

Schlussbericht vom 30.09.2022

zu IGF-Vorhaben Nr.20794N

Thema

Systematische Ursachenforschung von Erosionsschäden an Windenergieanlagen mittels Computertomographie (XRM) als Basis zur Schadensminimierung und Serviceoptimierung (SUrfErCut)

Berichtszeitraum

01.09.2019 bis 31.03.2022

Forschungsvereinigung

Deutsche Forschungsvereinigung für Mess-, Regelungs- und Systemtechnik e.V. (DFMRS)

Forschungseinrichtung(en)

- (1) Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und angewandte Materialforschung (IFAM)
- (2) Faserinstitut Bremen e.V. (FIBRE)
- (3) Universität Bremen, Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ)

Autoren:

Andreas Krenz¹, Christian Tornow¹, Oliver Focke², Elie Abi Aoun², Friederike Jensen³

Gefördert durch:

Inhaltsverzeichnis

1. Forschungsthema	3
2. Wirtschaftliche Relevanz für KMU	3
2.1. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	3
2.2. Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU	5
3. Wissenschaftlich-technischer Ansatz	7
3.1. Stand der Forschung und Entwicklung sowie eigene Vorarbeiten	7
3.1.1. Eigene Vorarbeiten	8
3.1.2. Untersuchungen mittels Röntgen-Computertomographie (μ -CT) und Röntgenmikroskopie (XRM)	9
3.1.3. Bildgebende und chemische Oberflächenanalyse mittels Laserkonfokal- (LSCM) und Lichtmikroskopie sowie Raster-Elektronenmikroskopie (REM)	10
3.1.4. Thermografische Struktur- und Randzonenanalyse	11
3.2. Forschungsziele	12
4. Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels	13
4.1. Materialauswahl, -beschaffung und Probenherstellung	16
4.2. Charakterisierung der Proben mit Kartografie des initialen Zustandes	16
4.3. Zyklische Belastungstests zur Erosionsbeständigkeit	17
4.4. Korrelation von Initialschäden und Erosionsschäden zur Aufklärung von Versagensmechanismen	17
4.5. Untersuchungen für eine fertigungsgerechte Messtechnik	18
4.6. Dokumentation und Berichte	18
5. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum	19
5.1. Probenherstellung (IFAM)	19
5.2. Regenerosionsversuche (IFAM)	22
5.3. Untersuchungen mittels Röntgencomputertomographie (μ -CT) und Röntgenmikroskopie (XRM) (FIBRE)	24
5.3.1. Funktionsprinzip	24
5.3.2. Festlegen der Messparameter	26
5.3.3. Bild-Datenanalysen	28
5.3.4. KI bzw. „Deep Learning Methoden“ zur Datenauswertungen	29
5.3.5. Schadensanalyse mittels μ -CT und XRM	33
5.4. Oberflächenanalyse mittels Streifenlichtprojektionsverfahren (IFAM)	36
5.5. Thermografische Struktur- und Randzonenanalyse (BIMAQ)	38
5.5.1. Anforderungskatalog und Messmethodenscreening	38

5.5.2.	Machbarkeitsuntersuchung thermografische Randzonenanalyse	39
5.5.3.	Demonstrator	55
5.5.4.	Evaluation	59
5.6.	Erosionsentwicklung – vom initialen Defekt zum Oberflächenschaden	59
5.6.1.	Charakterisierung der Proben mit Kartografie des initialen Zustandes und nach Erosionsbelastung	59
5.6.2.	Korrelation von Initialschäden und Erosionsschäden zur Aufklärung von Versagensmechanismen (Schadenskatalog).....	64
5.7.	Zusammenfassung und Ausblick.....	66
6.	Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen des Antrags.....	68
7.	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Ergebnisse	72
7.1.	Wissenschaftlich-technischer Nutzen.....	72
7.2.	Wirtschaftlicher Nutzen	73
7.3.	Innovativer Beitrag der erzielten Forschungsergebnisse	73
8.	Ergebnistransfer in die Wirtschaft.....	74
	Literatur	77
	Anhang – Schadenskatalog	81

1. Forschungsthema

„Systematische Ursachenforschung von Erosionsschäden an Windenergieanlagen mittels 3D Röntgen Mikroskopie Computertomographie (XRM)“ als Basis zur Schadensminimierung und Serviceoptimierung (SURfErCut)

Mit der fortschreitenden Entwicklung von Windenergieanlagen (WEA) als wichtige Technologie für erneuerbare Energien wurden immer größere Anlagen entwickelt, was zu sehr hohen Spitzengeschwindigkeiten an den Vorderkanten der großen Rotorblätter führt. Mit dieser Entwicklung haben auch die Schadensursachen und Auswirkungen der Regenerosion zugenommen [1]. Regenerosionsschäden an der Rotorblattoberfläche sowie der Rotorblattvorderkante verringern die Leistung und beeinträchtigen die Lebensdauer von Windkraftanlagen [2]. Dementsprechend ist die Regenerosion ein wichtiger Aspekt, der beim Betrieb von Windenergieanlagen berücksichtigt werden muss. In diesem Zusammenhang zielt das SURFERCUT-Projekt darauf ab, das Wissen über die Versagensmechanismen der Regenerosion aufgrund von Produktionsfehlern im Material, in den Beschichtungen und an den Schnittstellen innerhalb des Beschichtungssystems zu erweitern. Obwohl es Annahmen über Versagensmechanismen aufgrund von Produktionsfehlern etc. im Material, den Beschichtungen [3] und der Grenzfläche [4, 5] gibt, sind die Zusammenhänge zwischen dem Ausgangszustand des Rotorblattes vor der Erosionsbelastung und den auftretenden Versagensmustern noch nicht untersucht worden. Genau hier setzt das Projekt SURFERCUT an, um diese Wissenslücke über den Ursprung und die Ursachen von Erosionsschäden zu schließen. Das Projekt SURFERCUT basiert auf einem Ansatz zur Untersuchung der Entstehung und Ursachen von Regenerosionsschäden an Windenergieanlagenblättern. Ziel ist es, eine Korrelation zwischen Ausgangsdefekttypen sowie -größen und Erosionsschäden herzustellen, um die Ursachen und Mechanismen der Schäden zu klären. Dazu werden definierte Ausgangsdefekte in die Proben eingebracht, die mit 3D-Röntgenmikroskopie (XRM), Thermografie und bildgebenden oberflächenanalytischen Verfahren auf den Ausgangszustand hin untersucht werden. Anschließend werden die Proben in mehreren Zyklen in einem Regenerosionsprüfstand belastet. Zwischen diesen Belastungszyklen werden die Proben erneut vermessen, um den Fortschritt der Regenerosionsschäden beobachten zu können. Mit diesen Daten wird ein Defekt-mapping durchgeführt, um die Erosionsdefektwirkung entsprechender Ausgangsdefekte hinsichtlich Art, Größe und Position zu bewerten.

2. Wirtschaftliche Relevanz für KMU

2.1. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Rotorblätter von Windenergieanlagen sind Bauteile, die durch die Kombination aus einem Faserverbundkunststoff (FVK) für die strukturelle Festigkeit und einer funktionellen Beschichtung für das Strömungsverhalten ihre Aufgabe optimal erfüllen sollen. Die Beschichtungen der Rotorblätter, insbesondere der Rotorblattvorderkanten beeinflussen signifikant die Aerodynamik der Rotorblätter und damit die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems. Vor dem Hintergrund, dass an der Vorderkante Strömungsgeschwindigkeiten bis über 300 km/h auftreten können, sind hier die mechanischen und umweltbedingten Belastungen am größten, siehe Abbildung 1. Neben dem vorzeitigen Verschleiß an den Triebstrangkomponenten (z.B. Lager) begrenzen primär Erosionsschäden an den hochbelasteten Rotorblättern die Lebensdauer von WEA und führen zu hohen Wartungs- und Instandhaltungskosten.

Durch den Einsatz unter extremen Umweltbedingungen mit hohen Blattgeschwindigkeiten treten Schäden auf, deren initiale Ursache häufig in Fertigungsabweichungen liegen. Zugleich fehlt den KMU ein geeigneter Bewertungskatalog, mit dem sie Erosionsschäden im Rahmen der Sichtprüfung

bei Wartungsarbeiten frühzeitig identifizieren können, da sie nicht über die notwendigen Kenntnisse bzgl. der Mechanismen zur Schadensentstehung und -entwicklung verfügen. So werden Erosionsschäden häufig erst spät erkannt und nicht richtig interpretiert, sodass ein Austausch oder eine Reparatur erst dann durchgeführt wird, wenn der wirtschaftliche Schaden bereits immens ist.



a)

b)

Abbildung 1: a) WEA mit degradiertem Rotorblatt (<http://www.FAZ.net>), b) Detailaufnahme eines Erosionsschadens an einer WEA [6].

Im Rahmen der Strategie zur Reduktion der CO₂-Emissionen hat die Bundesregierung das Ziel, bis zum Jahr 2050 den Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung auf 80% zu erhöhen. Eine tragende Säule ist hierbei der weitere Ausbau der Windenergienutzung. Somit ist es unabdingbar, die Effizienz von WEA zu erhöhen sowie deren Langzeiteinsatz sicher zu stellen [7]. Untersuchungen zeigen, dass insbesondere Erosion und deren Folgeschäden an Rotorblättern zu wirtschaftlichen Einbußen in Höhe von über 2 Milliarden Euro pro Jahr führen [8, 9]. Für ein besseres Verständnis von Erosionsvorgängen, von der Schadensentstehung über die Schadensentwicklung bis zum völligen Bauteilversagen ist es erforderlich, die Schadensmechanismen systematisch zu untersuchen und zu dokumentieren.

Bisherige Untersuchungen auf dem Themengebiet zu Erosionsschäden zeigen, dass Inhomogenitäten (wie z.B. Luftblasen) im FVK oder in der Beschichtung diese maßgeblich begünstigen könnten. So zeigt Abbildung 2a eine beginnende Erosion im Lack. Ein Schliffbild in Abbildung 2b quer zur Lackoberfläche lässt erkennen, dass sich an der Erosionsstelle eine Pore im Harz unterhalb des Lacks befindet. Es gibt die Hypothese, dass Erosionsschäden bevorzugt an solchen Stellen auftreten [10].

Die aktuell angewandte Versagensanalytik (Belastung von Testproben im Erosionsprüfstand mit anschließender Bewertung der Schadensbilder mit Hilfe der Mikroskopie (vgl. Abbildung 2: Mikroskopieaufnahmen a) eines äußeren Erosionsschadens im Lack, b) eines Schliffes des Erosionsschadens mit darunterliegender Pore im Harz. b)) bezieht jedoch den Zustand der untersuchten Testproben vor der Erosionsbelastung sowie den zeitlichen Schädigungsfortschritt nicht in die Auswertung ein. Diese Vorgehensweise ist zwar ausreichend für die Bewertung und den Vergleich von unterschiedlichen Beschichtungssystemen, jedoch lassen sich Aussagen über die Erosionsursache oder Versagensmechanismen daraus nicht ableiten.

Die Unkenntnis über relevante Schadensarten und -größen verhindert bisher sowohl eine fundierte Bewertung sichtbarer Schäden bei der Rotorblattwartung im Freifeld als auch eine Optimierung der Rotorblatffertigung und der erforderlichen Dimensionierung der Erosionsschutzschichten. Sind

Schadensarten und -größen bekannt, können zudem bestehende zerstörungsfreie Prüfverfahren (z.B. Thermografie) optimiert und Messdaten aus diesen Verfahren besser interpretiert werden.

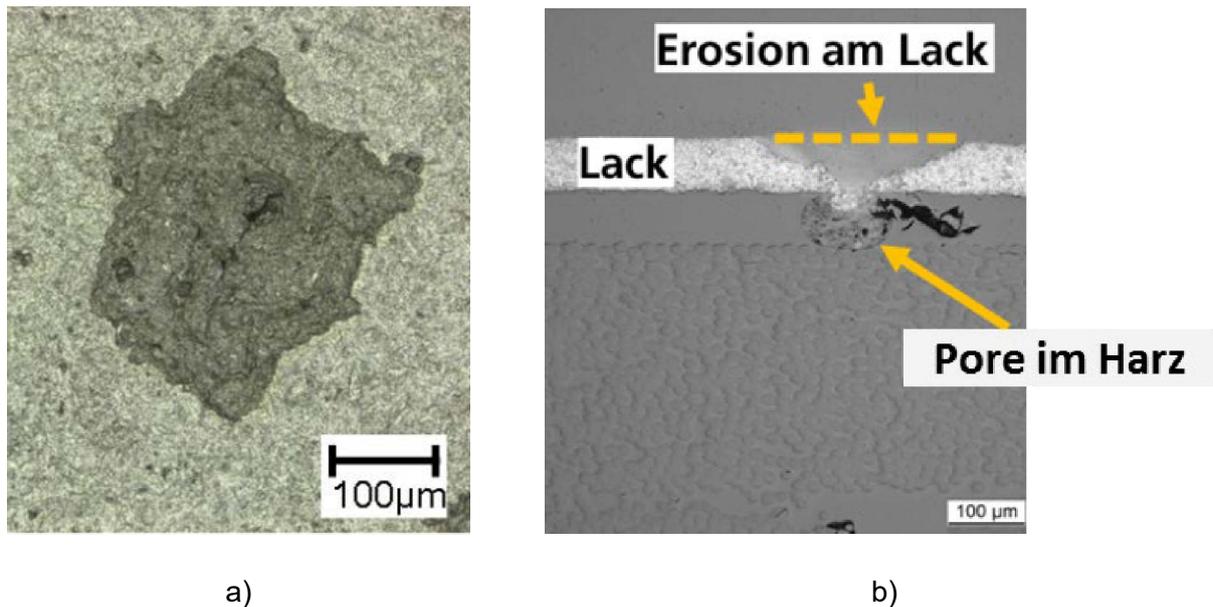


Abbildung 2: Mikroskopieaufnahmen a) eines äußeren Erosionsschadens im Lack, b) eines Schliffes des Erosionsschadens mit darunterliegender Pore im Harz.

Um eine Verbesserung des Gesamtsystems (und somit auch der Langlebigkeit des Rotorblatts) zu erreichen und ein umfassendes Verständnis aufzubauen, sind die bisher nicht erforschten Ursachen der Erosion sowie deren Früherkennung erforderlich.

Innerhalb des beantragten Forschungsvorhabens werden daher die Ursachen und der zeitliche Schädigungsfortschritt von Erosionsschäden bis zum Versagen unter Anwendung der zerstörungsfreien Röntgenmikroskopie (XRM) erforscht und die Anwendbarkeit weiterer berührungsloser Messverfahren, wie z.B. der aktiven Thermografie untersucht. Wenn es gelingt, mit Hilfe des Thermografie-Messverfahrens Aussagen für die Erosionsfrüherkennung und -charakterisierung zu treffen, steht den Anlagenherstellern und insbesondere den KMU der Wartungs- und Servicebranche erstmals ein berührungsloses Messverfahren für den Einsatz direkt am Rotorblatt zur Verfügung. Das ist zudem auch für den Einsatz im Service-Markt von WEA im Offshore-Bereich, mit der dort typischen zusätzlichen Erosionsbelastung durch salzhaltige Aerosole interessant.

2.2. Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU

Erosionsschäden an Rotorblättern und das mangelnde Verständnis für sie haben direkte und indirekte Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit von WEA.

Die direkten Auswirkungen liegen auf der Hand:

- Frühzeitiger, nicht gut verstandener Verschleiß führt zu kurzen Serviceintervallen, häufig auftretenden Schäden und dem Austausch von oder der Nacharbeit an Rotorblättern und damit verbunden zu hohen Kosten.

Die indirekten Auswirkungen sind aber nicht weniger kostenintensiv:

- Rotorblätter mit Erosionsschäden haben eine erhöhte Oberflächenrauheit und können den Verlauf der anströmenden Luft auf der Blattoberfläche erheblich beeinträchtigen. Hierdurch wird der Umschlag von der laminaren Grenzschicht zur turbulenten Grenzschicht weiter zur Blattvorderkante verschoben. Bei einer stärker ausgeprägten Vorderkanten-Erosion kann die

laminare Grenzschicht sogar völlig verschwinden. Insbesondere die Erosion der Vorderkante führt daher zu sehr großen Beeinträchtigungen des aerodynamischen Wirkungsgrades [11]. Neben dem erheblich geringeren Wirkungsgrad resultieren aus der Erosion zusätzliche Geräuschemissionen und aerodynamische Unwuchten, die aufgrund der verursachten erhöhten Lastwechsel die Lebensdauer des Rotorblattes und der Triebstrangkomponenten (z.B. Lager) deutlich verkürzen kann. Insgesamt können die Erosionen den Energieertrag und die Wirtschaftlichkeit der WEA erheblich verschlechtern. Nach einer Studie der Firma 3M bewirken Oberflächenerosionen durch Sand und Regentropfen eine Verringerung der Energieproduktion pro Jahr an WEA um über 20 % [7].

- Die zusätzlichen aerodynamischen Unwuchten führen zu vorzeitigen Ausfällen von Triebstrangkomponenten (z.B. Lager und Getriebe)
- Werden Erosionsschäden nicht frühzeitig genug erkannt, ermöglichen sie zudem das Eindringen von Feuchtigkeit in die Grenzschicht sowie in das Laminat selbst. Der Feuchteintrag begünstigt in den Rotorblättern erhebliche Folgeschäden bei Blitzeinschlägen, indem z.B. die eingedrungene Feuchtigkeit explosionsartig verdampfen und somit die FVK-Strukturen aufsprengen kann. Experten schätzen, dass jede WEA 0,6 bis einmal im Jahr von einem Blitz getroffen wird. In den überwiegenden Fällen wird dabei ein Rotorblatt getroffen [12].

Aus wirtschaftlicher Sicht ist es aus oben genannten Gründen sinnvoll, ein umfassendes Verständnis über die Entstehung (inklusive begünstigende Faktoren und deren Vermeidung) und die Früherkennung von Erosionsschäden zu gewinnen. Nur dann können geeignete Maßnahmen in Produktion (Defektminimierung) und Service (Früherkennung beginnender Erosion) und Instandhaltung (Auswahl der am besten geeigneten Reparaturmethode) getroffen werden.

Von den in diesem Forschungsvorhaben angestrebten neuen Erkenntnissen profitieren KMU entlang der gesamten Prozesskette bzw. der gesamten Betriebslaufzeit einer WEA. Rotorblatthersteller können zukünftig höherwertige, langlebigere Produkte herstellen. Windenergieanlagenbetreiber profitieren von den verlängerten bedarfsgerechten Prüfintervalen und verringerten Ausfallzeiten aufgrund von Bauteilversagen. Außerdem werden Triebstrangkomponenten (z.B. Kugellager) weniger stark beansprucht und vorzeitige Ausfälle vermieden. Für die Vermeidung und Früherkennung von Erosionsschäden sind geeignete Methoden zur Prozessüberwachung (Herstellung der Rotorblätter) und zur zerstörungsfreien In-Service Prüftechnik (Früherkennung) gefragt, so dass auch diese Branchen von den angestrebten Forschungsergebnissen profitieren. Besonders die beiden Bereiche des operativen Betriebs von WEA sowie deren Wartung und Instandhaltung liegen oftmals in der Hand von KMU. Der projektbegleitende Ausschuss dieses Forschungsvorhabens setzt sich unter anderem aus Vertretern von ebendiesen KMU zusammen.

Das neue Wissen bringt den Herstellern von FVK-Materialien, den FVK-Beschichtern sowie den Betreibern von WEA klare Wettbewerbsvorteile und Kosteneinsparungen durch eine verbesserte Effizienz und geringere Wartungskosten und verbesserte Informationen zur Instandhaltungsplanung und Reparaturdurchführung.

Es wird erwartet, dass mit Hilfe der Projektergebnisse die überwiegend aus der KMU-Branche stammenden Wartungs- und Serviceunternehmen ihren Kunden zukünftig bedarfsgerechtere Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten anbieten können.

Der europäische Wind-Service-Markt verfügt über ein starkes Wachstumspotential. Die Entwicklung und Prognose hierzu ist in Abbildung 3 zu sehen. Mit dem stetigen Anstieg der installierten Kapazitäten steigt auch ständig die Nachfrage nach Wartung und Instandhaltung sowie nach sonstigen technischen Service-Angeboten. Es wird erwartet, dass sich das Volumen des

europäischen Wind-Services-Marktes alleine im Onshore-Bereich von ca. 4,8 Mrd. Euro im Jahr 2011 auf ca. 8,8 Mrd. Euro im Jahr 2020 ausweitet [13].

