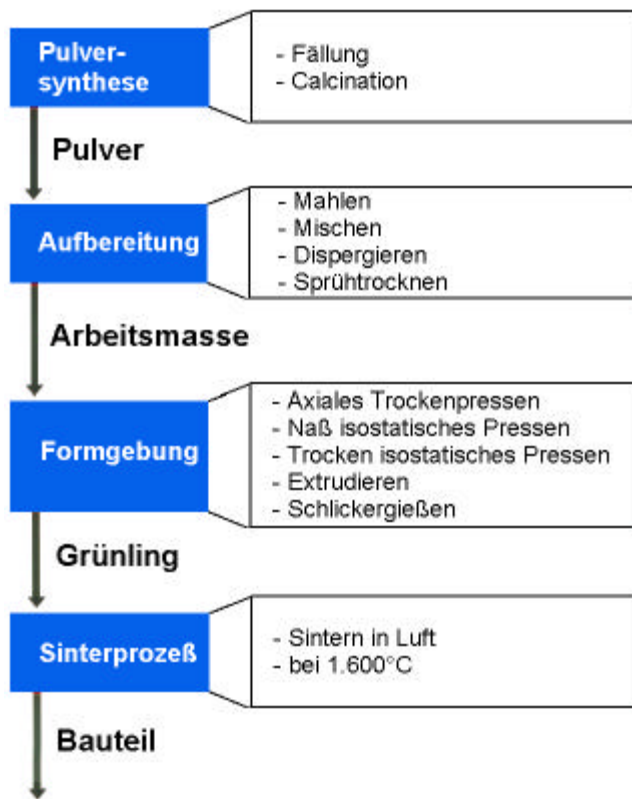


Bild 1.8: Technologie der Keramik (1)

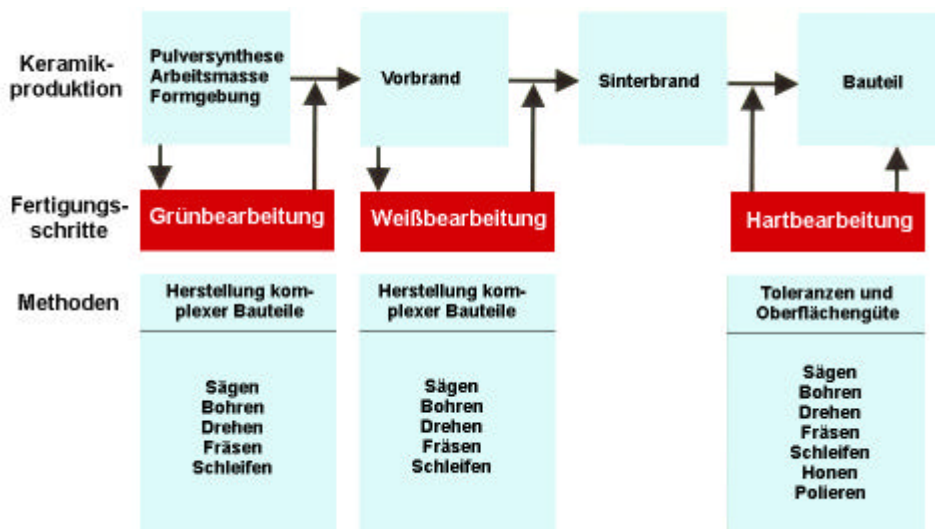


Bild 1.9: Technologie der Keramik (2)

Toleranzen

Keramische Bauteile schwinden beim Sintern bis zu 20%. Dadurch ergeben sich in der Fertigung relativ hohe Toleranzen. Ursachen hierfür sind die nicht zu vermeidenden Versatzschwankungen und Gründichteunterschiede im Formkörper.

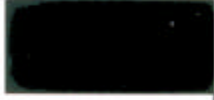

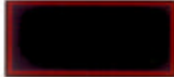
Fertigungsschritte		Toleranzen	
Formgebung Grünbearbeitung		Standard	Präzision
Sintern		$\pm 3 \dots 5\%$	$\pm 0,5 \dots 1\%$
Hartbearbeitung		$\pm 5 \mu\text{m}$	$\pm 0,1 \mu\text{m}$

Bild 1.10 Toleranzen

Nicht umsonst gibt DIN 40680 Toleranzen von ca. $\pm 5\%$ (grob) und ca. $\pm 2\%$ (mittel) für keramische Bauteile vor. Für Konstruktionsbauteile sind diese Werte deutlich zu hoch. Durch den Einsatz von optimierten Pulvern und Arbeitsmassen, aber auch durch moderne Formgebungstechnologien und Sinterprozesse lassen sich heute Toleranzen von $< \pm 0,5\%$ garantieren. Dadurch ergeben sich neue Anwendungen für die Keramik, z.B. bei Auskleidungen, im ballistischen Schutz aber auch als verschleißfeste und korrosionsbeständige Komponenten in Meß- und Regelarmaturen.

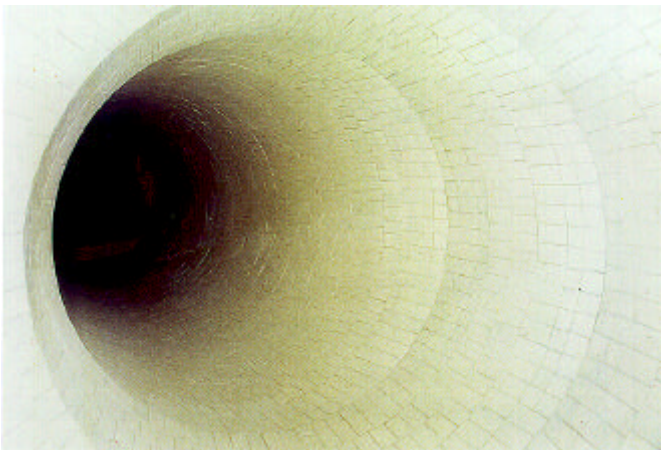


Bild 1.11 Auskleidung eines Zyklons



Bild 1.12: Keramikverbund für den ballistischen Schutz

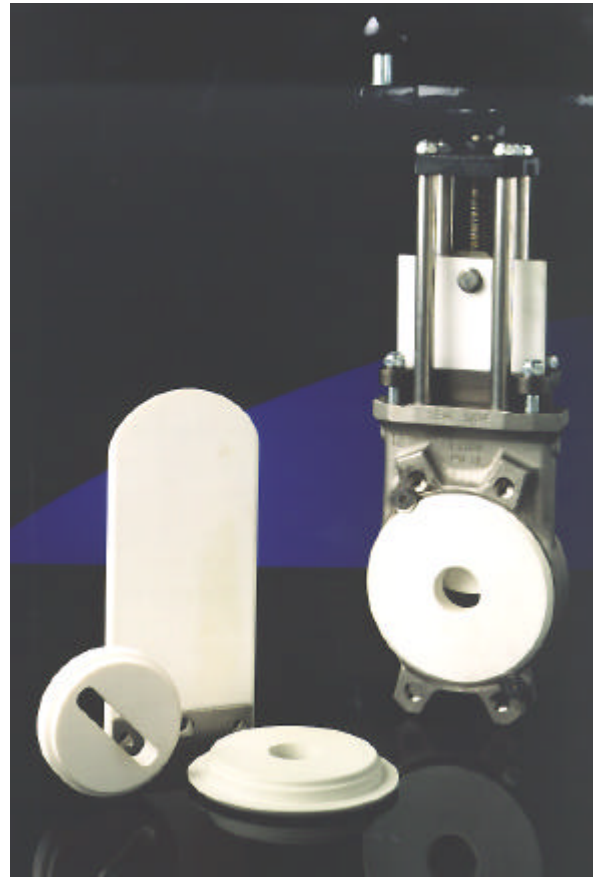


Bild 1.13: Dosierschieber

Near net shape Technologie

Speziell für die hartkeramische Nachbearbeitung sind endkonturnahe Bauteile erforderlich, um die Bearbeitungszeiten so gering wie möglich zu halten. Die Kosten der Nachbearbeitung steigen mit der erforderlichen Abtragsrate, mit der Erfüllung engster Toleranzen und mit der zu erreichenden Oberflächengüte. Sie können in Extremfällen bis zu 80% der Bauteilkosten betragen.

Die Fertigung von Bauteilen in engsten Toleranzen - near net shape Technologie - erfordert eine umfassende Beherrschung der gesamten keramischen Prozeßfolge. Hier ist in Betracht zu ziehen, daß keine Rohstoffcharge absolut identisch ist. Der Keramikhersteller muß wissen, wie er auf diese Schwankungen der Rohstoffbeschaffenheit reagieren muß, um die Forderung hinsichtlich Toleranzen und Eigenschaften zu erfüllen.

