

2.2 Konstruieren: Keramische Vorteile nutzen

- Alexander Rank
CeramTec GmbH
Plochingen

Die Folien finden Sie ab Seite 56.

2.2.1. Einleitung

Jeder Werkstoff hat seine eigenen Vorzüge und besonderen Eigenschaften, die ihn für einen besonderen Einsatzzweck qualifizieren. Werden Systeme optimiert und innovative Lösungen mit optimierten Funktionalitäten gesucht, wird durchaus die eine durch die andere Werkstoffklasse ersetzt. Oftmals wird dabei aber vergessen, dass für eine andere Werkstoffklasse auch andere Konstruktionsprinzipien gelten. Je nach Werkstoffeigenschaften und Herstellverfahren sind dabei unterschiedliche Regeln zu beachten. Für die Keramik gilt zum Beispiel wie für Gusswerkstoffe, dass Materialanhäufungen zu vermeiden sind und gleichmäßige Wandstärken zu bevorzugen. Gilt es ein neues Bauteil zu entwerfen, ist es auch bei der Keramik am besten, frühzeitig mit dem Hersteller bezüglich der Konstruktion Kontakt aufzunehmen und sich über die material- und verfahrensbedingten Konstruktionsprinzipien auszutauschen und diese dann in die Neuentwicklung einfließen zu lassen. Einige dieser Prinzipien sind im nachfolgenden näher erläutert:

2.2.2. Materialbedingte Konstruktionsprinzipien

Keramische Lösungen kommen dann zum Einsatz, wenn eine hohe Härte, eine besonders hohe Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit, eine gute Temperaturstabilität oder besonders gute thermisch oder elektrische Isolationsfähigkeiten gefragt sind. Die der Keramik inhärente Sprödigkeit muss aber bei der Konstruktion des Bauteils berücksichtigt werden. So sind Spannungsüberhöhungen zu vermeiden,

wie sie entstehen, wenn die Radien zu klein sind oder die Kanten zu scharf. Zu vermeiden sind auch Stufen, Absätze und punkt- oder linienförmige Krafteinleitungen, an denen ebenfalls schnell Spannungsspitzen auftreten können, die dann nicht wie beim Metall zu Verformungen führen sondern zu einem Riss und ggf. sofortigem Versagen. Ein Vorteil der mangelnden Verformbarkeit von Keramik ist aber die sehr gute Belastbarkeit unter Druckspannungen. Während sich Metalle unter Druckspannungen verformen, bleibt die Keramik unverformt. Sie kann dabei mit dem ca. 10-fache der maximalen Zugspannung als Druckspannung belastet werden ohne zu versagen. Wenn möglich, sollte man sich dies bei der Konstruktion mit Keramik zunutze machen, und wann immer es geht, die Keramik unter Druckspannung bringen statt unter Zugspannungen (z. B. Aufschumpfen von metallischen Bauteilen).

Bei der Konstruktion ebenfalls zu beachten ist, dass die Keramik aufgrund ihrer hervorragenden Verschleißbeständigkeit und hohen Härte im gebrannten Zustand sehr schwer und mit hohem Aufwand bearbeitbar ist. Möglich ist dies nur noch mit Diamantwerkzeugen und unter hohem Zeitaufwand. Daraus folgt, dass Funktionsflächen möglichst klein gehalten werden sollten und genau überlegt werden muss, wo auf enge Toleranzen verzichtet werden kann. Möglich ist dies zum Beispiel, indem man Funktionsflächen aus dem sonstigen Bauteil heraushebt, wie es bei Dicht- und Regelscheiben üblich ist.

2.2.3. Verfahrensbedingte Konstruktionsprinzipien

Die hohe Härte und gute Verschleißbeständigkeit führen bei der Keramik aber auch zu besonderen verfahrensbedingten Konstruktionsprinzipien. Da die Keramik nach dem Brennen bzw. Sintern nur noch schwer zu bearbeiten ist, ist es wichtig, dass das Bauteil vor dem thermischen Prozess schon die Endkontur erhalten hat, denn im ungebrannten Zustand, bevor der Werkstoff Keramik seine Eigenschaften ausbildet, kann man den so genannten Grünkörper noch relativ gut bearbeiten und in Form bringen. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Bauteile beim Sintern schwinden. Und zwar bis zu 20 %. Damit die Schwindung nicht zu unterschiedlichen Schwindungsvorgängen während des Sinterns und in Folge dessen zu Spannungen und

Rissen führt, sind Materialanhäufungen zu vermeiden. Zu berücksichtigen ist auch, dass die Endmaßgenauigkeit auch bei Präzisionsverfahren in etwa noch $\pm 1\%$ beträgt. Alle Maße, die genauer sein müssen, können nur noch über Hartbearbeitungsverfahren eingestellt werden.

