

# ADD2RELIABLADE

Erweiterte Materialdaten und Computertomographie, virtuelle Prüfstände, Big Data und datenbasierte Modellierung als Ergänzung für ReliaBlade

**Verbundvorhaben:** Erweiterte Materialdaten und Computertomographie, virtuelle Prüfstände, Big Data und datenbasierte Modellierung als Ergänzung für ReliaBlade

**Teilvorhaben:** Computertomographie und Big Data als Ergänzung für ReliaBlade

**Förderkennzeichen:** 0324335D  
**Laufzeit:** 01.05.2021-30.04.2025

**Ausführende Stelle:** Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme IWES  
Am Seedeich 45, 27572 Bremerhaven

Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen (IIS)  
Entwicklungszentrum Röntgentechnik (EZRT)  
Flugplatzstraße 75, 90768 Fürth

**Berichtersteller:** Dr. Enno Petersen

**Berechtigte Personen:** öffentlich zugänglich

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 0324335D und unter der Trägerschaft des Projektträgers Jülich gefördert. Die Verantwortung für die Inhalte des Abschlussberichts liegt bei den jeweils genannten Autoren.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>2</b>
<b>I. Kurzdarstellung</b>	<b>3</b>
<b>1 Aufgabenstellung</b>	<b>3</b>
<b>2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde</b>	<b>4</b>
<b>3 Planung und Ablauf des Vorhabens</b>	<b>4</b>
<b>4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde</b>	<b>4</b>
<b>5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen</b>	<b>7</b>
<b>II. Eingehende Darstellung</b>	<b>8</b>
<b>1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele</b>	<b>8</b>
1.1 Probenplanung für mechanische und computertomographische Untersuchungen	8
1.2 Probenfertigung	12
1.3 Versuchsdurchführung mechanisch	13
1.4 Ergebnisse der Computertomographien	15
1.4.1 Ondulationsproben	15
1.4.2 Repräsentative Hinterkanten-Proben	16
1.4.3 Repräsentative Hinterkanten-Proben mit künstlichen Poren	16
1.4.4 Vorspannvorrichtung	17
1.4.5 Auswerteroutinen	20
1.4.6 Großformat CT	21
1.4.7 Hochenergie-CT	22
<b>2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit</b>	<b>26</b>
<b>3 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans</b>	<b>26</b>
<b>4 Der während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen</b>	<b>27</b>
<b>5 Literaturverzeichnis</b>	<b>29</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>30</b>
<b>III. Erfolgskontrollbericht</b>	<b>31</b>
Anhang A: Erfolgskontrollbericht des Fraunhofer IWES	31
<b>IV. Berichtsblatt</b>	<b>32</b>

# I. Kurzdarstellung

## 1 Aufgabenstellung

Beim übergeordneten Projekt Reliablade welches durch das Vorhaben Add2ReliaBlade ergänzt wird, handelt es sich um ein binationales (Deutsch-Dänisches) Forschungsvorhaben, das sich mit der technischen Zuverlässigkeit von Rotorblättern beschäftigt. Dabei wird ein Teil der Arbeiten von einem dänischen Konsortium bearbeitet und ein zweiter Teil von einem deutschen (Leibniz Universität Hannover und Fraunhofer IWES). Add2ReliaBlade gewährleistet durch ein rein deutsches Konsortium unter starker Industriebeteiligung den nationalen und industriellen Zugang zu den Ergebnissen des Ursprungsprojekts.

Diese Ergebnisse werden ergänzt um hochauflösende Röntgen-Computertomographie-Aufnahmen (CT), die sowohl die fertigungsbedingte Mikrostruktur als auch das Fortschreiten von Schädigungen während der Belastungshistorie identifizieren. Die hierdurch erweiterte Datenbasis aus Reliablade wird verwendet, um Methoden zur Zuverlässigkeitsbewertung von Rotorblättern zu validieren. Hierzu sind Methoden zur Verarbeitung und Nutzbarmachung der anfallenden großen Datenmengen notwendig.

Der Fokus der IWES-Aktivitäten liegt auf der technischen Abwicklung zur Erstellung von CT-Aufnahmen von Subkomponenten und repräsentativen Detailproben aus Reliablade. Diese werden am Fraunhofer Entwicklungszentrum Röntgentechnik (EZRT) angefertigt. Dieses gehört zum Fraunhofer Institut für integrierte Schaltungen (IIS). Ein zur Verfügung stehender Großraums Scanner ermöglicht, die Untersuchung ganzer Rotorblattsubkomponenten in einzigartiger Auflösung. Die CT-Aufnahmen umfassen die Identifikation der Schädigungsausbreitung über bestimmte Stationen der Belastungshistorie und dienen so der Validierung von Simulationswerkzeugen, welche von den Partnern des Konsortiums entwickelt werden. Diese Methoden nutzen einerseits die erfasste Mikrostruktur als Eingabe für die Abbildung der Fertigungsqualität und sagen andererseits das Einsetzen und Fortschreiten von Schäden voraus, um so eine höhere Zuverlässigkeit der Lebensdauerprognose zu erzielen.

Um einen möglichst intuitiven Zugang zu den sehr umfangreichen Informationen aus verschiedensten Quellen zu ermöglichen, arbeitet das IWES an Methoden aus dem Bereich Big Data. Dies umfasst die Erstellung einer Datenbankarchitektur samt Auswerterroutinen zur inhaltlichen Verknüpfung und gezielten Bereitstellung von Daten und deren Zusammenhängen. Um insbesondere einen zeitnahen Erkenntnisgewinn aus Ermüdungsprüfungen zu erhalten, wird ein Werkzeug zum Vergleich und zur Visualisierung von experimentellen Ergebnissen mit Berechnungsvorhersagen erstellt.

Das Teilvorhaben verfolgt die folgenden technisch-wissenschaftlichen Arbeitsziele:

- Identifikation der fertigungsbedingten Mikrostruktur (Faserverläufe, Poren, Fehlstellen einer Hinterkantensubkomponente (TAP 1.3.1))
- Charakterisierung des Schadenswachstums an vordefinierten Fehlstellen und Identifikation des Einflusses auf die statische und dynamische Tragfähigkeit einer Hinterkantenverklebung (TAP 1.3.4)

- Aufstellen eines Zusammenhangs zwischen Harztränkung des Balsakerns und steifigkeitsabhängigem Beulwiderstand (TAP 1.3.2)
- Identifikation der Schadenscharakteristik an Ondulationen und des Zusammenhangs zu Winkelabweichung und Wellenlänge (TAP 1.3.1)
- Erstellen einer Datenbankstruktur zur Sicherung und Bereitstellung großer Datenmengen samt der gezielten Auswertung und Nutzbarmachung der Daten über interaktive Bedienelemente (TAP 3.1.1, TAP 3.1.2)
- Werkzeug zur Auswertung und Visualisierung von Versuchsergebnissen, um diese mit prognostizierten Ergebnissen zu vergleichen (TAP 3.1.4)

## **2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Das Projekt ist eng verbunden mit dem übergeordneten Projekt-Reliablade und damit zum deutsch-dänischen Konsortium. Innerhalb Add2RB werden Proben und Substrukturen aus Reliablade CT-gescannt, um dort wo gewinnbringend, eine höhere Aussagekraft über Schäden und Imperfektionen zu erhalten. Das Projekt ermöglichte den Datentransfer und Austausch zwischen den Partnern und Konsortien. Herausfordern war hieran die Zeitpläne aufeinander abzustimmen.

## **3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das Projekt startete durch Förderzusage im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms [1] am 01.05.2021 und wurde nach 1 jähriger Projektverlängerung am 30.04.2025 beendet. Ursächlich waren die Anbindung an das übergeordnete Reliablade-Projekt und die Verfügbarkeit von Ergebnissen aus diesem sowie der Durchführung von Prüfungen auf der 1MN-Maschine des Fraunhofer IWES. Für diese lag während der Projektlaufzeit ein aufwendig zu behebender Defekt vor, welche der in der Schweiz ansässige Hersteller nur iterativ und mit mehrmaligen Rückschlägen beheben konnte. Dies hat die Durchführung der Prüfungen erheblich verzögert, welches im Endeffekt maßgeblich für die erforderliche Verlängerung der Projektlaufzeit war.

Durch die Anbindung an Reliablade sind kleinere Änderungen eingetreten. Beispielsweise wurde für den großformatigen Scan der Hinterkante ein abweichendes Vorgehen zur ursprünglichen Planung gewählt und eine Komponente aus einem der getesteten Rotorblätter aus ReliaBlade herausgetrennt, da dieses einen größeren Mehrwert geboten hat. Dies führte zur Verschiebung des MS1 aus Q4 2021 in Q3 2022.

## **4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Zur Zuverlässigkeitsbewertung von Rotorblättern sind insbesondere Strukturdetails und ihre fertigungsbedingte inhomogene Mikrostruktur von hoher Bedeutung. Eine entsprechende Komponente stellt die Hinterkante (HK), insbesondere die dortige Verklebung der Halbschalen dar.

Durch Eigenspannungen können bereits nach der Fertigung initiale Mikrorisse auftreten, welche im Laufe der Zeit anwachsen und sogar in die angrenzenden Lamine fortschreiten können [8]. Um dieses gezielt experimentell abzubilden, besteht die Bestrebung Testaufbauten für entsprechende Subkomponenten zu entwickeln [9].

Weitere fertigungsbedingte Imperfektionen mit Einfluss auf die Materialeigenschaften sind unvermeidbar und spielen an weiteren Positionen eine entscheidende Rolle im Rotorblatt. Eine Fragestellung besteht im Grad der Harzaufnahme durch den Balsa-Kern bei der Verklebung mit den Deckschichten. In stabilitätsgefährdeten Bauteilen hat die Steifigkeitszunahme durch die Tränkung einen signifikanten Einfluss auf die Traglast [6]. Es ist Bestrebung, den Zustand nach der Fertigung in einen Zusammenhang zum Stabilitätsverhalten zu stellen und hierzu entsprechende Modelle zu entwickeln [7].

Eine weitere Problematik besteht in auftretenden Faserwelligkeiten, welche durch die Kraftumlenkung die Delaminations- und schädigungswiderstände eines Laminats massiv beeinträchtigen können [11]. Die Ursachen sind vielfältig, bislang jedoch wenig untersucht und kaum vorhersehbar. Im Mittelpunkt vieler Untersuchungen steht daher die Modellbildung, um die Auswirkungen vorherzusagen.

Zur Identifikation von Fehlstellen in Faserverbundbauteilen kommen in der Luft- und Raumfahrt bereits standardmäßig zerstörungsfreie Prüfmethode zum Einsatz und diese werden stetig weiterentwickelt. Aufgrund des Kostendrucks und der sehr großen Bauteile wird dies bislang nur wenig in der Windenergiebranche im Bereich der Rotorblätter eingesetzt.

Bei Faserkunststoffverbunden etablierte Methoden sind verschiedene Ultraschalltechniken, Thermografie oder Acoustic Emission. Diese können zuverlässig zur Detektion von Schäden im Bereich mehrerer Millimeter, teils sogar lediglich im Zentimeterbereich, herangezogen werden. Oftmals können hierbei keine oder nur ungenaue Informationen zur exakten dreidimensionalen Position, bspw. der Tiefe bei Delaminationen bereitgestellt werden.

