

3.5 Extrudieren, Walzen um Umformen – Keramik bringt gute Standzeiten

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

Die Folien finden Sie ab Seite 370.

3.5.1. Keramische Schneckenpressen (Extruder)

In zwei vom BMBF geförderten Projekten konnten erfolgreich verschiedene keramische Werkstoffe zur Verschleißreduzierung eingesetzt werden. Im Projekt „Walzen mit Keramik“ [KAI04] wurden keramische Walzen aus Siliziumnitrid in verschiedenste Anwendungen der Walztechnik integriert. Im Projekt „Keramische Komponenten zur Verarbeitung stark verschleißender Stoffgemische“ wurden keramische Systemkomponenten zum Einsatz in Schneckenpressen (Verarbeitung keramischer Massen) und Spritzguss [NN05; WAM02] entwickelt. Die Verschleißbeanspruchung im Themenkomplex Walze und Schnecke setzt sich aus einer abrasiven wie korrosiven Komponente zusammen. Bei beiden Beanspruchungen bietet die Keramik werkstoffseitig ein hohes Potenzial, was aber nur voll genutzt werden kann, wenn zum einen die Grundsätze des keramikgerechten Konstruierens beachtet werden und zum anderen eine keramikgerechte Verbindungstechnik für eine verbundspannungsarme Integration der Komponente in ihre jeweilige Funktionsumgebung zum Einsatz kommt. Dazu müssen die Eigenschaften der Keramik hinsichtlich mechanischer und thermischer Beanspruchbarkeit durchgängig in den Designphasen (Zieldefinition, Konzeptdefinition, Strukturwurf und Detailkonstruktion) beachtet werden. Unterstützend zur Detailkonstruktion kann ein Einsatz von FEM-Methoden erfolgen, welche im Vorfeld der Konstruktion Hinweise geben können, wo kritische Zug-Spannungsspitzen liegen und wie sich konstruktive Maßnahmen zu deren Reduzierung auswirken.

Im Bereich der keramischen Schneckenpressen wurden mit dem erläuterten Konzept erfolgreich keramische Extruderschnecken konzipiert. Zunächst wurden unter Annahme von Herstellerangaben zu Drehmoment und Axial - wie Radialdruckverläufen ein Beanspruchungsprofil erstellt und dieses gepaart mit möglichst anwendungsnahen Krafterleitungsmodellen in ein FEM-Modell implementiert.

Das Modell ist in der Lage resultierende Spannungen und Bruchwahrscheinlichkeiten unter Raumtemperatur zu berechnen [WAM04a, WAM04b]. Neben dem parametrischen Aufbau, d.h. durch Eingabe von Parametersätzen ist nahezu jede Schnecke geometrisch abbildbar, können auch Schneckensegmente berechnet werden, deren Schnittlasten jeweils auf das folgende Segment weitergegeben werden.

Zur Berechnung der Bruchwahrscheinlichkeiten werden anwendungsnahe Kennwerte über Vierpunktbiegetests und Berstversuche ermittelt und über die keramiktypischen Kennwerte Weibullmodul m und charakteristische Spannung σ_{0v} in die Bruchwahrscheinlichkeitsberechnung implementiert. Es wurden 2 Versionen der Extrusionsschnecke designed:

- Extruderschnecke mit aufgeklebten SSIC-Segmenten und abnehmbaren Spitzkopf aus ZrO_2 sowie eine
- Modular aufgebaute Schnecke mit aufschiebbaaren Segmenten

Beide Typen sind mit hohen Massedurchsätzen getestet worden und ergaben Standzeitverlängerungen zu herkömmlichen Stellite-Panzerungen von >10 .

Die Tendenz beim Verarbeiten von Kunststoffen geht immer mehr zu den hochgefüllten Compounds mit Glas- oder Carbonfasern. Da diese Fasern über eine hohe Eigenhärte verfügen, entsteht ein hoher abrasiver Verschleiß. Insbesondere beim Verarbeiten von PVC-Versätzen entsteht durch das Spaltprodukt HCL ebenso ein massiver korrosiver Angriff.

Für das Spritzgießen wurden unter Annahme von Herstellerangaben keramische Lösungen für den Düsenkopf, das Meteringzonen-

segment und den Liner entwickelt. Auch hier wurde wieder auf die FEM zurückgegriffen. Anhand der Superposition der Beanspruchungen (Drehmoment, Axialkraft und -druck) ist zu erkennen, dass sich Lasten wie Axialkraft und Drehmoment gegenseitig teilweise kompensieren. Im Düsenkopf wurden 2 Varianten aus ZrO_2 und Al_2O_3 getestet. Die Al_2O_3 -Komponenten überdauerten den Test schadungsfrei, während die ZrO_2 -Komponenten kleine druckspannungsinduzierte Risse zeigten, die aber keinen negativen Einfluss auf den Prozess hatten. Die Meteringzonensegmente konnten bisher bis zu einem Druck von 2000 bar in der Verarbeitung eingesetzt werden. Für den Liner sind eingeschrumpfte Hülsen vorgesehen, ein erster Prototyp befindet sich im Bau.

3.5.2. Walzen mittels Siliciumnitrid

Für den Walzprozess wurden verschiedene Lösungen für das Walzen von Edelstählen, das Drückwalzen und den Einsatz in Rohrschweißanlagen erarbeitet. Aufgrund der hohen Festigkeit verbunden mit einer hohen Bruchzähigkeit gilt Siliziumnitrid als für den Einsatz prädestiniert. Für das Walzen von Edelstählen konnten sich die Rollen als Zuführrollen im industriellen Einsatz bewähren. Ebenso als Verschleißwerkstoff im Windungsleger des Walzgerüsts. Als Umformrolle gerät die Keramik an ihre Beanspruchungsgrenze, wenn hochwarmfeste Legierungen gewalzt werden sollen. Für kleine und mittlere Umformwiderstände ist der Werkstoff aber auch als Umformwalze einsetzbar. Neben der Standzeitverlängerung von Faktor 2 der Zuführrollen spricht auch eine hohe erzeugte Oberflächengüte für den Einsatz der Keramikrollen. Die Rollen können bis zu 3x nachgeschliffen werden.

