

## 2.3 Dienstleistungen zwischen Lösungsansatz und fertigem Bauteil

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

*Die Folien finden Sie ab Seite 149.*

### 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.

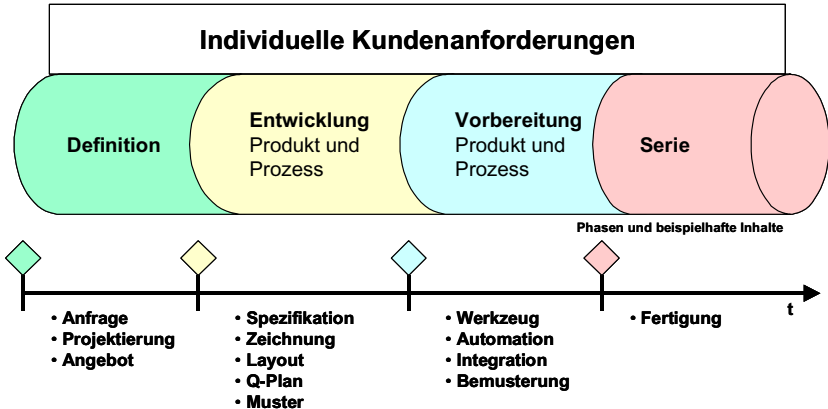
Erste Hilfe hierfür kann das Infozentrum für Keramik als Knotenpunkt oder direkt die Anfrage bei einem Hersteller für Keramik sein.

### Was erwartet der Kunde?

1. Informationen über Möglichkeiten
2. Vorschlag für die Erfüllung des Einsatzzweckes
3. Stimmendes Preis-Leistungs-Verhältnis für die erwarteten Stückzahlen
4. Konstante Qualität der Produkte aus sicherem Prozess
5. Verfügbarkeit der Teile in einem vom Kunden definierten Zeitraum

## Der Weg

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 der zu erwartenden Stückzahl. Hier beginnt dann die sogenannte „Sensibilisierung zur Keramik“. In verschiedensten Punkten muss der Kunde vor Machbarkeitsprüfung und Kalkulation beraten werden.

- Werkstoffauswahl
- Geeignetes Fertigungsverfahren
- Festlegung einer optimalen Geometrie
- **Diskussion zum Preis-Leistungs-Verhältnis**

## Die Keramik

Erst die genauen Kenntnisse der Einsatzbedingungen des Bauteiles ermöglichen es dem Keramikerhersteller dem Kunden den am besten 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

## Einführung in die Technische Keramik

Die nachfolgende Tabelle gibt einen kleinen Überblick einiger gängiger Keramiken die in Maschinenbau und Elektrotechnik häufig zum Einsatz kommen.

Ein umfassender Überblick ist im Brevier Technischer Keramik zu finden

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

Rohdichte	$\rho_\alpha$	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,7	1,8	2,8	2,1	2,0 – 2,1
Offene Porosität	$P_a$	[Vol. %]	0	38	0	0	18 – 24
Wasseraufnahme	$W_a$	[Gew. %]	0	21	0	0	9 – 12
Biegefestigkeit	$\sigma_B$	[MPa]	140	30	140	60	25
Druckfestigkeit			900	100	900	300	200
E-Modul	E	[GPa]	120			70	

Wärmeausdehnungskoeffizient	$\alpha_{20^\circ\text{C bis } 600^\circ\text{C}}$	[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	$c_p$	[J/kgK]	800 – 900	800 – 900	800 – 900	800 – 1200	750 – 850

Durchschlagfestigkeit	$E_v$	[kV/mm]	20		20	10	
Spezif. Widerstand	$\rho_v 20^\circ\text{C}$	[ $\Omega\text{m}$ ]	1011		1011	1010	
	$\rho_v 600^\circ\text{C}$		105	105	105	103	103
Dielektrizitätszahl 48 Hz bis 62 Hz	$\epsilon_r$		6		7	5	
Dielekt. Verlustfaktor	$\tan\delta$ (48 – 62Hz)	[10 <sup>-3</sup> ]	1,5		1,5	25	
	$\tan\delta$ (1MHz)		1,2		0,5	7	