Eine vielversprechende und in den letzten Jahren vermehrt zum Einsatz kommende Technologie ist die aus dem Medizinbereich bekannte Röntgen-CT. Diese ermöglicht eine sehr detaillierte Auflösung der Mikrostruktur für Bauteile sogar aus Kohlenstoff-Faser verstärktem Kunststoff [2, 3]. Durch die beeindruckenden Entwicklungen der letzten Jahre mit immer größer werdenden Anlagen ist ebenfalls das mögliche Untersuchungsvolumen der Proben stetig angestiegen. Das EZRT stellt einen Hochenergie-Großraum-CT zur öffentlichen Nutzung zur Verfügung, welcher zur Untersuchung ganzer PKW oder historischer Objekte eingesetzt wurde [1]. Dies stellt eine einzigartige Möglichkeit zur wissenschaftlichen Nutzung der Technologie dar.

Bei der mehrmonatigen Ermüdungsprüfung von Rotorblättern fallen enorm große Datenmengen an, wobei eine weitere Zunahme durch den vermehrten Einsatz von zusätzlicher Messmethodik abzusehen ist. Herausfordernd ist hierbei nicht nur die reine Größe der Daten, sondern insbesondere das gezielte Bereitstellen von Informationen und Zusammenhängen.

Unter dem Begriff Big Data fallen verschiedene Methoden zur Handhabung großer Datenmengen. Diese unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Anforderungen, bspw. bzgl. eines lediglich sehr hohen Datenvolumens, einer großen Vielzahl an unterschiedlichsten Datenformaten oder sogar die Erfordernis an einen sehr schnellen Transfer der Datenmengen. Lösungsansätze bestehen im Parallelisieren von Prozessen auf teils dezentralen Speicherorten oder Methoden zum selbstständigen Erkennen und Sortieren von Informationen aus den Daten [10].

## **Eigene Vorarbeiten**

Aufgrund der engen Verzahnung mit dem Ursprungsprojekt Reliablade existieren zahlreiche Vorarbeiten, insbesondere in der Bereitstellung von generierten Ganzblatt-, Komponenten-, und Couponprüfergebnissen als auch Berechnungsmodellen.

Eine besondere Herausforderung ergibt sich durch das Eingreifen in die innerhalb Reliablades bereits laufenden Prüfungen für die Anfertigung der CT-Aufnahmen. Es besteht die Notwendigkeit die geplanten Aktivitäten auf den aktuellen Projektfortschritt und die Erkenntnisse des Ursprungsprojekts anzupassen.

Abweichend zum angedachten Vorgehen während der Skizzenphase, erlaubt der Projektfortschritt in Reliablade nicht, die HK-Subkomponente einer dynamischen Prüfung zu unterziehen. Um die erforderliche Validierung der Berechnungs- und Simulationswerkzeuge wie geplant zu ermöglichen, werden Proben mit einer repräsentativen HK-Verklebung verwendet. Dies ermöglicht, gezielt charakteristische Fehlstellen in die Verklebung einzubringen und das Schädigungswachstum sowie die Auswirkungen auf das strukturelle Tragverhalten dieser zu identifizieren. Für den Großteil der in Add2ReliaBlade im CT untersuchten Probekörper ist die Fertigung und mechanische Prüfung in Reliablade vorgesehen; der Mehraufwand, der sich durch den für die CT-Untersuchung notwendigen mehrmaligen Ein- und Ausbau der Probekörper ergibt, wird hingegen Add2ReliaBlade zugeordnet. Eine Ausnahme stellen die Probekörper mit repräsentativen HK-Verklebungen dar. Diese werden in Reliablade gefertigt und in Add2ReliaBlade geprüft. In diese Proben werden in Reliablade identifizierte, charakteristische Fehlstellen eingebracht.

Innerhalb des Projekts „Zukunftskonzept Betriebsfestigkeit Rotorblätter - Phase II (FKZ 020E-100376344)“ wird ein „Dashboard“ zur Übertragung und Visualisierung von Testdaten aus der Rotorblattprüfung erstellt. Es ist geplant bestimmte Module, wie bspw. eine Weboberfläche für die Nutzung in Add2ReliaBlade zu adaptieren. Die gestellten Anforderungen an Datentransfer und Visualisierung weichen stark von denen der hier geplanten Datenbank ab, da im Dashboard keinerlei Auswertefunktionen vorgesehen sind und die Varianz als auch das Volumen der Daten weit geringer ausfallen. Im Gegenzug, dafür dominiert jedoch die Anforderung an die Geschwindigkeit des Datentransfers.

## **ReliaBlade (2018-2022, FKZ: 0324335)**

Der Schwerpunkt von „Reliablade“ ist die Bewertung der Auswirkungen von gemessenen Systemeigenschaften und Schäden mit dem finalen Ziel, Rotorblätter zukünftig durch einen digitalen Zwilling zu beschreiben. Teil des Projekts ist die experimentelle Untersuchung des Wachstums von Schäden in einem Rotorblatt während der Ermüdungsprüfung was durch den dänischen Partner die DTU durchgeführt wird.

Das übergeordnete Ziel von „Reliablade“ ist es, einen signifikanten Beitrag zur Erhöhung der Blattzuverlässigkeit zu leisten. Das Projekt vereint die zur Vorhersage erforderliche Strukturmodellbildung (Subkomponenten- und Ganzblatttests), die Weiterentwicklung von Inspektionsmethoden zur Erfassung des Ist-Zustands nach der Fertigung und während des Betriebs sowie die Verbesserung der Interaktion zwischen Fertigung und Materialeigenschaften, woraus eine belastungsgerechtere Konstruktion mit besserer Materialausnutzung resultiert. Die Kombination der gewonnenen Erkenntnisse ermöglicht der Industrie Schritte in Richtung höherer Wirtschaftlichkeit, geringerer Energieentstehungskosten und höherer internationaler Wettbewerbsfähigkeit.

Im Rahmen des Projektes wurde ein Blattdesign inklusiver aller Materialversuche für ein 31 Meter langes Rotorblatt entwickelt. Nach diesem Computer-Modell baute das Fraunhofer IWES im nächsten Schritt zwei Rotorblätter, in den verschiedenen Produktionsfehler gezielt integriert wurden. Im Rahmen der Fertigung wurden verschiedenen Messmethoden verwendet, um einen Abgleich des realen Rotorblattes mit dem Modell zu erhalten und jeden Fertigungsschritt zu erfassen. Diese Blätter durchliefen an der DTU experimentelle Tests, um sie absichtlich unter kontrollierten Bedingungen zu beschädigen. Einer dieser Tests beinhaltete eine Schwenkermüdungsprüfung, bei denen 2 Schadensarten im Fokus standen. Zum einen die Verklebung in der Hinterkante, bei der die Entwicklung von Klebnahtrissen betrachtet wurde. Zum anderen die Ausbildung von Zwischenfaserbrüchen von hochbeanspruchten Bereichen der Panels zwischen den Hauptgurten und der Hinterkante. Für beide Schadensarten wurden die Schadensinitiierung und der Schadensfortschritt durch Videoüberwachung, Thermographie und Inspektionen dokumentiert.

Um die integrierten Schäden beurteilen und Vorhersagen zu Schadensinitiierung und -wachstum treffen zu können, wurden zuvor durch Material- und Komponentenprüfungen Material- und Schadensmodelle entwickelt, die dann im Ganzblattversuch validiert und in eine Datenbank integriert wurden.

## 5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Siehe auch Kapitel 2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde. Die Projektinhalte wurden vom Fraunhofer Institut für Windenergiesysteme und dem Institut für Integrierte Schaltungen erarbeitet. Bei letzterem durch das Anwendungszentrum Röntgentechnik in Fürth (EZRT) wo die Messungen durchgeführt wurden. Im Gesamtkonsortium wurde insbesondere die Zusammenarbeit mit der DTU forciert. Über Treffen mit dem Gesamtkonsortium konnten Ergebnisse und Methoden ebenfalls mit weiteren Partnern diskutiert werden wie Siemens Software oder Siemens Gamesa RE.

Die Zusammenarbeit im Konsortium war zum Großteil durch die Bereitstellung von Daten durch das IWES an die Partner geprägt, welche diese für die weitere Erarbeitung ihrer Projektinhalte benötigten.

## II. Eingehende Darstellung

### 1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

#### 1.1 Probenplanung für mechanische und computertomographische Untersuchungen

Von Seiten des IWES wurden Proben für das Vorhaben (TAP 1.1) gefertigt, und geprüft (TAP1.5). Das EZRT führte CT-Aufnahmen durch (TAP 1.4). Diese fanden zu bestimmten Zeitpunkten statt, um den initialen Zustand in den Proben sowie das Schädigungswachstum umfassend zu identifizieren. Dies erforderte, das wiederholte mechanische Prüfen und Scannen der Probekörper nach dem Schema aus Abbildung 1.



Abbildung 1: Schema der mechanischen Prüfungen und CT-Messungen

Geprüft wurden Proben unter statischer und dynamischer Belastung. Letzteres bei unterschiedlichen Zyklenzahlen und entsprechend adaptierten Lastamplituden. Weiterhin fanden Prüfungen ohne CT-Messungen statt, um als Referenz eine Bewertung zu erlauben, ob der gesamte Vorgang des Ein- und Ausbaus der Proben der Versand sowie die CT-Untersuchung selbst einen Einfluss auf das Ergebnis haben könnten. Der nach Abstimmung mit den Partnern aufgestellte Probenplan für die repräsentativen HK-Proben ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Planung der HK-Proben zur mechanischen Testung und der Computertomographie

Prüfungsart	Zyklenzahl	Anzahl Proben	Eingebrachter Defekt	CT Scans			
				Vor Prüfung (Okt 21)	Nach 30k Zyklen (Jan 22)	Nach 60k Zyklen (Feb 22)	Nach Ver- sagen (Mär 22)
statisch	1	2					
	1	2		✓			✓
fatigue	100k	2					
	100k	2		✓	✓	✓	✓
	1M	2					
	100k	2	Bondline pores				
	100k	2		✓	✓	✓	✓
	100k	2		✓	✓	✓	✓

Die Prüfkörper sollen einen generischen Ausschnitt aus der Hinterkante des Rotorblatts darstellen. Als Klebnahtdicke sind 10 mm geplant. Die Deckhäute werden aus den gleichen Gelegen wie die für ReliaBlade geprüften Rotorblätter gefertigt. Der Lagenaufbau ist in folgender Tabelle 2: Lagenaufbau der HK-Proben dargestellt. Ein Probekörper in der Versuchsanordnung mit den Dimensionen wird in Abbildung 2 gezeigt.

