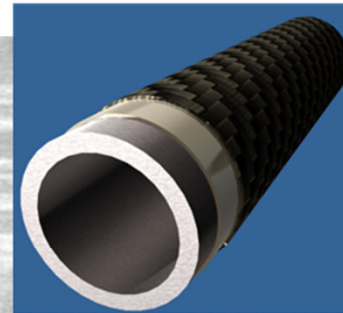
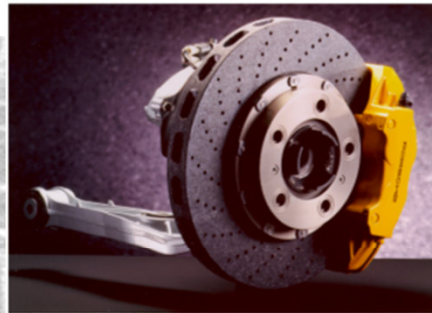
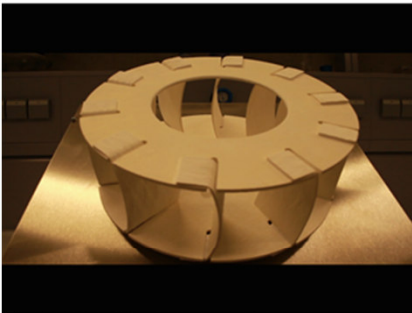


Automatisierbare Fertigungs- und Prüfverfahren für Faserverbundwerkstoffe mit hochtemperaturbeständiger Matrix

J. Schmidt

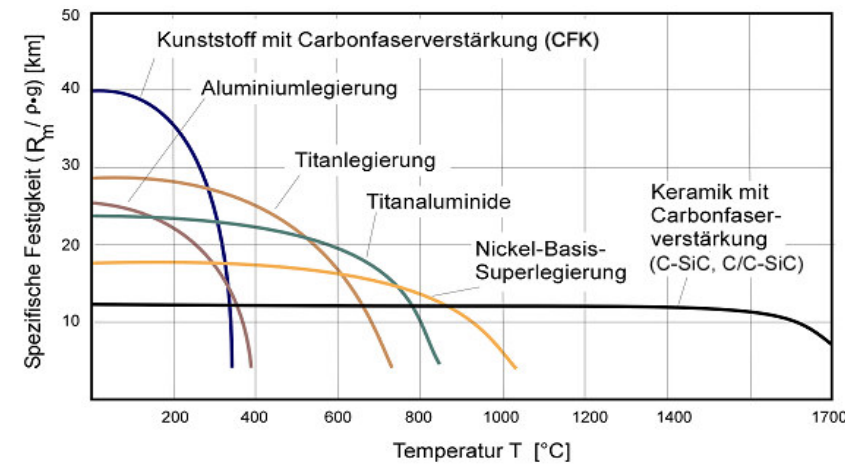
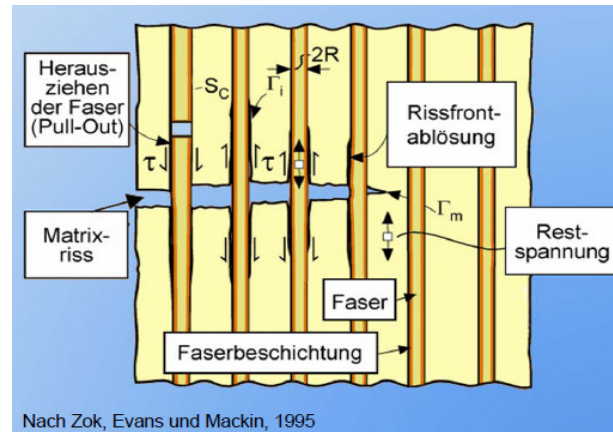
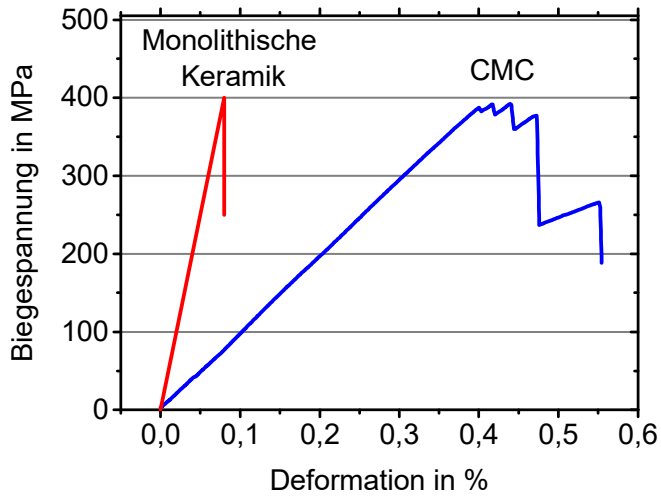
Fraunhofer-Institut für Silikatforschung / Zentrum für Hochtemperatur-Leichtbau HTL



Themenübersicht

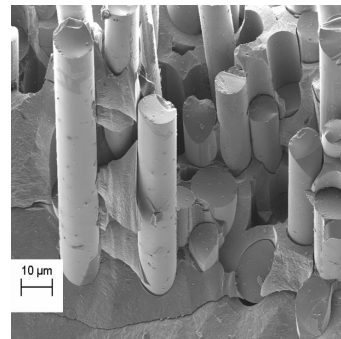
- **Faserverstärkte Verbundwerkstoffe mit keramischer Matrix (CMC)**
- **Industrielle Hochtemperatur Prozesse zwischen 300-1000 °C**
- **CMC und Faserverbundkunststoffe im Vergleich**
- **Automatisierbare Prozesskette für Faserverbunde**
- **Automatisierbare Prüfverfahren für Proben und Bauteile**
- **Anwendungsbeispiele**
- **Zusammenfassung**

Faserverstärkte Verbundwerkstoffe mit keramischer Matrix (CMC)

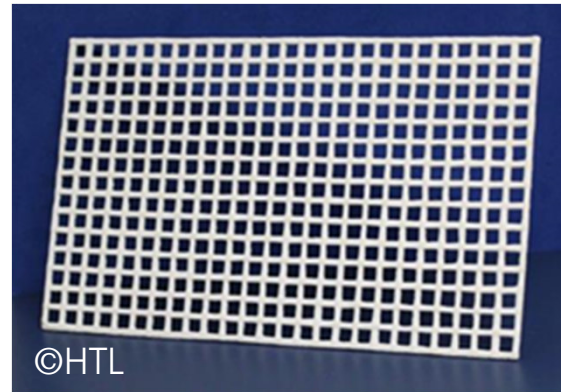
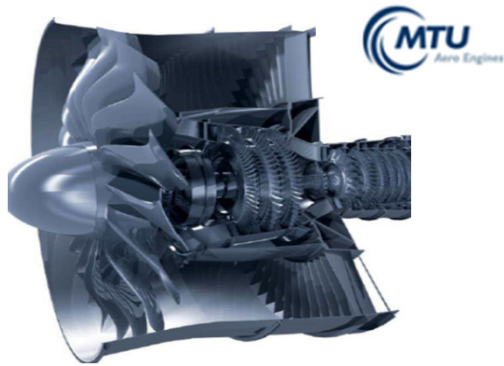


■ CMC-Typen

- Oxide: $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$
- Nicht-Oxide: SiC_f/SiC , C_f/SiC , C_f/C



Industrieanwendungen



Energietechnik

- Stationäre Gasturbinen
- Kernenergie

Mobilität

- Fluggasturbinenbauteile
- Bremscheiben und Reibbeläge

Ofen- und Anlagenbau

- Heißgasventilatoren
- Chargiergestelle
- Gießformen

Industrielle HT-Prozesse zwischen 300-1000 °C

- **Verbrennungsprozesse / Abgasbereich (250-1000 °C)**
- **Solarthermische Kraftwerke (390-500 °C, z.T. auch > 1000 °C)**
- **Metallraffination / Schmelzmetallurgie / Metallbeschichtung (400-1050 °C)**
- **Ofentechnik / Chargierung / Trägersysteme (300-900 °C)**
- **Bioraffination / Holzverflüssigung (475 °C)**
- **Erdölraffination / Cracken (450-700 °C)**
- **Glasverarbeitung / Umformen (600-800 °C)**
- **Chemie- und Verfahrenstechnik: Dehydrierung und Hydrodealkylierung, Synthesen (500-800 °C)**
- **H₂-Herstellung: Dampfreformierung von KWs, Thermochemische Spaltung von Wasser (300-900 °C)**

© GKM

CMC und Faserverbundkunststoffe im Vergleich

Kriterium	CMC	CFK/GFK/BaFK
Faserkosten	hoch, ca. 100-10.000 €/kg	niedrig, ca. 10-100 €/kg
Verfügbarkeit Textilien	Anbieter begrenzt, Spezialentwicklungen	Angebot breit, große Vielfalt
Gesamtprozess	teuer, vielstufig, teure HT-Schritte	günstig, schnell, wenige Prozessschritte
Automatisierungsgrad	niedrig-mittelhoch	hoch
Anwendungen	oft Nischenprodukte	Großserien
HT-Beständigkeit Werkstoff	> 1.000 °C	bis max. ca. 300 °C

