

### 3) Von der Anfrage zum keramischen Serienbauteil

- Herr Matthias Förster,  
Sembach GmbH & Co. KG  
Lauf a. d. Pegnitz

*Die Folien finden Sie ab Seite 140.*

#### Der erste Kontakt

##### Situation

Eine Neuentwicklung oder bestehende Konstruktion soll ermöglicht bzw. optimiert werden. Bestehende Bauteile oder Werkstoffe erfüllen die gestellten Anforderungen oder Wünsche nicht.

Beständigkeit gegen Alterung, Verschleiß, Temperatur, Isolationswiderstände und/oder Festigkeiten werden gefordert.

Der Gedanke einmal einen neuen Werkstoff zu verwenden, ja mal etwas mit Keramik zu machen wird gefaßt.

Erste Hilfe hierfür kann das Infozentrum für Keramik als Knotenpunkt oder direkt die Anfrage bei einem Hersteller für Keramik sein.

#### Was erwartet der Kunde?

- a. Informationen der Möglichkeiten
- b. Erfüllung des Einsatzzweckes
- c. Preis-Leistungs-Verhältnis für die erwarteten Stückzahlen muß stimmen
- d. Konstante Qualität der Produkte aus einem sicheren Prozeß

- e. Verfügbarkeit der Teile in einem vom Kunden definierten Zeitraum

### Der Weg dahin ist lang!

Der *prinzipielle* Weg dahin ist einfach!

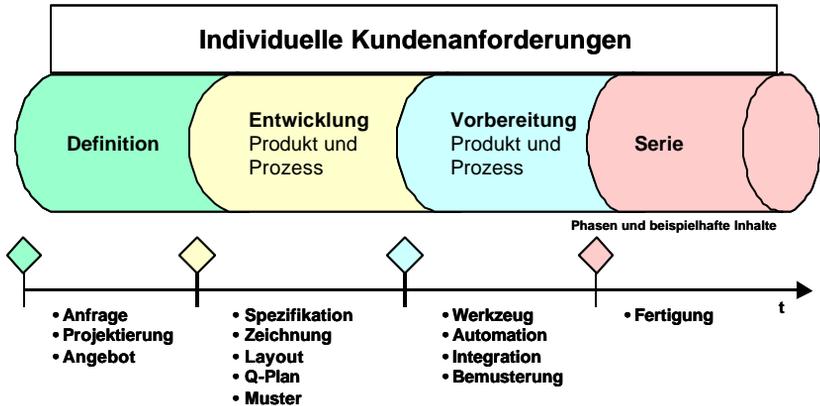


Bild 1: Individuelle Kundenanforderungen

Meist erhält man als Keramikerhersteller nur eine Zeichnung des Bauteiles mit der Materialbezeichnung „Keramik“ und einer zu erwartenden Stückzahl. Hier beginnt dann die sogenannte „Sensibilisierung zur Keramik“. Verschiedenste Punkte müssen vor der Machbarkeitsprüfung und Kalkulation mit dem Kunden geklärt und ermittelt werden.

- Werkstoffauswahl
- Geeignetes Fertigungsverfahren
- Festlegung einer optimalen Geometrie für beide Seiten
- Preis-Leistungs-Verhältnis

### Keramik

Erst die genauen Kenntnisse der Einsatzbedingungen des Bauteiles ermöglichen es dem Keramikerhersteller dem Kunden einen geeigneten

Werkstoff vorzuschlagen.

Hier sind u.a. folgenden Parameter abzuklären:

### Temperaturbelastung

- Thermoschockbeständigkeit
- Wärmedehnung
- Wärmeleitfähigkeit
- max. Einsatztemperatur ...

### Elektrische Beanspruchung

- Durchschlagsfestigkeit
- Oberflächenwiderstand
- Verlustfaktor
- Permittivität ...

### Mechanische Ansprüche

- Dichte
- Tribologie
- Festigkeiten (Biege-, Zug- oder Druckfestigkeiten)
- Härte
- evtl. Lastwechsel

### Chemische Umgebung

- Säure- bzw. Laugenbeständigkeit mit Ihren verschiedenen Variationen
- andere Umwelteinflüsse wie z.B. UV-Beständigkeit

## Von der Anfrage zum keramischen Bauteil

Die nachfolgende Tabelle gibt einen kleinen Überblick einiger gängiger Keramiken aus der Elektro- und Maschinenbaukeramik.

Weitere Beispiele sind im Brevier Technischer Keramik mit Ihren Eigenschaften aufgeführt.

