

TurbAn - SB-1100-011A\_P

Issue: 1

Date: 27.07.2023

Internal ref.:

Class: 2

Category: 3

**CMC-Optimierung für Turbinenanwendungen**

**CMC TurbAn**

**Sachbericht zum Verwendungsnachweis Teil I  
Kurzfassung**

<b>CMC-TurbAn</b>	<b>DISTRIBUTION LIST</b>			Programme Document Reference TurbAn-SB-1100-011A_P Issue 1	Page 2
<b>PROJECT INTERNAL</b>					
NAMES	ACRONYM	COPIES		PURPOSE	
		pdf	CD	Paper	APPROV.
J. Alting P. Hofbauer S. Schmidt-Wimmer S. Soller	AGG AGG AGG AGG	1 1 1 1			X X
<b>EXTERNAL</b>					
NAMES	AUTHORITY ACRONYM	COPIES		PURPOSE	
		PDF	CD	PAPER	APPROV.
U. Mohr N.N.	PTJ TIB Hannover	X			X X

<b>Internal reference :</b>	<b>Issue</b>		<b>Date :</b> 27.07.2023
<b>Structured reference :</b> TurbAn-SB-1100-011A_P			<b>Page</b> 3/21

CLASSIFICATION	COMPANY		MILITARY		PROGRAMME	
	ArianeGroup unprotected	<input checked="" type="checkbox"/>	Unclassified	(NP)	<input checked="" type="checkbox"/>	General Public (1) <input checked="" type="checkbox"/>
	ArianeGroup Reserved	<input type="checkbox"/>	Confidential	(CD)	<input type="checkbox"/>	Industry (2) <input type="checkbox"/>
	ArianeGroup Confidential	<input type="checkbox"/>	Secret	(SD)	<input type="checkbox"/>	Limited distribution (3) <input type="checkbox"/>
	ArianeGroup Secret	<input type="checkbox"/>	Top Secret	N/A	<input type="checkbox"/>	Confidential (4) <input type="checkbox"/>
French National (SF) <input type="checkbox"/>						
CONTRACT	Customer PTJ		Contract number		Programme CMC-TurbAn	
	Contractual document		C.Work Unit	Item	Sub-item	CWS
	yes <input checked="" type="checkbox"/>	no <input type="checkbox"/>				WP 1100

**TITLE** CMC-Optimierung für Turbinenanwendungen  
Sachbericht zum Verwendungsnachweis Teil I

## ABSTRACT

Im Rahmen des Vorhabens CMC TurbAn untersuchte ArianeGroup die Prozesskette zur Herstellung eines SiC/SiC Faserverbundwerkstoffes. Dies gesamte Prozesskette wurde untersucht: Textile Preformfertigung mittels Flechten, PBN-Beschichtung und pyC-Matrix-Aufbau mittels r-CVI-Verfahren, Schlicker-Infiltration, Konvertierung der C-Matrix zur SiC-Matrix im LSI-Prozess. Insgesamt wurden anhand von vier Iterationen die Einfluss verschiedener Prozessparameter auf die Werkstoffeigenschaften untersucht.

The project TurbAn investigated the process chain for manufacturing of SiC/SiC CMCs: textile manufacturing of preforms, PBN-coating and pyC-coating of fibres with r-CVI process, slurry infiltration, pyrolysis in LSI process. Four subsequent iterations of sampling investigated the effect of different process parameters on material properties.

**KEYWORDS** CMC TurbAn / Sachbericht Teil 1 / Final report part 1 CMC Optimierung für Turbinen

File ref. :	Configuration management	Distribution category	
Software : MS Word		Interest	Short term <input type="checkbox"/>
Language code : GER		Internal	Medium or long term <input type="checkbox"/>
Taking precedence : n/a		Customer	
figures 2		Sup. distribution	Authorized <input type="checkbox"/> Checked <input type="checkbox"/>
tables -			

	Author	Validated by
Name	S. Soller (JLFE)	J. Alting (JLFE)
Role	Project Management	Head of Department JLFE

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>5</b>
<b>1 VERWEISE .....</b>	<b>6</b>
1.1 ANWENDBARE DOKUMENTE.....	6
1.2 REFERENZDOKUMENTE .....	6
<b>2 KURZBERICHT .....</b>	<b>7</b>
2.1 AUFGABENSTELLUNG.....	7
2.2 VORGEHENSWEISE .....	7
2.3 ERGEBNISSE .....	7

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Prozesskette zur Fertigung von SiC/SiC-Zugproben (oben) sowie photographische Aufnahmen des Probenmaterialzustands nach jedem angewandten Prozessschritt (unten). .....	8
Abbildung 2: Erreichte Zug- und Biegefestigkeiten (4-Punkt-Biegerversuch) mit den Iteration 1 bis 4. ....	8

## 1 VERWEISE

### 1.1 ANWENDBARE DOKUMENTE

- [AD 1] Zuwendungsantrag "HomAS-TurbAN,  
Zuwendungsantrag, ArianeGroup GmbH, 31.07.2018
- [AD 2] Zuwendungsbescheid; Zuwendung aus dem Bundeshaushalt, Einzelplan 30, Kapitel 3004, Titel 68326, Haushaltsjahr 2018, für das Vorhaben „CMC-TurbAN – CMC Optimierung für Turbinen-anwendungen“, 15.11.2018, Förderkennzeichen 03XP0189C
- [AD 3] Änderungsbescheid; Zuwendung aus dem Bundeshaushalt, Einzelplan 30, Kapitel 3004, Titel 68326, Haushaltsjahr 2018, für das Vorhaben „CMC-TurbAN – CMC Optimierung für Turbinen-anwendungen“, 17.11.2021, Förderkennzeichen 03XP0189C
- [AD 4] Änderungsbescheid; Zuwendung aus dem Bundeshaushalt, Einzelplan 30, Kapitel 3004, Titel 68326, Haushaltsjahr 2018, für das Vorhaben „CMC-TurbAN – CMC Optimierung für Turbinen-anwendungen“, 06.01.2022, Förderkennzeichen 03XP0189C
- [AD 5] Änderungsbescheid; Zuwendung aus dem Bundeshaushalt, Einzelplan 30, Kapitel 3004, Titel 68326, Haushaltsjahr 2018, für das Vorhaben „CMC-TurbAN – CMC Optimierung für Turbinen-anwendungen“, 11.02.2022, Förderkennzeichen 03XP0189C
- [AD 6] Änderungsbescheid; Zuwendung aus dem Bundeshaushalt, Einzelplan 30, Kapitel 3004, Titel 68326, Haushaltsjahr 2018, für das Vorhaben „CMC-TurbAN – CMC Optimierung für Turbinen-anwendungen“, 09.11.2022, Förderkennzeichen 03XP0189C

### 1.2 REFERENZDOKUMENTE

- [RD1] Zwischenbericht "HomAS-TurbAN #01, ArianeGroup GmbH, 02.07.2020
- [RD2] Zwischenbericht "HomAS-TurbAN #02, ArianeGroup GmbH, 15.05.2021
- [RD3] Zwischenbericht "HomAS-TurbAN #03, ArianeGroup GmbH, 19.05.2022

## 2 KURZBERICHT

### 2.1 AUFGABENSTELLUNG

Das Vorhaben „CMC-Optimierung für Turbinenanwendungen“ (CMC-TurbAN) ist in der Gesamtvorhabenbeschreibung [AD 1] dargestellt und erstreckte sich gemäß Zuwendungsbescheid über den Bewilligungszeitraum vom 01.12.2018 bis 30.11.2021 [AD 2]. Durch die Corona-Pandemie kam es zu Verzögerungen, die eine Verlängerung des Zuwendungszeitraums bis zum 30.11.2022 erforderlich machten [AD 3].

Gesamtziel des Vorhabens war die Untersuchung und Entwicklung von CMC-Materialien für deren Einsatz als Hochtemperaturwerkstoff in Gasturbinen.

Im Rahmen des Hauptarbeitspaketes (HAP) 2, „SiC-basierte Materialien“, sollte die ArianeGroup eine produkt-spezifische Materialentwicklung betreiben, die aus einer Adaption von etablierten internen und externen Fertigungsprozessen auf die im Projekt geforderte SiC<sub>f</sub>/SiC (siliciumfaserverstärktes Siliciumcarbid)-Werkstoffklasse bestand.

Mehrere Projektpartner arbeiteten dazu parallel an der Entwicklung der Werkstoffklasse, um folgende Anforderung zu erfüllen: Es sollten mindestens 66% von den folgenden, im Förderprojekt angestrebten Werkstoffkennwerten erzielt werden:

- Biegefestigkeit > 300 MPa,
- Zugfestigkeit > 250 MPa,
- Proportional Limit Stress PPL > 150 MPa,
- Gesamtdehnung bei Bruch (Raumtemperatur) > 0,5 %,
- Porosität < 5%,
- zulässiger Abfall der Kennwerte < 30% nach Auslagerung bei 1200°C.