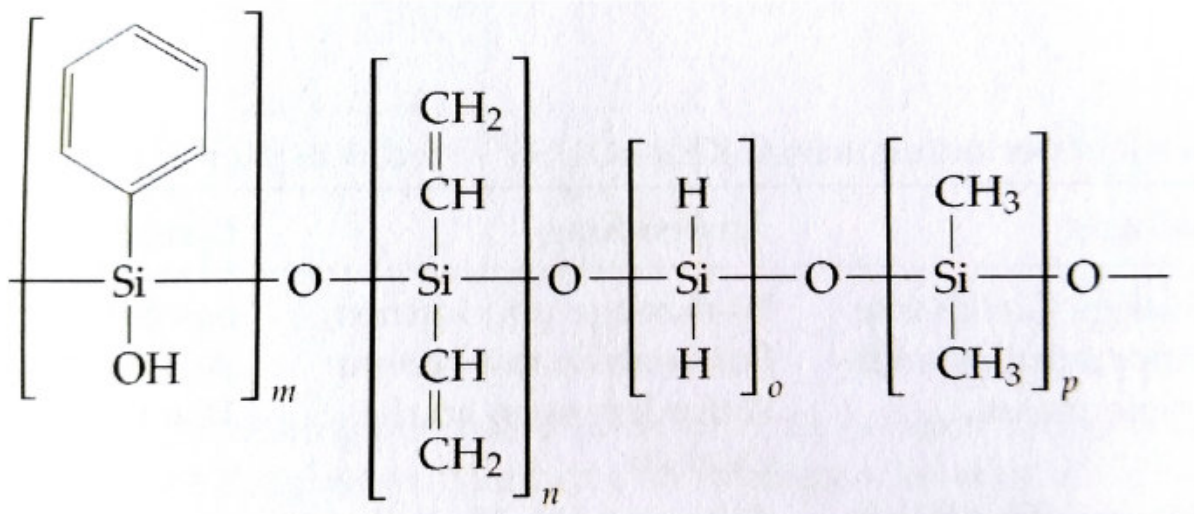
Automatisierbare Prozesskette für Faserverbunde mit hochtemperaturbeständiger Matrix

Faser

Bauteil



Matrixsystem - Polysiloxane

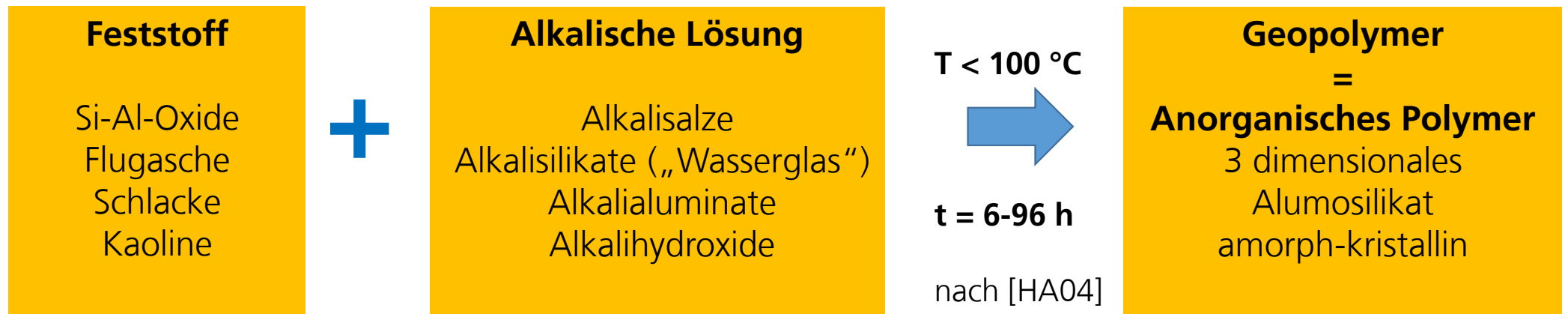


Strukturformel Methyl-Phenyl-Vinyl-Polysiloxan Silres H62C

■ Vernetzung

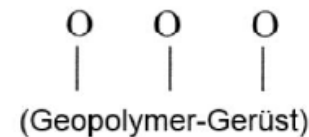
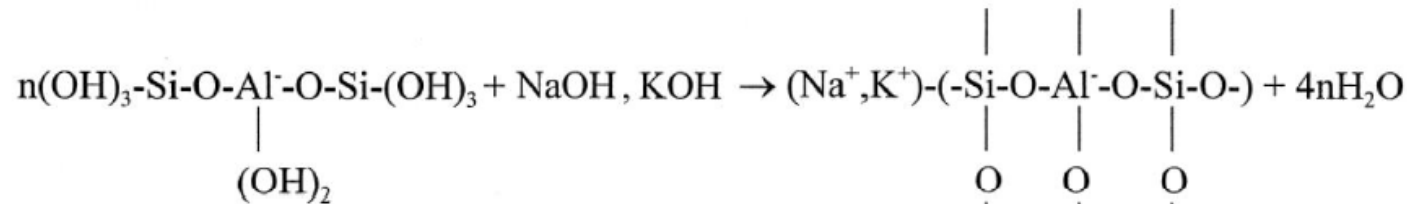
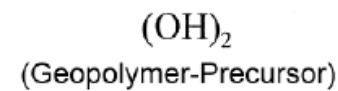
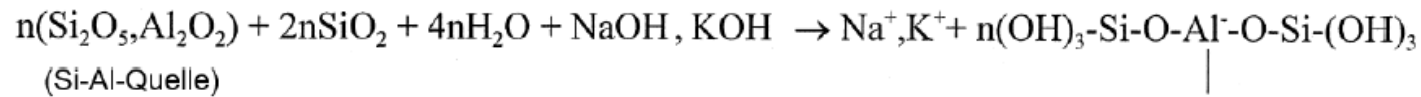
- Verarbeitung an Luft
- 3D Netzwerkbildung durch Polykondensation und Polyaddition bei ca. 200 °C
- Vernetzung durch funktionelle Gruppen (Si-H, Si-OH, Si-Vinyl) und Katalysatoren
- Funktionalität von Sauerstoffatomen bestimmt

Matrixsystem - Geopolymere

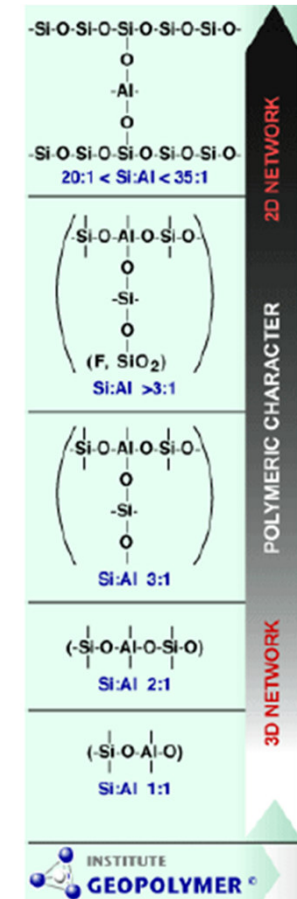


[HA04]: Hardjito, D.; Wallah, S.; Sumajouw, D. et al.: On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. MJ. 101 (2004) 6, S. 467–472.

Geopolymerbildung - Keramische Al-Si-Matrix



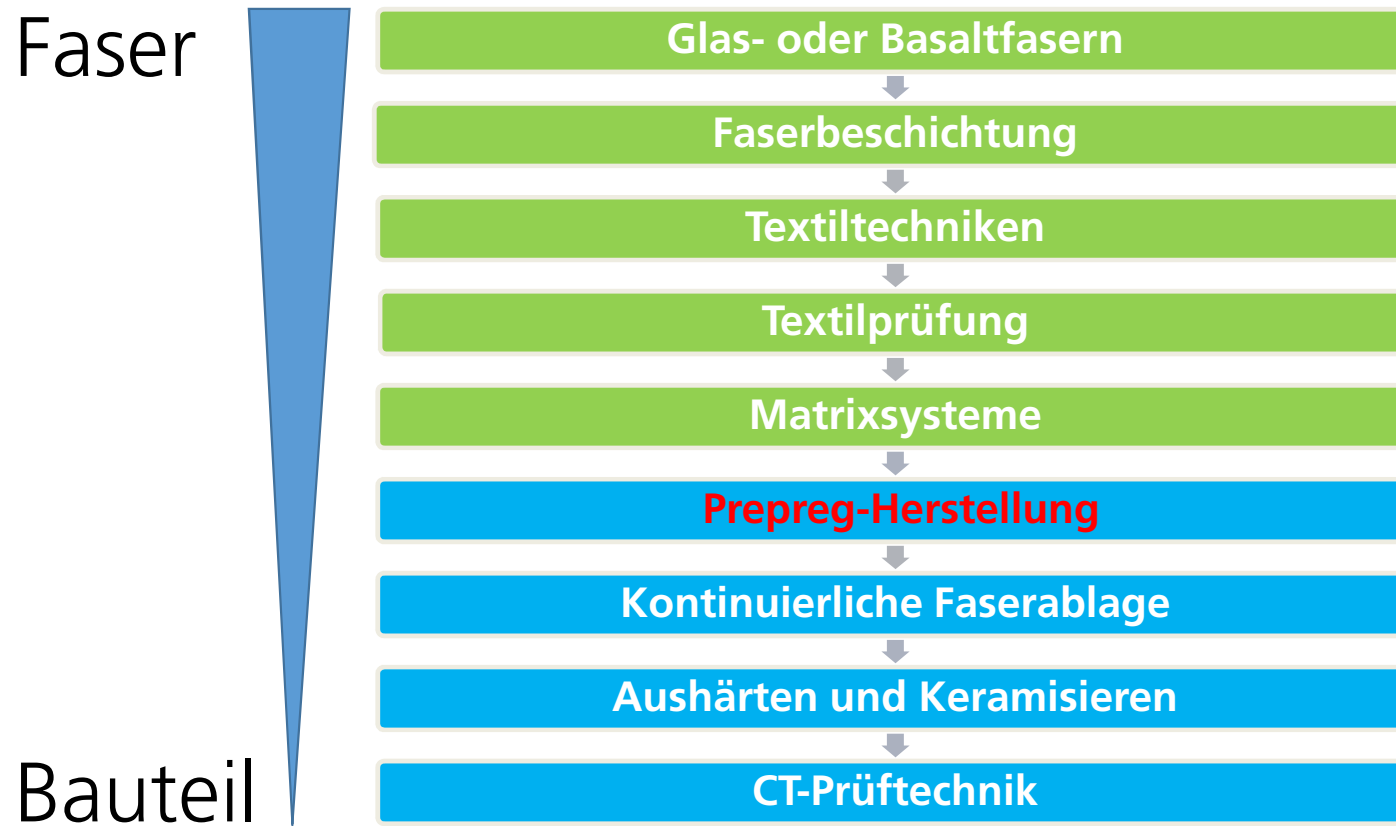
Bildungsreaktion von Geopolymeren im alkalischen Milieu ([XU00], oben) und Strukturvariationen ([JA02], rechts)



[XU00] H. Xu, J. van Deventer; *Int. J. of Mineral Proc.*, 2000, 59, 247-266

[JA02] J. van Jaarsveld, J. van Deventer, G. Lukey, *Chem. Eng. J.*, 2002, 89, 63-73

