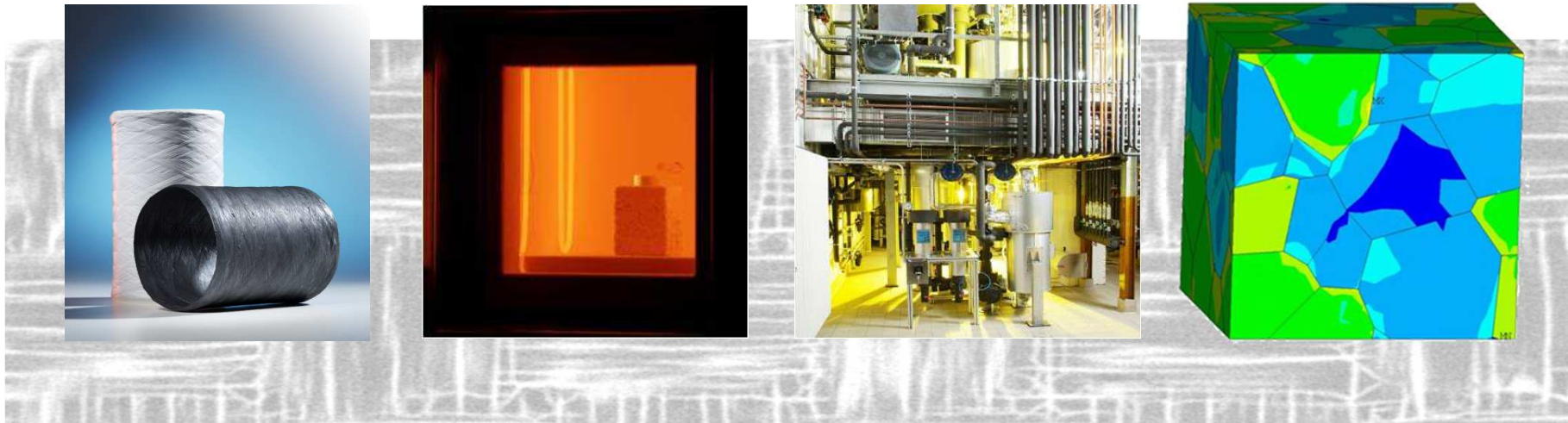

Hanau, 22.1.2015

Werkstoffverbunde für Hochtemperaturanwendungen

Workshop „HT-Verbundwerkstoffe für den Leichtbau“

Dr. Jens Schmidt (V), C. Gadelmeier, C. Eckardt



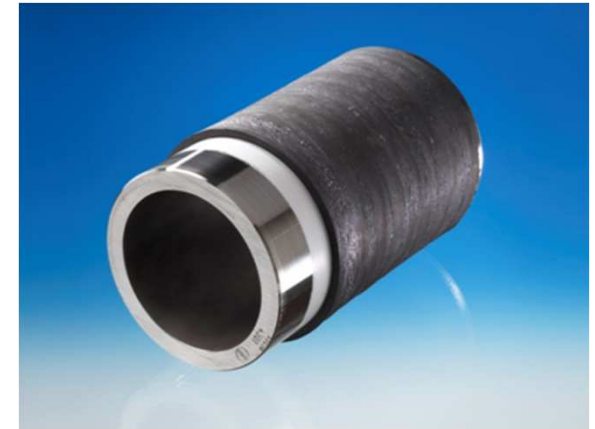
Themen

- **Konzepte zur Herstellung und Prüfung keramischer Werkstoffverbunde**
- **Metall-Keramikverbunde für die Kraftwerks- und Produktionstechnik**
 - Armierungstechnik
- **Keramik-Keramik-Verbunde für Wärmebehandlungsanlagen**
 - Fügetechniken
- **Zusammenfassung**

Konzepte zur Herstellung und Prüfung keramischer Werkstoffverbunde

■ Armierungstechnik

- Herstellung von *hybriden Materialsystemen* durch die Kombination von unterschiedlichen HT-Werkstoffen



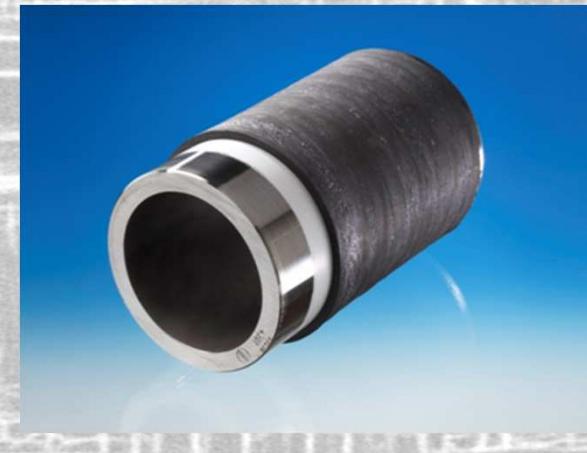
■ Fügetechnik

- Entwicklung von Fügetechniken zur *stoffschlüssigen Verbindung* von Einzel aus HT-Werkstoffen zu komplexen Bauteilen



Metall-Keramikverbunde für die Kraftwerks- und Produktionstechnik

Armierungstechnik



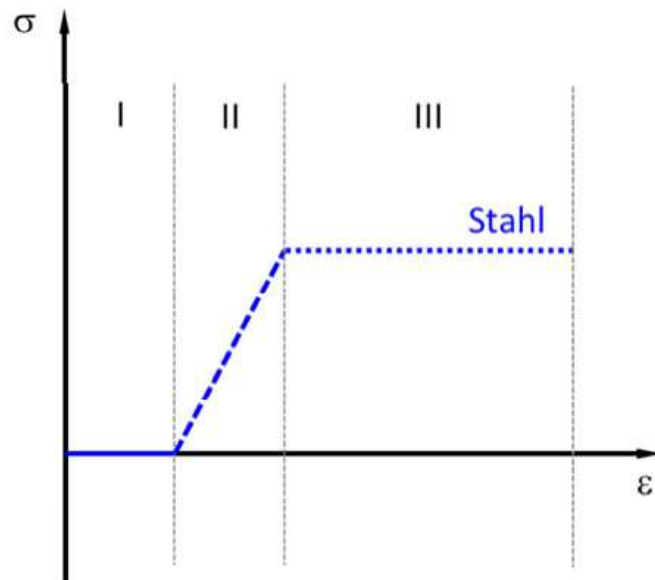
Kraftwerks- und Produktionstechnik

- Steigerung der Lebensdauer und Effizienz
 - Verbesserung Kriechbeständigkeit und Thermostabilität von Druckbehältern und Rohren
 - Alternative zu Stahl und Ni-Basislegierungen
 - Steigerung der Frischdampf Temperatur (700 °C-Kraftwerk)
 - Erhöhung der Lastwechselflexibilität

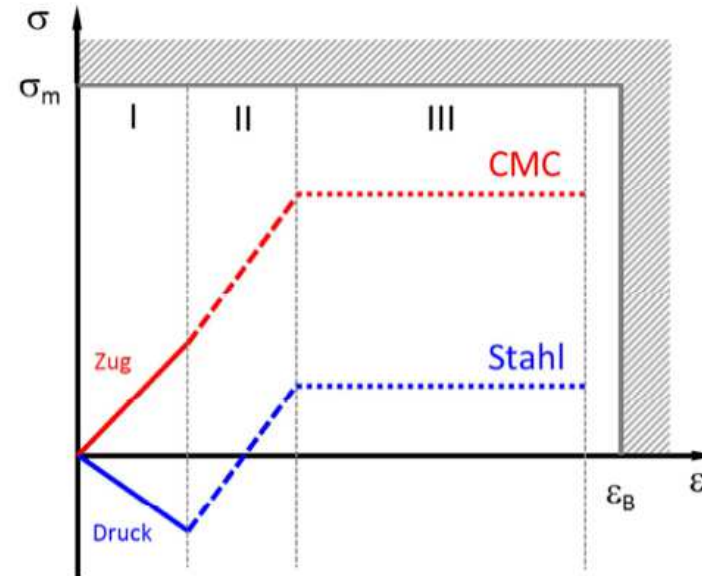
© GKM

Werkstoffverbundkonzept

Erhöhung der Lebensdauer durch Faserarmierung von innendruckbelasteten Stahlrohren



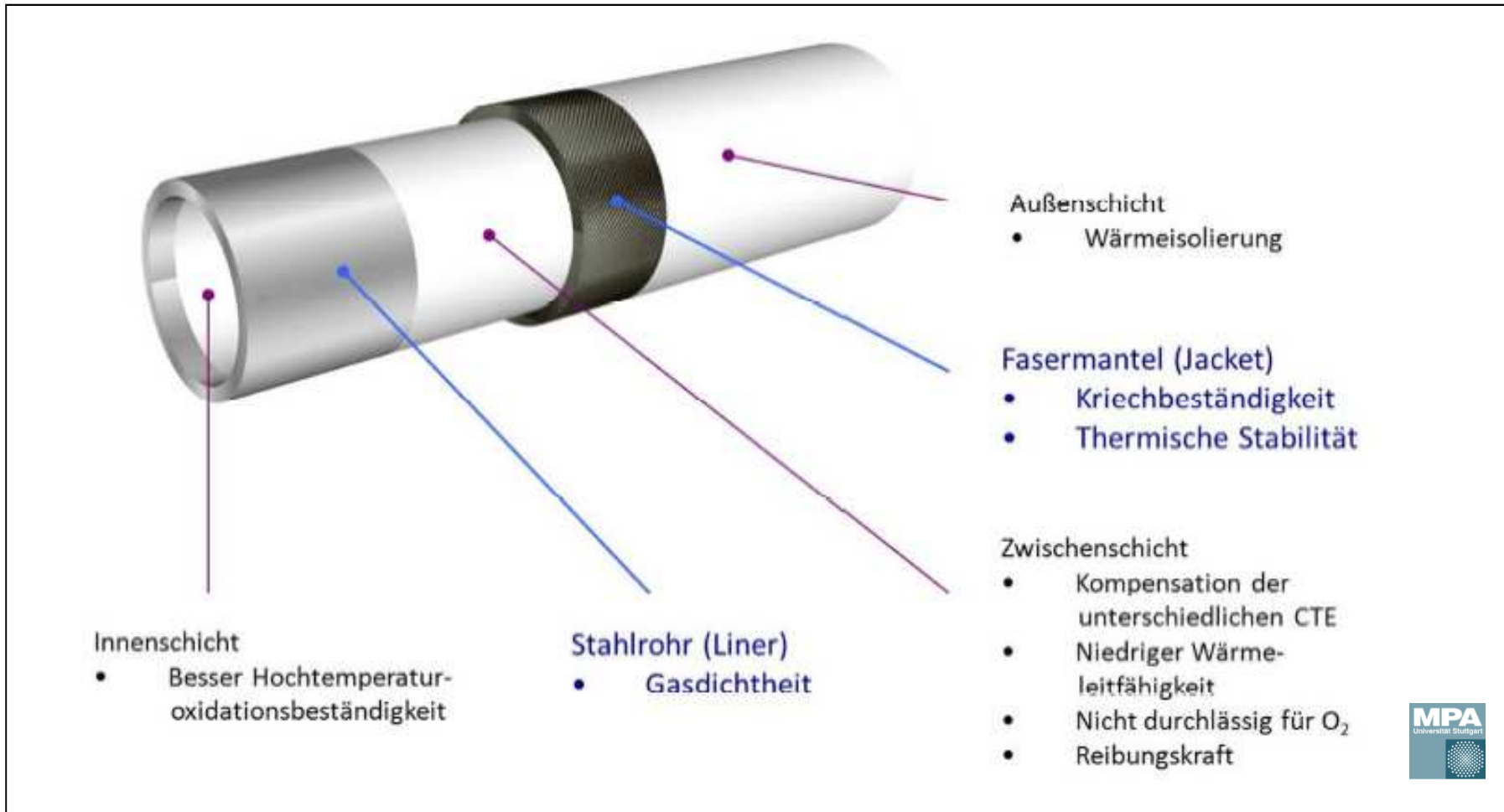
- I. Aufheizen
- II. Innendruck
- III. Kriechen



