

# Anorganische Verstärkungsfasern – Herstellung und Eigenschaften

A. Rüdinger

Fraunhofer-Institut für Silikatforschung / Zentrum für Hochtemperatur-Leichtbau



<https://www.3m.com>

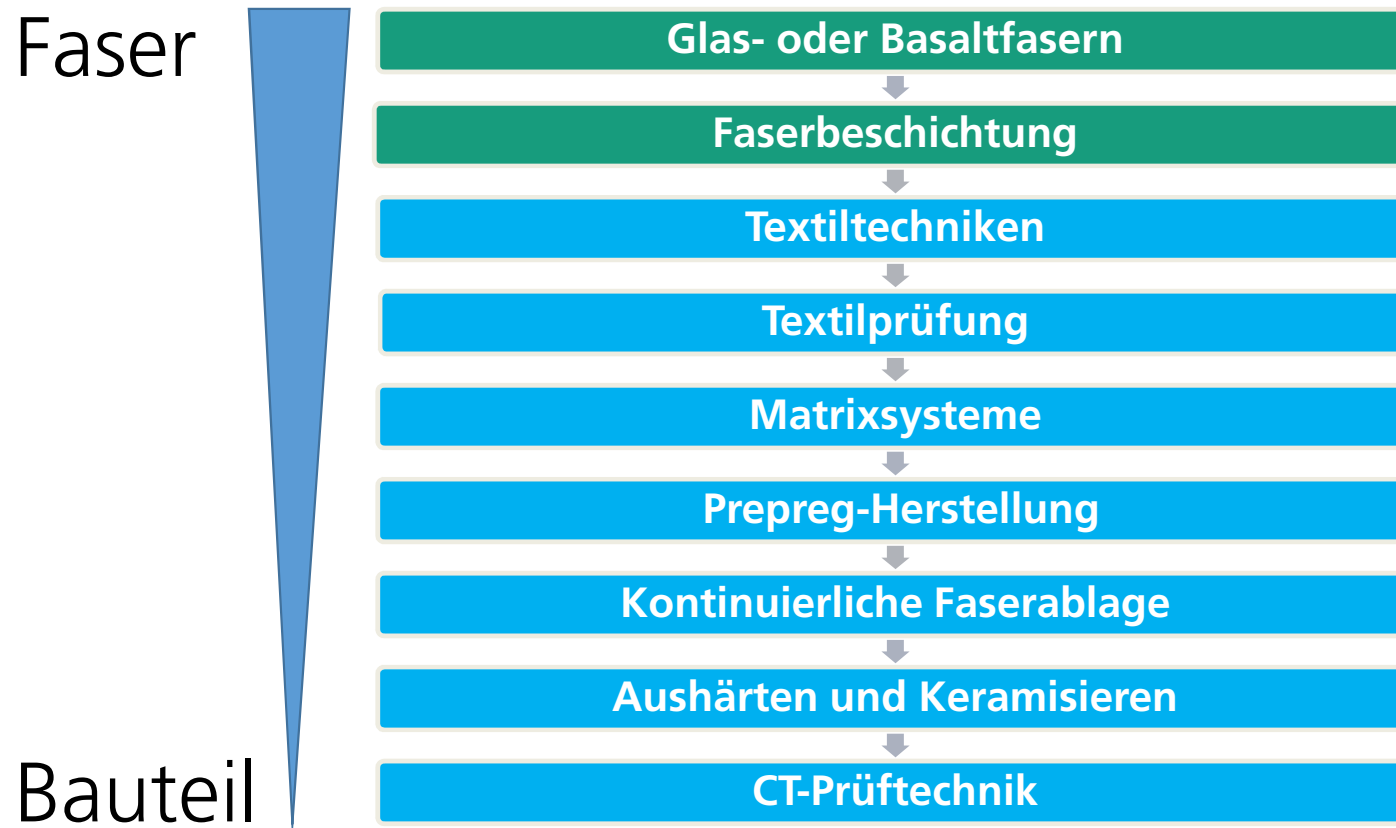


<https://www.deutsche-basalt-faser.de/>



[https://www.carbon.co.jp/english/products/silicon\\_carbide/](https://www.carbon.co.jp/english/products/silicon_carbide/)