Werkstoff			Stealan	Superpyrostat	Forsterit	Cordierit	Pyrostat
			Magnesium-Silicat			Magnesium-Aluminium-Silicat	
Bezeichn. nach DIN EN 60672			C221	C230	C250	C410	C511

Rohdichte	$\rho_{\text{r}}$	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,7	1,8	2,8	2,1	2,0 – 2,1
Offene Porosität	$P_{\text{a}}$	[Vol. %]	0	38	0	0	18 – 24
Wasseraufnahme	$W_{\text{a}}$	[Gew. %]	0	21	0	0	9 – 12
Biegefestigkeit	$\sigma_{\text{B}}$	[MPa]	140	30	140	60	25
Druckfestigkeit			900	100	900	300	200
E-Modul	E	[Gpa]	120			70	

Wärmeausdehnungs-koeffizient	$\alpha_{20^{\circ}\text{C bis } 600^{\circ}\text{C}}$	[10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ]	7 – 9	8 – 10	10 – 11	2 – 4	4 – 6
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$	[W/mK]	2 – 3	1,5 – 2	3 – 4	1,2 – 2,5	1,3 – 1,8
Spezifische Wärmekapazität	$c_{\text{p}}$	[J/kgK]	800 – 900	800 – 900	800 – 900	800 – 1200	750 – 850

Durchschlagfestigkeit	$E_{\text{v}}$	[kV/mm]	20		20	10	
Spezif. Widerstand	$\rho_{\text{v } 20^{\circ}\text{C}}$	[ $\Omega\text{m}$ ]	1011		1011	1010	
	$\rho_{\text{v } 600^{\circ}\text{C}}$		105	105	105	103	103
Dielektrizitätszahl 48 Hz bis 62 Hz	$\epsilon_{\text{r}}$		6		7	5	
Dielekt. Verlustfaktor	$\tan \delta (48 - 62\text{Hz})$	[10 <sup>-3</sup> ]	1,5		1,5	25	

## Von der Anfrage zum keramischen Bauteil

	$\tan\delta$ (1MHz)		1,2		0,5	7	
--	------------------------	--	-----	--	-----	---	--

Tabelle 1: Technische Daten von Silicatkeramiken

Werkstoff			A65	A92	A96	A99	M96	M99
			Aluminiumoxid				Magnesiumoxid	
Bezeichn. nach DIN EN 60672			C620	C786	C795	C799	C830	C830

Rohdichte	$\rho_\alpha$	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,8	3,6	3,7	3,8	2,0 – 2,3	2,3 – 2,7
Offene Porosität	$P_a$	[Vol. %]	0	0	0	0	35 – 45	25 – 39
Wasseraufnahme	$W_a$	[Gew. %]	0	0	0	0	16 – 22	9 – 17
Biegefestigkeit	$\sigma_B$	[MPa]	150	250	280	300 – 400	8 – 25	10 – 50
E-Modul	E	[GPa]	150	220	280	300 – 400	90	90

Wärmeausdehnungskoeffizient	$\alpha_{20^\circ\text{C bis } 600^\circ\text{C}}$	[10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ]	5 – 7	6 – 8	7 – 8	7 – 8	12 – 13	12 – 13
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$	[W/mK]	6 – 8	14 – 24	16 – 28	20 – 30	6 – 10	6 – 10
Spezifische Wärmekapazität	$c_p$	[J/kgK]	850 – 1050	850 – 1050	850 – 1050	850 – 1050	850 – 1050	850 – 1050

Durchschlagfestigkeit	$E_v$	[kV/mm]	15	15	15	17		
Spezif. Widerstand	$\rho_v 20^\circ\text{C}$	[ $\Omega\text{m}$ ]	1011	1012	1012	1012		
	$\rho_v 600^\circ\text{C}$		104	106	106	106		

Dielektrizitätszahl 48 Hz bis 62 Hz	$\epsilon_p$		8	9	9	9	10	10
Dielektr. Verlustfaktor	$\tan\delta$ (48 – 62 Hz)	$[10^{-3}]$		0,5	0,5	0,2		
	$\tan\delta$ (1MHz)			1	1	1		

Tabelle 2: Technische Daten von Oxidkeramiken

## Fertigungsverfahren

Der ermittelte Werkstoff, die geforderte Stückzahl und der Preis lassen dann die Wahl eines für diese Teil geeigneten Fertigungsverfahrens zu.

Die Stückzahl favorisiert meist ein oder mehrere Fertigungsverfahren oder läßt sie von vornherein nicht zu.

