

3.2 Keramische Werkzeuge für die Massivumformung

- Holger Wampers
H.C. Starck Ceramics GmbH & Co, KG
Selb

Die Folien finden Sie ab Seite 210.

3.2.1. Einleitung

Zur Massivumformung zählen verschiedene Umformtechniken wie:

- Walzen
- Fließpressen
- Schmieden
- Drahtziehen
- Tiefziehen u.a.,

die selbst mehrstufig ausgeführt und zusätzlich untereinander kombiniert werden können. Dabei werden meist metallische Werkstoffe als Matrizenwerkstoffe eingesetzt, die je nach Verschleißsystem einem mechanisch-chemischen Verschleiß unterliegen. Der Verschleiß bewirkt eine Toleranzaufweitung des Formteils und meistens auch eine Verschlechterung der Oberfläche. Dabei spielt die Adhäsion der im Kontakt stehenden Oberflächen der Reibpaarung eine wesentliche Rolle. Je höher die Reibung, desto höher wird der Verschleiß ausfallen. Um dies zu vermeiden gibt es eine Fülle von Schmiermitteln, die zur Reibungsreduzierung durch Trennung der Kontaktflächen führen.

Beim Einsatz von keramischen Werkstoffen in der Umformtechnik wird diese Problematik vermieden, Keramiken weisen in den allermeisten Fällen einen Reibungskoeffizienten von $\mu < 0,1$ im Gleitkontakt mit Metallen auf und können daher auch zur Schmiermittelreduktion (oder –substitution) eingesetzt werden. Aufgrund ihrer generellen Eigenschaften wie hohe Härte und hohe max. Einsatztemperatur bieten Keramiken ein großes Potential, wenn es um Verschleißreduktion und Verbesserung der Oberflächengüten geht.

3.2.2. Eigenschaften

Der Einsatz in der Massivumformung bringt aber auch hohe Last – und Verbundspannungen mit sich, die rasch kritische Zugspannungsniveaus erreichen können. Zusätzlich treten Anforderungen bezüglich Thermoschockbeständigkeit, Toleranzen (Bearbeitbarkeit) und möglichst hoher Schadenstoleranz auf. Aus der Palette der heute zur Verfügung stehenden Hochleistungskeramiken vereinigt Siliciumnitrid diese Eigenschaften am Besten auf sich und wird in den allermeisten Fällen als keramischer Matrizenwerkstoff eingesetzt. Neben der hohen Festigkeit zählen Thermoschockbeständigkeit bis zu $\Delta T = 600^\circ\text{C}$ (R1) und ein hoher Bruchzähigkeitswert von $K_{IC} = 6,5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ zu seinen Eigenschaften. Als kleiner Nachteil gilt die für Keramiken recht „geringe“ Härte von $\text{HV}_{10} = 15,2 \text{ GPa}$, was ungefähr auf Hartmetallniveau liegt (je nach Zusammensetzung).

Die Einflüsse auf die Werkzeugstandzeit sind durch die „keramische Brille“ zu sehen und auf die keramischen Belange zu übersetzen. Der Aufbau eines Werkzeugs ist genauestens zu prüfen und die jeweiligen Beanspruchungen (Radial- bzw. Tangentialspannungen) zu analysieren. Die keramiktypischen Eigenschaften wie statistisches Versagensverhalten (Weibullmodul) und zugspannungsvolumenabhängige Festigkeit können bei den meist komplexen Werkzeugen nicht mehr analytisch sondern nur noch mit der FEM (Finite-Element-Methode) berücksichtigt werden. Mit der FEM sind auch Aufgabenstellungen nach notwendiger Vorspannung (Radial-, Tangential- und Axialvorspannung) des keramischen Inserts zu lösen. Keramiken können auch einem chemischen Verschleiß unterliegen, wenn die keramische Bindephase zwischen den Körnern angegriffen wird. Dieser tribochemische Verschleiß, der auch zu sogenannten Tribooxidationsschichten führt, verursacht einen schichtweisen Verschleiß der Oberfläche bis das Werkzeug aus der Toleranz läuft. Durch die hohen max. Einsatztemperaturen bei Keramiken ergibt sich eine gute Eignung in der Halbwarm-Massivumformung (750°C - 850°C), bei der die Umformteile schon vorgewärmt sind und daher geringere Umformkräfte bedingen als in der Kaltmassivumformung.

3.2.3. Tribosysteme

Verschleiß selber ist eine Systemgröße, d. h. er hängt von mehreren Einflussgrößen ab die wiederum interagieren. Das Tribosystem bestehend aus dem Grund- und Gegenkörper und dem Schmierstoff wird durch Einflussgrößen wie Kenngrößen (Drehmoment, Kraft- und Bewegungsübertragung), Zeitverhalten (oszillierend, intermittierend, kontinuierlich), der Bewegungsart und dem Lastkollektiv beeinflusst. Daraus resultierend ergeben sich dann die Verschleißgrößen wie Reibung und Verschleiß.

3.2.4. Beispiel Schmieden mit Keramik

Aus einem mit dem IFUM Hannover durchgeführten Projekt konnten Ergebnisse für das Schmieden mit Keramik gewonnen werden. Dabei wurden Einsätze aus verschiedenen Siliciumnitridvarianten in einem Werkzeugeinsatz verlötet und dann im Schmiedeprozess eingesetzt. Bis zu einer Schmiedetemperatur von 1.000°C konnte die Keramik gegenüber Stahl eine ungefähr 6-fach bessere Standzeit erreichen, bis zu 1.250°C war sie noch 3-fach besser. Bei diesen hohen Kontakt-Temperaturen setzt die Oxidation der Oberflächenbereiche ein und beeinträchtigt das Materialverhalten. Die Schmiedetemperatur bezieht sich auf die Werkstücktemperatur, die Matrize wird gekühlt.

Bei Variationen der Siliciumnitridvarianten untereinander ist festzustellen, dass gerade die Variante mit höchster Härte die schlechteste Standzeit erreicht hat. Der Verschleißwiderstand ist nicht nur abhängig von der Härte, sondern auch von Bruchzähigkeit, Reibung etc. Das hochtemperaturbeständige Material kommt ohne Glasbindephase aus, was hier anscheinend einen wichtigen Einfluss ausübt. Ebenso spielt die Reibung eine Rolle. Aus hausinternen Materialuntersuchungen ist bekannt, dass das elektroerosiv bearbeitbare SN (N 3050) einen sehr niedrigen Reibungskoeffizienten aufweist. Dieses spiegelt sich in dieser Untersuchung durch den geringen Verschleiß wieder. Die Schmierung übt einen deutlichen Einfluss auf den Prozess aus. Durch die Verwendung von graphitfreien Schmiermitteln drehen sich die vorher ermittelten Ergebnisse um, der Werkstoff mit der höheren Härte liegt nun besser als der Partikelcomposite. Bei der Verwendung von graphithaltigen Schmiermitteln liegen beide Werkstoffe gleichauf. Die Schmiermittelmenge spielt ebenfalls eine wichtige Rolle, so ist das Optimum der Schmiermittelmenge für jeden Prozess zu ermitteln.

