

2.3 Konstruieren mit Keramik – durch Formanpassung die Vorzüge nutzen

- Dr. Ilka Lenke
CeramTec AG
Plochingen

Die Folien finden Sie ab Seite 107.

2.3.1. 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:

2.3.2. 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 zu nutze 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.

2.3.3. 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 $\pm 1\%$ beträt. 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.

2.3.4. 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

2.3.5. Beispiele für keramische Konstruktionen

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 Rundungen 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 Selbstjustage 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 Selbstjustage nicht benötigt, ist ein zylindrisch ausgeführtes Lager die einfachste Lösung. Sie lässt sich prozesstechnisch am leichtesten realisieren.

Ein weiteres Beispiel kommt aus dem Bereich der Sanitärarmaturen. Aus dem früheren metallischen Kugelventil wurde ein keramisches Flachschiebeventil. Die Kugelform würde als keramische Version sowohl eine Grünbearbeitung als auch eine relativ teure Hartbearbeitung der gekrümmten Außenflächen erfordern. Das flache Design der neuen Lösung hingegen macht die Grünbearbeitung überflüssig. Das Bauteil kann fertig gepresst werden und die Hartbearbeitung der flachen Funktionsflächen gestaltete sich wesentlich kostengünstiger als die einer Kugeloberfläche. So wurde das Flachventil zum Stand der Technik und wird heute in Millionen Stückzahlen gefertigt.

2.3.6. 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.

So wird die Festigkeit in der Regel nicht wie bei Metallen an Zugstäben gemessen. Ihr sprödes Werkstoffverhalten macht sie für dieses Prüfverfahren äußerst ungeeignet. Stattdessen werden die Festigkeitswerte mit der 4-Punkt-Biegeprüfung ermittelt (siehe anhängende Folien). Festigkeitskennwerte aus der 4-Punkt-Biegeprüfung sind nicht 1:1 mit Festigkeitskennwerten einer Zugprüfung vergleichbar. Eine grobe Faustregel zur Umrechnung ist folgende:

$$\text{Zugfestigkeit} = 2/3 \text{ Biegefestigkeit}$$

Zu beachten ist auch, dass die Festigkeit eine Funktion des Bauteilvolumens ist, da die Anzahl der möglichen, zum Versagen führenden Fehler in einem größeren Volumen natürlich höher ist. Deshalb werden die an Biegebruchstäbchen ermittelten Festigkeitswerte fast immer höher sein, als die an den Bauteilen gemessenen.

Ein weiterer sehr wichtiger Kennwert bei der Konstruktion mit Keramik ist der so genannte Weibullmodul m der aus mindestens 30 Festigkeitswerten bestimmt wird. Der Weibullmodul macht eine Aussage über die Ausfallwahrscheinlichkeit der Keramik bei einer bestimmten Belastung. Je höher die Zahl ist, desto enger ist die Bandbreiten, in der die Festigkeitswerte einer bestimmten Keramiksorte streuen. Standardwerte des Weibullmoduls liegen zwischen 5 und 20, Spitzenwerte spezieller hochzuverlässiger Werkstoffe bei einem Wert deutlich über 20.

Vortragsblock 1

Zum Schluss sei der kritische Spannungsintensitätsfaktor K_{Ic} als typischer keramischer Kennwert 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 30) finden sich auf den folgenden Seiten.

Konstruieren mit Keramik

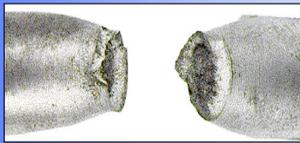
Durch Formanpassungen die Vorzüge voll nutzen