Der Einsatz in Rohrschweißanlagen gestaltete sich sehr positiv, da aufgrund der elektrischen Isolationseigenschaften des Siliziumnitrids keine Funkenüberschläge zwischen dem wassergekühlten Induktor und der Rolle auftraten. Dadurch bleibt die Spritzerbildung aus, welche eine ungleichmäßige und im worst case rissbehaftete Nahtausbildung nach sich ziehen kann. Des Weiteren wird zwischen dem Kühlwasser und der Rolle keine tribochemische Reaktion und damit Schichtbildung beobachtet.

Beim Drückwalzen wurden Standzeiten von 1,5-2 fach im Vergleich zum herkömmlich metallischen Werkstoff beobachtet. Auch hier zeichnet sich die Bearbeitung mit Keramik neben der Verschleißreduktion durch eine gesteigerte Oberflächengüte aus.

Alle vorgenannten keramischen Komponenten wurden durch eine keramikgerechte Verbindungstechnik mit dem metallischen Partner verbunden, ohne die ein Einsatz von Keramik nicht möglich ist.

3.5.3. Literatur

- [KAI04] Kailer, A.; Hollstein, T.
„Walzen mit Keramik“, Tagungsband zum Fachsymposium „Keramik in der Walzwerktechnik“, 17/18.3.2004, Neuwied, ISBN 3-8167-6462-2
- [NN05] N.N.
Tagungsband zum Abschluss Symposium des BMBF-Projekts „Keramische Komponenten zur Verarbeitung stark verschleißender Stoffgemische“, 31.5.2005, Selb
- [WAM02] Wampers, H.; Maier, H. R.
„Keramikschnecken zum Fördern und Spritzen“, IKKM/IPAK Projektportraits 2001, Aachen, ISBN 3-931814-52-1
- [WAM04a] Wampers, H., Maier, H.R., Händle, F.; Wötting, G.; Winterstein, G.; Spätling, J.
„Ceramic Components for the Extrusion of Ceramic Compounds“, cfi/Ber. DKG 81 (2004) No.4
- [WAM04b] Wampers, H.; Maier, H.R.; Winterstein, G.; Berthold, J.
„Keramische Schnecken zum Fördern und Spritzen“, Vortrag DKG-Jahrestagung 2004

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 24) finden sich auf den folgenden Seiten.

**Extrudieren, Walzen und Umformen -
Keramik bringt gute Standzeiten**

Holger Wampers
H.C. Starck Ceramics
Selb



Inhalt

- 1. Einleitung**
- 2. Eigenschaftsvergleich Stahl-Hartmetall-Keramik**
- 3. Keramische Schneckenpressen (Extruder)**
- 4. Spritzgießeinheit**
- 5. Zuführ- und Umformrollen aus Siliciumnitrid**
- 6. Siliciumnitridwalzen in Rohrschweißanlagen**
- 7. Drückwalzen aus Siliciumnitrid**
- 8. Principle/Proof of Principle**

Einleitung



Verarbeitung von hochgefüllten Kunststoffen (PA GF35/50, ABS (TiO₂))
und keramischen Massen führt zu erhöhtem:

Abrasivverschleiß +



Spritzgießschnecke nach Verarbeitung einer
hochverschleißenden Kunststoffmasse
(Standzeit: 1.500h)