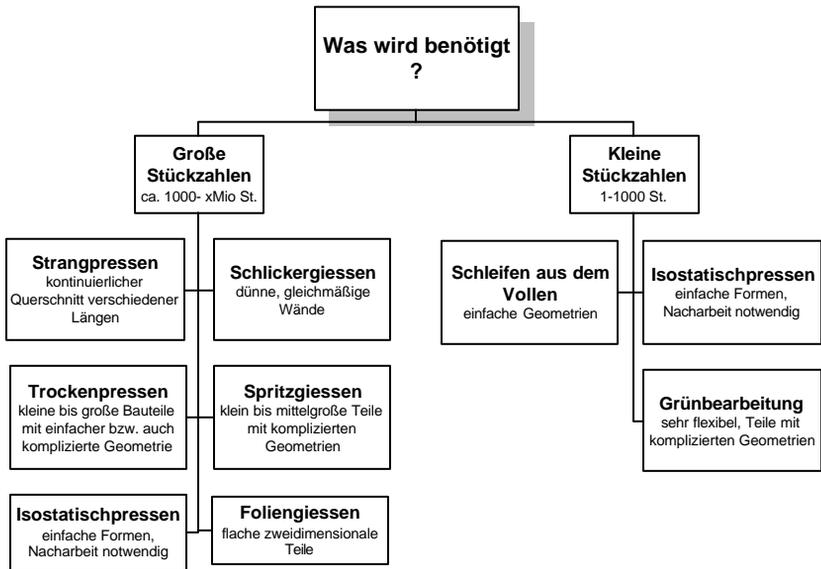


Bild 2: Auswahl des Fertigungsverfahrens

All diesen Fertigungsverfahren kann je nach Bauteilanforderung noch eine Nachbearbeitung oder eine Veredelung folgen, wie z.B.:

- Glasur
- Metallisierung ( für lötfähige Verbindungen )
- Silikon
- Beschichten mit anderen Materialien
- Schleifen
- Läppen
- Polieren

### **Geometrie**

Der wichtigste Punkt für die Herstellung des Bauteils ist die gewünschte Geometrie und deren geforderte Genauigkeit. „Geht nicht gibt's nicht – aber alles hat seinen Preis“.

Bei der Betrachtung der Machbarkeit eines Bauteiles stößt der Keramiker immer wieder auf die Forderungen der Metall- bzw. Kunststoffkonstrukteure.

Wichtig ist es also dem Kunden den Herstellungsprozeß der Keramik mit seinen Eigenheiten zu verdeutlichen und bewußt zu machen.

## Vergleich Keramik - Metall

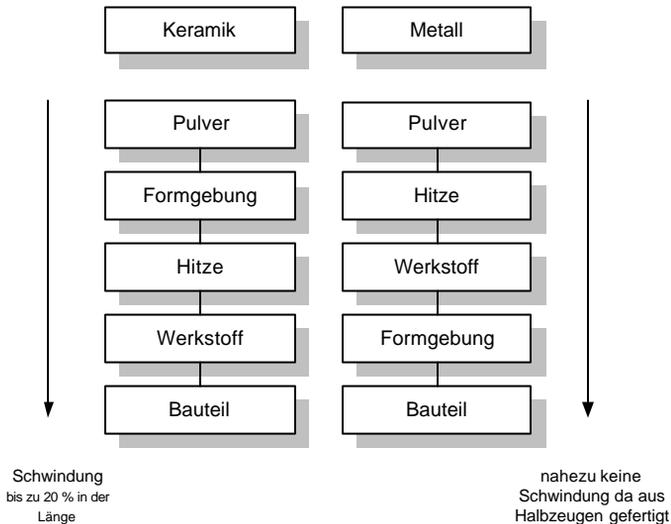


Bild 4: Herstellungsprozess von Keramik und Metall

Die Einhaltung von engen Toleranzen hat in der Herstellung des Bauteils meist die Konsequenz der Nachbearbeitung. Dies ist bei Keramikteilen je nach verwendetem Werkstoff nur mit Hilfe von Diamantwerkzeugen möglich und beeinflusst den Bauteilpreis entscheidend.

Ein Minimierung der Bearbeitungsflächen ist für beide Seiten unerlässlich.

Um hier geeignete Lösungen zu finden, die die Bauteilansprüche, -preise und -sicherheit optimieren, sollte die Geometrie nach bestimmten, auf den Werkstoff Keramik zugeschnittenen Kriterien überarbeitet werden.