Dr.-Ing. Ilka Lenke
CeramTec AG
Plochingen

Vergleich des Bruchverhaltens



Metall, Al



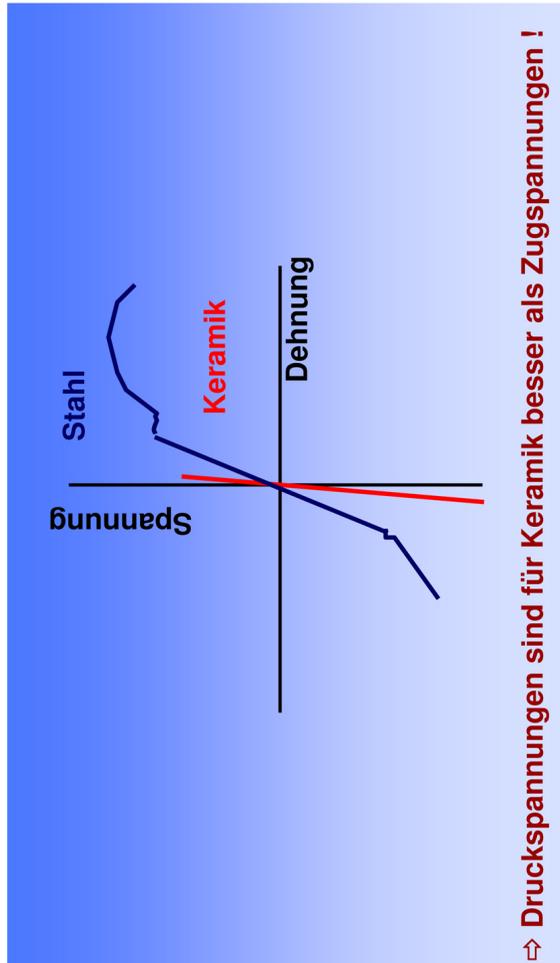
duktil

Keramik, Al_2O_3



spröde

Vergleich des Bruchverhaltens



⇨ Druckspannungen sind für Keramik besser als Zugspannungen !

Materialbedingte Konstruktionsprinzipien



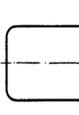
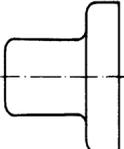
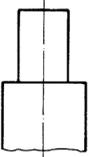
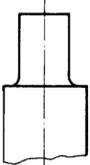
Hohe Spannungen durch ...

- kleine Radien
- scharfe Kanten
- Stufen
- Absätze
- Bohrungen
- Punkt- o. linienförmige Kraffteinleitung

vermeiden !!!

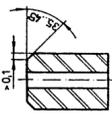
Materialbedingte Konstruktionsprinzipien

Spannungen bzw. Spannungsspitzen vermeiden

 <p>ungünstig</p>	 <p>günstig</p>	<p>– Ecken und scharfe Kanten vermeiden, Innenkanten und Durchbrüche runden</p>
 <p>ungünstig</p>	 <p>günstig</p>	<p>– Größere Auflageflächen sind günstiger</p>
 <p>ungünstig</p>	 <p>günstig</p>	<p>– Kerbwirkung vermindern</p>

Materialbedingte Konstruktionsprinzipien

Spannungen bzw. Spannungsspitzen vermeiden

 <p>ungünstig</p>	 <p>günstig</p>	<p>– Kanten senkrecht zur Preßrichtung kurz brechen (axiales Pressen)</p>
 <p>ungünstig</p>	 <p>günstig</p>	<p>– Lochabstände nicht zu klein bemessen</p>
 <p>ungünstig</p>	 <p>günstig</p>	<p>– plötzliche Querschnittsänderungen vermeiden</p>

Materialbedingte Konstruktionsprinzipien

**Keramik - wenn möglich - unter
Druck setzen !**

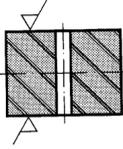
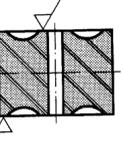
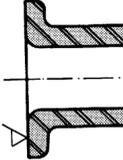
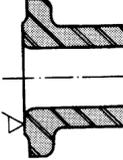
Keramik

Metallhülse

Schleißring
Bild-Quelle: CeramTec AG

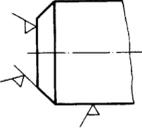
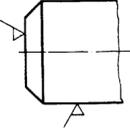
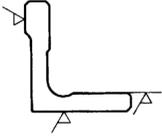
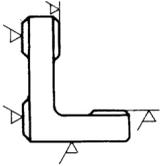
Materialbedingte Konstruktionsprinzipien

Nachbearbeitung minimieren !