Korrosionsangriff



Foto: Fa. ECT – Extrusion for Ceramics Technology

Extruderschnecke nach Korrosionsangriff

Lösungsansatz: Einsatz von keramischen Schnecken und Zylindern

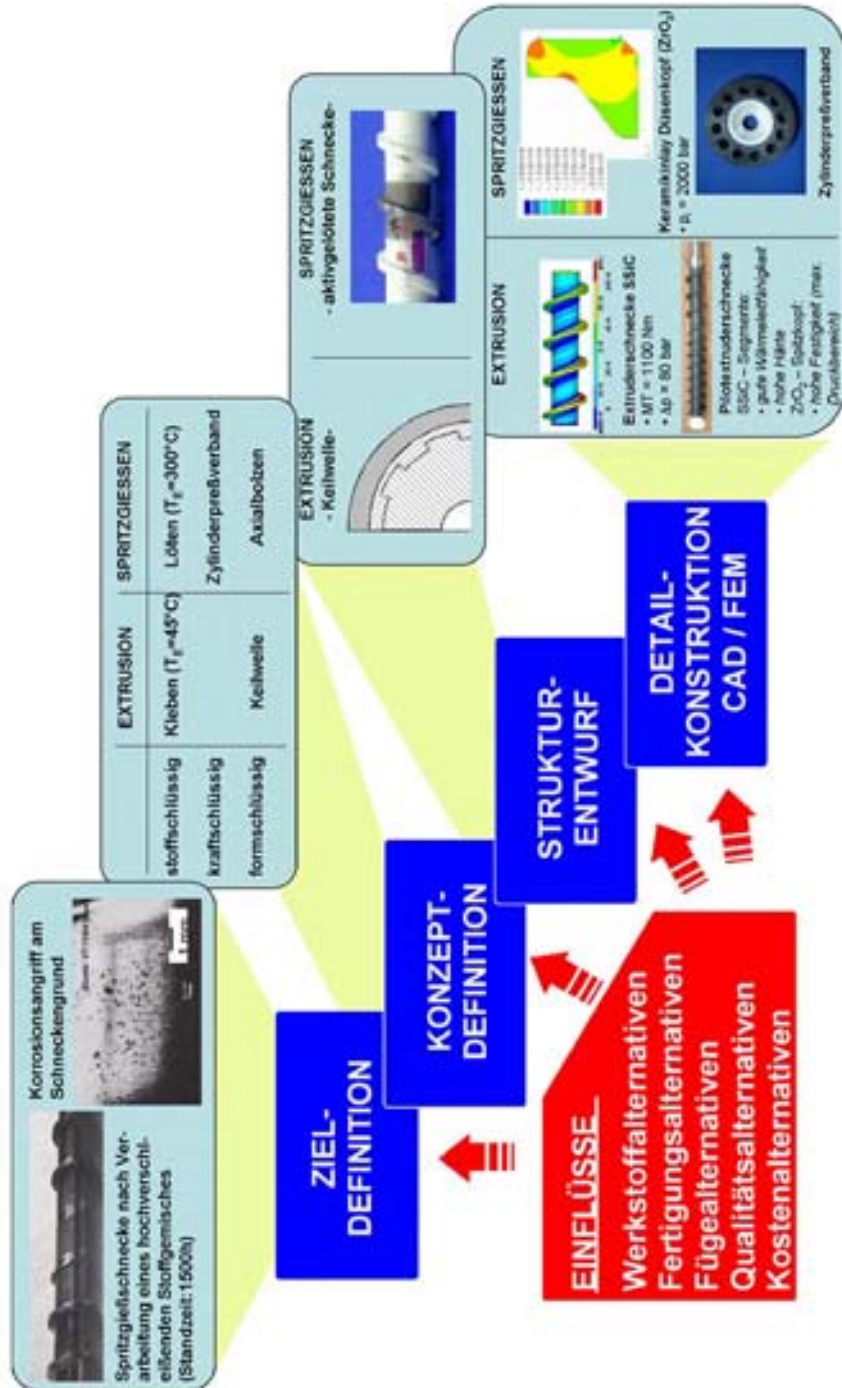
Vorteile:

- hoher Verschleißwiderstand
- kein metallischer Abrieb (Pharma- und Lebensmittelindustrie, transluzente Keramik)

Nachteile:

- stochastisches Versagensverhalten
- angepasste Verbindungstechnik notwendig

Einleitung



3.5 Keramik bringt gute Standzeiten - Folie 4

Richtwerttabelle Stahl / Hartmetall / SN-Keramik

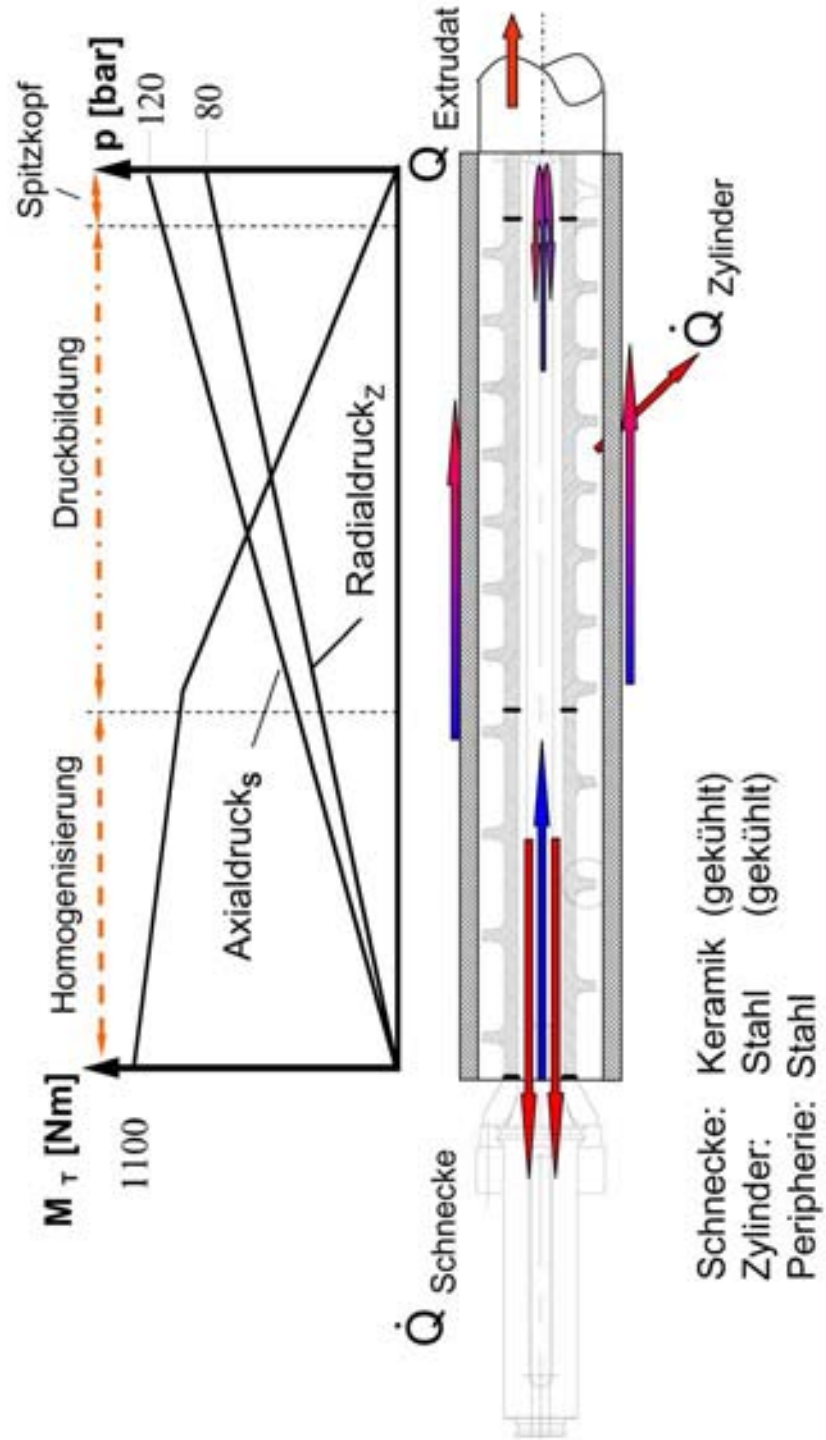


	Stahl (34CrAlNi7)	Hartmetall (WC)	Siliciumnitrid (100bar)
Dichte ρ [g/cm ³]	7,6	15	3,23
Biegefestigkeit σ (RT) [MPa]	900	1600	$\sigma_0=800$; $m=15$
Biegefestigkeit σ (1200°) [MPa]	-	800	$\sigma_0=500$; $m=15$
E-Modul [GPa]	210	600	300
Ausdehnungskoeffizient α [1/K]	$13 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-6}$
Wärmeleitfähigkeit λ (RT) [W/mK]	100	50	25
Bruchzähigkeit K_{Ic} [MPa \sqrt{m}]	80	20	6,5
Härte HV 10 [GPa]	9,5	22	15,2

3.5 Keramik bringt gute Standzeiten - Folie 5

Keramische Schneckenpresse

- Beanspruchungsprofil -



Keramische Schneckenpresse

- Pilotbauteile und Praxistest -



Foto: HITK Hermsdorf

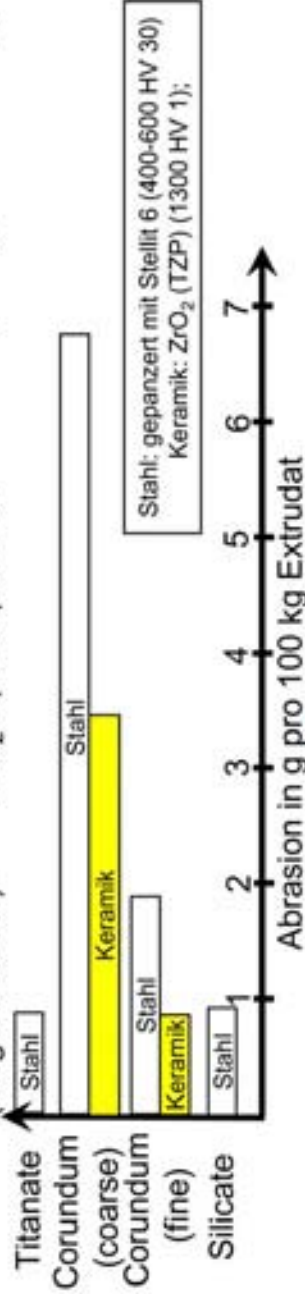


Foto: HITK Hermsdorf

Metallo – Spitzkopf
(durchgehender Gang)

Metallabrieb auf
ZrO₂-Spitzkopfflanke

ZrO₂ – Spitzkopf
(Gegenmesser)



Abrasionsverlust Spitzkopf 0 g/100kg → 50% des Verschleißes finden am Spitzkopf statt

Lf. Wampers, H. Maier, H. Weizenstein, G. Wölsing, G. Späuling, J. Händle, F. „Ceramic Components for the Extrusion of Ceramic Compounds“ in csl 4/2004

Keramische Schneckenpresse (Version 1)

- Schnecke mit SSiC- und ZrO₂-Segmenten -



Art/ Masse der extrudierten Versätze	bis 05.03.04	seit 24.03.04	Summe
Silikate (d ₅₀ < 3µm)	245 kg	472 kg	717 kg
Korund (d ₅₀ ca. 8 µm)	12 kg	134 kg	146 kg
Korund (d ₅₀ ca. 11 µm)		46 kg	46 kg
Korund (d ₅₀ ca. 15 µm)	890 kg	240 kg	1130 kg
Korund mit 10% Silikat (d ₅₀ ca. 50 µm)		100 kg	100 kg
α- Tonerde (d ₅₀ = 1,2 µm)		25 kg	25 kg
Titandioxid (d ₅₀ = 12 µm)	105 kg	87 kg	192 kg
Bariumtitanat (d ₅₀ ca. 1,5 µm)	100 kg	100 kg	200 kg
Basisches Material (pH > 12)		40 kg	40 kg
Gesamtsumme: 2596 kg			
Verschleiß: <1 g			

Keramische Schneckenpresse (Version 2)

- Schnecke mit aufschiebbaaren Segmenten -



Al₂O₃-Segment:
 $\Delta M_T = 130 \text{ Nm}$
 $\Delta p = 80 \text{ bar}$
 $F_B = 0\%$

