

## **4.2. Verbundkonstruktionen Keramik-Metall und Keramik-Kunststoff**

# Verbundkonstruktionen

## Keramik-Metall und Keramik-Kunststoff

Dr.-Ing. Hans Hoppert

ETEC

Gesellschaft für Technische Keramik mbH

Siegburg

### 1. Werkstoffe – Werkstoffverbunde

Keramische Werkstoffe besitzen ein Eigenschaftspotential, das in seiner Gesamtheit von keiner anderen Werkstoffgruppe erreicht wird. Sie sind verfügbar, leicht, hart, fest, verschleißfest, hochtemperaturfest, thermisch beständig, form- und korrosionsbeständig. Sie zeigen in der Regel sehr gute dielektrische und häufig sehr gute thermisch isolierende Eigenschaften. Einige, z.B. Siliciumcarbide weisen aber auch hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit auf. Sie sind umweltverträglich entsorgbar. Einen Vergleich der wichtigsten Eigenschaften Metalle–Polymere–Keramik zeigt Bild 1.

	Keramik	Metalle	Polymere
Thermische Ausdehnung	↓	↑	↑
Duktilität	↓	↑	↑
Formbeständigkeit	↑	↓	↓
Hochtemperaturfestigkeit	↑	↓	↓
Korrosionsbeständigkeit	↑	↓	↓
Verschleißfestigkeit	↑	↓	↓
Härte	↑	↓	↓
Wärmeleitfähigkeit	↓	↑	↓
Spezifisches Gewicht	↓	↑	↓
↓ Tendenz zu niedrigen Werten		↑ Tendenz zu hohen Werten	

**Bild 1.1:** Werkstoffvergleich

Keramische Werkstoffe haben aber auch einige Nachteile, die zum Teil auf die keramische Fertigungstechnologie, aber auch auf ihr sprödelastisches Bruchverhalten zurückzuführen sind. Der Anwender muß diese Nachteile kennen. Die Auslegung und Fertigung von keramischen Bauteilen als Monolith, in Modulbauweise oder als Werkstoffverbund unterliegt strengen Gesetzmäßigkeiten. Nicht umsonst verwendet der Keramiker den etwas abgedroschenen Slogan:

- **keramikgerecht konstruieren**
- **keramikgerecht fertigen**
- **keramikgerecht einsetzen**

Kompliziert geformte oder große Keramikkörper lassen sich mit den verwendeten Formgebungsverfahren unter Umständen nicht oder mit erheblichem Aufwand herstellen. Alternativen sind die Modulbauweise bzw. Werkstoffverbunde.

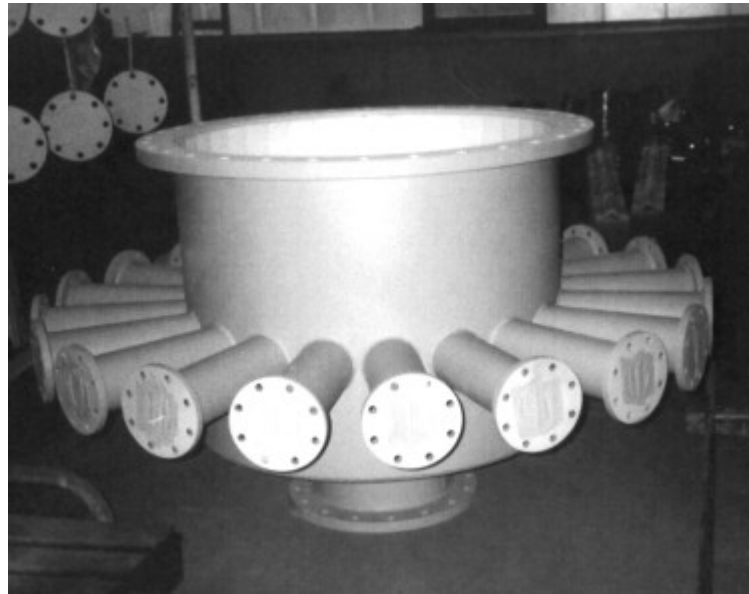
**Werkstoffverbunde sind makroskopische, inhomogene Kombinationen unterschiedlichster Werkstoffe. Ihre Verbindung, auch Fügen genannt, basiert auf stoffschlüssigen (Schweißen, Löten, Kleben), kraftschlüssigen (Umschrumpfen, Umgießen, Schrauben) und formschlüssigen Verfahren (Stecken, Klammern).**

Dabei muß das zuverlässige und wirtschaftliche Verhalten der Funktionseinheit im Vordergrund stehen. Die mögliche Komplexität und Größe der keramischen Module bzw. der Werkstoffverbunde sowie die Lage und Ausführung der Fügstellen werden durch folgende Faktoren bestimmt:

- Stand der Technik von Werkstoffen, Fertigungstechnik, Fügetechnik
- Kombinationsmöglichkeiten von wirtschaftlichen Formgebungsverfahren
- Anhebung der Beanspruchungsparameter (Größeneffekt)
- Erleichterung der Qualitätssicherung und Ausbeute
- Reduzierung thermischer Spannungen im Betrieb



**Bild 1.2:** Modulbauweise



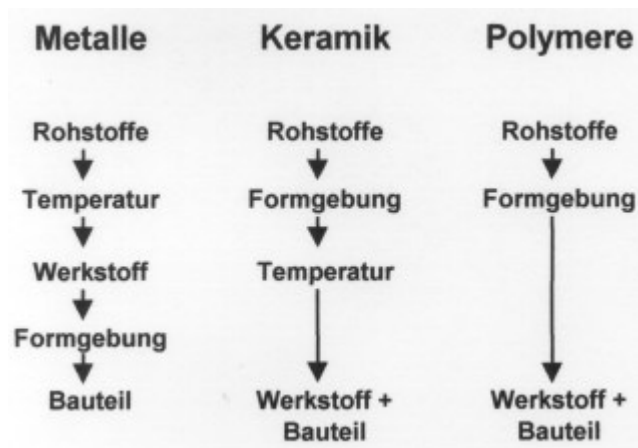
**Keramik-Verbund  
Klebetchnik  
Auch als Keramik-Polymer-  
Verbund herstellbar**

**Bild 1.3:** Werkstoffverbund

Zur Lösung dieser interdisziplinär verknüpften Aufgaben ist eine enge Zusammen-arbeit zwischen Werkstofftechnologen, Herstellungstechnikern, Konstrukteuren und Anwendern erforderlich.

## **2. Die keramische Fertigungstechnologie**

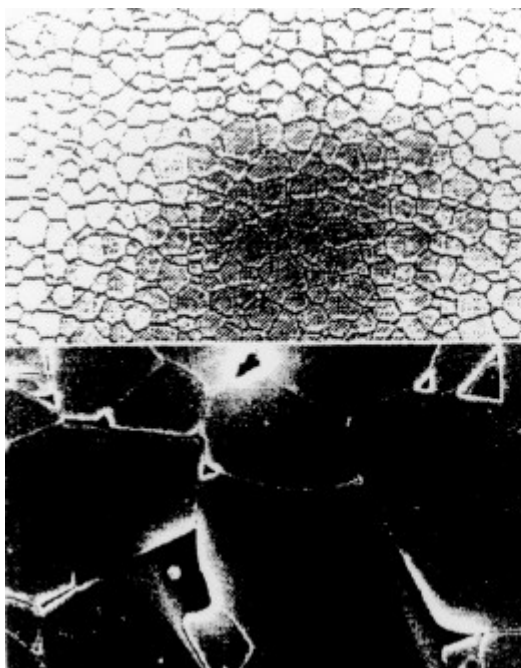
Der keramische Fertigungsprozess unterscheidet sich wesentlich von allen anderen Werkstofftechnologien. Im Unterschied – z.B. zu den Metallen erfolgt die Formgebung bei der Keramik vor dem Brand. Erst beim Sintern entstehen die für die Keramik charakteristischen Eigenschaften. Eine Veredlung des Werkstoffes durch Umschmelzen, Nachhärten oder Umformprozesse – wie bei Metallen üblich – ist bei Keramik nicht möglich. Selbst ein Nachbrennen ist keine Garantie für eine Verbesserung der Werkstoffeigenschaften. Der Keramiker muß die einzelnen Prozess-Schritte – vom Pulver über die Aufbereitung der Masse, der Formgebung und des Sinterprozesses als Ganzes sehen. Jeder Verfahrensschritt beeinflusst die endgültigen Eigenschaften des Werkstückes und ist deshalb im Gesamttablauf zu berücksichtigen.



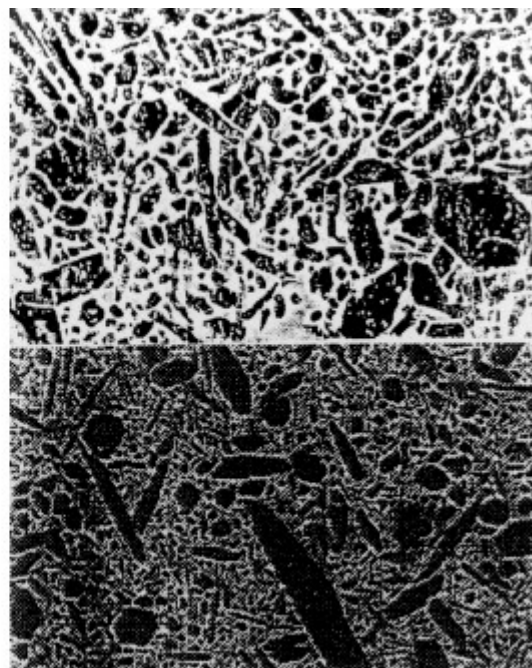
**Bild 2.1:** Fertigungstechnologie von unterschiedlichen Werkstoffgruppen



