



**Hochschule
Bonn-Rhein-Sieg**
University of Applied Sciences

Fachbereich Elektrotechnik, Maschinenbau und Technikjournalismus



DLR **Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**

Institut für Werkstoffforschung, Abteilung Struktur- und Funktionskeramik

MASTERTHESIS

**Fertigungsstrategie einer Turbinenblisk aus
oxidischer Faserverbundkeramik mittels
Infusionsverfahren unter Berücksichtigung
materialtechnischer Einflussfaktoren**

Vorgelegt von: Jacob Noah Rudat

Mat.Nr.: 9031041

Prüfer: Prof. Dr. Welf Wawers

Zweitprüfer: Prof. Dr. Klaus Wetteborn

21. März 2023

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere an Eides statt, die von mir vorgelegte Arbeit selbstständig verfasst zu haben. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Arbeiten anderer entnommen sind, habe ich als entnommen kenntlich gemacht. Sämtliche Quellen und Hilfsmittel, die ich für diese Arbeit benutzt habe, sind angegeben. Die Arbeit hat mit gleichem Inhalt beziehungsweise in wesentlichen Teilen noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Ort, Datum

Unterschrift

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird im Rahmen von Future Fighter Engine Plus (FFE+), einem internen Projekt des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), eine Fertigungsstrategie für die Herstellung einer Mikrogasturbinenblisk aus oxidkeramischem Faserverbundwerkstoff entwickelt. Hierfür soll das vakuumbasierte Infusionsverfahren der Abteilung Struktur- und Funktionskeramik des Instituts für Werkstoffforschung (WF) verwendet werden. Zunächst wird der theoretische Hintergrund des Materials und die davon etablierte Verarbeitung betrachtet. Auf Basis dieser Grundlage können das System und Funktionen der oxidkeramischen Blisk im Sinne der methodischen Prozessentwicklung bestimmt werden. Die darin formulierten Anforderungen und Bewertungskriterien lassen eine aufwandsreduzierte Entwurfsphase von Konzepten oder Lösungsprinzipien zu. Hierbei ist die Faserstruktur maßgeblicher Einflussfaktor in der Lösungsfindung. Nach der Bewertung, Validierung und Anpassung der Ergebnisse wird die Fertigungsstrategie auf dem best-bewerteten Konzept und den bisherigen Projekten der Abteilung entworfen. Zusätzlich ist in dieser Arbeit eine Machbarkeitsstudie am Institut für Flugzeugbau (IFB) der Universität Stuttgart von einem bislang unbekanntem Verfahren zur Herstellung oxidkeramischer Faserpreforms durchgeführt worden. Da eine Aussage über die Materialkennwerte für eine sichere Funktionsgewährleistung notwendig ist, sind Materialversuche bei Raum- und Hochtemperatur geplant. Das abschließende Ziel einer Prozessketten-Grundlage von Projekten mit dem vakuumbasierten Infusionsverfahren des Instituts für Werkstoffforschung fasst die Ergebnisse dieser Arbeit und anderen Erfahrungsberichten zusammen.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	I
Kurzfassung.....	II
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1 Einleitung und Motivation.....	1
2 Materialtechnische Grundlagen von Faserverbundwerkstoffen.....	3
2.1 Faserverbundwerkstoffe	3
2.2 Faserverbundkeramik.....	6
2.3 Oxidkeramischer Faserverbundwerkstoff.....	8
2.3.1 Materialeigenschaften von oxidkeramischen Faserverbundwerkstoffen... 9	
2.3.2 Etablierte Herstellungsverfahren.....	12
2.4 Vakuumbasiertes Fertigungsverfahren von oxidkeramischen Faserverbundwerkstoff.....	16
3 Modellbildung	19
3.1 Methodische Prozessentwicklung.....	20
3.1.1 Market Pull	20
3.1.2 Funktionsstruktur	21
3.1.3 Bewertungsmethodik in der Nutzwertanalyse	23
3.2 Anforderungsliste.....	26
3.3 Turbinenblik im Stand der Technik.....	29
3.4 Kräfteberechnungen	30
4 Fertigungsstrategie	33
4.1 Fertigungskonzepte	33
4.1.1 Quasi-isotroper ox-CMC Rohling	35
4.1.2 Kurzfaserpresen	37
4.1.3 Preform aus dreidimensionalem Gewebe	38
4.1.4 Überlagerung von geometrisch angepassten Gewebezuschnitten.....	40
4.1.5 Quasi-isotropes Wellenstück mit Verdrehung von Gewebezuschnitten..	42
4.2 Bewertung	43
4.3 Machbarkeitsstudie.....	46
4.3.1 Herstellungsverfahren und Testmodelle	46
4.3.2 Ergebnisse	48
4.4 Infusionstechnologie	50
5 Materialversuche	55
5.1 Plattenherstellung.....	58

5.2	Testergebnisse	60
5.2.1	Temperaturabhängige Biegeversuche	65
5.2.2	Biege-Zyklierversuche	68
6	Grundlagen einer Prozesskette.....	71
7	Diskussion	77
8	Zusammenfassung	79
9	Ausblick	80
	Literaturverzeichnis.....	i
Anhang 1	Versuchsprotokolle Biegeversuche Raumtemperatur	iv
Anhang 2	Versuchsprotokolle Biegeversuche Hochtemperatur	vii
Anhang 3	Versuchsprotokolle Biege-Zyklierversuche	x

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 Siliziumcarbid-Faserverbundwerkstoff-Blisk	2
Abbildung 2.1 Grundstruktur von Faserverbundkunststoffen.....	4
Abbildung 2.2 Faserfestigkeit in Abhängigkeit des Faserdurchmessers	4
Abbildung 2.3 Schematische Darstellung des Aufbaus von Hochleistungsfaserverbundkunststoffen	5
Abbildung 2.4 Rasterelektronenmikroskopische Ansicht einer ox-CMC Probe	9
Abbildung 2.5 Spannungsverlauf von ox-CMC Proben	11
Abbildung 2.6 Rasterelektronenmikroskopische Detailansicht einer ox-CMC Probe mittels vakuumbasiertem Infusionsverfahren und zusätzlichem Infiltrierdruck von 4 bar	11
Abbildung 2.7 schematische Darstellung des Wickelverfahrens.....	13
Abbildung 2.8 Anwendungsbeispiele von ox-CMC Komponenten.....	14
Abbildung 2.9 Kreislauf zur einheitlichen Matrixinfiltration des oxidkeramischen Gewebes im Prepreg-Verfahren	15
Abbildung 2.10 Handlaminierverfahren zur Erzeugung eines Grünkörpers	16
Abbildung 2.11 Harzinjektionsverfahren RTM	17
Abbildung 2.12 Versuchsaufbau zur Herstellung des Grünkörpers einer ox-CMC Platte mittels vakuumbasierten Infusionsverfahren	17
Abbildung 3.1 Produktentstehungsprozess nach <i>Naefe</i> und <i>Luderich</i>	19
Abbildung 3.2 Planungsstruktur der Arbeit zur Entwicklung von Fertigungsstrategie und einer Prozessketten-Grundlage der Blisk im Rahmen von FFE+.....	20
Abbildung 3.3 Systemkonzepte.....	22
Abbildung 3.4 funktionales Systemkonzept.....	23
Abbildung 3.5 tabellarische Übersicht und Kategorisierung von Bewertungsmethoden.....	24
Abbildung 3.6 Struktur des Zielsystems	26
Abbildung 3.7 Turbinenblisk der Mikrogasturbine JetCat-P1000-Pro	29
Abbildung 3.8 Mechanische Eigenschaften von IN100	30
Abbildung 3.9 schematische Skizze der Turbinenblisk mit Massenschwerpunkten der prismatischen Schaufeln anhand von acht Schaufeln	31
Abbildung 4.1 Segmentierung bei Kraftwerksturbinen	34
Abbildung 4.2 Satin- oder Atlas-8-Gewebe	35
Abbildung 4.3 Spannungspotential von Faserverbundkunststoffen bei verschiedenen Faserorientierungen anhand von CFK	36
Abbildung 4.4 Gewebepreform eines quasi-isotropischen ox-CMC Rohlings durch Überlagerung verdrehter Gewebelagen	37
Abbildung 4.5 Fertigungskonzept von Kurzfaserpresse zur Herstellung der ox-CMC Blisk.....	37
Abbildung 4.6 Nextel 610 Kurzfasern von 3M	38
Abbildung 4.7 orthogonale 3D-Webstruktur	39
Abbildung 4.8 einstufige Preform für ein Lüfterrad aus Entwicklungsstudie.....	39
Abbildung 4.9 Schema einer möglichen 3D-Preform für die Blisk	40
Abbildung 4.10 schichtweises Drapieren der Faserstruktur aus keilförmigen Gewebezuschnitten mit Mittellinie jedes Zuschnitts in rot.....	41
Abbildung 4.11 Draufsicht einer Turbinenschaufel unter dem Konzept der Überlagerung von geometrisch angepassten Gewebezuschnitten.....	42
Abbildung 4.12 Draufsicht einer Turbinenschaufel mit schematischer Struktur des Faseraufbaus aus Verdrehung von Gewebezuschnitten und quasi-isotropischen Material	42

Abbildung 4.13 TFP-Verfahren am IFB der Universität Stuttgart	47
Abbildung 4.14 Skizze eines beispielhaften Faserverlaufes für eine mögliche Preformkontur der Blisk	48
Abbildung 4.15 Aufwicklung der Nextel 610 Faser auf eine Spule der Stickmaschine am IFB	49
Abbildung 4.16 Nextel 610 Preformkontur.....	50
Abbildung 4.17 schematische Skizze der Turbinenblisk mit Drehpunkt der zusammengesetzten Masse von Scheibe und Schaufel anhand von acht Schaufeln.....	51
Abbildung 4.18 Zugspannung einer rotierenden Vollscheibe bei dynamischer Beanspruchung	52
Abbildung 4.19 schematischer Aufbau des Infusionsverfahren der Blisk mittels Überlagerung von geometrisch angepassten Gewebezuschnitten.....	54
Abbildung 5.1 Versuchsmatrix für die Untersuchung der Grenzen der Materialbeanspruchung unterschiedlicher Faserstrukturen	57
Abbildung 5.2 3-Punkt-Biegeversuch	58
Abbildung 5.3 Aufwicklung von UD-Gelegen.....	59
Abbildung 5.4 Versuchsaufbau zur Herstellung von ox-CMC Platten.....	60
Abbildung 5.5 Luftultraschallmessungen der Platten unterschiedlicher Faserstruktur mit nutzbarer Fläche zum Ausschneiden von Proben	63
Abbildung 5.6 Position der Entnahme von Proben aus den Platten mit unterschiedlichen Faserstrukturen	64
Abbildung 5.7 3PB von drei Proben aus der UD-Platte	66
Abbildung 5.8 3PB von drei Proben aus der Hybrid-Platte	67
Abbildung 5.9 3PB von drei Proben aus der DF-19-Platte	67
Abbildung 5.10 Biege-Zyklerversuche der drei Faserstrukturen	70
Abbildung 5.11 Berechnung des E-Moduls bei den Biegezyklerversuchen	71
Abbildung 6.1 Paradoxon der Konstruktion	72
Abbildung 6.2 TOTE-Schema	73
Abbildung 6.3 Grundlage einer allgemeinen Prozesskette	74
Abbildung 6.4 relevante Schritte in einer CMC-Prozesskette	75

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1 Übersicht des Materialverhaltens (nicht-) oxidativer Keramikwerkstoffe	6
Tabelle 2.2 Festigkeiten von WHIPOX-AA-3-45.....	10
Tabelle 3.1 Innovationsarten im ABELL-Schema.....	21
Tabelle 3.2 Anforderungsliste für die Fertigungsstrategie der Blisk.....	28
Tabelle 3.3 Kräfte- und Zugspannungsberechnung der zwei Werkstoffvarianten	32
Tabelle 4.1 kardinale Zielwertmatrix für die Bewertung der Fertigungskonzepte.....	45
Tabelle 4.2 Fliehkraft und Zugspannung an Durchmesser der Wellenanbindung.....	52
Tabelle 4.3 Zugspannungen nach Berechnungen dynamischer Beanspruchung	53
Tabelle 5.1 Materialgrößen bei der Dichte-, Faservolumengehalt- und Porositätsbestimmung der drei Faserstrukturen.....	61
Tabelle 5.2 Durchschnittliche Spannungen und Elastizitätsmodule der Faserstrukturen bei Raum- und Hochtemperatur	66

Abkürzungsverzeichnis

3PB	<i>3-Punkt-Biegeversuch</i>
Al ₂ O ₃	<i>Aluminiumoxid</i>
AT	<i>DLR Institut für Antriebstechnik</i>
BT	<i>DLR Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie</i>
DLR	<i>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt</i>
E-Modul	<i>Elastizitätsmodul</i>
FFE+	<i>Future Fighter Engine Plus</i>
HTL	<i>Fraunhofer Zentrum für Hochtemperatur-Leichtbau</i>
IFB	<i>Institut für Flugzeugbau, Universität Stuttgart</i>
ox-CMC	<i>oxidkeramischer Faserverbundwerkstoff</i>
ReFEx	<i>Reusability Flight Experiment, DLR Projekt</i>
RTM	<i>Harzinjektionsverfahren</i>
SiC	<i>Siliziumcarbid</i>
TFP	<i>Tailored Fiber Placement</i>
UD	<i>unidirektional</i>
WF	<i>Institut für Werkstoffforschung</i>
WHIPOX	<i>Wound Highly Porous Oxide Matrix CMC</i>

1 Einleitung und Motivation

In der Luft- und Raumfahrt werden Bauteile großen Belastungen ausgesetzt. Zur Funktionsgewährleistung wird deshalb eine Vielzahl an unterschiedlichen Werkstoffen anforderungsspezifisch eingesetzt. Spitzenbelastungen werden insbesondere im Triebwerk erreicht, da hier sehr hohe Drehgeschwindigkeiten und Temperaturen auf die Triebwerkskomponenten einwirken. Bei der Kraftstoffverbrennung in der zivilen Luftfahrt liegen diese Temperaturen beispielsweise bei 1.500 °C [1]. Die Nickelbasislegierungen (Inconel/Inc) bilden die Spitze der Metalllegierungen in Hinsicht auf ihre Temperaturfestigkeit. Da die Verbrennungstemperatur im Triebwerk trotzdem höher als die Temperaturstabilität dieses Werkstoffes ist, müssen die Komponenten des Triebwerks zur Verhinderung des temperaturbedingten Bauteilversagens gekühlt werden. Im Gegensatz zu großen Triebwerken der zivilen Luftfahrt, können Mikrogasturbinen durch einen im Verhältnis sehr kleinen Bauraum nicht gekühlt werden. Die Verbrennungstemperatur wird deshalb auf einen begrenzten Wert eingestellt. In dem Projekt Future Fighter Engine Plus (FFE+) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) sollen unter anderem Begleitflugkörper (Remote Carrier) für militärische Zwecke entwickelt werden. Der Antrieb erfolgt hierbei durch eine Mikrogasturbine. Um die Effizienz des Flugkörpers zu steigern, soll die aktuelle Turbinenblisk aus Inc713LC durch eine Blisk aus oxidkeramischem Faserverbundwerkstoff (ox-CMC) ersetzt werden. Die Werkstoffalternative ermöglicht eine Gewichtsersparnis von bis zu etwa 60% und schließt Krieeffekte bis 1.100 °C aus [2]. Dadurch kann ein temperaturbedingtes Bauteilversagen bis zu dieser Temperatur verhindert werden.

Bereits 1998 ist in einer Studie die Herstellung einer Blisk aus Siliziumcarbid-Faserverbundwerkstoff getestet worden. Das Ergebnis der Produktion zeigt Abbildung 1.1. Mit den etablierten Herstellungsverfahren konnte bisher keine vergleichbare Struktur einer Triebwerkskomponente aus ox-CMC umgesetzt werden.



Abbildung 1.1 Siliziumcarbid-Faserverbundwerkstoff-Blisk [3, S. 4]

Das in Abbildung 1.1 dargestellte Konzept einer Blisk ist aus ox-CMC etwa 8-mal günstiger als der siliziumbasierte Werkstoff. In der Abteilung Struktur- und Funktionskeramik des Instituts für Werkstoffforschung (WF) ist ein vakuumbasiertes Infusionsverfahren zur Herstellung von komplexen und zusammenhängenden Strukturen aus ox-CMC entwickelt worden. Hiermit kann eine solche Blisk potentiell gefertigt werden. In Anbetracht einmaliger Nutzung der Blisk, soll deshalb der oxidkeramische Faserverbundwerkstoff als kostengünstige Alternative zu Inconel oder Siliziumcarbid (SiC) untersucht und umgesetzt werden.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung einer Fertigungsstrategie für eine Turbinenblisk aus ox-CMC mittels genanntem Herstellungsverfahren. Da in der Entwicklungsphase viele Möglichkeiten zur Zielfindung vorliegen können, ist auf ein methodisches Vorgehen zu achten. In der Bewertungsphase der getroffenen Lösungsprinzipien wird dafür die Nutzwertanalyse von *Zangemeister* verwendet [4]. Zudem soll nach der Dokumentation der Fertigungsstrategie eine Grundlage für eine Prozesskette von ox-CMC Produkten geschaffen werden. Dafür werden die Abläufe dieses Projekts mit bereits abgeschlossenen Projekten des Instituts für Bauweisen und Strukturtechnologie (BT) verglichen.

Um ein besseres Verständnis über den Werkstoff zu schaffen, wird zu Beginn auf die materialtechnischen Grundlagen von keramischen Faserverbundwerkstoffen und deren Verarbeitung eingegangen. Diese entspringen aus der Kunststofftechnologie. Anschließend wird die Modellbildung im Sinne der Produktentwicklung formuliert. In diesem Kapitel werden besonders die Werkzeuge der Produktentwicklung und eine klare Aufgabenstellung zur Lösungsfindung von Fertigungskonzepten berücksichtigt. Nachdem das angestrebte Material und zugehörige System darin erläutert worden sind, kann die Fertigungsstrategie durch eine Konzeptbewertung ausgewählt werden. Die Darstellung der Strategie begrenzt sich auf eine schematische Skizzierung, die als Anleitung für eine konstruktive Umsetzung in einer Folgearbeit dient. Danach erfolgt eine

repräsentative Versuchsreihe von Materialbeanspruchungen. Diese ermöglichen eine Auskunft über die ertragbaren Belastungen, validieren das best-bewertete Fertigungskonzept und bestätigen das Werkstoffpotential. Im nächsten Abschnitt wird diese Arbeit und andere, internen Projekte des DLR in einer Prozessketten-Grundlage dokumentiert. Abschließend werden die Ergebnisse dieser Arbeit diskutiert, zusammengefasst und ausblickend bewertet.

2 Materialtechnische Grundlagen von Faserverbundwerkstoffen

Für eine werkstoffgerechte Entwicklung von Fertigungskonzepten des ox-CMC werden in diesem Kapitel die materialtechnischen Grundlagen von Faserverbundwerkstoffen betrachtet. Die Idee einen Werkstoff mit Fasern oder Geweben zu verstärken wird bereits seit längerer Zeit mit einer Vielzahl von Herstellungsmethoden im Kunststoffbereich umgesetzt. Aus diesem Grund wird die Materialklasse der Faserverbundwerkstoffe zu Beginn dieses Kapitels durch Faserverbundkunststoffe (FVK) anhand von Glas- (GFK) und Carbonfaserverbundkunststoff (CFK) dargestellt. Daraufhin werden die Potentiale, Herausforderungen und Fortschritte einer Umsetzung dieser Werkstoffstruktur im Bereich der Keramik erläutert. Abschließend wird das von WF entwickelte, vakuumbasierte Infusionsverfahren zur Herstellung von ox-CMC gezeigt.

2.1 Faserverbundwerkstoffe

Bei einem Faserverbundwerkstoff handelt es sich um eine Zusammensetzung aus mindestens zwei unterschiedlichen Komponenten. Die Werkstoffklasse der faserverstärkten Kunststoffe ist eine der davon bekanntesten Gruppen und findet in der Luft- und Raumfahrt eine Vielzahl von Anwendungen. Die erste Komponente ist eine Faser oder auch ein Gewebe, welches von einem Kunststoff umgeben wird, der die sogenannte Matrix bildet. Grundlegend sollen so spezifische Anwendungen mit optimal eingestellten Eigenschaften erzeugt werden [5, S. 15]. Das prinzipielle Gebilde von einem solchen Werkstoff ist in Abbildung 2.1 schematisch aufgezeigt.

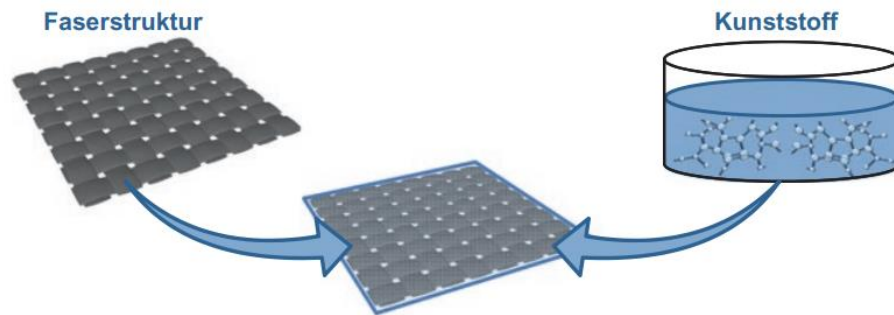


Abbildung 2.1 Grundstruktur von Faserverbundkunststoffen [6, S. 2]

Der Kunststoff liegt zu Beginn in einer flüssigen Form vor und stellt nach dem Aushärten zusammen mit der Faser eine hohe Festigkeit bei geringer Dichte des Werkstoffs her. Dabei wird die Belastungsmöglichkeit maßgeblich durch die ausgewählte Faser bestimmt. Diese kann hohe Zugkräfte aufnehmen [7, S. 33], da nach *Griffith* die Festigkeit eines Materials in Form einer Faser in Faserrichtung um einiges höher ist als bei gleicher Belastungsrichtung ohne Faserform [8]. Bei der Erstellung einer Leichtbaukomponente ist folglich die Auswahl einer Faservariante zu beachten. Abbildung 2.2 zeigt die maximale Festigkeit einer Faser bei Vergrößerung des Durchmessers. Daraus wird ersichtlich, dass die Steifigkeit rapide mit der Dicke einer Faser abnehmen wird. Aus diesem Grund sind Fasern mit geringerer Stärke für eine Leichtbauweise besser geeignet als dickere Fasern.

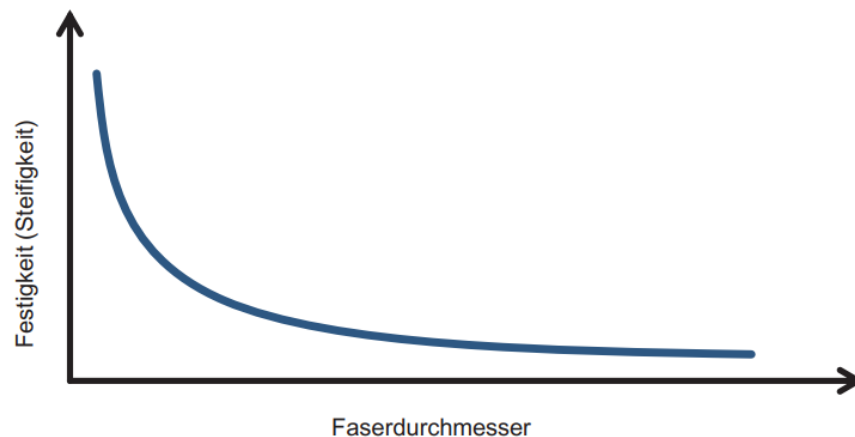


Abbildung 2.2 Faserfestigkeit in Abhängigkeit des Faserdurchmessers [6, S. 2]

Da ein Bauteil aus FVK nicht aus einem einzelnen Gewebe oder einer einzelnen Faserschicht besteht, ist eine dreidimensionale Betrachtung der Faserrichtungen notwendig. Hierfür verdeutlicht Abbildung 2.3 den unterschiedlichen Aufbau von Hochleistungsverbundwerkstoffen.

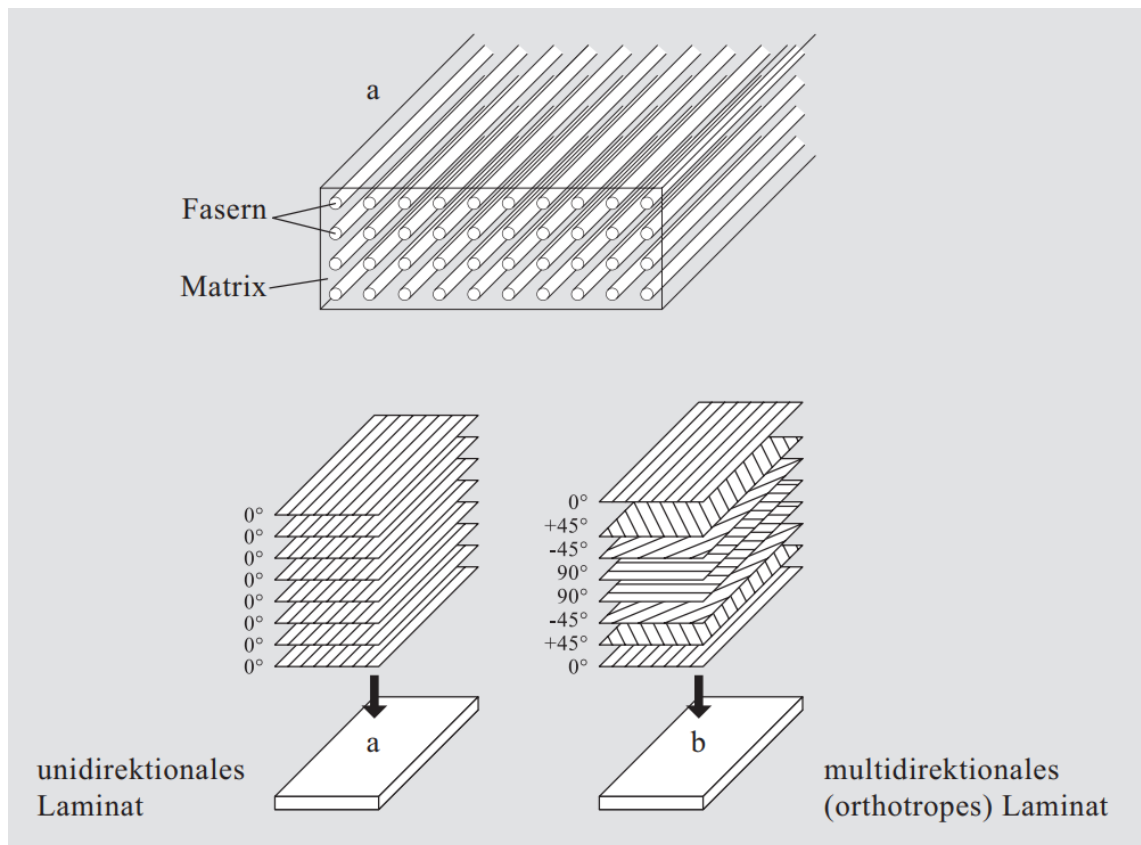


Abbildung 2.3 Schematische Darstellung des Aufbaus von Hochleistungsfaserverbundkunststoffen; **a** Unidirektionalschicht, **b** spezielle Laminatschichten [5, S. 19]

Dargestellt ist zum einen eine unidirektionale (UD) Faserrichtung über alle Schichten des Bauteils, mit welcher nur in gleicher Belastungsrichtung sehr gute Festigkeitswerte des Stoffes erzielt werden. Zum anderen ist ein multidirektionaler Aufbau des Materials anhand eines quasi-isotropischen oder auch orthotropen Ansatzes gezeigt. Die Festigkeitswerte dieser Variante liegen unterhalb des ersten Ansatzes, allerdings in jeder Belastungsrichtung ähnlich groß.

Es existiert eine Vielzahl an verschiedenen Stoffen, welche als endlose Faser oder verarbeitete Faser innerhalb eines Gewebes verwendet werden können. Das Spektrum der möglichen Kunststoff-Matrix ist ebenfalls sehr breit und jeder Kunststoff wird anwendungsspezifisch eingesetzt. Zwei etablierte Faserarten sind die Carbon- und Glasfaser. GFK wird hauptsächlich in der Infrastruktur (beispielsweise Flügel von Windrädern) und dem Leichtbau von transportrelevanten Komponenten (beispielsweise Behältnisse) eingesetzt. CFK findet hingegen ein sehr großes Anwendungsfeld im Automobil- und Luftfahrtsektor, da sich Teile wie Motorhauben oder Abdeckungen leicht umsetzen lassen (vgl. [6, S. 5-6]).

Auf die Herstellungsverfahren der beiden Werkstoffe wird hier nicht weiter eingegangen, da diese Fertigungskonzepte Grundlage für Ansätze zur Erzeugung von Faserverbundwerkstoffen im folgenden Abschnitt sind. Bei der Entwicklung von

Fertigungsverfahren des keramischen Faserverbundwerkstoff beeinflussen die weiter entwickelten FKV beispielsweise Auslegung oder Faseraufbau.

2.2 Faserverbundkeramik

Für die Herstellung einer hochtemperaturfesten Keramik stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Die Auswahl eines Materials wird durch die Übersicht von Potentialen und Einschränkungen in Tabelle 2.1 erleichtert. Monolithische, oder auch dicht- gesinterte Keramiken besitzen hiernach eine gute Temperaturresistenz. Aufgrund ihres spröden Belastungsverhaltens sind diese allerdings nicht schadenstolerant. Ein Faserverbundwerkstoff gleicht diesen Nachteil durch die innere Struktur aus und ist somit für den Anwendungsfall der Turbinenblik besser geeignet. Hier treten erwartungsgemäß hohe Zugkräfte auf, die von einer spröden Keramik nur geringfügig aufgenommen werden können.

Werkstoffe Anforderungen	monolithisch nicht- oxidisch	monolithisch oxidisch	nicht- oxidkeram. Faserverbund	oxidkeram. Faserverbund
Belastungsresistenz bei großer Hitze	+	0	+	0
oxidierend	-	+	-	+
Resistenz gegen große Temperaturwechsel	-	-	+	+
Schadenstoleranz	-	-	+	+

Tabelle 2.1 Übersicht des Materialverhaltens (nicht-) oxidativer Keramikwerkstoffe [9, S. 206]

Bei den keramischen Faserverbundwerkstoffen aus der oben gezeigten Tabelle werden zwei keramische Komponenten verwendet. Ziel ist es, mit der Faser oder dem Gewebe ein pseudo-duktilen Materialverhalten zu erzeugen. Zugkräfte werden von der Faser innerhalb des Werkstoffes aufgenommen, welche durch vorher genanntes Faserverhalten nach *Griffith* größer ausfallen werden. Die Keramikfasern werden bei zu großen Spannungen zwar weiterhin spröde brechen, allerdings überträgt sich die Kraft von einer abgerissenen Faser zur nächsten tragenden Faser. Dieses Verhalten definiert die Pseudo-Duktilität des Werkstoffes und bezeichnet sich als Faserabriss, der im späteren Kapitel 2.3.1 nähergehend erklärt wird.

Die keramischen Faserverbundwerkstoffe aus Tabelle 2.1 lassen sich durch ihr Korrosionsverhalten in zwei Klassen aufteilen. Die Oxidkeramik kann aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung (auch bei hoher Temperatur) nicht mit Sauerstoff reagieren. Die Nicht-Oxidkeramik hingegen benötigt dafür eine notwendige Schutzschicht vor Korrosion, da ansonsten die gewünschten Eigenschaften nicht beibehalten, oder gar nicht erst hergestellt werden können. Um die Eigenschaften des ox-CMC von denen des nicht-ox-CMC besser unterscheiden zu können, erfolgt in diesem Abschnitt zunächst eine Betrachtung der korrosionsriskanten Materialklasse.

Die Hauptvarianten von nicht-oxid-Fasern des Werkstoffes bestehen aus Carbon, Siliziumcarbid, oder einer darauf basierenden, anderen Zusammensetzung mit weiteren Stoffen wie Sauerstoff, Stickstoff oder Bor [9, S. 2]. Die Fasern können jeweils in einer Kohlenstoff- oder Siliziumcarbidmatrix eingebettet werden. Daraus ergeben sich folgende Kombinationen für den nicht-oxidativen, keramischen Faserverbundwerkstoff [10, S. 611]:

- C/C Carbonfaserverstärkter Kohlenstoff
- C/SiC oder C/C-SiC Carbonfaserverstärktes Siliziumcarbid
- SiC/SiC Siliziumcarbidfaserverstärktes Siliziumcarbid

Unter dem Ausschluss von Oxidation der Carbonfasern kann dieser Verbundwerkstoff bei Temperaturen von über 2.000 °C eingesetzt werden.

Der Werkstoff kann mittels unterschiedlicher Herstellungsverfahren erzeugt werden, wobei die Auswahl anwendungsspezifisch durch Bauteilgeometrie und Belastungsanforderung getroffen werden muss. Für rotationssymmetrische Komponenten wird in den meisten Fällen das Wickelverfahren ausgewählt. Da dieses Verfahren auch für die Umsetzung von Bauteilen aus ox-CMC etabliert ist, wird es im folgenden Abschnitt 2.4 detailliert erklärt. Weitere Verfahren sind beispielweise verschiedene Infiltrationsverfahren oder ein Heißpressverfahren. Die Infiltration kann in unter starker Erhitzung mit chemischen Dämpfen oder mittels eines Harzes bei Raumtemperatur erfolgen (vgl. [9]). Letzterer Ansatz benötigt eine anschließende Pyrolyse des Bauteils, in welcher chemische Bindungen aus dem Harz miteinander reagieren und eine Siliziumcarbidmatrix bilden. Zuvor benötigen die Fasern hierbei allerdings eine Beschichtung, die das Sintern einer monolithischen Keramik verhindert. Bei direktem Kontakt würden die Stoffe des Harzes mit dem Siliziumcarbid der Faser reagieren und so das pseudo-duktilen Verhalten des Werkstoffes ausschließen [11]. Auf die Herstellungsverfahren dieses Werkstoffes wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen.

2.3 Oxidkeramischer Faserverbundwerkstoff

In Kapitel 2.1 ist die Grundstruktur eines Faserverbundwerkstoffes mit Matrix und Faser, beziehungsweise Gewebe, anhand von FKV beschrieben worden. Bei dem oxidkeramischen Faserverbundwerkstoff des WF besteht die Matrix aus Aluminiumoxid (Al_2O_3), welches zusammen mit Wasser, Glycerin und einem chemischen Entschäumer ein zähflüssiges Wasser-Mineralgemisch (Schlicker) bildet. Durch den Schlicker wird die Oxidfaser (oder Oxidgewebe) flüssig infiltriert. Genannte Hilfsstoffe entweichen im späteren Trocknungs- und Sinterprozess. Die Faser des ox-CMC wird entweder als langes (endloses) Fadenbündel unterschiedlicher Materialstärke verwendet oder zu einer spezifischen Gewebevariante weiterverarbeitet. Im WF besteht das Fasermaterial hauptsächlich aus der Nextel 610 Faser (3M, St. Paul, USA). Alternativen hierzu sind etwa die Nextel 650 und Nextel 720 Faser (3M, St. Paul, USA). Die Materialien lassen sich durch ihre Mikrostruktur folgend unterscheiden:

- Nextel 610 ist ein Stoff aus einphasigem α -Aluminiumoxid mit einer durchschnittlichen Korngröße von etwa 80 nm
- Nextel 650 besteht aus Aluminiumoxid, vermischt mit Zirkondioxid
- Nextel 720 enthält das gleiche Aluminiumoxid, wie Nextel 610, ist allerdings mit Mullit, ein Silikat, in einer durchschnittlichen Kristallgröße von etwa 350 nm vermischt

Die Auswahl einer der drei Zusammensetzungen wird über die temperaturabhängige Materialfestigkeit getroffen, wobei maximale Spannungswerte in Ausbreitungsrichtung der Fasern angegeben werden. In einer Reihe von Materialversuchen hat *Krenkel* gezeigt, dass die Zugfestigkeit von Nextel 610 bei Raumtemperatur mit 3.000 – 4.000 MPa fast doppelt so hoch ist, wie von Nextel 720. Die Festigkeit von Nextel 650 liegt im mittleren Bereich dazwischen [9, S. 207]. Durch die Auslagerung bei 1.400 °C für eine Stunde ist aus jeder Probe eine monolithische Keramik gesintert worden. In dem Temperaturverlauf ist bei Nextel 610 und 650 mit zunehmender Wärme bei unterschiedlichen, kritischen Temperaturen ein fortlaufender Verlust der Festigkeit zu bemerken. Die Einsatzgrenze für Nextel 610 beträgt deshalb etwa 1.200 °C und für Nextel 650 etwa 1.000 °C für den kurzen Zeitraum. Nach der Auslagerung besitzt Nextel 720 eine Restfestigkeit von 1.500 MPa, welche circa 70 % des Zustandes bei Raumtemperatur entspricht. Die Restfestigkeiten der anderen Stoffe liegen bei weniger als 25 % dieses Zustandes [9, S. 207-208]. Alle bekannten Oxidfasern kriechen bereits bei Temperaturen von 1.100 °C [9, S. 9]. Dieser Effekt tritt zudem verstärkt bei Nextel 610 und 650 auf [12, S. 241].

