

## 2025\_FinalReport-CryoCrack MTA

Version: **2**  
Datum: 2026-01-20  
Förderkennzeichen: 50RL2230C  
Laufzeit: 01.08.2022 - 31.10.2025

### Verbundvorhaben: Cryo-Crack

#### **"Entwicklung einer Validierungsmethode für ein Berechnungskonzept zur Bewertung der Bildung von Leckagenetzwerken in kryogenen CFK-Wasserstofftanks"**

Teilvorhaben: „Unterstützung der Modellvalidierung“

### Final Report 2025

Zuwendungsempfänger	MT Aerospace AG Postfach 10 22 35 86012 Augsburg
Autoren	Ralf Hartmond  Christian Dittert

Copyright: The content and works published in this document are governed by the copyright laws of Germany. Any duplication, processing, distribution or any form of utilization beyond the scope of copyright law shall require the prior written consent of the author or creator in question.

<b>ISSUE / REVISION STATUS RECORD</b>			
<b>Issue and Rev. No.</b>	<b>Date</b>	<b>Pages changed, added, deleted</b>	<b>Reasons for change</b>
Issue 1	2025-12-03		Original issue
Issue 2	2026-01-20	Footnote	Dokument Klassifizierung wurde entfernt

---

## Inhaltsverzeichnis:

<b>1</b>	<b>Einleitung und Ziele von Cryocrack .....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und der durch geführtes Arbeiten .....</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Testmatrix und Definition der ersten Probekörper.....</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Beschaffung Hexcel 8552/IM7 .....</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>Definition Kreuzzugsprobe.....</b>	<b>15</b>
5.1	Unterstützung bei der Probekörperdefinition der Kreuzzugproben.....	15
5.2	Identifikation relevanter Randbedingungen .....	16
5.3	Finale Definition der Kreuzzugsprobe .....	18
<b>6</b>	<b>Diskussion über Wahrscheinlichkeiten von Microrissbildung anhand von Schliffen an realen Druckkörpern .....</b>	<b>21</b>
<b>7</b>	<b>Abstimmung der Analyse Methoden zwischen MTA und TU-BS .....</b>	<b>26</b>
<b>8</b>	<b>Testmatrix Level 2 und Level 3 .....</b>	<b>27</b>
8.1	Probenpräparation.....	28
<b>9</b>	<b>Leckage Messungen .....</b>	<b>30</b>
9.1	Leckage Messungen bei Level 2 uni axial Proben .....	30
9.2	Leckage Messungen bei Level 2 Biax Proben.....	35
9.3	Leckage Messungen bei Level 3 Biax Proben.....	36
9.4	Unterstützung Biax-Prüfstand TUM.....	37
9.4.1	Steifigkeitsunterschiede im Biax-Prüfstand.....	37
9.4.2	Kühlvorrichtung und Dehnungsverteilung .....	39
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung Ergebnisse CryoCrack .....</b>	<b>41</b>
<b>11</b>	<b>Vergleich des Stands des Vorhabens mit der ursprünglichen (bzw. mit Zustimmung des Zuwendungsgebers geänderten) Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplanung.....</b>	<b>43</b>
<b>12</b>	<b>Haben sich die Aussichten für die Erreichung der Ziele des Vorhabens innerhalb des angegebenen Berichtszeitraums gegenüber dem ursprünglichen Antrag geändert (Begründung)?.....</b>	<b>44</b>
<b>13</b>	<b>Sind inzwischen von dritter Seite Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind? .....</b>	<b>45</b>
<b>14</b>	<b>Sind oder werden Änderungen in der Zielsetzung notwendig?.....</b>	<b>46</b>
<b>15</b>	<b>Fortschreibung des Verwertungsplans.....</b>	<b>47</b>

---

## Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 5-1: Anforderungen an die Geometrie einer Kreuzzugprobe.....	15
Abbildung 5-2: Erste Form der Kreuzzugprobe .....	17
Abbildung 3:FEM Rechnungen für CP Lamine TUBS@DLR.....	18
Abbildung 4: Kreuzzugsprobe aktuelles Design Quelle: TUM.....	19
Abbildung 5:Mögliche Schnittanordnung Kreuzzugsprobe .....	20
Abbildung 6: Schliffe CFK Lamine bei verschiedenen Belastungen.....	22
Abbildung 7: Schliffe von Harzreichen und Faserarmen Stellen .....	23
Abbildung 8: Schliff mit Rissnetzwerk über mehrere Lagen.....	24
Abbildung 9:Schliffe mit laminatüblichen Mikroporen und Fehlstellen.....	24
Abbildung 10:Skizze DMS auf Kreuzzugsprobe. ....	29
Abbildung 11:Testaufbau Lecksucher .....	32
Abbildung 12: QI 2mm RT 623 1%.....	33
Abbildung 13: QI 2mm LN2 getaucht 1% .....	33
Abbildung 14: QI 1mm RT (625)1% .....	34
Abbildung 15: CP 2mm RT (628)1% .....	34
Abbildung 16:Kreuzzugsprobe in der Leckagemessung und im Detail.....	35
Abbildung 17:Leckagemessung Level 2 Biax Proben.....	35
Abbildung 18: CP 2mm RT Test:ID 2-07 .....	36
Abbildung 19: typischer Verlauf der Leckage bei einem Level 3 Versuch.....	37
Abbildung 20:Steifigkeitsunterschied Biax TUM .....	38
Abbildung 21:Anpassung Probenhalter Steifigkeit.....	38
Abbildung 22: Test der Kühlvorrichtung at MTA.....	39
Abbildung 23:Kreuzzugsprobe mit GFK-Verstärkung .....	40
Abbildung 24: Kreuzzugsprobe mit Stahl-Verstärkung .....	40

## Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1:Testmatrix für Level 0 Tests an der Uni Augsburg.....	9
Tabelle 2: Testmatrix für Level 1Tests am IWM .....	10
Tabelle 3:Hergestellte Platten bei MT-Aerospace für Level 0 tests. ....	12
Tabelle 4: Hergestellte Platten bei MT-Aerospace für Level 1 tests. ....	13
Tabelle 5: Hergestellte Platten bei MT-Aerospace für Level 2 und Level 3.....	14
Tabelle 6:Testübersicht Level 2 und Level 3 .....	28

---

# 1 Einleitung und Ziele von Cryocrack

Das Teilprojekt von MTA ist im Gesamtvorhaben Cryocrack mit dem Gesamtprojektleiter TUBS eingebettet. Im Folgenden ist das Gesamtziel des Vorhabens zusammengefasst.

Für zukunftsfähige, innovative Tanktechnologien in der Raumfahrt werden aufgrund des Leichtbaupotenzials und aus Gründen der Kostenoptimierung verstärkt Programme mit großen Anteilen aus Carbonfaser verstärkten Kunststoffen (CFK) umgesetzt. Insbesondere bei LH2-Systemen spielt die Permeation des Treibstoffs durch die Tankwand eine wesentliche Rolle und ist im Wesentlichen von den Parametern Matrixsystem, Wandstärke, Molekülgröße, Temperatur und Druckdifferenz abhängig.

Frühere Entwicklungsvorhaben, wie z.B. ESA FLPP Phoebus/Comet, sowie detaillierte wissenschaftliche Recherchen haben gezeigt, dass der Mechanismus, wie Leckage / Permeation bei Faserverstärkten Werkstoffen stattfindet nicht vollständig analytisch beschrieben werden kann. Weiterhin hat sich durch Versuche auf sample- und Komponenten-level gezeigt, dass die Mikrorisse und die Ausbildung eines Mikroriss-Netzwerks über alle Lagen eines Laminats hinweg wesentlich für die Leckage eines CFK-Werkstoffs verantwortlich sind. Dies konnte zwar durch Testen von Druckkörpern validiert werden, jedoch bestehen nur unzureichende Korrelationen zu coupon- oder flachen Probekörpern, sowohl uni- als auch multiaxial belastet.

Mit dem vorliegenden Gesamtvorhaben soll diese Lücke geschlossen. Basis dafür ist die Theorie des Mikroriss-Netzwerks, welche als Verbundvorhaben beginnend von der Micro-Ebene (Fraunhofer IWM) in ein Modell auf Meso-Ebene (TU Braunschweig) überführt und mit entsprechenden Materialtests auf coupon- und Makro-level validiert werden soll. Letztere sollen mit Hilfe von multiaxialen Kreuzzug-Versuchen realisiert werden (TUM, MTA) und mit Hilfe von Leckagemessungen im belasteten Zustand (MTA) die Bestätigung für die Theorie des Materialmodells auf Meso-Ebene liefern. Geplant ist, ein Materialsystem, vorzugsweise Hexcel 8552, zu verwenden, wobei der grundsätzliche Anspruch des Gesamtvorhabens ist, ein Materialunabhängiges Modell zu entwickeln.

Übergeordnetes Ziel des Teilvorhabens von MTA im Projekt Cryocracks ist es das bereits erlangte Know-how aus anderen Programmen (z.B. FLPP) effizient einzusetzen und eine robuste Validierung der Modelle zu erzielen. Dies trägt bei künftigen Entwicklungsprogrammen dazu bei mit deutlich weniger Aufwand Leckage-dichte Tanks auszulegen. Aus diesem übergeordneten Ziel werden die folgenden sub-Ziele abgeleitet:

1. Die erlangten Erkenntnisse aus bisherigen Programmen (z.B. FLPP ComET, PHOEBUS) sollen möglichst effizient dafür genutzt werden mit einem technologischen Vorsprung in die Validierungslogik zu starten.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurden die Kreuzzugtests als potenziell repräsentativer Test auf Proben-level identifiziert. Die technologische Reife dieser Tests ist jedoch, insbesondere für CFK-Probekörper zu gering, um direkt adaptiert werden zu können. Daraus wurde die folgenden, weiteren Ziele abgeleitet:

2. Die Entwicklung von Kreuzzug-Probekörpern für CFK zum Erfolg zu führen, sowohl für Tests bei RT als auch für cryogene Temperaturen.

3. Die benötigten Probekörper für das Programm und insbesondere die Kreuzzug-Proben herzustellen und bei den mech. Tests zu unterstützen (RT und cryo)

4. Leckage-messungen am Kreuzzug-Probekörper, während dieser belastet wird, durchzuführen

5. Einen Empfehlungskatalog über benötigte Prüfkörper für eine repräsentative Aussage bzgl. des Leckageverhaltens eines (beliebigen) CFK-Materials zu erstellen

---

Die Arbeiten in Cryocracks bauen zwar auf den Erkenntnissen aus anderen Programmen auf, sind aber in vollem Umfang eigenständig bzw. ergänzend. Die Ergebnisse werden dann in bestehende und künftige Programme (FLPP, LuFo, u.a.) einfließen.

---

## **2 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und der durch geführtes Arbeiten**

Im Wesentlichen wurde der Arbeitsanteil von MTA durch die folgenden Aufgaben bestimmt:

- Verständigung aller Projektpartner auf eine gemeinsame Prüfkörperlogik und im Projekt umsetzbaren Umfang
- Definition der Probekörper für alle Tests und Erstellen einer Testmatrix
- Beschaffung einer ausreichenden Menge des prepregs Hexcel 8552/IM7
- Fertigung alle benötigten Probenplatten
- Unterstützung bei der Definition möglicher Proben Geometrien für CFK Kreuzzugproben
- Identifikation relevanter Randbedingungen für den Kreuzzugteststand anhand realer Druckkörper
- Diskussion über Wahrscheinlichkeiten von Microrissbildung anhand von Schliffen an realen Druckkörpern
- Unterstützung bei Geometrien für CFK Kreuzzugproben
- Unterstützung Probenaufbereitung
- Workshop Abstimmung Analysemethoden von Micro zur Mesoebene
- Leakage Tests bei RT (ohne Dehnung) von allen Level 2 Proben nach mechanischer uniaxialer Vorbelastung durch die TUM bei 0,65% und 1% Dehnung, bei Raumtemperatur und Thermo geschockt bei 77K
- Leakage Tests Level 3 bei der TUM
- Unterstützung Fehlersuche und Lösung beim TUM BIAX Prüfstand

---

### 3 Testmatrix und Definition der ersten Probekörper

In den ersten Meetings des Projekts musste eine grundsätzliche Logik für die umzusetzenden Prüfkörper erarbeitet werden. Neben der wissenschaftlich basierten Wunschvorstellung muss der Prüfkörperumfang jedoch auch innerhalb von CryoCrack realisierbar sein. Daher hat sich das Konsortium grundsätzlich auf die Vorgehensweise entlang der Level 0-3 geeinigt. Gleichzeitig war allen Projektpartnern sehr bewusst, dass sich sowohl die Testmatrix als auch die Anzahl der Probekörper mit steigendem Erkenntnisgewinn ändern werden. Als Material für das Projekt wurde Hexcel 8552/IM7 ausgewählt.

Final wurde sich auf folgende Definition geeinigt:

Für Level 0:

- Material Charakterisierung ans der Uni Augsburg mit folgenden Parametern Längszug, Queer Zug, In plane shear, Bruchmechanik G1C, G2C, Open hole Tests and Qi Laminaten und an Crossply Laminaten.
- Materialdaten sind bei Raumtemperatur und bei Cryotemperaturen 77K zu ermitteln.

Für Level 1:

- Zählung von Rissen (Crack density) nach thermischer Zyklierung bei verschiedenen Layup Typen

Für Level 2:

- Uniaxiale und erst Biaxiale Tests an der TU München

Für Level 3:

- Biaxiale Tests mit in-situ Permeationsmessung bei Raumtemperatur und Cryotemperatur (77K)

Mit Eintreffen des Materials im Januar 2023 soll unmittelbar danach mit der Herstellung der Probekörper begonnen werden. Dafür wurden die Laminatkonfigurationen für die Level 0 und den ersten Teil der Level 1 Testkampagne, sowie die Anzahl der Probenplatten und Nebenparameter diskutiert. Zusammen mit der TU-BS und dem AMU der Uni Augsburg wurden folgende Parameter festgelegt. Die Testmatrix für Level 0 ist in Tabelle 1 definiert. Die Tests für die Crack-Density Untersuchungen Level 1 in Tabelle 2.