**Tabelle 1:** Technische Daten von Silicatkeramiken

Werkstoff			A65	A92	A96	A99	M96	M99
			Aluminiumoxid				Magnesiumoxid	
Bezeichnung 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

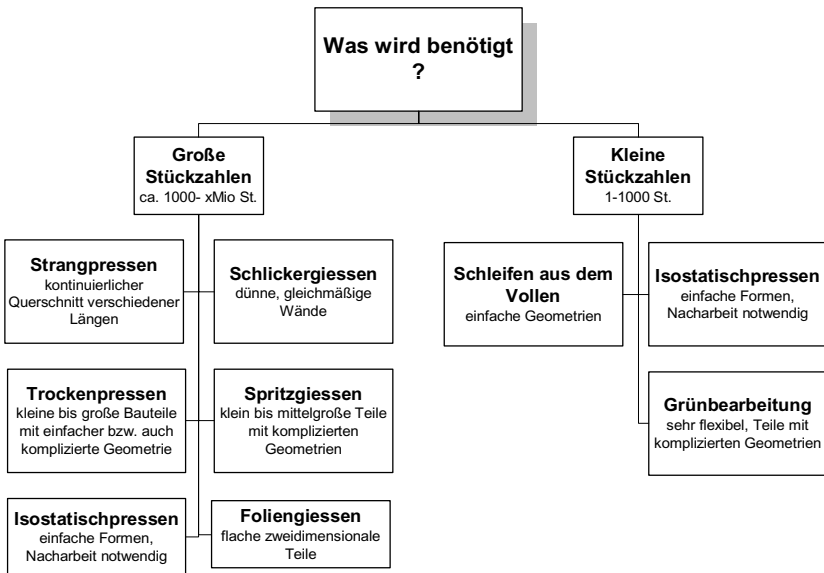
Durchschlagfestigkeit	$E_v$	[kV/mm]	15	15	15	17		
Spezifischer Widerstand	$\rho_v 20^{\circ}\text{C}$	[ $\Omega\text{m}$ ]	1011	1012	1012	1012		
	$\rho_v 600^{\circ}\text{C}$		104	106	106	106		
Dielektrizitätszahl 48 Hz bis 62 Hz	$\epsilon_p$		8	9	9	9	10	10
Dielektrischer Verlustfaktor	$\tan\delta$ (48 – 62 Hz)	[10 <sup>-3</sup> ]		0,5	0,5	0,2		
	$\tan\delta$ (1MHz)			1	1	1		

**Tabelle 2:** Technische Daten von Oxidkeramiken

## Das Fertigungsverfahren

Der ermittelte Werkstoff, die geforderte Stückzahl und der Preis bestimmen dann die Wahl des für dieses Teil geeignete Fertigungsverfahrens.

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 Funktionsanforderung noch eine Nachbearbeitung oder eine Veredelung folgen, wie z.B.:

- Glasieren
- Metallisieren ( für lötfähige Verbindungen )
- Silikonisieren
- Beschichten mit anderen Materialien
- Schleifen
- Läppen
- Polieren

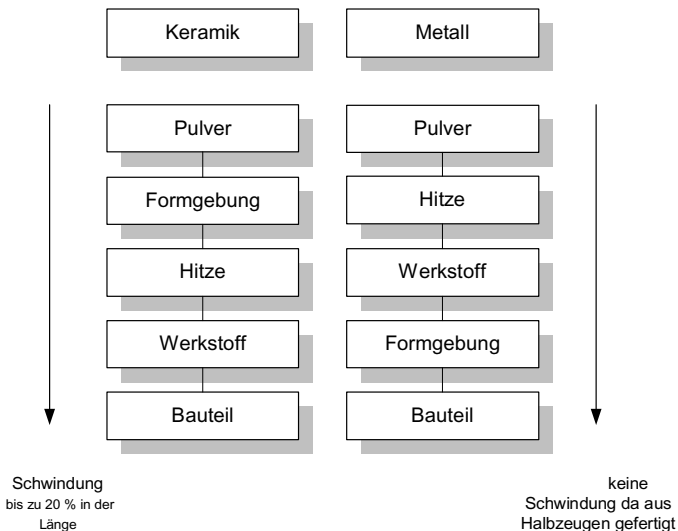
## Die Geometrie

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 stoßen wir immer wieder auf für Metall typische Anforderungen.