Automatisierbare Prozesskette für Faserverbunde mit hochtemperaturbeständiger Matrix



Kontinuierlicher Prepreg-Prozess

Verfahrensvorteile

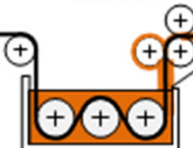
- Verarbeitung von Schlickern/ Polymeren
- Rolle-zu-Rolle-Verfahren
- Gewebe/UD-Tapes bis 600 mm Breite
- Bahngeschwindigkeit 0,1- 4 m/min
- Beschichtungsmodule
- Matrixfixierung mit IR und Umluft



Faser-
Bandrolle



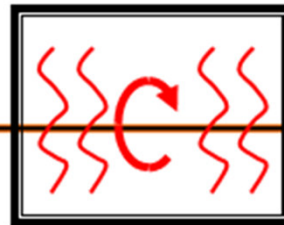
Quetschwerk



Tränkbad

mit Flüssigmatrix

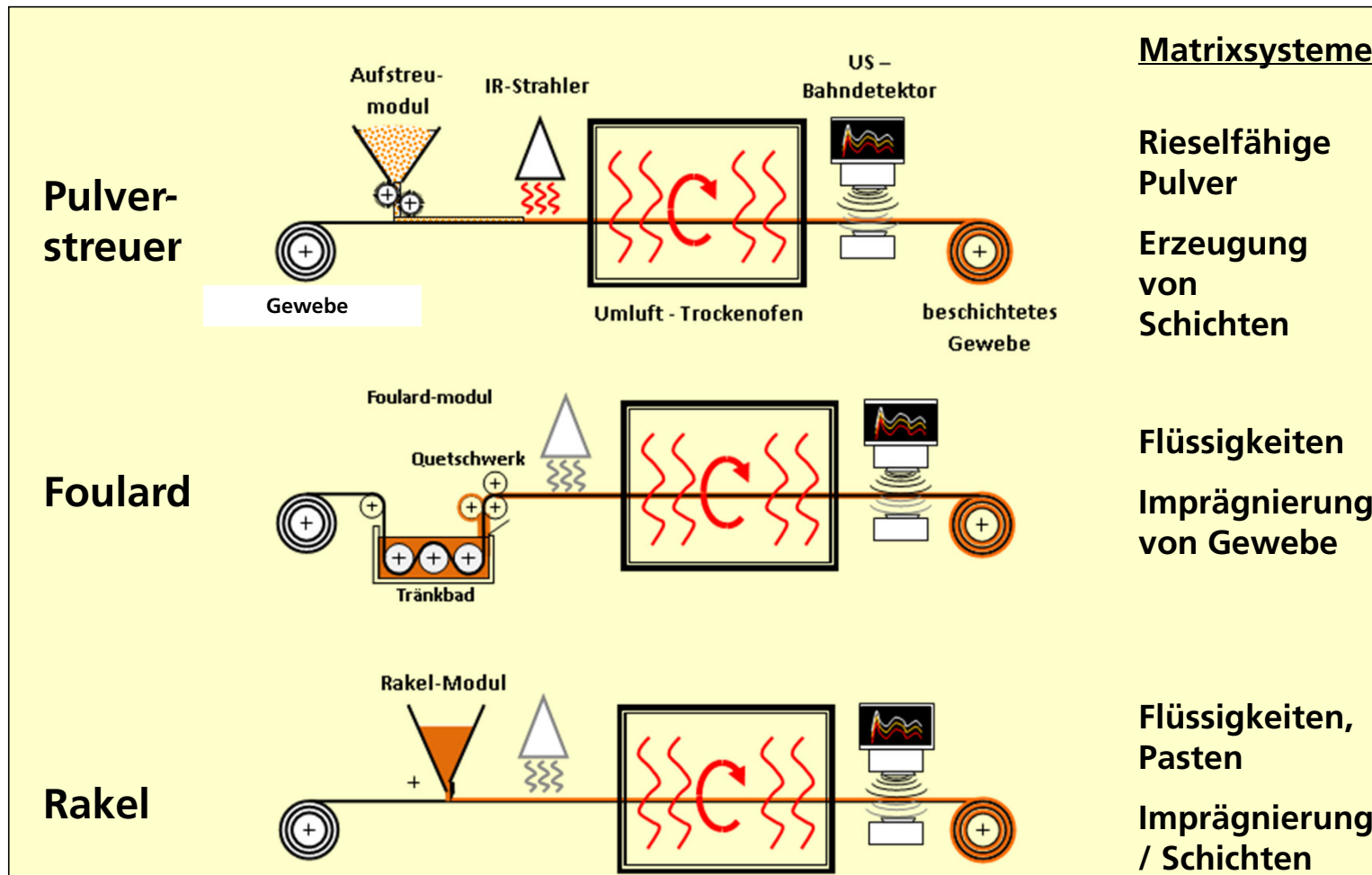
Umluft-Ofen



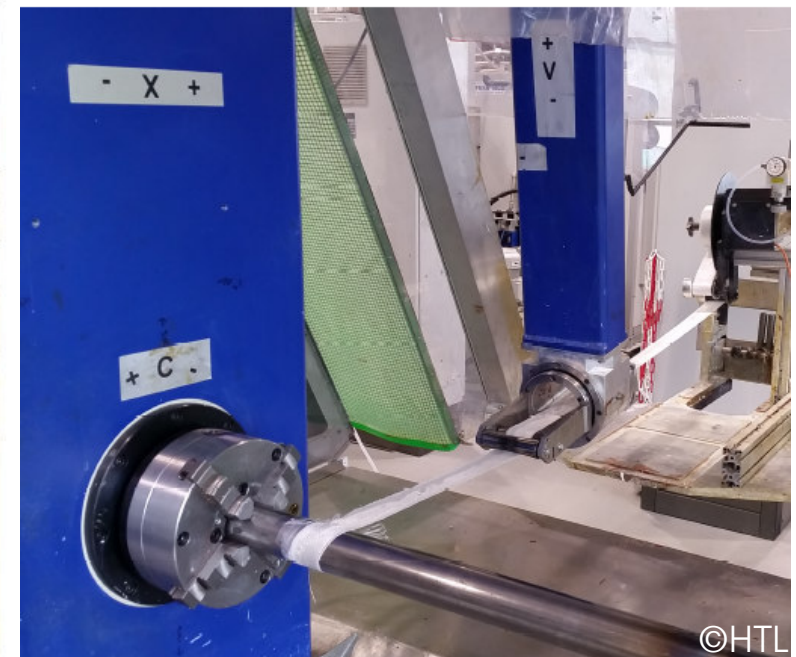
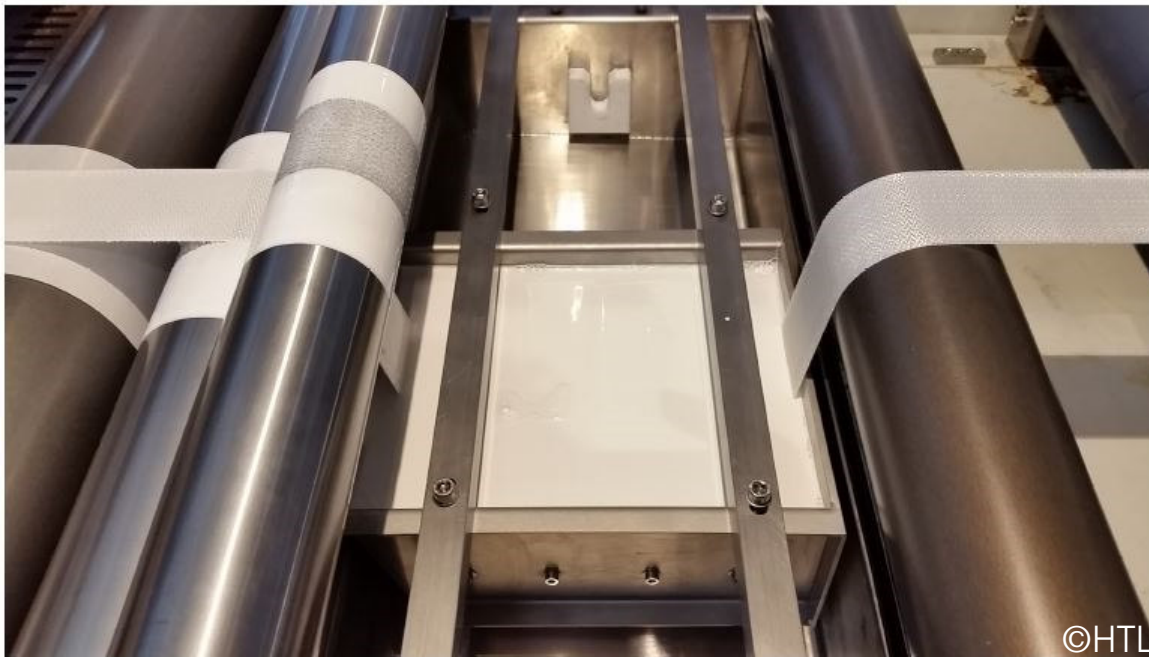
Prepreg-
Bandrolle



