

### 3.3 Werkstoffverbund Metall/Keramik: $1+1 \geq 2$

- Holger Wampers  
LAPP Insulators Alumina GmbH  
Redwitz

*Die Folien finden Sie ab Seite 185*

#### 3.3.1. Folie 1

Die kritische Spannung bei Werkstoffverbunden setzt sich aus den Eigen-, Verbund- und Lastspannungen zusammen, die wiederum durch die Eigenschaften der Fügepartner weitgehend festgelegt werden. Insbesondere bei Keramik-Metall-Verbunden treffen sehr unterschiedliche Eigenschaftsprofile aufeinander, die in der Regel hohe Verbundspannungen implizieren, die die nutzbare Lastspannung deutlich reduzieren. Die Überlagerung ist aber nicht linear zu sehen, sondern auch die 3-Dimensionalität ist zu beachten, d. h. die Spannungsrichtungen.

Da die Keramik auf Grund ihrer begrenzten Duktilität hier oft den „Bottle-Neck“ darstellt, ist eine genaue Kenntnis der Eigenschaften erforderlich, um einerseits die richtige Keramik auszuwählen und andererseits geeignete Fügepartner auf der Metallseite auszuwählen.

#### 3.3.2. Folie 2

Über die Designphasen einer Fügeaufgabe werden die mechanisch-thermisch-chemischen Randbedingungen festgelegt und eine Vorauswahl der Fügepartner vorgenommen. In der Detail-Konstruktion kann durch FEM (Finite-Element-Methode) eine Vorberechnung vorgenommen werden, die zwar nur bedingt eine Aussage zum Überleben des Verbundes beisteuert, aber im Vorfeld Konstruktionsalternativen ausschließt und daher Trial-and-error-Schleifen reduziert.

### 3.3.3. Folie 3-10

Anhand des Beispiels zur Drehmomentübertragung für keramische Schnecken werden exemplarisch konstruktive Einflüsse aufgezeigt und form- sowie stoffschlüssige Verbindungstechniken untereinander verglichen. Formschlüssige Verbindungstechniken haben oft den Vorteil der Demontierbarkeit und sind daher im Fall eines Schadens leichter austauschbar. Gelötete Verbunde bedingen eine sorgfältige Auswahl der Fügepartner (Keramik/Lot/Metall), da bei diesem Verfahren bedingt durch die hohe Löttemperatur von rund 900°C im Passivlötverfahren, bzw. rund 1.000°C beim Aktivlöten die Ausdehnungskoeffizienten und mechanischen Parameter E-Modul und Querkontraktion eine entscheidende Rolle für den Verbundspannungsaufbau spielen. Es kann für reine  $ZrO_2$ -Verbunde oder  $ZrO_2$ -Titan-Verbunde gezeigt werden, dass die Verbundspannungen minimal sind, was aber in Abstimmung der vorgenannten Parameter begründet liegt. Für andere Lötverbunde, etwa  $Si_3N_4$  und Stahl führt dies zu deutlich anderen Ergebnissen.

Im Vergleich der untersuchten Verfahren Bolzenverbindung (Aluminium /SSIC), Kleben (Stahl/SSIC) und Löten  $ZrO_2/ZrO_2$  überträgt das Lötverfahren rund 63,1% der ungestörten Welle. Dies liegt deutlich über den beiden anderen Alternativen.

Die Werkstoffeigenschaften wurden für den Vergleich über die Weibullbeziehungen herausgerechnet und einer konstanten Bruchwahrscheinlichkeit von  $F=50\%$  betrachtet.

Generell kann noch festgehalten werden, dass der Lötverbund i.d.R. höheren Temperaturen widersteht bis rund 400-500°C je nach Wahl der metallischen Fügepartner (Anlasstemperatur), aber auch unter Kostengesichtspunkten am kostenintensivsten ist.