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

### Vergleich Keramik - Metall



**Bild 3:** Herstellungsprozess von Keramik und Metall

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

Zur Optimierung des keramischen Bauteils ist es daher unerlässlich, zwischen Toleranzen für Funktionsflächen und Allgmeintoleranzen zu unterscheiden.

## Einführung in die Technische Keramik

---

Um hier geeignete Lösungen zu finden, die die Bauteilansprüche, -preise und –sicherheit optimieren, sollte die Geometrie nach bestimmten, auf Keramik zugeschnittenen Kriterien festgelegt werden. Wir unterstützen Sie auch hierbei.

Für die Geometrie finden folgende Grundregeln Anwendung:

<b>Grundregel</b>	<b>Konsequenz</b>
<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 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>• Querschnittsprünge 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>• Hinterschnidungen vermeiden</li></ul>

**Tabelle 3:** Grundregeln zur Formgebung

### Einige Beispiele für eine keramikgerechte Geometrie:

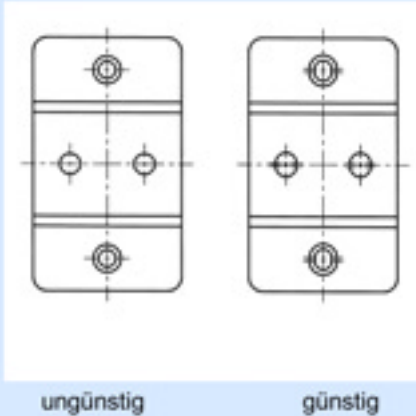
Weitere Vorschläge und Anregungen für die keramikgerechte Gestaltung sind im Brevier der Technischen Keramik beschrieben.

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



## Gestaltung von Bauteilen

- Nachbearbeitung minimieren

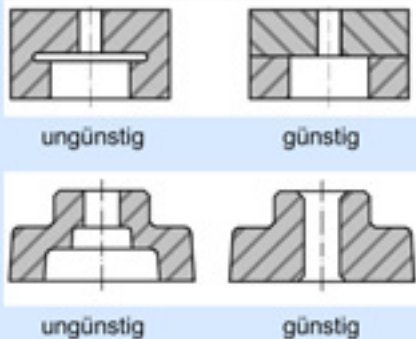


Bohrungen, die mit weiteren Bauteilen oder einer Montagevorrichtung in Zusammenhang stehen, müssen so groß bemessen sein, daß die Toleranzen des keramischen Bauteils (DIN 40680; bei Vereinbarung auch kleiner) überbrückt werden kann.

Bild 4: Bohrungen in keramischen Bauteilen

## Gestaltung von Bauteilen

- Einfache Formen anstreben



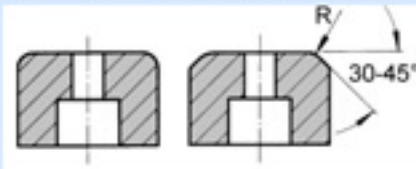
- Hinterschnidungen vermeiden

- Hohlräume vermeiden, die nur zur Masseersparnis dienen

Bild 5: Einfache Formen anstreben

### Gestaltung von Bauteilen

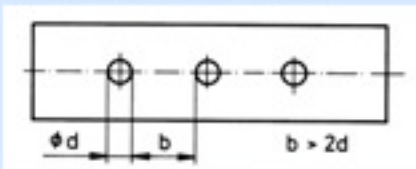
- Spannungsspitzen vermeiden



ungünstig

günstig

- Kanten senkrecht zur Preßrichtung kurz brechen (axiales Pressen)



ungünstig

günstig

- Lochabstände nicht zu klein bemessen

Bild 6: Spannungsspitzen vermeiden (1)