**Bild 2.2:** Einfluß der Fertigungsparameter auf Mikrostruktur und Werkstoffeigenschaften

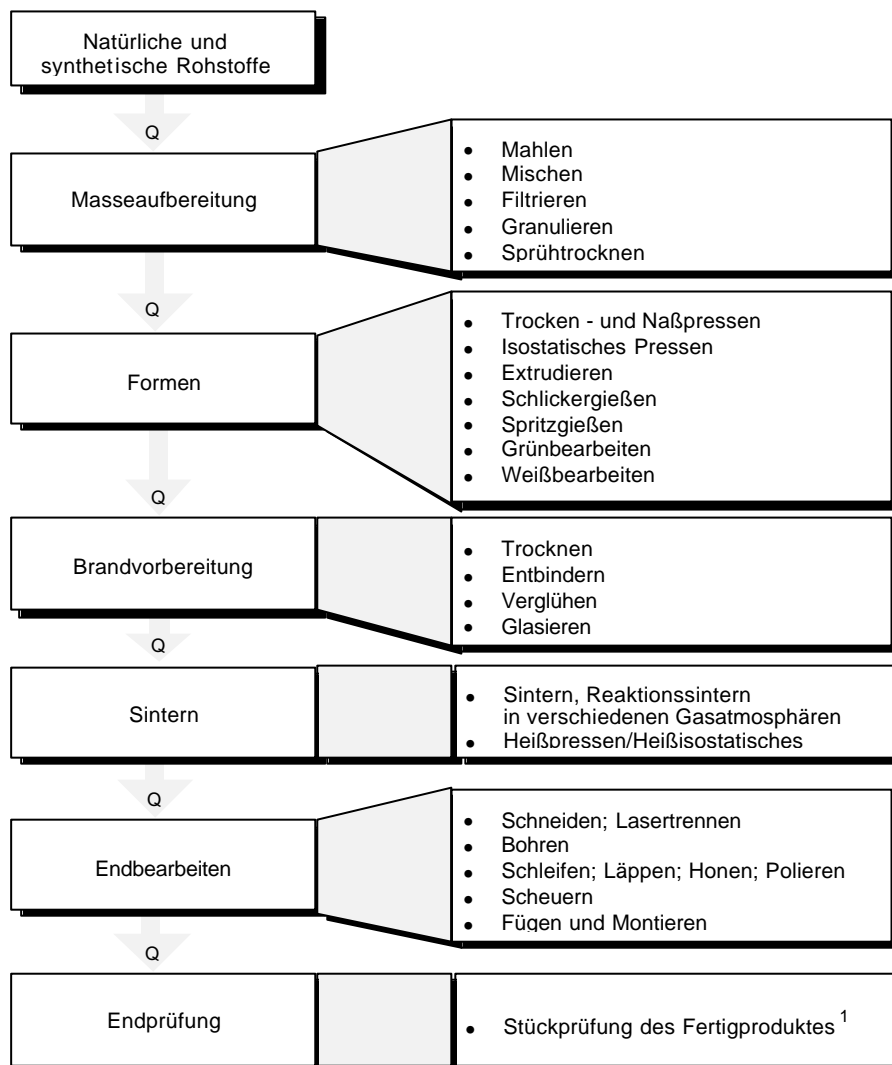


**Bild 2.3:** Gefüge Aluminiumoxid - Keramik



**Bild 2.4:** Gefüge von Siliciumnitridkeramik

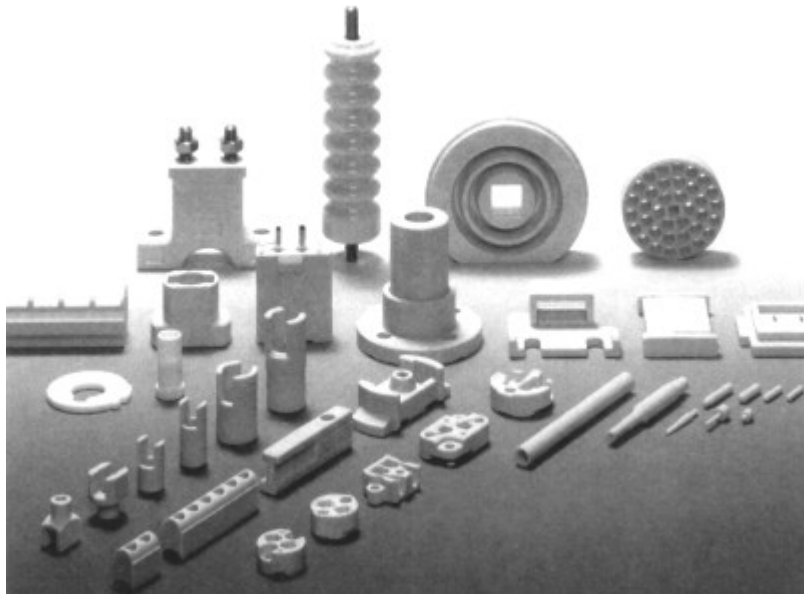
Im Bild 2.5 sind die Grundoperationen der keramischen Technologie zusammen-gestellt.



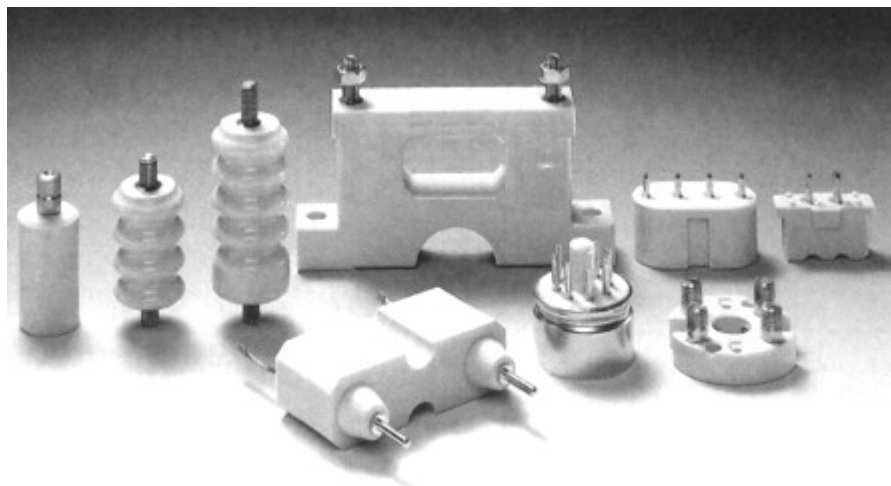
**Bild 2.5: Technologie der Keramik - Grundoperationen**

Der Anwender der Keramik, der Konstrukteur muß diese Grundoperationen kennen, ihre Problematik verstehen, um Keramik werkstoffgerecht einzusetzen. Ein Austausch eines Metallbauteils durch ein identisches Keramikteil führt in den seltensten Fällen zum Erfolg. Konstruieren mit Keramik erfordert neue Ansätze.

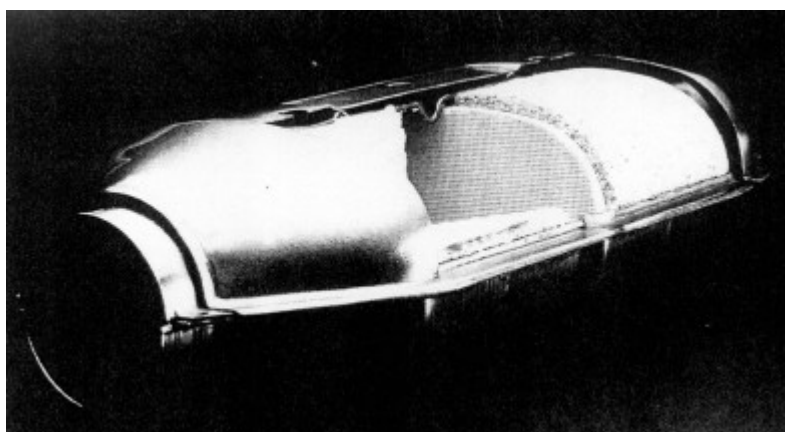
Es ist richtig, daß man bei der Formgebung von keramischen Komponenten einfache Formen anstreben soll. Allerdings lassen sich heute durch verbesserte Pulver, optimierte Aufbereitungs- und Formgebungsprozesse doch relativ komplizierte Bauteile herstellen, nicht nur als Einzelteile sondern auch in Großserien.



**Bild 2.6:** Keramik-Bauteile (Vogt GmbH, Henfenfeld)

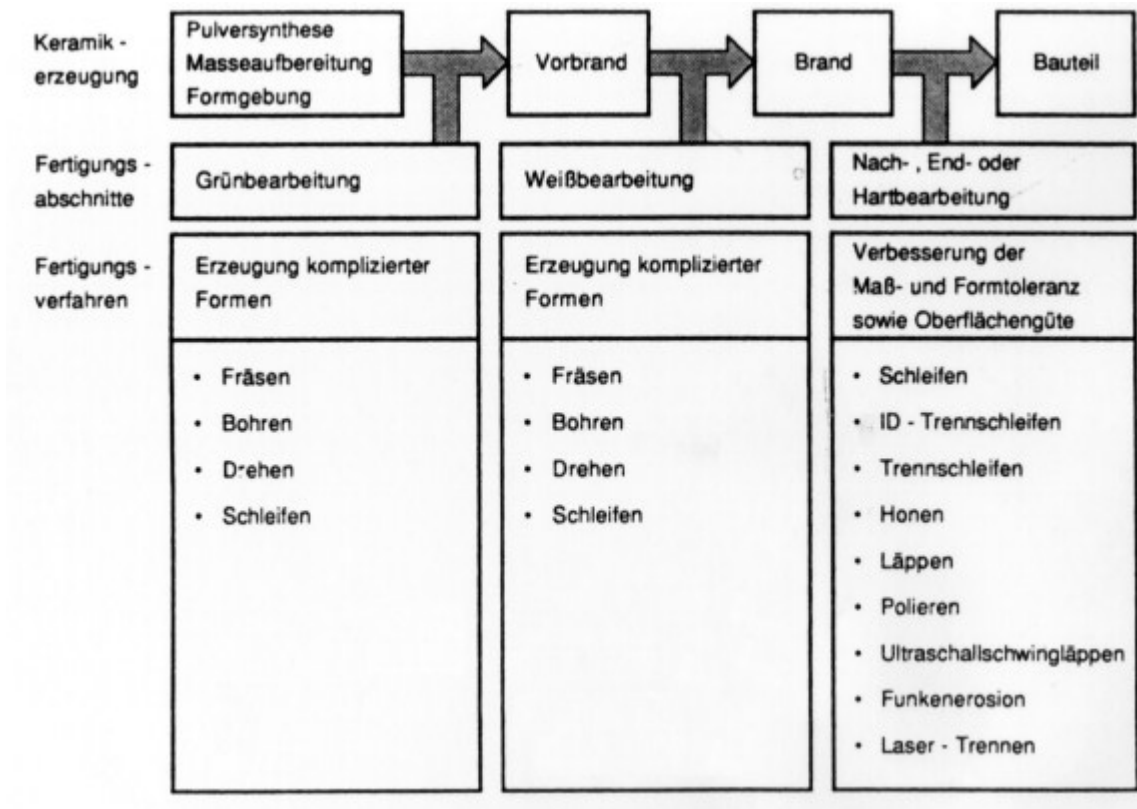


**Bild 2.7:** Keramik-Metall-Verbindungen (Vogt GmbH, Henfenfeld)

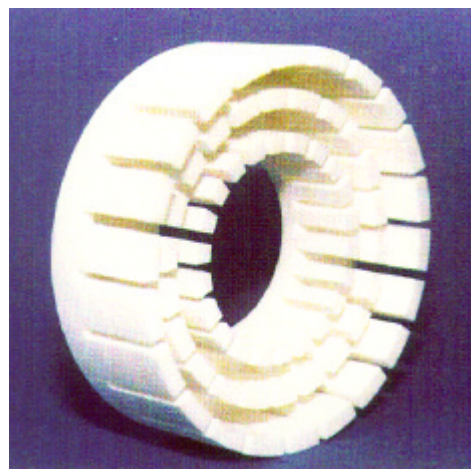


**Bild 2.8:** Keramik Wabe

Eine weitere, kostengünstige Möglichkeit besteht darin keramische Formkörper vor dem Sinterbrand – im grünen oder weißen Zustand – mechanisch zu bearbeiten. Speziell in diesem Bereich liegt noch ein breites, noch nicht erschlossenes Arbeitsgebiet.



**Bild 2.9:** Technologie der Keramik – mechanische Bearbeitung



**Bild 2.10:** Stator für Hochgeschwindigkeits – Rührwerk



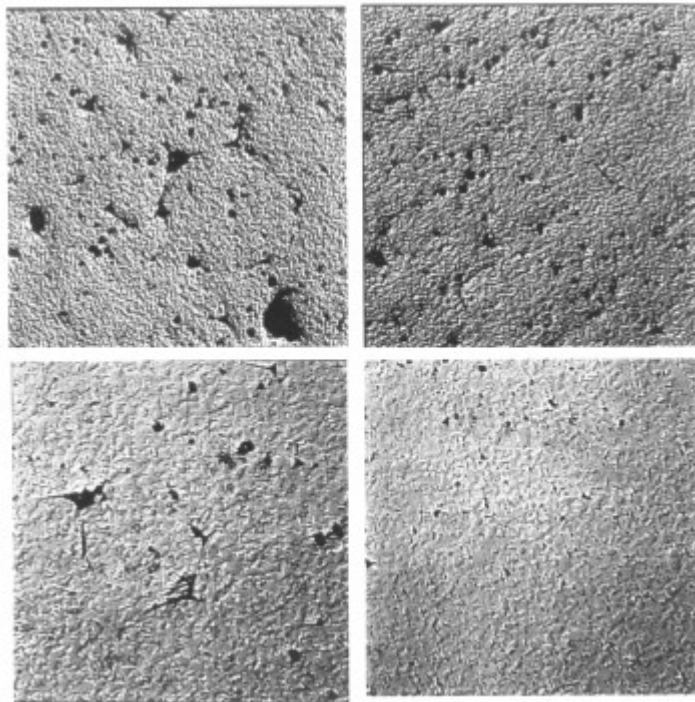
Komponenten aus Hochleistungskeramik prozesssicher herzustellen, ist eine ingenieurtechnische Herausforderung, die neues Denken in miteinander verbundenen Prozessen erfordert. Allein kann diese Aufgabe die keramische Industrie nicht lösen, hier brauchen wir Kooperationspartner – nicht nur aus der Wissenschaft sondern vor allem aus der Industrie.

Betrachten wir die Standardroute zum Herstellen keramischer Bauteile etwas genauer. Sie führt analog zur Pulvermetallurgie ausgehend von keramischen Pulvern oder Pulvermischungen unter Zugabe von meist organischen Verflüssigungs-, Plastifizierungs- und Bindemitteln über vielfältige Formgebungsverfahren zum sogenannten Grünkörper mit einer technisch handhabbaren Grünfestigkeit. Die eventuell nachfolgende spanende Bearbeitung nennt man Grünbearbeitung. Nach dem Trocknen und dem Ausbrennen der temporären Hilfsmittel liegt eine lose gepackte Mikrostruktur (Adhäsionsverbund) mit einer sehr niedrigen Grünfestigkeit vor.