Aber nicht nur der Sinterprozess fordert besondere Konstruktionsregeln sondern auch die vorgeschalteten Formgebungsverfahren. Wird ein Bauteil zum Beispiel per Trockenpressen hergestellt, muss auf eine gute Entformbarkeit geachtet werden, indem zum Beispiel scharfe Kanten und Ecken vermieden und die Kanten mit geeigneten Facetten versehen werden. Wichtig ist auch eine Gewährleistung der gleichmäßigen Verpressbarkeit des Pulvers, damit der Vorkörper nicht ungleichmäßig verdichtet und es infolgedessen zu einer ungleichmäßigen Schwindung und zu Sinterverzug kommt.

2.2.4. Kostenrelevanz der Konstruktions-Einflüsse

All die vorher genannten material- und konstruktionsbedingten Konstruktionsprinzipien beeinflussen natürlich die Herstellkosten. Eine grobe Abschätzung über die kostenrelevanten Einflüsse auf die Konstruktion bietet Tabelle 1. Je niedriger die in Stufen eingeteilten Anforderungen an das Bauteil sind, desto kostengünstiger lässt sich der Artikel fertigen. Ziel einer jeder Konstruktion sollte es sein, die Geometrie so einfach wie möglich zu gestalten, die Toleranzen so weit wie möglich zu gestalten und auf teure Hartbearbeitungsschritte weitestgehend zu verzichten.

Stufe	Forderungen an das keramische Bauteil	Haupteinfluss auf die Gestaltung des Bauteils (kostenrelevant)
1	Geringe mechanische Belastungen Einsatztemperatur = Raumtemperatur	Formgebungsverfahren (Werkzeugkosten)
2	Wie 1, zusätzlich: Maß- und Formtoleranzen	Formgebungsverfahren Nachbearbeitung
3	Wie 2, zusätzlich: Oberflächengüte vorgegeben	Nachbearbeitung
4	Wie 3, zusätzlich: Größere mechanische Belastungen und / oder thermisch induzierte Belastungen	Spannungsverteilung im Bauteil bei Belastung
5	Wie 4, zusätzlich: Verbindungen mit anderen Bauteilen	Nachbearbeitung (Maß- und Formtoleranz) und Spannungsverteilung im Verbund

Tabelle 1: Übersicht über kostenrelevante Einflüsse auf die Konstruktion

2.2.5. Beispiel für eine keramische Konstruktion

Ein Beispiel für eine erfolgreiche Überführung eines metallischen Bauteils in eine keramikgerechte Konstruktion ist das in den Folien gezeigte selbstjustierende Lagerelement für eine Klappe. Zunächst wurde das metallische Design 1:1 auf das keramische Bauteil übertragen, um die Materialeigenschaften in der Anwendung zu prüfen (mittlere Variante). Die Rundung der Außenfläche ist eine wichtige

Funktion, die dafür sorgt, dass sich das Lager in der Buchse selbst ausrichtet. Allerdings kann die Rundung nicht fertig gepresst werden, wenn ihre Geometrie der des Metallteiles entsprechen muss. Sie lässt sich dann nur durch Pressen eines Zylinders mit anschließendem Herausfräsen der Außenkontur bzw. Wölbung herstellen. Um auf diesen zeitaufwendigen und kostenintensiven Schritt verzichten zu können, musste das Bauteil umgestaltet werden. Dazu wurde die Krümmung der Außenfläche geändert und ein kleiner Sockel angefügt. Die Funktion der Selbstjustierung blieb so erhalten und der Herstellprozess vereinfachte sich, auch wenn die Gestalt des Keramik-Bauteils auf den ersten Blick komplexer aussieht als zuvor. Das Bauteil kann in dieser Gestalt fertig gepresst werden und da kein Material mehr abgedreht werden muss, wird gleichzeitig auch Rohstoff eingespart. Wird die Funktion der Selbstjustierung nicht benötigt, ist ein zylindrisch ausgeführtes Lager die einfachste Lösung. Sie lässt sich prozesstechnisch am leichtesten realisieren.

2.2.6. Besondere Kennwerte für die Konstruktion

Da keramische Werkstoffe sich unter anderem durch eine hohe Härte und Sprödigkeit auszeichnen, gelten nicht nur andere Konstruktionsregeln, sondern es werden auch andere Kennwerte zur Charakterisierung herangezogen. Die Bestimmung dieser Kennwerte erfolgt bei keramischen Werkstoffen meistens im Vierpunkt-Biegeversuch, da Zugversuche an Proben aus keramischen Werkstoffen äußerst kompliziert durchzuführen und dadurch sehr teuer sind.

Eine weitere mit dem rein elastischen Verhalten zusammenhängende Eigenschaft keramischer Materialien ist das gegenüber duktilen Werkstoffen starke Streuverhalten der mechanischen Eigenschaften. Es ist deshalb nicht sinnvoll, mit einem einzelnen Festigkeitswert, z. B. der mittleren Festigkeit, eine Konstruktion auszulegen, sondern man muss die gesamte Festigkeitsverteilung berücksichtigen.