3.2.5. Beispiel Fließpressen

Das Fließpressen stellt einen intermittierenden Prozess dar, bei dem der Umformwerkstoff durch eine sich verjüngende Öffnung gepresst wird. Die Auslegung von Werkzeugen muss auf Grund der sehr hoch auftretenden Kräfte im Prozess immer gewährleisten, dass das Werkzeug immer unter Druckvorspannung gehalten wird. Zur Dehnungsbegrenzung empfiehlt es sich, die Keramik mit Hartmetallringen zu fassen, da Hartmetall einen rd. doppelt so hohen E-Modul besitzt wie Siliciumnitrid.

Der logarithmische Umformgrad φ definiert das logarithmische Verhältnis des Einfluss- zu Ausflussquerschnitts. Je höher der Umformgrad desto größer die Querschnittsverengung. Die Schmierstoffe besitzen einen vom Umformgrad abhängigen Einfluss. Während bei Umformgraden von $\varphi = 0,49$ ein nur geringer Einfluss zu erkennen ist, ist bei einem hohen Umformgrad von $\varphi = 0,94$ ein deutlicher Einfluss zusehen. Generell bewirkt die Keramik um rd. 15% reduzierte Umformkräfte und erzeugt Rauigkeiten von $Ra < 0,5 \mu m$ am Formteil (bei korrekter Schmierung). Die Stempelkraft hingegen wird vom Schmierstoff kaum beeinflusst, auf die Reibung wird ein nur geringer Einfluss festgestellt. Abhängig von der Temperatur und dem Umformgrad existieren auch nicht-lineare Zusammenhänge mit der Reibung. Für rund $800^\circ C$ kann ein Minimum der Reibung in diesem Temperaturbereich existieren. Die Reibung unter- und oberhalb dieses Betriebspunkts steigt wieder an. Das Fließpressen macht deutlich, dass es eine Vielzahl von Parametern gibt, die den hochkomplexen Umformprozess beeinflussen. Durch die Auslegung des Werkzeugs mit numerischen Methoden kann eine möglichst hohe Druckvorspannung auslegungsseitig gewährleistet werden, die Optimierung mit den Parametern Schmierstoff (Art und Menge) und Temperatur müssen aber am System selber durchgeführt werden.

3.2.6. Auslegung mit der FEM

Aus der FEM können einerseits die durch die Einspannung resultierenden Spannungen ermittelt werden, andererseits die für die Keramik relevanten Bruchwahrscheinlichkeiten berechnet werden. Da die statistische Bruchspannungsverteilung von Keramiken nicht über eine Normalverteilung, sondern die so genannte Weibullverteilung beschrieben wird, müssen zur Versagensbeurteilung von Keramiken andere Kriterien als bei Metallen (z. B. Gestaltänderungsenergiehypothese GEH) herangezogen werden. Des weiteren gilt es das zugspannungsvolumenabhängige Verhalten der Keramik zu beachten. Über die FEM ist es möglich das effektiv auf Zug beanspruchte Volumen durch numerische Lösung zu berechnen und über die Verwendung der Parameter Weibullmodul m (Maß für die Homogenität der Fehlerverteilung) und der Normierungsspannung σ_{0v} (bezogen auf effektives Volumen $V_{\text{eff}}=1\text{mm}^3$ und Bruchwahrscheinlichkeit $F=63,2\%$) eine für den Spannungszustand resultierende Bruchwahrscheinlichkeit zu berechnen. Dazu werden eigens entwickelte Postprozessoren eingesetzt. So können auch die durch Steifigkeitssprünge resultierenden Zugspannungen auf Ihre Bruchrelevanz (=Bruchwahrscheinlichkeit) beurteilt werden.

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

Keramische Werkzeuge für die Massivumformung

Holger Wampers
H.C. Starck Ceramics GmbH & Co. KG
Selb

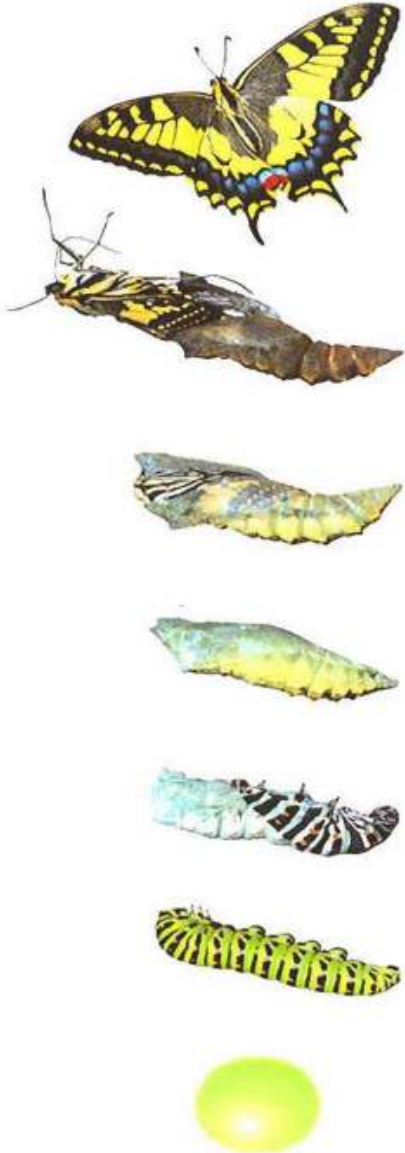


Inhalt

- 1. Einleitung**
- 2. Eigenschaftsvergleich Stahl-Hartmetall-Keramik**
- 3. Tribosystem**
- 4. Schmieden mit Keramik**
- 6. Fließpressen mit Keramik**
- 7. FEM-Berechnung**
- 8. Bauteile**
- 9. Zusammenfassung**

Einleitung - Fertigungsverfahren Massivumformung

think ceramics
TECHNISCHE KERAMIK



Walzen

Fließpressen

Schmieden

Tiefziehen

Drahtziehen









Quelle: Hatebur - Prospekt 2006

3.2 Massivumformung - Folie 3

Einleitung



Einsatzziele keramischer Werkzeuge:

- Verschleißreduzierung
- Schmiermitteloptimierung (Menge, Art)
- Erzielung besserer Oberflächengüten

Nutzbare Eigenschaften:

- hohe Härte
- geringere Adhäsionsneigung
- geringer Reibkoeffizient
- hohe max. Einsatztemperatur
- hohe Steifigkeit (E-Modul)

Keramikgerechte Konstruktion berücksichtigt:

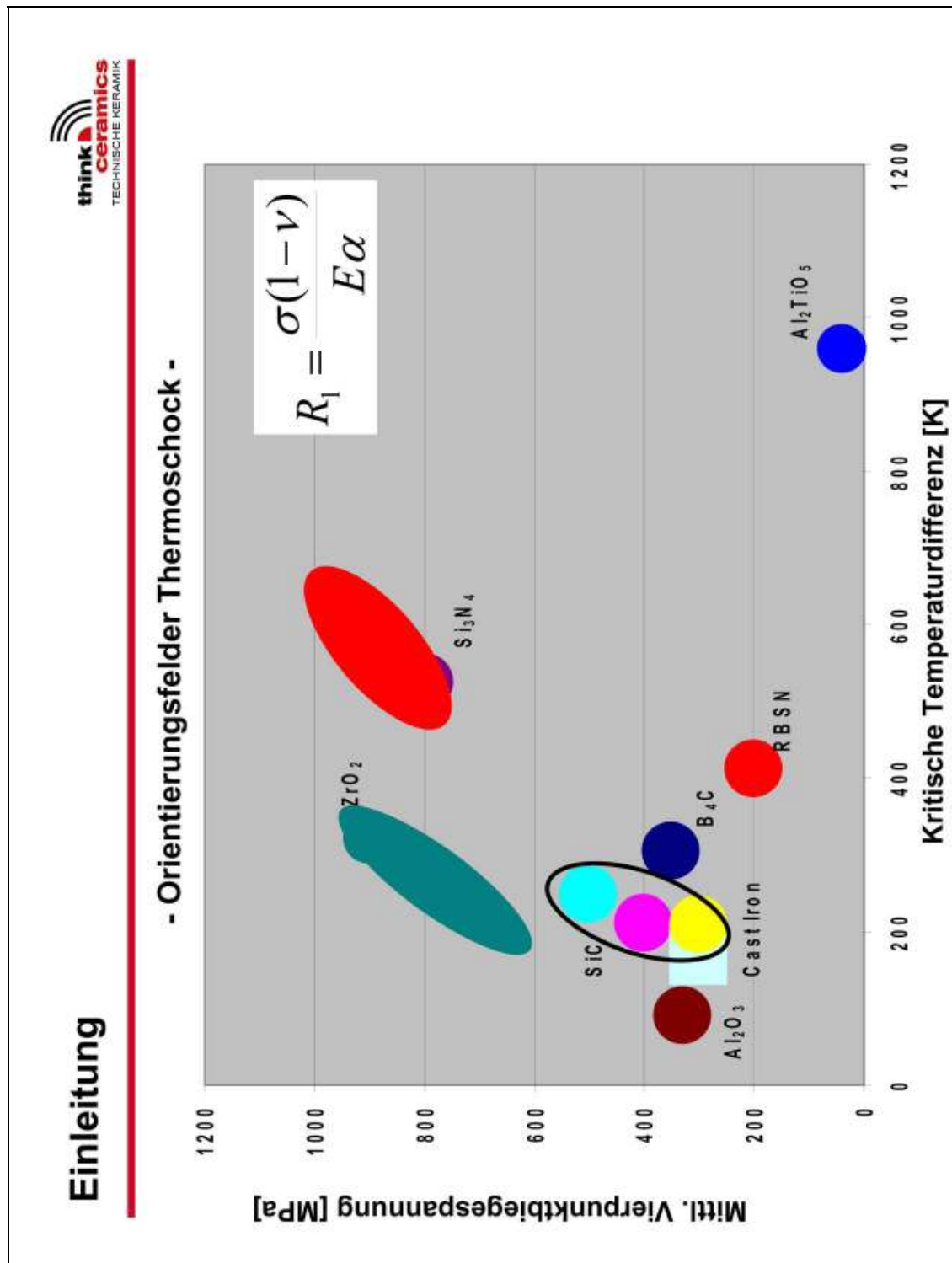
- statistisches Versagensverhalten
- niedrige Bruchzähigkeit (K_{IC})
- Thermoschockempfindlichkeit
- kleine Wärmedehnung (i. V. zur Peripherie)
- Bearbeitbarkeit