Es sei allerdings die Frage erlaubt, ob die vom Kunden oft vorgegebenen engsten Toleranzen wirklich für die Anwendung erforderlich sind. In der Regel werden die Maße aus

einer vorhandenen Bauteilzeichnung für Stahl übernommen. Ein Ventil aus Siliciumnitrid im Kraftfahrzeug muß für seine Funktion engste Toleranzen erfüllen, bei einer Düse aus Borcarbid oder Aluminiumoxid zum Versprühen von erosiven oder korrosiven Medien sind sie zur Aufrechterhaltung der Prozeßfähigkeit einer Anlage in der Regel nicht erforderlich.

Reproduzierbarkeit

Nach der Griffith - Gleichung sind Werkstoff - Fehler bruchauslösende Defekte. Ihre Größe bestimmt die Festigkeitsstreuung. Eine Maßzahl für die Festigkeitsstreuung ist der **Weibullmodul m**. Während bei Aluminiumoxid der Weibullmodul vor noch nicht allzu langer Zeit zwischen fünf und zehn lag, werden heute durch Optimierung der Pulver und verbesserte Formgebungstechnologien Werte von 15 bis 20 erreicht. Bei Zirkoniumoxid liegt er über 20, bedingt durch die höhere Bruchzähigkeit. Ähnlich hohe Werte sind heute auch bei Siliciumcarbid und Siliciumnitrid Stand der Technik. Hier ist anzumerken, daß der Weibullmodul keine echte Werkstoffkonstante wie z.B. der K_{Ic} - Faktor darstellt. Er beschreibt die Festigkeitsverteilung und ist damit ein Maß für die Prozeßfähigkeit. Vor allem durch Verkleinerung der Defektgrößen und Defektdichten konnten in den letzten Jahren deutliche Erfolge in der Zuverlässigkeit von keramischen Bauteilen erreicht werden.

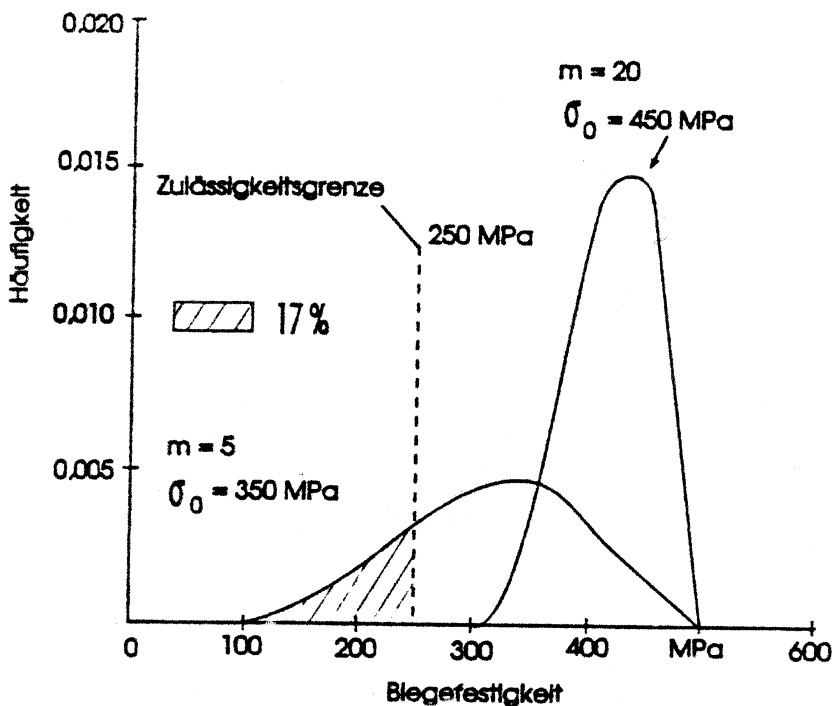


Bild 1.14 Weibullmodul

1.1 Übersicht über die keramischen Konstruktionswerkstoffe

Silicatkeramik	Oxidkeramik	Nichtoxidkeramik
Porzellan	Aluminiumoxid	Kohlenstoff
Steinzeug	Zirkonoxid	Siliciumcarbid
Steatit	Titandioxid	Siliciumnitrid
Cordierit	Berylliumoxid	Borcarbid
Glaskeramik	Magnesiumoxid	Bornitrid
	Spinell	Sialone
	Mullit	
	Aluminiumtitanat	

Tabelle 1.2 Keramische Werkstoffe

Siliciumcarbid SiC		
heißgepreßtes Siliciumcarbid		HPSIC
heißisostatisch gepreßtes Siliciumcarbid		HIPSIC
gesintertes Siliciumcarbid		SSIC
Siliciuminfiltriertes Siliciumcarbid		SISIC (RBSIC)
Siliciumnitrid Si₃N₄		
heißgepreßtes Siliciumnitrid		HPSN
heißisostatisch gepreßtes Siliciumnitrid		HIPSN
gesintertes Siliciumnitrid	SSN	
reaktionsgebundenes Siliciumnitrid		RBSN
Zirkonoxid ZrO₂		
teilstabilisiertes Zirkonoxid		PSZ
vollstabilisiertes Zirkonoxid		FSZ
tetragonales Zirkonoxid		TZP
Aluminiumoxid Al₂O₃		
Aluminiumoxidgehalt	80-90 Gew.-%	KER 706
	90-95 Gew.-%	KER 708.1
	94-99 Gew.-%	KER 708.2
	99 Gew.-%	KER 710

Tabelle 1.3 Werkstofftypen

1.2 Eigenschaften der Keramikwerkstoffe

Keramische Werkstoffe haben ein Eigenschaftspotential, das von keiner anderen Werkstoffgruppe in seiner Gesamtheit übertroffen wird. In den folgenden Bildern sollen die Eigenschaften der wichtigsten Keramikwerkstoffe mit den Eigenschaften von metallischen Werkstoffen verglichen werden.