**Tabelle 1: Testmatrix für Level 0 Tests an der Uni Augsburg**

ID	Level	Kenngröße	Responsible	Thermal Load	Specimen specification
0-01	Level 0	UD-Tensile 0°	Uni Augsburg	LN2	DIN EN ISO 527-5
0-02	Level 0	UD-Tensile 90°	Uni Augsburg	LN2	DIN EN ISO 527-5
0-03	Level 0	In-plane shear	Uni Augsburg	LN2	DIN EN 14129
0-04	Level 0	DCB	Uni Augsburg	LN2	ASTM D5528
0-05	Level 0	ENF	Uni Augsburg	LN2	ASTM D7905
0-06	Level 0	UD-Tensile 0°	Uni Augsburg	RT	DIN EN ISO 527-5
0-07	Level 0	UD-Tensile 90°	Uni Augsburg	RT	DIN EN ISO 527-5
0-08	Level 0	In-plane shear	Uni Augsburg	RT	DIN EN 14129
0-09	Level 0	DCB	Uni Augsburg	RT	ASTM D5528
0-10	Level 0	ENF	Uni Augsburg	RT	ASTM D7905
0-11	Level 0	OHT	Uni Augsburg	RT	ASTM D5766; QI@2mm
0-12	Level 0	OHT	Uni Augsburg	LN2	ASTM D5766; QI@2mm
0-13	Level 0	OHT	Uni Augsburg	RT	ASTM D5766; QI@4mm
0-14	Level 0	OHT	Uni Augsburg	LN2	ASTM D5766; QI@4mm
0-15	Level 0	OHT	Uni Augsburg	RT	ASTM D5766; CP@2mm
0-16	Level 0	OHT	Uni Augsburg	LN2	ASTM D5766; CP@2mm

**Tabelle 2: Testmatrix für Level 1 Tests am IWM**

ID	Level	Kenngröße	Responsible	Thermal Load	Specimen specification
1-01	Level 1	Crack-density (CT/Microsection)	IWM	-	Referenz direkt aus Platte
1-02	Level 1	Crack-density (CT/Microsection)	IWM	1x cycle LN2	Layup UD
1-03	Level 1	Crack-density (CT/Microsection)	IWM	1x cycle LN2	Layup CP
1-04	Level 1	Crack-density (CT/Microsection)	IWM	1x cycle LN2	Layup QI
1-05	Level 1	Crack-density (CT/Microsection)	IWM	10x cycle LN2	Layup UD
1-06	Level 1	Crack-density (CT/Microsection)	IWM	10x cycle LN2	Layup CP
1-07	Level 1	Crack-density (CT/Microsection)	IWM	10x cycle LN2	Layup QI
1-08	Level 1	Crack-density (CT/Microsection)	IWM	100x cycle LN2	Layup UD
1-09	Level 1	Crack-density (CT/Microsection)	IWM	100x cycle LN2	Layup CP
1-10	Level 1	Crack-density (CT/Microsection)	IWM	100x cycle LN2	Layup QI
1-11	Level 1	Crack-density (CT/Microsection)	IWM	low cooling rate	Layup UD
1-12	Level 1	Crack-density (CT/Microsection)	IWM	low cooling rate	Layup CP
1-13	Level 1	Crack-density (CT/Microsection)	IWM	1x cycle LN2	Layup 1 (e.g. QI) low thickness
1-14	Level 1	Crack-density (CT/Microsection)	IWM	1x cycle LN2	Layup 1 (e.g. QI) high thickness
1-15	Level 1	Crack-density (CT/Microsection)	IWM	1x cycle LN2	Layup 2 (e.g. CP) low thickness
1-16	Level 1	Crack-density (CT/Microsection)	IWM	1x cycle LN2	Layup 2 (e.g. CP) high thickness

Ebenfalls wurde im Konsortium diskutiert, inwiefern eine Pressen-Härtung des Materials einen zur Autoklav-Härtung abweichenden Einfluss auf die Bildung von Mikrorissnetzwerken haben kann. Hier gibt es, auch in der Literatur, keine Erfahrungswerte. Folglich wurde auf die Aushärtung im Autoklaven zurückgegriffen, da dies auch dem realen Prozess der Fertigung eines Druckbehälters entspricht.

---

## 4 Beschaffung Hexcel 8552/IM7

Für die Untersuchungen in CryoCracks hat man sich auf die Beschaffung des Materialsystems Hexcel 8552 geeinigt, da dieses akademisch bereits bestens charakterisiert ist und somit eine große Datenbasis besitzt.

Die Beschaffung von Hexcel 8552 gestaltete sich insofern schwierig, da zunächst nur Lieferzeiten von >22 Wochen möglich zu sein schienen. Dies hätte den weiteren Projektverlauf erheblich verzögert, worauf Alternativen gesucht und auch gefunden wurden. Die Lieferzeit konnte durch Gespräche mit dem Lieferanten erheblich gekürzt werden, wodurch das Material im Januar 2023 bei MTA angeliefert wurde. Die Menge wurde so gewählt, dass alle Probekörper der Testmatrix damit hergestellt werden können.

Im Konsortium wurde diskutiert ob entweder verschiedene Batches oder ein Produktionsbatch mit verlängertem Material für die Probekörper verwendet werden sollte. Beide Varianten haben vor- und Nachteile, grundsätzlich kann jedoch bei dem Hexcel 8552/IM7 davon ausgegangen werden, dass es sich um ein sehr stark am Markt etabliertes Material handelt, das grundsätzlich eine geringe Streubreite aufweisen sollte. Somit sind beide Argumentationen als nicht entscheidend für die Erkenntnisse in CryoCrack anzusehen.

Letztlich wurde auf eine weitere Bestellung innerhalb CryoCrack verzichtet, auch wenn dadurch die letzten Probekörper mit verlängertem Material gebaut werden müssen.

Das aktuelle verwendete Material ist aus der Charge 10M00655157A01, die Platten der Charge#2 wurden bereits aus diesem Material hergestellt. Es sind 91qm im Haus.

Das verbleibende Material muss für die Fertigung der Charge#3 verlängert werden. Der Einfluss der Verlängerung wird als gering eingestuft, da es sich um ein langjährig am Markt etabliertes Materialsystem handelt.

Die hergestellten Platten wurden in Handablage abgelegt und unter Verwendung von Druckblechen und im Autoklav ausgehärtet. Die für Level 0-3 gebauten Platten sind in der Tabelle 3, Tabelle 4 und Tabelle 5 für die verschiedenen Test Level dargestellt.

**Tabelle 3: Hergestellte Platten bei MT-Aerospace für Level 0 tests.**

Platten-Nr.	ID (link to test matrix)	Stacking	Status	Empfänger	Comment
PP.A1-465	0-01	[0]16	Charge #1	Uni Augsburg	Cryocrack Längszug E11
PP.A1-466	0-06				Cryocrack Längszug E11
PP.A2-468	0-02	[90]16	Charge #1	Uni Augsburg	Cryocrack Querkzug E22
PP.A2-469	0-07				Cryocrack Querkzug E22
PP.A2-470	0-07 wdh		Charge #1	TUBS/DLR	Querkzug E22 Knochenproben
PP.B2-490	0-03	[45, -45]8s	unsymmetrisch, Nachfertigung (2+2 Platten)	Uni Augsburg	Cryocrack In plane shear G12
PP.B2-503	0-08				Cryocrack In plane shear G12
					Aufleimerplatte 2x (in nachfertigur
PP.A4-491	0-04	[0]32	Charge #1	Uni Augsburg	Cryocrack Bruchmechanik G1C
PP.A4-492	0-09				Cryocrack Bruchmechanik G1C
PP.A4-493	0-05	[0]32	Charge #1	Uni Augsburg	Cryocrack Bruchmechanik G2C
PP.A4-494	0-10				Cryocrack Bruchmechanik G2C
PP.B2-495	0-11	[45,90,-45,0]2s	Charge #1	Uni Augsburg	Cryocrack OHT QI
PP.B2-496	0-12				Cryocrack OHT QI
PP.B4-472	0-13	[45,90,-45,0]4s	Charge #1	Uni Augsburg	Cryocrack OHT QI
PP.B4-473	0-14				Cryocrack OHT QI
PP.B2-498	0-15	[0,90]4s	Charge #1	Uni Augsburg	Cryocrack OHT 0/90
PP.B2-499	0-16				Cryocrack OHT 0/90

**Tabelle 4: Hergestellte Platten bei MT-Aerospace für Level 1 tests.**

Platten-Nr.	ID (link to test matrix)	Stacking	Status	Empfänger
PP.A4.0-631	1-02	[0]32	Charge #2	IWM
	1-05			
	1-08			
	1-11			
PP.B4.0-629	1-03	[0,90]8s	Charge #2	IWM
	1-06			
	1-09			
	1-12			
PP.B4.0-626	1-04	[45,90,-45,0]4s	Charge #2	IWM
	1-07			
	1-10			
PP.B2-497	1-13	[45,90,-45,0]2s	Charge #1	IWM
PP.B6.0-627	1-14	[45,90,-45,0]6s	Charge #2	IWM
PP.B2-500	1-15	[0,90]4s	Charge #1	IWM
PP.B6.0-630	1-16	[0,90]12s	Charge #2	IWM

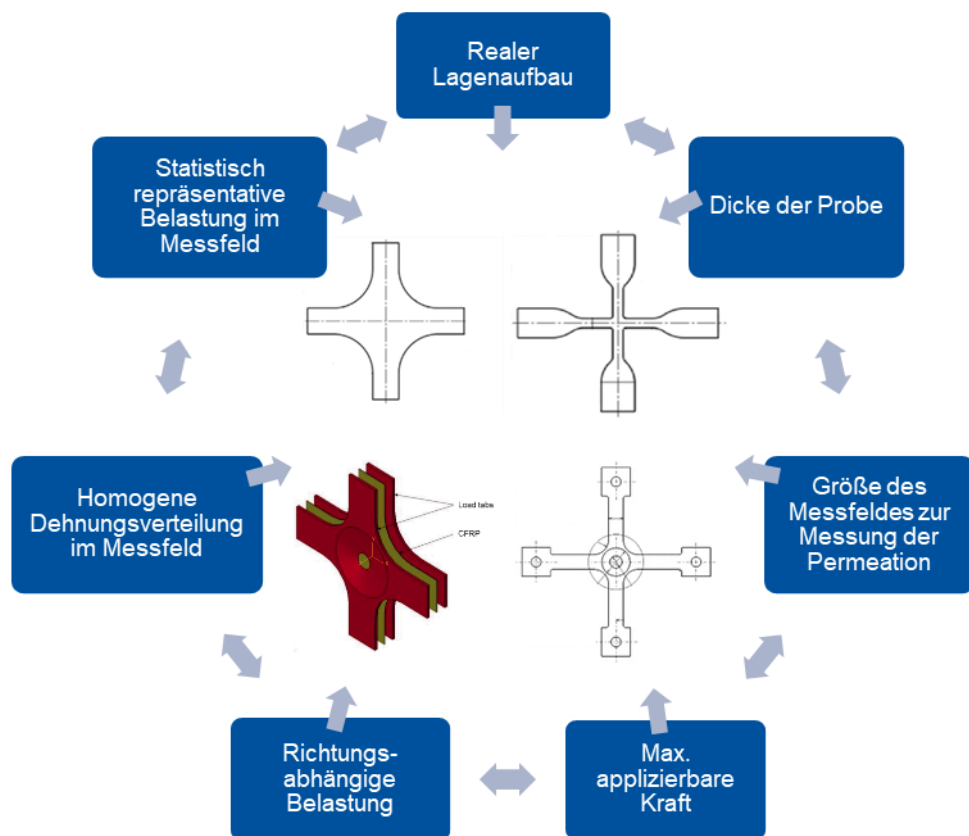
**Tabelle 5: Hergestellte Platten bei MT-Aerospace für Level 2 und Level 3**

	Platten-Nr.	ID (link to test matrix)	Stacking	Status	Empfänger	Comment	
Level 2	PP.B2.0-623	2-01	[45,90,-45,0]2s	Charge #2 (2x)	TUM	uniaxial load (QI - standard thickness)	
	PP.B2.0-624	2-02					
		2-05					
		2-06					
	PP.B1.0-625	2-03	[45,90,-45,0]s	Charge #2	TUM	uniaxial load (QI - low thickness)	
	PP.B2.0-628	2-04	[0, 90]4s	Charge #2	TUM	uniaxial load (CP - standard thickness)	
	663/664	2-07	[0,90]_4s		Charge #3	TUM	biaxial load (CP - standard thickness)
		2-10					
	665	2-12	[0,90]_8s		Charge #3	TUM	biaxial load (CP - higher thickness)
		2-13					
2-14							
666/667/668	2-15;-2-21	[45,90,-45,0]2s		Charge #3(2x)	TUM	biaxial load (QI - standard thickness): selected for FEA	
	2-22;2-28						
Level 3	663/664	.03-01;03-02	[0,90]_4s	Charge #3	TUM	biaxial load (CP - standard thickness)	
		.03-05;3-06					
	669	.02-09	[45; 67.5; 90; -67.5; -45; -22.5; 0; 22.5] s	Charge #3	TUM	biaxial load (QI small delta)	
		.03-04					
		.03-08					
	666/667/668	.3-03	[45,90,-45,0]2s	Charge #3	TUM	biaxial load (QI - standard thickness): selected for FEA	
.3-07							

## 5 Definition Kreuzzugprobe

### 5.1 Unterstützung bei der Probekörperdefinition der Kreuzzugproben

In Zusammenarbeit mit der TUM wurde ein erster Entwurf für die Erstellung von Probekörpern diskutiert und dann im Folgenden von der TUM per FEM umgesetzt. Ziel ist es einen homogenen Spannungszustand im relevanten Messbereich der Probe zu generieren. Hier gibt es Seitens der TUM einige Erfahrungen von metallischen Probekörpern, die jedoch nicht unmittelbar auf CFK-Probekörper übertragen werden können. Weiterhin muss für die CFK-Kreuzzugproben innerhalb aller Randbedingungen des Projekts eine Lösung gefunden werden. Dies ist in Abbildung 5-1 dargestellt, wobei die Geometrien der Probekörper in der Mitte als rein exemplarisch anzusehen sind.



**Abbildung 5-1: Anforderungen an die Geometrie einer Kreuzzugprobe**

Basierend auf diesen Randbedingungen hat die TUM sich von der Seite der praktischen Umsetzung eines Kreuzzugtests angenähert, während MTA einen analytischen Ansatz vom realen Tank ausgehend gewählt hat.

---

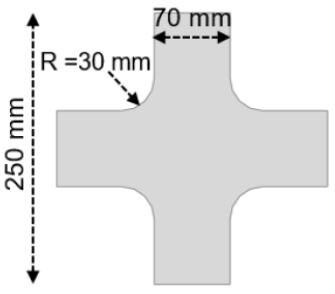
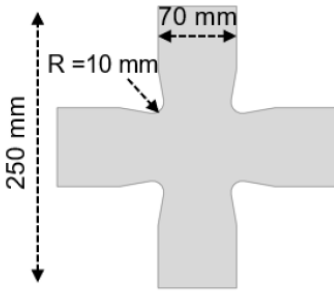
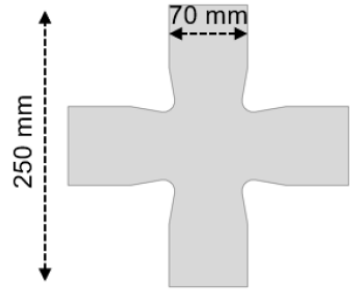
## 5.2 Identifikation relevanter Randbedingungen

Im letzten Berichtszeitraum wurden anhand charakteristischer Laminatkonfiguration im realen Tank die Spannungsverhältnisse in Längs- und Umfangsrichtung ausgelesen, die sehr von der lokalen Lagendefinition abhängig sind. Weiterhin wurde in einer ersten Abschätzung der benötigte Flux in N/mm identifiziert, welcher nötig ist um die geforderte Spannung in einem entsprechenden Laminat zu erzeugen. Die Laminatdicken variierten von 1,7mm bis 4,1mm. Die Ergebnisse sind im Anhang B auf Folie 5 zu finden.

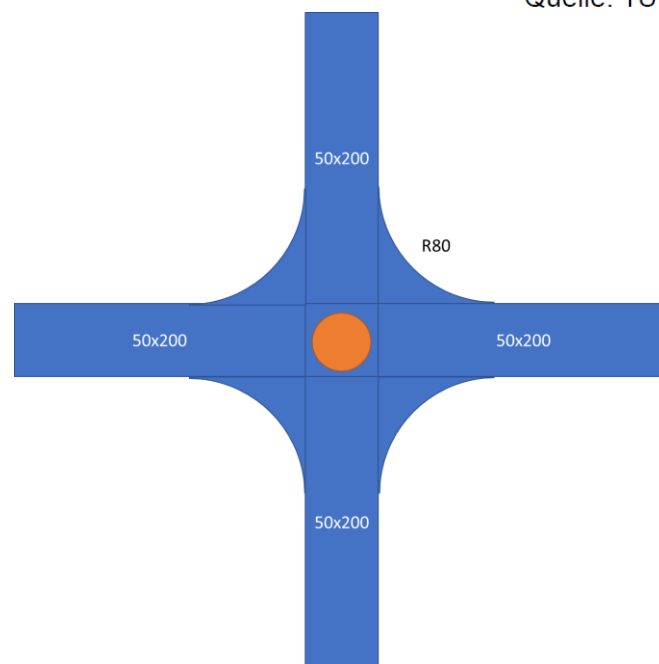
Die Arbeiten sind noch nicht abgeschlossen und werden im nächsten Berichtszeitraum fortgeführt. Dann werden auch detailliertere Daten bzgl. der Randbedingungen zur Verfügung stehen und diese werden mit den Ergebnissen der TUM harmonisiert werden können.