2.3.1 Materialeigenschaften von oxidkeramischen Faserverbundwerkstoffen

Die Materialeigenschaften von ox-CMC lassen sich im Vergleich zu Metallen, welche durch einen tief erforschten Erstarrungsprozess unter geringen Abweichungen reproduzierbar sind, deutlich schwieriger beschreiben. Der anisotrope Werkstoff wird nicht-dicht gesintert und besitzt somit eine Vielzahl an Poren unterschiedlicher Größe. Die Inhomogenität des Materials verdeutlicht hierfür Abbildung 2.4. Für die Herstellung der knapp 1,2 mm dicken Probe ist ein Oxidgewebe mit 0°/90° Faserorientierung verwendet worden. Die Fasern sind als Punkte aus dem Bild heraus und bogenförmig horizontal verlaufend erkennbar. Zwischen den Gewebelagen (hier sechs) ist die Aluminiumoxidmatrix als dichte weiße Masse zu erkennen. Sie ist mit Rissen, beziehungsweise Poren, ungleichmäßig in der Probe verteilt.

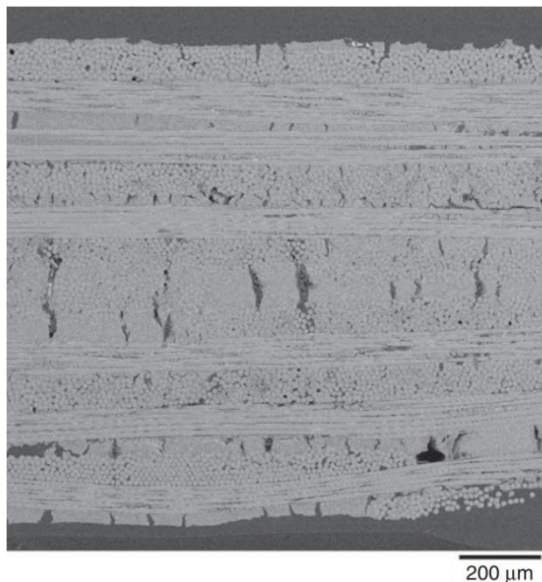


Abbildung 2.4 Rasterelektronenmikroskopische Ansicht einer ox-CMC Probe [12, S. 238]

Die Faserbündel in den Geweben sind zudem teilweise durch Matrix von anderen Faserbündeln des gleichen Gewebes getrennt. Der Abstand jeder Gewebelage variiert in dem Ausschnitt der Probe zwischen 50 und 250 µm. Aus diesen Inhomogenitäten ist die Reproduzierbarkeit von Materialeigenschaften eine Herausforderung, da Schwankungen bei Messreihen größer ausfallen können.

Aktuell sind vom WF Zug-, Biege- und Torsionsprüfungen des wickelverfahrensbasierten ox-CMC, Wound Highly Porous Oxide Matrix CMC (WHIPOX), mit Infiltration der Nextel 610 Faser vorgenommen worden. Die Ergebnisse der Messreihen sind in Tabelle 2.2 zusammengefasst. WHIPOX ist vom Institut mit dem Ziel einer porösen Matrix und einer Temperaturbeständigkeit von knapp 1.100 °C entwickelt worden. In anderen Versuchsreihen ist die Materialdichte auf einen Bereich zwischen 2,99 und 3,05 g/cm³

bei einer offenen Porosität von 23,2 bis 24,5 % bestimmt worden. Zudem besitzt der Werkstoff die Eigenschaft mit zunehmender Temperatur Wärme immer weniger zu leiten [2].

		Belastungsart	
		0/90°	+/- 45°
		[MPa]	
Raumtemperatur	Zugfestigkeit	267 +/- 11	144 +/- 9
	Biegefestigkeit	383 +/- 35	249 +/- 21
	Torsionsfestigkeit	85 +/- 6	147 +/- 8
1.200°C	Zugfestigkeit	144 +/- 4	105 +/- 4
	Biegefestigkeit	245 +/- 5	210 +/- 2

Tabelle 2.2 Festigkeiten von WHIPOX-AA-3-45 unterschiedlicher Belastungsrichtungen bei Raumtemperatur und starker Erhitzung [2]

Aus den Daten der Tabelle wird der zuvor erwähnte Einfluss der Faserbündelorientierung in Hinsicht der Belastungsrichtung deutlich. In begünstigter Belastungsrichtung sind die Zug- und Biegefestigkeiten bei Raumtemperatur deutlich höher. Bei starker Erhitzung verringert sich dieser Unterschied zwischen den Belastungszuständen. Für die Torsion des Werkstoffes ist hingegen die +/- 45° Orientierung zu bevorzugen.

Den Verlust von Festigkeiten bei starken Erwärmungen haben *Mechnich* und *Welter* in Ihren Untersuchungen näher betrachtet [13]. In dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Abbildung Abbildung 2.5 ist das Verhalten einer ausgelagerten Probe und einem Neuteil aufgezeigt. Die maximal ertragbare Spannung von WHIPOX-Proben ist nach einer Auslagerung von 1.000 Stunden bei 1.200 °C um circa 30 % (325 MPa zu 225 MPa) reduziert worden, wie dem Spannungsverlauf aus der Abbildung zu entnehmen ist.

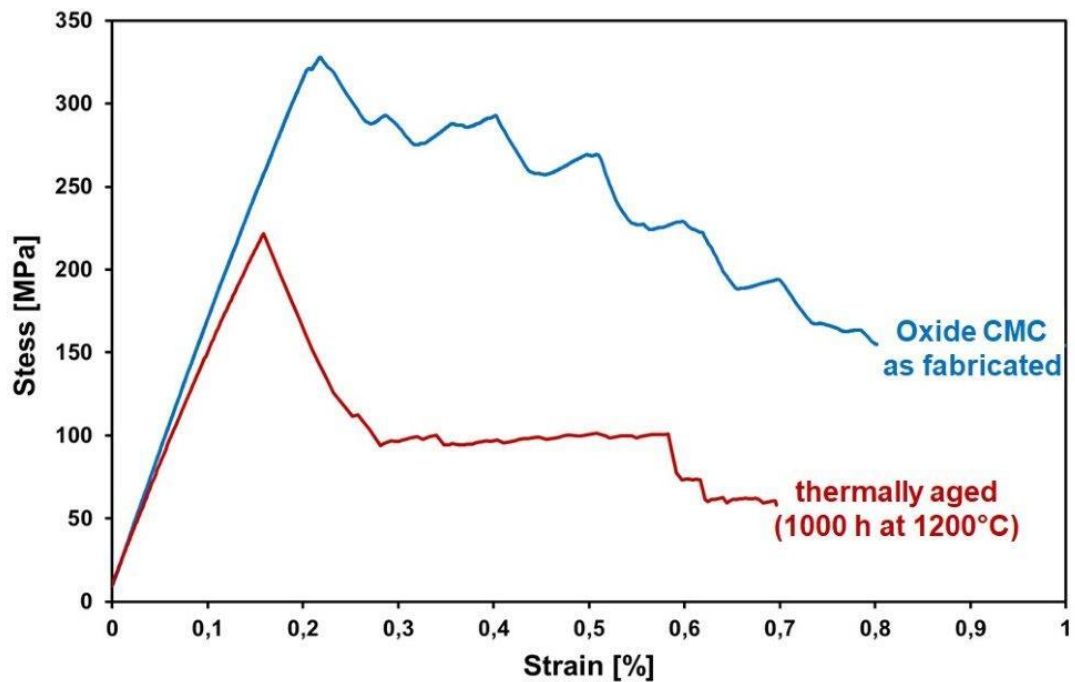


Abbildung 2.5 Spannungsverlauf von ox-CMC Proben [13]; **blau** Neuteil, **rot** Alterung durch Hochtemperatur

Für beide Proben ist ein zick-zack förmiger Spannungsverlauf nach der Spannungsspitze gemessen worden, der im Neuteil vielfach ausgeprägt ist und sich durch den Faserabriss in der Probe erklären lässt. In dem roten Graphen ist der Spannungsabfall mehr als doppelt so groß, was auf die Werkstoffalterung zurückzuführen ist. Beim Phänomen des Abrisses wird die Kraft von allen aktuell tragenden Fasern in einem sehr kurzen Zeitraum durch die Matrix auf die nächsten Fasern übertragen. So ist das Bauteil zwar geschwächt, versagt allerdings nicht sofort.

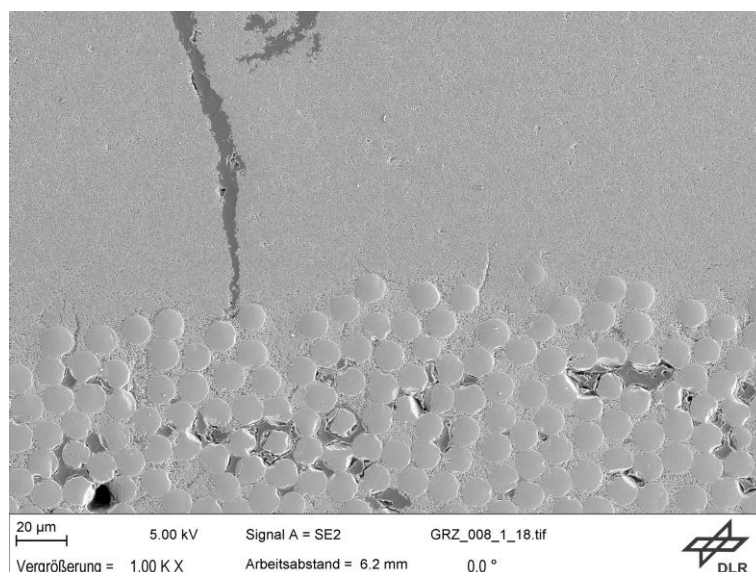


Abbildung 2.6 Rasterelektronenmikroskopische Detailansicht einer ox-CMC Probe mittels vakuumbasiertem Infusionsverfahren und zusätzlichem Infiltrierdruck von 4 bar [2]

Abbildung 2.6 stellt eine Detailansicht einer Rasterelektronenmikroskopie des ox-CMC dar. Diese Probe ist mit dem vakuumbasierten Infusionsverfahren und zusätzlichem Infiltrationsdruck hergestellt worden. Im Vergleich zu den Infiltrationsversuchen in der Literatur (siehe Abbildung 2.4) lässt sich hier eine einheitliche Al_2O_3 -Matrix erkennen. Wie zuvor sind Risse innerhalb des Materials durch die Sinterung entstanden und die Matrix mit Poren durchzogen. In der Detailansicht wird deutlich, dass mit diesem Verfahren die Bereiche zwischen den Fasern innerhalb eines Faserbündels infiltriert werden können. Die Fasern sind so, abgesehen von Infiltrationsfehlern (siehe Abbildung unten links), durchgängig in Matrix eingebettet. Der Werkstoff des Infusionsverfahrens stellt deshalb eine Verbesserung zu der gezeigten Oxidkeramik aus Abbildung 2.4 dar. Erste Untersuchungen des Instituts haben gezeigt, dass die Festigkeitswerte hier leicht von der Größe des wickelbasierten Werkstoffes aus Tabelle 2.2 abweichen. Ein drei-Punkt-Biegeversuch hat gezeigt, dass die Biegefestigkeit bei Raumtemperatur etwa bei 350 MPa beträgt (circa 9 % weniger) [2]. Aktuell sind noch keine statistische Versuchsdurchführungen von Institut veröffentlicht worden.

2.3.2 Etablierte Herstellungsverfahren

Die Ansätze zur Herstellung von ox-CMC weisen bezüglich der gewünschten Bauteilgeometrien verschiedene Potentiale auf, die gleichzeitig mit Beschränkungen verbunden sind. Grundlegend können sie auf die von der *Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V.* zusammengefassten Verfahrenstechniken für die Herstellung von FVK zurückgeführt werden, da diese teilweise bereits seit den 1940er Jahren existieren [7]. Durch die tief erforschte Kunststoffverarbeitung erweist sich die Herstellung leichter als beim ox-CMC, der durch die Anzahl von bekannten Fertigungsverfahren aktuell begrenzt wird. In diesem Abschnitt werden vorbereitend für das Infusionsverfahren die etablierten Fertigungsprinzipie von Grünkörpern in der Industrie behandelt. Ein Grünkörper ist eine noch zu sinternde Vorstufe des gewünschten Bauteils und bezeichnet einen getrockneten keramischen Körper. Er gibt folglich die Grundgeometrie wieder, erfährt durch die Sinterung allerdings eine zu berücksichtigende Schwindung. Für WHIPOX liegt diese bei circa einem Prozent in jeder Ausbreitungsrichtung. Die Untersuchung der Schrumpfung im zweiten Masterprojekt haben einen vergleichbar großen Wert für den infusionsbasierten Werkstoff ergeben [14].

Wickelverfahren

Zur Herstellung von rotationssymmetrischen Bauteilen aus ox-CMC ist das Wickelverfahren entwickelt worden. Hierbei wird ein Grünkörper mittels eines langen („endlosen“) Faserbündels aus Oxidkeramik und dem speziell dafür entwickelten

Schlicker erstellt. Unter der „endlosen“ Faser verstehen sich Filament-Rollen, die nach Verbrauch ausgetauscht und mit dem Ersatz verknüpft werden. Zur Veranschaulichung des Prozesses stellt Abbildung 2.7 die einzelnen Verfahrensschritte schematisch von links nach rechts laufend dar.

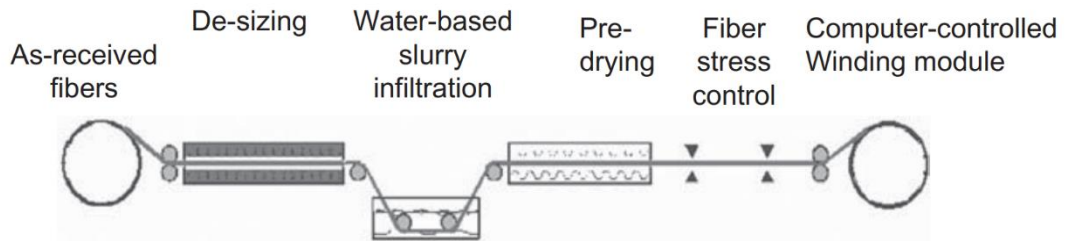


Abbildung 2.7 schematische Darstellung des Wickelverfahrens zur Herstellung von Grünkörpern aus ox-CMC [9, S. 211]

Das Faserbündel wird von der Filament-Rolle zur Entschlichtung („De-sizing“) durch einen Rohrofen geführt. In diesem Vorgang wird eine Polymer-Beschichtung thermisch entfernt, die zuvor ein Ausfransen der Fasern im Bündel verhindert und die Handhabung des Materials erleichtert hat. Die Schutzschicht würde in der fortlaufenden Verarbeitung ein Infiltrieren des Faserbündels verhindern. Daran schließt ein Schlickerbad an, sodass die freigebrannten Fasern in Schlicker infiltriert und eingebettet werden. In dem darauffolgendem Prozessschritt wird überschüssiger Schlicker entnommen und dem Infiltrationsbad zurückgeführt. Nach diesem Vorgang besitzt das Faserbündel eine Klebewirkung und wird unter Kontrolle der Faserstreckung aufgewickelt.

Die Wickelanlage selbst hat einen mit Wachs beschichteten Wickelkern, der sich durch eine angetriebene Welle mit variabler Geschwindigkeit drehen kann. Aus dem Kern resultiert die finale Innengeometrie des gewünschten Bauteils. Die Wachsschicht ermöglicht bei leichter Erwärmung das Entfernen des Grünkörpers nach einem 24-stündigem Trocknungsprozess.

Diese Herstellungsmethode lässt ein breites Spektrum an rotationssymmetrischen Bauteilen fertigen. Darüber hinaus ist im feuchten Materialzustand ein Verkleben mit anderen Bauteilen aus ox-CMC sowie eine aufgeschnittene Abwicklung möglich. Hierbei kann es sich beispielsweise um eine rechteckige Platte handeln.

Nach der abschließenden Sinterung besitzen die Bauteile die zuvor erwähnten pseudo-duktilen Eigenschaften. Zwei exemplarische Anwendungsmöglichkeiten sind in Abbildung 2.8 aufgeführt. Darin ist links ein Brennkammerkonzept einer Hochdruckturbine und rechts ein Leichtbau-Rohr zu sehen. Durch Einstellen unterschiedlicher Vorschub- und Drehgeschwindigkeiten kann die Faservolumendichte, lokal oder schichtweise, entsprechend der Belastung angepasst werden.



Abbildung 2.8 Anwendungsbeispiele von ox-CMC Komponenten hergestellt mit dem Wickelverfahren; **links** konzeptionelles Brennkammermodell einer Hochdruckturbine, **rechts** schichtweise Variation der Faservolumendichte beim Wickeln zur Leichtbauweise eines Rohrs [2]

Prepreg-Verfahren

Im Prepreg-Verfahren werden ox-CMC Platten gefertigt, die im trockenen Zustand gelagert und vor Verwendung erwärmt und ausreichend befeuchtet werden. Daraufhin können die Platten auf einen formgebenden Körper aufgetragen werden. Für die Erzeugung des Grünkörpers ist unter Betrachtung bereits produzierter Platten so nur ein Verarbeitungsschritt notwendig, weshalb der Herstellungszeitraum im Vergleich zu dem Wickelverfahren reduziert werden kann.

Die vorgefertigten Platten werden mittels einer Infiltrationstechnik hergestellt, die in Abbildung 2.9 dargestellt ist. Hierbei werden Gewebe aus Oxidkeramik in ein Schlickerbad getaucht. Nach diesem Vorgang ist das Gewebe in Oxidmatrix eingebettet, die Faserbündel des Gewebes allerdings nicht ausreichend infiltriert. Um dem entgegenzuwirken, folgt ein Warmwasserbad zur einheitlichen Infiltration des Gewebes.

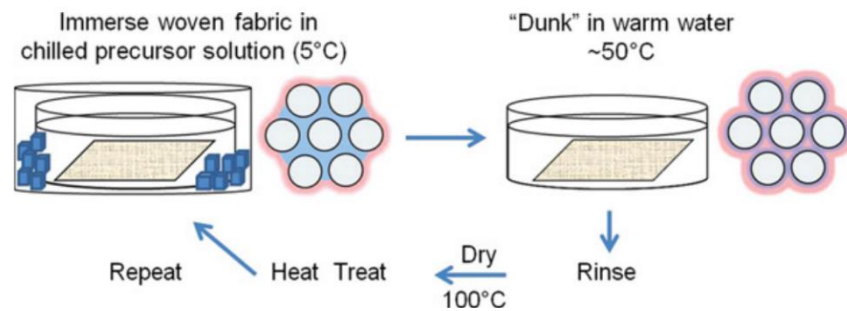


Abbildung 2.9 Kreislauf zur einheitlichen Matrixinfiltration des oxidkeramischen Gewebes im Prepreg-Verfahren [12, S. 244]

In diesem Vorgang sinkt durch die Wasserlöslichkeit des Schlickers die Matrixkonzentration. Mit mehrfacher Wiederholung dieses Vorgangs und zwischenzeitlicher Trocknung sowie Erwärmung reichert sich zunehmend mehr Matrix im Gewebe und zwischen den Faserbündeln an. Bei ausreichender Konzentration können die Platten bis zur Verwendung getrocknet und stapelweise gelagert werden.

Handlaminierverfahren

Ein weiteres Fertigungsverfahren ist das Handlaminieren von Oxidgeweben. Hierbei gibt es wiederum zwei Möglichkeiten der Anwendungsreihenfolge. Die Gewebe können in Schlicker getaucht und von Hand auf einen Formkörper gestrichen werden. Die gängige Weise ist allerdings das Auflegen der Gewebe auf den Formkörper und bestreichen mit Schlicker, wie es beispielsweise bei der Firma Walter E.C. Pritzkow Spezialkeramik der Fall ist. Hierfür zeigt Abbildung 2.10 die einzelnen Arbeitsschritte des Verfahrens. Das Bauteil wird schichtweise durch Wiederholung von **a** bis **c** auf dem Formkörper aufgebaut [15, S. 99].

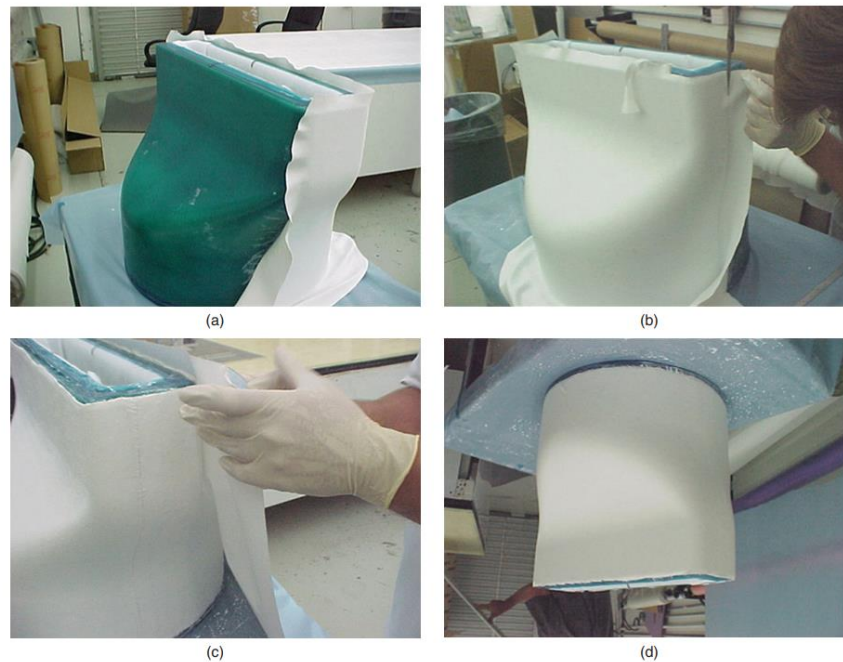


Abbildung 2.10 Handlaminierverfahren zur Erzeugung eines Grünkörpers [12, S. 245]; **a** Gewebe auftragen und bestreichen, **b** Besäumen, **c** nächste Lage auftragen, **d** Trocknung

Durch industrielle Erfahrung ermöglicht das Verfahren die erfolgreiche Herstellung von komplexen Bauteilstrukturen unter einschätzbarer Präzision und hat mit einem einfachen Prozess nur geringe Beschränkungen. Allerdings führen viele Arbeitsschritte zu einer aufwändigen und kostenintensiven Produktion [15, S. 100]. Außerdem verringert Handarbeit die Reproduzierbarkeit innerhalb einer Produktionsreihe, wodurch das Bauteilverhalten unterschiedlich ausfallen kann.

2.4 Vakuumbasiertes Fertigungsverfahren von oxidkeramischen Faserverbundwerkstoff

In der Abteilung Funktions- und Strukturkeramik des Instituts für Werkstoffforschung ist eine neue Herstellungstechnik für ox-CMC entwickelt worden. Diese druckbasierte Infiltrationstechnik ist wie zuvor erwähnt, auf ein Herstellungsverfahren für Faserverbundkunststoff zurückzuführen und nennt sich Infusionsverfahren. Im Kunststoffbereich ist das in Abbildung 2.11 als Harzinjektionsverfahren (RTM) bekannte Verfahren schematisch dargestellt. Es wird gängig für die Herstellung von Verkleidungselementen in Personenkraftwagen aus GFK oder Funktionskomponenten wie Druckschläuche aus CFK angewandt.

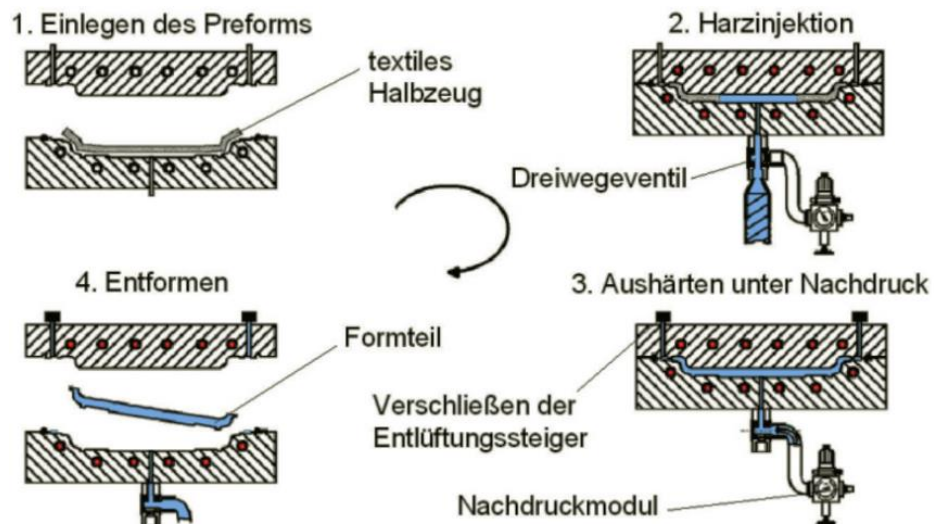


Abbildung 2.11 Harzinjektionsverfahren RTM [7, S. 391]

Zu sehen ist ein Prozess mit vier einzelnen Schritten; der Platzierung einer Preform (textiles Halbzeug), der Harzinjektion, der Aushärtung und dem Entformen des Bauteils. Meistens wird, wie in der Abbildung 2.11 schematisch gezeigt, ein zweiteiliges Werkzeug und eine trockene Preform verwendet (vgl. [7, S. 390-391]).

Für den Al_2O_3 -Werkstoff wird ein ähnlicher Ablauf angestrebt. Die Umsetzung erweist sich allerdings aufgrund des materialtechnischen Einflusses schwieriger. Der Einsatz eines wasserbasierten Schlickers bedingt zur Herstellung von Grünkörpern eine Filtration des Wassers innerhalb des Werkzeugs. Zur Erläuterung der Herausforderungen beim Entfernen des Wassers ist in Abbildung 2.12 ein erster Versuchsaufbau für die Herstellung von ox-CMC Platten von *Puchas, Held und Krenkel* aufgeführt.

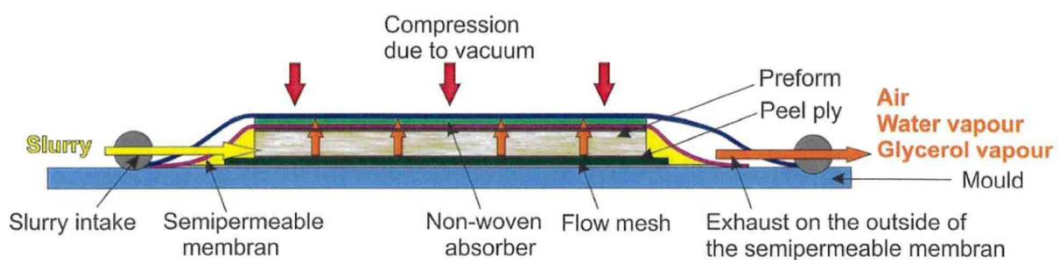


Abbildung 2.12 Versuchsaufbau zur Herstellung des Grünkörpers einer ox-CMC Platte mittels vakuumbasierter Infusionsverfahren [16]

Darin ist auf ein möglichst gleichmäßiges Einlegen der Oxidgewebe zu achten, die im Vergleich zu Glasfaser- oder Carbonfasergewebe deutlich steifer sind und in Position gehalten werden müssen. Auf der linken Seite des Vakuumbutels ist eine Einlassmöglichkeit für Schlicker und auf der rechten Seite ein Vakuumanschluss eingebracht. Bei Erzeugung eines Unterdrucks wird das Gewebe mit bis zu etwa 1 bar

zusammengedrückt (abhängig vom Innendruck des Vakuumbeutels) und der Schlicker von links nach rechts angesaugt. Mittels einer Fließhilfe unterhalb des Gewebestapels wird eine gleichmäßige Infiltration beschleunigt und begünstigt. Der Schlicker selbst wird durch eine semipermeable Membran geführt, die im Infusionsprozess ein Ausdringen des Aluminiumoxids verhindert. Die Membran ist durchlässig für das im Schlicker enthaltene Wasser, sodass dieses im Trocknungsprozess herausgefiltert werden kann. Neben der Komprimierung und dem Infiltrationsdruck hat das Vakuum einen zusätzlichen Verwendungszweck. Wasser verdampft bei Raumtemperatur nur sehr langsam unter dem atmosphärischen Druck. Da es bei 15 mbar ohne Temperaturerhöhung zu sieden beginnt, wird die Trocknung und somit die Herstellung des Grünkörpers beschleunigt.

Dieser Versuchsaufbau ist für Forschungszwecke der Herstellung von ox-CMC Platten entwickelt worden. Aus den Platten können dann Materialproben für Versuche entnommen werden. Zwar wird deshalb auf eine sehr präzise Herstellung geachtet, allerdings verursacht das nicht befestigte Auflegen mehrerer Gewebelagen ohne unterstützendes Werkzeug Ungenauigkeiten. Um diese Problematik zu lösen, ist also ein Werkzeugbau vergleichbar mit dem RTM-Verfahren zu verwenden. Dieser Versuch wird mittels einer Druck-Vakuum Infusion am DLR leicht abgewandelt verfolgt. Dieses vakuumbasierte Infusionsverfahren kann über verschiedene Ansätze gelöst werden. Beispielsweise ein Aufbau mit Vakuumsack ähnlich der Abbildung 2.12 oder unter Verwendung einer Vakuuminfusion wie in den beiden Studienarbeit zu Reusability Flight Experiment (ReFEx) [17] und den U-Profilen mit Rändern [14]. Die Form besteht in der Vakuuminfusion aus Gips, der durch seine geringe Porengröße als halbdurchlässige Membran fungiert. Die beiden Projekte haben gezeigt, dass der Gips eine gute Oberflächenqualität des Formteils verursacht und zerstörungsfreie Entformungen der Bauteile zulässt. Der Schlicker ist über einen Infusionsstempel zugeführt worden, der in Abbildung 2.11 das untere Werkzeugteil repräsentiert. Für die kritische Anwendung bei einer ungekühlten Mikrogasturbine ist eine Materialstruktur ähnlich von Abbildung 2.6 anzustreben. Dies ist nach aktuellen Kenntnissen von WF nur mittels zusätzlichem Infiltrationsdruck möglich. Aus diesem Grund soll für die Turbinenblisk im Sinne der Druck-Vakuum Infusion ein Infusionsverfahrens mit geschlossenem Werkzeug entwickelt werden. Diese Methode wird im DLR bereits zur Herstellung von Platten für mechanische Prüfungen und 3DCeraturb umgesetzt. Bei 3DCeraturb handelt es sich um ein DLR internes Projekt zur Entwicklung neuartiger Turbinenschaufeln aus keramischen Faserverbundwerkstoffen von WF und BT.

Untersuchungen des Einflusses vom Werkzeugmaterial auf die Oberflächengüte und die Entformbarkeit des Werkstoffs sind in den Bibliotheken der Hochschule Bonn-Rhein-

Sieg und des DLR sowie auf den Plattformen Google Scholar und Ebook Central nicht gefunden worden. Da der Gips in den Studienarbeiten unvorhersehbar brechen konnte, kann in der Konstruktion von Werkzeugen dem Gips ausschließlich eine filtrierende Funktion zugeschrieben werden.

3 Modellbildung

Für die Produktentwicklung eines ausgereiften Infusionsverfahrens zur Herstellung von komplexen Bauteilen aus ox-CMC, wie etwa der Turbinenblistk im Rahmen von FFE+, ist eine strukturelle Arbeitsweise und Methodik unumgänglich. Hierfür ist in Abbildung 3.1 der allgemeine Produktentstehungsprozess nach *Naefe* und *Luderich* dargestellt [18]. Darin ist die Produktentwicklung als wesentlicher Teil des Prozesses zu erkennen. Die vier Schritte in dem Teilbereich der Abbildung entsprechen den vier Phasen der Konstruktionsmethodik aus der VDI 2221. Produktplanung und Herstellung sind hier ausgegrenzt. Im Falle der Turbinenblistk ist die Produktplanung bereits durchgeführt, da bereits ein funktionierendes Konzept aus einer Nickelbasislegierung existiert und in gleicher Geometrie aus ox-CMC umgesetzt werden soll. Der oxidkeramische Faserverbundwerkstoff stellt wegen seiner temperaturspezifischen Eigenschaften, wie etwa Belastungsstabilität und sehr niedrige Wärmeübertragung, eine vielversprechende Alternative dar.

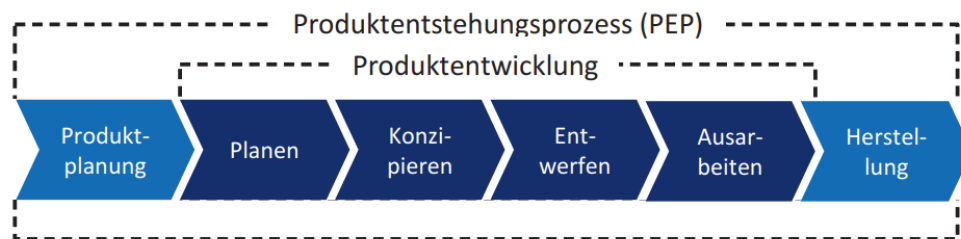


Abbildung 3.1 Produktentstehungsprozess nach *Naefe* und *Luderich* [18, S. 33]

Die gesamte Abfolge der dargestellten Produktentwicklung würde den Zeitrahmen und Aufwand dieser Arbeit übersteigen, weshalb zu Beginn dieses Kapitels eine Planungsstruktur (Abbildung 3.2) entworfen worden ist. Diese startet mit der Zielsetzung der Arbeit, die die Entwicklung einer Fertigungsstrategie beinhaltet. Im Hinblick auf den Produktentstehungsprozess wird so die gesamte Phase des Planens und Konzipierens erarbeitet. Auf Basis der Konzepte wird eine Entscheidung getroffen. Daraufhin wird ein erster Entwurf zur Fertigung einer Blistk getroffen. Dieser Entwurf fungiert als Anleitung zur konstruktiven Umsetzung der Strategie. Erfahrungsgemäß benötigt die Konstruktion

von Werkzeugen zur Herstellung von ox-CMC-Bauteilen in der Abteilung mehrere Iterationen zur Technologieausreifung. Wegen der zeitlichen Begrenzung wird deshalb die Ausarbeitung des Entwurfes nicht in dieser Arbeit durchgeführt.

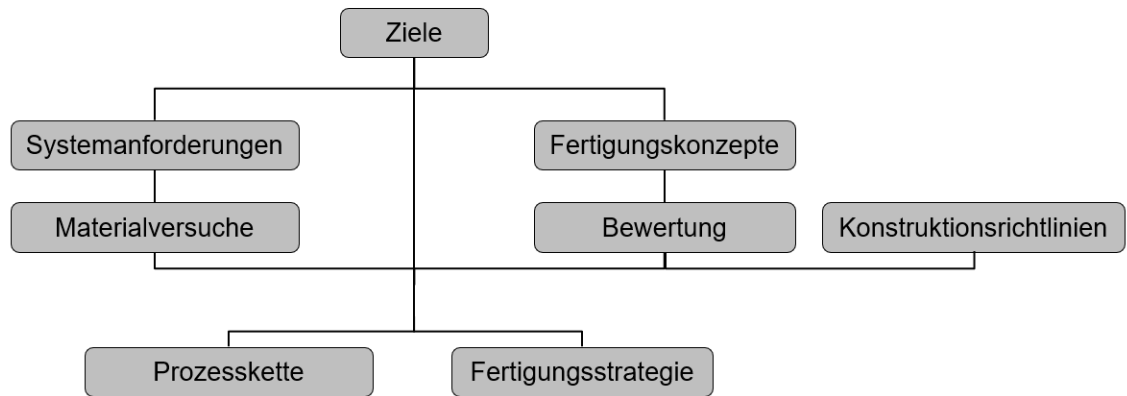


Abbildung 3.2 Planungsstruktur der Arbeit zur Entwicklung von Fertigungsstrategie und einer Prozessketten-Grundlage der Blisk im Rahmen von FFE+

Ergänzend soll eine Grundlage einer Prozesskette entwickelt werden. Die Begriffserklärung und Hintergründe dieses Ziels erfolgen im späteren Kapitel 6. Für das Erreichen der zwei Hauptziele wird sich auf eine methodische Prozessentwicklung konzentriert, die das systematische Aufstellen von Anforderungen und das Bewerten der Fertigungskonzepte übersichtlich gestaltet. Verbunden mit den Materialanforderungen werden in diesem Kapitel auch der Stand der Technik für die Blisk sowie Berechnungen für Kräfte und Spannungen im System der Blisk dokumentiert.