- I. Aufheizen (Annahme: kein Gap zw. Liner und Jacket)
- II. Innendruck
- III. Kriechen

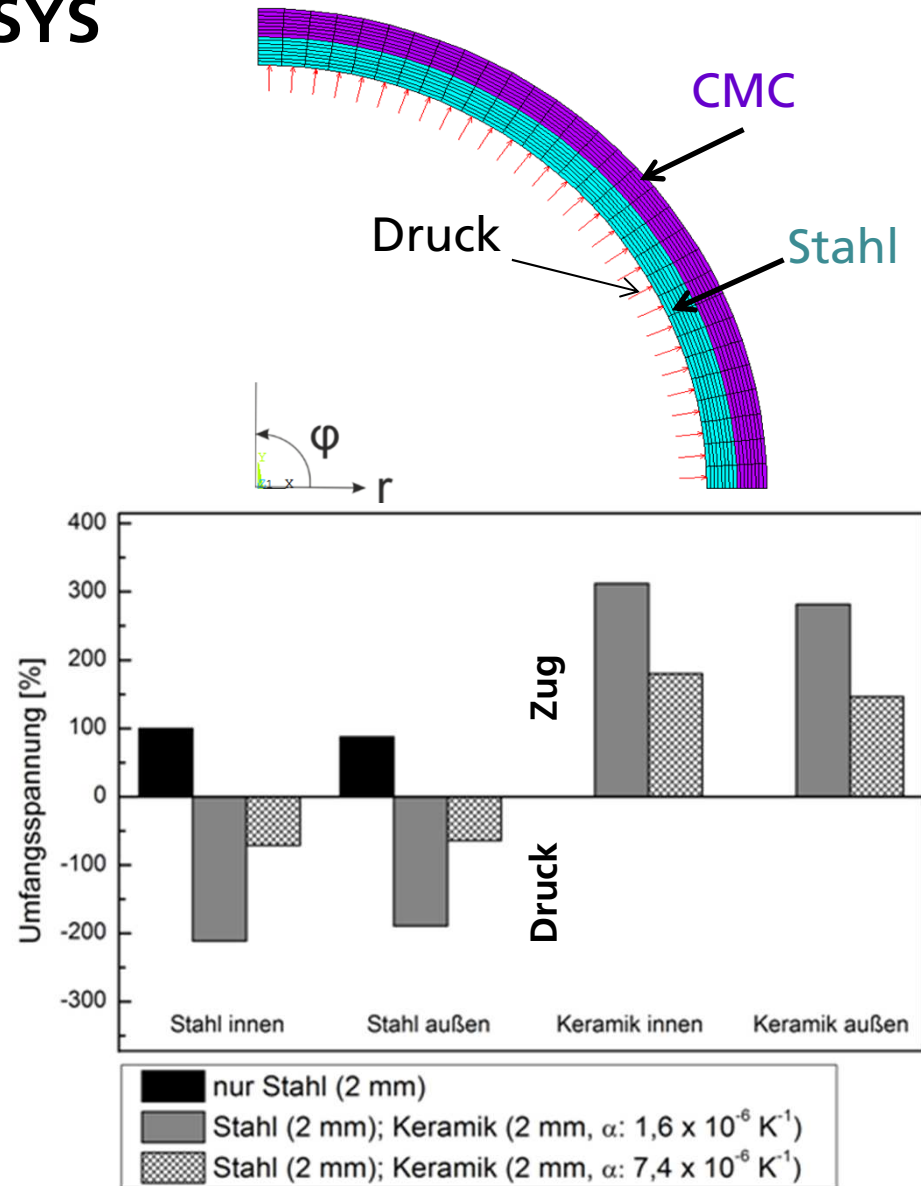
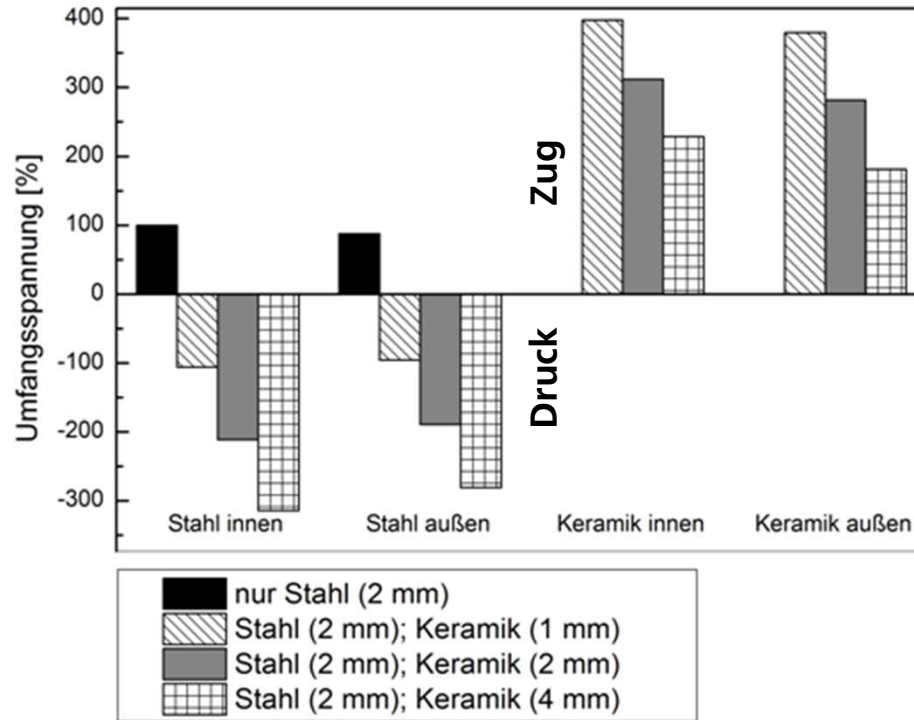


