

Rundvernadelung – ein neuartiger Ansatz zur Herstellung von Carbonfaser-Preformen für C/C- Verbundwerkstoffe

Gwendolyn Wild¹, Andreas Hiederer¹, Matthias Krödel²,
David Mayrhofer² Alexandra Luft¹, Felix Meier³, Frank
Ficker¹

1- Hochschule Hof University of Applied Science, Germany

2- ECM -Engineered Ceramic Materials GmbH, Germany

*3- Fraunhofer HTL - Anwendungszentrum Textile Faserkeramiken TFK,
Germany*



ifm

Institut für
Materialwissenschaften
der Hochschule Hof



ecm *engineered
ceramic materials GmbH*



Agenda

Hochschule Hof	03
Kurzvorstellung ifm und TFK	04
Eckdaten zum Forschungsprojekt RuRoRa	05
Ziele und Anforderungen	06
Arbeitsteilung	07
Projekttablauf	08
Auswahl der Preform-Materialien	11
Rundvernadelung	13
Preform- und Prozessoptimierung	17
Prozessroute	20
Charakterisierung der Rohre	23
Vergleich der erreichten Ergebnisse	26
Ausblick	27



Hochschule Hof

University of Applied Sciences



Standort Hof



Standort Kronach



Standort Münchberg



Lernort Selb

- 1994 Gründung
- 4 Standorte
- 5 Fakultäten
- über 43 Bachelor- und Masterstudiengänge
- Rund 4.000 Studierende*
- Verhältnis Professoren/Studierende rund 1:30
- textile Ausbildung in Münchberg seit 1854, Studiengänge Innovative Textilien und Textildesign (B.) und Sustainable Textiles (M.)

*WS 2023



Kurzvorstellung Institut für Materialwissenschaften der Hochschule Hof (ifm) und Fraunhofer Anwendungszentrum Textile Faserkeramiken TFK



**Fraunhofer-Zentrum für
Hochtemperatur-
Leichtbau HTL
Anwendungszentrum
Textile Faserkeramiken
TFK**



ifm
Institut für
Materialwissenschaften
der Hochschule Hof

**Institut für
Materialwissenschaften
der
Hochschule Hof**

Gründung:	2014	Gründung:	2011
Leitung:	Prof. Dr. F. Ficker	Leitung:	Prof. Dr. F. Ficker
Stellv. Leitung:	DI S. Grosch	Geschäftsführer:	Dr. E. Putzke

- Bündelung der Forschungskapazitäten der Fakultät Ingenieurwissenschaften
- Nutzung der Fachkompetenzen für industrienaher Forschung in enger Zusammenarbeit mit Unternehmen
- Entwicklung innovativer, nachhaltiger Produkte und Prozesse
- Fokus liegt auf der Entwicklung moderner Funktionswerkstoffe
- Stehen verschiedene Technika und Labore zur Verfügung



Eckdaten zum Forschungsprojekt RuRoRa

Entwicklung von **Rundvernadelten C/C-SiC-Rohrstrukturen** für die Raumfahrt

Projektpartner:



ifm

Institut für
Materialwissenschaften
der Hochschule Hof

Laufzeit: 01.04.2020 bis 30.06.2023

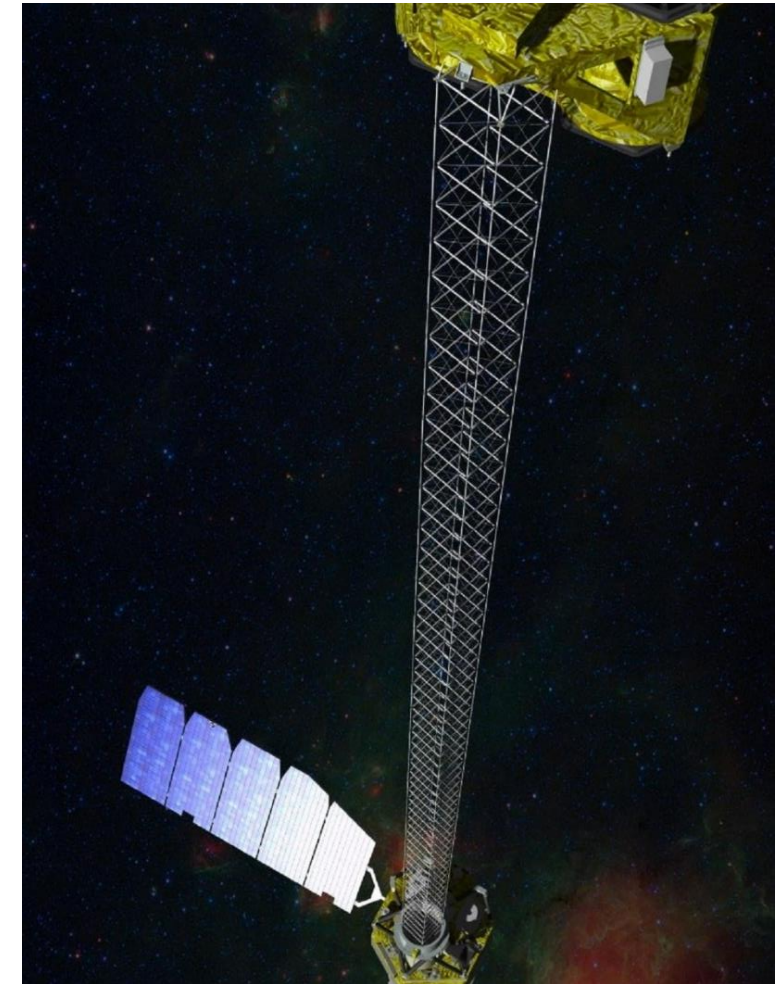


Förderträger: AiF Projekt GmbH



FuE Kooperationsprojekte des ZIM

Wir danken der AiF Projekt GmbH für die Förderung des Projektes „RuRoRa“, als auch unseren Projektpartnern, der Engineered Ceramic Materials GmbH und dem Fraunhofer ISC, für die freundliche Zusammenarbeit.