Die Ursache für die relativ starke Streuung und das Niveau der mechanischen Kennwerte ist die Verteilung von Einzelfehlern im Material und die Tatsache, dass die an diesen Fehlern auftretende Spannungsüberhöhungen wegen des rein elastischen Werkstoffverhaltens

durch plastische Deformation nicht abgebaut werden können. Das Streuverhalten wird somit durch die Verteilung der Einzelfehler, ihrer Art und Ihrer Größe sowie der äußeren Belastung bestimmt.

Mit einer von Weibull entwickelten Theorie, die auf dem Konzept des Versagens aufgrund des schwächsten Gliedes beruht, lässt sich das Streuverhalten der Festigkeit keramischer Materialien mathematisch gut beschreiben.

Mit Kenntnis der Verteilungsparameter besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Belastung σ_c und der Bruchwahrscheinlichkeit $F_{(\sigma_c)}$. Die Belastung σ_c gibt das Festigkeitsniveau bei einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 63,2 % an, und der Weibullmodul m ist ein Maß für die Festigkeitsstreuung. Standardwerte des Weibullmoduls liegen zwischen 5 und 20, Spitzenwerte spezieller hochzuverlässiger Werkstoffe bei einem Wert deutlich über 20.

Zum Schluss sei der kritische Spannungsintensitätsfaktor K_{Ic} als typischer keramischer Kennwerte genannt. Der kritische Spannungsintensitätsfaktor beschreibt den Widerstand der Keramik gegen die Ausbreitung eines Risses bzw. seine Risszähigkeit. Je höher der Kennwert, desto höher ist der Widerstand gegen die Rissausbreitung. Ein hoher Wert zum Beispiel wäre 10 wie ihn Siliziumnitride oder Zirkonoxide liefern.

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 35) finden sich auf den folgenden Seiten.

Konstruieren: Keramische Vorteile nutzen

Dipl.-Ing. Alexander Rank
CeramTec GmbH
Plochingen



Inhalt



1. Inhalt
2. Werkstoffeigenschaften Allgemein
3. Werkstoffverhalten bei mechanischer Beanspruchung
4. Keramische Kennwerte
5. Herstellungstechnologie keramischer Werkstoffe
6. Konstruktionsprinzipien
7. Komplexität des Bauteils

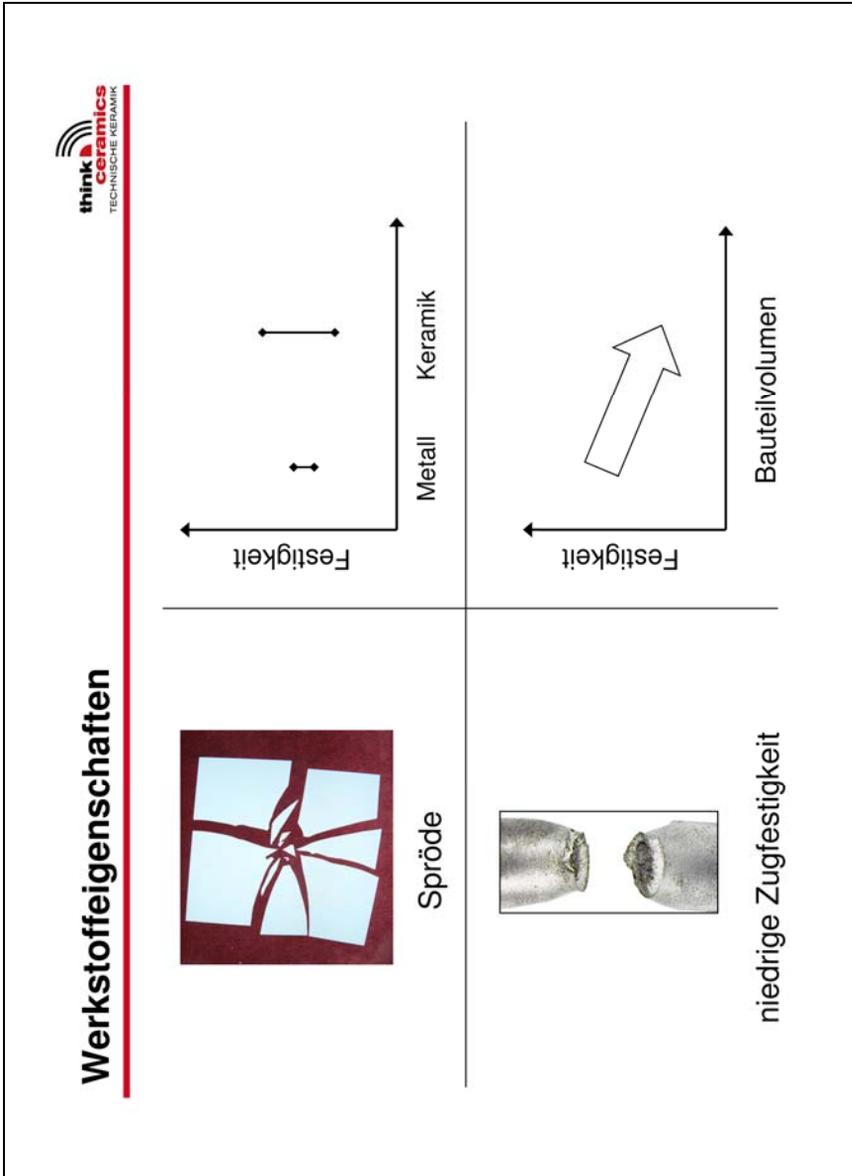
Warum Keramikgerechtes Design ?