### 2.2 VORGEHENSWEISE

Bereits bei der Antragsstellung wurde von der ArianeGroup eine neuartige Prozesskette zur Fertigung eines SiC/SiC-Werkstoffes aufgestellt. Diese erfüllte zum einen die Vorgaben von der MTU als Konsortialführer, nämlich die Verwendung der SiC Faser „Hi Nicalon Type S“ SiC von NGS, einer Faserbeschichtung mit Bor-nitrid (BN) sowie einer Ausrichtung der Fasern zu gleichen Teilen in 0°- und 90°-Richtung. Zum anderen wurde die Prozesskette auch den Ansprüchen der ArianeGroup gerecht, die sich einen sehr hohen Automatisierungsgrad sowie eine vollständige Abdeckung der Prozesskette (vertikale Prozesskette) zum Ziel gesetzt hat, siehe Abbildung 1.

### 2.3 ERGEBNISSE

Innerhalb kurzer Zeit, d.h. bereits bei der 1. Iteration, konnten die bei der ArianeGroup etablierten Prozesse für die im Projekt geforderte SiC<sub>f</sub>/SiC-Werkstoffstruktur mit der 0°/90°-Faserorientierung sowie der BN-Beschichtung angepasst und so erfolgreich ein SiC<sub>f</sub>/SiC-Werkstoff hergestellt werden. Darüber hinaus konnte sich die ArianeGroup dadurch mit der neuartigen SiC<sub>f</sub>/SiC-Herstellroute ein Alleinstellungsmerkmal erarbeiten.

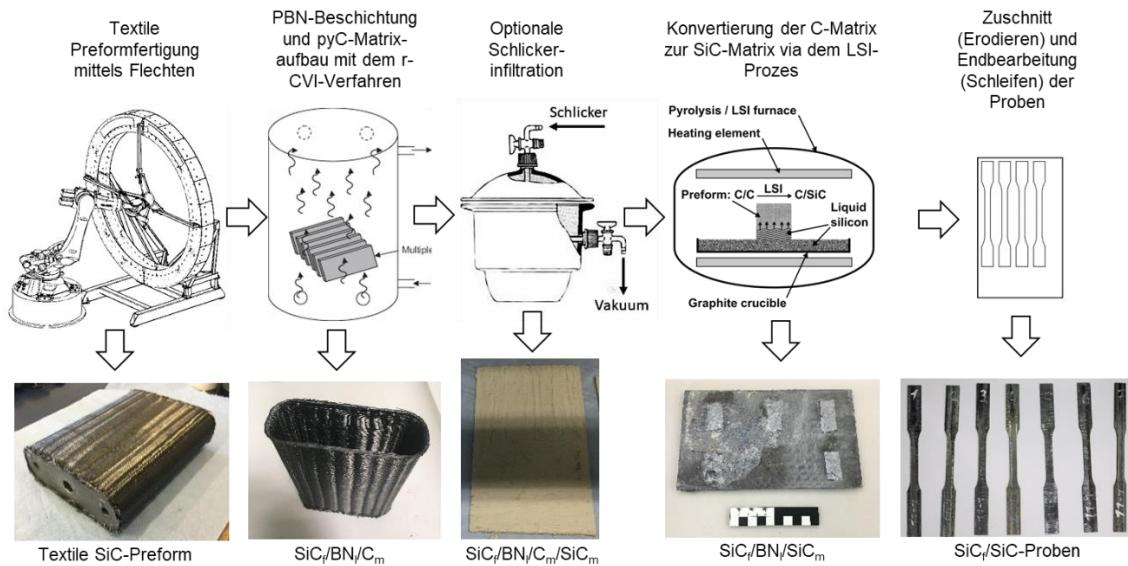


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Prozesskette zur Fertigung von SiC/SiC-Zugproben (oben) sowie photographische Aufnahmen des Probenmaterialzustands nach jedem angewandten Prozessschritt (unten).

Zudem weist die Prozesskette einen sehr hohen Automatisierungsgrad auf und wird vollständig, d.h. von der Faserbeschichtung bis hin zur SiC/SiC-Fertigung auf Komponentenebene, von der ArianeGroup mit CVT als Kooperationspartner abgedeckt. Dies erleichtert eine spätere Qualifikation des Werkstoffes und der Prozesse für eine mögliche Anwendung in der Luft- und Raumfahrtindustrie.

Insgesamt wurden vier Iterationen zur Einstellung der Werkstoffeigenschaften durchgeführt. In Iteration 2 und 3 konnten die Werkstoffkennwerte sukzessive verbessert werden. Als problematisch zeigten sich ungefüllte, teils große Poren im Werkstoff, welche eine weitere Steigerung der Festigkeitswerte verhinderten (siehe Abbildung 2). Trotz aufwendiger Analytik und der daraus abgeleiteten unterschiedlichen Ansätze zur Prozess- und Werkstoffoptimierung konnten die Poren nicht gefüllt werden, sodass die geforderten Werkstoffkennwerte innerhalb des Zuwendungszeitraums nicht erzielt werden konnten.

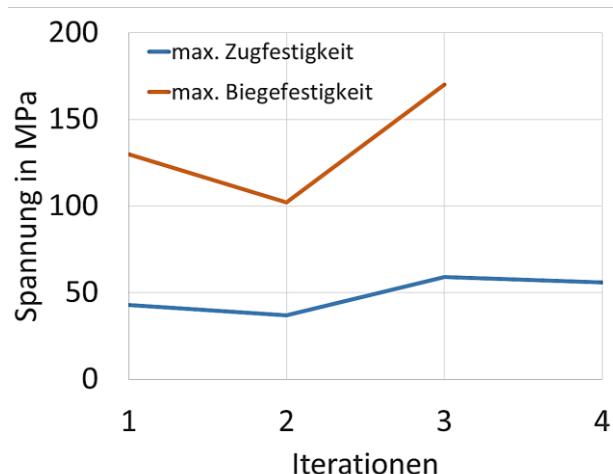


Abbildung 2: Erreichte Zug- und Biegefesterkeiten (4-Punkt-Biegerversuch) mit den Iteration 1 bis 4.



TurbAn

SB-1100-01B\_p

Issue: 1

Date: 27.07.2023

Internal ref.:

Class: 2

Category: 3

### CMC-Optimierung für Turbinenanwendungen

**CMC TurbAn**

**Sachbericht zum Verwendungsnachweis Teil II**

<b>CMC-TurbAn</b>	<b>DISTRIBUTION LIST</b>			Programme Document Reference TurbAn-SB-1100-01B_p Issue 1	Page 2
<b>PROJECT INTERNAL</b>					
NAMES	ACRONYM	COPIES		PURPOSE	
		pdf	CD	PAPER	APPROV.
J. Alting P. Hofbauer S. Schmidt-Wimmer S. Soller	AGG AGG AGG AGG	1 1 1 1			X X
<b>EXTERNAL</b>					
NAMES	AUTHORITY ACRONYM	COPIES		PURPOSE	
		PDF	CD	PAPER	APPROV.
U. Mohr N.N.	PTJ TIB Hannover	X X			X

<b>Internal reference :</b>		<b>Issue</b>		<b>Date :</b> 27.07.2023
<b>Structured reference :</b>	TurbAn-SB-1100-01B_p			<b>Page</b> 3/19

<b>CLASSIFICATION</b>	<b>COMPANY</b>	<b>MILITARY</b>		<b>PROGRAMME</b>	
	ArianeGroup unprotected <input checked="" type="checkbox"/>	Unclassified <input checked="" type="checkbox"/>	(NP) <input checked="" type="checkbox"/>	General Public (1) <input checked="" type="checkbox"/>	
	ArianeGroup Reserved <input type="checkbox"/>	Confidential <input type="checkbox"/>	(CD) <input type="checkbox"/>	Industry (2) <input type="checkbox"/>	
	ArianeGroup Confidential <input type="checkbox"/>	Secret <input type="checkbox"/>	(SD) <input type="checkbox"/>	Limited distribution (3) <input type="checkbox"/>	
	ArianeGroup Secret <input type="checkbox"/>	Top Secret <input type="checkbox"/>	N/A <input type="checkbox"/>	Confidential (4) <input type="checkbox"/>	
French National (SF) <input type="checkbox"/>					
<b>CONTRACT</b>	<b>Customer</b> PTJ	<b>Contract number</b> 03XP0189C		<b>Programme</b> CMC-TurbAn	
	<b>Contractual document</b>	C.Work Unit	Item	Sub-item	<b>CWS</b>
	yes <input checked="" type="checkbox"/> no <input type="checkbox"/>				<b>WP</b> 1100

**TITLE** CMC-Optimierung für Turbinenanwendungen  
Sachbericht zum Verwendungsnachweis Teil II

## ABSTRACT

Im Rahmen des Vorhabens CMC TurbAn untersuchte ArianeGroup die Prozesskette zur Herstellung eines SiC/SiC Faserverbundwerkstoffes. Dies gesamte Prozesskette wurde untersucht: Textile Preformfertigung mittels Flechten, PBN-Beschichtung und pyC-Matrix-Aufbau mittels r-CVI-Verfahren, Schlicker-Infiltration, Konvertierung der C-Matrix zur SiC-Matrix im LSI-Prozess. Insgesamt wurden anhand von vier Iterationen die Einfluss verschiedener Prozessparameter auf die Werkstoffeigenschaften untersucht.