Tabelle 2: Lagenaufbau der HK-Proben

Lage	Dicke/Lagenanzahl
Biax	2
UD	2
Biax	2
Klebstoff	10 mm
Biax	2
UD	2
Biax	2

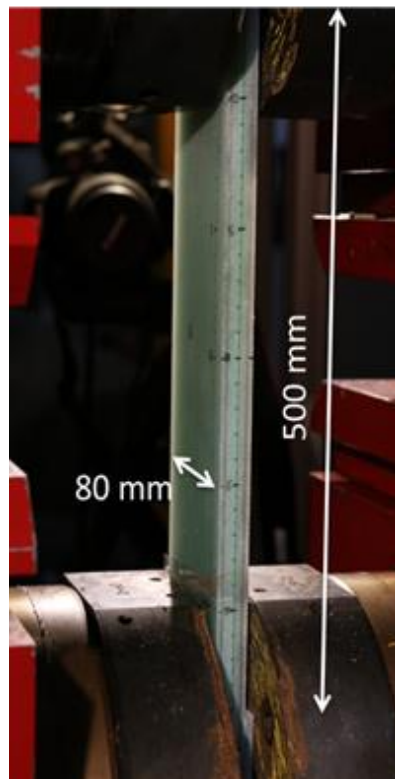


Abbildung 2: Repräsentative Hinterkanten-Probe in der Versuchsanordnung (1 MN-Maschine)

Weiterhin werden Ondulations-Proben untersucht (Abbildung 3). Diese repräsentieren das Auftreten von Welligkeiten in Gurten, welche über ein Infusionsverfahren gefertigt werden. Ebenso können die Untersuchungen Rückschlüsse auf Welligkeiten in weiteren Bereichen eines Rotorblatts ermöglichen. Die Fertigung und Testung fand innerhalb des Projekts Reliablades statt, so einige Probekörper bereits bis zum Versagen getestet waren und lediglich eine nachträgliche Identifikation des Schädigungsbild möglich war. Tabelle 3 zeigt der Prüfplan.

Tabelle 3: Prüfplanung der Ondulationsproben

Prüfungsart	Zyklenzahl	Anzahl Proben	Eingebrachter Defekt	CT Scans		
				Vor Prüfung (Okt 21)	Nach x Zyklen (Nov 21)	Nach Ver- sagen (Dez 21)
fatigue	100k	6				✓
	100k	2		✓	✓	✓

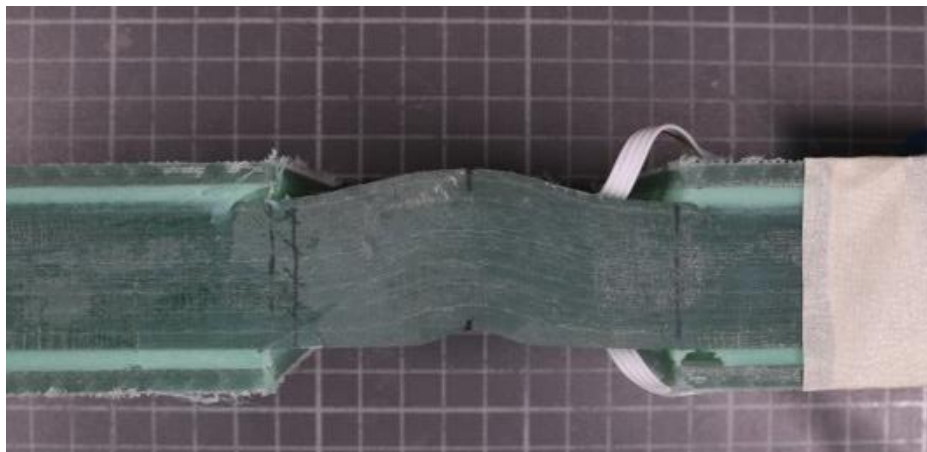


Abbildung 3: Ondulationsprobe

#### TAP 1.4 Großformatige Computertomographien

Das IB30-Rotorblatt, welches innerhalb von Reliablade in Schwenk-Richtung getestet wurde, wurde in Segmente zerteilt und solche mit besonders signifikanten Schäden in der Hinterkante für weitere Untersuchungen ausgewählt.

Eines von diesen Segmenten wurde für den CT-Scan vorbereitet und zum EZRT verbracht. Der Bereich der Hinterkante wurde durch Ultraschallprüfungen bereits untersucht, so dass eine Gegenüberstellung der Ergebnisse von UT- und CT-Messungen möglich ist. Position und Segment sind in Abbildung 4 und Abbildung 5 dargestellt.

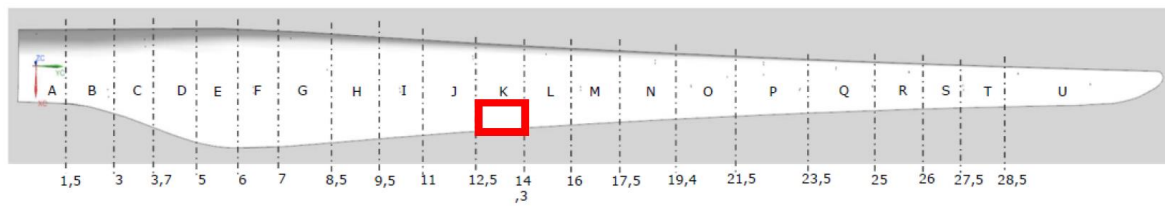


Abbildung 4: Segmente in das IB30 zerteilt wurde; in rot Bereich mit "Tunneling Cracks" in der Hinterkantenverklebung

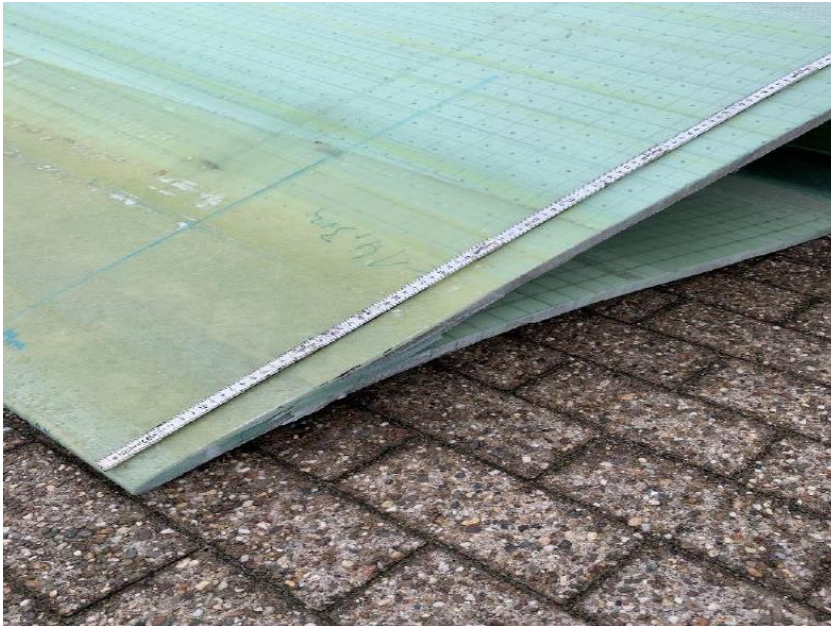


Abbildung 5: Segment aus IB30-Blatt

Neben der Hinterkante wurden großformatige Sandwich-Paneele aus Reliablade gescannt. Hierbei wurde untersucht welche Harzaufnahme je ein Balsa- und ein PET-Kernwerkstoff-Sandwich aufweisen und welche Schädigungen durch Belastung hervorgerufen werden. Abbildung 6 zeigt die Paneele und die HK vor dem XXL-Großraum-CT des EZRT.

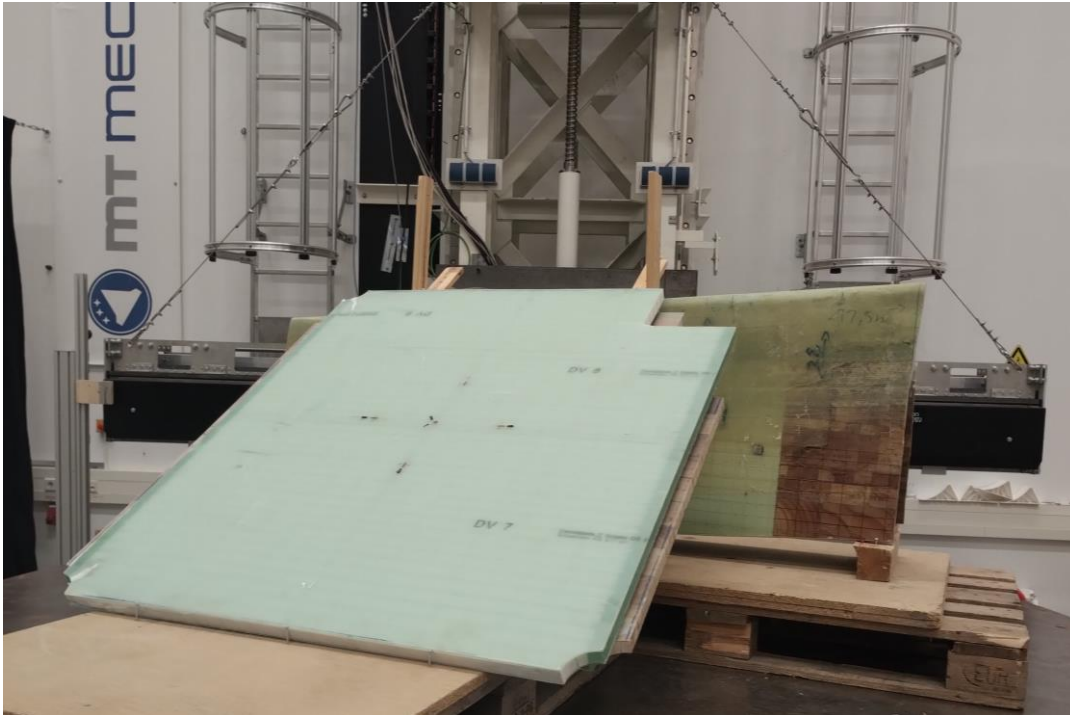


Abbildung 6: Großformatige Proben beim EZRT

## 1.2 Probenfertigung

In TAP 1.1.1 (Kurzfaserverstärkte Adhäsiv-Proben) wurden zur Sicherstellung einer hohen Fertigungsqualität, insbesondere einer homogenen Faserverteilung, zunächst Vorversuche zur Parametrierung des Prozesses durchgeführt. Im Anschluss wurden zwei Chargen gefertigt und an das Institut für Statik und Dynamik der Leibniz Universität Hannover für die experimentelle Untersuchung übergeben.

Etwas umfangreicher waren die Probekörper zum TAP 1.1.2, welche eine Hinterkantenverklebung zweier Rotorblatthalbschalen repräsentieren. Die Adhäsiv-Raupen wurden mit Hilfe einer Dosieranlage und einem variablen Klebeauftragskopf appliziert ((Abbildung 7 oben links).

Bei der Fertigung der Probekörper soll die Temperatur innerhalb der Klebnaht gemessen und über den Aushärteprozess geloggt werden. Dazu wird ein Temperatursfühler in den Randbereich der Probe eingebracht, der beim Besäumen der Probe abgetrennt wird. Zur Erzeugung repräsentativer und reproduzierbarer Fehlstellen in der Klebung wurden verschiedene Konzepte evaluiert, im Konsortium diskutiert und im Hinblick auf die Anforderungen eines Rotorblattherstellers bewertet. Ausgewählt wurde das Einbringen von Styroporkugeln als Porenrepräsentanten, wie sie in der industriellen Rotorblattfertigung auftreten (Abbildung 7 oben rechts). Die Adhäsivraupen wurden im Anschluss mit den Deckschichten versehen (Abbildung 7 unten links) und händisch auf die gewünschte Dicke der Klebschicht kompaktiert (Abbildung 7 unten rechts).