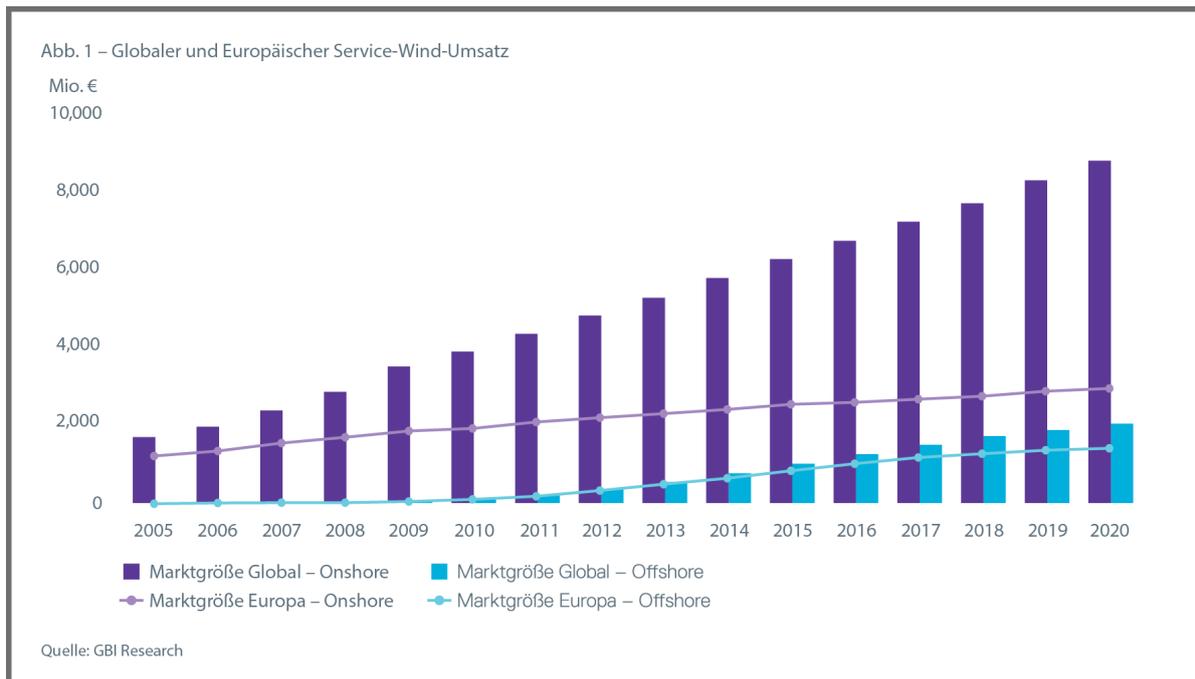


Abbildung 3: Entwicklung und Prognose des Marktvolumens im Bereich Service für WEA [13].

Die innerhalb des Forschungsvorhabens für Rotorblätter erzielten Ergebnisse können außerdem auf andere Branchen (z.B. Luftfahrt, Schiffbau etc.) übertragen werden, weil hier ebenfalls viele FVK-Bauteile eingesetzt werden, bei denen eine frühzeitige Erosionserkennung und Bewertung der Entstehung größerer Schäden wirkungsvoll vorbeugen kann.

3. Wissenschaftlich-technischer Ansatz

3.1. Stand der Forschung und Entwicklung sowie eigene Vorarbeiten

Zur Qualifizierung von FVK-Beschichtungssystemen für den Rotorblatteinsatz wurden Testproben gefertigt, im Erosionsprüfstand belastet und die Beschädigungen anschließend mittels zerstörender Messverfahren, z.B. Schlibbildanalysen bewertet. Der Testprobenzustand vor der Belastung wurde nicht betrachtet, kann jedoch für das Entstehen von Erosionsschäden in vielen Fällen maßgeblich sein. Mit Hilfe dieser richtlinienkonformen [14] Vorgehensweise gelingt zwar die Unterscheidung verschiedener Beschichtungssysteme bezüglich ihrer Performance, jedoch existieren bisher keine bestätigten Theorien, welche die Entstehungsmechanismen von Erosionsschäden erklären. Sie ermöglicht zudem keine Aussage bezüglich eines zu erwartenden zeitlichen Verlaufes des Schädigungsfortschrittes. Hieraus aber könnten wichtige Erkenntnisse für den frühzeitigen Nachweis von Schädigungen und zur Charakterisierung der Schädigung für die Reparaturplanung gewonnen werden. „Der frühe Nachweis und die zeitliche Verfolgung von Schädigungen und Versagen von Polymerbeschichtungen sind von großem Interesse für Lackhersteller und Anwender. Es gibt dazu jedoch nur wenige systematische Untersuchungen, und die Versagensmechanismen sind noch nicht vollständig verstanden [15].“

Es gibt bisher zwar Annahmen zu Versagensmechanismen aufgrund von fertigungsbedingten Fehlstellen etc. im Material, den Beschichtungen [3] und der Grenzfläche [4, 5], jedoch wurden die Zusammenhänge zwischen dem Ausgangszustand der Proben vor der Erosionsbelastung und den auftretenden Schadensbildern bislang noch nicht erforscht. Erosionsschutzkonzepte auf der Basis

von Folien sollen im Rahmen des Projektes nicht untersucht werden, da diese Systeme aufgrund bislang ungelöster Herausforderungen in Verarbeitung und Applikation bisher keine relevante Rolle im praktischen Einsatz spielen.

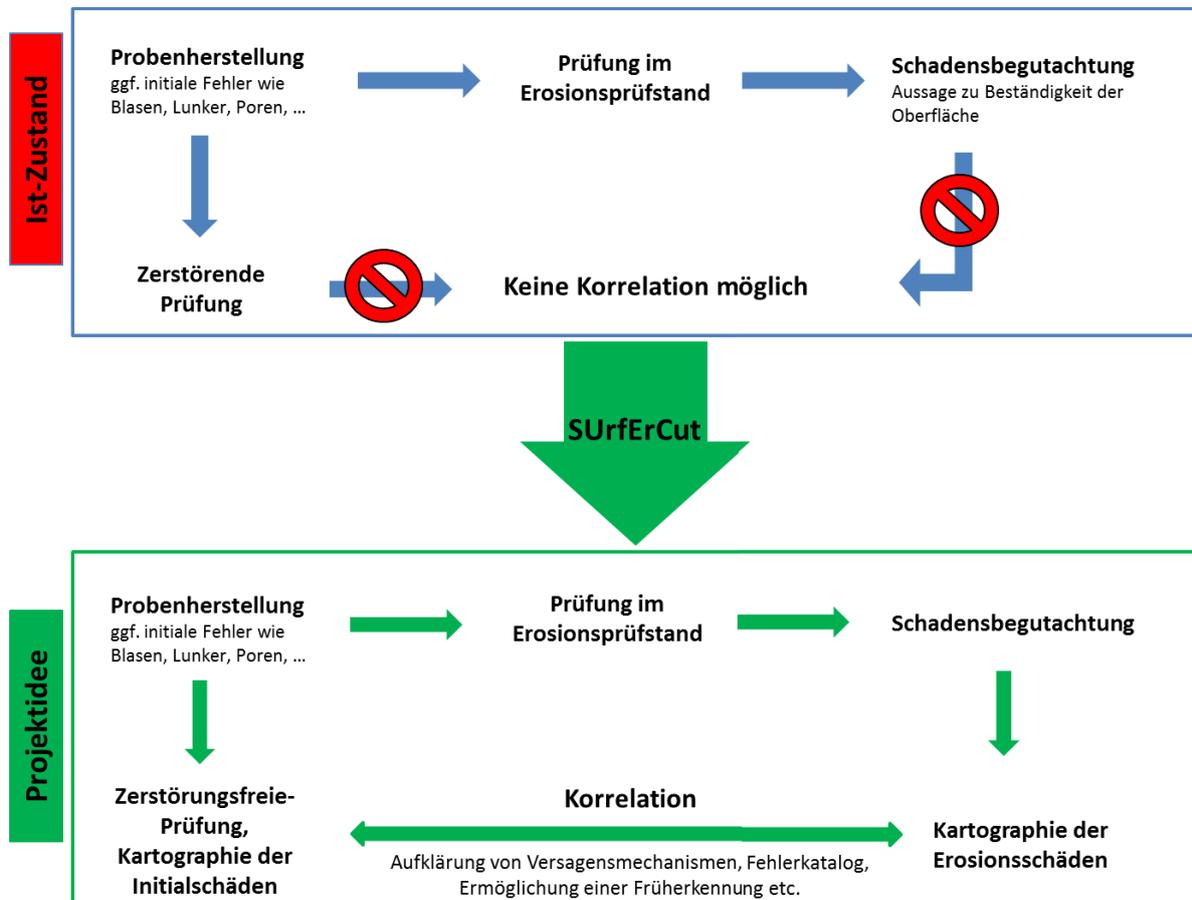


Abbildung 4: Ist-Zustand und Projektidee zur Identifizierung und Bewertung möglicher Initialschädigungen und Versagensmechanismen bei Erosionsschäden.

An dem Punkt der fehlenden Korrelation zwischen dem Zustand vor und nach der Erosionsbelastung wird dieses Projekt ansetzen, um eine Vermeidung sowie die frühzeitige Detektion beginnender Erosion zu ermöglichen, siehe Abbildung 4. Zu diesem Zweck erfolgt eine 100 % zerstörungsfreie Charakterisierung der beschichteten FVK-Probenkörper vor der Auslagerung im Erosionsprüfstand, unter anderem mittels XRM, aktiver Thermografie und bildgebenden Oberflächenanalyseverfahren wie der Laserkonfokal- (LSCM) und der Lichtmikroskopie. Die so untersuchten Probenkörper werden zusammen mit ihren Initialdefekten mittels Kartierung dokumentiert und stehen dann als Referenz für die zyklischen Belastungstests zur Verfügung.

3.1.1. Eigene Vorarbeiten

Zu den Analysemethoden, die im Vorhaben eingesetzt bzw. erprobt werden sollen, existieren in den beteiligten Forschungsinstituten bereits weitreichende Erfahrungen. Durch die Zusammenarbeit der beteiligten Forschungseinrichtungen im Rahmen des Projektes ergänzen sich die Kompetenzen und Techniken aller Partner optimal. Besonders die Kombination aus der Oberflächenanalytik am IFAM, den XRM-Untersuchungen am FIBRE und der Thermografie am BIMAQ mit der anschließenden Korrelation der jeweiligen Messergebnisse werden neue Erkenntnisse bzgl. der Ursachen und Mechanismen der Entwicklung von Erosionsschäden erwartet, vgl. Abbildung 5.



Abbildung 5: Probekörper mit unterschiedlich stark ausgeprägten Erosionsschäden (Vorgängerprojekt REGRO). Die Schäden können mit den Methoden der beteiligten Forschungseinrichtungen umfassend charakterisiert werden.

Die Thermografie kann als Verfahren, welches auch außerhalb von Untersuchungslaboren unmittelbar am Rotorblatt einsetzbar ist, insbesondere von KMU aus der Service- und Wartungsbranche angewendet werden. Für Messungen im Freifeld steht dem BIMAQ ein mobiles Thermografiemesssystem zur Verfügung, welches für die aerodynamische Rotorblattzustandserfassung (z.B. zur Planung von Wartungsarbeiten) auch Messungen aus größeren Distanzen bis zu einigen hundert Metern erlaubt und im Projekt als technische Grundlage zur Weiterentwicklung des Thermografiemessverfahrens dient.

3.1.2. Untersuchungen mittels Röntgen-Computertomographie (μ -CT) und Röntgenmikroskopie (XRM)

In den letzten Jahren hat die Röntgen-Computertomographie (μ -CT) in der materialwissenschaftlichen Forschung eine breite Anwendung gefunden [16–18]. Im Bereich der Faserverbundwerkstoffe liegt ihre besondere Stärke in der Erkennung von Defekten wie Poren [19], Hohlräumen und Delaminationen oder Rissen [20]. Darüber hinaus ist die Bestimmung der Faserorientierung in Kurzfaserspritzguss Bauteilen [21, 22] mittels der Röntgen-Computertomographie von großer Bedeutung, sowie die Durchführung und Analyse von in-situ Experimenten [22] zum tieferen Verständnis der Versagensmechanismen von Faserverbundwerkstoffen.

Zur röntgenbasierten Analyse von Erosionsschäden an den Vorderkanten von faserverstärkten Windturbinenblättern finden sich in der Literatur Arbeiten von Nash [23] und Mishnaevsky [24].

In [23] wurde eine zyklische Studie über die Degradation von plattenförmigen Glasfaserverbundstrukturen in einem Erosionsteststand durchgeführt. Eine Bewertung der Degradation wurde mittels μ -CT-Untersuchungen und Analysen durchgeführt. Es wurde der Abtrag der Beschichtung zwischen den einzelnen zyklischen Belastungen ermittelt. Die Voxelgröße betrug $14,8 \mu\text{m}^3$ (Nikon XT H 225 LC-Röntgensystem).

In den Untersuchungen von Mishnaevsky wurde ein 2 cm³ großer Ausschnitt einer im Regenerosionsprüfstand beanspruchten Flügelvorderkante entnommen und mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Röntgenmikroskopie (XRM, Zeiss Xradia 520 Versa) untersucht. Die untersuchte Probe umfasste sowohl intakte als auch beschädigte Bereiche. Mit einer Voxelgröße von 2 µm wurden die Defekte röntgenmikroskopisch erfasst und dokumentiert. Die Daten bildeten die Grundlage für eine computergestützte mikromechanische Modellierung des Einflusses von Struktur und Beschichtungseigenschaften auf die Degradation der Rotorblattvorderkante. Eine Kausalanalyse der Degradation wurde auf Basis der Simulation durchgeführt.

Die von der µ-CT erzeugten Daten sind sehr umfangreich. Mit etwa 2000 Querschnittsbildern pro Scan und einer Größe von etwa 8 GB erfordern die aus µ-CT-Messungen gewonnenen Teilbilder ein effizientes Datenverarbeitungssystem. In letzter Zeit wird der Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) für die automatisierte Auswertung großer Datensätze immer wichtiger. Die relevanteste Form der KI für die Verarbeitung von bildbasierten materialwissenschaftlichen Daten ist das maschinelle Lernen mit Deep Learning. Dabei sind Objekterkennung und semantische Segmentierung etablierte Konzepte der Bildverarbeitung. Die Idee hinter der Objekterkennung mit selbstlernenden Algorithmen ist, dem Code beizubringen, verschiedene Merkmale in einem Bild zu identifizieren. Dabei ordnet der Algorithmus einer Gruppe von Pixeln eine Kategorie zu. Bei der semantischen Segmentierung bilden alle Objekte desselben Typs eine einzige Klasse. Alle Teile des Bildes, die der gleichen Klasse angehören, werden zu einem einzigen Segment zusammengefasst. Im Bereich der Technik könnten diese Methoden zur Fehlererkennung in GFK-Bauteilen eingesetzt werden, um Poren, Risse, Ablösungen der Fasermatrix, Faserbrüche, durch die Matrix verursachtes Versagen und andere Fehlerursachen zu erkennen und zu unterscheiden. Dazu werden Datensätze von µ-CT-Schnitten benötigt, die dann in Trainings-, Test- und Validierungsdatensätze aufgeteilt werden. Darüber hinaus werden Deep-Learning-Tools wie "Data Augmentation" und "Transfer Learning" verwendet, um das iterative Lernen des Algorithmus zu erleichtern. Bang et al. kombinierten Thermografie-Tests mit Deep-Learning-Techniken, um Risse zu erkennen [25]. Badran et al. setzten Faltungsneuronale Netze (CNN) ein, um Phasen anhand von Form- und Kanteninformationen und nicht anhand von Intensitätsunterschieden zu unterscheiden, und segmentierten erfolgreich Phasen in einem unidirektionalen Verbundwerkstoff, der auch eine Beschichtung mit ähnlicher Bildintensität aufweist [26]. Solche Algorithmen sind auch für die Erkennung von Defekten geeignet. Diese neuronalen Netze verwenden Faltschichten, um die verschiedenen Merkmale eines Bildes, wie Kanten, Ecken und Linien, zu erkennen. Das Training eines solchen Netzes erfordert eine hohe Rechenleistung und eine geeignete Grafikkarte und kann zwischen 3 Stunden und mehr als 24 Stunden dauern. Diese moderne Art der Bildverarbeitung wird von Unternehmen wie Google, Amazon und Facebook genutzt. Der Open-Source-Charakter des Deep Learning bietet eine stetig wachsende Online-Community, die den Austausch mit anderen Wissenschaftlern, den Zugang zu Bilddatensätzen und zu bereits etablierten neuronalen Netzen wie U-Net [27] ermöglicht. Allerdings gelten nach wie vor Versuch und Irrtum und Learning-by-doing.

3.1.3. Bildgebende und chemische Oberflächenanalyse mittels Laserkonfokal- (LSCM) und Lichtmikroskopie sowie Raster-Elektronenmikroskopie (REM)

Das Fraunhofer IFAM bringt weitreichende Kompetenzen im Bereich der Charakterisierung und Bewertung von Oberflächen sowie in der Entwicklung von polymeren Beschichtungen in das Vorhaben ein. Zur materialwissenschaftlichen Charakterisierung von Oberflächen und zur Untersuchung der Schadensmechanismen bei der Regenerosion stehen spektroskopische Untersuchungsmethoden wie die X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) oder die Flugzeit-Sekundärionen-Massenspektroskopie (ToF-SIMS) sowie diverse mikroskopische Verfahren (z.B.

lichtmikroskopische Verfahren, Laserscanning Mikroskop (LSCM), Rasterelektronenmikroskopie (REM)) (Abbildung 6) und weitere Oberflächenanalysemethoden zur Verfügung.

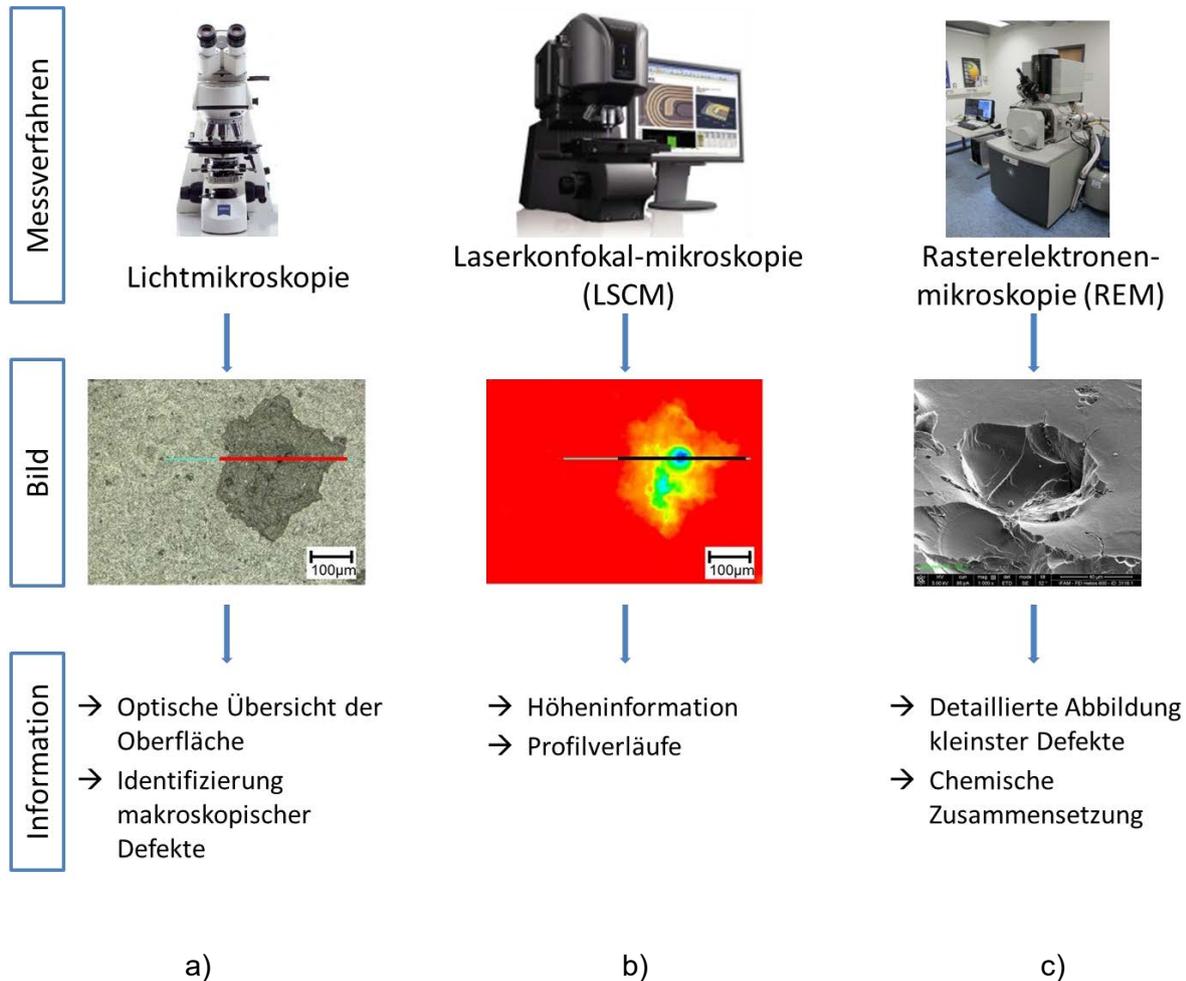


Abbildung 6: Übersicht über die im Projekt eingesetzten bildgebenden Verfahren, in a) und b) vergleichende lichtmikroskopische und Laserscanning Aufnahme, c) Gemini500.

Mit Hilfe des LSCM lassen sich Höhenprofile der beschädigten Oberflächen bestimmen, woraus sich charakteristische Daten über die Beschädigung, wie z.B. geometrische Eigenschaften (maximale Tiefe, Flankenwinkel, Rundheit, usw.) ergeben. Diese liefern wichtige Detailinformationen des Schadensbilds. Zusätzlich werden Dünnschliffe für Querschnitts-Aufnahmen der Probenkörper angefertigt. Diese werden mikroskopisch untersucht und liefern unter anderem wichtige Erkenntnisse über die Grenzschicht zwischen FVK und Beschichtung.

Zudem bestehen langjährige Erfahrungen hinsichtlich der Untersuchung von Ober- und Grenzflächenphänomenen an metallischen und polymeren Substraten sowie im Bereich der Entwicklung und Applikation von Lacksystemen. Eine weitere Kernkompetenz des Fraunhofer IFAM ist der Bereich FVK. Dies umfasst die gesamte Prozesskette der Materialentwicklung, der Produktion und Bearbeitung, sowie der Qualitätssicherung und Personalqualifizierung.

3.1.4. Thermografische Struktur- und Randzonenanalyse

Für die Untersuchung der Entwicklung von Regenerosionsschäden wird ein zerstörungsfreies Messverfahren benötigt, das die berührungslose Detektion von oberflächennahen Defekten in beschichteten und gekrümmten GFK ermöglicht und an Rotorblättern von Windkraftanlagen in der Fertigungsumgebung sowie im Freifeld anwendbar ist.

