

2.4 Service auf dem Weg zum keramischen Bauteil

- Ines Durmann
Sembach GmbH & Co. KG
Lauf a.d. Pegnitz

Die Folien finden Sie ab Seite 148.

2.4.1. Einleitung

Die Idee für eine völlig neue Baugruppe reift im Kopf des Konstrukteurs. Eine pfiffige Lösung, die das in seiner Firma produzierte Gerät deutlich verbessern würde. Bei der Umsetzung der Idee zeigt sich, dass einzelne Bauteile erhöhter thermischer Belastung ausgesetzt sind. Welchen Werkstoff also einsetzen? Nach einigen Internetrecherchen fällt die Wahl auf Keramik. Ein Angebot muss her, so dass an verschiedene Keramikhersteller eine entsprechende Anfrage gestellt wird.

Doch es flattern nicht wie erwartet einen Tag später die Angebote ins Haus, sondern die Keramikhersteller nehmen telefonisch Kontakt auf, um wichtige Punkte zur Angebotsbearbeitung zu klären.

Keramik hat ungewöhnliche Eigenschaften, die vielfach nur nach intensiver fachlicher Beratung erfolgreich genutzt werden können. Die Keramikhersteller wissen das und beraten ihre Kunden daher sehr intensiv. Dieser Service gilt für die Festlegung aller Fertigungsdetails.

2.4.2. Analyse der Aufgaben

Die Analyse der Aufgaben für das keramische Teil darf nicht mit dem Ziel *Ersatz eines Werkstoffes* sondern **Optimierung einer Baugruppe mit Beschränkung auf das eigentliche Problem** erfolgen!

Dazu sollte der Konstrukteur zusammen mit dem Keramikhersteller detailliert die Aufgaben der Funktionseinheit erörtern. Aus der Abstraktion des eigentlichen Problems erwächst die Chance, genau dieses optimal zu lösen und scheinbare Hindernisse zu umgehen. Die

Abstraktion lässt die wirklichen technischen Anforderungen erkennen und führt letztlich zum optimalen Werkstoff, zu optimalen Formgebung und Herstellung.

Dies spiegelt sich dann später auch in der Zuverlässigkeit des Systems und einem guten Preis-Leistungs-Verhältnis wieder.

2.4.3. Auswahl des keramischen Werkstoffs

Erst die **genaue Kenntnis der Einsatzbedingungen** ermöglicht es dem Keramikhersteller, dem Kunden den am besten geeigneten Werkstoff vorzuschlagen.

Dazu müssen u.a. folgende Betriebsbedingungen und die dafür notwendigen Werkstoff-Parameter abgefragt werden:

Thermische Belastung

- Thermoschockbeständigkeit
- Wärmedehnung
- Wärmeleitfähigkeit
- Max. Einsatztemperatur

Elektrische Beanspruchung

- Durchschlagfestigkeit
- Oberflächenwiderstand
- Verlustfaktor
- Permittivität

Mechanische Anforderungen

- Dichte
- Reibeigenschaften
- Festigkeiten
- Härte
- Evtl. Lastwechsel

Chemische Umgebung

- Säure- bzw. Laugenbeständigkeit
- Andere Umwelteinflüsse wie z.B. UV-Beständigkeit

Die folgende Tabelle zeigt die Eigenschaftsprofile einiger gängiger keramischer Werkstoffe, die in der Elektrotechnik zum Einsatz

Einführung in die Technische Keramik

kommen. Ein umfassender Überblick ist im Brevier Technische Keramik zu finden (www.keramverband.de/brevier).

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

Rohdichte	ρ_a	[g/cm ³]	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	σ_B	[MPa]	140	30	140	60	25
Druckfestigkeit		[MPa]	900	100	900	300	200
E-Modul	E	[GPa]	120			70	

Wärmeausdehnungskoeffizient	$\alpha_{20^\circ\text{C bis } 600^\circ\text{C}}$	[10 ⁻⁶ K ⁻¹]	7 – 9	8 – 10	10 – 11	2 – 4	4 – 6
Wärmeleitfähigkeit	λ	[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_d	[kV/mm]	20		20	10	
Spezif. Widerstand	$\rho_V 20$	[Ωm]	10 ¹¹		10 ¹¹	10 ¹⁰	
	$\rho_V 600$	[Ωm]	10 ⁵	10 ⁵	10 ⁵	10 ³	10 ³
Dielektrizitätszahl 48 Hz bis 62 Hz	ϵ_r		6		7	5	
Dielekt. Verlustfaktor	$\tan\delta_{3-62\text{Hz}}$	[10 ⁻³]	1,5		1,5	25	
	$\tan\delta_{(1\text{MHz})}$	[10 ⁻³]	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	ρ_{α}	[g/cm ³]	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	σ_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 ⁻⁶ K ⁻¹]	5 – 7	6 – 8	7 – 8	7 – 8	12 – 13	12 – 13
Wärmeleitfähigkeit	λ	[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_d	[kV/mm]	15	15	15	17		
Spezifischer Widerstand	$\rho_v 20$	[Ωm]	10 ¹¹	10 ¹²	10 ¹²	10 ¹²		
	$\rho_v 600$	[Ωm]	10 ⁴	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶		
Dielektrizitätszahl 48 Hz bis 62 Hz	ϵ_r		8	9	9	9	10	10
Dielektrischer Verlustfaktor	$\tan\delta$ (48 – 62Hz)	[10 ⁻³]		0,5	0,5	0,2		
	$\tan\delta$ (1MHz)	[10 ⁻³]		1	1	1		

Tabelle 2: Technische Daten von Oxidkeramiken

2.4.4. Auswahl des Formgebungsverfahrens

Ist der passende Werkstoff gefunden, gilt es das geeignete Fertigungsverfahren für die geforderte Stückzahl und die zu realisierenden Konstruktionsmerkmale zu wählen. Die Stückzahl favorisiert meist ein oder mehrere Verfahren oder lässt diese von vornherein nicht zu. Das gewählte Formgebungsverfahren macht ggf. auch noch kleinere Konstruktionsänderungen notwendig!