1. Funktionalität der Komponenten.
2. Keramische Bauteile sollen so lange wie möglich halten.
3. Die Mechanismen die zu einem Bauteilversagen führen, unterscheiden sich von den Versagensmechanismen von Metallen.
4. Die Herstellung von keramischen Bauteilen unterscheidet sich von der Herstellung von Metallen und ist im Allgemeinen teurer.

Werkstoffeigenschaften	think ceramics TECHNISCHE KERAMIK	
	Keramik	Metall
Härte	←	→
Hochtemperaturfestigkeit	←	→
Thermische Ausdehnung	→	←
Duktilität	→	←
Korrosionsbeständigkeit	←	→
Verschleißfestigkeit	←	→
elektrische Leitfähigkeit	↔	↔
Dichte	→	←
Wärmeleitfähigkeit	→	←

2.2 Konstruieren: Keramische Vorteile nutzen - Folie 4

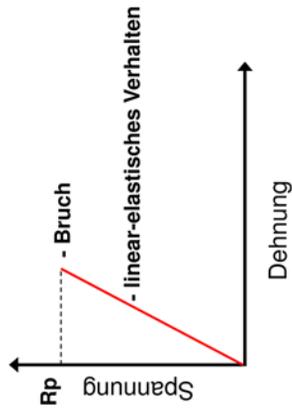


2.2 Konstruieren: Keramische Vorteile nutzen - Folie 5

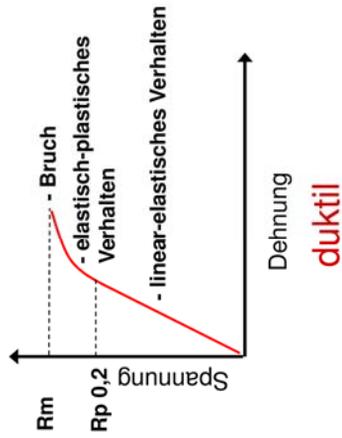
Werkstoffverhalten bei mechanischer Beanspruchung



Keramik



Metall



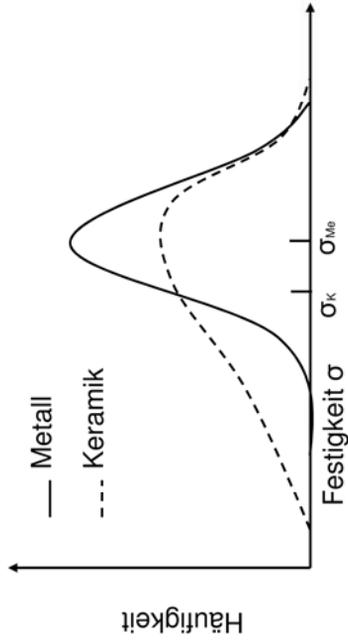
⇒ **Druckspannungen sind für Keramik besser als Zugspannungen !**

⇒ **Versagen eines Keramikbauteils tritt in der Regel plötzlich auf !**

Werkstoffverhalten bei mechanischer Beanspruchung



Streuverhalten der mechanischen Eigenschaften



Die Auslegung der Konstruktion sollte über die gesamte Festigkeitsverteilung des Materials erfolgen.

Keramische Kennwerte

Kritischer Spannungsintensitätsfaktor K_{Ic}

$$K_{Ic} = \sigma_c \cdot \sqrt{a_c} \cdot f$$

σ_c = Spannung

a_c = Risslänge

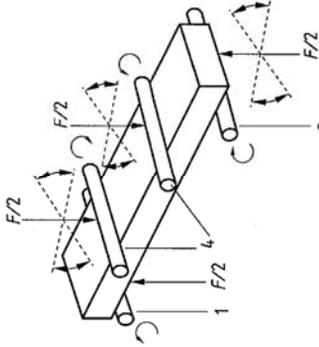
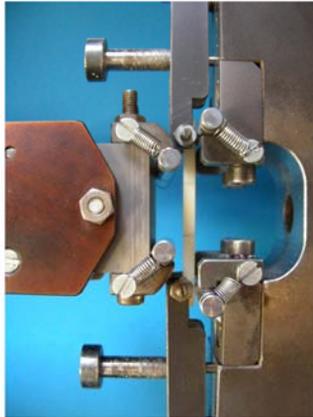
f = Geometriefaktor