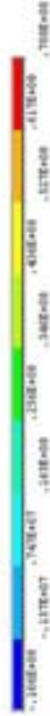
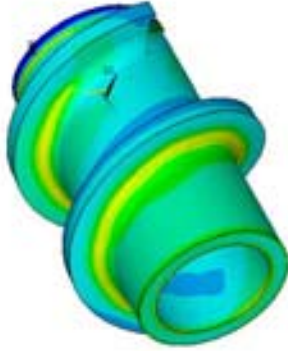
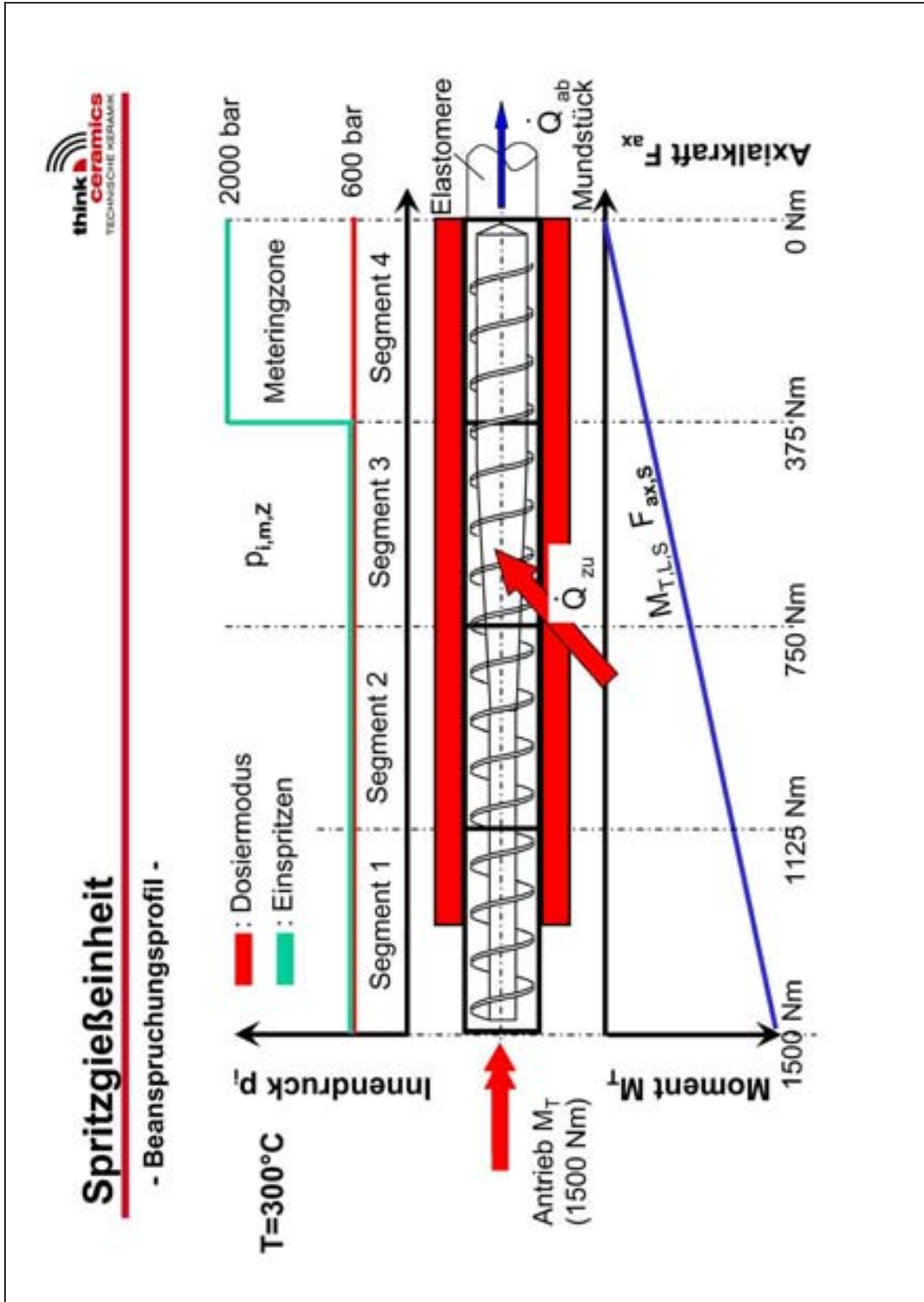


Foto: Fa. ECT – Extrusion for Ceramics Technology

Vorteile:

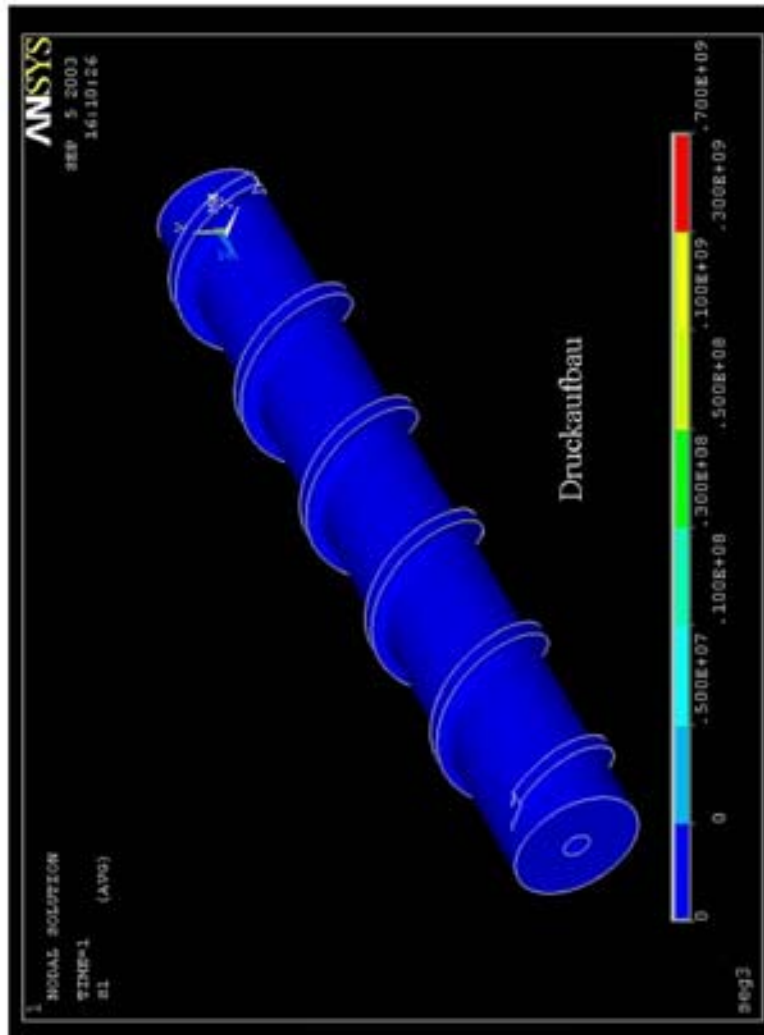
- leichteres Demontieren der Segmente im Versagensfall eines Segments
- Anordnung von Keramik oder Hartmetall nach Extrudat- bzw. Verschleißanforderung
- Standzeitverlängerung gegenüber Sintermetallsegmenten von >10