Werkstoffverbundkonzept „Compoundrohr“



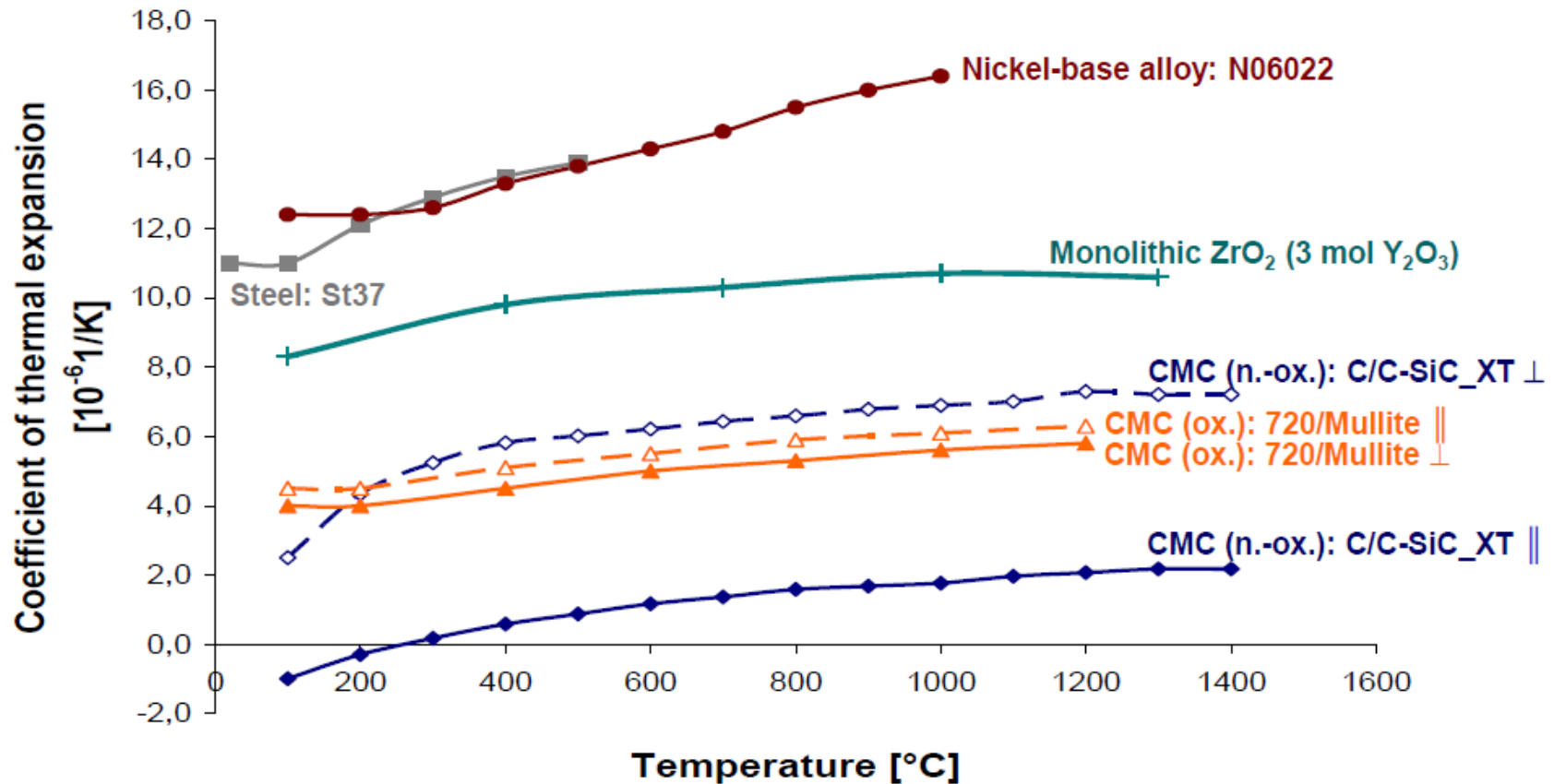
Spannungsberechnung mit ANSYS

Modellwerkstoff UD-C/SiC



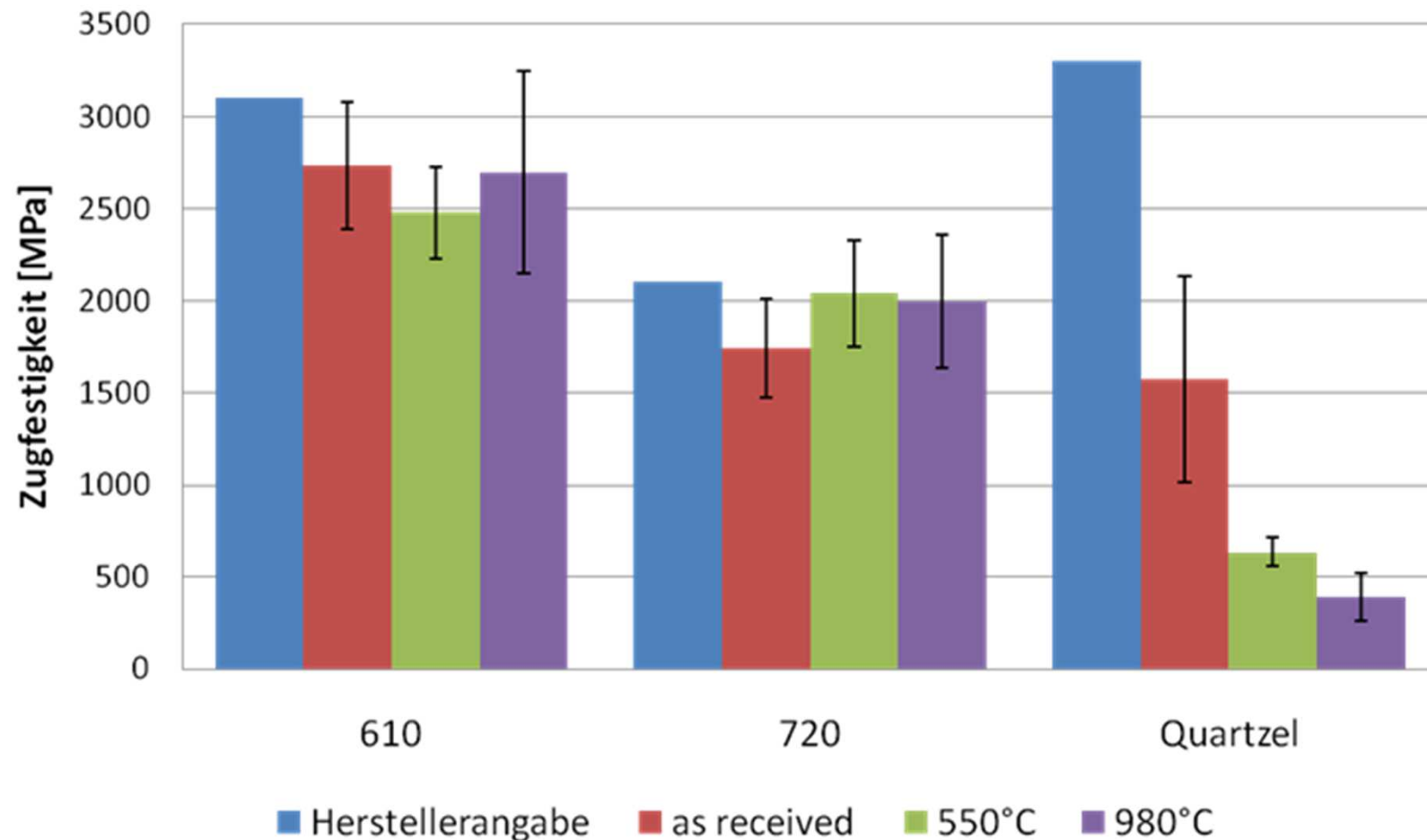
Auswahl Faser-Matrix-System

Thermische Ausdehnungskoeffizienten von Metallen und Keramiken



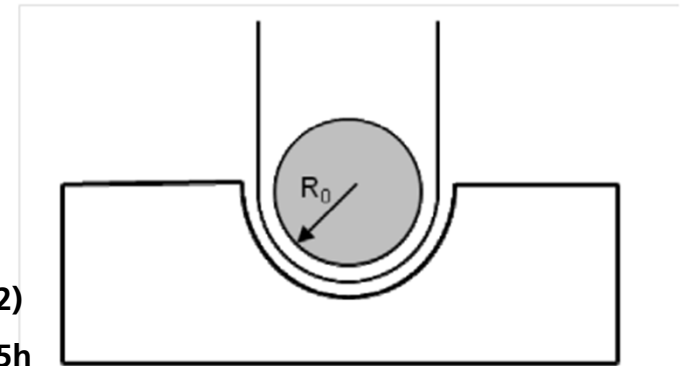
Thermische Stabilität von Fasern nach Auslagerung (1 h/Luft)

Einzelfaserzugversuch nach ASTM D3379-75



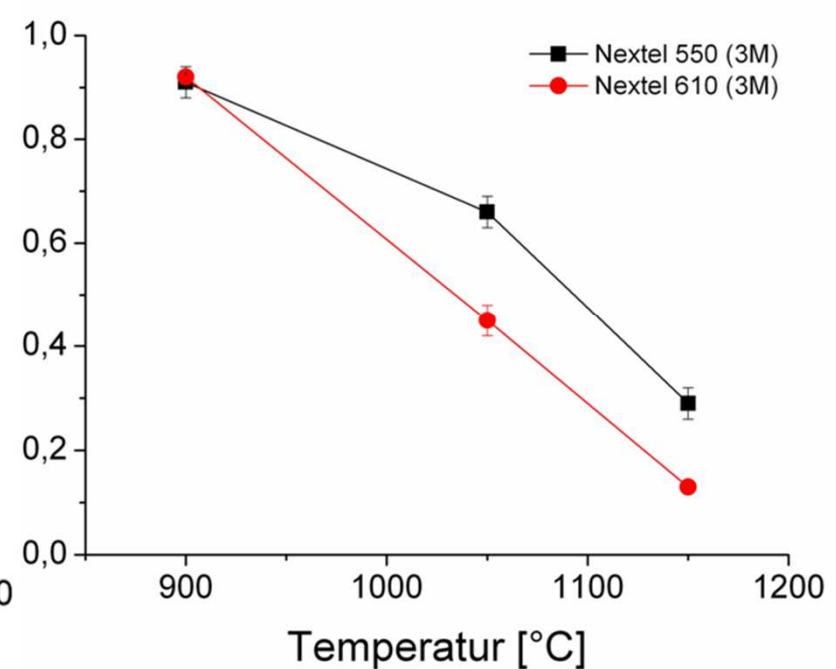
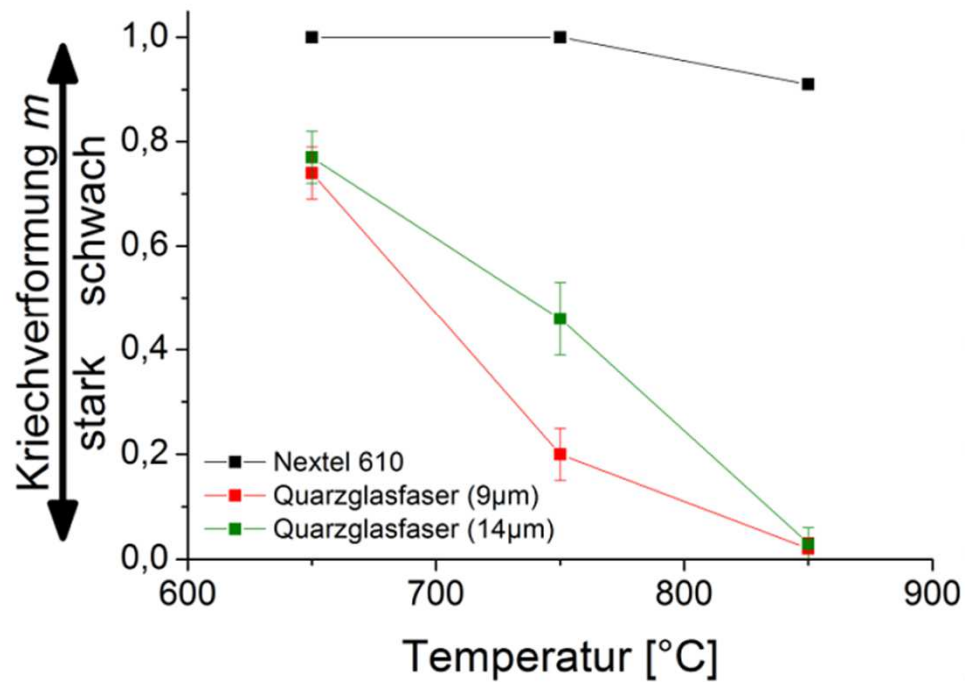
Kriechverformung von Fasern

Bend-Stress-Relaxation-Test (BSR)



Morscher, G.; DiCarlo, J. (1992)