The project TurbAn investigated the process chain for manufacturing of SiC/SiC CMCs: textile manufacturing of preforms, PBN-coating and pyC-coating of fibres with r-CVI process, slurry infiltration, pyrolysis in LSI process. Four subsequent iterations of sampling investigated the effect of different process parameters on material properties.

**KEYWORDS** CMC TurbAn / Sachbericht Teil 2 / Final report part 2 CMC Optimierung für Turbinen

<b>File ref. :</b>	<b>Configuration management</b>		<b>Distribution category</b>	
<b>Software :</b> MS Word			<b>Interest</b>	Short term <input type="checkbox"/>
<b>Language code :</b> GER	None <input checked="" type="checkbox"/>		Medium or long term <input type="checkbox"/>	
<b>Taking precedence :</b> n/a	Internal <input type="checkbox"/>			
figures 10	Customer <input type="checkbox"/>		<b>Sup. distribution</b>	Authorized <input type="checkbox"/> Checked <input type="checkbox"/>

	<b>Author</b>	<b>Validated by</b>
Name	P. Hofbauer (JTLX)	S. Soller (JLFE)
Role	Technical Lead, Materials & Processes	Project Lead, Future Propulsion

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>5</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>5</b>
<b>1 REFERENZEN.....</b>	<b>6</b>
1.1 ANWENDBARE DOKUMENTE.....	6
1.2 REFERENZDOKUMENTE .....	6
<b>2 AUFGABENSTELLUNG .....</b>	<b>6</b>
<b>3 ABLAUF DES VORHABENS.....</b>	<b>8</b>
3.1 GEPLANTE VORGEHENSWEISE.....	8
3.2 FERTIGUNG UND CHARAKTERISIERUNG DES ERSTEN PROBENSATZES (1. ITERATION) .....	9
3.3 FERTIGUNG UND CHARAKTERISIERUNG DER PROBENSÄTZE AUS ITERATION 2 BIS 4 .....	13
<b>4 ERGEBNISSE .....</b>	<b>16</b>

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Inhalte und Meilensteine des Hauptarbeitspakets 2 .....	7
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Prozesskette zur Fertigung von SiC/SiC-Zugproben (oberer Bildbereich) sowie photographische Aufnahmen des Probenmaterialzustands nach jedem angewandten Prozessschritt (unterer Bildbereich). .....	8
Abbildung 3: PBN-Faserbeschichtung sowie die pyC-I- und pyC-II-Schichten zum Matrixaufbau. – Die lichtmikroskopische Aufnahme wurde mit einem Polarisationsfilter erstellt. Dadurch werden die orientierte pyC-I-Schicht (mit circularer Orientierung um die Faser) sowie die nicht-orientierte pyC-II-Schicht mit unterschiedlicher Helligkeit dargestellt. ....	10
Abbildung 4: Lichtmikroskopische Aufnahme einer SiCf/SiC-Probe. – Die pyC-I-Schicht ist größtenteils noch vorhanden, die pyC-II-Schicht wurde teilweise umgesetzt. Im Bild rechts unten sind bereits SiC-Fasern zu erkennen, die vom Silicium angegriffen wurden und sich eine feinkristalline Struktur gebildet hat. ....	12
Abbildung 5: Zugfestigkeit (linker Graph) und Biegefestigkeit (rechter Graph) von SiC <sub>f</sub> /SiC-Proben aus der 1. Iteration. ....	13
Abbildung 6: Lichtmikroskopische Schliffbildanalyse einer SiC <sub>f</sub> /SiC-Probe. – Vereinzelte große Poren, hohe Porosität innerhalb des Fasergarns sowie Siliciumanhäufungen. ....	13
Abbildung 7: Zugfestigkeit von SiC/SiC-Proben aus der 3. Iteration. ....	14
Abbildung 8: Biegefestigkeit (4-Punkt-Biegeversuch) von SiC/SiC-Proben aus der 3. Iteration. ....	15
Abbildung 9: Erreichte Zug- und Biegefestigkeiten (4-Punkt-Biegerversuch) mit den Iteration 1 bis 4. ....	16
Abbildung 10: Computertomographische Aufnahmen von Zugproben aus der 4. Iteration. ....	17

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Vergleich Soll- und Istwerte des SiC <sub>f</sub> /SiC-Werkstoffs. ....	17
--	----

## 1 REFERENZEN

### 1.1 ANWENDBARE DOKUMENTE

- [AD 1] Zuwendungsantrag "HomAS-TurbAN,  
Zuwendungsantrag, ArianeGroup GmbH, 31.07.2018
- [AD 2] Zuwendungsbescheid; Zuwendung aus dem Bundeshaushalt, Einzelplan 30, Kapitel 3004, Titel 68326, Haushaltsjahr 2018, für das Vorhaben „CMC-TurbAN – CMC Optimierung für Turbinenanwendungen“, 15.11.2018, Förderkennzeichen 03XP0189C
- [AD 3] Änderungsbescheid; Zuwendung aus dem Bundeshaushalt, Einzelplan 30, Kapitel 3004, Titel 68326, Haushaltsjahr 2018, für das Vorhaben „CMC-TurbAN – CMC Optimierung für Turbinenanwendungen“, 17.11.2021, Förderkennzeichen 03XP0189C
- [AD 4] Änderungsbescheid; Zuwendung aus dem Bundeshaushalt, Einzelplan 30, Kapitel 3004, Titel 68326, Haushaltsjahr 2018, für das Vorhaben „CMC-TurbAN – CMC Optimierung für Turbinenanwendungen“, 06.01.2022, Förderkennzeichen 03XP0189C
- [AD 5] Änderungsbescheid; Zuwendung aus dem Bundeshaushalt, Einzelplan 30, Kapitel 3004, Titel 68326, Haushaltsjahr 2018, für das Vorhaben „CMC-TurbAN – CMC Optimierung für Turbinenanwendungen“, 11.02.2022, Förderkennzeichen 03XP0189C
- [AD 6] Änderungsbescheid; Zuwendung aus dem Bundeshaushalt, Einzelplan 30, Kapitel 3004, Titel 68326, Haushaltsjahr 2018, für das Vorhaben „CMC-TurbAN – CMC Optimierung für Turbinenanwendungen“, 09.11.2022, Förderkennzeichen 03XP0189C

### 1.2 REFERENZDOKUMENTE

- [RD1] Zwischenbericht "HomAS-TurbAN #01, ArianeGroup GmbH, 02.07.2020
- [RD2] Zwischenbericht "HomAS-TurbAN #02, ArianeGroup GmbH, 15.05.2021
- [RD3] Zwischenbericht "HomAS-TurbAN #03, ArianeGroup GmbH, 19.05.2022

## 2 AUFGABENSTELLUNG

Das Vorhaben „CMC-Optimierung für Turbinenanwendungen“ (CMC-TurbAN) ist in der Gesamtvorhabenbeschreibung [AD 1] dargestellt und erstreckte sich gemäß Zuwendungsbescheid über den Bewilligungszeitraum vom 01.12.2018 bis 30.11.2021 [AD 2]. Durch die Corona-Pandemie kam es zu Verzögerungen, die eine Verlängerung des Zuwendungszeitraums bis zum 30.11.2022 erforderlich machten [AD 3].

Gesamtziel des Vorhabens war die Untersuchung und Entwicklung von CMC-Materialien für deren Einsatz als Hochtemperaturwerkstoff in Gasturbinen.

Im Rahmen des Hauptarbeitspaketes (HAP) 2, „SiC-basierte Materialien“, sollte die ArianeGroup eine produkt-spezifische Materialentwicklung betreiben, die aus einer Adaption von etablierten internen und externen Fertigungsprozessen auf die im Projekt geforderte SiC/SiC (siliciumfaserverstärktes Siliciumcarbid)-Werkstoffklasse bestand.