Einleitung

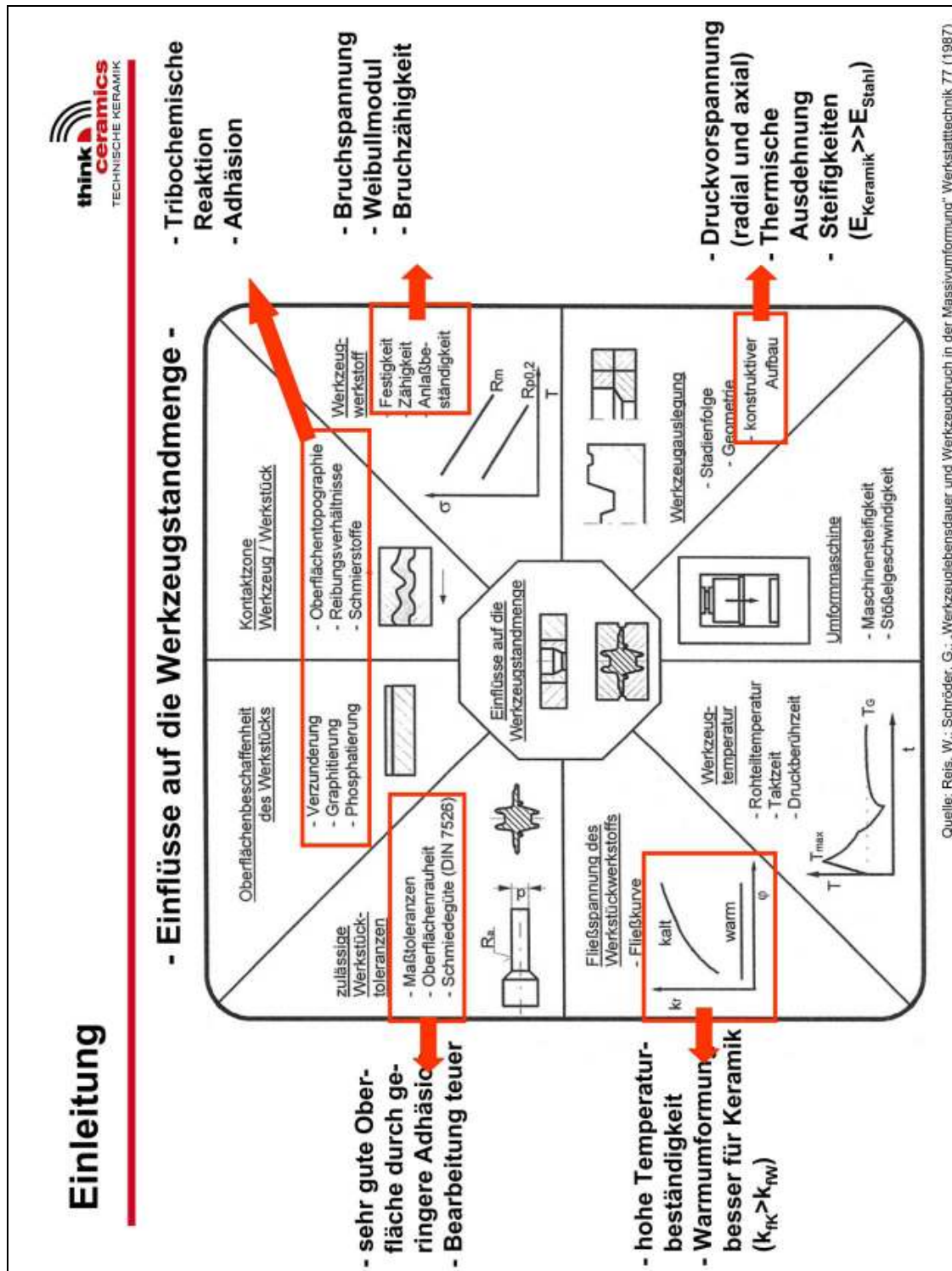


- Eigenschaftsvergleich Stahl/ Hartmetall /SN-Keramik -

	Stahl (34CrAINi7)	Hartmetall (WC)	Siliciumnitrid (100bar)
Dichte ρ [g/cm ³]	7,6	15	3,23
Biegefestigkeit σ (RT) [MPa]	900	1600	$\sigma_o=800$; $m=15$
Biegefestigkeit σ (1200°) [MPa]	-	800	$\sigma_o=500$; $m=15$
E-Modul [GPa]	210	600	300
Ausdehnungskoeffizient α [1/K]	$13 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-6}$
Wärmeleitfähigkeit λ (RT) [W/mK]	100	50	25
Bruchzähigkeit K_{Ic} [MPa√m]	80	20	6,5
Härte HV 10 [GPa]	9,5	22	15,2



3.2 Massivumformung - Folie 6



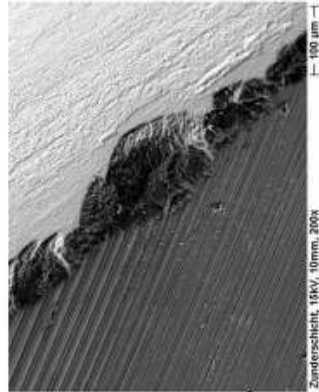
3.2 Massivumformung - Folie 7

Tribosysteme

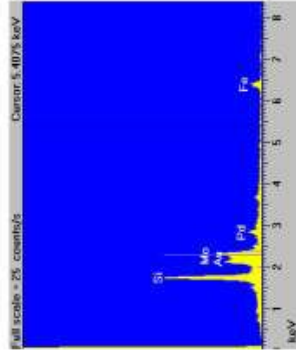
- Struktur und Einflußgrößen -



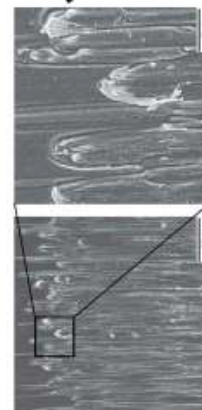
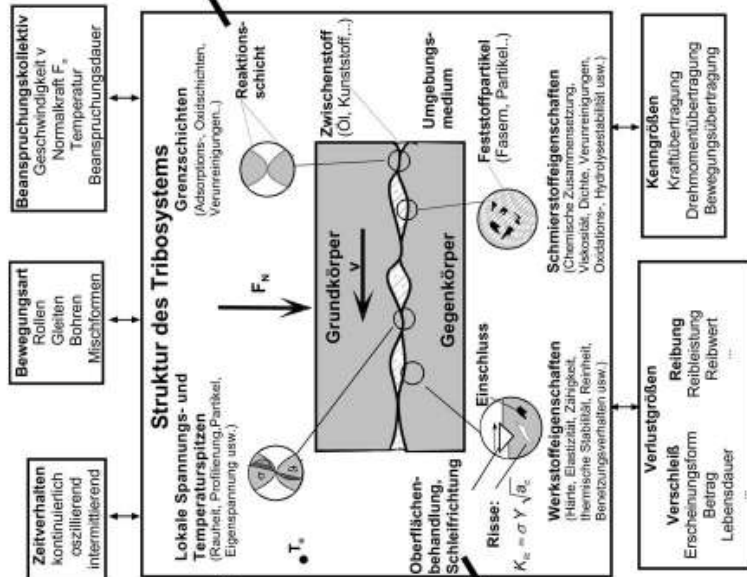
Ausbruch durch
Spannungsspitze



Zunderschicht auf
Keramikoberfläche



Analyse der Oberflächen-
rückstände (Schmiermittel)

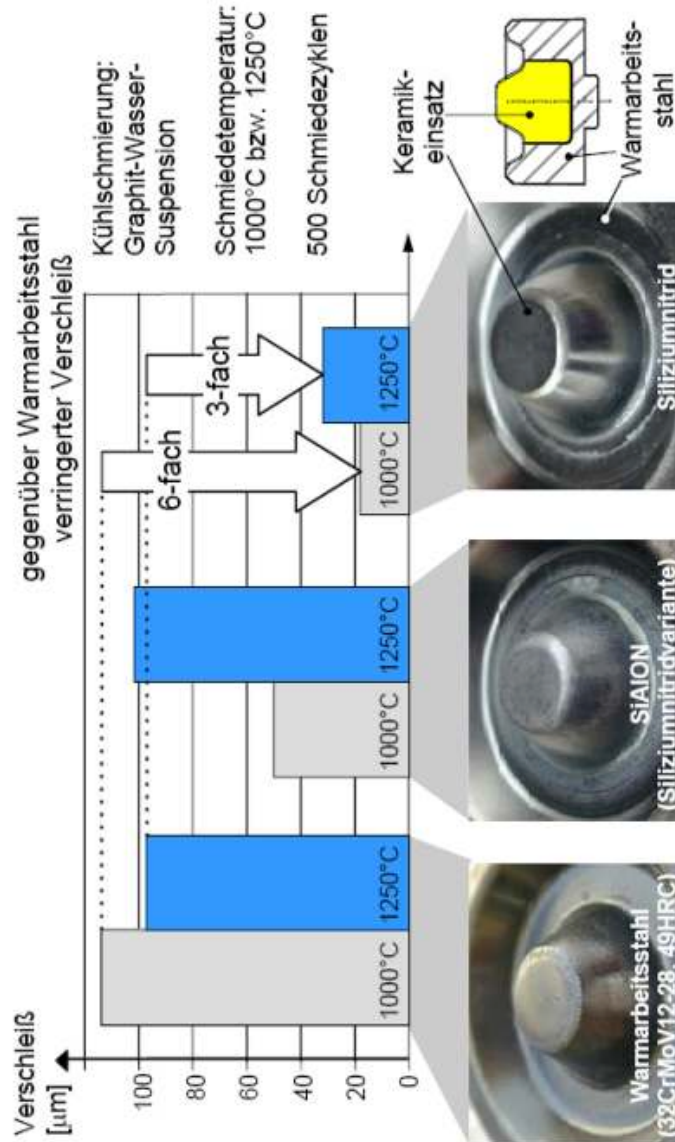


Verschleißriefen auf
Oberfläche (Keramik)