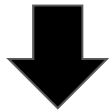
Versuch: Graphit-Tool, N₂, 0,5h



Zeitstandsversuche

Prüfkörper in unterschiedlichen Fertigungszuständen

■ Stahl-Liner neu, T24, Bainit



■ Nasswickeln



■ Therm. Vernetzen



■ Pyrolyse $T < 700\text{ °C}$

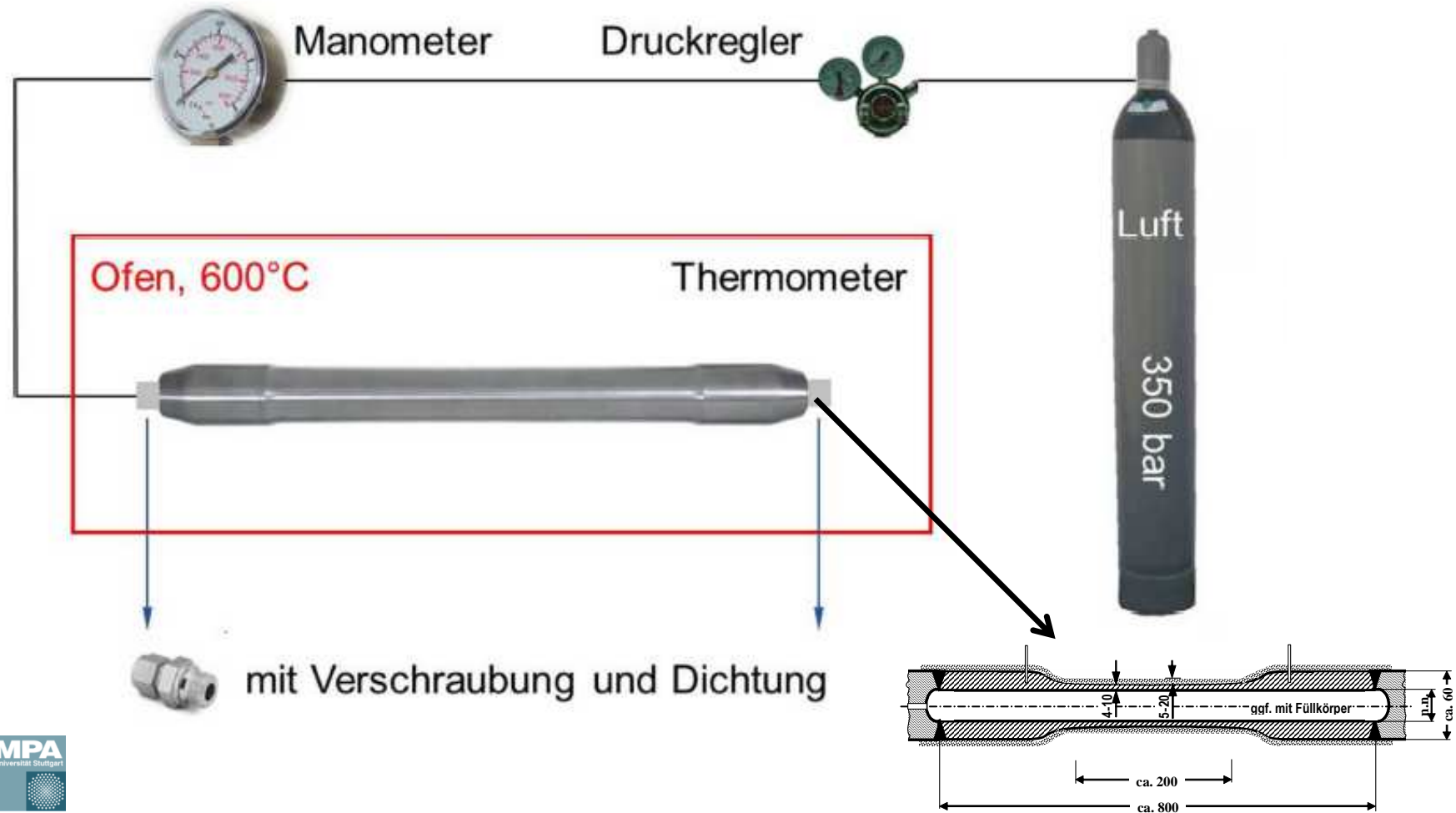


■ Hybridrohr für Zeitstandsversuch



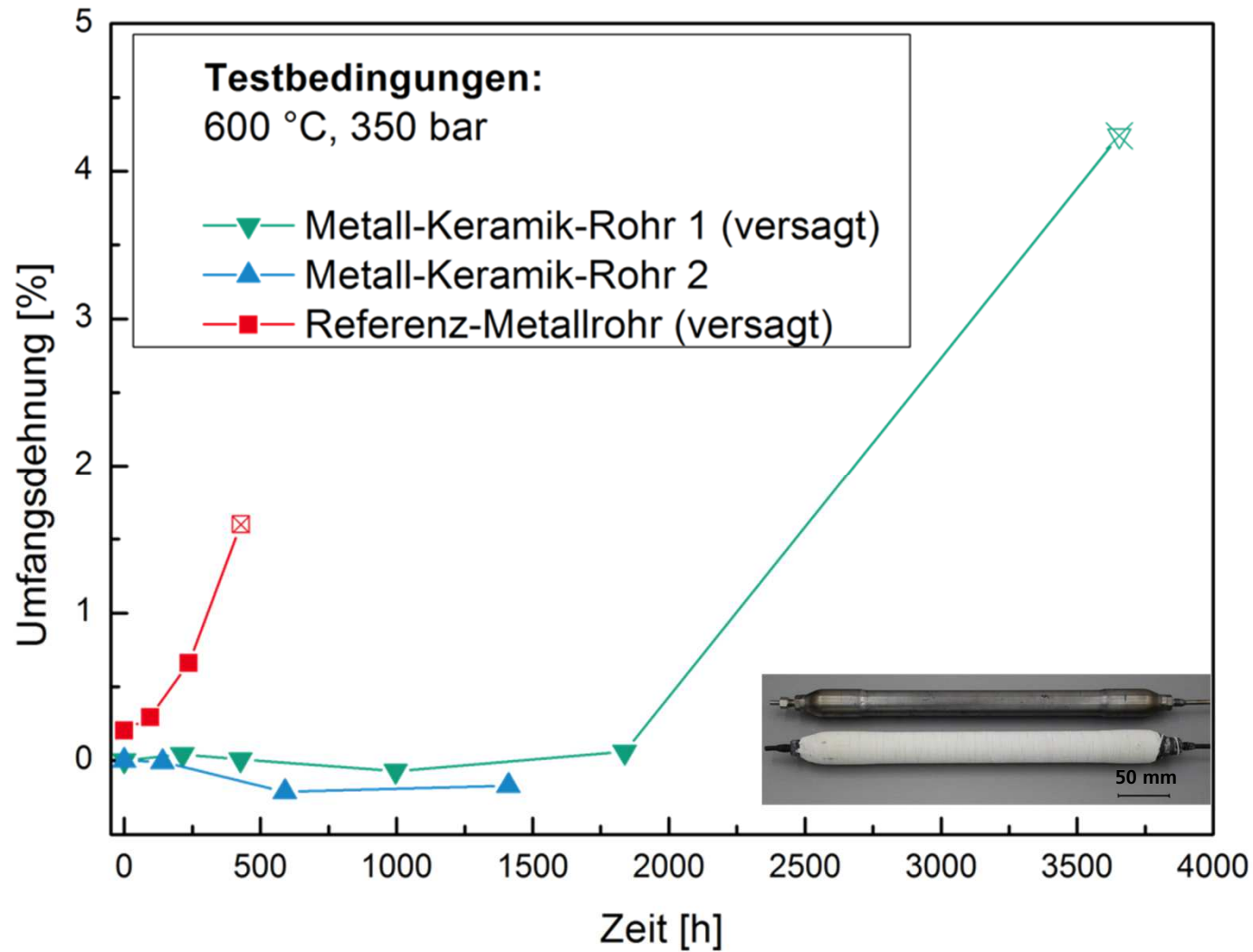
Zeitstandversuche

Versuchsaufbau MPA Stuttgart



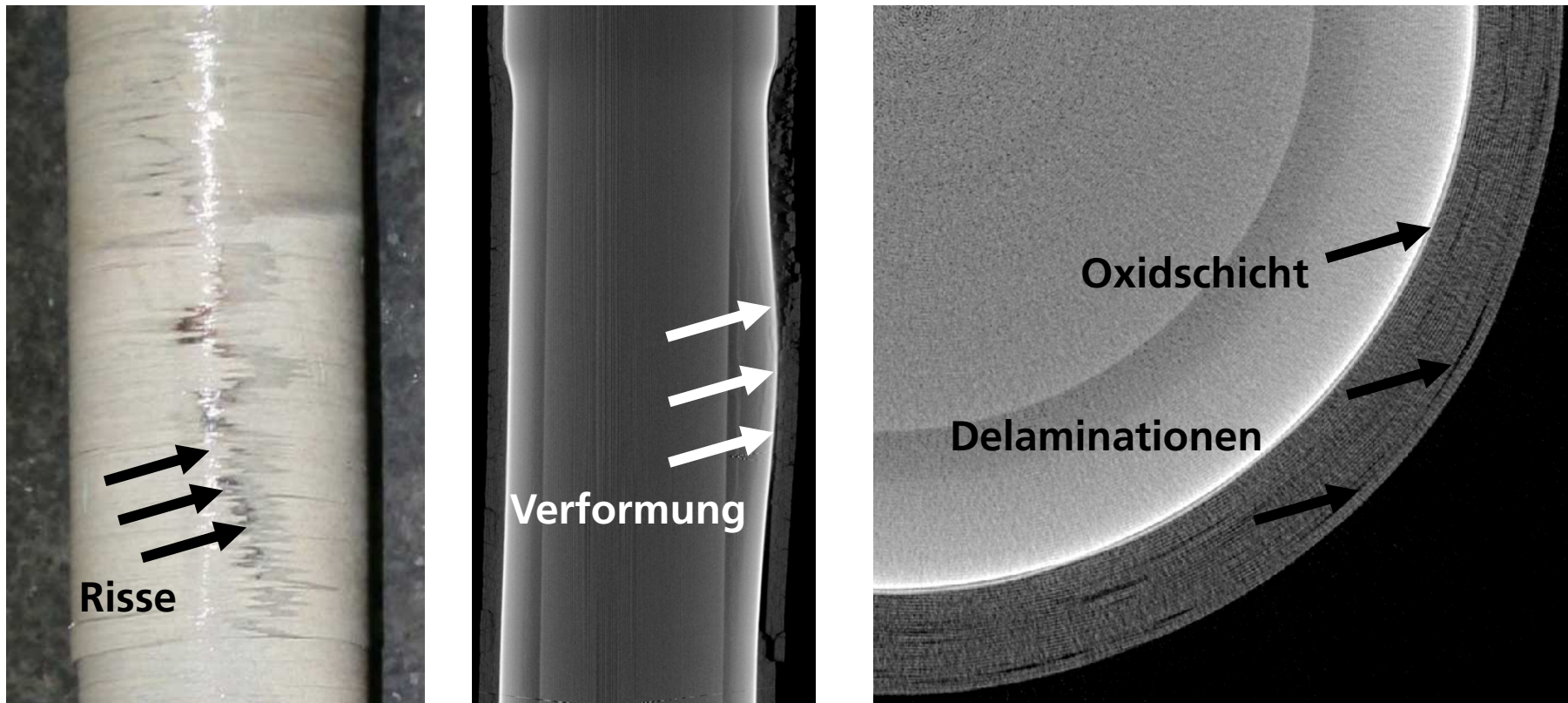
Zeitstandversuche

Bauteilverhalten armierter Metall-Keramik-Versuchsrohre



Zerstörungsfreie Prüfung eines UD-armierten Liners mit CT

Liner LM 19, Wandstärke CMC = 2,6 mm

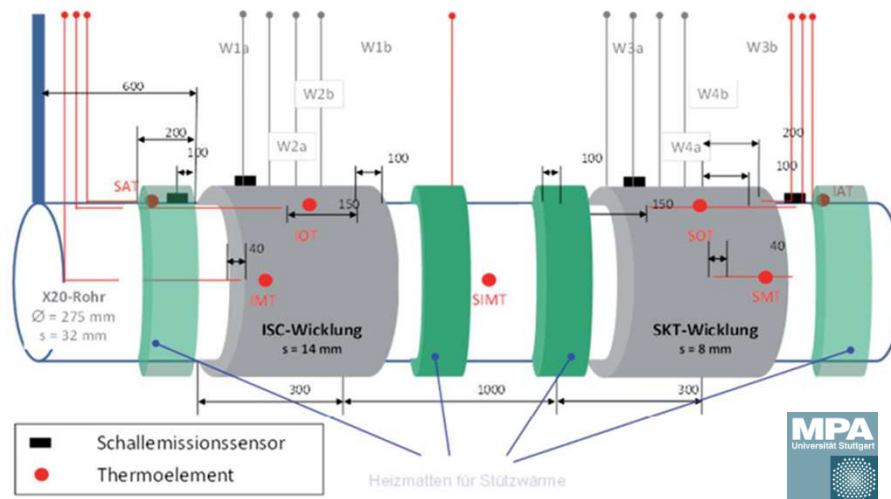


Werkstofffehler nach Prüfzeit = 1682 h

Feldversuch im Großkraftwerk Mannheim

Vorbereitung

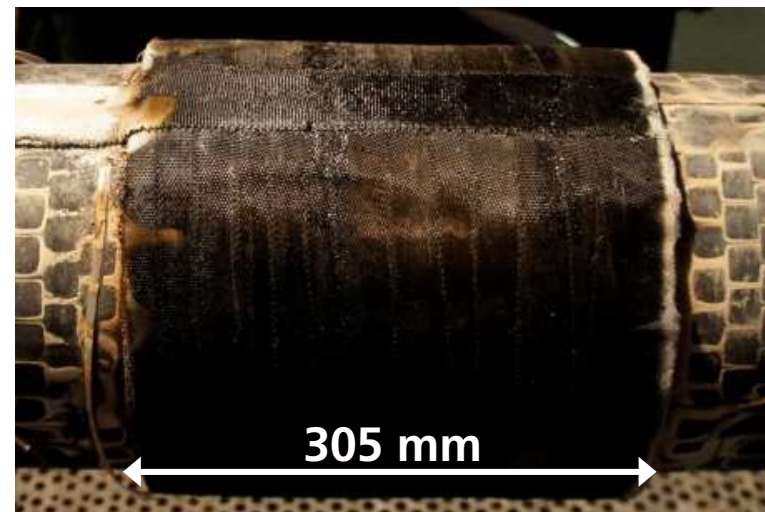
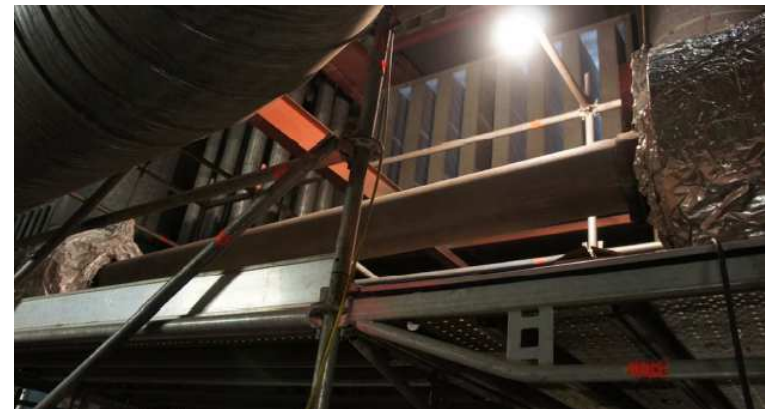
- Frischdampfrohr X20-Stahl
- Rohr $\varnothing_A = 275 \text{ mm}$, $D = 32 \text{ mm}$
- Dampftemperatur $T_{\max} = 530 \text{ °C}$, Innendruck = 255 bar (Angaben GKM)
- Instrumentierung



Feldversuch im Großkraftwerk Mannheim

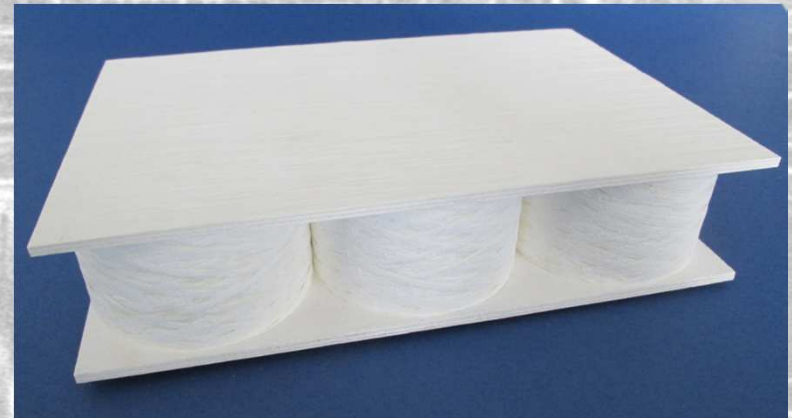
Applikation Faserarmierung

- Handlaminieren von Gewebe-Prepregs
Wandstärke Keramikmantel = 14 mm
- Wärmeeintrag mit Heizmatte aus
Textilglasgewebe ($T_I = 530 \text{ °C} / T_A = 740 \text{ °C}$)
- Härtung und Pyrolyse in einem Schritt
- Dehnkompatible Zwischenschicht



Keramik-Keramik-Verbunde für Wärmebehandlungsanlagen

Fügetechniken



Anwendungspotenzial von gefügten Keramikbauteilen für Wärmebehandlungsanlagen

HT-Lüfterräder



GRAPHITE  MATERIALS



<http://www.schmiedag.de/fileadmin/schmiedag/technologie/bilder/Gesekschmiede.jpg>