Zunächst wurden konventionelle, fehlerfreie Proben gefertigt. Anschließend wurden Proben mit 5 mm Kugeln in Probenmitte innerhalb der Adhäsivschicht hergestellt und unter Temperatur ausgehärtet.

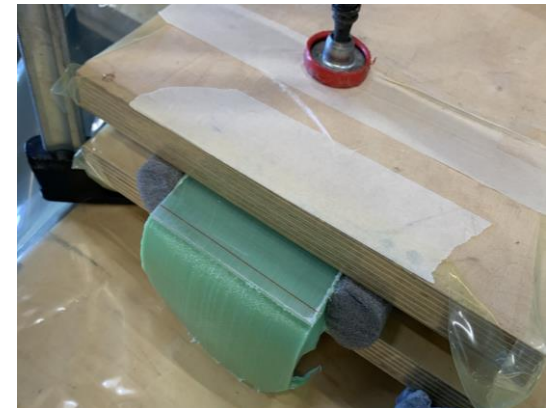
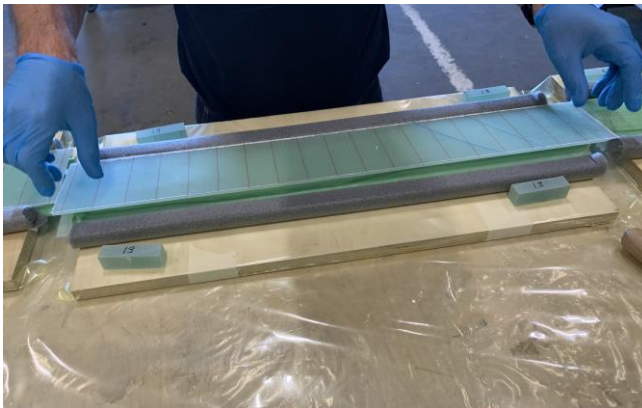
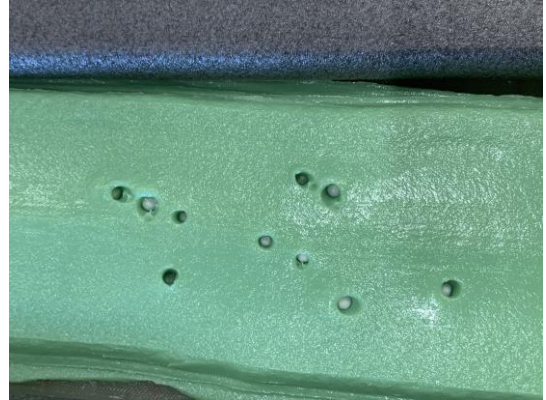


Abbildung 7: Fertigung der Proben zur Repräsentation einer Hinterkantenverklebung; o.l. Klebstoffauftrag mit variablem Klebeauftragskopf; o.r. Styropor-Kügelchen händisch eingebracht; u.l. Zusammenfügen mit Deckschichten; u.r. Klemmen und überschüssiges Material

### 1.3 Versuchsdurchführung mechanisch

Die Versuchsdurchführung war zunächst durch hohe Auslastung und wiederkehrende Defekte an den 1 MN- und 2,5 MN-Prüfmaschinen verzögert; der Austausch defekter Komponenten gestaltete sich zollbedingt als sehr zeitaufwendig. Alternativen (externe Prüfungen, nachträgliche Probenbearbeitung) wurden verworfen, da sie die CT/Prüf-Abstimmung erschwert bzw. Probenartefakte erzeugt hätten. Nach Abschluss der Reparaturen wurden die Prüfungen gestartet.

Die Ergebnisse der statischen Proben mit Faserwelligkeiten und repräsentativer Hinterkantenverklebung zeigten charakteristische Schadensbilder, so dass diese für die folgenden Ermüdungsprüfungen zur Identifikation geeigneter Lastniveaus verwendet werden konnten. Hierauf aufbauend wurden CT-Scans durchgeführt. Abbildung 8 zeigt beispielhaft das Schadensbild bei einem statischen Versuch an einer der HK-Proben.





Abbildung 8: Schäden vorne an statisch geprüfter "Milchschnitte" bei  $F=282,9\text{kN}$ ,  $314,4\text{kN}$  und  $395,7\text{kN}$

Die Ermüdungsprüfungen erfolgten sukzessive an den Proben nach Planung in Tabelle 1. Begleitet wurden die Versuche durch automatisierte Kameraaufnahmen, welche auf der Oberfläche Risse und Schädigungen dokumentierten. Ein finales Schädigungsbild für diverse Proben ist in Abbildung 9 gezeigt. Risse treten zumeist dünn von einer Deckschicht zur anderen auf, dies oftmals unter einem geringen Bruchwinkel. Insbesondere im Bereich von initialen Imperfektionen wie Lufteinschlüssen oder auch den künstlichen Poren treten Risse initial auf.

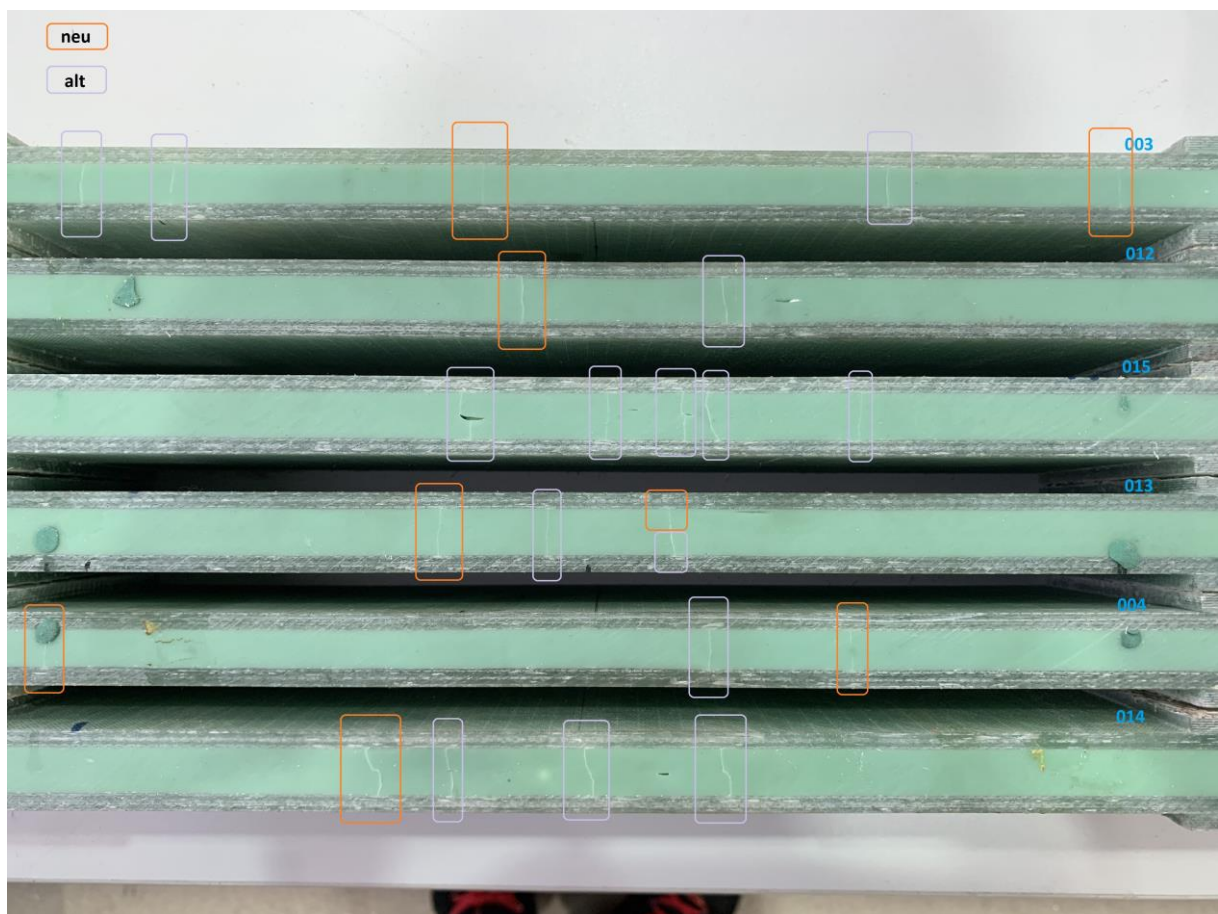


Abbildung 9: Schädigungsbild nach xx Zyklen an den repräsentativen HK-Proben

Die wiederkehrenden CT-Scans und der umfangreiche Testplan führte zu einer langwierigen Durchführung der Tests, welche aber schlussendlich in 2024 abgeschlossen werden

konnten. Die gesamten Ergebnisse wurden den Partnern zur Verfügung gestellt, um ihre Projektaktivitäten zu ermöglichen.

## 1.4 Ergebnisse der Computertomographien

In Task 1.4.3 (dicke Lamine mit Faserwelligkeiten) und Task 1.4.4 (repräsentative Hinterkantenverklebung) wurden Micro-CT-Messungen auf den entsprechenden Geräten des EZRT durchgeführt. Die CT-Aufnahmen erlauben beliebige Schnitte durch das Messvolumen und damit die Detektion innerer Schäden und Imperfektionen über die gesamten Probekörper. Die Datensätze sind durch hohe Datenvolumina (bis 200 GB je Scan) geprägt, welches die Auswertung und den Transfer der Daten etwas komplizierter gestaltet als erwartet.

### 1.4.1 Ondulationsproben

Die Ondulationsproben wurden mit hoher ( $40 \mu\text{m}^3/\text{Voxel}$ ) und niedriger Auflösung ( $70 \mu\text{m}^3/\text{Voxel}$ ) untersucht. Abbildung 10 zeigt die CT einer Ondulationsprobe mit hoher (links) und geringerer Auflösung (rechts). Eine niedrige Auflösung erlaubt die Vermessung der auftretenden Welligkeit als Winkel oder so genannter „Amplitude-to-Wavelength“, da derartige Parameter als Eingabewerte für die Anwendung analytischer Ansätze erforderlich sind. Abbildung 11 zeigt einen Schnitt parallel zur Oberfläche der Ondulation mit hoher Auflösung.