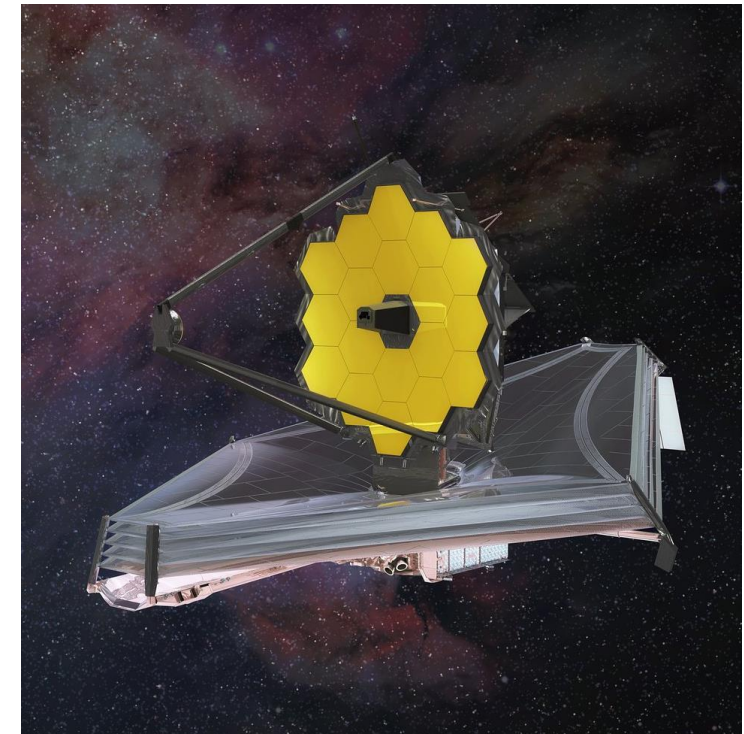


Röntgenteleskop NuSTAR

Ziele und Anforderungen

- Bisher: Gestänge aus gewickelten Rohrprofilen → Delamination der Wickellagen, niedrige Torsionssteifigkeit und Zugfestigkeit
- **Niedrige Wärmeausdehnung in radialer Richtung:** begrenzende Geometrie durch bspw. Bohrungen zum Verbinden des Gestänges
- **Mechanische Verbesserung** der Rohrstruktur für mehr Stabilität
- **Gewichtsreduktion** → Dünnere und leichtere Komponenten

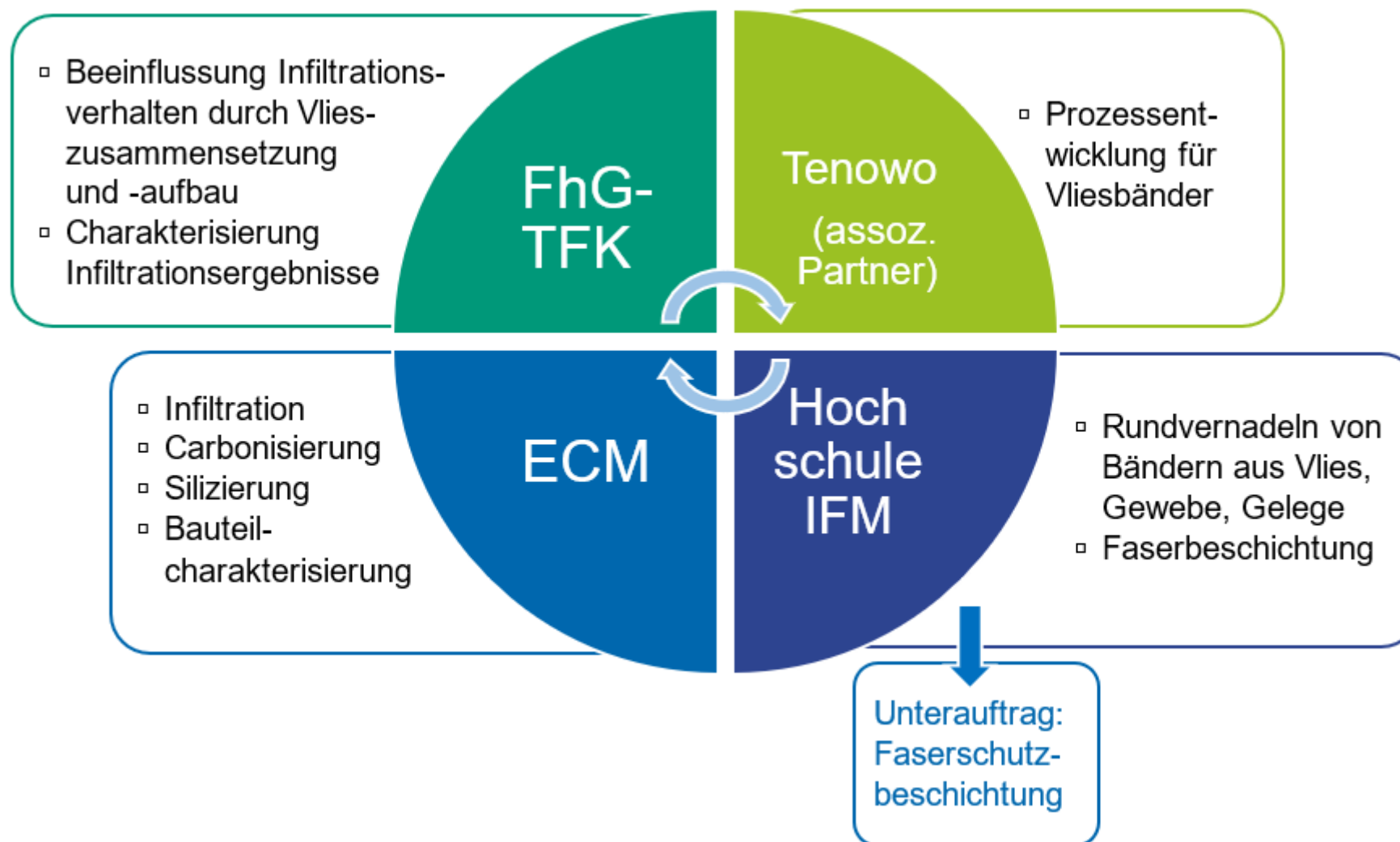
Wärmeausdehnung	$2 - 2,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Zugfestigkeit	200 MPa
Faservolumengehalt	< 50 %
Gestänge-Länge	750 mm
Gestänge-Durchmesser	20 – 40 mm
Wandstärke	3 – 10 mm
Wärmeleitfähigkeit	so hoch wie möglich