Schmieden mit Keramik



- Verschleißvergleich mit Stahlwerkstoffen -

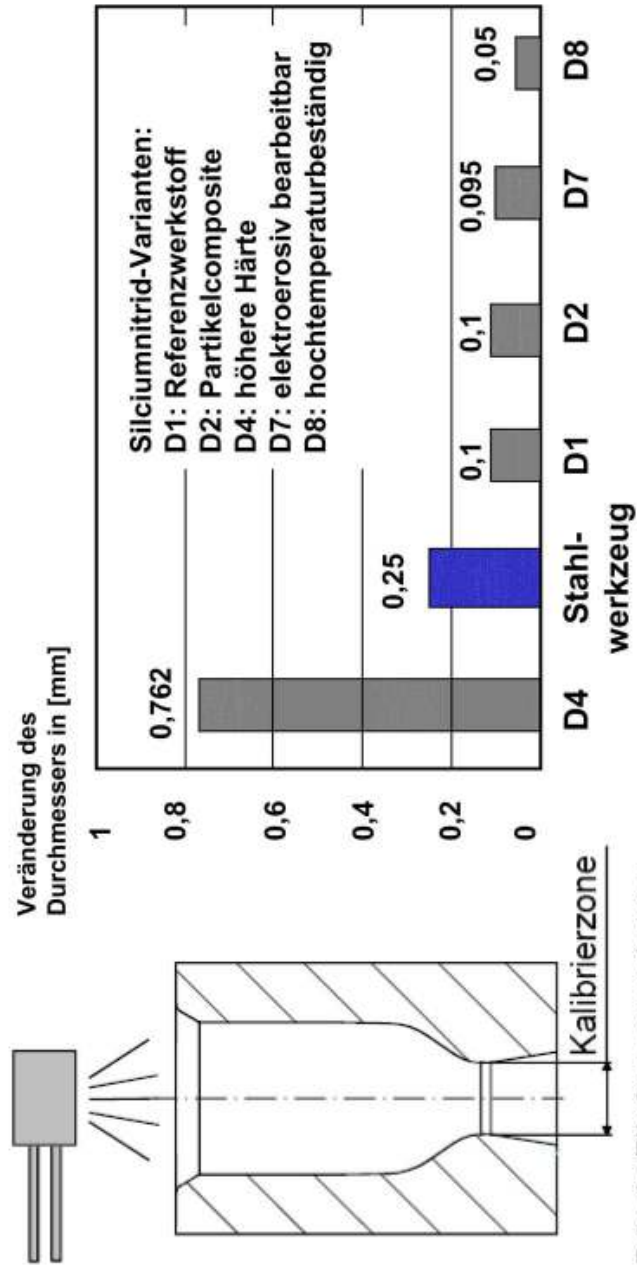


Quelle: Barnert, L. BMBF-Malech Forschungsvorhaben 03N 5022B/3
„Ermittlung der Prozessparameter für keramische Umformwerkzeuge
und Bewertung des Einsatzverhaltens“ 2001, IFUM Hannover

Schmieden mit Keramik

- Verschleißvergleich mit Stahlwerkstoffen -

Verschleiß der Kalibrierzone durch Abtrag nach 1.000 Schmiedezyklen



Prinzip Fließpresswerkzeug
mit Kalibrierzone

Schmiedetemperatur: 1.200 °C

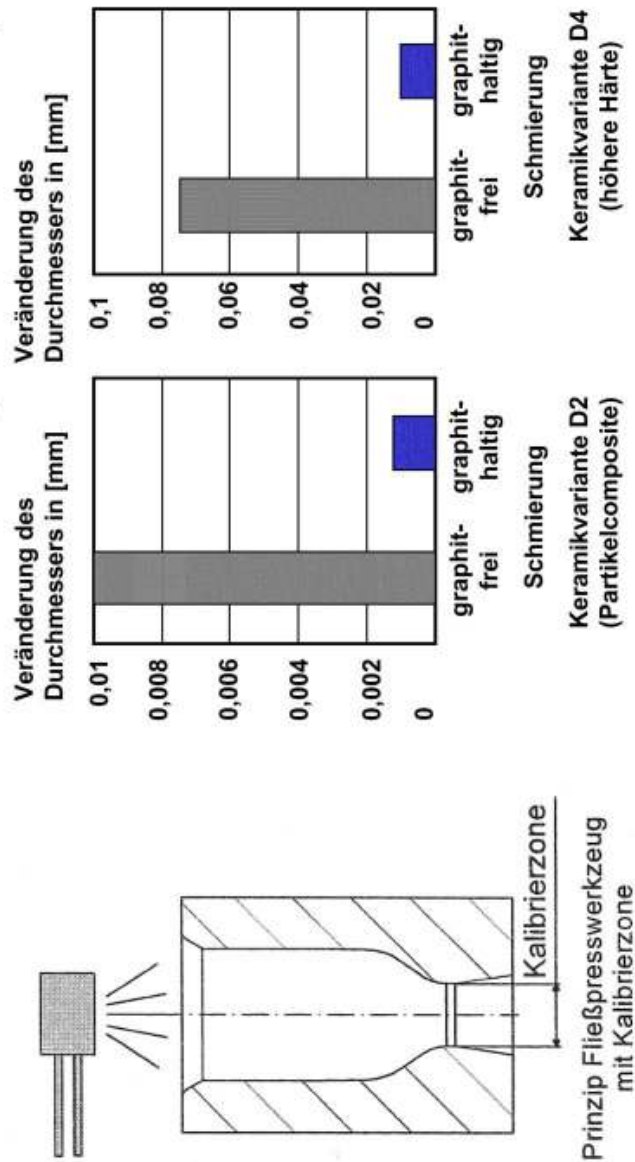
Quelle: Barner, L. BMBF-Matech Forschungsvorhaben 03N 5022B/3
„Ermittlung der Prozessparameter für keramische Umformwerkzeuge
und Bewertung des Einsatzverhaltens“ 2001, IFUM Hannover