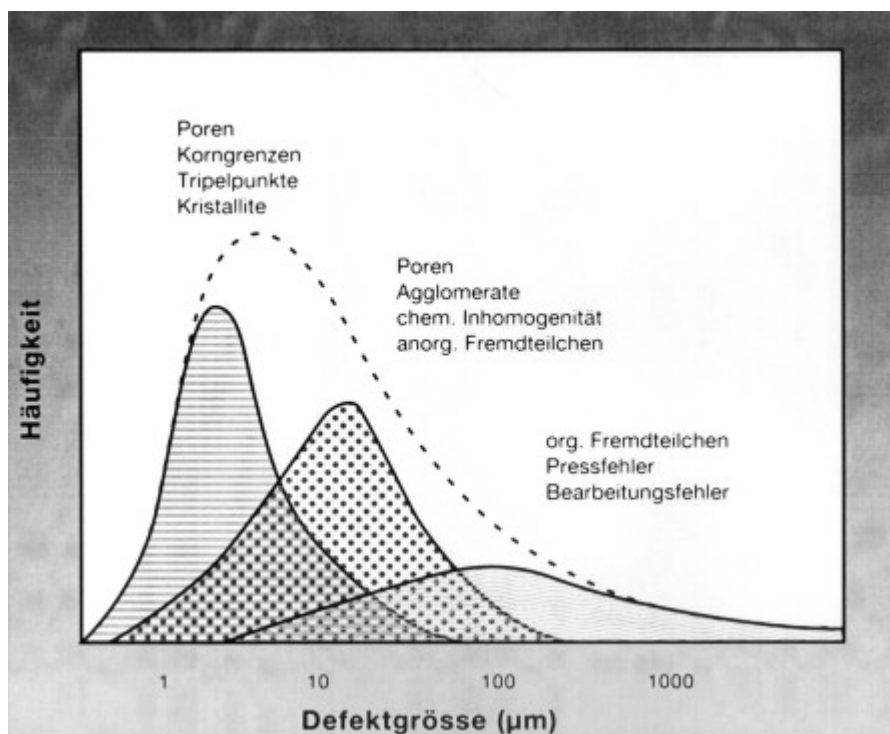
Als Ersatz oder Ergänzung zur Grünbearbeitung kann eine spanende Weißbearbeitung nach dem Vorbrand (Schrühen, Vorsintern) erfolgen. Dabei können sich sowohl Mikrostruktur wie auch Dichte des Formkörpers und die eventuell vor-liegenden Reaktionspartner (z.B. Entwässern von Tonen) bereits verändern.

Der grüne bzw. weiße Zustand mit allen seinen durch die Formgebung bedingten Fehlern (Dichtegradienten, Inhomogenitäten, Einschlüsse, Risse, Eigenspannungen u.a.) ist der Ausgangszustand für den keramischen Brand, in dem aufgrund unterschiedlicher werkstoffspezifischer Reaktionsmechanismen eine Verfestigung, Verdichtung und Umstrukturierung des Formkörpers erfolgt. Prozeßvorlauffehler in der Mikrostruktur wirken beim Sintern in der Regel verschärfend (Rißwachstum), in selteneren Fällen werden sie eingefroren. Als Grundregel gilt:

**Gefügefehler, die bei der Formgebung oder Bearbeitung entstanden sind, können durch den Brand nicht mehr behoben werden.**



**Bild 2.11.a.:** Defektgrößenverteilung (Gefügebildungen)



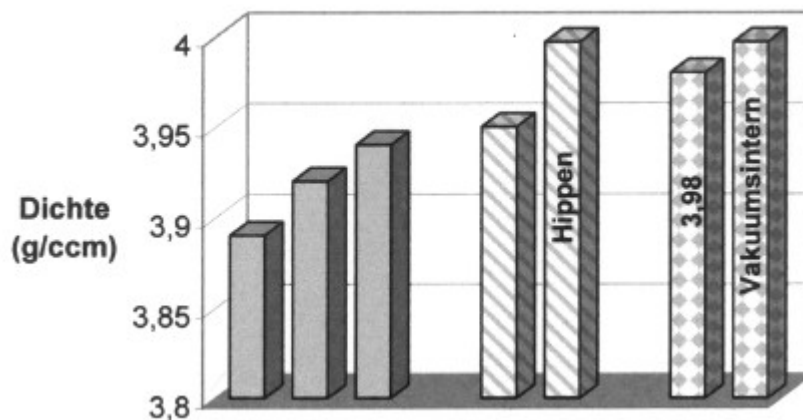
**Bild 2.11.b.:** Defektgrößenverteilung

Die wesentlichen zeitabhängigen Steuerungsparameter des keramischen Brandes sind Temperatur, Druck und Atmosphäre. Die nach dem heutigen Stand der Technik erreichbaren

Gründichten liegen in der Regel zwischen 50 und 70% der theoretischen Dichte des Werkstoffes. Das bedeutet eine lineare Schwindung von ca. 20 bis 10% beim Sinterprozess.

Die Verfestigung und Verdichtung von Pulverformkörpern erfolgt heute noch überwiegend durch druckloses Sintern in fester Phase, d.h. unterhalb des Schmelzpunktes des am niedrigsten schmelzenden Bestandteiles, oder unter Zuhilfenahme einer geringen, beim Brand entstehenden flüssigen Phase. Der thermische Prozess verdichtet den grünen Formkörper durch Materialumordnungs- Vorgänge auf 92 bis 98% der theoretischen Dichte und verfestigt das Pulver durch Bildung von Kontaktflächen zu einem polykristallinen Festkörper.

Mit reaktiven Pulvern können nach dem heutigen Stand der Technik theoretische Dichten von > 99% erreicht werden, bei Anwendung spezieller Sinterprozesse nahezu 100%.



**Bild 2.12: Erreichbare Dichten: Aluminiumoxid – Keramik > 99,7%**

Neben dem drucklosen konventionellen Sintern werden heute in der Keramik noch folgende Sintertechnologien angewendet:

- Reaktionssintern
- Vakuumsintern
- Drucksintern (axiales und isostatisches Heißpressen, Nachhippen)

Reaktionssintern wird vor allem bei speziellen Siliciumcarbid- und Siliciumnitrid – Werkstoffen eingesetzt. Der Vorteil liegt in der geringen Schwindung der Bauteile (< 5% bis 0%). Die Vakuum- und Drucksintertechnik erlaubt die Herstellung nahezu porenfreier Werkstoffe mit praktisch 100% theoretischer Dichte.

### 3. Technologie und Werkstoffeigenschaften

Betrachtet man die keramische Fertigungstechnologie als Ganzes, weist sie viele Vorteile auf.

Die wichtigsten sind:

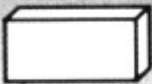
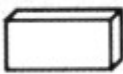
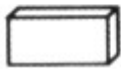
- große Vielfalt der Ausgangspulver und Versätze
- zahlreiche unterschiedliche Formgebungsverfahren unter Berücksichtigung von Geometrie der Bauteile, Stückzahl und Wirtschaftlichkeit
- Variable Sintertechnologie

Diesen Vorteilen stehen aber nicht wegzudiskutierende Nachteile entgegen, z.B:

- relativ hohe Bauteiltoleranzen
- die Größe der keramischen Bauteile ist begrenzt
- Reproduzierbarkeit der Eigenschaften
- das sprödelastische Bruchverhalten

#### 3.1. Toleranzen

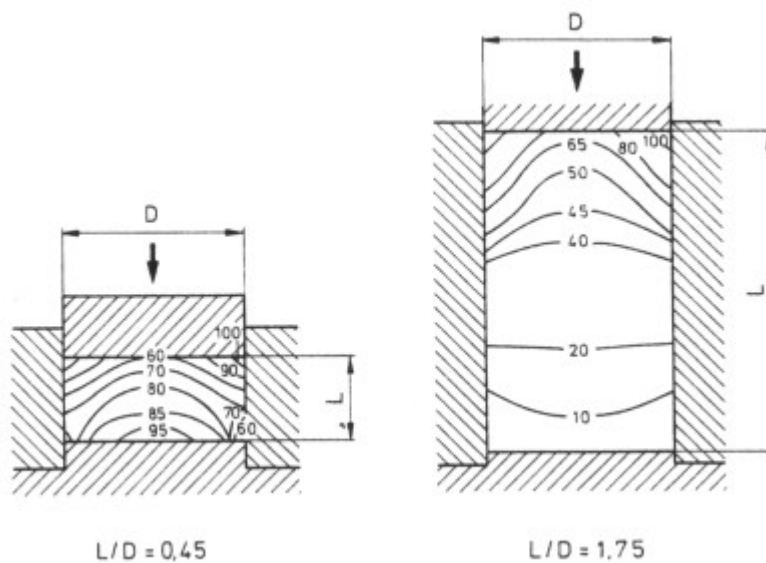
Keramische Bauteile schwinden beim Brand bis zu 20%. Daraus resultieren in der Fertigung relativ hohe Toleranzen. Ursachen hierfür sind die nicht zu vermeidenden Versatzschwankungen der einzelnen Fertigungschargen und die Gründichte-unterschiede der Bauteile nach der Fertigung. Nicht umsonst erlaubt DIN 40680 Toleranzen von ca.  $\pm 5\%$  (grob) und  $\pm 2\%$  (mittel) für Längenabmessungen. Für viele Konstruktionsbauteile sind diese Werte zu hoch, vor allem deshalb, weil die keramische Hartbearbeitung zur Erreichung engerer Toleranzen recht kostenintensiv ist. Durch den Einsatz von optimierten Pulvern und Arbeitsmassen, aber auch durch moderne Formgebungstechnologien und Sinterprozesse lassen sich heute Toleranzen von  $< \pm 0,5\%$  in der Serienfertigung garantieren.

Abmessungen	Toleranzen	
	Standard	ETEC
Formgebung		
Grünbearbeitung		
		
↓ Sintern (as fired)		
	$\pm 2\%$	+0/-2% +0/-1%
↓ Nachbearbeitung		
	$\pm 5 \mu\text{m}$ bis $\pm 0,5 \mu\text{m}$	

**Bild 3.1:** Brennschwindung und Toleranzen

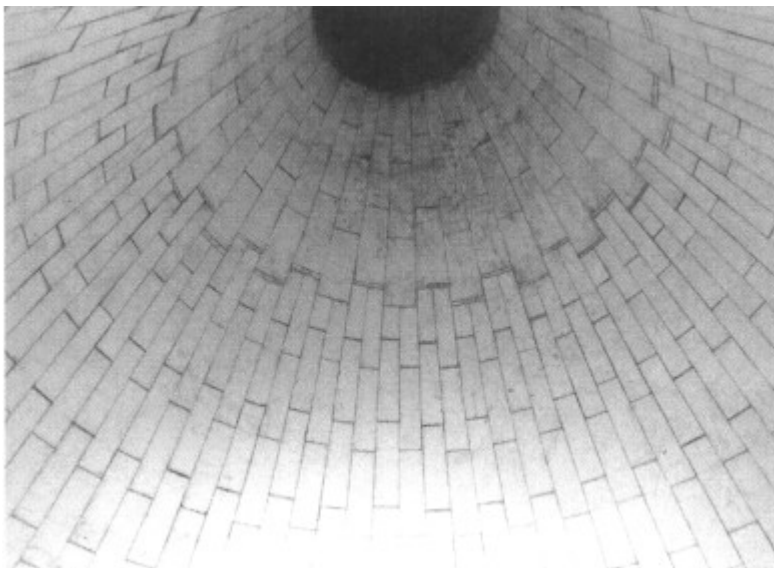
Differenzen in der Dichteverteilung im Grünling äußern sich in unterschiedlichen Schwindungsbeträgen beim Sintern. Daraus resultieren:

- Differenzen bei Längenmaßen, Planparallelität und Winkeligkeit
- Durchbiegung, Reduzierung der Ebenheit
- Verformung der Bauteile
- Rißbildung durch innere Spannungen



**Bild 3.2:** Dichteverteilung in einem gepreßten Formkörper

In der Keramik hat die „near net shape,, – Technologie in den letzten Jahren hohe Bedeutung erlangt. Dadurch ergaben sich in vielen Bereichen kostengünstige Lösungen, ohne die teure Hartbearbeitung mit Diamantwerkzeugen anwenden zu müssen. Beispiele hierfür sind die engfugige Verlegung von Verschleißschutzplatten in der Aufbereitungstechnik, Keramik/Polymer – Verbundpanele im ballistischen Schutz aber auch verschleiß- und korrosionsbeständige Komponenten in Meß- und Regelarmaturen. Während bei Verschleißschutzauskleidungen Toleranzen von  $+0/-2\%$  allen Anforderungen genügen, sind bei Zusatzpanzerungen Toleranzen von  $< \pm 0,2\%$  zu erfüllen, um die geforderte Schutzleistung zu garantieren. Für Anwendungen in der Meß und Regeltechnik ergibt sich ein relativ breites, anwendungsspezifisches Toleranzspektrum. So muß z.B. ein Siliciumnitrid – Ventil im Kraftfahrzeug für seine Funktion engste Toleranzen erfüllen. Bei einer Sandstrahldüse, die sowieso im Betrieb sehr stark verschleißt, sind engste Toleranzen eine überflüssige Bedingung.