James Webb Space Telescope, ©ESA/Hubble



Arbeitsteilung





Projektlauf

AP-Nr.	Bezeichnung des Arbeitspakets	Beteiligter Partner
1	Projekt-Recherchen	HS
2	Festlegung der detaillierten Anforderungsprofile und des Demonstrators	ECM
3	Entwicklung des Vliesaufbaus	HTL
4	Entwicklung des Prozesses zur Erzeugung der Vliespreformen	HS
5	Entwicklung der Maschinentechologie zur Vernadelung tubularer Preformen	HS
6	Erarbeitung des Prozesses für Schutzbeschichtung	HS
7	Erarbeitung des Prozesses für die Matrixherstellung (Harzinfiltation)	ECM
8	Erarbeitung des Prozesses für die Pyrolyse	ECM
9	Erarbeitung des Prozesses für die Silizierung	ECM



Projektlauf

AP-Nr.	Bezeichnung des Arbeitspakets	Beteiligter Partner
10	Optimierung der Prozessführung auf Basis der Versuchsergebnisse	ECM
11	Wissenschaftliche Unterstützung der Prozessoptimierung für Pyrolyse und Silizierung	HTL
12	Anwendungstechnische Charakterisierung der Muster	ECM
13	Demonstratorherstellung und Prüfung	ECM
	Abstimmung, Projektmanagement und Dokumentation	ECM+HS+HTL



Arbeitsplan RuRoRa																			MS1	MS2														MS3					
AP-Nr.	beteiligte Partner	20 04	20 05	20 06	20 07	20 08	20 09	20 10	20 11	20 12	21 01	21 02	21 03	21 04	21 05	21 06	21 07	21 08	21 09	21 10	21 11	21 12	22 01	22 02	22 03	22 04	22 05	22 06	22 07	22 08	22 09	22 10	22 11	22 12	23 01	23 02	23 03		
1	Lead HS	█	█																																				
2	Lead ECM	█	█	█	█																																		
3	Lead HTL		█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█																	
4	Lead HS			█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█																							
5	Lead HS			█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█		
6	Lead HS																																						
7	Lead ECM					█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█		
8	Lead ECM									█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█		
9	Lead ECM																																						
10	Lead ECM																																						
11	Lead HTL																																						
12	Lead ECM			█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	
13	Lead ECM																																						
	ECM + HS + HTL + TE	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	

MS	Meilensteine
1	Herstellung der textilen Preform durch Rundvernadelung
2	Erfolgreiche Harzinfusion der Preform unter Berücksichtigung der Formstabilität
3	Herstellung eines infiltrierten Bauteils (Demonstrators)



Auswahl von Preform-Materialien auf Grundlage von Flachvernadeln

- Zunächst Ermittlung wichtiger Spezifikationsanforderungen und Maschinenparameter
- Umfangreiche Versuchsreihen zur Entwicklung geeigneter Preformen und deren Aufbau durch Vernadelung von Flachproben auf Basis der Spezifikationen
- Herstellen der Flachproben auf gleicher Weise wie endgültige Preformen
- Prüfung der prozessierten Flachproben



Prüfkörper von flachvernadelten C/C-SiC-Platten



Rundvernadelungsanlage Rontex an der Hochschule Hof

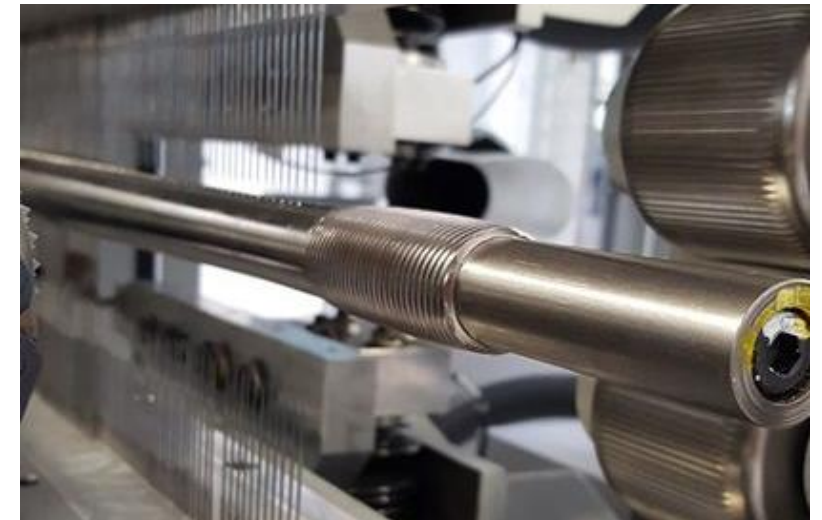
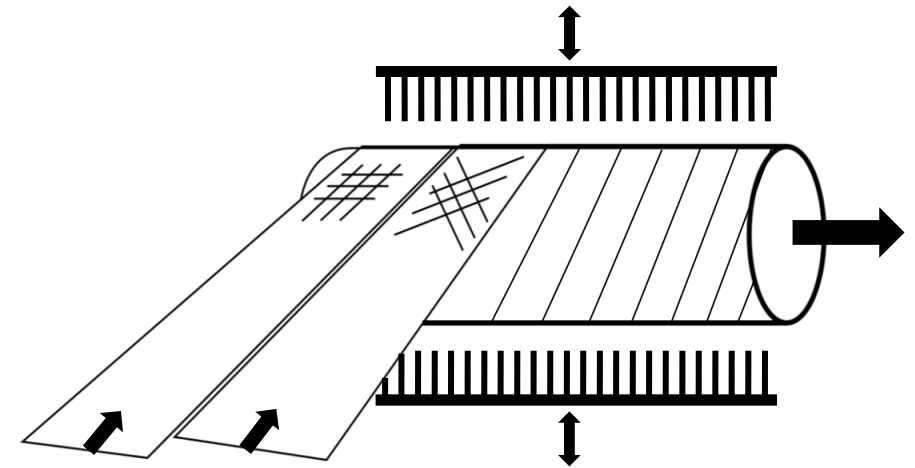
- Vernadelungsprinzip "Rontex", von Richard Dilo patentiert
- Rundvernadelungsanlage zur Herstellung von runden, dreidimensionalen Rohrstrukturen
- Durchmesser von 10-400 mm aus textiler Bandware möglich (ifm: 27, 150 und 400 mm)
- Einsatz von Carbonfaser (HS Hof), Glas, Keramik, Basalt und allen Arten von Synthese- und Naturfasern
- Verwendung von textilen Halbzeugen in Bandform (Vliese, Gewebe, Gelege ...)
- Wandstärken bis zu 20 mm