Da Erosionsschäden oft von unterhalb der Oberfläche entstehen und dann in Oberflächenschäden übergehen, ist es für die Inspektion von Rotorblättern wünschenswert, beide Schadensarten mit einem einzigen Messsystem erfassen und unterscheiden zu können. Neben der μ -CT ist die Infrarot-Thermographie ein besonders geeignetes Messverfahren zur Erfassung von oberflächennahen und oberflächlichen Schäden, da sie im Gegensatz zur μ -CT sehr flexibel und einfach im freien Feld an realen Windenergieanlagen eingesetzt werden kann. Das thermografische Messverfahren erlaubt zudem einen direkten Vergleich mit den Ergebnissen aus den oben vorgestellten Messverfahren. Im Bereich der Materialprüfung wurde bereits eine Vielzahl von thermografischen Untersuchungen durchgeführt. Meola et al. untersuchte die Schlagschädigung eines modifizierten glasfaserverstärkten Verbundwerkstoffs (GFK) mit aktiver und passiver Thermografie [28]. Während der Zustand der Proben vor und nach der Schlagbeanspruchung mit aktiver Thermografie erfasst wurde, wurde die Schadensausbreitung im Material während des Schlags aufgrund der inneren Materialreibung mit passiver Thermografie aufgezeichnet. Passive thermografische Aufnahmen der Schadensentwicklung bei mechanischen Schlägen auf GFK-Bleche durch Hämmer in einer Fallgewichtsprüfmaschine wurden von Katunin et al. durchgeführt [29]. Zhou et al. ging noch einen Schritt weiter und modifizierte seine Probekörper mit Gelkugeln auf Wasserbasis, die sich während der Laminierung in Luftblasen im Harz verwandeln, um Hohlräume zu imitieren, die während des Herstellungsprozesses entstehen könnten [30]. Die Proben wurden anschließend mit Zug belastet und mit passiver Thermografie untersucht, um zu zeigen, dass die Thermografie zur Erkennung der Luftblasenentwicklung während der Zugbelastung sowie zur Erkennung des kritischen Zustands der Blase und ihres Zerfalls verwendet werden kann. Sowohl Tuo et al. als auch Li et al. setzten CFK-Platten, die durch Stöße vorgeschädigt waren, einer Druckbelastung aus und konnten das Schadenswachstum von Delaminationen mittels Thermografie erfassen [31, 32]. Colombo et al. führten thermografische Untersuchungen an mit Delaminationen vorgeschädigten GFK-Platten durch und beobachteten das Schädigungswachstum unter Zugbelastung [33]. Alle Studien zeigen, dass die Thermografie genutzt werden kann, um den Zustand einer vorgeschädigten oder unbeschädigten Faserverbundplatte vor und nach unterschiedlichen Belastungen zu visualisieren und das eingetretene Schadenswachstum zu dokumentieren.

Bei der Betrachtung der bisherigen Arbeiten wurden beide notwendigen Aspekte, Regenerosionsversuche und thermografische Defektdetektion, meist getrennt betrachtet. Obwohl das Phänomen der Regenerosion zur Kategorie der Schlagschäden gehört, wurden bisher keine thermografischen Untersuchungen des gesamten Schadensverlaufs der Regenerosionsentwicklung durchgeführt. Unklar ist auch, ob der erfasste Schadenszustand eindeutig einem Schadensstadium zugeordnet werden kann und ob aus den thermografisch detektierten Defekten auf die Ursache des Schadens geschlossen werden kann. Eine weitere Herausforderung ist eine Defektdetektion, die nicht nur Defekte unterhalb der Oberfläche, sondern zusätzlich auch oberflächliche Schäden in einem gemeinsamen Bild detektieren kann und die in der Lage ist, beides automatisch im Hinblick auf eine zukünftige autonome Schadensinspektion zu unterscheiden.

3.2. Forschungsziele

Das übergeordnete Ziel des Forschungsvorhabens liegt in der Erhöhung der Lebensdauer von WEA und in der Steigerung der Effizienz während des Betriebs. Dies wird erreicht durch die systematische Identifizierung von Material- und Beschichtungsdefekten in Produktion und Betrieb, welche zu einer verringerten Erosionsbeständigkeit der Rotorblätter führen. Es soll ein umfassendes Verständnis für die Entstehung und Früherkennung von Erosionsschäden geschaffen werden. Hierfür essenziell ist das Auffinden von Zusammenhängen zwischen initialen Bauteileigenschaften und später auftretenden Erosionsschäden, um so einen besseren Einblick in die relevanten Versagensmechanismen und Einflüsse zu bekommen. Eine genaue Kenntnis dieser Mechanismen

ist für eine Optimierung des Herstellungsprozesses sowie des Wartungsservice zwingend erforderlich. Dieses Ziel soll anhand folgender Arbeitshypothese erreicht werden:

- Es gibt eine Korrelation zwischen initialen Bauteileigenschaften (z.B. FVK/Beschichtung) sowie den im Betrieb der WEA auftretenden Erosionsschäden. Mittels Kartierung (vor, zwischen und nach Erosionsbelastung) lassen sich diese eindeutig zuordnen.
- Aus dieser Korrelation lassen sich die Schadensarten und -größen verstehen, vorhersagen und durch geeignete Maßnahmen vermeiden.
- Bildgebende Analyseverfahren, u.a. hochauflösende XRM-Tomografieschnittbilder und Thermografie, ermöglichen eine hinreichende Auflösung zur Kartografie des initialen Probenzustandes sowie zur sicheren Detektion der auftretenden Schadensbilder nach der Erosionsbelastung.
- Die bei Testproben auftretenden Schadensbilder liefern eine hinreichende Aussage bezüglich der in der Realität vorkommenden Schädigungen.
- Durch eine zyklische Belastung der Testproben lässt sich das Fortschreiten der Erosionsschäden verfolgen. Dies ermöglicht eine zeitlich gestaffelte Beschreibung und Analyse der Versagensmechanismen. Infolgedessen wird eine Früherkennung ermöglicht.
- Die Messergebnisse bilden eine Grundlage für die Erstellung eines Anforderungskataloges für Messverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) von Rotorblättern, um im Anschluss der Fertigung und im Betrieb, die Schadensarten und -größen zu erfassen.

Dies eröffnet folgende Möglichkeiten:

- Die Identifizierung von zu vermeidenden/ zu erkennenden Defekte im Herstellungsprozess der Rotorblätter (inklusive des Beschichtungsprozesses).
- Eine Optimierung der Herstellungsprozesse sowie der eingesetzten Materialien und Beschichtungen.
- Ausgehend von Initialschäden eine bedarfsgerechtere Überwachung und besser planbarere Wartungsstrategien mit geeigneter Prüftechnik (z.B. Thermografie vor Ort im Freifeld an der laufenden WEA).
- Die Festlegung von Fehlertoleranzen für die Zerstörungsfreie Prüftechnik (ZfP) für Messungen in der Fertigung und an der laufenden WEA.

4. Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Der Weg zur Umsetzung des angestrebten Forschungsvorhabens ist in Abbildung 7 dargestellt. Mit Hilfe der bildgebenden Analyseverfahren werden Prüfkörper hinsichtlich ihres initialen Zustandes (Laminatlagen, Risse, Poren, Lackdicken sowie der Grenzfläche und weitere Fehlstellen) untersucht und kartographiert. Anschließend werden sie im Erosionsprüfstand realitätsnah belastet und erneut untersucht, um eine Korrelation zwischen Erosionsschäden und Schadenstypen und -größen herzuleiten. Während dieser Test werden fortwährend Analysen inklusive Kartierungen der Probekörper durchgeführt, um später nicht nur das Endresultat der Erosionsprüfung vorliegen zu haben, sondern auch den zeitlichen Verlauf der Erosionsschäden verfolgen zu können (zyklische Belastung und Analyse). Insbesondere dieser zeitliche Schädigungsverlauf und die örtliche Korrelation mit Hilfe der Kartierungen liefern wichtige Informationen zur Ermittlung der ursächlichen Schadensarten und der Versagensmechanismen.

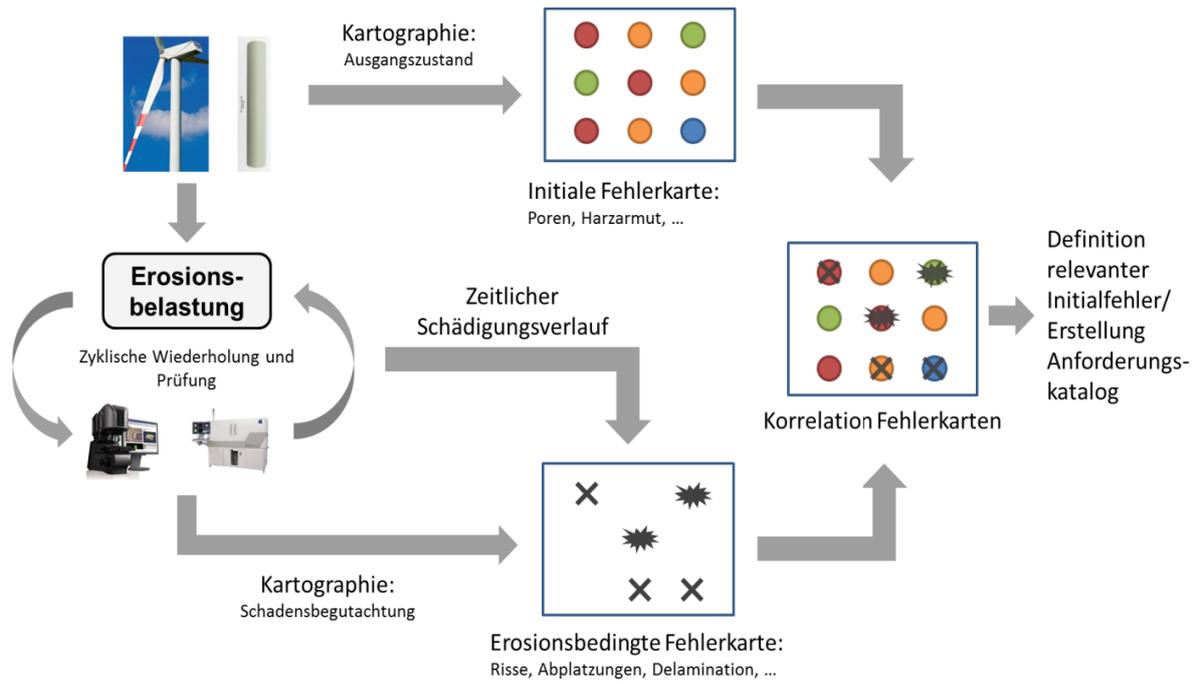


Abbildung 7: Schematische Darstellung der praktischen Umsetzung des geplanten Forschungsvorhabens.

Abbildung 8 zeigt die im Rahmen des Projekts zu bearbeitenden Arbeitspakete.

AP	Arbeitsschritte	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	Projektschritte																								
1	Materialauswahl, -beschaffung und Probenherstellung																								
1.1	Belastung PVC- und Sinterproben																								
1.2	Beschaffung der Materialien																								
1.3	Fertigung der Probekörper																								
2	Charakterisierung der Proben mit																								
	Kartographie des initialen Zustands																								
2.1	Abbildung und Analyse des Zustands aller Proben																								
2.2	Analyse des initialen Zustands der Problemflächen mit																								
	biogenen und chemischen Verfall																								
2.3	Formulierung des initialen Problems aus den Ergebnissen aus																								
	2.1 und 2.2																								
3	Zyklische Belastung zur Ermittlung der Erosionsanfälligkeit																								
4	Zyklische Untersuchung der Problemlösung nach Kartographie und Erosionsbelastung																								
4.1	Zyklische Untersuchung mittel XRM																								
4.2	Zyklische Untersuchung der Erosionsanfälligkeit mit biogenen und chemischen Verfahren																								
4.3	Zielabhängige Kartierung des Probenzustandes																								
5	Korrelation initialer und aktueller Zustände zur Ermittlung von Versagensmechanismen																								
	Schadenskatalog																								
5.1	Abgleich der initialen und aktuellen Zustände																								
5.2	Identifizierung von Versagensmechanismen																								
5.3	Erarbeitung eines Schadenskatalogs als allg. verfügbares Instrument für die Industrie																								
6	Fertigungsgerechte Erarbeitung eines Anforderungskataloges																								
6.1	Screening weiterer Messmethoden																								
6.2	Anwendung und Weiterentwicklung der IR-Endoskopie																								
6.3	Erstellung von Demonstratoren für den industriellen Einsatz der IR-Randsonde																								
6.4	Evaluation der IR-Technologie unter Feldbedingungen																								
7	Rekomendation und Berichterstattung																								
7.1	pubA-Sitzung																								
7.2	Zwischen- und Abschlussbericht																								

Abbildung 8 : Arbeitsplan des Forschungsvorhabens SUfErCut mit den Zeitpunkten der Projekttreffen.

4.1. Materialauswahl, -beschaffung und Probenherstellung

Für die Beständigkeit von Rotorblättern und insbesondere der Rotorblattvorderkanten sind sowohl das eingesetzte Substrat als auch das aufgetragene Beschichtungssystem von zentraler Bedeutung. Daher werden in diesem Arbeitspaket in Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss (pbA) praxisrelevante Gesamtsysteme aus Substrat (FVK) und Beschichtungssystem (Lack) als Grundlage für die Fertigung von Probekörpern festgelegt. Bei der Beschaffung des Probematerials ist ausdrücklich auch vorgesehen, auf Materialien der Mitglieder des pbA zurückzugreifen, um einen möglichst hohen Anwendungsbezug der Untersuchungen zu gewährleisten. Ebenso wird angestrebt, bei der Fertigung der Probekörper auf Kapazitäten der Mitglieder des pbA zurückzugreifen. Prinzipiell ist die Fertigung der Probekörper auch bei den durchführenden Forschungsstätten möglich. Der Fertigungsprozess spielt eine zentrale Rolle, wenn es um die Entstehung von Initialschäden sowie Materialeigenschaften geht. Daher ist eine gut dokumentierte, realitätsnahe Fertigung der Probekörper eine wichtige Grundlage für den weiteren Projektverlauf.

4.2. Charakterisierung der Proben mit Kartografie des initialen Zustandes

Um das Fortschreiten der Erosionsschäden verfolgen und Rückschlüsse auf die Schadensursachen ziehen zu können, ist eine genaue Kenntnis des Ausgangszustandes der gefertigten Probekörper und somit des Startpunktes des zeitlichen Schädungsverlaufes notwendig. Daher nimmt die Bestimmung des Ausgangszustandes der Probekörper eine zentrale Rolle im Projektverlauf ein. Zu diesem Zweck wird mittels bildgebender Verfahren eine initiale Analyse aller Proben hinsichtlich Laminatlagen, Risse, Poren, Laminat-Beschichtung und anderen Fehlstellen bzw. Abweichungen durchgeführt. Hierbei kommen die genannten bildgebenden und chemisch-analytischen Verfahren (hochauflösende Mikroskopie, XRM sowie die aktive Thermografie) zum Einsatz.

Die Messergebnisse werden kartographiert, um sie später direkt mit den Ergebnissen während der zyklischen Belastungstests (AP 3) abgleichen zu können. Als besondere Herausforderung ist hierbei die exakte Verortung und Verfolgung der Fehlstellen über die gesamte Versuchsreihe in der jeweiligen Probe mit den einzelnen Prüfverfahren aber auch vergleichend zwischen ihnen zusehen. Erst so ist eine genaue Beschreibung der Schadstellenentwicklung zu erreichen.

Speziell bei einer XRM-Messung werden bis zu 3000 Einzelbilder generiert. Eine manuelle Sichtung und Analyse ist daher nicht praktikabel. Im Projekt wird deshalb eine Analysesoftware zur automatisierten Auswertung der Bilddaten sowie zur Fehlstellendetektion entwickelt. Ein wesentlicher Aspekt ist dabei die Erkennung von Inhomogenitäten im FVK. Der erste Schritt besteht somit in der Segmentierung des XRM-Datensatzes. Die segmentierten Fehlstellen werden über im Rahmen des Projektes zu definierende Merkmale (Größe bzw. das Volumen, die Form, die Position, dabei insbesondere der Abstand zur Lackschicht) beschrieben und quantifiziert. So entsteht eine Kartographierung aller erkannten Fehlstellen in einer Defekt-map zu einem Zeitpunkt t .

Um die Ergebnisse der initialen Messung direkt mit den Ergebnissen während der zyklischen Belastungstests abgleichen zu können, ist eine Registrierung der zeitlich aufeinander folgenden Messungen in einem gemeinsamen Koordinatensystem notwendig. Dies wird über die Verwendung geeigneter in ihrer Position unveränderlicher Markierungen an der Probe gesichert. Sowohl die Registrierung der Daten als auch die Zuordnung der detektierten Defekte und Schäden über den zeitlichen Verlauf erfolgt mit Hilfe der im Projekt zu entwickelnden Auswertesoftware und ist auch auf die weiteren bildgebenden Verfahren anwendbar.

4.3. Zyklische Belastungstests zur Erosionsbeständigkeit

In diesem Arbeitspaket werden die Belastungstests zur Erosionsbeständigkeit an den Probekörpern durchgeführt. Diese Belastungen erfolgen zyklisch, um den zeitlichen Verlauf der Schädigung verfolgen und frühe Anzeichen für beginnende Schädigungen feststellen zu können. Hierfür steht eine große Auswahl an unterschiedlichen Tests zur Verfügung. In Voruntersuchungen hat sich gezeigt, dass realitätsnahe Schadensbilder durch die Belastung mit UV-Strahlung, Temperaturwechsel, sowie der im Regenerosionsprüfstand erreicht werden. Zusammen mit dem pbA werden die relevanten Belastungsarten (UV-Belastung, Temperaturwechselbelastung und Regenerosion) sowie deren Intensität und die Dauer der einzelnen Belastungszyklen abgestimmt. Nach jedem Belastungszyklus werden die Probekörper erneut mittels den in AP 2 bereits verwendeten, zerstörungsfreien Analysemethoden untersucht und erneut kartographiert (AP 4). So entsteht eine wachsende Defekt-map, welche den zeitlichen Verlauf der Schädigungen nachverfolgen lässt und für die systematische Untersuchung von Erosionsschäden im Vergleich mit der initialen Defekt-map (AP 2) für Korrelationen (AP 5) herangezogen wird. Charakterisierung der Proben mit Kartographie nach Erosionsbelastung

Um das Fortschreiten der Erosionsschäden verfolgen zu können, muss der Zustand der Probekörper während der Durchführung der Tests regelmäßig kontrolliert werden. Für diese zyklischen Untersuchungen werden die Probekörper kurzzeitig aus den Testumgebungen entnommen. Sie werden analog zu AP 2 mit hochauflösenden Mikroskopieverfahren, mit Verfahren zur großflächigen Erfassung der geometrischen Eigenschaften, thermografischen Messmethoden sowie mittels XRM untersucht. Dadurch ist es möglich, bereits kleinste Schädigungen der Oberfläche zu erkennen und folglich auftretende Erosionsschäden von ihrer Entstehung an zu verfolgen. Auch Schädigungen, die sich im Bereich des Substrates abspielen oder sich bis dorthin ausgebreitet haben, können dank der XRM-Messtechnik genau studiert werden. Alle diese Ergebnisse fließen in eine Kartierung der Veränderungen der Proben (zeitabhängige Kartierung) ein. Die auftretenden Schädigungen können dadurch sowohl räumlich als auch zeitlich genauesten verfolgt werden. Diese Informationen werden fortlaufend für die Arbeiten in den AP 5 und AP 6, der Korrelation zwischen Initial- und Erosionsschäden sowie den Voruntersuchungen für In-Service Überwachungsmethoden, genutzt.

4.4. Korrelation von Initialschäden und Erosionsschäden zur Aufklärung von Versagensmechanismen

Die inhaltliche Korrelation zwischen der Kartierung der Initialschäden aus AP 2 und den fortlaufend aktualisierten Karten der Schadensbilder aus AP 4 wird in diesem Arbeitspaket untersucht. Durch die Möglichkeit der zeitlichen Verfolgung der Ausbreitung von Erosionsschäden werden diese, wenn möglich, direkt zu ihrem Ursprung verfolgt. Dies erfolgt automatisiert auf Basis der in AP 2.3 erstellten Software. Im Idealfall kann somit eine direkte Korrelation zwischen dem Entstehungsort eines Schadens auf der Oberfläche mit einer ursächlichen Schädigung/Unregelmäßigkeit im Ausgangszustand des Probekörpers korreliert werden. Dadurch wird es möglich, die ursächlichen Schadensarten und -größen zu identifizieren. Durch die Erfassung dieser Informationen, ebenfalls mittels Kartierung, wird dann eine umfangreiche Beschreibung der Versagensmechanismen möglich. Zusammen mit theoretischen Betrachtungen zur Entstehung der Defekte lässt sich somit ein ganzheitliches Bild der Entstehung, Ausbreitung und Auswirkung von Schadstellen entwickeln. Die Informationen liefern anschließend die Basis zur theoretischen Betrachtung und zur Überprüfung von Versagenshypothesen aus der Literatur. Auf dieser Grundlage wird dann ein Schadenskatalog erarbeitet, der einen Überblick über die auftretenden Schadensbilder, deren Ursache und mögliche Strategien zur Lösung anbietet. Dieser Katalog steht als allgemein verfügbares Instrument der gesamten Industrie offen. direkt von der Wirtschaft genutzt werden.