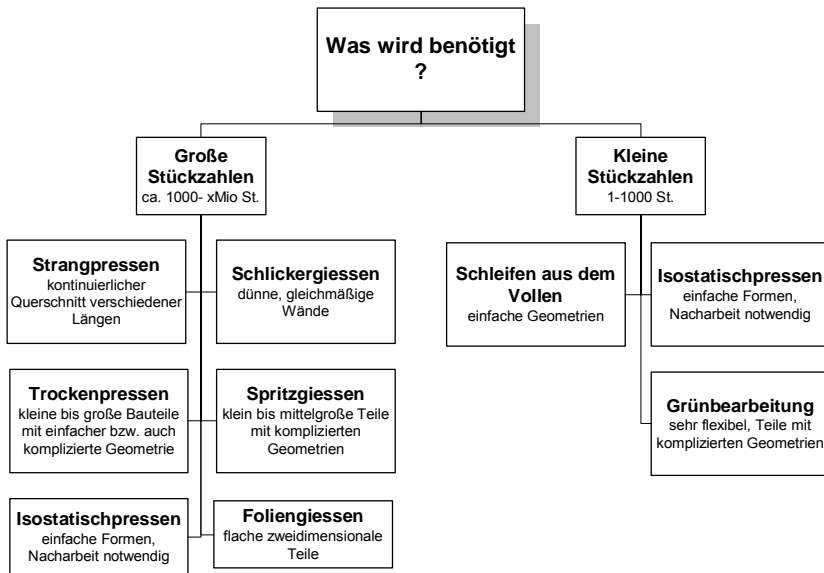


Bild 1: Auswahl des Fertigungsverfahrens

2.4.4.1. Foliengiessen

Zur Herstellung von großflächigen, dünnen keramischen Bauteilen wird das Foliengießverfahren eingesetzt. Hierbei wird ein keramischer Schlicker mit verschiedenen organischen Zusätzen auf ein endloses, über Rollen angetriebenes Stahlband „gegossen“ (Bild 2). Das heißt, der Schlicker läuft kontinuierlich aus einem Vorratsbehälter durch einen einstellbaren Spalt auf das Band. Im Gegenstrom wird zur Trocknung Warmluft über die Folie geblasen, so dass man am Bandende eine

flexible Grünfolie erhält. Diese kann entweder aufgewickelt werden oder direkt durch schneiden, stanzen, prägen o.ä. weiter verarbeitet werden.

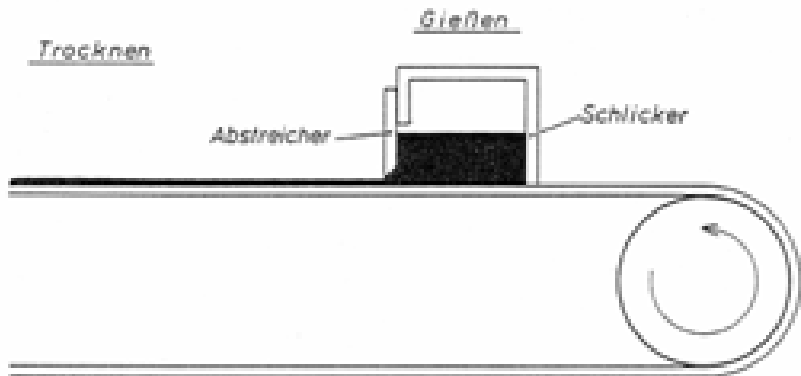


Bild 2: Prinzipskizze des *Foliengießens*

Die Aufbereitung und Zusammensetzung einer Foliengießmasse ist sehr komplex. Die einzelnen Bestandteile einer solchen Gießmasse sowie deren Funktion zeigt Tabelle 3.

Bestandteil	Funktion	Beispiel 1	Beispiel 2
Keramisches Pulver	Matrix	Al_2O_3	SiC
Lösemittel	Dispersion	dest. Wasser	Ethylalkohol Trichlorethylen
Verflüssiger	Dispersion, Kontrolle von Oberflächenladungen und pH-Wert	Arylschwefelsäure	Menhaden-Fischöl
Binder	Grünfestigkeit	Polyvinylacetat	Polyvinylbutyral
Plastifizierer	Flexibilität	Polyethylenglycol Dibutylphtalat	Polyethylenglycol Octylphtalat
Benetzungsmittel	Reduzierung der Oberflächenspannung des Lösemittels	Octylphenoxyethanol	

Tabelle 3: Zusammensetzung einer Foliengießmasse

Bei der Aufbereitung wird zuerst das keramische Pulver zusammen mit Wasser und einem geeigneten Verflüssiger in dem ausgewählten Lösemittel dispergiert. Anschließend werden Binder, Plastifizierer und Benetzungsmittel zugemischt. Die fertige Mischung muss vor dem Vergießen gut entlüftet werden, um Blasenbildung zu vermeiden.

Mittels Foliengießen lassen sich keramische Teile (Substrate) mit einer Dicke im Bereich 0,25 bis 1,5 mm herstellen, was mit anderen Formgebungsverfahren gar nicht oder nur unter hohem Aufwand machbar wäre. Substrate aus Aluminiumoxid werden in verschiedenster Form als Leiterplatten in der Elektronik verwendet, wenn erhöhte Anforderungen an die Wärmeleitfähigkeit gestellt werden. Dies ist im Zuge der Miniaturisierung mehr und mehr der Fall. Außerdem können aus einzelnen Keramiksubstraten z.B. mehrschichtige keramische Gehäuse für die Elektronik oder Wärmetauscher für die Energietechnik aufgebaut werden.

2.4.4.2. Strangpressen (Extrudieren)

Eines der ältesten aber nach wie vor gebräuchlichsten Verfahren zur Herstellung achssymmetrischer Bauteile ist das Extrudieren oder Strangpressen. Nicht nur einfache Achsen oder Rohre lassen sich mittels Extrusion formen, sondern auch äußerst komplizierte Profile, die nicht zwangsläufig runde Querschnitte haben müssen.

Hohe Stückzahlen lassen sich durch das Arbeiten mit Mehrfach-Werkzeugen realisieren, d. h. mit einem Mundstück werden mehrere Stränge gleichzeitig gezogen. Die Dimensionen extrudierter Bauteile reichen von filigranen Röhrchen mit Außendurchmessern < 1 mm bis zu Balken mit Durchmessern von > 200 mm. Ebenso variieren die Längen von 100 mm bis zu 5,5 m.