HT-Greifer

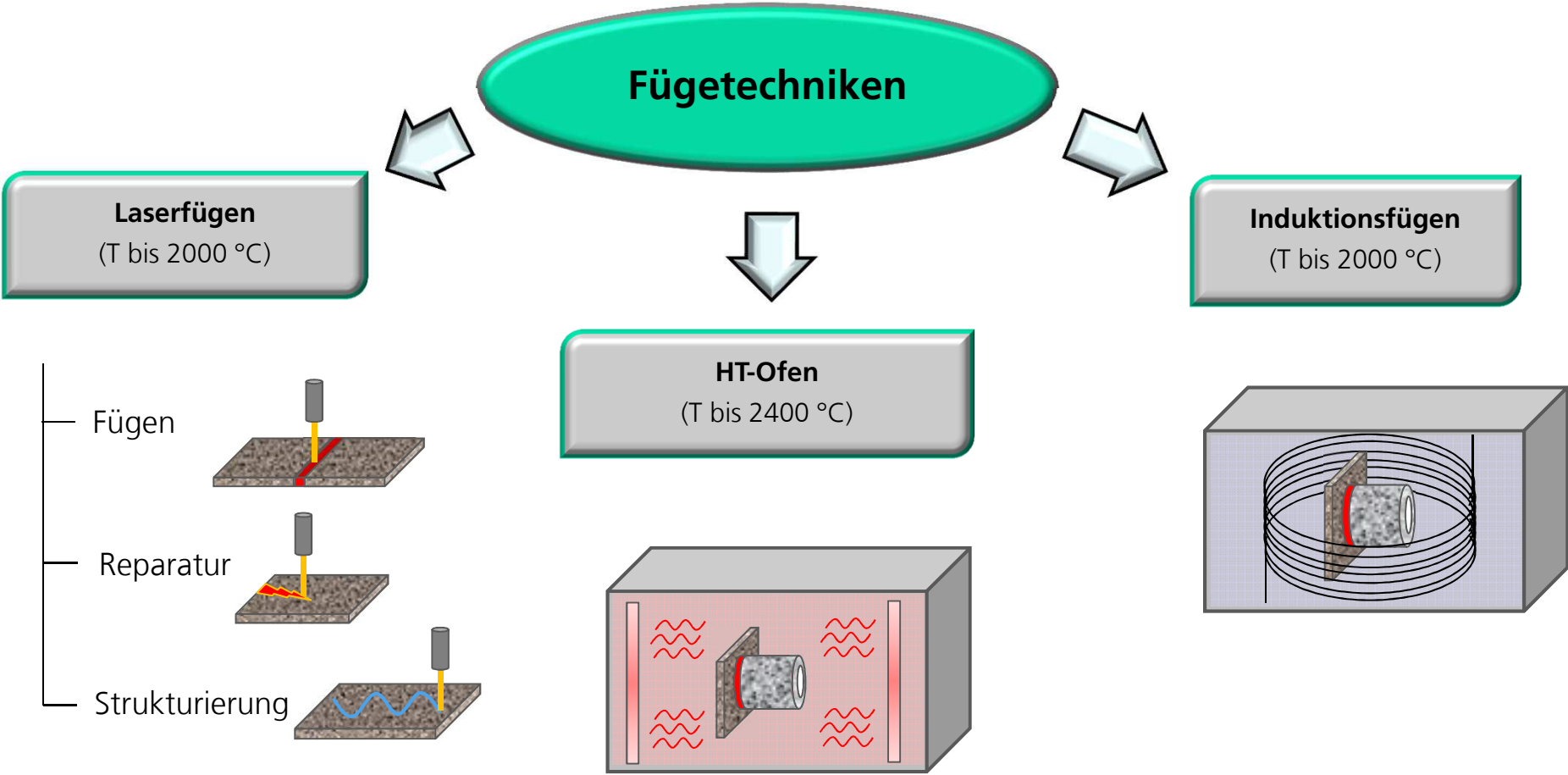


HT-Wärmeübertrager

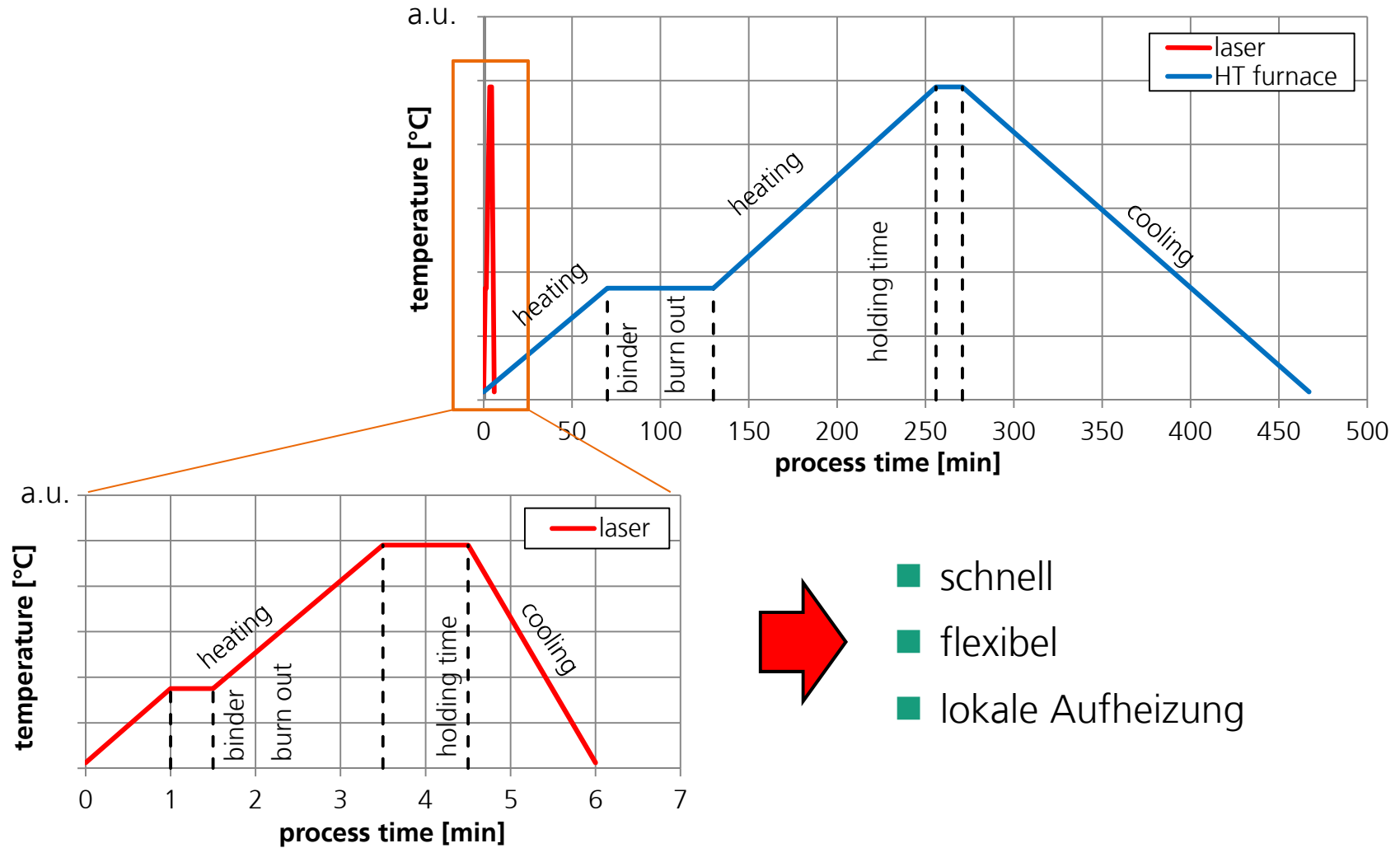


CARBONGROUP®

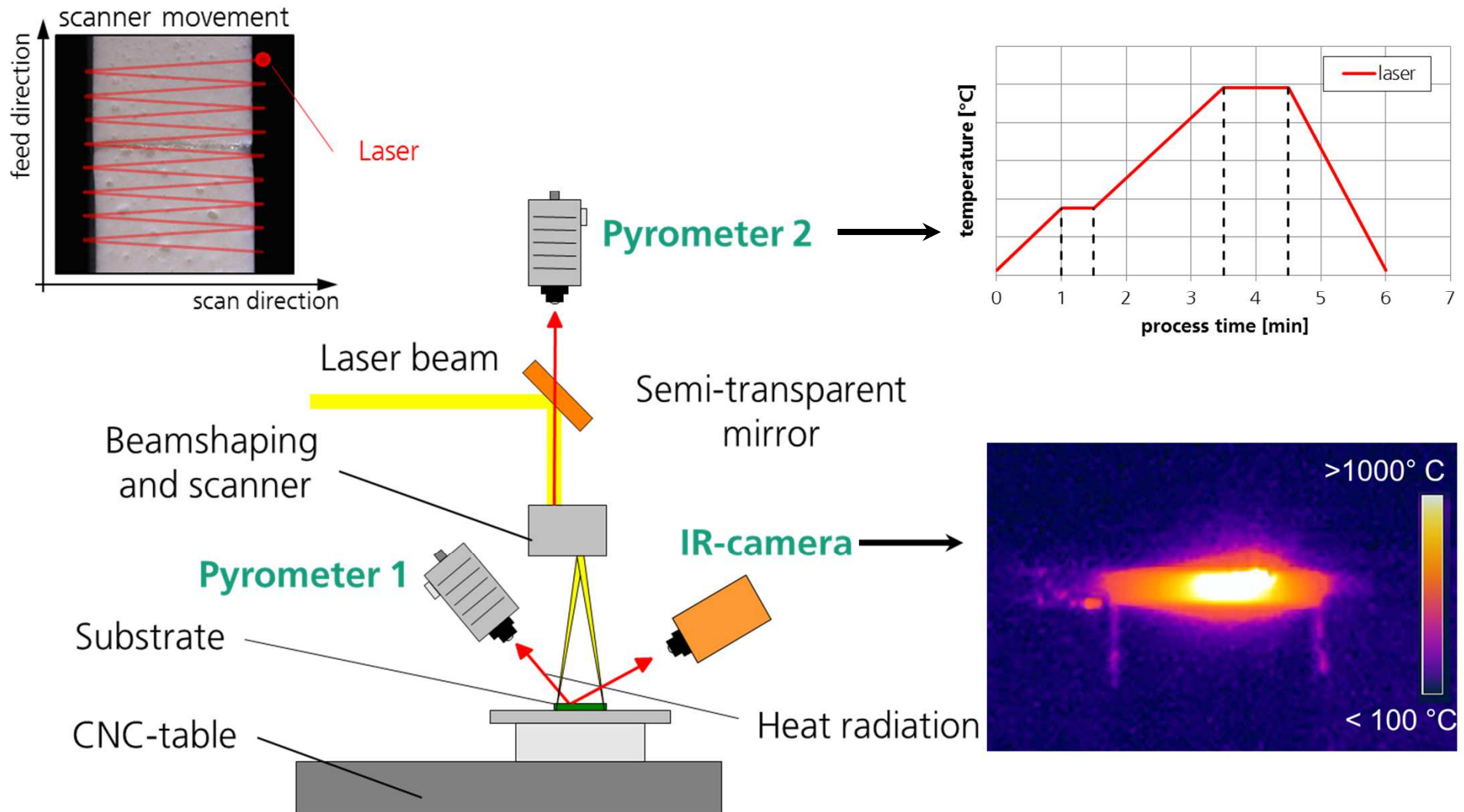
HT-Fügen von Keramiken



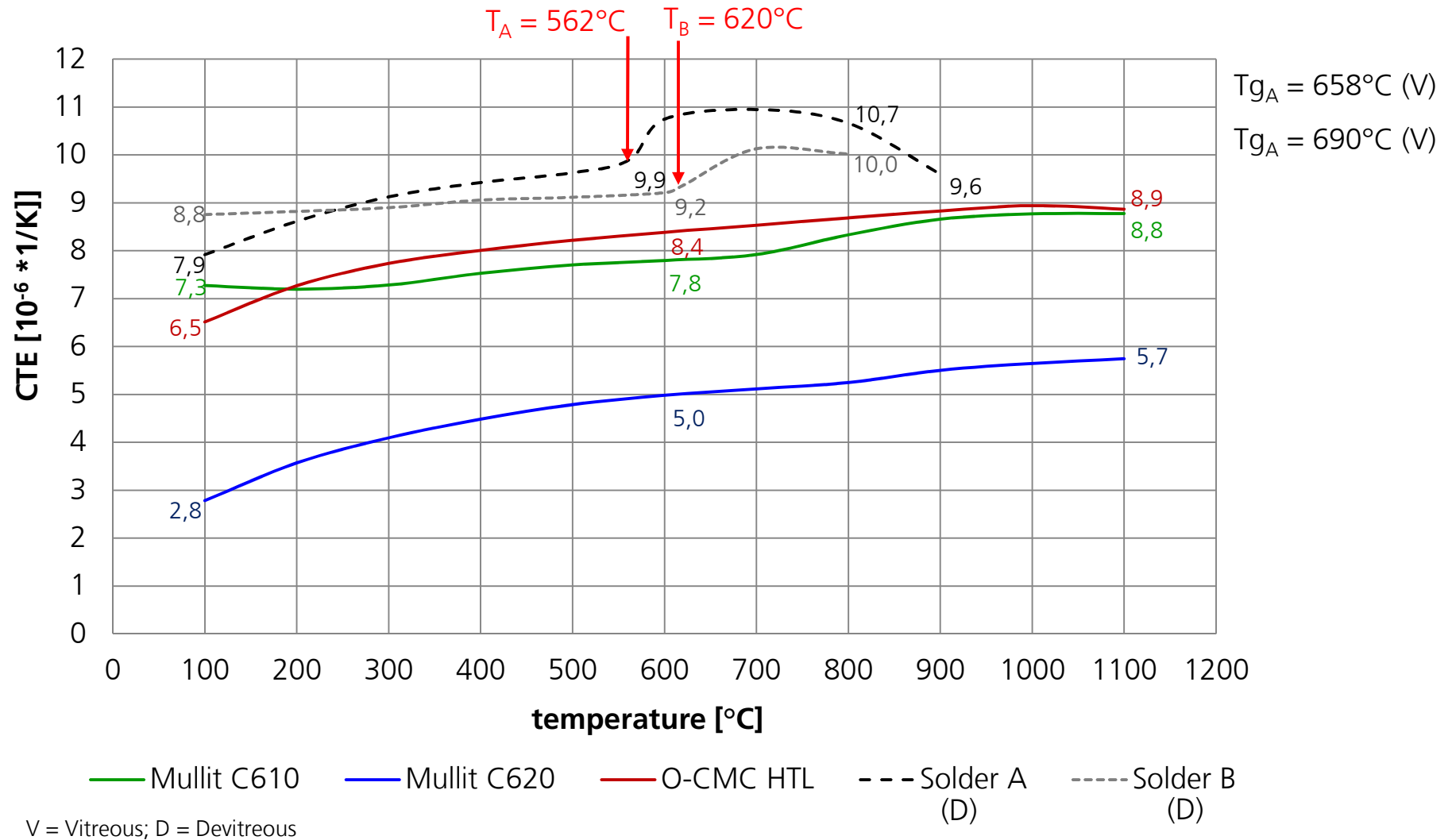
Verfahrenstechnische Vorteile Laserfügen



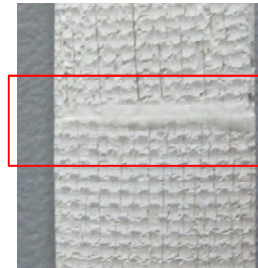
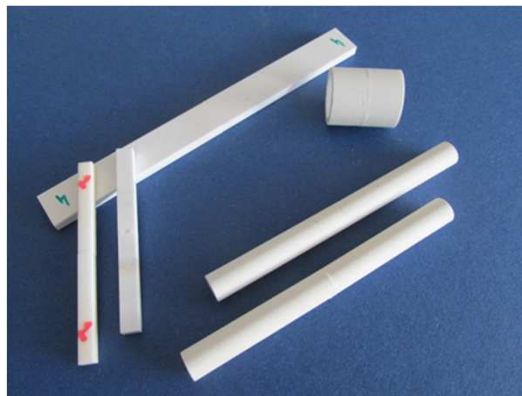
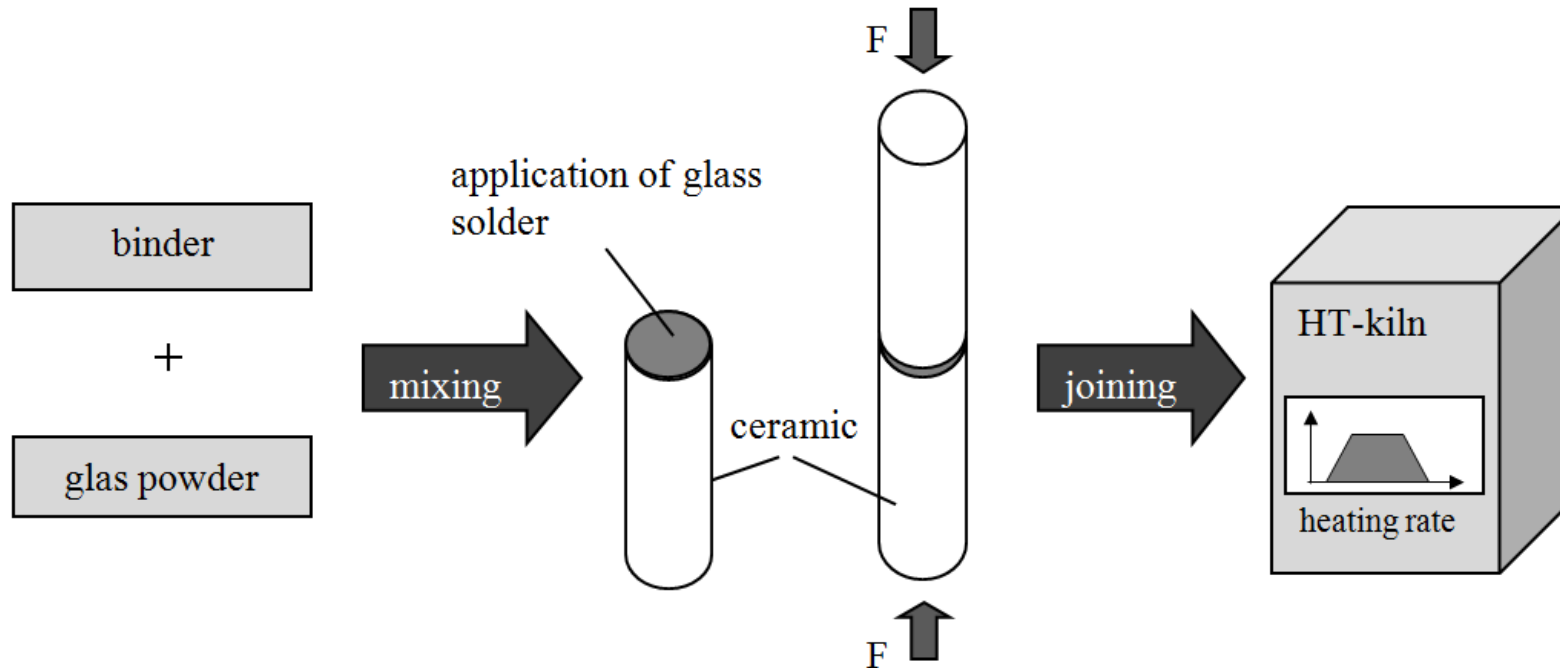