### Gestaltung von Bauteilen

- Spannungsspitzen vermeiden



ungünstig

günstig

- Plötzliche Querschnittsänderungen vermeiden



ungünstig

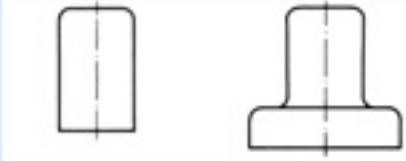
günstig

- Ecken und scharfe Kanten vermeiden, Innenkanten und Durchbrüche runden

Bild 7: Spannungsspitzen vermeiden (2)

### Gestaltung von Bauteilen

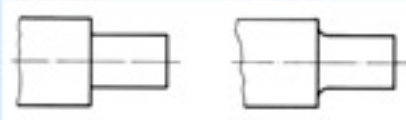
- Spannungsspitzen vermeiden



ungünstig

günstig

- Große Auflageflächen sind günstiger



ungünstig

günstig

- Kerbwirkung vermindern

Bild 8: Spannungsspitzen vermeiden (3)

### Gestaltung von Bauteilen

- Materialanhäufungen vermeiden



ungünstig

günstig

- Knotenpunkte auflösen

Bild 9: Materialanhäufungen vermeiden

### Gestaltung von Bauteilen

- Nachbearbeitung minimieren



ungünstig

günstig

- Bearbeitungsflächen gering halten und ggf. abheben



ungünstig

günstig

- Bearbeitungsflächen abheben

Bild 10: Nachbearbeitung minimieren

### Folgende Regeln gelten:

- Spannungsspitzen und Punktlasten vermeiden
- Druckbeanspruchung bevorzugen
- Schlag- und Stoßbeanspruchung vermeiden
- Zusatzbeanspruchung durch Wärmedehnung vermeiden

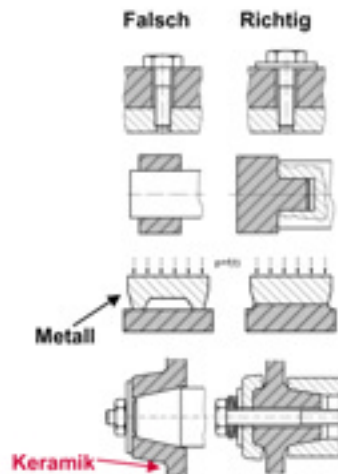


Bild 11: Nachbearbeitung minimieren

Wenn all diese Punkte geklärt und eine Lösung für beide Seiten gefunden wurde, kann man erste Bauteile als Prototypen herstellen. Diese werden z.B. aus vorgeformtem Vollmaterial herausgearbeitet und besitzen dann nahezu die Eigenschaften der fertiggepressten Teile. Auch die Herstellung eines Pilotwerkzeuges kann bei verschiedenen Teilen in Betracht gezogen werden. Damit 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.

Wenn die Prototypen erfolgreich getestet sind und der Preis, als weitere Bauteileigenschaften, den Erwartungen des Kunden entspricht, kann der Bau eines Serienwerkzeuges beginnen, z.B. ein Werkzeug zum Trockenpressen.

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 kundeneigenen Kriterien oder wie in der Automobilbranche üblich nach genormten Kriterien, wie z.B. PPAP.

Ein wichtiger Punkt bei der anfänglichen Serienteilelieferung ist die Sensibilisierung der Wareneingangskontrolle und der Fertigung des Kunden für den neuen etwas anderen Werkstoff Keramik.

Wir möchten Ihnen daher mitgeben: Lassen sie sich bei der Einführung eines keramischen Bauteils in Ihr Produkt durch einen Keramikhersteller begleiten und speziell zu folgenden Punkten intensiv beraten zu lassen:

- Werkstoff
- Geometrie
- Toleranzen
- Zeitlicher Ablauf

Damit ist dann gewährleistet, dass Sie ein optimales Keramikteil erhalten, auch bezüglich des Preis-Leistung-Verhältnisses.

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 20) finden sich auf den folgenden Seiten.