3.1 Methodische Prozessentwicklung

In der Produktentwicklung gibt es eine Vielzahl von Methoden und Vorgängen, um den Produktlebenslauf zu formen. Zur Verfolgung der methodischen Prozessentwicklung müssen zunächst neben einem Bewertungsverfahren auch die jeweiligen Produktziele bestimmt werden. In dieser Arbeit wird die Nutzwertanalyse als Bewertungsmethode verwendet. Für die Grundlage der darin aufgeführten Bewertungskriterien wird zuvor der Ursprung der Infusionstechnologie von ox-CMC in den wirtschaftswissenschaftlichen Innovationsbegriff des Market Pull eingegliedert und daraufhin eine Funktionsstruktur des Prozesses auf Basis des Systems aufgestellt. Diese Aufgabenklärung und Zielsetzung unterstützen die Formulierung von Anforderungen in Kapitel 3.2.

3.1.1 Market Pull

Produktentwicklungen zu kategorisieren, ermöglicht eine zielgerichtete Erstellung von Anforderungen und Bewertungen. Dafür wird in diesem Abschnitt der Innovationsbegriff

erläutert. Die Weiterentwicklung von Prozessen ist nach *Mattmann* maßgeblich auf neue Innovationen zurückzuführen, da dieser Begriff Produkt- und Prozessneuheiten umfasst [19]. Nach *Mattmann* soll sich der Fertigungsprozess durch Fertigungsverfahren und -technologien erneuern [19, S. 20]. Dies ist bei dem Infusionsverfahren der Fall, weshalb eine genauere Betrachtung der Innovationsart sinnvoll erscheint. Im Ordnungsschema der Tabelle 3.1 sind zwei unterschiedliche Klassen von Innovationsarten aufgeführt; die nachfragebedingte Induktion (Market Pull) und die autonome Induktion (Technology Push). Erstere führt der Bezeichnung nach zu einer Nachfrage nach neuen Produkten und bildet so eine Grundlage für Innovationen. Die Konzentration liegt hierbei auf der Erfüllung der marktseitigen Anforderungen. Bei der autonomen Induktion erfolgt die Entwicklung der Produkte oder der Technologien ohne Markt in der Industrie. Auch wenn der Market Pull naheliegend für die Produktentwicklung erscheint, so sind dennoch beide Innovationsarten gewinnbringende Kategorien (vgl. [19, S. 20-22]).

Geschäftsfeld- dimension Innovationsart	Mittel, Fähigkeit, Technologie	Zweck, Funktion, Kundenproblem	Markt, Segment, Kundengruppe
Technology Push	gegeben	gesucht	gesucht
Market Pull	gesucht	gegeben	gegeben

Tabelle 3.1 Innovationsarten im ABELL-Schema [19, S. 20]

Das Infusionsverfahren für den ox-CMC des DLR ist in die Klasse des Market Pull einzuordnen. Die Technologie ist unter dem Vorwand zur Herstellung von komplexen Bauteilen aus dem Potential der oxidischen Faserverbundkeramik entwickelt worden. Wie es in dieser Arbeit am Beispiel der ox-CMC-Turbinenblistik deutlich wird, ist der Zweck von dem Produkt bereits bekannt. Der Markt, beziehungsweise die Kundengruppe, ist in diesem Fall die Luft- und Raumfahrtbranche sowie ein breites Industriefeld mit Bedarf an thermoisolierenden Elementen und Hochleistungswerkstoffen. Ein Beispiel hierfür sind etwa Bremsscheiben aus Siliziumcarbid im BT [11].

3.1.2 Funktionsstruktur

Um die Komplexität des Fertigungsprozesses zu verringern und eine Übersicht der technologierelevanten Einflussfaktoren zu gewinnen, wird eine Struktur des Systemkonzepts für den Infusionsprozess aufgestellt. Grundlegend existieren die drei Systemvarianten aus Abbildung 3.3. Jede Auswahl wird über den fokussierten Systemaspekt getroffen. Bei dem funktionalen Konzept wird das Systemverhalten

dargestellt, also die Eigenschaften und Veränderungen von Ein- zu Ausgangsgrößen. Das zweite, strukturele Konzept zielt auf die Eigenschaften von Elementen im System ab. Hierbei wird eine Systemstruktur erstellt, die den Gesamtkontext zusammenfasst. Das hierarchische Systemkonzept wird bei komplexeren Strukturen eingesetzt. Damit ist es möglich, Einflüsse von Elementen auf ganze Systeme oder einzelne Subsysteme aufzuzeigen (vgl. [19, S. 28-30] + [20, S. 109-11]).

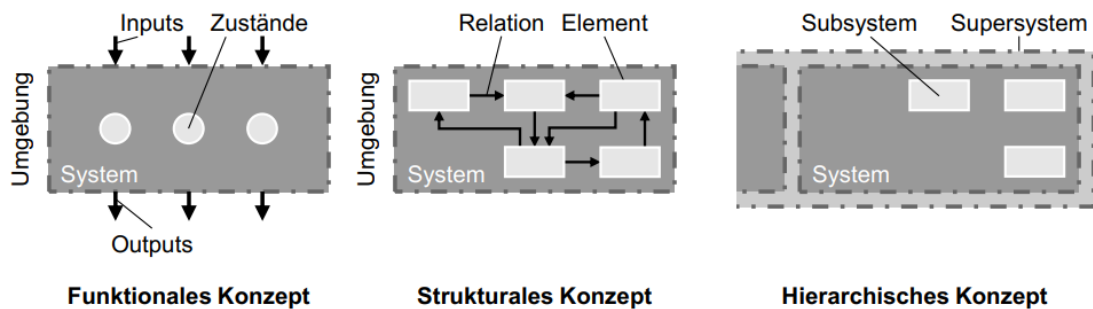


Abbildung 3.3 Systemkonzepte [19, S. 30]

In Anbetracht der Entwicklung einer Fertigungsstrategie für die Blist aus ox-CMC wird in der folgenden Abbildung 3.4 das Systemkonzept des vakuumbasierten Infusionsverfahrens erarbeitet. Hierbei handelt es sich um ein funktionales Konzept, da die unterschiedlichen Eingangsgrößen die Materialstruktur des Grünkörpers beziehungsweise die Eigenschaften des fertigen Bauteils beeinflussen. Eingangsgrößen sind für das Infusionsverfahren die verwendete Oxidfaser (oder Oxidgewebe), die ausgewählten Werkzeugmaterialien und die Konstruktion der Formwerkzeuge selbst. Der Schlicker ist keine Eingangsgröße, da dieser eigens zur Infusion entwickelt worden ist und in jeder Infiltration die gleiche Zusammensetzung besitzt. Er kann unter Vakuum, äußerem Druck oder in Kombination von Unter- und Überdruck zugeführt werden. Die Detailansicht der Mikrostruktur des Druck-Vakuum-Werkstoffs aus Abbildung 2.6 hat gezeigt, dass eine kombinierte Druckbeaufschlagung gute Ergebnisse erzielt. Die Zustände im Prozess sind das Faser-Drapieren und Entformen nach der Trocknung. Ein einfaches Einlegen der Preform oder Drapieren eines Gewebes begünstigt die Wiederholungs- und Prozessgenauigkeit. Ebenso verbessert die Entformbarkeit des Grünkörpers das Prozessergebnis und verringert die notwendige Nachbearbeitung. Dieser Zustand wird durch die werkzeugbezogenen Eingangsgrößen beeinflusst.

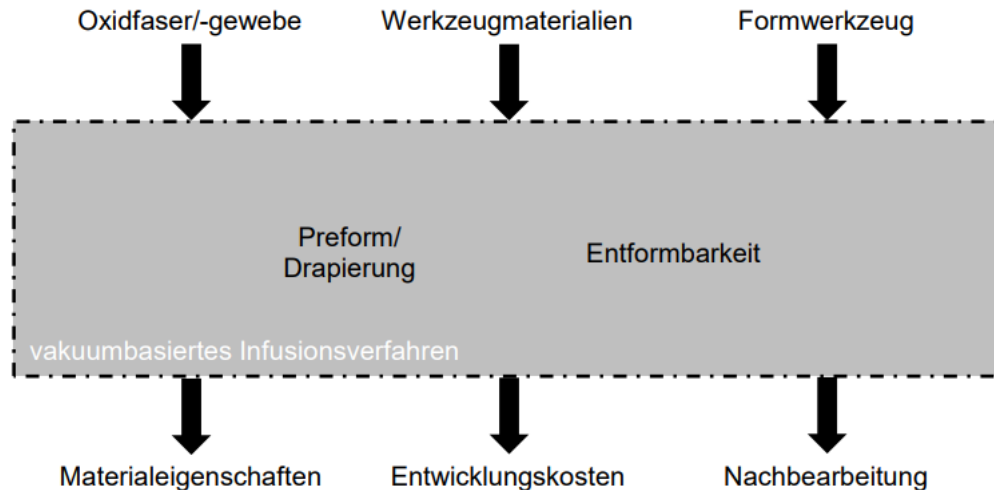


Abbildung 3.4 funktionales Systemkonzept für das vakuumbasierte Infusionsverfahren

Für die Materialeigenschaften ist maßgeblich die Oxidfaser als Ausgangsgröße im Werkstoff verantwortlich. Diese beeinflusst die ertragbaren Spannungen und andere Werkstoffkennwerte. Die anderen beiden Ausgangsgrößen sind die Entwicklungskosten (oder auch der Entwicklungsaufwand) des Prozesses und die notwendige Nachbearbeitung zur abschließenden Herstellung von Oberfläche und Geometrie der BliSk.

3.1.3 Bewertungsmethodik in der Nutzwertanalyse

Für die methodische Produktentwicklung ist die Auswahl einer geeigneten Bewertungsmethode essentiell. Bei der Bewertung von den später folgenden Fertigungskonzepten in Kapitel 4.1 wird sich auf eine Auswahl beschränkt. Ein zu breites Spektrum von Lösungsprinzipien kann die Bewertung unübersichtlich und schwierig gestalten.

Die Möglichkeiten der Bewertungsmethoden sind von *Bender* und *Gericke* in Abbildung 3.5 tabellarisch in drei Kategorien hinsichtlich ihrer Komplexität und des benötigten Zeitaufwandes zugeordnet worden [21]. Die einfache Klasse umfasst Bewertungsmethoden, wie den paarweisen Vergleich oder die Punktbewertung der Bewertungskriterien. In dieser Kategorie sind Zeitaufwand und Größe der Bewertung überschaubar. Ergebnisse der Klasse „einfach“ verschaffen Orientierung, lassen allerdings nur bedingt viele Aspekte in der Entscheidungsfindung zu. Die zweite Klasse kategorisiert „umfassende“ Bewertungsmethoden. Im Vergleich zur einfachen Klasse steigen hier zunehmend Zeitaufwand und Ausgangsgröße der Bewertung. Zu der Kategorie gehören beispielsweise das Rangfolgeverfahren oder die Präferenzmatrix.

Darin kann eine höhere Anzahl an unterschiedlichen Methoden für den Lösungsweg in Betracht gezogen werden. Merkmal ist zudem die Verwendung von Bewertungstafeln. Die „komplexe“ Klasse versucht eine Vielzahl an beliebigen Kriteriengruppen in die Bewertungsmethoden miteinzubeziehen (vgl. [21, S. 310-313]). Da hier der Zeitaufwand und die Menge an Ausgangsgrößen am höchsten ist, wird in dieser Arbeit auf Bewertungsmethoden der letzten Kategorie verzichtet.

		Legende: ● trifft zu ◐ möglich ○ trifft nicht zu	Bel. Kriteriengruppen	Kriteriengewichtung							Maßzahlumsetzung		Zahlen					
				Kriterienbereinigung	frei abgeschätzt	Bewertungstafeln	Rangfolgeverfahren	Präferenzmatrix	Dominanzmatrix	konsistente EM	inkonsistente EM	Bewertungstafeln	Bedeutungsprofile	Wertfunktionen	konsistente EM	inkonsistente EM	scharf	unscharf
C		Argumentenbilanz	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		Bedeutungsprofile	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		Paarweiser Vergleich	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		Punktbewertung	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
B		Nutzwertanalyse	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		Rangfolgeverfahren	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		Präferenzmatrix	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		Techn.-wirts. Bewertung	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
A		Abstandsberechnung nach BAUER	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		Vorrangsmethode (AHP)	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		Verfahren nach BREIING	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		Verfahren nach KNOSALA	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

Abbildung 3.5 tabellarische Übersicht und Kategorisierung von Bewertungsmethoden nach Bender und Gericke [21, S. 313]

In dem Infusionsverfahren dieser Arbeit gibt es nur wenige, beeinflussbare Eingangsgrößen. In dem Entscheidungsweg für eine Fertigungsstrategie können beliebige Kriterien ausgewählt werden und die Dokumentation zur Ergebnisdarstellung wird durch eine Bewertungstafel veranschaulicht. Aus diesen Gründen fällt die Auswahl in dieser Arbeit auf eine Nutzwertanalyse. Die Bewertungsmethode ist der zweiten Kategorie zuzuordnen und bildet einen Kompromiss zwischen Zeitaufwand und Genauigkeit bei mehreren Kriterien.

Die Nutzwertanalyse ist erstmals von *Christof Zangemeister* 1970 eingeführt worden und zielt auf die Analyse der Vorgehensweise komplexer Produktalternativen ab [4]. Diese Bewertungsmethode ist für die Ausgrenzung von der reinen Investitionskostenbewertung entwickelt worden. Zwar hat der finanzielle Umfang bei vielen Projekten in der Entscheidungsfindung einen großen Einfluss, dieser sollte trotzdem nicht maßgeblich für den Ausschluss eines Lösungsprinzips verantwortlich sein [4, S. 1]. *Zangemeister* unterscheidet in seinem Verfahren die Grundlage der Entscheidungsmodelle (Nutzwertmodelle) von dieser Investitionsrechnung [4, S. 2]. Das vakuumbasierte Infusionsverfahren vom WF befindet sich noch im Stadium der Technologieausreifung. Eine Weiterentwicklung des Prozesses ist aus diesem Grund mit Kosten verbunden, welche höher als angepasste Entwicklungen ausfallen können.

Somit ermöglicht die Nutzwertanalyse eine Bewertung ohne großen Einfluss durch die Investitionsrechnung. Die Stärke dieser Methode liegt in der systematischen Aufstellung der Bewertungskriterien. Mit einer stufenweisen Ermittlung des Gewichtungsfaktors werden einzelne Kriterien nicht gegeneinander aufgestellt, sondern aufgrund eines höheren Ziels abgewogen [21, S. 319].

In der Nutzwertanalyse werden die einzelnen Bewertungskriterien unter Verwendung eines Zielsystems strukturell ermittelt. Das Zielsystem wird durch die geordnete Menge aller handlungsbestimmenden Ziele definiert und umfasst mehrere Teilziele in einem Stufensystem abnehmender Komplexität. Dabei hängt ein Teilziel einer Stufe immer nur von den damit verbundenen Teilzielen der darunter gelegenen Stufe ab. Die Teilziele der untersten Stufe bilden ohne weitere Abhängigkeiten die Zielkriterien in der Bewertung. Jedem Teilziel wird eine Gewichtung zwischen 0 und 1 zugeschrieben, wobei die Summe in einer Stufe immer gleich 1 sein muss. Es wird zwischen Stufengewichtung g_s und Knotengewichtung g_k unterschieden. Die Knotengewichtung gibt die Bedeutung des oben angesprochenen Zusammenhangs eines Teilziels mit dem übergeordneten Teilziel wieder. Das Stufengewicht wird durch Multiplikation des Stufengewicht vom übergeordneten Ziel und aktueller Knotengewichtung berechnet. Die untersten Stufen von Teilzielen ohne weiteren Zusammenhang ergeben die Ziel- oder auch Bewertungskriterien. In einer Bewertungsrunde wird jedem Kriterium ein Zielwert vergeben. Auf dieser Basis wird mittels Multiplikation von Stufengewichtung und Zielwert ein Nutzwert berechnet. Die Summe aller Nutzwerte jedes Konzeptes bilden dann eine Punktzahl, die ein best-bewertetes Konzept zur Folge hat (vgl. [21, S. 317-319] und [4, S. 324-331]).

Zur Entscheidung einer Fertigungsstrategie für die Turbinenblisk mittels der Nutzwertanalyse ist in Abbildung 3.6 eine solche Struktur des Zielsystems erstellt worden. Um die Teilziele zu bestimmen, ist das funktionale System aus Abbildung 3.4 verwendet worden. Dabei werden von dem Werkstoffverhalten die gewünschten Materialeigenschaften sowie von der Prozesstechnik alle Eingangsgrößen und Zustände im System zusammengefasst. Die Herstellungskosten befassen sich hierbei ausschließlich mit den benötigten Stoffen zur Herstellung des Grünkörpers und nicht dessen Nachbearbeitung. Die Nachbearbeitung kann zum Stand dieser Arbeit nicht exakt eingeschätzt werden. Zusätzlich ist die Reproduzierbarkeit des Verfahrens aufgeführt.

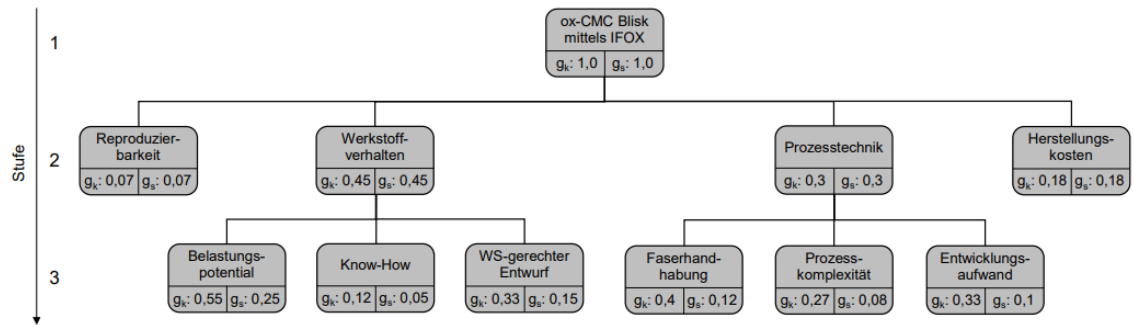


Abbildung 3.6 Struktur des Zielsystems für Blisk aus ox-CMC nach Vorbild von *Bender* und *Gericke* [21]

Bei der Auswahl der unteren Teilziele, die mit Herstellungskosten und Reproduzierbarkeit die Bewertungskriterien bilden, ist auf die Anweisungen von *Zangemeister* geachtet worden. Diese besagen beispielsweise, dass Kriterien unabhängig voneinander aufgestellt werden müssen [4, S. 126-136].

Die Bewertungskriterien der Nutzwertanalyse dieser Arbeit sind in drei Gruppen einzuteilen:

- Allgemeine Bewertungskriterien: Reproduzierbarkeit mit 7 % und Herstellungskosten mit 18 % Stufengewicht
- Werkstoff Bewertungskriterien: Belastungsmöglichkeit (oder -potential) mit 25 %, das Know-How über das Material mit 5 % und der werkstoffgerechte Entwurf des Fertigungskonzeptes mit 15 % Stufengewicht
- Prozess Bewertungskriterien: Faserhandhabung vor Infiltration mit 12 %, Komplexität des Prozesses mit 8 % und der Entwicklungsaufwand zur Umsetzung des Fertigungskonzeptes mit 10 % Stufengewicht

Die einzelnen Knoten- und Stufengewichtungen sind in Absprache mit den Teilnehmenden der später folgenden Bewertungsrunde (Kapitel 4.2) beschlossen worden.

3.2 Anforderungsliste

Nach dem methodischen Aufbau von Systemgrundlage und Bewertungsmethode können in diesem Abschnitt die Ziele jedes Fertigungskonzeptes in Form von Anforderungen getroffen werden. Ein essentieller Vorgang dafür ist die Aufstellung einer umfassenden Anforderungsliste. Diese beinhaltet wichtige Aspekte jedes an dem Projekt teilnehmenden Instituts zur Entwicklung einer Fertigungsstrategie der Blisk aus ox-CMC. Die Beteiligten sind das Institut für Antriebstechnik (AT) als Auftragsgeber, BT in

beratender Funktion aufgrund vieler Umsetzungen von Projekten mit nicht-Oxidkeramik und WF als Auftragnehmer.

Zur Erstellung einer Anforderungsliste existiert in der Literatur eine Vielzahl von Vorlagen und Schemata. Die Grundlage der Anforderungsliste dieser Arbeit schaffen *Mattmann* [19], *Naefe* [22], *Luderich* [18] und *Kirchner* [20].

Eine Anforderungsliste ist wesentlicher Bestandteil der Produktentwicklung, da diese die Informationen aus dem Lasten- und Pflichtenheft für die interne Bearbeitung konkretisiert. Damit ist es möglich, die Nachvollziehbarkeit des Lösungswegs für Projektpersonen und Kunden übersichtlich zusammenzufassen. Bei der Erstellung einer Anforderungsliste sind messbare und quantitative Angaben zu bevorzugen, da diese Berechnungsgrundlagen schaffen und die Komplexität verringern (vgl. [20, S. 54-55]).

Hauptsächlich lassen sich die aufgelisteten Anforderungen in eine funktionale und nicht-funktionale Klasse unterteilen. Funktionale Anforderungen legen das Produktverhalten fest. Nicht-funktionale Anforderungen beschreiben hingegen, wie ein Funktionsverhalten umgesetzt werden soll. Mit den zwei überordneten Klassen lassen sich Rahmenbedingungen für die Produktideen verfassen. Um Anforderungen leichter bestimmen zu können, existieren weitere Anforderungstypen zur Spezifikation von Funktionen. Bei dieser tiefgehenden Kategorisierung handelt es sich beispielsweise um produktspezifische Anforderungen, also Anforderungen konkret an ein einzelnes Produkt (vgl. [21, S. 186-188]).

Zur Bestimmung der Anforderungstypen existieren Ansätze mittels einer Dokumentationsgrundlage, die unternehmensspezifisch angepasst wird. Ziel dabei ist es, die Anforderungen durch eine einheitliche Beschreibung aufzustellen. Hilfestellungen sind beispielsweise Templates von Aussagen über Systeme oder Strukturen. Häufig werden die Anforderungen in Verbindung mit quantitativen Angaben in forderungs- oder zielpriorisierte Kategorien eingeteilt. Bei diesen handelt es sich etwa um die Kategorien Fest- (F), Mindest- oder Maximal- (M) sowie Wunschforderungen (W) [19, S. 63-66].

Im Aufbau einer Anforderungsliste können verschiedene Schemata verfolgt werden. Beispielsweise mit einer Tabelle bestehend aus rein-essentiellen Informationen, wie sie *Mattmann* anstößt [19, S. 66] oder einer Auflistung mit Bemerkungen und Verantwortlichen von *Kirchner* [20, S. 57]. Dabei besitzt jede Form spezifische Vor- und Nachteile bezüglich Übersichtlichkeit und Informationsdetail.

Für diese Arbeit ist in Tabelle 3.2 eine Anforderungsliste nach dem Vorbild von *Naefe* leicht verändert worden [22]. Der Unterschied besteht darin, dass keine Verantwortlichkeit aufgeführt ist. In dieser Arbeit werden Informationen und Hilfestellungen von den verschiedenen Instituten zur Verfügung gestellt, die Verantwortung für die Umsetzung der Fertigungsstrategie ist davon ausgenommen. Bei

den dokumentierten Anforderungsgruppen in der Tabelle ist eine begrenzte Auswahl prozessrelevanter Informationen getroffen worden.

		Anforderungsliste	
DLR WF-SFK		für: FFE+ CMC-Blisk Jacob Noah Rudat	Erstellt am: 18.10.2022 Seite 1 von 1
F/M/W	Anforderung		Daten
	1.	Geometrie	
F	1.1	Abmessungen [mm ³]	Ø 140 x 15
F	1.2	Geometrievereinfachung	Schaufel
W	1.3	Wellenanbindung	Konzept
	2.	Kinematik	
F	2.2	Geschwindigkeit; Drehzahl [1/s]	1.000
	3.	Kräfte	
M	3.1	Biegelast auf Schaufeln [N]	~ 42
M	3.2	Zuglast auf Schaufeln [N]	~ 5477
M	3.3	Drehmoment [Nm]	~ 50,7
M	3.4	Turbinenleistung [kW]	~ 318
M	3.5	Belastungszeitraum [h]	2
	4.	Energie	
F	4.1	„Take Off“ Temperatur [°C]	927
F	4.2	„Continuos Flight“ Temperatur [°C]	650
	5.	Stoff	
F	5.1	Faserverbundkeramik [Faser]	Nextel 610
	6.	Sicherheit	
W	6.1	Unterscheidungsmerkmal zur zivilen Luftfahrt/Nutzung	2-fach
	7.	Fertigung	
F	7.1	vakuumbasiertes Infusionsverfahren	Druck-Vakuum
	8.	Kontrolle	
F	8.1	Kriechversuche über max. Temperatur [°C]	1.000
	9.	Montage	
W	9.1	Kein Zusammenbau von Einzelteilen	Blisk
	10.	Instandhaltung	
W	10.1	Wartung	Wartungsfrei
W	11.	Kosten	niedrig

Tabelle 3.2 Anforderungsliste für die Fertigungsstrategie der Blisk aus ox-CMC nach Vorbild von Naefe (vgl. [22, S. 82-84])

Grundlegend gehört zu der Umsetzung einer Blisk die entsprechende Wellenanbindung. In diesem Anwendungsfall bestehen Welle und rotierendes Bauteil aus unterschiedlichen Materialien. Hohe Temperaturen und Drehgeschwindigkeiten führen in der Schnittstelle der beiden Komponenten zu unterschiedlichen Ausdehnungen, die Materialspannungen verursachen können. Da zur Lösung dieses Problems somit eigens für die Wellenanbindung unterschiedliche Konzepte entworfen und bewertet werden müssen, entfällt die Wunschforderung in dieser Arbeit. Für eine erstmalige Herstellung einer Blisk aus ox-CMC soll mit der Fertigungsstrategie eine vereinfachte Geometrie erzeugt werden. Diese Geometrie bildet einen Rohling, aus dem die Blisk gefertigt werden kann. Die angegebene Drehzahl wird im „Take-Off“-Status, also bei maximalem Schub für fünf Minuten und einer Verbrennungstemperatur von 927 °C, erreicht. Die zwei Stunden Laufzeit der Blisk beschreiben den „Continuos Flight“-Status, bei welchem die Verbrennungstemperatur 650 °C mit geringerer Drehzahl beträgt.

3.3 Turbinenblisk im Stand der Technik

Ausgangsbasis für diese Arbeit ist das Design der Turbinenblisk für die P1000-Pro Mikrogasturbine (JetCat, Ballrechten-Dottingen, Deutschland) aus Abbildung 3.7. Der äußere Durchmesser von den Schaufelspitzen beträgt 140 mm und die Höhe der Blisk an dickster Stelle 15 mm. Für die Anbindung an die Welle ist eine Bohrung von 15 mm vorgesehen. Die 23 Schaufeln sind auf einem Scheibenteil ohne Überschneidung (siehe Abbildung rechts) aneinandergereiht. Im Scheibenteil der Blisk sind für ein Auswuchten einige Vertiefungen eingebracht.

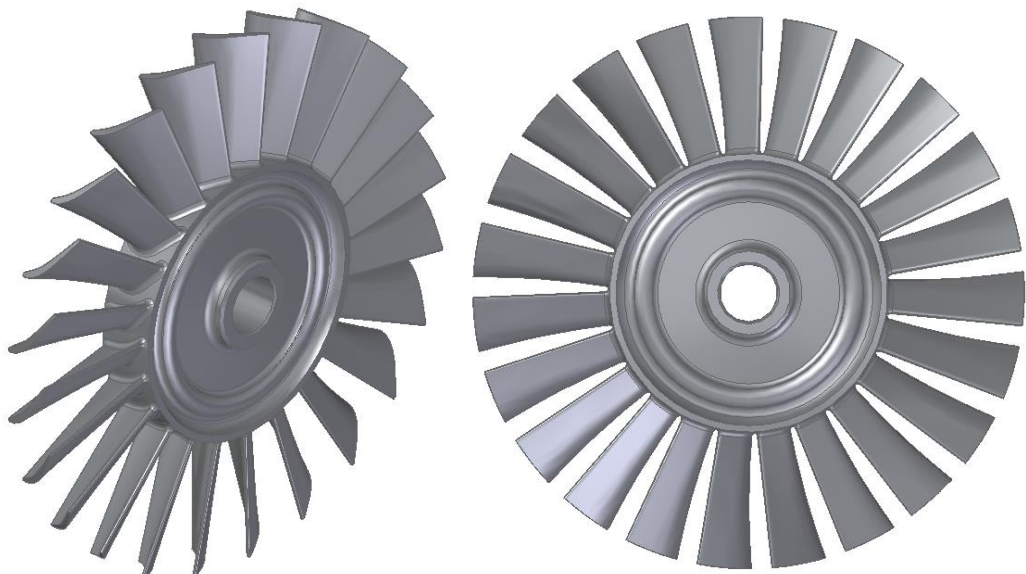


Abbildung 3.7 Turbinenblisk der Mikrogasturbine JetCat-P1000-Pro

Der aktuelle Inc713LC Werkstoff ist eine Nickelbasislegierung und wird mittels Feinguss hergestellt. Kurz zusammengefasst handelt es sich hierbei um ein Gussverfahren, welches durch eine präzise Fertigung gekennzeichnet ist und somit nur geringe Nachbearbeitungen benötigt und zulässt. Werkstoffdaten wie die Zugfestigkeit sind vom AT bei JetCat angefragt und abgelehnt worden. In der Recherche sind auf verschiedenen Plattformen keine Materialdaten (abgesehen von der Dichte) gefunden worden. Da allerdings Detailinformationen zu Inc100/IN100 von AT zur Verfügung gestellt werden konnten, werden diese Materialwerte in dem Graphen aus Abbildung 3.8 als Referenz aufgezeigt. Unter der Temperatur im „Take-Off“-Status kann das Material maximal eine Zugfestigkeit von etwa 700 MPa aushalten.

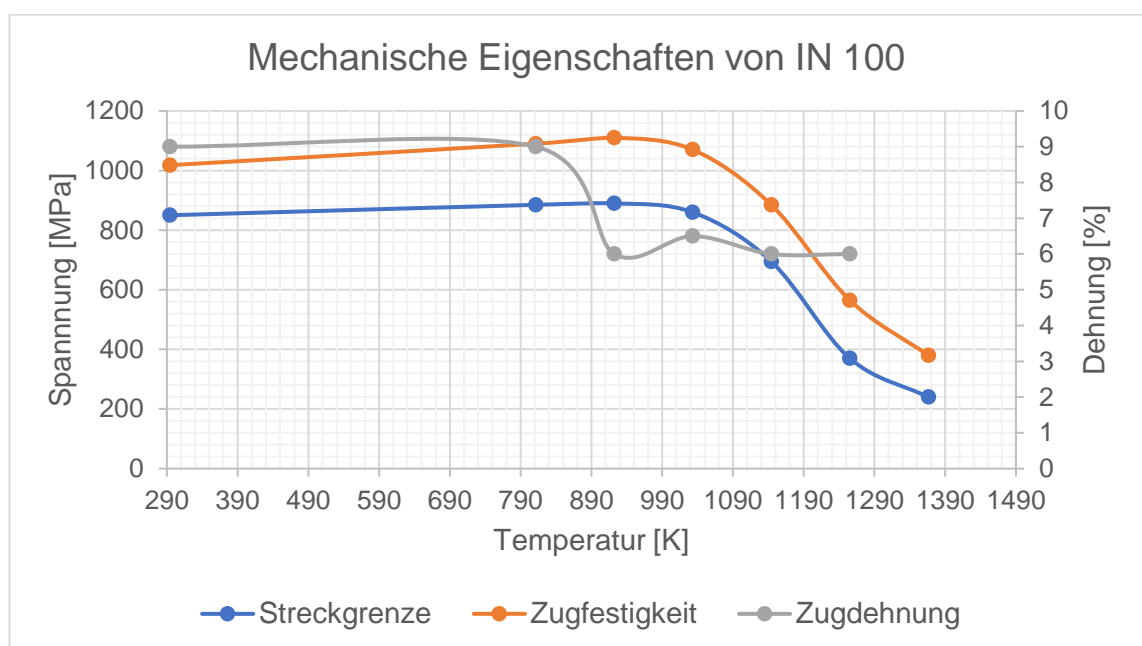


Abbildung 3.8 Mechanische Eigenschaften von IN100; Streckgrenze, Zugfestigkeit und Zugdehnung unter hoher Erwärmung [1]

3.4 Kräfteberechnungen

Im folgenden Abschnitt werden die unbekanntenen Kräfte in der Blisk unter Vereinfachungen und aus den Informationen der Anforderungsliste bestimmt. Zum Aufzeigen der Verbesserungen durch das alternative Material erfolgt daraufhin ein Werkstoffvergleich, aus dem Kräfte und Spannungen im Bauteil berechnet werden können. Für die Berechnung von auftretender Fliehkraft (F_{Zf}) und erzeugtem Drehmoment (M) unter Maximalbelastung gilt bei gegebener Turbinenleistung P nach bekannten Formeln aus dem *Taschenbuch für Maschinenbau*:

$$F_{Zf} = m \times \frac{v^2}{r} = m \times \omega^2 \times r$$

$$M = \frac{P}{\omega}$$

Wofür die Masse m , Bahngeschwindigkeit v oder Winkelgeschwindigkeit ω und ein Radius r benötigt wird [23]. Um diese zu ermitteln, ist zunächst in Abbildung 3.9 eine symbolische Skizze mit reduzierter Schaufelanzahl erstellt worden. Der Scheibenteil wird zur Übersichtlichkeit als ein homogener Zylinder betrachtet. Da sich die Querschnittsfläche der Schaufeln vom Fuß zur Spitze hin nicht-linear verkleinert, müssen in dieser Arbeit ohne Zugang zu Detailinformationen über die Bauteilgeometrie oder einer hinreichenden Simulation zur Spannungsberechnung (beispielsweise mittels Finite-Elemente Methode) Vereinfachungen getroffen werden. Ohne Vereinfachungen ist das Volumen und somit Masse und Massenschwerpunkt einer Schaufel mit klassischen Methoden nicht zu bestimmen. In den Berechnungen dieses Abschnitts wird die Querschnittsfläche prismatisch betrachtet, wobei von der kleinsten Fläche an der Spitze der Schaufel mit 25 mm^2 ausgegangen wird. Diese Fläche wird auch für die später folgende Spannungsberechnung verwendet.

