

Forschungsbericht FHG zum Teilvorhaben „Blattfertigung und Blattprüfung“

Oktober 2022

Verbundvorhaben: Radarüberwachung und Kommunikation für Qualitätssicherung und Zustandsüberwachung von Rotorblättern

Teilvorhaben: *Blattfertigung und Blattprüfung*

Förderkennzeichen: 0324324E

Laufzeit: 01.11.2018 – 30.04.2022

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

Berichtersteller: Stefan Krause, Oliver Bagemiel, Raphael Wedel

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 0324324E 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



Kurzfassung

Der vorliegende Bericht beschreibt das Teilvorhaben des Fraunhofer-Instituts für Windenergiesysteme IWES im Rahmen des Verbundvorhabens RadKom QS. Das Projekt hatte zum Ziel, eine radarbasierte Sensortechnologie zu entwickeln und zur Anwendung zu bringen und dessen Funktionsfähigkeit durch den Bau und der Ermüdungsprüfung eines 31m Rotorblattes zu validieren. Das Vorhaben wurde vom IWES in Zusammenarbeit mit der Goethe Universität Frankfurt am Main (GUF), der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen (FAU), der Infineon Technologies AG, dem Projektleiter Wölfel Engineering GmbH + Co.KG und dem assoziierten Partner Nordex SE durchgeführt.

Das Teilvorhaben „Blattfertigung und Blattprüfung“ des Fraunhofer IWES zielte schwerpunktmäßig auf den Bau eines Blattes mit integriertem Sensornetzwerk ab, welches anschließend am Prüfstand des Fraunhofer IWES im Rahmen eines Ermüdungsversuches gezielt belastet wurde, bis Defekte aufgetreten sind. Diese wurden mit dem von den Projektpartnern entwickelten Sensornetzwerk erkannt und lokalisiert. Zur Validierung der Technik wurden zudem Laborversuche durchgeführt, in denen die im Rotorblatt auftretenden Schäden nachgestellt und die Erfassung über die zu verwendenden Radarsensoren getestet wurde. Darüber hinaus wurde eine Fertigungsmethode entwickelt, die eine strukturgerechte Integration der Sensoren im Laminat des Rotorblattes ermöglicht. Diese wurde sowohl auf Laborebene wie auch am späteren Demonstrator erfolgreich getestet.

Abstract

This report describes the sub-project of the Fraunhofer Institute for Wind Energy Systems IWES as part of the joint project RadKom QS. The aim of the project was to develop and apply radar-based sensor technology and to validate its functionality by constructing and fatigue testing a 31m rotor blade. The project was in collaboration with Goethe Universität Frankfurt am Main (GUF), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen (FAU), Infineon Technologies AG, the project Manager Wölfel Engineering GmbH + Co.KG and the associated partner Nordex SE.

The IWES sub-project „Blade production and blade testing“ focused on the construction of a blade with an integrated sensor network, which was tested as a part of a fatigue test until defects occurred. These were detected and localized with the sensor network developed by the project partners. Laboratory tests were carried out to validate the technology by rebuild damage behavior on coupon test level. In addition a manufacturing method was developed that enables the sensors to be integrated into the laminate of the rotor blade. This was successfully tested at laboratory level and on the demonstrator level.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	II
Abstract	II
Teil I: Kurzdarstellung	5
1 Aufgabenstellung	5
2 Voraussetzungen	5
3 Planung und Ablauf	5
4 Wissenschaftlicher und technische Stand	6
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6
Teil II: Eingehende Darstellung	7
6 Verwendung der Zuwendung	7
6.1 AP 1: Anforderungsdefinition – Schadenskatalog mit Versagensmodi, Systemspezifikation	7
6.2 AP 3.1 Herstellung von Proben mit Fertigungsmängeln/Schäden	8
6.3 AP 4.1 Design des Rotorblatts	14
6.4 AP 4.2 Design des Rotorblatttests	16
6.5 AP 4.3 Rotorblattfertigung	17
6.5.1 Fertigungskonzept für die Sensorintegration	17
6.5.2 Bau des Blattdemonstrators	20
6.6 AP 4.4 Auslegung, Durchführung und Überwachung eines Ermüdungstests in Schwenkrichtung	27
6.6.1 Testaufbau und Instrumentierung	27
6.6.2 Testdurchführung	29
6.6.3 Visuelle Überwachung der Ganzblattprüfung	32
7 Übersicht zahlenmäßiger Nachweis	37
8 Angemessenheit der geleisteten Arbeit	37
9 Verwertbarkeit der Ergebnisse	37
10 Fortschritt an anderen Stellen	39
11 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	39
12 Abbildungsverzeichnis	41
13 Tabellenverzeichnis	42
14 Literaturverzeichnis	43

Teil I: Kurzdarstellung

1 Aufgabenstellung

Das Teilvorhaben „Blattfertigung und Blattprüfung“ zielte schwerpunktmäßig auf den Bau eines Blattes mit integriertem Sensornetzwerk ab, welches anschließend am Prüfstand des Fraunhofer IWES im Rahmen eines Ermüdungsversuches gezielt belastet wurde, bis Defekte aufgetreten sind. Diese Defekte galt es mit dem von den Projektpartnern entwickelten Sensornetzwerk zu erkennen und zu lokalisieren. Dafür mussten Konzepte für die Integration der Sensoren erarbeitet und erprobt werden. Zudem galt es auftretende Materialfehler und Defekte zu klassifizieren und Methoden für eine gezielte Fehlereinbringung zu entwickeln. Beides sollte durch Vorversuche getestet und final im Demonstrator Blatt angewandt werden. Untersuchungsgegenstand war dabei ein 31m Blatt. Das Blatt sollte beim IWES gebaut und anschließend im Ermüdungsversuch getestet werden. Mithilfe des Blattes und des Ermüdungsversuch sollte die Anwendbarkeit der Sensoren getestet und validiert werden.

Das Fraunhofer IWES hat neben der Blattfertigung und der Blattprüfung im Projekt umfassende Expertise im Bereich Fertigung und Charakterisierung von Rotorblattmaterialien eingebracht und zur Gesamtorganisation des Projekts beigetragen. In Teil II sind die geleisteten Tätigkeiten in Zuordnung zu den Hauptarbeits- und Teilarbeitspaketen ausführlich aufgeführt.

2 Voraussetzungen

Für die erfolgreiche Bearbeitung des Projektvorhabens wurden im Projektkonsortium die relevanten Themenfelder gemäß der jeweiligen Kompetenz besetzt. Im Bereich der Radarsensorik wurde die entsprechende Hardware von Infineon Technologies AG (IFAG) bereitgestellt. Der Aufbau und die Inbetriebnahme der Schalltechnik erfolgte von der Friedrich Alexander Universität Erlangen Nürnberg (FAU). Die Verarbeitung und Auswertung der Signale wurde durch die Goethe Universität Frankfurt am Main (GUF) realisiert. Alle Themen auf Materialebene rund um die Blattfertigung und Prüfung wurden vom Fraunhofer IWES bearbeitet. Die Firma Wölfel übernahm die Projektleitung und brachte Expertise im Bereich der Strukturüberwachung und des Monitoringprozesses ins Projekt mit ein und fungierte gleichzeitig als potenzieller Anwender für das zu entwickelnde System. Als beratendes Element und für ein direktes Feedback aus der Rotorblattindustrie fungierte als assoziierter Partner der Blatthersteller Nordex.

3 Planung und Ablauf

Gegenüber der Antragsstellung gab es keine inhaltliche Änderung der Zielstellung und Arbeitsplanung. Lediglich die Projektlaufzeit wurde kostenneutral um weitere 6 Monate verlängert, da sich der Bau des Demoblattes verzögert hatte. Eine detaillierte Darstellung des Projektablaufs ist in Teil II dieses Berichtes zu finden.

4 Wissenschaftlicher und technische Stand

Für die Erkennung fertigungs- oder betriebsbedingter Defekte und Schäden in Rotorblättern existiert eine Vielzahl zerstörungsfreier Prüfverfahren, z.B. elektromagnetische Verfahren, Thermographie, Shearographie und Ultraschallverfahren [1]. Diese Messmittel müssen dabei meist manuell bedient werden. Um eine kontinuierliche Strukturüberwachung (Condition Monitoring) im Betrieb zu ermöglichen, müssen zerstörungsfreie Prüfverfahren kontinuierlich über lange Zeiträume messen können und extrem ermüdungs- und witterungsbeständig sowie blitzgeschützt sein. Erste Systeme wurden im Projekt MultiMonitorRB erprobt [2]. Um einen vorzeitigen Ausfall der Messsysteme zu verhindern, ist es denkbar, sie in die Laminatstruktur des Rotorblatts zu integrieren und dadurch zu schützen. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass sie die Rotorblattstruktur und die Fertigungsabläufe nicht beeinträchtigen. Integrierte Sensoren, oder gar Faseroptische Sensoren, die diese Anforderungen erfüllen, sind bislang nicht bekannt.

Um neue Sensorik effizient entwickeln und erproben zu können, werden Bauteile mit typischen Fertigungsdefekten und Betriebsschäden benötigt. Diese entstehen einerseits unbeabsichtigt oder aber gezielt nur für einen Teil der typischen Schäden, beispielsweise durch Einlegen einer Trennfolie auf eine Klebfläche. Die gezielte Fertigung von Probekörper mit weiteren typischen Defekten wie z.B. Ondulationen und Delaminationen war ebenfalls Gegenstand dieses Forschungsprojektes.

Im Projekt Blade Tester wurde ein separates System zur Erfassung der Rotorblattgeometrie entwickelt [1]. Dieses System erlaubte es jedoch nicht, damit Schäden oder Schadensfortschritte zu erkennen. Eine Bilderfassung für Rotorblätter, die auch Schäden erkennen kann, ist den Autoren nicht bekannt.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit der Projektpartner war stets vertrauensvoll. Da die Projektpartner über Expertise aus unterschiedlichen Bereichen verfügen, ergänzten sie sich gut, entwickelten Ideen gemeinsam, diskutierten sehr offen und tauschten alle nötigen Daten, Materialien und Materialkenntnisse untereinander aus. Die geförderten Partner arbeiteten gleichberechtigt zusammen. Es wurde ein Kooperationsvertrag für das Gesamtprojekt geschlossen. Darin wurden die Organisation der Zusammenarbeit, die Nutzung und die Verwertung der Projektergebnisse und der Freigabeprozess für Veröffentlichungen geregelt.

Den Rahmen für einen stetigen Austausch gaben regelmäßige Jour fixe und die halbjährlichen Projekttreffen. Die Projekttreffen fanden im Halbjahrestakt statt und wurden bis März 2020 abwechselnd von den Projektpartnern ausgerichtet. Aufgrund der Corona Pandemie, fanden alle planmäßigen Gesamttreffen nach März 2020 ausschließlich online über Microsoft Teams statt. Die Projekttreffen dienten dem Austausch von Ideen, der Vorstellung des aktuellen Entwicklungsstands, der Diskussion aktueller Fragestellungen, der Fassung gemeinsamer Beschlüsse und der Einführung in bestimmte Themen des ausrichtenden Projektpartners. Zudem gab es Anlassbezogene Direktbesuche bei der Validierung von Sensoren, dem Bau und Test des Blattes am Fraunhofer IWES mit den direkt beteiligten Projektpartnern (IWES & FAU).

Teil II: Eingehende Darstellung

6 Verwendung der Zuwendung

6.1 AP 1: Anforderungsdefinition – Schadenskatalog mit Versagensmodi, Systemspezifikation

Bei der Anforderungsdefinition an die Sensoren wurden zwei Anwendungsfelder bedacht. Zum einen soll der Sensor möglichst nah an der Bauteiloberfläche (Innenseite) sein und zum anderen soll sich dieser nach Möglichkeit schon in der Blattfertigung mit ins Blatt einbringen lassen. Dabei wurde im Konsortium entschlossen, zwei Anwendungsszenarien im Projekt abzubilden. Das erste Szenario sieht den Einbau der Sensoren im Bereich der Kernwerkstoffe des Schalenlaminats vor. Die Kernwerkstoffe ermöglichen durch ihre Dicke den Einbau eines Sensors, ohne Auswirkungen auf den Faserverlauf und somit des Kraftflusses zu haben. Neben der Größe und der Art der Einbettung in den Blattaufbau, wurde ebenfalls der Einfluss auf die Struktur und die Implementierung in den Fertigungsprozess berücksichtigt. In der Industrie erfolgt der Blattbau im Schichtbetrieb, mit oft wechselndem Personal. Die Arbeitsschritte müssen dabei einfach und einheitlich gehalten werden und sind, gerade im Hinblick auf die Tonnen an Glasfaser- und Kernmaterial auf Durchsatz ausgerichtet. In diesen Prozess eine Positionsgenaue und vom zeitlichen Aufwand her überschaubare Sensorintegration zu gewährleisten, wurde besonders vom Blatthersteller Nordex kritisch gesehen und im Hinblick auf einen späteren Markteintritt als zu große Hemmschwelle angesehen. Daher wurde neben den eingebetteten Sensoren als zweites Szenario eine im folgenden Verlauf bezeichnete "Retro Fit" Sensorvariante entwickelt. Dabei wird der Sensor samt einer Kunststoffeinhäusung in die innere Blattschale geklebt. Dieser Vorgang ist unabhängig vom Fertigungsprozess und kann sowohl nach der Blattfertigung als auch während des Betriebs an der Anlage nachgerüstet werden. Dies jedoch nur in Bereichen, die für den Menschen in einem Blatt noch erreichbar sind. Wohingegen im ersten Szenario die Sensoren beliebig angeordnet werden können. Dies ermöglicht zudem den Business Case einer nachrüstbaren und auch erweiterbaren Sensorüberwachung für schon bestehende und somit ältere Blätter. Beide Sensorvarianten wurden im Demoblatt berücksichtigt und basierten auf der identischen Sensortechnik.

Für die Validierung der geplanten Radarsensoren wurden insgesamt sechs mögliche Fehlerarten definiert. Dabei unterscheidet das IWES in Fehler, die durch eine nicht fachgerechte Fertigung entstehen können und Fehler, die durch diese Fertigungsmängel auftreten oder durch Belastungen während des Betriebsdauer an der Struktur entstehen können. In der folgenden Abbildung sind diese einmal aufgeführt. Die Fertigungsfehler wie Ondulationen und Wellen resultieren typischerweise aus einer fehlerhaften Faserablage und mangelhaften Infusionsaufbau. Weitere Fertigungsmängel sind trockene Stellen infolge der Infusion (Lufteinschlüsse, kaputte Folie, falsche Fließfronten oder Viskosität) oder Luftporen in der Klebnaht. Aus diesen Fehlstellen können dann während des Betriebs und durch Materialermüdung Risse, Delaminationen und Zwischenfaserbrüche entstehen. Jedoch auch ohne die eingebrachten Fehler, kann es in Folge von Materialermüdung oder Überlasten während der Betriebsdauer zu Schädigungen kommen.

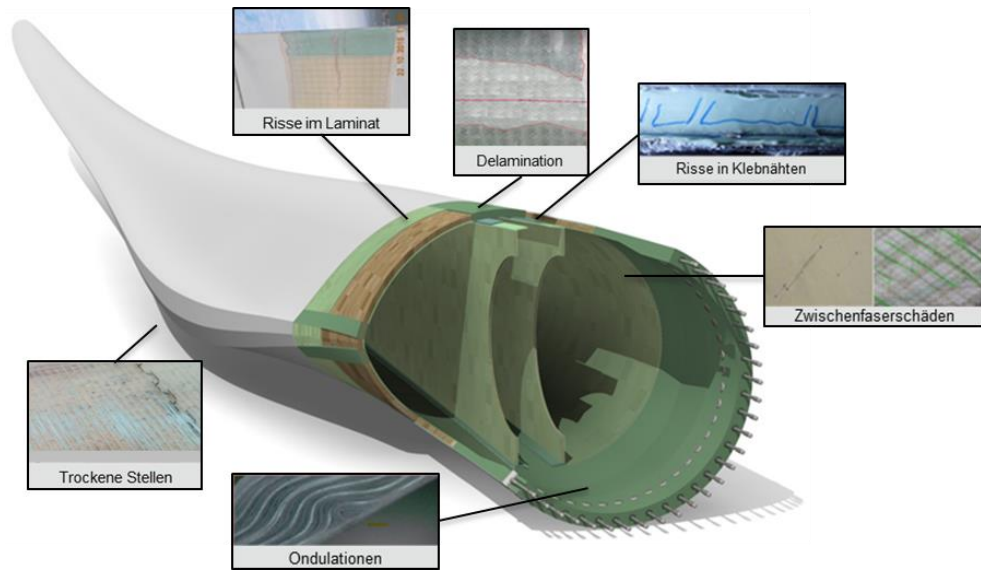


Abbildung 1: Potenzielle Fehlstellen im Rotorblatt

Neben der direkten Einbringung von Fehlern während der Schalenfertigung, können auch Fehlstellen nachträglich eingebracht werden, z.B. durch Abschleifen von einzelnen Lagen, Impact Schäden, Bohrlöcher usw..

6.2 AP 3.1 Herstellung von Proben mit Fertigungsmängeln/Schäden

Zur Unterstützung der Laboruntersuchungen der GUF sowie der Materialcharakterisierung der FAU wurden Materialproben hergestellt und den Partnern zur Verfügung gestellt. Eine Übersicht der Probenkörper ist in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 1: Probenübersicht für Materialcharakterisierung in AP 3

Material	Beschreibung	Größe [mm]
U-E-591g/m ² (UD)	Proben mit 8,10 und 12 Lagen (symm.) + Harz	100x100
U-E-1182g/m ² (UD)	Proben mit 8,10 und 12 Lagen (symm.) + Harz	100x100
K-E-1175g/m ² (Triax)	Proben mit 8,10 und 12 Lagen (symm.) + Harz	100x100
X-E-778g/m ² (Biax)	Proben mit 8,10 und 12 Lagen (symm.) + Harz	100x100
EP- Infusionsharz Epikote RIMR 035c + Epikure RIMH 036-038	eine Reinharzprobe mit 4mm Dicke	100x100
EP_ Klebeharz Epikote BPR 135G + Epikure BPH 134G + 137G	drei verschiedene Dicken mit teilweisen Lufteinschlüssen	100x100
Baltek Sb 100 (Balsa Holz)	eine Probe ohne Harz	144x100
Airex (PVC Kunststoff)	versch. Sorten (C71.75, C71.55, C70.75) ohne Harz	144x100
K-E-1175g/m ² (Triax)	Probenplatte für Klimakammer (10 Lagen + Harz)	623x390
X-E-778g/m ² + Baltek	Sandwich-Verbundproben (8,10 und 12 Lagen Biax)	100x100
X-E-778g/m ² + Airex C70.75	Sandwich-Verbundproben (8,10 und 12 Lagen Biax)	100x100

Zu den reinen Materialproben wurden für die Erprobung der Sensoren zusätzlich Proben mit gezielten Fertigungsfehlern hergestellt. Dazu wurden die in AP 1 definierten Fehler einzeln betrachtet und eine Fertigungsmethode entwickelt, mit welcher sich die Fehler gezielt erzeugen lassen. Die erarbeiteten Fertigungsmethoden wurden so definiert, dass eine Überführung vom Couponmaßstab in den realen Maßstab des Demoblattes erfolgen kann. Orientierung für die Wahl der potenziellen Fehlstellen gab der Schadenskatalog aus AP1. Nachfolgend werden die Fehler und deren Einbringung in Couponproben erläutert.