Ziel ist es auf Basis dieser ersten Erkenntnisse eine erste Kreuzzug-Probengeometrie umzusetzen und der TUM zur Verfügung zu stellen, so dass grundlegende Versuche, z.B. bzgl. der Einspannung, der Wegmessung, Zugänglichkeit, etc. durchgeführt werden können.

Basierend auf den Erkenntnissen der FEM-Rechnungen der TUM im letzten Berichtszeitraum wurden die Aktivitäten der möglichen Probekörperdefinitionen der Kreuzzugproben intensiviert. Im Wesentlichen wurde, die noch vorhandene nicht- Linearität im Messfeld akzeptiert und zunächst eine Mischung der „Referenzgeometrie und Geometrie 2 (mit Dickensprüngen)“ ausgewählt. Der Radius wurde auf  $> 30$  mm definiert, siehe Abbildung 5-2. Danach wurde die Übertragbarkeit von realen Tanklaminaten auf ebene Kreuzzug- Probekörper überprüft. Neben den Belastungsverhältnissen in L- und W- Richtung in Vergleich zu einem realen Tank ist auch das Laminat-stacking entscheidend für die Repräsentativität der Probe. Hierbei muss auf die Ebenheit der Probe besonders geachtet werden, was einen symmetrischen Lagenaufbau voraussetzt. Die Ausgeglichenheit des Laminats muss ebenfalls überprüft werden, da je nach Orientierung der Lagen die Durchgängigkeit der Fasern der einzelnen Lagen unterschiedlich unterbrochen wird. Sollten diese Punkte nicht beachtet werden, würde die Probe nach dem Aushärten (im Falle der Symmetrie) bzw. spätestens nach Fräsen (im Falle der Ausgeglichenheit) nicht mehr eben sein und wäre somit für einen Kreuzzugtest ungeeignet.

Referenz	Geometrie 1	Geometrie 2
		

Quelle: TUM UTG, 2. Quartalstreffen



**Abbildung 5-2: Erste Form der Kreuzzugprobe**

Die verschiedenen Betrachtungen bzgl. der Übertragbarkeit von realen Tanklaminaten sind noch nicht vollständig abgeschlossen und werden im nächsten Berichtszeitraum ausführlicher betrachtet. Dennoch können zum jetzigen Zeitpunkt die folgenden Erkenntnisse formuliert werden:

- Für generische Laminats sind Kreuzzugprobekörper aus CFK gut geeignet, dies gilt
  - o für quasi-isotrope Lagenaufbauten, die „einfach“ in symmetrischem und ausgeglichenem stacking hergestellt werden können,
  - o mit Einschränkungen für Laminat mit einer Vorzugsrichtung (z.B. 0/90° im Verhältnis ungleich 50:50)
- Phänomene (Delta-Winkel, thin-ply, etc.) können gut überprüft werden, mit der Einschränkung dass Symmetrie und Ausgeglichenheit der Laminats erreicht werden müssen
- Dickensprünge im Bereich der Lasteinleitung sind von Vorteil
- Die direkte Übertragbarkeit von realen Tanklaminaten auf Kreuzzugprobekörper ist i.d.R. nicht möglich
- Kreuzzug-Probekörper mit einer hohen Repräsentativität bzgl. der Spannungszustände im Vergleich zu realen Tanklaminaten...

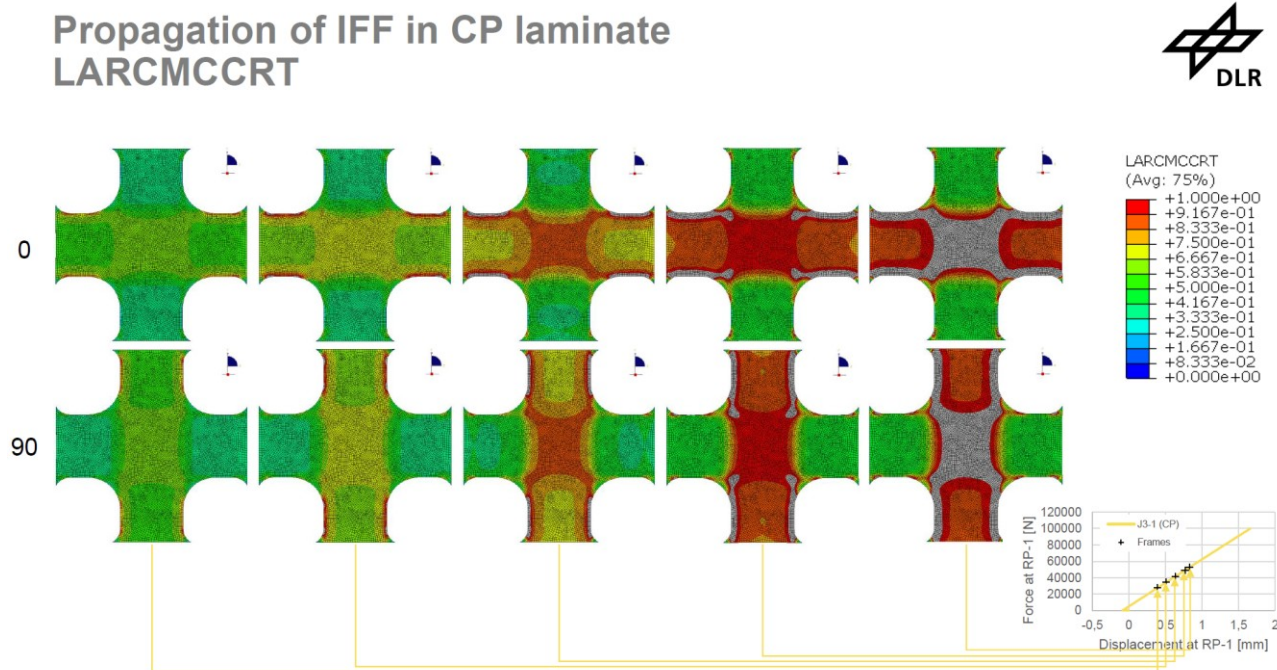
- können möglich sein, sind aber mit erheblichem Aufwand bei der Auslegung verbunden
- beinhalten immer Kompromisse

Dadurch ist u.a. ein Ziel der Arbeiten von MTA und TUM in CryoCrack die o.g. Erkenntnisse mit Hilfe der noch geplanten Kreuzzugtests zu verifizieren oder zu widerlegen.

### 5.3 Finale Definition der Kreuzzugsprobe

Aus der bisherigen Grundannahmen für die Kreuzzugprobe mit einem initialen Design gezeigt in Abbildung 5-2 ergeben sich folgende Limitationen:

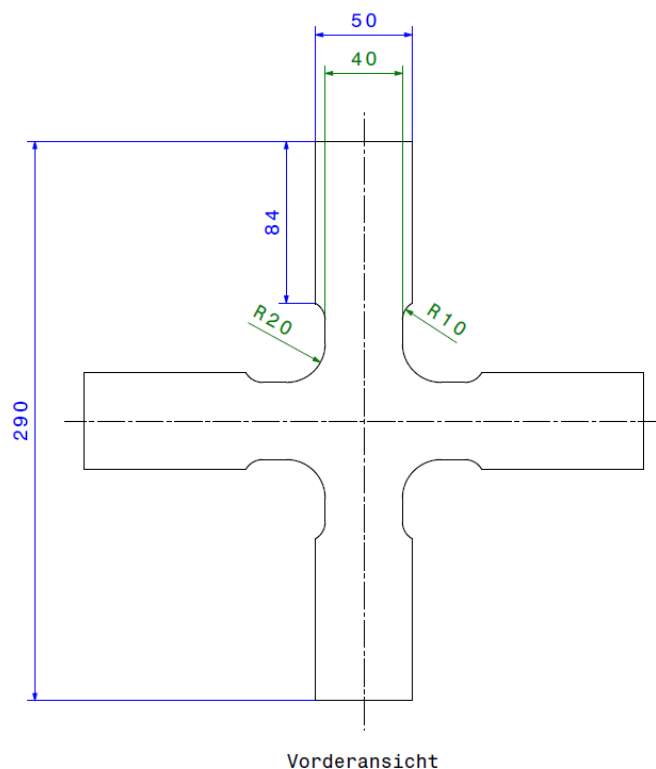
- Symmetrischer Lagenaufbau zwingend notwendig
- direkte Übertragbarkeit von realen Tanklaminaten auf Kreuzzugprobekörper ist i.d.R. nicht möglich
- Für generische Laminat sind Kreuzzugprobekörper aus CFK gut geeignet, dies gilt
  - Für quasi-isotrope Lagenaufbauten, die „einfach“ in symmetrischem und ausgeglichenem stacking hergestellt werden können,
  - mit Einschränkungen für Laminat mit einer Vorzugsrichtung (z.B. 0/90° im Verhältnis ungleich 50:50)
- Phänomene (Delta-Winkel, thin ply, etc.) können gut überprüft werden, mit der Einschränkung, dass Symmetrie und Ausgeglichenheit der Laminat erreicht werden müssen
- Dickensprünge im Bereich der Lasteinleitung sind von Vorteil



**Abbildung 3:FEM Rechnungen für CP Laminate TUBS@DLR**

Mit dem Fortlaufen des Projektes wurde im 2 Halbjahr 2023 nochmal deutlich an der Probendefinition der Kreuzzugproben gearbeitet. Insbesondere hat das Team um Prof. Hühne, bei der Vorauslegung unterstützt und FEM-Analysen für CP Laminat und QI Laminat wie in Abbildung 3, mit der in

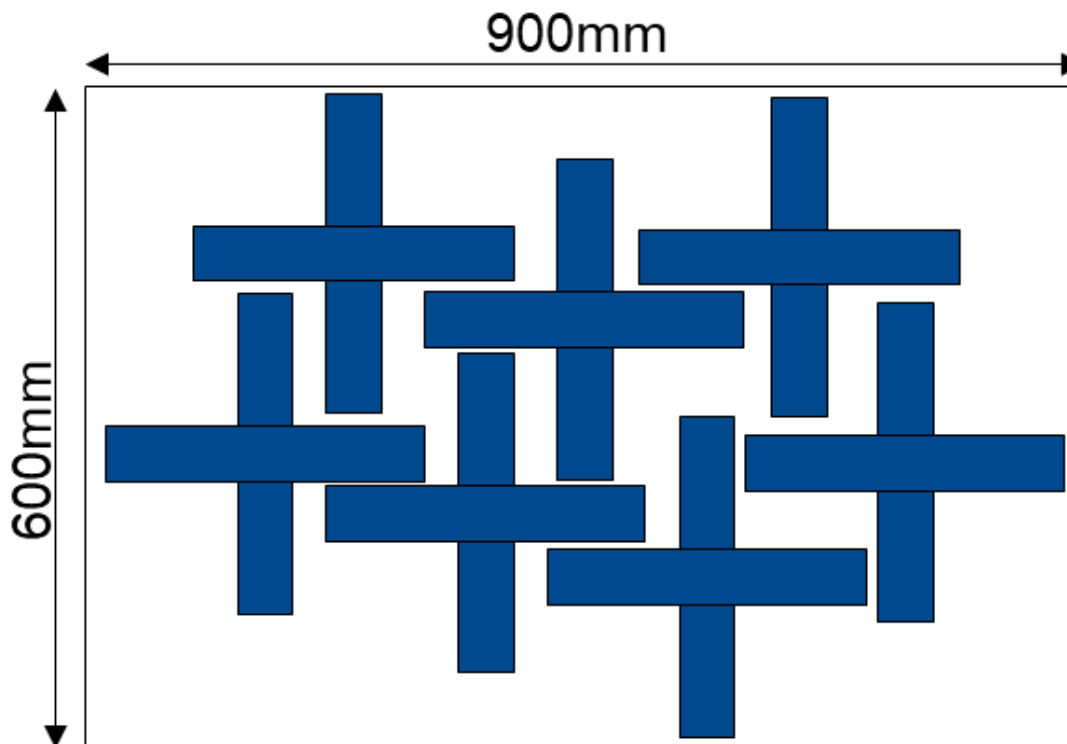
Abbildung 4 gezeigten Geometrie vorgenommen und überprüft ob mit dem Design und den vorhandenen Teststand mit 100kN Krafteinleitung genügend Spannungen erzeugt werden können, um Rissbildung im Laminat zu erzeugen. Die FEM-Ergebnisse haben gezeigt, dass genügend Spannungen in Proben bis zu 4mm Dicke erzeugt werden können, um Risswachstum zu beobachten.



**Abbildung 4: Kreuzzugprobe aktuelles Design Quelle: TUM**

Aus dieser Annahme mit der Testmatrix ergab sich die Plattengröße von 600mmx900mm. Die Abbildung 5, zeigt das bis zu 7 Kreuzzugproben aus einer Platte entnommen werden können. Um genügend Marge während der Tests zu haben wird die Probendicke bei fast allen Tests bei 2mm gehalten.

Bei der Festlegung der Testmatrix wurde zusätzlich der Fokus gesetzt den Einfluss zwischen Delta Winkel und Rissbildung respektive Leckage zu untersuchen. Daher wurde wie oben ein zusätzliches Layup mit Delta winkeln  $22,5^\circ$  eingeführt.



**Abbildung 5: Mögliche Schnitthanordnung Kreuzzugsprobe**

---

## **6 Diskussion über Wahrscheinlichkeiten von Microrissbildung anhand von Schliffen an realen Druckkörpern**

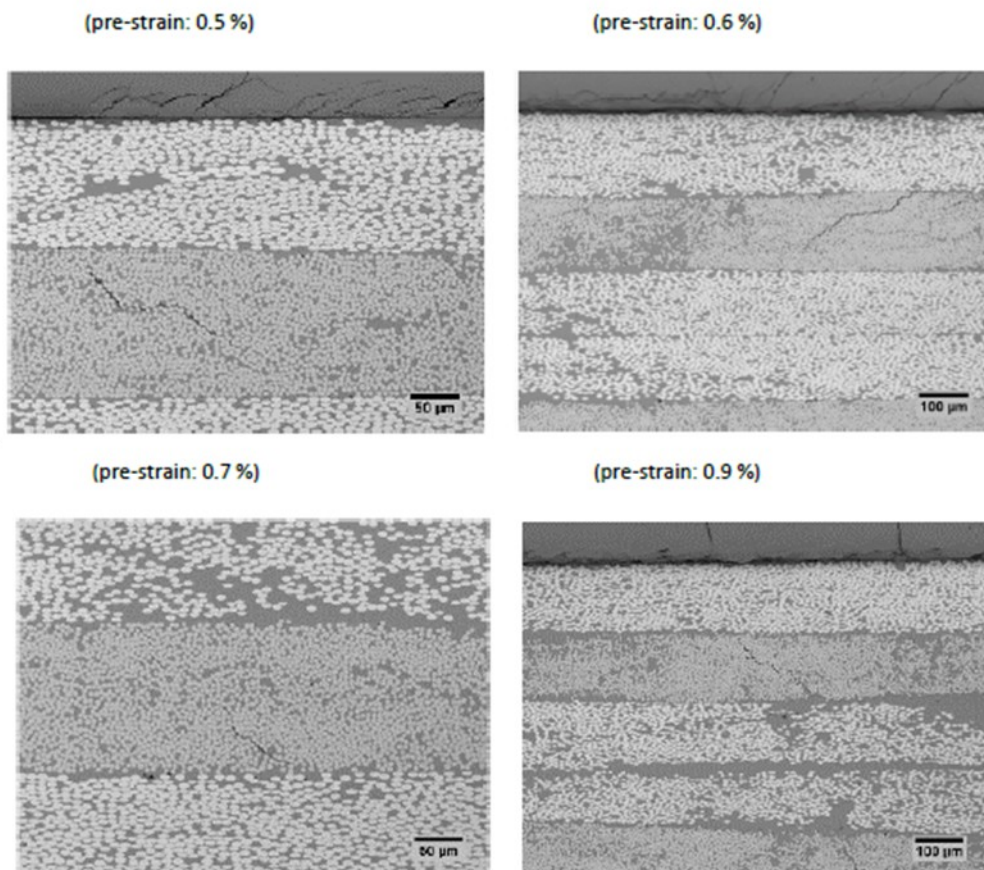
Im letzten Quartalsmeeting wurden eine Reihe von Ergebnissen aus vergangenen Versuchen dem Konsortium zur Verfügung gestellt. Hinter jedem der Ergebnisse gibt es eine oder mehrere Fragestellungen, die die Bildung von Microrissnetzwerken, die Verteilung oder das mechanische Verhalten der Mikrorisse betrifft. Ein wünschenswertes Ziel wäre, dass spätestens zum Ende des Projekts ein Erkenntnisgewinn erzielt wird, der die Fragestellungen beantwortet oder von dem zumindest Tendenzen abgeleitet werden können.