Versuchsaufbau Laserfügen und Prozesskontrolle



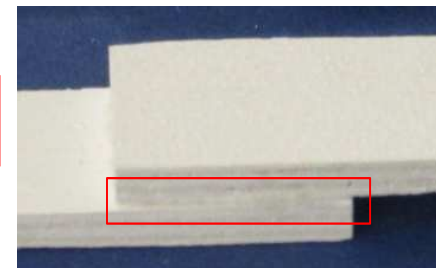
Thermische Ausdehnungskoeffizienten von Keramiken und kommerziellen Fügeloten



Fügeprobenherstellung



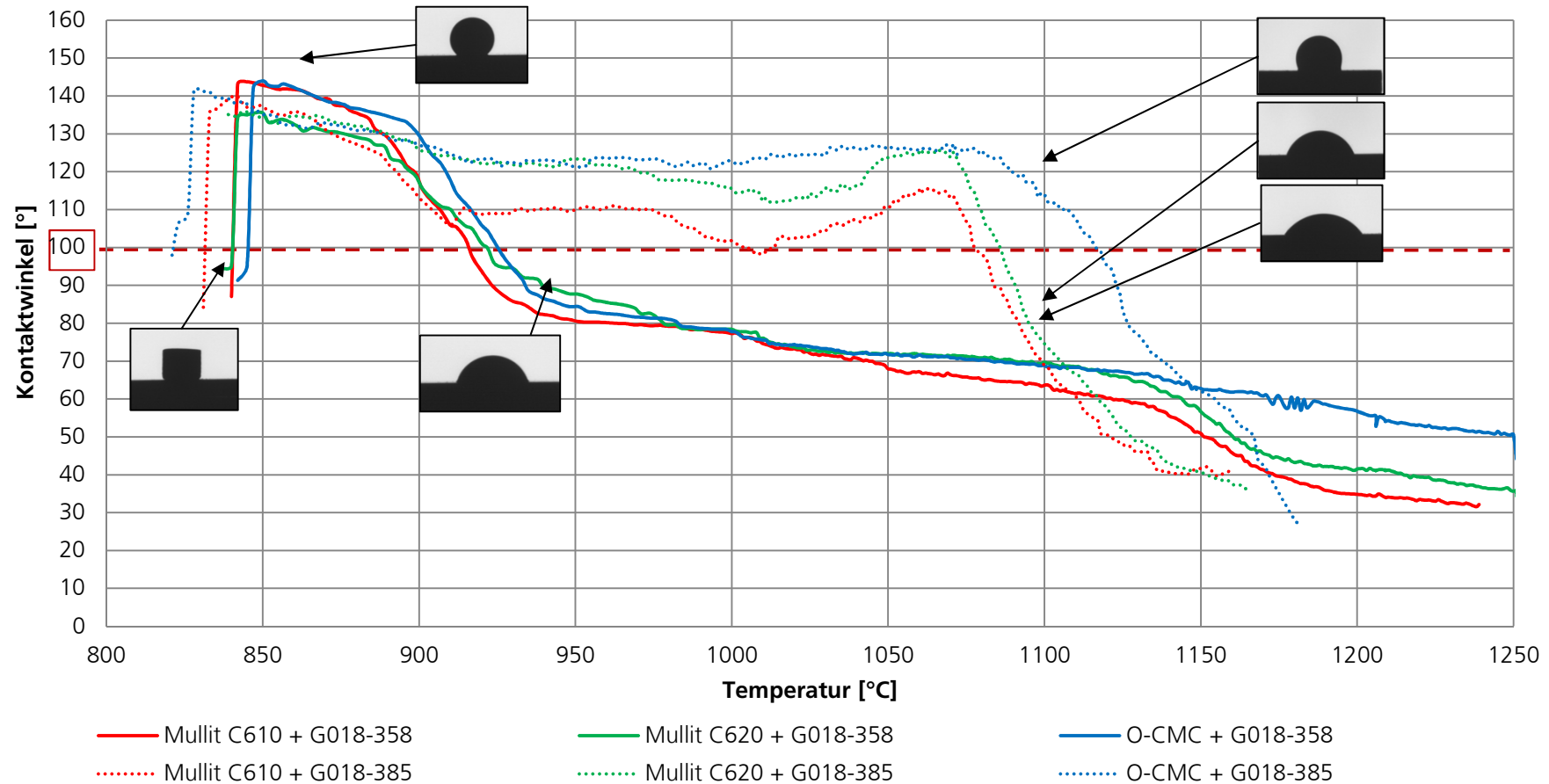
50x10x3 mm³



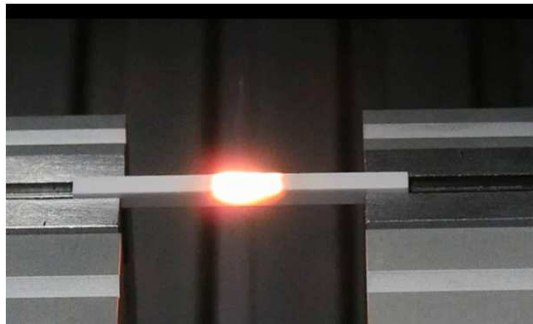
60x4x3 mm³

Fügespaltbreite ~ 80 µm

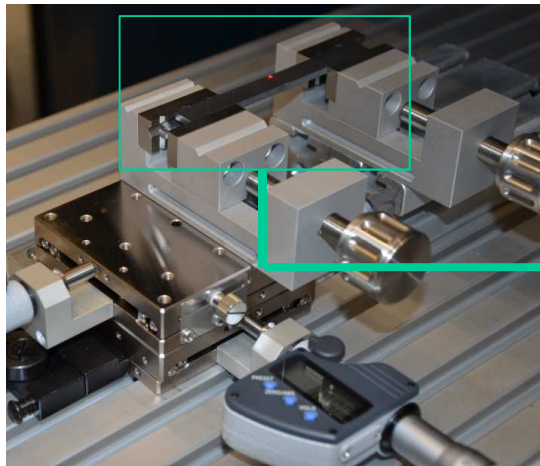
Kontaktwinkelmessungen mit kommerziellen Fügeloten