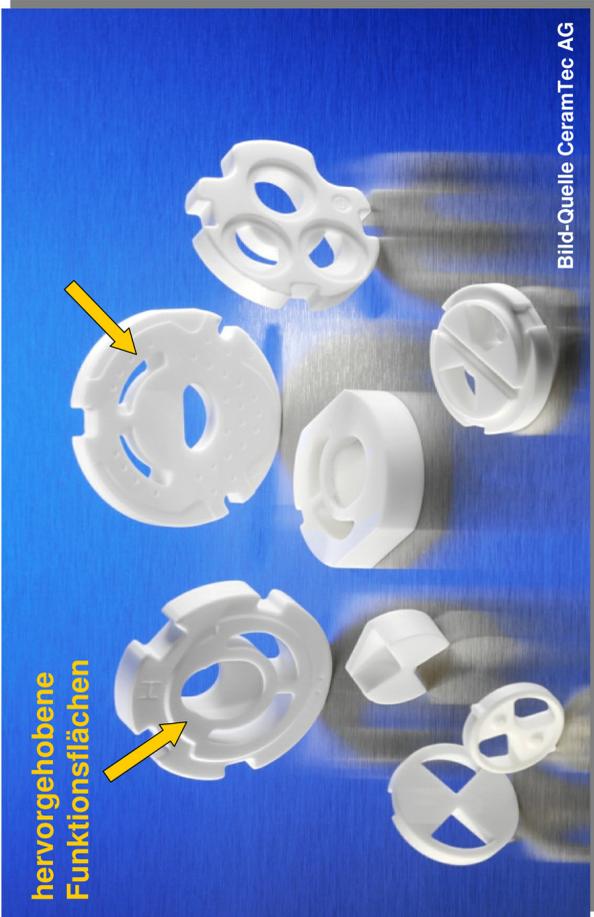
 <p>ungünstig</p>	 <p>günstig</p>	<p>– Bearbeitungsflächen gering halten und ggf. abheben</p>
 <p>ungünstig</p>	 <p>günstig</p>	<p>– Bearbeitungsflächen abheben</p>

Materialbedingte Konstruktionsprinzipien

Nachbearbeitung minimieren !

 <p>ungünstig</p>	 <p>günstig</p>	<p>– Fasen an rotations-symmetrischen Teilen so bemaßen, daß die Facette nicht bearbeitet werden muß</p>
 <p>ungünstig</p>	 <p>günstig</p>	<p>– Bei Winkelteilen dicke Schenkel, reduzierte Bearbeitungsflächen und eindeutige Auflagen schaffen</p>