**Bild 3.3:** Auskleidung eines Sichters

#### **Müllverbrennungskraftwerk**

hohe Korrosion

Standzeiten:

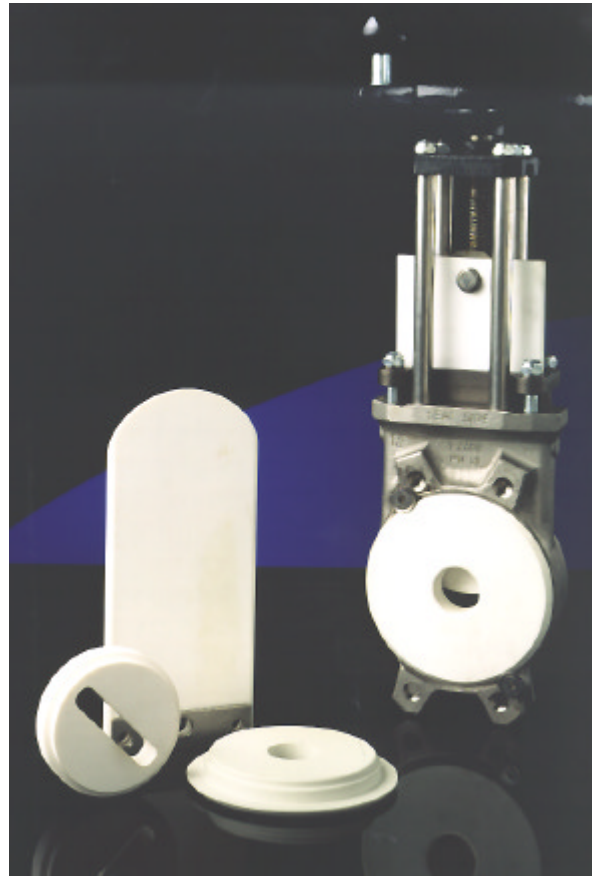
Stahl <1Jahre

Keramik >7Jahre

Bild 3.4 Zeigt die Leichtpanzerung einer Fahrzeugtür aus ALOTEC 96 SB Keramik-Aramid Komposit; Schutzklasse FB7; Kaliber 7,62x54 API; Dragunov



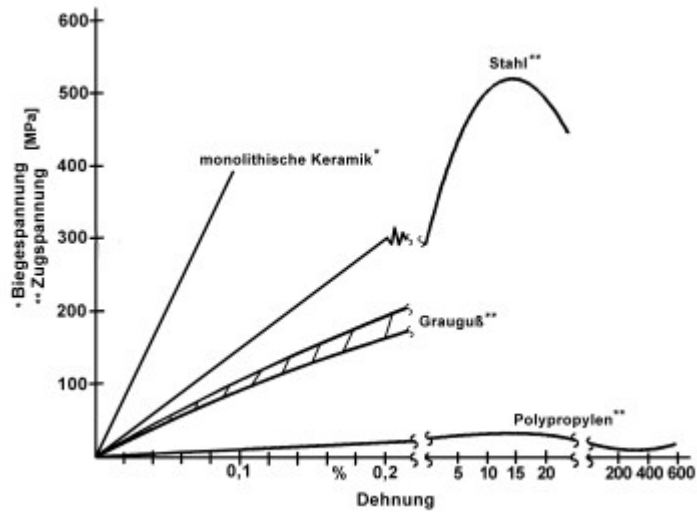
**Bild 3.4:** Panel für den ballistischen Schutz von Kraftfahrzeugen



**Bild 3.5:** Dosierschieber

### 3.2 Reproduzierbarkeit und sprödelastische Eigenschaften

Metalle – vor allem Stähle – sind gutmütige Werkstoffe. Durch ihre hohe Zähigkeit verzeihen sie leicht Konstruktionsfehler. Dagegen ist die hohe Sprödigkeit der Keramik ein besonderes Problem. Ursache der hohen Sprödigkeit ist die fehlende Plastizität der Keramik. Spannungsspitzen an äußeren oder inneren Fehlstellen (Kerben, Poren etc.) können nicht durch plastische Verformung abgebaut werden.



**Bild 3.6:** Spannungs- Dehnungsdiagramm

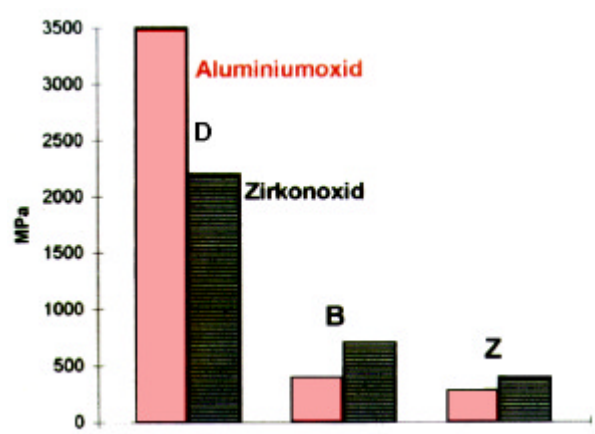
Der als spröde anzusehende Gußwerkstoff GG-20 besitzt eine Bruchzähigkeit, die in etwa den „zähen„ Keramikwerkstoffen Siliciumnitrid und Zirkoniumoxid entspricht.

Spröde Werkstoffe	Zähe Werkstoffe	"Metallähnliche" Werkstoffe
$K_{Ic} < 5$	$K_{Ic} > 5$	Pull out Effekt
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZTA	C-SiC
SiC	ZrO <sub>2</sub>	
B <sub>4</sub> C	SN	

**Bild 3.7:** Spröde und „zähe„ Keramikwerkstoffe

Da Fehlstellen auf Zugspannung wesentlich empfindlicher reagieren als Druckspannungen, ist bei keramischen Werkstoffen die Druckfestigkeit bis über den Faktor 10 größer als die Zugfestigkeit. Deshalb wird die Festigkeit von Keramik – nicht zuletzt wegen der einfacheren Versuchsdurchführung – meist im Biegeversuch ermittelt. Reine Zugspannungen sind in Konstruktionen mit Keramikwerkstoffen möglichst zu vermeiden.

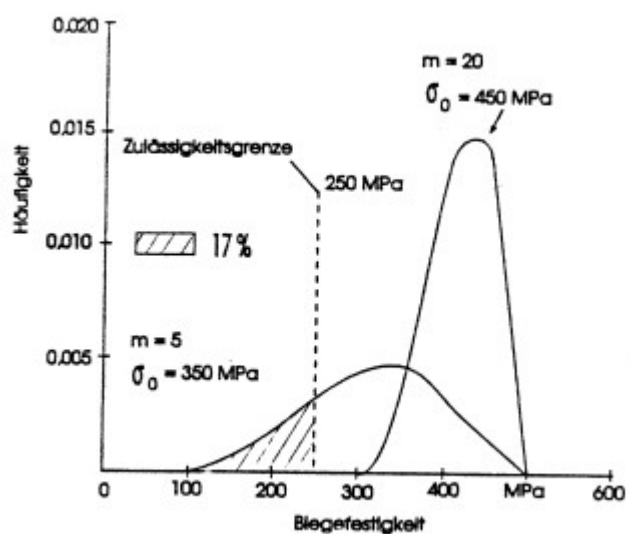
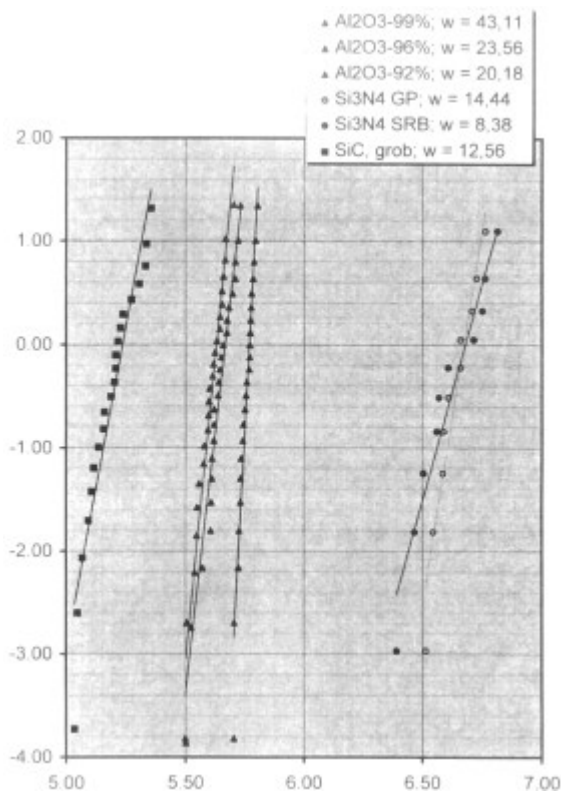




**Bild 3.8:** Zug-, Biege- und Druckfestigkeit von Keramikwerkstoffen

Charakteristisch für Keramik ist die relativ große Streuung der Festigkeitswerte. Sie ist durch den Einfluß der Fehlstellen im Werkstoff bedingt. Die Streuung der Festigkeit kann nach der Weibull – Verteilung beschrieben werden.

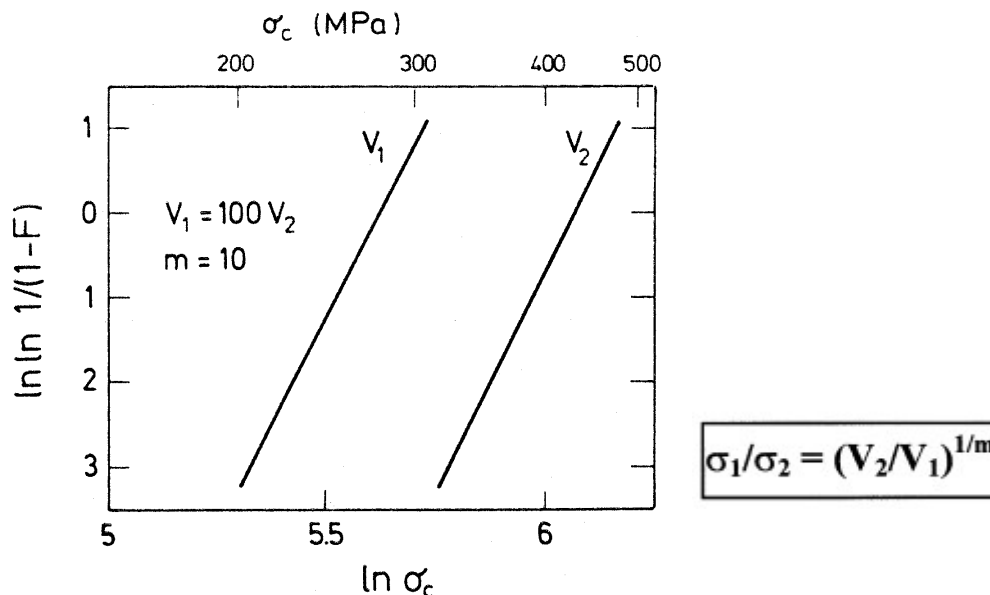
Je höher der Weibullmodul  $m$  ist, desto geringer ist die Streuung der Werte und desto homogener ist der Werkstoff. Der  $m$  – Wert ist ein Maß für die Prozessfähigkeit. Angestrebt werden  $m$  – Werte um 20 und mehr.



**Bild 3.9:** Weibullverteilung

Während bei Aluminiumoxid der Weibullmodul vor noch nicht zu langer Zeit zwischen 5 und 10 lag, werden heute durch Optimierung der Pulver und verbesserte Formgebungstechnologien Werte zwischen 15 und 25 erreicht. Bei Zirkoniumoxid liegt er höher als 20, bedingt durch die höhere Bruchzähigkeit. Korrespondierende Werte erreicht man beim Siliciumcarbid und beim „zähen“, Siliciumnitrid.

Die Festigkeit der Keramik ist abhängig vom Volumen des Bauteils. Erklärbar ist die Volumenabhängigkeit der Festigkeit durch die größere Wahrscheinlichkeit des Auftretens von bruchauslösenden Fehlstellen. Aus der Volumenabhängigkeit ist abzuleiten, daß kompakte Bauteile möglichst klein sein sollen.