Faserondulation:

Charakterisierend für die Faserondulation in Faserverbund-Strukturen ist ein wellenförmiger Versatz von Faserbündeln. Durch die ondulierten Fasern entsteht ein örtlich gestörter Kraftfluss, der eine Spannungserhöhung in der Matrix zur Folge hat [3]. Eingehend mit der Ondulation ist eine reduzierte Zugfestigkeit und eine erheblich verringerte Druckfestigkeit des FVK. Faserondulationen entstehen bei der Herstellung der Verstärkungsfasern, beim Drapieren der Gewebe oder infolge der Harzinjektion aufgrund von Faserwascheffekten. Faserondulationen werden nach der Ausrichtung in in-plane Ondulation (Fehlansrichtung der Fasern in der Ebene) und out-plane Ondulation (Fehlansrichtung der Fasern in Dickenrichtung) unterteilt [4]. Durch Kombination beider Methoden hätte eine globale Ondulation (Kombination aus in-/out-plane Ondulation) erzeugt werden können. Die Realisierung erfolgte jedoch durch eine out-plane Ondulation, indem im Lagenaufbau in 90° Richtung ein Fremdkörper, in Form eines Matrixstabes eingebracht wurde. Dieser erzeugt eine sprunghafte Änderung der Faserausrichtung. Das Verfahren wird als Transversal-Strip-Verfahren bezeichnet [6]. Gründe für die Wahl der out-plane Ondulation war die gute Reproduzierbarkeit und der realitätsnahe Defekt, der folgende Fehler in der Produktion symbolisiert, Roving zwischen den Gewebelagen, vergessenes Werkzeug im Aufbau, Fehler beim Ablegen der Gewebelagen.

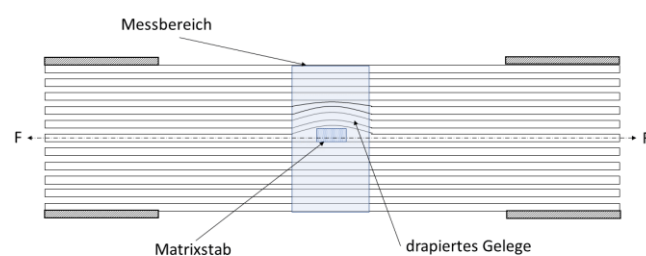


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Transversal - Strip – Verfahren [6]

Zur Herstellung des Matrixstabs wurde ein handelsübliches U-Profil aus Aluminium mit einem Innenmaß von 12mm x 10mm mit Vakuumfolie ausgelegt, ein Infusionsaufbau aufgebaut und mit der Matrix ausgegossen. Anschließend wurde das Profil mit Nassschleifpapier auf sein endgültiges Maß von 10mm x 5mm geschliffen. Die Einbringung des Matrixstabs in das Laminat erfolgte nach dem halben Aufbau, mittig im späteren Messbereich ausgerichtet, in 90° Richtung des Laminats.

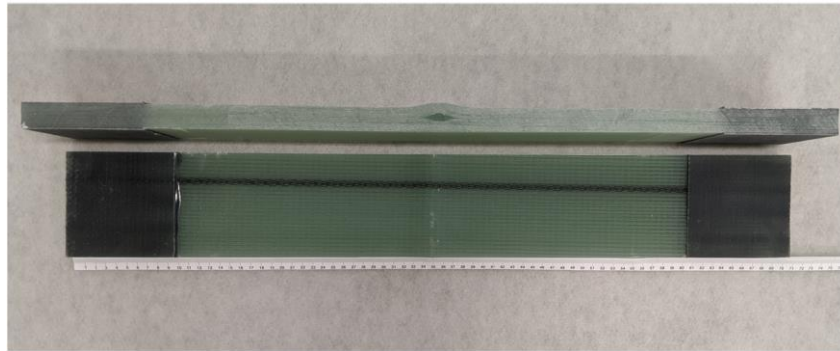


Abbildung 3: Prüfkörper mit eingebrachter Faserondulation

Delamination:

Unter Delamination versteht man einen Trennbruch zwischen den Einzelschichten des Laminats und eine bei Schichtbauten auftretende Versagensart. Charakterisierend für den interlaminaren Schadensmechanismus in Glasfaserverbund-Strukturen ist eine Trübung des Laminats. Delamination ist der schwerste Defekt und damit ein kritischer Schadensmechanismus, der an Faserverbund-Strukturen auftreten kann, da er die Steifigkeit und die Festigkeit des Materials erheblich verringert. Delaminierung kann in folgende Klassen unterteilt werden: [7]

- Normalbelastung auf Schichtebene (Mode I)
- Schubbelastung in der Schichtebene parallel zu der Faserorientierung (Mode II)
- Schubbelastung in der Schichtebene senkrecht zu der Faserorientierung (Mode III)

Realisiert wurde die Anregung einer Delamination durch die Einbringung von tropfenförmigen und somit spitz zulaufenden PTFE-Folien im Lagenaufbau. Die Einbringung der Folien erfolgte bei den Proben über und unter dem mittleren Messbereich. Durch die Kraftumlenkung um die Folie und die entstehenden Spannungsspitzen um und am Ende der Folie, lässt sich der Effekt eines nadelförmigen Lunkers oder fehlerhafter Vernetzung zwischen Faser und Matrix sehr reproduzierbar nach- und abbilden und somit eine Delamination initiieren.

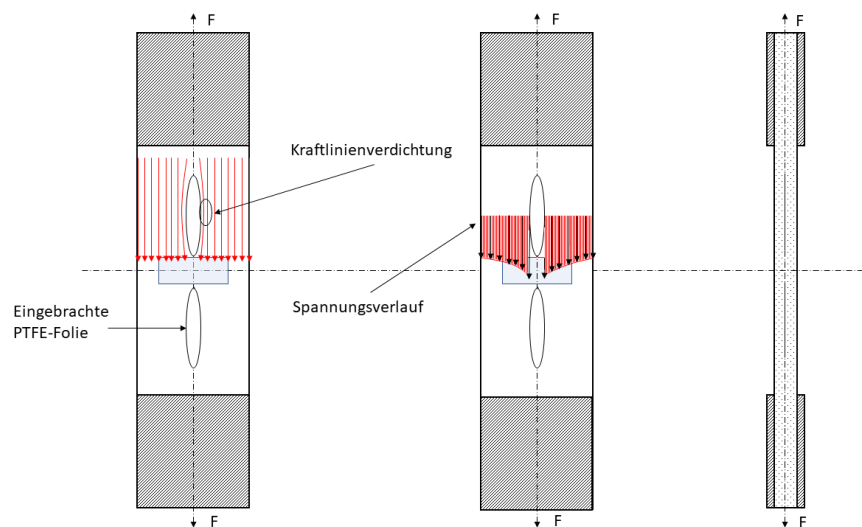


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Verfahrens mit Kraftlinien und Spannungsverlauf

Die Einbringung der tropfenförmig zugeschnittenen und eingefärbten 75µm PTFE-Folien erfolgte nach dem halben Aufbau angrenzend an den späteren Messbereich in 0° Richtung des Laminats.

Durch die Färbung ist eine Ortung der Folie im fertigen Laminat möglich und dient dem Zuschnitt des Prüfkörpers.

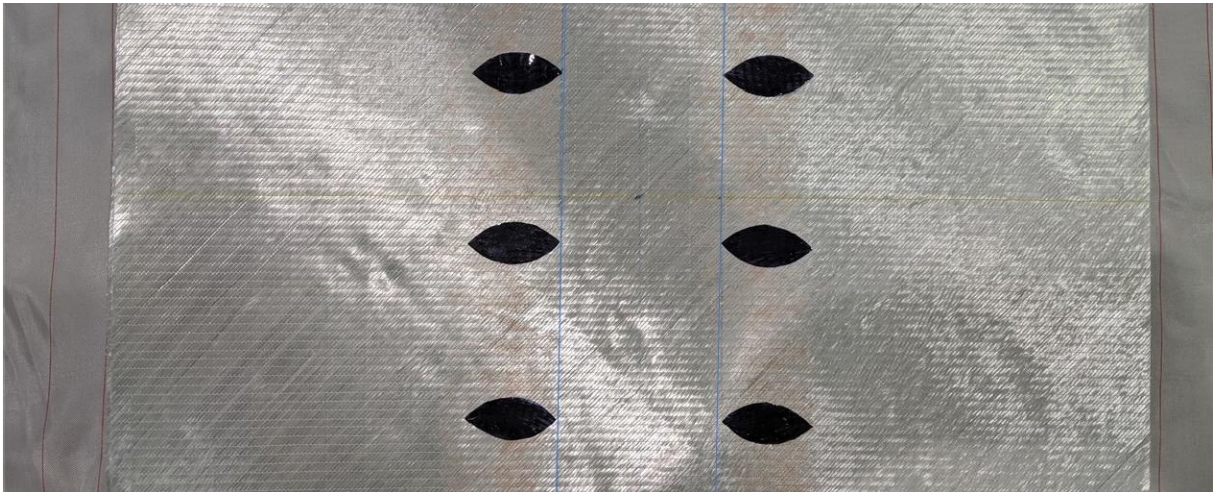


Abbildung 5: Eingebachte PTFE Folie angrenzend am Messbereich

Die zugesägten Prüfkörper sind in der nachfolgenden Abbildung abgebildet. Die Einfärbung der PTFE Folien ermöglichte eine hohe Reproduzierbarkeit der Prüfkörper durch Ortung der eingebrachten Delaminationen.

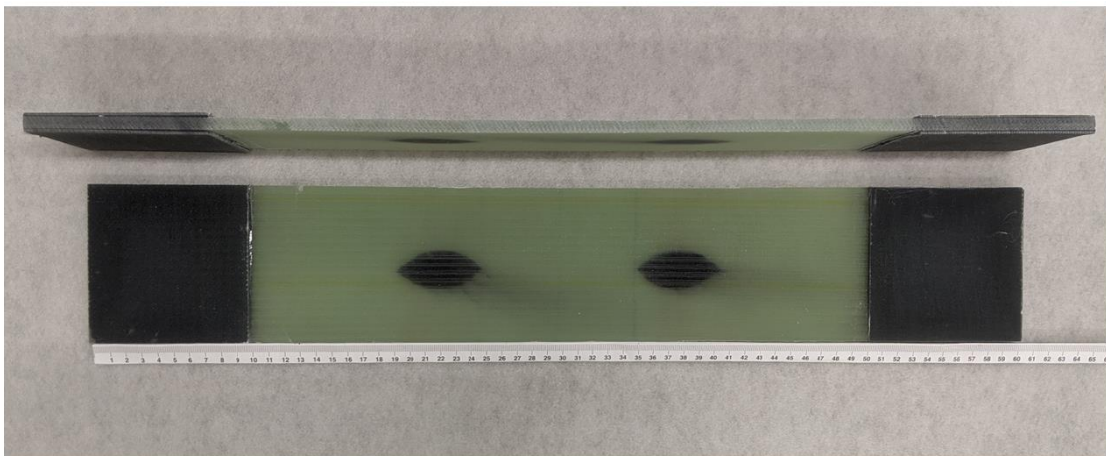


Abbildung 6: Prüfkörper mit eingebrachten Folien

Klebnahttrisse infolge Fehlverklebungen:

Charakterisierend für Fehlverklebungen an hochmodernen Rotorblättern sind vor allem Blind-Klebestellen im Inneren des Rotorblatts. Diese stellen damit potenzielle Schadensorte dar. Blind Klebestellen im Inneren des Rotorblatts sind ausschließlich mit modernen zerstörungsfreien Prüfverfahren nachweisbar. Maßgeblich dafür sind Lufteinschlüsse oder eine nicht ausreichende Vermischung der beiden Klebstoffkomponenten in der Dosieranlage. Der Auftrag von zu wenig Klebstoff infolge falscher Berechnungen, Fehler beim Auftragen oder zu große Toleranzen bei den Fügepartnern. Eine nachträgliche Ausbesserung der Fehlstelle ist in den meisten Fällen nicht möglich. Da die Fehlstellen optisch nicht erkennbar sind, ist eine reproduzierbare Fehlverklebung nur schwer zu realisieren. Für eine Erzeugung eines Risses, kann ebenfalls die Verwendung einer Folie zwischen den Fügepartnern eingebracht werden. Ausgehend von dem Fremdkörper im der

Klebnahtrisse, können Risse entstehen. Um jedoch für die Vorversuche an den Probenkörpern Klebnahtrisse zu erzeugen, wurde auf das Einbringen einer Folie verzichtet. Dafür wurden die Probenkörper jedoch anders als bei den anderen Proben in der Mitte schmaler gestaltet. Die Anpassung der Geometrie führt zu einer Verdichtung der Kraftflusslinien im konkaven Bereich der Probe und somit zu einer Spannungserhöhung im Messbereich. Die gewünschte Reproduzierbarkeit war mit der Anpassung der Geometrie gegeben.

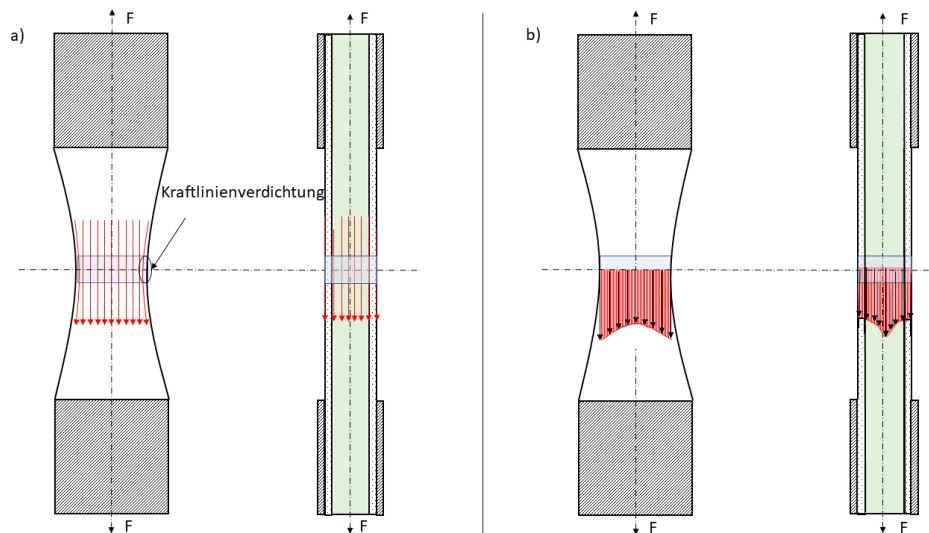


Abbildung 7: Schem. Darstellung des optimierten Verfahrens a) Kraftlinienverlauf b) Spannungsverlauf

Die Anpassung der Prüfkörpergeometrie der Klebstoffprüfkörper an eine konkave Form führte zu einer Verdichtung der Kraftlinien und somit zu einer Spannungserhöhung im Messbereich, welches folgend mit der Ausprägung von Klebnahtrissen einherging. Zur Herstellung der Sandwich-Verbundplatte wurden zunächst zwei Infusionsaufbauten der Außenlamine hergestellt und infundiert. Anschließend wurde der unter Vakuum gemischte Klebstoff auf eine der Platten aufgetragen und die beiden Platten miteinander gefügt. Das Einbringen von zuvor gefertigte Abstandshalter aus GFK bzw. Klebstoff sorgte beim Fügen der Platten für die definierte Klebstoffdicke. Die Prüfkörper wurden anschließend bei einem externen Dienstleister, mittels Wasserstrahl, aus der Verbundplatte geschnitten.



Abbildung 8: Prüfkörper Klebnahtriss

Zwischenfaserbrüche:

Unter einem Zwischenfaserbruch (ZfB) versteht man das Versagen der Einzelschicht in Faserrichtung. Zwischenfaserbrüche können als Adhäsivbruch entlang der Faser/Matrix-grenzfläche, als Kohäsivbruch durch die Matrix oder als Kombination in Abhängigkeit von der Belastungsart, auftreten. Mehrachsige Lamine sind stärker ZfB gefährdet als einachsige UD-Schichten. Besonders gefährdet sind Schichten unter 45° Schubbelastung und 90° Zugbelastung. [4] Das Auftreten von Zwischenfaserbrüchen ist überwiegend belastungsabhängig und kann durch Berechnungen vorausgesagt werden. Der Erzeugung von Zwischenfaserbrüchen erfolgte durch die reine Probengestaltung mit +-45° Biaxialgelege. Der Grund dafür liegt in der guten Sichtbarkeit des Zwischenfaserbruchs durch das Abgleiten der +- 45° Schichten des Biaxialgeleges bei anliegender Belastung in 0° Richtung. [9] Da das Auftreten von Zwischenfaserbrüchen abhängig vom verwendeten Material ist, wurde ein einfacher Infusionsaufbau aus Biaxialgelege gestaltet. Das Auftreten der Zwischenfaserbrüche wird durch das Abgleiten der Schichten gegeneinander begründet.