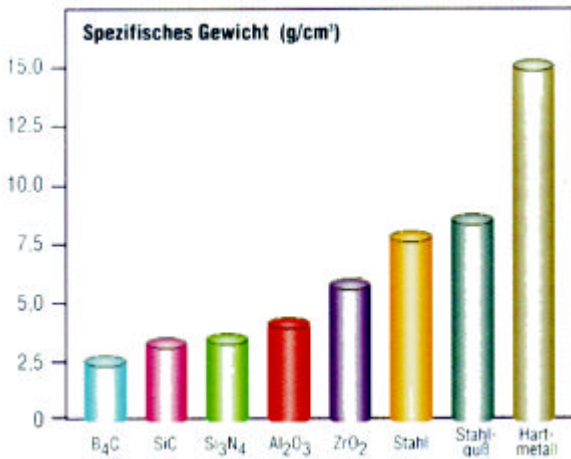


Bild 1.15: Spezifisches Gewicht

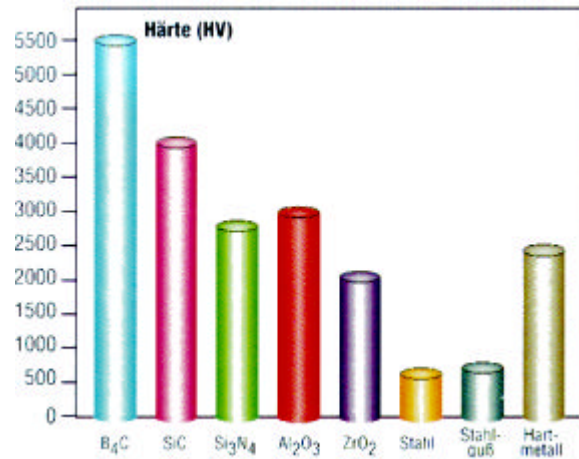


Bild 1.16: Härte

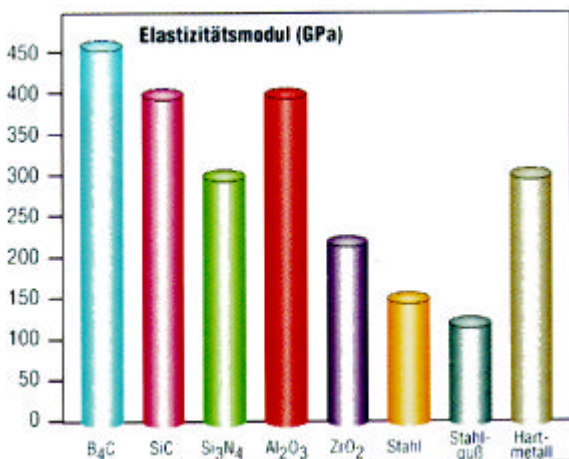


Bild 1.17: E-Modul

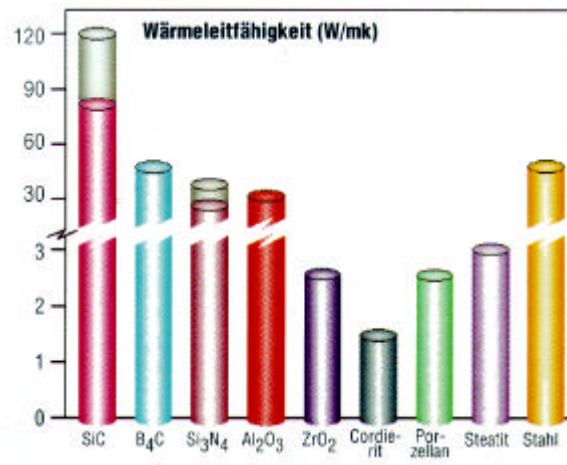


Bild 1.18: Wärmeleitfähigkeit

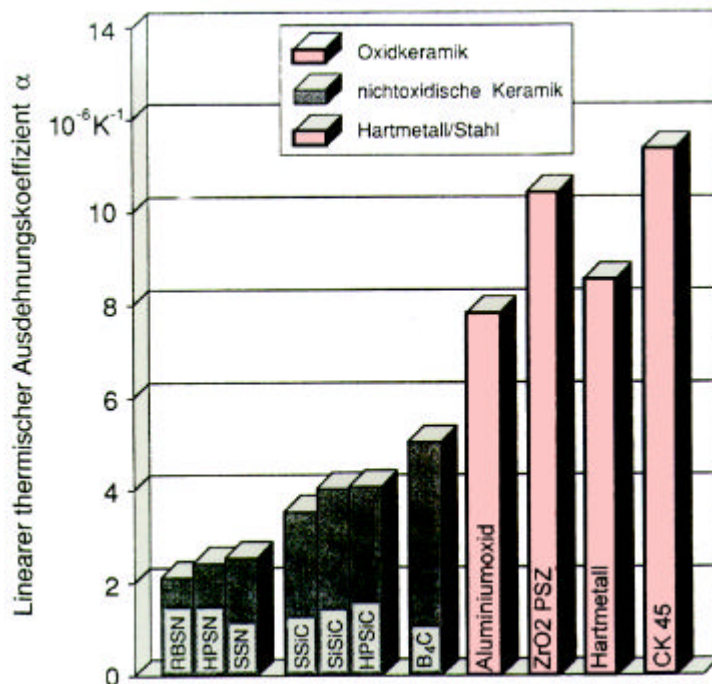


Bild 1.19: Thermischer Ausdehnungskoeffizient

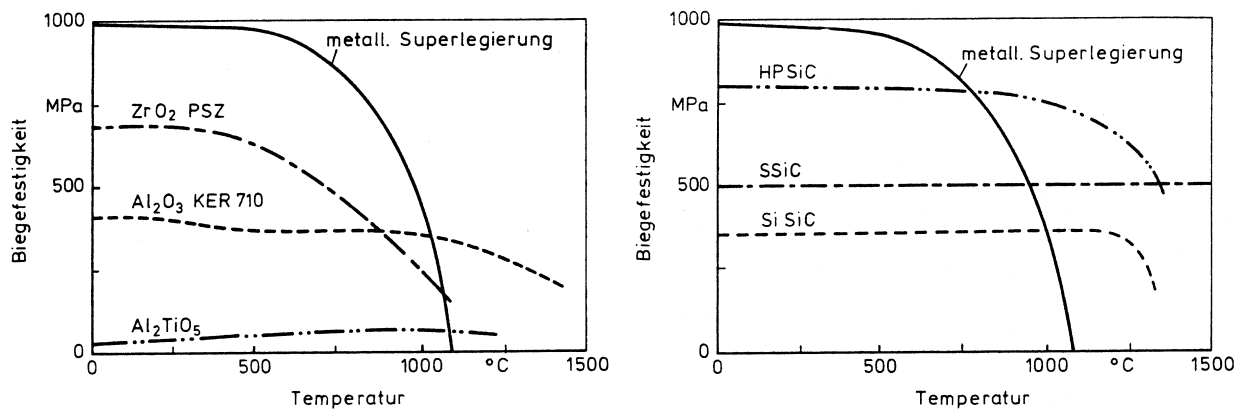


Bild 1.20: Hochtemperaturfestigkeiten von Oxiden, Carbiden und Nitriden

Von besonderer Bedeutung für den Konstrukteur sind die Festigkeitswerte, die bei keramischen Werkstoffen in der Regel durch Vierpunktbiegung an standardisierten Proben gemessen werden.

Werkstoff	Weibull Parameter		Bruch- zähigkeit
	m	σ_c	K_{Ic}
		MPa	$\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$
Aluminiumoxidkeramik	7	330	4,5
Zirkoniumoxidkeramik			
- $\text{ZrO}_2\text{-MgO-CaO}$	25	350	6,0
- $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$	20	960	10,5
Dispersionskeramik			
- $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$	10	610	5,8
- $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$	10	610	5,4
Siliciumcarbidkeramik			
- SiSiC	15	360	4,0
- SSiC	8	360	3,8
Siliciumnitridkeramik			
- $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Y}_2\text{O}_3$	20	810	7,0
Aluminiumtitanatkeramik	20	30	-

Tabelle 2: Biegebruchfestigkeit, Weibullmodul, Bruchzähigkeit

Die Festigkeit ist nicht die herausragende Eigenschaft, derentwegen keramische Werkstoffe unverzichtbar geworden sind. Dies sind andere Eigenschaften, wie hohe Härte, Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Formbeständigkeit (E-Modul) und Warmfestigkeit. Aber ein Werkstoff mit diesen Eigenschaften kann häufig nur dann richtig genutzt werden, wenn er gleichzeitig über eine ausreichend hohe Festigkeit verfügt.

Bei keramischen Werkstoffen ist die Festigkeit keine echte Werkstoffkonstante, wie z.B. die Dichte, der E-Modul oder der Wärmeausdehnungskoeffizient. Die Größen können mit einem Fehler von < 5% gemessen werden. Dagegen gilt für die Festigkeit eine Streuung von 15 bis 20% als normal.

Zwei weitere wesentliche Gesichtspunkte sind bei der Beurteilung der Festigkeit noch zu berücksichtigen:

- die Festigkeitsanisotropie der Keramik
- die Volumenabhängigkeit der Festigkeit