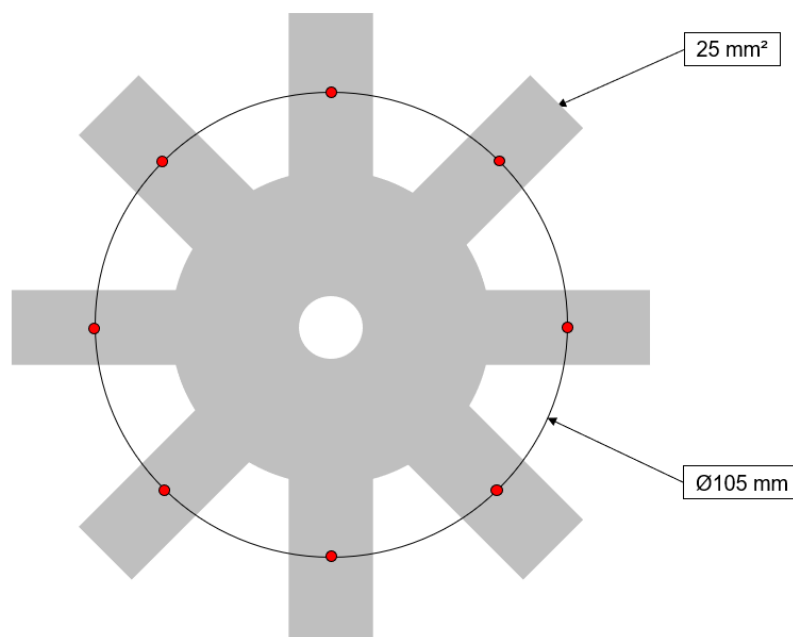


Abbildung 3.9 schematische Skizze der Turbinenblisk mit Massenschwerpunkten der prismatischen Schaufeln (rot) anhand von acht Schaufeln

Vom Mittelpunkt der Drehbewegung aus liegen die rot markierten Massenschwerpunkte der Skizze nach auf einem Radius von $52,5 \text{ mm}$. In der Fliehkraftberechnung wird überschlägig von der Gesamtmasse einer Schaufel bei besagtem Massenschwerpunkt ausgegangen. Unter dieser Annahme wird die reale Kraft in der Blisk geringer sein, wodurch eine gewisse Sicherheit für die Materialien miteinbezogen wird. Die Sicherheit gegen Bauteilversagen wird weiterhin aufgrund eines geringeren Radius vom

Massenschwerpunkt sowie einer reduzierten Masse zur Fliehkraftberechnung unter realen Bedingungen erhöht. Die Kräfte- und Spannungsberechnung bei den getroffenen Vereinfachungen dieser Arbeit sind in der folgenden Tabelle 3.3 zusammengefasst. Für die Massenbestimmung wird bei ox-CMC die mittlere Dichte von WHIPOX verwendet. Die Dichte des Inc713LC ist von einem Hersteller dieses Werkstoffes, Cannon Muskegon Corporation (Muskegon, USA), entnommen worden [24].

Das Volumen beträgt

$$V = 25 \times 35 \text{ mm}^3 = 0,875 \text{ cm}^3$$

bei einer Winkelgeschwindigkeit von

$$\omega = 2\pi n = 6283,19 \text{ 1/s}$$

und die Zugspannung wird durch die Fliehkraft folgend

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

nach dem *Taschenbuch für Maschinenbau* berechnet [23].

Größe	Inc713LC	ox-CMC
Dichte [g/cm ³]	8,00	3,02
Masse [g]	7,00	2,64
Fliehkraft [N]	14508,3	5476,9
Drehmoment [Nm]		50,65
Biegekraft [N]		41,95
Zugspannung [MPa]	580,3	219,08

Tabelle 3.3 Kräfte- und Zugspannungsberechnung der zwei Werkstoffvarianten

Da in der Schaufel die Fliehkraft um einiges größer als die Biegekraft ist und der ox-CMC Biegespannungen besser als Zugspannungen aufnehmen kann, wird die Biegespannung nicht berechnet und im weiteren Verlauf der Arbeit vernachlässigt. Bei Betrachtung des Spannungsdiagramms für IN100 in Abbildung 3.8 und den Zugfestigkeiten für WHIPOX aus Tabelle 2.2 liegen die berechneten Zugspannungen im kritischen Bereich beider Materialfestigkeiten. Trotz dieses Problems werden beide Materialien unter Betrachtung der oben erwähnten Einflussfaktoren nicht

ausgeschlossen. Es führt jedoch zu der Notwendigkeit einer simulationsbasierten Untersuchung von den Spannungsspitzen und -verläufen an unterschiedlichen Stellen der Blisk. Eine Simulation würde den zeitlichen Rahmen dieser Arbeit übersteigen und muss deshalb in einem weiteren Projekt erfolgen.

4 Fertigungsstrategie

In diesem Kapitel wird die Entwicklung einer Fertigungsstrategie unter den zuvor beschriebenen Rahmenbedingungen dokumentiert. Dafür werden zunächst die Fertigungskonzepte aufgrund eigener Ideen und Recherchen zu vergleichbaren Problemstellungen erläutert. Bei deren Entwicklung sind die Erkenntnisse der beiden Studienarbeiten über die Antennenabdeckung für ReFEx [17] und die Analyse von U-Profilen [14] eingeflossen. Nach Vorgabe des Instituts für Antriebstechnik ist vorerst keine Änderung des Bliskdesigns aus Abbildung 3.7 vorgesehen. Deshalb soll die Fertigungsstrategie unter Verwendung der Nextel 610 Fasern diesen Entwurf umsetzen. Die Vorgabe beschränkt die Freiheiten bei der Auswahl während der Prozessentwicklung, führt jedoch zur Gewährleistung der Turbineneffizienz. Aus der Ermittlung des funktionalen Systems (Abbildung 3.4) ist es möglich die Geometrie der Grünkörper-Blisk zu vereinfachen. Ohne Berücksichtigung des Aufwands zur Nachbearbeitung werden im Grünkörper die Schaufeln prismatisch hergestellt und im Anschluss präzise ausgefräst oder geschliffen. Darüber hinaus ist der Scheibenbereich als homogener Zylinder betrachtet. Durch das deutlich reduzierte Gewicht kann dort Masse zum Auswuchten hinzugefügt werden.

Nach Konzipieren verschiedener Lösungsprinzipien wird die Bewertung in einer interdisziplinären Projektgruppe durchgeführt und dokumentiert. Die Bewertungskriterien der Nutzwertanalyse entsprechen den unabhängigen Teilzielen des Zielsystems aus Abbildung 3.6. Daraufhin wird ein weiteres Konzept in Kapitel 4.3 erörtert, welches in der abschließenden Bewertungsrunde aufgefallen ist und wofür eine Machbarkeitsstudie erfolgt. In dem letzten Abschnitt wird aus dem best-bewerteten Fertigungskonzept eine Strategie zur Ausarbeitung der Infusionswerkzeuge gezeigt.

4.1 Fertigungskonzepte

In der Konzeptionsphase dieser Arbeit ist bei Betrachtung gängiger Triebwerkskomponenten die Segmentierung für eine Mikrogasturbine aufgefallen. Diese würde die Geometrien des Infusionsprozesses durch getrennte Schaufel- und

Wellenstücke deutlich vereinfachen. Darüber hinaus wäre eine Fehlerquote der Schaufeln durch Verformen während des Sinterns unproblematisch. Durch Ersetzen von fehlerhaften Schaufeln ist keine gesamte Blisk eine Fehlproduktion. Eine Herausforderung bildet dabei die Anbindung von Schaufel zur Scheibe, für die zwar bekannte Konzepte (siehe Abbildung 4.1) existieren, die Umsetzung aus ox-CMC jedoch nicht beurteilungsfähig ist.



Abbildung 4.1 Segmentierung bei Kraftwerkturbinen [25]

Dieses Konzept ist nicht in der Bewertung aufgeführt, da es per Definition keine Blisk ist und somit die Anforderungsliste nicht erfüllt. Zur Vervollständigung der Konzeptionsphase und zum Aufzeigen des Potentials von austauschbaren Verlustteilen ist es an dieser Stelle dokumentiert worden.

Der Anforderungsliste nach, soll die Faser im oxidkeramischen Infusionswerkstoff aus Nextel 610 bestehen. Da die Preform beim Infusionsverfahren die größte Herausforderung darstellt, beschäftigen sich die folgenden Fertigungskonzepte zur Herstellung einer Turbinenblisk aus ox-CMC mit der inneren Faserstruktur aus verfügbaren Varianten dieses Materials. 3M produziert Nextel 610 mit unterschiedlichen Faserbündelstärken von 1.500 bis 20.000 Denier¹. Diese Einheit entspringt der französischen Seidenindustrie und klassifiziert das Gewicht einer Faser in Gramm auf 9.000 m Länge [26]. Für die Konzepte ist eine Faserstärke von 3.000 Denier vorgesehen. Diese Stärke lässt eine Auswahl von Endlofasern des Wickelverfahrens, Kurzfasern und dem DF-19-Gewebe aus Abbildung 4.2 (links) zu. In der Abbildung (rechts) ist die schematische Webstruktur dieses Satin- oder auch Atlas-8-Gewebes dargestellt. Hierbei liegt der horizontal verlaufende Schussfaden² über jedem achten, vertikal aufgespannten

¹ 1 Denier \equiv Gewicht von 1 g auf 9.000 m Länge eines Faserbündels [21]

² Schussfäden sind parallele Fäden quer zum aufgespannten Kettfaden [21]

Kettfäden³ [26]. Nach Entschlichten eines DF-19-Gewebes besitzt dieses eine durchschnittliche Dicke von 0,43 mm und ein Flächengewicht von 610 g/m² [27].

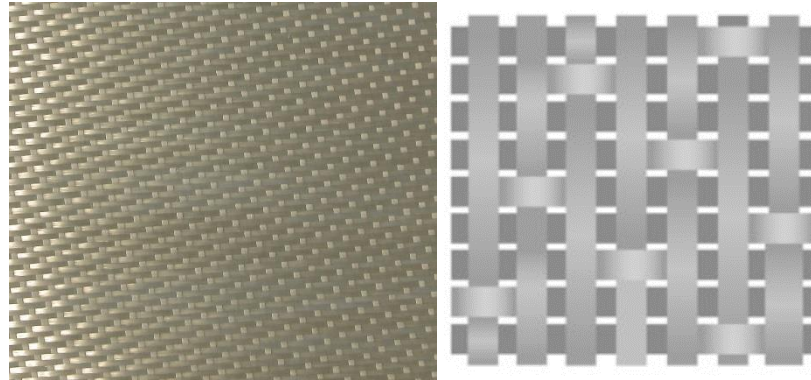


Abbildung 4.2 Satin- oder Atlas-8-Gewebe; links DF-19-Strukturgewebe von 3M, rechts Detailansicht des schematischer Bindungsverlaufes [21]

Am Ende jedes Konzeptes wird zusätzlich eine Einschätzung der zu erwartenden Materialkosten für eine Blisk angegeben. Die Kosten des Schlickers sind im Vergleich zu der Faser verschwindend gering und werden dabei nicht miteinbezogen.

4.1.1 Quasi-isotroper ox-CMC Rohling

Das Fertigungskonzept dieses Abschnitts umfasst die Herstellung eines quasi-isotropischen ox-CMC Rohlings. Aus diesem kann die gewünschte Geometrie der Turbinenblisk durch abtragende Verfahren, wie etwa Fräsen, gefertigt werden.

Der Ursprung dieser Idee ist auf die Lastorientierung von Fasern im FKV zurückzuführen. Hierfür zeigt Abbildung 4.3 das maximale Spannungspotential von CFK mit verschiedenen Faserrichtungen in einem repräsentativen Bauteil. Die Festigkeit ist bei der unidirektionalen Orientierung (rot) zwar in 0° und 180° am größten, dafür in fast allen anderen Richtungen verschwindend gering. Ein Ansatz zur Kompensation dieser Schwachstelle ist die Verwendung einer bidirektionalen Faserorientierung (blau), welche gemäß der Abbildung die Belastungsrichtungen 90° und 270° zusätzlich abdeckt. Dadurch wird allerdings das maximale Spannungspotential verringert.

³ Kettfäden werden in Längsrichtung aufgespannt und mit Schussfäden verwoben [21]

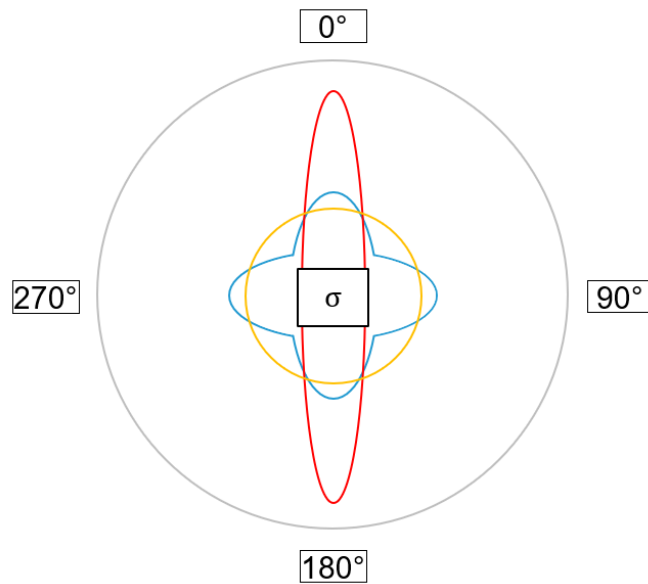


Abbildung 4.3 Spannungspotential von Faserverbundkunststoffen bei verschiedenen Faserorientierungen anhand von CFK; **rot** unidirektional, **hellblau** bidirektional, **orange** quasi-isotrop (vgl. [28])

In der bidirektionalen Struktur sind beliebige Faserrichtungen weiterhin nicht abgedeckt. Da bei der Blisk allerdings durch 23 Schaufeln in fast jede Ausbreitungsrichtung lastorientierte Fasern angestrebt werden sollen, muss die Struktur quasi-isotropisch aufgebaut sein. Die Faserrichtungen zur Erzeugung von einem quasi-isotropischen Rohlings werden alternierend angeordnet, sodass in jeder Ausbreitungsrichtung die gleichen Spannungswerte zu erwarten sind. Die maximal ertragbaren Zugspannungen dieses Werkstoffes werden höher als die 45° gerichtete Belastung von WHIPOX aus Tabelle 2.2, aber deutlich unterhalb der maximalen Materialfestigkeit vermutet.

Dieses Konzept ist beispielsweise zum Schutz der Antennen von ReFEx in einer vorherigen Studienarbeit verfolgt worden [17]. Da bei der Turbinenblisk die Schaufeln jedoch circa alle 15,65° radial nach außen zeigen und bei jeder Schaufel möglichst die unidirektionale Beanspruchung angestrebt werden soll, bietet sich quasi-isotropisches Material mit diesem Ziel unter entsprechender Verdrehung an. Schematisch zeigt folgende Abbildung 4.4 kreisförmige Gewebezuschnitte, die mit der genannten Verdrehung übereinander gelagert werden und bei denen die 0° Faserrichtung (Kettfaden) mit Pfeilen gekennzeichnet ist. Die senkrecht dazu verlaufende Faserrichtung (Schussfaden) ist zur Übersichtlichkeit nicht aufgeführt, begünstigt aber das quasi-isotropische Materialverhalten.

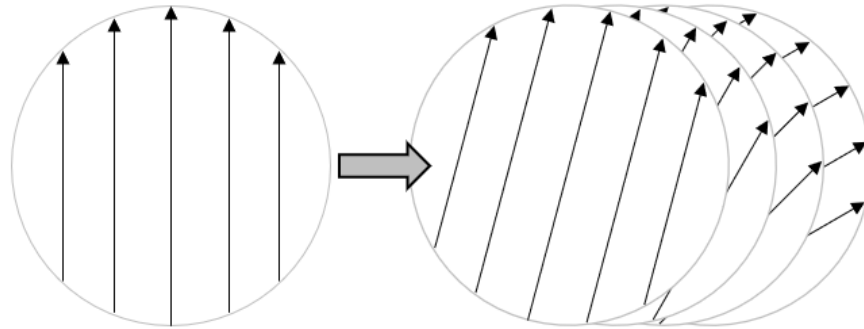


Abbildung 4.4 Gewebepreformation eines quasi-isotropischen ox-CMC Rohlings durch Überlagerung verdrehter Gewebelagen

Für die Bliskhöhe von 15 mm werden etwa 35 DF-19-Gewebelagen benötigt. Damit jede Schaufel ein gleiches Materialverhalten aufweisen kann, wird eine integrale Anzahl an Geweben, orientiert in Ausbreitungsrichtung einer Schaufel, benötigt. Die berechnete Dicke für zwei Gewebe pro Schaufel (46 Gewebelagen) beträgt circa 19,8 mm. Damit die zuvor genannte Dicke erzielt wird, muss der Werkstoff um bis zu 31,8 % komprimiert werden. In der Studienarbeit zu den U-Profilen ist die Infiltrationsgüte durch eine Komprimierung der Gewebe um 20 % ausreichend gewesen [14]. Aus den Einschätzungen von WF führt die größere Kompression nicht zu Infiltrationsproblemen, sondern nur zur Erhöhung der Materialdichte. Dieser Punkt muss vor der Produktion allerdings ausreichend validiert werden. Für den Gewebeverbrauch einer Blisk fallen Kosten von etwa 1.200 € an.

4.1.2 Kurzfaserpresen

In der zweiten Überlegung für die Faserstruktur der Blisk dient ein Fertigungsverfahren von BT als Vorlage. In dem Institut werden SiC-Kurzfasern in eine Form gefüllt und mittels eines Heißpressverfahrens von Harz unter Druck infiltriert. Auf die Oxidkeramik übertragen, werden die Nextel 610 Kurzfasern analog in ein präzises Formwerkzeug gegeben und unter Kompression der Fasern infiltriert. Eine Erhitzung ist dabei nicht notwendig. Dieser Ablauf ist in Abbildung 4.5 schematisch visualisiert.

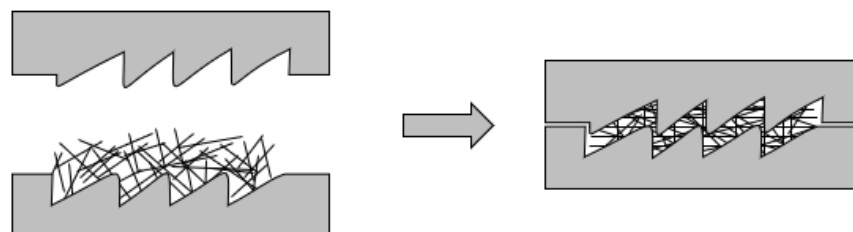


Abbildung 4.5 Fertigungskonzept von Kurzfaserpresen zur Herstellung der ox-CMC Blisk

In dem betrachteten Verfahren sind zwei wichtige Aspekte zu beachten. Zum einen besitzen die Kurzfasern, wie bereits beschrieben, eine Kunststoffschlichte. Bereits nach dem Ausbrennen erweist sich die Handhabung von Geweben schwierig. Diese Herausforderung ist bei den Kurzfasern ohne stabilisierende Struktur erwartungsgemäß noch größer. Zum anderen wird das Materialverhalten stark von der Länge der Fasern bestimmt. Der Hersteller 3M bietet die Nextel 610 Kurzfasern aus Abbildung 4.6 in den Längen von 3,2 mm bis 12,7 mm an. Dabei schaffen längere Fasern eine gerichtete Lastoptimierung, ähnlich dem Effekt von unidirektionaler Belastung aus vorherigem Kapitel 4.1.1. Kürzere Fasern sorgen für ein homogeneres Materialverhalten [29]. Genauere Aussagen über Belastungsmöglichkeiten lassen sich an dieser Stelle aufgrund fehlender Materialversuche nicht treffen. Nach BT sind diese allerdings nicht sehr gut zu bewerten. Kennwerte werden im Bereich einer Belastung in 45°-Orientierung von Proben mit Gewebe erwartet.



Abbildung 4.6 Nextel 610 Kurzfasern von 3M [27]

Die Kurzfasern können durch Materialverschnitt anderer Projekte im Institut hergestellt werden, weshalb bei dem Konzept nur sehr geringe Materialkosten anfallen werden.

4.1.3 Preform aus dreidimensionalem Gewebe

In diesem Konzept wird eine Preform verwendet, bei der aus einem oder mehreren Faserbündeln ein drei-dimensionales Gewebe hergestellt wird. Die Weiterentwicklung eines 2D-Gewebes, wie DF-19, erweist sich durch die zusätzliche Ebene als schwierig. Ziel ist das Herstellen einer orthogonalen Webstruktur vergleichbar mit Abbildung 4.7. Ansatz hierfür ist beispielsweise ein Oxidkeramikschlauch. Diese Variante wird allerdings stark von dem gewünschten Bauteil begrenzt. Beispielsweise bei einer Welle, bei welcher die unterschiedlichen Durchmesser und Übergänge die Auswahl einer passenden Schlauchgröße verkomplizieren, oder gar ausschließen. Erfolgreich sind nach gezeigtem Schema bereits mehrlagige Gewebe aus Carbon- oder Kunststofffasern

umgesetzt worden. Das Verweben von Fasern in dritter Dimension sorgt für ein ideales Materialverhalten, da sich die Fasern nicht nur in einer Ebene gegenseitig stützen. Besonders bei der Nextel 610 Faser ist das Erzeugen einer solchen Struktur durch Fasersteifigkeit und sprödes Materialverhalten erschwert. Aus Keramik konnte bei der Recherche in diesbezüglich forschenden Abteilungen von Instituten der Universität Bayreuth, Stuttgart oder Dresden nichts Vergleichbares gefunden werden.

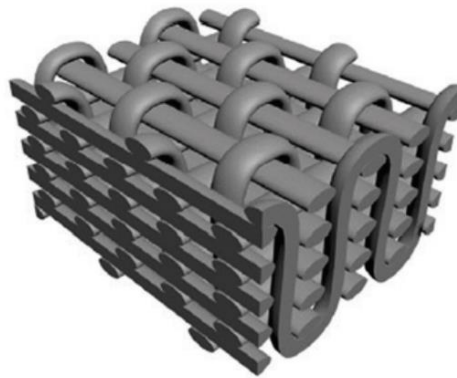


Abbildung 4.7 orthogonale 3D-Webstruktur [30]

Lediglich im Zentrum für Hochtemperatur-Leichtbau (HTL) des Fraunhofer-Instituts für Silicatforschung wird aktuell die Fertigung von 3D-Preformen aus der Nextel 610 Faser erforscht. Mit der Faser ist bereits ein mehrlagiges Gewebe erfolgreich hergestellt worden, welches nach aktuellem Stand entschlichtet und infiltriert werden könnte. Eine komplexe, drei-dimensionale Struktur ist vom HTL in Abbildung 4.8 für die Entwicklungsstudie eines Lüfterrades aus einer exemplarischen Faser durchgeführt worden. Hierbei ist zunächst eine einstufige Preform erstellt worden.

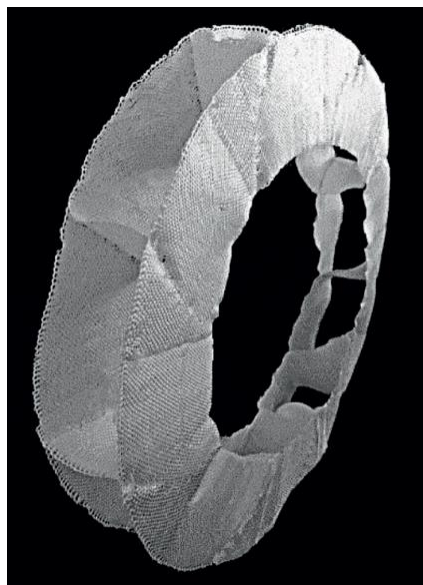


Abbildung 4.8 einstufige Preform für ein Lüfterrad aus Entwicklungsstudie von Grosch [31]

Wegen der zuvor erwähnten Verarbeitungsproblematik von Nextel 610 geht das HTL im Frühjahr 2023 in die Entwicklungs- und Testphase zur Umsetzung einer solchen Struktur aus Nextel 610 über [31].

Für die Blisk müsste die Preform eine Struktur ähnlich dem Schema aus Abbildung 4.9 besitzen. Zur Übersichtlichkeit sind die Nebenrichtungen analog zu den vorherigen Konzepten vernachlässigt und Hauptrichtungen durch Pfeile gekennzeichnet. Die Fasern können konzentrisch zum Mittelpunkt aufgebaut werden, wodurch die Stabilität in der Scheibe erzeugt wird. Im Schaufelbereich sind Faserrichtungen zur Schaufelspitze verjüngend anzustreben. Alternativ kann eine prismatische Schaufel in der Preform geometrisch entsprechend komprimiert werden. Auf diese Weise werden in der Variante dieses Konzepts komplexe und variable Strukturen aus 3D-Gewebe hergestellt, welche den gewünschten Belastungszuständen angepasst werden können.

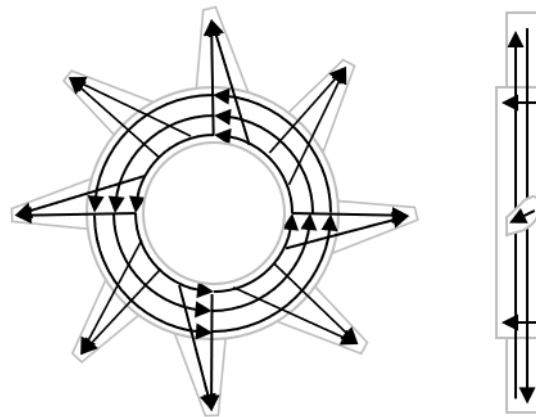


Abbildung 4.9 Schema einer möglichen 3D-Preform für die Blisk

Der Faserverbrauch wird durch eine optimale Gewebestruktur minimiert. Die Verarbeitung einer Preform wird zu Kosten führen, die vermutlich größer als die der Industriestandards von 3M ausfallen werden. Eine fundierte Kosteneinschätzung dieses Konzeptes kann aufgrund des Entwicklungsstadiums nicht gegeben werden.

4.1.4 Überlagerung von geometrisch angepassten Gewebezuschnitten

Das Konzept dieses Abschnittes verwendet zur Herstellung der Faserstruktur das DF-19-Gewebe. Im Vergleich zum ersten Konzept des quasi-isotropischen Rohlings besteht eine Schicht nicht aus einem zusammenhängenden Gewebe, sondern wird aus mehreren Gewebezuschnitten drapiert. Konzeptziel ist, in jeder Schaufel eine der Fliehkraft gerichtete Faserorientierung anzustreben, die in jeder Lage gleich ist. Dabei werden Gewebe in die Form aus Abbildung 4.10 (links) zugeschnitten, bei der die Kettfäden analog zu den vorherigen Konzepten durch Pfeile dargestellt sind. Der mittlere

Pfeil ist für die folgenden Abbildungen rot gekennzeichnet. Mit dieser Kennzeichnung ist die Lage des Zuschnittes in einer Gewebeschicht hervorgehoben und das Konzept somit leichter nachzuverfolgen. In dem Schema der Abbildung werden zur Übersicht nur acht Schaufeln gezeigt. Die Zuschnitte werden kreisförmig auf Stoß aneinander geordnet, sodass sie nicht überlappen und lokal den Faservolumengehalt erhöhen können.

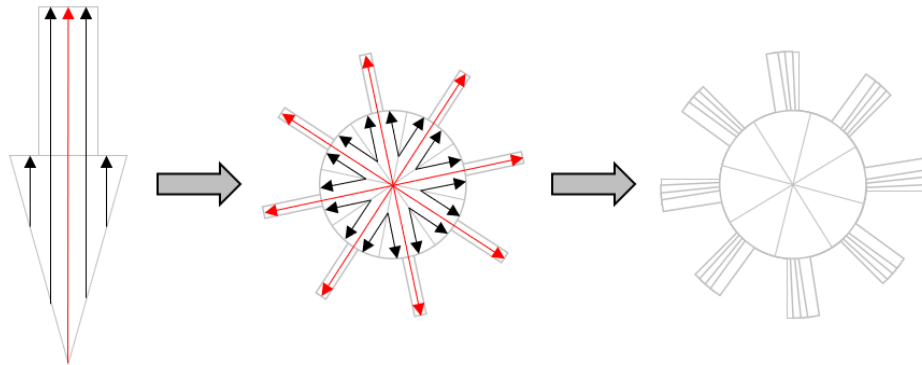


Abbildung 4.10 schichtweises Drapieren der Faserstruktur aus keilförmigen Gewebezuschnitten mit Mittellinie jedes Zuschnitts in rot

Innerhalb einer Schicht werden so die mittleren Fasern des Gewebes in Ausbreitungsrichtung der Schaufel platziert. Über die Dicke der Blisk von 15 mm werden die Schichten von Zuschnitten leicht verdreht angeordnet (siehe Abbildung 4.10 rechts), sodass Stoßstellen von Fasern schichtweise überlagert werden. Die Verdrehung ist dabei nach einem ähnlichen Verlauf der roten Kurve aus Abbildung 4.11 innerhalb des Querschnitts der Schaufelspitze anzupassen. Dabei ergeben sich die Positionen jedes Zuschnitts innerhalb einer Schicht aus dem Drehpunkt der Blisk und dem Punkt auf der roten Kurve. Unter Verwendung des oben gezeigten Zuschnitts werden die Schaufeln des Grünkörpers einen prismatischen Querschnitt, der vergleichbar mit der weißen Begrenzung aus Abbildung 4.11 ist, besitzen. Für eine Blisk fallen nach dieser Variante Gewebekosten von etwa 1.200 € an.

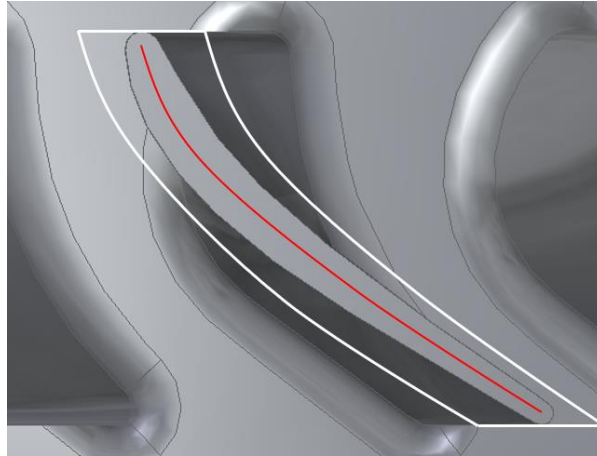


Abbildung 4.11 Draufsicht einer Turbinenschaufel unter dem Konzept der Überlagerung von geometrisch angepassten Gewebezugschnitten; **rot** Mittellinie der Gewebezugschnitte, **weiß** Kontur der Schaufeln im Grünkörper

4.1.5 Quasi-isotropes Wellenstück mit Verdrehung von Gewebezugschnitten

Das letzte der hier vorgestellten Konzepte ist eine Kombination des quasi-isotropischen CMC-Rohlings und den übereinander gelagerten Gewebezugschnitten. Anders als bei den vorher gezeigten Varianten wird ein inhomogener Grünkörper hergestellt. Dies ist durch die unterschiedliche Faserstruktur von Scheibenteil und Schaufeln in Abbildung 4.12 zu erklären. Im oberen und unteren Scheibenteil wird durch Stapeln verdrehter Gewebelagen ein quasi-isotropischer Werkstoff erzeugt. In den Schaufeln ist wie zuvor eine lastorientierte Faserrichtung zu bevorzugen, die mittels keilförmiger Gewebezugschnitte realisiert wird. Die Form der Zuschnitte ist aus Abbildung 4.12 (rechts) zu entnehmen, bei der die Schaufelfläche etwas breiter als bei dem vorherigen Konzept aus Abschnitt 4.1.4 ist. Zur verbesserten Nachvollziehbarkeit sind die Faserrichtungen der Kettfäden im Gewebe durch Pfeile markiert. Die mittlere Faserlinie im Gewebe ist wiederum durch einen roten Pfeil gekennzeichnet.

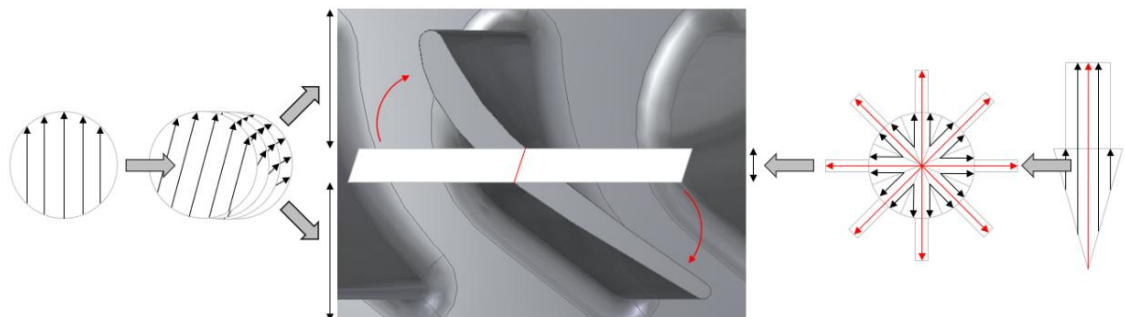


Abbildung 4.12 Draufsicht einer Turbinenschaufel mit schematischer Struktur des Faseraufbaus aus Verdrehung von Gewebezugschnitten und quasi-isotropischen Material

In der Drapierung der Fasern werden zunächst schichtweise DF-19-Gewebelagen für den Scheibenbereich aufgebaut. Daraufhin werden die Zuschnitte aneinandergereiht und zu jeder Ebene leicht versetzt übereinandergelegt. Die Verschiebung der Ebenen ist durch das weiße Parallelogramm in dem mittleren Ausschnitt der Abbildung 4.12 zu erkennen. Anschließend wird der restliche Scheibenbereich mit Gewebelagen vervollständigt. Aus den überstehenden Flächen werden die Schaufeln im Werkzeug geformt. Dies erfolgt mittels Verdrehung des erzeugten Parallelogramms nach den rot eingezeichneten Pfeilen in der Draufsicht mittig der Abbildung. Dabei verkürzt die ebene Verschiebung von den Zuschnitten die maximale Verdrehung des Gewebes. Zusammen mit der mittleren Lage der Faserstruktur für die Schaufeln wird die nötige Verdrehung minimiert. Die Idee dahinter ist die Integrität der Faserstruktur möglichst gut erhalten zu können, sodass ein Faserbrechen in diesem Vorgang vermieden wird.

Mit dieser Faserstruktur wird im Vergleich zu den Konzepten aus Abschnitt 4.1.1 und 4.1.4 weniger Gewebeverschnitt erzeugt, weshalb hier DF-19-Gewebe im Wert von 550 € verbraucht wird.

4.2 Bewertung

Nachdem die Fertigungskonzepte entworfen worden sind, erfolgt in diesem Kapitel die Bewertung mittels Nutzwertanalyse. Wie in Kapitel 3.1.3 bereits erwähnt, ist dies eine subjektive Bewertungsmethode. Um ein objektives Ergebnis zu ermöglichen, führt eine interdisziplinäre Arbeitsgruppe die Bewertung durch. Darin sind die Bewertungskriterien diskutiert und anschließend die Stufengewichtungen vom Zielsystem aus Abbildung 3.6 getroffen worden. Wegen des zeitlichen Aufwandes bei einstimmiger Punktbewertung durch alle Teilnehmer ist sich für eine individuelle Punktbewertung jedes Teilnehmers entschieden worden. Die Teilnehmer sind drei Gruppen, beziehungsweise Instituten zugehörig. Daraufhin wird die durchschnittliche Punktzahl jeder Gruppe berechnet, sodass eine repräsentative Bewertung durch jedes Institut erfolgt. Es sind zwei Personen von BT wegen zahlreicher Projektumsetzungen aus keramischen Faserverbundwerkstoff für den verfahrenstechnischen Hintergrund vorgesehen. Drei Teilnehmer von AT vertreten die Ansicht des Auftraggebers. Drei weitere Bewertungen von WF betrachten den werkstofftechnischen Hintergrund von ox-CMC. Zusätzlich zu den verschiedenen Prioritäten der Einrichtungen fließt eine gleichgewichtete Punktbewertung des Projektingenieurs dieser Arbeit ein. Die folgende Tabelle 4.1 zeigt die zusammengefassten Ergebnisse der vier Parteien aus der Bewertungsrunde in einer kardinalen Zielwertmatrix nach *Zangemeister* (vgl. [4, S. 336]).

Es können integrale Punkte von 0 bis 10 vergeben werden, wobei 0 die schlechteste und 10 die beste Bewertung ist. Folglich stellt eine hohe Gesamtpunktzahl in der rechten Spalte der Tabelle ein gut bewertetes Konzept dar. Da in der Bewertungsrunde Unklarheiten innerhalb der Punktevergabe aufgetreten sind, folgt eine beispielhafte Bewertung: „Niedrige Herstellungskosten sind gut zu bewerten, etwa mit einer 8“. Ein ideales Konzept würde eine Gesamtpunktzahl von 10 erreichen.