Das HAP 2 wurde in zwei Arbeitspakete (AP) unterteilt: Das AP 2.1 umfasst die Herstellung von Probensätzen, die im Projekt „Iterationen“ genannt wurden. Diese Probensätze wurden von mehreren Projektpartnern parallel hergestellt. Nach der Charakterisierung und Evaluierung der in HAP 2 gefertigten Probensätze wurde der Kandidat, der den SiC/SiC-Werkstoff mit den vielversprechendsten Materialeigenschaften entwickelt hat, für die Fertigung eines Demonstratorbauteils ausgewählt. Die Demonstratorfertigung erfolgte im Rahmen von AP 2.2 die (siehe Abbildung 1). Die übrigen, für die Demonstratorfertigung nicht ausgewählten Kandidaten, konnten ihren Werkstoff im Rahmen von AP 2.1 mit weiteren Iterationen optimieren.

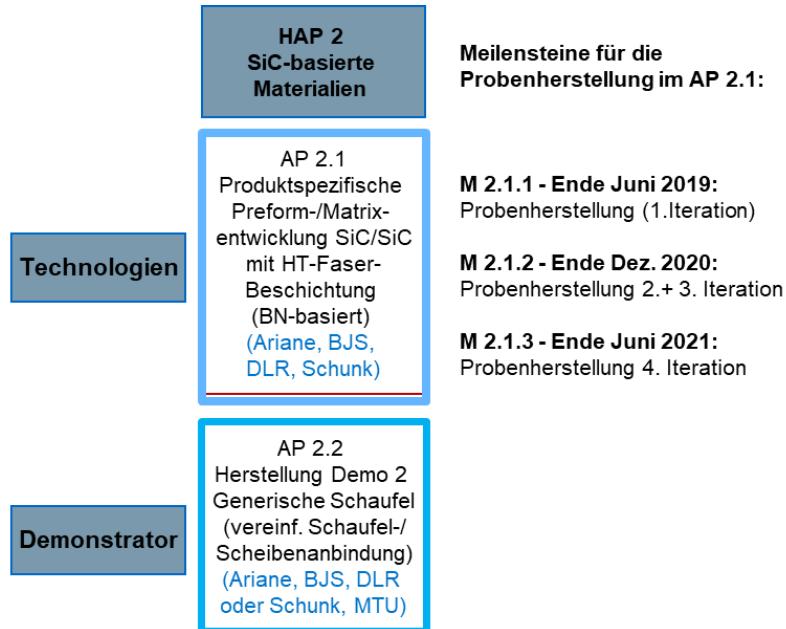


Abbildung 1: Inhalte und Meilensteine des Hauptarbeitspakets 2

Neben der werkstofflichen Zuordnung zum HAP 2 erfolgte auch eine inhaltliche und zeitliche Meilensteinplanung (siehe Abbildung 1). Diese bestand zunächst aus der Lieferung eines ersten testfähigen Probensatzes sowie zwei weiteren testfähigen Probensätzen aus Iteration 2 und 3. Die Proben aus Iteration 3 sollten mindestens 66% von den folgenden, im Förderprojekt angestrebten Werkstoffkennwerten erzielen:

- Biegefestigkeit > 300 MPa,
- Zugfestigkeit > 250 MPa,
- Proportional Limit Stress PPL > 150 MPa,
- Gesamtdehnung bei Bruch (Raumtemperatur) > 0,5 %,
- Porosität < 5%,
- zulässiger Abfall der Kennwerte < 30% nach Auslagerung bei 1200°C.

Für die nicht zur Demonstratorfertigung ausgewählten Partner wurde ein dritter Meilenstein als Liefertermin für den Probensatz aus Iteration 4 festgesetzt.

### 3 ABLAUF DES VORHABENS

#### 3.1 GEPLANTE VORGEHENSWEISE

Bereits bei der Antragsstellung wurde von der ArianeGroup eine neuartige Prozesskette zur Fertigung eines SiC/SiC-Werkstoffes aufgestellt. Diese erfüllte zum einen die Vorgaben von der MTU als Konsortialführer, nämlich die Verwendung der SiC Faser „Hi Nicalon Type S“ SiC von NGS, einer Faserbeschichtung mit Bor-nitrid (BN) sowie einer Ausrichtung der Fasern zu gleichen Teilen in 0°- und 90°-Richtung. Zum anderen wurde die Prozesskette auch den Ansprüchen der ArianeGroup gerecht, die sich einen sehr hohen Automatisierungsgrad sowie eine vollständige Abdeckung der Prozesskette (vertikale Prozesskette) zum Ziel gesetzt hat, siehe Abbildung 2.

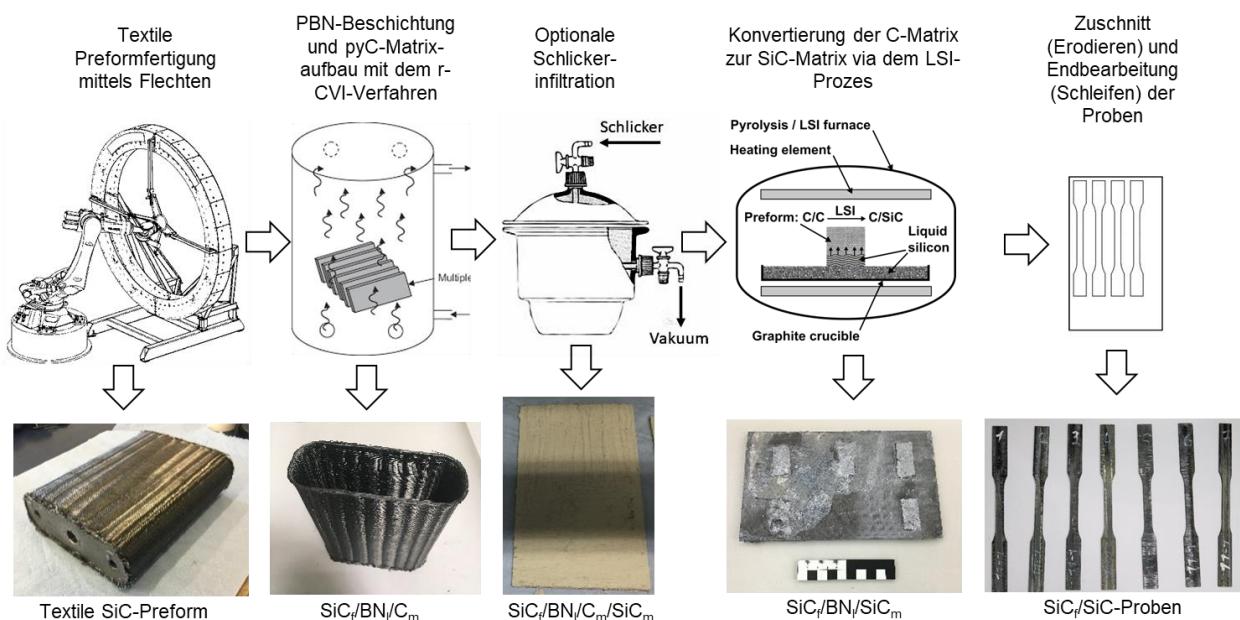


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Prozesskette zur Fertigung von SiC/SiC-Zugproben (oberer Bildbereich) sowie photographische Aufnahmen des Probenmaterialzustands nach jedem angewandten Prozessschritt (unterer Bildbereich).

Durch die eigenständige Herstellung der Faserarchitektur, der Faserbeschichtung sowie der Fertigung des Werkstoffes auf Komponentenebene, hob sich die ArianeGroup von den anderen Konsortialpartnern ab. Allerdings barg der neuartige Ansatz auch Risiken, die jedoch in dem für derartige Förderprojekte üblichen Maß eingeschätzt wurden.

Als risikoreiche Prozessschritte wurden vor allem die Verarbeitung der SiC-Faser mittels Flechten aufgrund deren hohen Biegesteifigkeit im Vergleich zur üblicherweise verwendeten Kohlenstofffaser sowie die Faserbeschichtung mit BN und der Kohlenstoff (C)-Matrixaufbau über den CVI (Chemical Vapor Infiltration) eingestuft. Letzteres, die BN-Beschichtung und der C-Matrixaufbau, wurden in enger Abstimmung von mit dem Unternehmen CVT durchgeführt, welche über einen Kooperationsvertrag auch bei der Herstellung anderer Werkstoffklassen in den Prozessen bei der ArianeGroup mit eingebunden ist. Die Herausforderungen beim

CVI-Prozess lagen zum einen darin, dass bislang nur hochorientierter, reaktionsträger pyrolytischer Kohlenstoff in der porösen textilen Preform abgeschieden wurde. Für die Konvertierung von C mit Silicium (Si) während der Flüssigphasensilicierung wird allerdings ein reaktionsfreudiger amorpher Kohlenstoff benötigt. Zum anderen lagen für die BN-Beschichtung bislang nur wenige Erfahrungswerte vor.