Schmieden mit Keramik



- Schmierstoffeinfluß -

Verschleiß der Kalibrierzone durch Abtrag nach 1.000 Schmiedezyklen

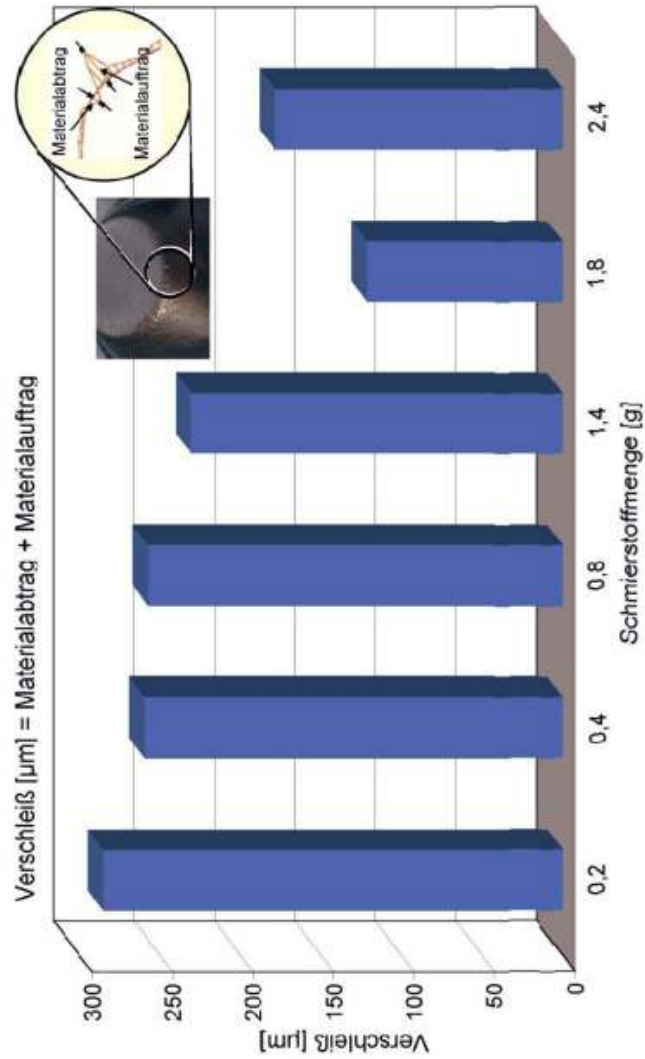


Schmiedetemperatur: 1.200 °C

Quelle: Barnert, L. BMBF-Matech Forschungsvorhaben 03N 5022B/3 „Ermittlung der Prozessparameter für keramische Umformwerkzeuge und Bewertung des Einsatzverhaltens“ 2001, IFUM Hannover

Schmieden mit Keramik

- Schmiermittelmengeneinfluß -



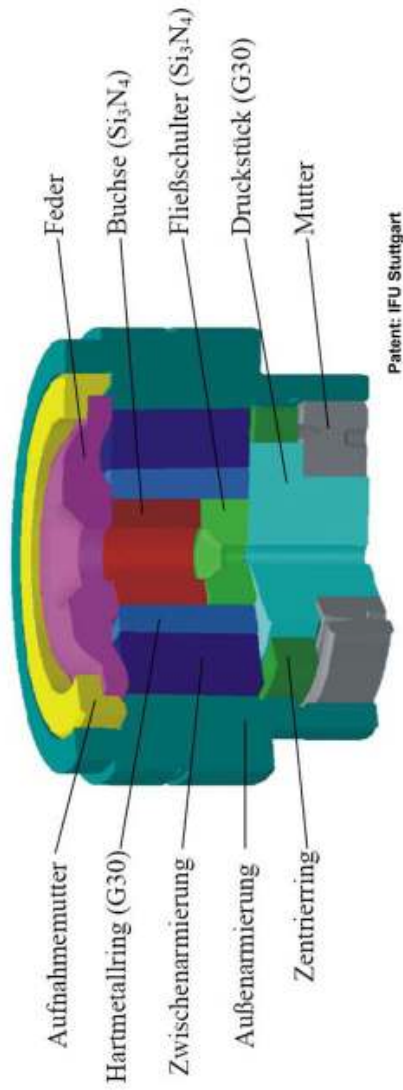
- „Viel hilft nicht unbedingt viel“; Die optimale Schmiermittelmenge muss ermittelt werden
- Der Verschleißmechanismus besteht in einem Materialabtrag und -auftrag

Quelle: Bach, F.-W., Doege, E.: Aktivitäten von keramischen Segmenten für den Einsatz in verschleißkritischen Bereichen von Schmiedegesenken. SFB 489, 2000-02

Fließpressen mit Keramik (Si_3N_4)



- Werkzeugkonstruktion -

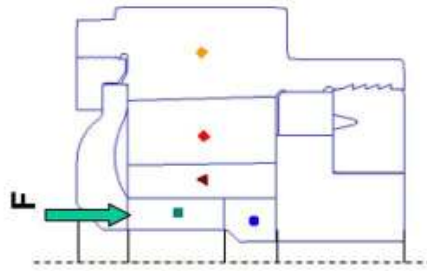
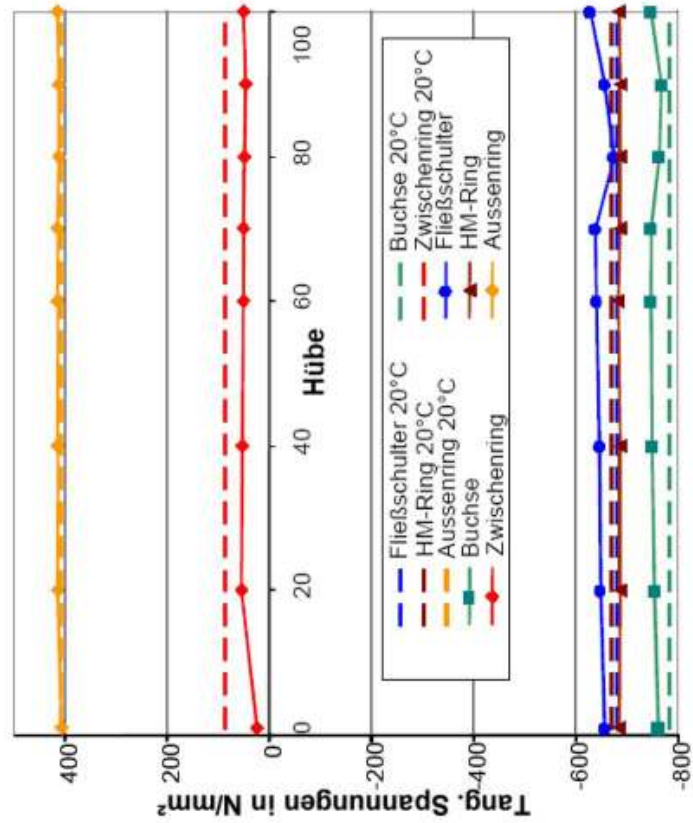


- SN-Keramik mit mehreren Armierungsringen vorgespannt
- 1. Armierungsring aus Hartmetall (E-Modul=600 GPa) zur Dehnungsbegrenzung
- Axiale Vorspannung über Tellerfeder