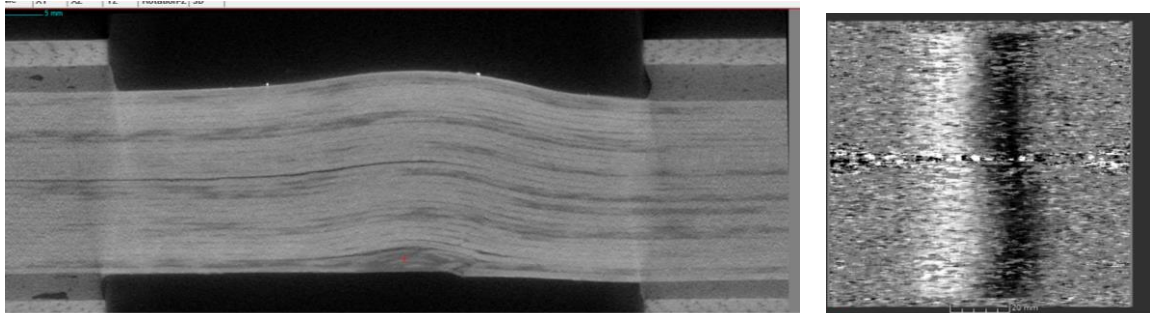


Abbildung 10: Links CT-Aufnahme einer Ondulationsprobe (seitlicher Schnitt) mit hoher Auflösung ( $40 \mu\text{m}^3$  je Voxel); rechts Draufsicht auf Ondulation bei niedriger Auflösung ( $70 \mu\text{m}^3$  je Voxel)

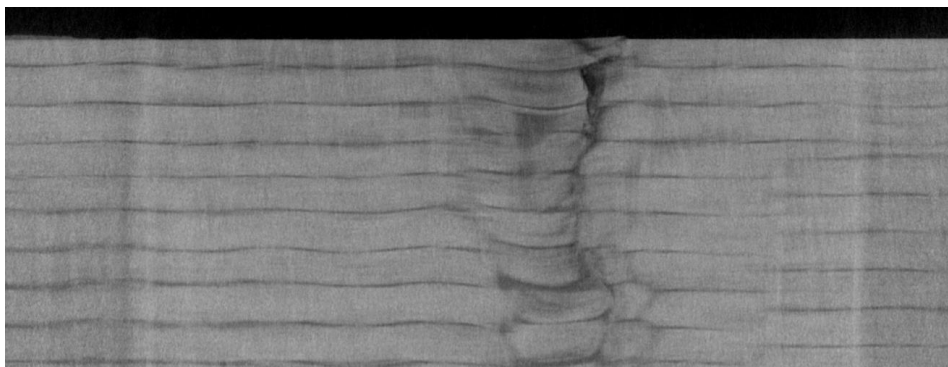


Abbildung 11: CT-Aufnahme einer Ondulationsprobe (Schnitt über die Dicke) ( $40 \mu\text{m}^3$  je Voxel);

### 1.4.2 Repräsentative Hinterkanten-Proben

Wie beschrieben werden die Messungen der repräsentativen HK-Proben zunächst bei hoher Auflösung mit den ungeschädigten Proben durchgeführt, um initiale Fehlstellen aus der Fertigung zu detektieren. Im Anschluss werden die Proben mechanisch getestet und erneut im CT untersucht. Die ermöglichte Darstellung der einzelnen Faserbündel- und Schichten (Abbildung 12 rechts) lässt erwarten, dass Schäden im Bereich 100µm gut erkennbar sind

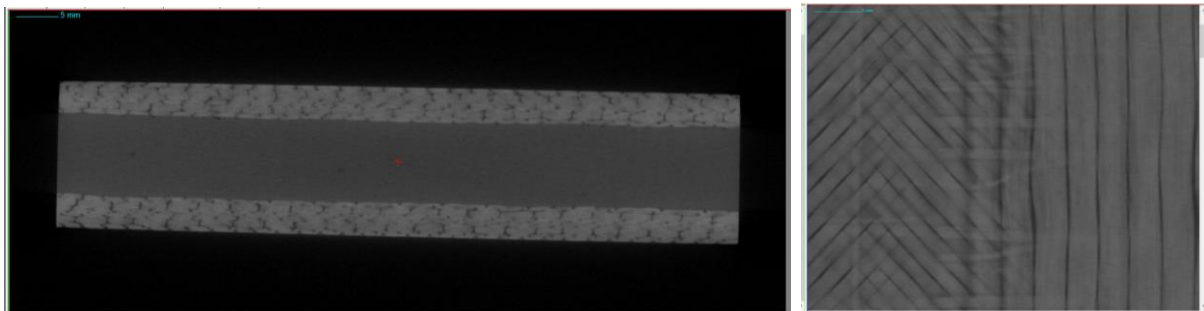


Abbildung 12: CT-Aufnahme einer repräsentativen Hinterkantenprobe bei hoher Auflösung; links Schnitt über Höhe, rechts Schnitt auf Decklaminat ( $35 \mu\text{m}^3$  je Voxel);

Nach Abschluss der Untersuchungen ist der Meilenstein 2 (MS2) erfüllt, welcher durch die Charakterisierung des Schädigungsfortschritts definiert ist.

### 1.4.3 Repräsentative Hinterkanten-Proben mit künstlichen Poren

Zu Beginn stellen die Proben mit künstlichen Poren eine geeignete Möglichkeit dar, sich einen Überblick über die Möglichkeiten der CT-Aufnahmen zu verschaffen und Scanparameter zu bestimmen. Die oben genannten Voxelgrößen wurden bspw. an diesen Proben bestimmt. Abbildung 13 zeigt eine Aufnahme über die Dicke der Probe.

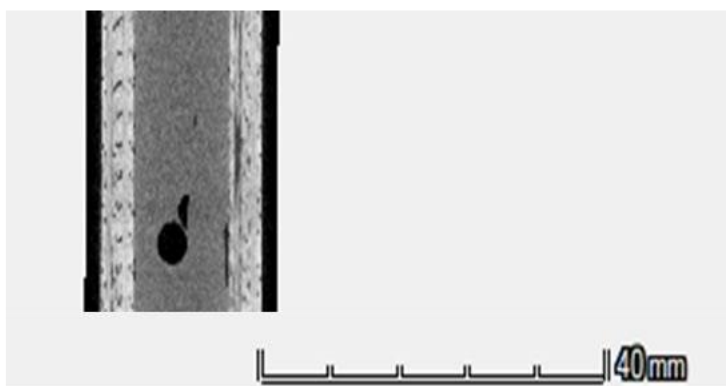


Abbildung 13: Seitliche Darstellung einer Probe mit künstlicher Pore

Abbildung 14 zeigt ein Durchsichtsbild einer entsprechenden Probe, sprich die gesamte Dicke der Probe wird überlagert dargestellt, so dass sämtliche Poren zu erkennen sind. Dies führt zu einer gewissen Unschärfe in der Abbildung.

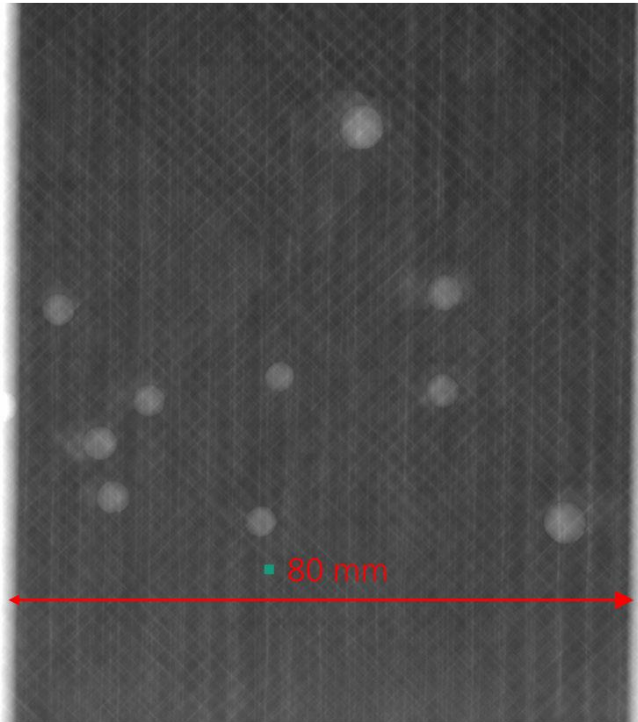


Abbildung 14: Durchschallungsdarstellung einer Probe mit künstlichen Poren, Draufsicht

#### 1.4.4 Vorspannvorrichtung

Für in-situ-CT-Messungen unter Last wurde in Task 1.4.4 eine Vorspannvorrichtung entwickelt. Dies ermöglicht, HK-Proben vorspannen zu können, so dass Risse während der CT-Messungen aufgezogen werden können. Aufgrund CT-spezifischer Randbedingungen wurde eine Konstruktion auf Basis eines Plexiglaszylinders mit mehreren Millimetern Wandstärke gewählt; hochdichte Werkstoffe im relevanten Bereich können so vermieden werden, welche die Messungen überlagern würden. Ebenso erfolgt die Klemmung außerhalb des Scanbereichs.

Abbildung 15 zeigt eine Darstellung der Vorrichtung im Modell und mit eingespanntem Probekörper im Technikum des Fraunhofer IWES. Die Probeneinfassung außerhalb des Scanbereichs erfolgt mit Anzugsschrauben. Über ein Drehmoment lässt sich die gewünschte Vorspannung einstellen.



*Abbildung 15: CAD-Darstellung und Abbildung der Aufziehvorrichtung im Technikum für repräsentative Hinterkanten-Verklebungsproben*

Es wurde untersucht, ob ein Kriechen oder Relaxieren der Probekörper die CT-Aufnahmen stören würde. Hierzu wurde ein Probekörper in der Vorrichtung mit Dehnmessstreifen versehen. Nach Aufbringen der initialen Vorspannung und somit Dehnung im Probekörper wurde über einen bestimmten Zeitraum beobachtet welche Reduzierung der aufgetragenen Dehnung eintritt. Der Verlauf ist in Abbildung 16 dargestellt. Nach ca. 50min tritt eine Konvergenz der Dehnungen ein. Folglich ist ein Vorbereiten der Proben ca. 1h vor Beginn der Messungen ausreichend.