### 3.3.4. Folie 11

Beispiel zum Einschrumpfen von Zirkonoxid in Edelstahl 1.4301. Beim Fügen des Verbundes muss das Zusammenspiel der reinen Verbundspannungen und der überlagerten Lastspannungen (Verschrauben des Kopfes und Betriebslasten) beachtet werden. So liegt in die-

sem Beispiel nach dem Schrumpfen eine recht hohe Zugspannung im Konturübergang vor. Nach Verschrauben ist das nahezu gesamte Bauteil unter Druckspannungen. Nach Aufbringen des Innendrucks von  $p_i = 2.000 \text{ bar}$  ist die entstehende Zugspannung zwar im Zugbereich, aber um einen Faktor 2-3 geringer als nach dem Schrumpfen. Das Bauteil ist nach dem Schrumpfen also rissgefährdeter als im Betrieb.

Rissprüfungen nach dem Einschrumpfen belegen die Ergebnisse der FEM.

### 3.3.5. Folie 12

Eingeschrumpfte Keramiken für die Blechumformung müssen in Folge der Kaltverformung hohe Umformkräfte aufnehmen. Daher wird konstruktiv so vorgegangen, dass der gesamte Verbund unter so hohe Druck-Vorspannung gesetzt wird, dass über die Beanspruchung möglichst keine Zugspannungen auftreten.

Diese Betrachtung muss aber auch die Steifigkeit eines Verbundes umschließen. Da hier Siliziumnitrid gewählt wurde, könnte eine Armierung aus Stahl mit E-Modul 210 GPa eine Dehnung der Keramik mit E-Modul 320 GPa auf Grund der Beanspruchung durch Umformkräfte nicht begrenzen. Dies würde lokal zu Rissen führen, da die Bruchgrenze bei Keramiken bei rund 0,1% liegt.

Daher wird zunächst mit Hartmetall umgeschumpft und dann zusätzlich zur Vorspannungsverstärkung mit Stahl. Das Fügen erfolgt von innen nach außen und kann thermisch oder mechanisch erfolgen.

### 3.3.6. Folie 13-15

Beispiele der vorgestellten Verbindungstechniken am Beispiel keramische Schnecke. Es werden Aktivlötverbunde mit Stahl/ $\text{Si}_3\text{N}_4$  und  $\text{TiAl}_6\text{V}_4/\text{ZrO}_2$  vorgestellt. Einfach demontierbare Verbunde aus Stahl/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  sind bereits im Feld getestet worden und weisen Verschleiß um den Faktor  $>50$  im Vergleich zu Stellite 6 auf. Dabei werden mechanisch bis zu 1.000 Nm Drehmoment übertragen.

### 3.3.7. Folie 16

Mit der Passiv-Löttechnik sind Verbunde aus Kupfer/Keramik als auch Stahl/Keramik kostengünstig herstellbar. Zusätzlich können durch das Serienverfahren auch hohe Stückzahlen hergestellt werden. Mit dieser Verbindungstechnik können auch Bauteile für den Verschleißschutz mit Stahl in der Einspannstelle und Keramik am Funktionsort (=Verschleißstelle) hergestellt werden. LAPP fertigt in dieser Fertigungstechnik bis zu 300.000 Thyristoren für die Halbleiterindustrie sowie Sensoren und Stromdurchführungen für die Mess- und Regeltechnik.

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 16) finden sich auf den folgenden Seiten.

# Werkstoffverbund Metall/Keramik - $1+1 \geq 2$

Dipl.-Ing. Holger Wampers  
LAPP Insulators Alumina GmbH  
Redwitz a.d. Rodach

## Einleitung

Spannungsanteile eines Werkstoffverbundes (allg.):

$$\sigma_c = f(\sigma_v + \sigma_e + \sigma_l)$$

$\sigma_v$ : Verbundspannung

$\sigma_e$ : Eigenspannung

$\sigma_l$ : Lastspannung



- thermisch (Ausdehnungskoeff.)  
- mechanisch (E-Modul)



- Oberflächenbehandlung  
(schleifen, as fired)



- mechanisch-chemisch  
-thermische Lasten

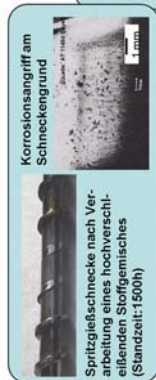
**Besonderheiten eines Metall-Keramik-Werkstoffverbundes:**