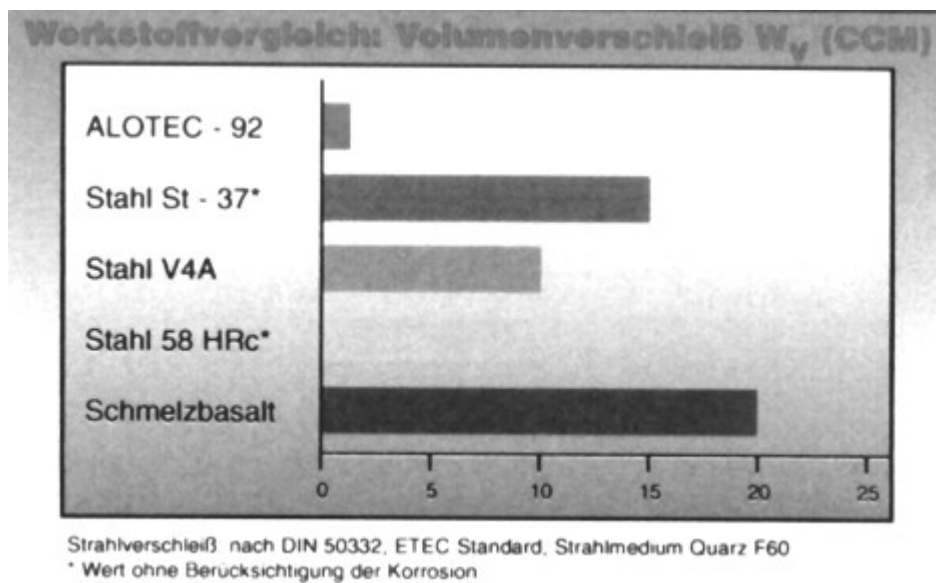
**Bild 3.10:** Volumenabhängigkeit der Festigkeit

### 3.3 Bauteilgröße

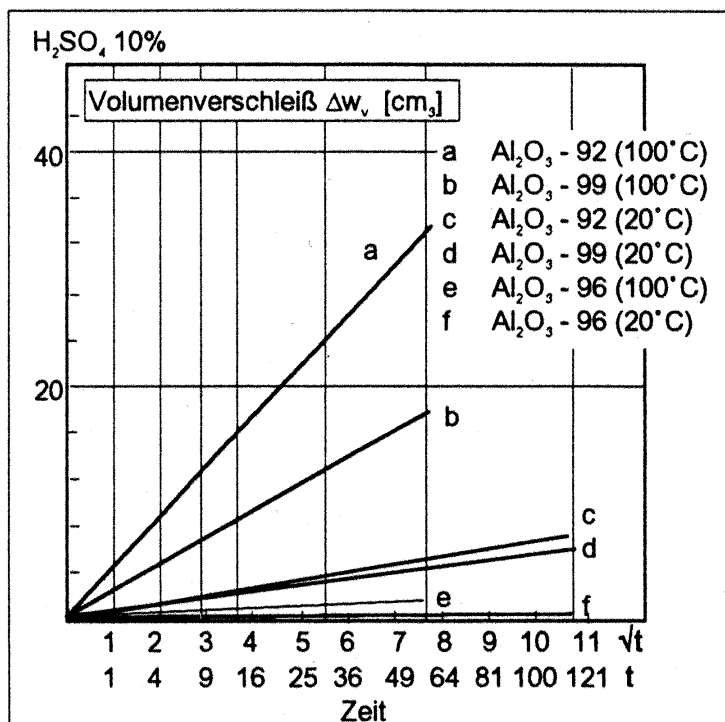
Großflächige und großformatige Keramikbauteile lassen sich nur aus den bereits diskutierten Gründen nur mit erhöhtem Fertigungsaufwand herstellen. Ein weiterer Grund ist die oben beschriebene Volumenabhängigkeit der Festigkeit.

In der Regel ist die Festigkeit nicht die Eigenschaft, derentwegen keramische Werkstoffe unverzichtbar geworden sind. Dies sind andere Eigenschaften wie hohe Härte, Verschleißfestigkeit gegen Abrasion und Erosion, Korrosionsbeständigkeit, Formbeständigkeit (E-Modul) und Warmfestigkeit. Allerdings ist für den Einsatz eine ausreichende Festigkeit eine Grundvoraussetzung. Festigkeit ist auch keine echte Werkstoffkonstante wie z.B. Dichte,

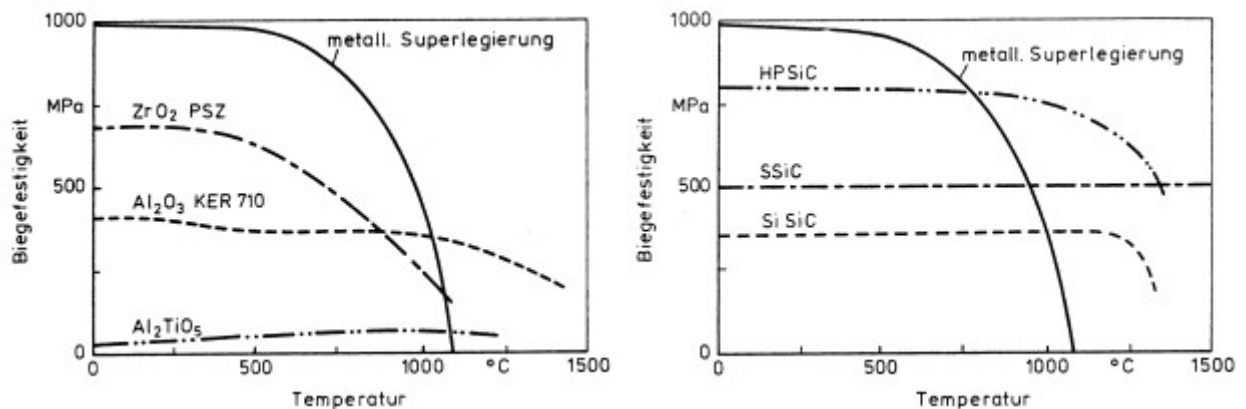
Elastizitätsmodul, Wärmeausdehnungskoeffizient und andere. Diese Größen können mit einem Fehler von <5% gemessen werden. Dagegen gilt für Festigkeit eine Streuung von 15 bis 20% als normal. Zurückzuführen ist diese breite Streuung auf die schon diskutierten Gefügefehler wie Poren, Mikrorisse, Inhomogenitäten etc.. Die Statistische Verteilung der Defektgrößen führt zwangsweise zu der Weibullverteilung der Festigkeit.



**Bild 3.11:** Erosivverschleiß – Werkstoffverschleiß



**Bild 3.12:** Korrosion von  $Al_2O_3$



**Bild 3.13:** Warmfestigkeit von Keramikwerkstoffen:

- a) Oxide
- b) Carbide und Nitride

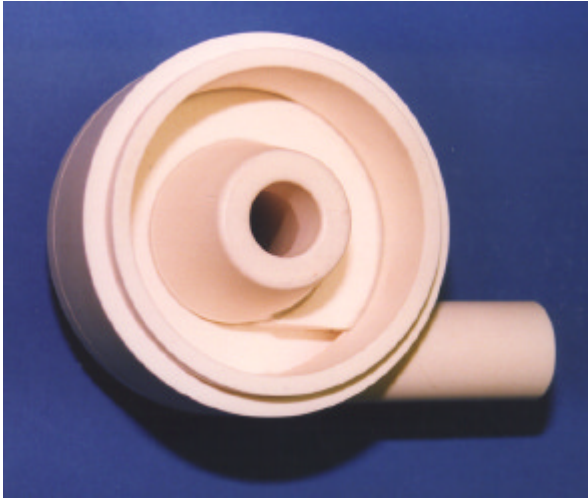
#### 4. Modulbauweise und Verbundkonstruktionen

##### 4.1 Modulbauweise

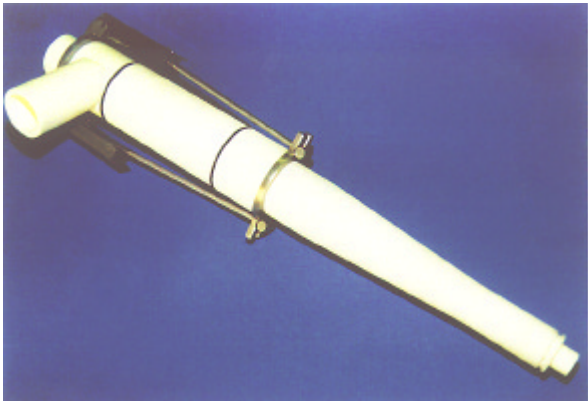
Eine vielfach angewendete Methode, Schwierigkeiten bei der Formgebung und beim Brand zu umgehen, ist die Modulbauweise. Dabei wird das Bauteil in zwei oder mehrere einfache kleinere Einheiten aufgeteilt. Angewendete Fügetechniken sind:

- Garnieren und Zusammensintern
- Laminieren
- Kleben, Kitten
- Löten (metallische Lote, Glaslote)
- Schweißen

Lösbare Verbunde lassen sich durch Klemmen, Spannen und Schrauben realisieren. Hier besteht die wesentliche Aufgabe darin, hohe Kontaktfestigkeiten bei gleichzeitiger Vermeidung von Kanteneffekten, Zwangskräften und Biegebeanspruchungen zu erzielen.



**Bild 4.1:** Einlauf eines Zyklons



**Bild 4.2.a und b.:** Hydrozyklone in Modulbauweise

## 4.2 Werkstoffverbunde

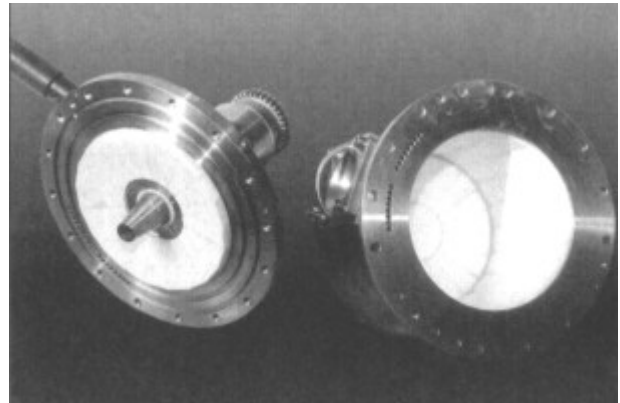
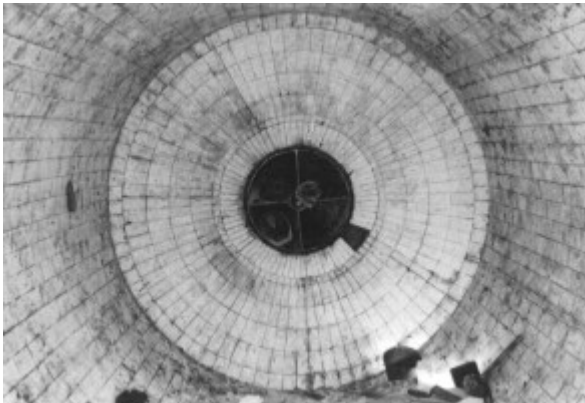
Werkstoffverbunde werden durch Fügen unterschiedlicher Werkstoffe hergestellt. Ziel aller Füge-technologien muß sein:

- Die vorteilhaften Eigenschaften der Einzelwerkstoffe nutzen, ohne daß die nachteiligen Eigenschaften versagenskritisch werden
- Krafteinleitung und Füge-technik müssen den Eigenschaften der einzelnen Komponentenwerkstoffe entsprechen
- Werkstoffkombinationen mit Funktionstrennung verwirklichen, so daß die Nachteile des einen Werkstoffes durch den anderen Werkstoff kompensiert werden.

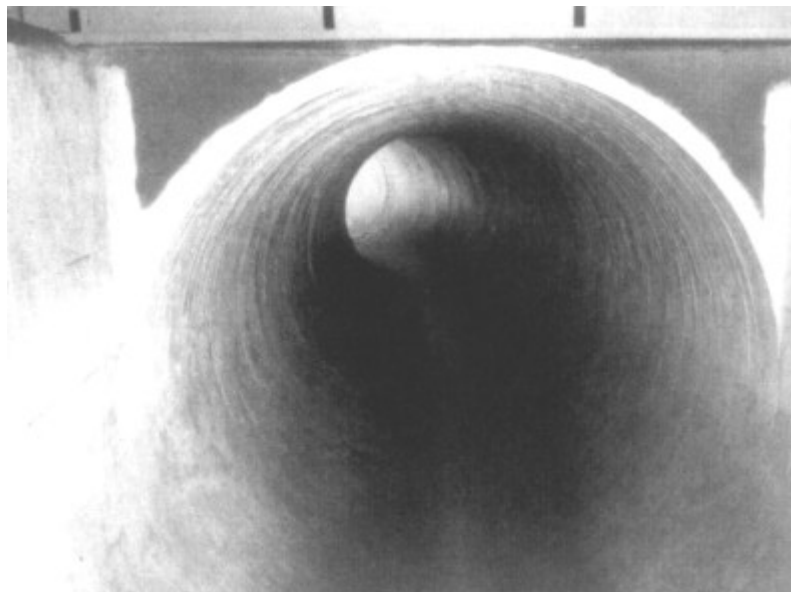
Geeignete Fügepartner für Keramik sind Metalle (Stähle) und Polymere. Bei vielen Anwendungen bestimmen die Stahl- oder Polymerkomponenten die Konstruktion und wirken als die tragende Komponente. Die Keramik ist verantwortlich für die Funktion.