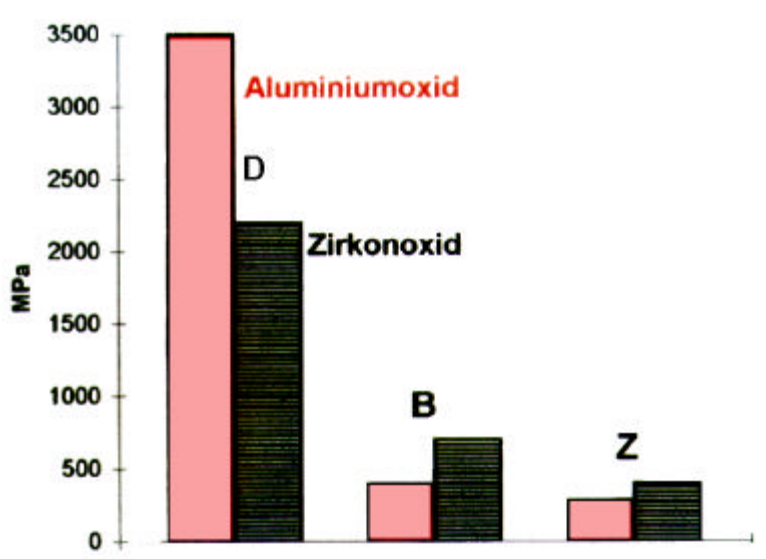


Bild 1.21 Festigkeitsanisotropie der Keramik

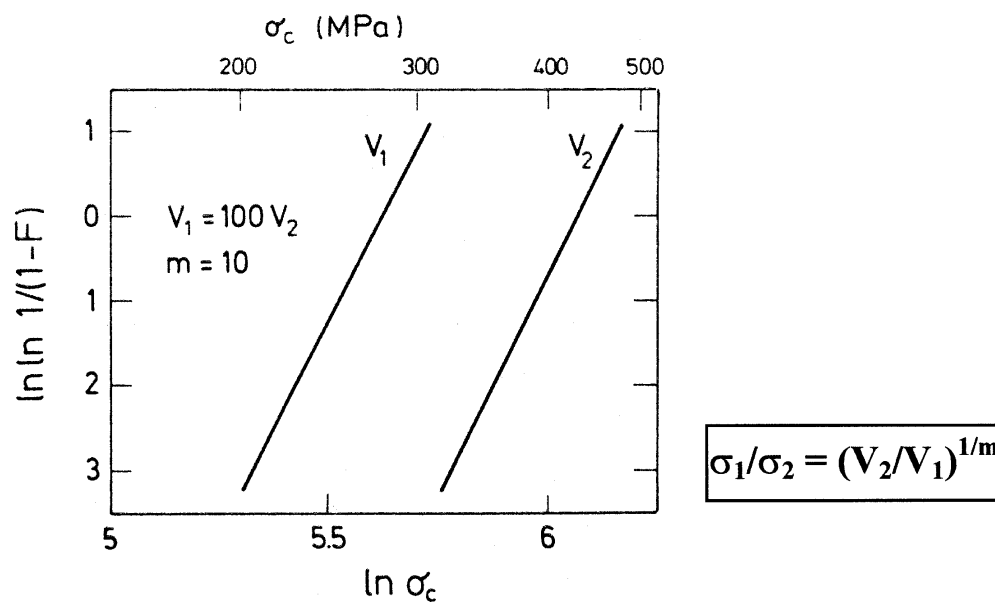


Bild 1.22 Volumenabhängigkeit der Festigkeit

2. Systemanalyse - die Voraussetzung für einen erfolgreichen Einsatz von Keramik

Systemanalytisches Vorgehen zum Lösen anwendungstechnischer Fragen hat sich nicht nur in Keramik durchgesetzt. Nicht mehr das einzelne Bauteil steht im Mittelpunkt, sondern die Funktion einer Maschine oder Anlage. Die zuverlässige und wirtschaftliche Funktion der Einheit ist bestimmt durch die eingesetzten Werkstoffe - aber auch durch Kraftfluß verbunden mit tribologischem Verhalten, Wärmefluß und Umgebungseinfluß. Erforderliche Dämpfungselemente als „Sicherheitsgurt,“ für die begrenzte Duktilität der Keramik sind ebenfalls ein wichtiger Systemparameter. **Speziell bei der Lösung von Verschleißproblemen bewähren sich systemanalytische Ansätze.**

Alle technischen Systeme, in denen Reibungs- und Verschleißprozesse ablaufen, werden als Tribosysteme bezeichnet. Sie sind nach DIN 50320 durch Grund- und Gegenkörper, Zwischenstoff und Umgebungsmedium bestimmt.

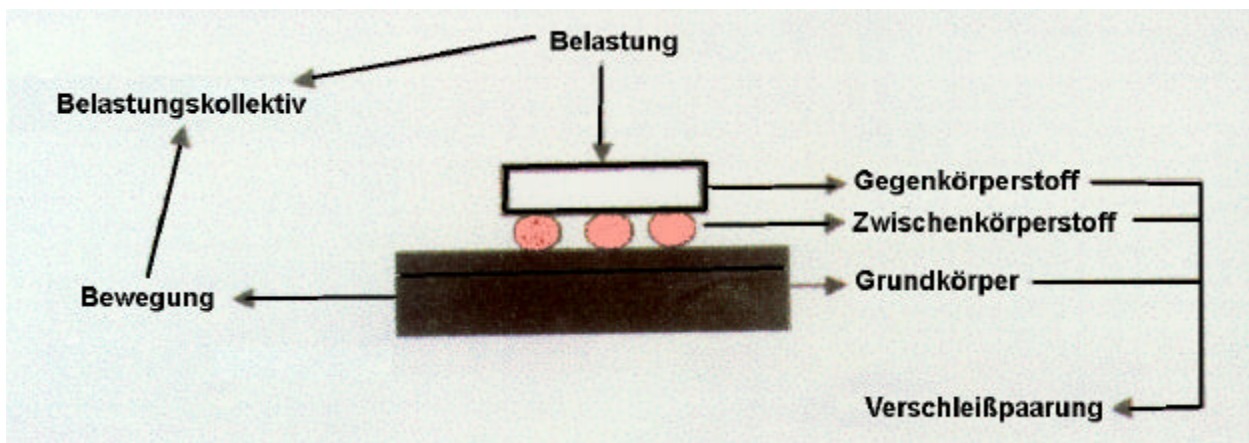


Bild 2.1 Tribosysteme nach DIN 50320

Bei der Bearbeitung von Verschleißproblemen ist immer zu berücksichtigen, daß Verschleiß keine reine Werkstoffeigenschaft ist, sondern eine Systemeigenschaft darstellt. Dies erfordert eine gesamtheitliche Betrachtung des Tribosystems.

Voraussetzungen hierfür sind:

- Kenntnis der anwendungsrelevanten Eigenschaften des Verschleißschutzwerkstoffes
- Beurteilung der vorliegenden Belastungen: mechanisch, thermisch, chemisch !
- Einfluß der Eigenschaften des Prozeßgutes auf den Verschleiß
- Umfangreiches Know-how in Konstruktion, Fertigung und Einbau der Bauteile

Die Systemanalyse ist die Voraussetzung für werkstoffgerechte und anwendungsgerechte Konstruktion, Fertigung und Montage.

Der Ablauf der Systemanalyse ist in **Bild 2.2** schematisiert.

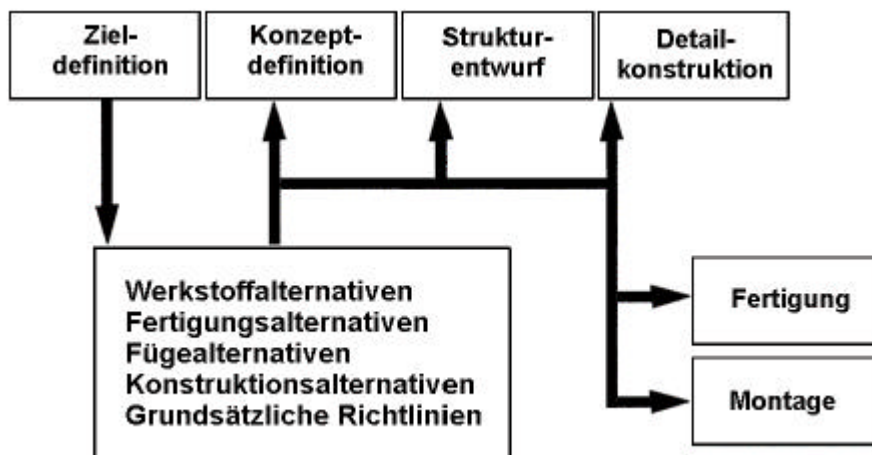


Bild 2.2: Ablauf der Systemanalyse

Das im Bild 2.3 dargestellte Impact-Panel ist ein Beispiel für die erfolgreiche Anwendung. Die Kombination spröder, verschleißfester Keramik mit elastischem PU - Kunststoff bringt die Voraussetzung für die Absorption der im Betrieb vorliegenden Prallenergien.

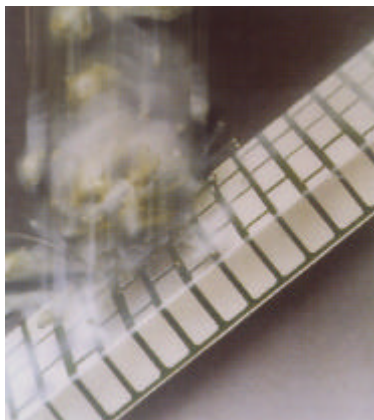


Bild 2.3: Impact-Panel

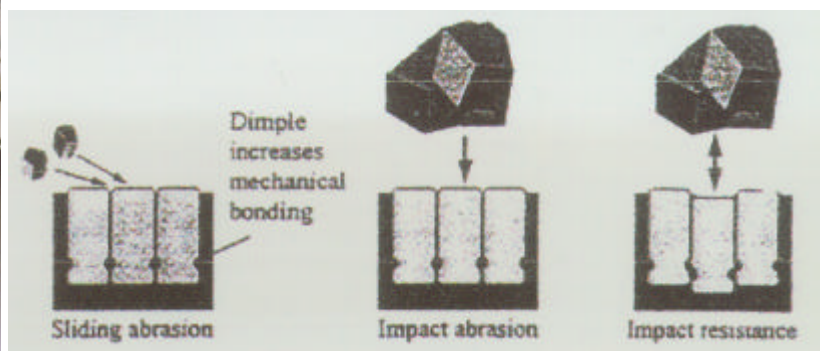


Bild 2.4: Prinzip Impact-Panel

Die Systemanalyse erfordert Kompetenz in der Werkstofftechnik, aber auch Kompetenz in der Konstruktion und in der Prozeßtechnik. Da es den „Allrounder,“ heute kaum mehr gibt, sind wir

immer mehr auf eine interdisziplinäre Zusammenarbeit angewiesen. Wie komplex die auftretenden Wechselwirkungen zusammenhängen, geht aus dem **Bild 2.5** hervor.