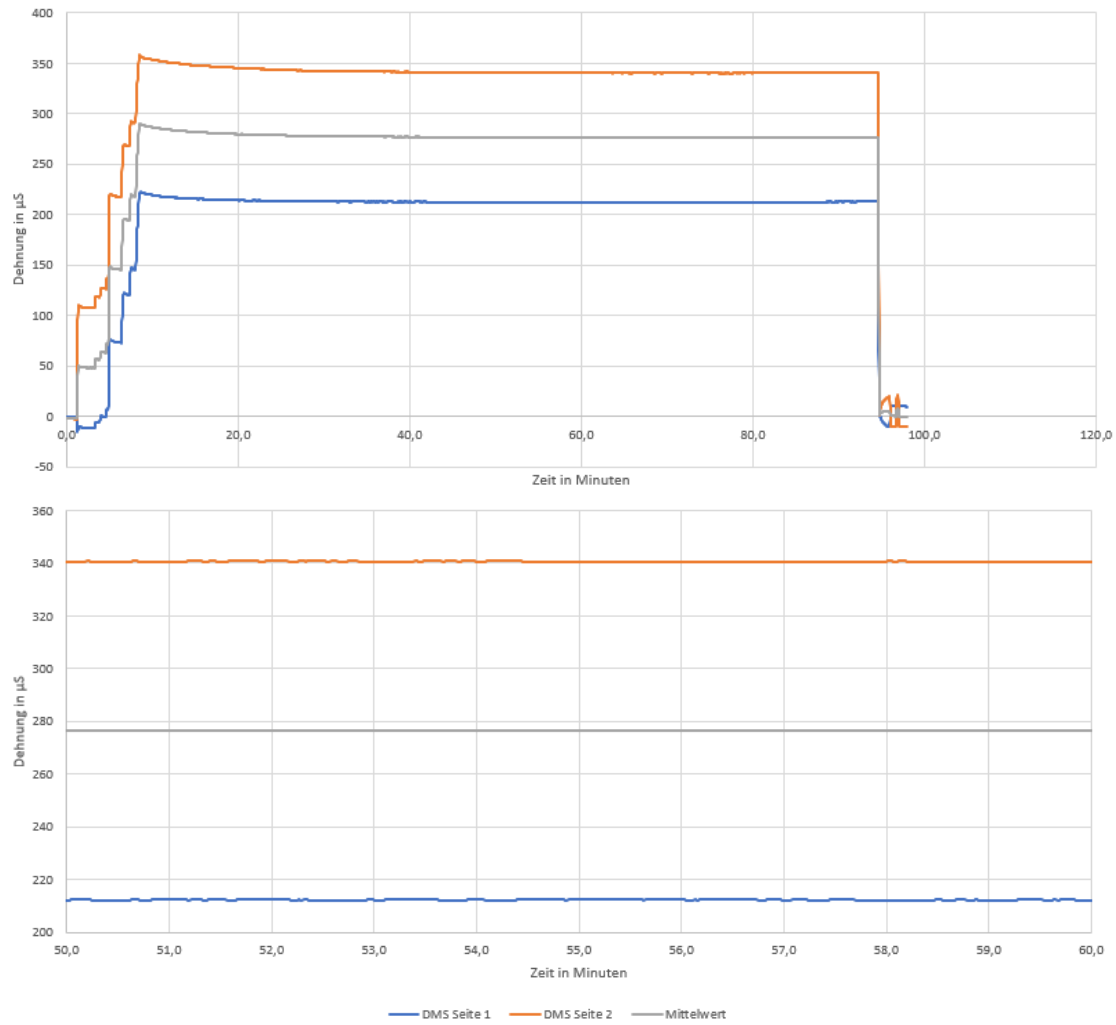


Abbildung 16: Reduktion der Dehnung über der Zeit; oben: gesamter Versuch, unten: detaillierte Ansicht

Mit diesem Vorgehen wurden letztendlich CT-Aufnahmen beim EZRT durchgeführt, wie in Abbildung 17 gezeigt.



Abbildung 17: Meskammer zur Durchführung der CT-Messung mit Aufziehvorrichtung

#### 1.4.5 Auswerteroutinen

Zur Unterstützung der Auswertung der CT-Daten wurde ein DAAD Rise Student der University of Texas at Dallas eingestellt, welcher sich mit Automatisierungsmethoden zur CT-Auswertung beschäftigte. In Abbildung 18 ist dargestellt, wie Porengrößen innerhalb des Adhäsivs der repräsentativen Hinterkantenproben über eine Python-Auswerteroutine automatisch identifiziert werden können. Dies erleichtert die Sichtung der Messdaten bzgl. der initialen Kategorisierung enorm.

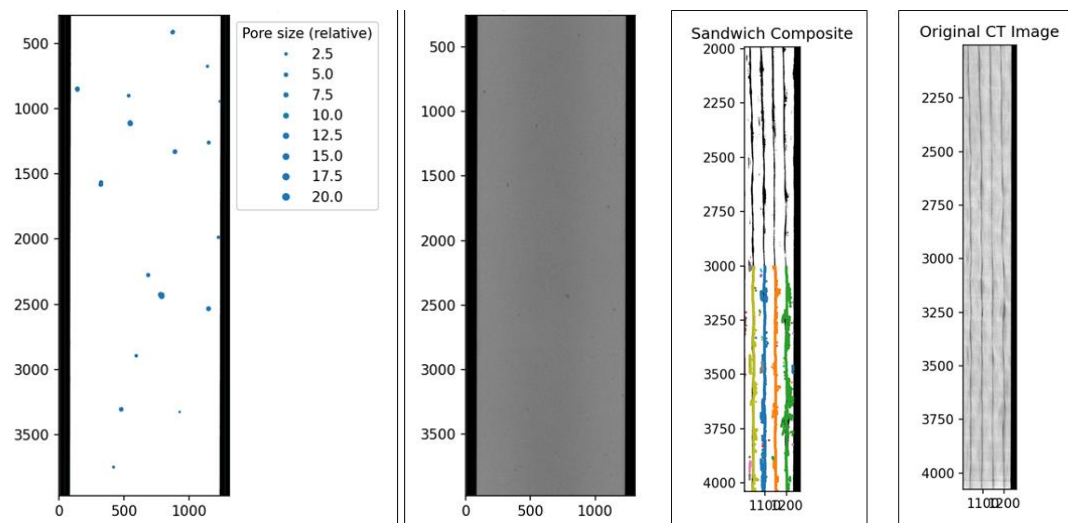


Abbildung 18: (l) Automatische Porenerkennung und Visualisierung in repräsentativen Hinterkantenproben; (r) Original CT-aufnahme

#### 1.4.6 Großformat CT

Abbildung 19 zeigt einen Schnitt durch ein Balsa-Sandwich-Paneel. Zu erkennen ist das Muster durch die Vorkonditionierung. Auf gekrümmten Oberflächen würde dies eine Drapierung des Balsakerns ermöglichen. Die Messungen erlauben eine Bestimmung des aufgenommenen Harzvolumens.

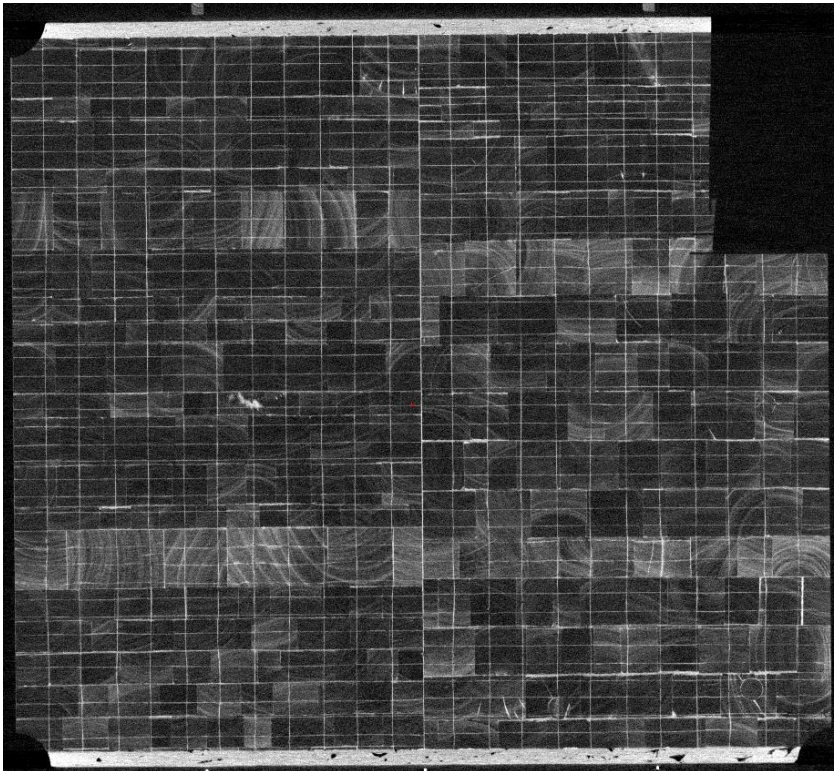


Abbildung 19: CT-Aufnahme eines Balsa-Paneels, Schnitt parallel zur Oberfläche

Abbildung 20 zeigt die CT-Aufnahme der Hinterkantenkomponente und insbesondere der Klebung zwischen Ober- und Unterschale. Gut zu erkennen ist ein Lufteinschluss des in den Innenbereich ausgetretenen Harzes. Eine detaillierte Darstellung der Mikrostruktur im Bereich 200-300 $\mu$ m ist möglich ohne an Schärfe zu verlieren. Dies führt zu einer etwas geringeren Auflösung als bei den Mikro-CT-Aufnahmen der HK-Proben. Insgesamt wird mit den Aufnahmen der definierte MS1 erzielt.

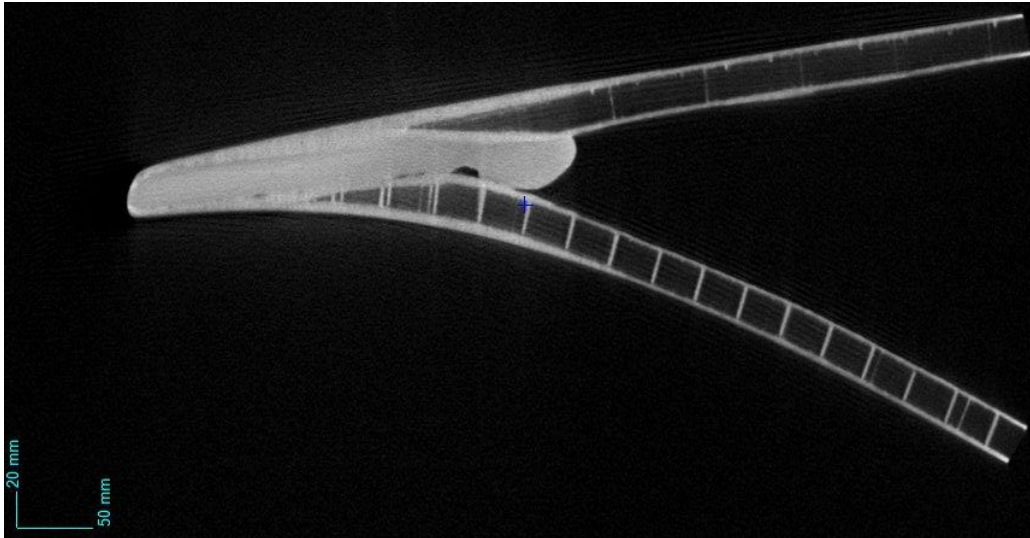


Abbildung 20: CT-Aufnahme der Hinterkantenkomponente, Schnitt normal zur Oberfläche

#### 1.4.7 Hochenergie-CT

Das EZRT richtet aktuell einen neuen Hochenergie-CT (Beamline) ein, welcher eine nochmals erhöhte Auflösung gegenüber den konventionellen Anlagen bietet. Zu Versuchszwecken wurden einige Rotorblatttypische Proben beim IWES gefertigt und im Hochenergie-CT untersucht. Siehe. Abbildung 21 für einen Glaserfaser-Epoxidverbund. Dies ermöglicht die Betrachtung einzelnen Glasfaser-Rovings und möglicher Schäden in der Harzschicht oder der Anbindung zwischen Faser und Matrix über das gesamte Probenvolumen.