# Einführung

## Dienstleistungen zwischen Lösungsansatz und fertigem Bauteil

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

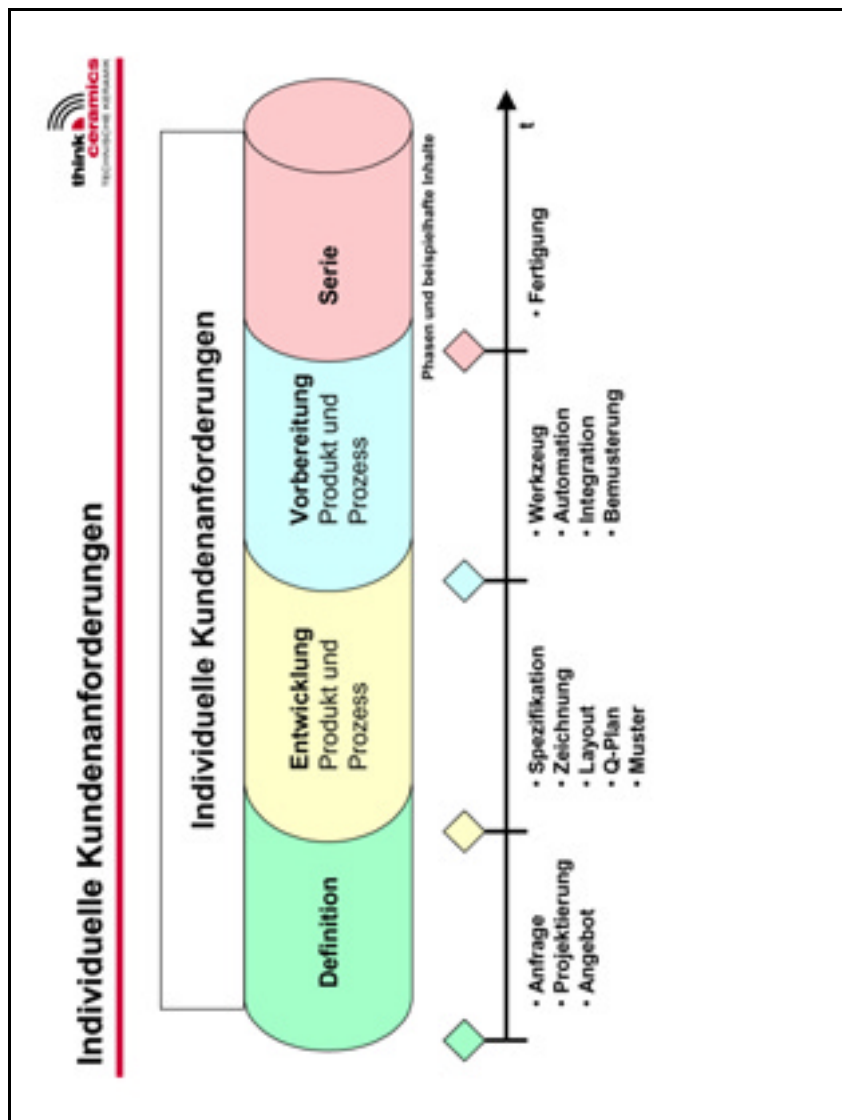


## Was erwartet der Kunde?



1. Informationen über Möglichkeiten
2. Vorschlag für die Erfüllung des Einsatzzweckes
3. Stimmendes Preis – Leistungs - Verhältnis für die erwarteten Stückzahlen
4. Konstante Qualität der Produkte aus sicherem Prozess
5. Verfügbarkeit der Teile in einem vom Kunden definierten Zeitraum





## Klärungen mit dem Kunden

---



- Stückzahl
- Werkstoffauswahl
- Geeignetes Fertigungsverfahren
- Festlegung einer optimalen Geometrie
- **Diskussion zum Preis-Leistungs-Verhältnis**