Permeations- / Leckage kurven aus vorangegangenen Versuchen im unbelasteten Zustand bei RT und 77K, sowie im belasteten Zustand während und nach dem Belastungsvorgang wurden für andere CFK Systeme bei MTA bewertet. Die wesentlichen Erkenntnisse waren hierbei:

- Die Leck- / Permeationsraten bei 77K wird um Größenordnungen verringert. Dies ist im wesentlichen mit der verringerten Molekularbewegung bei kryogenen Temperaturen zu erklären. Andererseits entstehen durch die reine thermische Belastung Mikrorisse, die wiederum die Leck / Permeationsraten negativ beeinflussen.
- Leck- / Permeationsraten im belasteten Zustand sind eine halbe Größenordnung schlechter, wenn im belasteten Zustand gemessen wird. Dies deutet darauf hin, dass die Mikrorisse im Laminat durch die Belastung „offengehalten“ werden, so dass für die Leckage ein „einfacher zu durchquerendes Netzwerk“ entsteht. Es könnte aber auch sein, dass es durch die Belastung mehr und/ oder kürzere Wege für die Permeation gibt.

In Abbildung 6, sind Schliffe von CFK Laminaten zu sehen, die verschiedenen Belastungslevel unterzogen wurden. Zwar sind Microrisse auf jedem Schliff zu erkennen, jedoch handelt es sich bei Schliffen immer um eine sehr lokale 2D-Betrachtung, folglich entstehen die folgenden Fragestellungen:

- Ab welchem Belastungslevel ist ein Riss relevant, d.h. Teil eines Netzwerks?
- Ab welcher Rissdichte (Risse pro  $\text{mm}^2$  oder Risse pro  $\text{mm}^3$ ) sind die Mikrorisse relevant für eine erhöhte Permeation / Leckage? Gibt es einen nicht-linearen Anstieg der Leckrate in Abhängigkeit der Rissdichte? ^
- Kann die Rissdichte über einfache coupon tests, wie z.B. Schliffe verifiziert werden?
- Wie wird sichergestellt, dass der vorliegende Schliff kein Zufallstreffer ist?



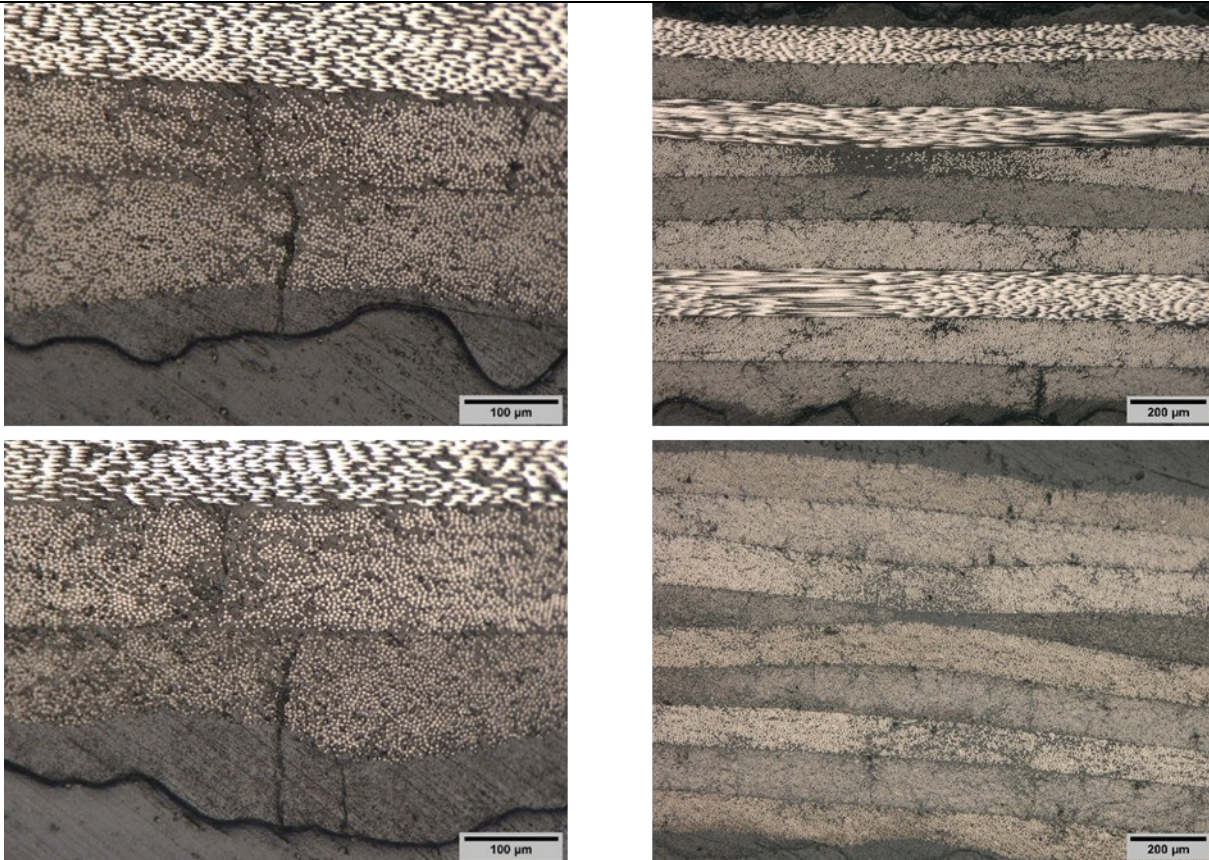
**Abbildung 6: Schliffe CFK Laminat bei verschiedenen Belastungen**

Abbildung 7, zeigt Schliffe von Harzreichen / Faserarmen Stellen, in denen teilweise Microrisse zu erkennen sind. So entstehen u.a. die folgenden Fragestellungen:

- Sind Randeffekte Verantwortlich für die Initiierung von Microrissen? Gibt es begünstigende Faktoren, z.B. Imperfektionen an der Oberfläche der Laminat, Abreißgewebe, Abdrücke des Vakuumaufbaus, etc.?
- Sind Microrisse die zunächst nur in den äußeren Lagen auftreten relevant für erhöhte Leckraten?
  - o Wie kann man deren Beteiligung an einem Rissnetzwerk charakterisieren?
  - o Sind diese begünstigend für Microrisse in tieferliegenden Lagen?
- Sind Harzreiche bzw. Faserarme Stellen begünstigend für Microrisse?

In allen bisherigen Schliffen von MTA, so auch exemplarisch in den gezeigten, gibt es sowohl dafür als auch gegen diese Theorie Beispiel ohne klare Tendenz.

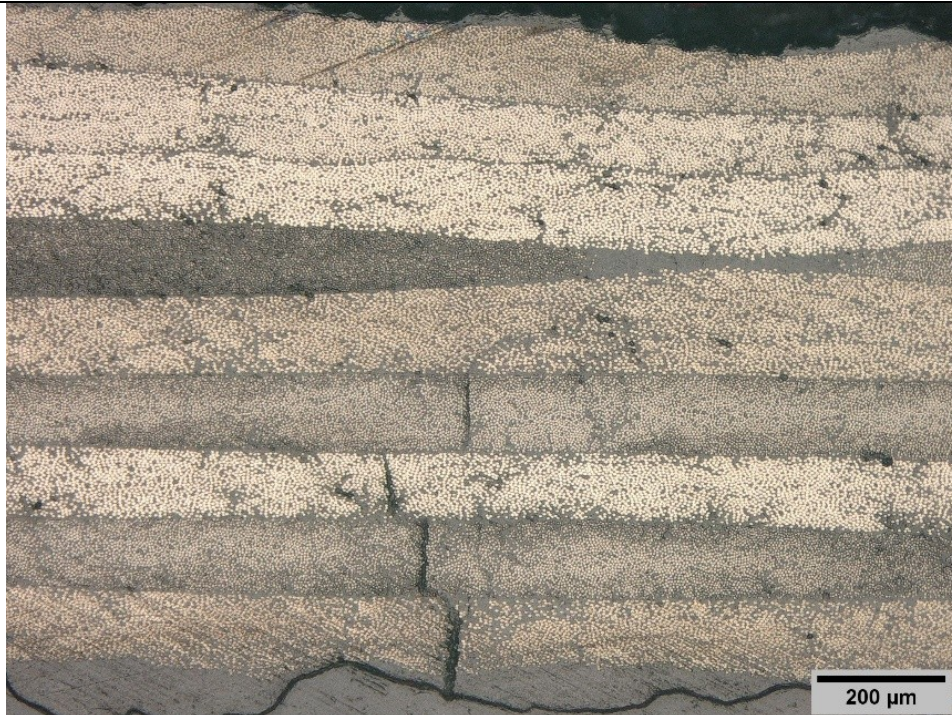
- o Gibt es andere begünstigende Faktoren (z.B. Schichtverteilung, Imprägnierqualität)?
- o Wie hoch sind die Wahrscheinlichkeiten solcher begünstigender Faktoren im Vergleich zu anderen Faktoren, z.B. Randeinflüssen?



**Abbildung 7: Schliffe von Harzreichen und Faserarmen Stellen**

In Abbildung 8 sind Schliffe dargestellt, auf denen ein Teil eines Riss-Netzwerks über mehrere Lagen erkennbar ist. Des Weiteren ist erkennbar, wie ein Riss vermeintlich an einer harzreichen Stelle beginnt oder endet. Die Fragestellungen fokussieren sich in Ergänzung zu den vorigen wie folgt:

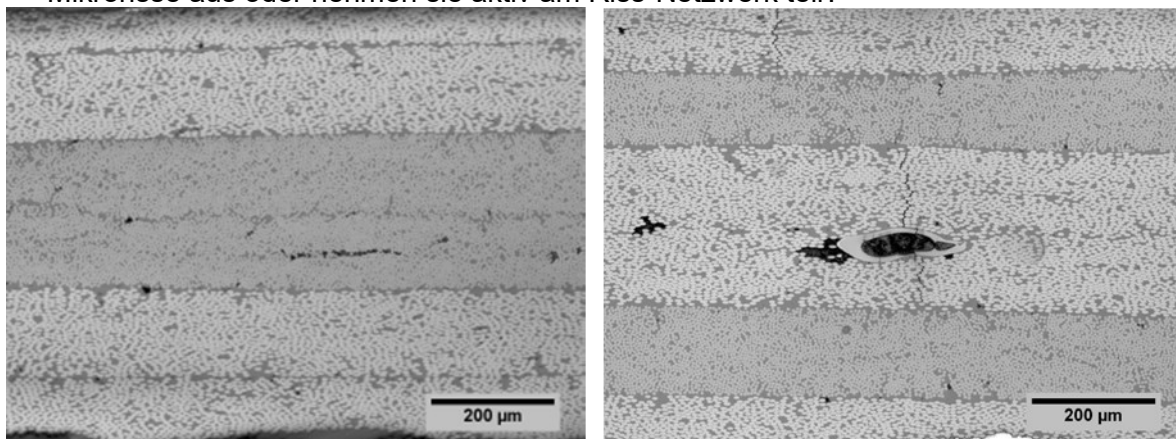
- Wie kann ein Riss-Netzwerk verifiziert werden? Insbesondere dann, wenn es „kippt“, d.h. die ersten durchgehenden Risspfade sich ausgebildet haben?
- Kann ein 3D-Rissnetzwerk im z.B. CT visualisiert werden? Alle Unternehmungen seitens MTA waren bisher nicht von Erfolg gekrönt. Wenn ja, wie sind die Parameter und wie stellt man Repräsentativität sicher (z.B. ab wie vielen Proben)?
- Können Harzreiche Stellen auch in Form eines Riss-stoppers auftreten? Was sind die Effekte dafür? Kann ein solcher Effekt positiv genutzt werden?



**Abbildung 8: Schliff mit Rissnetzwerk über mehrere Lagen**

Abbildung 9, zeigt Schliffe, auf denen Laminatübliche Mikroporen oder ähnliche Fehlstellen zu sehen sind. Grundsätzlich muss davon ausgegangen werden, dass solche Effekte in jedem Laminat auftreten, insbesondere wenn es sich um komplexe Strukturbauteile handelt.

- Erhöhen Mikroporen oder „standard- mikro- Defekte“ die Wahrscheinlichkeit für die Entstehung von Rissen?
- Können Mikrorisse an solchen Defekten sicher nachgewiesen werden?
- Beschränken sich solche Risse auf den lokalen Bereich des Defekts, breiten sich die Mikrorisse aus oder nehmen sie aktiv am Riss-Netzwerk teil?



**Abbildung 9: Schliffe mit laminatüblichen Mikroporen und Fehlstellen**

Wie schon am Anfang dieses Kapitels erwähnt, ist das Ziel über den wissenschaftlichen Ansatz des Projekts und das damit verbundene Gesamtverständnis für die Entstehung von Riss-Netzwerken ein besseres Verständnis für die Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Riss-(Netzwerk-)Entstehung und dessen Einflussfaktoren zu erlangen. Die o.g. Fragestellungen bzw. die Antworten darauf sind eine Detaillierung des Mehrwerts, der seitens MTA im Projekt erzielt werden soll. Es ist der Versuch eine

---

Liste zu generieren, deren Aspekte aus anwendungsorientierten Herausforderungen von cryogenen CFK Druckkörpern abgeleitet wurden und so konkret einzeln differenzierbare Effekte betrachtet, die auf der Ebene des Mikro- und Meso-levels einfacher zu beantworten sein sollten, als z.B. die globale Fragestellung: „Wann wird ein Materialtyp undicht?“

Aufgabe für MTA wird es sein, im Rahmen des Projekts mit den eigenen und auch den Ergebnissen der Partner schrittweise Antworten und Tendenzen zu diesen Fragestellungen zu generieren und über die Laufzeit zu tracken.

Dann können auch zielgerichtete weiterführende Entwicklungen in allen damit verbundenen Teilbereichen angestoßen werden, von der Materialentwicklung und Additiven bis hin zu optimierten Designs, Fertigungsverfahren, oder Härtezyklen, sowohl für RT als auch cryogene Anwendungen bis 20K.

---

## **7 Abstimmung der Analyse Methoden zwischen MTA und TU-BS**

Die MT-A ist neben den unterstützenden beratenden Aufgaben im experimentellen Bereich mit TUM auch begleitend im Analyse Bereich tätig. Hier bei den Analyse Tätigkeiten geht es vorwiegend um das Verständnis und der Bewertung des numerischen Multi-Skalen Ansatzes der TUBS. Zudem wird diskutiert wie ein übertrag des gewählten Ansatz für industrielle Anwendung and CFK-Druckkörpern genutzt werden kann.

Im Quartals Meeting Q7 am 11.04.24 in Augsburg wurde beschlossen, dass eine Analyse Methoden Workshop zwischen der TU-BS und der Analyse Abteilung der MTA stattfinden soll.