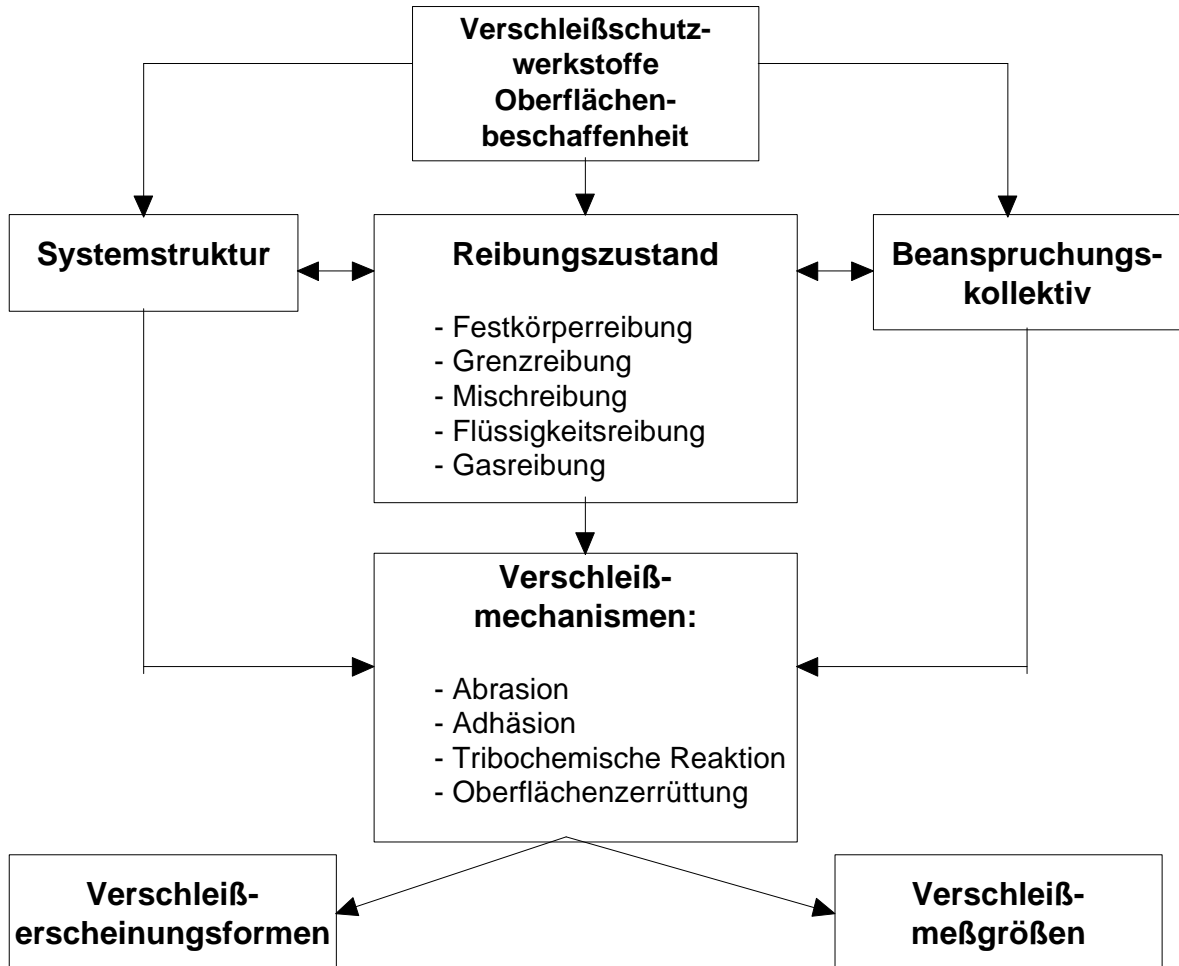


Bild 2.5: Verschleißformen und -meßgrößen

Dasselbe gilt auch für das Beanspruchungskollektiv

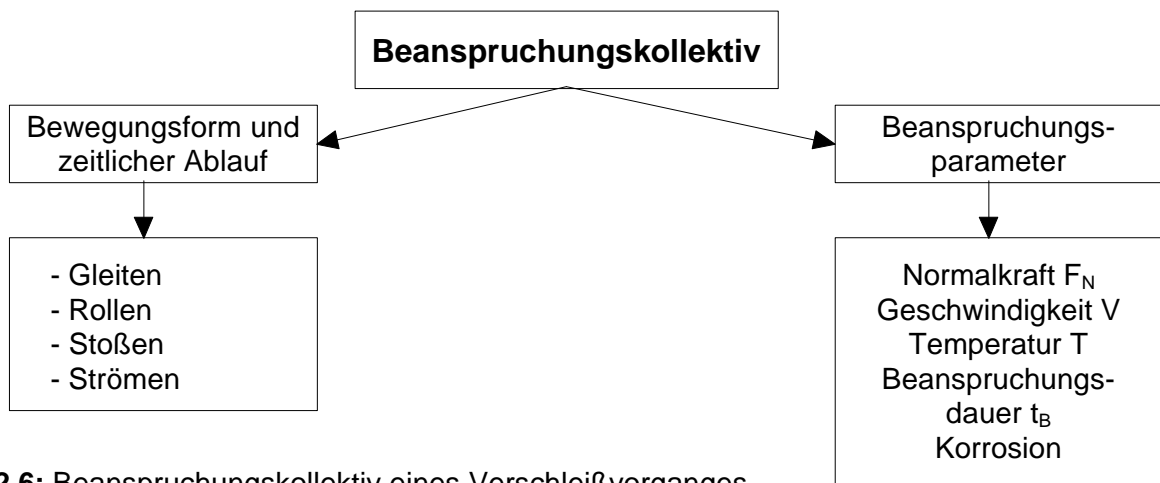


Bild 2.6: Beanspruchungskollektiv eines Verschleißvorganges

Die Systemanalyse ist aber nicht nur eine Methode bei der Neu – und Weiterentwicklung von Bauteilen und Prozessen. Sie hat sich auch bei der Schadensanalyse bewährt. Dafür ein Beispiel aus der Verfahrenstechnik: Keramik-Mühlenauskleidungen sind heute, speziell wenn eisenfreie Vermahlung erforderlich ist, Stand der Technik. Grundsätzlich ist Keramik empfindlich gegen zu hohen Prallverschleiß. Die Stoßempfindlichkeit läßt sich durch konstruktive und verfahrenstechnische Maßnahmen soweit reduzieren bzw. beheben, daß ein wirtschaftlicher Einsatz gewährleistet wird.

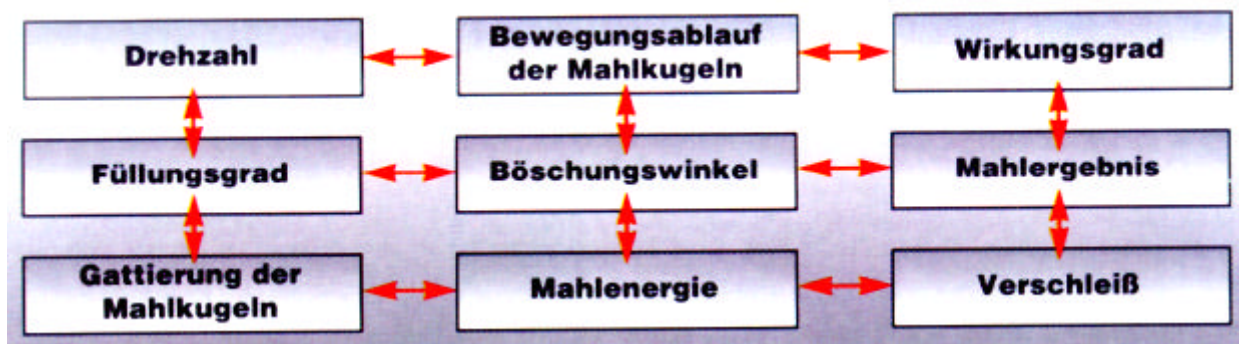


Bild 2.7: Der Mahlprozeß als System

Das Negativbeispiel (**Bild 2.8**) zeigt Kanten- und Eckenabplatzungen der Futtersteine in einer Trommelmühle. Im Betrieb prallten die Mahlkugeln direkt auf die Keramikauskleidung - nicht wie es eigentlich erforderlich ist auf das Mahlgut, um den Impakteffekt zur Zerkleinerung auszunutzen. Durch Umstellung der Mahlbedingungen - Reduzierung der Drehzahl und/oder Erhöhung des Füllgrades konnte der Fehler leicht behoben werden. In diesem Falle entschied sich der Kunde für eine Erhöhung des Füllgrades. Die Drehzahl blieb unverändert. Nach dieser Umstellung stabilisierte sich das Verschleißbild auf das erwartete, niedrige Niveau. Dabei trat noch folgender Nebeneffekt auf: **Die Mühlenleistung stieg deutlich an.**