3.5 Keramik bringt gute Standzeiten - Folie 10

Spritzgießeinheit

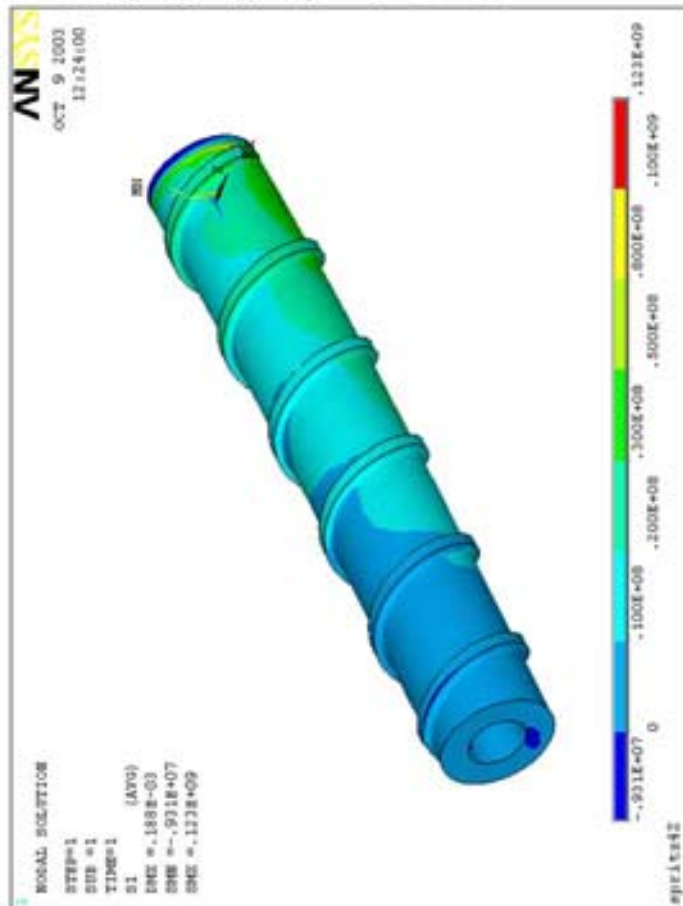
- FEM-Beanspruchungssequenz Spritzgießschnecke (3.Segment) -



3.5 Keramik bringt gute Standzeiten - Folie 11

Spritzgießeinheit

- FEM-Berechnung Meteringzonensegment -



Bruchwahrscheinlichkeiten:

ZrO₂: F_B <10⁻⁶ %

SSN:F_B <10⁻⁶ %

SSiC: F_B = 7.86E-06

Al₂O₃: F_B <10⁻⁶ %

4. Segment:

M_T: 375 Nm → 0 Nm

Δp_{ax} = 60 bar

Die Strukturzuverlässigkeit für alle einsatzrelevanten Keramiken ist gegeben

Noch zu beachten sind resultierende
Verbund- und Eigenspannungen

Spritzgießeinheit

- Drucktest Keramikinlays (ZrO_2/Al_2O_3) -



Fügeprozess



Eingeschrumpftes Inlay



Foto: Fa. Battenfeld

Umlaufender Tangentialriss
(Farbeindringverfahren)

$r_{\text{K}} = 500\text{kg}$	1000 bar PP	2000 bar PP	1000 bar PA6.6 GF35	1000 bar PA6.6 GF50
Al_2O_3	✓	✓	✓	✓
ZrO_2	✓	Umlaufender Riss	Keine weitere Schädigung	Auftreten mehrerer Axialrisse

Häufige Montage/Demontage des Düsenkopfes führt zu Lastspitzen für das Inlay

Al_2O_3 besser geeignet als ZrO_2

Risse führen nicht zum Totalversagen der Keramik (Druckversagen)