⇒ Maß für den Widerstand gegen Rissausbreitung

Keramische Kennwerte

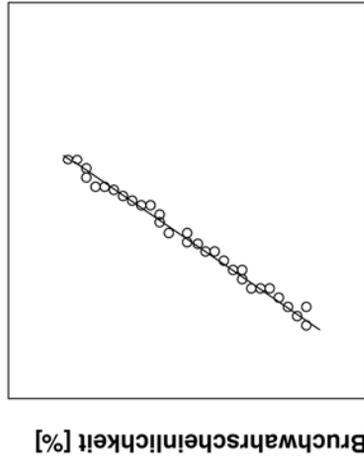


4-Punkt-Biegefestigkeit



$$\sigma_i = F \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{(L-l)}{b \cdot d^2}$$

Keramische Kennwerte



$$p_i = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_0}\right)^m\right)$$

p_i = Einzelbruchwahrscheinlichkeit,

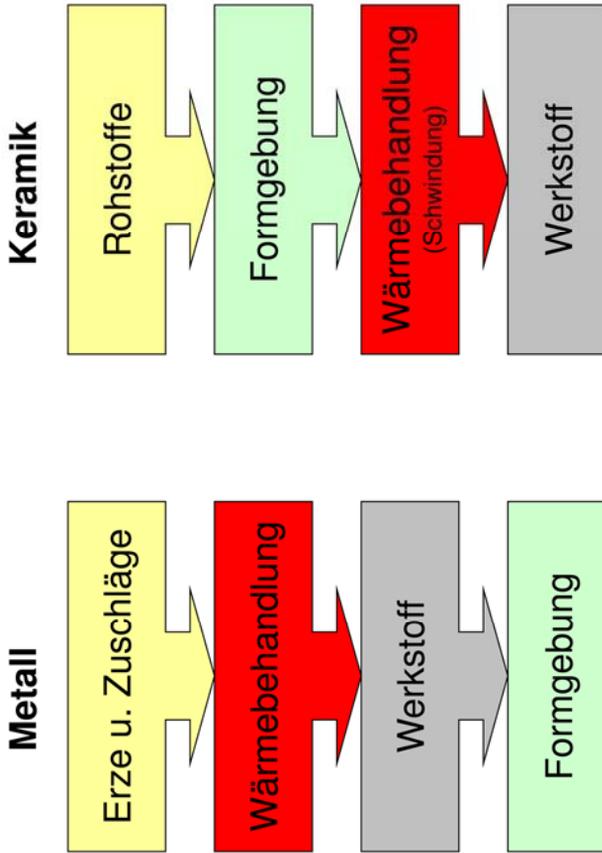
σ_i = Einzelfestigkeitswert,

σ_0 = „Charakteristische Festigkeit“,

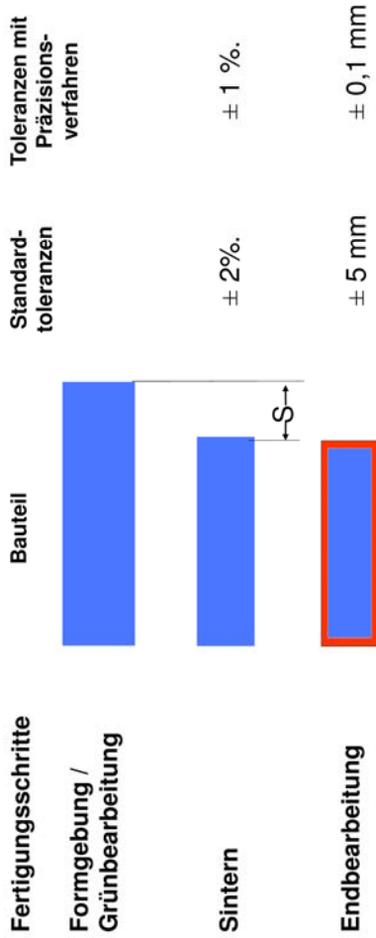
m = Weibull-Modul

$$\underbrace{\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-p}\right)\right)}_y = m \cdot \underbrace{\ln\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_0}\right)}_x$$

Herstellung von Keramik im Vergleich



Schwindung von Keramik



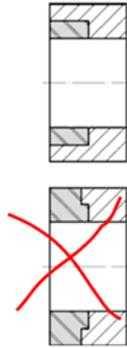
Konstruktionsprinzipien

1. Einfache Formen
2. Spannungsspitzen vermeiden
3. Zugspannungen minimieren
4. Materialanhäufungen vermeiden
5. Hartbearbeitungsaufwand minimieren
6. Fertigungsspezifische Besonderheiten beachten