# Automatisierbare Prozesskette für Faserverbunde mit hochtemperaturbeständiger Matrix



# Gliederung

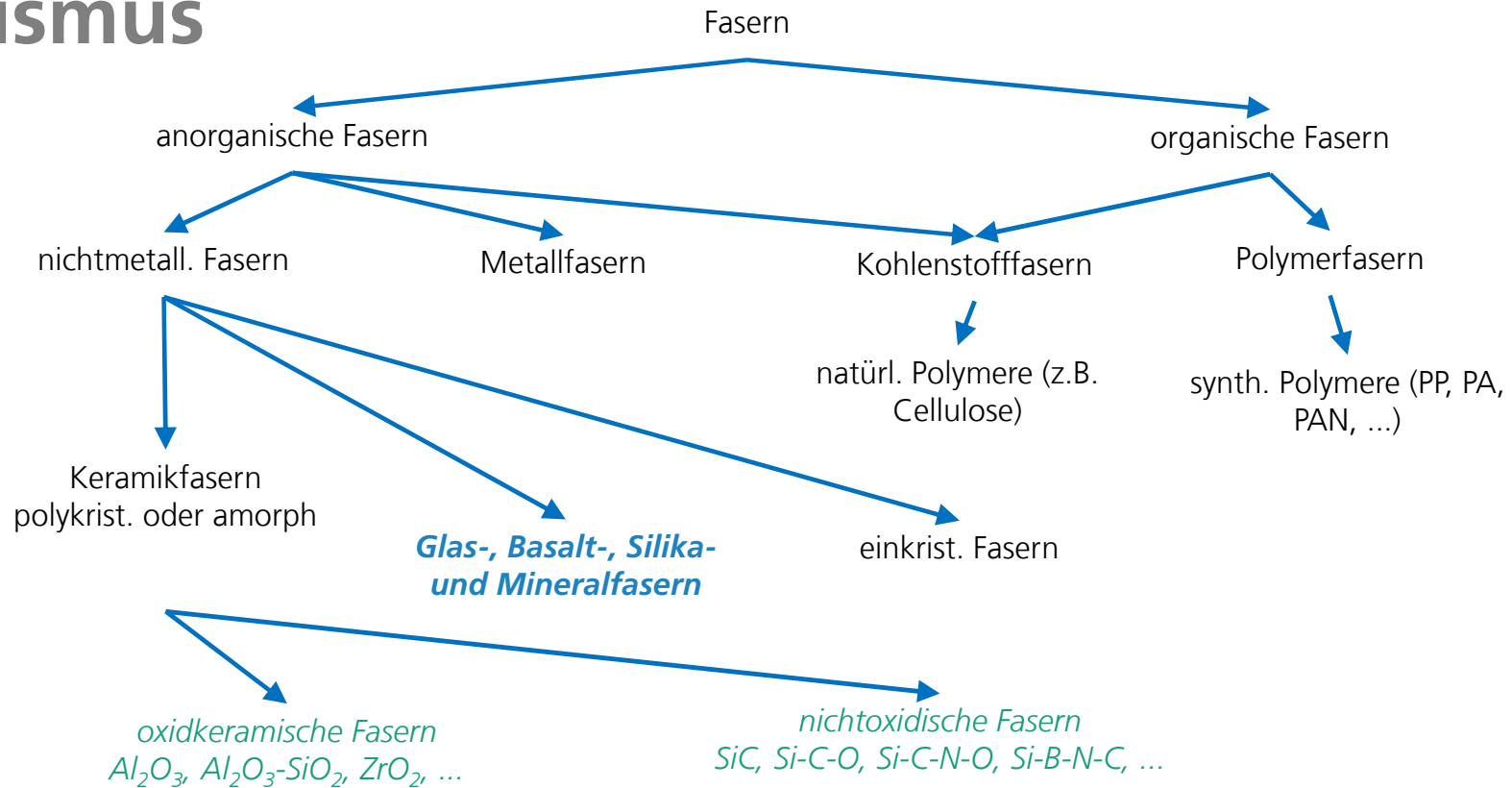
- **Untergliederung von Fasern**
  - **Funktionalität, Aufmachung, Chemismus**
- **Anorganische Fasern**
  - **Vor- und Nachteile**
- **Herstellung und Eigenschaften von Verstärkungsfasern**
  - **Anorganische Verstärkungsfasern**
  - **Keramische Verstärkungsfasern**
  - **Faserentwicklung am HTL**
- **Faserbeschichtung**
- **Zusammenfassung**