*Keramik ist ein spröder Werkstoff mit gut nutzbarem Eigenschaftsprofil  
(Härte, Temp.)* 

*Keramik besitzt eine um den Faktor 1.000 geringere Bruchdehnung als Stahl (1.4301)* 

*Keramik kann Spannungsspitzen nicht durch Plastizität abbauen* 

# Einleitung



Spritzgießschnecke nach Verarbeitung eines hochverschleißenden Stoffgemisches (Standzeit: 1500h)

EXTRUSION	EXTRUSION	SPRITZGIEßEN
stoffschlüssig	Kleben ( $T_g=45^\circ\text{C}$ )	Löten ( $T_g=300^\circ\text{C}$ )
kraftschlüssig		Zylinderpreißverband
formschlüssig	Keilwelle	Axialbolzen

**ZIEL-DEFINITION**

**KONZEPT-DEFINITION**

**STRUKTUR-ENTWURF**

**DETAIL-KONSTRUKTION CAD / FEM**

**EINLÜSE**  
Werkstoffalternativen  
Fertigungsalternativen  
Fügealternativen  
Qualitätsalternativen  
Kostenalternativen



**EXTRUSION**

Extruderschnecke SSiC  
• MT = 1100 Nm  
• sp = 80 bar

**SPRITZGIEßEN**

Keraminkinlay Düsenkopf (ZrO<sub>2</sub>)  
• p<sub>1</sub> = 2000 bar

**Phlektender Schnecke**  
SSiC - Spinnnetz  
• gute Wärmeleitfähigkeit  
• hohe Härte  
ZrO<sub>2</sub> - Spitzkopf  
• hohe Festigkeit (max. Pseudobritzheit)

Zylinderpreißverband

**Methode: Betrachtung des Beanspruchungskollektivs aus Eigen-, Verbund- und Lastspannungen**

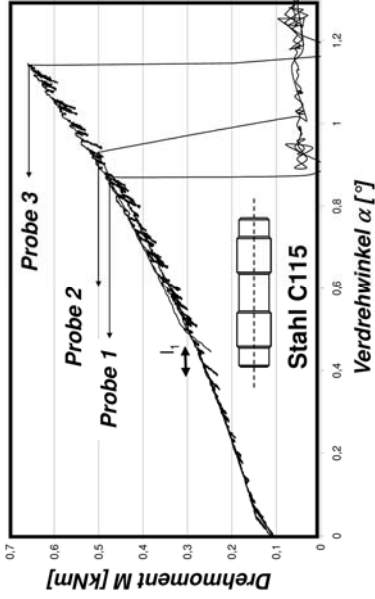
# Beispiel Drehmomentübertragung



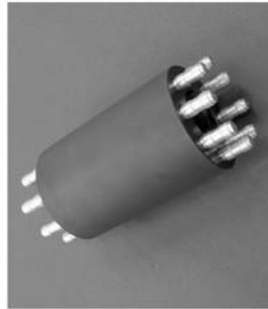
## Formschlüssig – Stahlbolzen/2 Auflager



Drehmomentprüfstand



- ↯ Leicht wieder trennbarer Verbund (Repair)
- ↯ Zusätzliche Axialkraft über Zuganker erforderlich (thermisch hoch belastet: Vorspannungsverlust!)
- ↯ Kraftaufteilung durch Fertigungstoleranzen nicht gleichmäßig