DILO Rontex S 4000 Rundvernadelungsanlage beim IFM

Rundvernadelungsprinzip

- Textile Bänder laufen seitlich auf perforierten Stichdorn auf
 - Vernadelung von oben und unten
- Umlenkung von Fasern in radialer Richtung (z-Verstärkung)
 - Steigerung interlaminare Scherfestigkeit bzw. Trennfestigkeit
- Endlose textile Rohre möglich: Vorwärtsbewegung der Rohre durch Abzugswalzen, die Textil auf Abzugspatrone pressen



Vernadelungszone, Foto: ifm



Rundvernadelung – Materialien

- **PES-Vlies:**
 - + Sehr gut für Vorversuche, Einstellung der Parameter
- **CF-Vlies:**
 - + Isotroper Charakter
 - Hält Verzug während Vernadeln nicht stand
- **CF-Vlies „Maliwatt“ (85% CF, Nähfäden)**
 - + Mit Verstärkung lässt sich CF-Vlies vernadeln
 - Keine Faserausrichtung, Innendurchmesser zu hoch, Dichte und FVG zu gering
- **CF-Band (NCF)**
 - + Reines CF-Material mit Faserorientierung
 - Niedrigere Lagenhaftung, Faltenbildung, Faserschädigung



Rundvernadeltes PES-Vlies, Foto: ifm



Rundvernadeltes Maliwatt-Vlies, Foto: ifm

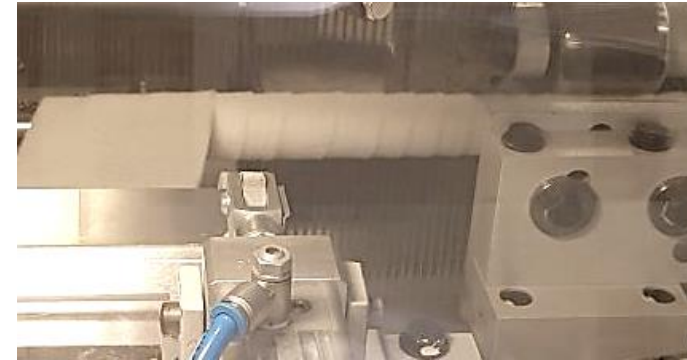


Rundvernadeltes NCF-Band, Foto: ifm



Rundvernadelung – Projekterkenntnisse beim Einsatz von T700-Fasern

- PES verdichtet sich beim Vernadeln
 - Innendurchmesser nimmt ab
- T700-CF-Material: Verdichtet sich deutlich weniger
 - Innendurchmesser ändert sich kaum → muss mit hoher Spannung um Dorn gewickelt werden
- Schwierig, reines CF-Vlies zu vernadeln
- Textile Zugfestigkeit des Ausgangsmaterials ausschlaggebend für Erfolg der Vernadelung
- Spezielle Materialien, z.B. CF-Vlies „Maliwatt“-Verfestigung (PES-Faserverstärkung in Längsrichtung), NCF lassen sich gut vernadeln



Oben: Vernadelung von PES-Vlies,
unten: Vernadelung von Carbon-Maliwatt, *Bilder: ifm*

Optimierung der Rontex

- Ersetzen der geriffelten und garnierten Abzugswalzen
 - Einsatz von gummierten Walzen
 - Schonen der Faseroberfläche
 - Besserer Antrieb
 - Nachteil: starke Abnutzung der Walzenoberfläche

- Tausch des konischen Stichdorns mit zylindrischen
 - Geringerer Außendurchmesser
 - Höhere Preformdichte und FVG
 - Minimieren der Falten