# Fasern

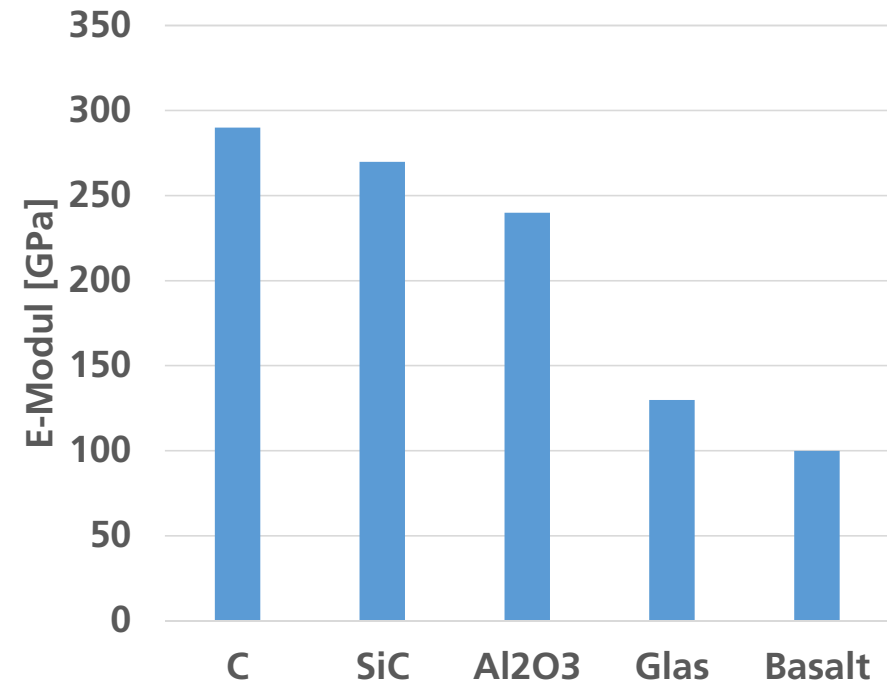
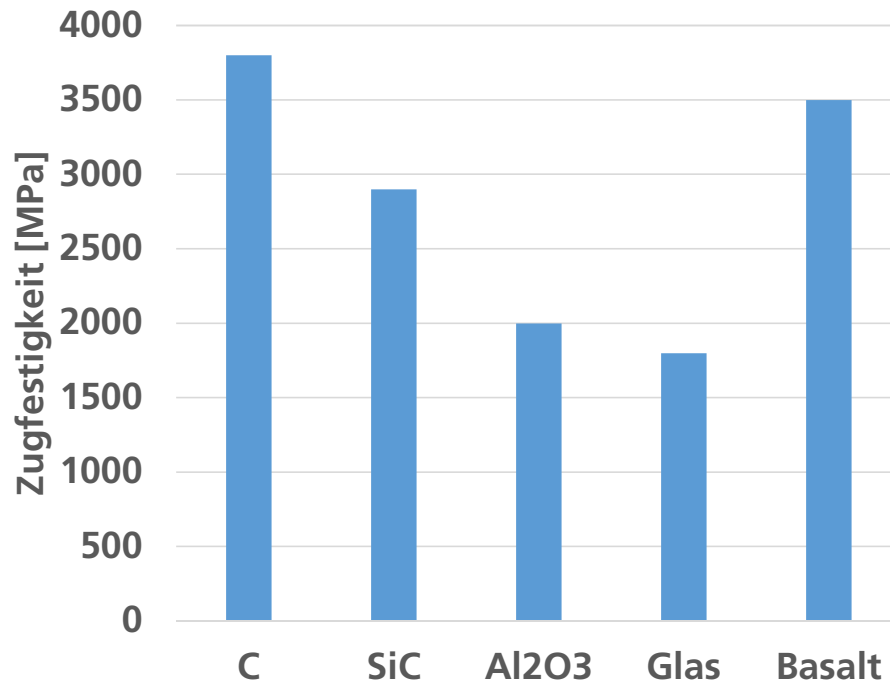
## Untergliederung