In der Tabelle sind die Konzepte nach Kapitel 4.1.1 bis Kapitel 4.1.5 der Reihe nach aufgeführt:

Konzept 1: quasi-isotropischer ox-CMC Rohling

Konzept 2: Kurzfaserpresse

Konzept 3: Preform aus drei-dimensionalem Gewebe

Konzept 4: Überlagerung von geometrisch angepassten Gewebezuschnitten

Konzept 5: quasi-isotropisches Wellenstück mit Verdrehung von Gewebezuschnitten

Bei den drei Kriterienbereichen handelt es sich um die aus dem Zielsystem kategorisierten allgemeinen, werkstoff- und prozessbezogenen Kriterien. Die detaillierten Beschreibungen der Kriterien sowie die in der Nutzwertanalyse durchgeführten Berechnungen sind in Kapitel 3.1 nachzulesen.

Bei der Auswertung der vergebenen Punktzahlen ist aufgefallen, dass die grundsätzliche Einschätzung der meisten Kriterien in einem gewissen Bereich übereinstimmt. Ein Beispiel hierfür ist die maximale Abweichung von zwei Punkten in der Belastungsmöglichkeit. Eine von wenigen Ausnahmen gibt es etwa bei den Einschätzungen des Entwicklungsaufwandes. Ein Erklärungsansatz dafür ist, dass aktuell sehr wenige Referenzmöglichkeiten für das Infusionsverfahren existieren und der Entwicklungsablauf in den Konzepten angeschnitten und nicht detailliert werden konnte. Darüber hinaus sind die beiden Referenzstudien von ReFEx [17] und den U-Profilen mit Rändern [14] aus zeitlichen Gründen nicht im Detail diskutiert worden.

Kardinale Zielwertmatrix für die Fertigungsstrategie der CMC-Blisk															
Kriterienbereiche		Allgemein			Werkstoff				Prozess						
i →		1	2		3	4	5		6	7	8				
Kriterien		Herstellungskosten	Reproduzierbarkeit		Belastungsmöglichkeit	Know-how	werkstoffgerechter Entwurf		Faserhandhabung	Prozesskomplexität	Entwicklungsaufwand				
Gewichtung		18	7	Σ 25	25	5	15	Σ 45	12	8	10	Σ 30	Σ 100		
Fertigungskonzepte	Konzept 1	AT	5,5	7,5	1,52	2	7	1,5	1,08	8,5	8	9	2,56	5,15	5,18
		BT	2,5	9	1,08	2	8,5	4	1,53	9	6	8	2,36	4,97	
		WF	4,7	6,3	1,28	3,67	6,7	2,67	1,65	7,7	8	7,33	2,29	5,23	
		selbst	3	10	1,24	3	10	2	1,55	8	9	9	2,58	5,37	
	Konzept 2	AT	7,5	8,5	1,95	2	5	3	1,20	8	7	8,5	2,37	5,52	5,17
		BT	6	8,5	1,68	2	7	5,5	1,68	9	3,5	3,5	1,71	5,06	
		WF	8,7	4	1,84	1,33	2,3	5,67	1,30	5,7	6,67	5,33	1,75	4,89	
		selbst	9	9	2,25	2	5	1	0,90	7	8	6	2,08	5,23	
	Konzept 3	AT	1	5	0,53	7	5,5	7,5	3,15	3	2,5	2	0,76	4,44	5,43
		BT	0	8,5	0,60	9	2	9	3,70	4,5	2,5	0	0,74	5,04	
		WF	1,7	8,7	0,91	8	1,7	8,67	3,38	8,3	5	1,67	1,57	5,86	
		selbst	1	9	0,81	9	2	9	3,70	10	6	2	1,88	6,39	
	Konzept 4	AT	5	5	1,25	7,5	4,5	7	3,15	4,5	3,5	4	1,22	5,62	5,57
		BT	1	5	0,53	6,5	4	5,5	2,65	4,5	1,5	0,5	0,71	3,89	
		WF	5,3	6,3	1,40	7	7,3	7,67	3,27	5,3	5,67	4,33	1,53	6,20	
		selbst	6	7	1,57	8	6	6	3,20	6	5	7	1,82	6,59	
	Konzept 5	AT	3	3,5	0,79	7,5	6	7,5	3,30	3,5	2	3	0,88	4,97	5,25
		BT	1	4,5	0,50	7	3	7	2,95	2,5	1,5	2	0,62	4,07	
		WF	5	5,3	1,27	6,67	3	7	2,87	4,7	4	3,67	1,25	5,39	
		selbst	7	6	1,68	8	5	7	3,30	5	4	7	1,62	6,60	

Tabelle 4.1 kardinale Zielwertmatrix für die Bewertung der Fertigungskonzepte einer ox-CMC Blisk nach Vorbild von Zangemeister (vgl. [4, S. 336])

In den beiden rechten Spalten sind die Punktzahlen der vier Gruppen und ein zusammengefasstes Ergebnis aufgeführt. Dabei fällt auf, dass sich die Konzepte im Gesamtergebnis von 5,17 bis 5,57 nur wenig unterscheiden. Die beiden ersten Konzepte haben die geringsten Punktzahlen erzielt, da diese in der Belastungsmöglichkeit und in der Betrachtung des werkstoffgerechten Entwurfes nicht gut abgeschnitten sind. Eine 3D-Preform wirkt durch diese beiden Aspekte scheinbar am sinnvollsten. Da die Entwicklung einer tauglichen Umsetzung bisher in unbestimmter Zukunft liegt, könnte das Fertigungskonzept auch mit bester Bewertung im Verlauf dieser und der darauf aufbauenden Arbeit möglicherweise nicht verfolgt werden. Allerdings stellt die Methode

in Zukunft ein konkurrenzfähiges Konzept zur best-bewerteten Lösung dar. In der Nutzwertanalyse hat sich die Überlagerung von geometrisch angepassten Gewebezuschnitten als Lösung herausgestellt. Folglich wird im weiteren Entwurfsprozess einer Fertigungsstrategie die Faserstruktur aus dem erläuterten Fertigungskonzept von Abschnitt 4.1.4 verwendet.

4.3 Machbarkeitsstudie

Bevor im nächsten Kapitel die Infusionstechnologie für die Herstellung einer Blisk aus ox-CMC dargestellt wird, ist ein alternatives Verfahren zur Preform-Herstellung in diesem Abschnitt dokumentiert. In der Bewertungsrunde sind Bedenken bezüglich der Größe von den auftretenden Spannungen diskutiert worden. Hierbei ist von BT das „Tailored Fiber Placement“-Verfahren (TFP) aus der Faserverbundtechnologie zur Herstellung von variabel-axialen Preforms angeregt worden. Bei diesem Verfahren kann die Faserstruktur innerhalb einer Ebene optimal an die Belastungsrichtung und das Materialverhalten angepasst gelegt werden [32]. Beim Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart (IFB) verarbeitet eine solche Legeanlage aktuell Carbonfasern, aus denen beispielsweise Fahrradlenker oder Bremsscheiben hergestellt werden.

Dieses Herstellungsverfahren für eine Preform erscheint nicht nur für die Blisk, sondern allgemein für die Umsetzung von Bauteilen mit komplexen Geometrien aus ox-CMC hinsichtlich der Festigkeiten von lastorientierten Fasern (vgl. Abbildung 4.3) sehr vielversprechend. Deshalb soll in dieser Arbeit vom IFB eine Machbarkeitsstudie zum Ablegen der Nextel 610 Faser durchgeführt werden.

Dafür wird in diesem Kapitel das Herstellungsverfahren kurz betrachtet sowie die in der Machbarkeitsstudie untersuchte Form mit anschließender Ergebnisauswertung gezeigt.

4.3.1 Herstellungsverfahren und Testmodelle

Bei dem TFP-Verfahren werden Fasern auf Spulen von einer Stickmaschine abgewickelt und durch einen Stickkopf auf ein Tuch genäht. Schematisch zeigt Abbildung 4.13 (links) diesen Vorgang des Aufnähens. Darin ist zu erkennen, dass hierbei die Faser nicht vernäht, sondern mit einem Faden auf das Tuch gespannt wird. Faden und Tuch zum Vernähen der Faser können aus einer Reihe von unterschiedlichen Materialien ausgewählt werden. In der Abbildung rechts ist eine beispielhafte Geometrie des IFB aus Carbonfasern zu erkennen. Solche Strukturen einer Preform können auf der Stickmaschine eine Größe von bis zu 1,0 x 1,4 m besitzen.



Abbildung 4.13 TFP-Verfahren am IFB der Universität Stuttgart [32]; **links** Prinzipskizze, **rechts** variable Preform-Struktur

Wie in Kapitel 2.3.2 bereits beschrieben, muss die Faser vor dem Infiltrieren entschlichtet werden. Dieser notwendige Schritt hat Auswirkungen auf die Preform-Herstellung mit dem TFP-Verfahren. Beispielsweise verdampfen Tuch und Faden aus einem nicht-temperaturfesten Kunststoff bei der Entschlichtungstemperatur von 750 °C. So würden die Fasern jegliche Struktur vor dem Entschlichten verlieren. Lösungsansätze sind hierfür etwa das Ausbrennen der Kunststoffbeschichtung in einem Werkzeug oder ein abschließendes Vernähen von formgebenden Stellen mit einer Aramidfaser. Diese ist hitzeresistent bis 900 °C und würde bei Sinterung des Grünkörpers unter 1.300 °C verschwinden. Da diese Aspekte unwesentlicher Teil einer Machbarkeit des Faseraufnehmens von Nextel 610 sind, wird nicht weiter auf die verfahrenstechnischen Grundlagen und Möglichkeiten von TFP eingegangen.

Für die Untersuchung der Machbarkeit des Aufnehmens einer Faser hat das IFB bestimmte Vorgehensweisen, die verschiedene Strukturen beinhalten. Diese reichen von 0°/90°-Gelegen bis zu Strukturen vergleichbar mit obiger Abbildung 4.13 (rechts). Um die Umsetzbarkeit einer ebenen Schicht der Turbinenblik aufzuzeigen, versucht das IFB zudem den Pfad aus Abbildung 4.14 abzulegen. Diese Skizze ist mit SolidEdge (Siemens, München, Deutschland) erstellt worden und zeigt einen ähnlichen Verlauf der äußersten Kontur der Turbinenblik. Die überstehenden Köpfe außerhalb des 140 mm Durchmessers werden zur durchgängigen Umleitung der Faser verwendet. Außerdem ermöglichen sie ein präzises Abschneiden der Fasern bei der Gewährleistung einheitlicher Faserrichtungen in der Schaufelspitze.

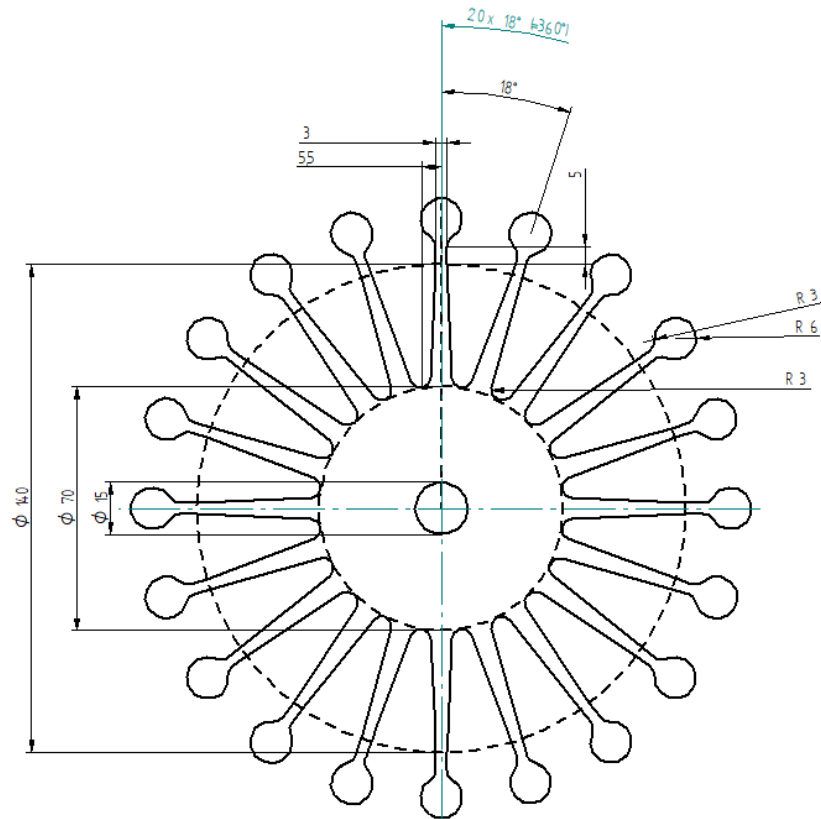


Abbildung 4.14 Skizze eines beispielhaften Faserverlaufes für eine mögliche Preformkontur der BliSk

Beim Ablegen dieses Pfades beträgt der Radius in Kurven minimal 3 mm. Es existiert bei WF keine Dokumentation, bei welchem Radius Nextel 610 Fasern spröde brechen. Vorversuche haben gezeigt diesen minimalen Radius aus Sicherheitsgründen nicht zu unterschreiten.

4.3.2 Ergebnisse

Zur Vorbereitung des Vernähens von Fasern auf einem Tuch muss das Material zunächst auf kleine Spulen gewickelt werden. In einem ersten Versuch hat es dabei im IFB Schwierigkeiten gegeben. Die Fasern ließen sich nur unter viel Aufwand umspulen, da das Bündel ständig ausgefranst ist. Aus persönlichen Gesprächen in der Abteilung für Struktur- und Funktionskeramik ist dabei ein möglicher Einfluss durch Materialalterung aufgefallen. Schon zuvor hat es beim Handhaben von nicht-neuwertigen Filament-Rollen Probleme gegeben. Der zweite Versuch ist in Abbildung 4.15 gezeigt. Dabei ist mit geringer Drehgeschwindigkeit ein gutes Ergebnis erzielt worden.

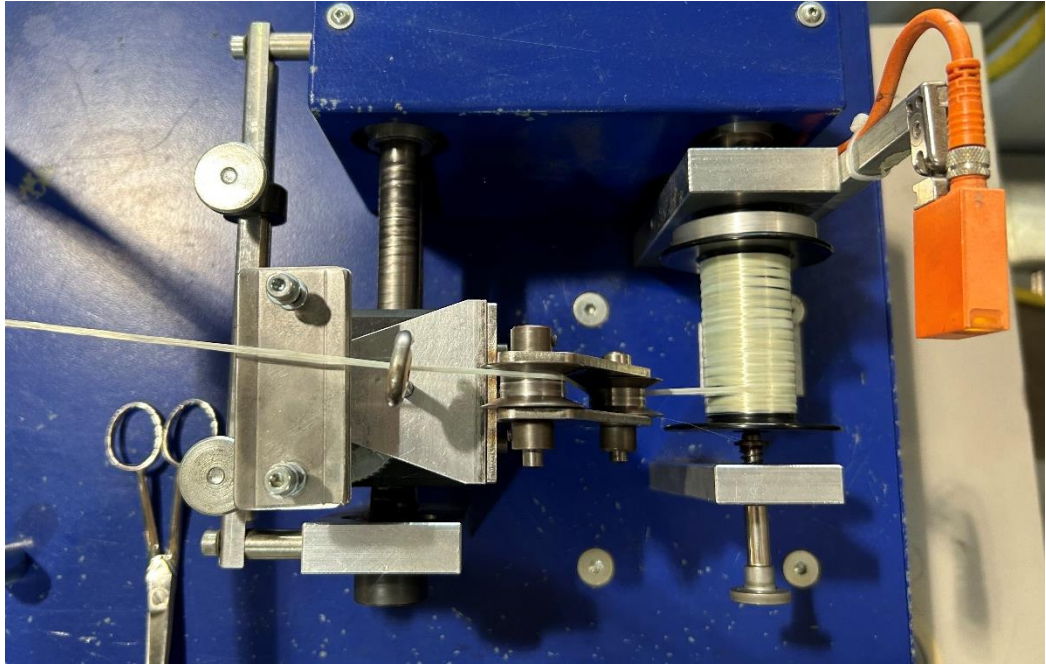


Abbildung 4.15 Aufwicklung der Nextel 610 Faser auf eine Spule der Stickmaschine am IFB

Nach der Vorbereitung des Materials kann die Aufnahmbarkeit der Nextel 610 Faser getestet werden. Hierfür hat das IFB gängige Schemata, um unterschiedliche Pfade mit kritischen Stellen abzulegen. Das erste dieser Muster ist ein $0^\circ/90^\circ$ -Gelege. Dabei ist ein Spröbruch der Faser bei dem 180° -Richtungswechsel in jeder Reihe des Geleges festgestellt worden. Der Biegeradius ist an diesen Stellen zu klein, weshalb bei einer Umsetzung eines solchen Geleges eventuell mehrere Bahnen übersprungen werden müssen. So kann das Gelege ohne Reihenweises Ablegen der Faser die gleiche Struktur besitzen. Darüber hinaus ist das Brechen der Fasern an diesen Stellen unproblematisch, da die Nutzung des Randes bei den Strukturen mittels TFP nicht notwendig ist, oder durch Vergrößerung der Preform umgangen werden kann.

Das erfolgreiche Vernähen auf dem Tuch lässt so den Test des erstellten Musters aus Abbildung 4.14 zu. Die erstellte Preformkontur einer symbolhaften Blisk ist in Abbildung 4.16 gezeigt. Darin hat das IFB die Preformkontur insgesamt 7-mal übereinander genäht. Danach war die Kontur in Kombination mit dem verwendeten Faden und Tuch nicht weiter zu übernähen. Nach Aussagen des IFB lässt die Nextel 610 Faser jedoch weitere Schichten zu.

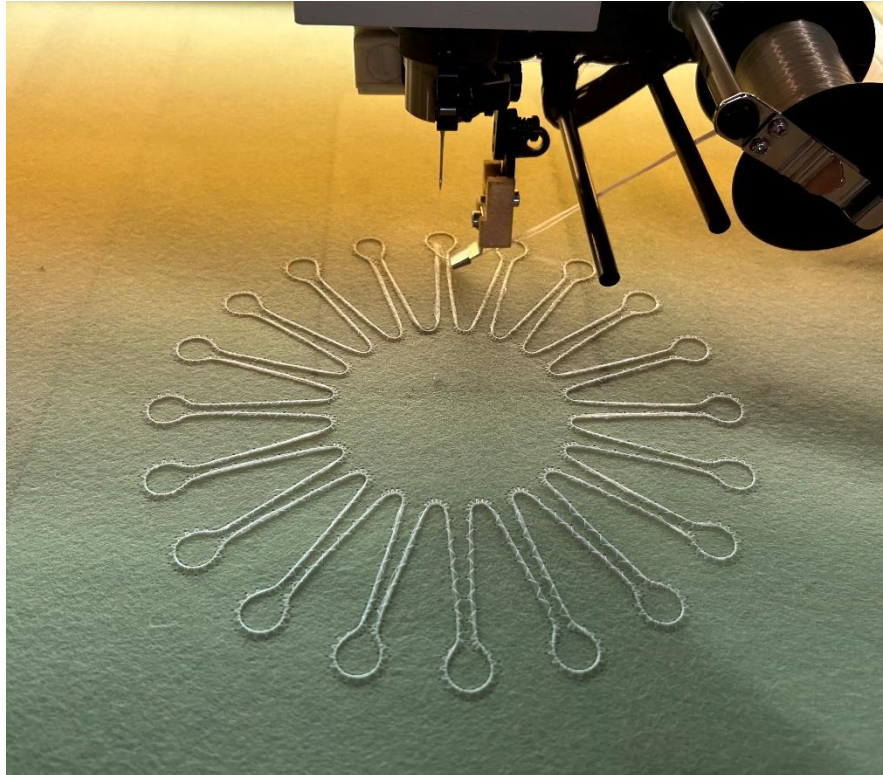


Abbildung 4.16 Nextel 610 Preformkontur einer beispielhaften Blisk am IFB mit der ersten von sieben übereinander genähten Schichten Material

4.4 Infusionstechnologie

In die Entwicklung einer Infusionstechnologie der Blisk aus ox-CMC fließen die Erkenntnisse und Beobachtungen der Herstellungsprozesse sowie Infusionswerkzeuge von der Antennenabdeckung für ReFEx [17], den U-Profilen mit Rändern [14] und 3DCeraturb mit ein. Diese Projekte formen folglich maßgebend den Infusionsprozess der Blisk.

Für den Entwurf der Infusionswerkzeuge ist laut der strukturellen Planung dieser Arbeit aus Abbildung 3.2 zu Beginn eine Betrachtung der Konstruktionsrichtlinien und Modellvereinfachungen notwendig. Für das Verbiegen von Geweben hat die zweite Studienarbeit zu oben genannten U-Profilen gezeigt, dass ein Radius von einfacher Profilstärke ohne Faserbrüche erzeugt werden kann. Aus der Konzeptbewertung ergibt sich als das zu verfolgende Konzept die Überlagerung von geometrisch angepassten Gewebezuschnitten, wodurch der grundsätzliche Drapierungsablauf festgelegt wird. Innerhalb dieses Fertigungskonzeptes kommt es zu keiner Krümmung von Gewebe, die einem Sprödbruch erliegen könnten. Stattdessen wird die Blisk aus einem Rohling gefräst.

In einem informativen Austausch mit Projektteilnehmern von FFE+ sind das bewertete Konzept und die weiteren Schritte präsentiert worden. Dabei ist der Einwand

aufgekommen, dass das Konzept so zwar die Kräfte in den Schaufeln aufnehmen kann, der Scheibenteil hingegen bei maximaler Drehgeschwindigkeit zerreißen würde. Bei rotierenden Triebwerkskomponenten würden die auftretenden Kräfte und Spannungen drastisch ansteigen, weshalb dieses Konzept angepasst werden muss. Um diese Größen einzuordnen, wird eine Berechnung der Kräfte und Spannungen mit Unterstützung einer Skizze aus Abbildung 4.17 durchgeführt. Dabei ist die Aufhängung der drehenden Masse auf dem 15 mm Durchmesser der Wellenanbindung eingezeichnet. Folglich zieht die zusammengesetzte Masse von Schaufel und zugehörigem Scheibenteil in der Berechnung der Fliehkraft an diesem Punkt. SolidEdge berechnet die Gesamtmasse der Blisk nach aktuellem Entwurf auf Basis des Volumens mit angegebener Dichte. Mit der mittleren Dichte von WHIPOX (3,02 g/cm³) wiegt die Blisk aus ox-CMC 218 g. Daraus ergibt sich in Tabelle 4.2 die zusammengesetzte Masse von einer der 23 Schaufeln mit dem Ausschnitt des Wellenteils.

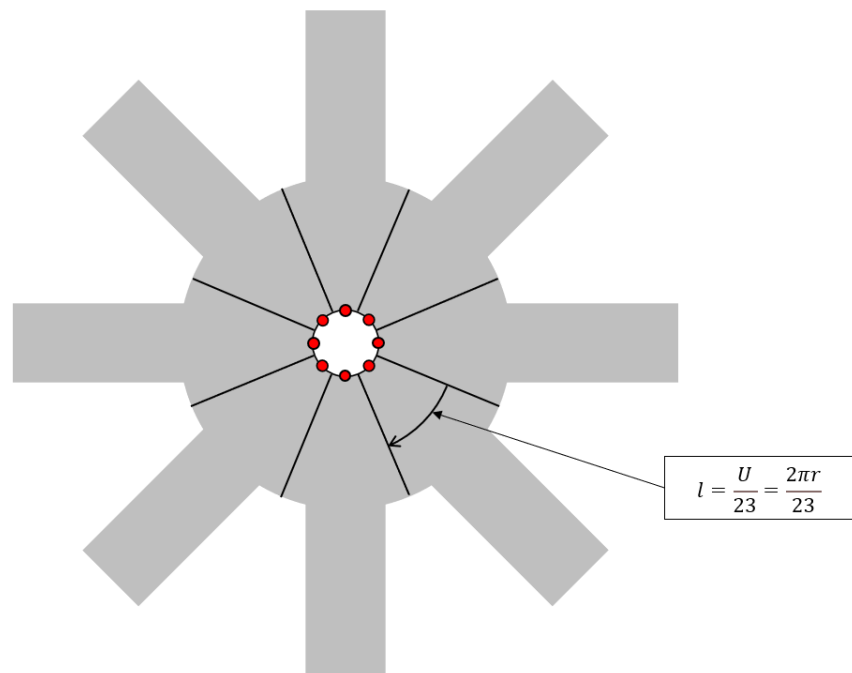


Abbildung 4.17 schematische Skizze der Turbinenblisk mit Drehpunkt (rot) der zusammengesetzten Masse von Scheibe und Schaufel anhand von acht Schaufeln

Die Berechnung der Fliehkraft erfolgt analog zu den Berechnungen aus Kapitel 3.4. Die Querschnittsfläche lässt sich durch die Dicke der Blisk und die Bogenlänge bei besagtem Durchmesser (siehe Abbildung 4.17) bestimmen.

Masse [g]	9,48
Fliehkraft [N]	2806,4
Querschnittsfläche [mm ²]	30,73
Zugspannung [MPa]	91,32

Tabelle 4.2 Fliehkraft und Zugspannung an Durchmesser der Wellenanbindung

An dieser Stelle ist laut Berechnung eine Zugspannung von knapp 91 MPa zu erwarten. Die reduzierte Spannung kann auf die verringerte Fliehkraft zurückgeführt werden. Im Vergleich zu den Berechnungen aus Kapitel 3.4 ist der Radius 7-mal kleiner und die Masse etwa 3,6-mal größer. Aus dieser Differenz kann die niedrigere Fliehkraft resultieren.

Um die Aussagekraft dieser vereinfachten Rechnung zu verstärken, wird zudem die dynamische Beanspruchung umlaufender Bauteile durch Fliehkräfte aus dem *Taschenbuch für Maschinenbau* untersucht [23]. Hierbei handelt es sich um eine gängige Bestimmung bei der Bauteilauslegung von BT. Die darin aufgeführten Berechnungen gründen sich in der Statik sowie Festigkeitslehre und wenden das d'Alembertsche Prinzip an. Zur Auswahl werden verschiedene Zustände von rotierenden Bauteilen behandelt, wie etwa eines umlaufenden Stabes oder Rings [23, S. C38]. Im Falle des zu verfolgenden Konzepts fällt die Auswahl in Abbildung 4.18 auf eine Vollscheibe konstanter Dicke. Der Radius R bezieht sich bei den Ergebnissen aus Tabelle 4.3 auf den äußeren Radius der Scheibe oder Schaufelspitze und r auf den Durchmesser der Bohrung für die Wellenanbindung. In den Berechnungen wird eine Querdehnzahl (ν) von 0,3 verwendet. Für Keramiken liegt diese Eigenschaft zwischen 0,18 und 0,3, weshalb diese Berechnungen durchgeführt werden können [33].

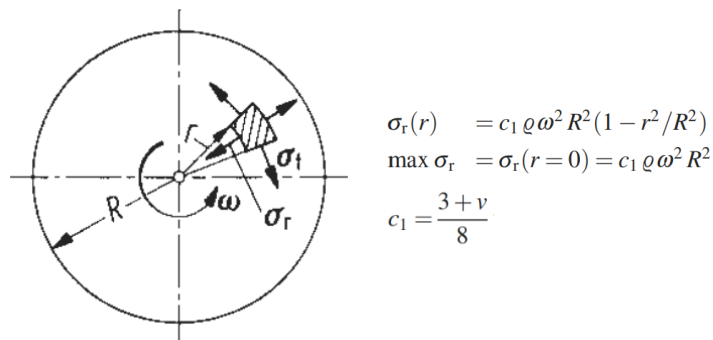


Abbildung 4.18 Zugspannung einer rotierenden Vollscheibe bei dynamischer Beanspruchung (vgl. [23, S. C38])

Mit der Variation des äußeren Radius R ergeben sich folgende Spannungswerte σ_r :

R [mm]	35	70
σ_r [MPa]	57,48	238,09
$\max \sigma_r$ [MPa]	60,25	240,98

Tabelle 4.3 Zugspannungen nach Berechnungen dynamischer Beanspruchung

Bei der Blisk handelt es sich um ein Bauteil mit Spannungen zwischen den berechneten Werten aus Tabelle 4.3. Es kann weder die Spannung einer Scheibe mit 70 mm Radius noch die einer Scheibe mit 35 mm Radius verwendet werden. Allerdings ist anzunehmen, dass durch das geringe Gewicht der Schaufeln eine Tendenz zur Beanspruchung einer kleinen Scheibe vermutet wird. Die zutreffende Spannung wird im Bereich der Berechnungen aus Kapitel 3.4 liegen. Ohne eine numerische Simulation, beispielsweise mittels Finite Elemente Methode, ist allerdings keine zuverlässige Größenordnung der auftretenden Spannungen zu treffen. Um die Kraftaufnahme im Scheibenbereich trotzdem gewährleisten zu können, wird die Faserstruktur lokal verstärkt. Dies erfolgt durch zusätzliche Gewebelagen in diesem Bereich. Die Anzahl orientiert sich an der erfolgreichen Infiltration mit 20-prozentiger Kompression der Gewebe aus der Studienarbeit der U-Profile mit Rändern. Über die geplanten 35 Schichten werden danach sieben weitere Lagen DF-19-Gewebe eingebracht. Neben einer Start- und Endlage sind die restlichen fünf Gewebelagen gleichmäßig, in einem Abstand von sieben Schichten Gewebezuschnitte, in der Blisk verteilt.

Nachdem die Faserstruktur angepasst worden ist, folgt die Erläuterung der auszuarbeitenden Infusionswerkzeuge. Bisher sind der Formbau von 3DCeraturb, den Studienarbeiten ([14] + [17]) und einer 3 mm starken Platte dem WF bekannt. Diese Auswahl von Herstellungsverfahren für Bauteile aus ox-CMC mittels Infusionsverfahren lässt prozessgestaltende Freiheiten beim Entwerfen der Blisk-Infusionswerkzeuge aus Abbildung 4.19 zu.

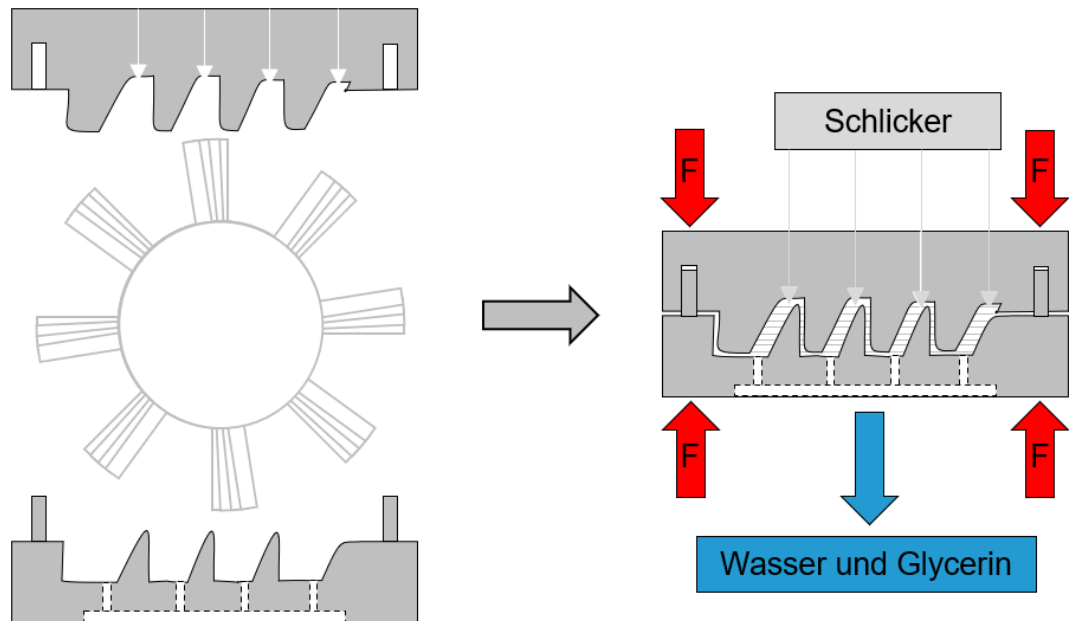


Abbildung 4.19 schematischer Aufbau des Infusionsverfahren der Blist mittels Überlagerung von geometrisch angepassten Gewebezuschnitten

Die Umsetzung des Infusionsverfahrens erfolgt in einem abgeschlossenen System. Zuerst werden die Zuschnitte mit zusätzlichen Gewebelagen aus DF-19-Gewebe in das untere Formwerkzeug drapiert. Anschließend kann das obere Werkzeug formschlüssig mit einer zusätzlichen Dichtung aufgesetzt werden. Die Genauigkeit bei der Positionierung der beiden Hälften wird dabei durch Zentrierstifte hergestellt, welche in der Skizze rechts und links im unteren Werkzeug eingezeichnet sind. Nachdem der Schlicker ausreichend entgast worden ist, ein mehrschrittiges Entziehen von Luft aus dem Gemisch mit unterschiedlichen Vakuumdrücken, wird dieser mit einem Druck von 4 bar in das Werkzeug gepresst. Dieser Druck basiert auf der Infiltration der oben erwähnten Plattenherstellung. Da dem Schlicker Wasser und Glycerin entzogen werden muss, sind in dem unteren Werkzeug Aussparungen vorgesehen. In diese wird der Gips als filternde Schicht eingebracht. Der Gips füllt zudem die Unterseite dieses Werkzeugs aus, sodass mehr Volumen zur Aufnahme von den Stoffen vorhanden ist. Ein weiterer Zweck des zusätzlichen Gipses ist die Auflagemöglichkeit auf eine Trockenmasse von Gips, die den Stoffentzug beschleunigt. Die Größe der Trockenmasse hängt hierbei von dem aufzunehmenden Volumen ab. Im Infiltrationsvorgang müssen die Kräfte des Infiltrationsdruckes durch eine äußere Spannvorrichtung aufgenommen werden, welche in der Abbildung durch die roten Pfeile symbolisiert wird. Da die Fließrichtung des Schlickers durch die Richtung der Entnahme vom Wasser und Glycerin bestimmt wird, verdichtet sich der Schlicker in gleicher Richtung. Unter Aufrechterhaltung des

Infiltrationsdruckes wird so zusätzlicher Schlicker benötigt, der mit Verdichtung des Materials nachfließt und eine ausreichende Infiltration sicherstellt.

Die notwendige Trocknungszeit im Werkzeug beträgt nach den Erfahrungen der bisherigen Projekte etwa zwei bis drei Stunden. Nach dieser Zeit können die beiden Formwerkzeuge voneinander getrennt werden. Hierfür ist eine umlaufende Fase an dem oberen Werkzeug vorgesehen, durch welche ein Hebel angesetzt werden kann. Der Aufbau ermöglicht ein Entformen des Grünkörpers von beiden Werkzeughälften aus. Erwartungsgemäß befindet sich der Grünkörper nicht an dem gipsseitigen Infusionswerkzeug. Falls dies doch der Fall ist, kann der Gips zerbrochen und der Grünkörper durch die Aussparungen im Werkzeug herausgedrückt werden. Andernfalls kann der Grünkörper mit Hilfe der Infusionskanäle im oberen Werkzeug herausgestoßen werden. Vor der Entformung muss der Grünkörper in einem Trockenofen bei 100 °C ausreichend durchtrocknen, da dies nach den Studienarbeiten ein zerstörungsfreies Entformen begünstigt.

Da im Sinterprozess bereits dünne Bauteile mit einer Profilstärke von 3 mm zum Verbiegen tendieren, sollte der Grünkörper der Blisk in einem Keramik-Kugelbad gesintert werden. Dieses verhindert aktuell das Verformen von Platten und Turbinenschaufeln aus 3DCeraturb in der Sinterung.

Aus dem fertigen ox-CMC Rohling kann abschließend die gewünschte Bliskgeometrie hergestellt werden. Essentiell ist dafür die korrekte Ausrichtung des Rohlings, da ansonsten die mittleren Gewebelinien nicht im Schaufelquerschnitt zentriert sind und daraus schlechtere Materialeigenschaften resultieren.

5 Materialversuche

Materialdaten des oxidkeramischen Faserverbundwerkstoffes liegen im DLR fast ausschließlich von WHIPOX vor. Für den infusionsbasierten Werkstoff sind in Zukunft größere Versuchsreihen geplant. Um die Datenbank vorab ergänzen zu können, sind in dieser Arbeit verschiedene mechanische Prüfungen durchgeführt worden. Darüber hinaus können mit den Versuchen die Faserstrukturen auf die berechneten Spannungen in der Blisk überprüft werden.