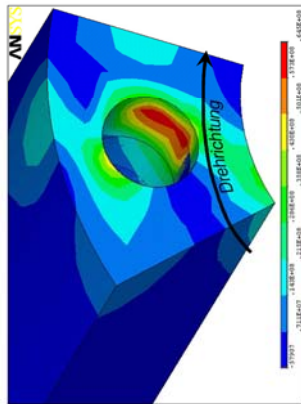


SSIC-Probe mit Bolzen

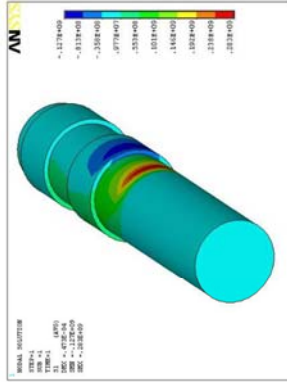


# Beispiel Drehmomentübertragung

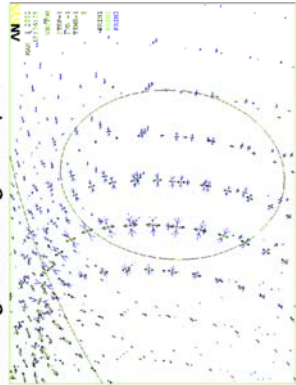
## Formschlüssig – FEM - Analyse



Spannungsverteilung Nabe (linear elastisch)



Spannungsverteilung Bolzen (Mises)

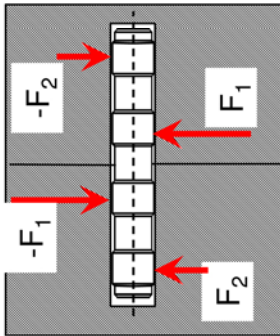


Spannungsrichtungen Nabe

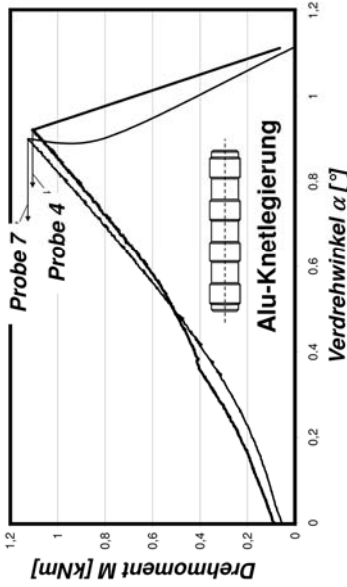
- Spannungsverteilung in der Nabe zeigt Zugspannungen im Kontaktpunkt
- Bolzen wird in der Mitte max. auf Zug beansprucht
- Zugspannungen im Kontaktpunkt resultieren aus Druckspannungen im Kontaktpunkt (Querdehnung)

## Beispiel Drehmomentübertragung

### Formschlüssig – Alubolzen/4 Auflager



Definierte Kraftangriffspunkte



- Erhöhte Plastizität der Bolzen führt zu höherer Drehmomentübertragung um bis zu 60%
- Bessere Gleichmäßigkeit
- Aluminium besitzt niedrigere Warmfestigkeit als Stahl

## Beispiel Drehmomentübertragung

### Stoffschlüssig – Kleben (Loctite + Aktivator)



Ausgepresste Welle – Klebung  
nur an weißen Stellen



- ↯ Drehmoment liegt im Mittel leicht höher als bei Stahlbolzen
- ↯ Hohe Streuung durch infolge Welligkeit der Fügestelle durch ungleichmäßigen Sinterschrumpf (as fired)
- ↯ Fügestelle muss geschliffen werden (Kosten)

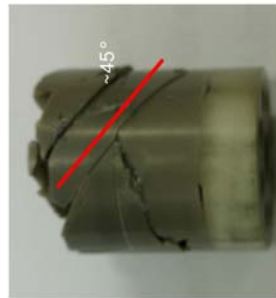
# Beispiel Drehmomentübertragung



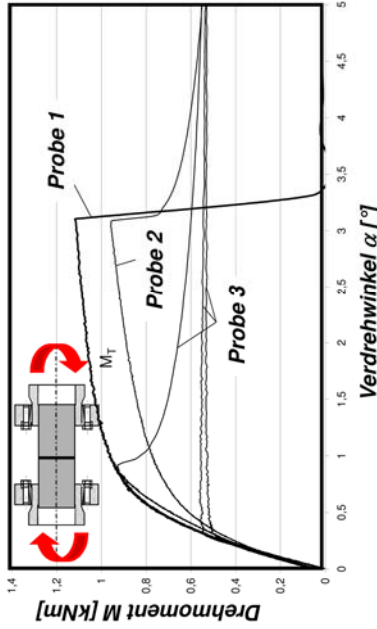
Stoffschlüssig – Aktivlötten von  $ZrO_2$