Für den Einsatz von Stahl spricht das schadenstolerante Verhalten und seine hohe Festigkeit. Polymere werden vor allem dann eingesetzt, wenn niedriges Gewicht oder gummielastisches Verhalten gefordert wird.

#### 4.2.1 Keramik / Stahl – Verbunde



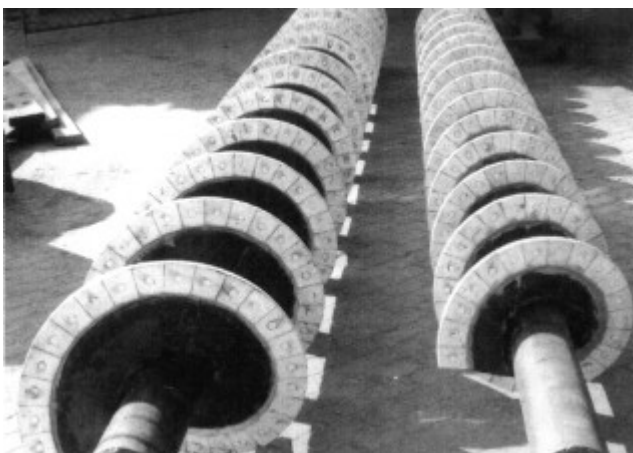
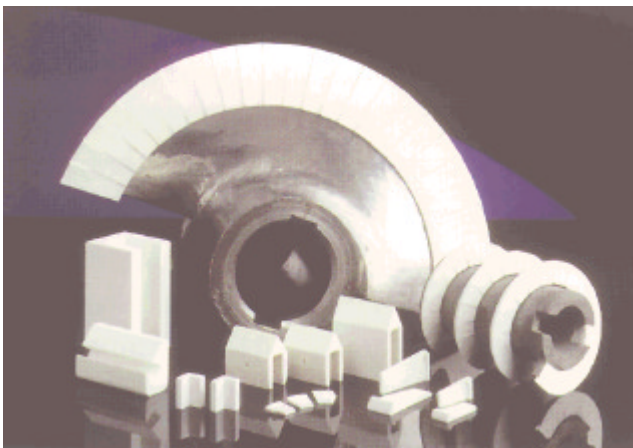
**Bild 4.3:** Mühlenauskleidungen



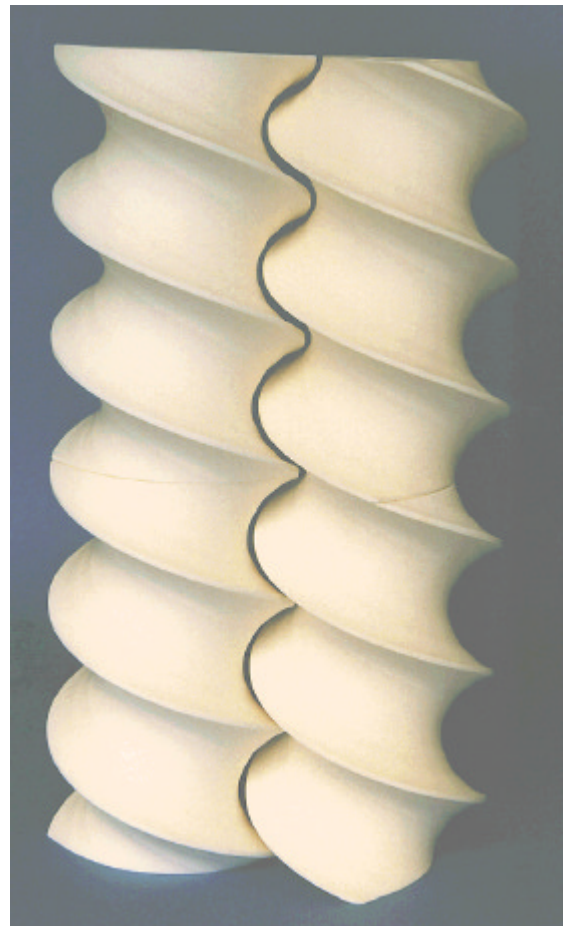
**Bild 4.4:** Granulationsrinne



**Bild 4.5:** Rohrauskleidungen



**Bild 4.6:** Förderschnecken

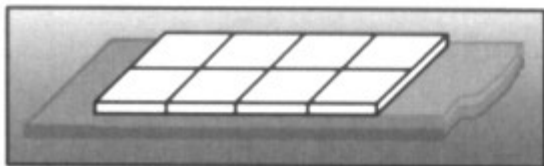


Je nach Anforderung stehen eine Reihe unterschiedlicher Fügeverfahren für Keramik/Metall – Verbunde zur Verfügung. Die jeweilige Auswahl richtet sich nach der Art der Werkstoffe, den Einsatzbedingungen, den gefertigten Stückzahlen und nicht zuletzt nach den Kosten.

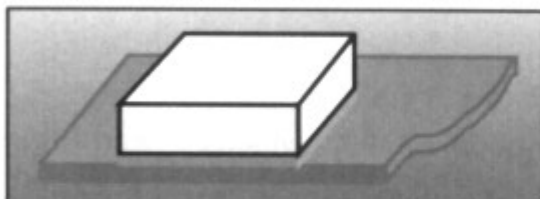
**Kleben** ist das vielseitigste Verfahren, zwei Werkstücke stoffschlüssig miteinander zu verbinden. Der Verbund Keramik / Stahl erfordert Klebstoffe mit hoher Polarität und geringer Schrumpfung. Hier eignen sich vor allem Epoxidharze, aber auch Polyvinylbutyrale, Polymethacrylate u.a. finden Anwendung. Damit werden Zugscherfestigkeiten von über  $10 \text{ N/mm}^2$  erreicht. Allerdings sind die Einsatztemperaturen auf Werte unterhalb  $150^\circ\text{C}$  begrenzt. Silicone und Polyimide sind bei Beachtung ihrer spezifischen Eigenschaften – z.B. Gummielastizität der Silicone – bis ca.  $250^\circ\text{C}$  anwendbar.

Hydraulisch und chemisch abbindende **Zemente** können bei reduzierter Festigkeit Vorteile durch ihre höhere Tempertaturfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit bringen.

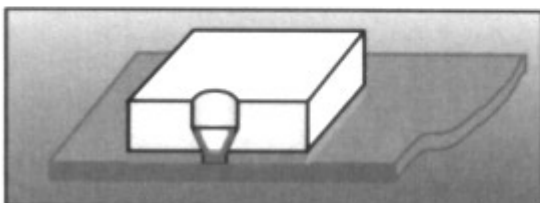
Daneben finden **mechanische Fügeverfahren** – z.B. Schrauben, Schweißen, Verkeilen, Nut- und Federkonstruktionen – häufig in Verbindung mit Klebern – breite Anwendung.



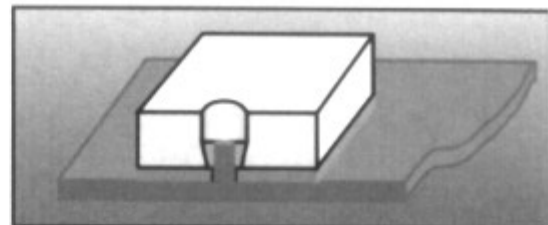
Vulkanisieren von Mosaiken in Gummi



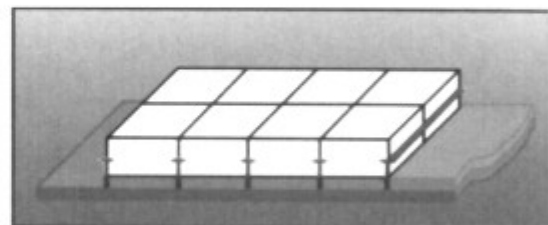
Direktes Verkleben bzw. Zementieren auf Stahl.



Kleben bzw. Zementieren in Kombination mit Schweißen.



Kleben bzw. Zementieren in Kombination mit Schrauben. Beste, aber aufwendige Fügetechnik.



T-Nut-Verfahren in Kombination mit Kleben bzw. Zementieren.

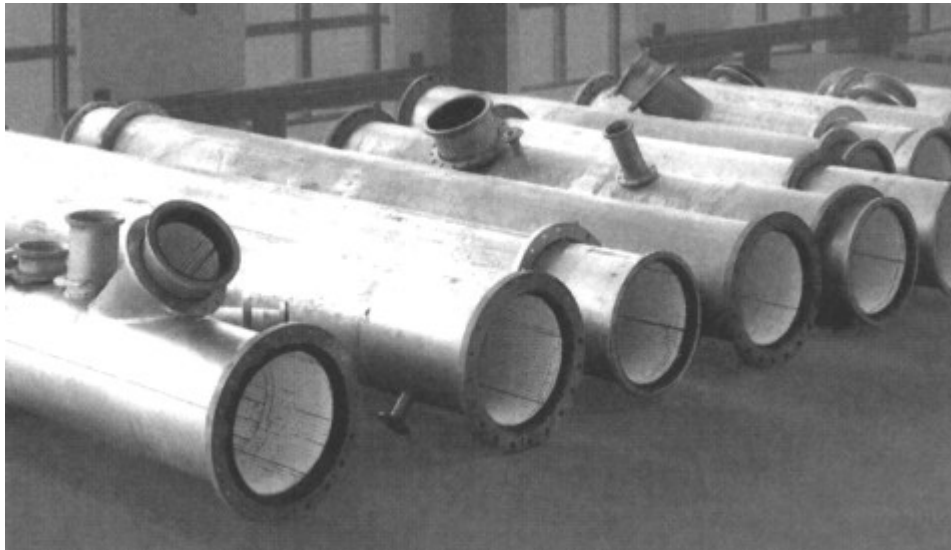
### gebräuchliche Montagetechniken bei Auskleidungen

**Bild 4.7:** Montagetechniken

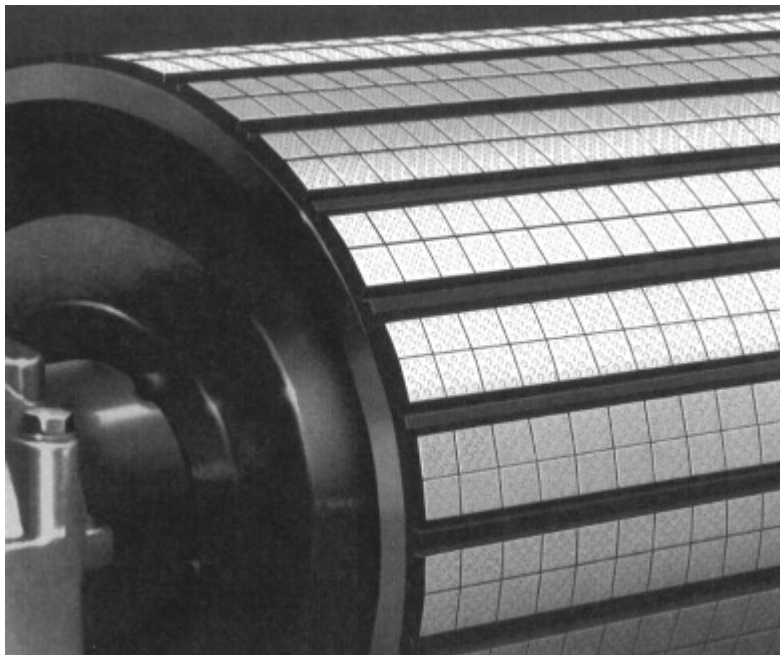


Die Entwicklung und der Einsatz von leistungsfähigen und kostengünstigen Fügemethoden hat den gleichen Stellenwert wie die Qualität der Keramik und die werkstoffgerechte Konstruktion.