Dieses Meeting fand am 29.05.24 statt und hatte das Ziel der Durchgängigkeit der Analyse Methoden von Micro zu Meso zu Marco ebene sicher zu stellen.

Die TU-BS präsentierte ihren Analyse Vorgehensweise und die MTA präsentierte ihre momentane industrielle Herangehensweise und die Needs für eine praktikable Berechnungsmethode von Cryo Cracks in großen CFK Strukturen.

Eine Direkte Implementierung der TU-BS Methode in die MTA-Modelle ist momentan noch nicht möglich. Es wurde vereinbart weitere Implementierung Ansätze anzudenken und am Ende des Programms Cryo Cracks 1 eine Performance Bewertung TU-BS Methode in einem MTA industriellen Model zu überprüfen (Modellierungsaufwand, Rechenzeiten ...).

Des Weiteren wurden erste Gedanken ausgetauschte, was mögliche Inhalte bei einer Fortführung Vorhabens sein könnten.

---

## 8 Testmatrix Level 2 und Level 3

Die Level 2 Proben sowie die Level 3 Kreuzzugsproben wie in Tabelle 6 gezeigt, wurden aufgrund, geänderter Randbedingungen des Teststandes, welcher auf eine Kraft von 100KN begrenzt ist, nochmal hinsichtlich der Testbarkeit überarbeitet.

In der Tabelle 6, sind die definierten Proben Level 2 und Level 3 beschrieben. Die Tabelle steht auf dem Cloud Laufwerk allen Partnern zur Verfügung.

Die Proben 2-01 bis 2-06 sind uni-axial Proben und dienen der ersten Bewertung des der gewählten Layups und einer ersten Bewertung hinsichtlich Permeation/ Leckage der Proben.

Dafür werden die Proben wie in der Testmatrix beschrieben bis zu einem Lastlevel 1 (6500  $\mu\text{s}$  / 0,65 %) oder dem Lastlevel 2 (10000  $\mu\text{s}$  / 1 %) gezogen und danach bei der MT einem Leckage test unterzogen. Danach werden die Proben an die TUBS gesendet für weitere crack Density Untersuchungen, wie Schlifffbilder. Neben den beiden Lastlevel, soll auch der Einfluss von thermisch cryo zyklerten proben im Vergleich zu Raumtemperatur Proben bewertet werden.

Die Proben 2-07 bis 2-28 wurden neu definiert um möglichst gezielt den Einfluss auf die Rissbildung von:

- Thermoshock
- Delta Winkel Änderungen
- Lagenaufbauten
- Temperatureinfluss
- Dehnungen

zu untersuchen. Für die Modellbildung und zur Verknüpfung mit den bisher ermittelten Eigenschaften wurden die Lamine [0,90]4s sowie [45,90,-45,0]2s ausgewählt. Ein zusätzliches dickeres Laminat [0,90]8s soll den Einfluss des Thermoshocks auf Rissbildung bei dicken Laminaten untersuchen. Daher ergeben sich für Level 2 folgenden Tests:

- 2-07-2-09 Ermittlung von Versagenslasten für die 3 Hauptlamine
- 2-10-2-14 Untersuchungen Einfluss Thermoshock und Laminatdicke auf Rissbildung
- 2-15-2-28 Bestimmung des Lastlevels in Verbindung mit Rissbildung bei RT und LN2

**Tabelle 6: Testübersicht Level 2 und Level 3**

Testing Overview											
ID	Level	Thermal Load	Responsible	Mechanical load		Responsible	Permeability testing @RT post	Permeability post-load	Kenngröße	Temp.	Specimen specification
				simultaneous loading/testing							
2-01	Level 2	RT	TUM	1x uniaxial load (strain level 1)	TUM	yes		Crack-density (CT/Microsection)	-	Layup 1 (e.g. QI)	
2-02	Level 2	RT	TUM	1x uniaxial load (strain level 2)	TUM	yes		Crack-density (CT/Microsection)	-	Layup 1 (e.g. QI)	
2-03	Level 2	RT	TUM	1x uniaxial load (strain level 2)	TUM	yes		Crack-density (CT/Microsection)	-	Layup 1 (e.g. QI) low thickness	
2-04	Level 2	RT	TUM	1x uniaxial load (strain level 2)	TUM	yes		Crack-density (CT/Microsection)	-	Layup 1 (e.g. CP)	
2-05	Level 2	LN2	TUM	1x uniaxial load (strain level 1)	TUM	yes		Crack-density (CT/Microsection)	-	Layup 1 (e.g. QI)	
2-06	Level 2	LN2	TUM	1x uniaxial load (strain level 2)	TUM	yes		Crack-density (CT/Microsection)	-	Layup 1 (e.g. QI)	
2-07	Level 2	RT	TUM	1x biaxial load (stepwise loading)	TUM	yes		Crack-density (CT/Microsection)	-	Layup 1 (CP(90.2))	
2-08	Level 2	RT	TUM	1x biaxial load (stepwise loading)	TUM	yes		Crack-density (CT/Microsection)	-	Layup 2 (QI(45.2))	
2-09	Level 2	RT	TUM	1x biaxial load (stepwise loading)	TUM	yes		Crack-density (CT/Microsection)	-	Layup 3QI(22.5.2)	
2-10	Level 2	LN2 10x	TUM	1x biaxial load (strain level 1)	TUM	yes		Crack-density (CT/Microsection)	-	Layup 1 (CP(90.2))	
2-12	Level 2	RT	TUM	1x biaxial load (strain level 1)	TUM	yes		Crack-density (CT/Microsection)	-	CP(90.4)	
2-13	Level 2	LN2 10x	TUM	1x biaxial load (strain level 1)	TUM	yes		Crack-density (CT/Microsection)	-	CP(90.4)	
2-14	Level 2	LN2 1x	TUM	1x biaxial load (strain level 1)	TUM	yes		Crack-density (CT/Microsection)	-	CP(90.4)	
2-15	Level 2	RT	TUM	1500mus	TUM	yes		Crack-density (CT/Microsection)	RT	Layup 2 (QI(45.2))	
2-16	Level 2	RT	TUM	2000mus	TUM	yes		Crack-density (CT/Microsection)	RT	Layup 2 (QI(45.2))	
2-17	Level 2	RT	TUM	2500mus	TUM	yes		Crack-density (CT/Microsection)	RT	Layup 2 (QI(45.2))	
2-18	Level 2	RT	TUM	3500mus	TUM	yes		Crack-density (CT/Microsection)	RT	Layup 2 (QI(45.2))	
2-19	Level 2	RT	TUM	4500mus	TUM	yes		Crack-density (CT/Microsection)	RT	Layup 2 (QI(45.2))	
2-20	Level 2	RT	TUM	5500mus	TUM	yes		Crack-density (CT/Microsection)	RT	Layup 2 (QI(45.2))	
2-21	Level 2	RT	TUM	6500mus	TUM	yes		Crack-density (CT/Microsection)	RT	Layup 2 (QI(45.2))	
2-22	Level 2	LN2	TUM	1500mus	TUM	yes		Crack-density (CT/Microsection)	77	Layup 2 (QI(45.2))	
2-23	Level 2	LN2	TUM	2000mus	TUM	yes		Crack-density (CT/Microsection)	77	Layup 2 (QI(45.2))	
2-24	Level 2	LN2	TUM	2500mus	TUM	yes		Crack-density (CT/Microsection)	77	Layup 2 (QI(45.2))	
2-25	Level 2	LN2	TUM	3500mus	TUM	yes		Crack-density (CT/Microsection)	77	Layup 2 (QI(45.2))	
2-26	Level 2	LN2	TUM	4500mus	TUM	yes		Crack-density (CT/Microsection)	77	Layup 2 (QI(45.2))	
2-27	Level 2	LN2	TUM	5500mus	TUM	yes		Crack-density (CT/Microsection)	77	Layup 2 (QI(45.2))	
2-28	Level 2	LN2	TUM	6500mus	TUM	yes		Crack-density (CT/Microsection)	77	Layup 2 (QI(45.2))	
Prüfkörper pro Test											
3-01	Level 3	RT	TUM	1x biaxial load (strain level 1)	TUM	-		Permeability under load	RT	Layup 1 (CP(90.2))	
3-02	Level 3	RT	TUM	1x biaxial load (strain level 2)	TUM	-		Permeability under load	RT	Layup 1 (CP(90.2))	
3-03	Level 3	RT	TUM	1x biaxial load (strain level 1+2)	TUM	-		Permeability under load	RT	Layup 2 (QI(45.2))	
3-04	Level 3	RT	TUM	1x biaxial load (strain level 1+2)	TUM	-		Permeability under load	RT	Layup 3QI(22.5.2)	
3-05	Level 3	LN2	TUM	1x biaxial load (strain level 1)	TUM	-		Permeability under load	77	Layup 1 (CP(90.2))	
3-06	Level 3	LN2	TUM	1x biaxial load (strain level 2)	TUM	-		Permeability under load	77	Layup 1 (CP(90.2))	
3-07	Level 3	LN2	TUM	1x biaxial load (strain level 1+2)	TUM	-		Permeability under load	77	Layup 2 (QI(45.2))	
3-08	Level 3	LN2	TUM	1x biaxial load (strain level 1+2)	TUM	-		Permeability under load	77	Layup 3QI(22.5.2)	

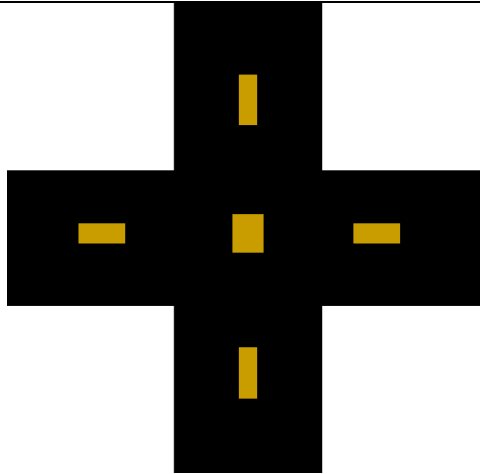
Bei den Level 3 Tests wie in Tabelle 6 gezeigt liegt der Fokus auf der Konstanten Leckage Messung unter Last bei RT und LN2 Temperatur. Zusätzlich sollen hier den Einfluss der Delta Winkel untersucht werden daher wird als zusätzliches Laminat ein [45; 67.5; 90; -67.5; -45; -22.5; 0; 22.5]\_s bereitgestellt. Somit kann der Unterschied auf die Rissbildung bei gleicher Laminatdicke zwischen den Delta winkeln 90°, 45° und 22,5° untersucht werden.

### 8.1 Probenpräparation

Bei der Probenpräparation ist auf folgende Punkte zu achten:

- Wasserstrahlschneiden zur Probenfertigung ist zu bevorzugen
- 2mm Dicke GFK platten Twill2x2 280g/m<sup>2</sup> als Aufleimer verwenden
- Verklebung GFK+-45, Klebstoff scotch-weld 7236 oder ähnlich.
- Klebevorrichtung ist zu verwenden um Aufleimer zu positionieren und mit definierter Anpresskraft zu verkleben

Proben sind zusätzlich mit DMS zu bestücken. Proben 2-07 bis 2-09 mit 5 Stück wie in Abbildung 10 gezeigt. Alle weiteren jeweils eine auf jeden Arm.



**Abbildung 10: Skizze DMS auf Kreuzzugsprobe.**

## 9 Leckage Messungen

### 9.1 Leckage Messungen bei Level 2 uni axial Proben

Es wurde mit der TUM und dem DLR entschieden was die uniaxialen last Level 1 und Level 2 bei den Proben vom Platte 623 sind.

Hierzu wurde klassische Laminat Theorie zusammen mit in situ Festigkeiten angewandt, um ein relevantes Last Level zu definieren.

- Last Level 1: 6500  $\mu\text{s}$  / 0,65 %
- Last Level 2: 10000  $\mu\text{s}$  / 1 %

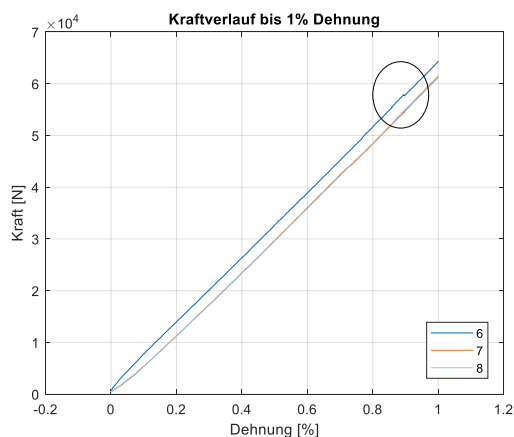
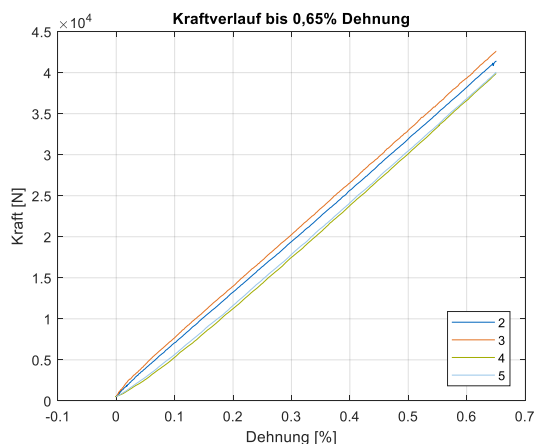
Dadurch soll sichergestellt werden, dass man auf jeden Fall eine relevanten Riss Bildungen und die damit verbundene Leckage generiert.

Die ersten Proben wurden nach entsprechender Belastung bei RT durch die TUM zur MTA geschickt.

- 2mm QI Laminat (Platte 623)

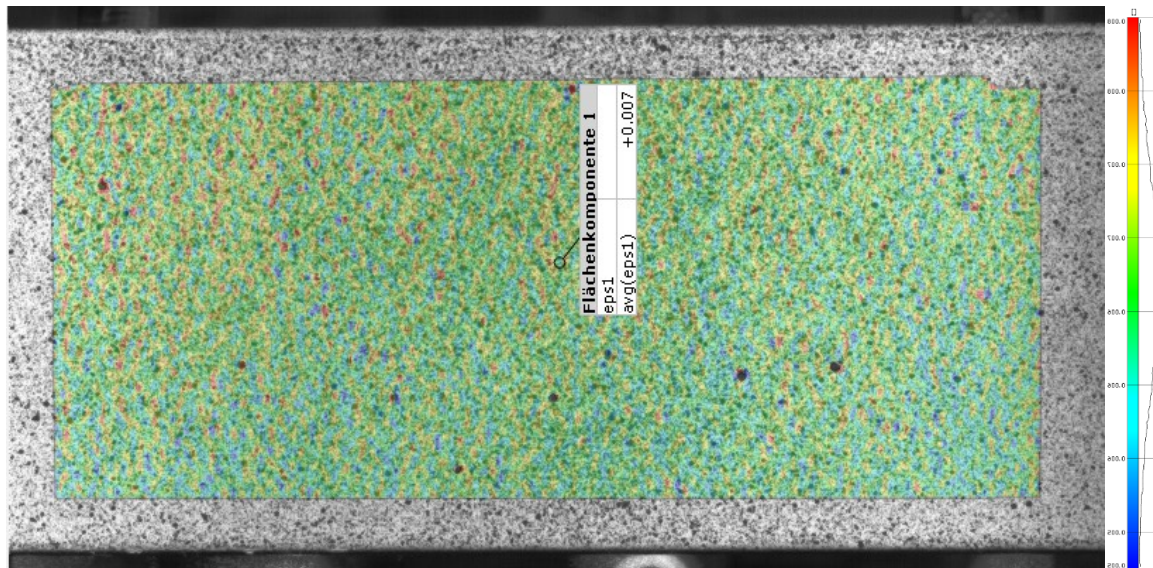
Sieben Proben wurden von TUM vorbelastet (4 Proben bis 0,65% und drei Proben bis 1% Dehnung

Die TUM lieferte die entsprechende Messprotokolle für die 7 Tests mit. In den folgenden Graphen sind die entsprechenden resultierenden Spannungen /Dehnungs-Kurven ausgewertet. Alle kurven sind linear und stetig. Probe 6 hat bei ca. 0,95% eine Auffälligkeit, die weiter von der TUM betrachtet werden soll.