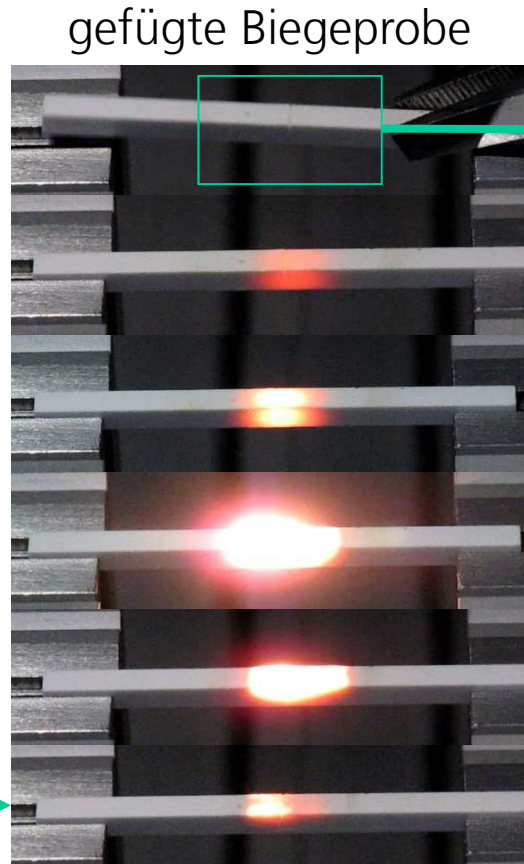
Laserfügen von Mullitkeramik mit Glaslot



Laserfügevorrichtung



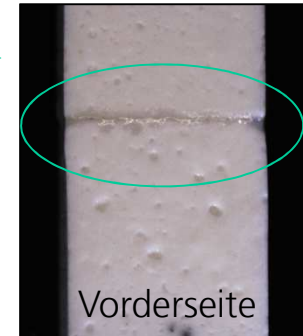
Laserfügeprozess (1 min)



gefügte Biegeprobe

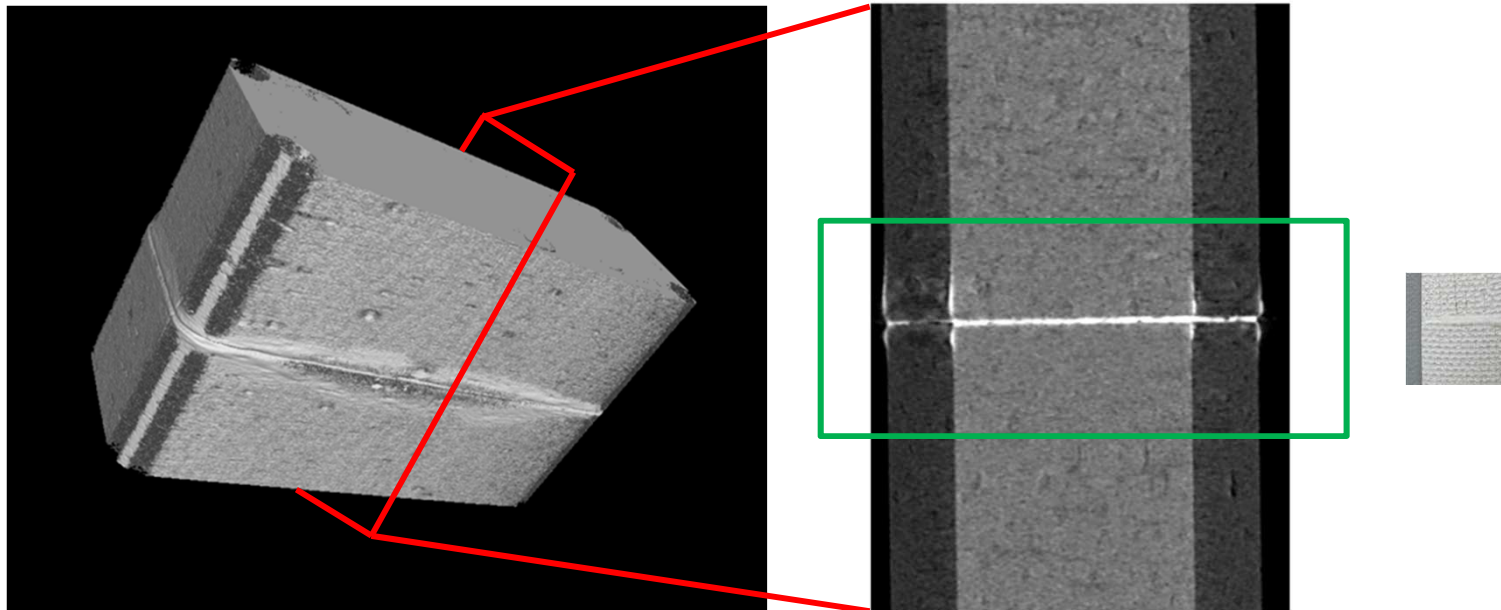
Start Fügeprozess

Fügenreht

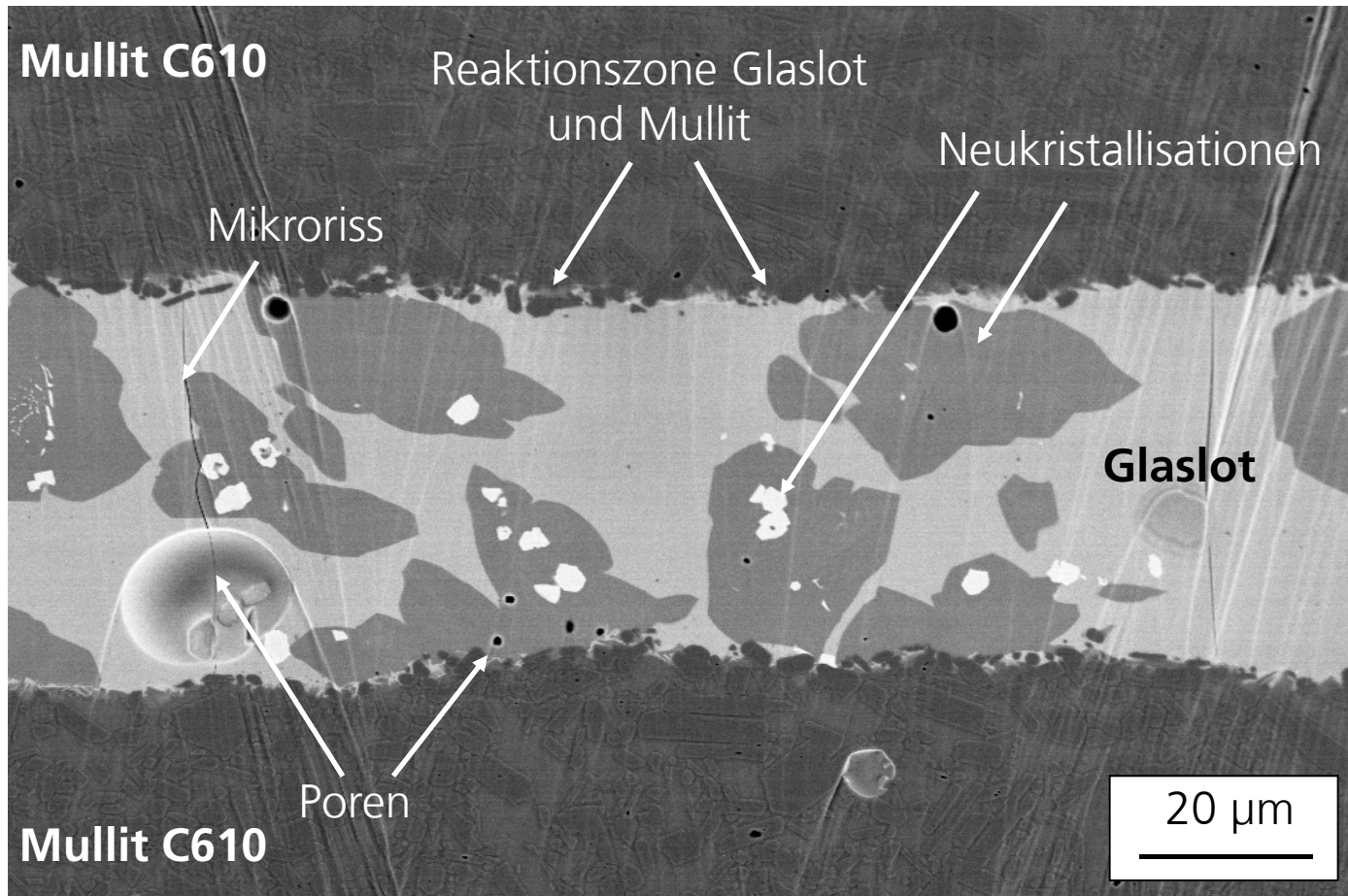


Mikrostrukturanalyse der Fügeverbindungen mit Computertomographie

Mullit-Keramik mit Glaslot nach dem Laserfügen

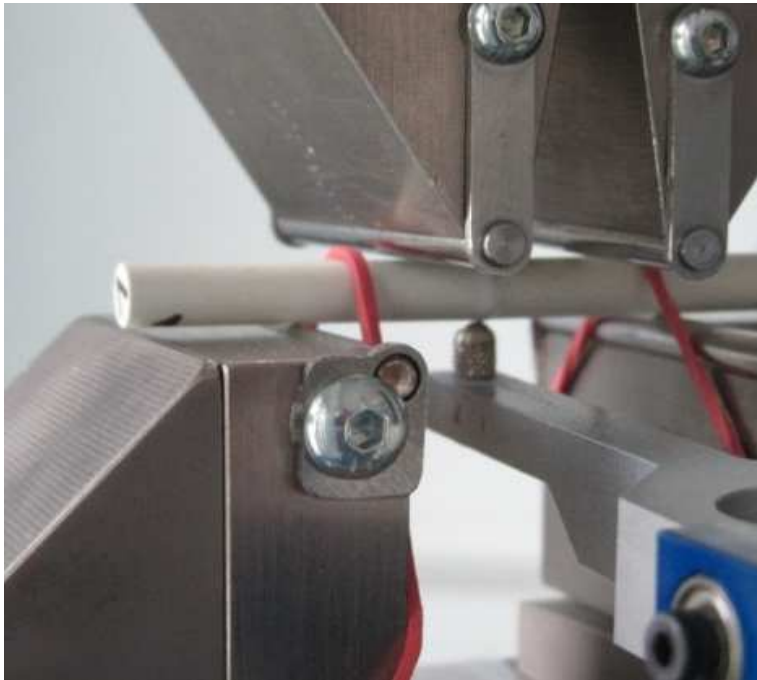


Mikrostrukturanalyse der Fügeverbindungen mit REM (CSP-Schnitt)