Materialbedingte Konstruktionsprinzipien



hervorgehobene Funktionsflächen

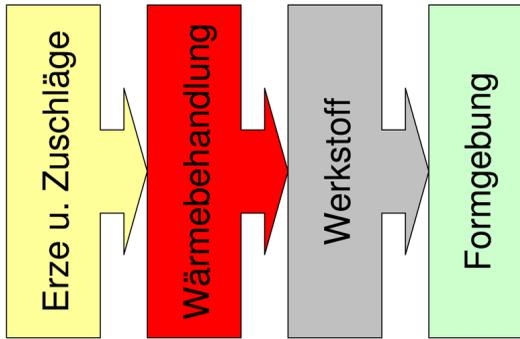
think ceramics
TECHNISCHE KERAMIK

Bild-Quelle: CeramTec AG

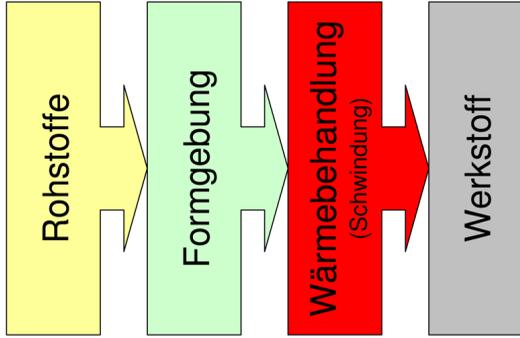
2.3 Konstruieren mit Keramik - Folie 10

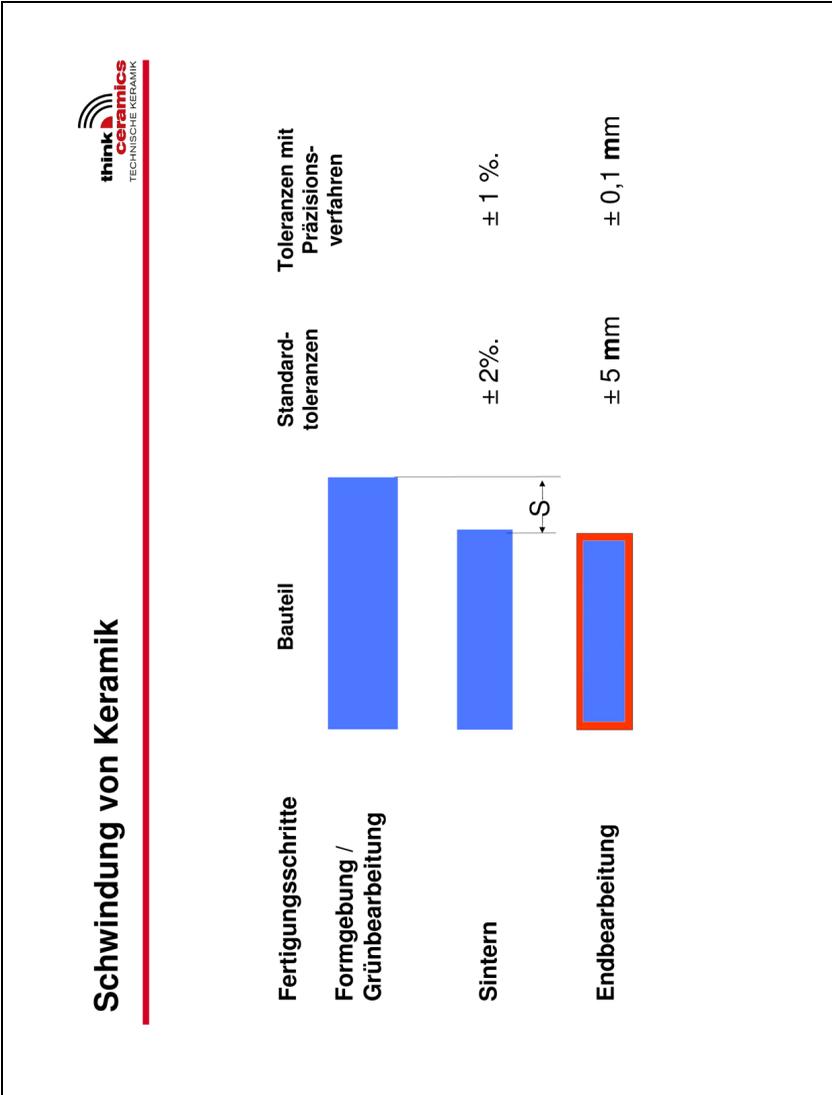
Herstellung von Keramik im Vergleich

Metall



Keramik

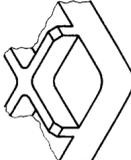
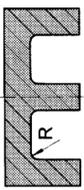




2.3 Konstruieren mit Keramik - Folie 12

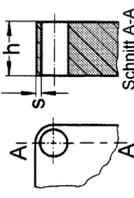
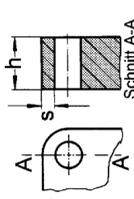
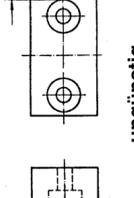
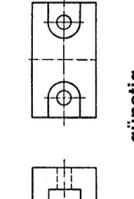
Herstellungsbedingte Konstruktionsprinzipien

Runde Ecken und Kanten bevorzugen!