Hierfür gibt es einige Grundregeln, die Anwendung finden:

Grundregel	Konsequenz
Einfache Formen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formen dem entsprechenden Urformverfahren anpassen</li> <li>• Urform- und Sintervorgang erleichtern</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"><li>• Modulbauweise bei komplizierten Formen</li></ul>
<i>Spannungs-spitzen vermeiden</i>	<ul style="list-style-type: none"><li>• keine plötzlichen Querschnittsveränderung</li><li>• Kerben, Ecken und scharfe Kanten minimieren</li><li>• Kräfte großflächig einleiten</li></ul>
<i>Zugspannungen minimieren</i>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Vorgabe beanspruchungsgerechter Querschnitte</li><li>• Erzielen von Druckspannungen</li><li>• keramikgerechte Gestaltung der Urkrafteinleitung</li></ul>
<i>Materialanhäufungen vermeiden</i>	<ul style="list-style-type: none"><li>• geringe Wandstärkendifferenzen</li><li>• Querschnittssprünge vermeiden</li><li>• Knotenpunkte auflösen</li><li>• verdichtungsgerecht gestalten</li></ul>
<i>Nachbearbeitung minimieren</i>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Grünbearbeitung ist günstiger als Endbearbeitung</li><li>• Kantenrundungen vermeiden Ausbrüche</li><li>• kleine und abgesetzte Bearbeitungsflächen zu lassen</li></ul>
<i>Beachtung Fertigungs-spezifischer Besonderheiten</i>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Entformbarkeit erleichtern</li><li>• günstige Urformverfahren ermöglichen</li><li>• Hinterschneidungen vermeiden</li></ul>

Tabelle 3: Grundregeln zur Formgebung

### **Einige Beispiele für eine Keramik gerechte Geometrie:**

Weitere Vorschläge und Anregungen für die keramikgerechte Gestaltung sind im Brevier der Technischen Keramik beschrieben.

(Siehe auch [www.keramverband.de/brevier](http://www.keramverband.de/brevier))

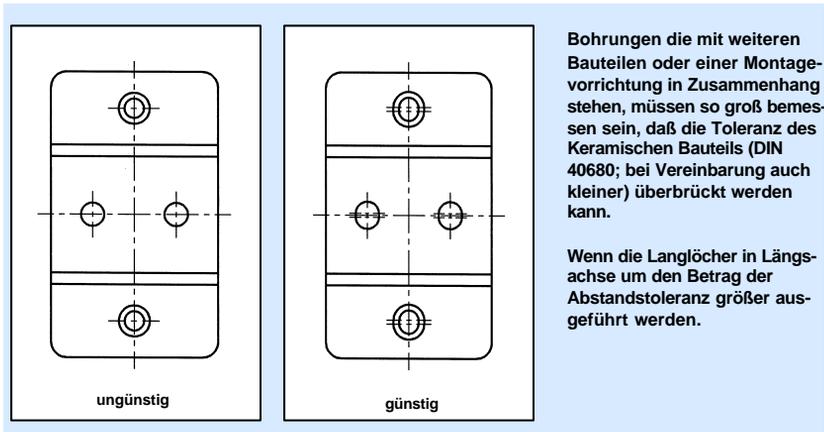


Bild 5: Bohrungen in keramischen Bauteilen

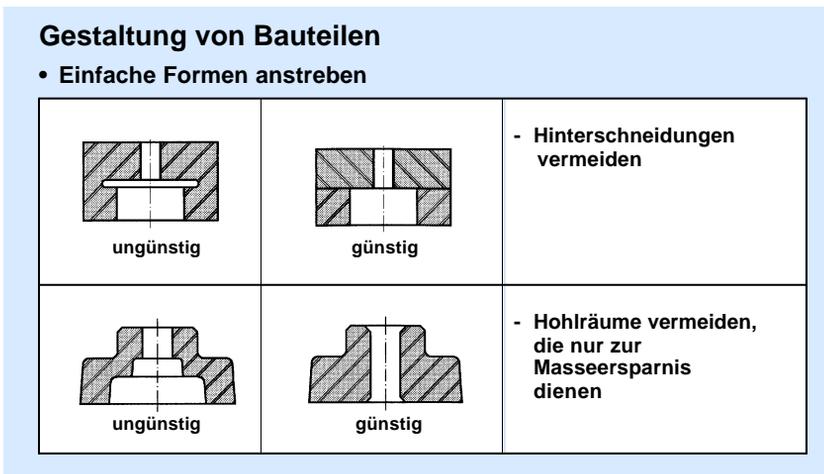


Bild 6: Einfache Formen anstreben

## Gestaltung von Bauteilen

### • Spannungsspitzen vermeiden

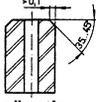
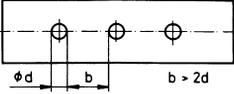
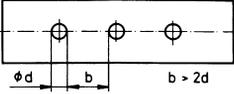
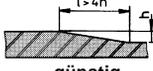
 <p>ungünstig</p>	 <p>günstig</p>	<p>- Kanten senkrecht zur Preßrichtung kurz brechen (axiales Pressen)</p>
 <p>ungünstig</p>	 <p>günstig</p>	<p>- Lochabstände nicht zu klein bemessen</p>
 <p>ungünstig</p>	 <p>günstig</p>	<p>- plötzliche Querschnittsänderungen vermeiden</p>