Datum	Probenbezeichnung	Breite [mm]	Dicke [mm]	Strainlevel	Temperatur	Messlänge [mm]	Kommentar
28.05.2024	QI_623_2	49,86	2,023	0,65	RT	80	
28.05.2024	QI_623_3	49,98	2,023	0,65	RT	80	
28.05.2024	QI_623_4	49,97	2,030	0,65	RT	80	Fehlversuch (Vorbelastung bis ca. 1000 N); Versuch wurde wiederholt (Druckbelastung auf ca. 2000N); Im Anschluss Wechsel auf lagegeregelten Betrieb (0,65% erreicht)
29.05.2024	QI_623_5	49,98	2,031	0,65	RT	80	Probe leicht ausgebaucht in der Mitte
29.05.2024	QI_623_6	49,99	2,036	1	RT	80	Probe minimal ausgebaucht in der Mitte
29.05.2024	QI_623_7	49,96	2,025	1	RT	80	
29.05.2024	QI_623_8	49,99	2,030	1	RT	80	Probe minimal ausgebaucht in der Mitte

Die Dehnungen wurden zusätzlich über ein DIC verfahren gemessen. Exemplarisch ist ein Bild gegeben.



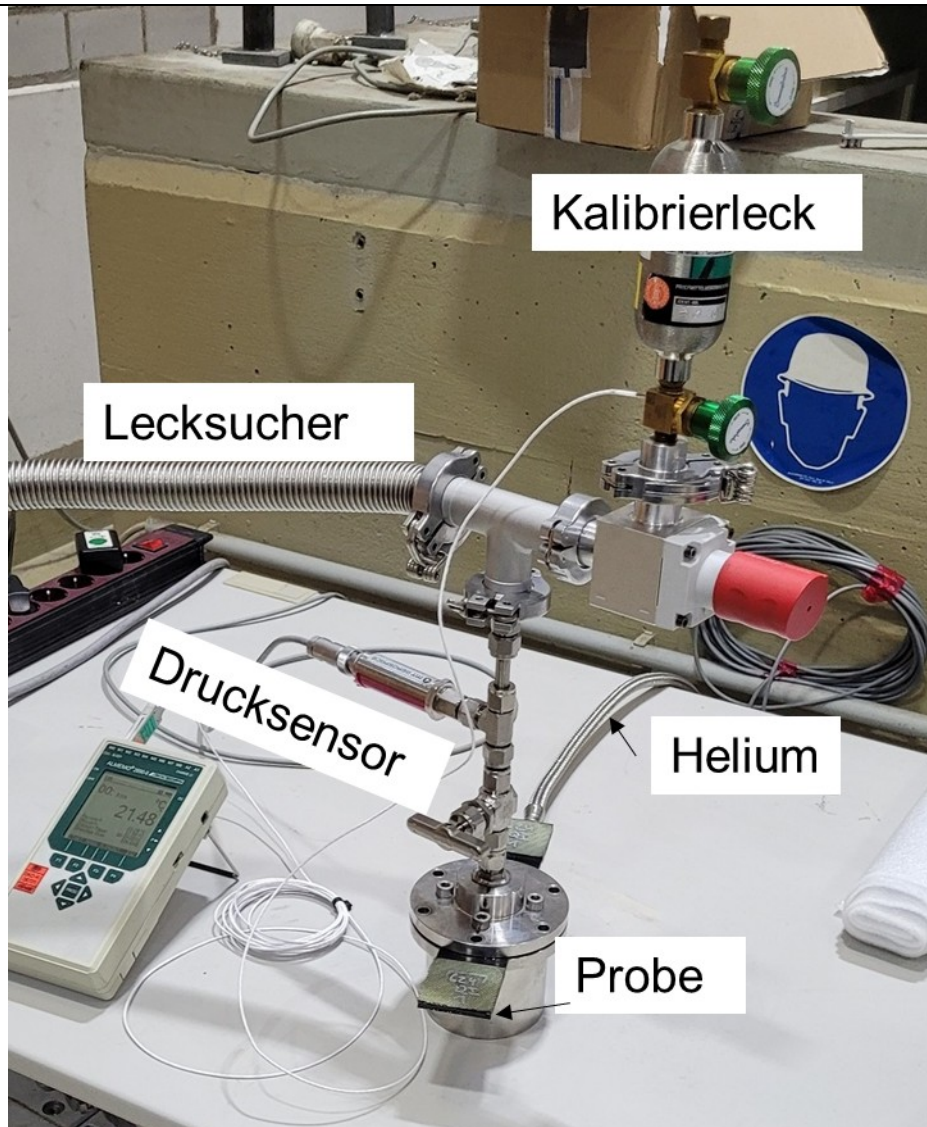
Die kompletten Rohdaten sind von der TUM erzeugt worden und mit MTA und TU BS geteilt.

Nach dem entsprechenden Wareneingang wurden die Proben and die Testabteilung zum Unstrained leak Test bei RT weitergeleitet.

Neben der oben gezeigten generellen Beschreibung für die QI Platte 2mm dick (623) wurde noch eine dünne 1mm dicke QI platte belastet (625), sowie eine CP platte 2mm dick (628). Außerdem wurden einige Proben aus dem 2mm QI Platten Material vor der mechanischen Belastung in flüssigen Sickstoff 77K getaucht, um eine zusätzliche Thermoschock Belastung zu induzieren.

In den folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse aus der Leckage Messung bei der MT der mechanischen Belastung für die einzelnen Proben gegenübergestellt.

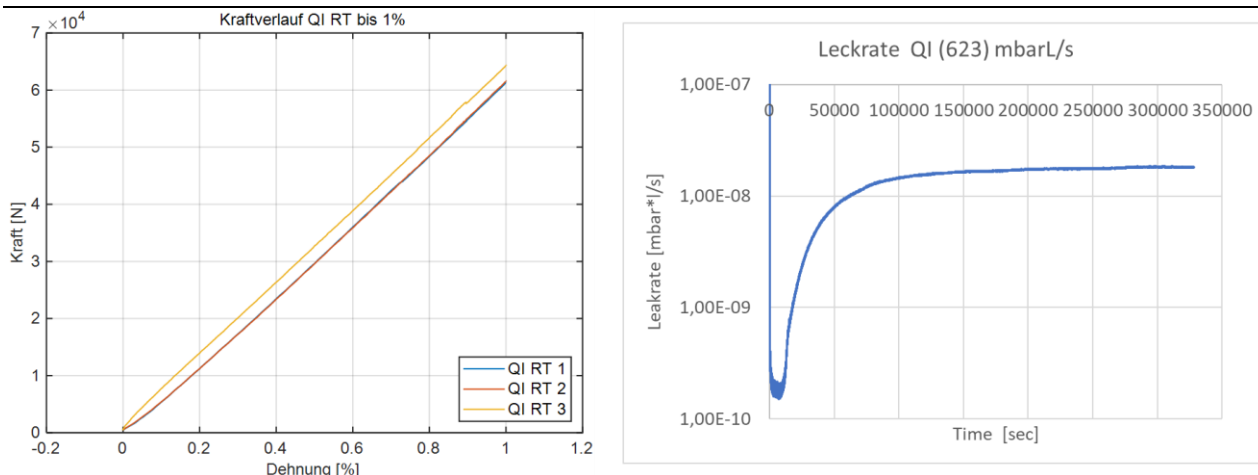
Der Testaufbau ist in Abbildung 11, gezeigt. Im unteren Teil des Aufbaus wir die Probe eingespannt und mit Helium bedrückt. Der delta druck beträgt 1,3 bar bei 100% Helium. Auf der Oberseite wir der Lecksucher erst mit einem Kalibrierleck beaufschlagt und kalibriert bevor. Der Kalibrierstrang geschlossen wird und der Strang zur Probe geöffnet. Die Messzeit beträgt bis zu 140h. Außerdem wurden Vortests unternommen um den Einfluss der Farbe auf der Probe die für die Aramis Messung benötigt wird zu qualifizieren. Es wurde hier kein Einfluss gefunden.



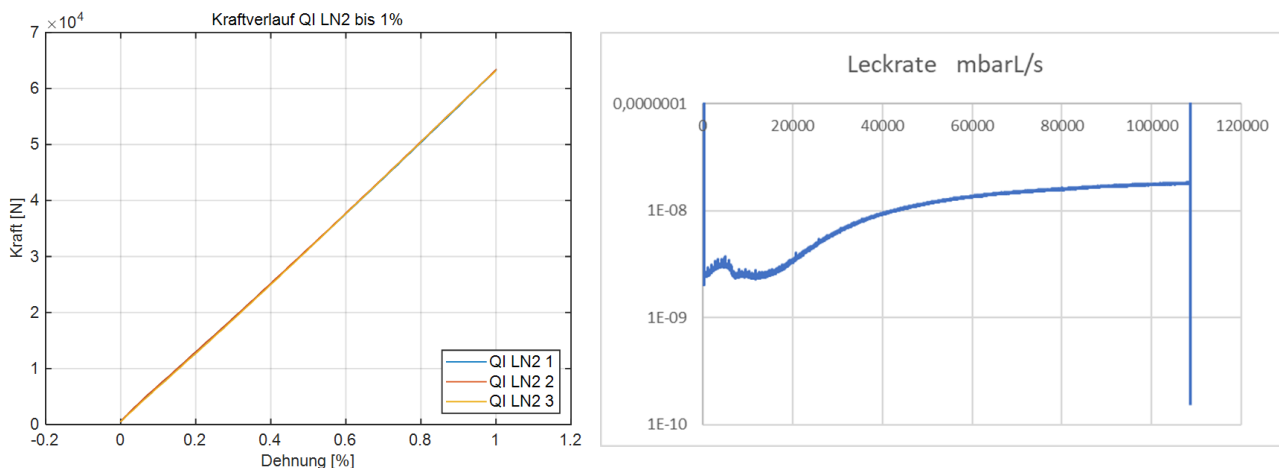
**Abbildung 11: Testaufbau Lecksucher**

In Abbildung 12, sind die Ergebnisse für die Leckrate der QI Platte 2mm (623) bei 1% Dehnung gezeigt. Wie man erkennen kann, ist die Probe technisch dicht und die gemessenen Leckrate liegt bei  $2E-8\text{mbar}\cdot\text{L/s}$ .

Der gleiche Lagenaufbau vorher Thermo geschockt ist in Abbildung 13 gezeigt. Es zeigt sich das bei gleichen Lastlevel auch hier die Leckrate mit  $2E-8\text{mbar}\cdot\text{L/s}$  bestimmt werden konnte. Das bedeutet das hier kein Einfluss auf die Dichtigkeit und einem Thermoschock nachgewiesen werden konnte.



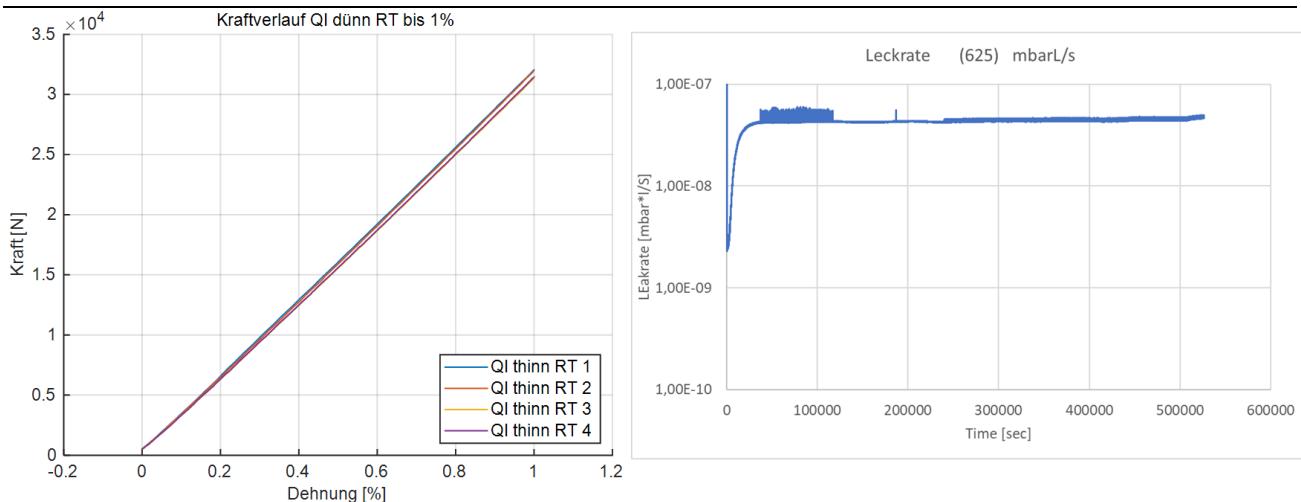
**Abbildung 12: QI 2mm RT 623 1%**



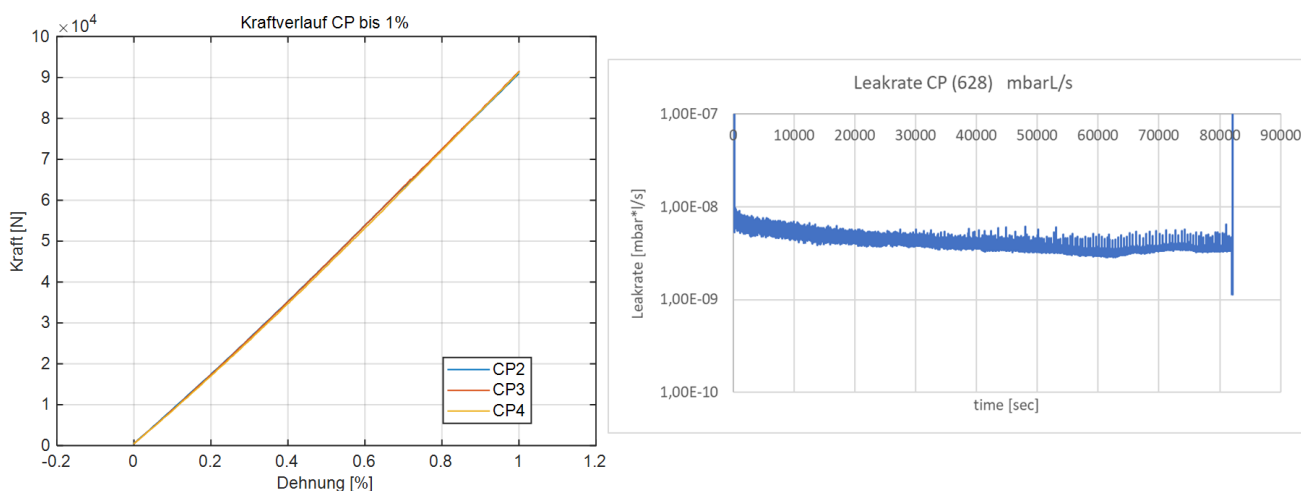
**Abbildung 13: QI 2mm LN2 getaucht 1%**

In Abbildung 14 sind die Leckraten für eine dünne QI platte bei Raumtemperatur gezeigt. Bei 1% Dehnung stellt sich eine Leckagerate von  $6E-8$  mbar\*/L/s ein. Damit ist auch dieses Laminat technisch dicht, auch wenn die gemessene Permeation etwas höher liegt als für das 2mm Laminat.