Spritzgießeinheit

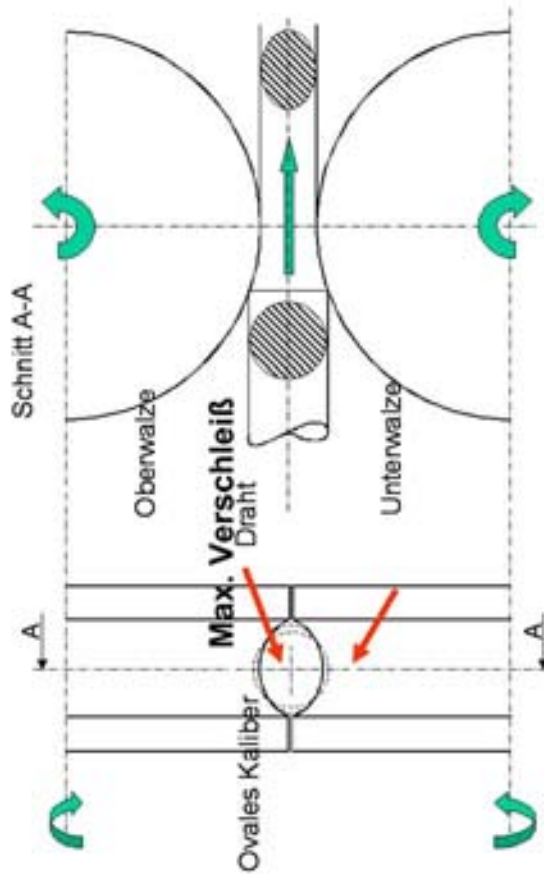
- Meteringzonensegment (Al_2O_3)-



Einsatz bisher bis 2000 bar Spritzdruck

Zuführ- und Umrollen aus Stahl

- Walzvorgang im Ovalekaliber (Drahtwalzen) -



Technische Probleme

- Verschleiß des Kalibers → Vergrößerung der Fertigungstoleranz
 - Tribochemische Reaktion
 - Bremsflecke
 - Aufschweißungen
- Schlechtere Oberflächenqualität beim Endprodukt

Zuführwalzen aus Siliciumnitrid

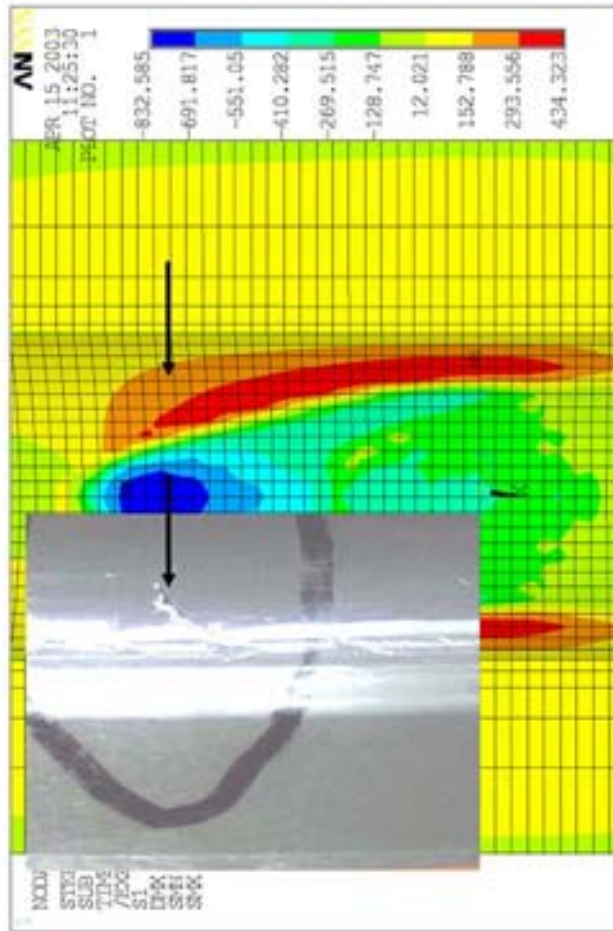


Stand der Entwicklung

- Standzeit bei > 600 t Walzgut
- keine tribochemische Reaktion
- keine Bremsflecken
- nachschleifbar
- Einsatz als Umformrolle aufgrund der hohen Kräfte nicht bei jedem Stahl möglich
- Verbindungstechnik Walze/Lagerung durch klebtechnische Lösung



Umformwalze aus Siliciumnitrid



FEM-Berechnung für Umformwalze

- Am Kalibergrund Druckspannungen
- Infolgedessen ergeben sich Zugspannungen an der Kaliberflanke
- Exakte Übereinstimmung Theorie/Praxis

Quelle: Kaler, A., Hollstein, T., „Walzen mit Keramik“, Tagungsband zu Fachsymposium „Keramik in der Walzentechnik“, Neuweid, 17/18.3.2004

Umformwalze aus Siliciumnitrid



Stand der Entwicklung

- Einsatz im 4. von 8 Walzgerüsten
- Walzguttemperatur 950-1100°C
- Gute Ergebnisse bei niedrigem bis mittlerem Verformungswiderstand bei hoher Oberflächengüte
- Hochwärmfeste Werkstoffe führen zur Materialüberlastung und Versagen der Rolle

$\varnothing_a = 225 \text{ mm}$
 $\varnothing_i = 120 \text{ mm}$
 $B = 25 \text{ mm}$
 $\varnothing_k = 7,71 \text{ mm}$



Siliciumnitridwalzen in Rohrschweißanlagen

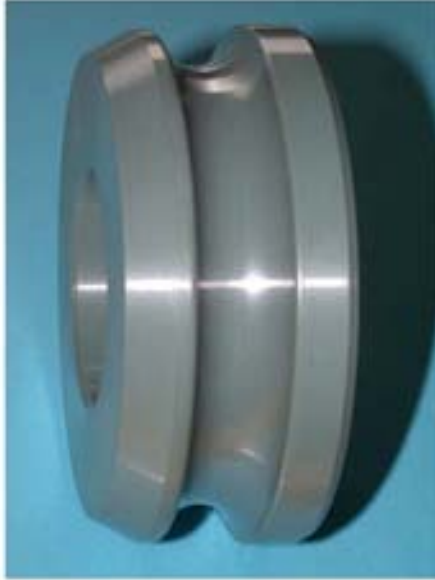


Einsatz von Keramik ohne Änderung der Konstruktion



Betriebsbedingungen Schweißrolle

- Tribochemische Reaktion mit Kühlmedium → Verminderung der Oberflächenqualität
- Funkenüberschlag am Induktor → Rohrnaht wird nicht dicht geschweißt