Konstruktionsprinzipien

1. Einfache Formen anstreben

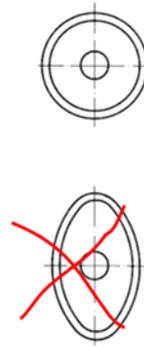
Brevier Technische Keramik



Keine Absätze
Kostenaspekt



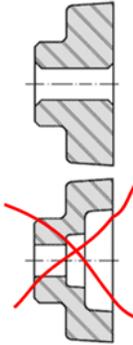
Modulbauweise
Kostenaspekt



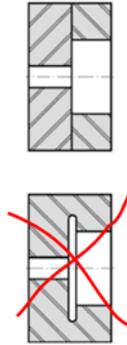
Rund statt oval
Kostenaspekt

Konstruktionsprinzipien

1. Einfache Formen anstreben



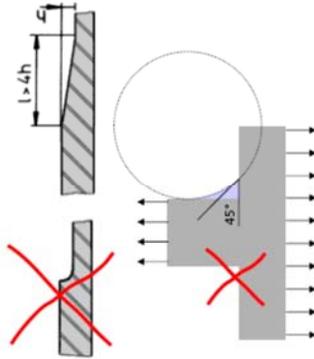
Keine komplizierten Formen
Kostenaspekt



Keine Hinterschneidungen
Modulbauweise
Kostenaspekt

Konstruktionsprinzipien

2. Spannungsspitzen vermeiden

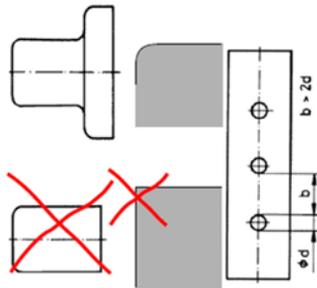


Keine plötzlichen
Querschnittsänderungen
Fertigungsaspekt

Kerbformen optimieren
Fertigungsaspekt

Konstruktionsprinzipien

2. Spannungsspitzen vermeiden



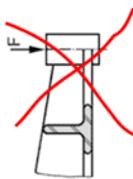
Große Auflageflächen
Fertigungsaspekt

Kanten und Spitzen vermeiden
Fertigungsaspekt

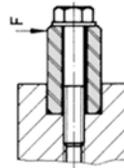
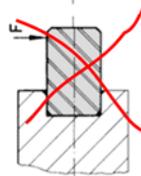
Große Lochabstände
Fertigungsaspekt

Konstruktionsprinzipien

3. Zugspannungen minimieren



Rippe im Druckbereich
Fertigungsaspekt



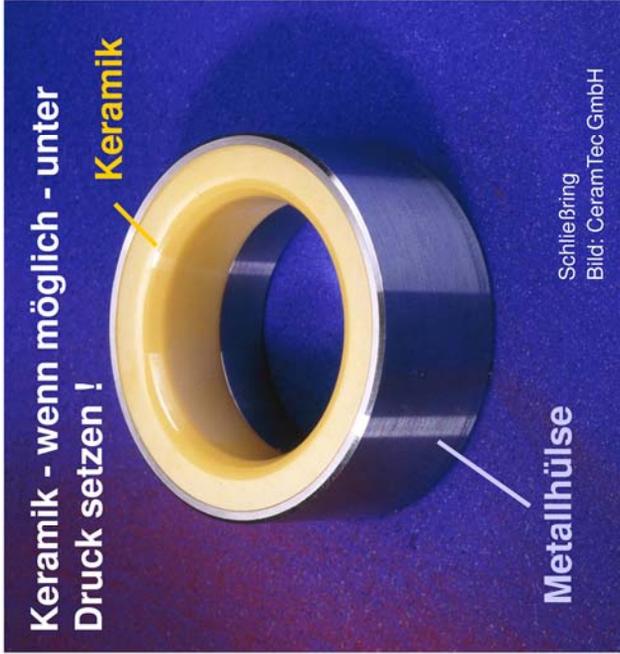
Druckvorspannungen
Fertigungsaspekt

Materialbedingte Konstruktionsprinzipien



Keramik - wenn möglich - unter
Druck setzen !