### 3.2 FERTIGUNG UND CHARAKTERISIERUNG DES ERSTEN PROBENSATZES (1. ITERATION)

Zur Fertigung eines ersten Probensatzes aus dem zu entwickelnden SiC/SiC-Werkstoffs wurden zunächst textile Preformen aus Kohlenstofffasern mit einer Radialflechtmaschine gefertigt. Dadurch konnten zum einen mögliche Probleme bei der Verarbeitung der steiferen SiC-Faser mittels Flechten vermieden und zum anderen Kosten eingespart werden. Anschließend wurden die Preformen aus Kohlenstofffasern zur Anpassung der Prozessparameter für den CVI-Prozess verwendet. Ziel der Parameteroptimierung war das Erreichen einer homogenen BN-Schichtdickenverteilung auf den Faseroberflächen aller einzelnen Faserfilamente innerhalb eines Garns (Rovings) sowie eine homogene Schichtdickenverteilung über die Wandstärke der Preform (siehe Preformgeoemtrie, dargestellt links unten in Abbildung 2 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Darüber hinaus sollte durch Anpassung der Prozessparameter der anschließende Aufbau des Kohlenstoffs auf der BN-Schicht amorph erfolgen, um diesen innerhalb kurzer Zeit mit schmelzflüssigem Si zu SiC umsetzen zu können. Die kurzen Umsetzungszeiten sind erforderlich, um eine temperatur- und zeitabhängige Faserdegradation der SiC-Faser zu minimieren. Zudem musste herausgefunden werden, wie weit die textile Faserarchitektur durch die C-Infiltration nachverdichtet werden muss, um diese dadurch für die Weiterverarbeitung ausreichend zu stabilisieren. Ebenso musste der Schlicker an die Faserarchitektur angepasst werden. Dieser sollte die großen Zwischenräume, welche durch das 0°/90° Triaxialgeflecht (Stehfäden in 0°-Richtung, Flechtfäden in nahezu 90°-Richtung) und den Ondulationen (Krümmung der Fasern an den Kreuzungspunkten des Geflechts), mit Feststoffpartikeln (Si, C, SiC) auffüllen, um bei der nachfolgenden Silicierung eine gute Faser-Matrix-Anbindung zu gewährleisten. Die Charakterisierung der im Vorfeld hergestellten aus Kohlenstofffasern hergestellten Preformen erfolgte zum einen durch lichtmikroskopische Untersuchungen von Schliffproben auf Mesoebene (Porosität, Phasenzusammensetzung, etc.) sowie mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) zur Analyse der BN-Schichtdickenverteilung und zur Bestimmung des Orientierungsgrads des über die Gasphase abgeschiedenen Kohlenstoffs. Nach zufriedenstellenden Ergebnissen aus den Vorversuchen wurden die gefundenen Prozessparameter zur Fertigung eines ersten Probensatzes (1. Iteration) aus SiC/SiC angewandt (siehe unterer Bildbereich in Abbildung 2).

#### Flechtprozess zur textilen Preformfertigung:

Zur Fertigung einer textilen Preform mit dem Flechtverfahren wird ein Flecktkern mit darauf befestigten Fasern mit einem Industrieroboter auf einer definierten Bahn und mit einer definierten Geschwindigkeit durch einen Flechtring (auch Flechtauge genannt) geführt. Durch die Umlenkung der Fasern durch den Felchtring und den geringen Abstand zwischen Flechtring und –kern können die Fasern mit sehr flachen Winkel auf dem Flecktkern abgelegt werden. Dadurch wird ein unerwünschtes Abheben des Geflechtes vom Flecktkern vermieden bzw. minimiert. Das Zuführen der Fasern erfolgt von Flechtfadenspulen, die in der Flechtmaschine auf Klöppeln transportiert werden. Die Klöppel bewegen sich gegenläufig auf einer sinusförmigen Kurvenbahn entlang

des Flechtrades. Diese Bewegung führt zu einer Überkreuzung der einzelnen Flechtfäden, wodurch ein homogenes, biaxiales Flechtmuster auf den Kern abgelegt werden kann. Zur Herstellung der SiC<sub>f</sub>/SiC-Preformen wurde die Radialflechtanlage um eine Zuführung von sogenannten Stehfäden (Fasern) erweitert. Damit können Stehfäden vom äußeren Rand der Flechtmaschine zugeführt geführt werden die entlang der Längsachse (0°) des Bauteils verlaufen. Mit den Fasern in axialer Richtung (Stehfäden) sowie durch die nahezu senkrecht zur Bauteilachse abgelegten Flechtfäden (90°) entsteht so die geforderte 0°/90°-Faserorientierung. Die Anzahl der Stehfäden und der verwendeten Klöppeln sowie die Fachung der Fäden, d.h. ob die Fasern einzeln oder z.B. doppelt aufgespult und abgelegt werden, bestimmen den Faservolumengehalt der Preform. Als Fleckkerne wurden Kerne aus Grafit gefertigt, die für den nächsten Prozessschritt (r-CVI-Prozess) aufgrund ihrer Temperaturbeständigkeit und ihres Längenausdehnungskoeffizientens in der Preform verbleiben können. Neben der Anpassung der Flechtanlage wurden zudem die Fleckparameter zur Verarbeitung von SiC-Fasern weiter optimiert. So wurden neben der Anpassung der Fleckgeschwindigkeit auch die Zugfedern getauscht, um die Zugkraft der Fadenspannung an die SiC-Faser anzupassen.

#### PBN- und pyC-Faserbeschichtung mittels r-CVI:

Die Beschichtung der SiC-Fasern erfolgte nach dem Fleckprozess. Hierbei wurden die Fasern des Geflechts sowohl mit pyrolytischem Bornitrit (PBN) als auch mit pyrolytischem Kohlentstoff (pyC) als Kohlenstoffspender für den Matrixaufbau mittels r-CVI beschichtet. Der angewandte r (engl. rapid, r)-CVI-Prozess arbeitet im Gegensatz zum klassischen CVI-Prozess mit höheren Gasgeschwindigkeiten sowie höheren Drücken und Temperaturen und wurde von der CVT GmbH im Unterauftrag durchgeführt. Da die Gasphaseninfiltration von der Geometrie der Preform abhängig ist (z.B. von den Ondulationen im Geflecht), mussten die Prozessparameter (Temperatur, Druck, Gasgeschwindigkeit, Gaszusammensetzung, etc.) für die SiC-Faser weiter optimiert werden. Bereits in der 1. Iteration konnte ein Multischichtsystem aufgebaut werden, bestehend aus (von der Faseroberfläche ausgehend):

- einer homogenen PBN-Schicht,
- einer zirkular orientierten pyC-Schicht (pyC-I), um die PBN-Schicht vor dem Angriff mit Silicium während der Flüssigphasensilicierung zu schützen, sowie
- aus einer nicht-orientierte pyC-Schicht (pyC-II), die von dem schmelzflüssigen Silicium zur SiC-Matrix um-gesetzt werden kann.

Abbildung 3 zeigt diese verschiedenen Schichten in einer lichtmikroskopischen Aufnahme.

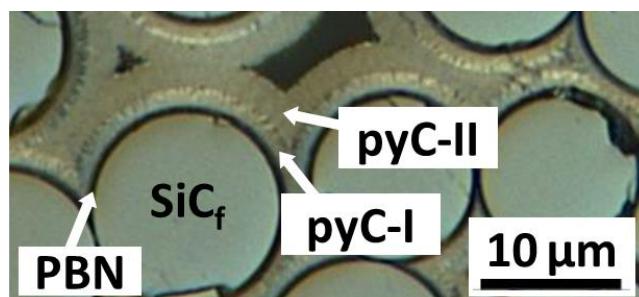


Abbildung 3: PBN-Faserbeschichtung sowie die pyC-I- und pyC-II-Schichten zum Matrixaufbau. – Die lichtmikroskopische Aufnahme wurde mit einem Polarisationsfilter erstellt. Dadurch werden die orientierte pyC-I-Schicht (mit circularer Orientierung um die Faser) sowie die nicht-orientierte pyC-II-Schicht mit unterschiedlicher Helligkeit dargestellt.