Bild 7: Spannungsspitzen vermeiden (1)

## Gestaltung von Bauteilen

### • Spannungsspitzen vermeiden

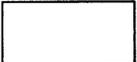
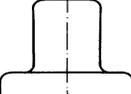
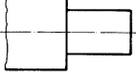
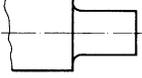
 <p>ungünstig</p>	 <p>günstig</p>	<p>- Ecken und scharfe Kanten vermeiden, Innenkanten und Durchbrüche runden</p>
 <p>ungünstig</p>	 <p>günstig</p>	<p>- Größere Auflageflächen sind günstiger</p>
 <p>ungünstig</p>	 <p>günstig</p>	<p>- Kerbwirkung vermindern</p>

Bild 8: Spannungsspitzen vermeiden (2)

## Gestaltung von Bauteilen

- Materialanhäufungen vermeiden

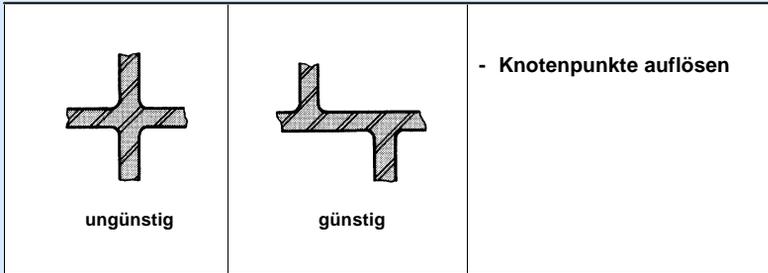


Bild 9: Materialanhäufungen vermeiden

## Gestaltung von Bauteilen

- Nachbearbeitung minimieren

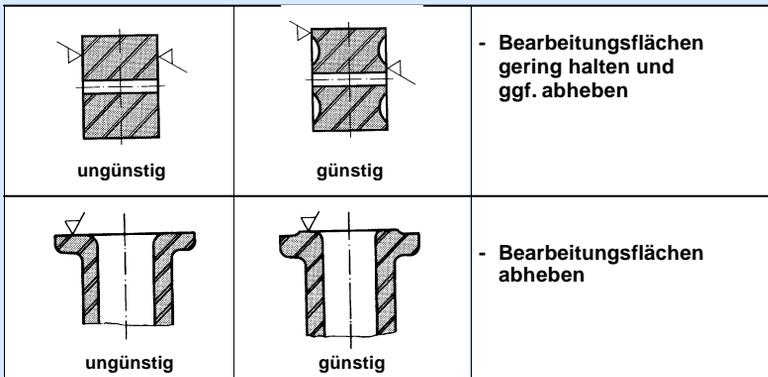


Bild 10: Nachbearbeitung minimieren

Wenn all diese Punkte geklärt und eine Lösung für beide Seiten gefunden wurde, kann man erste Bauteile als Prototypen herstellen. Diese werden z.B. für Trockenpressteile aus vorgeformtem Vollmaterial herausgearbeitet und entsprechen nahezu den Eigenschaften von fertig gepressten Teilen. Auch die Herstellung eines Pilotwerkzeuges kann bei verschiedenen Teilen in Betracht gezogen werden. Hier können dann auch erste Kleinserien gefertigt werden. Die Herstellung im sogenannten Rapidprototyping wie derzeit im Metall- und Kunststoffbau üblich, ist in der Keramik industriell noch nicht möglich.

Falls diese Prototypen erfolgreich getestet sind und der Preis, als weiterer Parameter, den Erwartungen des Kunden entspricht, kann, z.B. wie im Trockenpressverfahren gängig, der Bau eines Serienwerkzeuges beginnen.

Wie jedoch meist in der Praxis üblich, sind vor dem Fertigen des Teiles in der Serie einige Optimierungsschleifen zu bewältigen.

Je nach Kundenwunsch erfolgt die Festlegung der Spezifika für die Bemusterung der Teile und des Prozesses nach eigenen abgesprochenen Kriterien oder wie in der Automobilbranche üblich nach genormten Kriterien, wie z.B. PPAP.

Ein wichtiger Punkt für die Einführung der Teile in Serie ist die Sensibilisierung der Wareneingangskontrolle und der Fertigung für den neuen etwas anderen Werkstoff Keramik.