- **Funktionalität**
  - Schutz und thermische Isolation → Fell, Haare, Federn, Mineralwolle, ...
  - **Verstärkung** → Holz, Pflanzenstängel, Glasfaser, Metalldrähte, ...
  - Funktionalität → menschl. Gewebe, Muskeln, Nervenbahnen, Glasfaser, ...
- **Zusammensetzung**
  - Fasern bestehen aus organischem Material
  - Fasern bestehen aus **anorganischem Material**
- **„Aufmachung“ / Form**
  - Kurzfasern / Stapelfasern / Vlies
  - **Endlofasern**

# Fasern Untergliederung Chemismus



# Anorganische Fasern mech. Eigenschaften



■ Bauteilauslegung nach Festigkeit oder Steifigkeit

■ Textile Verarbeitung

# Anorganische Fasern

## Faserpreise

	Nextel™ 610 Fabric DF19	Carbon Fabric C T24-5.0/270-E100	Silica Fabric S300 LS	Basalt Fabric 014-0040
<b>Supplier</b>	3M™	SGL Carbon	Hiltex	Final Advanced Materials
<b>Filament number (in roving)</b>	1.000	24.000	300 g/m <sup>2</sup>	500
<b>Tensile strength (filament) [GPa]</b>	2.9	5	300 N/cm ribbon of fabric	3.0
<b>Young's Modulus (filament) [GPa]</b>	373	240	-	86
<b>Price per m<sup>2</sup> fabric</b>	~ 800 €	30 - 50 €	~ 15 €	15 €

# Anorganische Fasern

## Untergliederung

### Funktionalität

- **Schutz und thermische Isolation** → polykristalline Wolle; Alumosilikate und Zirkonoxid
- **Verstärkungsfasern** → Steigerung des E-Modul, Steigerung der Bruchzähigkeit, Steigerung der Temperaturwechselbeständigkeit, Reduzierung des Gewichtes



<https://www.3m.com>



<https://www.rath-group.com/produkte/>



<https://www.deutsche-basalt-faser.de/>



# Anorganische Fasern

## Untergliederung

### „Aufmachung“ / Form

#### Kurzfasern / Stapelfasern / Vlies

- **Zerfaserung der Spinnmasse oder Schmelze bei der Formgebung über rotierende Scheiben oder Air-blow-Verfahren**
- **Polykristalline Wolle für Ofenisolierungen, Katalysatorklebung (Canning)**

#### Endlosfasern

- **Filamenterzeugung über Schmelz- oder Trockenspinnverfahren (Lösung)**
- **Verarbeitung zu Geweben**
- **Verwendung zur Verstärkung von Metallen (MMC), Keramik (CMC) und anorganischen Matrices (z.B. Geopolymer / GMC)**