 <p>ungünstig</p>	 <p>günstig</p>	<p>– Scharfe Ecken an den Schnittpunkten der Stege neigen zur Rissbildung, scharfe Kanten an den Rippen führen zur Beschädigung. Rundungen an den Schnittpunkten der Stege vermindern die Rissgefahr und abgeschrägte Kanten den Bruchanfall.</p>
 <p>ungünstig</p>	 <p>günstig</p>	<p>– Scharfe Kanten in Versenken erhöhen Bruchgefahr und Rißbildung. Kleine Radien erhöhen die Festigkeit.</p>

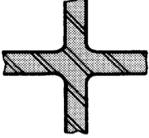
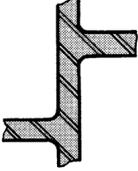
Herstellungsbedingte Konstruktionsprinzipien

Wandstärken dick genug wählen!

 <p style="text-align: center;">ungünstig</p>	 <p style="text-align: center;">günstig</p>	<p>– Das Loch befindet sich zu nahe an der Außenkante. Die zu schwache Wand reißt oder bricht. Das Verhältnis s/h muß ausreichend sein (1:5).</p>
 <p style="text-align: center;">ungünstig</p>	 <p style="text-align: center;">günstig</p>	<p>– Die Wand „S“ ist zu schwach und neigt zum Riss, besser die Einsenkung nach außen öffnen.</p>

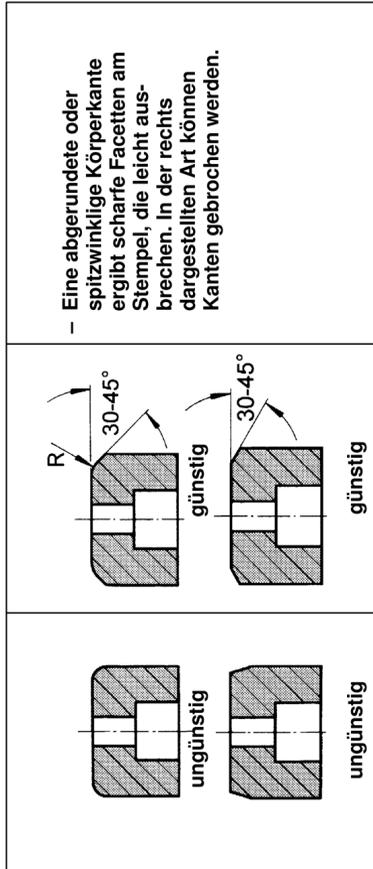
Herstellungsbedingte Konstruktionsprinzipien

Knotenpunkte auflösen!

		<p>- Knotenpunkte sind Masseanhäufungen, die beim Sintern zu Schwindungsproblemen führen können.</p>
---	---	--

Herstellungsbedingte Konstruktionsprinzipien

Facetten geeignet brechen!