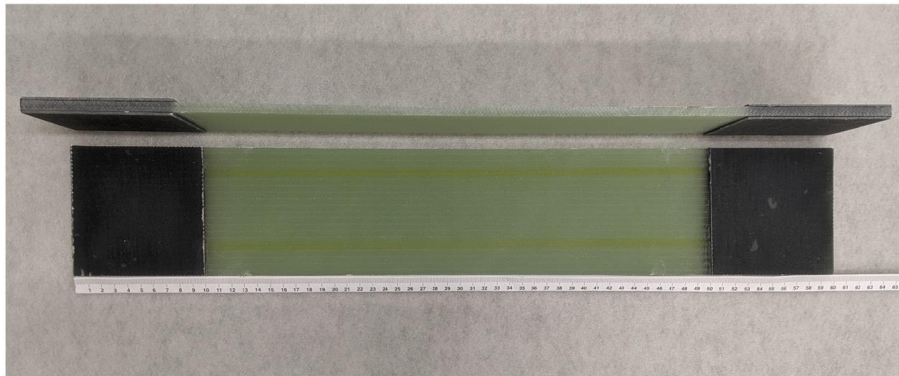


Abbildung 9: Prüfkörper Zwischenfaserbruch

Planung und Herstellung der Prüfkörper

Die vorgegebene Mindestgröße der Proben betrug 400mm · 100mm und war mit einer Anzahl von 3 Prüfkörpern festgelegt. Die Festlegungen der Gelegearten und der Dicken erfolgte in Absprache mit der Goethe Universität Frankfurt und dem Laborleiter des Fraunhofer IWES in Hinblick auf das Prüfverfahren ($R=-1 > R=0,1 > R=1$), der Bewertbarkeit, der Wirtschaftlichkeit und der Nutzbarkeit der Erkenntnisse in weiteren Projekten. Folgender Lagenaufbau wurde dafür definiert.

Tabelle 2: Aufbau Prüfkörper

Schädigung	Gelege	Lagenaufbau	Prüfverfahren	Dicke [mm]
Faserondulation	UD	24 Lagen + 10x5mm Matrixstab	Zug-Druck ($R=-1$)	20
Delamination	Biax	12 Lagen + 75µm Copolymer-Einlage	Zug-Zug ($R=0,1$)	8
Klebnahtrisse	Klebstoff + UD	2x4 Lagen + 10mm Klebstoff		7+10
Zwischenfaserbrüche	Biax	12 Lagen		8

Die in Tabelle 3 angegebenen Abmaße ergaben sich aus den verwendeten Prüfverfahren. Einzig das Maß der Klebstoffprobe wurde frei festgelegt. Dafür wurden die Außendurchmesser im Verhältnis zur Länge der Probe betrachtet. Die verwendeten Verhältnisse stammen aus

Erfahrungswerten des Instituts. Daraus ergaben sich folgende Prüfkörperabmessungen und Einspannbereiche.

Tabelle 3: Festgelegte Abmaße der Prüfkörper

Schädigung	Abmaße [mm]	Einspannung pro Seite [mm]
Faserondulation	700 x 100	100 x 100
Delamination	600 x 100	100 x 100
Klebnahtrisse	1260 x 130	130 x 130
Zwischenfaserbrüche	600 x 100	100 x 100

Zur Herstellung der Prüfkörper wurde aufgrund der Probengröße das Vakuuminfusionsverfahren genutzt. Das Harz/Härter Verhältnis war mit 100/28, der Faservolumenanteil mit 53 %, die Dichte des Harzes mit 1,14 g/cm³ und die Dichte der Faser mit 2,55 g/cm³ angegeben. Abschließend wurden die zugesägten Prüfkörper für 6 Stunden bei 60°C getempert. Der Temperaturanstieg war mit 2K/min voreingestellt.

Im Anschluss wurden die Proben am Fraunhofer IWES unter Einsatz der zur Anwendung kommenden Radartechnik getestet. Die Prüfungen dienten zur Unterstützung der Laboruntersuchungen und wurden in enger Abstimmung und mit Unterstützung der FAU und der GUF durchgeführt. Infineon stellte die Sensoren zur Verfügung. Es wurden jeweils drei Prüfkörper nach den entwickelten Methoden hergestellt und im Anschluss in Ermüdung geprüft. Das für die mechanische Prüfung angewandte Verfahren richtete sich an die ISO 13003 (Glasfaserverstärkte Kunststoffe - Bestimmung des Ermüdungsverhaltens unter zyklischer Beanspruchung). Diese Norm legt die allgemeinen Verfahren für die Dauerfestigkeitsprüfung von Faser- Kunststoff-Verbundwerkstoffen unter zyklischer Belastung mit konstanter Amplitude und Frequenz fest. [10] Neben den Messdaten der Prüfmaschine wurden die Prüfkörper mit einem Dehnungsmessstreifen (K-Faktor=2,8) ausgestattet. Zusätzlich wurden über eine Kamera Momentaufnahmen der Prüfkörperstirnseite im entlasteten Zustand aufgenommen. Die mechanischen Untersuchungen wurden mit einer 1MN Universalprüfmaschine der Firma w+b durchgeführt. Die Radartechnik wurde auf einen verschiebbaren Ausleger montiert und über eine Aluminiumkonstruktion mit dem Schutzgitter und der Maschine verbunden. Der verschiebbare Ausleger diente der optimalen Ausrichtung der Radartechnik zur Probengeometrie. Zusätzlich wurden über eine Kamera Momentaufnahmen der Prüfkörper im entlasteten Zustand aufgenommen. Eine dafür vorgesehene Unterbrechung des Prüfvorgangs nach 100 Zyklen gewährleistete eine hohe Bildqualität. Die Datenerfassung erfolgte über Dehnungsmessstreifen und die Messwertgeber der Prüfmaschine. Alle Proben wurden bis zum Versagen getestet.

Neben den Messwerten bestätigte auch die Bildauswertung das Einsetzen von Materialfehlern an den präparierten Proben. Die Sensortechnische Auswertung zu allen Schadensfällen erfolgte von der GUF und war daher nicht Gegenstand der Tätigkeiten des Fraunhofer IWES. Das IWES hat die Probenerstellung und die mechanische Prüfung erfolgreich umgesetzt.

6.3 AP 4.1 Design des Rotorblatts

Im Projektantrag war der Bau eines 40m langen Rotorblattes geplant. Basierend auf einem am IWES schon vorhandenen 18m Formsatzes eines 40m Blattes, sollte dieser um 22m verlängert

werden. Im Zuge des notwendigen Vergabeverfahrens wurden die erforderlichen Unterlagen zur Fertigung des erweiterten Formsatzes erstellt und vom TÜV-Nord geprüft. Es ließen sich die Fertigung der Formsätze im vorgegeben Projektzeitraum jedoch nicht umsetzen. Im Zuge einer Standortauflösung einer Deutschen Blattfertigung, konnte ein Formensatz beschafft werden, der zuvor für den Bau einer Kleinserie verwendet wurde. Der Formensatz besteht aus Blattschalen- und Gurtformen sowie Profile zur Fertigung des Schubstegs. Daher wurde für die Fertigung des Demonstrators von einem 40m Blatt auf ein 30,5m Blatt gegangen. Die Umstellung hatte keinerlei negative Auswirkungen auf die Projektinhalte.

Das Blatt hat ein Gesamtgewicht von ca. 4,5t, einen Flanschdurchmesser von 1,6m und 50 Bolzen. An einem Querschnitt eines baugleichen Blattabschnittes sind die wesentlichen Bestandteile und der Aufbau einmal dargestellt.

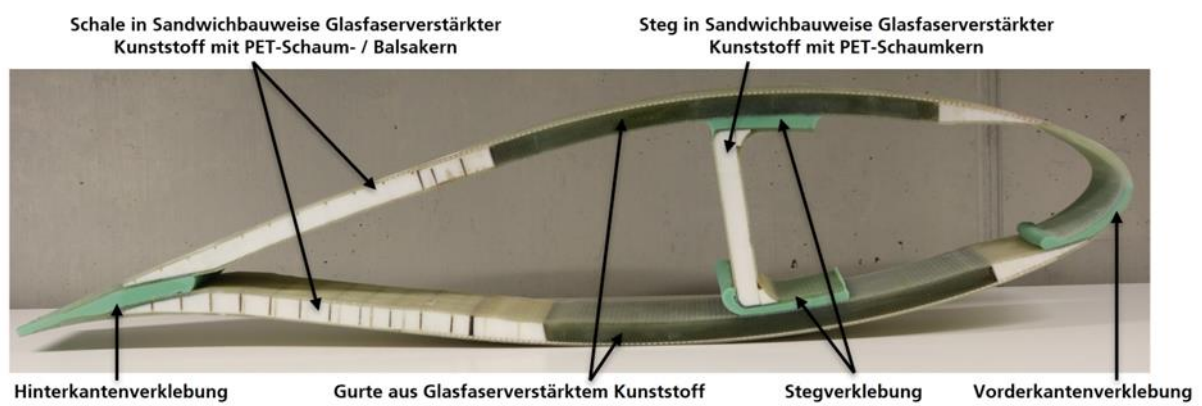


Abbildung 10: Querschnitt eines baugleichen Blattsegments

Die erforderlichen Fertigungsunterlagen lagen dem IWES vor. Mit der Umstellung war es lediglich erforderlich das Blattdesign in FOCUS abzubilden. Die Strukturtopologie des ursprünglich geplanten Modells wurde soweit möglich in das neue Design eingearbeitet. So wurden z.B. zur Minimierung von Steifigkeitssprüngen zusätzliche 45° Schäftungen in das neue Design eingearbeitet. Der Lagenaufbau wurde an die im Vorfeld ausgewählten Materialien angepasst. Im Übergang von Wurzelbereich zu Hinterkante, wurde der Lagenaufbau aufgrund eine besseren Drapierbarkeit mittels Biax- und UD-Gelege aufgebaut. Im geometrisch konstanten Bereich der Rotorblattwurzel, wurden zur Erreichung der notwendigen Wandstärke der Lagenaufbau mit Triax-Lagen aufgebaut. Unterstützt wurde die Erstellung des PlyBooks durch die Firma ACT. Diese führte die notwendigen Berechnungen zum Beulen der Schalenstruktur sowie der Festigkeit der T-Bolzenverbindung in Abhängigkeit des Lagenaufbaus durch. Dafür wurde vorab das FE-Netz für die numerische Simulation verfeinert und die Elementanzahl auf ca. 82k vergrößert, um Schäftungen an den Kernwerkstoffen besser abbilden zu können. In diesem Zuge wurde auch die Berechnung der Massen überarbeitet. Ziel dabei ist eine genauere Approximation der Kernmassen im Blatt. Die Kernmassen ergeben sich aus der Dichte der Kernwerkstoffe und der Menge des Harzes, dass während der Infusion in die Oberfläche der Materialien und in vorhandene Lochungen und Schlitzungen eindringt. Diese wurden beim bisherigen Modell in allen Bereichen mit der gleichen Dichte abgebildet. Beim Bau des Blattes wurden zur besseren Drapierbarkeit aber verschieden geschlitzte Kerne an unterschiedlichen Stellen im Blatt verwendet. Zusätzlich dienen die Schlitzte als Fließkanäle für das Harz während der Infusion. Über ein Modell wurde der Massenunterschied durch unterschiedlich gestaltete Harzkanäle im Kernmaterial ermittelt und auf

das Blattmodell übertragen. Dies ermöglichte eine realistischere Massenverteilung im Modell. Das Blattmodell wurde am 20.12.2019 allen Projektpartnern zur Verfügung gestellt, um die Planungen der Sensorverteilung durchzuführen. Anschließend erfolgte beim IWES die Auslegung der einzubringenden Fehlstellen gemäß der definierten Fertigungsverfahren aus AP 3.1. Die Herausforderung bestand dabei in der genauen Definition der Fehlstellengröße und die damit verbundene Vorhersage der Entstehung und vor allem Ausbreitung des Schadens. Durch die Coupontests wurde festgestellt, dass die zu verwendenden Sensoren keine Fertigungsfehler erkennen, sondern zuvor Referenzmessungen vom Ist-Zustand benötigen. Daher musste für den Blatttest gewährleistet sein, dass es nicht zu einem zu schnellen Versagen des Blattes am Teststand kommt, um genügend Daten für die Definition des vermeintlich unbeschädigten Soll-Zustandes generieren zu können. Eine zu schnelle Schadensausbreitung hätte dies nicht gewährleisten können und hätte das gesamte Projekt gefährdet. Aus dem vorangegangenen Forschungsvorhaben MultiMonitorRB [2] hatte das IWES Vorkenntnisse zum Test und Schädigungsverlauf eines baugleichen Blattes. Dort traten nach Erhöhung der Lasten ebenfalls Blattschäden auf (Delamination und Zwischenfaserbruch). Um das Prozessrisiko zu minimieren, hat das gesamte Projektkonsortium beschlossen, das Demoblatt ohne Fehler zu bauen. Besonderer Fokus in der Auswertung der Sensordaten lag auf dem Vorderkantenbereich zwischen 7 und 8m, da dort das Blatt im MultiMonitor Projekt versagte. Die erarbeiteten Fertigungsverfahren aus AP 3.1 dienen dem IWES auch ohne eine Integration ins Blatt für weitere Projekte und Coupontests als wichtige Grundlage für Forschungsthemen zur Schadensvorhersage. Das Forschungsvorhaben ReliaBlade hat genau dieses zum Ziel. [11]

6.4 AP 4.2 Design des Rotorblatttests

Auf Basis des Balkenmodells des 30,5m Blattes wurde der Ermüdungsversuch in Schwenkrichtung simuliert. Dabei wurde der Testbiegemomentenverlauf schrittweise durch Bestimmung von insgesamt vier Lastscherenpositionen (9m, 15m, 20m, 29m), der Aufbringung von Zusatzmassen, sowie der Optimierung der Testfrequenz (ca. 1,6Hz) an den Zielbiegemomentenverlauf angepasst und somit eine mögliche Überlast minimiert. Die Einleitung der Kraft erfolgt ausschließlich über LF2. Die anderen Lastscheren dienen lediglich als Zusatzmasse.

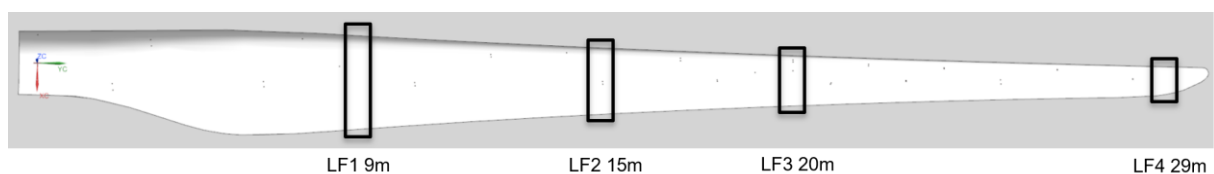


Abbildung 11: Position der Lastscheren

Für die festgelegten Lastscherenpositionen wurden die Lastscheren konstruiert und hinsichtlich des Gewichtes optimiert. Dabei ist der Aufbau einer Lastschere immer identisch. Für die Aufnahme werden massive Holzschalen konturgerecht zurechtgeschnitten und über äußere Stahl-Doppel-T-Träger eingefasst und so auf die Blattoberfläche gespannt. Es liegt eine reine kraftschlüssige Verbindung vor. So ist es möglich eine Lastschere und die Krafteinleitung individuell der Blattgeometrie anzupassen. Die Breite der Lastscheren wird entsprechend der aufzubringenden Last und des benötigten Kraftschlusses ausgelegt. Für den Blatttest wird die Breite der Lastscheren konstant von 300mm (LF1) in 50mm je Lastschere auf 150mm (LF4).

Für die Befestigung des Blattes am Prüfblock konnte auf eine schon vorhandene Adapterplatte von dem Test eines baugleichen Blattes zurückgegriffen werden.

6.5 AP 4.3 Rotorblattfertigung

Da sämtliche Fertigungsunterlagen zum Bau des Blattes vorlagen bzw. in AP 4.1 marginal angepasst wurden, lag ein sehr großer Fokus auf die Erstellung eines Fertigungskonzeptes für die Integration des Sensorsystems. Besonders bei den eingebetteten Sensoren standen die Schwerpunkte der Position und Einbringung in den Laminataufbau im Fokus. Strukturell ist die Einbringung eines „Fremdkörper“ in einen Faserverbundaufbau als sehr kritisch zu betrachten. Auf der Faserebene ist eine Einbringung unmöglich, da nicht einfach ein paar Faserlagen weggelassen oder lokal ausgespart werden können, da diese für die Aufnahme und Weiterleitung von Kräften durchgängig und ohne sprunghafte Unterbrechung durchlaufen müssen. Andernfalls kommt es zu Spannungsspitzen und somit zu potenziellen Fehlstellen im Blatt. Daher ist dies lokal nur im Bereich der Kernwerkstoffe möglich, da diese zum einen die nötige Materialstärke aufweisen und anders als die Fasern nicht konstant durchlaufen müssen. Die Planung des Fertigungskonzeptes und die Definition der genauen Positionen in der Blattschale lief daher parallel. Der GUF wurde daher nach Übersendung des CAD Modells samt Lagenplan und Position der Kernwerkstoffe die Grundlage für die Ermittlung der Sensorverteilung geschaffen.

6.5.1 Fertigungskonzept für die Sensorintegration

Die Sensoren (B: 21 mm, L: 34 mm, H: 10 mm) wurden in einer Einbettmasse in einer Kerbe im Kernwerkstoff integriert, welche vorab in das Kernkit eingearbeitet wurde. So war es möglich den Sensor Geometriekonform in die Kernwerkstoffe einzubauen, ohne die Faserorientierung der Gelege Unter- und Oberhalb des Kernkits zu beeinflussen. Dafür wurde zunächst mittels CAD und Literatur die Form und Größe der Kerbe definiert und verschiedene Kerbgeometrien in ANSYS Workbench simuliert. Die Berechnungen bezogen sich im gesamten Projektverlauf auf das Schaummaterial Airex C70.55. Im Fokus stand dabei eine geringe Kerbwirkung, um so Spannungsspitzen und negative Einflüsse auf die Blattstruktur zu vermeiden. Dabei wurden verschiedene Breiten und Eingriffstiefen, Entlastungskerbenn und abgeflachte Kerbböden getestet. Am geeignetsten ergab sich dabei aber eine konkav gestaltete Längskerbe, ohne abgeflachten Boden und ohne Entlastungskerbenn um die eigentliche Kerbe herum. Dabei kann mit CNC Maschinen eine präzise Fertigung umgesetzt werden, weshalb eine CNC Maschine für die Fertigung der Kerben im Schaumkern verwendet wurde.