Bild 3: Kolbenpresse für das vertikale Extrudieren von Keramikmassen



Bild 4: Beispiele für extrudierte Keramikbauteile

2.4.4.3. Trockenpressen

Immer wieder beeindruckend sind die komplizierten Geometrien von Regler- oder Sicherungssockeln für die Elektroindustrie, die mittels Trockenpressverfahren hergestellt werden. Mehr durch Zufall wurde dieses Formgebungsverfahren Anfang des 20. Jahrhunderts entwickelt, als es um die Verwertung von Specksteinabfällen bei der Azethylenbrennerherstellung ging. Heute ist die Automatisierung des Trockenpressens soweit fort geschritten, dass es enorme Stückzahlen mit ausgezeichneter Qualitätskonstanz liefert. Nach wie vor ist das Steatit der für das Trockenpressen am besten geeignete Werkstoff. Aber auch bei der Verarbeitung weitaus härterer, abrasiverer Oxidkeramiken wird das Verfahren angewandt.

Zur Gestaltung von Trockenpressbauteilen wurden einige wichtige Kriterien zusammengestellt, die bei der Konstruktion beachtet werden sollten (siehe Brevier). Je nach Auslegung des Trockenpressautomaten lassen sich Bauteile von Fliesen- bis zu Streichholzkopfgröße

realisieren. Kleine Scheiben oder Plättchen können bis zu einer Höhe von ca. 0,8 bis 1 mm gepresst werden. Darunter bietet sich eher das Foliengießverfahren an. Feine Stege o.ä. im Bauteil lassen sich soweit herstellen, wie das verwendete Pressgranulat die Hohlräume im Presswerkzeug vernünftig füllen kann bzw. die Werkzeuggestaltung möglich ist.



Bild 5: Kleiner Ausschnitt aus der Trockenpress-abteilung bei Sembach.



Bild 6: Verschiedene Trockenpressteile aus Steatit

Zum besseren Verständnis sind im Folgenden die einzelnen Vorgänge beim Trockenpressen dargestellt:

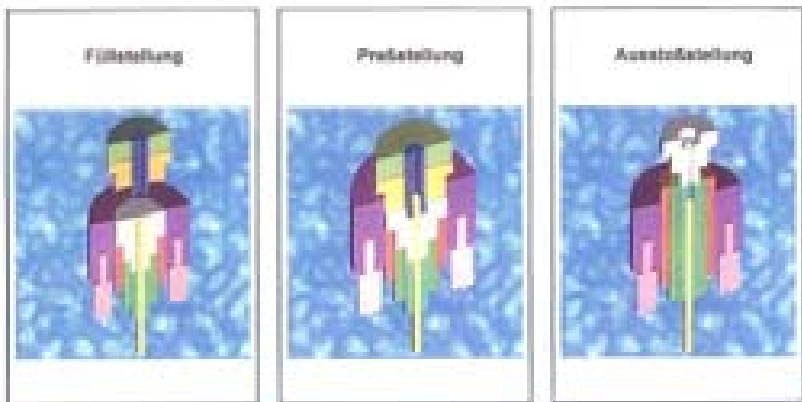


Bild 7: Hauptschritte beim Trockenpressvorgang

Die drei Hauptabschnitte beim Trockenpressvorgang sind:

Füllen mit Granulat – Pressen – Ausstoßen des Presslings.

Prinzipiell besteht das Trockenpresswerkzeug aus einer Mantelform und Ober- bzw. Unterstempel, die, wie obige Abbildung zeigt, mehrfach unterteilt sein können.



Bild 8: Trockenpressen „live“!

- Links → Füllstellung: Mit Preßgranulat gefüllte Form (3fach).
Mitte → Pressstellung: Oberteil taucht ein in Unterteil.
Rechts → Ausstoßstellung: Füllschuh schiebt gepresste Teile nach vorne ab.

Gepresst wird je nach erforderlichen Stückzahlen mit Einfach- oder Mehrfachwerkzeugen, wobei pro Minute bis zu 20 Pressungen nacheinander durchgeführt werden.

Man kann unschwer erkennen, dass mittels Trockenpressen zwar komplexe Bauteile produziert werden können, aber auch äußerst komplexe Presswerkzeuge mit zahlreichen bewegten Teilen (Presstempeln) dazu nötig sind. Bei hohen Stückzahlen ist aber das Trockenpressen eindeutig das wirtschaftlichste Verfahren.

2.4.4.4. Spritzgießen

Immer häufiger werden keramische Bauteile gewünscht, bei deren Herstellung die bereits erwähnten Verfahren in Hinblick auf die geometrische Gestaltung an ihre Grenzen stoßen. In solchen Fällen bietet es sich an, in Analogie zur Herstellung von Kunststoffteilen, keramische Materialien zu verspritzen. Dafür besteht die Masse aus einer Mischung aus Keramikpulver und Kunststoff. Prinzipiell sollten die Wandstärken eines keramischen Spritzgussteils möglichst gleichmäßig ausgelegt sein. Außerdem ist die Wandstärke nach oben auf ca. 10 mm begrenzt, bedingt durch den an die Formgebung anschließenden Entbinderungsprozess. Seit langem etabliert ist der keramische Spritzguss bei der Produktion von Fadenführern für die Textilmaschinenindustrie. Diese Bauteile demonstrieren in eindrucksvoller Weise, welche zusätzlichen gestalterischen Möglichkeiten der keramische Spritzguss eröffnet.