Prepregs - Variable Auftragstechniken

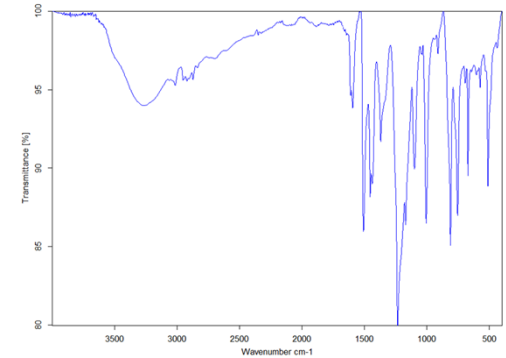
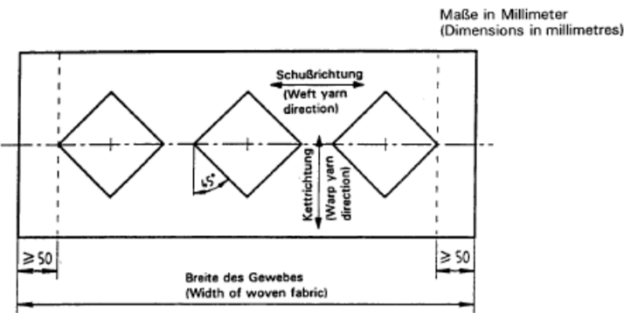
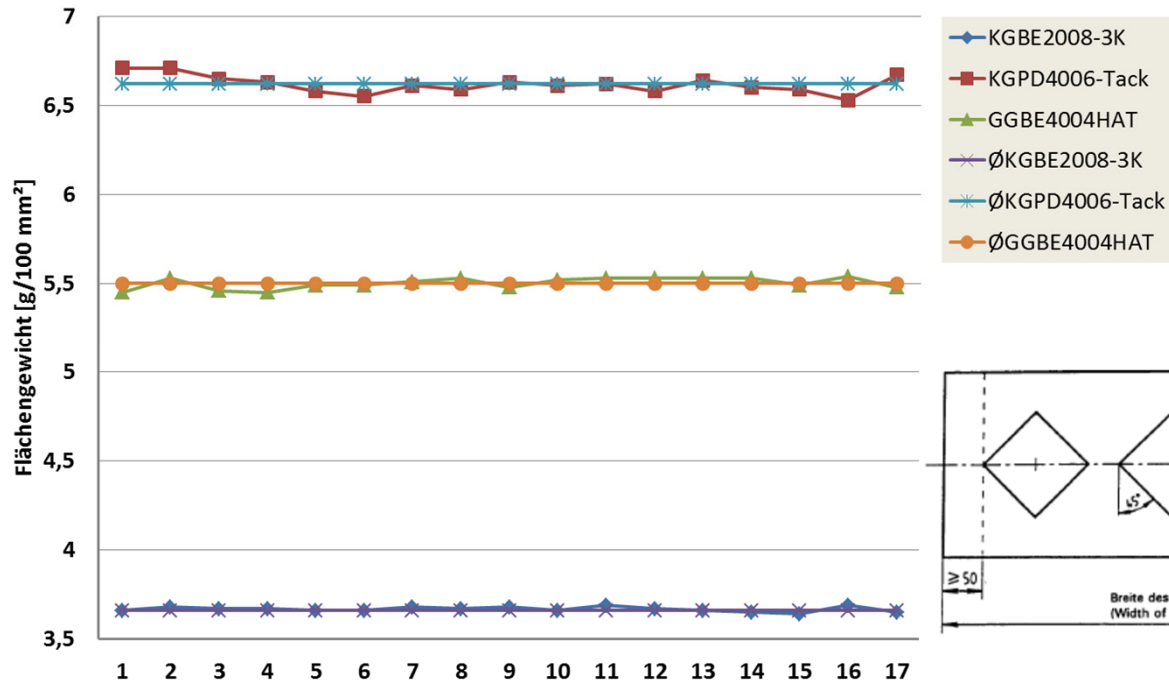


Polysiloxanverarbeitung mit Glasfasern



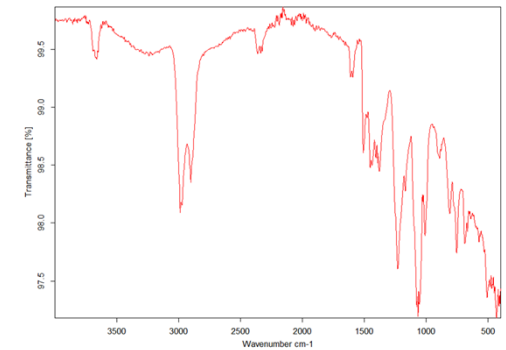
Imprägnierung und Konsolidierung eines Textilbandes mit Siloxanharz im Prepreg-Prozess (links) und Bandablage auf einen Wickelkern (rechts)

Qualitätsmerkmale von Prepregs



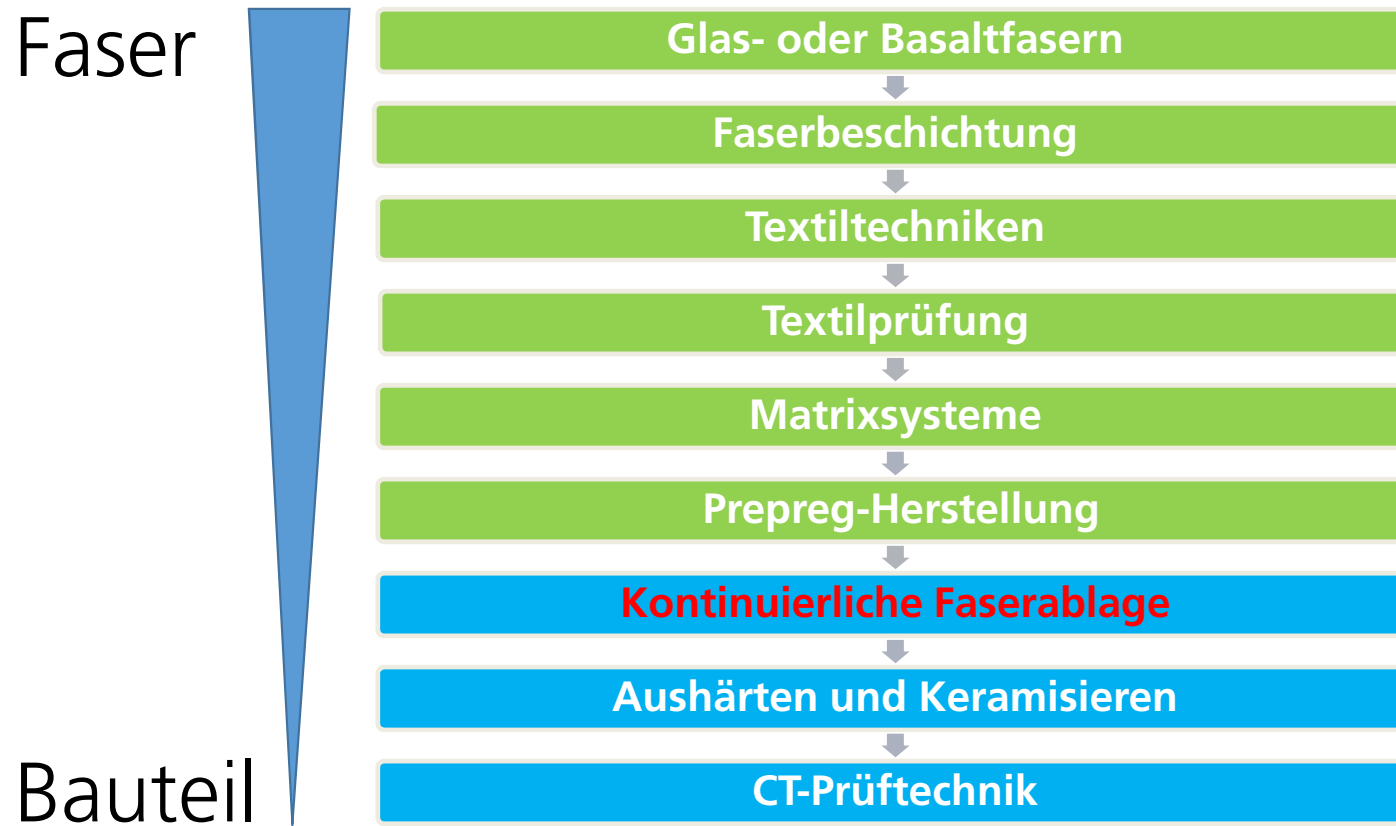
Polymer as-received

120 °C, Luft

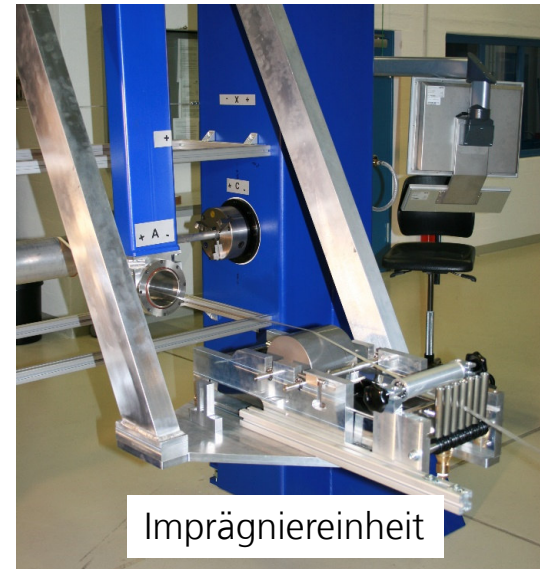
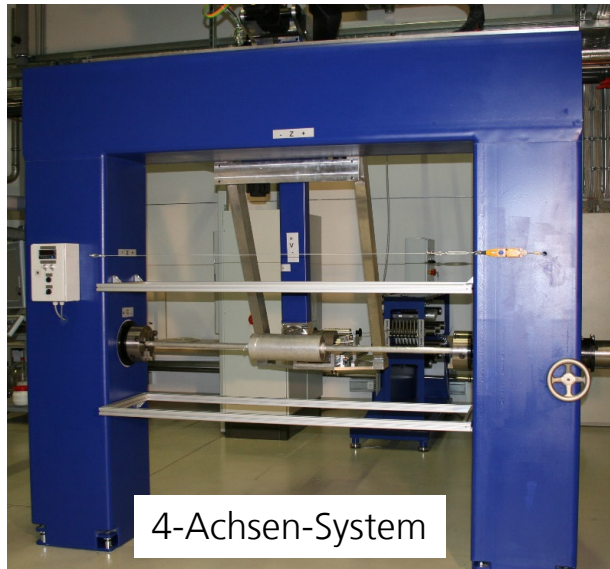


Prepreg: Polymer B-stage

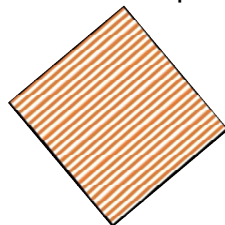
Automatisierbare Prozesskette für Faserverbunde mit hochtemperaturbeständiger Matrix