# Keramikfasern

## Vor- und Nachteile

**oxidische Keramikfasern ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ , polykristallin)**

**+ hohe Zugfestigkeit und Moduli**

**+ Oxidationsstabilität**

**- hohe Kriechraten bei Temperaturen  $> 1000\text{ °C}$**

**- Reduzierung Zugfestigkeit durch Kornwachstum bei Temperaturen  $> 1000\text{ °C}$**

**nichtoxidische Keramikfasern ( $\text{SiC(O)}$ ,  $\text{Si-C-N}$ ,  $\text{Si-B-N-C}$ )**

**+ hohe Zugfestigkeiten und Moduli**

**+ niedriger Kriechraten bei hohen Temperaturen**

**- Oxidationsstabilität bei Temperaturen  $> 1000\text{ °C}$**

**- Stabilität gegenüber Metallschmelzen (LSI-Verfahren)**

**- Aufwändige Herstellungsverfahren (Inertgas, E-Strahl)**

# Anorganische Fasern

## Vor- und Nachteile

**Anorganische Verstärkungsfasern (Glas-, Basalt-, Silika- und Gesteinsfasern)**

**+ mittlere Zugfestigkeit und Moduli**

**+ Oxidationsstabilität**

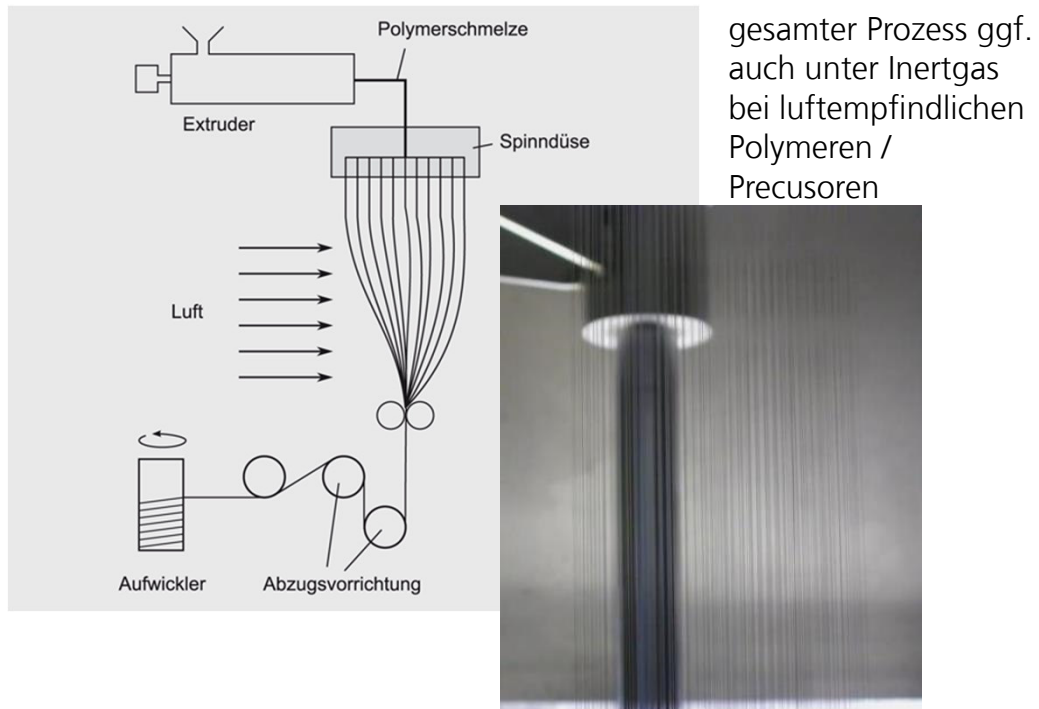
**- hohe Kriechraten bei Temperaturen  $> 1000\text{ °C}$**

**- Reduzierung Zugfestigkeit durch Kristallisation (Silikafasern)  $> 1000\text{ °C}$**

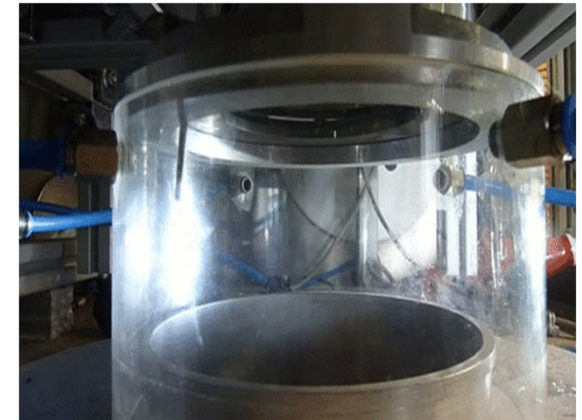
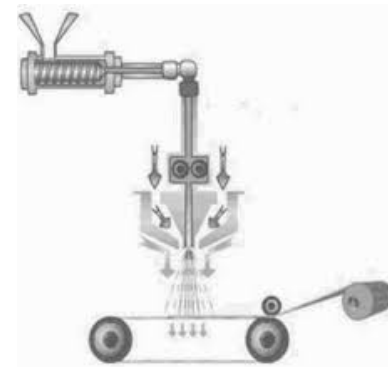
**- Reduzierung Zugfestigkeit durch Kristallisation (Basalt)  $> 600\text{ °C}$**