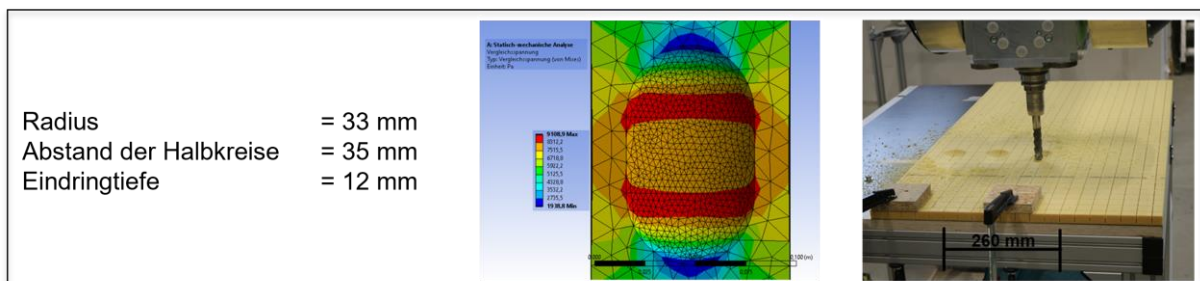


Abbildung 12: Ermittlung der optimalen Kerbgeometrie

Neben der Kerbgeometrie wurde eine geeignete Einbettmasse für den Sensor ermittelt und dessen Einfluss getestet. Es wurde eine niedrigmodulige Einbettmasse (Elastomer PURE ST 44/30) und eine hochmodulige Einbettmasse (Duomer EPIKOTE EP-Harz) getestet. Dafür wurden

Simulationen und Materialversuche durchgeführt. Die Einbettmasse soll wenn möglich keine Bauteilspannungen in den Sensor leiten und zugleich eine gute Anbindung an den Kernwerkstoff gewährleisten. Die Simulation ergab, dass eine vollständige Verkapselung des Sensors in einer niedrigmoduligen Einbettmasse den Sensor optimal vor Spannungen schützt. Bei einer hochmoduligen Einbettmasse wurden selbst bei einer vollständigen Verkapselung Spannungen in den Sensor geleitet. Die Spannungen, die in den Sensor eingeleitet werden, könnten zum Versagen der Komponenten im Sensor führen. Somit scheint die Verwendung eines niedrigmoduligen Werkstoffes sinnvoll. Jedoch muss bei einem niedrigmoduligen Werkstoff beachtet werden, dass es zu einer starken Dehnung an Grenzfläche zwischen Einbettmasse und Sensor kommt. Diese extreme Dehnung könnte das Versagen der Anbindungen zwischen Sensor und Einbettmasse bedingen. Dem gegenüber steht die hochmodulige Einbettmasse. Hier kommt es zu einer Dehnung der Grenzfläche zwischen Einbettmasse und Schaumkern. Jedoch lag hier keine erhebliche Schwächung vor, da im Vergleich zur ungekerbten Sandwichprobe nur 3200 N weniger Kraft für 0,5 % maximale Dehnung benötigt wurden.

Für die Materialversuche wurden Proben mithilfe des Vakuuminfusionsverfahren gefertigt. Die verwendeten Gelege stammten von der Firma SAERTEX. Für die 0° Gelege wurden die U-E-1182 g/m² verwendet. Für die +- 45° Gelege kam das Gelege X-E-778 g/m² zum Einsatz. Das Kernmaterial wurde mithilfe einer CNC Fräse mit der Kerbgeometrie versehen. Für die Probenfertigung wurde auch die Vorgehensweise für die Einbettung der Sensoren untersucht. In ersten Versuchen wurden diese direkt in den Kernkits eingegossen, dabei kam es jedoch zur Bildung eines Hohlraums im Bereich der Kerbe. Eine direkte Verkapselung der Sensoren im Infusionsaufbau war dadurch nicht möglich. Es wurde entschieden, die Sensoren schon vorab in der Einbettmasse zu verkapseln und diese dann in der Infusion im Bauteil zu integrieren. Für die Verkapselung wurden Silikonformen verwendet. Es wurden drei Formen aus Silicon mit Hilfe einer Gießform gefertigt. Für die Formen wurden die Silikone ELASTOSIL C 1200 und ELASTOSIL Vario 40 verwendet. Der Sensor wurde seitlich durch dünne Fäden in der Silikonform positioniert. Die Form wird dann mit der Einbettmasse gefüllt, bis der Sensor vollständig umschlossen und die Oberseite der Form erreicht ist. Es wurden zu jeder Einbettmasse drei Sensoren eingebettet und Probenkörper gefertigt. Als Referenz wurden drei Probenkörper ohne Kerbe und Sensor gefertigt.

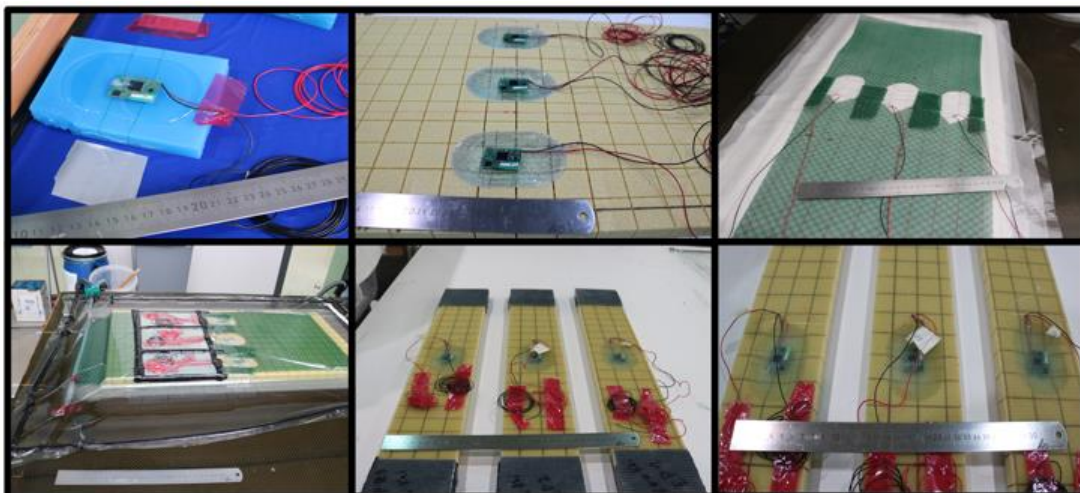


Abbildung 13: Fertigung der Probenkörper

Die Ermüdungsversuche ergaben bei den Proben mit der hochmoduligen EP-Harz Einbettmasse, dass diese deutlich schneller versagten als die ungekerbten und mit niedrigmoduligen Elastomer aufgefüllten Proben.

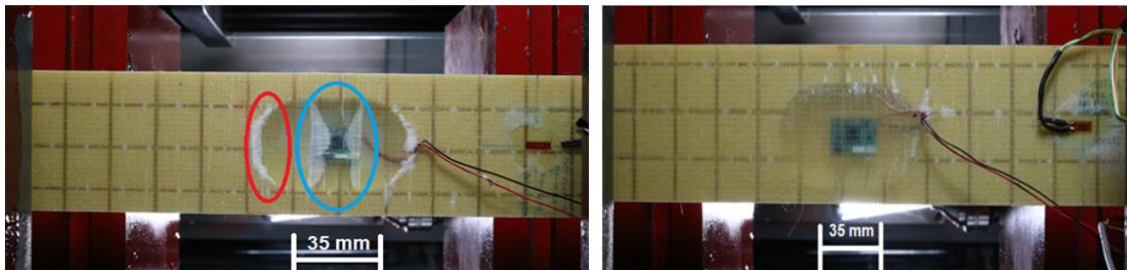


Abbildung 14: Schadensvergleich Durometer (links) und Elastomer (rechts) nach ca. 100.000 Zyklen bei $R=0,1$

Die numerische und experimentelle Untersuchung zeigte eine klare Empfehlung für die Verwendung des Elastomers PURe anstelle des EP-Harzes. Es trat keine mech. Schwächung der Ermüdungsprobe auf und die Haftung am Kernwerkstoff war ebenfalls besser. Die Kabelverbindung wurde in den Versuchen zunächst seitlich an der Einbettmasse herausgeführt. Es stellte sich jedoch heraus, dass dabei die Kabelverbindung an den Sensoren beschädigt wird, wenn das Kabel im eingebauten Zustand unter Zugspannung steht. Daher wurde entschieden das Kabel nach unten herauszuführen und dies entsprechend bei der Ablage im Kernwerkstoff zu berücksichtigen. Aus diesem Grund erfolgte die Einbettung im Demobauteil mit nach unten herausgeführten Kabeln. Die Bestimmung der Kerbform, der Einbettmasse und die Versuchsdurchführung wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit durchgeführt. Die detaillierte Vorgehensweise, Materialparameter usw. sind dort festgehalten. [12]

Nach der beschriebenen Vorgehensweise wurden insgesamt 12 Sensoren für den Demonstrator vorbereitet und eingebettet. Dabei dienten zwei Sensoren als Ersatz, falls bei der Einbettung Probleme entstanden wären oder es beim Einbau zu Problemen kommt. Der Einbau der eingebetteten Sensoren wurde vorab an Versuchsaufbauten getestet. Die Herausforderung besteht in der Verlegung der Kabel, die aus dem eingebetteten Sensor kommen. Die Kernwerkstoffe lassen sich beliebig bearbeiten und mit Aussparungen für die Kabel versehen. Die Kabel müssen jedoch auf die Blatt Außenseite geführt werden, da perspektivisch geplant ist, die Leistungsversorgung über Solarfolien zu realisieren. Im Projekt selbst werden die Folien nicht verbaut, da das Demoblatt in der Halle getestet wird und dort keine Solarfolie nutzbar ist. Für die Validierung der fertigungstechnischen Machbarkeit werden die Kabel im Demoblatt trotzdem nach außen geführt und dort über eine externe Energiequelle versorgt. Die folgende Abbildung zeigt den schematischen Aufbau des Sensorkonzepts. Die Vorgehensweise und die Bilder dazu werden beim Bau des Blattes noch einmal aufgeführt und an dieser Stelle nicht weiter erläutert.

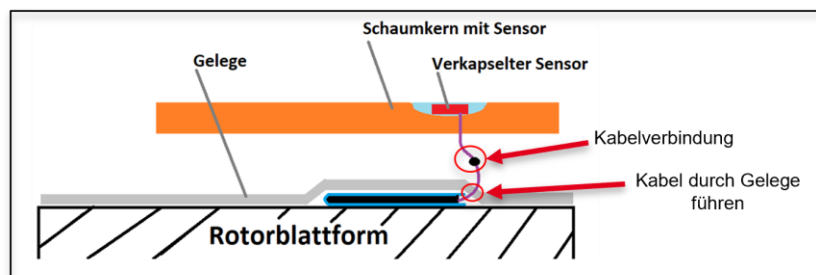


Abbildung 15: Schichtaufbau für die Sensorintegration

6.5.2 Bau des Blattdemonstrators

Für den Bau des Demonstratorblattes konnte das Fraunhofer IWES auf ein klappbares Rotorblattformwerkzeug, samt Gurt und Stegform nutzen. Eine Infusions- und Klebstoffdosieranlage stand ebenfalls zur Verfügung. Gefertigt wurde das Blatt von Juni bis Anfang September an einem Außenstandort des IWES in Lemwerder. Die erforderlichen Materialien wurden entsprechend des Lagenplans und den Fertigungsunterlagen bestellt und zur Fertigungshalle geliefert. Die verwendeten Materialien repräsentieren den Stand der Technik bei der Herstellung von Rotorblättern und sind gemäß Anbieter langfristig am Markt verfügbar. Für die Fertigung der Rotorblattkomponenten wurde ein Infusionsharz- und Klebstoffsystem auf Epoxid-Basis der Firma Hexion eingesetzt. Diese Systeme repräsentieren den industriellen Standard zur Fertigung von Rotorblättern. Die verwendeten Glasfasermaterialien wurden, mit der Vorgabe einer langfristigen Verfügbarkeit am Markt, vom Hersteller SAERTEX GmbH & Co.KG bezogen. Die eingesetzten Kernmaterialien wurden von der Firma „Gaugler & Lutz GmbH & Co. KG“ bezogen und entsprechen ebenfalls dem industriellen Standard. Zu den Auswahlkriterien zählten eine gute Rezyklierbarkeit sowie gute mechanische und thermische Eigenschaften.

Bau der Gurte

Der erste Schritt in der Fertigung des Rotorblattes war der Bau der beiden Hauptgurte für die Saug- und Druckseite. Die Belegung der Gurtformen erfolgte mit UD-Gelegen gemäß PlyBook. Diese wurden mit Hilfe einer Rollenvorrichtung in die Gurtformen abgewickelt und mittels Anschlags positioniert. Der Zuschnitt erfolgte direkt an der Form.

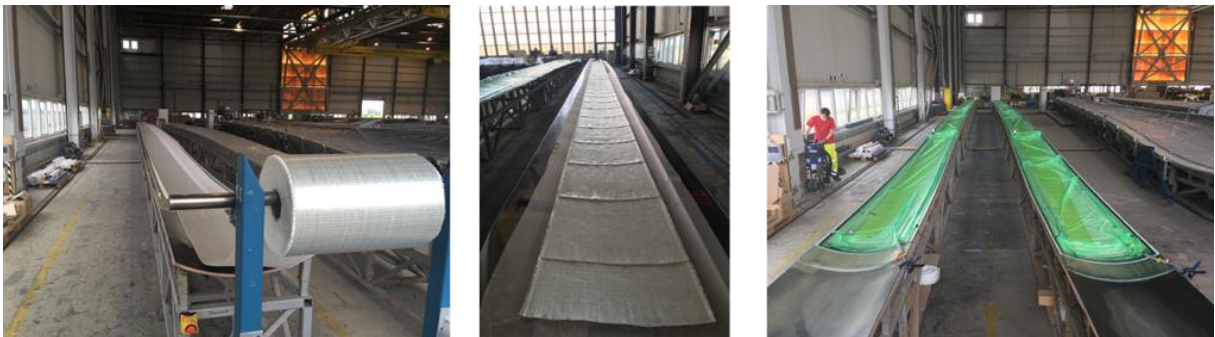


Abbildung 16: Gurtfertigung

Im weiteren Fertigungsschritt folgte das Aufbringen der Vakuumfolien sowie ein Vakuumtest, um Undichtigkeiten an den Schnittstellen sowie Beschädigungen der Folie auszuschließen. Erst nach erfolgreichem Vakuumtests erfolgte die Vakuuminfusion. In den weiteren Schritten folgten das Aushärten der Bauteile mittels Heizlüfter, das Entfernen des Vakuumaufbaus sowie das Entformen der getemperten Gurte unter Verwendung von Vakuum-Gurttraversen.

Bau des Schubstegs

Ebenfalls in einer separaten Form gefertigt wurde der Schubsteg. Der Bau des Schubstegs erfolgte, anhand der zuvor bestimmten Abmessungen, in zwei Teilen. Getempert wurde die Komponente durch Temperierung des Stegtischs mittels externer Heizlüfter und einer Abdeckung mit Isolationsfolie. Anschließend erfolgte die Entformung des Schubstegs sowie das Besäumen der Anbindungsflächen.



Abbildung 17: Fertigung des Schubsteges

Bau der Halbschalen

Die Fertigung der zwei Blattschalen stand besonders im Fokus der Sensorintegration. Dort galt es das zuvor entwickelte Konzept für den fertigungstechnischen, wie auch materialgerechten Einbau in das reale Bauteil zu überführen. Die Festlegung der Position der Sensoren erfolgte von den Projektpartnern der GUF und wurden in Form eines CAD Modells des Blattes, samt der angeordneten Sensoren, dem Fraunhofer IWES zur Verfügung gestellt. Aus diesem Modell wurden die genauen Sensorpositionen in den Formwerkzeugen für die Blattfertigung abgeleitet. Alle 40 Sensorpositionen wurden dabei auf die jeweilige Blattschale, der Z-Position im Blatt und die radiale Ausrichtung in Bezug auf die Blattmittellinie bestimmt und in einer Exceltabelle zusammengefasst. Diese Tabelle war maßgebend für die Fertigung des Demonstrators.

Tabelle 4: Positionen der Sensoren

Sensornummer im Blatt (FAU)	Sensornummer CAD	Blattseite	Position Z [mm]	Referenzkante	Abstand zum Gurt [mm]
1	4	SS	2000	TE	auf Klebnaht
2	11	SS	10000	TE	360
3	35	SS	27000	LE	372
4	8	SS	6000	TE	422
5	29	SS	23000	TE	475
6	39	PS	7000	LE	400
7	31	SS	24000	LE	385
8	33	SS	25500	TE	290
9	28	SS	22000	LE	320
10	10	Steg	8000	TE	Höhe= 243 - Gurt&Stegfußdicke
11	38	PS	29000	TE	240
12	2	PS	750	TE	260
13	26	PS	21000	TE	146
14	6	PS	3000	LE	142
15	21	Steg	19000	TE	75 mm zu Infusion Core
16	7	SS	3000	LE	48 mm zu InfusionCore
17	19	SS	18000	TE	31 mm zu InfusionCore
18	13	SS	12000	LE	0mm zu Infusion Core
19	27	PS	22000	LE	40
20	5	PS	2000	LE	40
21	22	Steg	20000	LE	Höhe = 168 - Gurt&Stegfußdicke
22	37	SS	29000	TE	Höhe = 151 - Gurt&Stegfußdicke
23	9	PS	6000	TE	23 mm zu Infusioncore
24	1	SS	750	TE	0mm zu Infusioncore
25	20	PS	18000	TE	0mm zu Infusioncore
26	12	PS	10000	TE	95
27	36	PS	27000	LE	35
28	14	PS	12000	LE	-30
29	32	PS	24000	LE	-15
30	3	SS	750	LE	auf Gurt
31	15	PS	14900	TE	-60
32	16	SS	14900	TE	-60
33	17	SS	17050	LE	-60
34	18	PS	17050	LE	0mm zu Infusioncore
35	23	SS	19900	LE	-60
36	24	PS	19900	LE	-60
37	25	SS	21020	TE	-135
38	30	PS	23000	TE	-135
39	34	PS	25510	TE	600
40	40	PS	14000	LE	190 mm zu Infusioncore

Die Sensoreinbringung wurde in den Fertigungsprozess integriert und die Sensoren dabei im und am Blatt angebracht und in Betrieb genommen. Zu unterscheiden sind dabei Sensoren, die direkt beim Bau der Blattschalen in das Laminat eingebaut werden und Sensoren die in die Innenseite der schon fertigen Blattschale geklebt werden. Beide Sensortypen sind in ihrer Funktionsweise identisch und unterscheiden sich lediglich durch Ihre Einbauweise. Nachfolgend ist die Vorgehensweise für die integrierten Sensoren einmal kurz beschrieben.