Bild 9: Keramische Spritzguss-Bauteile

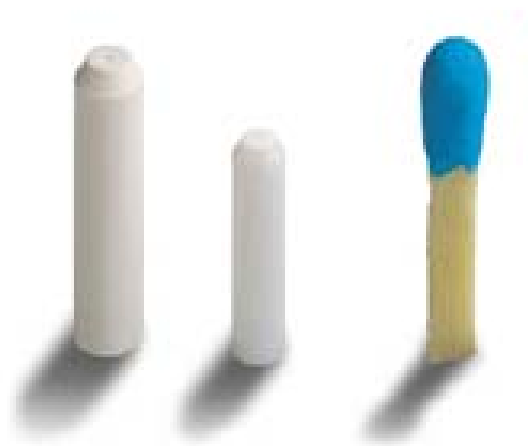


Bild 10: Gespritzte Lichtleiterstecker aus Keramik



Bild 11: Keramisches Mahlwerk, spritzgegossen aus Aluminiumoxid



Bild 12: Spritzgussmaschine der Fa. Arburg wie sie bei der Herstellung von Keramikbauteilen zum Einsatz kommt



Bild 13: Einbau eines Spritzgusswerkzeugs

Allen genannten Formgebungsverfahren kann je nach Funktionsanforderung eine Nachbearbeitung oder Veredelung folgen, wie z.B.:

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

2.4.5. Festlegung der Geometrie

Der wohl wichtigste Punkt für die Herstellbarkeit eines keramischen Bauteils ist die gewünschte Geometrie und die geforderte Genauigkeit. Bei der Betrachtung der ihm überlassenen technischen Zeichnungen stößt der Keramikerhersteller immer wieder auf für Metalle typische Anforderungen.

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

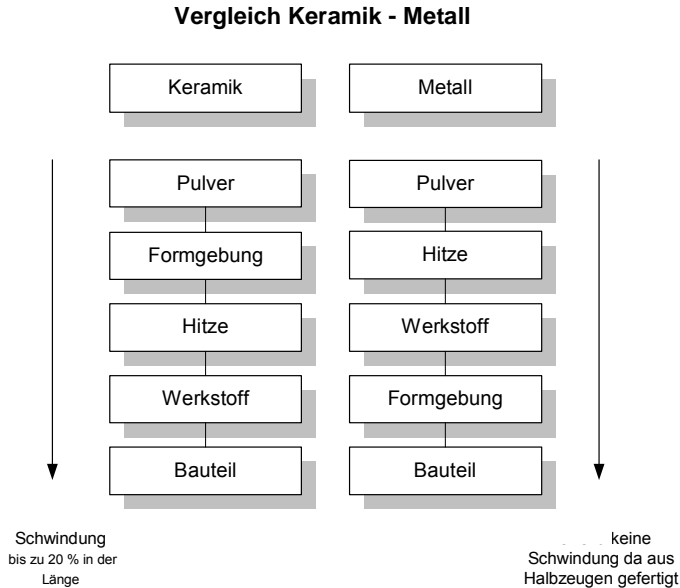


Bild 14: Herstellungsprozess von Keramik und Metall

Die Einhaltung der für Metall typischen engen Toleranzen hat bei der Herstellung keramischer Bauteile meist eine Nachbearbeitung zur Konsequenz. Dies ist bei Keramikbauteilen, je nach verwendetem Werkstoff, nur mit Diamantwerkzeugen möglich und beeinflusst den Bauteilpreis entscheidend.

Zur Optimierung der Geometrie eines keramischen Bauteils ist es daher unerlässlich, zwischen Toleranzen für Funktionsflächen und Allgointoleranzen zu unterscheiden. Außerdem sollte die Geometrie nach bestimmten, auf Keramik zugeschnittenen Kriterien, gestaltet werden.

Folgende Grundregeln finden dabei Anwendung:

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

Tabelle 4: 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)