### Schlickerinfiltation zur Füllung großer Poren:

Zur Vermeidung von Siliciumanhäufungen nach der Flüssigphasensilicierung sowie zur Sicherstellung einer ausreichenden Faser-Matrix- und interlaminaren Anbindung wurde ein SiC-Schlicker entwickelt, der die nach dem r-CVI-Prozess noch vorhandenen offenen, großen Poren mit SiC-Partikeln füllt. Hierzu wurden die zu infiltrierenden Platten in einem Exsikkator evakuiert und anschließend unter Vakuum mit Schlicker infiltriert. Nach der Infiltration wurden die vollständig mit Schlicker bedeckten Platten wieder mit Normaldruck beaufschlagt, sodass der Schlicker in die offenen Poren gelangen konnte, ohne dass Gaseinschlüsse einer Infiltration entgegenwirkten.

### Flüssigphasensilicierung

Üblicherweise wird für die Flüssigphasensilicierung eine Matrix aus reaktiven Kohlenstoff erzeugt, der über ein offenes Poresystem für das schmelzflüssige Silicium zugänglich ist und mit dem Silicium zu Siliciumcarbid reagieren kann. Die Reaktion von  $C + Si \rightarrow SiC$  ist eine stark exotherme Reaktion, bei der lokale Temperaturhöhungen während der reaktiven Infiltration von bis zu 600 °C möglich sind. Da Silicium erst bei ca. 1413 °C schmilzt, ergeben sich bei der Flüssigphasensilicierung Absoluttemperaturen von über 2000 °C. Diese hohen Temperaturen führen jedoch zu einer Degradation der SiC-Faser und somit zu Festigkeitsverlusten. Um diesen Nachteil auszugleichen, wurde ein neuer Ansatz zur Herstellung von SiC<sub>f</sub>/SiC-Materialen über den LSI-Prozess verfolgt. Dieser besteht darin, anstelle des reaktiven Kohlenstoffs (auch amorpher Kohlenstoff genannt, also ohne kristalliner Struktur) einen pyrolytischen Kohlenstoff für die Reaktion mit Silicium zu verwenden. Anders als der amorphe Kohlenstoff weist der pyrolytische Kohlenstoff (auch Pyrokohlenstoff, pyC) eine turbostratische Mikrostruktur, d.h. parallel ausgerichtete Graphenebenen auf. Senkrecht zu diesen Graphenebenen lässt sich der Kohlenstoff nur mit sehr langen Reaktionszeiten mit Si zu SiC umsetzen, da das Silicium nur über Volumendiffusion durch die Graphenebenen ins Innere gelangt. Aus diesem Grund wurde auf der PBN-Schicht zunächst eine pyC-I-Schicht aufgebracht, deren Graphenebenen zirkular um die Faser, also nahezu parallel zur Faseroberfläche, angeordnet sind. Sie schützt somit die PBN-Schicht vor einem Angriff mit Silicium. Bei der pyC-II-Schicht verlaufen die Graphenebenen hingegen senkrecht zur Faseroberfläche, sodass ein Angriff infolge der Korngrenzendiffusion des Siliciums zwischen den Graphenebenen und somit eine schnellere Umsetzung dieser Schicht zu SiC möglich ist (siehe Abbildung 3). Hierbei sind die Reaktionszeiten immer noch deutlich höher als bei der Reaktion mit amorphen Silicium. Dies führt dazu, dass dem Werkstoff mehr Zeit zur Ableitung der exothermen Reaktionswärme zur Verfügung steht und somit die Absoluttemperaturen signifikant verringert werden können. Neben den Reaktionszeiten beeinflussen zudem die Schichtdicken der pyC-I- und pyC-II-Schicht die SiC-Phase, da eine freie Kohlenstoffphase aufgrund der Anwendung des refraktiven Werkstoffs in oxidischer Atmosphäre vermieden werden soll. Die Reaktionszeiten und Schichtdicken sind deshalb so zu wählen, dass zwar der gesamte Pyrokohlenstoff zu SiC umgesetzt wird, jedoch die PBN-Schicht und die Fasern vom Silicium nicht angegriffen werden. Hierbei wurden Versuchsreihen mit unterschiedlichen Reaktionszeiten und Schichtdicken durchgeführt, um die optimalen Prozessbedingungen zu identifizieren. Abbildung 4 zeigt eine lichtmikroskopische Aufnahme einer Materialprobe, bei der die Umsetzung der pyC-II-Schicht zwar teilweise gelang, jedoch bereits SiC-Fasern vom Silicium angegriffen wurden.

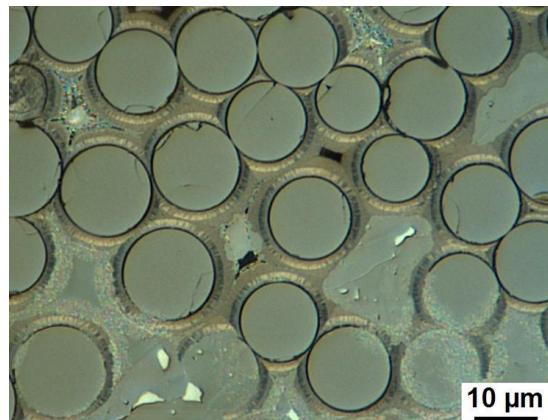


Abbildung 4: Lichtmikroskopische Aufnahme einer SiCf/SiC-Probe. – Die pyC-I-Schicht ist größtenteils noch vorhanden, die pyC-II-Schicht wurde teilweise umgesetzt. Im Bild rechts unten sind bereits SiC-Fasern zu erkennen, die vom Silicium angegriffen wurden und sich eine feinkristalline Struktur gebildet hat.

#### Probenzuschnitt:

Der Probenzuschnitt (durch Drahterodieren) aus den Platten wurde, wie für die nachfolgenden Iterationen auch, von der Firma Prüfstandtechnik und Musterbau Fischer im Unterauftrag durchgeführt. Nach dem Zuschnitt der unterschiedlichen Proben (Zug- und Biegeproben, Dichteproben, etc.) wurden diese durch Schleifen auf das Fertigmaß mit ca. 0,2 mm Aufmaß gefertigt und anschließend ans Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK) geschickt. Das IPK hat im letzten Bearbeitungsschritt alle SiC<sub>f</sub>/SiC-Proben der Verbundpartner auf Fertigmaß durch Schleifen endbearbeitet, um vergleichbare Testergebnisse zu gewährleisten.

#### Charakterisierung der Werkstoffeigenschaften:

Zur Charakterisierung wurde der Probensatz aus der 1. Iteration ans Fraunhofer IPK zur Endbearbeitung geliefert, die nach erfolgter Probenpräparation am Fraunhofer-Zentrum für Hochtemperatur-Leichtbau (HTL) getestet wurden. Es wurden lediglich Zug- und Biegeversuche durchgeführt, da diese Festigkeitswerte aus Sicht der Materialentwicklung die kritischen Werte darstellen und zur Bewertung zunächst ausreichten (siehe Abbildung 5).

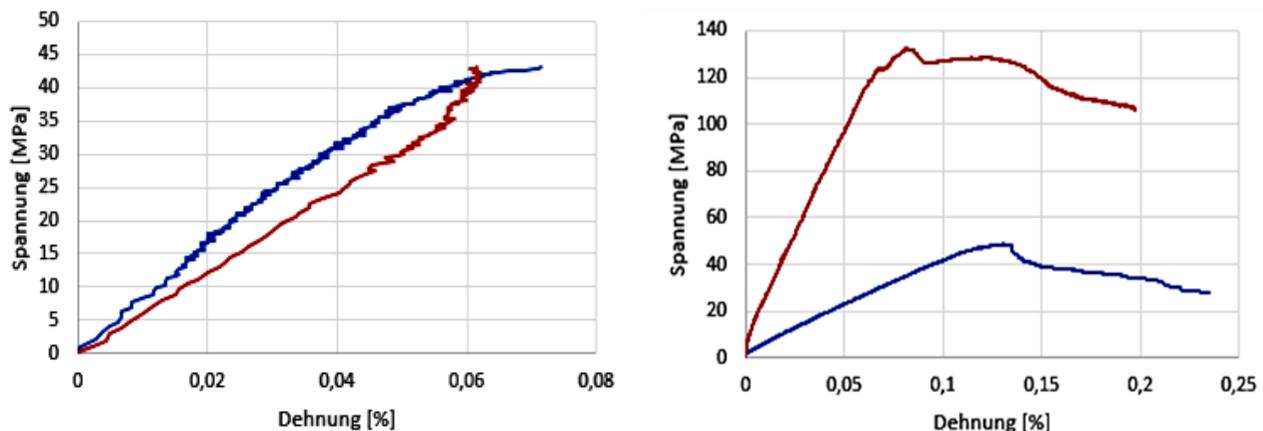


Abbildung 5: Zugfestigkeit (linker Graph) und Biegefestigkeit (rechter Graph) von SiC<sub>x</sub>/SiC-Proben aus der 1. Iteration.