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 14) finden sich auf den folgenden Seiten.

think  
ceramics

# Von der Anfrage zum keramischen Serienbauteil

Matthias Förster  
Sembach GmbH & Co. KG  
Lauf a.d. Pegnitz



Folie 1

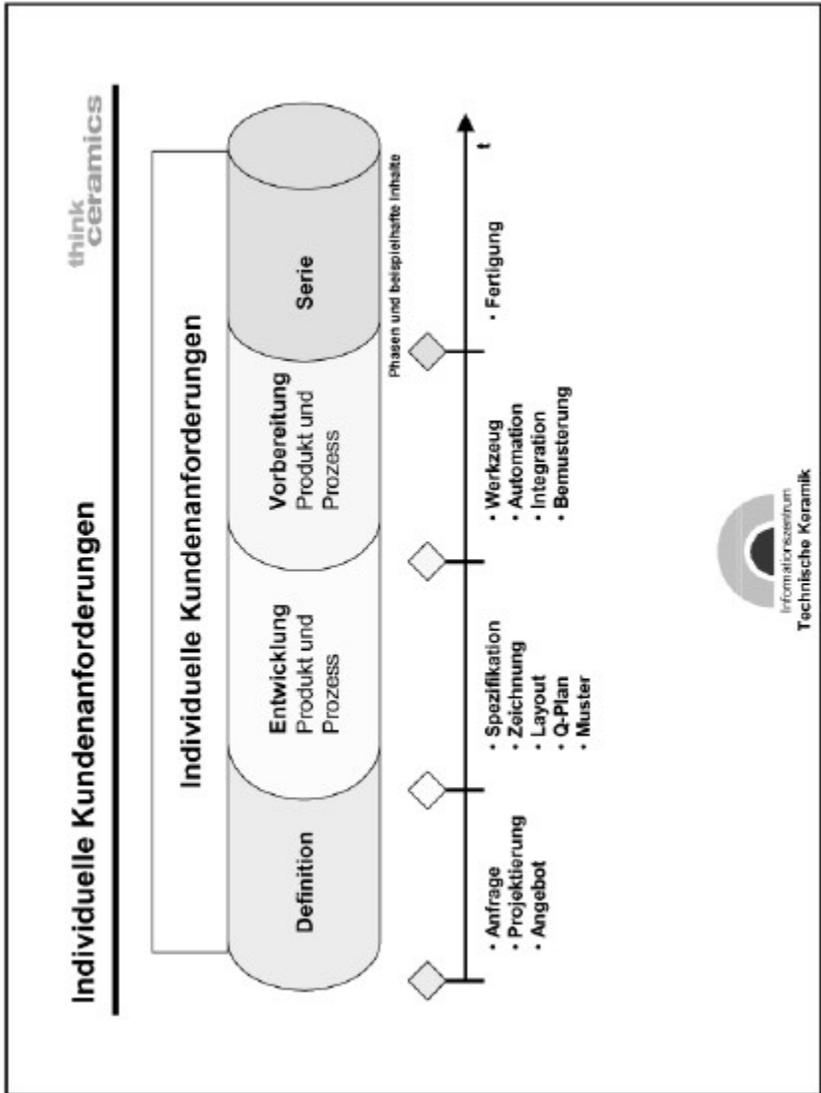
## Was erwartet der Kunde?

think  
ceramics

- a. Informationen der Möglichkeiten
- b. Erfüllung des Einsatzzweckes
- c. Preis -Leistungs-Verhältnis für die erwarteten Stückzahlen muß stimmen
- d. Konstante Qualität der Produkte aus einem sicheren Prozeß
- e. Verfügbarkeit der Teile in einem vom Kunden definierten Zeitraum



Folie 2



Folie 3

## Klärungen mit dem Kunden

think  
ceramics

- Stückzahl
- Werkstoffauswahl
- Geeignetes Fertigungsverfahren
- Festlegung einer optimalen Geometrie für beide Seiten
- Preis-Leistungs-Verhältnis



Folie 4

**Temperaturbelastung**

think ceramics

- Thermoschockbeständigkeit
- Wärmedehnung
- Wärmeleitfähigkeit
- max. Einsatztemperatur
- ...

Informationszentrum  
Technische Keramik

Folie 5

**Elektrische Beanspruchung**

think  
ceramics

- Durchschlagsfestigkeit
- Oberflächenwiderstand
- Verlustfaktor
- Permittivität
- ...