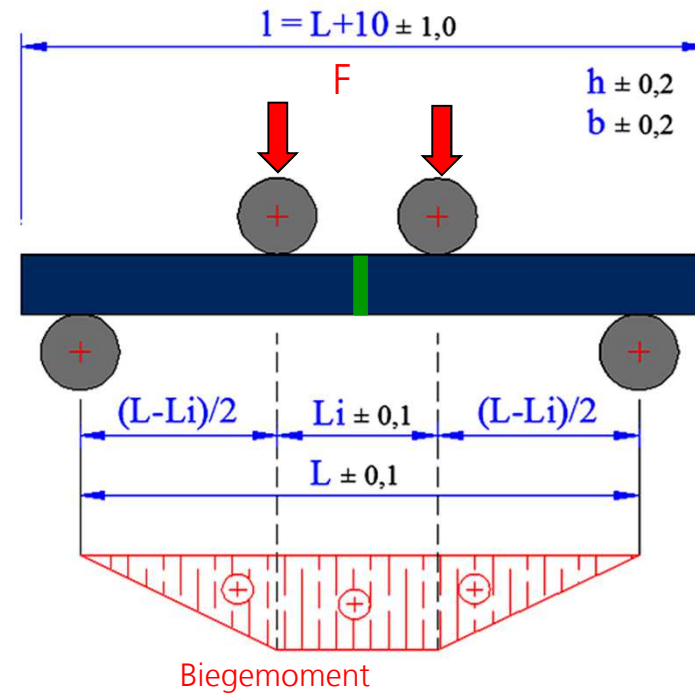
Mechanische Festigkeitsprüfung von Fügeverbindungen

- Biegefestigkeit σ_B nach DIN EN 843-1



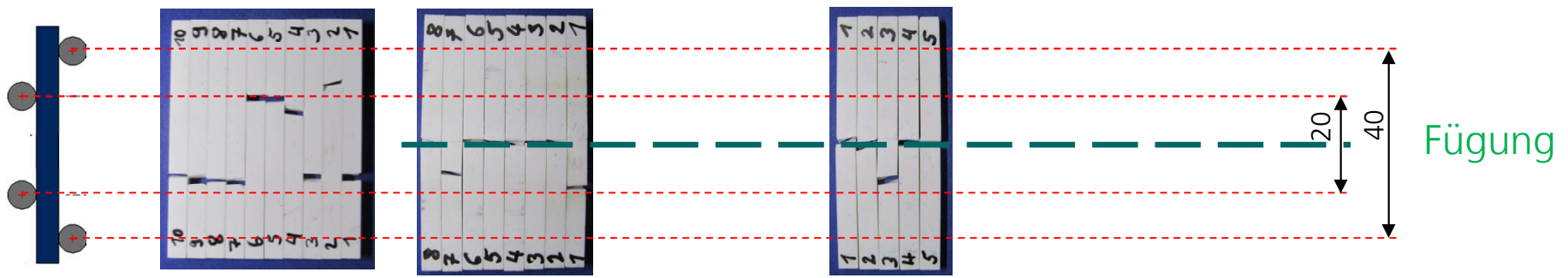
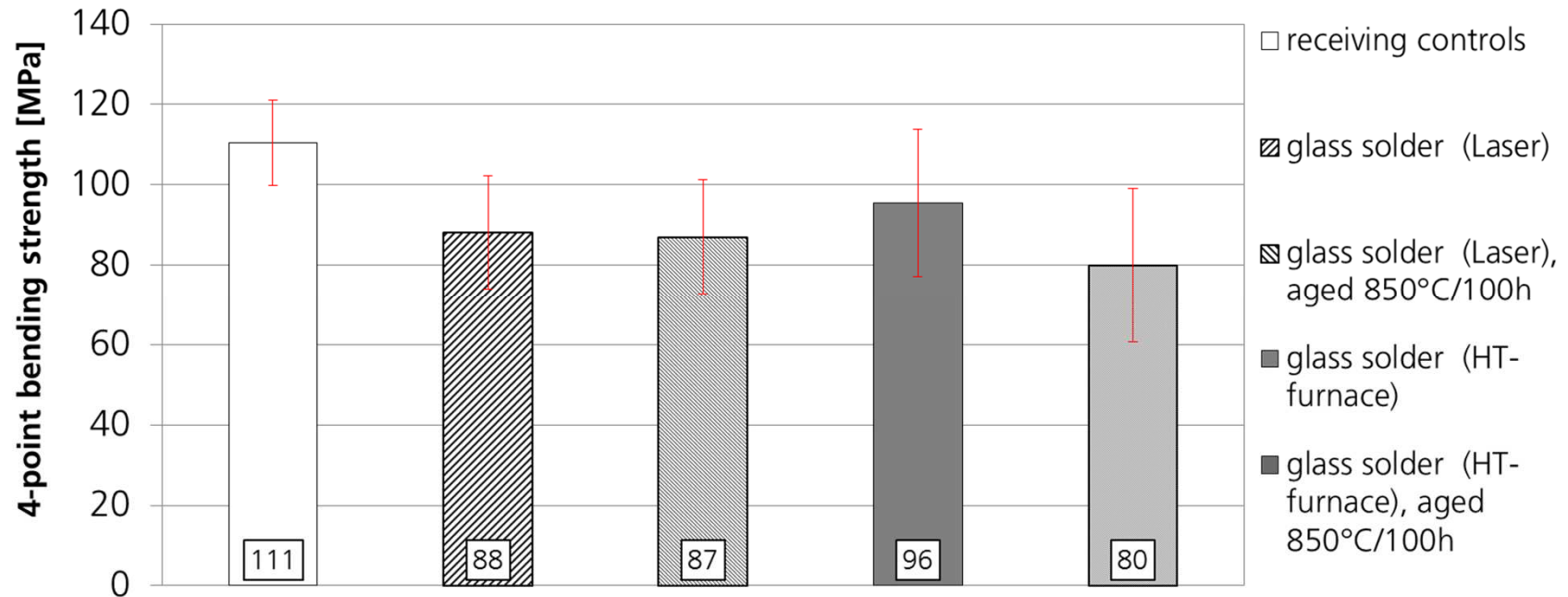
$\varnothing 6 \text{ mm}, L = 70 \text{ mm}$

$3 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}, L = 50 \text{ mm}$



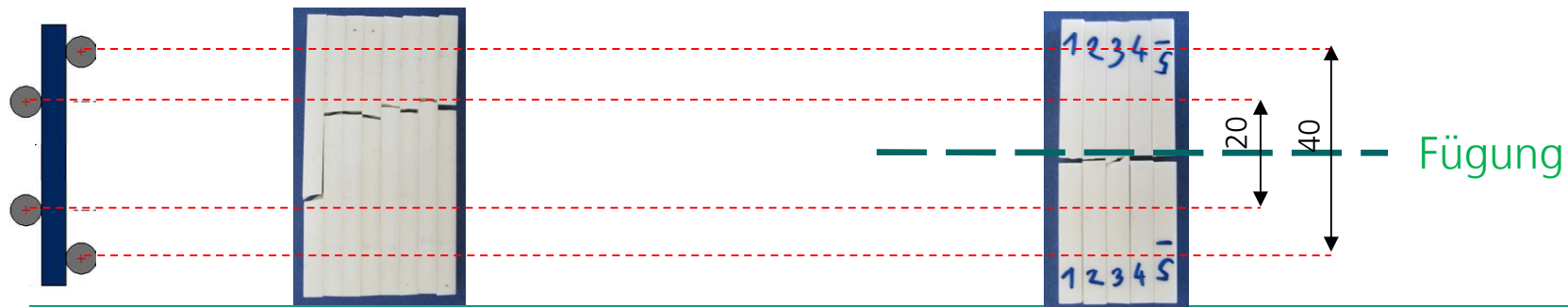
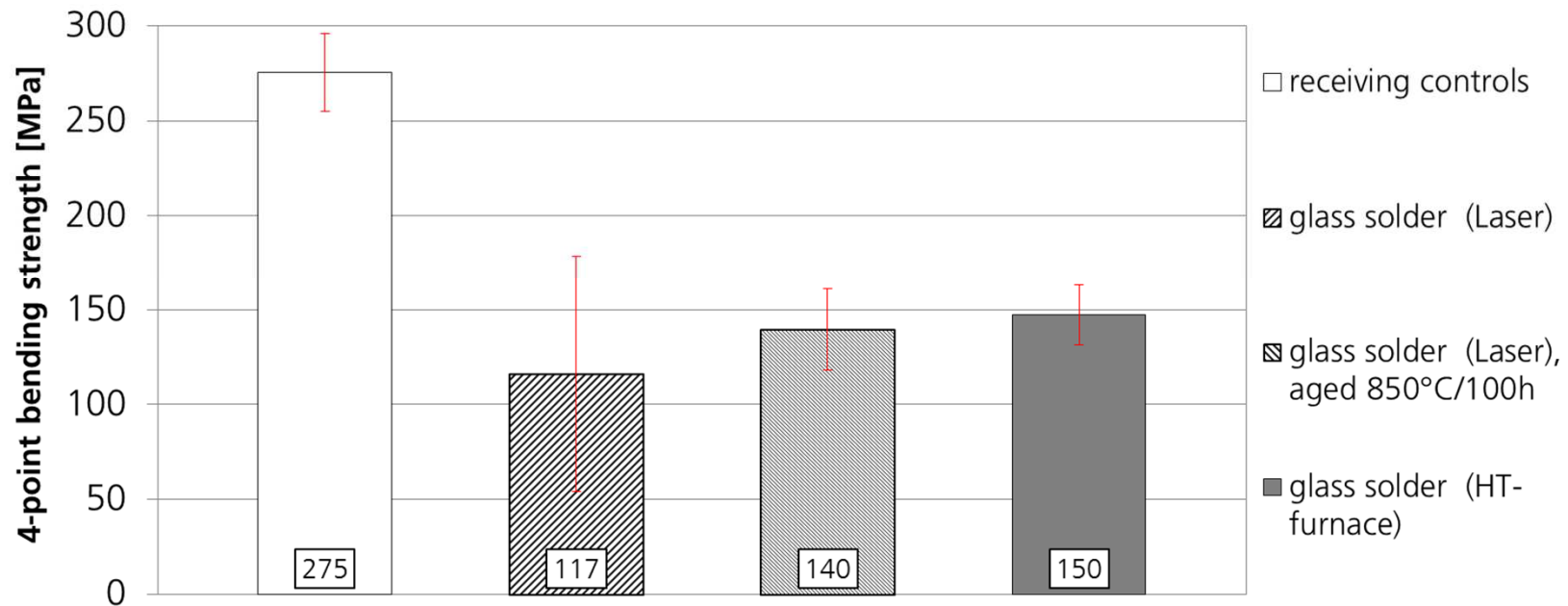
Festigkeiten von gefügten Keramikproben (DIN EN 843-1)

Mullit C610 mit 50x4x3 mm³



Festigkeiten von gefügten Keramikproben (DIN EN 843-1)

Aluminiumoxid mit 50x4x3 mm³



Zusammenfassung

- Faserarmierungen nehmen Zugspannungen auf und führen zur Erhöhung der Kriechbeständigkeit von innendruckbelasteten Metallrohren
- Laserfügen kann zum stoffschlüssigen Fügen von oxidischen Keramiken eingesetzt werden
 - Keramischer Grundwerkstoff thermisch nicht hoch belastet
 - Gefügte Mullit-Proben erreichen die Grundfestigkeit
 - Gefügte Al_2O_3 -Proben erreichen nicht die Grundfestigkeit
 - Glaslote für HT-Anwendungen $> 1000\text{ °C}$ nicht geeignet
- Mit Computertomographie ist eine bildgebende Qualitätsprüfung von Werkstoffverbunden möglich

Danksagung

**Wir danken dem BMBF für die Unterstützung des
Projekts „Compoundrohre“ (FKZ 03X3529)**



sowie

**dem bayerischen Wirtschaftsministerium für die
gewährte finanzielle Unterstützung des Projekts
„ENERTHERM“**