Lötverbund  $ZrO_2/ZrO_2$



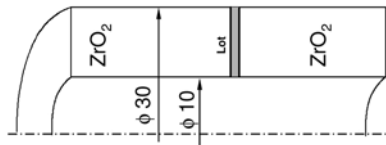
Gebrochene Probe 1



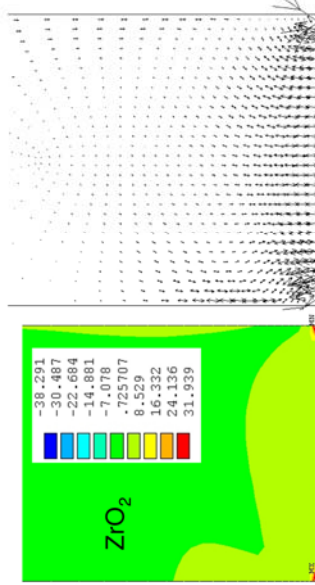
Übertragenes Drehmoment > 1 kNm bei 30er Welle  
 Klemmkraft reichte bei Probe 2 und 3 nicht mehr aus  
 Bruch erfolgt durch das Lot:  $\sigma_v$  minimal

## Beispiel Drehmomentübertragung

### Stoffschlüssig – Aktivlöten von $ZrO_2$



Modell



Spannungsverteilung und Richtung

Über FEM bestätigt sich eine sehr geringe Verbundspannung von  $\sigma_v < 16 \text{ MPa}$

Spannungsspitzen an den Rändern können durch Radlen oder Fasen reduziert werden

Für andere Keramikwerkstoffe wie z.B. SSiC mit  $\alpha = 3,4 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K} \neq \alpha_{\text{LOT}}$  zeigen sich deutlich höhere Verbund-Spannungen

## Beispiel Drehmomentübertragung

### Egalisierung Werkstoff- und Geometrieinfluß



	SSiC	ZrO <sub>2</sub>
Mechanische Kennwerte (as-fired)	m = 13,5; σ <sub>br</sub> = 357,6 MPa	m = 8,4; σ <sub>br</sub> = 818,0 MPa

$$\chi = \frac{\sigma_{L, \text{Boizen/Kleben/Löten}}}{\sigma_{L, \text{Welle}}} \quad |_{F_B=50\%}$$

$$\chi_{\text{Boizen}} = \frac{1114,5 \text{ Nm}}{13941,0 \text{ Nm}} \Big|_{F_B=50\%} = 8,2\%$$

$$\chi_{\text{Kleben}} = \frac{2760,0 \text{ Nm}}{13941,0 \text{ Nm}} \Big|_{F_B=50\%} = 19,8\%$$

$$\chi_{\text{Löten}} = \frac{1116,7 \text{ Nm}}{1771,0 \text{ Nm}} \Big|_{F_B=50\%} = 63,1\%$$

Form/Kraft-schlüssig

Stoffschlüssig (RT)

Stoffschlüssig (HT)

Kostenintensität

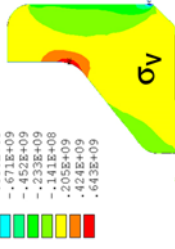
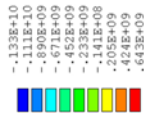
Temperaturempfindlichkeit, Verbundspannung

## Beispiel Einschrumpfen (kraftschlüssig)

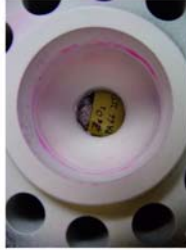
### Inlay für Düsenkopf (ZrO<sub>2</sub>) - Spritzgießmaschine



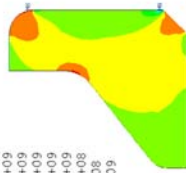
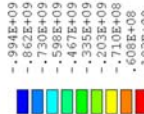
Eingeschrumpftes Inlay