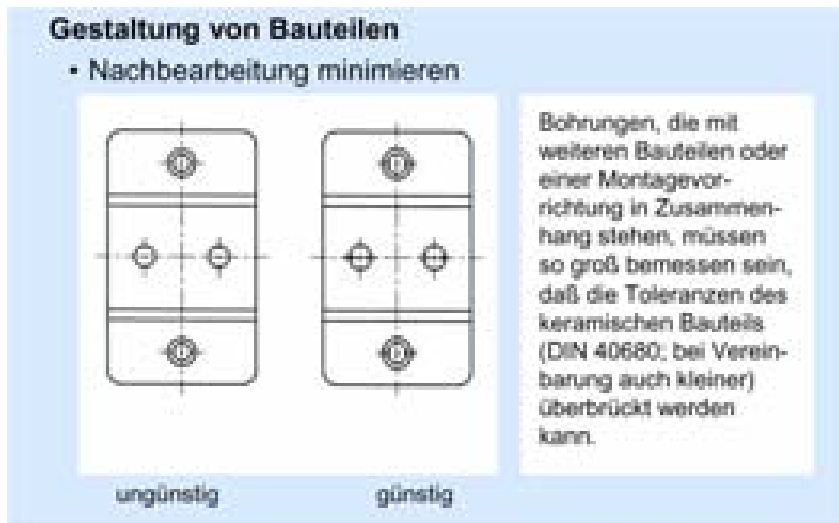


Bild 15: Bohrungen in keramischen Bauteilen

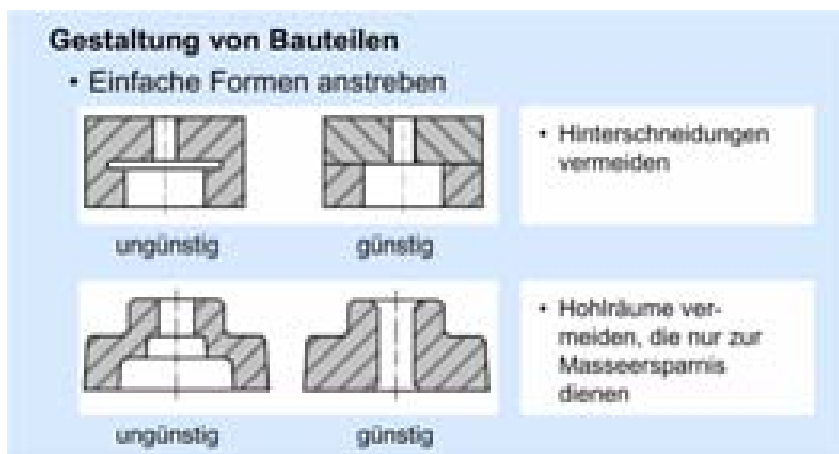


Bild 16: Einfache Formen anstreben

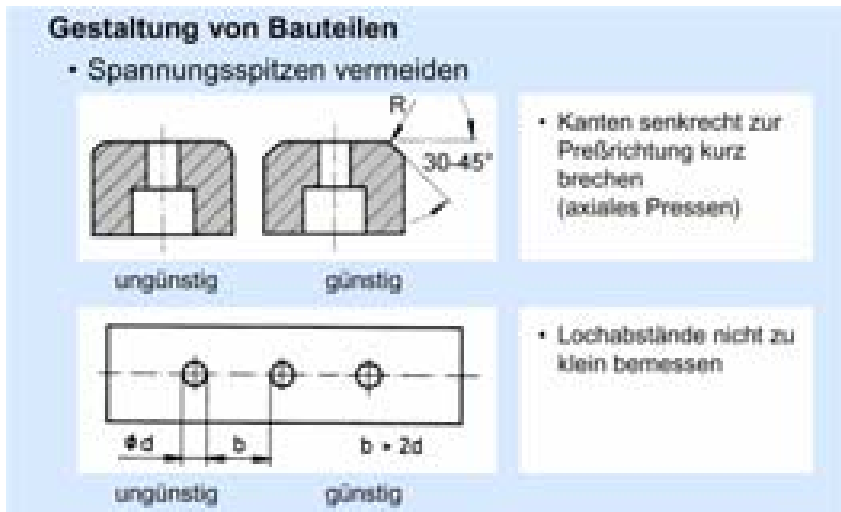


Bild 17: Spannungsspitzen vermeiden (1)

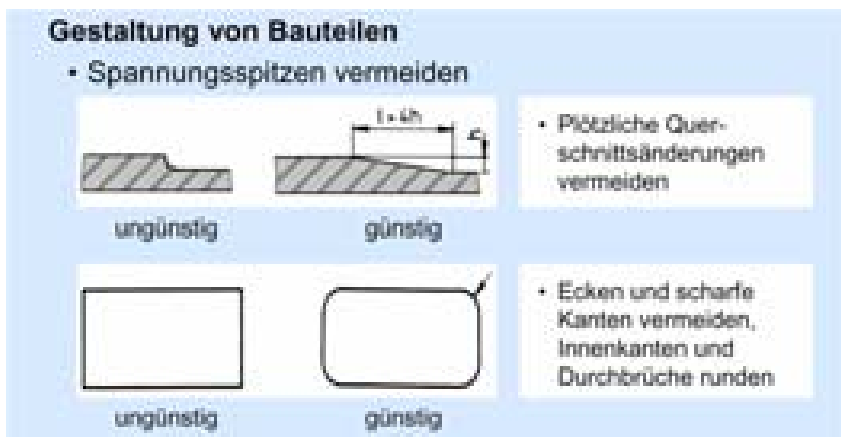


Bild 18: Spannungsspitzen vermeiden (2)

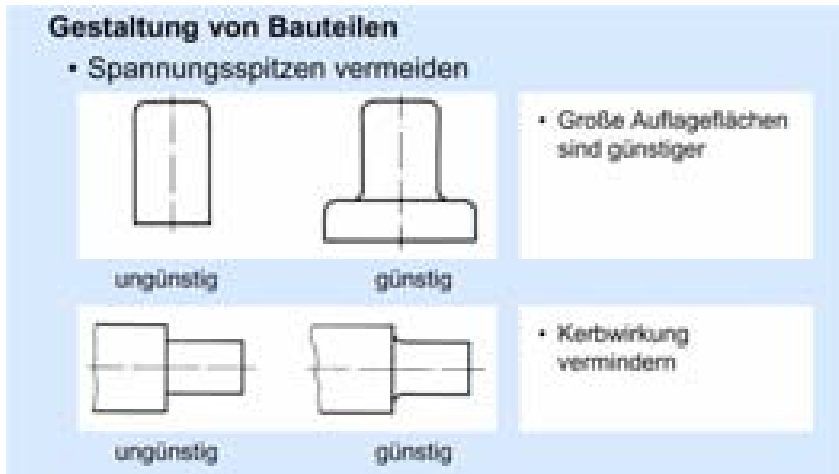


Bild 19: Spannungsspitzen vermeiden (3)



Bild 20: Materialanhäufungen vermeiden

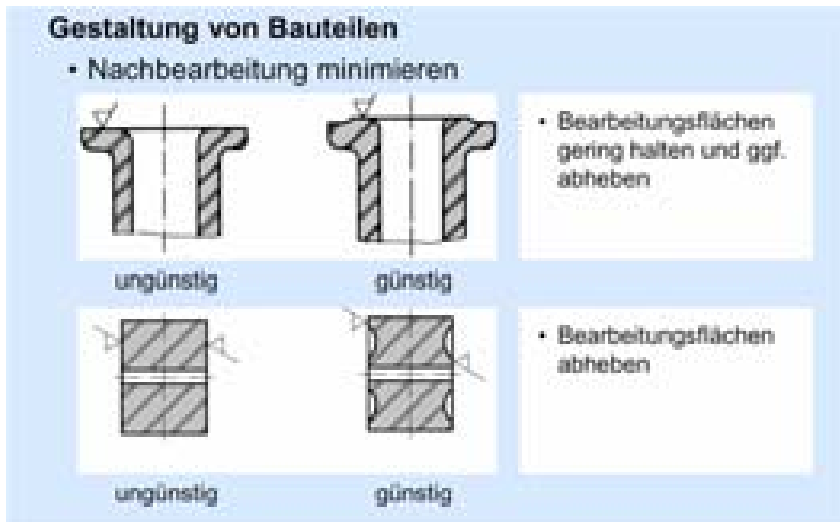


Bild 21: Nachbearbeitung minimieren

Folgende Regeln gelten:

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

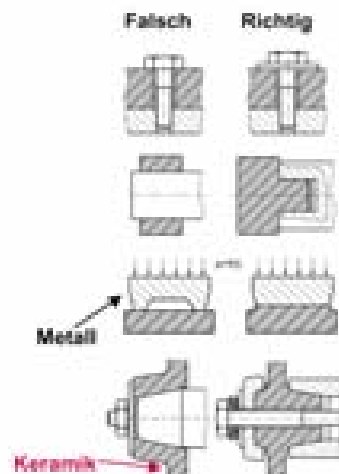


Bild 22: Nachbearbeitung minimieren

2.4.6. Serieneinführung – vom Prototypen zum Serienteil

Sind alle vorab genannten Punkte geklärt und eine für beide Seiten akzeptable Lösung gefunden, können die ersten Bauteile als Prototypen hergestellt werden. Diese werden z.B. aus vorgeformtem Vollmaterial herausgearbeitet. Auch die Herstellung eines Pilotwerkzeugs kann in Betracht gezogen werden. Damit können auch erste Kleinserien gefertigt werden. Die Herstellung nach dem Rapid Prototyping wie derzeit im Metall- und Kunststoffbau üblich, ist bei keramischen Bauteilen industriell noch nicht möglich.