Lastgerechte Faserablage via Wickeltechnik

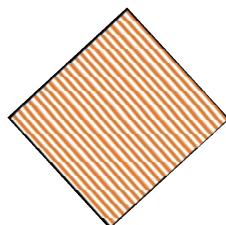


Nasswickelprozess von 3D Strukturen mit Fasern und textilen Bändern



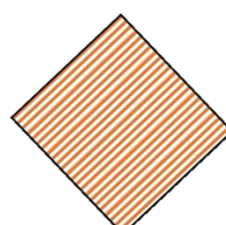
1-te Lage

$\alpha = +45^\circ$



2-te Lage

$\alpha = -45^\circ$



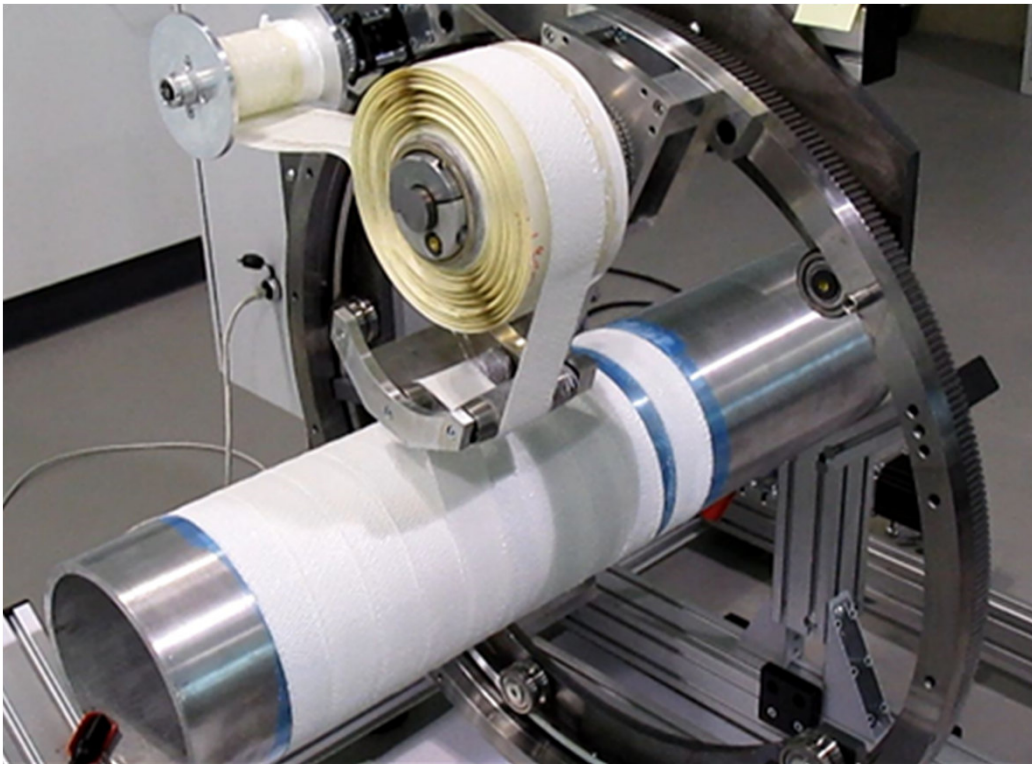
3-te Lage ...n-te Lage

$\alpha = +45^\circ$



CMC-Komponente als Vierkanthohlprofil

Kontinuierliche Faserablage mit teilautomatisierter Wickelvorrichtung

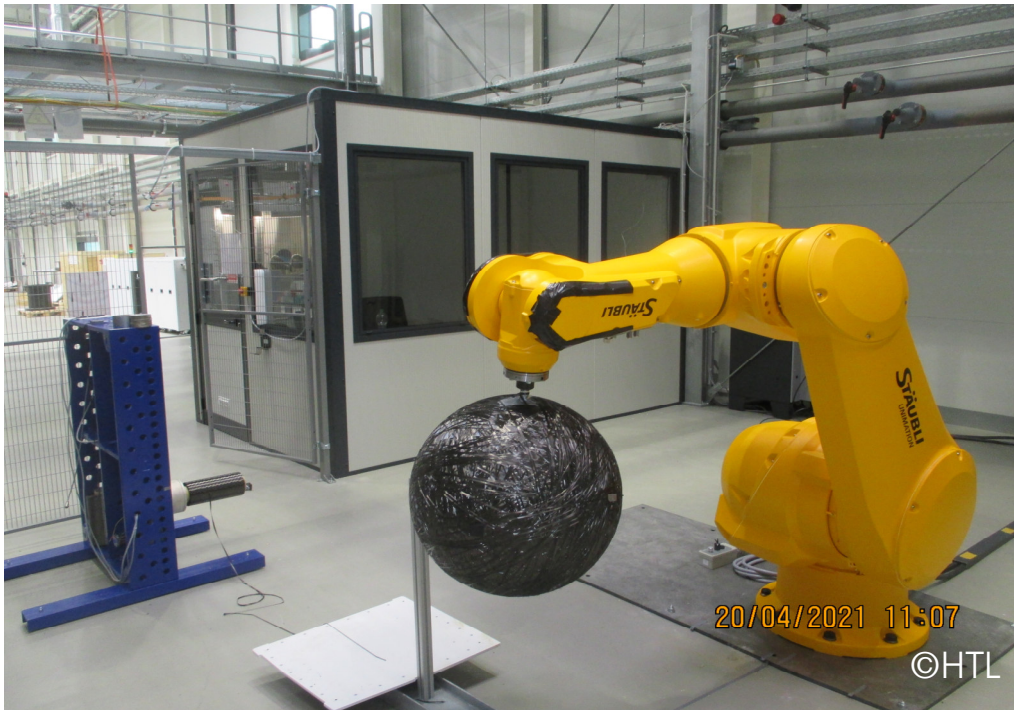


- Herstellung symmetrischer Bauteile mit großen Längen und Biegeradien
- Einsatz von Polysiloxan-Glasfaser-Prepregs mit 50 mm Tapebreite
- Alu-Rohrkern $D_a = 200$ mm, $L = 400$ mm



17 Wickelprozess (links) und GFR-Demonstrator nach Vernetzung (rechts)

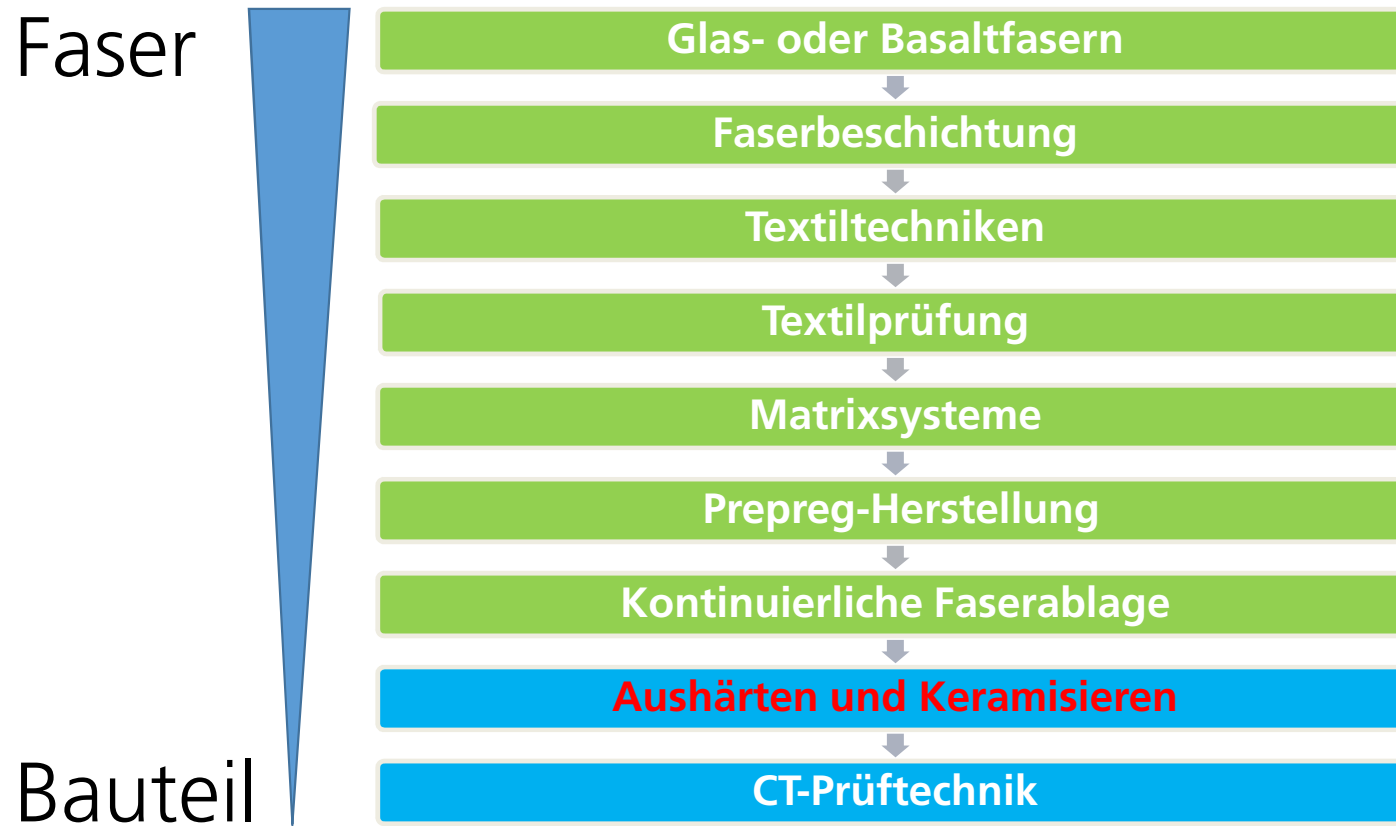
Kontinuierliche Faserablage mit Industrie-Roboter