Nach Schrumpfen bei RT



Rißprüfung nach Betrieb



Mit Betriebslasten (p<sub>p</sub>, T)

Über FEM bestätigt sich eine sehr geringe Verbundspannung von  $\sigma_v < 16 \text{ MPa}$

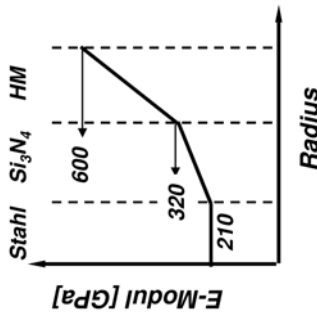
Spannungsspitzen an den Rändern können durch Radien oder Fasen reduziert werden

Für andere Keramikwerkstoffe wie z.B. SiC mit  $\alpha = 3,4 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K} \neq \alpha_{\text{LOT}}$  zeigen sich deutlich höhere Verbund-Spannungen

## Beispiel Einschrumpfen (kraftschlüssig)



### Eingeschrumpfter Ring ( $Si_3N_4$ ) - Blechumformung



- 2-schaliger Armierungs-Aufbau mit Hartmetall als „Dehnungsbegrenzer“,  $E_{HIM} \cdot 2 \cdot E_{Si_3N_4}$
- Gesamter Verbund soll im Belastungsfall auf Druck gehalten werden
- Reduzierung von Schmiermitteln und Erhöhung der Standzeit führen zu reduzierten „Life Cycle Costs“

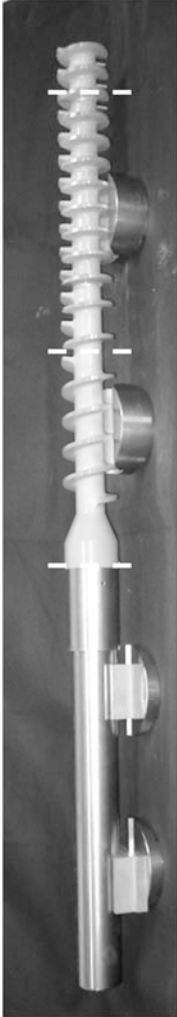




## Stoffschlüssige Drehmomentübertragung



### Gelötete Verbunde im Extrusionsprozess



Aktivgelöteter Verbund Stahl/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> aus 4 Segmenten



Aktivgelöteter Ti/ZrO<sub>2</sub>-Verbund  
Schnecke und Zylinder

Modularer Aufbau 1- bzw. 2-gängig ↴

Beachtung fügegerechter Parameter durch  
definierte Führung und Vorspannung bei  
Löttemperatur ↴

Aufbereitung sandhaltiger Genußmittel (oben)  
und Forschungsextruder zur Analyse der  
Schmelzeströmung im Extruder mit NMR (links) ↴

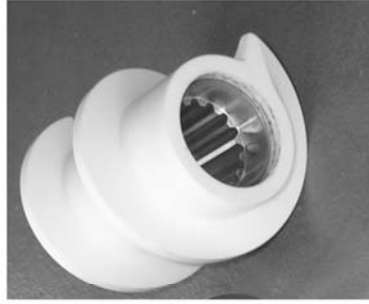
## Stoffschlüssige Drehmomentübertragung



### Geklebte Verbunde im Extrusionsprozess



Aufgeschobene Segmente aus  $Al_2O_3$



Eingeklebte Innenverzahnung

- ⇓ Schnecke zur Verarbeitung von  $Al_2O_3$ -Massen
- ⇓ Ziel: Verschleißminimierung und Kontaminationsfreiheit
- ⇓ Verschleiß Faktor >50 niedriger als bei Stahl

## Passiv-Löttechnik



1kV - Durchführung



3fach- Durchführung



12kV – Durchführung (150A)

- ↓ Verfahren zur Herstellung von Serien
- ↓ Stückkosten sind niedriger als beim Vakuumlöten
- ↓ Produkte sind Stromdurchführungen, gelötete Stahl-Keramik-Verbunde für den Verschleißschutz, Sensoren für die Meß- und Regeltechnik