Die Crossply (CP) Proben sind in Abbildung 15, gezeigt. Die gemessene Leakagerate bei einer mechanischen Vorbelastung von 1% Dehnung beträgt  $8E-9$  mbar\*/l/s. Damit ist auch dieses Laminat technisch dicht und von der gemessenen Leckrate kann ausgegangen werden das sich keine Risse im Laminat gebildet haben.



**Abbildung 14: QI 1mm RT (625)1%**



**Abbildung 15: CP 2mm RT (628)1%**

Final lässt sich zusammenfassen, dass alle getesteten Laminat der Level 2 Uniaxial Proben ID 2-01 bis 2-06 technisch dicht sind. Dies bedeutet das sich kein Rissnetzwerk in den Proben gebildet hat welches zur Leckage führen würde. Die Ergebnisse zeigen auch dass es keinen Unterschied macht, ob die Proben nur mechanisch belastet oder vorher auch thermogeschockt wurden. Die Vermutung liegt hier zeigt das die Uniaxiale Belastung nicht ausreicht, um ein Rissnetzwerk zu initiieren. Ein Grund hierfür könnten die enthaltenden 0 Grad lagen in den Laminaten sein. Diese haben eine Bruchdehnung von 1,3% und werden daher nicht in den Rahmen beansprucht das sich hier Uniaxial risse bilden. Ein weiterer Indikator hierfür könnten die gemessenen Permeationsraten sein. Diese zeigen für das CP material die die kleinsten Werte und bei QI dünn die höchsten. Im CP sind die meisten 0° Grad lagen enthalten und im QI dünn die wenigstens.

Generell jedoch lässt sich ableiten, das vermutlich ein biaxialer Spannungszustand benötigt wird, um ein Rissnetzwerk durch Leckage Messung nachzuweisen. Diese Probentyp wird für die restlichen Proben Level 2 als auch für die Level 3 Proben verwendet.

## 9.2 Leckage Messungen bei Level 2 Biax Proben

Bei der Leckage Messung der uniaxialen Proben 2-01 bis 2-06 wie in Kapitel 9.1 beschrieben konnte keine nennenswerte Leckage festgestellt werden. Dies wurde zurückgeführt auf die nur einachsige Belastung der Probe, wodurch kein nennenswertes Rissnetzwerk entstehen kann. Daher wurde erwartet das die Kreuzzugsproben deutlich höhere Leckagewerte zeigen. Beispielhaft ist in Abbildung 16, der Probenhalter für Leckage mit einer Biax Probe gezeigt.

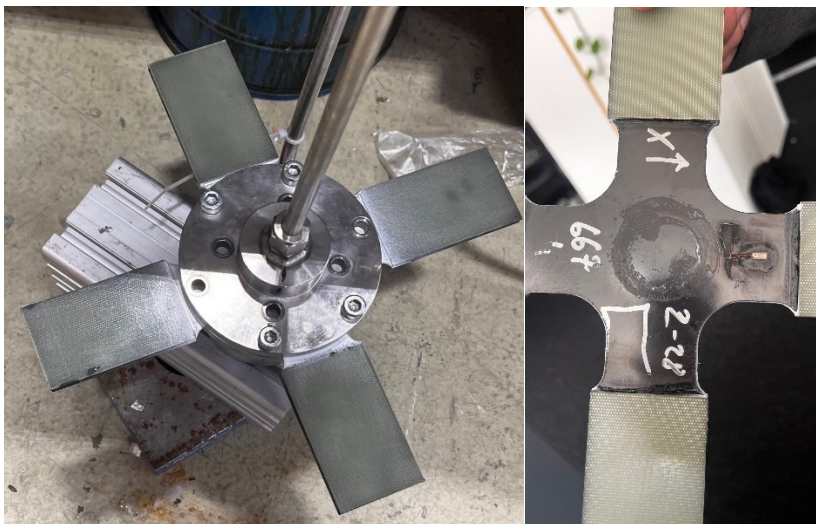


Abbildung 16: Kreuzzugsprobe in der Leckagemessung und im Detail

In der Abbildung 17 und in Abbildung 18 sind die Leckage Messungen der Level 2 Biax Proben dargestellt. Dabei war der Fokus insbesondere auf den Proben 2-07 bis 2-09 welche bis zum Versagen belastet worden sind. Die Probe 2-07 wie in Abbildung 18 gezeigt, ist die einzige Level 2 Biax Probe welche Anzeichen von Leckage aufweist. Alle anderen Proben und Lagenaufbauten wie in Abbildung 17 gezeigt, sind komplett dicht, mit einem Leckagewert von  $1E-10 \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$ . Die Durchführung der Messung erfolgte, vergleichbar den uniaxialen Proben beschrieben in Kapitel 9.1.

Die Probe 2-07 zeigt zwar Einflüsse von Leckage auf, es ist jedoch aufgrund der Versagenslast welche zum Abreißen der Arme führte unklar ob nicht Risse vom Rand der Probe in den Messbereich gewandert sind und diese Leckage verursachen.

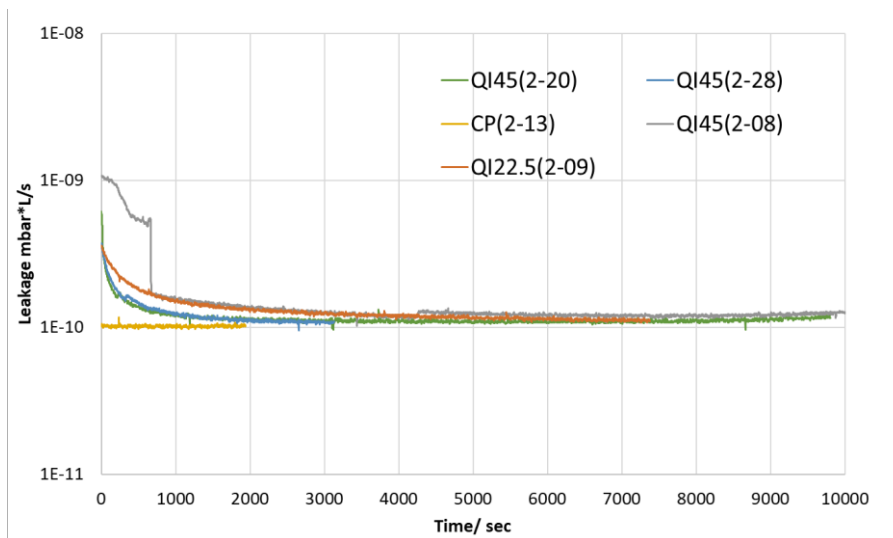
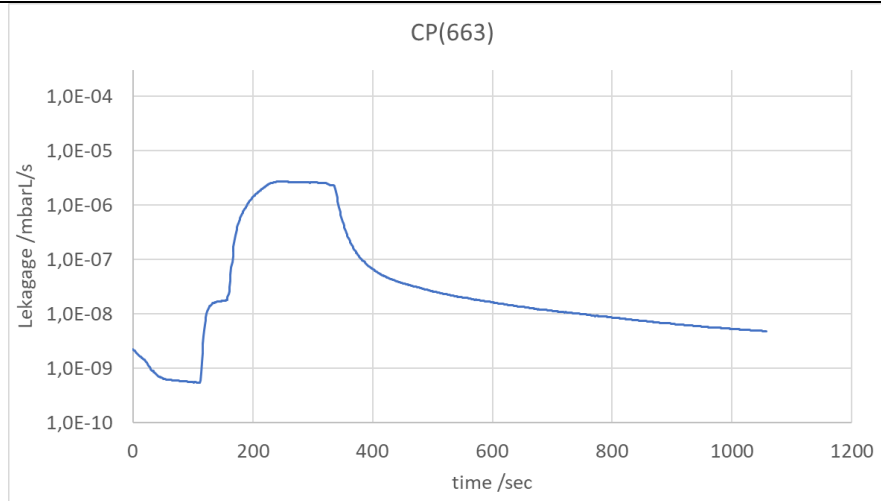


Abbildung 17: Leckagemessung Level 2 Biax Proben



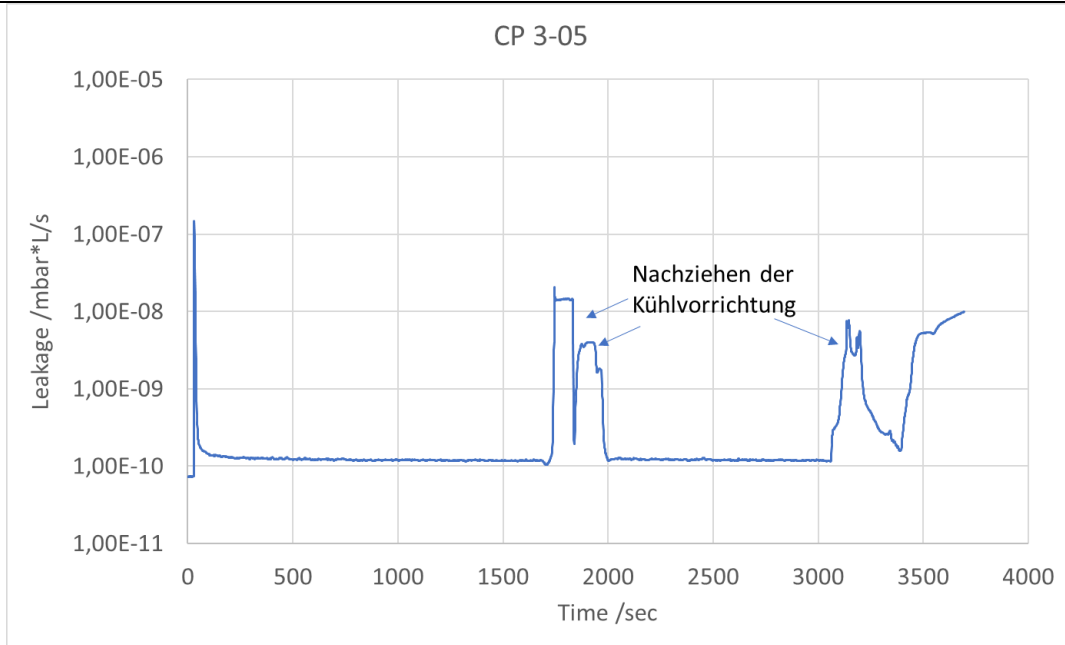
**Abbildung 18: CP 2mm RT Test:ID 2-07**

### 9.3 Leckage Messungen bei Level 3 Biax Proben

Da sich nach der Belastung der Kreuzzugsproben bei Level 2 immer noch keine Leckage einstellt, selbst bei Versagenslast, ist davon auszugehen das die benötigten Dehnungsniveaus in der Mitte der Probe nicht erreicht werden aber an den Rändern und Armen der Probe bereits zu Versagen führen. Um das Dehnungsniveaus in der Mitte zu erhöhen, sollten die Proben im kalten Zustand gemessen werden, was Bestandteil der Level 3 Test ist. Für diese Messungen war die MTA mit Leckage Equipment bei der TUM vor Ort um am BIAx-Messtand Leckage in-situ zu messen.

In Abbildung 19, ist die Leckage für einen Level 3 Versuch einer CP-Probe unter Kryobedingungen gezeigt. Man erkennt auch hier das keine Leckage auftritt. Es wurde zwar im Bereich 1700 Sekunden bis 2000 Sekunden und ab 3000sekunden eine Erhöhung des Leckage wertes gemessen. Dies wurde aber auf die Abkühlung der Messvorrichtung zurückgeführt, welche Aufgrund der Temperatur Vorspannung verliert. Nach nachziehen der Kühlvorrichtung wurde wieder ein sehr niedriger Wert um 1E-10 mbar\*L/s gemessen. Weitere Daten wie Temperatur und Dehnung mit der Verknüpfung der Leckage sind beim Testreport der TU-München verfügbar.

Als Bewertung von MT- Seite ist jedoch die Aussage des bei den gemessenen Level-3 Proben 3xCP sowie 2xQI bei kalten Bedingungen keine Leckage und somit kein Rissnetzwerk nachgewiesen konnte.



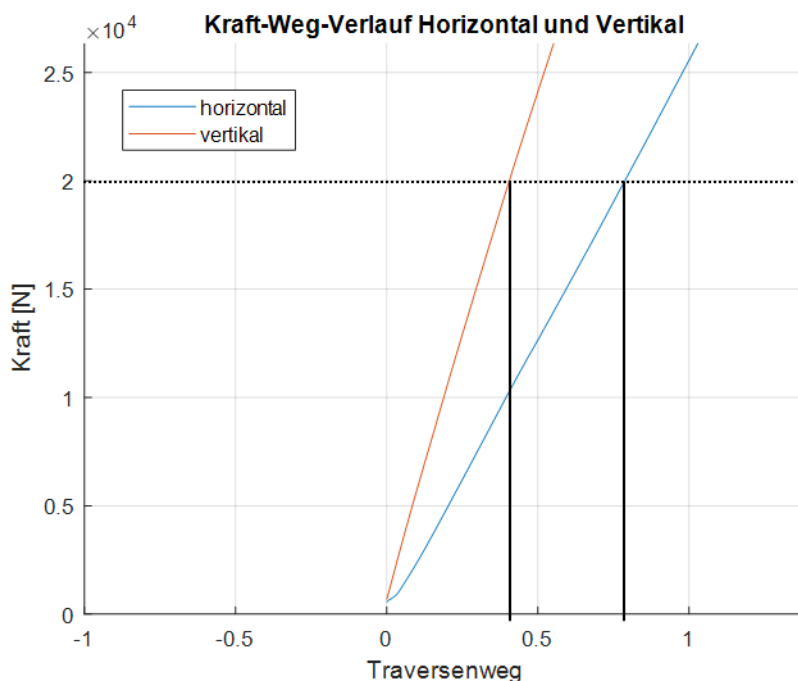
**Abbildung 19: typischer Verlauf der Leckage bei einem Level 3 Versuch**

## 9.4 Unterstützung Biax-Prüfstand TUM

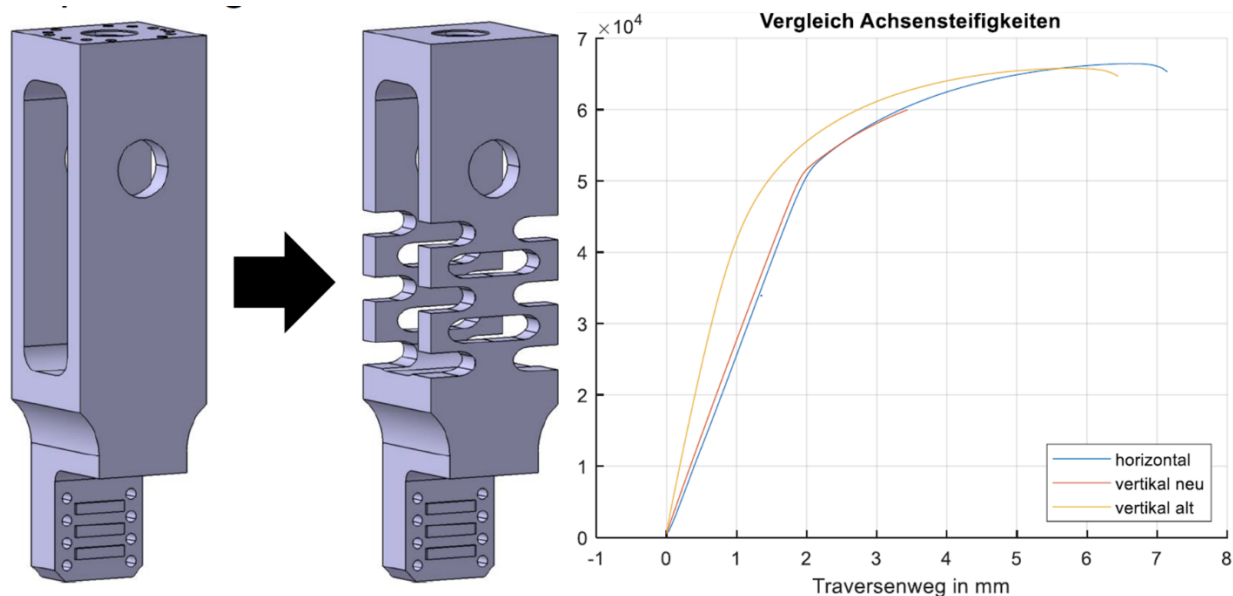
### 9.4.1 Steifigkeitsunterschiede im Biax-Prüfstand

Erste Ergebnisse mit dem Kreuzzugsproben Teststand zeigen einen Steifigkeitsunterschied zwischen horizontaler und vertikaler Achse wie in Abbildung 20 gezeigt. Dieser führt zu ungleichen Lastniveaus in den Armen und muss daher kompensiert werden.