4.5. Untersuchungen für eine fertigungsgerechte Messtechnik

Die systematischen Untersuchungen zur Erosionsbeständigkeit (AP 2 – AP 5) liefern als Ergebnis unter anderem Informationen darüber, wie Schädigungen an Rotorblättern im Anfangsstadium aussehen. Um das Auftreten von großflächigen Erosionsschäden zu vermeiden, werden Methoden gesucht, mit denen sich die Bauteile regelmäßig und ohne großen Aufwand in der Fertigung und bei der Wartung im Freifeld zerstörungsfrei auf beginnende Erosion untersuchen lassen. In diesem Arbeitspaket wird daher ein Anforderungskatalog erstellt, in dem definiert wird, welche Schadensarten und vor allem welche Schadensgrößen minimal erkannt werden müssen. Nur so lässt sich direkt beurteilen, ob eine Messmethode für die In-Service-Prüfung sowie zum Inline-Monitoring im Herstellungsprozess geeignet ist. Es folgt ein Screening bereits verfügbarer Messmethoden, die für die Fertigungsüberwachung und in der Wartung geeignet sind.

Darüber hinaus erfolgt eine Weiterentwicklung des bereits anerkannten aktiven und passiven thermografischen Messverfahrens seitens des BIMAQ, deren Einsetzbarkeit für Wartungsaufgaben im Freifeld vor Ort an der WEA untersucht werden soll. Dafür können bereits frühzeitig Proben aus den Vorversuchen und im Verlauf des Projekts auch aus den zyklischen Belastungstests für die Untersuchungen verwendet werden. Nach einer Evaluierung der am besten geeigneten Messmethode wird ein Demonstrator aufgebaut. Dieser soll auf Basis der Erkenntnisse im AP 5 in einer fertigungsnahen Umgebung zeigen, wie ein kommerzieller Sensor in der Qualitätssicherung eingesetzt werden kann. In der Evaluationsphase werden weitere Messmethoden aus dem Screening auf ihre praktische Eignung zur Erkennung der Defektgrößen hin untersucht.

4.6. Dokumentation und Berichte

In diesem Arbeitspaket erfolgt die Dokumentation der im Projektverlauf erzielten Ergebnisse, insbesondere der umfangreichen Resultate in Form des Schadenskatalogs aus AP 5, welche die Ergebnisse aus den über die gesamte Dauer der durchgeführten Tests anfallenden Messungen beinhalten. Die Übersicht und die inhaltliche Verknüpfung aller Arbeitspakete ist schematisch in Abbildung 9 dargestellt. Die Ergebnisse des Projektes werden in einem Abschlussbericht zusammengestellt und öffentlich zugänglich gemacht. Des Weiteren sind regelmäßige, halbjährliche Treffen mit den pbA-Mitgliedern geplant, um die aktuellen Ergebnisse zu diskutieren und auf die sich daraus ergebenden Vorschläge des pbA reagieren zu können.

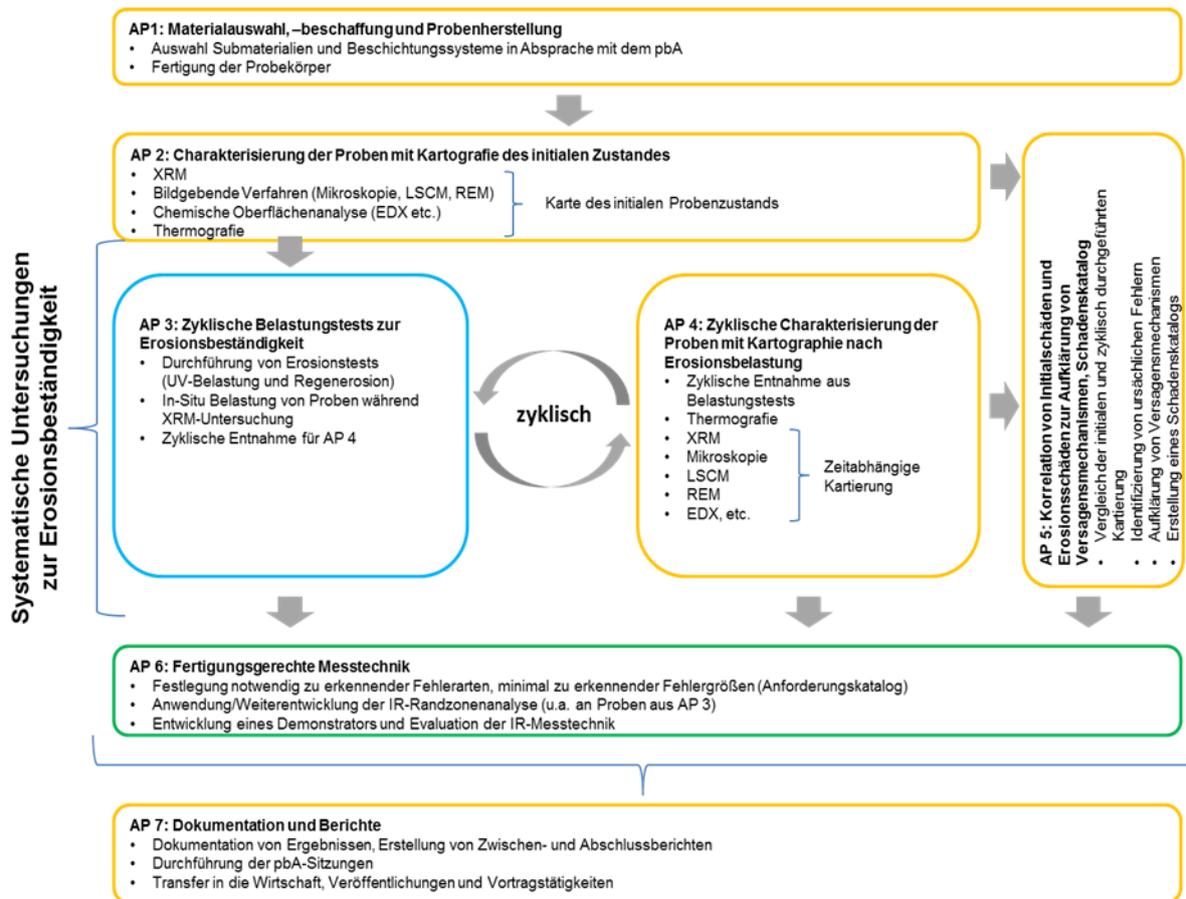


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Verknüpfung der Arbeitspakete und Projektteilnehmer.

5. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum

5.1. Probenherstellung (IFAM)

Um die Ähnlichkeit mit einer realen Rotorblattvorderkante einer WEA zu erreichen, wird der zu untersuchende Probekörper hinsichtlich der Geometrie und des strukturellen Aufbaus entsprechend angepasst. Das Beschichtungssystem wird genauso aufgebracht, wie bei realen Rotorblättern, so dass der gesamte Probekörper ein ähnliches thermografisches Verhalten aufweist wie die Vorderkante eines Rotorblatts einer Windkraftanlage, vgl. Abbildung 10a.

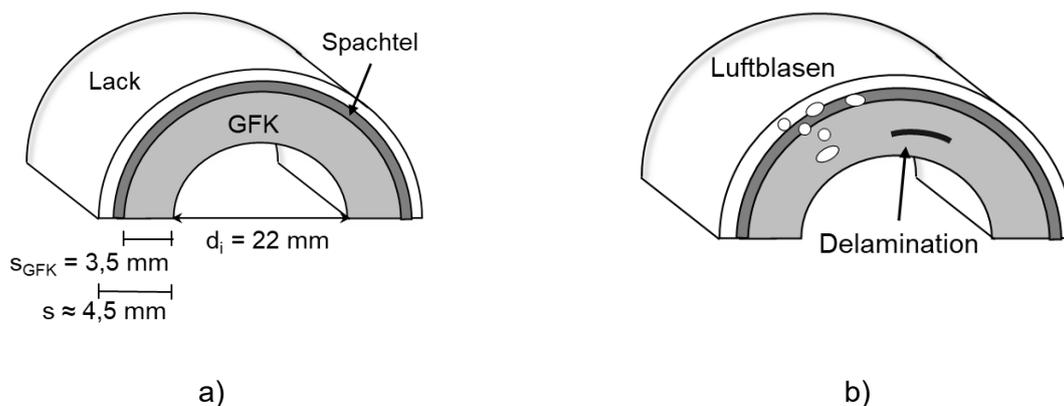


Abbildung 10: Schematische Darstellung a) der grundlegenden Probenstruktur sowie b) der Modifizierung einzelner Schichten.

Der Außenradius des Probekörpers einschließlich des Beschichtungssystems beträgt 14,75 mm. Zum Vergleich: Ein typisches Blattprofil von Windkraftanlagen, wie das NACA 4415 oder das NACA 23015 [34], hat bei einer Sehnenlänge von 1 m in der Blattmitte einen Vorderkantenradius von etwa 25 mm. Bei einer Sehnenlänge von 0,5 m im Spitzenbereich des Blattes (wo die Belastung am höchsten ist) hat die Vorderkante einen Radius von etwa 12 mm [35]. Der vorliegende Probenradius befindet sich daher im äußeren Drittel des Rotorblattes im Bereich der Spitze. Abbildung 10b zeigt schematisch die durchzuführenden Modifizierungen an den einzelnen Proben in gesammelter Darstellung.

Es wurden insgesamt 56 Proben gefertigt, eine Auflistung ist in Tabelle 1 dargestellt. Die Grundkörper wurden durch das Fraunhofer IWES im Unterauftrag hergestellt. Die GFK-Probekörper wurden am Fraunhofer IWES im Vakuuminfusionsverfahren hergestellt. Der Laminataufbau an der Probenoberfläche beträgt $\pm 45^\circ$. Die Laminatstruktur des Geleges (Oberfläche) ist: biaxial, biaxial, unidirektional, biaxial. Das spezifische Gewicht der Fasern beträgt: biaxial 830 g/m^2 und unidirektional 990 g/m^2 . Der Volumengehalt der Fasern liegt zwischen 50 % und 55 %. Das verwendete Harzsystem war RIM 135 mit dem Härter Typ: RIM 137 von Hexion. Die Beschichtung erfolgte durch die pbA-Mitglieder in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IFAM. Damit keine direkten Rückschlüsse auf das verwendete Beschichtungssystem möglich sind, wurden die Bezeichnungen „A“ und „B“ für die Beschichtungssysteme als Codierung eingeführt.

Tabelle 1: Auflistung der gefertigten Probekörper.

Beschichtungssystem	Initialdefekt (Kurzbezeichnung)	Anzahl der Proben (Nr.) mit $l = 236 \text{ mm}$	Anzahl der Proben (Nr.) mit $l = 50 \text{ mm}$
A	Luftblasen im GFK (L)	3 (1-3)	3 (4-6)
	Delamination im GFK (D)	3 (1-3)	3 (4-6)
	Luftblasen im Lack (B)	3 (1-3)	3 (4-6)
	Luftblasen im Spachtel (S)	3 (1-3)	3 (4-6)
	Referenz (R)	1 (1)	3 (2-4)
B	Luftblasen im GFK (L)	3 (1-3)	3 (4-6)
	Delamination im GFK (D)	3 (1-3)	3 (4-6)
	keine Defekte (B)	3 (1-3)	3 (4-6)
	Luftblasen in Lack und Spachtel (S)	3 (1-3)	3 (4-6)
	Referenz (R)	1 (1)	3 (2-4)

Für das Beschichtungssystem A wurden Proben mit vier verschiedenen Initialdefekten hergestellt. Die Buchstaben in der Probenbezeichnung in der Probenübersicht stehen für die folgenden Initialdefektarten:

L	Luftblasen im GFK	Einbringung durch Lufteinzug bei der GFK-Herstellung
D	Delamination zwischen einzelnen Lagen im GFK	Einbringung als Teflonfolie bei der GFK-Herstellung
B	Luftblasen im Lack	Einbringung von Styroporkugeln bei der Beschichtung
S	Luftblasen im Spachtel	Einbringung von Styroporkugeln bei der Beschichtung
R	Referenzprobe	Keine explizit eingebrachten Defekte

Für das Beschichtungssystem B wurden Proben mit drei verschiedenen Initialdefekte hergestellt. Hier werden die gleichen Buchstaben in der Probenbezeichnung verwendet, mit der Ausnahme, dass die es keine Differenzierung zwischen S und B Initialdefekten gemacht wird, sondern die Probe mit der Bezeichnung S initial im Spachtel und zugleich in der Beschichtung aufweist. Dieser Umstand ist auf einen Fehler bei der Probenbeschichtung zurückzuführen.

Exemplarisch ist in Abbildung 11a der Initialdefekt Luftpnezug im GFK-Verbundmaterial gezeigt. Dazu wurde bei der Herstellung der Probekörper bewusst Luftblasen im Vakuumprozess eingebracht. Hierbei wurden in der Lokalisation und Ausprägung undefinierte Defekte im GFK-Probekörper erzeugt, wie sie auch im realen Herstellungsprozess entstehen können. Delaminationen wurden in Form von Teflonfolien während des Laminierungsprozesse in das GFK eingebracht, siehe Abbildung 11b.



a)



b)

Abbildung 11: Mikroskopaufnahmen von a) Luftblasen im GFK-Probekörper als Initialdefekte L und b) von einer Delamination im GFK-Probekörper als Initialdefekt D.

Zur Imitation von Defekten im Beschichtungssystem wurden Styroporkugeln während des Beschichtungsprozess eingebracht. Diese Styroporkugeln weisen einen Durchmesser von $(1 \pm 0,4)$ mm auf und wurden direkt während des Beschichtungsprozesses des Spachtels bzw. dem Lack manuell eingebracht. Die Styroporkugeln mussten aufgrund ihrer elektrostatischen Eigenschaften mittels einer dünnen Unterschicht auf der Probenoberfläche angehaftet werden (vgl. Abbildung 12).



a)



b)

Abbildung 12: Einbringen der Styroporkugeln a) auf dünner Spachtel-Unterschicht und b) in die Spachtelschicht.

Diese Unterschicht wurde beim Spachtelmaterial mittels eines flexiblen Kamms so dünn wie möglich aufgebracht. Daraufhin wurde eine überdeckende Schicht des Spachtelmaterials final aufgetragen. Nach einer ausreichend langen Trocknungszeit wurde der Spachtel einen Tag später im ersten

Schritt maschinell und im zweiten Schritt manuell abgeschliffen, um die geometrisch korrekte Form der Proben herzustellen und eine ausreichend raue Oberfläche als Vorbereitung zur Beschichtung der Proben zu generieren. Für jede Defektart wurden zusätzlich zu den 236 mm langen Proben kürzere 50 mm Proben hergestellt. Diese kleineren Proben sollen eine noch genauere μ -CT-Untersuchung ermöglichen, wobei der Messraum der vorhandenen μ -CT-Anlage entsprechend begrenzt ist.

Für die Positionierung und Fixierung der Proben im Regenerosionsprüfstand wurden zusätzlich spezielle Probenhalter (vgl. Abbildung 13) konstruiert und gefertigt. Diese Probenhalter ermöglichen die Einspannung der langen (236 mm) und der kurzen (50 mm) Proben im Regenerosionsprüfstand. Die Einspannung der Proben erfolgt mit einem Niederhalter, mit dem die Proben an den Außenseiten mit einem Überstand von 3 mm eingespannt werden. Der Probenhalter ist für die variierende Beschichtungsdicke der Proben ausgelegt, sodass Proben mit eher geringerer Beschichtungsdicke durch eine Unterfütterung an den Außenseiten passend eingespannt werden können.



Abbildung 13: Probenhalter für die halbrunden Probekörper im Regenerosionsprüfstand für a) 236 mm Proben und b) 50 mm Proben

5.2. Regenerosionsversuche (IFAM)

Um die Auswirkungen von Initialdefekten auf die verfrüht einsetzende Regeneration zu untersuchen, müssen die hergestellten Probekörper mit Regen belastet werden. Dies geschieht in einem Regenerosionsprüfstand (vgl. Abbildung 14). Dazu werden die Probekörper außen auf einem Drehteller eingespannt. Während der Erosionsprüfung dreht sich die Scheibe mit den Probekörpern, welche gleichzeitig über einen Regengenerator mit Regen belastet werden.

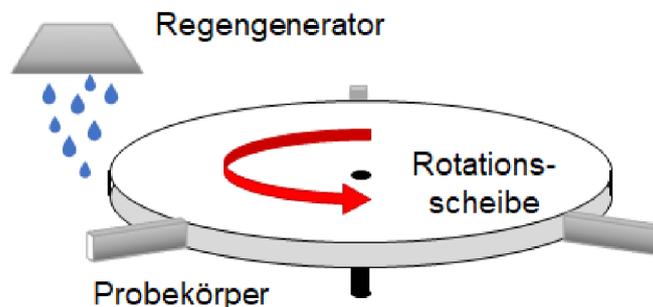


Abbildung 14: Schematische Darstellung der Regenerosionsanlage, die für die Regenbelastung der Prüfkörper im Projekt SurferCut verwendet wird.

Die Probekörper wurden im Leading Edge Lab des Fraunhofer IWES getestet, welches in Abbildung 15 dargestellt ist. Der hubschrauberähnliche Prüfstand enthält eine rotierende Scheibe, in der drei

Probekörper von 236 mm installiert werden können und die sich mit bis zu 140 m/s drehen kann. Vier Regentanks leiten Wassertropfen in 3 m Höhe über den Prüfling ein. Pro Test wurden drei Probekörper installiert. Nach den festgelegten Prüfintervalen wurden die Probekörper inspiziert.



Abbildung 15: IWES-Regenerosionstestmaschine

Dabei sollten die Parameter der Regenerosionsanlage so realitätsnah wie möglich sein. Da der Schadensfortschritt unter realen Bedingungen jedoch erst nach sehr langer Zeit eintritt, wurden die Parameter der Versuchsanlage so eingestellt, dass erste Erosionsschäden in einer akzeptablen Zeit von wenigen Stunden auftreten, vgl. Tabelle 2. Die Zeiten, in denen Erosionsschäden auftreten, variieren je nach Beschichtungssystem und Zustand des Probekörpers (Initialdefekte etc.) Die angegebenen Prüfparameter und der IWES-Prüfstand entsprechen der von DNV-GL empfohlenen Praxis [36].

Tabelle 2: Übersicht über die Parametereinstellungen der rotierenden Regenerosionsprüfanlage.

Rotationsgeschwindigkeit	120 m/s
Regentropfengröße	1-2 mm
Regenintensität	20 l/min
Umgebungstemperatur	23 °C

Abbildung 16 zeigt eine in der Halterung installierte Probe und Beispiele für Regenerosionsschäden.

Tabelle 3 zeigt eine Übersicht über die Testprozedur und die einzelnen Teillaufzeiten der durchgeführten Regenerosionsprüfung. Aufgrund des unterschiedlichen Erosionswiderstands der Beschichtung A und B wurden angepasste Laufzeiten für beide Beschichtungen bei den Regenerosionsversuchen gewählt. Die Laufzeiten wurden jeweils für beide Beschichtungssysteme auf Grundlage von Vorversuchsergebnissen abgeleitet.

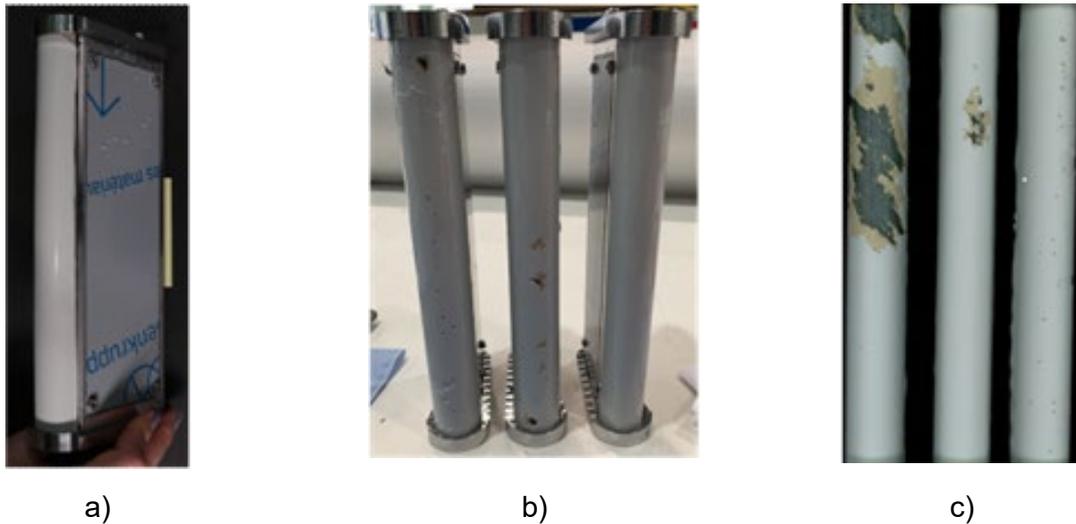


Abbildung 16: a) eingespannte Proben vor der Regenbelastung, b) eingespannte Proben während der Regenbelastung, c) Proben nach der Regenbelastung.

Tabelle 3: Übersicht über die Belastungszyklen

1.	Initialuntersuchung
2.	Erste Teillaufzeit Regenerosionsprüfung (A_Proben: 15 Min; B_Proben: 15 Min)
3.	Erste Zwischenuntersuchung
4.	Zweite Teillaufzeit Regenerosionsprüfung (A_Proben: 30 Min; B_Proben: 30 Min)
5.	Zweite Zwischenuntersuchung
6.	Dritte Teillaufzeit Regenerosionsprüfung (A_Proben: 90 Min; B_Proben: 120 Min)
7.	Dritte Zwischenuntersuchung
8.	Vierte Teillaufzeit Regenerosionsprüfung (A_Proben: 105 Min; B_Proben: 195 Min)
9.	Enduntersuchung: Gesamtlaufzeit Regenerosionsprüfung (A_Proben: 240 min (4h); B_Proben: 360 min (6h))

5.3. Untersuchungen mittels Röntgencomputertomographie (μ -CT) und Röntgenmikroskopie (XRM) (FIBRE)

5.3.1. Funktionsprinzip

Bei der Bildgebung wird das abzubildende Objekt von einer Röntgenquelle durchleuchtet und auf einem Röntgenfilm (Detektor) abgebildet. Es entsteht eine Projektion des Volumens auf eine Fläche. In Strahlrichtung hintereinander liegende Bildteile des durchleuchteten Körpers überlagern sich zwangsläufig. Dadurch kann beispielsweise nicht unterschieden werden, ob die im Röntgenbild sichtbare Schwächung durch ein Material höherer Absorption oder durch eine größere Schichtdicke hervorgerufen wurde.