Wie aus den Kurvenverläufen in Abbildung 5 ersichtlich ist, wurde lediglich eine Zugfestigkeit von 40 MPa und eine max. Biegefestigkeit von bis zu 130 MPa erreicht. Die anschließende Materialanalyse zeigte, dass der Werkstoffe eine hohe Porosität im mikro- und mesoskopischen Bereich aufweist und die Kohlenstoffmatrix nur zu einen geringen Teil zu SiC umgesetzt wurde, was zu den geringen Festigkeitswerten führte. Ebenso waren vereinzelte Siliciumanhäufungen erkennbar, die zu weiteren Festigkeitsverlusten führen (siehe Abbildung 6).

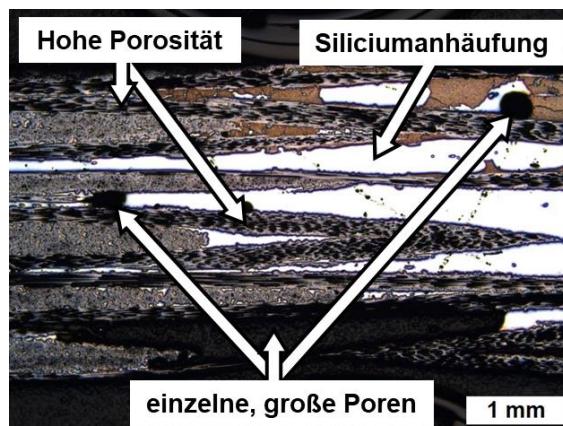


Abbildung 6: Lichtmikroskopische Schliffbildanalyse einer SiC<sub>x</sub>/SiC-Probe. – Vereinzelte große Poren, hohe Porosität innerhalb des Fasergarns sowie Siliciumanhäufungen.

### 3.3 FERTIGUNG UND CHARAKTERISIERUNG DER PROBENSÄTZE AUS ITERATION 2 BIS 4

Basierend auf den Testergebnissen aus Iteration 1 wurden in den Iterationen 2 bis 4 sukzessive versucht, die Prozessparameter dahingehend zu optimieren, dass sowohl die Makroporen mit den beiden Phasen Silicium und Siliciumcarbid gefüllt werden, als auch dass das Mikroporensystem zwischen den Faserfilamenten mit Silicium zur Umsetzung des noch hohen C-Anteils zu SiC infiltriert wird. Hierbei wurde zunächst in Iteration 2 die Schlickinfiltation durch eine Polymerinfiltation ersetzt, da ein Porenverschluss durch den Feststoffanteil des Schlickers vermutet wurde, der die Zugänglichkeit der Poresysteme mit dem schmelzflüssigen Silicium verhindert. Bei dem verwendeten Polymer handelte es sich um ein Polysilazan, das durch die anschließenden

Wärmebehandlungsprozesse zunächst vernetzt und dann pyrolysiert wurde. Bei der Pyrolyse erfolgt eine teilweise Carbonisierung des siliciumhaltigen Polymers, sodass der Kohlenstoff mit dem Silicium zu SiC reagiert. Folglich kann die Pyrolyse durch die Bildung von SiC auch als Keramisierung bezeichnet werden. Da bei dem PIP (Polymer Infiltration and Pyrolysis)-Prozess nach der ersten Infiltration noch eine hohe Restporosität vorliegt, wurde anschließen eine Flüssigphasensilicierung durchgeführt, um die geforderte Restporosität zu erreichen. Da auch dieser Ansatz nicht zu dem gewünschten Ergebnis führte, nämlich zur Vermeidung von Meso- und Makroporen, wurden in Iteration 3 und 4 weitere Kombinationen mit unterschiedlichen Polymeren wie z.B. Phenolharzen sowie die Auswirkungen einer unterschiedlicher Anzahl an Nachinfiltrationen untersucht. Darüber hinaus wurde auch eine weitere Versuchsreihe in Iteration 2 zur Untersuchung des Einflusses der Haltzeit der Maximaltemperatur bei der Flüssigphasensilicierung auf den Umsetzungsgrad des mikroporösen Kohlenstoffs und des pyC zu SiC durchgeführt. Die Ergebnisse hieraus zeigten keine Verbesserung des Füllgrades bzw. einer Reduzierung der Restporosität. Da bei längeren Haltzeiten sowie durch die Erhöhung der Anzahl an Wärmebehandlungsprozessen von einer stärkeren Faserdegradation ausgegangen werden musste, wurden in den Iterationen 2 bis 4 zudem die Parameter des r-CVI-Prozesses angepasst. Hierbei wurde die pyC-II-Schicht (siehe Abbildung 3) sukzessive reduziert, um mögliche Zwickelbildungen die zum Verschluss des Porensystems führen können, zu vermeiden. Diese konnte anhand von licht- und rasterelektronenmikroskopischen Analysen sowie mit computertomographischen Untersuchungen nach dem r-CVI-Prozess identifiziert werden. Dieser Ansatz führte in Iteration 3 zu einer deutlichen Verbesserung der Werkstoffeigenschaften, obwohl das Silicium nicht in die großen, offenbar immer noch isolierten Poren eindringen konnte (siehe Abbildung 7 und Abbildung 8).

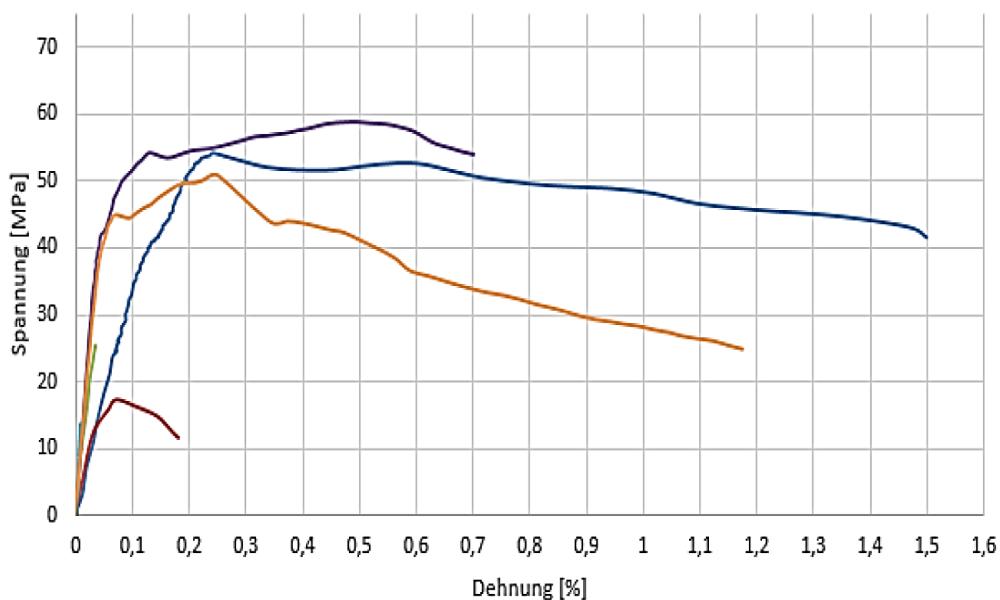


Abbildung 7: Zugfestigkeit von SiC/SiC-Proben aus der 3. Iteration.

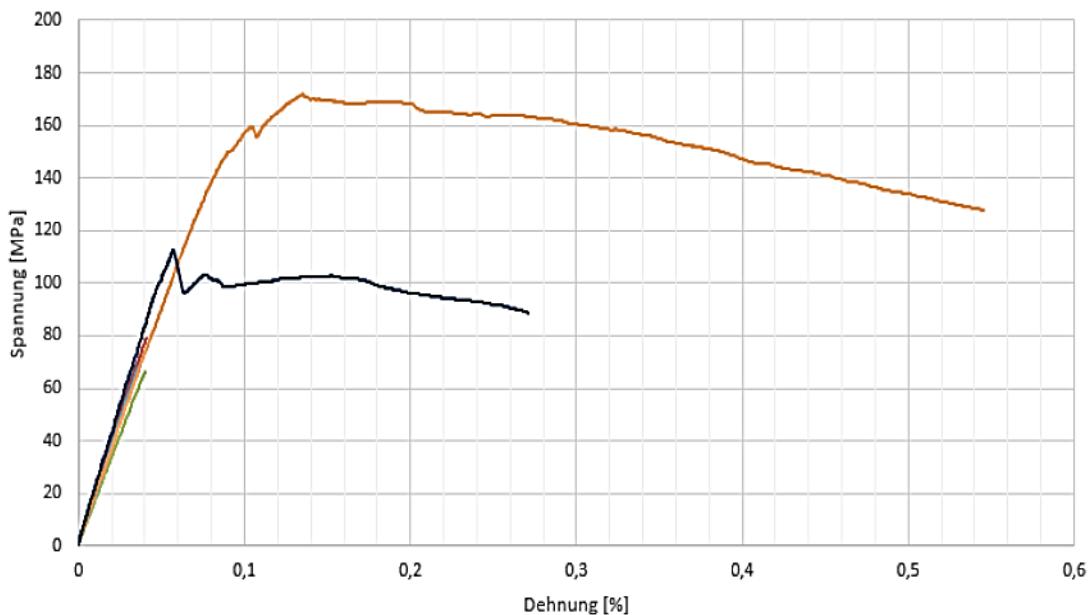


Abbildung 8: Biegefestigkeit (4-Punkt-Biegeversuch) von SiC<sub>x</sub>/SiC-Proben aus der 3. Iteration.