# keramische Fasern Herstellung

## Schmelzspinnen



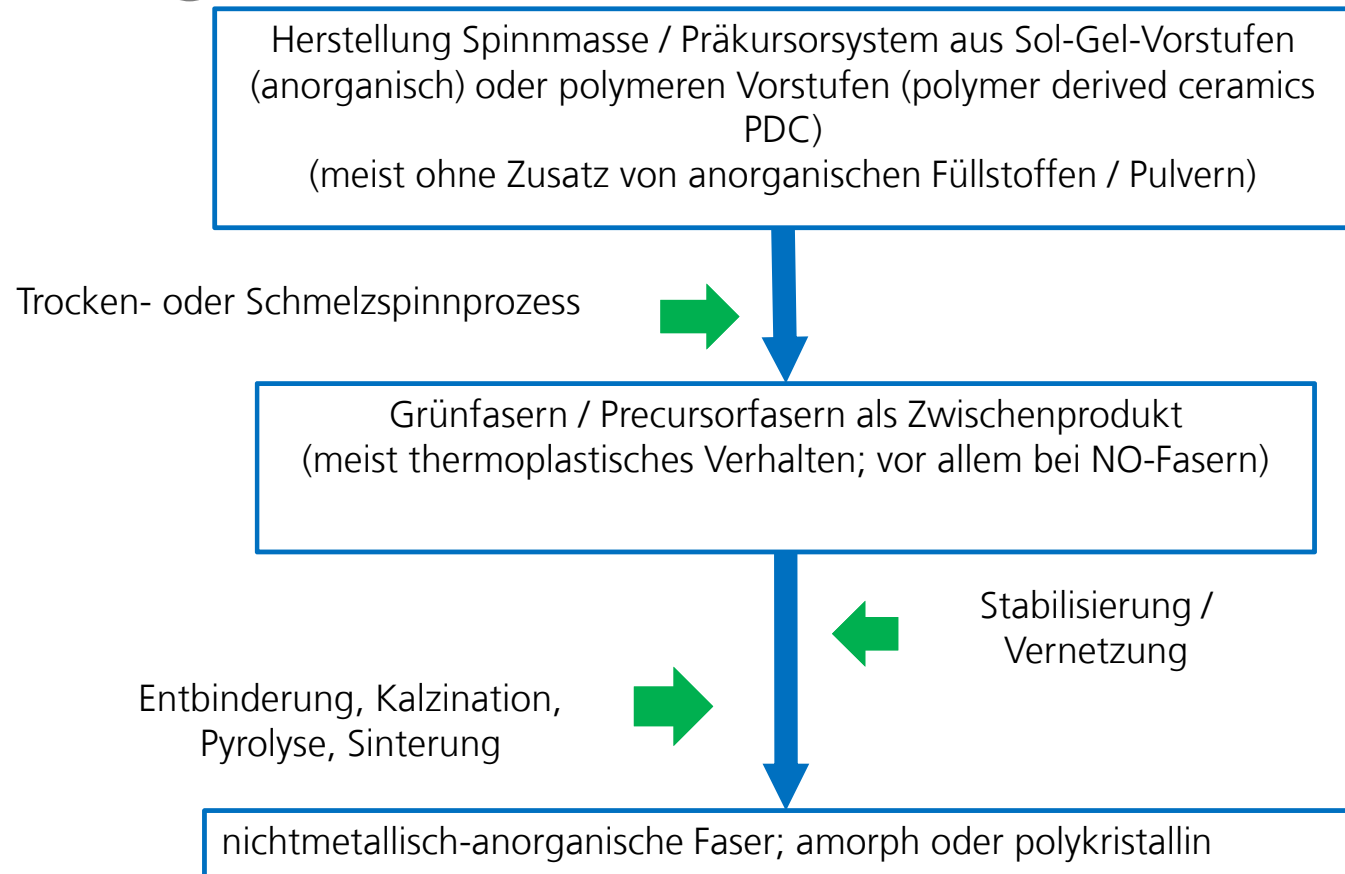
## Trocken- bzw. Lösungsspinnen



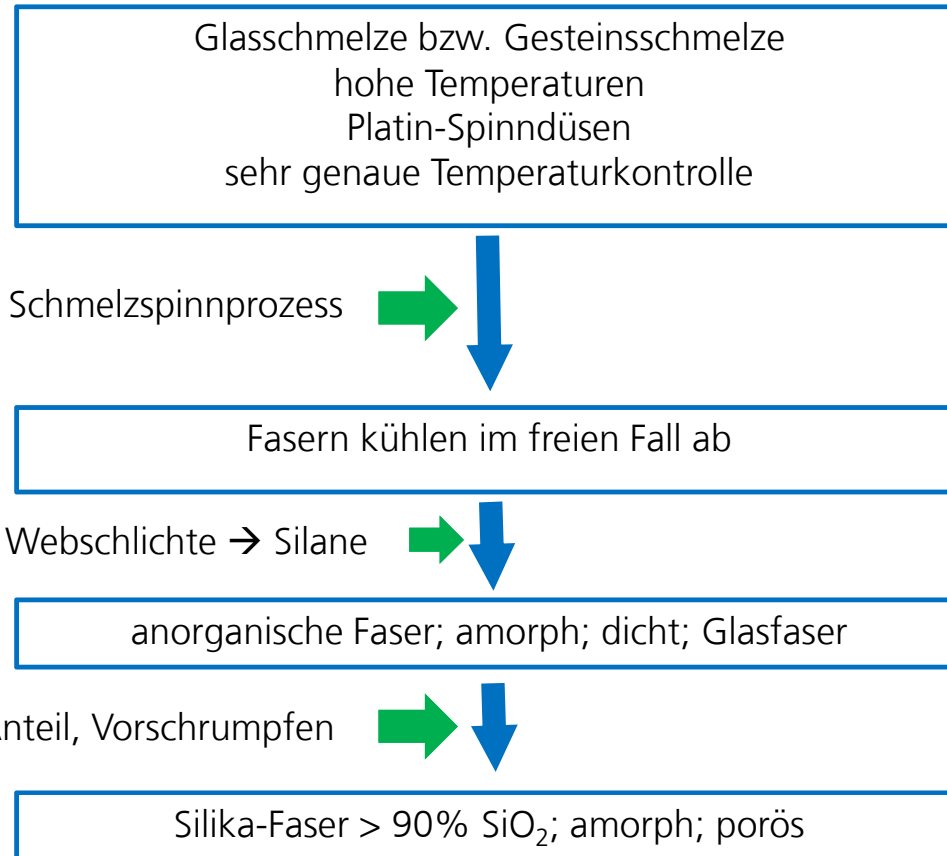
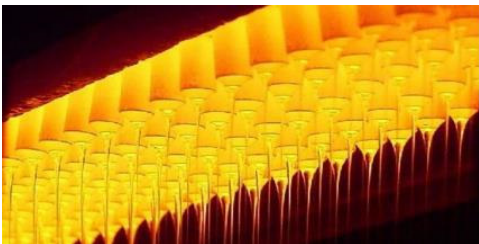
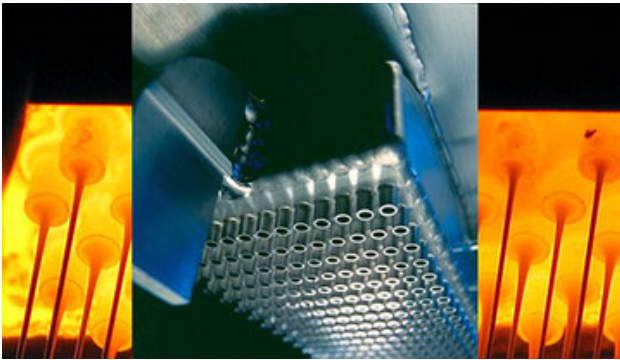
Textile Werkstoffe für den Leichtbau pp 327-366 | Cite as Vliesstoffhalbzeuge und Vliesbildungstechniken

Quelle: Polymere: Synthese, Eigenschaften und Anwendungen pp 461-496 | Cite as; Grundlagen der Kunststoffverarbeitung

# keramische Fasern Herstellung



# Amorphe anorganische Fasern Herstellung



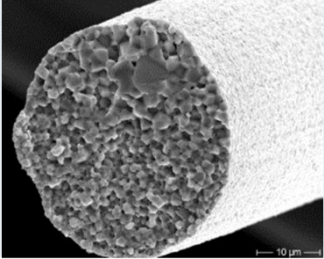
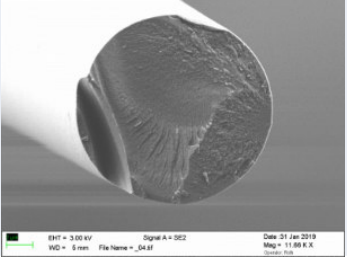
# Spinntechnik Filamenterzeugung