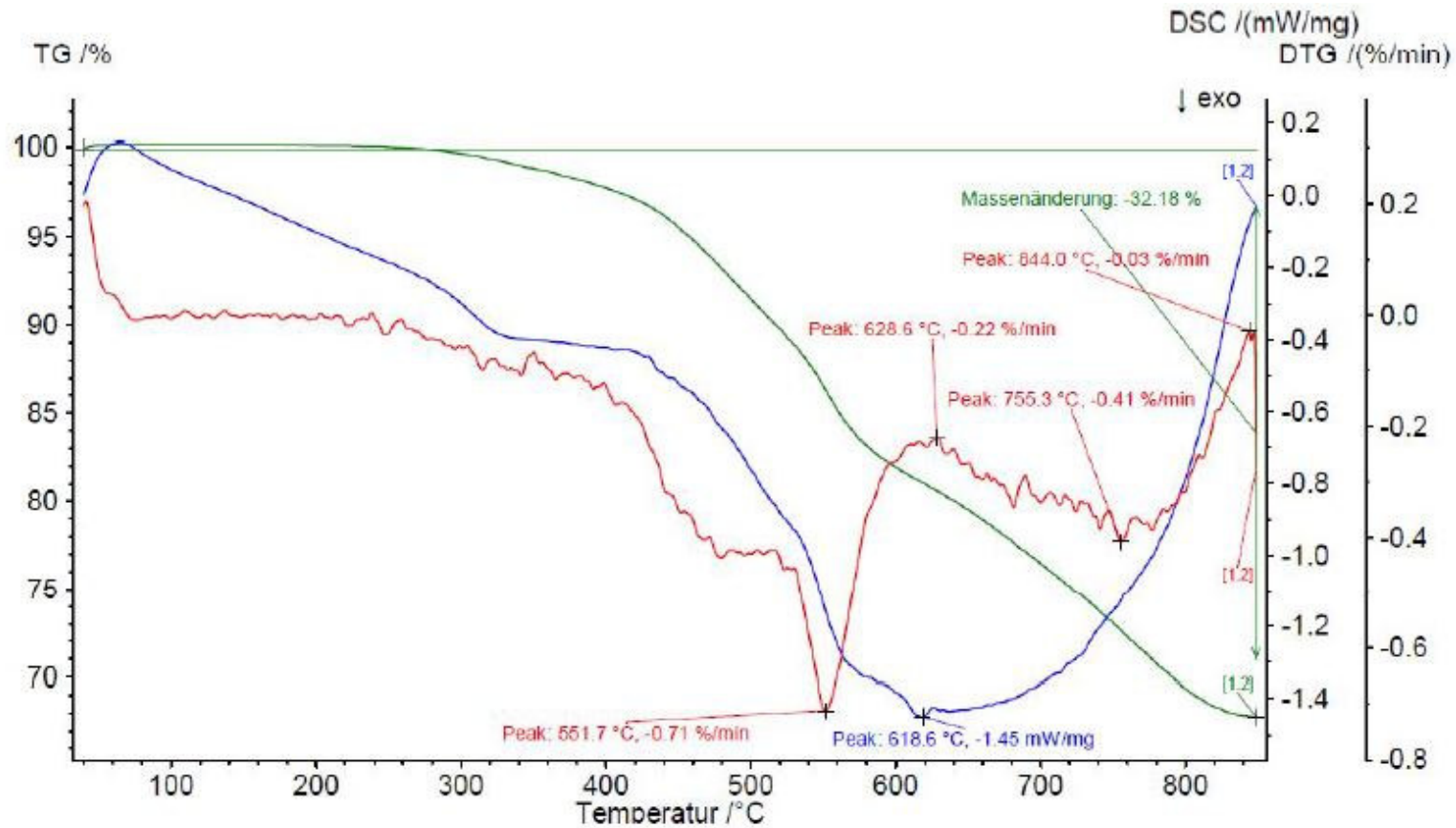
Roboter für die 3D-Faserablage auf einen Kern mit Bauteil, Spulengatter und Einhausung

- **Automatisierte 3D-Ablage**
 - **Faserablage beliebiger Komplexität**
 - **Isotensoide Ablage**
- **6-Achsen, 65 kg Traglast, 2 m Reichweite**
- **Faserbündel- und Tapeablage**
- **Verfahrensgenauigkeit ca. 10 μm**

Automatisierbare Prozesskette für Faserverbunde mit hochtemperaturbeständiger Matrix

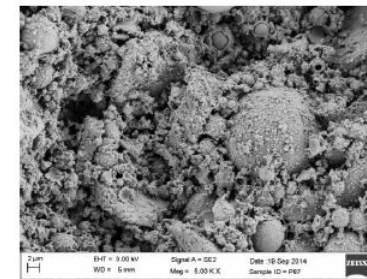
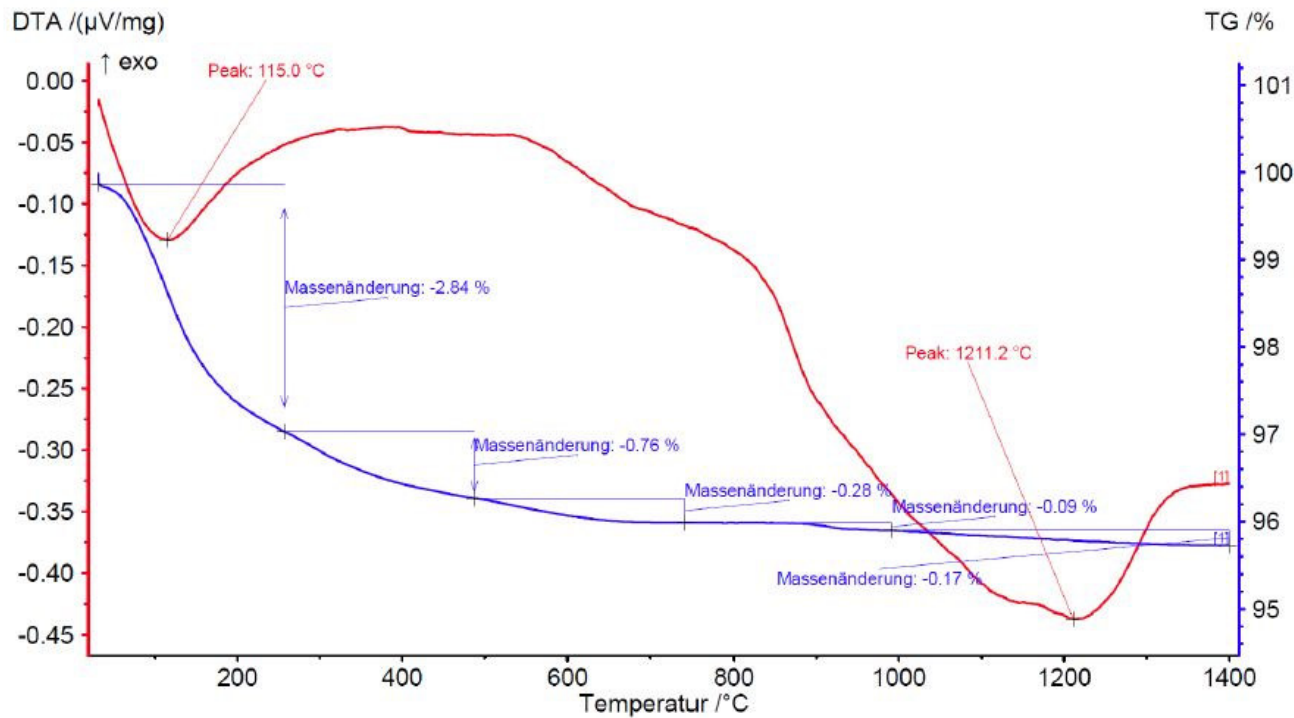


Thermisches Verhalten von Polysiloxanen

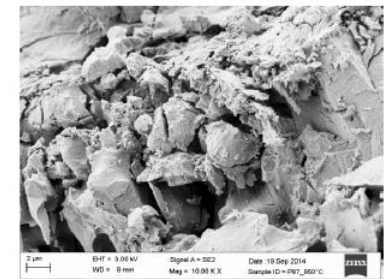


Thermisches Verhalten von Polysiloxan. TG/DTA + DSC-Messung an Luft von 35-850 °C mit 5K/min