Bei der industriellen μ -CT (Abbildung 17 und Abbildung 18) hingegen rotiert das Messobjekt zwischen dem Brennfleck welcher von einem fokussierten Elektronenstrahl auf dem Target (Röntgenquelle, Bremsstrahlung) erzeugt wird, in einem kegelförmigen Röntgenstrahl und einem Detektor, wodurch eine vergrößerte Abbildung auf einem Detektor entsteht (Abbildung 18). Der Detektorschirm besteht aus einzelnen, zeilenförmig oder matrixförmig angeordneten Zellen, den

Pixeln, welche separat die Röntgenstrahlung in digitale Signale wandeln. Dabei wird zunächst die Röntgenstrahlung mit Hilfe eines Szintillators in sichtbares Licht gewandelt. Die Intensität der Röntgenstrahlung I , welche den Detektor erreicht, ist abhängig von der Intensität der Röntgenquelle I_0 und des ortsgebundenen Absorptionsvermögens $\mu(x,y,z)$ des durchstrahlten Mediums. Das Absorptionsvermögen ist abhängig von der Dichte und Dicke des Mediums.

$$I = I_0 * e^{-\int_S \mu(x,y,z) dx dy dz}$$

Hierbei entstehen in jedem Pixel eindimensionale Absorptionsprofile des Objekts. Diese werden in jedem Winkelschritt bei einer minimalen Bauteilrotation von 180° aufgezeichnet. Erst die computergestützte Bildrekonstruktion, häufig erfolgt diese mit dem Algorithmus einer gefilterten Rückprojektion kann für jedes Volumenelement des Objektes (Voxel) ein Absorptionsgrad (Grauwert) ermittelt und anschließend ein 2D- Schnittbild mit einer Grauwertverteilung errechnet werden (Abbildung 17b).

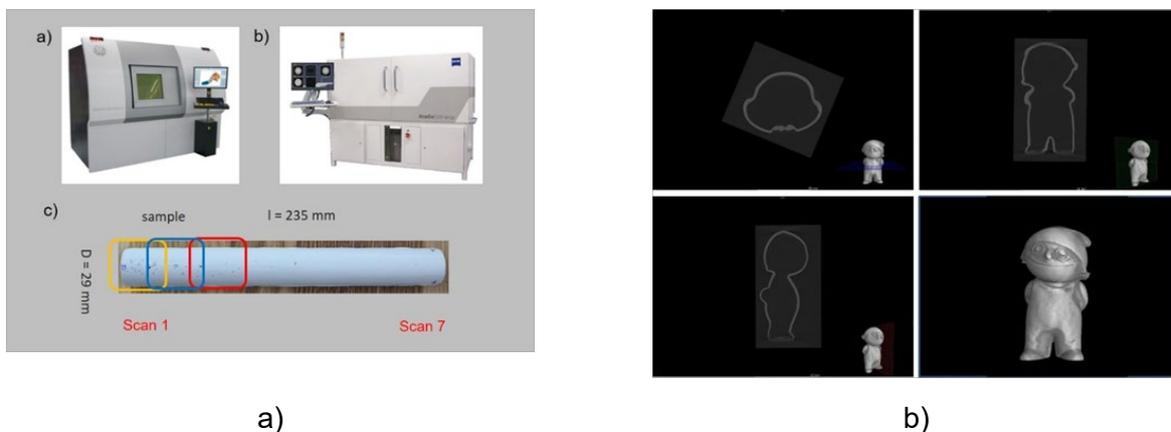


Abbildung 17: (a) Übersicht über den Röntgen-Computer-Tomograph (GE „Research Edition“), Nano-Fokus-Röhre: 180 kV / 15 W; Mikro-Fokus-Röhre 240 kV / 320 W; max. Objektgröße 600 mm x 280 mm), b) Röntgenmikroskop (X-Ray Röhre: 160 kV / 10 W; max. Objektgröße 50 mm x 50 mm; X-Radia 520 Zeiss), c) Objekt und Scaneinteilung; (b) Rückprojizierter Datensatz: 3D Darstellung und entsprechende Schnittbilder in VolumeGraphics.

Das Verfahren ermöglicht die Bauteilprüfung hinsichtlich der inneren Qualität und geometrischen Toleranz. Die Fehlernachweisgrenze bei der μ -CT bzw. die Auflösung (Abbildung 18 oben) variiert mit dem Prüfteilabstand zur Röntgenquelle und ist damit abhängig von der Bauteilgröße.

Im Gegensatz zum herkömmlichen μ -CT verwendet das XRM (Abbildung 18 unten) eine zweistufige Vergrößerungstechnik, die auf einer Synchrotron-Kaliberoptik basiert. Die geometrisch vergrößerte Projektion wird auf eine Szintillatorschicht projiziert, wobei die Röntgenstrahlen in sichtbares Licht umwandelt werden. Die Projektion wird über Vergrößerungsoptiken auf einen konventionellen CCD-Sensor abgebildet. Im XRM stehen hierzu eine 4x und 20x Vergrößerungsoptik, welche in einem Mikroskoprevolver verbaut sind, zur Verfügung. Der zweistufige Aufbau ermöglicht ein "Resolution at a Distance" (RaaD) Verfahren, welches große, flexible Arbeitsabstände bei gleichzeitig hoher Auflösung im Submikrometerbereich (räumliche Auflösung $< 700 \text{ nm}$) ermöglicht, ohne dass die Probe verkleinert werden muss.

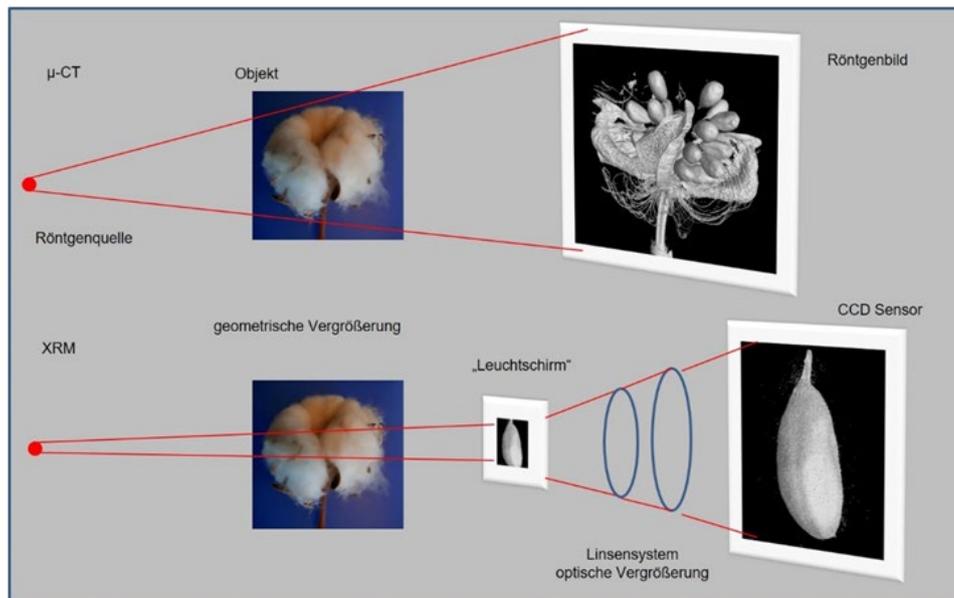


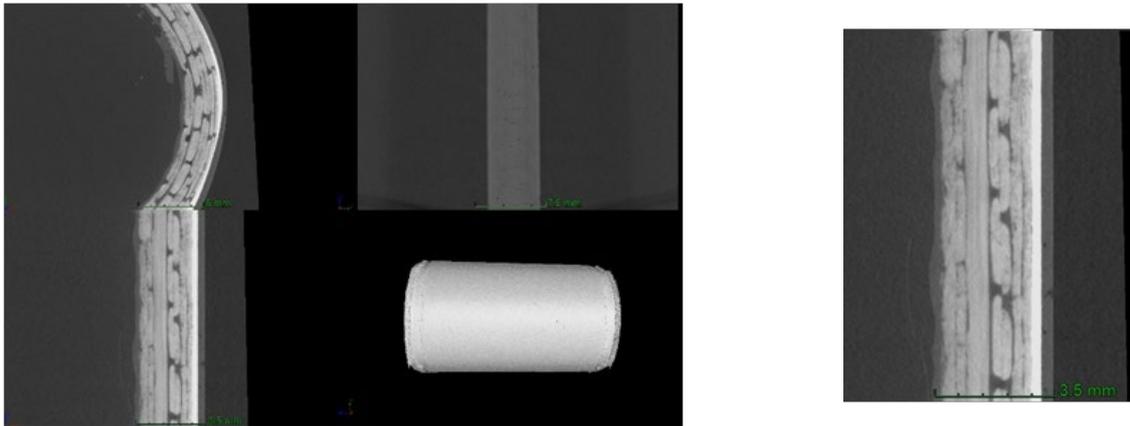
Abbildung 18: Schematischer Aufbau der Röntgentechniken; oben: μ -CT geometrische Vergrößerung. Zur maximalen Vergrößerung muss das Objekt daher nah an die Quelle platziert und verkleinert werden. Unten: XRM: geometrische und optische Vergrößerung (Zeiss), am Beispiel einer Baumwollkapsel und Samen. Eine Verkleinerung der Probe ist nicht notwendig.

5.3.2. Festlegen der Messparameter

Die Prüfkörper sollten mit einer maximalen Auflösung ohne das Auftreten von Messartefakten (Randeffekte, Strahlaufhärtung, ...) so gescannt werden, dass die Bilddaten mit einem maximalen Bildkontrast zur Separation der Materialien für die Bildanalyseverfahren vorliegen. Dazu wurden jeweils zwei Proben so im Prüfraum positioniert, dass sie ein zylindrisches Prüfobjekt ergeben. Rotationsachse des Prüfkörpers und des Manipulator-Tisches sind dann coaxial. Rotationsartefakte treten nicht auf, ein automatisierter Multiscan der Gesamtprobe nach (Abbildung 17 a (c)) ist dann durchführbar. Der Prüfkörper sollte zudem so im Bildfeld positioniert werden, dass er die Detektorbreite zu 3/4 bedeckt. Daraus ergibt sich eine Auflösung von $25\ \mu\text{m} - 27\ \mu\text{m}$ folglich wird der Probekörper durch sieben Teilscans erfasst. Die Teilscans werden allerdings nicht zusammengefügt, denn mit ca. 100 GB Größe übersteigt diese den Arbeitsspeicher der Workstation. Analysen werden für jeden Scan separat nach vorgegebenen Aufnahme- und Rekonstruktionseinstellungen durchgeführt, welche in Voruntersuchungen experimentell und analytisch ermittelt wurden. In Abbildung 3 zeigt eine Ergebnisdarstellung für eine solche Prüfkörper.

Zur Ermittlung der Einstellparameter wurden Beschleunigungsspannung, Filamentstrom, Anzahl der Projektionen (Winkelschritte), Integrationszeit, Anzahl der Bildaufnahme pro Winkelschritt (Mittelung) sowie Korrektoreinstellung wie das „Beam hardening“ bei der Rückprojektion der Bilddaten unter „Phoenix datos|x e reconstruction“ in Abbildung 20 variiert.

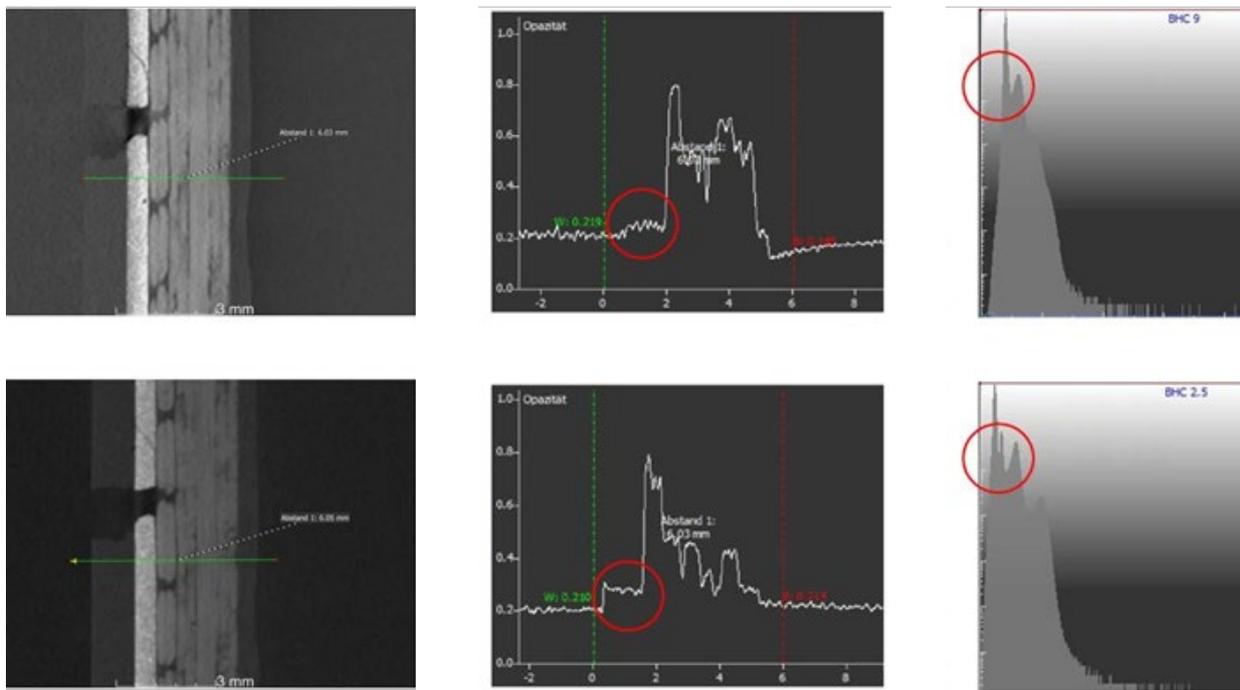
Eine Möglichkeit der Kontrastbewertung unter VolumeGraphics 3.2 ist in Abbildung 20 aufgezeigt. Spalte a zeigt das Histogramm (Intensität über Grauwerte) des gesamten Datensatzes. In Spalte b ist die Intensität über die Distanz der grünen Linie aus den jeweiligen Schnittbildern der Spalte a aufgetragen. Der Datensatz wurde mit unterschiedlichen Strahlaufweichung rekonstruiert. Der Vergleich im Histogramm (Spalte c, unten) zeigt zwei weitere Peaks. Zudem ist in der mittleren Spalte ein weiteres höheres Plateau, welches die Lackschicht repräsentiert erkennbar.



a)

b)

Abbildung 19: a) Darstellung der Messergebnisse in VolumeGraphics, in a) unten rechts 3D Bild sowie die drei Schnittbilder, oben rechts Vorderansicht im Bereich des Spachtels. In b) Vergrößerung aus a). Von links nach rechts 5 lagen GFK, Filler (helle Schicht) sowie Lackschicht mit einigen Fehlstellen (dunkle Punkte), zum Teil sind diese zur Oberfläche offen. Gesamtbreite der Probe beträgt 3,5 mm.



a)

b)

c)

Abbildung 20: Einfluss des „Beam hardening“. Spalte a) Die Unterscheidbarkeit der Lack-Luft Schicht ist im unteren Schnittbild deutlicher. Das zeigt sich auch in den Analysedarstellungen in der Spalte b und c. In der mittleren Spalte jeweils im Kreis sind die Opazitätswerte über die Distanz aufgetragen (grüne Linie in Spalte a). Diese ist im unteren Bild deutlich höher. Auch der Vergleich des Histogramms (Intensität über Grauwert) in Spalte c zeigt für das untere Histogramm im Kries ein Peak mehr, diese steht für die identifizierte Lackschicht.

Das Auffinden der Scaneinstellungen für die XRM-Messungen erfolgte unter „Scout and Scan“ anhand eines Leitfadens unter Einhaltung vorgegebener Schwellwerte. Bei der Anwendung an

Faserverbundmaterialien werden niedrigere Beschleunigungsspannungen gewählt, da diese einen höheren Kontrast im Bild und damit eine Separation von Materialien geringer Dichteunterschiede wie der Lackschicht und der Luft ermöglichen. Auf Basis der definierten Einstellungen erfolgt die Rekonstruktion automatisiert.

Die Durchführung von Detailaufnahmen mittels des XRM erfolgt in zwei Arbeitsschritten. Im ersten Scan wird die Probe gänzlich erfasst, die Daten rekonstruiert und im „XRM-Viewer“ visualisiert (3D in Abbildung 21a). Das ROI wird anhand des „Scout and Zoom“ Leitfadens festgelegt (Schnittbild in Abbildung 21a). Ein erster Übersichtsscan erfasst das gesamte $28 \times 30 \times 2 \text{ mm}^3$ große glasfaserverstärkte Objekt. Dabei wurde die 0,4-fach Vergrößerungsoptik genutzt. Die Pixelgröße beträgt $32 \mu\text{m}$. Sobald ein ROI bestimmt wurde, werden die Abstände zwischen Quelle, Objekt und Detektor entlang der optischen Achse entsprechend der gewünschten Vergrößerung eingestellt. Zudem kann das Bauteil senkrecht zur optischen Achse (Quelle - Detektor) so eingestellt werden, dass die ROI während der Bauteildrehung auf der optischen Achse bleibt. Anschließend wird eine zweite Messung bei erhöhter Auflösung durchgeführt (Abbildung 21b). Der zweite Scan erfasst ein Volumen von $2,8 \times 3 \times 1,8 \text{ mm}^3$ bei Verwendung des Objektivs mit einer 4-fachen Vergrößerung, die Pixelgröße beträgt nun $2 \mu\text{m}$. Die Messungen für ein $\mu\text{-CT-Scan}$ dauerte ca. 25 Minuten bei 1600 Winkelschritten. Aufgrund der niedrigen Strahlleistung beim XRM wurden 1,5 Stunden bzw. 3,5 Stunden für die ROI-Messungen benötigt.

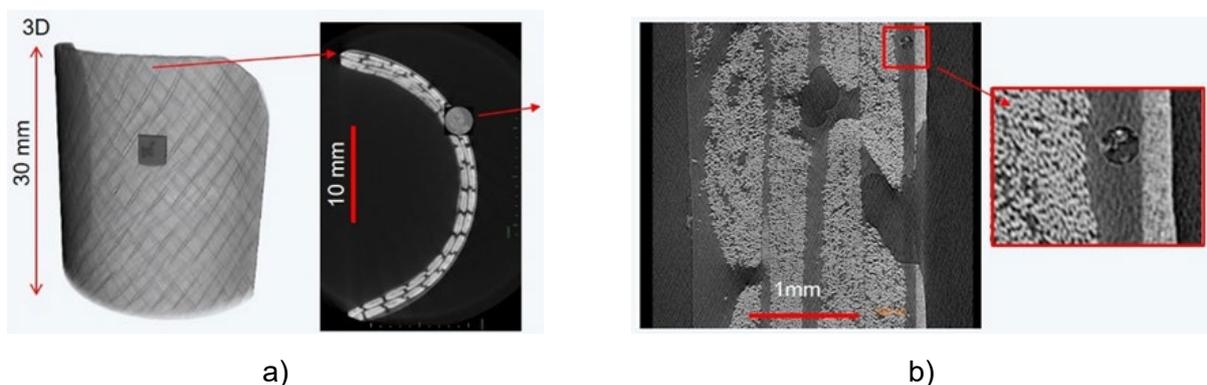


Abbildung 21: XRM-Scans: a) 3D-Ansicht des gesamten Objektes einschließlich dem ROI (dunkler Bereich) und das zugehörige Schnittbild mit markiertem ROI, b) ROI-scan als Schnittbild mit einer Pore in vergrößerter Ansicht (rotes Quadrat).

5.3.3. Bild-Datenanalysen

Abbildung 22 zeigt Darstellungen eines manipulierten Probekörpers aus hochauflösenden XRM-Messungen. Im Bereich der Spachtelmasse befinden sich Styroporkugeln. Deren Abdrücke hinterlassen in den Schnittbildern kreisförmige Strukturen unterschiedlichster Durchmesser. Erst in den 3D-Darstellungen werden die kugelförmigen Strukturen erkennbar. Die Poren lassen sich nach Position, Größe, Sphärizität und Größenverteilung in VolumeGraphics analysieren oder deren Volumen farblich kodiert visualisieren (Abbildung 22b). Die Analyse ist allerdings zeitintensiv, daher wurden im Weiteren KI bzw. „Deep Learning Methoden“ zur Datenauswertung genutzt.

Für jede Einzelmessung ergeben sich ca. 1000 Schnittbilder. Für jede Langprobe ergibt das 6000. Die Datenmenge erzwingt die Anwendung von „KI“ und „Deep Learning Methoden“ zur Segmentierung der Bilddaten, insbesondere auch zur Ermittlung der Degradation, welcher über einen Vergleich zum Referenzzustand im Anschluss der Belastungszyklen erfolgt. Eine Datenanalyse einer einzelnen Messung mit VolumeGraphics ist zeitaufwändig (2h – 3h), daher erfolgt diese nur referenzierend bzw. validierend zu den KI-Ergebnissen.