- Vorbereitung von zwei ca. 40cm langen Kabellitzen, welche an der Formoberfläche durch eine Vakuumtasche vor dem Infusionsharz geschützt werden sollen
- Dabei wird eine Seite der offenen Kabelenden an einer Nadel fixiert, um später einfacher durch das Glasfasergelege gesteckt werden zu können

- Die Vakuumentasche ist ca. 10x10cm groß und wird durch Tacky Tape an der Form fixiert. Dafür wurden die Positionen der durch das Gelege austretenden Kabelenden aus Tabelle 7 abgeleitet und an der Form ausgemessen und markiert

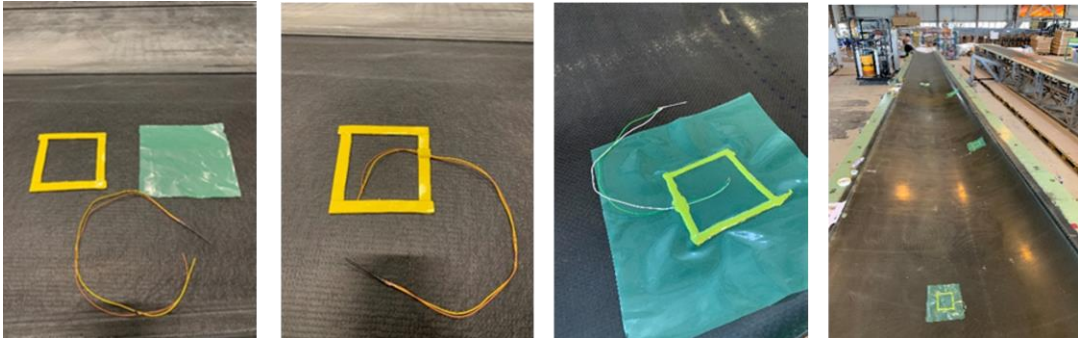


Abbildung 18: Aufbau der Vakuumentasche

- Es werden 10cm der Kabel in der Vakuumentasche gelegt und die restlichen 30cm zur Seite geführt
- Anschließend erfolgte die Ablage der Glasfasergelege und das Durchführen der Nadel samt Kabellitzen

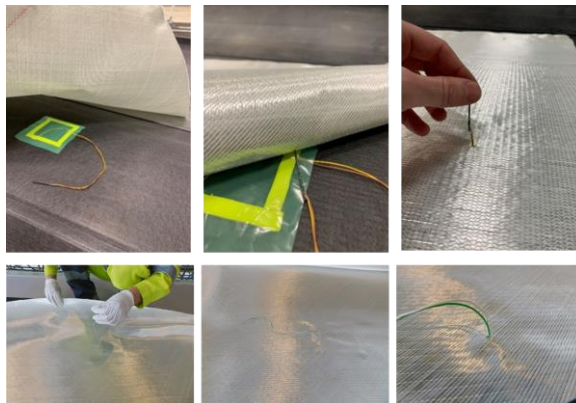


Abbildung 19: Durchführung der Kabel durch das Gelege

- Dieser Vorgang erfolgt bis zur Ablage der Kernwerkstoffe. Dort werden die Kabel ebenfalls durchgeführt und kommen ca. 80mm vor dem eigentlichen Bauteil aus dem Kernwerkstoff
- Anschließend wird der eingebettete Sensor samt offener Kabelenden im Kernwerkstoff abgelegt und die Kabellängen angepasst

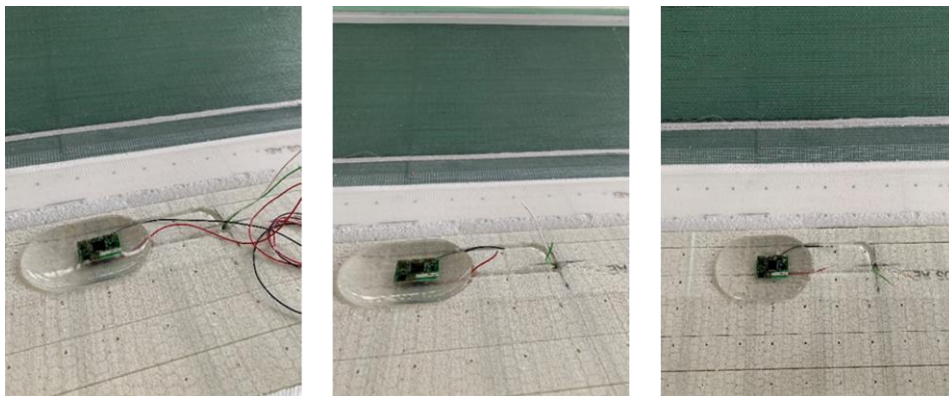


Abbildung 20: Einpassung der Sensoren

- Beide Kabelenden werden mit Hilfe des Stoßverbinders (S888021 SCHRUMPF-LÖTVERBINDER WEIß 1,7 MM von der Firma Voelkner) verbunden
- Durch einen Heißluftfön schmilzt das Lötmaterial und der Schlauch schrumpft. So sind die Kabel optimal verbunden und vor Harz geschützt

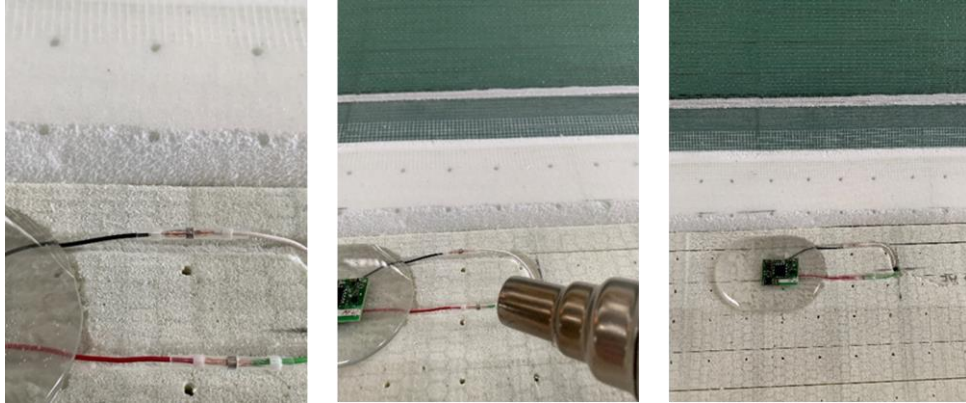


Abbildung 21: Verbindung der offenen Kabelenden

Ab diesem Fertigungsschritt erfolgte die weitere Fertigung der Blattschalen gemäß dem Stand der Technik. Dies beinhaltete sowohl UD-Lagen, als auch Biax-Lagen in unterschiedlichen Längen und Anordnungen. Um dies zu gewährleisten, wurden bei jeder Lage die Positionen markiert und die Gelege in der Form mit einem kleinen Handcutter zugeschnitten. Besonders zu beachten war dabei die Überlappungen der einzelnen Bahnen versetzt anzuordnen, damit es zu keiner Materialaufdickung kommt. Falten im Aufbau wurden mit einem Wischer herausgestrichen.

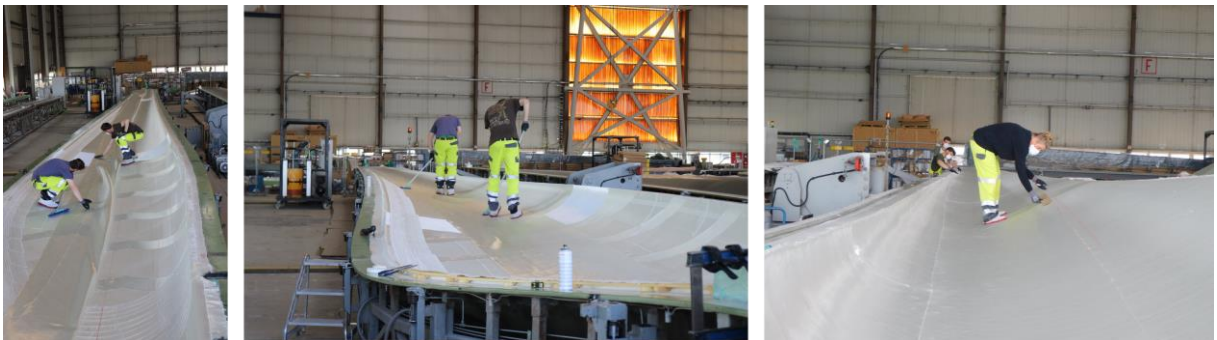


Abbildung 22: Ablage der äußeren Lagen

Die äußeren Lagen kennzeichnen die Lagen die unterhalb der Kernwerkstoffe liegen und im Falle des Projektes auch unterhalb der Sensoren. Auf die Außenlagen wurden dann die Kernwerkstoffe platziert und auf der Mittellinie des Blattes wurde der Blattgurt abgelegt.

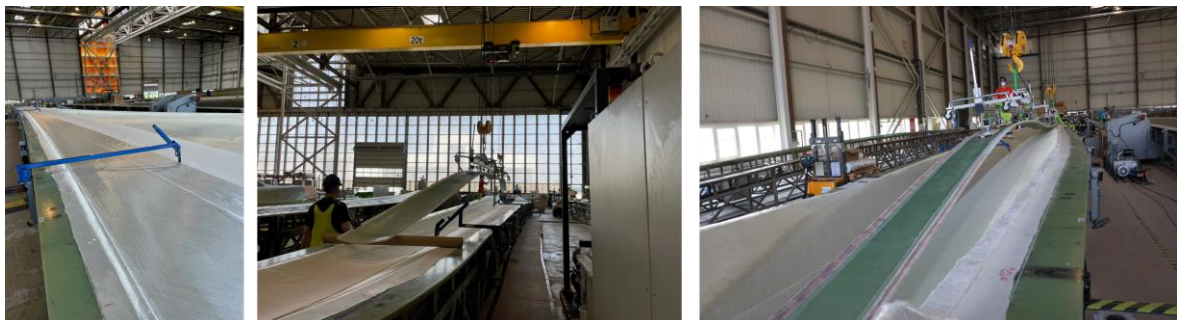


Abbildung 23: Einbau des Blattgurtes

Neben dem Blattgurt wurden anschließend die Kernwerkstoffe positioniert. Die Kernkits wurden speziell auf die Kontur des Blattes angepasst und zugeschnitten bestellt. Anhand der Bezeichnung erfolgte eine schnelle Zuordnung der Positionen.



Abbildung 24: Zuordnung und Ablage der Kernwerkstoffe

Auf den Kernwerkstoffen und dem Gurt wurden die mittleren und inneren Lagen, sowie schmale UD-Streifen als Vorder- und Hinterkantengurt appliziert. Der Infusionsaufbau der Rotorblattschalen ist exemplarisch für die Saugseite in Abbildung 41 dargestellt.



Abbildung 25: Vakuumaufbau und Infusion

In diesem Verfahren wurde beide Blattschalen gefertigt. Die Temperung der Blattschalen erfolgte mittels Formheizung und Heizlüfter nach der Entfernung des Infusionsaufbaus. Anschließend erfolgte das Besäumen der fertigungsbedingten Überhöhungen im Flanschbereich.

Verklebung

Die Verklebung des Schubstegs und der Rotorblatthalbschalen erfolgte in drei Schritten.

- Schritt 1: Fertigung der Klebelippen
- Schritt 2: Schubsteg positionieren und fügen
- Schritt 3: Klebstoffauftrag auf Schubsteg sowie Vorder- und Hinterkante der Saugseitenblattschale und Fügen der Formschale.

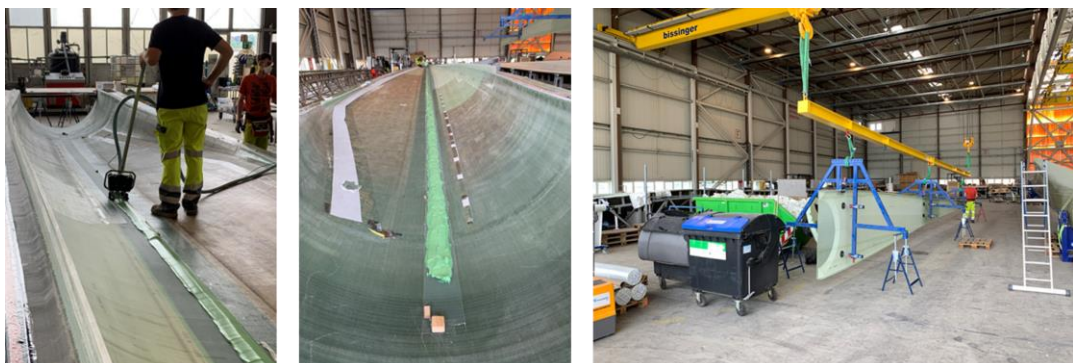


Abbildung 26: Auftrag des Klebstoffes



Abbildung 27: Einsetzen des Schubsteges

Einbau der Retro-Fit Sensoren

Nach der Stegverklebung erfolgt der Einbau der Retro Fit Sensoren. Diese Arbeit wurde zusammen mit den Projektpartnern der FAU Erlangen durchgeführt. Die FAU hat auch die Ausstattung der Sensorplatinen und deren Programmierung übernommen. Das IWES war an dieser Stelle nur für den Einbau ins Blatt verantwortlich. Die Positionen der Sensoren wurden zuvor durch die Projektpartnern der GUF berechnet und festgelegt. Diese wurden in der Blattschale markiert und die Sensoren mit einem 2K Klebstoff (SPABOND 730 Harz/Härter) festgeklebt. Damit die Sensoren beim Einkleben und im Betrieb nicht beschädigt werden, wurden die Platinen in einem Gehäuse verbaut. Das Gehäuse wurde von der FAU ausgelegt und gefertigt.

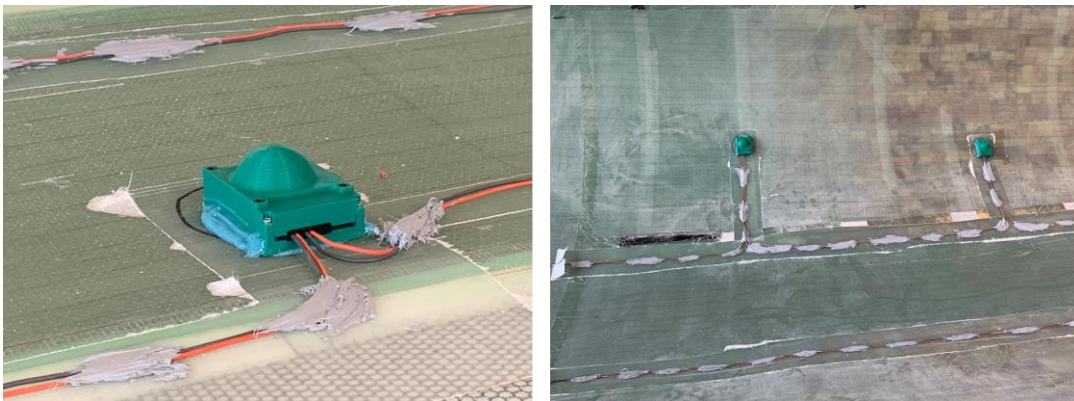


Abbildung 28: Einbau der Retro-Fit Sensoren

Abschließend wurden die Kabel der einzelnen Sensoren mit einem 1K Klebstoff (WIKO MS Polymer) an der Schaleninnenseite fixiert. Dies ist erforderlich, damit die Kabel während des Betriebs nicht wackeln und dadurch das Messsignal beeinflussen.

Blattschalenverklebung

Die Verklebung des Schubstegs und der Blattschalen erfolgt zur Sicherstellung der Position des Schubstegs separat. Für die Verklebung wurden zunächst die Oberflächen für den Klebstoffauftrag gereinigt und dann der Klebstoff aufgetragen. Der Auftrag erfolgte handgeführt mittels Klebstoffauftragskopf an den Formenrändern und auf dem Stegfuß.

Nach dem Auftrag wurde die Druckseitenschale über das Formwendesystem beim Klappvorgang um 180 Grad gedreht und auf den Formenrand der Druckseitenform gezogen. Dieser Vorgang dauert ca. 10min. und gewährleistet so, dass die Verklebung noch innerhalb der Topfzeit des Klebstoffes erfolgt. Der Wendevorgang ist in der folgenden Abbildung einmal dargestellt.



Abbildung 29: Wendevorgang der Druckseitenschale

Nach der Verklebung wurde der überschüssige Klebstoff entfernt und in den Blatt zugänglichen Bereichen einzelnen Lagen als Überlaminat aufgetragen, um so die Verklebung zu stärken. Danach wurde das Blatt bei ca. 50-60°C für mehrere Stunden getempert. Nach der vollständigen Aushärtung wurde das Blatt entformt und in einem Transportgestell abgelegt. Dort wurde das Blatt auf mögliche Fertigungsschäden untersucht. Trockene, oder auffällige Stellen wurden nicht festgestellt.



Abbildung 30: Entformung der Blattschale

In diesem Zustand war es erstmals möglich die Kabel die aus der Blattschale herausgeführt wurden zu kontrollieren. Alle Kabelenden waren frei von Harz oder anderen sichtbaren Defekten. Zum Schutz der Kabel während des Transportes wurden diese abgeklebt.