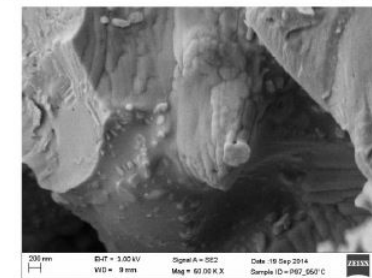
Thermisches Verhalten von Geopolymeren



a) unerhitzt



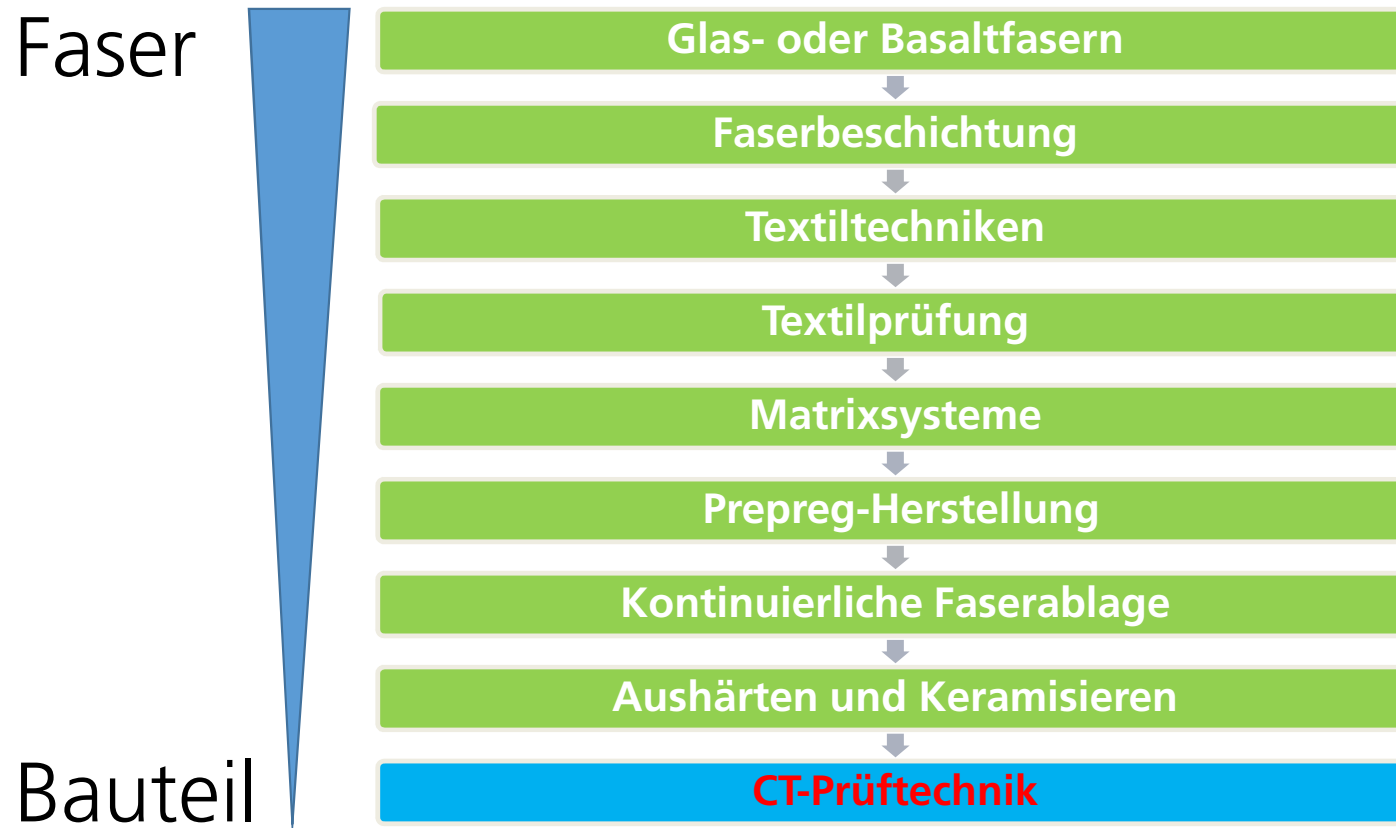
b) auf 950 °C erhitzt (fern)



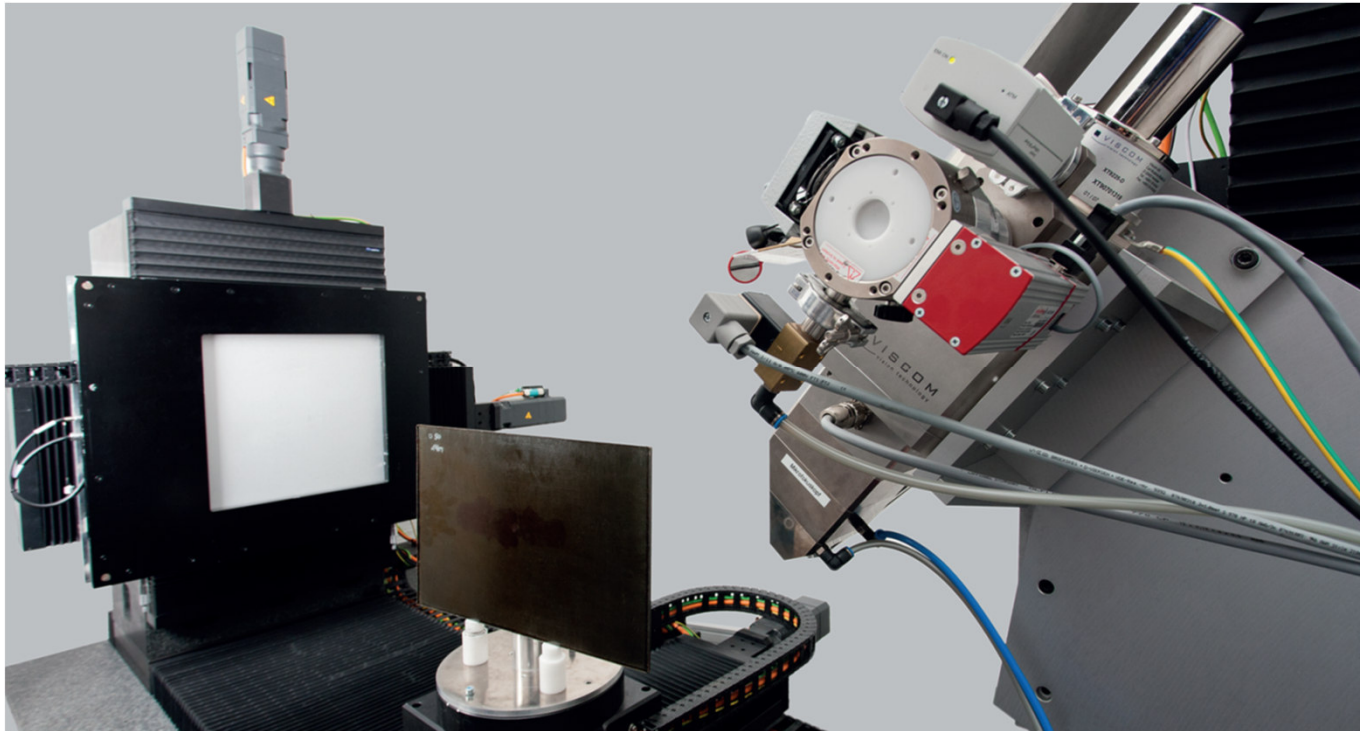
c) auf 950 °C erhitzt (nah)

TG/DTA (links) eines bei 70 °C hergestellten Geopolymers und Sinterverhalten bei 950 °C (oben)

Automatisierbare Prozesskette für Faserverbunde mit hochtemperaturbeständiger Matrix

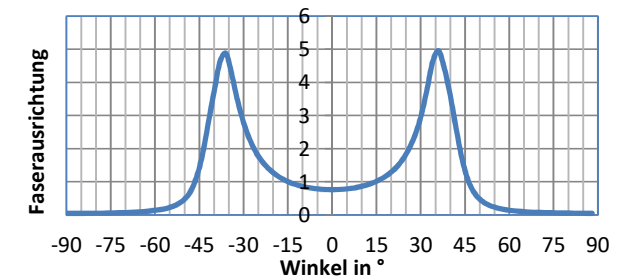
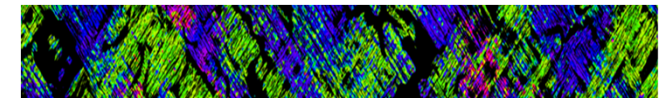


Computertomographie zur 3D Analyse

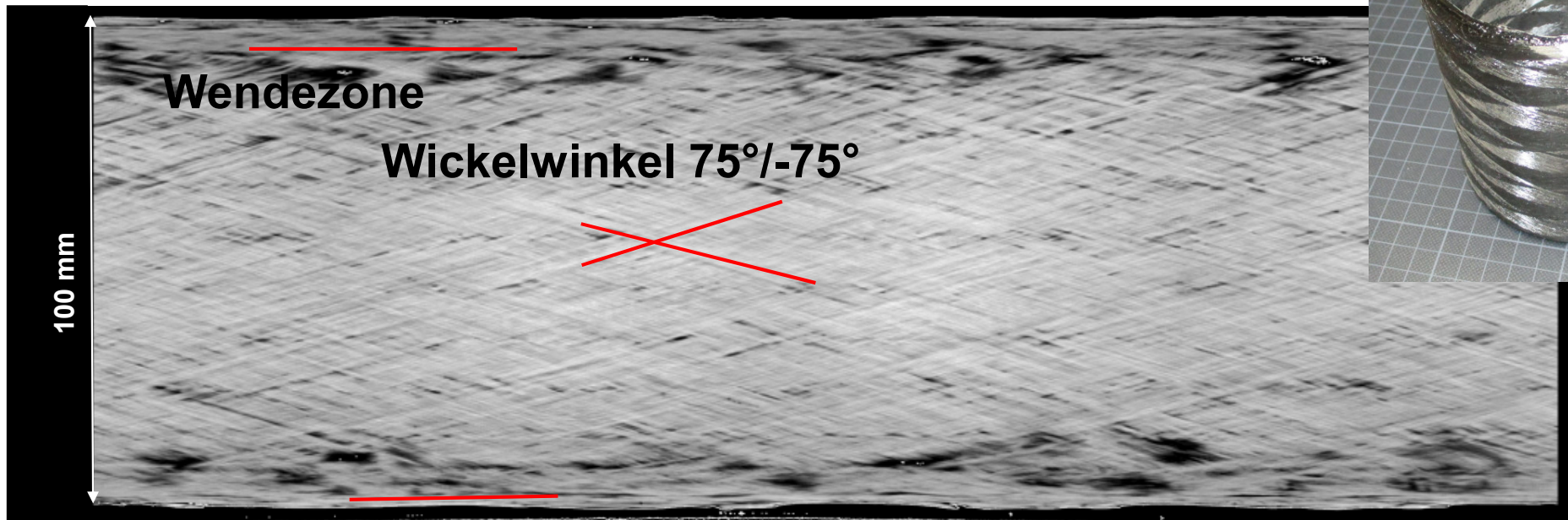


Computertomograph am HTL mit 225/450 KV-Röntgenröhre

- Werkstoffdefekte im Volumen, z.B. Risse, Delaminationen
- Porosität
- Faserorientierungen
- Geometrische Vermessung