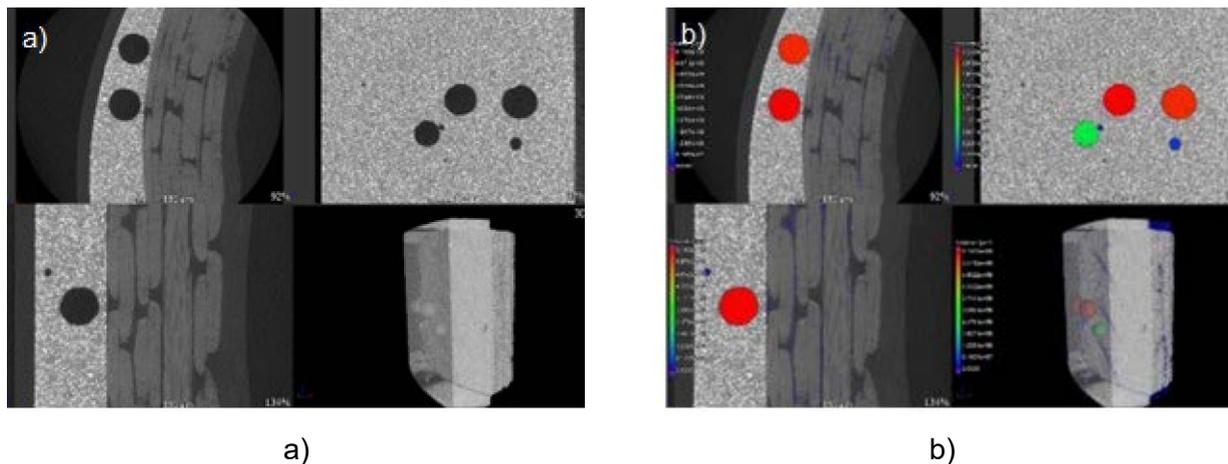


Abbildung 22: Bildanalyse an hochaufgelösten XRM-Daten einer Bauteilvorderkante. In a) Schnittbilder und 3D-Ansicht in VolumeGraphics ohne Analyse. Im Bereich des Spachtelauftrags befinden sich Partikel mit hoher Dichte (helle Punkte) sowie künstlich generierte Fehlstellen (Styroporkugeln) im Prüfkörper, b) Porenanalyse mit farblich kodierten Volumengrößen.

5.3.4. KI bzw. „Deep Learning Methoden“ zur Datenauswertungen

Künstliche Intelligenz (KI) in Form von Deep Learning und maschinellem Lernen hat im Bereich der Materialwissenschaften zunehmend an Bedeutung gewonnen. Der Einsatz von KI ist vor allem dann entscheidend, wenn es um die automatisierte Auswertung und Verarbeitung von großen Datensätzen geht. Mit ca. 1500 Querschnittsbildern pro Scan und einer Größe von ca. 8 GB sind Split-Bilder aus μ -CT Messungen ein Beispiel für ein KI-geeignetes Datenverarbeitungsschema.

In der aktuellen Arbeit wurden maschinelles (Machine Learning) und tiefes Lernen (Deep Learning) als Mittel zur Lokalisierung von Defekten in den zuvor beschriebenen Proben eingesetzt. Bei den Defekten handelt es sich hauptsächlich um Poren, die in der Beschichtung und/oder Spachtelschicht eingeschlossen sind, sowie um Poren im glasfaserverstärkten Laminat. Die größte Herausforderung, die den Erfolg von KI für technische Anwendungen einschränkt, ist die Verfügbarkeit von beschrifteten Datensätzen. Im vorliegenden Fall stehen keine μ -CT Bilder zur Verfügung, bei denen die Art und Lage der Defekte bekannt sind. Solche markierten Daten werden für das Training des neuronalen Netzes jedoch benötigt. Aus diesem Grund bestand der erste Schritt zur automatisierten Datenverarbeitung mit Hilfe von KI darin, aussagekräftige annotierte Daten zu erzeugen. Das Labeling erfolgte mit dem „Segmentation Wizard“ [37], einem kommerziell erhältlichen Tool von ORS Dragonfly [38], einer Bildverarbeitungssoftware.

Ein virtueller rechteckiger weißer Rahmen (siehe Abbildung 23) stellt einen Teil des Probekörpers vor einem schwarzen Hintergrund dar. Eine Beschichtungsschicht, eine Füllstoffschicht, ein glasfaserverstärktes Laminat, ein Überschuss der Matrix sowie eine Luftblase in der Beschichtungsschicht werden von dem Rahmen umschlossen. Eine semantische Segmentierung setzt voraus, dass jedes Pixel eines Bildes adäquat beschriftet ist. Wie in Abbildung 23 zu sehen ist, wurden einige Pixel jeder Materialschicht, des Hintergrunds und des Defekts manuell mit verschiedenen Farben gekennzeichnet. Dies ergibt insgesamt 7 Markierungen. Um die manuelle Beschriftung aller Pixel zu vermeiden, wurde maschinelles Lernen eingesetzt. Hier lieferte ein auf einem Entscheidungsbaum basierender Random-Forest-Klassifikator die Segmentierung des zu beschriftenden Rahmens in Abbildung 24.

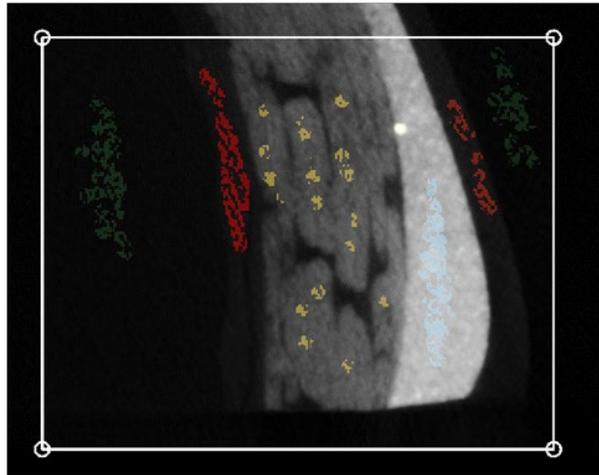


Abbildung 23: Pixelweise Beschriftung eines Slice.

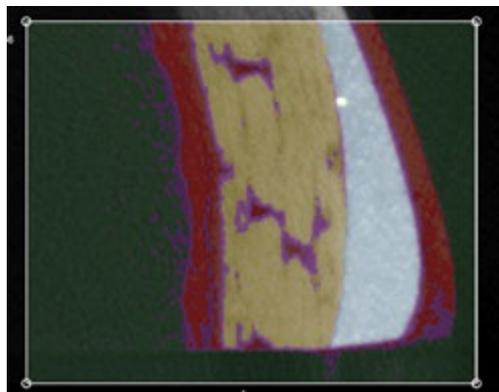


Abbildung 24: Etikettierung eines virtuellen Rahmens mit Hilfe einer Random-Forest-Klassifikation.

Die Ergebnisse des maschinellen Lernens sind vielversprechend. Dennoch waren zu diesem Zeitpunkt noch manuelle Korrekturen erforderlich, insbesondere beim Übergang zwischen den verschiedenen Materialschichten und bei der Erkennung der Defekte. Die manuell angepasste Random-Forest-Vorhersage liefert ausreichend gelabelte Pixel, um mit dem Training eines neuronalen Netzes zu beginnen. Convolutional Neural Networks (CNN) sind ein Standardwerkzeug für Deep Learning im Bereich der Bildverarbeitung. CNNs sind eine Kategorie von neuronalen Netzen und stellen eine Folge von Faltungen dar. Ein etabliertes neuronales Netz für die semantische Bildsegmentierung ist das von der Universität Freiburg entwickelte U-Net [27]. Dieses neuronale Netz wird häufig in der Medizintechnik eingesetzt, hier für die automatisierte Defekterkennung im Bauteil.

Das Training des neuronalen Netzes besteht darin, die Werte der Gewichte mittels Gradientenabstieg anzupassen, wobei das Ziel eine Fehlerminimierung ist. Die Entwicklung der Verlustfunktion ist in Abbildung 25 dargestellt.

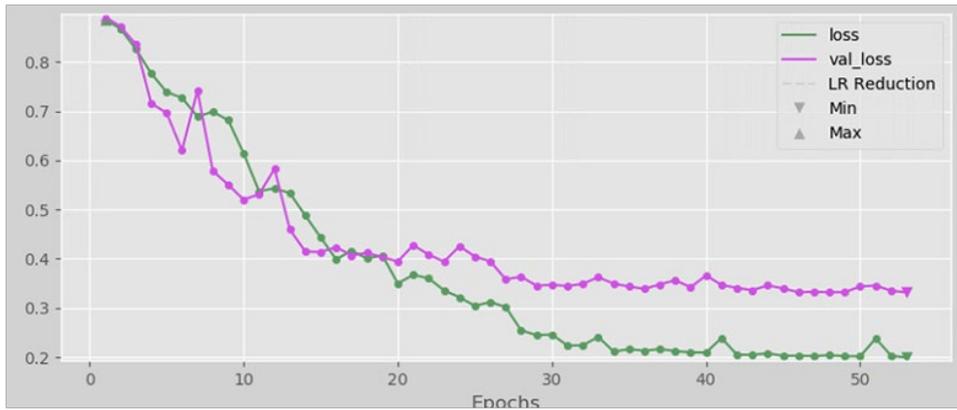


Abbildung 25: Verlustfunktion vs. Epochen während des ersten U-Netz-Trainings

Die grüne Kurve (Verlustfunktion) sinkt mit der Zeit, d. h. mit der Entwicklung des Trainings, was auf ein effizientes Training hinweist. Abbildung 26 zeigt den letzten Stand des Verlusttrainings nach dem letzten Training des U-Netzes.

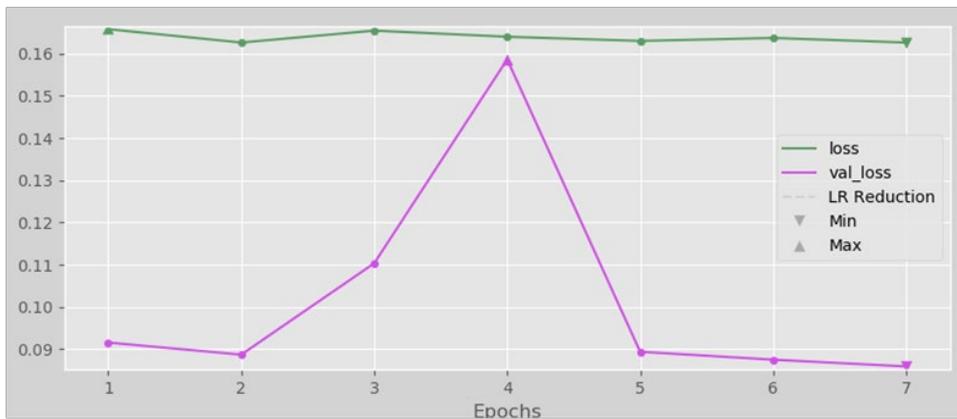


Abbildung 26: Verlustfunktion nach dem letzten U-Netz-Training.

Nach dem 10. Trainingszyklus stagnierte die Reduktion der Verlustfunktion (0,163). Die Fehlerminimierung (von 0,9 nach dem ersten Trainingszyklus auf 0,163 nach dem letzten Trainingszyklus) wurde erreicht. Abbildung 27 fasst Beispiele für die Ergebnisse der automatischen Segmentierung mit dem U-Netz zusammen.

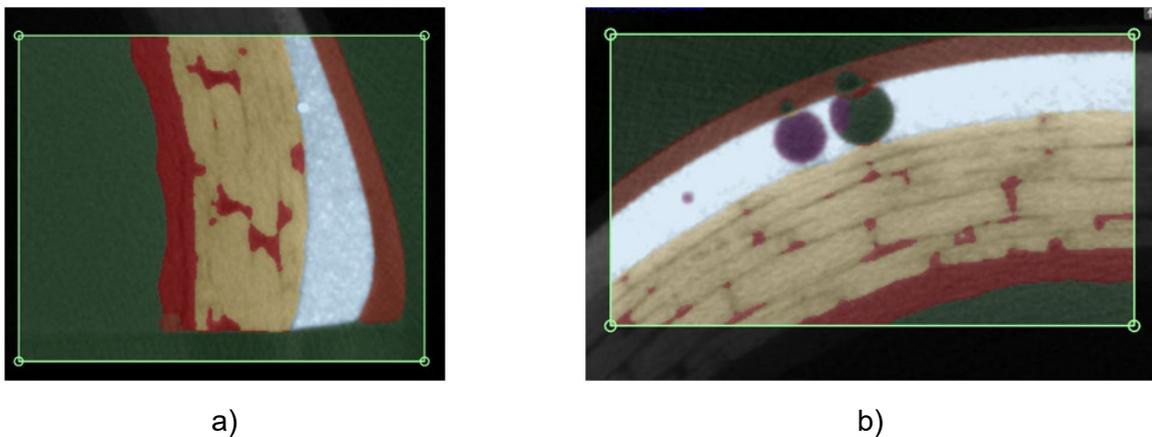


Abbildung 27: Automatische Segmentierung virtueller Bilder unter Verwendung des U-Net CNN im Segmentierungsassistenten.

Der Erfolg der Unterscheidung zwischen verschiedenen Materialschichten ist in Abbildung 27a zu sehen. Eine größere Herausforderung war die Identifizierung von Poren (in lila, Abbildung 27b). Die kleinen Poren wurden vollständig erkannt, die größeren dagegen nur teilweise. Außerdem wurde festgestellt, dass die Luftblasen in der Beschichtung, die sich über den Poren in der Füllstoffschicht befinden, nicht erkannt wurden. Insgesamt wurde das U-Netz 12-mal trainiert, wobei bei jedem Training ein zusätzlicher virtuell markierter Frame von verschiedenen Teilen der Probe in die Trainingsdaten eingespeist wurde. Die durchschnittliche Trainingsdauer betrug etwa 35 Minuten. Die erzielten Ergebnisse verbesserten sich jedoch nicht durch weiteres Training. Aus diesem Grund wurde ein Sensor 3D [39] CNN mit einer anderen Architektur untersucht, um bessere Ergebnisse zu erzielen.

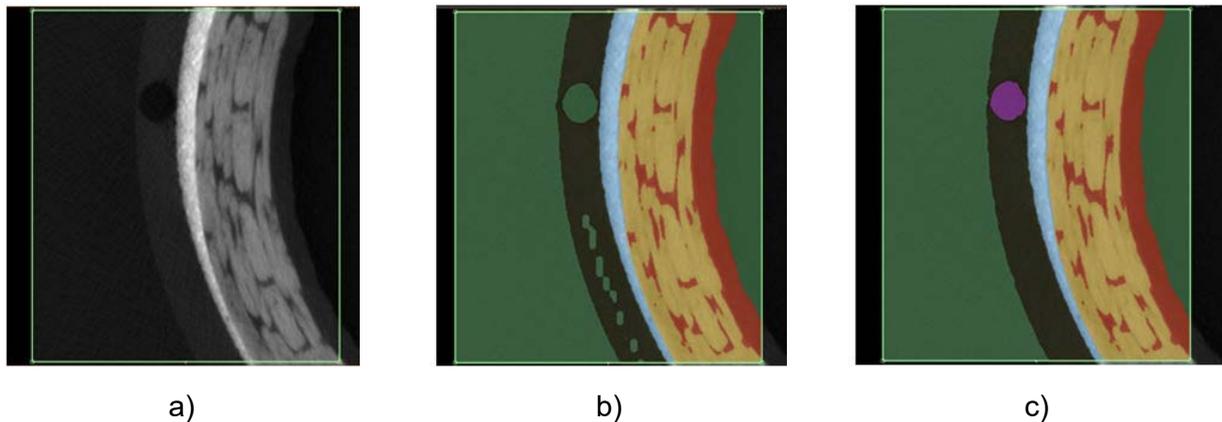


Abbildung 28: a) μ -CT-Slice Nr. 303 aus 2014 Bildern, b) Segmentierung mit U-Net, c) Segmentierung mit Sensor 3D.

Der Vergleich der erzielten Segmentierungsergebnisse mit dem U-Netz und den Sensor-3D-Modellen zeigt einen deutlichen Vorteil des Sensor-3D gegenüber dem U-Netz für den vorliegenden Zweck. Das Sensor-3D-CNN war nicht nur in der Lage, zwischen verschiedenen Materialschichten und dem Hintergrund zu unterscheiden, sondern die Defekte wurden auch vollständig lokalisiert. Die in Abbildung 28 gezeigten Ergebnisse mit dem Sensor 3D wurden nach 5 Trainingssequenzen, d.h. mit 5 gelabelten Bildern, erzielt. Allerdings ist das Training des Sensor 3D zeitaufwändiger als das des U-Netzes, mit einer durchschnittlichen Trainingsdauer von 68 Minuten.

Diese Version des Sensor-3D-Trainings mit der „Segmentation Wizard“-Toolbox wurde anschließend verwendet, um die Schnittbilder des μ -CT-Scans (insgesamt 2014 Schnittbilder) automatisch zu beschriften. Die Deep-Learning-Segmentierung erfordert eine grafische Rechenleistung, die in diesem Projekt durch einen NVIDIA Quadro M5000 mit einem GPU-Speicher von 8 GB bereitgestellt wurde. Sie war in der Lage, ein Sensor-3D-Modell mit 8.593.350 Parametern zu unterstützen. Die 3D-Ergebnisse sind in Abbildung 29 dargestellt.

Der schwarze geometrische 3D-Halbzyylinder stellt die gescannte Probe dar, die in lila gefärbten Kugeln sind die Defekte. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Ergebnisse der KI mit den Ergebnissen der Nachbearbeitung der Infrarotmessungen übereinstimmen. Darüber hinaus ist festzustellen, dass der Sensor 3D die Artefakte und das Rauschen sowie die beiden Enden der Probe und die Längskanten als Poren bezeichnet hat. Dies zeigt deutlich, dass ein weiteres Training des CNN erforderlich ist, um den Effekt des Rauschens zu berücksichtigen. In zukünftigen Untersuchungen wird vor dem Training und der Segmentierung ein Filter zur Entfernung von Ring-Artefakten auf den Datensatz angewendet. Nach dem ersten Belastungszyklus im Regenerationsprüfstand wurde die Probe erneut gescannt und das gleiche Verfahren auf den neuen Datensatz angewandt. Die Ergebnisse sind in der folgenden Abbildung 30 dargestellt.

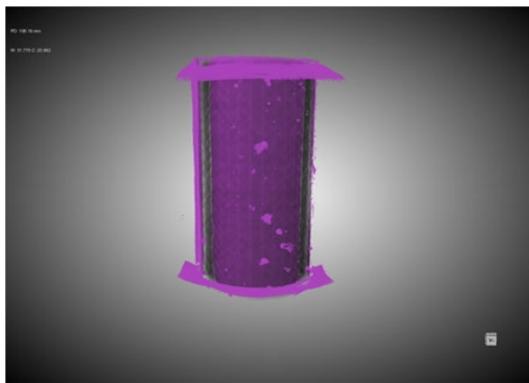


a)



b)

Abbildung 29: Defekterkennung im Ausgangszustand in zwei unterschiedlichen Ansichten.



a)



b)

Abbildung 30: Entwicklung der Defekte nach einem Belastungszyklus in zwei unterschiedlichen Ansichten.

Die Auswirkungen von Rauschen und Ringartefakten sind in diesem Scan deutlich sichtbar. Dennoch wurden die Defekte erfolgreich lokalisiert. Es ist festzustellen, dass die Poren durch die Regenerosion an Größe zunehmen. Die begrenzte Anzahl von Parametern, die mit dem verfügbaren Grafikprozessor erreicht werden kann, deutet auf die Notwendigkeit hin, Cloud Computing einzubeziehen. Ein 24-GB-Grafikprozessor wäre in der Lage, mehr Parameter zu berücksichtigen; die Datenverarbeitung wird jedoch aufgrund der Anzahl der Proben und der damit verbundenen Anzahl der erforderlichen Scans weiterhin zeitaufwändig sein. Das trainierte CNN zeigte eine hohe Genauigkeit, da ein Training auf der Basis einer Handvoll Frames für die Segmentierung des gesamten Datensatzes ausreichend war. Zukünftig muss eine Trainingsstrategie entwickelt werden, um die Robustheit des CNN zu gewährleisten. Tatsächlich zeigten sowohl das U-Net als auch Sensor 3D schlechte Ergebnisse für Scans mit unterschiedlichen Auflösungen und/oder unterschiedlichem Fokus-Objekt-Abstand und Fokus-Detektor-Abstand sowie Vergrößerung.

5.3.5. Schadensanalyse mittels μ -CT und XRM

Im folgendem wird die Degradation an einer Probe mit Poren im Spachtel und eine mit Poren im Lack gezeigt, siehe Abbildung 31.