Keramik

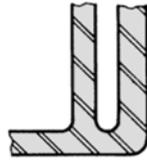
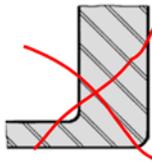


Metallhülse

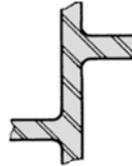
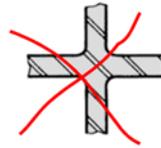
Schließring
Bild: Ceram Tec GmbH

Konstruktionsprinzipien

4. Materialanhäufungen vermeiden



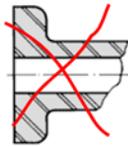
Gleiche Wanddicken
Fertigungsaspekt



Knotenpunkte auflösen
Fertigungsaspekt

Konstruktionsprinzipien

4. Materialanhäufungen vermeiden



Keine dicken Ränder
(bei Formteilen)

Fertigungsaspekt

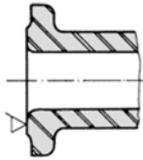
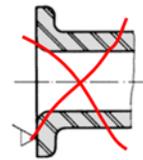


Keine stark unterschiedlichen
Wanddicken bei Strangpressteilen
(Verzugsgefahr)

Fertigungsaspekt

Konstruktionsprinzipien

5. Nachbearbeitung minimieren



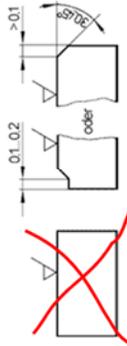
Bearbeitungsflächen anheben
Kostenaspekt



Kantenwinkel $< 90^\circ$
vermeiden
Fertigungsaspekt

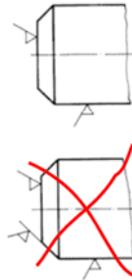
Konstruktionsprinzipien

5. Nachbearbeitung minimieren



Zu bearbeitende Flächen
(anheben und) anfasen

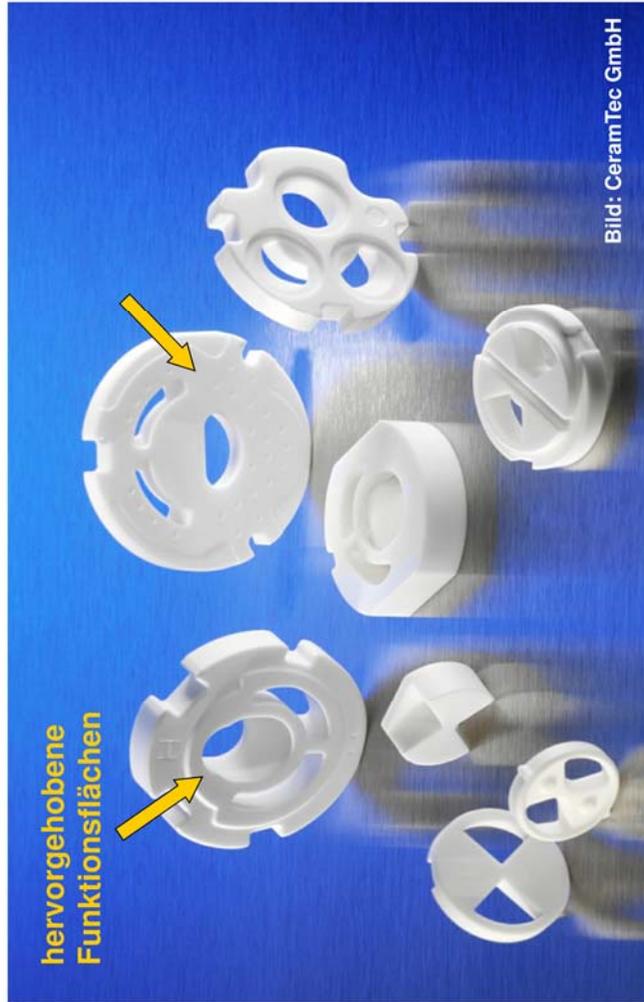
Kostenaspekt



Facette ohne Bearbeitung

Kostenaspekt

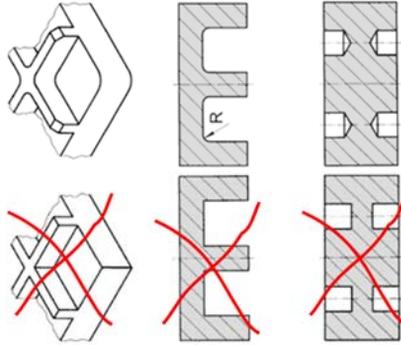
Materialbedingte Konstruktionsprinzipien



Konstruktionsprinzipien



6. Fertigungsspezifische Besonderheiten beachten

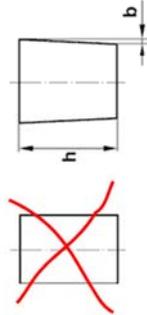


Scharfe Ecken und Kanten vermeiden

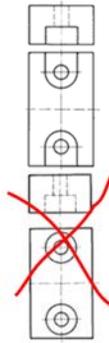
Facette ohne Bearbeitung

Konstruktionsprinzipien

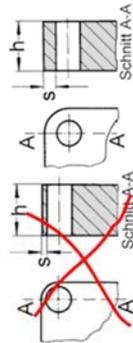
6. Fertigungsspezifische Besonderheiten beachten