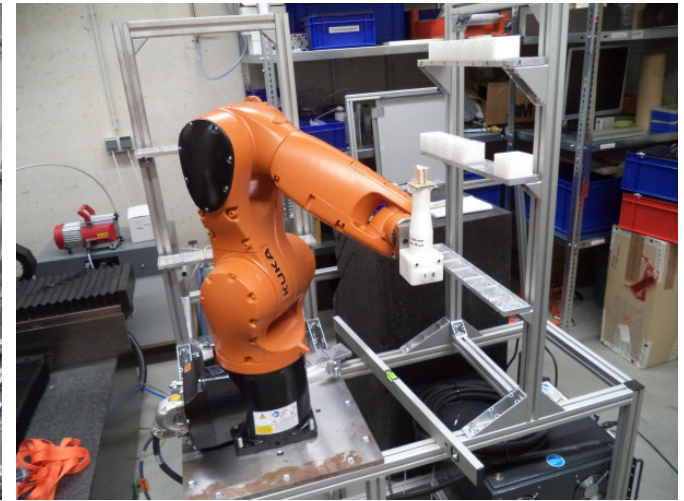
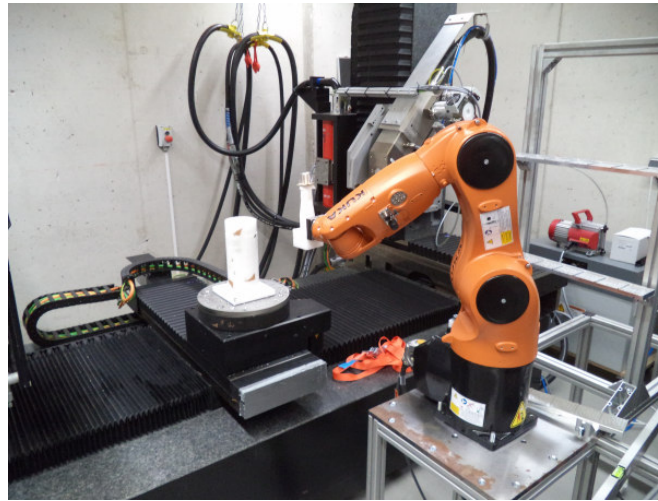


Qualitätskontrolle von CMC-Bauteilen



CMC-Rohr ($D_A = 100 \text{ mm}$, $L=100 \text{ mm}$), Qualitätsanalyse anhand eines CT-Bildes im virtuell abgerollten Zustand (links)

Computertomographie - Automatisches Handling-System zum Probenwechsel



Roboterunterstützter Probenwechsel in der Computertomographie:

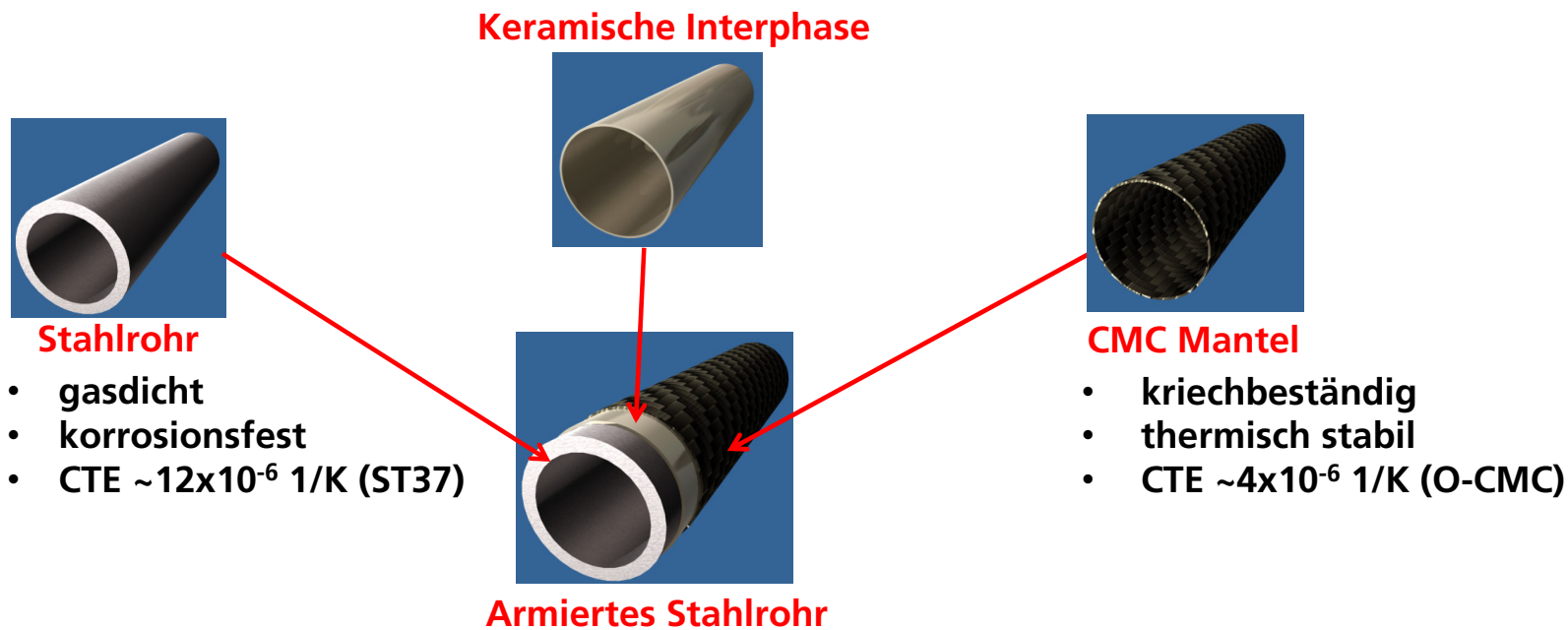
Bild links: Bauteilentnahme aus dem Regal

Bild Mitte: Positionierung auf Messtisch

Bild rechts: Bauteilablage in das Regal

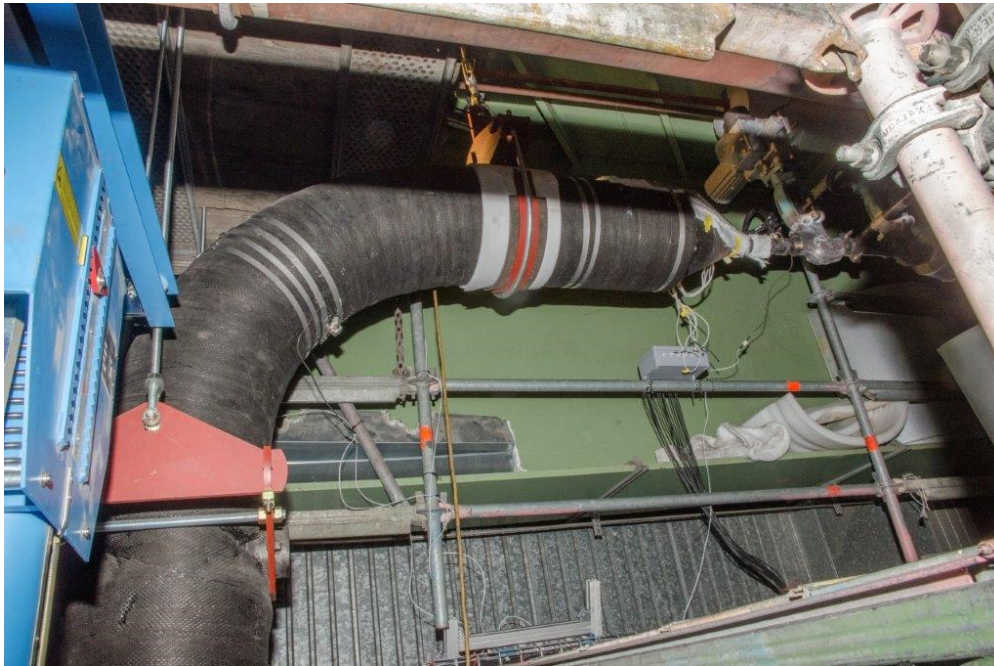
Anwendungsbeispiel 1 - Faserarmierung von Stahlrohren in Kraftwerken

Problem: Tertiäres Kriechen bei 600 °C/ 350 bar reduziert Lebensdauer



Anwendungsbeispiel 1 - Faserarmierung von Stahlrohren in Kraftwerken

Feldversuch im GKM seit 07/2018



CMC-Rohrbogen (ca. 4 m lang) im Einbauzustand im GKM (links) und vor der Pyrolyse bei der Fa. Schunk Kohlenstofftechnik (rechts). [ECK19]

[ECK19] C. Eckardt, M. Friedrich, T. Wamser, N. Wolff, K. Metzger: „Gut gerüstet gegen Druck und Hitze“, Chemie-Technik, S. 38-40, 04/2019

Anwendungsbeispiel 2

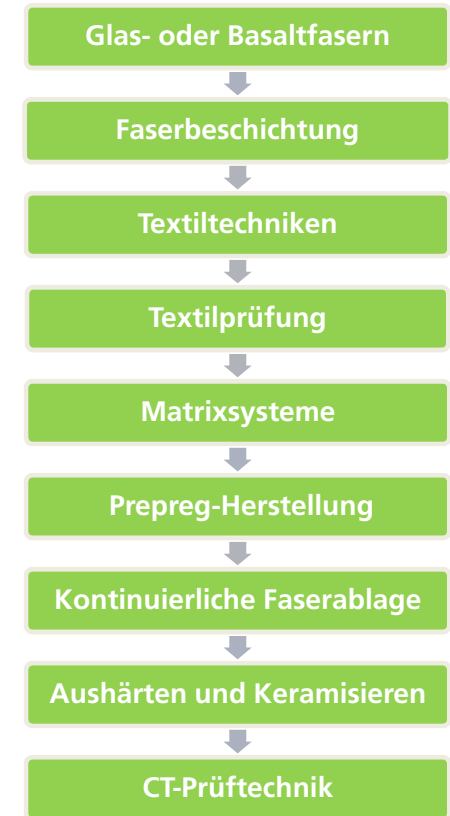
Hilfsmittel in der Gießereitechnik



Gießtiegel (links) und Rinne aus Glasfaser-Aluminiumsilikatmatrix (rechts) für die Verarbeitung von Metallschmelzen in Gießereien

Zusammenfassung

- **Auswahl von Faser-Matrix-Systemen in Hinblick auf maximale Einsatztemperatur und Atmosphäre**
- **Prozesse aus der CFK-Technologie sind kostengünstig und auf CMC übertragbar**
- **Verarbeitung von HT-Polymeren und Geopolymeren als Schlicker im Prepregprozess möglich**
- **Verschiedene kontinuierliche Ablegeverfahren für Prepregs nutzbar**
- **Thermische Behandlung führt schon bei niedrigen Prozesstemperaturen zu thermisch beständigen Keramikmatrices**
- **Automatisierbare Qualitätskontrolle mit Computertomographie**





Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Kontakt:

Dr. Jens Schmidt

Arbeitsgruppe Verbundwerkstofftechnologie

Fraunhofer Zentrum für Hochtemperatur-Leichtbau

Gottlieb-Keim-Str. 62 / 95448 Bayreuth

jens.schmidt@isc.fraunhofer.de