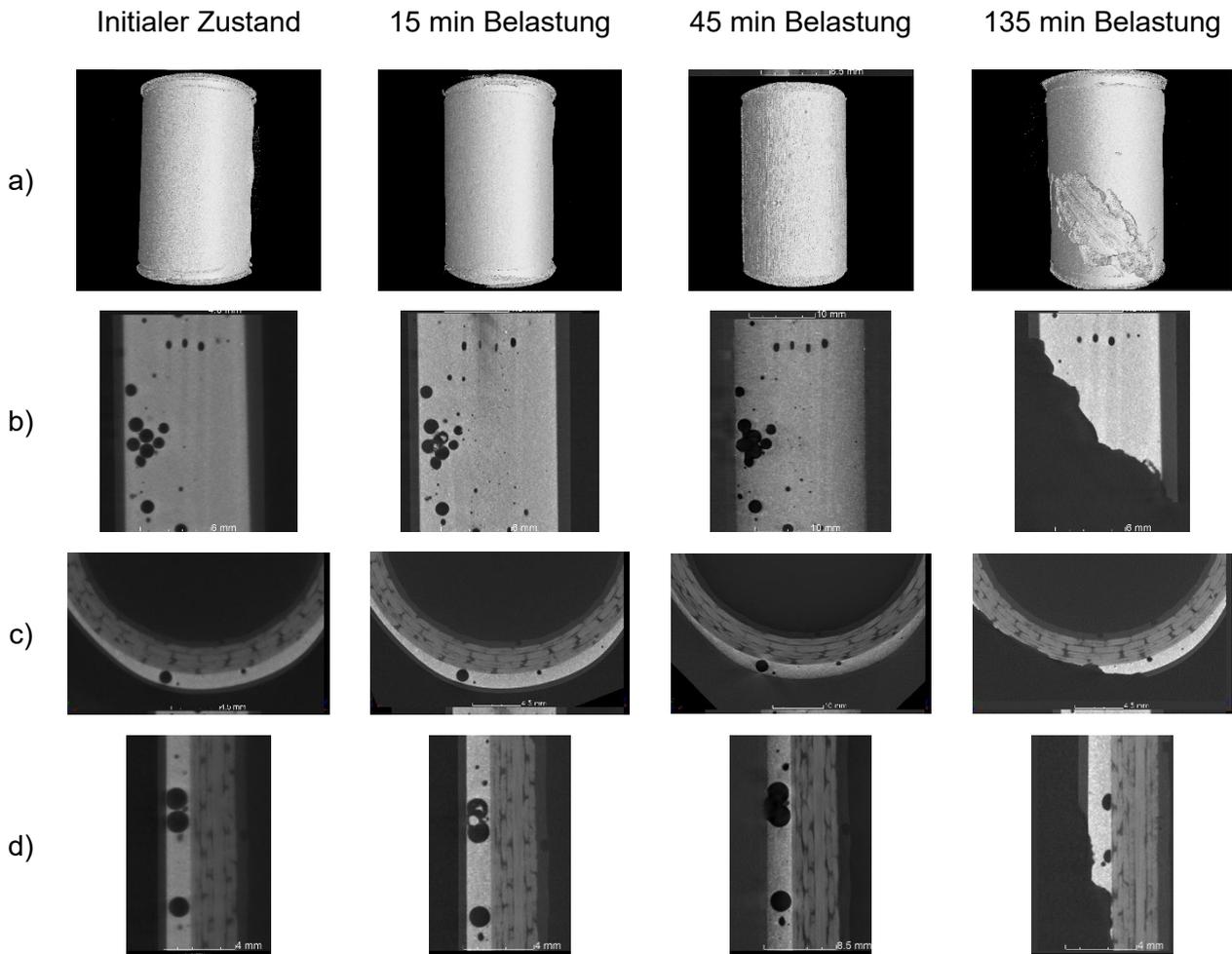


Abbildung 31: μ -CT-Aufnahmen: Probekörper mit Luftblasen im Spachtel nach unterschiedlichen Belastungszyklen in unterschiedlichen Ansichten und Schnittbildern.

Die Poren befanden sich im Bereich des Spachtels. Die Probe wurde im initialen Zustand nach 15, 45 sowie 135-minütiger Belastung mittels μ -CT gescannt und die Bilddaten mittels VolumeGraphics bearbeitet. Es sind die identischen Positionen der unterschiedlich belasteten Probe dargestellt. Von oben nach unten ist die 3D-Darstellung sowie die entsprechenden Schnittbilder gezeigt. In der zweiten Zeile sind die Schnittbilder im Bereich der Spachtelschicht gegenübergestellt. Die Degradation steigt mit der Belastung. Zum Teil ist diese jedoch von außen nicht sichtbar. Dies ist beim Vergleich der Schnittbilder in der unteren Zeile zu erkennen. In den beiden linken Schnittbildern ist die Lackschicht noch intakt. Im rechten der beiden Schnittbilder zeigt sich abgeplatztes Material im Bereich der Poren. Erst nach 45-minütiger Belastung versagt die Lackschicht (drittes Bild von links). Der Bereich der Poren ist freigelegt. Die Regentropfen treffen auf die GFK – Schicht und unterspülen die Spachtelschicht.

In Abbildung 32 ist im linken Teilbild die 3D-Darstellung der belasteten Probe mit drei Bereichen unterschiedlicher Degradationsgrade in der Spachtelschicht gekennzeichnet und dargestellt (rote Kreise). Entsprechende Schnittbilder, die den Bereich vor und nach der Belastung zeigen sind rechts dargestellt. Die Poren befinden sich hier in der Lackschicht. Es zeigt sich, dass der Degradationsgrad von der Position der Pore, d.h. dem Abstand zur Luft-Lack-Grenzfläche, der Größe und der Anzahl der Poren, respektive dem Porenvolumen abhängig ist. Hinzu kommt die Position der Vorschädigung (Pore) entlang des Probekörpers, denn dieser ist abhängig vom Druck der Regentropfen, welche mit der Distanz zur Rotationsachse im Regenerosionsprüfstand zu nimmt.

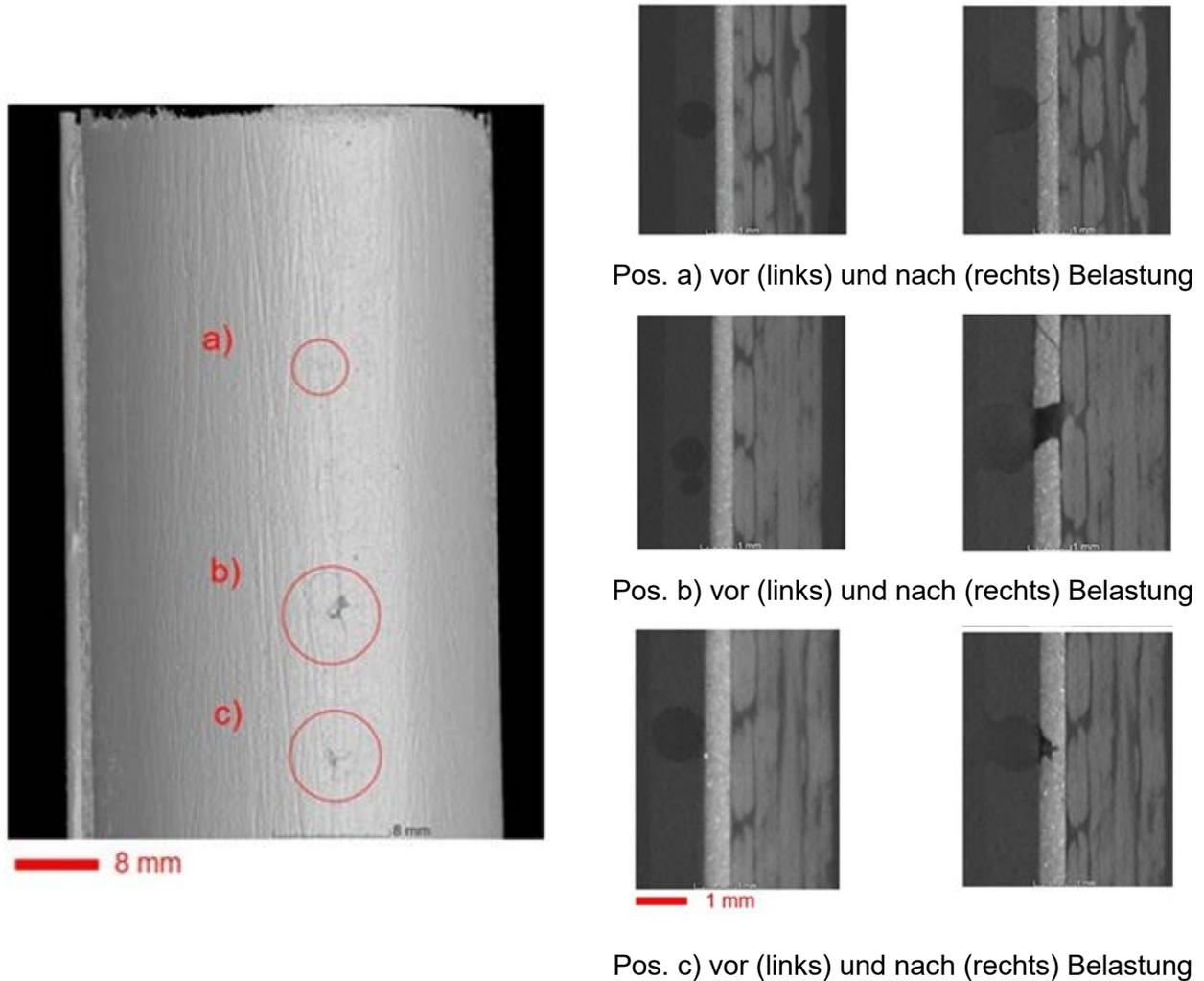


Abbildung 32: 3D-Darstellung der belasteten Probe (links) mit markierten Positionen der Schnittbilder. Die Schnittbilder (rechts) zeigen die identischen Positionen vor und nach der Belastung im Regenerosionsprüfstand.

Aus den Schnittbildern lässt sich ein "zeitlichen Verlauf" der Schädigungsdynamik ableiten. Ist die Lackschicht nicht mehr vorhanden entstehen erst Risse in der Spachtelschicht (a) anschließend wird die Spachtelschicht abgetragen oder ausgewaschen (c) bis die GFK-Struktur freigelegt wird (b). Die aufplatzenden Regentropfen unterspülen anschließend die Grenzschicht zwischen GFK und Spachtel. Es kommt zur Rissbildung außerhalb der Öffnung (b, oberer Bereich). Die Schädigung ist großflächiger als die Öffnung in der Lackschicht.

Abbildung 33a zeigt das Schnittbild aus Abbildung 32b. Die Pixelgröße beträgt $27 \mu\text{m}$ und zeigt die Probe vor der Belastung. In Abbildung 33b ist die gleiche Position nach der Belastung bei einer Pixelgröße von $9 \mu\text{m}$ dargestellt (XRM). Die Lackschicht oberhalb der Pore hat versagt, die Aushöhlung hat die GFK-Struktur erreicht, der Spachtel ist gebrochen (Riss unten im Bild) und die Anbindung unterspült. Die Fehlstellenausdehnung im Spachtel ist deutlich größer als die Öffnung an der Oberfläche. Durch die Öffnung können Regentropfen ungehindert auf die GFK-Struktur treffen. Beim Auftreffen werden die Wassertropfen zur Seite abgeleitet und unterspülen die Anbindung zwischen GFK und Spachtel.

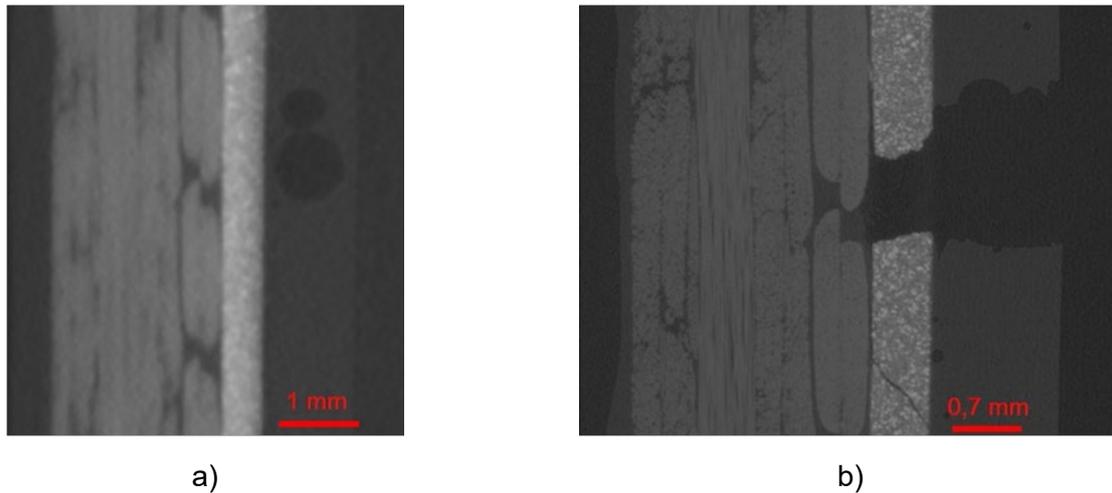


Abbildung 33: a) zeigt ein μ -CT-Schnittbild vor der Belastung bei einer Pixelgröße von $27\ \mu\text{m}$, in b) XRM (Pixelgröße $9\ \mu\text{m}$) gleiche Position nach der Belastung im Regenerosionsprüfstand.

Abbildung 34 zeigt eine Schnittbildfolge der identischen Fehlstelle aus Abbildung 33b. Es zeigen sich Ablösungen entlang der Grenzschicht zwischen Glasfaser und Grundierung (Abbildung 34a). Die Grundierung ist in ihrer Ausdehnung großflächig zerstört, die Ausdehnung ist deutlich größer als die Öffnung in der Lackschicht. Eine Sichtprüfung der Fehlstelle von außen würde das reale Ausmaß der Zerstörung nicht erfassen

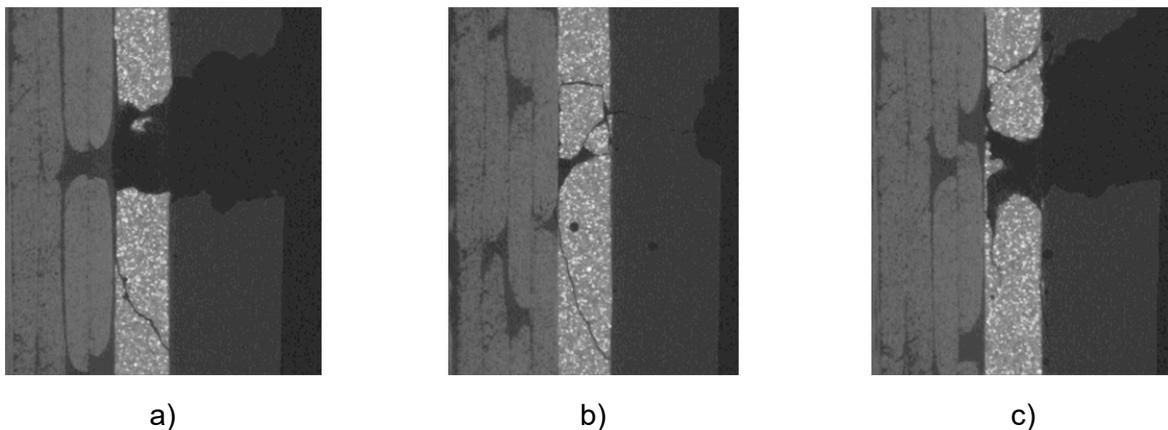


Abbildung 34: Schnittbildfolge der identischen Fehlstelle (XRM, Pixelgröße $9\ \mu\text{m}$) an drei unterschiedlichen Positionen eines Defektes.

Fazit: Für eine Schadensbewertung einer Rotorblattvorderkante aus Faserverbund mittels einer Sichtprüfung ist nicht zielführend, da die gänzliche Ausdehnung des degradierten Bereiches nicht erfasst werden kann. Des Weiteren konnte anhand der Bildsequenz aus Abbildung 32 der zeitliche Verlauf einer Degradation der Flügelvorderkante aufgezeigt werden.

5.4. Oberflächenanalyse mittels Streifenlichtprojektionsverfahren (IFAM)

Die optische Oberflächenanalyse der Proben wurden beim Forschungspartner Fraunhofer IFAM mittel Streifenlichtprojektionsverfahren durchgeführt. Das Streifenlichtprojektionsverfahren ist eine optische Messmethode zur dreidimensionalen Erfassung von Oberflächen. Dabei wird die zu erfassende Oberfläche mit einem Muster aus hellen und dunklen Lichtstreifen unterschiedlicher Breite zeitlich sequenziell unter einem definierten Winkel beleuchtet. Die projizierten Streifenmuster werden mittels Kameras erfasst. Aus der erfassten zeitlichen Folge von unterschiedlichen

Helligkeitswerten für die einzelnen Bildpunkte wird mit einem speziellen Algorithmus die zugrundeliegende dreidimensionale Oberfläche des erfassten Objektes berechnet. Die Geometrie der erfassten Oberfläche wird hierbei im μm -Bereich aufgelöst. Der Vorteil dieser Messmethode liegt in der relativ schnellen und großflächigen Erfassung von dreidimensionalen Oberflächen mit hoher Auflösung im Vergleich zu anderen bildgebenden Verfahren wie zum Beispiel der Mikroskopie. Zudem bestehen auch inline-taugliche Handgeräte, die unter Verwendung des gleichen Messprinzips arbeiten. Die Messungen wurden mit einem 3D-Profilometer vom Typ VR-3200 des Herstellers Keyence durchgeführt, wie es in Abbildung 35 zusammen mit eingezeichneten Strahlengängen dargestellt ist.

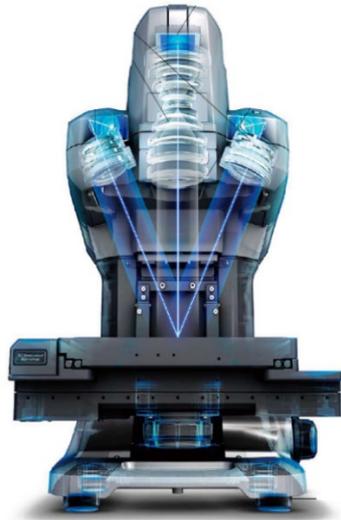
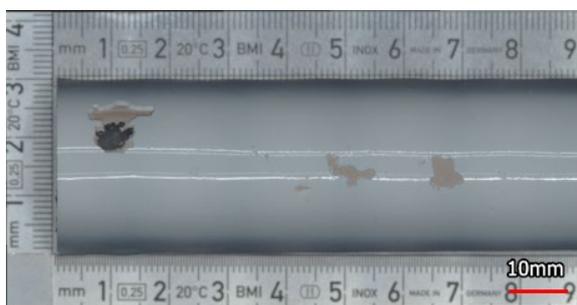
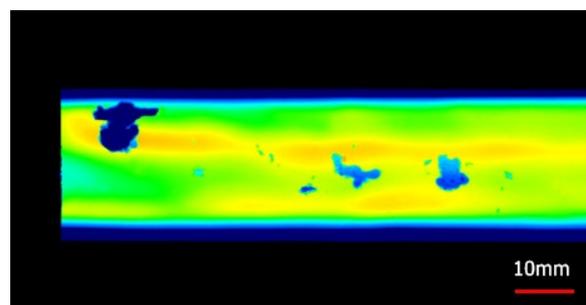


Abbildung 35: Darstellung 3D-Profilometer Keyence VR-3200 mit eingezeichneten Strahlengängen [40].

In Abbildung 36 werden exemplarisch die 3D-Profilometer Messdaten einer belasteten Vorversuchprobe dargestellt. Die Bildaufnahmen dienen grundsätzlich zur Lokalisierung der Fehlstellen und die Höhendarstellungen zeigen eine kontrastreiche Visualisierung des Oberflächenzustands. Regenerosionsschäden an der Oberfläche lassen sich hiermit sehr deutlich darstellen. Die Höhendarstellung beinhaltet zudem eine Korrektur der Oberflächenkrümmung der Proben.



a)



b)

Abbildung 36: a) 3D-Profilometer Bildaufnahme und b) 3D-Profilometer Höhendarstellung des Probenbereichs 1 der Vorversuchprobe A_L-1.

5.5. Thermografische Struktur- und Randzonenanalyse (BIMAQ)

5.5.1. Anforderungskatalog und Messmethodenscreening

Zunächst wurden zu Beginn des Projektes die Anforderungen aufgestellt, die die jeweiligen Messmethoden erfüllen müssen, um der geforderten Messaufgabe gerecht zu werden. Da es in diesem Projekt um die Entwicklung des Schadensverlaufs von initialen Produktions- / Materialdefekten hin zu oberflächlichen Erosionsschäden, hervorgerufen durch Regenbelastung geht, müssen in erste Linie Defekte, die unterhalb der Oberfläche liegen detektiert werden können. Um durch die Materialprüfung keine Schäden hervorzurufen, muss die Messmethode kontaktlos arbeiten. Weiterhin ist insbesondere bei der Wartung eine schnelle Datenerhebung erforderlich, um Stillstandskosten der Anlage so gering wie möglich zu halten. Damit einher geht die Fähigkeit der Messmethode, große Flächen untersuchen und abbilden zu können. Die Messmethode sollte außerdem einen einfachen und kostengünstigen Messaufbau besitzen, damit insbesondere mittelständischen und kleinen Unternehmen der Zugriff ermöglicht wird. Als letzte, jedoch sehr wichtige Anforderung steht die In-situ Messfähigkeit an. Es soll sichergestellt sein, dass die Materialprüfung sowohl am Fertigungsort der Rotorblätter als auch vor Ort an der Windenergieanlage durchgeführt werden können. In-Service Messungen aus großen Entfernungen, die nicht invasiv sind, wären wünschenswert, sind jedoch nicht Hauptaugenmerk des Projektes. Aus diesen Anforderungen und einer gezielten Recherche bezüglich Monitoring Techniken an Rotorblättern von Windenergieanlagen ergibt sich Tabelle 4.