Für einen Überblick der durchzuführenden Versuche ist in Abbildung 5.1 eine Versuchsmatrix erstellt worden. In Kapitel 4.3 ist bereits deutlich geworden ist, dass variable Formen von Fasergelegen aus Nextel 610 hergestellt und als Faserkonzept umgesetzt werden können. Aus diesem Grund werden in den Materialbeanspruchungen neben Proben mit DF-19-Gewebe zusätzliche Faserstrukturen untersucht. Die erste

Alternative ist eine Hybridstruktur mit abwechselnden Schichten von DF-19-Gewebe und UD-Gelegen. In der anderen Faserstruktur werden ausschließlich UD-Gelege verwendet.

Nach einer optischen Überprüfung der Infiltrations- und Sinterungsqualität wird entsprechend der Versuchsmatrix die Dichte jeder Faservariante über das Archimedische Prinzip bestimmt. Dafür wird das Gewicht der Platten im trockenen Zustand, Unterwasser und im nassen Zustand gemessen. Bei dem nassen Zustand ist oberflächliches Wasser von jeder Platte unter ähnlichem Druck abgetupft worden. So wird nur das vom Material aufgenommene Wasser mitgewogen. Im nächsten Schritt überprüft nach ausreichender Trocknungszeit eine Ultraschallmessung die innere Zusammensetzung des Werkstoffs. Dafür werden die Platten in ein 2-dimensionales Gestell eingespannt und in dieser Ebene von der Messeinrichtung abgefahren. Sobald die erzielten Werte der Messung in einem adäquaten Bereich liegen, können aus den Platten Proben geschnitten werden. Daraufhin erfolgt eine mechanische Prüfung bei Raum- und Hochtemperatur zur Bestimmung der Materialeigenschaften. Die Hochtemperatur liegt dabei mit 1.000 °C etwas über der Maximaltemperatur aus der Anforderungsliste. Zudem wird das Temperaturwechselverhalten wegen schnellen Beschleunigungen in der Turbine betrachtet. Dies erfolgt beim WF gängig, je nach Brauchbarkeit der Ergebnisse, durch einen oder mehrere Zyklerversuche. Für die anderen beiden Versuche werden drei Proben untersucht, da so eine gewisse Aussagekräftigkeit der Messungen geschaffert werden kann. Abhängig von der Streuung von Ergebnissen sind beim WF für eine statistische Versuchsauswertung sieben bis acht Proben nötig. Da in dieser Arbeit allerdings nur eine Orientierung des Materialverhaltens aufgezeigt werden soll und das Material in größeren Versuchsreihen kostenintensiv ist, wird die minimale statistische Sicherheit durch die drei Proben verwendet.

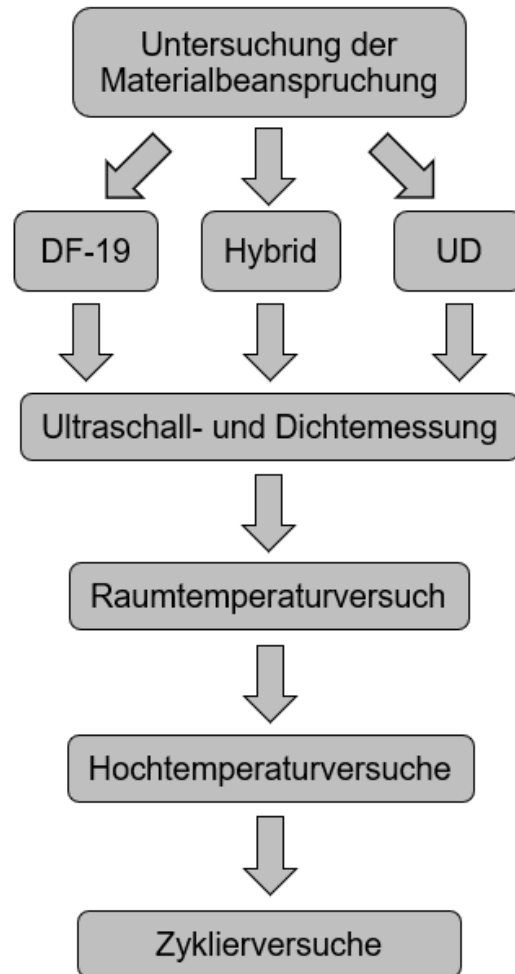


Abbildung 5.1 Versuchsmatrix für die Untersuchung der Grenzen der Materialbeanspruchung unterschiedlicher Faserstrukturen

Die Versuche, welche optimal zur Beanspruchung durch Fliehkräfte passen, sind Zugversuche. Hierfür werden Werkstoffrohlinge mit einer Breite von 30 mm und einer Länge von 300 mm benötigt. Mittels Wasserstrahlschneiden können daraus genormte Probenabmessungen erzeugt werden. Mit einer solchen Versuchsstruktur gestaltet sich der finanzielle Aufwand durch Rohmaterial und Bearbeitung umfangreich. Außerdem steigt auch der zeitliche oder personelle Aufwand für die Probenherstellung. Da beide Aspekte im Rahmen dieser Arbeit eingeschränkt sind, werden zur Orientierung der ertragbaren Spannungen 3-Punkt-Biegeversuche (3PB) nach dem Aufbau aus Abbildung 5.2 durchgeführt. Darin liegt die Probe auf zwei Punkten auf. Die Biegekraft wird durch einen mittleren Punkt eingeleitet. Bei dieser Biegebelastung wird der Werkstoff durch die Zugbeanspruchung auf der unteren Seite der Probe versagen. In Abbildung 5.2 ist der Biegeversuch bei Raumtemperatur links und bei Hochtemperatur rechts dargestellt. Die Messnadeln zur Bestimmung der Verschiebung während den Belastungen sind vom Prüfenieur beim WF mit geringem zeitlichem Aufwand

unterhalb der Proben einstellbar. Die Hochtemperaturversuche lassen sich ebenfalls mit nur leicht erhöhtem Zeitrahmen durchführen. Der Zyklierversuch wird mittels eines 4-Punkt-Biegezyklierversuchs umgesetzt, bei welchem das Kriechverhalten und Elastizitätsmodul (E-Modul) bestimmt und verglichen werden kann. Die Kraft wird in diesem Versuch über zwei Punkte mit gleichem Abstand zur Mitte der Probe eingeleitet. Bei der Versuchsreihe einer Probe erfolgt die Kraftereinleitung von 800 °C bis 1.050 °C mit einer schrittweisen Temperaturerhöhung um 50 °C. Anschließend wird die Temperatur bis 1.200 °C in 25 °C-Schritten erhöht. In jedem Schritt wird die in Abhängigkeit der Probendicke angesetzte Kraft zuerst schnell mit einer Rate von 1.000 N/s eingeleitet. Danach werden die Proben in einem langen Zeitraum mit einer Rate von 1 N/s beansprucht. Vor der gleichmäßigen Entspannung des Materials wird die Belastung jedes Zyklus für 10 Minuten aufrechtgehalten. Der Verlauf beider Kraftereinleitungen gibt dabei Auskunft über das Kriechverhalten und E-Modul der Probe. Falls die Kurve übereinstimmt, ist kein Kriechen festzustellen. Eine Versetzung beider Kurven ist durch eine permanente Verschiebung zu erklären und deutet auf Kriechverhalten hin.



Abbildung 5.2 3-Punkt-Biegeversuch [2]; **links** bei Raumtemperatur, **rechts** bei Hochtemperatur

5.1 Plattenherstellung

In diesem Abschnitt wird die Vorgehensweise zur Herstellung der Platten aus ox-CMC dokumentiert. Der erste Schritt hierfür ist die Beschreibung der Faservorbereitung. Wie bei allen Projekten vom WF mit Verwendung von DF-19-Gewebe, wird dieses der Reihenfolge nach zugeschnitten, entschlichtet, drapiert und infiltrierte. Die Herstellung von UD-Gelegen ist mit mehr Aufwand verbunden, da zur Homogenität des Werkstoffes die Fasern im gleichen Abstand zueinander drapiert und infiltrierte werden sollen. Von einem Werkstoffingenieur beim WF ist ein Ablauf der Wickelanlage mit festgesetztem Vorschub programmiert worden, durch welchen die Gelege hergestellt werden. Mit Hilfe von Klebestreifen konnten so zwei wiederholungsgenaue UD-Gelege pro Wicklung auf dem Wickelkern hergestellt werden. Da der Rohofen die Schlichte der Faser ausbrennt,

erfolgt keine Nachbearbeitung zur Infiltrationsgewährleistung. Die Aufwicklung von Gelegen und Vorbereitung zum Trennen vom Wickelkern sind in Abbildung 5.3 zu erkennen. Eine zuvor aufgeklebte Klarsichtfolie vereinfacht dabei die Gelege-Handhabung und das Trennen vom Wickelkern. Gewebe und Gelege haben nach der Vorbereitung eine Mindestbreite von 130 mm und eine Mindestlänge von 130 mm.

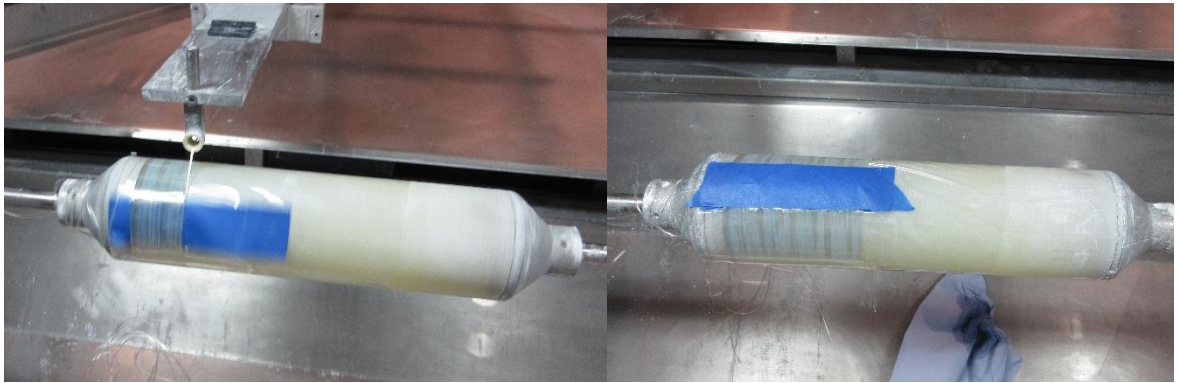


Abbildung 5.3 Aufwicklung von UD-Gelegen; **links** Wickelprozess, **rechts** Vorbereitung zur Trennung der Gelege

Der Versuchsaufbau zur Herstellung der drei Platten ist in Abbildung 5.4 gezeigt. Die Gelege, beziehungsweise Gewebe, werden auf eine große Gipsplatte schichtweise drapiert. Eine Fließhilfe wird als Unterlage für die Gipsplatte verwendet. Dieses inkompressible Hilfsgewebe aus Kunststoff verursacht mit dem Anschluss der Vakuumpumpe rechts im Bild eine Unterdruckrichtung durch den Gips. Für die UD-Platte (Abbildung links) werden neun Gelege verwendet. Die Hybridstruktur benutzt in abwechselnder Abfolge fünf DF-19-Gewebe und vier UD-Gelege. In der Platte aus DF-19-Gewebe werden neun Lagen aufgebaut. Die einzelnen Platten werden durch Kunststoffstäbe voneinander getrennt, sodass im trockenen Zustand das Entformen jeder Platte erleichtert wird. Über die Fasern wird eine für Schlicker durchlässige Abreißhilfe und eine Fließhilfe gelegt. Erstere begünstigt das Entformen, Letztere vereinfacht die Schlickerverteilung im Versuch. Als oberste Komponente ist ein Dreiecksschlauch platziert, an den der Schlickereinlass angeschlossen ist und welcher ebenfalls die Schlickerverteilung begünstigt. Die gesamte Aufbaustruktur ist von einem Dichtring umgeben, der den Schlickerfluss begrenzt. Ohne dieses Element würde der Schlicker direkt in die Vakuumpumpe gezogen werden und die Ansaugung verstopfen.

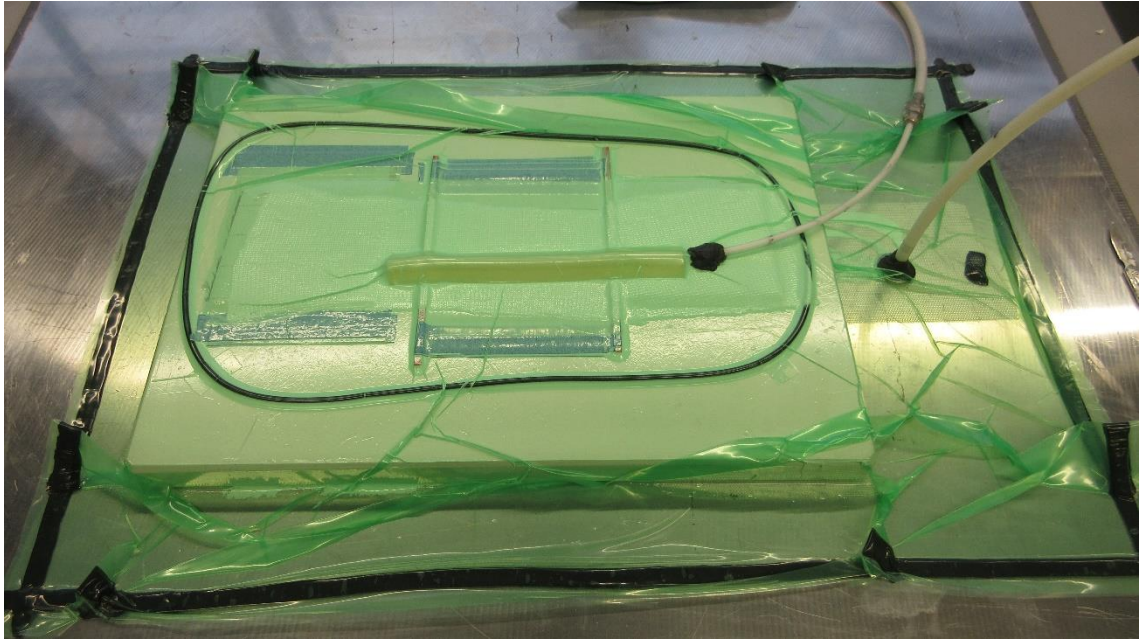


Abbildung 5.4 Versuchsaufbau zur Herstellung von ox-CMC Platten; **links** UD, **mittig** Hybrid, **rechts** DF-19

Nach einer Trocknungszeit von zwei bis drei Stunden ist der Infiltrationsversuch beendet worden. Das Trennen der Platten-Grünkörper vom Gips und anschließender Sinterung ist feiertagsbedingt erst nach längerer Zeit erfolgt. Die Platten sind durch die Kunststoffstäbchen leicht voneinander zu trennen gewesen. Ein Abnehmen der Platten von dem Gips war für die Faserstruktur unter Verwendung der UD-Gelege ohne Komplikationen möglich. Lediglich bei der Platte aus DF-19-Gewebe ist in dem Vorgang ein vernachlässigbarer Bereich des Randes beschädigt worden. Augenscheinlich weist die UD-Platte eine höhere Matrix-Konzentration im Bereich des Dreiecksschlauches auf. Dadurch ist zu erwarten, dass dieser Bereich nicht für mechanische Prüfungen verwendet werden kann. Bei der Hybrid-Platte lässt sich eine homogene Infiltration erkennen. In der Sinterung haben sich alle Platten leicht in eine Richtung gewölbt. Die Krümmung ist vermutlich auf die Sinterung ohne zusätzlichen Druck auf die Platten, beispielsweise durch ein Gewicht, zurückzuführen. Für eine detaillierte Testreihe wäre die Verbiegung unzulässig und alle Platten müssen neu hergestellt werden. Da diese Arbeit zeit- und kostentechnisch begrenzt ist, wird dieses Problem für einen Vergleich der Werkstoffkennwerte mit WHIPOX und untereinander vernachlässigt.

5.2 Testergebnisse

Die Bestimmung der Materialdaten durch die Tests aus der Versuchsmatrix (Abbildung 5.1) beginnen mit dem Besäumen der gesinterten Platten. Nachdem grobe Unregelmäßigkeiten des Materials am Rand entfernt worden sind, können die Platten

vermessen werden. Die Größe und alle weiteren relevanten Daten zur Dichtebestimmung sind in folgender Tabelle 5.1 dokumentiert. Bei Betrachtung der DF-19-Platte ist eine Gewebekompression von circa 18 % zu bemerken (ausgehend von 0,43 mm pro Gewebe, der entschlichteten Dicke laut Herstellerangaben, [27]). Bei Übertragung dieser Materialverdichtung entspricht die Oxidkeramik-Stärke mittels UD-Gelege innerhalb der Hybridstruktur etwa 0,52 mm. Daraus ergibt sich eine Schichtdicke durch ein Gelege von circa 0,13 mm. Neun UD-Gelege haben eine Materialstärke von etwa 1,15 mm erzeugt. Daraus berechnet sich ebenfalls eine Schichtdicke von etwa 0,13 mm pro UD-Gelege.

Größe	UD-Gelege	Hybrid	DF-19
Länge [mm]	115	114	117
Breite [mm]	118	119	119
Dicke [mm]	1,15	2,30	3,20
Fläche [mm ²]	13570	13566	13923
Masse, Fasern [g]	26,55	52,99	76,44
Masse, trocken [g]	42,12	64,79	97,59
Masse, in Wasser [g]	32,32	49,29	74,51
Masse, nass [g]	44,74	69,85	105,51
Werkstoffdichte [g/cm ³]	3,384	3,144	3,141
Faservolumengehalt [%]	54,69	65,94	63,09
offene Porosität [%]	21,10	24,61	25,55

Tabelle 5.1 Materialgrößen bei der Dichte-, Faservolumengehalt- und Porositätsbestimmung der drei Faserstrukturen

Die Dichte der drei Platten wird durch das Archimedische Prinzip über Multiplikation der Dichte von Wasser ($0,9982 \text{ g/cm}^3$) mit dem Quotienten von trockener Masse und der Differenz zwischen nasser Masse und dem Plattengewicht Unterwasser berechnet [2]. Der Faservolumengehalt ist durch Dichte und Fasergewichtsanteil bestimmt worden. Mittels der Norm DIN EN 993-1:1995 wird die offene Porosität durch den Quotienten von aufgenommenem Wasser der Platten und der Differenz der trockener Masse zum Gewicht Unterwasser ermittelt [34].

Die berechneten Dichten von den zwei Faserstrukturen mit DF-19-Gewebe liegen im Vergleich zu WHIPOX etwas höher. Für die UD-Platte ist der Wert weiter erhöht, was durch einen erhöhten Matrixanteil erklärt werden kann. Die offene Porosität liegt für alle Faserstrukturen in einem ähnlichen Bereich wie WHIPOX.

Nach der Dichtebestimmung müssen die drei Platten wieder ausreichend getrocknet werden, da sonst die Ergebnisse der folgenden Luftultraschall-Versuche verfälscht würden. Abbildung 5.5 zeigt die Messungen der drei Faserstrukturen während dieser Ultraschalltests. Dabei ist die Dämpfung durch die innere Struktur der Platten zur Auswertung von hellgrau (wenig/keine Dämpfung) bis lila (starke Dämpfung) farblich skaliert worden. Eine geringe Dämpfung deutet auf ein dichtes Material hin, da dieses den Schall mit kaum Verzögerung durchlässt. Viele oder große Lufteinschlüsse verlangsamen das Signal. In den Graphen sind mit einem roten Kasten die Flächen markiert, welche sich zum Ausschneiden von Proben eignen. Bei der Betrachtung des ersten Diagramms fällt auf, dass lokal eine erhöhte Matrixkonzentration in der UD-Platte vorliegt, da hier eine stärkere Dämpfung zu messen ist. Aufgrund dieser Unregelmäßigkeit kann der Bereich nicht genutzt werden. Da hier die Faserorientierung die Lage der Proben vorgibt, eignet sich der darüberliegende Bereich wegen Platzmangels ebenfalls nicht. Die Hybrid-Platte zeigt eine dunklere Färbung auf. Die höhere Dämpfung des Schalls lässt sich durch die im Vergleich zur UD-Platte größere Porosität und Profilstärke erklären. Für die gesamte Platte ist allerdings eine homogene Dämpfung zu erkennen, weshalb hier beliebig Proben entnommen werden können. Durch die Dicke der DF-19-Platte nimmt die Färbung weiter zu. Im unteren Bereich der Platte sind Unregelmäßigkeiten (blau) im Material zu erkennen, weshalb nur aus dem oberen Bereich Biegeproben hergestellt werden dürfen. Der inhomogene Werkstoff kann nach WF auf einen Infiltrationsfehler innerhalb der Platte zurückgeführt werden. Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse der inneren Materialstruktur zeigt Abbildung 5.6 die vom Prüfenieur markierten Positionen der Proben jeder Platte. Bei der UD- und DF-19-Platte können jeweils maximal neun Proben geschnitten werden, für die Hybrid-Platte sind 10 Proben vorgesehen.

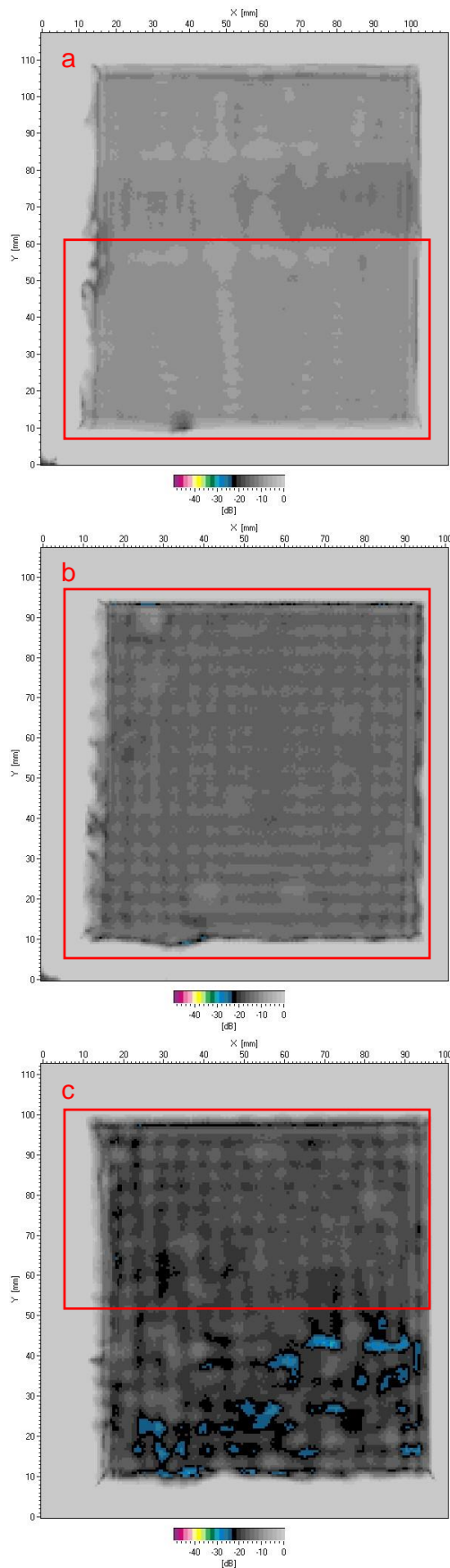


Abbildung 5.5 Luftultraschallmessungen der Platten unterschiedlicher Faserstruktur mit nutzbarer Fläche zum Ausschneiden von Proben (rot eingerahmt); **a** UD, **b** Hybrid, **c** DF-19

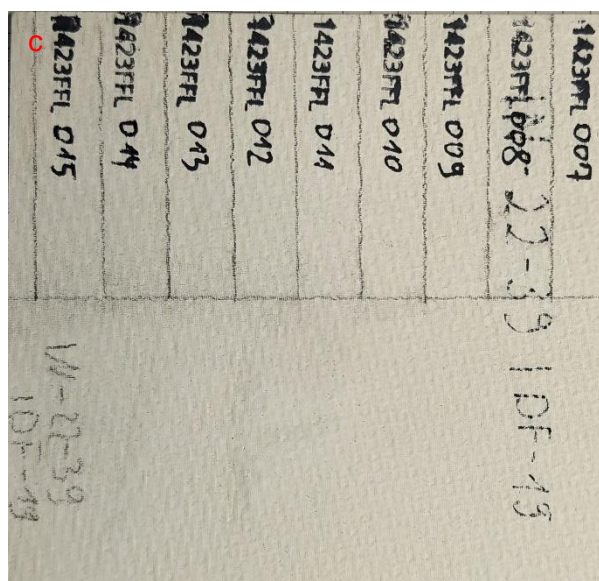
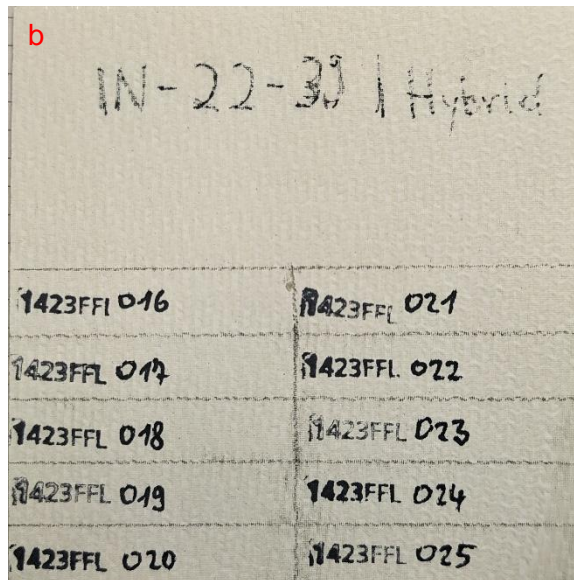
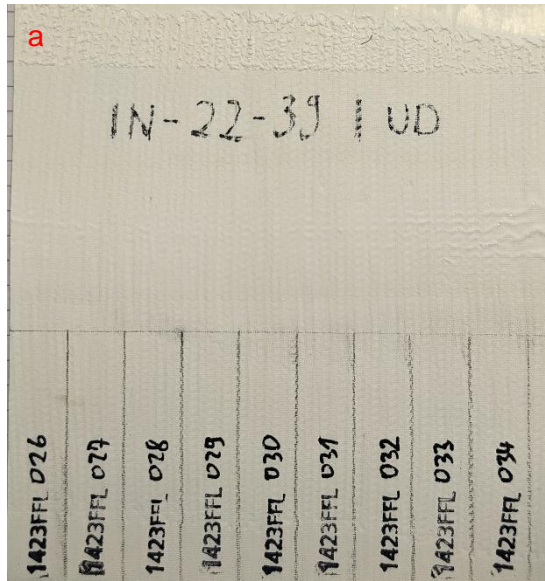


Abbildung 5.6 Position der Entnahme von Proben aus den Platten mit unterschiedlichen Faserstrukturen; **a** UD, **b** Hybrid, **c** DF-19

5.2.1 Temperaturabhängige Biegeversuche

Als erste Referenz für die Materialkennwerte werden die Proben bei Raumtemperatur bis zum Bauteilversagen durchgebogen. Um den Bezug zur Turbinenblisk von FFE+ herzustellen, wird daraufhin der gleiche Test bei Hochtemperatur durchgeführt. Die Temperatur von 1.000 °C liegt dabei etwas höher als beim „Take-Off“ der Turbine mit 927 °C. Die leichte Erhöhung der angesetzten Temperatur soll das Hochtemperatur-Potential des Werkstoffes bestätigen. Die in Abbildung 5.7 bis Abbildung 5.9 aufgeführten Graphiken zeigen jeweils im oberen Graphen das Spannungsverhalten einer Faserstrukturen bei Raumtemperatur und im unteren Graphen bei Hochtemperatur. Die Daten sind hierbei aus den Protokollen der Versuche entnommen worden, welche ausführlich im Anhang 1 und Anhang 2 nachzulesen sind. Bei allen Messungen ist das materialtypische, pseudo-duktilen Verhalten durch den zick-zackförmigen Verlauf nach dem ersten Faserabriss im Spannungsmaximum zu erkennen. Der Faserabriss ist in den Proben der UD-Platte (Abbildung 5.7) und der DF-19-Platte (Abbildung 5.9) nicht so stark ausgeprägt wie in denen der Hybrid-Platte (Abbildung 5.8). Die Proben zeigen, mit Ausnahme von kleinen Verzögerungen in der Dehnung, einen gleichmäßigen Spannungsverlauf. Bei Hochtemperatur verringert sich die Streuung der Ergebnisse von Hybrid-Proben, für die beiden anderen Faserstrukturen kann diesbezüglich keine sichere Aussage getroffen werden. In den Spannungsdiagrammen unterscheidet sich die Höhe der maximalen Materialbeanspruchung deutlich. In der folgenden Erörterung der Graphen wird sich auf die durchschnittlichen Größen (Bruchspannung und E-Modul) der drei Proben bezogen. Bei Raumtemperatur kann keine wesentliche Differenz der Bruchspannungen (σ_{Br}) zwischen Hybrid- und DF-19-Faserstruktur festgestellt werden. Die UD-Proben erreichen hier fast doppelt so große Spannungswerte (siehe Tabelle 5.2). Aus dem Vergleich mit den Hochtemperaturversuchen wird deutlich, dass die absolute Bruchspannung bei der UD-Faserstruktur am stärksten abnimmt (66 MPa). Die Spannungen der anderen Strukturen reduzieren sich um bis zu 42 MPa. Im relativen Vergleich des temperaturabhängigen Spannungsverhaltens liegt der Belastungsverlust der UD-Struktur bei 12,13 %, der Hybrid-Struktur bei 12,78 % und der DF-19-Struktur bei 16,41 %. Der Sprödbruch erfolgt bei allen Proben ungefähr auf Höhe einer Dehnung von 0,3 %.

In der Tabelle 5.2 ist zudem das von der Messeinrichtung berechnete E-Modul bei beiden Temperaturen aufgeführt. Bei der DF-19-Faserstruktur nimmt das Elastizitätsmodul im relativen Vergleich von Raum- zu Hochtemperatur am meisten ab (18,18 %). Für die Hybridstruktur beträgt dieser Verlust 10,2 %, bei der UD-Struktur 10,12 %.

Größe	Raumtemperatur		Hochtemperatur	
	σ_{Br} [MPa]	E-Modul [GPa]	σ_{Br} [MPa]	E-Modul [GPa]
UD	544	168	478	151
Hybrid	266	98	232	88
DF-19	256	110	214	90

Tabelle 5.2 Durchschnittliche Spannungen und Elastizitätsmodule der Faserstrukturen bei Raum- und Hochtemperatur, berechnet durch drei Proben

In den folgenden Spannungs-Dehnungsdiagrammen der durchgeführten Versuche ist im unteren Spannungsbereich teilweise eine kurze Kurve in grün zu erkennen. Hierbei handelt es sich um ein Messartefakt, bei dem die Kalibrierung der Messnadeln aufgezeichnet worden ist.

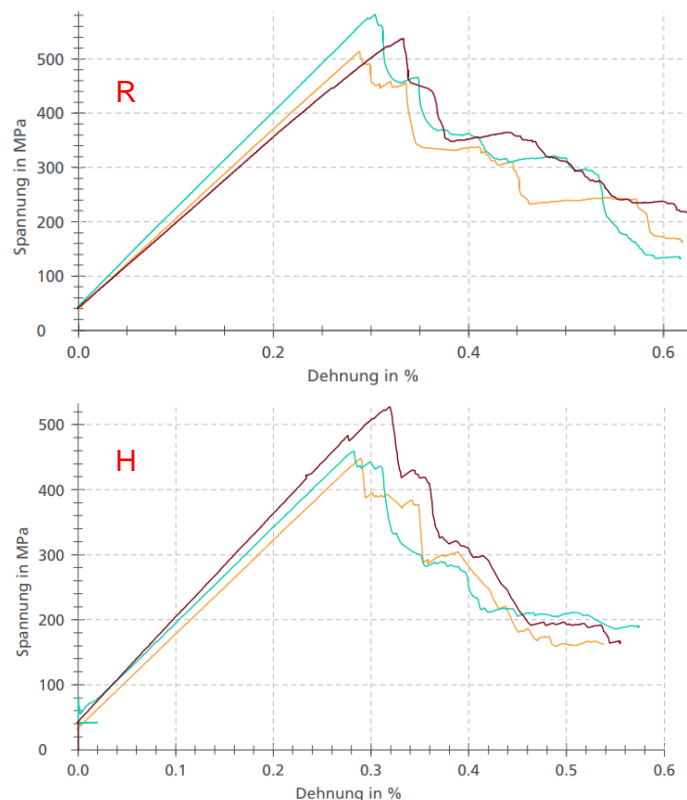


Abbildung 5.7 3PB von drei Proben aus der UD-Platte; **oben** bei Raumtemperatur, **unten** bei Hochtemperatur

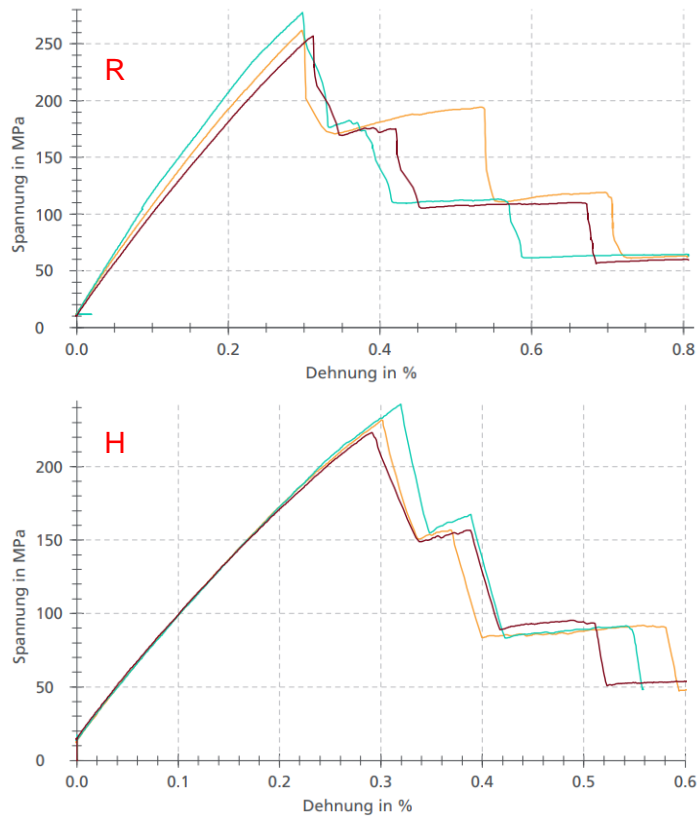


Abbildung 5.8 3PB von drei Proben aus der Hybrid-Platte; **oben** bei Raumtemperatur, **unten** bei Hochtemperatur

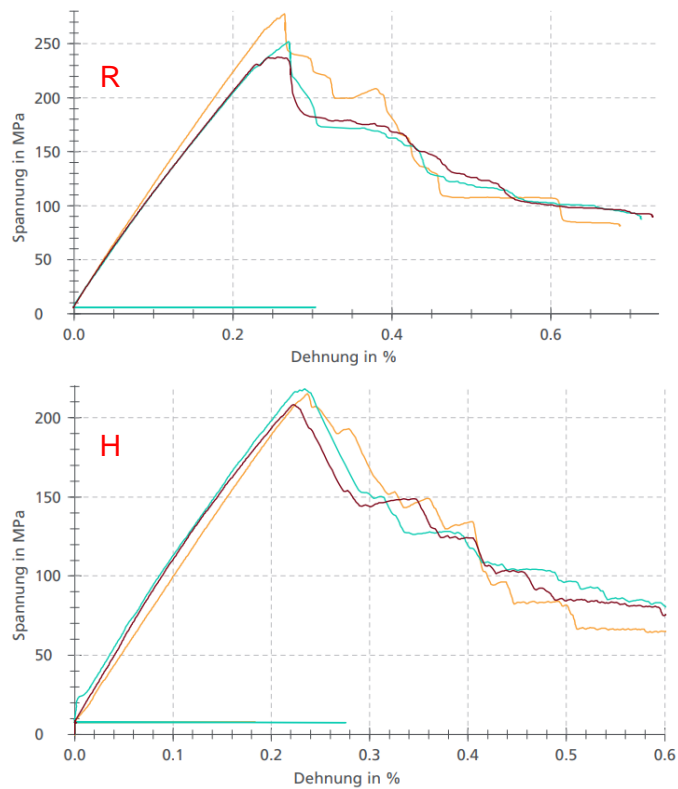


Abbildung 5.9 3PB von drei Proben aus der DF-19-Platte; **oben** bei Raumtemperatur, **unten** bei Hochtemperatur

Wie in Kapitel 2.3.1 bereits erwähnt, befindet sich die Bruchspannung von Proben mit DF-19-Faserstruktur unter Verwendung der Druck-Infusion in einer bisher nicht veröffentlichten Studie der Abteilung für Struktur- und Funktionskeramik bei etwa 350 MPa. Die Platten für die Probenausschnitte sind dabei durch einen geschlossenen Werkzeugbau hergestellt worden. Mit diesem Werkzeug können aktuell keine Platten aus UD- oder Hybridfaserstruktur hergestellt werden. Deshalb sind in dieser Arbeit keine bereits produzierten DF-19-Platten verwendet worden, wodurch die Differenz der gemessenen Bruchspannungen zu erklären ist.