konisch
zylindrisch



Oben: konischer Dorn
unten: zylindrischer Dorn, Foto: ifm

konisch
zylindrisch



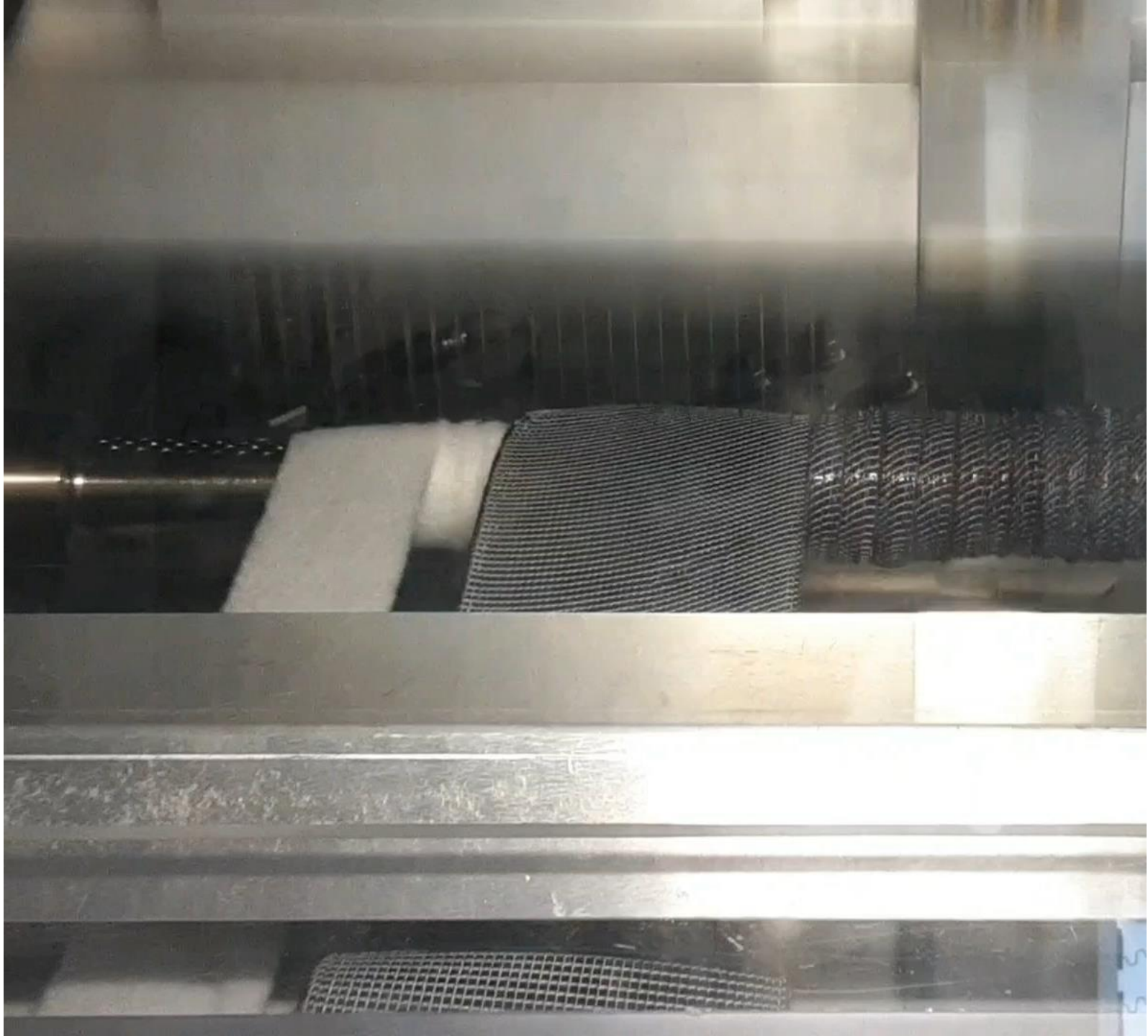
Oben: NCF auf konischem Dorn vernadelt
unten: NCF auf zylindrischen Dorn vernadelt, Foto: ifm

Optimierung der Preformen

- Materialkombinationen aus NCF und PES-Vlies:
 - Puffermaterial
 - gleicht Faltenbildung aus
- Gleichzeitig in Maschine einlaufen
 - Siliziuminseln
- Dünnerer PES-Vliesstoff
 - Erhöht Dichte und FVG
 - Wanddicke unter 1 mm
- Parallel einlaufen lassen:
 - Kern/Mantel-Struktur
- Einsatz kleinere Abzugspatrone (10 mm),
110 mm breites NCF-Band
 - Anzahl Überlappungen steigt
 - Wanddicke steigt