# Anorganische Verstärkungsfasern

## Entwicklung am HTL

	Lab scale	Large Lab scale	FPP (goal)
Tensile strength (single filament) [MPa]	< 1.000 MPa ( $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1.400 MPa (Mullite) 1.600 MPa ( $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + amorph. SiO <sub>2</sub> )	2.000 MPa (Mullite) 3.000 MPa ( $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
Young's modulus [GPa]		170 - 200	
Diameter [ $\mu$ m]	15 – 20 $\mu$ m	8 – 12 $\mu$ m	10 – 14 $\mu$ m
Crystal size (XRD) [nm]	> 500 nm ( $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	200 nm (Mullite)	< 100 nm
Crystal phases [-]	Corundum $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mullite, $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + amorph. SiO <sub>2</sub>	Mullite, $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
SEM picture			

### Strategie HTL:

#### Zielgerichtete Entwicklung für Kunden

##### ■ Stoffsysteme

- Glas & Silika
- Basalt
- Ox und NOx

##### ■ Aufmachung / Filamentanzahl

- 100 – 1000 fil.

##### ■ Kostenstruktur

- Prozesse
- Rohstoffe



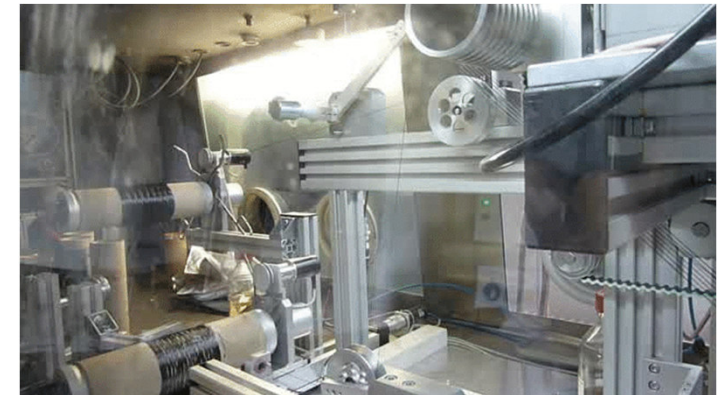
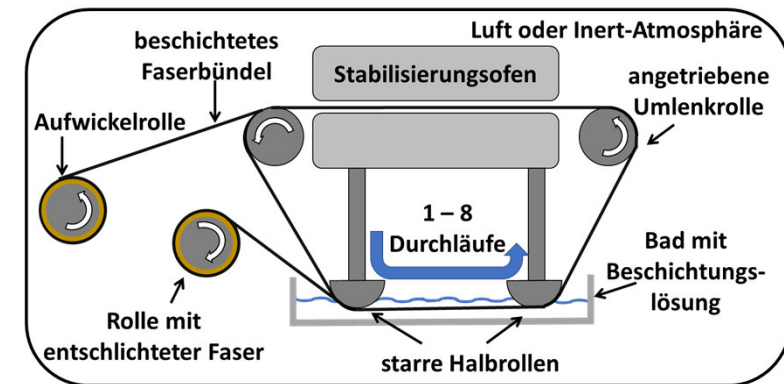
# Faserbeschichtung Interphase

## Vorteile im Vergleich zu CVD:

- Hohe Geschwindigkeit > 500 m/h
- Mehrfachbeschichtung in einem Zyklus möglich
- Keine signifikante Verschlechterung der Faserbündelzugfestigkeit
- Modulares System mit hoher Flexibilität
- Größere Materialauswahl (auch oxidische Faserbeschichtungen)
- $\text{BN}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$

Maier, J.; Nöth, A.; Schönfeld, K.: Key Engineering

17 Materials, Vol. 809, pp. 421-426, 2019



# Anorganische Verstärkungsfasern Herstellung und Eigenschaften

## Zusammenfassung

- Keramikfasern können sowohl als Isolationsmaterial, als auch als **Verstärkungsfasern** in CMC eingesetzt werden
- Herstellung von **keramischen Verstärkungsfasern** ist sehr komplex und zeitaufwändig, daher resultieren u.a. die **hohen Preise**
- **Anorganische Verstärkungsfasern** aus Gesteinsschmelzen (Basalt) oder modifizierten Gläsern wie Silikafasern besitzen mittlere Festigkeiten und sind z.T. bis 1100 °C einsetzbar; **einfachere Prozesstechnik und niedrige Preise**
- **Anwendungstemperatur und Atmosphäre** spielen eine Rolle ob oxidkeramische, nichtoxidische oder anorganische "Glas"-Fasern Anwendung als Verstärkungsfasern für CMCs finden