Grundsätzlich lassen sich größere, absolute Schwankungen der Spannungswerte bei den UD-Proben erkennen. Dies ist vermutlich durch die lokal schwankende Faserorientierung in der Platte zu erklären. Ohne ein Werkzeug zur präzisen Einspannung von UD-Gelegen kann dieser Unterschied nicht minimiert werden. Dies ist aus zeitlichen Gründen erst in einer größeren Versuchsreihe zu verfolgen. Die Werte aller Proben sind jedoch zur Einordnung des Materialverhaltens geeignet, da sie die Größenordnung von unterschiedlichen Faserstrukturen aufzeigen und das Potential von unidirektionalen Verbundkeramiken bestätigen.

5.2.2 Biege-Zyklerversuche

In diesem Abschnitt sind die Biege-Zyklerversuche der drei Faserstrukturen dokumentiert. Mit diesem Versuch kann das temperaturabhängige Kriechverhalten des Materials präzise bestimmt werden. Dafür wird in den Graphen der Abbildung 5.10 zunächst jeweils eine Testkraft angesetzt, welche die Prüfkraft des eigentlichen Versuches übersteigt. So kann ein Versagen des Bauteils unter der Prüfkraft bei Hochtemperatur ausgeschlossen werden. Die von der Probendicke abhängige Prüfkraft beträgt bei der Messung in Abbildung 5.10 für die UD-Probe (a) 46 N, die Hybrid-Probe (b) 93 N und die DF-19-Probe 205 N. Dementsprechend ist die Testkraft in (a) auf 55 N, in (b) auf 120 N und in (c) auf 250 N erhöht. Die Versuche werden anhand des zurückgelegten Weges (oder auch Zyklusweges) der Messeinrichtung auf der x-Achse visualisiert. Ein Kriechverhalten ist bei dem Auseinanderschere des Spannungs- und Entlastungsverlaufes zu bemerken. Für jede Temperatur zeigen erste Messkurven die zügige und zweite Messkurven die langsame Belastung. In den Graphen der UD- und Hybrid-Faserstruktur sind Unregelmäßigkeiten, beispielsweise bei (a) in der letzten Messung oder (b) für 2,2 mm Zyklusweg, zu erkennen. Hierbei handelt es sich um ein kurzzeitiges Verhaken der Messnadeln in der Probenoberfläche. Dadurch entsteht eine minimale Verbiegung der Messnadeln, welche durch die präzise Messung in dieser Form

aufgezeichnet wird. Für das Endergebnis der Verschiebung sind diese Messfehler allerdings irrelevant und können vernachlässigt werden.

Im Verschiebungsverlauf der UD-Probe (a) ist bis einschließlich einer Temperatur von 1.050 °C (~2 mm Zyklusweg) ein elastisches Verhalten des Materials für beide Belastungsgeschwindigkeiten zu erkennen. Danach Scheren die Kurven bei Be- und Entlastung für jede Lastgeschwindigkeit aus. Diese Verschiebung fällt größer in der langsamen Kraftereinleitung aus. Die Untersuchung der UD-Faserstruktur ist in diesem Versuch nach 1.150 °C abgebrochen worden.

Für die Hybrid-Faserstruktur ist das erste Auseinanderschere der Verläufe aus den Graphen nicht eindeutig ersichtlich. Kriechen tritt erkennbar bei 1.100 °C (~2,5 mm Zyklusweg) auf. Bei den Temperaturen davor ist lediglich eine Tendenz für Kriechen zu erkennen.

In dem letzten Diagramm für die DF-19-Faserstruktur (c) sind keine Messunregelmäßigkeiten zu erkennen. Der Biege-Zyklerversuch ist nach 1.175 °C beendet worden. Ähnlich der Hybrid-Probe ist hier durch die starke Steigung der Verläufe nur eine Tendenz für Kriechen bei 1.075 °C (~1,9 mm Zyklusweg) zu erkennen. Deutlich zeigt erst der Verlauf bei 1.125 °C (~2,5 mm Zyklusweg) dieses Materialverhalten auf.

In den Messungen wird zudem das temperaturabhängige E-Modul berechnet. Zusammengefasst veranschaulicht das Diagramm aus Abbildung 5.11 die Abnahme der E-Moduli. Darin stellen die bläulichen Kurven den Verlauf des E-Moduls bei schneller Belastung und die rötlichen bei langsamer Belastung dar. Aus diesen Versuchsergebnissen lässt sich die exakte Temperatur für den Beginn von Kriechen feststellen. Sobald die zwei Verläufe eines Materials nicht mehr mit einer gewissen Toleranz übereinstimmen, tritt Kriechen auf. Bei der Hybrid-Probe ist dieser Punkt eindeutig bei 1.050 °C. Für die DF-19-Faserstruktur scheint dieser Punkt bei 1.075 °C zu liegen. Da die Graphen bereits unter der Temperatur von 1.050 °C zu auseinanderschere beginnen, wird diese Verzögerung auf Messunregelmäßigkeiten zurückgeführt. Im Falle der UD-Probe ist kein wesentlicher Unterschied der zwei Kurven zu erkennen. Dies kann mit der maßgeblichen Bestimmung von Materialeigenschaften durch die annähernd einheitliche Richtung der Fasern erklärt werden. Da das E-Modul ab 1.050 °C deutlich zu sinken anfängt, ist hier der Beginn von Kriechen des Werkstoffs festzustellen.

Die vollständigen Versuchsprotokolle der Biege-Zyklerversuche sind im Anhang 3 zu finden.

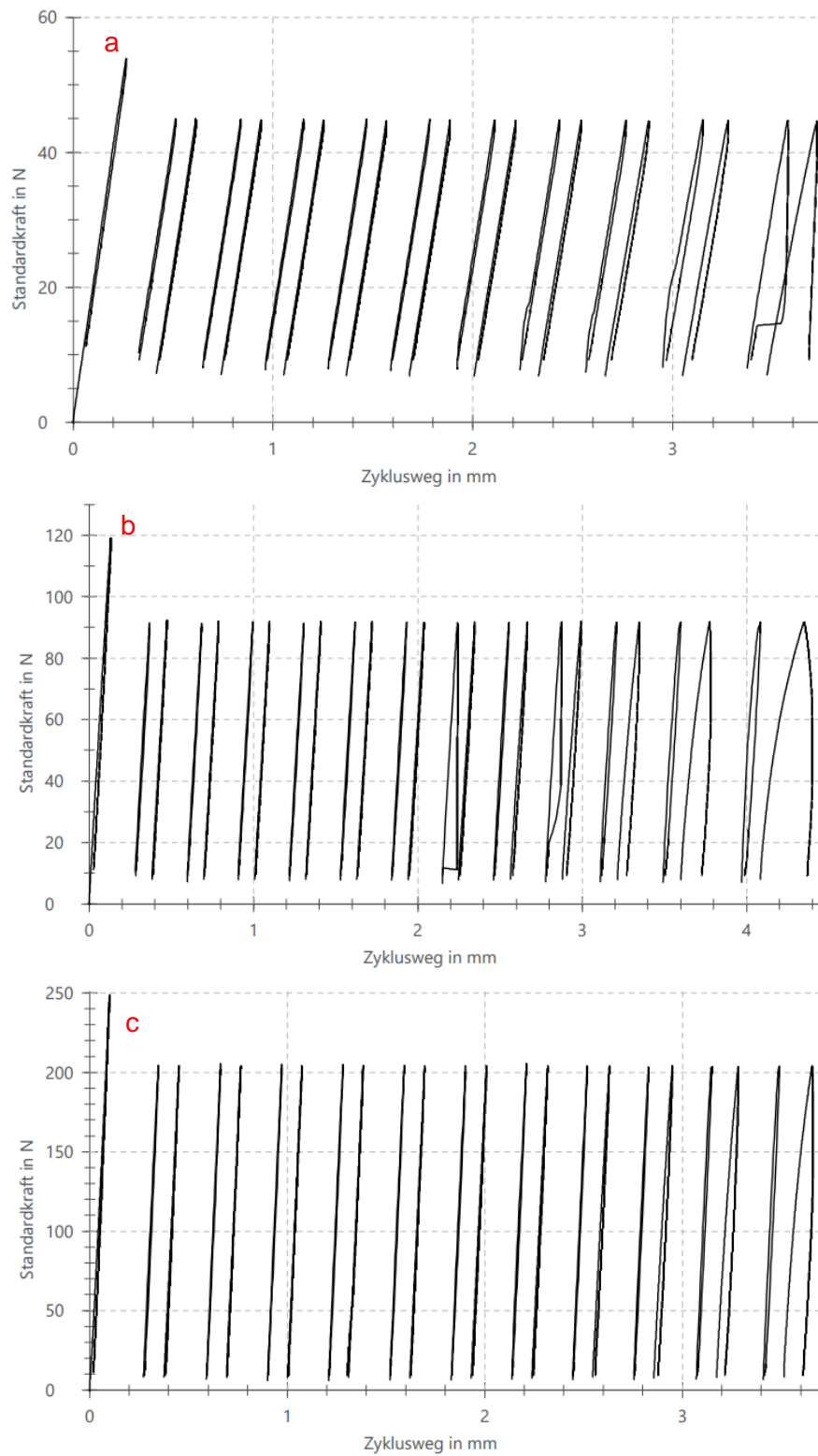


Abbildung 5.10 Biege-Zyklerversuche der drei Faserstrukturen mit Start bei 800 °C und Ende bei 1.200 °C (Temperatursteigung bis 1.050 °C: 50°C, danach: 25 °C); **a** UD-Probe, **b** Hybrid-Probe, **c** DF-19-Probe

4-PB E-Modul-Zyklus IN-22-39

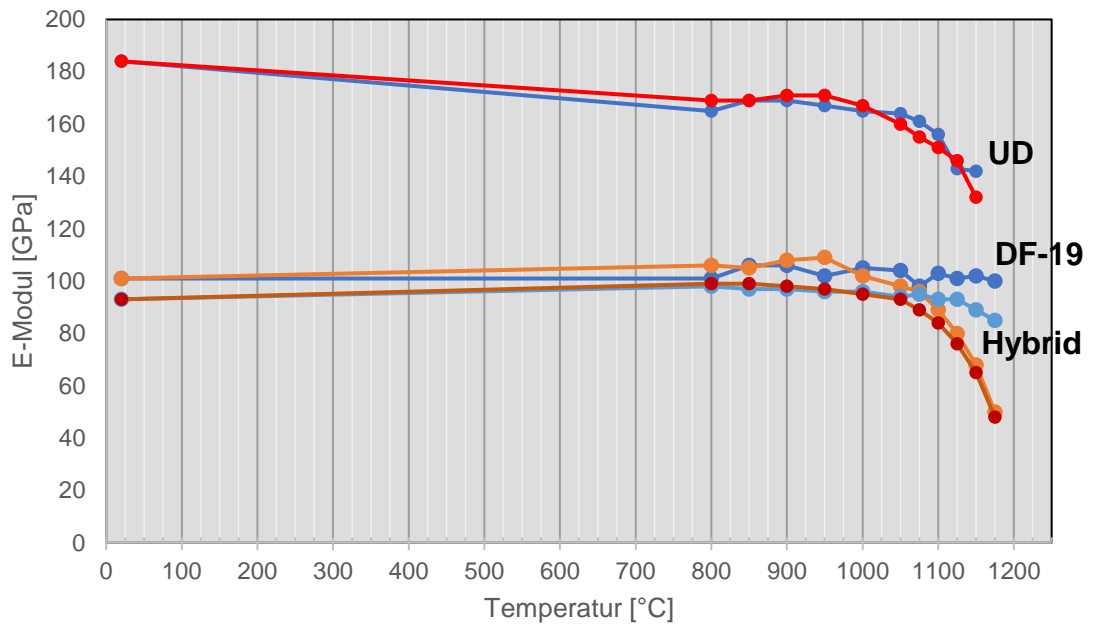


Abbildung 5.11 Berechnung des E-Moduls bei den Biegezyklierversuchen; **bläulich** bei schneller Lastzuführung, **rötlich** bei langsamer Lastzuführung

6 Grundlagen einer Prozesskette

In der Produktentwicklung existiert eine Vielzahl von unterschiedlichen Methoden und genormten Vorschriften zur Erstellung eines Produktlebenslauf. Wie es diese Arbeit bereits in Kapitel 3 aufgezeigt hat, kann der Produktentstehungsprozess in mehrere Kategorien aufgeteilt werden. Eine der bekanntesten Methoden im Maschinenbau zur Durchführung der Produktentwicklung ist die VDI 2221 mit den vier Phasen der Konstruktionsmethodik aus Abbildung 3.1: Aufgabe klären, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten. Ziel dieser Methodik ist es, Kosten beziehungsweise Aufwand in der gesamten Betrachtung einer Produktentwicklung gering zu halten. Abbildung 6.1 lässt den Verwendungszweck einer solchen Methodik durch den Anstieg von Änderungskosten im Vergleich zu den Bereichen der Produkteigenschaften im Produktlebenslauf aufzeigen. Dabei handelt es sich um das Paradoxon der Konstruktion. Entsprechend dem Paradoxon stellt das Erkennen der Produkteigenschaften im frühen Verlauf des Produktes eine Herausforderung dar und kann im späteren Verlauf nur schwierig beeinflusst werden. Zudem nehmen die Änderungskosten zum Ende des Produktlebenslauf sukzessiv zu. Mit durchgehender Verwendung einer Methodik wie etwa der VDI 2221, kann diesem Paradoxon entgegengewirkt werden. Das Produkt

muss die formulierten Anforderungen stetig erfüllen, sodass Produkteigenschaften schon früh erkannt werden können. Damit lassen sich die Änderungskosten (oder auch der Aufwand der Produktentwicklung) reduzieren [19, S. 3-4].

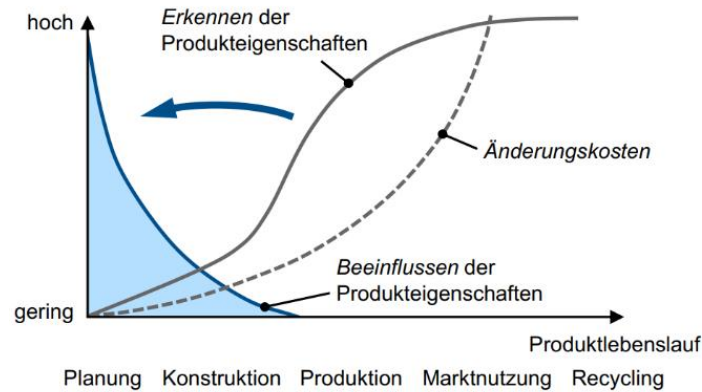


Abbildung 6.1 Paradoxon der Konstruktion [19, S. 4]

Für die Entwicklung von oxidkeramischen Faserverbundwerkstoffen soll in dieser Arbeit eine allgemein gültige Grundlage einer Prozesskette für Projekte von WF entwickelt werden. Dafür wird zunächst die Prozesskette als ein iterativer Ablauf von verschiedenen, aufeinanderfolgenden Aufgaben definiert. Involviert sind dabei bis zu drei unterschiedliche Einrichtungen; der Auftraggeber (in dieser Arbeit das AT), die Abteilung Struktur- und Funktionskeramik des WF sowie eine Konstruktionseinrichtung. In zukünftigen Projekten soll in vielen Fällen letzter Beteiligter das BT sein. Die VDI 2221 besagt, dass ein Wechsel der Aufgaben zur Erfüllung der Anforderungen zu jeder Zeit erfolgen muss. Allerdings führen viele Wechsel zu einer Erhöhung des Aufwandes. Aus diesem Grund wird eine Struktur gesucht, die kleine iterative Vorgehen bevorzugt und so große Aufgabenwechsel möglichst vermeidet. Für die Umsetzung in der später folgenden Prozesskette wird das Test-Operate-Test-Exit-Schema (TOTE) verwendet. Eine symbolische Schleife einer Aufgabe mit Überprüfung dieses Schemas in Abbildung 6.2 gezeigt und stellt ein Teilstück der Arbeitsflusses dar. So kann der Arbeitsfluss der Prozesskette erst fortgesetzt werden, wenn die Überprüfung in der Schleife erfolgreich ist [22, S. 20-22].

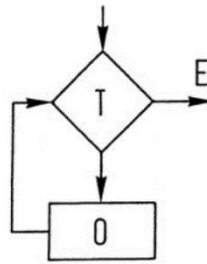


Abbildung 6.2 TOTE-Schema [22, S. 22]

Mit solchen Bausteinen können große Sprünge von Anpassungen umgangen werden. Diese sind in der erarbeiteten Struktur zwar weiterhin nach Vorgabe der VDI 2221 möglich, zur Übersichtlichkeit jedoch nicht skizziert worden.

In Abbildung 6.3 ist die grundlegende Prozesskette für Projekte vom WF aus dieser Arbeit aufgezeichnet. Bei der Erstellung sind die Beobachtungen und Abläufe vom Verlauf dieses Projektes formgebend. Aus den Gesprächen mit dem BT sind die Erfahrungswerte des 3DCeraturb-Projekts mit eingeflossen. Die Erkenntnisse von dem Projekt werden durch eine längere Laufzeit und viele teilnehmende Institute mitaufgeführt. Der Verlauf von 3DCeraturb ist weiterhin aufgrund der Entwicklung eines materialgerechten Designs zu beachten. Im Bereich der Anforderungsbestimmung ist in 3DCeraturb die Bedeutung umfangreicher Aufgabenklärung deutlich geworden. Außerdem liefert das Projekt viele Ansätze von funktionsprüfenden Möglichkeiten, wie zum Beispiel strömungs- und strukturmechanische Simulationen. Da in dieser Arbeit die Relevanz eindeutiger Anforderungen und geeigneter Bewertung, sowie Überprüfung der Ergebnisse bestätigt worden ist, sind in der Prozesskette zwei Bereiche mit iterativen Vorgehen nach dem TOTE-Schema eingearbeitet. In der Prozesskette sind beteiligte Einrichtungen in rechteckigen Kästen, Aufgaben in abgerundeten Kästen und Iterationen nach dem TOTE-Schema in Rauten visualisiert.

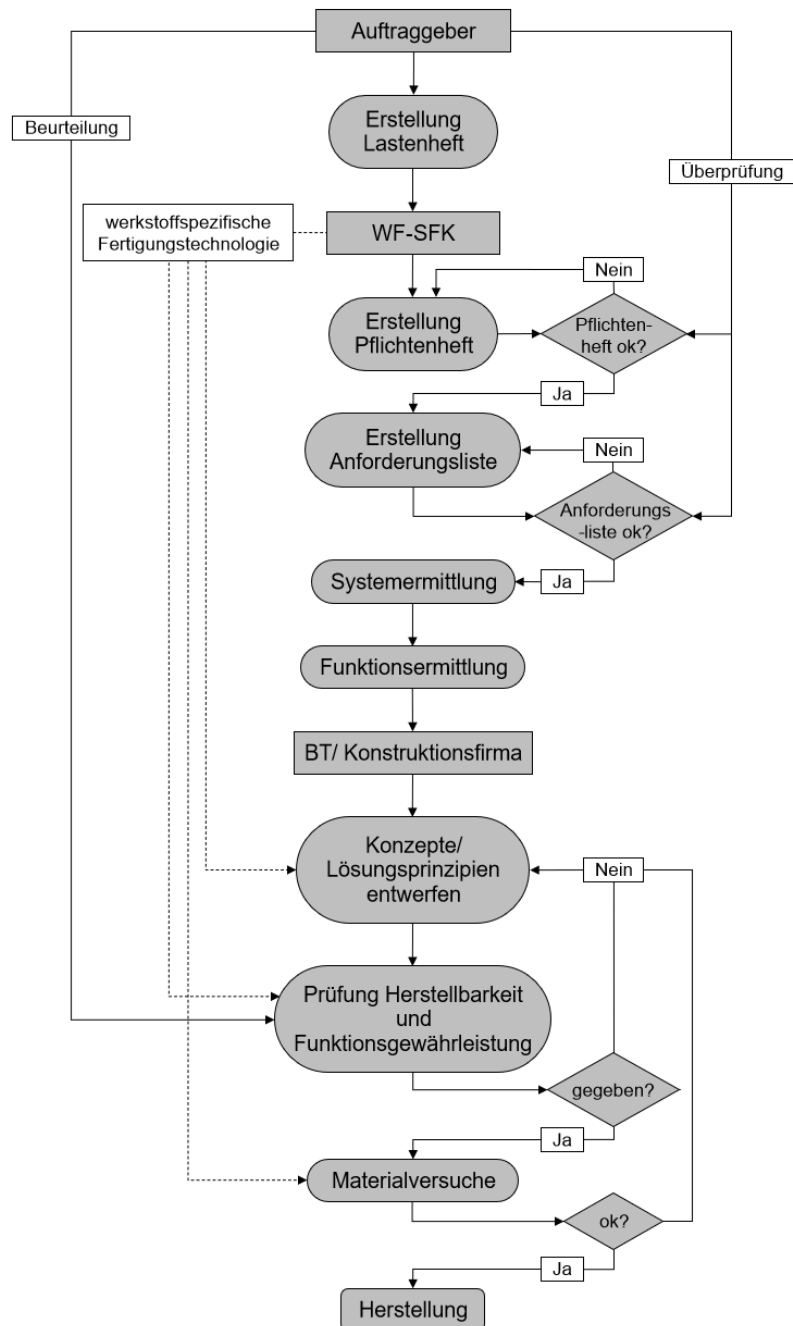


Abbildung 6.3 Grundlage einer allgemeinen Prozesskette für Projekte des Instituts für Werkstoffforschung unter Verwendung des TOTE-Schemas

Bei dem ersten Bereich handelt es sich äquivalent zur VDI 2221 um die präzise Aufgabenklärung. Die Informationen aus einem Lastenheft des Auftraggebers werden vom WF in ein Pflichtenheft konkretisiert, welches gegebenenfalls nach einer Überprüfung zusammen mit dem Auftraggeber überarbeitet wird. Auf dieser Basis kann anschließend eine Anforderungsliste erstellt werden. Nach einer erneuten Überprüfung und Überarbeitung der Anforderungen ist vom WF das System des Produktes zu ermitteln. Aus einem System lassen sich analog zu dieser Arbeit Funktionen bestimmen.

Der Bereich gründet sich folglich auf die umfangreiche Erstellung einer Anforderungsliste. Bereits zuvor ist hierfür von *Neraj* eine erste Anzahl an potentiell relevanten Anforderungen erstellt worden, welche in bereichsspezifische Schritte einer Prozesskette aufgeteilt sind [35].

Die Anforderungsliste für das Produkt ist bereits zu Beginn der Prozesskette mit möglichst vielen, zutreffenden Anforderungen zu füllen. Dies führt zur Vermeidung von Änderungen im späteren Verlauf des Arbeitsflusses. Als Ausgangsbasis zur Erstellung der Liste bietet sich die Dokumentation aller potentiellen Anforderungen eines Produkts im Luft- und Raumfahrtsektor in einem Katalog an. Hier gilt es, den Katalog mit der Zeit weiter zu vervollständigen. Dafür können die Anforderungen aus dieser Arbeit und der Abbildung 6.4 als Ausgangsmenge verwendet werden. Wie die Abbildung andeutet, liegt eine Einteilung der Anforderungen nach dem Schema aus Tabelle 3.2 inklusive Verantwortlichen nahe. Dadurch kann der Fortschritt des Arbeitsflusses zu jederzeit nachvollzogen und beschleunigt werden.



Abbildung 6.4 relevante Schritte in einer CMC-Prozesskette (vgl. [35, S. 136])

Der zweite Bereich umfasst die Weiterverarbeitung von Funktionen unter gegebenen Anforderungen durch die konstruktive Umsetzung von BT, oder einer anderen Einrichtung. Äquivalent zur VDI 2221 verlaufen dabei die Phasen des Konzipierens und Entwerfens. In Zusammenarbeit mit dem WF werden unter den Erfahrungen der werkstoffspezifischen Fertigungstechnologie Konzepte, beziehungsweise Lösungsprinzipien entworfen. Diese werden im darauffolgenden Schritt auf Herstellbarkeit sowie Funktions- und Anforderungsgewährleistung geprüft. Die Herstellbarkeit bezieht sich auf die allgemeine Fertigungsmöglichkeit unter bekannten oder zu entwickelnden Fertigungstechnologien vom WF. In der Prüfung der Funktionsgewährleistung sind vorerst drei unterschiedliche Analysen zusammengefasst, die mit Simulationen und Messungen wie folgt aufgelistet sind:

- Thermalanalyse (Temperaturverteilung, Kriecheffekte)
- Aerodynamische Analyse (Strömungssimulation, Oberflächenqualität, Leistung)
- Strukturmechanische Analyse (FEM-Simulation, Verformungen, Spannungen)

Hauptsächlich beruht die Erstellung der Liste auf den Tests für 3DCeraturb und einer ersten Übersicht von einer keramischen Faserverbundwerkstoff-Prozesskette des BT. Nach diesem Schritt erfolgt eine Beurteilung des Auftraggebers, zusammen mit der werkstoffseitigen Einschätzung vom WF. Analog zu dieser Arbeit wird auf diese Weise eine interdisziplinäre Bewertungsgruppe gebildet. Der Umfang der Bewertung variiert dabei mit der Auswahl der Bewertungsmethode. Falls die Prüfung von dem Konzept nicht erfolgreich ist, muss die Entwurfsphase in einer Schleife bis zur geeigneten Lösungsfindung wiederholt werden. Mit der einvernehmlichen Bestätigung der Teilnehmer, werden fortlaufend Materialversuche vom WF geplant und durchgeführt, welche an das Konzept angepasst sind. Ab diesem Punkt geht der Arbeitsfluss in die Phase der Ausarbeitung über. Bei Misserfolg der Versuche erfolgt eine weitere Iteration zur Auswahl von geeigneten Lösungsprinzipien mit anschließender Überprüfung und eingereichten Materialversuchen. Bei ausreichenden Versuchsergebnissen wird der Entwurf planmäßig ausgearbeitet. In dem Arbeitsfluss ist dieser Schritt unter Herstellung zusammengefasst. Auch wenn darin die notwendige Nachbearbeitung und Qualitätssicherung enthalten ist, werden diese Punkte den Anforderungen zugeordnet und fließen mit Ausnahme dieser Arbeit in die Bewertung der Lösungsprinzipien ein. Aus der Prozesskette wird deutlich, dass die Entwicklung von komplexen Produkten aus anisotropen Werkstoffen (ox-CMC) eine interdisziplinäre Zusammenarbeit benötigt. Es bedarf einem engen Austausch von den beteiligten Projektteilnehmern, sodass die Produktentwicklung beschleunigt werden kann. Die verschiedenen Institute bringen nach der gezeigten Prozesskette, Kenntnisse in fachspezifische Aufgaben ein. Mit dem systematischen Abarbeiten der einzelnen Bausteine werden viele Aufgabenwechsel aus der VDI 2221 vermieden. Zur Folge können die Änderungskosten im Produktlebenslauf nach Abbildung 6.1 reduziert werden.

7 Diskussion

Im Verlauf dieser Arbeit ist die Relevanz der methodischen Prozessentwicklung bei der Umsetzung von einem komplexen Bauteil anhand der Turbinenblisk aus dem anisotropen, oxidkeramischen Faserverbundwerkstoff deutlich geworden. Hierbei handelt es sich trotz grundlegender Technologieentwicklungen im Bereich des druckbasierten Infusionsverfahrens um eine Neuentwicklung einer Fertigungsstrategie. Die dafür konzipierten Lösungswege sind mittels einer Nutzwertanalyse bewertet worden. Hierbei ist aufgefallen, dass durch eine hohe Anzahl an Teilnehmenden die subjektiven Ansichten ausgeglichen werden konnten. Dadurch ist jedoch auch die Punktbewertung für ein herausstechendes Fertigungskonzept eingeschränkt worden. In der Gesamtbetrachtung ist das best-bewertete Konzept nur 0,5 Punkte vom schlechtest-bewerteten Konzept entfernt. Nichtsdestotrotz konnte das Fertigungskonzept unter Berücksichtigung von Problematiken bei den Spannungen innerhalb der Bliskscheibe mit geringen Anpassungen zu einer Fertigungsstrategie entwickelt werden. Diese erfüllt die gegebenen Anforderungen an mechanische- und temperaturkritische Belastungen nach dem Standpunkt der aufgezeigten Ermittlungen.

In der Machbarkeitsstudie dieser Arbeit ist gezeigt worden, dass die Nextel 610 Faser für die Herstellung von Faserpreforms mittels TFP-Verfahren geeignet ist. Die Radien von 3 mm sind beim Ablegen erfolgreich erstellt worden. Für die weitere Verwendung einer TFP-Preform, ergeben sich erste Vorgaben an die Konstruktion des Werkzeugs und Geometrie der Blisk. Bei Verwendung einer UD-Faserstruktur in den Schaufeln und umlaufenden Faserstruktur in der Bliskscheibe sind nur oberflächliche Bearbeitungsmethoden, wie zum Beispiel Schleifen, erlaubt. Bei zu großer Materialabtragung, wie etwa Fräsen, würden äußere Fasern durchtrennt, wodurch ein lokaler Verlust von Materialeigenschaften resultiert. Aus diesem Grund muss der Werkzeugbau bei einer solchen Faserstruktur unter Berücksichtigung der Bauteilgeometrie angepasst werden. Darüber hinaus ist die Bauteilgeometrie an kritischen Stellen den Materialbegrenzungen entsprechend anzupassen. Diese Stellen sind beispielsweise Radien, oder veränderliche Profilstärken. Bei zu engen Radien würden die Fasern spröde brechen, woraus schlechtere Materialeigenschaften resultieren. Da die Preform wesentlich durch die dickste Profilstärke definiert wird, führt eine sehr klein zulaufende Schaufelspitze zu einer hohen Kompression von Fasern. Dadurch könnte die Infiltration der Fasern behindert werden. Die Verwendung einer solchen Faserstruktur symbolisiert dennoch den materialgerechtesten Entwurf für ox-CMC-Komponenten wie der Blisk.

In den Materialversuchen aus Kapitel 5 ist der Unterschied von Faserstrukturen und dem Potential von UD-Gelegen im ox-CMC deutlich geworden. Bei der Infusion der Versuche ist durch Stapeln unterschiedlicher Gewebe die Notwendigkeit eines Werkzeugbaus für Materialversuche aufgefallen. Hier führte der Vakuumsackaufbau aus Abbildung 5.4 zu Schwierigkeiten beim Platzieren und Festhalten der Bestandteile während des Vakuumierens. Die berechneten Bruchspannungen lassen nach ersten DF-19-Probentests mittels eines Werkzeuges eine erste Orientierung der Materialfestigkeit zu. Unter besseren Bedingungen sind demnach höhere Festigkeiten als die der Proben dieser Arbeit erwartbar. Die Bruchspannungen von den UD-Proben zeigen das Potential dieser Struktur durch den Vergleich der Materialbelastbarkeit mit DF-19-Proben. Hier konnten doppelt so große Werte erreicht werden, wodurch zweifache Sicherheiten realisierbar sind. So könnte die Wunschforderung der Sicherheit in eine Mindestforderung umformuliert werden. Aus der Dicke einer UD-Lage bei den hergestellten Platten kann die Anzahl von notwendigen Gelegen mittels des TFP-Verfahrens bestimmt werden. In dem Ablegeprozess sind sieben Lagen übereinander genäht worden. Ausgehend von der ersten Größenordnung der Dicke einer UD-Lage (circa 0,13 mm) sind etwa 16 bis 17 Gelege für eine Blisk notwendig.

8 Zusammenfassung

Nach den zwei Hauptzielen für die Herstellung einer Blisk aus ox-CMC sind in dieser Arbeit eine Fertigungsstrategie und eine Grundlage für eine Faserverbundkeramik-Prozesskette entwickelt worden. Die Prozesskette ist dabei durch die Kernvorgänge eines methodischen Arbeitens, basierend auf der VDI 2221 Konstruktionsmethodik und dem Abgleich von den Abläufen des 3DCeraturb-Projektes und der Blisk-Fertigungsstrategieentwicklung, erstellt worden. Bei dem Lösungsweg für eine Fertigungsstrategie ist die Bedeutung von methodischer Prozessentwicklung bestätigt worden. Aus dieser Arbeitsweise sind die Fertigungskonzepte anforderungsspezifisch erstellt und in einer interdisziplinären Arbeitsgruppe bewertet worden. Das Ergebnis ist der Entwurf einer Fertigungsstrategie durch die Umsetzung eines Faserkonzepts, mit der eine Arbeitsanweisung für die Ausarbeitung getroffen worden ist. Zudem ist in dem Verlauf dieser Arbeit eine Machbarkeitsstudie vom IFB der Universität Stuttgart zur Herstellung von Oxidkeramikpreforms mit dem TFP-Verfahren in Auftrag gegeben worden. Die Ergebnisse dieser Studie sind für Oxidfaser-Preforms sehr vielversprechend, da eine ebene Struktur ausgehend von der Bliskkontur mit der Nextel 610 Faser hergestellt werden konnte. Aus den daraus entwickelten Faserstrukturen von Platten, sind Materialversuche vorgenommen worden, welche aufgrund von zeitlichen und kostentechnischen Einflussfaktoren vereinfacht wurden. Aus dem Vergleich von Bruchspannungen aus unterschiedlichen Biegeversuchen mit dem wickelbasierten ox-CMC (WHIPOX) ist dabei das Potential von einer UD-Faserstruktur deutlich geworden.

9 Ausblick

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit können nächste Schritte zur Umsetzung der entwickelten Fertigungsstrategie formuliert werden. Nach dem Schema des Produktentstehungsprozesses, müssen die getroffenen Anleitungen zum Werkzeugbau konstruktiv ausgearbeitet werden. Zuvor ist in einer Bewertungsrunde vom WF über die Änderung der Faserstruktur zu entscheiden. Das Potential hinsichtlich erhöhter Materialfestigkeiten einer UD-Blisk könnte in einem auf dieser Arbeit aufbauenden Folgeprojekt vertieft untersucht werden. Im Werkzeugbau für eine solche Blisk ist auf die Einhaltung von minimalen Radien beim Aufnähen der Nextel 610 Faser zu achten. Hierfür ist eine detaillierte Machbarkeitsstudie in Kooperation mit dem Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart zu empfehlen. Außerdem beschränkt sich in diesem Fall die Nachbearbeitung auf ein Minimum, da sonst die Materialeigenschaften verschlechtert werden können. Für eine Entscheidung der zwei Faserstrukturkonzepte ist eine ausführliche Versuchsreihe von verschiedenen Materialprüfungen (wie etwa Zugversuche) unumgänglich. Damit verbunden, muss die Herstellung der dafür benötigten Proben mit einem Werkzeug unterstützt werden, sodass maximale Werkstoffpotentiale bestimmt werden können. Auch wenn die 0°/90°-Gelege des IFB fehlgeschlagen sind, so lässt sich eine solche Struktur mittels geeigneter Programmierung realisieren.

Die Grundlage einer Prozesskette verschafft in diesem Zusammenhang eine Übersicht des Arbeitsflusses von den beschriebenen Schritten. Da diese Struktur ausschließlich auf Basis von Literaturquellen, Erfahrungsberichten vom BT und dem Verlauf dieser Arbeit entwickelt worden ist, liegt die Weiterentwicklung und Anpassung durch wirtschaftsingenieurwissenschaftliche Fachkenntnisse nahe.