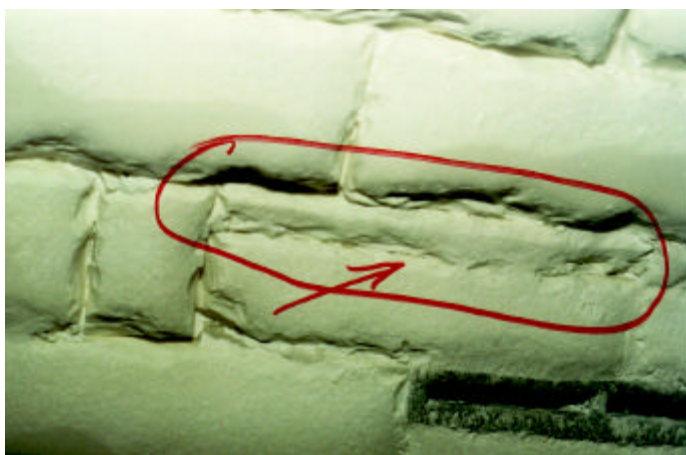


Bild 2.8: Kantenabplatzungen am Liner

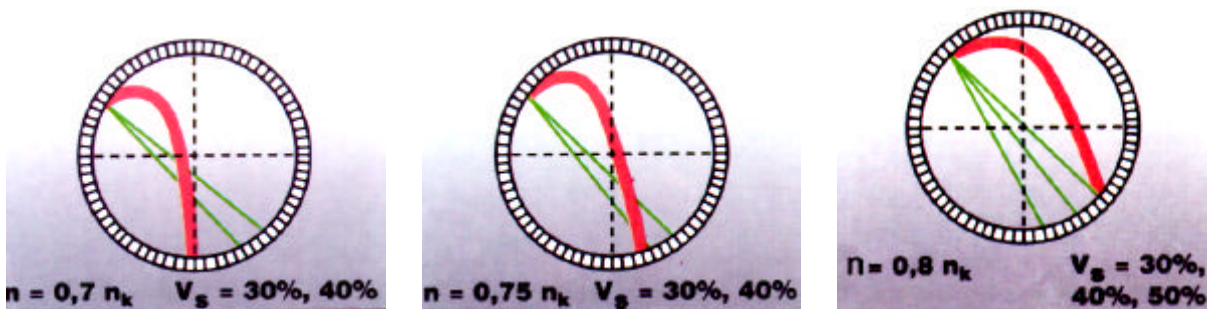


Bild 2.9: Wurfparabeln in Abhängigkeit vom Füllgrad – Einfluß des Füllgrades

Hilfsmittel um das Verhalten von Werkstoffen unter Belastung beurteilen zu können, sind die Varianzanalyse und die Finite-Elemente-Methode.

- **Varianzanalyse** – Beispiel Rohrbogen

Für die Berechnung und Auslegung erosiv beanspruchter Bauteile – besonders auch bei Hochtemperaturbelastung – sind Werkstoffdaten erforderlich, die unter realen Bedingungen, d.h. bei heißem Partikel / Gas – Strahl und heißer Werkstoffprobe gemessen werden müssen.

Zu den Einflußparametern gehören:

- die Geometrie der dreidimensionalen Bauteiloberfläche
- die dreidimensionale, bauteilspezifische Zweiphasenströmung mit
 - Partikelflugrichtung
 - Partikelgeschwindigkeit
 - Partikelkonzentration
 - Partikelmaterial
 - Schwankungen durch Turbulenzen
- die strahlverschleißspezifischen Werkstoffeigenschaften in Abhängigkeit von
 - Partikelgeschwindigkeit
 - Aufprallwinkel
 - Werkstoff – und Strahlmitteltemperatur

Das Simulationsprogramm beruht auf der Lösung einer Differentialgleichung, die die dreidimensionale Gestaltsänderungen von Bauteilen in Abhängigkeit von der erosiven Belastung beschreibt. Die Gleichung stellt eine nichtlineare, partielle Differentialgleichung erster Ordnung

mit den unabhängigen Varianten x , y , z und der abhängigen Variante t dar, wobei die unverschlossene Bauteiloberfläche zum Zeitpunkt $t = 0$ den Startwert darstellt.

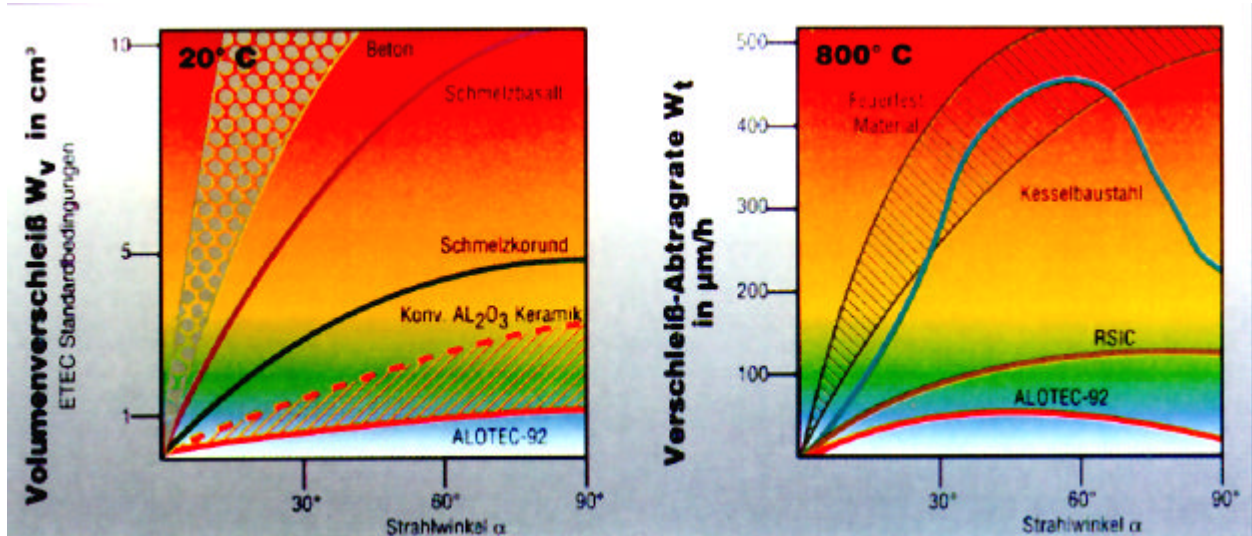


Bild 2.10: Vergleich Hochtemperaturverschleiß

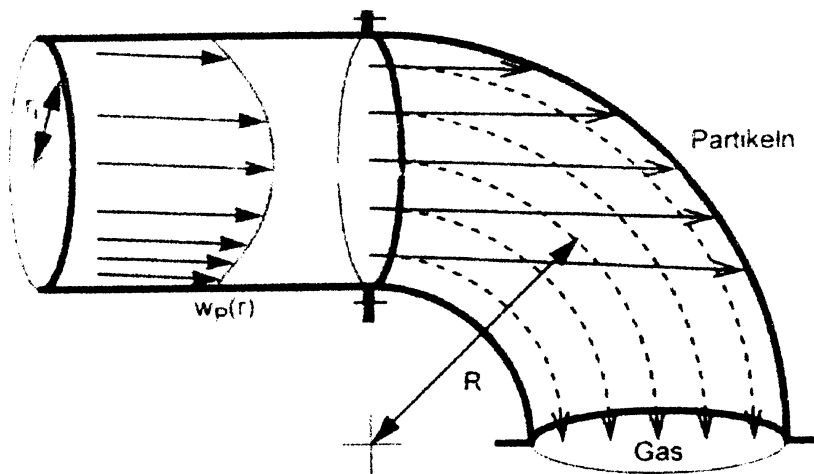


Bild 2.11: Partikelbewegung in einem Krümmer



Bild 2.12: Simulation des Verschleißfortschritts als Funktion der Zeit

- **Finite Elemente Methode**

Für die Berechnung der Lebensdauer belasteter Bauteile – sei es bei thermischer und/oder mechanischer Belastung – ist die Spannungsverteilung im Bauteil erforderlich. Analytische Lösungen liegen bis heute nur für einfache Bauteile wie Stäbe, Rohre und Platten vor.

Bei komplex geformten Bauteilen wird zur Spannungsanalyse die Methode der Finiten Elemente verwendet. Dabei wird ein Bauteil in viele kleine Elemente zerlegt, für die analytische Lösungen bestehen. Die Finite-Elemente-Methode ist also ein Näherungsverfahren, die Zahl der zu lösenden Gleichungen hängt von der Zahl der gewählten Elemente ab.