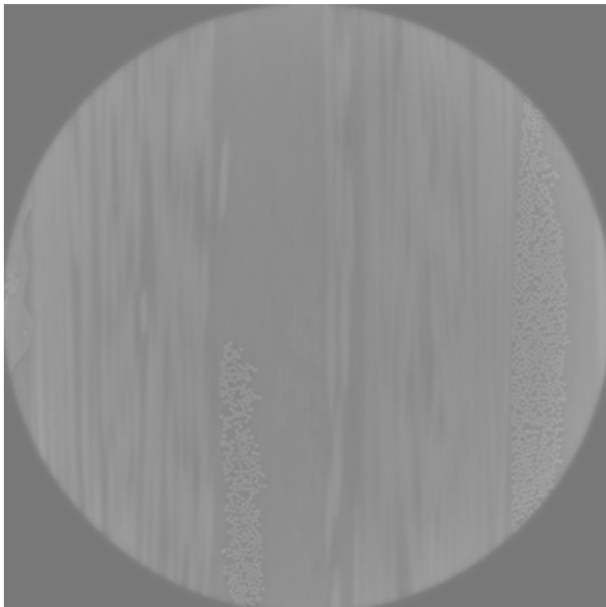


Abbildung 21: Schnittbild eines biaxialen Faserverbundcoupons aufgenommen mit einem Beam-Line CT und einer Pixelgröße von 0,64 $\mu$ m

### TAP 3.1 Verarbeitung großer Datenmengen

Die grundlegende Architektur der Datenbank (Task3.1.1) sowie ein Konzept zur Speicherung und der Datenauswertung (Task3.1.2) wurde zu Beginn des Vorhabens erstellt. Dieses ist neben der Zusammenarbeit mit dem Konsortium in Add2Reliablade, in Kooperation mit der DTU erfolgt und beim Halbjahresmeeting des Gesamtkonsortiums in Risö (DK) vorgestellt worden. Ein Fokus der Zusammenarbeit mit der DTU ist die Entwicklung einer Ontologie zur strukturierten Ablage der Daten.

Die erste Ausbaustufe erfasst Metadaten und Ergebnisse der Coupon-Tests (fünf Sub-Tasks nach Abbildung 22). Serverseitig umfasst das System eine Wissensgraph-Datenbank (Apache Jena Fuseki; T-Box, R-Box) sowie eine relationale Datenbank (PostgreSQL) für Dateireferenzen, Nutzerdaten, Dashboard und Zeitreihen (TimescaleDB), angebunden über einen in Python implementierten REST-Server. Ein in TypeScript (Angular) entwickeltes Webinterface erlaubt tabellarische Abfragen, instanzbezogene Bearbeitung über einen Eigenschaftseditor sowie Dateneingaben. Die Oberfläche wird generisch aus der T-Box abgeleitet. Abfragen unterstützen zudem die Suche entgegen der Kantenrichtung im Property Path.

1st stage				
Task 1	Task 2	Task 3	Task 4	Task 5
Requirement specification	System structure definition	Initial ontology development	Basic workflow definition and connection	ReliaBlade material data storage
Continue testing				

Abbildung 22: 5 Stufen der Implementierung

Zur Einbettung einer Auswerteroutine für Materialeigenschaften (Task 3.1.2) wurden mit der Materialgruppe des IWES zusammengearbeitet, um die Anforderungen für derartige Tools zu berücksichtigen.

Der zweite Workshop im ReliaBlade-Gesamtkonsortium zur Datenbank (Task 3.1.1.) und Datenauswertung (Task3.1.2) wurde am 26.09.2022 online durchgeführt. Die Datenbank soll zunächst die Metadaten und Ergebnisse der in Add2ReliaBlade durchzuführenden Coupon-Proben umfassen (1st stage). Innerhalb des Workshops wurde die erste Version des Software-Systems vorgestellt. Serverseitig besteht das System aus einer Datenbank zur Speicherung des Knowledge-Graphs (Apache Jena Fuseki; Speicherung der Ontologie T-Box und R-Box) und einer Relationalen Datenbank (Postgresql) zur Speicherung von Dateireferenzen, Userdaten, Dashboard und Zeitreihen (über das TimescaleDB-PlugIn) die über einen in Python implementierten Webserver via REST-API angesprochen. Abbildung 23 zeigt die Architektur der Software.

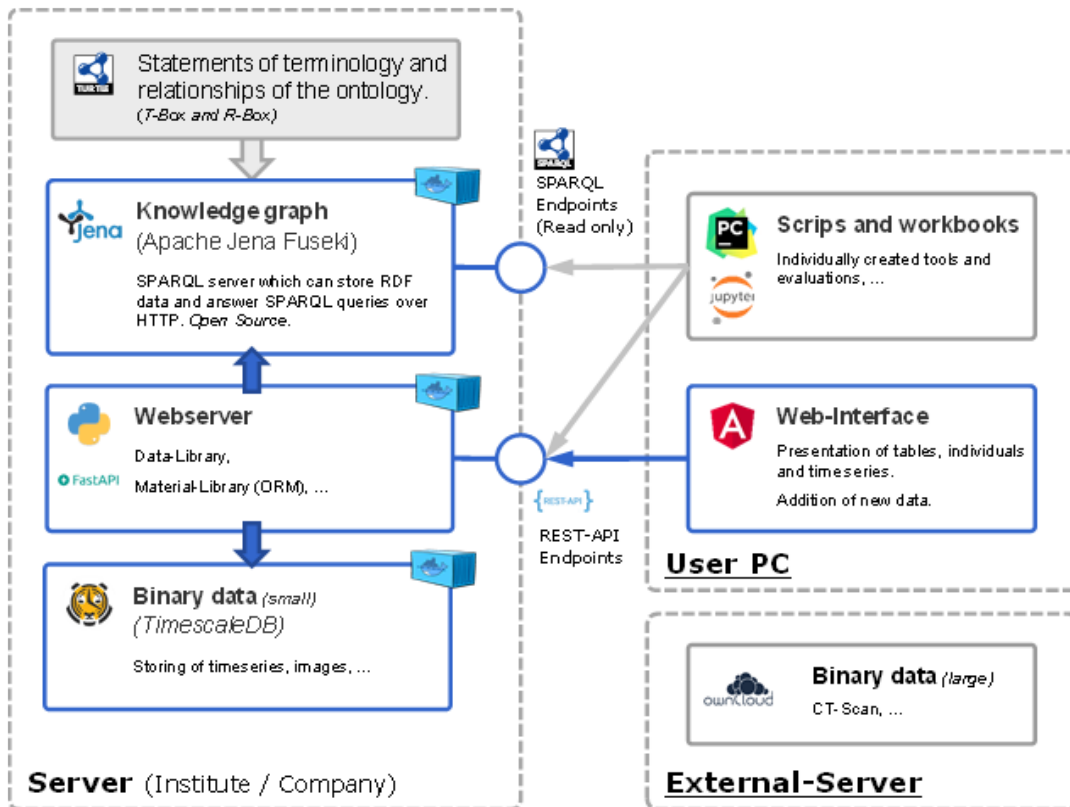


Abbildung 23: Struktur des Softwaresystems

Das System umfasst ebenfalls ein in Typescript (mit Angular) implementiertes Web-Interface, welches sowohl die Datenabfrage (Tabellarisch und bezogen auf Individuen über einen Eigenschaftseditor) als auch die Dateneingabe ermöglicht (Abbildung 24). Zu diesem Zweck bietet das System eine generische generierte Oberfläche, die auf den Daten der T-Box der Ontologie basiert und eine Dashboard Funktion an die später noch um Funktionalitäten zur Bearbeitung von Workflows erweitert werden soll.

Das Screenshot zeigt die Webinterface-Oberfläche für die Reliablade-Datenbank. Die Oberfläche ist in drei Hauptbereiche unterteilt:

- Materialien:** Eine Tabelle mit den Spalten 'Item', 'Material', 'E', 'Edited by' und 'Edited on'. Die Tabelle enthält Einträge für Aluminium, Alu-3 und Alu-2.
- Property path Editor:** Ein Dialogfenster zur Konfiguration von Eigenschaftspfaden. Es enthält Felder für 'Domain', 'Property', 'Range' und 'Property domain'.
- Individuals:** Eine Ansicht der Instanzen der Klassen 'Person' und 'Plate'. Es zeigt Details wie 'Edited on', 'Edited by', 'Based on' und 'Updated'.

Ein Diagramm im unteren rechten Bereich zeigt eine Zeitreihe mit einem Wertebereich von 0 bis -400 über die Zeit.

Abbildung 24: Webinterface

Ein MS3 konnte erzielt werden bei dem das Datenbanksystem die Ergebnisse einer dynamische Zugprüfung bereitgestellt hat. Angemerkt werden muss, dass für die Gesamtheit der CT-Daten über mehrere TB, Schwierigkeiten bestehen, diese auf einem entsprechend leistungsstarkem System über die entwickelte Datenbankstruktur zugänglich zu machen. Für ausgewählte Daten ist dies jedoch möglich.

## **2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Es wurden sämtliche Ziele, welche in den Antragsphase genannt wurden, erfüllt. Diese Ziele wurden im Einzelnen im vorangegangenen Kapitel 1 genannt. Der geleistete Arbeitsaufwand übertraf etwas den geplanten Umfang, was durch IWES-interne Aufwendungen aufgefangen werden konnte und war somit angemessen. Der Nutzen wird in den folgenden Kapiteln detailliert dargestellt.

## **3 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

Das Projekt Add2ReliaBlade unterstützt die Ziele des Hauptprojektes durch eine Erweiterung der experimentellen Datenbasis. Dies festigt das Fundament für die Entwicklung virtueller Methoden zur Zuverlässigkeits- und Lebensdauerprognose. Die Anwendung dieser Methoden wird zu leichteren und damit günstigeren Rotorblättern führen. Die ermöglichte Kostenersparnis dient der Stärkung der nationalen als auch europäischen Windenergiebranche und wird langfristig einen Beitrag zur Senkung der Stromentstehungskosten leisten. Die Vergrößerung des ReliaBlade-Konsortiums garantiert hierbei den zeitnahen Transfer der Erkenntnisse in die nationale Industrie. Auch über die Windindustrie hinaus, ist in Branchen, in welchen Leichtbauwerkstoffe verwendet werden, mit einem hohen Interesse an den Ergebnissen und entwickelten Methoden zu rechnen.

Ein wichtiger Baustein bei der langfristigen Entwicklung von digitalen Rotorblattzwillingen ist die Abbildung der fertigungsbedingten Mikrostruktur, was durch die Anfertigung der geplanten CT-Aufnahmen gewährleistet wird. Aufbauend können validierte Simulationen dazu dienen, Wartungsintervalle oder Belastungsgrenzen der Rotorblätter im Feld aufzuzeigen und somit kostspielige Ausfälle minimieren. Eine entsprechende Umsetzung ist 3-10 Jahr nach Vorhabenende realistisch.

Im Rahmen des Projekts fokussiert sich das IWES auf die Handhabung von großen Datenmengen und der enthaltenen Verknüpfungen. Die erarbeiteten Analysemethoden dienen dazu, einen Mehrwert aus durchgeführten Experimenten zu ziehen und stärken damit zeitnah die Kompetenz der experimentellen Validierung des IWES, welche wiederum die Rotorblatthersteller bei der effizienten Entwicklung der Blätter unterstützt. Bereits während des Vorhabens wurden Daten mit der DTU ausgetauscht, um gemeinsame Veröffentlichungen vorzubereiten. Die Aktivitäten sind fortlaufend.

Die CT-Aufnahmen werden weiterhin zur Validierung von am IWES verwendeten ZFP-Methoden (Ultraschall, Acoustic Emission oder Thermografie) verwendet, was zur zuverlässigen Anwendung dieser Methoden im Kontext der Rotorblattprüfung oder deren Komponenten beiträgt. Im Besonderen ist der Vergleich der Ultraschallprüfung an der Hinterkante des IB30-Blatts mit den CT-Aufnahmen erkenntnisreich. Erste Ziele wurden während der Laufzeit erreicht. Weitere werden 2-3 Jahre nach Abschluss zu erkennen sein.