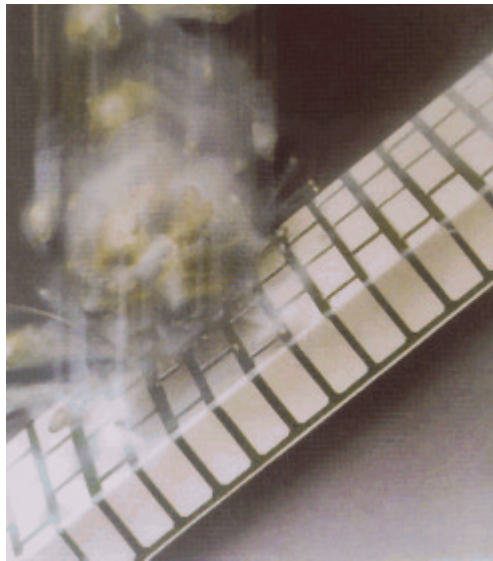
#### 4.2.2 Keramik / Polymer – Verbunde



**Bild 4.8:** Keramikmosaik einvulkanisiert in Gummi



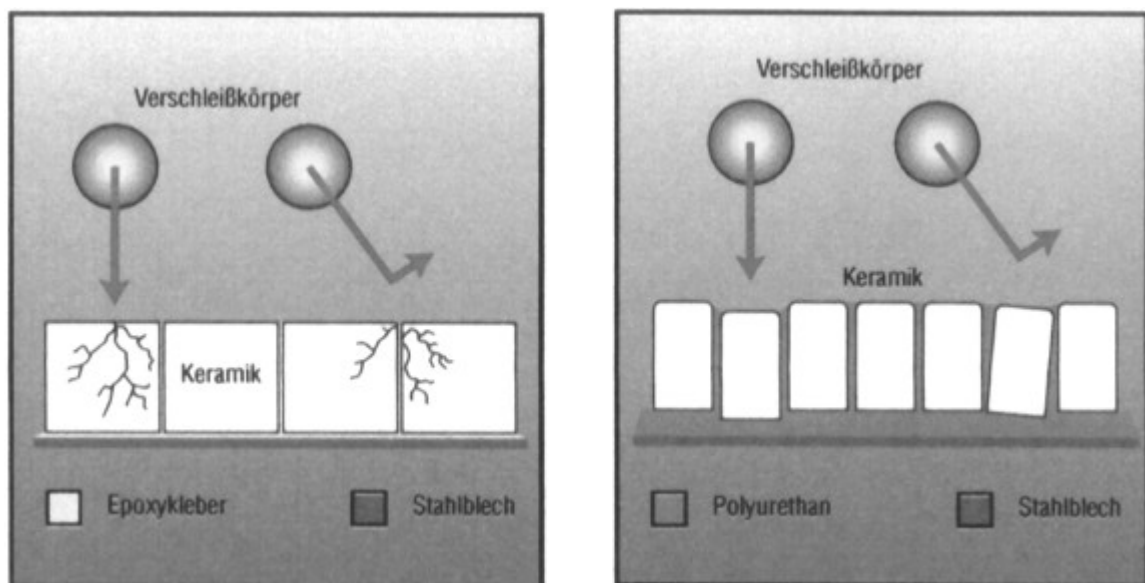
**Bild 4.9:** Belegung der Antriebsrollen von Förderbändern



**Bild 4.10:** Impact – Panels: Keramik / Polyurethan – Verbund

• **Impact – Panels**

Keramik besitzt eine ausgezeichnete Verschleißfestigkeit gegen Abrasion und Erosion. Konventionelle Auskleidungen reagieren aber empfindlich gegen Prall- und Schlagbeanspruchung. Durch den Werkstoffverbund Keramik / Polymer werden die Vorteile beider Werkstoffe sinnvoll miteinander kombiniert. Die Keramik garantiert höchste Verschleißfestigkeit. Die weichelastische Polymermatrix absorbiert die Prallenergien durch elastische Verformung.



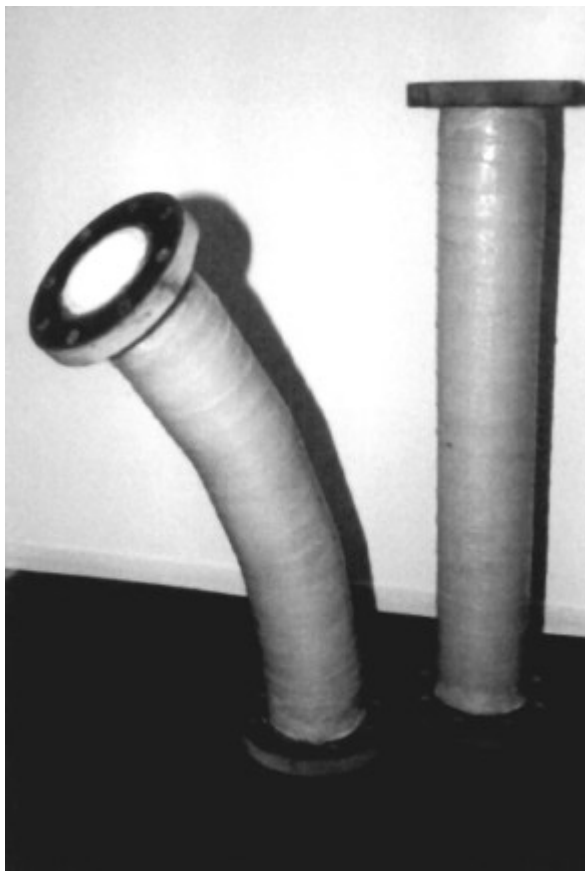
**Bild 4.11:** Energieabsorption durch elastische Verformung

#### • Leichte, verschleißfeste Rohre

Für den Transport von Massenschüttgütern gewinnt die pneumatische Förderung immer größere Bedeutung. Stahlleitungen erfüllen nicht mehr die heutigen Anforderungen hinsichtlich Standzeit und Wirtschaftlichkeit.

Aluminiumoxid – Keramik besitzt auf Grund seiner hohen Härte eine deutlich höhere Verschleißfestigkeit als Stähle. Mit Keramik ausgekleidete Stahlrohre sind heute Stand der Technik. Sie garantieren höchste Wirtschaftlichkeit. Nachteile sind ihr höheres Gewicht und die durch den Keramikeinbau bedingten größeren Rohraußendurchmesser. Dadurch ist eine Integration in bestehende Rohrleitungen nicht immer gewährleistet.

Die **ALOLIGHT – Technologie** benötigt keine Stahlrohre und keinen Mörtel oder PU- Schaum zur Fixierung der Keramiksegmente. Die Rohrsegmente bestehen aus einem vorgefertigten Innenrohr aus Keramik und einer stoßfesten GFK – Ummantelung. Dieses Verbundsystem garantiert höchste Betriebssicherheit hinsichtlich Verschleiß und Korrosion und erfüllt gleichzeitig alle statischen und dynamischen Anforderungen.

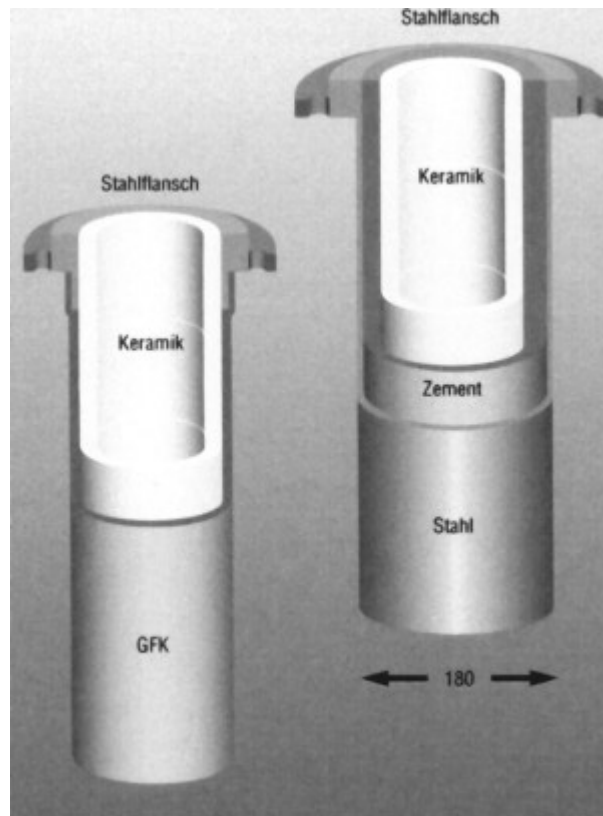


#### Die Lösung zeichnet sich aus:

- Hohe Verschleißfestigkeit durch Aluminiumoxid
- Gewichtseinsparung: ca. 50% gegenüber Stahl
- Alle gebräuchlichen Flanschtypen verwendbar
- Absolut Korrosionsbeständig, kein Rostschutz erforderlich

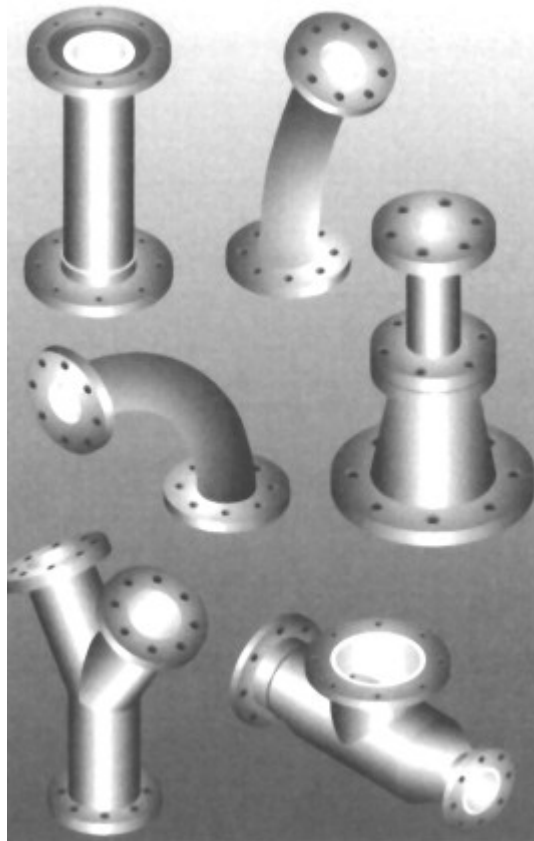
Hohe Wirtschaftlichkeit und vereinfachte Montage

**Bild 4.12:** ALOLIGHT - Technologie



Bauteilvergleich und Standzeiten von Rohren				
	Wandstärke (mm)	DA (mm)	m (kg)	Standzeit Faktor
Schmelzbasalt + <b>Stahl</b>	25 (+4)	180	60	1,25
ALOTEC 92 + <b>Stahl</b>	17 (+4)	180	55	17
<b>Stahl</b>	7	114	20	0,6
ALOLIGHT + GFK	10 (+4)	128	16	10

**Bild 4.13:** Bauteilvergleich ALOLIGHT / konv. Rohre



**Bild 4.14:** Flexibilität der ALOLIGHT - Technologie

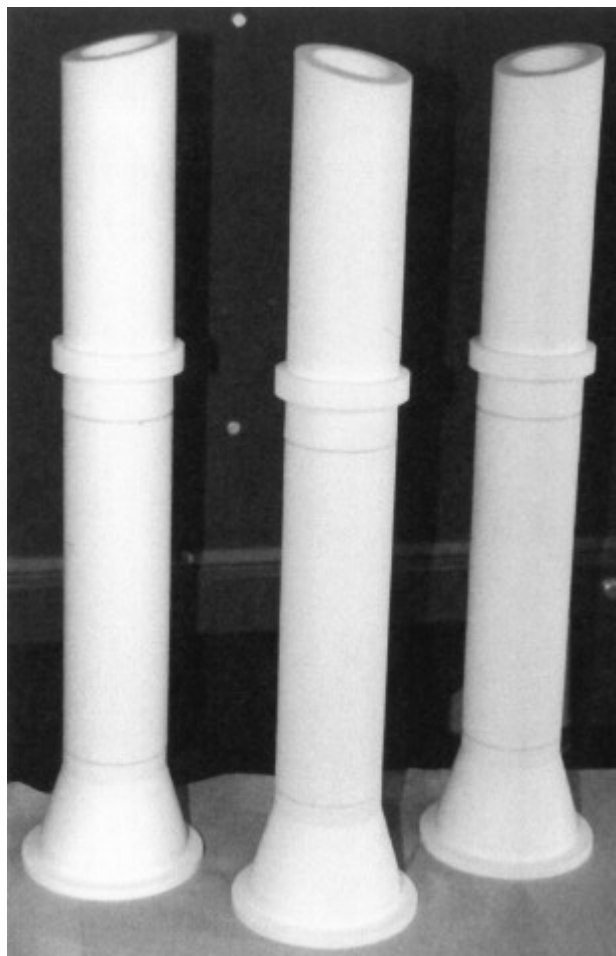
## 5. Zusammenfassung

Diese Arbeit kann nur einen Überblick über Konstruktion, Fertigung, Fügen und Anwendung von keramischen Komponenten im Maschinen- und Anlagenbau geben.