Informationszentrum  
Technische Keramik

Folie 6

## **Mechanische Ansprüche**

think  
ceramics

- Dichte
- Tribologie
- Festigkeiten  
(Biege-, Zug- oder Druckfestigkeiten)
- Härte
- evtl. Lastwechsel



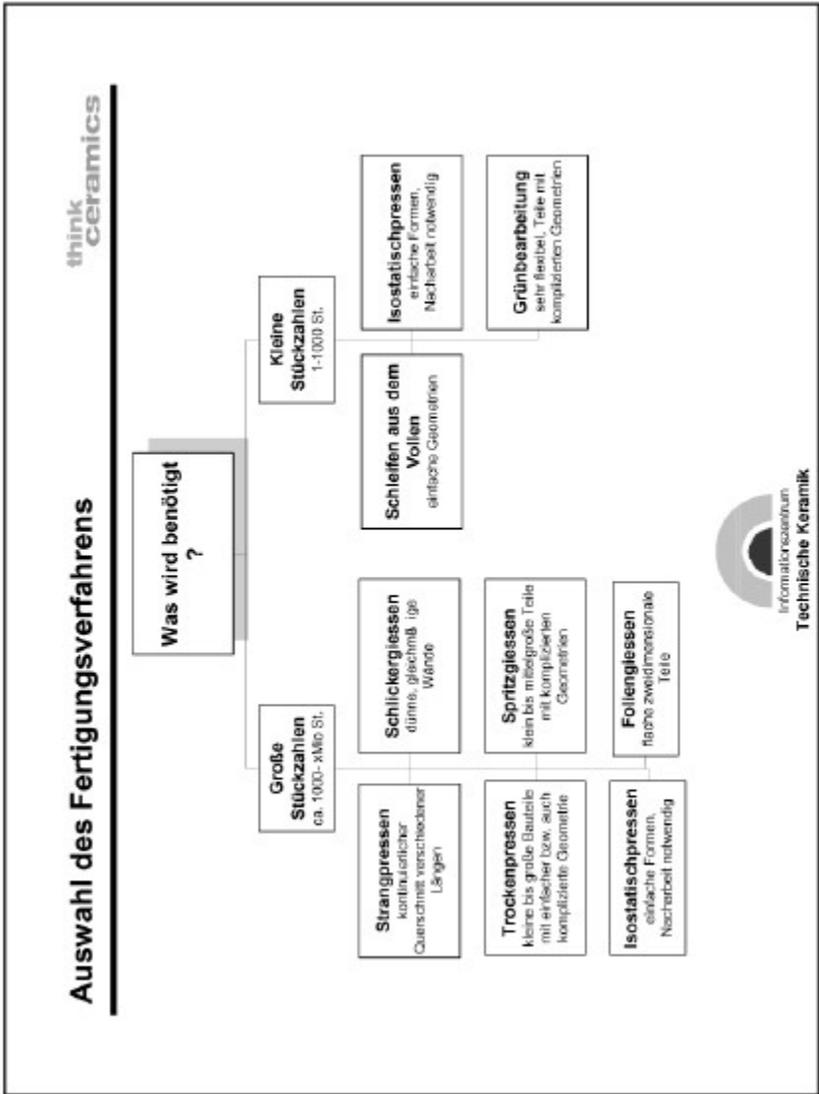
## Chemische Umgebung

think  
ceramics

- Säure- bzw. Laugenbeständigkeit mit Ihren verschiedenen Variationen
- andere Umwelteinflüsse wie z.B. UV-Beständigkeit