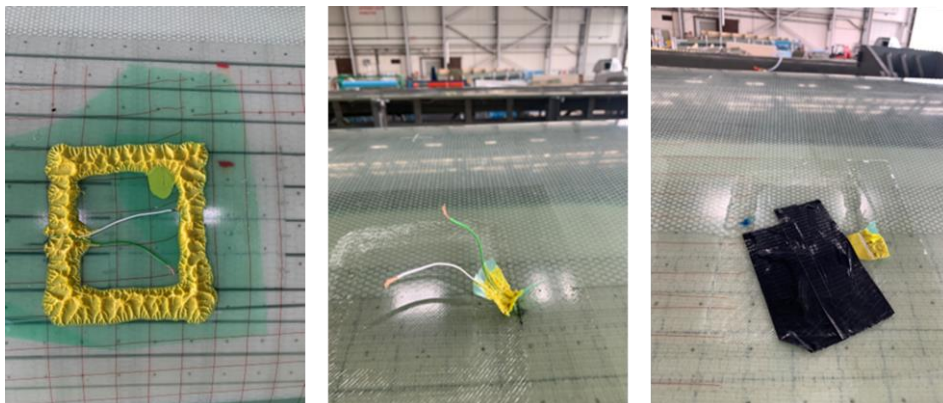


Abbildung 31: offene Kabelenden nach der Entformung

Der gesamte Blattbau erfolgte nach dem aktuellen Stand der Technik und in manueller Bauweise. Anders als im Projektantrag beschrieben, wurden keine gezielten Schäden eingebaut. Es wurde lediglich bei der abschließenden Blattbearbeitung darauf verzichtet, die Ellipse des Steges auszuschneiden. An dieser Stelle gibt es Erfahrungen mit den Auswirkungen, da es in der Industrie auch mal vorkommen kann, dass dieser Schritt vergessen wird. Dies führt zu einem steiferen Verhalten des Steges und somit zu höheren Belastungen im Stegfuß. Das Resultat wäre ein zunehmendes Ablösen des Stegfußes und der Klebverbindung zur Blattschale. Der Schaden ist optisch gut zu erkennen, da er in der Blattwurzel und somit in einem gut zugänglichen Bereich auftritt. Dies ist daher der einzige bewusst eingebaute Fehler im Blatt. Die finale Bearbeitung des Flansches, der Vorder- und Hinterkante und der Ausstattung der Bolzen erfolgte bei einer externen Firma (EWT Rotor Blades B.V.) aus den Niederlanden. Das Blatt wurde dafür von Lemwerder in die Niederlande transportiert und anschließend nach Bremerhaven zum Rotorblattprüfstand. Dort kam das Blatt am 19.10.21 an und wurde der Abteilung Blattprüfung übergeben. Dort wurden zunächst alle Radar Sensoren verkabelt und auf ihre Funktionalität geprüft. Beim Anschluss der Sensoren wurde festgestellt, dass drei der zehn Anschlusskabel der einlaminieren Sensoren bei der externen Bearbeitung bei EWT abgeschliffen wurden. Es wurde versucht die entsprechenden Stellen aufzuschleifen und den Kabelanschluss herzustellen, dies gelang aber nur bei einem Sensor. Zwei Sensoren waren dadurch schon vor dem Teststart als defekt zu deklarieren. Die Ausfälle sind aber zu tolerieren, da die Sensoren in einem Blattbereich sind, in dem nicht zwingend mit Schäden gerechnet wurde.

6.6 AP 4.4 Auslegung, Durchführung und Überwachung eines Ermüdungstests in Schwenkrichtung

6.6.1 Testaufbau und Instrumentierung

Nach der Anlieferung des Rotorblattes im Oktober 2021 wurde zunächst eine Eingangsinspektion durchgeführt, um eventuelle Schäden aus der Fertigung und dem Transport von den im Ermüdungstest auftretenden Schäden abgrenzen zu können. Im Anschluss wurde das Rotorblatt zur Testüberwachung und zur Berechnung des eingeleiteten Biegemoments mit 28 uniaxialen und 2 triaxialen Dehnungsmessstreifen, sowie jeweils 3 uniaxialen Dehnungsmessstreifen auf 4 ausgewählten Blattbolzen ausgestattet. Für die Platzierung der Dehnungsmessstreifen wurden als Orientierung bewährte Positionen aus Zertifizierungstests herangezogen. Die Dehnungsmessstreifen dienen zur Steuerung und Überprüfung des Blatttests. Über die gemessene Dehnung wird das aufzubringende Biegemoment am Blatt eingestellt und überwacht. Über die bekannte Dehnung, ein bekanntes Kalibriergewicht und den Hebelarm kann das Biegemoment für mehrere Crosssections berechnet werden. Die DMS an den Blattbolzen sind zur Überwachung der Vorspannkraft und um Setzverluste frühzeitig zu erkennen. Auf die Radarmessungen oder gar die Schadenserkenkung und Bewertung hat dies keinen Einfluss.

Für den Ermüdungstest in Schwenkrichtung wurde das Rotorblatt mit der Saugseite nach unten in der 70m Halle des Fraunhofer IWES in Bremerhaven ohne Verwendung eines Blattlagers an einer Adapterplatte montiert, welche mit Abstandsringen und einer Keilplatte unter einem Winkel von 5° aus der Horizontalen am Testblock befestigt wurde. Zur Lasteinleitung und zur Beeinflussung des eingeleiteten Biegemoments wurden 4 Lastscheren (teilweise mit Zusatzmassen) am Blatt montiert. Die erwarteten Ermüdungslasten, bei denen Schäden auftreten,

waren aus einem vorangegangenen Test bekannt. Sie wurden im Testverlauf stufenweise erhöht, um sicherzustellen, dass im Test Ermüdungsschäden auftreten. Um diese Ziellasten mit dem Testaufbau so gut wie möglich entlang der gesamten Blattlänge zu erreichen, wurde das Inhouse-Testauslegungstool genutzt. Hierbei wird auf Basis eines Balkenmodells des Rotorblattes und einer harmonischen Simulation in ANSYS der Testaufbau optimiert. [13]

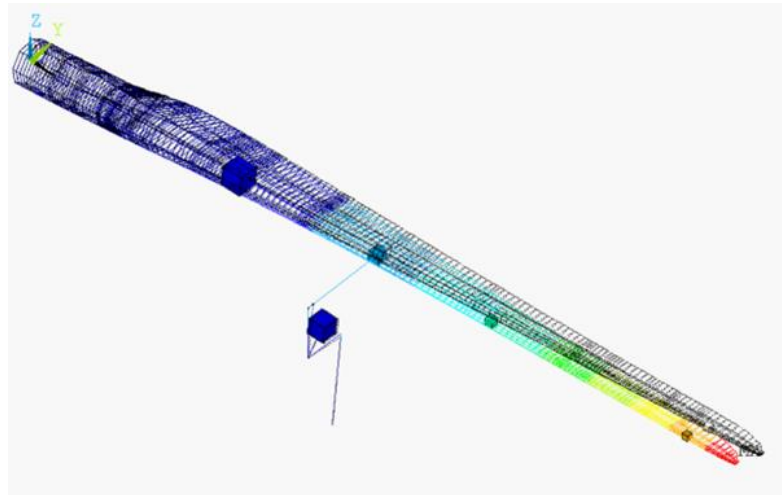


Abbildung 32: harmonische Simulation des Testaufbaus in ANSYS

Vor dem Teststart wurde sowohl mit demontierten als auch mit montierten Lastscheren jeweils eine experimentelle Modalanalyse durchgeführt, die als Referenzmessung zu weiteren experimentellen Modalanalysen diente. Bei einer experimentellen Modalanalyse an Rotorblättern werden Crosssections (Schnitte) ausgewählt, die mit Beschleunigungssensoren ausgestattet werden. Hierfür wurde das Rotorblatt an 14 Radien mit uniaxialen Beschleunigungssensoren an der Endkante und biaxialen Beschleunigungssensoren an der Nasenkante ausgerüstet. Zusätzlich wurden jeweils 4 uniaxiale Beschleunigungssensoren auf der Saug- und auf der Druckseite im Panelbereich zwischen den Gurten und der Endkante installiert. Wenn das Blatt in einer höheren Eigenfrequenz schwingt, ergeben sich zwangsläufig Knotenpunkte an denen keine Bewegung stattfindet. Die Auswahl der Sensorpositionen/Crosssections erfolgt so, dass möglichst kein Sensor in einem Schwingungsknoten platziert wird, weil dieser dann nichts messen würde. Dann wird mit einem Impact-Hammer auf das Blatt geschlagen, um die Eigenfrequenzen des Blattes gleichzeitig anzuregen. Dann schwingt das Blatt mit kaum sichtbarer Auslenkung für einige Zeit, dabei wird die Beschleunigung gemessen. Diese Anregung mit dem Impact-Hammer, ein spezieller Gummihammer mit integrierter Kraftmessdose, findet einige Male und in verschiedenen Richtungen statt, um jede messbare Eigenfrequenz bestmöglich anzuregen und somit im Post-Processing identifizieren zu können. Die am Rotorblatt installierten Dehnungsmessstreifen wurden zum Start des Ermüdungstest kalibriert, um das Verhältnis zwischen gemessener Dehnung und aufgebrachtem Biegemoment zu ermitteln. Die Kalibrierung wurde in Schwenk- und in Schlagrichtung durchgeführt, da die Anregung des hydraulischen Zylinders nicht vollständig in Schwenkrichtung erfolgt, und der Einfluss der Anregung in Schlagrichtung berücksichtigt werden muss. Die dynamische Anregung erfolgte nahe der Systemeigenfrequenz mit einer Testfrequenz von 1.61 Hz. Die Amplitude des Zylinders wurde vor dem Test sukzessive gesteigert, um das initiale Lastniveau zu erreichen, das mit einem Biegemoment von 1324 kNm bei einer Blattlänge von 12m festgelegt wurde.



Abbildung 33: Modalanalyse ohne Lastscheren

6.6.2 Testdurchführung

Modalanalyse

Über den gesamten Testzyklus, wurden 6 Modalanalysen durchgeführt. Folgende Einteilung gab es dafür.

1. unbeschädigtes neues Blatt ohne Lastscheren bei Zyklenzahl 0
2. unbeschädigtes neues Blatt mit Lastscheren bei Zyklenzahl 0
3. Leicht beschädigtes Blatt mit Lastscheren bei Zyklenzahl 400.000 (Schäden mit Ablösung des Stegfußes, Risse in Harzkanälen im Panelbereich, Klebnahtrisse an der Endkante)
4. Leicht beschädigtes Blatt mit Lastscheren bei Zyklenzahl 800.000 (Schäden in Zahl und Größe angestiegen)
5. stark beschädigtes Blatt mit Lastscheren bei Zyklenzahl 1.25 Mio. (Schäden in Anzahl und Größe angestiegen + 1.5m langer Riss durch die Endkante bei R2.5m / strukturell so kritisch, dass der Test abgebrochen werden musste)
6. Stark beschädigtes Blatt ohne Lastscheren bei Zyklenzahl 1.25 Mio. (Schäden wie bei 5.)

Die Auswertung der Modalanalyse hat folgende Erkenntnisse geliefert:

- Die Eigenfrequenzen sind erwartungsgemäß gesunken. Dies ergab ein Vergleich von vor und nach dem Test (Vergleich von EMA1 vs. EMA6 ebenso wie EMA2 vs. EMA5)
- Die leichten Beschädigungen sind nicht sicher detektierbar über die Modalanalyse, der große strukturelle hoch relevante Schaden hingegen schon
- Der große Schaden in der Endkante ist deutlich messbar. Er wirkt sich am stärksten auf die 1. Schwenkeigenfrequenz aus. Sie verringert sich durch den Schaden um 1.1%. Auch in der 2. Schwenkeigenfrequenz ist der Schaden noch sehr deutlich durch eine Verringerung der Frequenz messbar. Die Reduzierung der 2. Schwenkeigenfrequenz beträgt 0,9%.
- Strukturelle Schäden führen zu einem Steifigkeitsverlust und äußern sich so in sinkenden Eigenfrequenzen

Ermüdungsversuche

Im Ermüdungsversuch kann für jede Crosssection, an der Dehnung gemessen wird, ein Biegemoment ermittelt werden. Das erste Lastniveau wurde aus einem vorangegangenen Test eines baugleichen Blattes abgeleitet. Diese Last galt als Referenzlast und wurde als 100% Last festgelegt. Da sich die Verteilung der Testlast über der Blattlänge aus dem Testsetup und den Testparametern, wie auch der Testfrequenz ergibt, ist es möglich den Test auf die direkte Belastung von nur einem Radius einzustellen. Dafür wurde der Radius 12m ausgewählt. Die Laststufen des Ermüdungstests wurden wie folgt eingestellt.

1. Laststufe 102,3 % Last für ca. 400.000 Zyklen
2. Laststufe 105,5 % Last für ca. 400.000 Zyklen
3. Laststufe 111,4 % Last für ca. 400.000 Zyklen

Diese Laststufen waren so ausgelegt, dass es in diesem Zeitraum zu ersten strukturellen Schäden kommt, welche dann unter Laststufe drei zum Versagen des Blattes führen. Es traten Schäden auf, allerdings nicht so schwerwiegende strukturelle Schäden wie erwartet und erwünscht, sodass weitere Laststufen mit noch höherer Belastung eingestellt wurden, um weitere Schäden zu initiieren. Die folgenden Laststufen wurden wie folgt eingestellt.

4. Laststufe 115,1 % Last für ca. 12.200 Zyklen
5. Laststufe 121,2 % Last für ca. 6100 Zyklen
6. Laststufe 127,6 % Last für ca. 20.700 Zyklen

Die begleitenden Radarmessungen erfolgten nicht während der dynamischen Belastung, sondern in den Stillstandszeiten. Dies war nach 49.000 Zyklen, sowie nach Abschluss von Laststufe 1, 2, 3 und 6 der Fall. Während den Messungen wurde darauf geachtet, dass keine weiteren Arbeiten im und um das Blatt erfolgten. Dies hätte eine Beeinflussung der Messergebnisse zur Folge. Die Datenaufnahme, Auswertung und Bewertung lag nicht im Aufgabenbereich des Fraunhofer IWES. Daher wird an dieser Stelle auf die Berichte der Projektpartner GUF und FAU verwiesen.

Das Fraunhofer IWES konnte während des Ermüdungsversuchs jedoch Schäden optisch erfassen und dokumentieren. Während und zwischen den einzelnen Laststufen erfolgte von Innen und Außen eine Inspektion des Blattes und eine Dokumentation der Schäden. Während des Testverlaufs konnten folgende Schäden festgestellt werden.

Schaden am Stegfuß:

Der Schaden am Stegfuß trat bei $R=0,8m$ und nach 208.000 Zyklen (Laststufe 1) auf und ist fortan stetig gewachsen. Der Schaden wurde in diesem Zustand als unkritisch bewertet. Entstehungsursprung lag vermutlich an dem nicht ausgeschnittenen Steg Mund. Dadurch entstanden Spannungen im Fußbereich, da sich das Material dort nicht ausreichend verformen konnte. Dies wurde bewusst gemacht, um einen Schaden zu erzeugen.

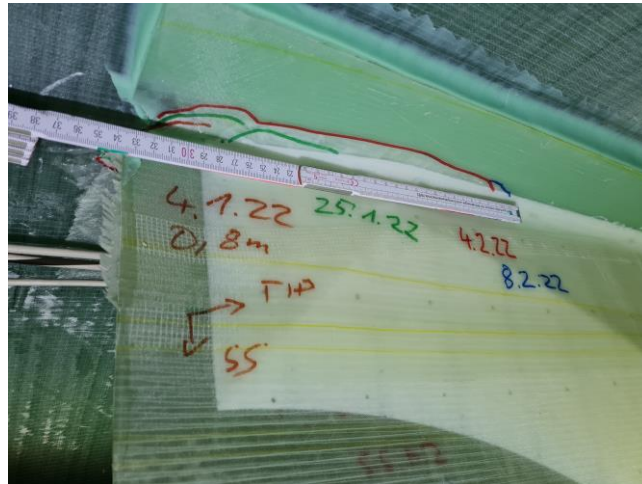


Abbildung 34: Schadensverlauf am Stegfuß Druckseite

Klebnahtrisse an der Hinterkante:

Ein weiterer Schaden trat in der Endkantenverklebung auf. Dort waren nach 400.000 Zyklen schon erste Risse zu erkennen. Im Laufe der Zyklen nahm die Anzahl der Risse zu. Es stellte aber keinen relevanten Schaden oder eine Schwächung der Blattstruktur dar. Ein solches Schadensbild wird bei herkömmlichen Blatttests am IWES häufig beobachtet und als unkritisch bewertet.



Abbildung 35: Schadensbild Klebverbindung Endkante

Harzrisse im Panelbereich:

Besonderes Augenmerk lag auf den Vorderkantenbereich bei $R=7,5$ bis $R=8,5$ m. Dort trat beim Test eines baugleichen Blattes ein erheblicher Schaden ein. Beim Radkom Test kam es in diesem Bereich zur Bildung von Haarrissen in den Harzkanälen der Kernwerkstoffe. Ein größerer und strukturell kritischer Riss ist dabei nicht entstanden. Die Entstehung von Haarrissen wird bei Blatttests häufiger festgestellt. Die Zahl der Risse ist mit zunehmendem Testverlauf steigend. Ein elementarer Schaden resultiert daraus in der Regel nicht, da dieser Bereich nicht Last tragend ist, sondern mehr zur Aufrechterhaltung der Aerodynamischen Kontur dient.

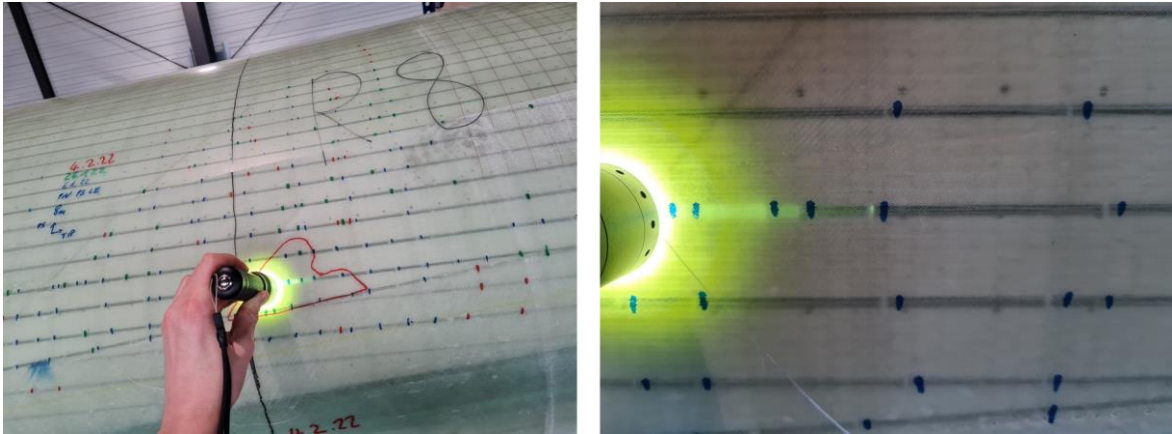


Abbildung 36: Schadensbild Panelbereich Vorderkante

Das vollständige Versagen trat in Laststufe 6 auf. Bei $R=2,5m$ zog sich ein Riss an der Endkante von Druck- zur Saugseite und durch die Klebnaht. Der Schaden entwickelte sich über einen Zeitraum von etwa 15 Minuten. Kleinere Fehlstellen, welche den Riss und das Ausmaß frühzeitig angekündigt hätten, gab es nicht. Es konnten jedoch vorab interessante Aufnahmen mit der Thermografiekamera gemacht werden. Dies wird in Kapitel 6.8.3 weiter erläutert.