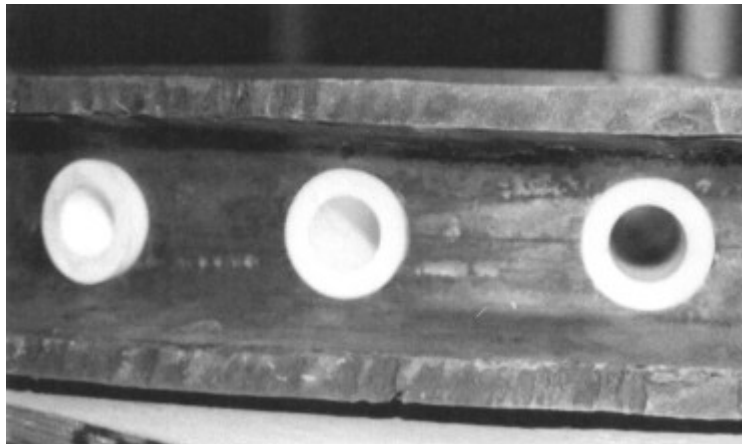
Sie soll aber dazu beitragen, über eine breite Anwendung von Keramik nachzudenken. Speziell die Modul- und die Fügetechnik sind dafür prädestiniert – berücksichtigt man die vorteilhaften Eigenschaften der Keramik und vermeidet man ihre nicht wegzudiskutierenden Schwächen – erfolgreiche, wirtschaftliche und kostengünstige Problemlösungen zu erschließen. Weitere Beispiele sind:



**Bild 5.1:** Düsen und Staurohre



**Bild 5.2:** Dosierdüsen in Modulbauweise



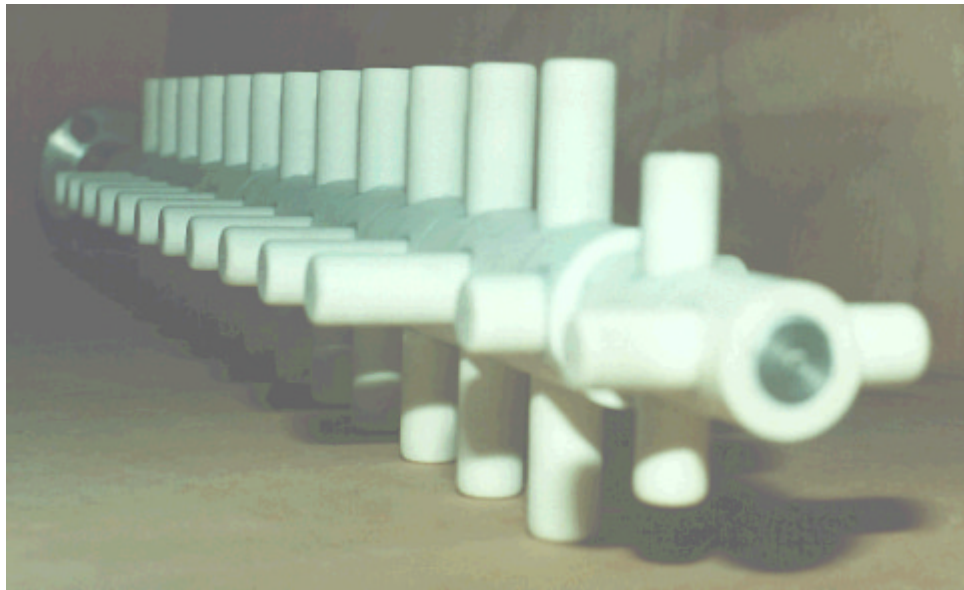
**Bild 5.3:** Düsenkranz



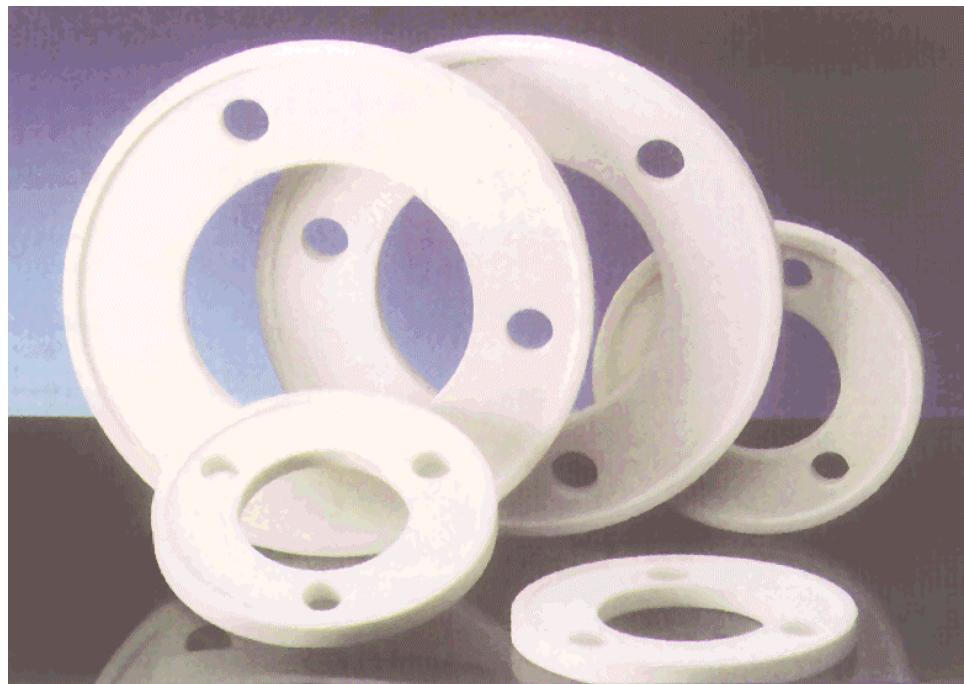
**Bild 5.4:** Keramische Lager



**Bild 5.5:** Impeller / Laufrad für Pumpen

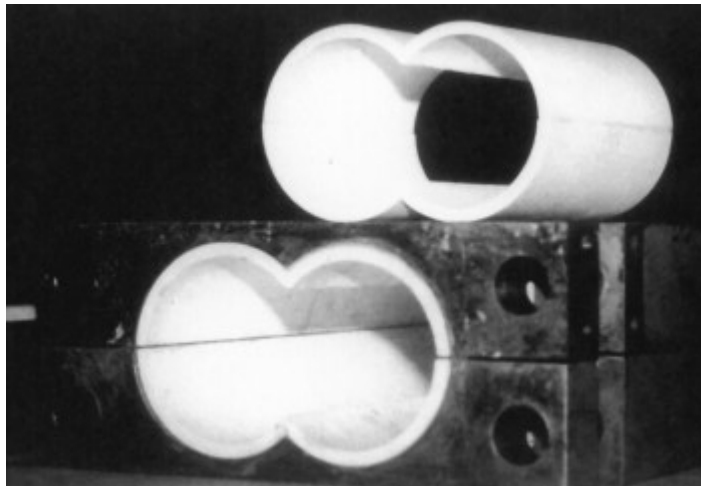


**Bild 5.6:** Antriebswellen für Attritoren



**Bild 5.7:** Mahlscheiben für Attritoren





**Bild 5.8:** Auskleidungen für Extruder

Generell gilt bei ETEC für den Einsatz von keramischen Werkstoffen der Grundsatz:

**Keramik nur dort verwenden, wo sie hingehört !**

Das bedeutet, daß Keramik nur in verschleißbeanspruchten Problemzonen zur Anwendung kommt. Die Konstruktion bleibt – wenn möglich – aus Metall. Diese Konstruktionstechnik erlaubt einerseits kostengünstige, anwendungsgerechte Problemlösungen, da der häufig teure Werkstoff Keramik sehr sparsam verwendet werden kann. Die eventuell erforderlichen Hartbearbeitungskosten bleiben im Rahmen. Andererseits bleibt die Handhabung dieser Bauteile gegenüber den Standardbauteilen gleich. Ein Umdenken im Umgang mit keramischen Bauteilen ist für den Anwender kaum erforderlich. Das führt dazu, daß kostspielige Enttäuschungen beim Einsatz von Keramik auf ein Minimum reduziert werden.

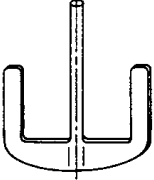
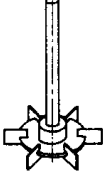
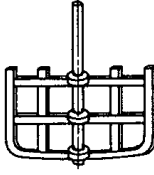
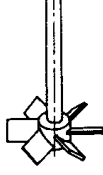
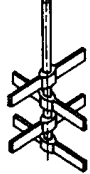
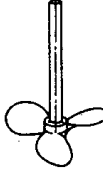
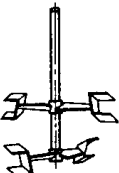
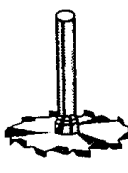
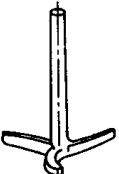
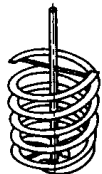
<p><b>Ankerrührer</b></p>  <p>Rührer mit der Innenkontur eines Behälters. Enger Spalt zwischen Rührer und Wand. Gute Wärmeübertragung. <math>d_1/d_2 = 0,9</math> bis <math>0,95</math> <math>v = 0,5</math> bis <math>5</math> m/s Mischen mit Heizen bzw. Kühlen</p>	<p><b>Scheibenrührer</b></p>  <p>Rührer mit starker radialer Abströmung und Umwälzwirkung. <math>d_1/d_2 = 0,2</math> bis <math>0,35</math> <math>v = 3</math> bis <math>6</math> m/s Mischen, Suspendieren, Begasen</p>
<p><b>Gitterrührer</b></p>  <p>Sonderformen des Ankerrührers mit Gittern. Verbesserte Rührwirkung im Behälterinnenraum. <math>d_1/d_2 \approx 0,9</math> <math>v = 0,5</math> bis <math>5</math> m/s Mischen mit Heizen bzw. Kühlen</p>	<p><b>Schrägblattrührer</b></p>  <p>Rührer mit radialer und axialer Abströmung, starke Umwälzwirkung <math>d_1/d_2 = 0,2</math> bis <math>0,5</math> <math>v = 3</math> bis <math>10</math> m/s Mischen, Suspendieren, Homogenisieren</p>
<p><b>Kreuzbalkenrührer</b></p>  <p>Einfacher Rührer mit geringer bis mittlerer Rührleistung. <math>d_1/d_2 = 0,6</math> bis <math>0,8</math> <math>v =</math> bis <math>8</math> m/s Mischen</p>	<p><b>Propellerrührer</b></p>  <p>Schnellaufender Rührer mit starker axialer Abströmung und starker Umwälzwirkung <math>d_1/d_2 = 0,1</math> bis <math>0,5</math> <math>v = 2</math> bis <math>15</math> m/s Homogenisieren, Suspendieren</p>
<p><b>Gegenstromrührer</b></p>  <p>Energiesparender Rührer mit guter axialer und radialer Rührwirkung. <math>d_1/d_2 = 0,5</math> bis <math>0,7</math> <math>v = 1,5</math> bis <math>8</math> m/s Mischen mit Heizen/Kühlen Suspendieren, Homogenisieren</p>	<p><b>Zahnscheibenrührer</b></p>  <p>Schnellaufender Rührer mit überwiegend axialer Abströmung <math>d_1/d_2 = 0,2</math> bis <math>0,5</math> <math>v = 10</math> bis <math>30</math> m/s Homogenisieren, Begasen, Suspendieren</p>
<p><b>Impellerrührer</b></p>  <p>Rührer mit drei rückwärts gebogenen Schaufeln für Flüssigkeiten mit mittlerer Viskosität <math>d_1/d_2 = 0,4</math> bis <math>0,7</math> <math>v = 4</math> bis <math>12</math> m/s Mischen, Suspendieren</p>	<p><b>Wendelrührer</b></p>  <p>Langsam rotierender Rührer für hochviskose Flüssigkeiten, gute axiale Umwälzung <math>d_1/d_2 = 0,9</math> bis <math>0,95</math> <math>v = 0,5</math> bis <math>1</math> m/s Mischen hochviskoser Medien</p>
<p>Erläuterungen: <math>d_1</math> = Behälterdurchmesser, <math>d_2</math> = Rührerdurchmesser, <math>v</math> = Rührerumfangsgeschwindigkeit</p>	

Bild 5.9: Bauformen von Rührern

## 6. 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

**Ashbye, 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