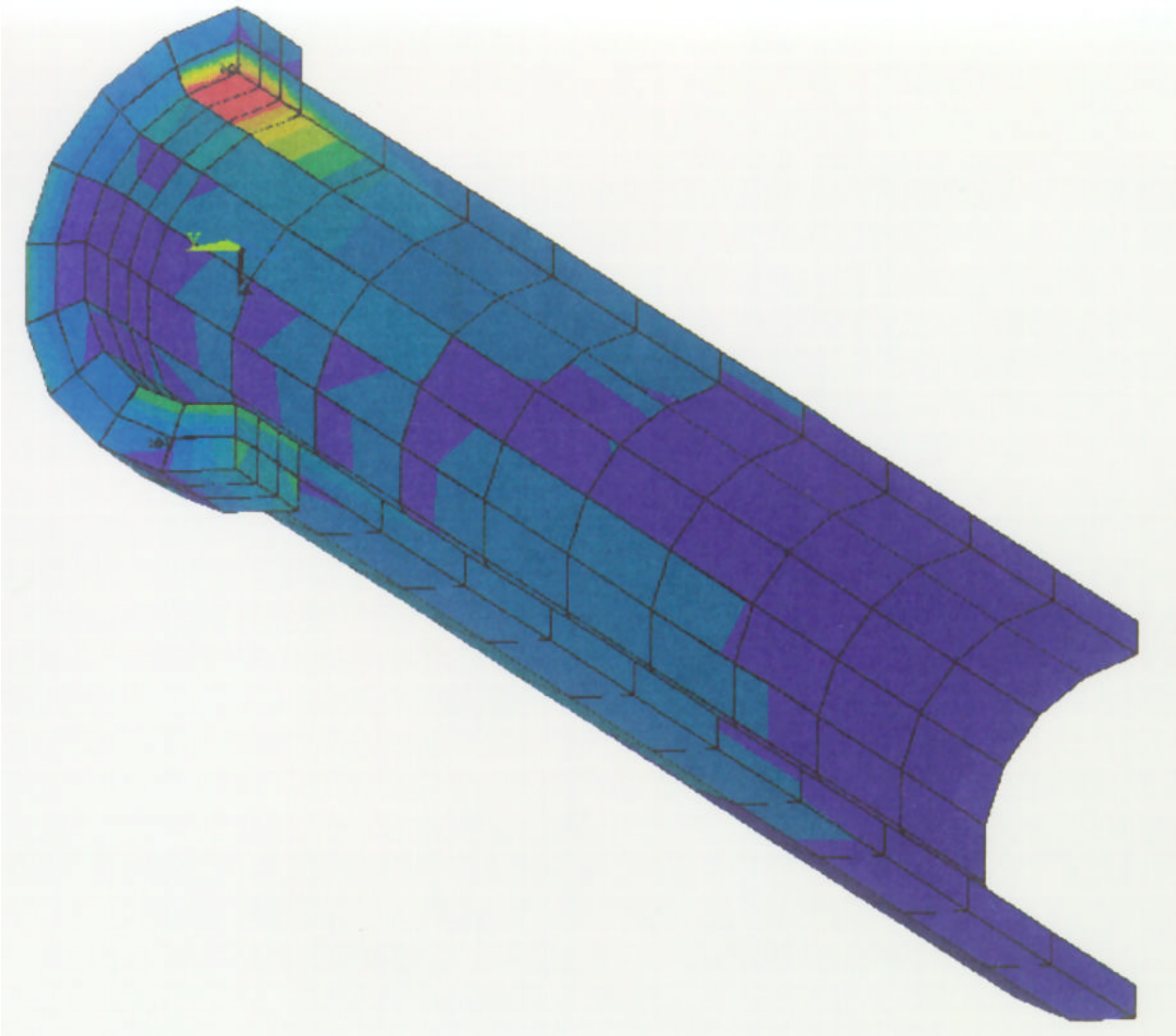


Bild 2.13: Berechnung der Spannungen an einem Rohr

3. Entwicklungstendenzen

Keramik berechenbar, prüfbar, reproduzierbar und damit zuverlässig und wirtschaftlich einsetzbar zu machen, sind die wichtigsten Kriterien, die erreicht werden müssen. Hier gibt es hoffnungsvolle Ansätze. Die bisher erreichten Ergebnisse tragen zunehmend zu gemeinsamen Aktivitäten von Zulieferern, Herstellern und Anwendern bei.

Große, massive monolithische Keramikbauteile zeigen in der Regel mehr oder weniger ausgeprägtes Spröbruchverhalten und vertragen keine plötzlichen Temperaturveränderungen. Zusätzlich nimmt die Bruchgefahr mit zunehmender Bauteilgröße zu: Grund hierfür ist die **Volumenabhängigkeit der Festigkeit**.

Die Entwicklung von umwandlungsverstärkten Werkstoffen (ZTA, ZrO_2) haben wohl Wege gezeigt die Spröbruchanfälligkeit zu reduzieren, haben sich aber - vor allem aus Kostengründen - nur für Sonderanwendungen durchgesetzt. Ähnliche Ergebnisse ergeben sich bei den mit Fasern, Whiskern und Platelets verstärkten Werkstoffen. Eine weitere Alternative ist die **"in situ" Verstärkung**. Der Wunsch der Werkstoffwissenschaftler, plastische Verformbarkeit bei keramischen Materialien zu erreichen, wurde durch die Entwicklung des extrem feinkörnigen 3Y-TZP¹ erfüllt. Das Gefüge besteht aus gleichmäßigen Kristalliten nahezu gleicher Größe (100 - 200 μm), die von einer bis zwei μm dicken Glasphase umhüllt sind. Die plastische Verformbarkeit hängt stark von der Glasphase ab und beruht hauptsächlich auf einem Korngrenzengleiten, d.h. die einzelnen Kristalle ändern ihre Plätze im Gefüge. Die bisher erreichten Verformungen liegen bei 100 %.

Mit modernen Keramikwerkstoffen werden Biegebruchfestigkeiten und auch relativ hohe Temperaturwechselbeständigkeiten erreichen (Siliciumnitrid, Siliciumcarbid, Nano-Aluminiumoxid). Doch wachsen Kosten und Aufwand, die zur Erreichung einer garantierten Zuverlässigkeit erforderlich sind. Der Wunsch, duktile Metallkomponenten durch monolithische Keramik preisgünstig zu ersetzen, erweist sich daher technisch und wirtschaftlich nicht als realisierbar. Trotz der höheren Kosten im Vergleich mit Aluminiumoxid haben sich allerdings Siliciumnitrid und Siliciumcarbid durch ihre sehr guten Eigenschaften eine starke Marktstellung für viele Anwendungen erarbeitet.

¹ tetraonal zirconia polycrystal

Um die Problematik erfolgreich zu lösen, bieten sich zwei Konzepte an:

Werkstoffverbunde

- **Keramik-Metall-Verbunde mit verbesserten Eigenschaften**
- **Keramiksichten auf Metallen zur Reduzierung von Korrosion und Verschleiß**
- **Gradienten-Verbundwerkstoffe, um eine gleitende Anpassung von Wärmedehnung und elastischen Konstanten zu erreichen.**

Die Problematik der **thermisch gespritzten Schichten** liegt in ihrer Porosität (nicht ausreichender Korrosionsschutz) und ihrer eingeschränkten Haftfestigkeit (nicht immer ausreichender Verschleißschutz). **CVD und PVD-Verfahren** erlauben nur die Herstellung extrem dünner Schichten.

Die Problematik der **Gradienten-Verbundwerkstoffe** liegt in den unterschiedlichen Schwindungsraten der einzelnen Schichten und in der relativ teuren Fertigungstechnologie.

Verbundwerkstoffe

Zu den Verbundwerkstoffen gehören die Cermet, also Keramik-Metall-Verbunde. Hier sehen wir die besten Chancen das Sprödbruchproblem in den Griff zu bekommen. Voraussetzung hierfür ist, daß sich zwischen Metall und Keramik eine ausreichend feste Bindung erzielen läßt und sich Wärmedehnung und elastische Konstanten - auch im Temperaturverlauf - nicht zu stark unterscheiden. SiSiC ist ein typisches Beispiel dafür. Werkstoffe mit SiC bzw. Al₂O₃ als Matrix und metallisches Aluminium als Zwischenphase haben die hochgesteckten Erwartungen nicht erfüllen können.