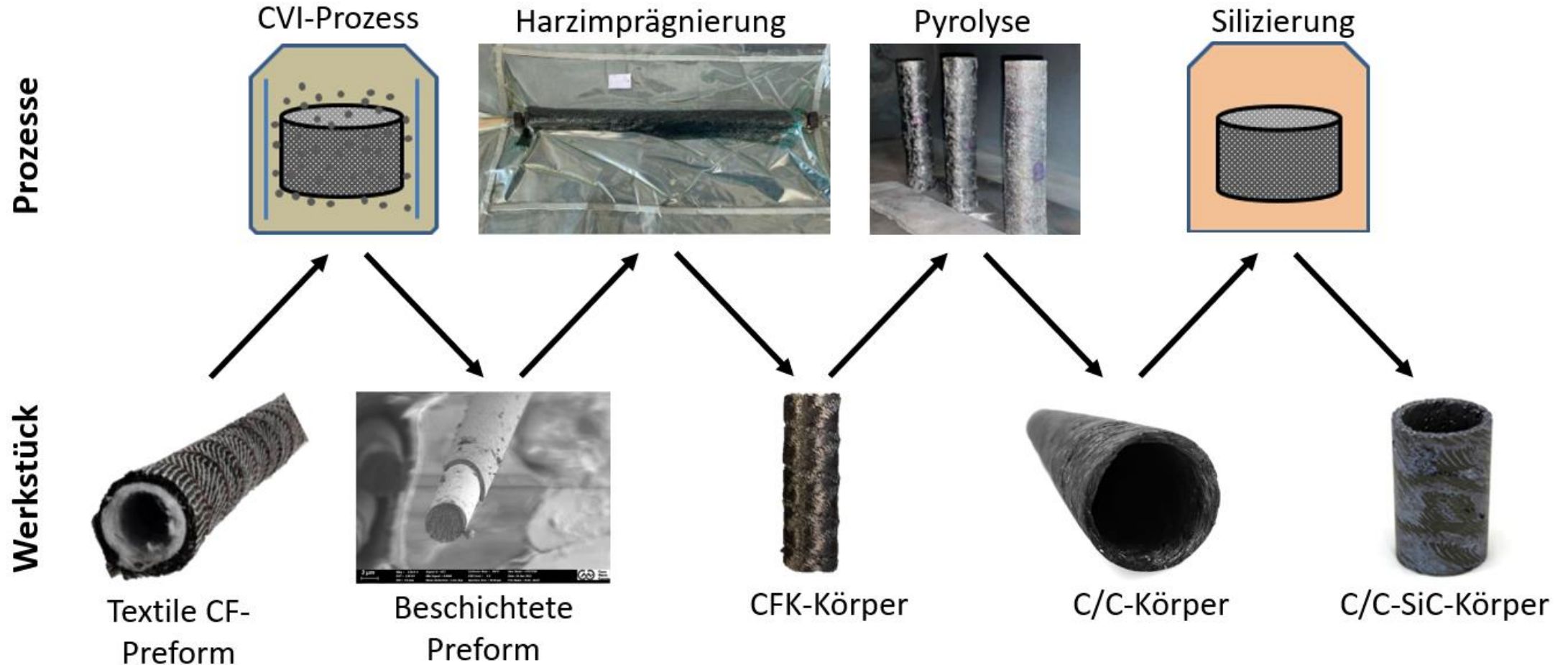


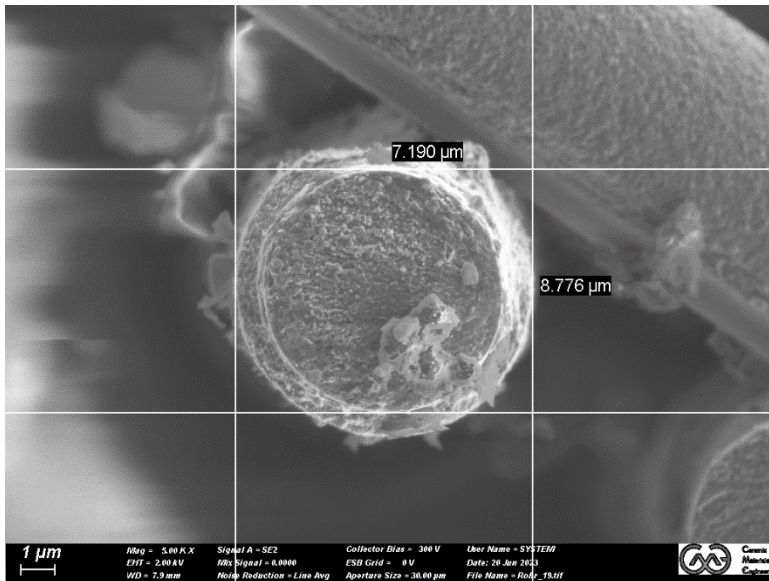
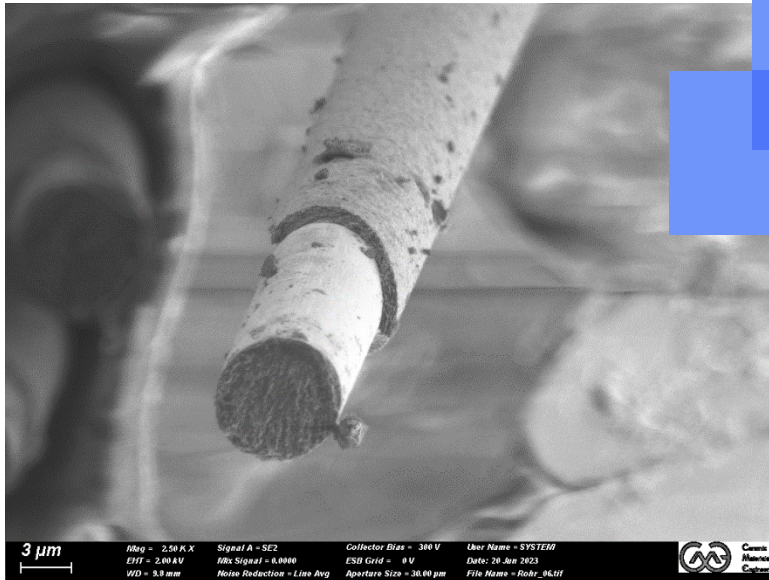
Oben: Schneckenstruktur, unten: Kern/Mantel-Struktur, Foto: ifm





Prozessroute für C/C-SiC





Beschichtung der Carbonfasern

- Schutz der Fasern gegen Beschädigung während Pyrolyse und Silizierung
- Verstärkung der Faser/Matrix-Haftung während der Harzinfiltration
- Beschichtung mittels CVI mit einer PyC-Schicht (pyrolysiertes Carbon)
 - Unterschiedliche Schichtdicken: 600 nm und 800 nm

REM-Bilder der PyC-Beschichtung, Foto: CME Bayreuth



Bewertung der Infiltration und Prozessierung

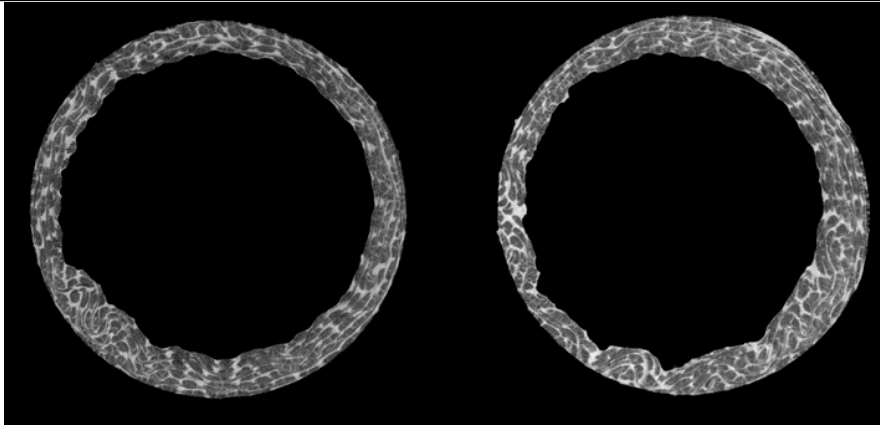
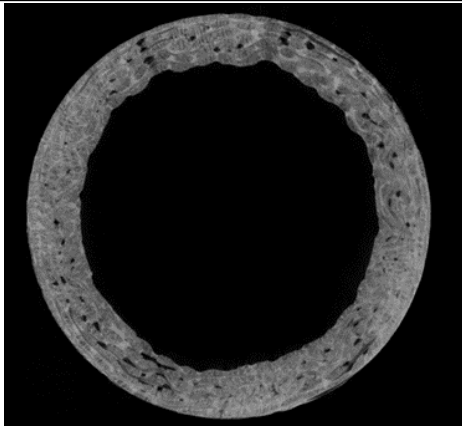
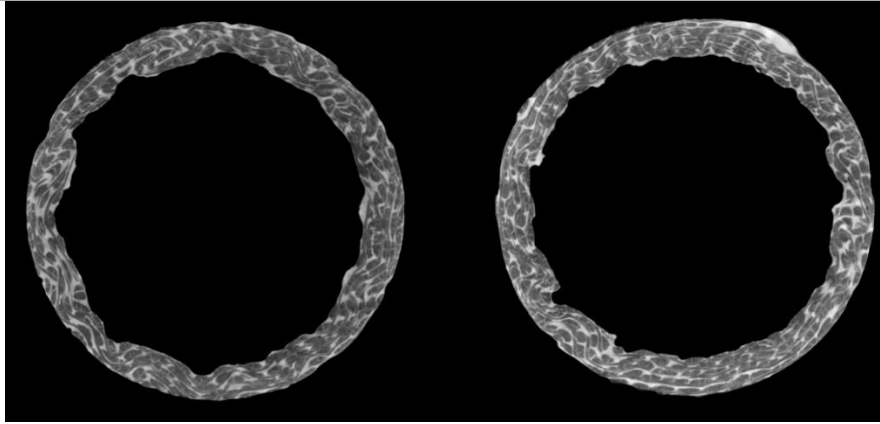
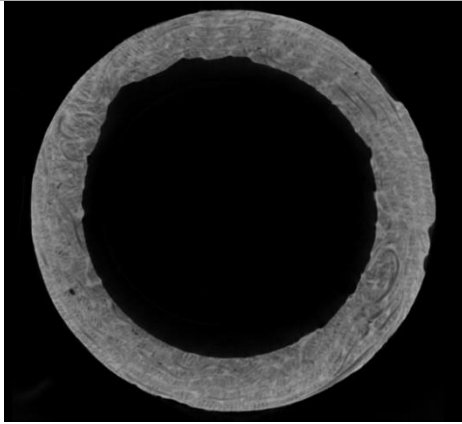
- Infiltration konnte für rundvernadelte C/C-Preformen optimiert werden
 - Strukturen relativ homogen
- Die C/C-Preformen noch nicht optimal bezogen auf die Porenstruktur, aber Infiltration über Kapillarkräfte funktionierte bis zu einer Saughöhe von 200 mm
- Die Berechnung der notwendigen Si-Menge gilt es noch zu optimieren
 - Um übermäßigen Faserangriff zu eliminieren und überschüssiges Si zu vermeiden
- Selbst ein Rohr mit Länge von 750 mm infiltrierbar
 - Infiltrationsrichtung 90° zur Rohrlänge
 - Mikroporosität im Gegensatz zu gewickelten Geweberohren gut genug, um auch „quer“ zu infiltrieren