## **Temperaturbelastung**



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



## Elektrische Beanspruchung



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



## Mechanische Ansprüche

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

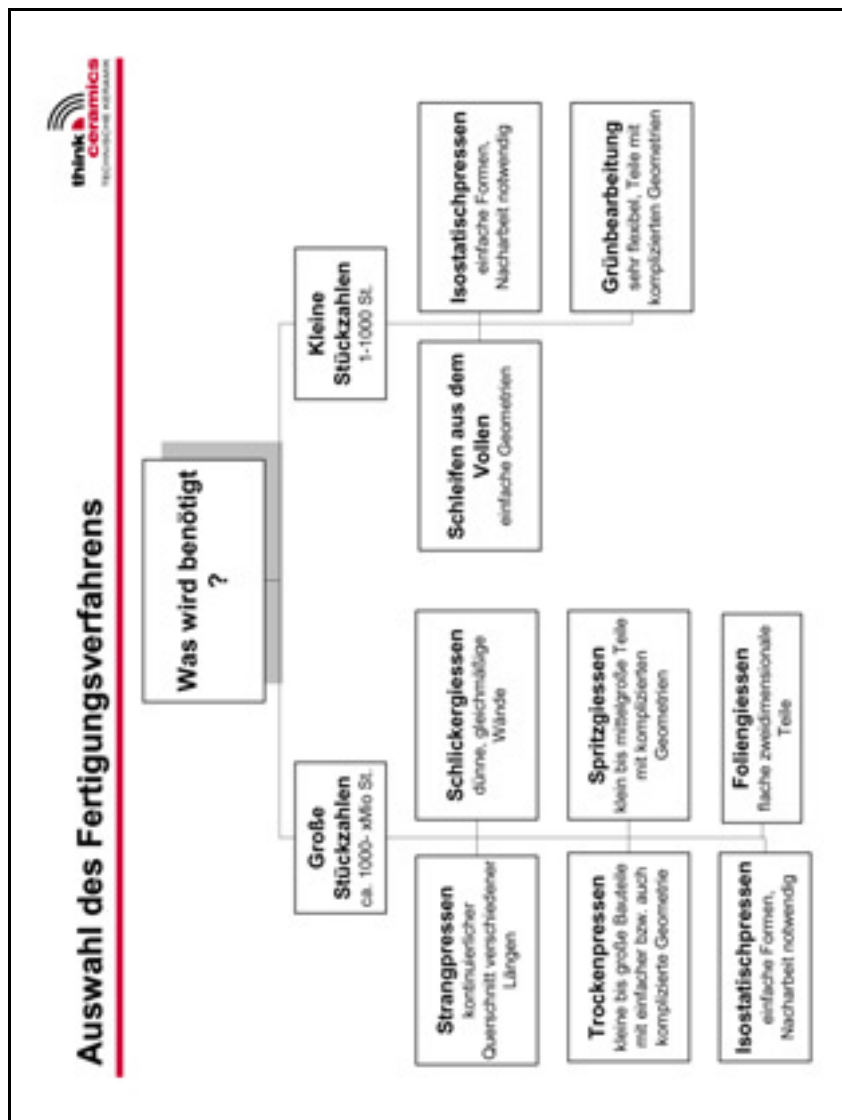


## Chemische Umgebung



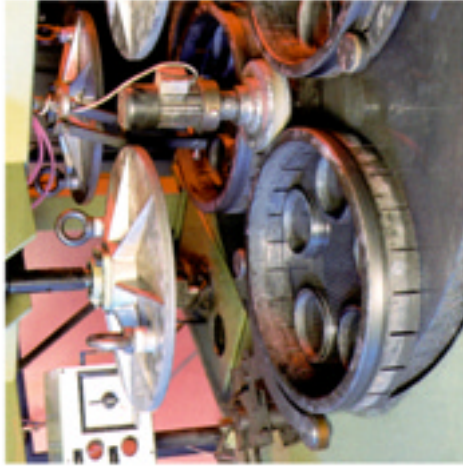
- Säure- bzw. Laugenbeständigkeit mit Ihren verschiedenen Variationen
- andere Umwelteinflüsse wie z.B. UV-Beständigkeit