Am weitesten fortgeschritten ist die Entwicklung von Faserverbunden auf der Basis von **CMC-Werkstoffen** im System SiC-C-(Si). Dieser neue Werkstofftyp, dessen Eigenschaften durch Verfahrensvariationen in weiten Grenzen steuerbar sind, hat ein breites Anwendungspotential in allen Hochtemperatur-Technologien. Potentielle Anwendungsgebiete sind Luft- und Raumfahrt (z.B. als Hitzekacheln), aber auch als tragende Bestandteile in Raketen, Bremsscheiben für Kraftfahrzeuge und Schienenfahrzeuge, Filtermaterialien etc.. Nachteilig ist heute nur noch der hohe Preis für die Kohlefasern.

Eine weitere Verbreiterung der Anwendung von Konstruktionskeramik ist im Rahmen von Forschungskonzepten zur Realisierung **schadenstoleranter Werkstoffstrukturen** - nicht mehr Gefügedesign, sondern Moleküldesign ist gefragt - sowie durch interdisziplinäre Forschungsaktivitäten zum **maßgeschneiderten Werkstoff- und Bauteildesign** zu erwarten. Für die Entwicklung härterer und hochtemperaturbeständiger Keramiken sind Aktivitäten im Gange, die die Konstitutionsforschung berücksichtigen, die von Kombinationen mit dispergierten Metallen ausgehen und auf die Entwicklung von **Nanokeramiken** und **Nanokompositkeramiken** mit Gefügeelementen zwischen 10 und 1.000 Nanometern zielen. Die **Precursor-technik** bzw. der Einsatz von **polymeren Präkeramiken** weist uns hier den Weg.

Thermoschockprobleme lassen sich häufig durch den Einsatz von porösen Werkstoffen - auf der Basis von SiC, Al₂O₃, Mullit und vor allem Aluminiumtitanat - lösen. Aber auch für diese Anwendungen ergeben sich neue, interessante Lösungsansätze, die auf Erfahrungen der Feuerfestkeramik zurückgreifen. Durch die Umstrukturierung dieser grobkeramischen Werkstoffe in Richtung Feinkeramik besteht die Möglichkeit Systeme zu entwickeln, die recht hohe Festigkeiten, verbesserte Elastizitäts- und ausgezeichnete Temperaturwechselbeständigkeits-Kennzahlen aufweisen.

4. Keramik aus volkswirtschaftlicher Sicht

Wissenschaft und Technik stehen in einem kontinuierlichen Entwicklungsprozeß. Dabei führt der Weg zu immer anspruchsvolleren, intelligenteren Technologien.

Mit derselben Dynamik steigen auch die Anforderungen, die an die verwendeten Werkstoffe gestellt werden. Gefordert werden Energie- und Materialeinsparungen, gleichzeitig werden Verbesserungen bei Funktion, Qualität, Lebensdauer und Sicherheit erwartet. Darüber hinaus sollten die Werkstoffe wiederverwendbar oder wenigstens umweltverträglich entsorgbar sein. Schließlich spielen der Preis bzw. das Preis-Leistungs-Verhältnis eine ganz entscheidende Rolle.

Keramik und volkswirtschaftliche Bedeutung

Keramische Werkstoffe haben in diesem Innovationsprozeß einen wichtigen Beitrag geleistet. Dennoch ist das erst der Beginn einer erfolgreichen Entwicklung. Die Voraussetzungen dafür liegen in dem immer besser werdenden Verständnis der Mikrostrukturen der Keramik und ihren Einfluß auf die Eigenschaften der Bauteile. Diese Entwicklung wird unter dem Schlagwort Gefügedesign zusammengefaßt. Ob wir allerdings eine exakte Zuordnung von verschiedenen Atomen im Molekül erreichen, wird die Zukunft zeigen.

Weitere Voraussetzungen für einen erfolgreichen Einsatz von Keramik sind werkstoffgerechte Konstruktion und keramikgerechte Anwendung. Hier muß man auch die Entwicklung und die Einführung neuer und preiswerter Fügeverfahren mit einschließen.

Keramik hat sich bis heute in einer Vielzahl von Anwendungen bewährt bzw. sie wird für neue Anwendungen in Betracht gezogen, bei denen hohe Härte, große Verschleißfestigkeit, hohe Korrosionsbeständigkeit und gute Hochtemperaturstabilität - verbunden mit niedrigem spezifischen Gewicht - benötigt werden. Die neuen High-Tech-Werkstoffe erreichen hohe Festigkeiten und hohe Weibullmoduli.

Technische Keramik spielt in unserer heutigen Welt eine wichtige Rolle. Allerdings sind keramische Bauteile - als Bestandteil von Funktionsgruppen in Geräten und Anlagen, Maschinen und Fahrzeugen - nicht auf den ersten Blick zu erkennen. Dadurch sind sie wenig bekannt. Wer sieht einer Förderrinne zum Beschicken eines Hochofens an, daß sie mit Keramik ausgekleidet ist, daß die Panzerung einer Schutzweste bzw. eines Kraftfahrzeuges aus Keramik besteht.

Das Potential der Technischen Keramik ist bis heute nicht ausgeschöpft. Hier konnte nur ein kleiner Bereich angesprochen werden. Kontinuierlich werden neue Werkstoffe entwickelt, aber noch wichtiger ist, daß bekannte Werkstoffe verbessert und damit neue Anwendungen erschlossen werden. Wissenschaft und Forschung fördern das werkstoffkundliche Verständnis. Verbesserte und neue Fertigungstechnologien und Fertigungsmaschinen brachten große Fortschritte bei Qualität, Reproduzierbarkeit und Sicherheit.

Das wesentliche Ziel aller Aktivitäten muß sein, daß Hersteller, Konstrukteure, Anlagenbauer und Anwender enger zusammenarbeiten. Nur durch multidisziplinäre Forschung und Entwicklung sowie Einbindung aller Beteiligten der Wertschöpfungskette und des damit

vorhandenen Abstimmungsprozesses, läßt sich das hohe Anwendungspotential der Keramik ausschöpfen.

Nicht Konkurrenz der Werkstoffe ist gefragt - obwohl eine gesunde Konkurrenz immer gut ist für den Fortschritt - sondern Kooperation muß das Ziel der Zukunft sein.

Werkstoffe bestimmten schon immer das wirtschaftliche und gesellschaftliche Geschehen auf unserer Welt - von der Stein-, Bronze- und Eisenzeit bis heute.

Die heutige Industriegesellschaft wäre ohne die Verfügbarkeit der geeigneten Werkstoffe nicht möglich. Eine technische Idee und der technische Fortschritt können erst dann verwirklicht werden, wenn dafür die richtigen Materialien zur Verfügung stehen. So haben vor allem innovative Werkstoffe in den vergangenen Jahren, Jahrzehnten und Jahrhunderten den Fortschritt der Technik direkt beeinflußt.

Werkstoffe besitzen für die modernen Industrien und Industrienationen eine strategische Bedeutung, denn sie bestimmen letztendlich die Wettbewerbsfähigkeit ihrer Unternehmen und ihrer Produkte. Welche Stellung hier die Konstruktionskeramik einnehmen wird, muß die Zukunft zeigen. Die Grundlagen sind geschaffen, das Anwendungspotential ist vorhanden. Nicht "schau'n wir mal", sondern "**packen wir ´s an**" muß die Devise sein.

5. Literatur:

ETEC - Prospekte und Veröffentlichungen, ETEC - Gesellschaft für Technische Keramik m.b.H., Siegburg

Brevier Technische Keramik, Verband der Keramischen Industrie e.V.

Fahner Verlag Lauf,

ISBN 3-924158-36-3

Spur, Günther, Keramikbearbeitung, Carl Hanser Verlag München, Wien 1989

ISBN -3446-15620-8

Munz D., Fett T., Mechanisches Verhalten keramischer Werkstoffe, Springer Verlag

Berlin, Heidelberg, New York

ISBN 3-540-51508-9

Zum Gahr, K.H., Microstructure and Wear of Materials, Elsevier Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo
ISBN -0-444-42754-6

Ashby, M.F., Materials Selection in Mechanical Design, Pergamon Press Ltd 1992
ISBN -07506-27271

Uetz, H., Abrasion und Erosion, Carl Hanser Verlag München, Wien
ISBN 3-346-14215-0

Habig, K.H., Verschleiß und Härte, Carl Hanser Verlag München, Wien
ISBN 3-446-12965-0

Mohr, M., Twaron im ballistischen Schutz, Akzo Nobel Wuppertal (Selbstverlag)

Meier, H.R., Leitfaden Technische Keramik, Institut für Keramische Komponenten im Maschinenbau, RWTH Aachen (Selbstverlag)

Tietz, H.D., Technische Keramik, VDI Verlag Düsseldorf
ISBN 3-18-401204-2

Wolzenburg, T., Standzeitverlängerung erosiv belasteter Bauteile, Shaker Verlag, Aachen
ISBN 3-8265-2844-1