Aus wissenschaftlicher Sicht waren in Add2ReliaBlade u. a. die folgenden erheblichen Erkenntnisgewinne zu erwarten, welche folgendermaßen verwertet werden:

- Durch die geplanten Computertomographien in TAP 1.4 werden Komponenten und Strukturdetailproben während ihrer Belastungshistorie zerstörungsfrei dreidimensional erfasst, wodurch eine vollständige Nachverfolgung von Position und Ausbreitung von Schäden ermöglicht wurde. Die damit erzielte Genauigkeit und Transparenz der Schadenscharakteristik stellt ein Alleinstellungsmerkmal dar und lässt in Ergänzung der Ergebnisse aus ReliaBlade eine hohe Steigerung der Kompetenzen im Bereich der Werkstoffwissenschaften und Materialmodellierung erwarten. Neben der Windenergie wird ebenfalls großes Interesse in anderen Branchen mit hoher Nutzung von Verbundwerkstoffen bestehen. Dies eröffnet einmalige Möglichkeiten zur Veröffentlichung in angesehenen wissenschaftlichen Zeitschriften und zum aufbauenden internationalen Austausch. Erste Veröffentlichungen durch die Partner sind erfolgt und weitere sind für die nächsten 2-3 Jahre in Planung.

Die Aktivitäten rund um die Nutzung von digitalen Methoden zur effizienten Bereitstellung von Informationen stellen einen wichtigen Baustein bei der Entwicklung von Auswertemethoden des IWES dar. Die Verknüpfung von Informationen aus verschiedensten Quellen kann dazu dienen, bislang unerkannte Zusammenhänge aufzudecken und führt somit zu einer deutlichen Erhöhung des Erkenntnisgewinns aus durchgeführten Prüfungen.

Leider hat sich die Nachfrage nach Untersuchungen zum grundlegenden Materialverhalten in den letzten Jahren stark verringert, so dass auf Seiten des IWES heute keine spezifische Materialforschungs-Gruppe mehr besteht. Nichtsdestotrotz sind die Erkenntnisse im Rahmen übergreifender Aktivitäten von hoher Relevanz, wie bspw. der Untersuchung von im Feld aufgetretenen Hinterkantenrissen oder der Entwicklung von Reparaturmethoden. Diese Aktivitäten fanden bereits während der Projektlaufzeit statt und werden ebenso für weitere 3-5 Jahre in der Zukunft verwendet werden.

Die umfangreichen CT-Aufnahmen ergänzen die Datenbasis der zerstörungsfreien Prüfmethoden aus ReliaBlade und anderer Projekte, wie MultimonitorRB (FKZ 0324157), so dass durch den Vergleich der Methoden eine Aussage zur Qualität und möglichen Nutzungsszenarien ermöglicht wird. Dies steuert über die Validierung einen Beitrag zur technischen Weiterentwicklung der Methoden bei. Innerhalb von MultiMonitorRB fand in der Zwischenzeit ein Blatttest mit umfangreicher Messtechnik an einem Rotorblatt mit Reparatur statt.

#### **4 Der während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Insbesondere die DTU hat in Kollaboration mit Siemens Software große Fortschritte auf dem Gebiet der digitalen Zwillinge erzielt und führt diese innerhalb des dänischen Vorhabens Reliablade2 fort. Eine Anbindung besteht über das Deutsche Reliablade2.

## 5 Literaturverzeichnis

- [0] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: Bekanntmachung - Forschungsförderung im 7. Energieforschungsprogramm „Innovationen für die Energiewende“ vom 18. Juni 2021
- [1] Garcea S.C., Wang Y., Withers P.J., X-ray computed tomography of polymer composites, *Composites Science and Technology*, Volume 156, 2018, Pages 305-319, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.10.023>.
- [2] Ullrich H-J., Hufenbach W.A., Gude M., Modler N, Danczak M., Geske V., Radloff S., (2014), Röntgen-Computer-Tomographie im Leichtbau, 16. Seminar Aktuelle Fragen der Durchstrahlungsprüfung und des Strahlenschutzes – Vortrag 2
- [3] Jespersen K. et. al, „Ex-situ time-lapse x-ray CT study of 3D microstructural fatigue damage evolution in unidirectional composites,“ in *Proceedings of the ECCM17 European Conference of Materials*, München, Deutschland, 2017.
- [4] Nielsen,W..M., Prediction of process induced shape distortion and residual stresses in large fibre reinforced composite laminates – With application to Wind Turbine Blades, Bd. Ph. D. Dissertation, DTU, 2012.
- [5] Roberts J.C., Boyle M.P., Wienhold P.D., White G.J., Buckling, collapse and failure analysis of FRP sandwich panels, *Composites Part B: Engineering*, Volume 33, Issue 4, 2002, Pages 315-324, //doi.org/10.1016/S1359-8368(02)00017-3.
- [6] Rosemeier M. et al., Impact of resin uptake of core materials on buckling of wind turbine blades, in *Proceedings of the Torque 2018 Conference*, Milan, Italy, 2018.
- [7] Rosemeier M., Krimmer A., Bardenhagen A., Antoniou A. (2019), Tunneling crack initiation in trailing-edge bond lines of wind-turbine blades, (2019) *AIAA Journal*, 57 (12), pp. 5462-5474. doi: 10.2514/1.J058179
- [8] Rosemeier M., Antoniou A., Chen X., Lahuerta F., Berring F, Branner K., (2019) Trailing edge subcomponent testing for wind turbine blades–Part A: Comparison of concepts, *Wind Energy* Volume22, Issue4, 487-498, <https://doi.org/10.1002/we.2301>
- [9] Wartala R., Hadoop: Zuverlässige, verteilte und skalierbare Big-Data-Anwendungen, Open Source Press, München 2012. ISBN 978-3-941841-61-1
- [10] Xiao Chen, Fracture of wind turbine blades in operation—Part I: A comprehensive forensic investigation, 2018. Available: <https://doi.org/10.1002/we.2212>. (Ondulationen)

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema der mechanischen Prüfungen und CT-Messungen .....	8
Abbildung 2: Repräsentative Hinterkanten-Probe in der Versuchsanordnung (1 MN-Maschine).....	9
Abbildung 3: Ondulationsprobe .....	10
Abbildung 4: Segmente in das IB30 zerteilt wurde; in rot Bereich mit "Tunneling Cracks" in der Hinterkantenverklebung .....	11
Abbildung 5: Segment aus IB30-Blatt .....	11
Abbildung 6: Großformatige Proben beim EZRT .....	12
Abbildung 7: Fertigung der Proben zur Repräsentation einer Hinterkantenverklebung; o.l. Klebstoffauftrag mit variablem Klebeauftragskopf; o.r. Styropor-Kügelchen händisch eingebracht; u.l. Zusammenfügen mit Deckschichten; u.r. Klemmen und überschüssiges Material .....	13
Abbildung 8: Schäden vorne an statisch geprüfter "Milchschnitte" bei $F=282,9\text{kN}$ , $314,4\text{kN}$ und $395,7\text{kN}$ .....	14
Abbildung 9: Schädigungsbild nach xx Zyklen an den repräsentativen HK-Proben .....	14
Abbildung 9: Links CT-Aufnahme einer Ondulationsprobe (seitlicher Schnitt) mit hoher Auflösung ( $40\ \mu\text{m}^3$ je Voxel); rechts Draufsicht auf Ondulation bei niedriger Auflösung ( $70\ \mu\text{m}^3$ je Voxel).....	15
Abbildung 10:CT-Aufnahme einer Ondulationsprobe (Schnitt über die Dicke) ( $40\ \mu\text{m}^3$ je Voxel);.....	15
Abbildung 12: CT-Aufnahme einer repräsentativen Hinterkantenprobe bei hoher Auflösung; links Schnitt über Höhe, rechts Schnitt auf Decklamina ( $35\ \mu\text{m}^3$ je Voxel); ..	16
Abbildung 13: Seitliche Darstellung einer Probe mit künstlicher Pore .....	16
Abbildung 12:Durchschallungsdarstellung einer Probe mit künstlichen Poren, Draufsicht .....	17
Abbildung 14: CAD-Darstellung und Abbildung der Aufziehvorrichtung im Technikum für repräsentative Hinterkanten-Verklebungsproben .....	18
Abbildung : Reduktion der Dehnung über der Zeit; oben: gesamter Versuch, unten: detaillierte Ansicht.....	19
Abbildung : Meskammer zur Durchführung der CT-Messung mit Aufziehvorrichtung... ..	20
Abbildung 10: (l) Automatische Porenerkennung und Visualisierung in repräsentativen Hinterkantenproben; (r) Original CT-aufnahme .....	20
Abbildung 12: CT-Aufnahme eines Balsa-Paneels, Schnitt parallel zur Oberfläche .....	21
Abbildung 13: CT-Aufnahme der Hinterkantenkomponente, Schnitt normal zur Oberfläche .....	22
Abbildung 20: Schnittbild eines biaxialen Faserverbundcoupons aufgenommen mit einem Beam-Line CT und einer Pixelgröße von $0,64\ \mu\text{m}$ .....	22
Abbildung 22: 5 Stufen der Implementierung .....	23
Abbildung 23: Struktur des Softwaresystems .....	24
Abbildung 24: Webinterface .....	24

### III. Erfolgskontrollbericht

#### **Anhang A: Erfolgskontrollbericht des Fraunhofer IWES**

## IV. Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Abschlussbericht	
3. Titel Erweiterte Materialdaten und Computertomographie, virtuelle Prüf-stände, Big Data und datenbasierte Modellierung als Ergänzung für ReliaBlade		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. Petersen, Enno	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.04.2025	
	6. Veröffentlichungsdatum 31.10.2025	
	7. Form der Publikation Abschlussbericht	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme Am Seedeich 45 27572 Bremerhaven	9. Ber. Nr. Durchführende Institution	
	10. Förderkennzeichen 0324335D	
	11. Seitenzahl 30	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	für	
	13. Literaturangaben 10	
	14. Tabellen 3	
15. Abbildungen 24		
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Kurzfassung Inhaltliches Ziel von Add2reliaBlade ist es, die zur Verfügung stehenden Daten aus ReliaBlade durch CT-Aufnahmen und Untersuchungen von kurzfaserverstärktem Klebstoff zu ergänzen und diese Daten zur Validierung von Berechnungs- und Simulationsmethoden für die Zuverlässigkeitsbewertung von Rotorblättern zu nutzen. Zur Handhabung, Speicherung und geziel-ten Verfügbarmachung von Informationen aus derart großen Datenmengen werden Methoden aus dem Bereich Big Data verwendet. Darüber hinaus ist es Ziel die Ergebnisse des ReliaBlade-Projekts einem nationalen Konsortium mit hoher Industriebeteiligung zur Verfügung zu stellen und somit den Entwicklungsstand-ort Deutschland zu stärken.		
19. Schlagwörter Composites, trailing edge, CT, NDT		
20. Verlag	21. Preis	