Literaturverzeichnis

- [1] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Antriebstechnik, Abteilung Triebwerk.
- [2] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, „Institut für Werkstofforschung, Abteilung Struktur- und Funktionskeramik,“ 04 2022. [Online]. Available: https://www.dlr.de/wf/de/PortalData/23/Resources/dokumente/2021-04-12_Datasheet_short_WHIPOX-AA-3-45.pdf.
- [3] T. Kuriyama, H. Miyagawa, M. Uyama, S. Yamamoto, S. Yokoi und M. Hiromatsu, „Status of Advanced Material Gas-Generator Research and Development Program,“ *American Society of Mechanical Engineers*, 2001.
- [4] C. Zangemeister, Nutzwertanalyse in der Systemtechnik, WITtemannsche Buchhandlung - München, 1971.
- [5] P. Eyerer und H. Schüle, Polymer Engineering 1, Springer-Verlag GmbH Deutschland, 2020.
- [6] D. May, Integrierte Produktentwicklung mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Springer-Verlag GmbH Deutschland, 2020.
- [7] AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V., Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites, Frankfurt am Main: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.
- [8] A. A. Griffith, „The phenomena of rupture and flow in solids,“ *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Nr. 221, S. 163-198, 1921.
- [9] W. Krenkel, Ceramic Matrix Composites: Fiber Reinforced Ceramics and their Applications, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008.
- [10] W. Kollenberg, Technische Keramik, Essen: Vulkan-Verlag GmbH, 2009.
- [11] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie, Abteilung keramische Verbundstrukturen, Stuttgart.
- [12] N. P. Bansal und J. Lamon, Ceramic Matrix Composites: Materials, Modeling and Technology, John Wiley & Sons, Inc., 2014.
- [13] P. Mechnich und M. Welter, „Porous Oxide Ceramic Matrix Composites – Properties, Manufacturing and Applications,“ in *Encyclopedia of Materials: Composites*, Elsevier, 2021, S. 48-54.
- [14] J. N. Rudat, „Untersuchung von Fertigungsgrenzen für unterschiedliche U-Profile mit Rändern aus ox-CMC mittels vakuumbasiertem Infusionsverfahren,“ Köln, 2022.
- [15] J. P. Davim, Ceramic Matrix Materials: Materials, Manufacturing and Engineering, Walter de Gruyter GmbH, Berlin, 2016.

- [16] G. Puchas, A. Held und W. Krenkel, „Near-net shape manufacture process for oxide fiber composites (OFC),“ Elsevier, 2019.
- [17] J. N. Rudat, „Entwicklung der Herstellungstechnologie einer Antennenabdeckung für ReFEx aus oxidkeramischem Faserverbundwerkstoff mittels Infusionsverfahren,“ Köln, 2022.
- [18] P. Naefe und J. Luderich, Konstruktionsmethodik für die Praxis, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2020.
- [19] I. Mattmann, Modellintegrierte Produkt- und Prozessentwicklung, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2017.
- [20] E. Kirchner, Werkzeuge und Methoden der Produktentwicklung, Springer-Verlag GmbH Deutschland, 2020.
- [21] B. Bender und K. Gericke, Pahl/Beitz Konstruktionslehre, Springer-Verlag GmbH Deutschland, 2021.
- [22] P. Naefe, Methodisches Konstruieren, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2018.
- [23] K.-H. Grote und J. Feldhusen, Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [24] Cannon Muskegon Corporation, „Vacuum Alloys,“ [Online]. Available: <https://cannonmuskegon.com/products/vacuum-alloys/>. [Zugriff am 03 02 2023].
- [25] EnBW Energie Baden Württemberg AG, [Online]. Available: <https://www.enbw.com/unternehmen/konzern/energieerzeugung/fossile-energie/technik.html>. [Zugriff am 05 02 2023].
- [26] R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH, [Online]. Available: <https://www.r-g.de/wiki/Webarten>.
- [27] 3M Advanced Materials Division, [Online]. Available: <https://multimedia.3m.com/mws/media/1242134O/3m-nextel-ceramic-structural-fabrics-610-720.pdf>. [Zugriff am 12 09 2022].
- [28] C. Hielscher, J. Grenz und A. Camberg, „Ansatz zur effizienteren Auslegung von Hybridbauteilen,“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, S. 60-65, 2020.
- [29] J. Schuster, „Analyse von Faserorientierungen in kurzfaserverstärkten Polymer-Verbundwerkstoffen mittels Bildverarbeitung,“ *Practical Metallography*, S. 58-67, 1993.
- [30] N. S. Karaduman, Y. Karaduman, H. Ozdemir und G. Ozdemir, „Textile Reinforced Structural Composites for Advanced Applications,“ in *Textiles for Advanced Applications*, IntechOpen, 2017, S. 88-133.
- [31] S. Grosch und F. Ficker, „3D-Webtechnik für die additive Herstellung keramischer Preforms,“ 2023.

- [32] Institut für Flugzeugbau, Universität Stuttgart, „Tailored Fiber Placement,“ [Online]. Available: <https://www.ifb.uni-stuttgart.de/forschung/fertigungstechnologie/faserverbundtechnologie/tfp/>. [Zugriff am 10.02.2023].
- [33] think ceramics, „Brevier Technische Keramik,“ [Online]. Available: http://www.keramverband.de/brevier_dt/5/3/4/5_3_4_2.htm#:~:text=Die%20Querkontraktion%20%2C%20oft%20auch%20Poisson,%2C18%20%2D%200%2C3.. [Zugriff am 13.02.23].
- [34] DIN-Normenausschuss Materialprüfung, „DIN EN 993-1:1995-04; Prüfverfahren für dichte geformte feuerfeste Erzeugnisse - Teil 1: Bestimmung der Rohdichte, offenen Porosität und Gesamtporosität,“ 1995.
- [35] N. Jain, „Development of a digital manufacturing,“ 2022.

Anhang 1 Versuchsprotokolle Biegeversuche Raumtemperatur



**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**

Institut für Werkstoff-Forschung
Abteilung Struktur- und Funktionskeramik

02.02.2023

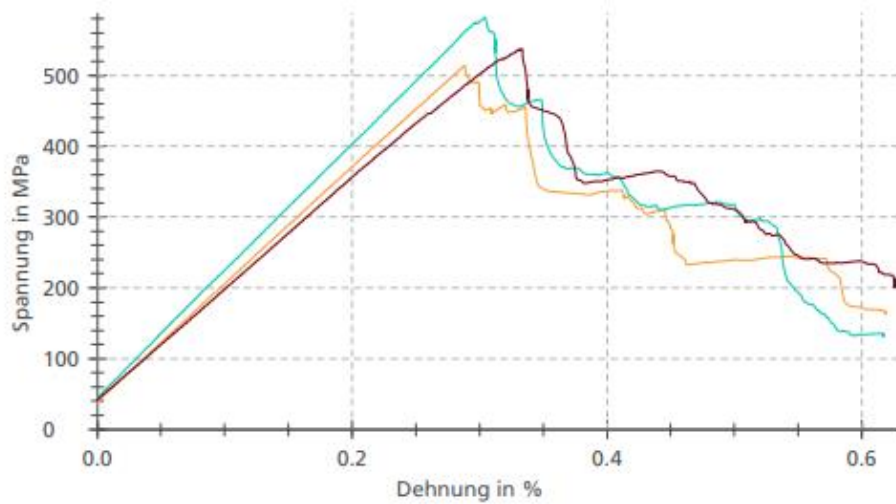
Prüfmaschine : Zwick 2
Prüfart : Druck
Kraftmessdose : Xforce HP 2.5kN
Prüfer : F. Flucht
Auftraggeber : J. Rudat

Auflagerabstand : 40mm
Vorkraft : 8 N
Prüfgeschwindigkeit : 1,0 mm/min
Prüftemperatur : 20°C
Beginn der Steigungsberechnung : 60 MPa
Ende der Steigungsberechnung : 100 MPa

Wicklung/Infiltration : IN-22-39
Material : UD
DB-Nr. Serie : 1423FFL0026
Pr.-Or. : PO0
Faserorientierung : 0°
Faser : N610-3k



3-Punkt-Biegeprüfung



Legende	DB-Nr.	F _{max} N	σ _{Fmax} MPa	ε _{Fmax} %	Weg _{Fmax} mm	E-Mod GPa	Breite mm	Höhe mm	Dela	Wickl./Infil.	180°
●	1423FFL0026	110	514	0,288	0,731	167	9,87	1,14	nein	IN-22-39	ja
●	1423FFL0028	111	582	0,304	0,790	181	9,84	1,08	nein	IN-22-39	ja
●	1423FFL0030	103	537	0,333	0,845	155	9,91	1,08	nein	IN-22-39	ja

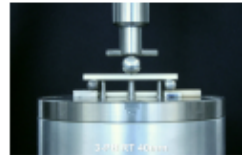
Serie	F _{max} N	σ _{Fmax} MPa	ε _{Fmax} %	E-Mod GPa
n = 3				
\bar{x}	108	544	0,309	168
s	5	35	0,023	13
v [%]	4	6,35	7,42	7,61



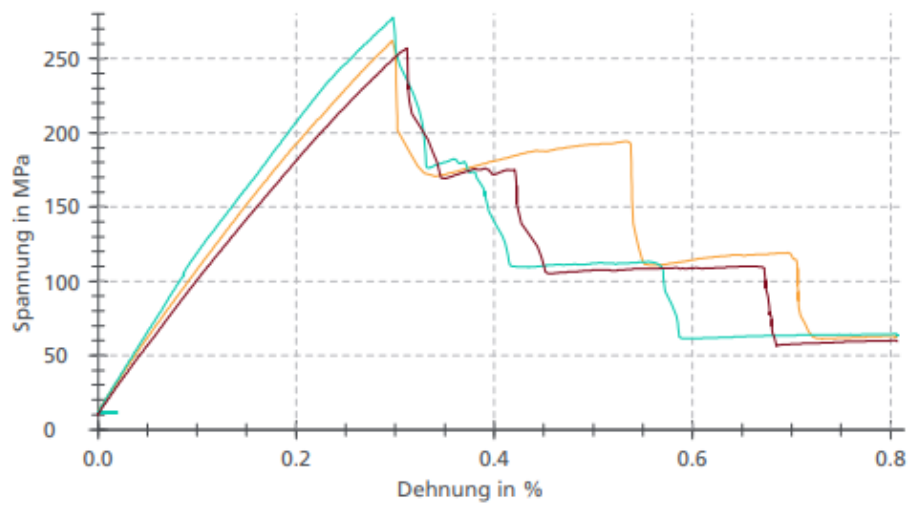
Prüfmaschine : Zwick 2
Prüfart : Druck
Kraftmessdose : Xforce HP 2.5kN
Prüfer : F. Flucht
Auftraggeber : J. Rudat

Auflagerabstand : 40mm
Vorkraft : 8 N
Prüfgeschwindigkeit : 1,0 mm/min
Prüftemperatur : 20°C
Beginn der Steigungsberechnung : 40 MPa
Ende der Steigungsberechnung : 60 MPa

Wicklung/Infiltration : IN-22-39
Material : Hybrid
DB-Nr. Serie : 1423FFL0016
Pr.-Or. : PO0
Faserorientierung : 0-90°
Faser : N610-3k



3-Punkt-Biegeprüfung



Legende	DB-Nr.	F _{max} N	σ _{Fmax} MPa	ε _{Fmax} %	Weg _{Fmax} mm	E-Mod GPa	Breite mm	Höhe mm	Dela	Wickl./Infil.	180°
Orange	1423FFL0016	215	262	0,297	0,399	97	10,09	2,21	nein	IN-22-39	ja
Cyan	1423FFL0018	223	278	0,299	0,414	108	10,11	2,18	nein	IN-22-39	ja
Red	1423FFL0022	222	257	0,312	0,419	88	10,33	2,24	nein	IN-22-39	ja

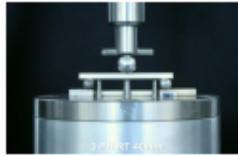
Serie	F _{max} N	σ _{Fmax} MPa	ε _{Fmax} %	E-Mod GPa
n = 3				
\bar{x}	220	266	0,303	98
s	4	11	0,008	10
v [%]	2	4,11	2,63	10,31



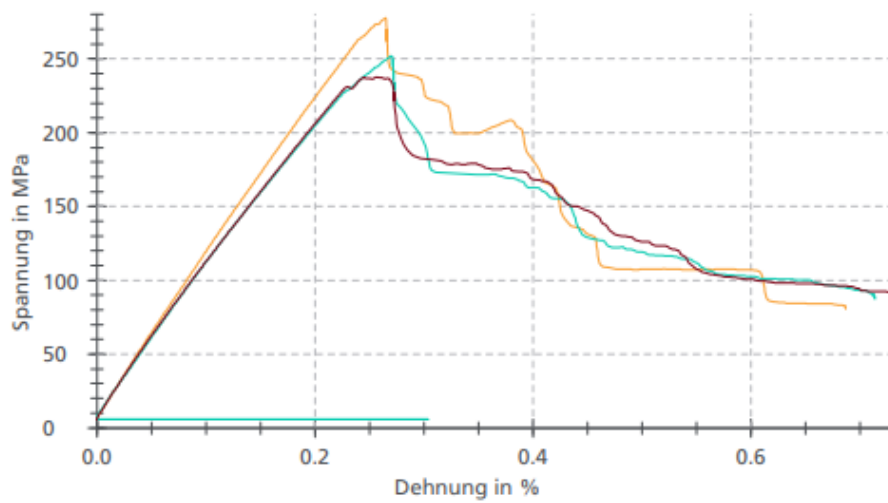
Prüfmaschine : Zwick 2
Prüfart : Druck
Kraftmessdose : Xforce HP 2.5kN
Prüfer : F. Flucht
Auftraggeber : J. Rudat

Auflagerabstand : 40mm
Vorkraft : 8 N
Prüfgeschwindigkeit : 1,0 mm/min
Prüftemperatur : 20°C
Beginn der Steigungsberechnung : 40 MPa
Ende der Steigungsberechnung : 60 MPa

Wicklung/Infiltration : IN-22-39
Material : IDF19
DB-Nr. Serie : 1423FFL0008
Pr.-Or. : PO0
Faserorientierung : 0-90°
Faser : N610-3k



3-Punkt-Biegeprüfung



DB-Nr.	F _{max} N	σ _{Fmax} MPa	ε _{Fmax} %	Weg _{Fmax} mm	E-Mod GPa	Breite mm	Höhe mm	Dela	Wickl./Infil.	180°
1423FFL0008	458	278	0,265	0,289	114	10,14	3,13	nein	IN-22-39	nein
1423FFL0010	424	252	0,270	0,296	107	10,09	3,16	nein	IN-22-39	ja
1423FFL0012	387	238	0,256	0,283	108	10,01	3,12	nein	IN-22-39	ja

Legende
● 1423FFL0008
● 1423FFL0010
● 1423FFL0012

Serie	F _{max} N	σ _{Fmax} MPa	ε _{Fmax} %	E-Mod GPa
n = 3				
\bar{x}	423	256	0,264	110
s	36	20	0,007	4
v [%]	9	7,92	2,68	3,62

Anhang 2 Versuchsprotokolle Biegeversuche Hochtemperatur



**Deutsches Zentrum
DLR für Luft- und Raumfahrt e.V.**
in der Helmholtz-Gemeinschaft

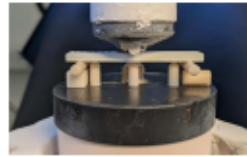
Institut für Werkstoff-Forschung
Abteilung Struktur- und Funktionskeramik

07.02.2023

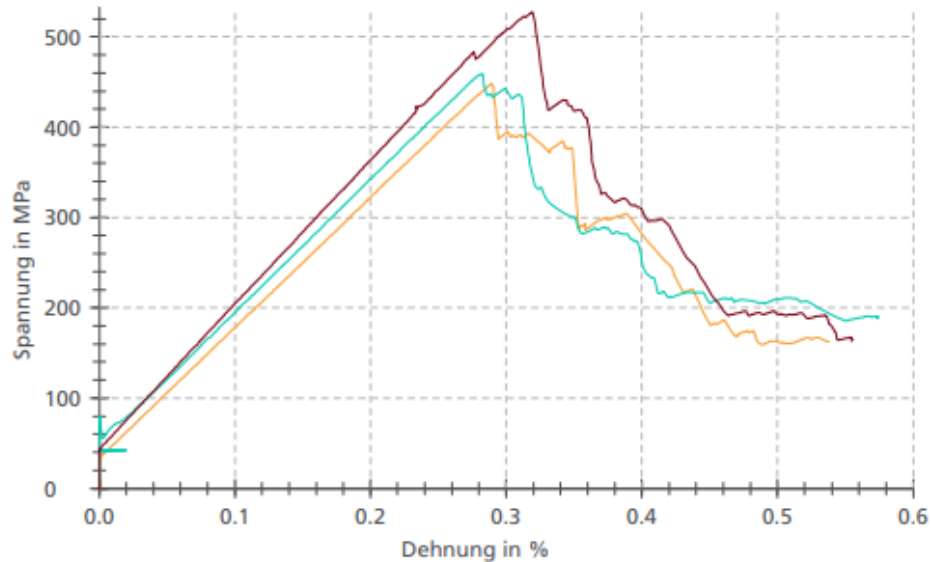
Prüfmaschine : Zwick 1
Prüfart : Druck
Kraftmessdose : KAF-TC 2.5kN
Prüfer : F. Flucht
Auftraggeber : J. Rudat

Auflagerabstand : 40mm
Vorkraft : 8 N
Prüfgeschwindigkeit : 1,0 mm/min
Prüftemperatur : 1000°C
Aufheizrate : 100°C/min
Beginn der Steigungsberechnung : 100,00 MPa
Ende der Steigungsberechnung : 150,00 MPa

Wicklung/Infiltration : IN-22-39
Material : UD
DB-Nr. Serie : 1423FFL0027
Pr.-Or. : 0-90°
Faser : N610-3k
Bemerkung :



3-Punkt-Biegeprüfung HT



DB-Nr.	Proben-Nr.	σ_{Br} MPa	F_{Br} N	σ_{max} MPa	F_{max} N	ϵ_{Br} %	Weg_{Br} mm	E-Mod GPa	Steigung 1 N/mm	Breite mm	Höhe mm	ILSS _{Br} MPa	Dela
1423FFL0027	1	448	88	448	88	0,29	0,701	145	1453,05	9,86	1,09	0,0	nein
1423FFL0029	2	459	90	459	90	0,28	0,685	146	1458,54	9,85	1,09	0,0	nein
1423FFL0031	3	528	109	528	109	0,32	0,766	162	1621,84	9,86	1,12	0,0	nein

Legende



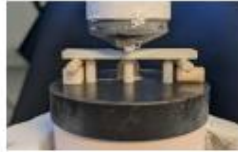
Serie	F_{Br} N	σ_{Br} MPa	ϵ_{Br} %	σ_{max} MPa	E-Mod GPa	ILSS _{Br} MPa
n = 3						
\bar{x}	96	478	0,30	478	151	0,0
s	12	43	0,02	43	10	0,0
v [%]	12,32	9	6,65	9,01	6,35	-



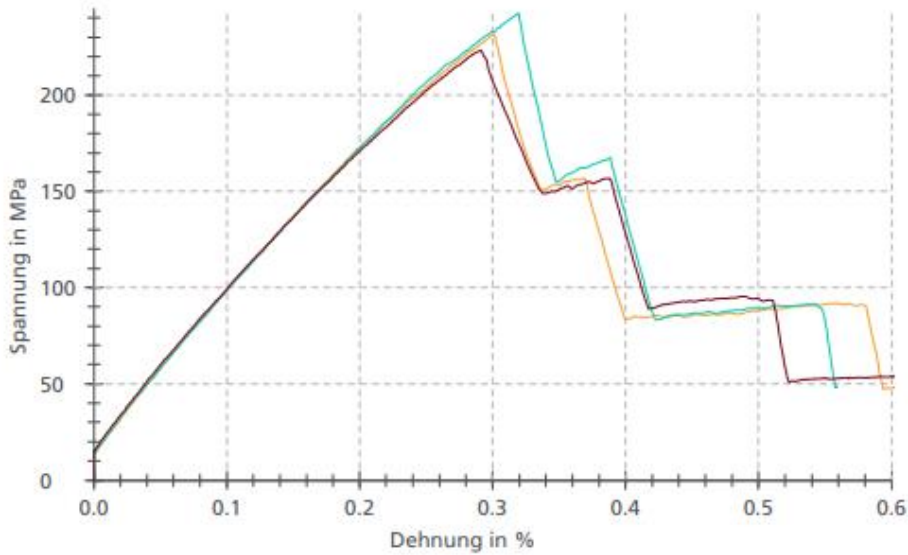
Prüfmaschine : Zwick 1
Prüfart : Druck
Kraftmessdose : KAF-TC 2.5kN
Prüfer : F. Flucht
Auftraggeber : J. Rudat

Auflagerabstand : 40mm
Vorkraft : 8 N
Prüfgeschwindigkeit : 1,0 mm/min
Prüftemperatur : 1000°C
Aufheizrate : 100°C/min
Beginn der Steigungsberechnung : 30,00 MPa
Ende der Steigungsberechnung : 50,00 MPa

Wicklung/Infiltration : IN-22-39
Material : Hybrid
DB-Nr. Serie : 1423FFL0017
Pr.-Or. : 0-90°
Faser : N610-3k
Bemerkung :



3-Punkt-Biegeprüfung HT



Legende	DB-Nr.	Proben-Nr.	σ_{Br} MPa	F_{Br} N	σ_{max} MPa	F_{max} N	ϵ_{Br} %	Weg $_{gr}$ mm	E-Mod GPa	Steigung 1 N/mm	Breite mm	Höhe mm	ILSS $_{gr}$ MPa	Dela
●	1423FFL0017	1	232	190	232	190	0,30	0,377	89	894,01	10,06	2,21	0,0	nein
●	1423FFL0021	2	243	206	243	206	0,32	0,391	86	857,61	10,34	2,22	0,0	nein
●	1423FFL0023	3	223	188	223	188	0,29	0,364	88	881,25	10,38	2,21	0,0	nein

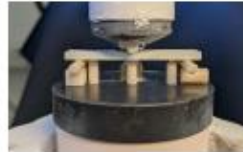
Serie	F_{Br} N	σ_{Br} MPa	ϵ_{Br} %	σ_{max} MPa	E-Mod GPa	ILSS $_{gr}$ MPa
n = 3						
\bar{x}	195	232	0,30	232	88	0,0
s	10	10	0,01	10	2	0,0
v [%]	5,09	4	4,72	4,15	2,10	-



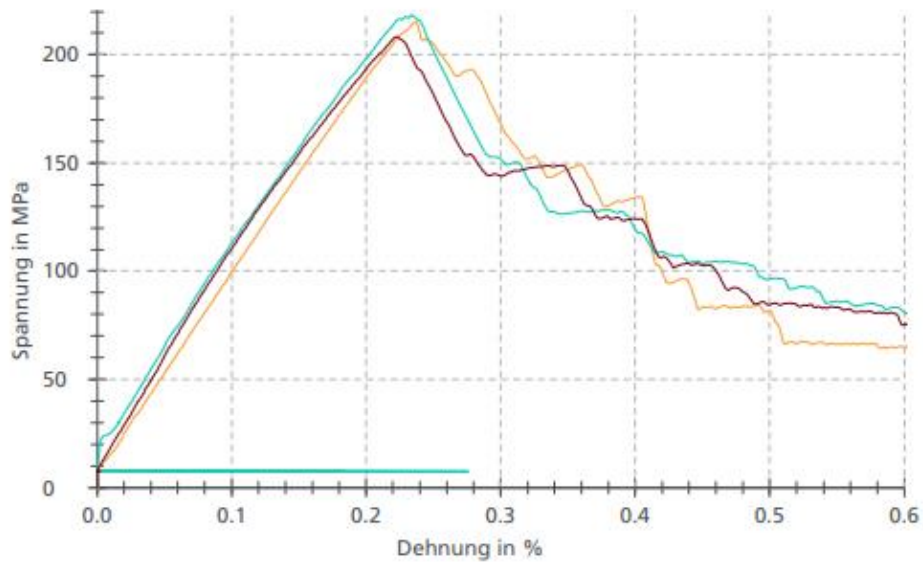
Prüfmaschine : Zwick 1
Prüfart : Druck
Kraftmessdose : KAF-TC 2.5kN
Prüfer : F. Flucht
Auftraggeber : J. Rudat

Auflagerabstand : 40mm
Vorkraft : 8 N
Prüfgeschwindigkeit : 1,0 mm/min
Prüftemperatur : 1000°C
Aufheizrate : 100°C/min
Beginn der Steigungsberechnung : 100,00 MPa
Ende der Steigungsberechnung : 150,00 MPa

Wicklung/Infiltration : IN-22-39
Material : IDF-19
DB-Nr. Serie : 1423FFL0007
Pr.-Or. : 0-90°
Faser : N610-3k
Bemerkung :



3-Punkt-Biegeprüfung HT



DB-Nr.	Proben-Nr.	σ_{Br} MPa	F_{Br} N	σ_{max} MPa	F_{max} N	ϵ_{Br} %	Weg_{Br} mm	E-Mod GPa	Steigung 1 N/mm	Breite mm	Höhe mm	ILSS _{Br} MPa	Dela
1423FFL0007	1	215	363	215	363	0,24	0,227	92	917,09	10,37	3,12	0,0	nein
1423FFL0009	2	218	363	218	363	0,23	0,216	88	879,89	10,16	3,13	0,0	nein
1423FFL0011	3	209	343	209	343	0,22	0,202	89	892,30	9,95	3,15	0,0	nein

Legende
 1423FFL0007
 1423FFL0009
 1423FFL0011

Serie	F_{Br} N	σ_{Br} MPa	ϵ_{Br} %	σ_{max} MPa	E-Mod GPa	ILSS _{Br} MPa
n = 3						
\bar{x}	356	214	0,23	214	90	0,0
s	11	5	0,01	5	2	0,0
V [%]	3,17	2	3,26	2,34	2,11	-

Anhang 3 Versuchsprotokolle Biege-Zyklerversuche



**Deutsches Zentrum
DLR für Luft- und Raumfahrt e.V.**
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Institut für Werkstoff-Forschung
Abteilung Struktur- und Funktionskeramik

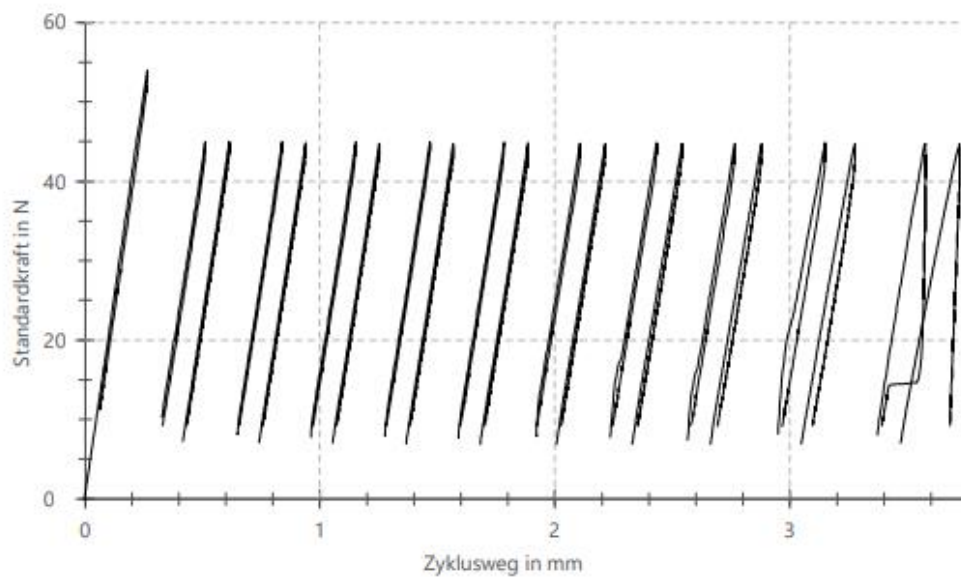
15.02.23

Prüfmaschine	: Zwick 1	Auflagerabstand	: 40-20
Prüfart	: Druck	Vorkraft	: 8 N
Kraftmessdose	: Gassmann 10kN	v1	: 1000 N/s
Prüfer	: Ferdinand Flucht	v2	: 1 N/s
Auftraggeber	: J. Rudat	Aufheizrate	: 100°C/min
		Beginn Steigung	: 25,00 N
		Ende Steigung	: 40,00 N


Material	: UD
Wicklung/Infiltration	: IN-22-39
DB-Nr.	: 1423FFL0032
Pr.-Or.	: PO0
Faserorientierung	: 0-90°
Faser	: N610-3k
Starttemperatur	: 800°C
Temperaturerhöhung	: 100-50°C
Haltezeit	: 10 min



**4-Punkt-Biegung
HT-Zyklisierung**





Legende 

Index	DB-Nr.	Prüfspannung MPa	Breite mm	Höhe mm	E-Mod GPa	Steigung 1 N/mm	Prüftemperatur °C
1	1423FFL0032	120,0	9,88	1,08	184	349	
2					165	312	800
3					169	320	800
4					169	320	850
5					169	321	850
6					169	320	900
7					171	325	900
8					167	316	950
9					167	317	950
10					165	313	1000
11					167	317	1000
12					164	310	1050
13					160	304	1050
14					161	306	1075
15					155	293	1075
16					156	297	1100
17					151	286	1100
18					143	271	1125
19					146	276	1125
20					158	300	1150
21					132	251	1150

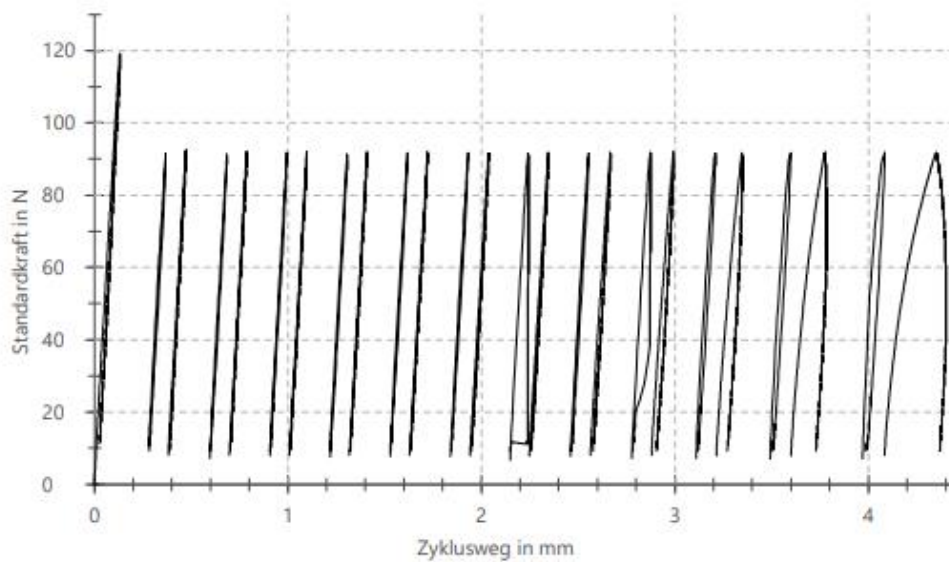


Prüfmaschine	: Zwick 1	Auflagerabstand	: 40-20
Prüfart	: Druck	Vorkraft	: 8 N
Kraftmessdose	: Gassmann 10kN	v1	: 1000 N/s
Prüfer	: Ferdinand Flucht	v2	: 1 N/s
Auftraggeber	: J. Rudat	Aufheizrate	: 100°C/min
		Beginn Steigung	: 19,00 N
		Ende Steigung	: 85,00 N


Material	: Hybrid
Wicklung/Infiltration	: IN-22-39
DB-Nr.	: 1423FFL0020
Pr.-Or.	: PO0
Faserorientierung	: 0-90°
Faser	: N610-3k
Starttemperatur	: 800°C
Temperaturerhöhung	: 100-50°C
Haltezeit	: 10 min



4-Punkt-Biegung
HT-Zyklisierung





Legende 

Index	DB-Nr.	Prüfspannung MPa	Breite mm	Höhe mm	E-Mod GPa	Steigungx N/mm	Prüftemperatur °C
1	1423FFL0020	58,0	10,06	2,21	93	1511,32	
2					98	1593,93	800
3					99	1610,24	800
4					97	1589,10	850
5					99	1620,01	850
6					97	1580,81	900
7					98	1606,14	900
8					96	1570,44	950
9					97	1582,85	950
10					96	1561,32	1000
11					95	1544,40	1000
12					94	1541,28	1050
13					93	1520,03	1050
14					95	1555,18	1075
15					89	1450,48	1075
16					93	1517,78	1100
17					84	1377,76	1100
18					93	1521,76	1125
19					76	1248,16	1125
20					89	1447,29	1150
21					65	1057,02	1150
22					85	1394,40	1175
23					48	781,25	1175
24					77	1251,43	1200
25					30	490,99	1200

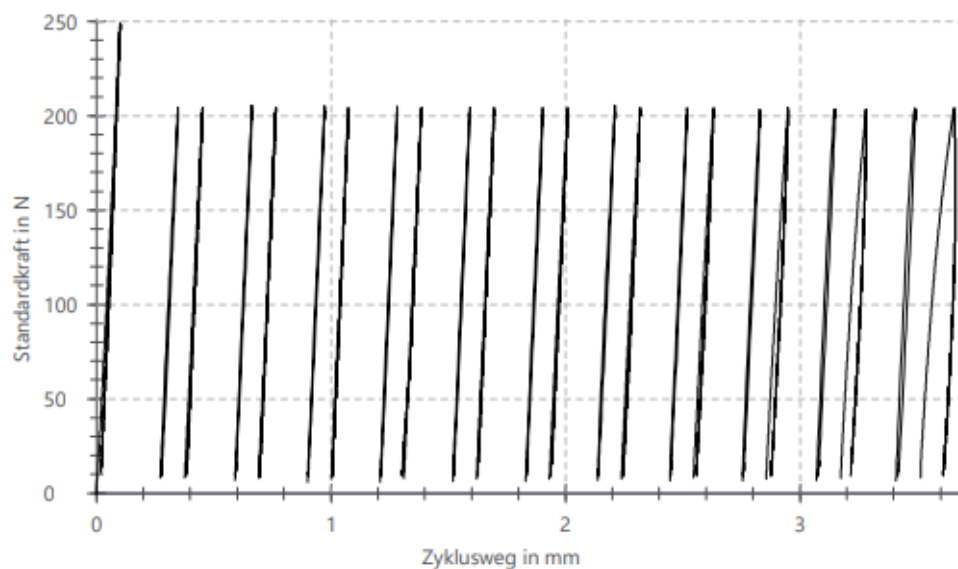


Prüfmaschine	: Zwick 1	Auflagerabstand	: 40-20
Prüfart	: Druck	Vorkraft	: 8 N
Kraftmessdose	: Gassmann 10kN	v1	: 1000 N/s
Prüfer	: Ferdinand Flucht	v2	: 1 N/s
Auftraggeber	: J. Rudat	Aufheizrate	: 100°C/min
		Beginn Steigung	: 20,00 N
		Ende Steigung	: 60,00 N


Material	: IDF-19
Wicklung/Infiltration	: IN-22-39
DB-Nr.	: 1423FFL0014
Pr.-Or.	: PO0
Faserorientierung	: 0-90°
Faser	: N610-3k
Starttemperatur	: 800°C
Temperaturerhöhung	: 100-50°C
Haltezeit	: 10 min



4-Punkt-Biegung
HT-Zyklisierung





Legende 

Index	DB-Nr.	Prüfspannung MPa	Breite mm	Höhe mm	E-Mod GPa	Steigung 1 N/mm	Prüftemperatur °C
1	1423FFL0014	53,5	9,96	3,11	108	4877	
2					107	4870	800
3					107	4855	800
4					114	5185	850
5					103	4686	850
6					113	5129	900
7					116	5250	900
8					112	5094	950
9					114	5164	950
10					112	5103	1000
11					102	4619	1000
12					113	5141	1050
13					107	4856	1050
14					101	4571	1075
15					100	4545	1075
16					112	5091	1100
17					96	4360	1100
18					108	4904	1125
19					93	4200	1125
20					109	4945	1150
21					84	3798	1150
22					108	4897	1175
23					76	3467	1175