Leichte Konizität ($b \sim 0,005 h$)
(erleichtert Ausformen)
Fertigungsaspekt



Versenkungen am Rand öffnen
Fertigungsaspekt



Randabstand von Bohrungen!
Fertigungsaspekt

h [mm]	s [mm]
< 10	$\frac{1}{4} h$ ($s \geq 1 \text{ mm}$)
10 - 20	$\frac{1}{5} h$ bis $\frac{1}{6} h$
> 20	< $\frac{1}{6} h$

Konstruktionsprinzipien

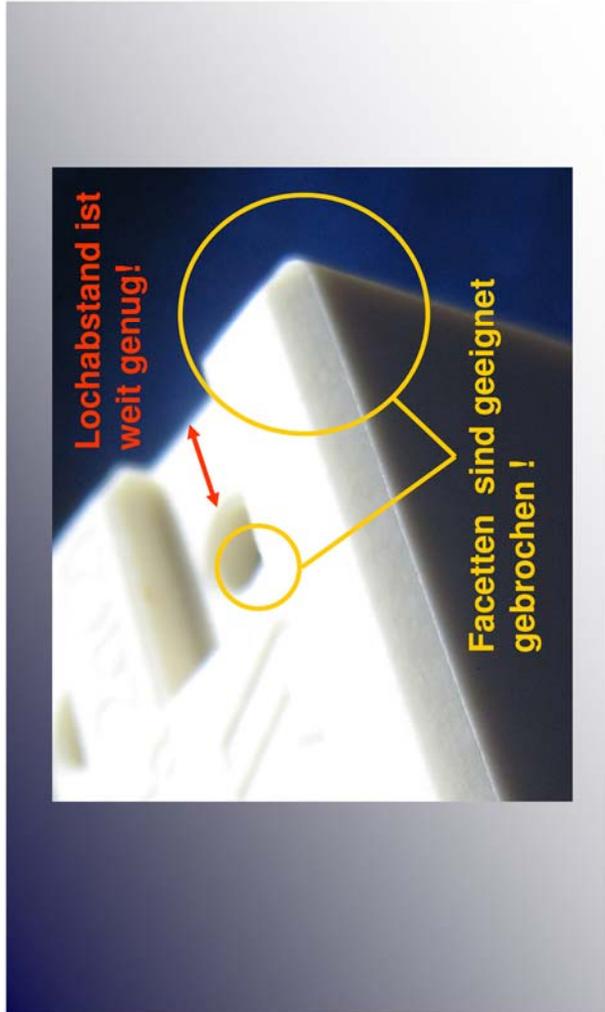


Sockel für elektromechanische
Schaltungen



Bild: CeramTec GmbH

Konstruktionsprinzipien



Komplexität der Gestaltung



Stufe	Forderungen an das keramische Bauteil	Haupteinfluss auf die Gestaltung des Bauteils (kostenrelevant)
1	Geringe mechanische Belastungen Einsatztemperatur = Raumtemperatur	Formgebungsverfahren (Werkzeugkosten)
2	Wie 1, zusätzlich: Maß- und Formtoleranzen	Formgebungsverfahren Nachbearbeitung
3	Wie 2, zusätzlich: Oberflächengüte vorgegeben	Nachbearbeitung
4	Wie 3, zusätzlich: Größere mechanische Belastungen und / oder thermisch induzierte Belastungen	Spannungsverteilung im Bauteil bei Belastung
5	Wie 4, zusätzlich: Verbindungen mit anderen Bauteilen	Nachbearbeitung (Maß- und Formtoleranz) und Spannungsverteilung im Verbund

2.2 Konstruieren: Keramische Vorteile nutzen - Folie 29

Komplexität der Gestaltung

- Beispiel Stufe 1:
- Einfaches Trockenpressteil
 - ohne Nachbearbeitung



Komplexität der Gestaltung



- Beispiel Stufe 1:
- extrudierte Profile
 - ohne Nachbearbeitung



Komplexität der Gestaltung

Beispiel Stufe 5:

- hohe Maßanforderungen
- hohe Oberflächengüte
- hohe mechanische Belastungen
- Verbindung mit Metall



Bild: CeramTec G

Beispiel: Lager aus Keramik



Metallisches
Vorbild kopiert



Keramikgerecht
optimiert



Keramikgerecht
optimiert



1. Selbstjustierendes
Lager aus Keramik im
metallischen Design

2. Selbstjustierendes
Lager aus Keramik
keramikgerecht
gestaltet

3. Lager aus Keramik
keramikgerecht
gestaltet ohne
Selbstjustagefunktion

Fazit

- **Materialbedingte Eigenheiten** berücksichtigen
 - Spannungsspitzen vermeiden
 - Druckspannungen bevorzugen
- **Fertigungsbedingte Eigenheiten** berücksichtigen
- **Gemeinsame Bauteilauslegung** mit den Keramikexperten diskutieren

Zusammenfassung



Wenn's teuer sein darf ...



... dann darf es auch kompliziert sein!