Sind die Prototypen erfolgreich getestet und der Preis als weitere entscheidende Bauteileigenschaft entspricht den Vorstellungen des Kunden, kann der Bau eines Serienwerkzeugs beginnen.

Wie jedoch meist in der Praxis üblich, sind vor der Serienfertigung eines Bauteils einige Optimierungsschleifen zu durchlaufen. Je nach Kundenwunsch erfolgt die Festlegung der Spezifika für die Bemusterung der Teile z.B. nach kundeneigenen Kriterien oder wie in der Automobilbranche üblich nach genormten Kriterien, wie z.B. PPAP.

Bei der anfänglichen Serienteilelieferung sollte schließlich eine Sensibilisierung der Wareneingangskontrolle und der Fertigung des Kunden für den „neuen, etwas anderen Werkstoff“ Keramik erfolgen.

Lassen Sie sich also bei der Einführung eines keramischen Bauteils durch einen Keramikhersteller begleiten und zu folgenden Punkten intensiv beraten:

- Werkstoff
- Geometrie
- Toleranzen
- Zeitlicher Ablauf

Damit ist gewährleistet, dass Sie ein optimales Keramikbauteil, auch bezüglich Preis-Leistungs-Verhältnis, erhalten.

2.4.7. Bemerkungen zu Preisfindung

Der Preis eines keramischen Bauteils wird in erster Linie **nicht** vom Material bestimmt sondern durch Formgebung und Brand. Preisvergleiche sollten systemübergreifend sein.

2.4.8. Bemerkungen zu Lieferzeit

Bei der Neueinführung keramischer Teile spielt die Freigabeproofungen durch den Kunden eine wichtige Rolle. Dem Anwender sollte klar sein, dass die Bauteileigenschaften oft formgebungsabhängig sind. Muster müssen daher i.d.R. serienfertigungsnah produziert werden. Lieferzeiten sind daher auch abhängig vom Werkzeugbau. Formgebung und Brennen von Keramik sind aufwändige Verfahren. Ihr Keramikhersteller hilft gern bei speziellen Dispositionen, so dass Lieferzeiten keine Rolle spielen sollten.

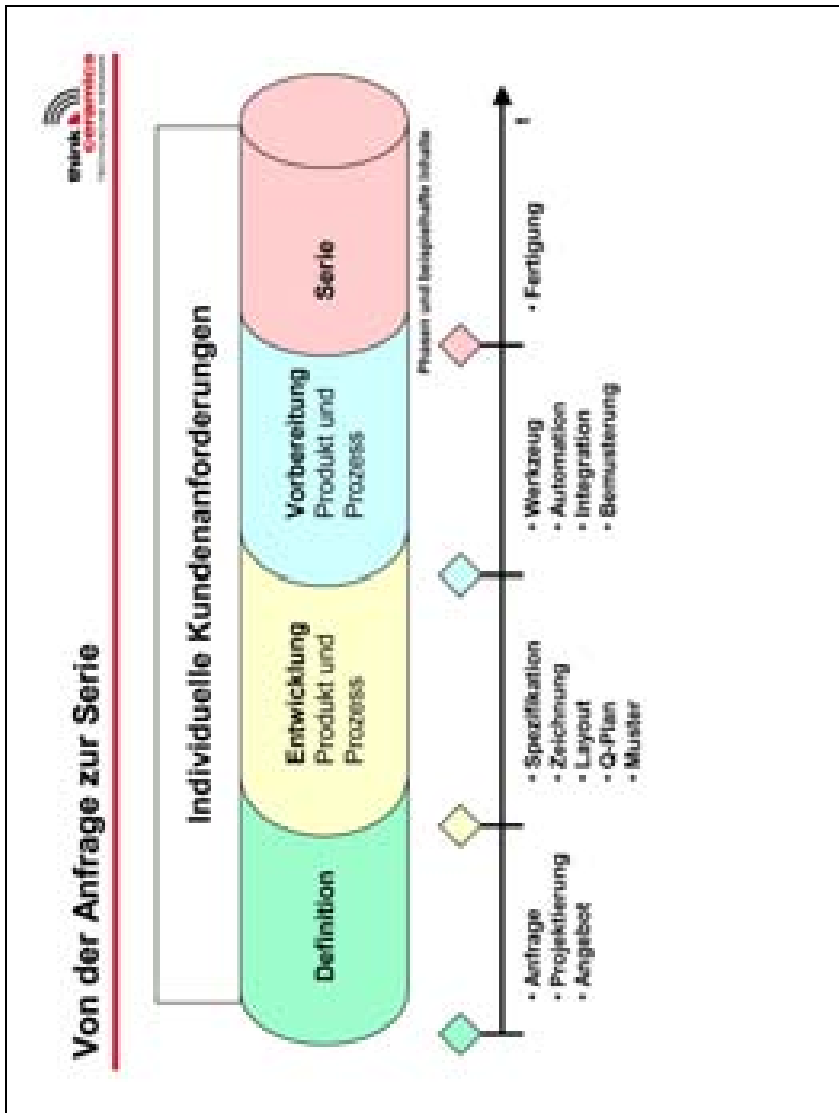
Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 22) finden sich auf den folgenden Seiten.