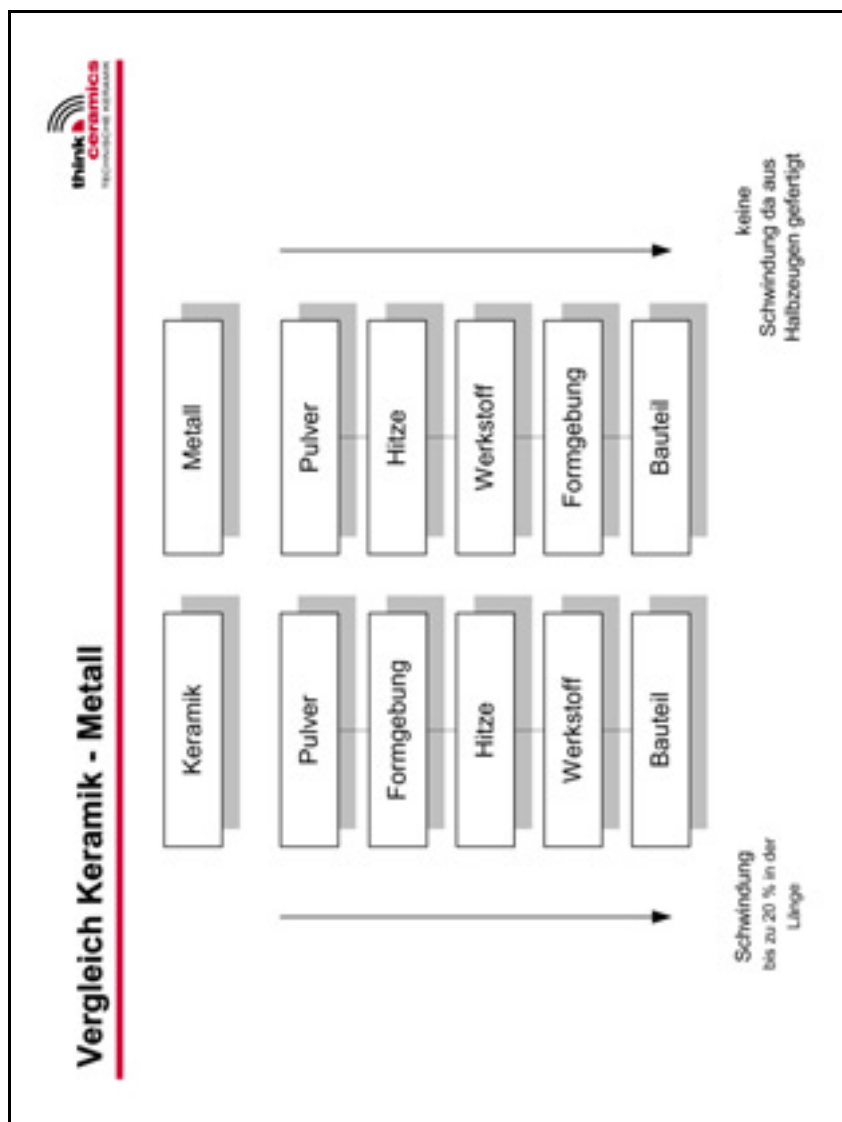


## Nachbearbeitung

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







## Grundregeln zur Formgebung

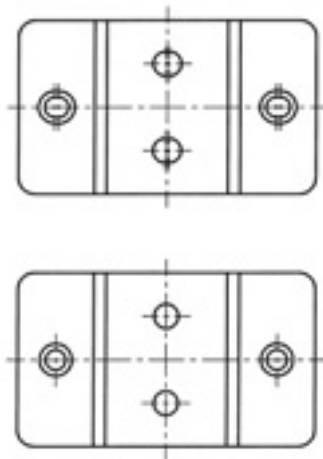


Grundregel	Konsequenz
<i>Einfache Formen</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formen dem entsprechenden Urformverfahren anpassen</li> <li>• Urform- und Sintervorgang erleichtern</li> <li>• Modulbauweise bei komplizierten Formen</li> </ul>
<i>Spannungsspitzen vermeiden</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• keine plötzlichen Querschnittsveränderung</li> <li>• Kerben, Ecken und scharfe Kanten minimieren</li> <li>• Kräfte großflächig 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>• 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 Ausbrüche</li> <li>• 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

### Gestaltung von Bauteilen

- Nachbearbeitung minimieren

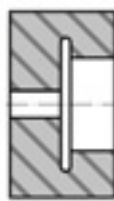


Bohrungen, die mit weiteren Bauteilen oder einer Montagevorrichtung in Zusammenhang stehen, müssen so groß bemessen sein, daß die Toleranzen des keramischen Bauteils (DIN 40680; bei Vereinbarung auch kleiner) überbrückt werden kann.