Quelle: Dr.- Ing. A. Felde, IFU Stuttgart; Zwischenbericht 12/2005:
„Einsatz von Keramikmatrizen für das Vollvorwärts-Fließpressen“

Fließpressen mit Keramik (halbwarm: 750°C)

- Stempelkraft/Reibzahl -



Werkzeug ohne Innendruck

Anfangstemperatur ca. 50°C

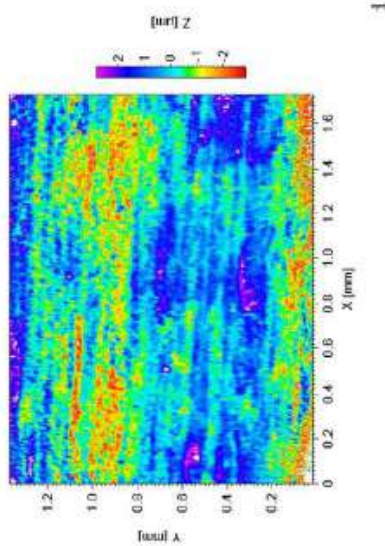
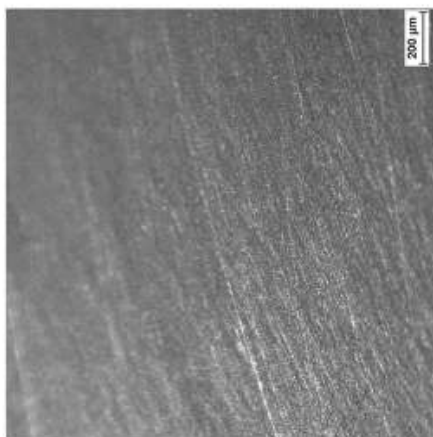
- Tangentialspannung der Hülse und Fließschulter immer im Druckbereich

Quelle: Dr.- Ing. A. Felde, IFU Stuttgart, Zwischenbericht 12/2005:
„Einsatz von Keramikmatrizen für das Vollvorwärts-Fließpressen“

Fließpressen mit Keramik (kalt: 250°C)



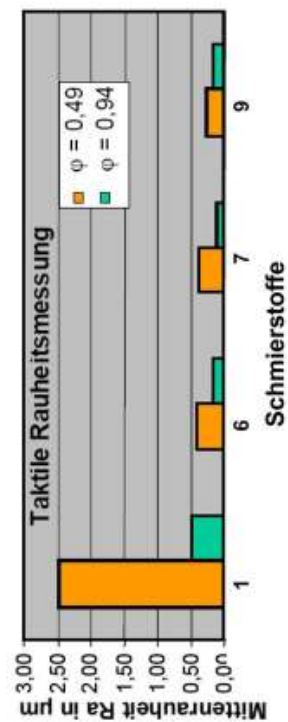
- Oberflächengüten Werkzeug/Werkstück -



Siliziumnitrid $R_a=0,08 \mu\text{m}$

Fließpressteil 16 MnCr5;
 $\phi=0,94$; $T=750^\circ\text{C}$

Umformteil Oberfläche

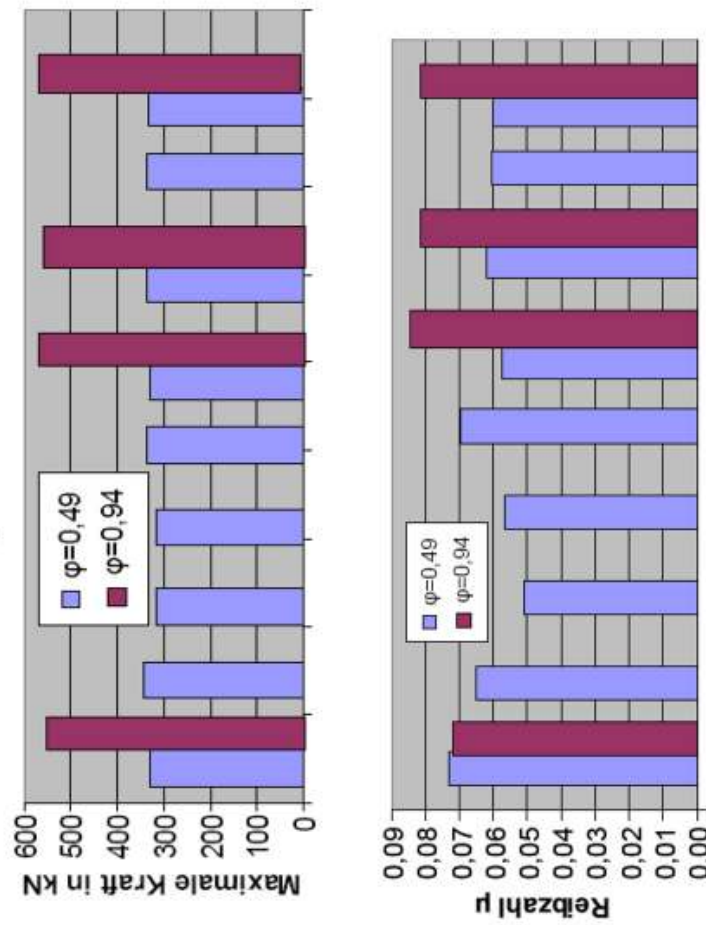


- deutlicher Schmierstoffeinfluss
- Reduktion der Umformkräfte ~15%

Quelle: Dr.- Ing. A. Felde, IFU Stuttgart, Zwischenbericht 12/2005:
„Einsatz von Keramikmatrizen für das Vollvorwärts-Fließpressen“

Fließpressen mit Keramik (kalt: 250°C)