Gemeinsame Überlegungen mit der TUM haben dazu geführt die Steifigkeiten in der vertikalen Achse zu reduzieren und somit die Achsen anzugleichen. Die Steifigkeitsreduktion soll durch Anpassung des Probenhalters passieren, wie in Abbildung 21 gezeigt. Die Änderungen wurden so umgesetzt um haben wie in der Abbildung gezeigt zu Anpassung der Steifigkeitsunterschiede geführt.



**Abbildung 20:Steifigkeitsunterschied Biax TUM**

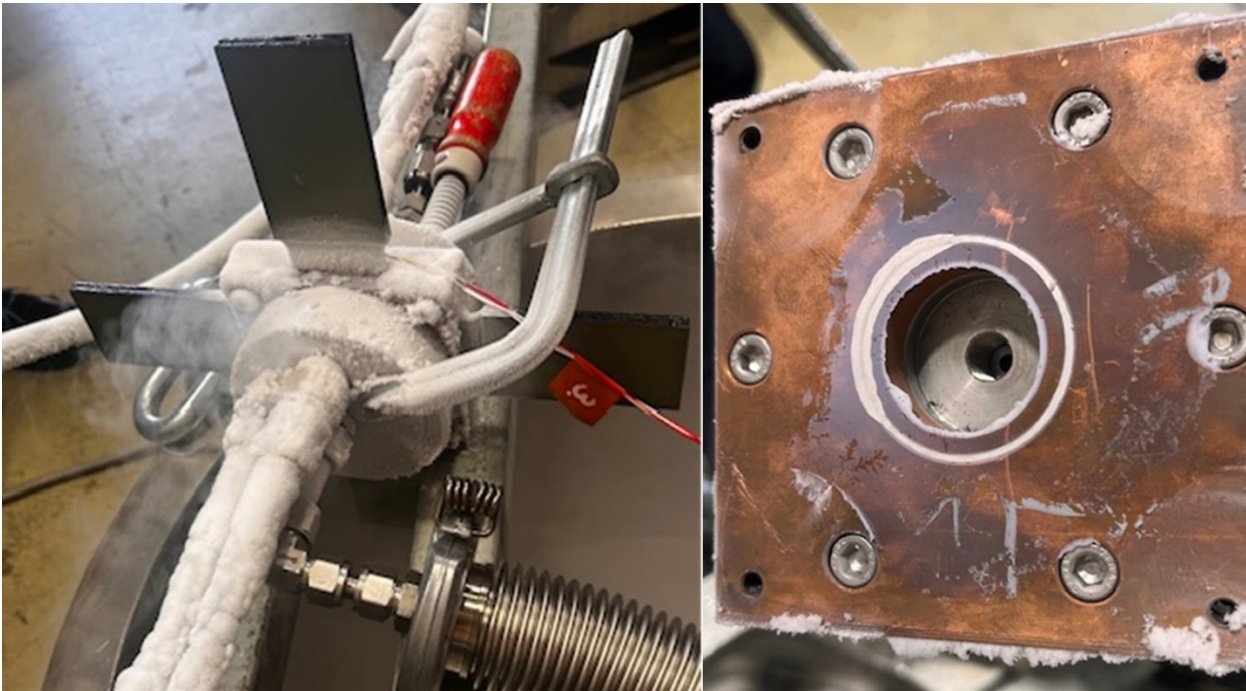


**Abbildung 21:Anpassung Probenhalter Steifigkeit**

Die herbeigeführte Lösung, beruht auf Schwächung einer Achse diese Lösung wurde gewählt als Hotfix um zügig das Probenprogramm in Cryocrack wieder aufzunehmen. Die Lösung ist jedoch keine Langfristige Lösung, da diese zur Reduktion der maximalen Kräfte führt, welche zum Erreichen bestimmter Dehnungsniveaus benötigt wird. Daher wird gemeinsam mit der TUM an generellen Verbesserungen für den BIAx Prüfstand gearbeitet.

## 9.4.2 Kühlvorrichtung und Dehnungsverteilung

Neben den Leckage Messungen bei der MT von den Level 2 Proben und den Messungen der Level 3 Proben bei der TUM mit MT Personal. Wurden folgende unterstützende Arbeiten unternommen. Wie in Abbildung 22 wurde die Kühlvorrichtung für den Biax-Prüfstand bei der MT qualifiziert. Dafür wurde eine Kreuzzugsprobe in die Kühlvorrichtung gespannt, runtergekühlt und geschaut, ob man ein Vakuum für die Leckage Messung aufbringen kann. Als Ergebnis hat man rausgefunden, das der verwendete Indiumdraht zu klein ist und die Dicke erhöht werden muss und das die Kühlvorrichtung beim abkühlen Vorspannung verliert welche durch nachziehen kompensiert werden muss.



**Abbildung 22: Test der Kühlvorrichtung at MTA**

Außerdem gab es etliche Meetings und Diskussionsrunden, wie man die Dehnungen in der Mitte der Probe weiter erhöhen kann. Da auch nach Abkühlung und gleichzeitiger Belastung der Probe keine Leckage gemessen werden konnte ist davon auszugehen, das mit dem momentanen Probendesign nicht genügend Dehnung in den Messbereich in Mitte aufgebracht werden kann ohne das Spitzen am Randbereich zum Versagen der Probe führen. Als möglicher Ausweg wurde GFK-Verstärkungen (Aufleimer) diskutiert und wie in Abbildung 23 zu sehen auch umgesetzt, welche zu höheren Dehnungen im Messbereich führen sollen. Leider konnte auch bei diesen Proben keine Leckage nachgewiesen werden. In Abbildung 24, ist die Umsetzung eines 2mm Stahlaufleimers gezeigt, um die Dehnungen in die Mitte zu bringen. Im Vergleich mit den Level 2 Proben konnte hiermit die Dehnung CP für CP von 0,63% auf 0,68% erhöht werden und für QI von 0,3% auf 0,4%. Im Vergleich zu der Bruchdehnung, welche für das Material mit 0,67% angegeben ist, sind wir insbesondere für CP in dem Bereich wo vielleicht Risse entstehen. Leider sind diese Proben bereits versagt und damit nicht für Leckage test zu verwenden.

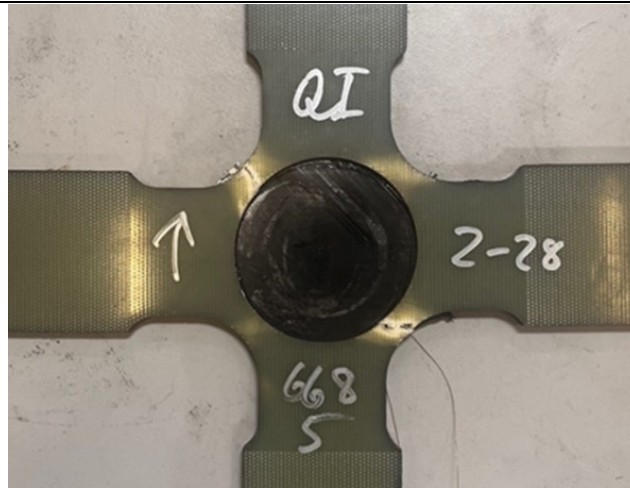


Abbildung 23: Kreuzzugsprobe mit GFK-Verstärkung



Abbildung 24: Kreuzzugsprobe mit Stahl-Verstärkung

---

## 10 Zusammenfassung Ergebnisse CryoCrack

In diesem Kapitel werden nochmal die wichtigsten Punkte aus dem Kapitel 2 zusammengefasst und bewertet.

Die Verständigung aller Projektpartner auf eine gemeinsame Prüfkörperlogik und im Projekt umsetzbaren Umfang wurde erfolgreich umgesetzt.

Die Definition der Probekörper für alle Tests und Erstellen einer Testmatrix konnte erfolgreich bearbeitet werden. Die benötigten Tests wurden definiert und in eine Testmatrix eingearbeitet. Diese wurde in 3 Leveln unterteilt. Wobei Level 1 Materialcharakterisierung definiert und Level 2 und 3 die Tests mit der Kreuzzugsprobe.

Das Material Hexcel 8552/IM7 konnte erfolgreich beschafft werden und die benötigten Lagenaufbauten und Platten für die Tests aus dem Material wurden in Handablage hergestellt.

Die MT hat bei der Definition möglicher Proben Geometrien für CFK Kreuzzugproben unterstützt und aus der Firmen Heritage relevanter Randbedingungen für den Kreuzzugteststand anhand realer Druckkörper definiert.

Die MT hat aus anderen Projekten Schliffen von realen Druckkörpern gezeigt und anhand dieser die Diskussion über Wahrscheinlichkeiten von Microrissbildung und Riss-Initiierung gestartet.

Unterstützend hat die MT zusammen mit der TUBS bei den möglichen Geometrien für CFK-Kreuzzugproben und deren Probenaufbereitung unterstützt.

Ebenso hat die MT in enger Abstimmung mit der TUBS-Analysemethoden von Micro zur Mesoebene diskutiert und deren Eignung für Auslegung von CFK-Druckkörpern bewertet.

Leckage Tests bei RT (ohne Dehnung) von allen Level 2 Proben nach mechanischer uniaxialer Vorbelastung durch die TUM bei 0,65% und 1% Dehnung, bei Raumtemperatur und Thermo geschockt bei 77K sind erfolgreich bei der MT durchgeführt worden. Es konnte jedoch keine Leckage in den Proben nachgewiesen werden. Es ist davon auszugehen das bei Uniaxialen Proben der Belastungspunkt bei dem Rissnetzwerke entstehen gleich zu setzen ist mit dem Versagen der Probe.

Leckage Tests von Level 3 wurden bei der TUM durchgeführt. Das Messverfahren auch bei cryo Temperaturen konnte erfolgreich gezeigt werden und das Konzept bestätigt. Jedoch konnte auch bei den Level 3 Proben keine Leckage nachgewiesen werden. Als Hauptgrund konnte die Kreuzzugsprobengeometrie ausgemacht werden. Die Geometrie verhindert das genügend Dehnung in den zentralen Messbereich entsteht, um Rissnetzwerke und damit Leckage nachzuweisen. Zeitgleich entstehen hohe Spannungen und Dehnungen an den Armen der Probe, die zu einem Versagen an den Armen der Probe führt.

Die MT hat unterstützend bei Fehlersuche und Lösung beim TUM BIAx Prüfstand geholfen. Dabei sind folgende Probleme hervorzuheben:

- Der Prüfstand musste während seiner Auslegung auf 100kN begrenzt werden, was einen Einfluss auf Probengeometrie, Laminataufbau und Dehnungen hatte
- Während die ersten Versuche sind Steifigkeitsunterschiede in den beiden Armen des Prüfstands aufgetreten, welche zu unterschiedlichen Lastverteilungen in der Probe geführt haben. Diese konnte durch Anpassen des Probenhalters minimiert werden.
- Die Kühlung wurde mit Hilfe von MT angepasst, um eine Leckage Messung auch bei Kryotemperaturen und unter Last zu gewährleisten.

Abschließend bewertend, aus experimenteller Sicht, konnte während der Projektlaufzeit keine Leckage oder ein Rissnetzwerk bei Proben aus dem Material Hexcel 8552/IM7 nachgewiesen werden. Dadurch war es nicht vollständig möglich den numerischen Ansatz des Multiskalen-Ansatzes zu validieren. Dies bezieht sich bereits auf den Nachweis von Rissen der Crack-Density Untersuchungen bei den Level 1 Proben durchgeführt beim IWF und geht über die uniaxialen Proben bis hin zu den Level 3 Kreuzzugsproben bei der TUM. Die Gründe hierfür, sind fehlerhafte geometrische Randbedingungen der Kreuzzugsprobe, Steifigkeitsproblem beim Biax-Prüfstand und beim erzeugten Lastniveau.

Die Material Charakterisierung zur Generierung der Materialkarten, welche für den numerischen Teil von Cryo-Cracks benötigt wurden, konnte wie geplant erfolgreich durchgeführt werden. Somit können Simulationen mit den richtigen Material Daten durchgeführt werden.

---

## **11 Vergleich des Stands des Vorhabens mit der ursprünglichen (bzw. mit Zustimmung des Zuwendungsgebers geänderten) Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplanung**

Im 1.Halbjahr 2024 kam es zum Verzug des Projektes aufgrund von Schwierigkeiten bei der Durchführung der Level 2 und 3 Tests an der TUM. Die erforderlichen Lasten in der Probe konnten nicht eingestellt werden, was zum zu frühen Versagen der Probe in den Armen führte ohne das ausreichend Dehnungen in der Probenmitte erzeugt werden konnte, welche zu nachweisbaren Rissen führen sollten. Als Grund dafür konnten Steifigkeitsunterschiede in den Prüfstands Armen ausgemacht werden, welche durch Umbauten an Biax-Prüfstand minimiert werden konnten. Als zweiter Grund konnte die Probengeometrie identifiziert werden, hier kam es zum Versagen der Probe an den Armen ohne das die benötigten Lasten zur Risserzeugung in der Mitte der Probe erzeugt werden konnten. Dieses Problem sollte durch Aufleimer verbessert werden, führte aber nur minimal zur Verbesserung.

Diese zusätzlichen Arbeiten haben das Projektende um 6 Monate verzögert.

---

## **12 Haben sich die Aussichten für die Erreichung der Ziele des Vorhabens innerhalb des angegebenen Berichtszeitraums gegenüber dem ursprünglichen Antrag geändert (Begründung)?**

Die Ziele von experimenteller Seite wurden nicht erreicht, da der Nachweis von Rissnetzwerken auch mit Ende des Projektes nicht gezeigt werden konnte. Somit konnte kein Validierungsfall für den numerischen Teil des Projektes erzeugt werden. Ursprünglich waren hierfür die Level 3 Tests vorgesehen. Die numerische Validierung muss nun mit Teilergebnissen durchgeführt werden. Ein Vergleich gemessene Leckage zu Simulation kann nicht gezeigt werden.

---

## **13 Sind inzwischen von dritter Seite Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind?**

Es sind keine Ergebnisse bekannt, die die im Projekt beschriebene anvisierte technologische Sprunghöhe erreichen, neben dem im Konsortium CryoCrack mitwirkenden Instituten.

---

## **14 Sind oder werden Änderungen in der Zielsetzung notwendig?**

Da die Ziele bis Projektende nicht erreicht werden können, sind Änderungen in der Zielsetzung notwendig, da wie in Kapitel 12 keine Rissnetzwerke im experimentellen Teil nachgewiesen werden konnten. Die Validierung des numerischen Ansatzes muss nun auf Teilergebnisse oder mit Projekt fremden Daten durchgeführt werden.

---

## **15 Fortschreibung des Verwertungsplans.**

Aktuell sind keine Anmeldungen von Schutzrechten geplant.

Es wird mit Ende des Projektes nicht davon ausgegangen, dass eine wirtschaftliche Verwertung nach Projektende gegeben ist, da kein experimenteller Nachweis von Leckage und Entstehung von Rissnetzwerken weder bei Raumtemperatur noch bei Cryo 77K erbracht werden konnte.

-----Dokument ENDE-----