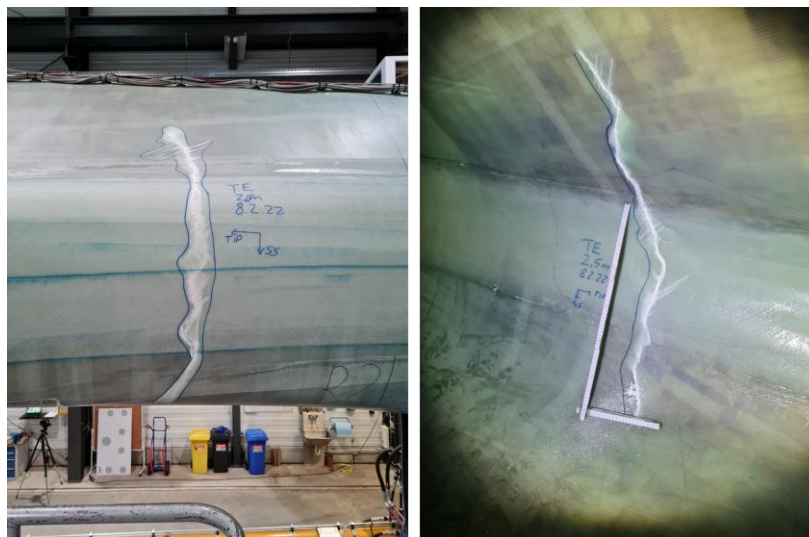


Abbildung 37: Schaden an der Hinterkante (Außen l. / Innen r.)

Die Schädigung war bis zum finalen Schaden vergleichbar mit anderen Blatttests. Der finale Schaden wird in anderen Blatttests nicht so provoziert, da das Blatt üblicherweise nicht bis zum Versagen und mit derartigen Überlasten getestet wird. Im Anlagenbetrieb wäre das Blatt in diesem Zustand vermutlich nicht direkt als funktionsunfähig erkenntlich gewesen und der Schaden erst bei einer Inspektion erkannt worden. Jedoch bestünde die Gefahr eines schnellen und unkontrollierten Risswachstums. Wäre dieser Schaden im Feld bei einer Inspektion festgestellt worden, wäre die Anlage sofort außer Betrieb genommen und das Blatt zur Reparatur oder gar Austausch angewiesen worden.

6.6.3 Visuelle Überwachung der Ganzblattprüfung

Der Ermüdungsversuch wurde visuell mit einer Thermografiekamera begleitet. Die Verwendung einer herkömmlichen Kamera, mit deren Hilfe kleine entstehende Risse beobachtet werden sollten, wurde nicht umgesetzt. Es wären mehrere Kameras notwendig gewesen, so dass nur

Leihgeräte möglich gewesen wären. Aufgrund der zu erwartenden Testdauer, infolge der Zyklen und der für die Radarmessungen notwendigen Ruhephasen, war dies nicht zu realisieren. Der geplante Einsatz einer Thermografiekamera wurde aber umgesetzt. Verwendet wurde eine Kamera der Firma InfraTec (VarioCam HD Head 900) und die Software IRBIS Professional. Der Vorteil einer Thermografiekamera gegenüber einer rein visuellen Überwachung der Blattgeometrie ist die Sichtbarkeit innerer Prozesse im Material, welche rein äußerlich betrachtet nicht zu erfassen sind. Durch die Bewegungen des Blattes, infolge der eingeleiteten Belastung, kommt es durch die elastische Verformung im beanspruchten Materialbereich zur Reibung und dadurch zur Erzeugung thermischer Energie. Die Erfassung ermöglicht die Detektion von stark dynamisch belasteten Materialbereichen. Eine thermische Belastung ist nicht gleichbedeutend mit einem Materialversagen oder einer Fehlstelle, jedoch kann eine dauerhafte thermische Beanspruchung die Materialermüdung beschleunigen, in Abhängigkeit der Temperatur und Dauer der Temperaturbelastung. Die Bereiche, in denen ein Temperaturanstieg verzeichnet wurde, standen auch unter besonderer Beobachtung. Betrachtet wurde nicht das gesamte Blatt. Im Fokus stand der Vorderkantenbereich bei $R=8\text{m}$, da dort ein Schaden im Testverlauf vermutet wurde. Es war möglich die Kameraperspektive so einzustellen, das ein Bereich von 6m einsehbar war. Gleiches wurde für die Hinterkante gemacht. Es stand aber nur eine Kamera zur Verfügung, weshalb nicht beide Seiten gleichzeitig überwacht werden konnten. Die Kamera wurde auf einem Stativ positioniert und war schwenkbar. Eine exakte und feste Position gab es nicht. Es wurden beim Blatt insgesamt vier sogenannte HotSpots festgestellt. Einer entstand an der Vorderkante bei $R=8\text{m}$ (dort wo ein Versagen erwartet wurde) und an der Hinterkante bei $R=2,5\text{m}$ (Schadenstelle im Blatt). Zwei weitere HotSpots entstanden bei $R=2\text{m}$ an der Vorderkante und bei $R=9\text{m}$ an der Hinterkante. Letztere war begründet in der Lastscherenklemmung.

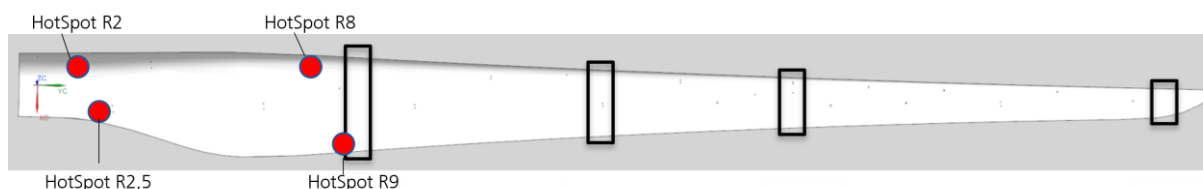


Abbildung 38: Position der erfassten HotSpots

Der Temperaturanstieg im Blatt verlief langsam. Durch die entsprechende Masse der Schale im vorderen Bereich und den thermischen Eigenschaften des Materials, benötigt der Aufheizvorgang mehrere Stunden, bis sich bei konstanter Last eine stabile Temperatur eingestellt hat. Die stabilen Temperaturen verhielten sich in Laststufe 1-3 wie folgt.

Tabelle 5: HotSpot Temperaturen bei Laststufe 1-3:

	Blattachse [m]	Blattbereich	Temp. [°C] bei 102,3%	Temp. [°C] bei 105,5%	Temp. [°C] bei 111,4%
HotSpot R2	2	Vorderkante	37,6	/	44,6
HotSpot R2,5	2,5	Hinterkante	38	/	46,1
HotSpot R8	8	Vorderkante	32	34	38,1
HotSpot R9	9	Hinterkante	34,1	/	37,5

Es war festzustellen, dass die Lasterhöhungen jeweils zu einer Erhöhung der Temperatur geführt haben. Besonders auffällig ist der Temperaturanstieg an Vorder- und Hinterkante bei ca. 2m. Im Bereich der späteren Schadenstelle stieg die Temperatur um 8°C an. In der folgenden Abbildung ist die thermografische Darstellung aus Laststufe 3 dargestellt. Darauf ist zu erkennen, dass im

markierten Temperaturbereich Temperaturen von 22°C bis hin zu 46°C auftreten. Die maximale Temperatur ist dabei lokal begrenzt und konzentriert sich stark auf die Hinterkante.

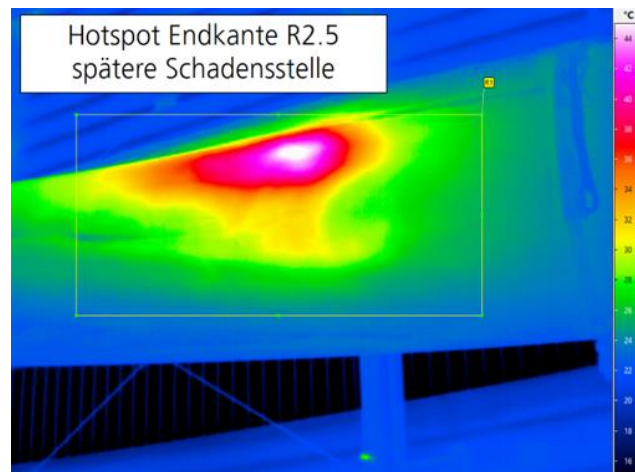


Abbildung 39: HotSpot 2,5 bei Laststufe 111,4%

Zu diesem Zeitpunkt waren noch keine strukturellen Schäden ersichtlich. Der HotSpot R2 an der Vorderkante erreichte Temperaturen von bis zu 45°C. Der HotSpot R8 hingegen hatte etwas geringere Temperaturen von ca. 38°C. Diese lagen aber genau in dem Blattbereich, in der der eigentliche Hauptschaden vermutet wurde und wurde daher genauer beobachtet als der HotSpot R2,5.

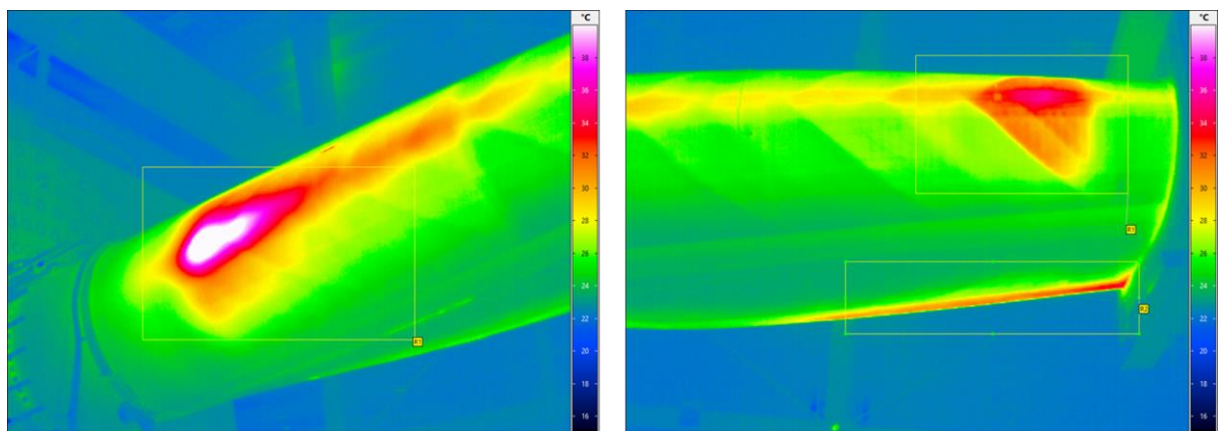


Abbildung 40: Darstellung von HotSpot R2 (l.) und R8 (r.)

Die Höchstbelastungen an der Vorder- und Hinterkante resultiert aus der Testanordnung. Der Ermüdungstest erfolgte ausschließlich in Schwenkrichtung. Dadurch kommt es in diesen Bereichen abwechselnd zu Druck- und Zugbelastungen und im Material zur Stauchung und Dehnung.

Auch in den hinteren Bereichen des Blattes war entlang der Kanten eine Temperaturerhöhung festgestellt worden. Dort war die Temperaturverteilung jedoch gleichmäßig, ohne die Ausprägung eines lokalen Spots. Die Temperaturen lagen dort bei ca. 30-34°C.

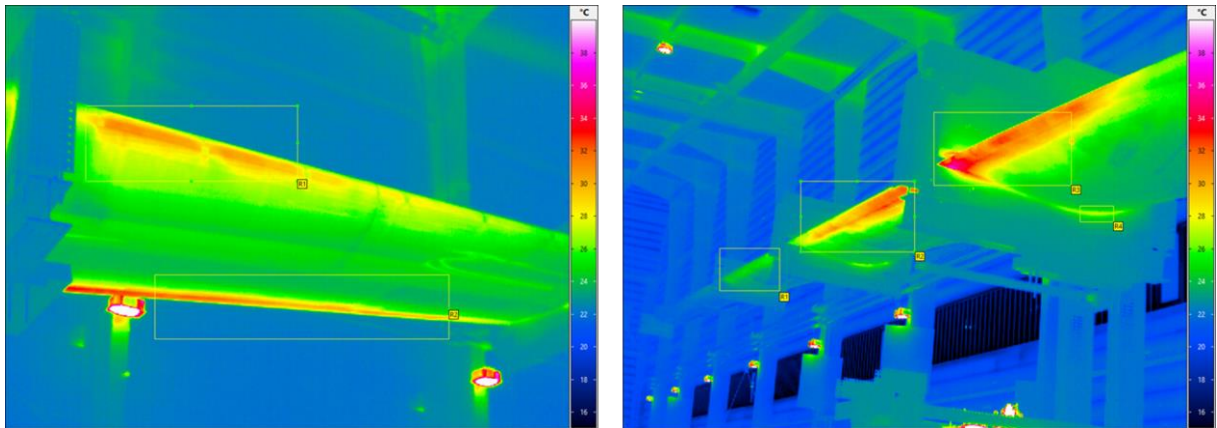


Abbildung 41: Thermografieaufnahmen an Vorder- (r.) und Hinterkante (l.)

Bei den Laststufen 4-6 gab es keine konstante Temperatur, da der Test während dieser Laststufen weniger Zyklen hatte als bei den drei Laststufen zuvor. Bei Laststufe 6 stieg die Temperatur jedoch sehr schnell an, so dass bei HotSpot R2 eine maximale Temperatur von 69,1°C und bei HotSpot R8 eine Temperatur von 75,7°C festgestellt wurde.

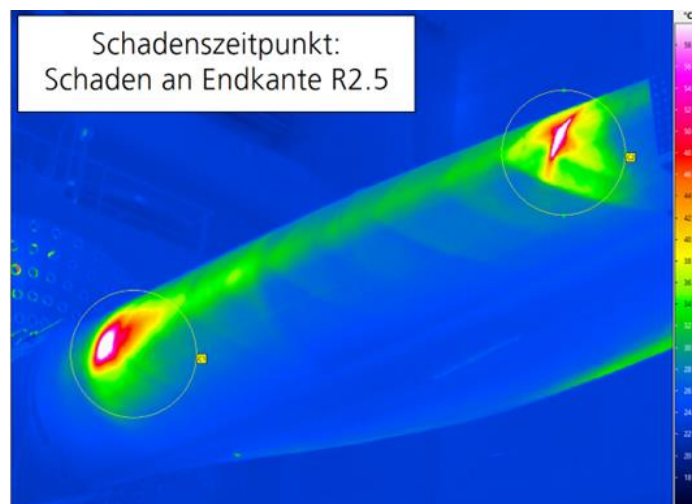


Abbildung 42: HotSpots an Vorderkante kurz vor dem Schaden in Laststufe 6

Die Temperaturen stiegen deshalb nicht höher an, weil der sich entwickelnde Schaden in der Hinterkante größer wurde, sodass sich wichtige Testparameter wie die Anregungskraft sehr deutlich veränderten und aus diesem Grund der Test heruntergefahren und beendet wurde. Die Kamera befand sich zu diesem Zeitpunkt auf der Seite der Vorderkante, so dass die Hinterkante und der schlussendliche Schaden nicht erfasst wurden. Der Grund war die schon festzustellenden kleinen Risse im Kernwerkstoffpanel bei R=8m der Vorderkante. Dort wurde mit dem Schaden gerechnet und deshalb war die Kamera auf dieser Seite positioniert. Aufgrund der festgestellten Temperaturanstiege an der Vorderkante, ist auch von ähnlichen Temperaturen an der Hinterkante und im späteren Schadensbereich auszugehen.

Die Verwendung einer Thermografiekamera bei Rotorblatttests ist am IWES nicht üblich. Eine Anwendung in diesem Umfang gab es bislang nicht. Die festgestellten HotSpots ermöglichen die Detektierung von besonders hoch belasteten Materialbereichen. Die Wärme resultiert aus dem Wechselspiel von Dehnung und Stauchung im Material. Dadurch kommt es zu innerer Reibung, welche wiederum Wärme erzeugt. Gleichzeitig führt die steigende Temperatur zu einer

Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften. Das Fraunhofer IWES hat eine Materialstudie mit Reinharzproben durchgeführt, zu genau dem gleichen Matrixmaterial wie beim Rotorblatt. Die Studie ergab einen direkten Zusammenhang von erhöhter Temperatur und dem damit verbundenen Einfluss auf die statische Zugfestigkeit. So nimmt die Festigkeit bei 60°C Probertemperatur im Vergleich zur Raumtemperatur um bis zu 50% ab. [14]

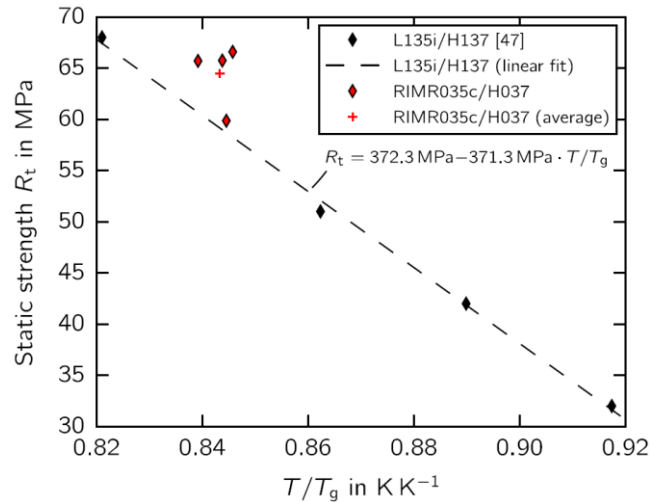


Abbildung 43: Einfluss der Temperatur auf die Bauteilfestigkeit [14]

Es ist an dieser Stelle jedoch zu erwähnen, dass die erhöhten Temperaturen bei einer Belastung aufgetreten sind, die gezielt eingebracht wurden, um einen Schaden im Blatt zu erzeugen. Bei herkömmlichen Blatttests am Fraunhofer IWES werden solche Lasten nicht gefahren und sind nicht Teil der Zertifizierung. Die Tests laufen länger und bei geringerer Last. Temperaturen von ca. 70°C sind daher bei diesen Tests nicht zu erwarten. Die Versuche haben jedoch gezeigt, dass sich auch schon bei geringeren Lasten HotSpots identifizieren lassen, die auf höher belastete Materialbereiche hinweisen und Bereiche lokalisieren, die bei auftretenden Überlasten als kritisch bewertet werden müssen. Dies kann als Anhaltspunkt für genauere Betrachtungen während der Inspektion genutzt werden und so ein zusätzliches Hilfsmittel bei der Dokumentation und Überwachung von Rotorblatttests darstellen. Eine Rückführung auf den Zustand des Materials, oder auf eine bevorstehende Schadensentstehung infolge einer Zustandsänderung liefert diese Methode zum aktuellen Stand nicht. Trotzdem plant das IWES auch in Zukunft den Einsatz von Thermografiekameras.