- Stempelkraft/Reibzahl -



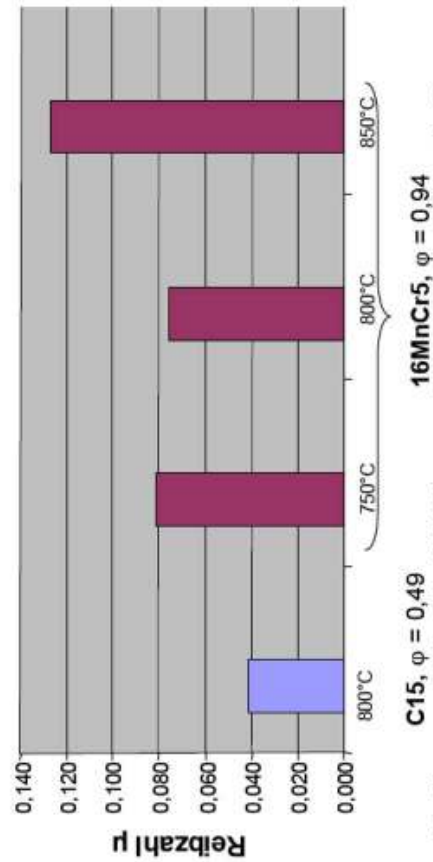
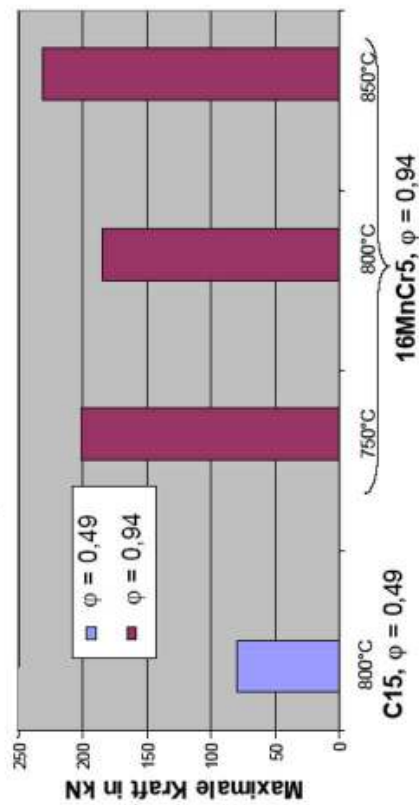
- Ein Einfluß des Schmierstoffs auf die Stempelkraft konnte nicht festgestellt werden
- Ein Einfluß auf die Reibzahl konnte - wenn auch gering - nachgewiesen werden

Quelle: Dr.- Ing. A. Felde, IFU Stuttgart; Zwischenbericht 12/2005:
„Einsatz von Keramikmatrizen für das Vollvorwärts-Fließpressen“

Fließpressen mit Keramik (halbwarm: 750°C)



- Stempelpkraft/Reibzahl -



- Reibung steigt bei höheren Temperaturen wieder an

Quelle: Dr.- Ing. A. Felde, IFU
Stuttgart, Zwischenbericht
12/2005.
„Einsatz von Keramikmatrizen
für das Vollvorwärts-
Fließpressen“

FEM – Berechnung Schrumpfzustand

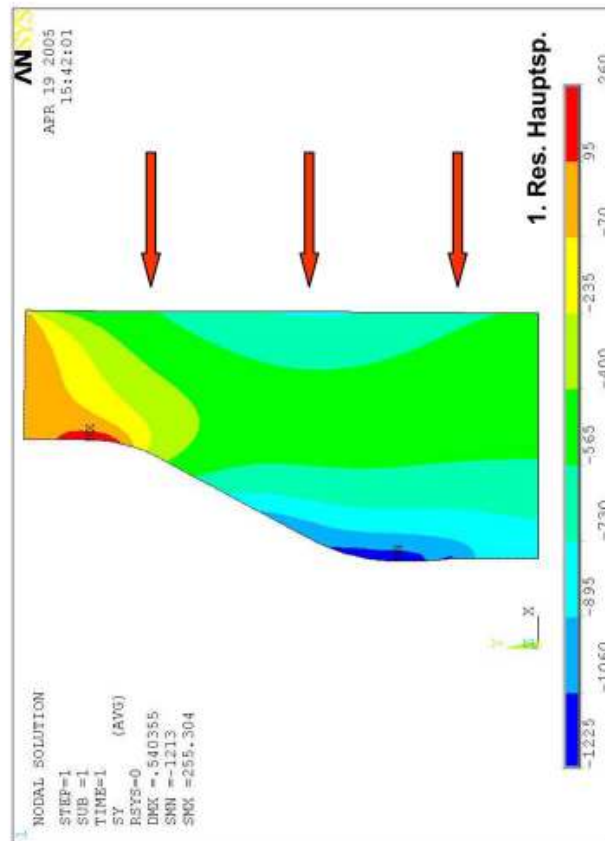
- HW-Fließpressen -

SN: m=18; $\sigma_{ov}=1015$ MPa

σ_p	F
$\sigma = 256$ MPa	$F_B=0,13\%$
$\sigma = 265$ MPa	$F_B=0,25\%$
$\sigma = 334$ MPa	$F_B=13 \%$
$\sigma = 349$ MPa	$F_B=29 \%$

$$F = 1 - \exp \left(- \frac{V_{eff}}{V_0} \cdot \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{ov}} \right)^m \right)$$

$$V_{eff} = \iiint_V f(x,y,z)^m dV$$



- Zugspannungen entstehen an Kontursprünge bei reiner (Außen-) Druckbeanspruchung
- Kompensation durch Axialkräfte

Bauteile

think ceramics
TECHNISCHE KERAMIK

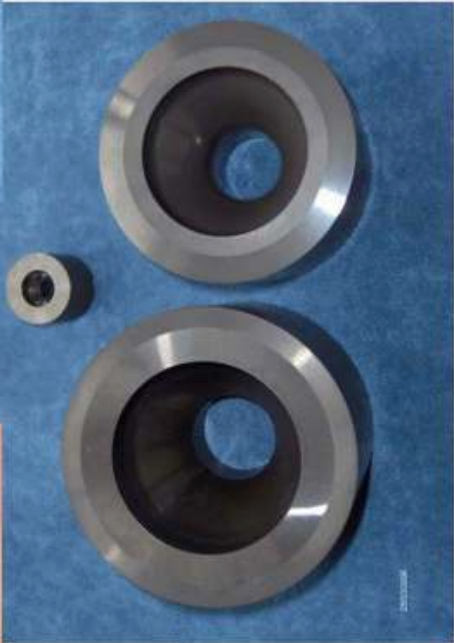
- Fließpressen/Drahtziehen -



Drahtziehsteine SN
(eingeschrumpft)



Fließpressmatrize SN
(Halbwarmumformung)



Zusammenfassung

- Keramische Werkstoffe weisen im Verhältnis zu metallischen Werkstoffen eine deutlich geringere Adhäsionsneigung zum Umformwerkstoff auf, dadurch wird die Reibung reduziert
- Die Art und Menge der verwendeten Schmiermittel beeinflussen beim Fließpressen (warm und kalt) die Stempelkräfte und die Reibzahlen nur mäßig, die Oberfläche am Umformteil jedoch sehr stark
- Die Schmiermittel besitzen einen starken Einfluß auf den Verschleiß, welcher daher nicht auf rein mechanische Ursachen zurückgeführt werden kann, sondern auch tribochemische Anteile beinhaltet
- Die Einpassung der keramischen Komponenten in das Werkzeug erfordert die Berücksichtigung keramikspezifischer Gestaltungsregeln
- Generell verschleifen keramische Umformwerkzeuge weniger als metallische, sind aber konstruktiv höher beansprucht, was die Gefahr des spontanen Versagens erhöht
- Der Verschleiß des Werkzeugs setzt sich immer durch das Wechselspiel Materialabtrag und Materialauftrag zusammen. Hierbei spielt die Interaktion des Tribosystems Keramik/Schmierstoff/Umformwerkstoff eine bedeutende Rolle.