C/C-SiC-Rohr, Foto: ECM



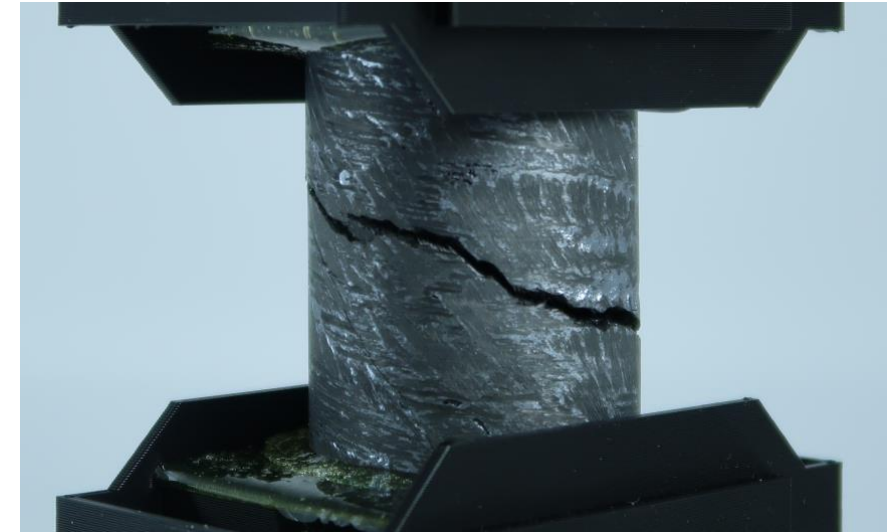
Charakterisierung – CT-Aufnahmen

	Ohne Beschichtung	Beschichtete C/C-SiC Struktur <ul style="list-style-type: none">– 35 % Fasern– 50 % Matrix
Position: 75 mm		
Position: 150 mm Rohrlänge: 300 mm		



Zugprüfung – Herausforderungen

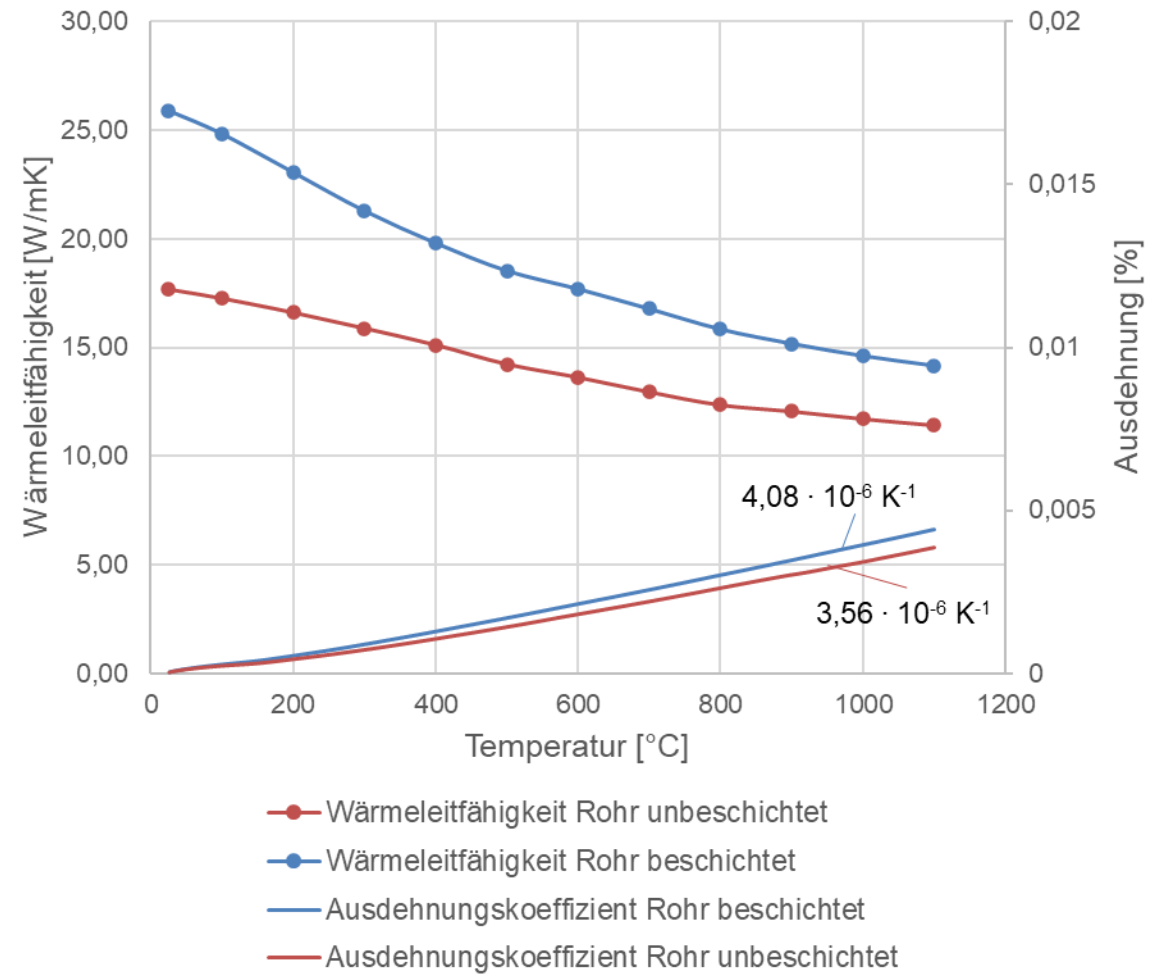
- Entwicklung einer 3D-gedruckten Form, um Rohre in Zugprüfmaschine einspannen zu können
- Ungleichmäßige Wanddicke der C/C-SiC-Rohrstrukturen nach Oberflächennachbehandlung
 - Unklar, ob Rohr an Dünnstelle zuerst versagt
- Gute Vorbereitung der Prüflinge essenziell, aber sehr schwierig
 - Wichtig, Beschädigungen während Prüfungsvorbereitung zu vermeiden
 - Planparalleles Einsetzen in Harz und Form, um Beschädigung während Einspannen zu vermeiden