7 Übersicht zahlenmäßiger Nachweis

Der zahlenmäßige Nachweis erfolgt separat durch die Fraunhofer Zentrale.

8 Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Vorhaben RadKom QS gewonnenen Erkenntnisse dienen direkt der Förderung und Stärkung der Kompetenzen im Bereich von Strukturüberwachung von Rotorblättern.

Die in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse können sowohl auf der wissenschaftlichen Seite als auch bei der industrienahen Vermarktung von Zustandsüberwachungsmethoden kritischer Strukturbereiche auf Basis der Radartechnik angewandt werden. Auch die erarbeiteten Methoden zur Einbringung von Material- und Fertigungsfehlern auf Couponebene können nach Projektende als Zusatzleistungen im Materiallabor des Fraunhofer IWES angeboten werden. Durch den Bau des Demonstratorblattes hat das IWES weitere Kompetenzen in der Auslegung und der Fertigung von großen Faserverbundbauteilen erlangt und sein Know How in der Bewertung und Unterstützung von Fertigungsabläufen erweitert. Die Anwendung der Thermografiekamera zur Überwachung des Blatttests hat ebenfalls neue Erkenntnisse geliefert und stellt für das Fraunhofer IWES einen aufbauenden Ansatz in weiteren Forschungsprojekten und in den industriellen Blattzertifizierungstests dar.

9 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das Forschungsvorhaben hat zum ersten Mal eine erfolgreiche Nutzung von herkömmlichen Radarsensoren für die Detektion von Material- und Strukturschäden nachgewiesen. Das Ziel, ohne teure und speziell angepasste Sensoren einen Schaden in der Laminatstruktur nachzuweisen und so die Voraussetzung für eine Überwachung von Rotorblättern zu schaffen, wurde erreicht. Durch den Bau eines 31m Blattes als Demonstrator, ist eine Überführung vom Prüfstand in eine reale Anwendungsumgebung gegeben. So ist es auch begründet, dass ein Teil des Projektkonsortiums im Rahmen eines Nachfolgeprojektes die Anwendung an einer bestehenden WEA anstrebt, um darauf aufbauend den Übergang aus dem Labor in den Markt und auf wirtschaftlich betriebene Anlagen zu schaffen. Dort wird die Retrofit Anwendung mit nachrüstbaren Sensoren favorisiert. Im Austausch mit Projektpartner Nordex, wurde dieser Variante das größere Marktpotential ausgesprochen. Begründet ist dies zum einen an der Möglichkeit der Nachrüstung an schon bestehende Anlagen und der nicht erforderlichen Neuberechnung der Blattstruktur, aufgrund der in die Struktur integrierten Sensoren, welche Materialtechnisch als Fremdkörper und somit Fehlerquellen einzustufen sind. Zudem bedingen die integrierten Sensoren einen technischen wie zeitlichen Mehraufwand in der Fertigung. Eine realistische Chance, unter den aktuellen Fertigungsbedingungen, mit Zeitdruck und der Beschäftigung von gering qualifiziertem Personal, wurde der Integration nicht eingeräumt. Auch ist eine Reparatur oder der Austausch nach der Fertigung nur bedingt und mit erheblichem Aufwand möglich. Beim Retrofit Konzept sind die Sensoren jederzeit austauschbar. Ein Unterschied in der Messung oder bei den Messergebnissen wurde nicht festgestellt. Einziger Nachteil ist die ausschließliche Anwendung in zugänglichen Bereichen des Blattes, sofern die Sensoren erst nach der Schalenverklebung eingebaut werden.

Neben der Anwendung in ersten Feldversuchen in einem Nachfolgeprojekt, ist auch die Anwendung in der Rotorblattfertigung denkbar, sofern die Systeme in der Fertigung auch schon eingebaut werden. Die Sensoren erkennen keine Schäden direkt, sondern es können lediglich Unterschiede in den Signalen festgestellt werden, wenn mehrere Messungen durchgeführt werden. In der Fertigung wäre dies nur möglich, wenn man bei einem Blattpyp Daten sammelt und somit das Signalbild bei einem unbeschädigten Blatt bekannt ist. Weicht dann ein Blatt nach der Fertigung davon ab, könnten so auch Fehler im Fertigungsprozess identifiziert werden. Da es in der Fertigung aber diverse Qualitätskontrollen gibt und die Schalen vor der Verklebung auch von Innen noch komplett einsehbar sind, werden dabei schon die gravierendsten Fehler entdeckt. Die Hauptanwendung zielt daher auf die Anwendung im Betrieb ab, wo das Blatt zwischen den Wartungsintervallen unbeobachtet ist. Eine Produkteinführung ist aber erst nach Versuchen im Feld an einer WEA Anlage realistisch.

Das Fraunhofer IWES sieht für sich gezielt vier wesentliche Produkte, deren wirtschaftliche Anschlussfähigkeit gegeben ist und ab Projektende vom Institut genutzt werden kann.

- Fertigung und Prüfung eines vollständigen 31m Rotorblattes
 - Einbringung von Fertigungsexpertise / Personalschulungen als Dienstleistung anbieten
 - Bereitstellung von Formwerkzeugen für Materialvalidierungen
 - Bau kleiner Komponenten oder ganzer Blätter mit Kundenmaterial
 - Nutzung des aufgebauten Fertigungsequipments für Forschungs- und Industrieprojekte
- Unterstützung bei der Materialauslegung von Herstellern und Kunden
 - Erweiterung der Couponfertigung um Proben mit gezielt eingebrachten Fehlern, um die Anfälligkeit des Materials- auf schwankende Fertigungsbedingungen zu untersuchen
- Erweiterung der Rotorblattprüfung durch thermografische Überwachung
 - Aufnahme ins Angebotsportfolio für Industriekunden
- Erweiterung der Rotorblattprüfung um die experimentelle Modalanalyse
 - Aufnahme ins Angebotsportfolio für Industriekunden
- Erweiterung der Rotorblattprüfung um die Verwendung von Radarsensoren
 - Das entwickelte Sensornetzwerk kann auch in Blatttests zum Einsatz kommen. Besonders interessant sind dort Beobachtungen von Bereichen, die schwer zugänglich sind. Das System kann somit zusätzlich zur Sichtprüfungen angewandt werden und bietet beim Test von Blättern 100m+ mehr Überwachungsmöglichkeiten und kann dort die Inspektionszeit zwischen den Zyklen verkürzen (Zeithorizont: 1-2 Jahre, wenn das System an WEA getestet wurde)

Neben der wirtschaftlichen Nutzung ergeben sich aus dem Projekt ebenfalls wissenschaftliche Ansätze für zukünftige Forschungsvorhaben.

- Optische Fasermesssysteme / Smart Textiles

Die Konzepterarbeitung für die Integration der Sensoren zeigte, dass es fertigungstechnisch möglich ist, auch Sensoren mit Kabeln in einem Rotorblattlaminat in der konventionellen Schalenfertigung einzubauen. Die Blatthersteller scheuen jedoch den Mehraufwand in der Umsetzung. Aus diesem Grund muss die Forschung im Bereich Faserintegrierter Mess- und Prüfsysteme vorangetrieben werden. Erst wenn es möglich ist, die entsprechende Messtechnik nicht in Form eines einzelnen haptischen Sensors, sondern im Faserhalbzeug selbst zu integrieren,

werden auch die Hersteller offen für eine Einführung in die Fertigung sein. Aus diesem Grund wird das Fraunhofer IWES im Bereich der fertigungstechnischen Sensorintegration diesen Ansatz weiterverfolgen. Bei entsprechenden Innovationen bei den Faserhalbzeugen seitens der Industrie, kann das Fraunhofer IWES im Rahmen eines Forschungsprojektes seine Material- und Fertigungsexpertise einbringen und sein Democenter zur Verfügung stellen.

➤ Schadensvorhersage und Fehlercharakterisierung

Die ermittelten Verfahren zur gezielten Einbringung von verschiedenen Fehlstellen und Versagensarten im Laminat kann das IWES in neue Forschungsthemen einbringen, um ein besseres Verständnis für die Auswirkung und die Schadensvorhersage zu erlangen. Im Projekt wurden mehrere Fehlerarten durch eine gezielte Fertigung nachgebildet und auch in Ermüdungsversuchen nachgewiesen. Dafür eignen sich Versuche auf Coupon Ebene. Dort können mit moderatem kostentechnischem Aufwand umfangreiche Versuchsreihen durchgeführt und mit Simulationsergebnissen abgeglichen werden.

➤ Ausbau der Thermografieanwendung / Verständnis für die Materialprozesse

Die Verwendung einer Thermografiekamera als System zur Bilddokumentation erwies sich als zielführend. Es konnten durch die Aufnahmen sowohl die spätere Schadensstelle wie auch die Region der Schadensstelle eines vorangegangenen Blatttests mit einem baugleichen Blatt erfasst werden. Die Kamera zeichnete dabei eine Temperaturentwicklung an den entsprechenden Stellen auf, welche kurz vor dem Versagen sogar deutlich anstieg. Es ist daher geplant, die Thermografiekamera auch für industrielle Blatttests zu verwenden und dies den Herstellern mit anzubieten. Parallel wird das IWES in diesem Bereich auch weitere Forschung betreiben und das System intern sowohl bei Forschungstests (z.B. MultiMonitor Repair care) als auch auf Couponebene nutzen, um den Zusammenhang zwischen erhöhter Temperatur und bevorstehenden Materialversagen, sowohl unter Laborbedingungen als auch unter realen Prozessbedingungen besser zu verstehen. Die Erweiterung der Thermografieanwendung lässt sich auch mit weiteren Untersuchungen der integrierten Fehlstellen in Coupons verbinden.

Neben der aufgeführten Verwertung wurden schon im Rahmen des Projektes die Ergebnisse der Radarmessungen und der Anordnung der Sensoren veröffentlicht. Die Veröffentlichungen erfolgten vom Projektpartner GUF mit Unterstützung des Projektkonsortiums und sind in Kapitel 11 aufgeführt.

10 Fortschritt an anderen Stellen

Gegenüber der Antragsstellung sind keine Änderungen oder Fortschritte von anderer Seite zum Forschungsumfang bekannt.

11 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Im Rahmen des Projekts entstanden Veröffentlichungen in Form von Konferenzbeiträgen, und studentischen Abschlussarbeiten.

Veröffentlichte Artikel:

“Radar-based monitoring of glass fiber reinforced composites during fatigue testing” / 27.05.2021 in der Structural Control and Health Monitoring

“Analysis and Compensation of Relative Humidity and Ice Formation Effects for Radar-Based SHM Systems Embedded in Wind Turbine Blades” / Juni 2022 veröffentlicht im European Workshop on Structural Health Monitoring, EWSHM 2022 - Volume 3

“Towards Embedded RadCom-Sensors In Wind Turbine Blades: Preliminary Numerical And Experimental Studies” / Januar 2020, Progress In Electromagnetics Research Letters

Conference Paper:

“Detection of ice accretions on composite panels using FMCW radars at 60GHz” / Juni 2021, auf der 2021 IEEE 8th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)

Studentische Abschlussarbeiten:

“Fertigungsmethodik der Integration von Sensorsystemen in Rotorblättern zur Zustandsüberwachung” / Oktober 2020, Bachelorarbeit erstellt von Kai Kraske, Hochschule Bremerhaven

“Entwicklung von Fertigungsmethoden zur Einbringung von Defekten in Composite-Strukturen” / Februar 2020, erstellt von Kevin Mischke, Hochschule Bremen

12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Potenzielle Fehlstellen im Rotorblatt	8
Abbildung 2: Schematische Darstellung des Transversal - Strip – Verfahren [6]	9
Abbildung 3: Prüfkörper mit eingebrachter Faserondulation	10
Abbildung 4: Schematische Darstellung des Verfahrens mit Kraftlinien und Spannungsverlauf	10
Abbildung 5: Eingebrachte PTFE Folie angrenzend am Messbereich	11
Abbildung 6: Prüfkörper mit eingebrachten Folien	11
Abbildung 7: Schem. Darstellung des optimierten Verfahrens a) Kraftlinienverlauf b) Spannungsverlauf	12
Abbildung 8: Prüfkörper Klebnahttriss	12
Abbildung 9: Prüfkörper Zwischenfaserbruch	13
Abbildung 10: Querschnitt eines baugleichen Blattsegments	15
Abbildung 11: Position der Lastscheren	16
Abbildung 12: Ermittlung der optimalen Kerbgeometrie	17
Abbildung 13: Fertigung der Probenkörper	18
Abbildung 14: Schadensvergleich Duromer (links) und Elastomer (rechts) nach ca. 100.000 Zyklen bei R=0,1	19
Abbildung 15: Schichtaufbau für die Sensorintegration	19
Abbildung 16: Gurtfertigung	20
Abbildung 17: Fertigung des Schubsteges	21
Abbildung 18: Aufbau der Vakuumentasche	22
Abbildung 19: Durchführung der Kabel durch das Gelege	22
Abbildung 20: Einpassung der Sensoren	22
Abbildung 21: Verbindung der offenen Kabelenden	23
Abbildung 22: Ablage der äußeren Lagen	23
Abbildung 23: Einbau des Blattgurtes	23
Abbildung 24: Zuordnung und Ablage der Kernwerkstoffe	24
Abbildung 25: Vakuumaufbau und Infusion	24
Abbildung 26: Auftrag des Klebstoffes	24
Abbildung 27: Einsetzen des Schubsteges	25
Abbildung 28: Einbau der Retro-Fit Sensoren	25
Abbildung 29: Wendevorgang der Druckseitenschale	26
Abbildung 30: Entformung der Blattschale	26

Abbildung 31: offene Kabelenden nach der Entformung	26
Abbildung 32: harmonische Simulation des Testaufbaus in ANSYS	28
Abbildung 33: Modalanalyse ohne Lastscheren	29
Abbildung 34: Schadensverlauf am Stegfuß Druckseite	31
Abbildung 35: Schadensbild Klebverbindung Endkante	31
Abbildung 36: Schadensbild Panelbereich Vorderkante	32
Abbildung 37: Schaden an der Hinterkante (Außen l. / Innen r.)	32
Abbildung 38: Position der erfassten HotSpots	33
Abbildung 39: HotSpot 2,5 bei Laststufe 111,4%	34
Abbildung 40: Darstellung von HotSpot R2 (l.) und R8 (r.)	34
Abbildung 41: Thermografieaufnahmen an Vorder- (r.) und Hinterkante (l.)	35
Abbildung 42: HotSpots an Vorderkante kurz vor dem Schaden in Laststufe 6	35
Abbildung 43: Einfluss der Temperatur auf die Bauteilfestigkeit [14]	36

13 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Probenübersicht für Materialcharakterisierung in AP 3	8
Tabelle 2: Aufbau Prüfkörper	13
Tabelle 3: Festgelegte Abmaße der Prüfkörper	14
Tabelle 4: Positionen der Sensoren	21
Tabelle 5: HotSpot Temperaturen bei Laststufe 1-3:	33

14 Literaturverzeichnis

- [1] Fraunhofer IWES, „Projekt Blade Tester,“ Fördergeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Förderkennzeichen 0324157, 01.10.2011 - 30.06.2015.
- [2] Fraunhofer IWES, „Projekt MultiMonitorRB,“ Fördergeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Förderkennzeichen 0324157, 01.03.2017 - 29.02.2021.
- [3] M. F. a. S. Roth, Faserverbundbauweisen Eigenschaften, Springer Berlin Heidelberg, 2003.
- [4] G. W. Ehrenstein, Faserverbund-Kunststoffe, München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2006.
- [5] H. H. a. I. Daniel, „Elastic properties of composites with fiber waviness,“ *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Nr. 27(10):931-941, 1996.
- [6] K. P. K. H. a. W. J. Wang, „Experimental fabrication and characterization of out-of-plane fiber waviness in continuous fiber-reinforced composites,“ *Journal of Composite Materials*, Nr. 46(17): 2041-2053, 2012.
- [7] T. O. Brien, „Characterization, analysis and prediction of delamination in composites using fracture mechanics,“ 2002.
- [8] R. G. Cuntze, „Neue Bruchkriterien und Festigkeitsnachweise für unidirektionalen Faserkunststoffverbund unter mehrachsiger Beanspruchung,“ BMBF-Förderkennzeichen: 03N8002 Abschlussbericht, 1997.
- [9] A. Puck, Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten, München: Hanser Verlag, 1996.
- [10] I. I. O. f. Normung, Fibre-reinforced plastics: Determination of fatigue properties under cyclic loading conditions.
- [11] F. IWES, Projekt ReliaBlade, Projektzeitraum 2018 - 2023.
- [12] K. Kraske, „Fertigungsmethodik der Integration von Sensorsystemen in Rotorblättern zur Zustandsüberwachung,“ Bachelorarbeit, Bremerhaven, 2020.
- [13] D. Melcher, M. Bätge und S. Neßlinger, „A novel rotor blade fatigue test setup with elliptical biaxial resonant excitation,“ 2020.
- [14] M. Rosemeier und A. F. I. Antoniou, „Probabilistic Approach for the Fatigue Strength Prediction of Polymers,“ *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, p. 11, 2021.