Folie 8



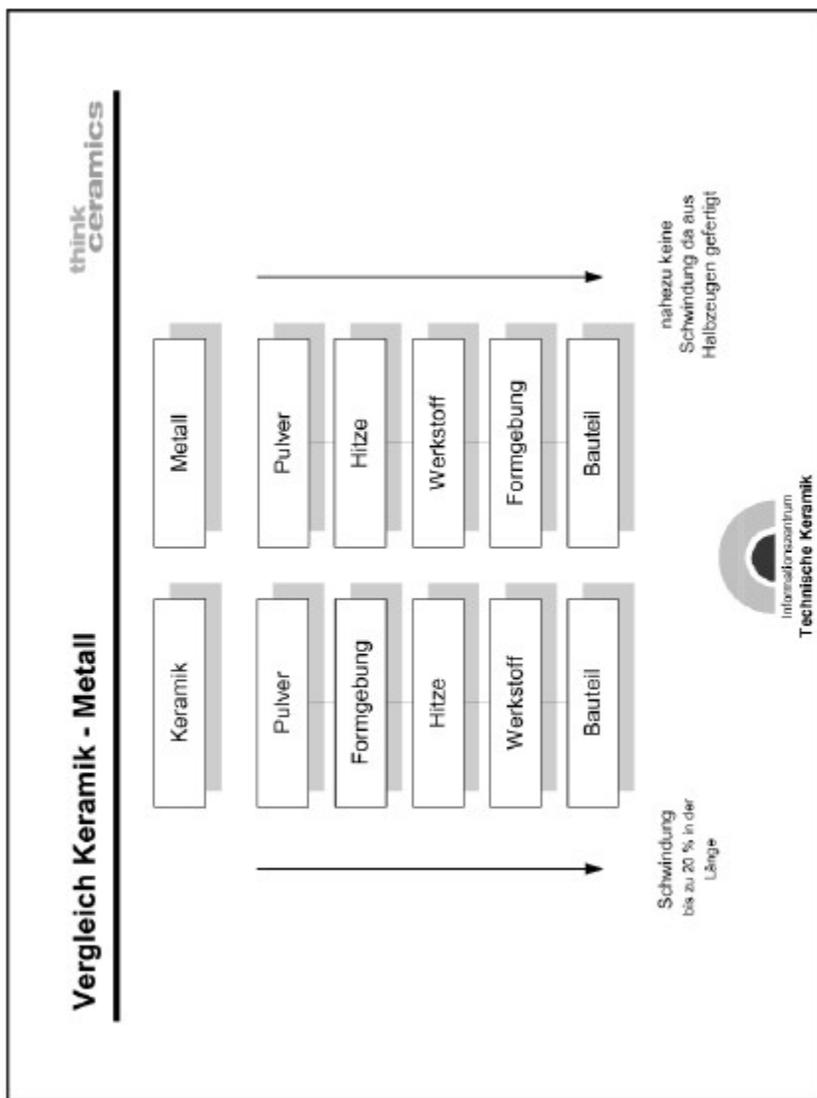
**Nachbearbeitung**

- Glasieren
- Metallisieren
- Hydrophobieren
- Beschichten mit anderen Werkstoffen
- Schleifen
- Polieren
- Läppen

think ceramics

Informationszentrum  
Technische Keramik

Folie 10



## Grundregeln zur Formgebung

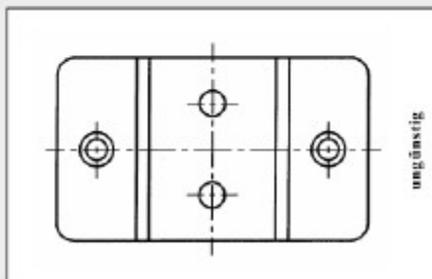
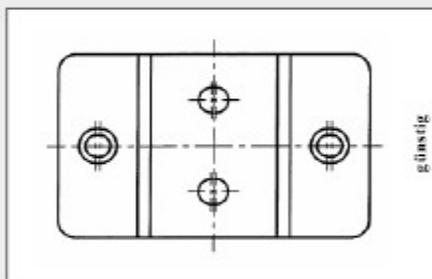
think  
ceramics

Grundregel	Konsequenz
<i>Einfache Formen</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formen dem entsprechenden Urformverfahren anpassen</li> <li>• Urform- und Sintervorgang erleichtern</li> <li>• Modulbauweise bei komplizierten Formen</li> </ul>
<i>Spannungsspitzen vermeiden</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• keine plötzlichen Querschnittsveränderung</li> <li>• Kerben, Ecken und scharfe Kanten minimieren</li> <li>• Kräfte großflächig einteilen</li> </ul>
<i>Zugspannungen minimieren</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorgabe beanspruchungsgerechter Querschnitte</li> <li>• Erzielen von Druckspannungen</li> <li>• keramikgerechte Gestaltung der Umräfteileitung</li> </ul>
<i>Materialanhäufungen vermeiden</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geringe Wandstärkendifferenzen</li> <li>• Querschnittsprünge vermeiden</li> <li>• Knotenpunkte auflösen</li> </ul>
<i>Nachbearbeitung minimieren</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grünbearbeitung ist günstiger als Endbearbeitung</li> <li>• Kantenrundungen vermeiden</li> <li>• Ausbrüche kleine und abgesetzte Bearbeitungsflächen zu lassen</li> </ul>
<i>Beachtung Fertigungsspezifischer Besonderheiten</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entformbarkeit erleichtern</li> <li>• günstige Urformverfahren ermöglichen</li> <li>• Hinterschneidungen vermeiden</li> </ul>



## Bohrungen in keramischen Bauteilen

think  
ceramics



Bohrungen die mit weiteren Bauteilen oder einer Montagevorrichtung in Zusammenhang stehen, müssen so groß bemessen sein, daß die Toleranz des Keramischen Bauteils (DIN 40680; bei Vereinbarung auch kleiner) überbrückt werden kann.

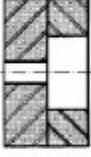
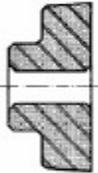
Wenn die Langlöcher in Längsachse um den Betrag der Abstandstoleranz größer ausgeführt werden.

**think  
ceramics**

## Einfache Formen anstreben

**Gestaltung von Bauteilen**

- Einfache Formen anstreben

 ungünstig	 günstig	- Hinterschneidungen vermeiden
 ungünstig	 günstig	- Hohlräume vermeiden, die nur zur Massenersparnis dienen

  
Informationszentrum  
Technische Keramik

Folie 14