Bruchbild der zuggeprüften C/C-SiC-Rohre in Prüfform, Foto: ifm



Thermische Charakterisierung





Vergleich der erreichten Ergebnisse

Bezeichnung	Zielwert	Erreichter Wert
Zugfestigkeit axial	200 MPa (Flachproben)	50 MPa (Rohrproben)
Wärmeausdehnung in axialer Richtung	$2-2,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$3,5 - 4,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Wärmeleitfähigkeit	So hoch wie möglich	18 - 26
Faservolumengehalt	< 50 %	Ca. 35 %
Außendurchmesser	< 40 mm	40-45 mm



Ausblick

- Band- und Rohrstruktur optimieren
 - Neue Materialkombinationen: z.B. Roving + Vlies
- Zug-Prüfmethode von Rohren optimieren
- Alternative industrielle Anwendungen für rundvernadelte Preformen erschließen





Eckdaten zum Forschungsprojekt RuRoRa

Entwicklung von **Rundvernadelten C/C-SiC-Rohrstrukturen** für die Raumfahrt

Projektpartner:



Laufzeit: 01.04.2020 bis 30.06.2023

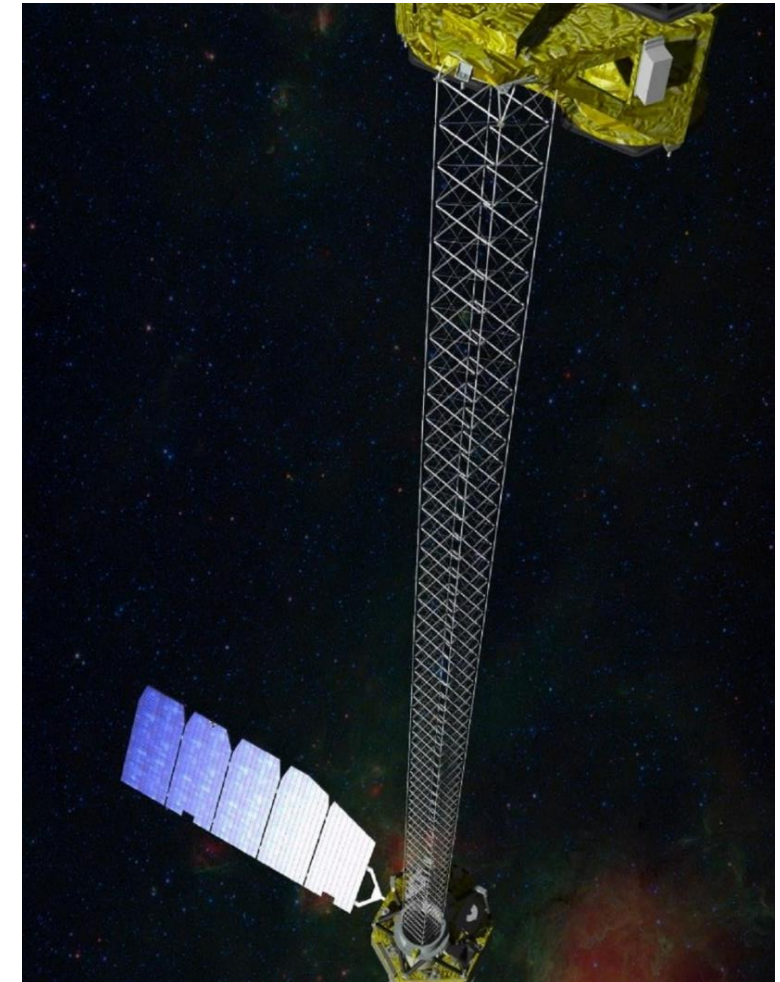


Förderträger: AiF Projekt GmbH



FuE Kooperationsprojekte des ZIM

Wir danken der AiF Projekt GmbH für die Förderung des Projektes „RuRoRa“, als auch unseren Projektpartnern, der Engineered Ceramic Materials GmbH und dem Fraunhofer ISC, für die freundliche Zusammenarbeit.



Röntgenteleskop NuSTAR



ifm

Institut für
Materialwissenschaften
der Hochschule Hof

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Kontakt:

Gwendolyn Wild

E-Mail: gwendolyn.wild.2@hof-university.de

Telefon: **+49 9281 409-8407**

Alfons-Goppel-Platz 1

95028 Hof

Phone +49 9281 409-3000

ifm@hof-university.de

www.hof-university.de/ifm

Kulmbacher Str. 76

95213 Münchberg

Phone +49 9281 409-8000