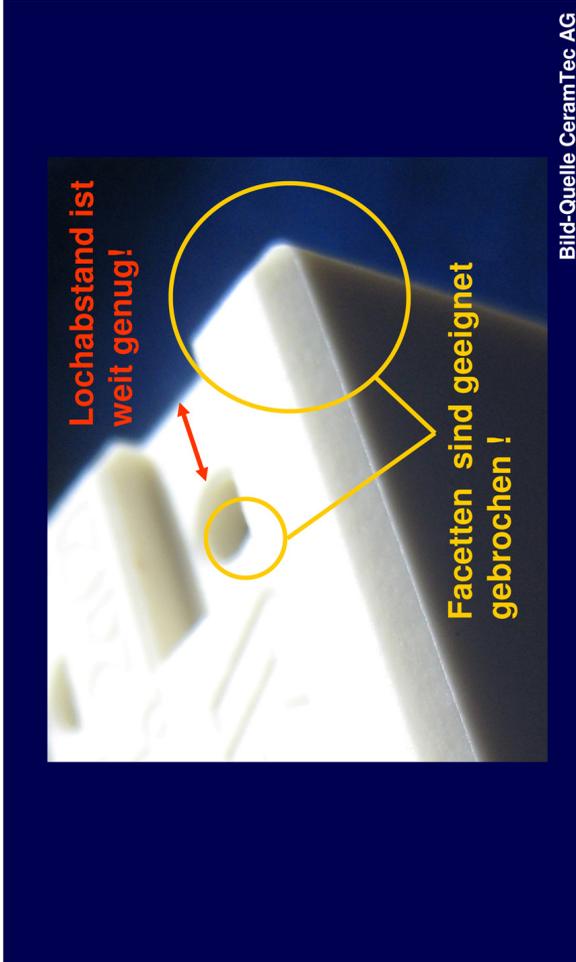
Herstellungsbedingte Konstruktionsprinzipien

Sockel für elektromechanische
Schaltungen



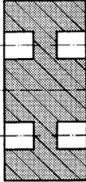
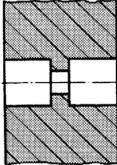
Bild-Quelle CeramTec AG

Herstellungsbedingte Konstruktionsprinzipien



2.3 Konstruieren mit Keramik - Folie 18

Herstellungsbedingte Konstruktionsprinzipien

 <p>ungünstig</p>	<p>– Ebene Böden in Sacklöchern führen zu Überpressungen. Spitze Stifte im Werkzeug ermöglichen einen ausreichenden Materialfluss beim Formen und vermeiden eine Überpressung.</p>
 <p>günstig</p>	<p>– Der Boden zwischen den Versenken ist zu schwach und wird deshalb überpresst. Gefahr der Rissbildung.</p>

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

Komplexität der Gestaltung

Stufe 1:

- einfaches Trockenpressteil
- ohne Nachbearbeitung

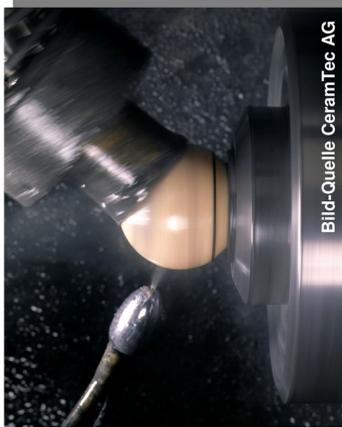


Bild-Quelle: CeramTec AG

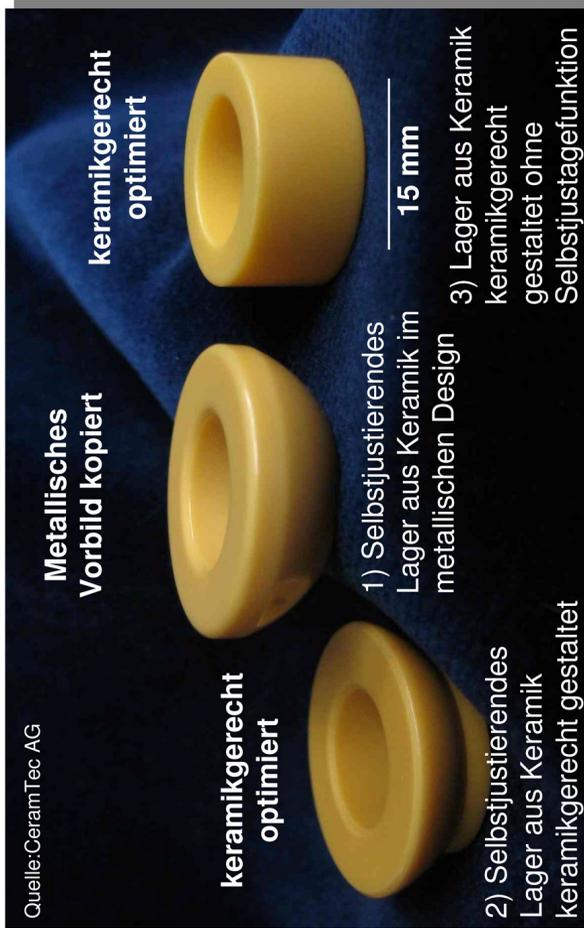
Komplexität der Gestaltung



- Beispiel Stufe 5:**
- hohe Maßanforderungen
 - hohe Oberflächengüte
 - hohe mechanische Belastungen
 - Verbindung mit Metall



Beispiel: Lager aus Keramik



2.3 Konstruieren mit Keramik - Folie 24

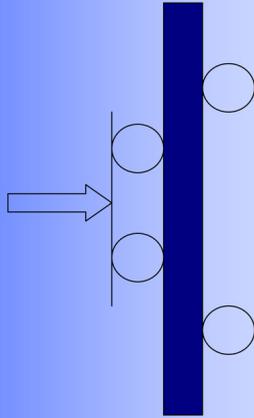
Beispiel: Wasserhahn



⇒ Von der metallischen Kugellösung zur flachen Keramiklösung

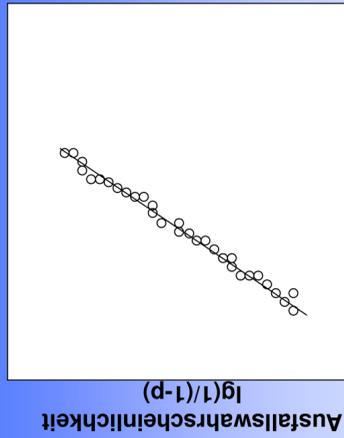
Typische keramische Kennwerte

4-Punkt-Biegefestigkeit



Typische keramische Kennwerte

Festigkeits- und Zuverlässigkeitskennwert

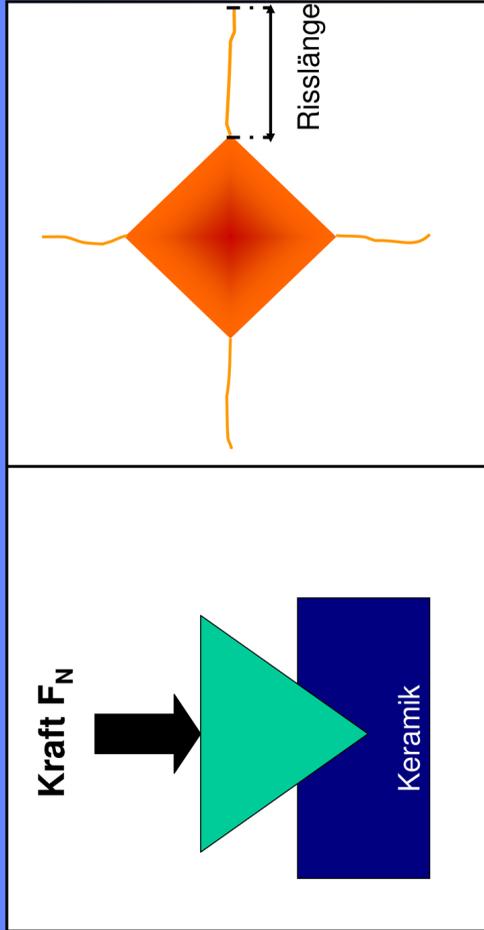


Weibullmodul m als Maß
für die Zuverlässigkeit

o

Typische keramische Kennwerte

Kritischer Spannungsintensitätsfaktor K_{Ic}
⇒ Maß für den Widerstand gegen Rissausbreitung



Zusammenfassung

- **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!

Bild-Quelle: CeramTec AG