Einführung

**Service auf dem Weg zum
keramischen Bauteil**

Ines Durmann
Sembach GmbH & Co. KG
Lauf a.d. Pegnitz







Klärungen mit dem Kunden

- Werkstoffauswahl
- Geeignetes Fertigungsverfahren
- Festlegung einer optimalen Geometrie
- Stückzahl
- **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

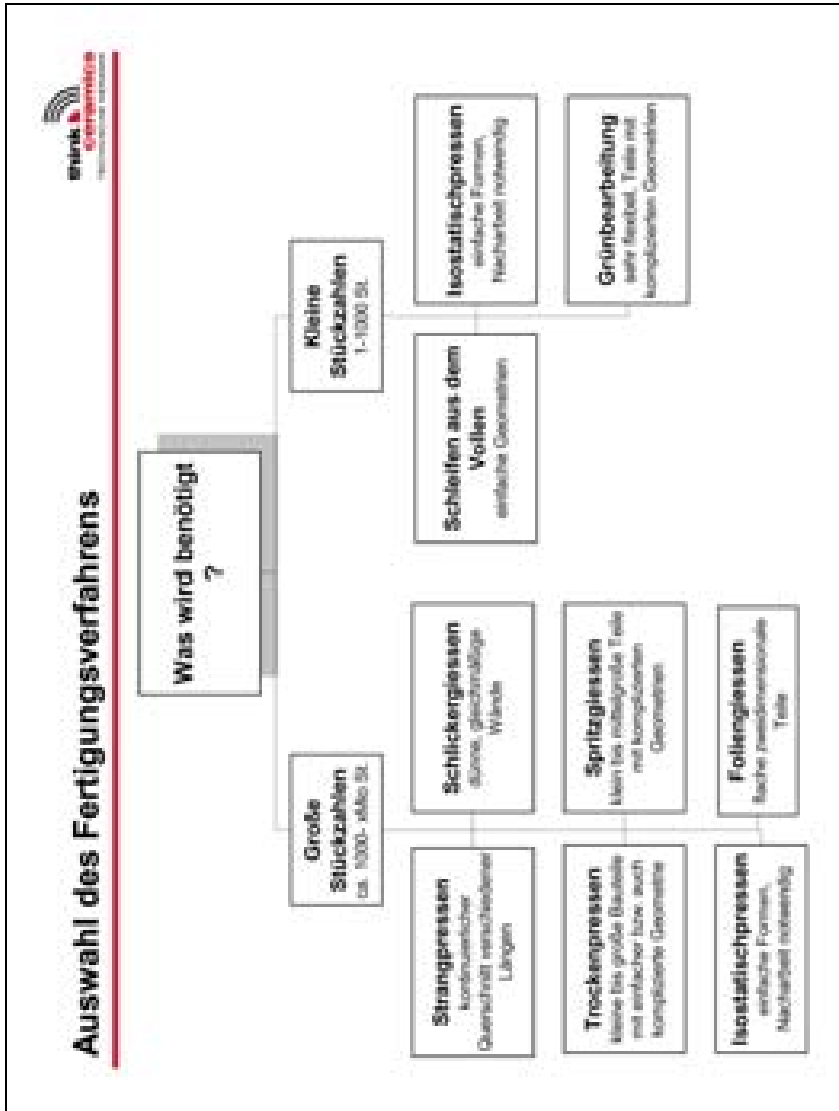


Chemische Umgebung



- Säure- bzw. Laugenbeständigkeit
- andere Umwelteinflüsse wie z.B. UV-Beständigkeit





Foliengießen



- Großflächige, dünne keramische Bauteile
- Bauteildicke 0,2 - 1,5 mm
- Mehrschichtaufbau möglich durch Laminieren
- Entwickelt zur Herstellung elektronischer Bauteile

Strangpressen (Extrusion)



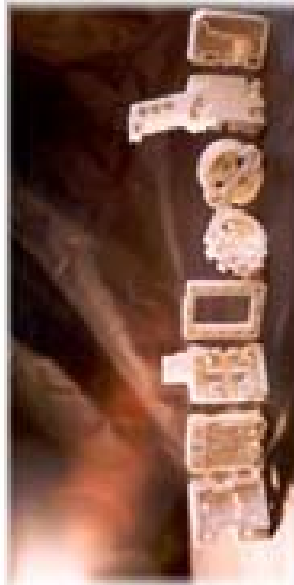
- Achsymmetrische Querschnitte
- Enden offen
- Klein-/Großserie
(Mehrfachwerkzeug)
- Freimaßtoleranz DIN 40680
mittel



Trockenpressen



- Hochautomatisierter Prozeß → Wandstärken = f(Bauteilhöhe)
- Mehrfachwerkzeuge → Bauteilhöhe / Bodenstärke < 4
- Großserie → Bis 5 mm ± 0,1 mm
5 bis 10 mm ± 0,15 mm
> 10 mm ± 1,5%



Isostatistisches Pressen

+ Grünbearbeitung

- Großvolumige Bauteile
- Kleinserie/Prototypen
- Mehrfachbearbeitung möglich



Spritzguß (CIM)

- Endkonturnahe Formgebung komplexer Geometrien
- Mehrfachwerkzeuge
- Hoher Automatisierungsgrad möglich
- Kleinserie/Großserie
- Toleranz $\pm 1\%$
- Wandstärke ≤ 10 mm