Deshalb wurde bei der vierten Iteration eine weitere Reduktion der Gasphaseninfiltration berücksichtigt. Im Vergleich zur zweiten Iteration (als Referenz mit 100 % Kohlenstoffaufnahme definiert) wurde die über die Gasphase infiltrierte Kohlenstoffmenge in der Iteration 3 um 50% und in der Iteration um 75 % reduziert. Nach der Gasphaseninfiltration mit Kohlenstoff, welche aufgrund der stark reduzierten Kohlenstoffmenge nunmehr nur noch zur Stabilisierung der Faserarchitektur dient und in Bezug auf den Matrixaufbau eine untergeordnete Rolle aufweist, erfolgten die Nachinfiltrationen mit Polysilazan und Phenolharz. Aufgrund eines Defekts am Silicierofen der Arianegroup musste die Silicierung kurzfristig an das Fraunhofer HTL in Bayreuth ausgelagert werden. Allerdings schlug die Silicierung fehl, da unerwünschte Gasphasenreaktionen dafür sorgten, dass die Platten nicht mit Silicium infiltriert werden konnten (siehe Zwischenbericht ZB-1100-01). Aufgrund der fehlgeschlagenen Silicierung bei der vierten Iteration wurde entschieden, die Iteration zu wiederholen. Hierbei wurden die Faserarchitekturen verändert, um durch größere Ondulationen die Zugänglichkeit der Zwischenräume (Poren) zu verbessern. D.h. es wurde eine Preform nach wie vor mit einem Triaxialgeflecht mit nahezu 90°/0° gefertigt, jedoch wurden hierbei 8-fache 0°-Fäden verwendet. Zudem wurde eine Preform mit einem Triaxialgeflecht mit ±75°/0° gefertigt, wobei diese ebenfalls mit dem höheren Anteil an 0°-Fäden (8-fach) hergestellt wurde. Die Testergebnisse zeigten jedoch, dass die untersuchten Faserstrukturvariationen (mehrfach gefächerte Flechtfäden) und der damit verbundenen unterschiedlichen Ondulationen nur geringen Einfluss auf die Festigkeiten haben.

## 4 ERGEBNISSE

Innerhalb kurzer Zeit, d.h. bereits bei der 1. Iteration, konnten die bei der ArianeGroup etablierten Prozesse für die im Projekt geforderte SiC<sub>f</sub>/SiC-Werkstoffstruktur mit der 0°/90°-Faserorientierung sowie der BN-Beschichtung angepasst und so erfolgreich ein SiC<sub>f</sub>/SiC-Werkstoff hergestellt werden. Darüber hinaus konnte sich die ArianeGroup dadurch mit der neuartigen SiC<sub>f</sub>/SiC-Herstellroute ein Alleinstellungsmerkmal erarbeiten. Zudem weist die Prozesskette einen sehr hohen Automatisierungsgrad auf und wird vollständig, d.h. von der Faserbeschichtung bis hin zur SiC<sub>f</sub>/SiC-Fertigung auf Komponentenebene, von der ArianeGroup mit CVT als Kooperationspartner abgedeckt. Dies erleichtert eine spätere Qualifikation des Werkstoffes und der Prozesse für eine mögliche Anwendung in der Luft- und Raumfahrtindustrie.

In Iteration 2 und 3 konnten die Werkstoffkennwerte sukzessive verbessert werden. Als problematisch zeigten sich ungefüllte, teils große Poren im Werkstoff, welche eine weitere Steigerung der Festigkeitswerte verhinderten (siehe Abbildung 9). Trotz aufwendiger Analytik und der daraus abgeleiteten unterschiedlichen Ansätze zur Prozess- und Werkstoffoptimierung (siehe Abschnitt 3.3) konnten die Poren nicht gefüllt werden (siehe Abbildung 10).

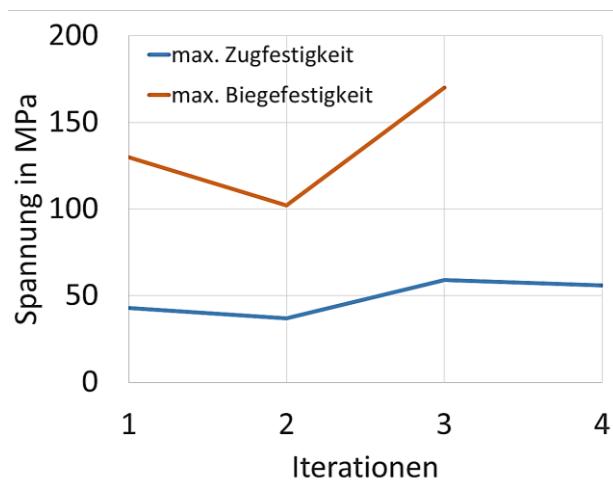


Abbildung 9: Erreichte Zug- und Biegefesterkeiten (4-Punkt-Biegerversuch) mit den Iteration 1 bis 4.

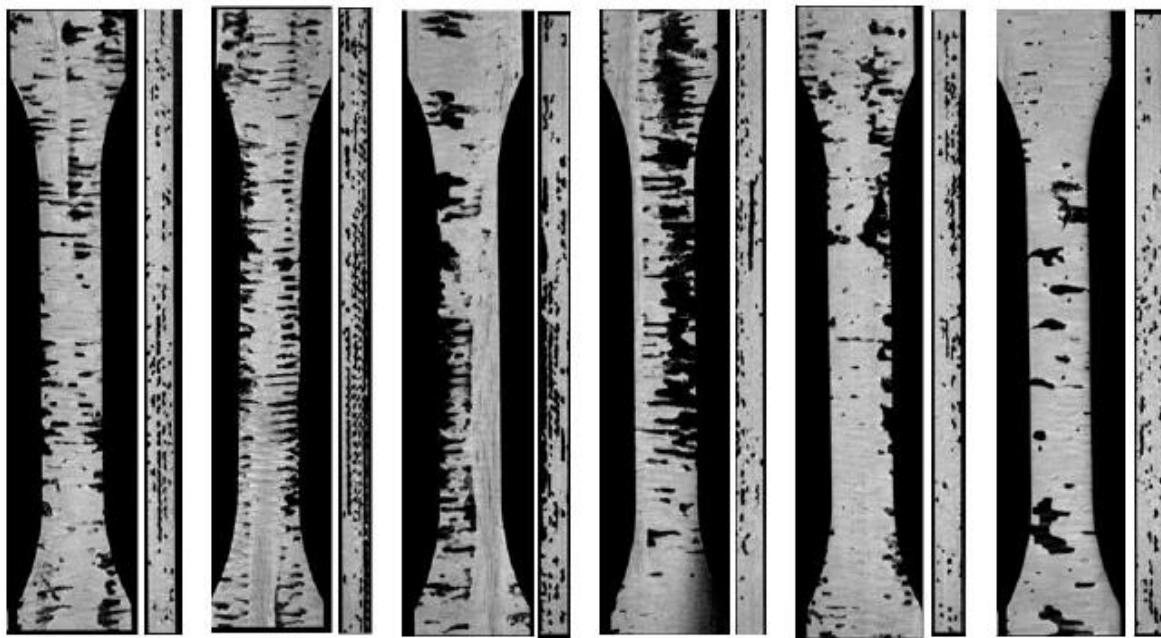


Abbildung 10: Computertomographische Aufnahmen von Zugproben aus der 4. Iteration.

Die Porosität führt dazu, dass die angestrebten Werkstoffkennwerte nur bei der offenen Porosität und der Bruchdehnung erreicht bzw. übertroffen wurden. Die Festigkeitswerte konnten nicht erreicht werden, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Vergleich Soll- und Istwerte des SiC/SiC-Werkstoffs.

	<b>Sollwerte</b>	<b>Istwerte</b>
Porosität	< 5%	1,8 %
Biegefestigkeit	> 300 MPa	172 MPa
Zugfestigkeit	> 250 MPa	55 MPa
PL	> 150 MPa	37 MPa
Bruchdehnung	> 0,5 %	0,55 %