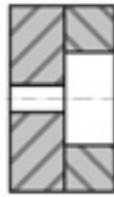
## Einfache Formen anstreben

### Gestaltung von Bauteilen

- Einfache Formen anstreben



ungünstig



günstig

- Hinterschneidungen vermeiden



ungünstig



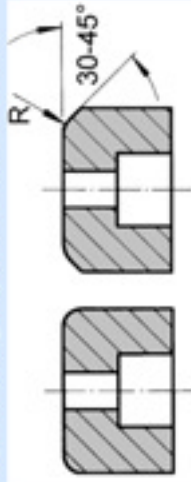
günstig

- Hohlräume vermeiden, die nur zur Masseersparnis dienen

## Spannungsspitzen vermeiden (1)

### Gestaltung von Bauteilen

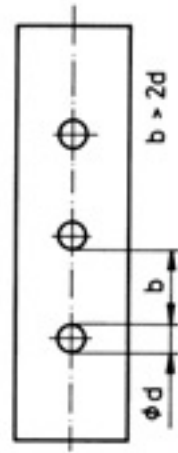
- Spannungsspitzen vermeiden



- Kanten senkrecht zur Preßrichtung kurz brechen (axiales Pressen)

ungünstig

günstig



- Lochabstände nicht zu klein bemessen

ungünstig

günstig

## Spannungsspitzen vermeiden (2)



### Gestaltung von Bauteilen

- Spannungsspitzen vermeiden



- Plötzliche Querschnittsänderungen vermeiden

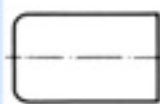


- Ecken und scharfe Kanten vermeiden, Innenkanten und Durchbrüche runden

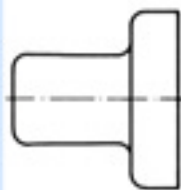
## Spannungsspitzen vermeiden (3)

### Gestaltung von Bauteilen

- Spannungsspitzen vermeiden

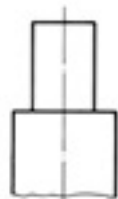


ungünstig

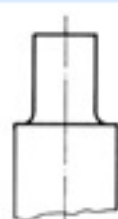


günstig

- Große Auflageflächen sind günstiger



ungünstig



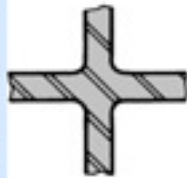
günstig

- Kerbwirkung vermindern

## Materialanhäufungen vermeiden

### Gestaltung von Bauteilen

- Materialanhäufungen vermeiden



ungünstig



günstig

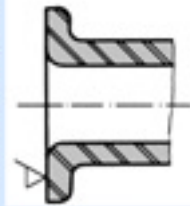
- Knotenpunkte auflösen



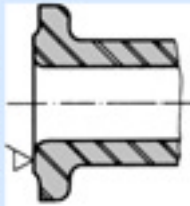
## Nachbearbeitung minimieren

### Gestaltung von Bauteilen

- Nachbearbeitung minimieren

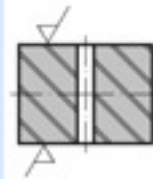


ungünstig

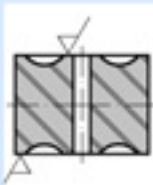


günstig

- Bearbeitungsflächen gering halten und ggf. abheben



ungünstig



günstig

- Bearbeitungsflächen abheben

## Verbindungstechnik - Regeln



### Folgende Regeln gelten:

- Spannungsspitzen und Punktlasten vermeiden
- Druckbeanspruchung bevorzugen
- Schlag- und Stoßbeanspruchung vermeiden
- Zusatzbeanspruchung durch Wärmedehnung vermeiden