SN-Rolle Neuzustand

Siliciumnitridwalzen in Rohrschweißanlagen

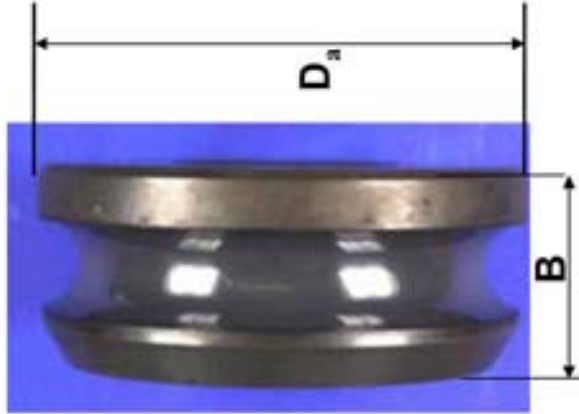


Betriebsbeanspruchte Stahlrolle



Korrosion, Adhäsion
↕
Verschleiß

Betriebsbeanspruchte SN-Rolle
Laufzeitverlängerung ca. 2,5-fach



$D_a = 100 \text{ mm}$
 $B = 40 \text{ mm}$

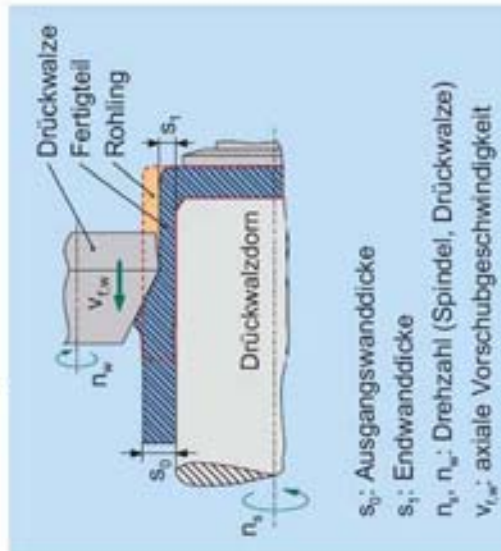
Vorteile:

- Geringere bis keine tribochemische Reaktion mit Kühlmedium
- Funkenüberschlag konnte gänzlich vermieden werden
- Standzeitverlängerung um Faktor 3 gegenüber Hartmetall

Drückwalzen aus Siliciumnitrid



Prinzip des Drückwalzens



- s_0 : Ausgangswanddicke
- s_1 : Endwanddicke
- n_s, n_w : Drehzahl (Spindel, Drückwalze)
- $v_{r,w}$: axiale Vorschubgeschwindigkeit

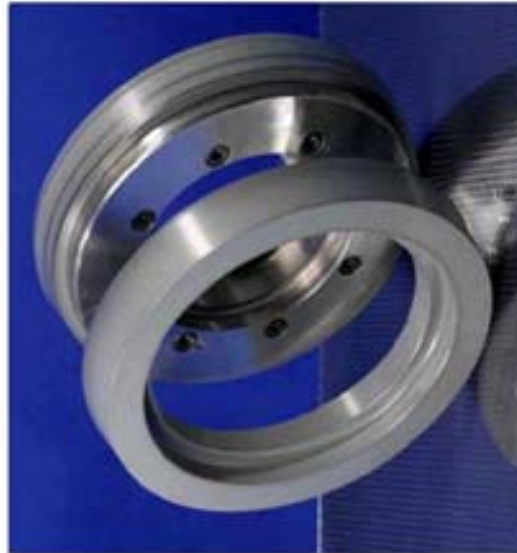


Oberfläche: $R_a=0,175 \mu\text{m}$
Wanddicke: $0,175 \text{ mm}$
Geradheit: $0,1 \text{ mm/m}$
Toleranz: H7

- **Wärmespannungsrisse** infolge Thermoschock \rightarrow Begrenzung der Lebensdauer
- **Tribochemische Reaktion** \rightarrow Verminderung der Oberflächenqualität

Drückwalzen aus Siliciumnitrid

Keramikringe für das Drückwalzen



(Ø 265 mm)

- Keramikgerechte Konstruktion des SN-Rings mit einer Kombination aus Kraft- und Formschluss
- Hervorragende Thermoschockbeständigkeit des SN's führt zu einer Erhöhung der Lebensdauer bei gleichzeitiger Reduktion der Taktzeit um 30%
- Sehr gute Oberflächenqualität

Standzeitverlängerung: 1,5-2 gegenüber Hartmetall



Principle

- **Keramische Werkstoffe beim Walzen und Extrudieren bringen im Vergleich zu Stahlwerkstoffen höhere Standzeiten und bessere Produktgüten.**
- **Die Realisierung erfolgt durch:**
 - **Analyse des Kraft, Wärme- und Stoffflusses**
 - **FEM-Berechnung**
 - **Keramikgerechte Konstruktion sowie Verbindungstechnik**

Proof of Principle

- Der industrielle Einsatz der Extrusionsschnecken bringt Standzeiten von >10 im Vergleich zu Sintermetall
- Für den Spritzgießprozess wurden Düsenkopfinlays erfolgreich eingesetzt. Zylinder und Schnecken befinden sich im Feldtest mit sehr positiven Ergebnissen.
- Walzen aus Siliciumnitrid wurden als Zuführrolle beim Edelstahlwalzen erfolgreich industriell eingesetzt. Für kleine und mittlere Verformungswiderstände ist der Einsatz als Umformrolle bewiesen,
- Der Einsatz von Siliciumnitridrollen in Rohrschweißanlagen führt zu einer Standzeitverlängerung gegenüber Hartmetall um den Faktor 3.
- Beim Drückwalzen wird eine Standzeitverlängerung gegenüber Hartmetall um den Faktor 1,5-2 erreicht.