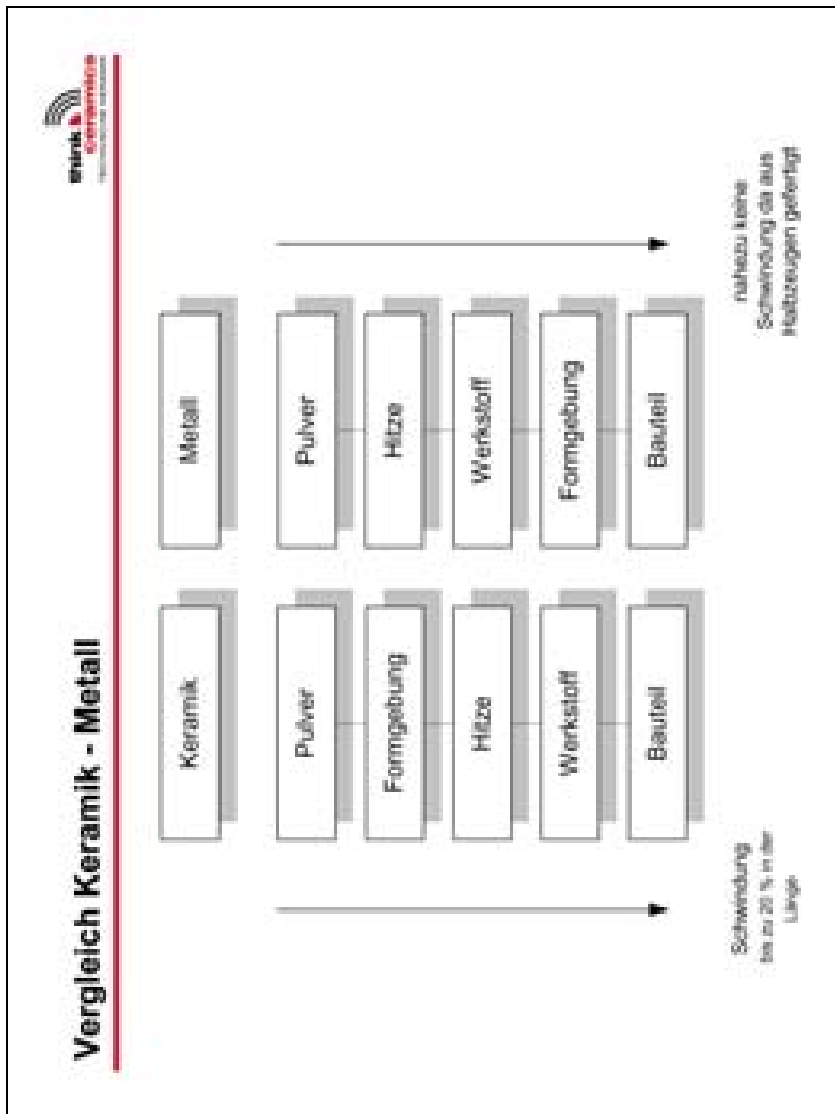


Gemeinsamkeiten



- Dimensionen von wenigen Millimetern bis zu einigen Metern sind möglich
- Werkzeugkosten fallen an, da keramische Bauteile normalerweise keine Katalogware darstellen.
- Kombination mit Grünbearbeitung ist bei allen Verfahren machbar.
- Formgebung eines keramischen Werkstoffes ist mittels verschiedener Verfahren möglich.
- Engste Toleranzen und beste Oberflächengüten ⇒ Nachbearbeitung





2.4 Folie 15

Grundregeln zur Formgebung

Grundregel	Konsequenz
Einfache Formen	<ul style="list-style-type: none"> • Formen dem entsprechenden Urformverfahren anpassen • Urform- und Sintervorgang erleichtern • Modulaufweise bei komplizierten Formen
Spannungsspitzen vermeiden	<ul style="list-style-type: none"> • keine plötzlichen Querschnittsveränderung • Kerben, Ecken und scharfe Kanten minimieren • Kräfte großflächig einleiten
Zugspannungen minimieren	<ul style="list-style-type: none"> • Vorgabe beanspruchungsgerechter Querschnitte • Erzielen von Druckspannungen • keramigerechte Gestaltung der Urkräfteinleitung
Materialaufnungen vermeiden	<ul style="list-style-type: none"> • geringe Wandstärkedifferenzen • Querschnittsprünge vermeiden • Knotenpunkte auflösen
Nachbearbeitung minimieren	<ul style="list-style-type: none"> • Grünbearbeitung ist günstiger als Endbearbeitung • Kantenrundungen vermeiden • Ausbrüche • kleine und abgesetzte Bearbeitungsfächen
Beachtung Fertigungsverfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Entformbarkeit erleichtern • günstige Urformverfahren ermöglichen • Hinterschneidungen vermeiden

Einfache Formen anstreben

Gestaltung von Bauteilen

- Einfache Formen anstreben

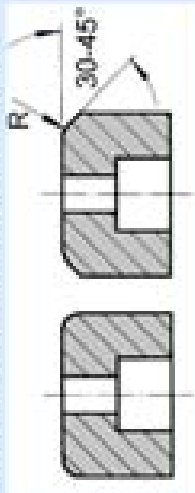
• Hinterschneidungen vermeiden

• Hohlräume vermeiden, die nur zur Masseersparnis dienen

Spannungsspitzen vermeiden (1)

Gestaltung von Bauteilen

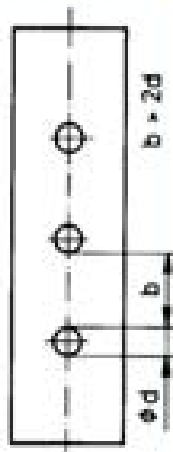
- Spannungsspitzen vermeiden



- 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



ungünstig

günstig

- Plötzliche Querschnittsänderungen vermeiden



ungünstig

günstig

- Ecken und scharfe Kanten vermeiden, Innenkanten und Durchbrüche runden

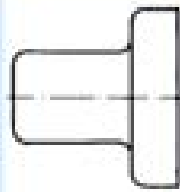
Spannungsspitzen vermeiden (3)

Gestaltung von Bauteilen

- Spannungsspitzen vermeiden

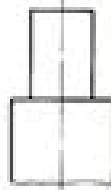


ungünstig



günstig

- Große Auflageflächen sind günstiger



ungünstig



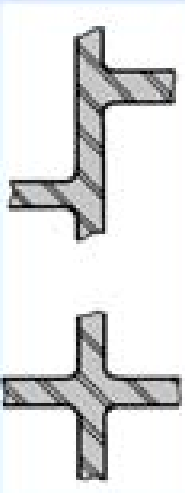
günstig

- Kerbwirkung vermindern

Materialanhäufungen vermeiden

Gestaltung von Bauteilen


- Materialanhäufungen vermeiden



• Knotenpunkte auflösen

ungünstig

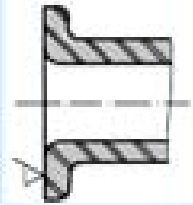
günstig



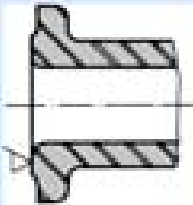
Nachbearbeitung minimieren

Gestaltung von Bauteilen

- Nachbearbeitung minimieren

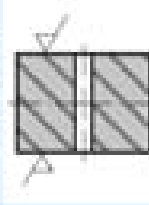


ungünstig

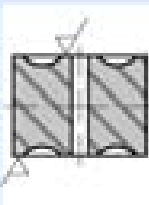


günstig

- Bearbeitungsflächen gering halten und ggf. abheben



ungünstig



günstig

- Bearbeitungsflächen abheben