Tabelle 4: Screening von Messmethoden für die Fertigungsüberwachung und der Wartung, + positive Bewertung, 0 neutrale Bewertung, - negative Bewertung nach [41] und [42]

Anforderungen Messmethode	Detektion von Defekten unterhalb der Oberfläche	Kontaktlose Messung	Schnelle Daten-erhebung	Großflächige Messung	Einfacher Messaufbau	In-situ Mess-fähigkeit
Visuelle Inspektion	-	+	-	+	+	+
Akustische Emission	+	-	0	0	-	0
Ultraschall	+	0	0	0	0	+
Radiometrie	+	+	-	0	-	0
Computer Tomografie	+	+	-	+	-	-
Aktive Thermografie	+	+	0	0	+	+

Alle Messmethoden bieten je nach Anwendung ihre Vorteile und haben sich größtenteils in der Vergangenheit als Monitoring Techniken bewährt. In den letzten Jahren hat sich jedoch die Thermografie als nützliche zerstörungsfreie messtechnische Methode für die Prüfung von Rotorblättern erwiesen. Die aktive Thermografie arbeitet berührungslos, bietet einen einfachen Messaufbau, verfügt über ausreichende Abbildungsmöglichkeiten (schnelle Bildaufnahme großer Flächen) und die gelieferten Bildergebnisse in Form von Thermogrammen können direkt bei der Prüfung interpretiert werden [43]. Darüber hinaus ermöglicht sie die Erkennung von unter der Oberfläche liegenden Defekten [41], zu denen Produktions- und Materialfehler gehören. Daher ist

aktive Thermografie eine vielversprechende Messmethode im Bereich des Monitorings von Rotorblättern an Windenergieanlagen und sollte in dieser speziellen Anwendung intensiver untersucht werden.

Aus den Untersuchungen der AP 2 bis AP 5 hat sich eine weitere Anforderung an die Messmethode ergeben. Defektgrößen, die erkannt werden müssen, da sie einen Einfluss auf frühzeitige Erosion besitzen sind Lufteinschlüsse ab einem Durchmesser von ca. 1 mm, die sich in den Lack- und Spachtelschichten des Messobjektes befinden und demnach zwischen 0 mm und 1,5 mm unterhalb der Oberfläche liegen. Defektarten wie beispielsweise Delaminationen und Lufteinschlüsse von ca. 1 mm Durchmesser im Laminat ($\leq 1,5$ mm Tiefe) müssen nicht erkannt werden, da in den Untersuchungen kein Zusammenhang zwischen diesen Defektarten und frühzeitig auftretender Erosion festgestellt werden konnte. Die ausgewählte Messmethode der aktiven Thermografie soll daher zusätzlich hinsichtlich dieser Anforderung in Vorversuchen untersucht werden.

Bei der aktiven Thermografie wird das Messobjekt mit einer externen Anregungseinheit erwärmt, sodass ein Wärmefluss im Material des Messobjektes entsteht. Dieser Wärmefluss ist hauptsächlich von der Wärmespeicherkapazität und der Wärmeleitfähigkeit der im Messobjekt vorhandenen Materialien abhängig. Entsprechend dieser Koeffizienten wandert die Wärme unterschiedlich schnell durch das Messobjekt, sodass sich auf der Oberfläche des Messobjektes mit der Zeit eine lokal unterschiedlich ausgeprägte Temperaturverteilung ausbildet. Diese wird in Form eines Thermograms dargestellt [44]. Abbildung 37 zeigt eine schematische Darstellung des Messprinzips der aktiven Thermografie.

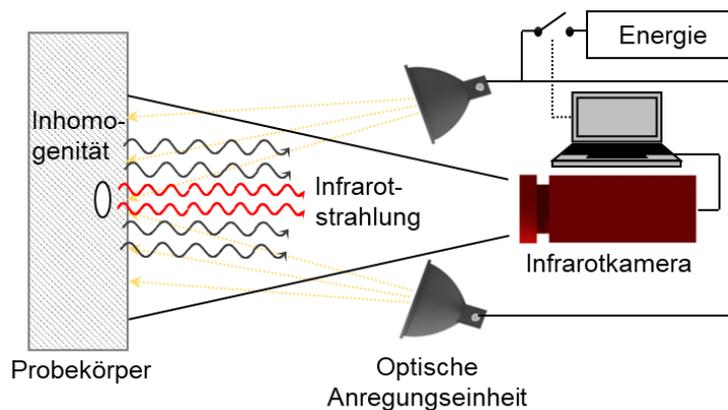


Abbildung 37: Schematische Darstellung des aktiv thermografischen Messprinzips.

5.5.2. Machbarkeitsuntersuchung thermografische Randzonenanalyse

Als nächstes erfolgt eine Weiterentwicklung des bereits anerkannten aktiven thermografischen Messverfahrens seitens des BIMAQ, deren Einsetzbarkeit für Wartungsaufgaben im Freifeld vor Ort an der WEA untersucht werden soll. Dafür können bereits frühzeitig Proben aus den Vorversuchen und im Verlauf des Projekts auch aus den zyklischen Belastungstests für die Untersuchungen verwendet werden.

Für die verschiedenen aktiven Thermografiemethoden ist es erforderlich, durch äußere energetische Anregung in dem Prüfobjekt einen Wärmestrom zu induzieren, um die Schichten oder Fehlstellen im Inneren des Materials visualisieren zu können. Für die Entwicklung eines für die geplanten thermografischen Messungen geeigneten Versuchsaufbaus und die Auswahl, der am besten geeigneten Thermografie-Methode werden zunächst die verschiedenen Ansätze für energetische Anregungen und Auswertalgorithmen anhand von Literaturrecherche miteinander verglichen.

5.5.2.1. Auswahl des aktiv thermografischen Messprinzips

Innerhalb der aktiven Thermografie existieren eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden, wie beispielsweise Impuls-Thermografie, Langpuls-Thermografie, Lock-In Thermografie oder Step-Heating Thermografie, die sich jeweils in der Anregungs- und Aufnahmeroutine unterscheiden.

Bei der Impuls-Thermografie wird die Probe für einige Millisekunden (meist 2 ms – 10 ms) mit einer Blitzlampe bei hoher Leistung angeregt. Die Thermogramme werden während der Abkühlphase aufgezeichnet. Im Gegensatz dazu wird bei der Langpuls- und Stufen-Thermografie die Probe mehrere Sekunden lang (von 5 s – 300 s und mehr) mit Halogenlampen bei geringerer Leistung angeregt. Bei der Langpuls-Thermografie erfolgt die Aufzeichnung während der Abkühlphase, während bei der Stufenheizungs-Thermografie die Thermogramme bereits während der Anregung in der Aufwärmphase aufgezeichnet werden [45]. Bei der Lock-In Thermografie wird das Material mit einer gedämpften Frequenz von sinusförmigen oder rechteckförmigen periodischen Anregungsmustern angeregt. Diese unterschiedlichen aktiven Thermografieverfahren wurden in verschiedenen Untersuchungen zur Defekterkennung bei Rotorblättern von Windkraftanlagen eingesetzt. Wang et al. führten vergleichende Untersuchungen zwischen der Impuls-Thermografie, der Step-Heating Thermografie und der Langpuls-Thermografie in Kombination mit verschiedenen klassischen Auswerteverfahren wie der Hauptkomponentenanalyse (PCA), der Phasen-Fourier-Analyse und der thermografischen Signalrekonstruktion durch, die zeigten, dass mit der Langpuls-Thermografie die besten Ergebnisse bei der Untersuchung von faserverstärkten Werkstoffen erzielt werden konnten [46].

Im Gegensatz zur Impuls-Thermografie ist die Langpuls-Thermografie besser für Materialien mit geringer thermischer Reaktion geeignet, da die lange Anregungszeit ausreichend Wärme in tiefere Schichten des tragenden Materials eindringen lässt. Außerdem sind die Wärmequellen kostengünstig und in großer Vielfalt verfügbar. Im Gegensatz zur Lock-in-Thermografie ist die Langpuls-Thermografie schneller, da nur ein Heizimpuls verwendet wird, während die Lock-in-Thermografie mehrere kurze bis lange Impulse verwendet. Ein Nachteil gegenüber der Impuls-Thermografie oder der Step-Heating Thermografie ist jedoch die vergleichsweise langsame Datengenerierung aufgrund der langen Anregungs- und Aufzeichnungszeit, die beide durch die Leitfähigkeit des Materials bestimmt werden.

Diese Untersuchungen führten daher zu dem Schluss, Langpuls-Thermografie für die Weiterentwicklung der Randzonenanalyse sowie für die systematischen Untersuchungen im Projekt einzusetzen.

5.5.2.2. Untersuchung der Defektdetektion entsprechend der gestellten Anforderungen

In AP 6.1 wurde die Anforderung gestellt, dass Defektgrößen, die einen Einfluss auf frühzeitige Erosion besitzen wie beispielsweise Lufteinschlüsse ab einem Durchmesser von ca. 1 mm, die sich in den Lack- und Spachtelschichten des Messobjektes befinden und demnach zwischen 0 mm und 1,5 mm unterhalb der Oberfläche liegen, erkannt werden müssen. In Vorversuchen wurde daher untersucht, ob sich die anhand der Recherche ausgewählte Messmethode der Langpuls-Thermografie zur Detektion solcher Defekte eignet. Dazu wurde zunächst ein Versuchsaufbau entwickelt, in dem die modifizierten Testmessobjekte untersucht werden konnten. Mit einem dem Zweck der Untersuchung entsprechenden Auswertalgorithmus konnten die Messdaten hinsichtlich der Anforderung ausgewertet werden.

Zur Bewertung der thermografischen Erkennbarkeit von Defekten wird das Verhältnis von Tiefe zu Durchmesser herangezogen [47]. Es ergibt sich aus der Tiefe, in der sich der Defekt unterhalb der Oberfläche befindet, geteilt durch den entsprechenden Defektdurchmesser. Aufgrund der lateralen

Wärmeübertragung, die im Material zwischen der Oberfläche und dem Defekt stattfindet, gilt ein Defekt mit einem Tiefe-Durchmesser-Verhältnis von > 1 als kaum nachweisbar. In den meisten experimentellen Untersuchungen wurden flache und unbeschichtete Referenzobjekte (GFK und CFK), die mit Flachbohrungen modifiziert wurden, untersucht [46, 48–50], um ungünstige Einflüsse auf die Ergebnisse durch eine gekrümmte Geometrie oder eine beschichtete Oberfläche zu reduzieren. Kaminska et al. führten zum Beispiel Untersuchungen an einer mit Flachbohrungen modifizierten GFK-Platte durch [51]. Dabei wurden sowohl die Impuls-Thermografie als auch die Step-Heating Thermografie eingesetzt. Der Vergleich der verschiedenen Anregungsarten ergab, dass die Impuls-Thermografie besonders gut für die Untersuchung oberflächennaher Defekte geeignet ist, während die Step-Heating Thermografie tiefer liegende Defekte hervorhebt. Die Ergebnisse der Rohdaten beider Thermografieverfahren zeigen, dass Defekte mit einem Tiefe-Durchmesser-Verhältnis von 0,5 erkannt werden konnten. Da die Langpuls-Thermografie eine höhere Empfindlichkeit für Defekte in Materialien mit geringer Wärmeleitfähigkeit und niedriger thermischer Ansprechrate (wie GFK) hat als die Impuls-Thermografie und in ihrer Ausführung der Step-Heating Thermografie stark ähnelt, wird die Langpuls-Thermografie für die Erkennung von tief liegenden Defekten bevorzugt.

Nach AP 6.1 müsste dementsprechend ein Tiefe-zu-Durchmesser-Verhältnis von ca. 1,5 bei den Messungen erreichbar sein, was sich außerhalb des theoretischen Grenzbereichs der aktiven Thermografie befindet.

Probekörper:

Für die Vorversuche werden Probekörper aus dem Vorgängerprojekt herangezogen. Diese besitzen denselben Aufbau wie die Proben dieses Projektes, jedoch ohne eingebrachte Defekte. Um anfängliche Defekte zu imitieren, wird die Probe mit verschiedenen Bohrungen präpariert, siehe Abbildung 38.

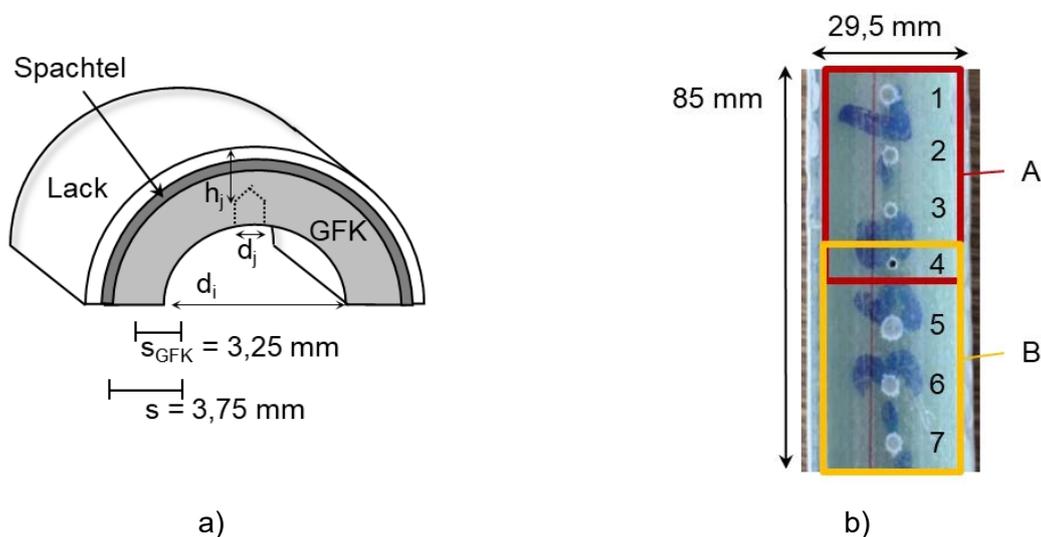


Abbildung 38: a) Schematische Darstellung der Probekörperstruktur und der eingebrachten Bohrungen, b) Foto von der Rückseite des Probekörpers mit eingebrachten, nummerierten Bohrungen.

In diesem Fall werden Hohlräume durch die Verwendung von Standardbohrungen mit einer verjüngten Spitze imitiert, da dies der Form von eingeschlossenen Luftblasen nahe der Oberfläche sehr ähnelt. Die Bohrungen werden an der Rückseite des Halbrohrs angebracht, so dass sich die Bohrungen von der Vorderseite aus gesehen in unterschiedlichen Tiefen h_j unter der Oberfläche befinden. Diese Art der Probenpräparation ist einfach zu realisieren, ermöglicht reproduzierbare

Prüfungen und wird als Standardmethode eingesetzt, in diesem Fall erstmals an gekrümmten und beschichteten Proben. Die Bohrungen sind in Tabelle 5 aufgeführt. Bohrung 4 ist eine Durchgangsbohrung und dient als Markierung für eine bessere Orientierung in den Thermogrammen. Außerdem sind die Bohrungen in zwei ROI aufgeteilt, da nicht alle Bohrungen in einem Kamerabild (field of view, FOV) erfasst werden können.

Tabelle 5: Eigenschaften der einzelnen Defekte des modifizierten Prüfkörpers in den beiden ROIs A und B.

Nummer j	ROI	Tiefe h_j [mm]	Durchmesser d_j [mm]	Tiefe-zu-Durchmesser-Verhältnis
1	A	1,5	3	0,50
2	A	1,4	2,5	0,56
3	A	1,5	2	0,75
4	A & B	0	1,5	-
5	B	2,4	3,5	0,69
6	B	2,2	3	0,73
7	B	2,6	2,5	1,04

Versuchsaufbau und -durchführung

Für die Durchführung der Versuchsreihen der Vorversuche wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, der in Abbildung 39 dargestellt ist.

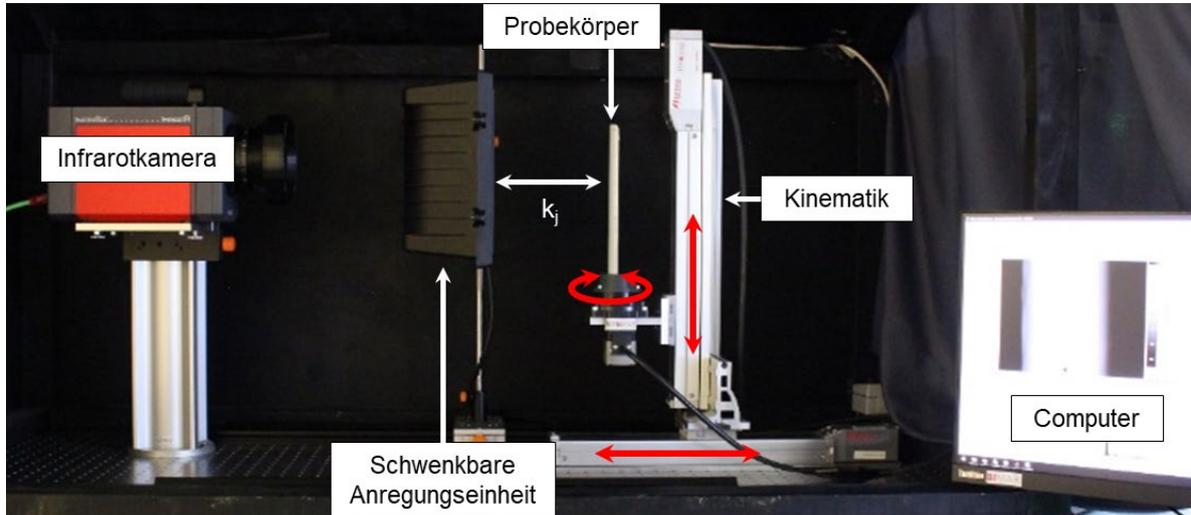


Abbildung 39: Foto des entwickelten Versuchsaufbaus mit dem Abstand $k = 114$ mm zwischen Anregungseinheit und Probekörper

Er erlaubt eine flexible Anordnung des Probekörpers, der Anregungseinheit und der Kamera. Eine an die Probengeometrie angepasste Spannvorrichtung kann über lineare Achsen in horizontaler und vertikaler Richtung bewegt werden. Ein Rotationsmotor ermöglicht eine Rotationsverstellung der Probe. Die Anregungseinheit ist frontal auf den Probekörper gerichtete, um eine möglichst gleichmäßige Anregung für den zu betrachtenden Probenabschnitt zu gewährleisten. Sie kann sowohl geschwenkt als auch auf der Grundplatte des Prüfstandes variabel platziert werden. Die Kamera ist ebenfalls flexibel auf der Grundplatte positionierbar und kann in der Höhe verstellt werden. Für die in dieser Arbeit durchgeführten Experimente wird eine 1 kW Halogenlampe im

Reflexionsmodus (Anregung und Kamera befinden sich auf der gleichen Seite der Probe) als Anregungseinheit verwendet.

Als Infrarotkamera wurden zwei unterschiedliche Modelle der Firma InfraTec ausgewählt. Als High-End Kamera für Forschungszwecke kam die Image IR 8300 mit einem Bildformat von (640×512) px², einer Temperaturlösung von 0,025 K und einem Spektralbereich von $2 \mu\text{m} - 5 \mu\text{m}$ zum Einsatz. Das gewählte Objektiv ist ein 100 mm Teleobjektiv in Kombination mit einem 500 mm Nahbereichsobjektiv (Makroobjektiv), das ein Bildfeld von (48×39) mm² mit einer räumlichen Auflösung von $75 \mu\text{m}$ aufweist. Der Abstand zwischen dem Kameraobjektiv und dem Probekörper beträgt 500 mm. Da die Kosten für die Image IR 8300 sehr hoch sind, bietet es sich an, zusätzlich mit einem günstigeren Modell Messungen durchzuführen, um den KMU in der Instandhaltung und Wartung finanziell einen Zugang zu Geräten zu ermöglichen. Daher wurde als eine weitere Infrarotkamera die Vario Cam hr head ausgewählt mit einem Bildformat von (640×480) px², einer Temperaturlösung von 0,035 K und einem Spektralbereich von $7,5 \mu\text{m} - 14 \mu\text{m}$ zum Einsatz. Das gewählte Objektiv ist ein 100 mm Objektiv. Durch die automatische Fokussierung ist Abstand zwischen dem Kameraobjektiv und dem Prüfling variabel und wurde auf 170 mm festgelegt, sodass das Bildfenster der Kamera möglichst optimal ausgenutzt wird. Die Parameter des Versuchsstands sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Parameter des entwickelten Versuchsstands und der verwendeten Infrarot Kameras.

Parameter	Image IR 8300	VarioCam hr head
Bildformat [px²]	(640 x 512)	(640 x 480)
Temperaturlösung [K]	0,025	0,035
Wellenlängenbereich [μm]	2 - 5	7,5 - 14
Objektiv	100 mm Tele + 500 mm Makro	100 mm
Abstand zw. Kamera und Probekörper [mm]	500	170
Anregungsleistung	2 Halogenstrahler mit je 1 kW	

Für die Durchführung der Versuche wird der mit Bohrungen modifizierte Probekörper in den Versuchsstand eingespannt. Anschließend wird der Probekörper mit dem Halogenstrahler angeregt. Bevor die Aufnahme beginnen kann, wird der Halogenstrahler zur Seite geschwenkt, sodass zwischen dem Ende der Anregung und Beginn der Aufnahme ca. 3 Sekunden liegen. Die Aufnahmedauer beträgt 30 s bei einer Bildaufnahmefrequenz von 10 Hz. Die Aufnahmedauer ist auf 30 s festgelegt, da die größte Temperaturänderung innerhalb der ersten 20 s – 25 s nach Anregungsende stattfindet. Längere Aufnahmen können zwar auch zu einem Informationsgewinn führen, jedoch soll die spätere Inspektionsdauer an einer Windenergieanlage entsprechend kurzgehalten werden, weshalb dies bereits im Experiment berücksichtigt wird. Neben der Detektierbarkeit unterschiedlicher Tiefe-zu-Durchmesserhältnisse soll außerdem eine möglichst optimale Anregungsroutine entwickelt werden. Daher wird derselbe Probekörper mehrmals mit unterschiedlichen Anregungsdauern gemessen. Die Anregungsdauern reichen dabei von 10 s – 35 s. Die Versuchsparameter der Vorversuche sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Versuchsp Parameter der Vorversuchsreihe bei Verwendung der Image IR 8300.

Versuchsreihe	1	2
ROI	A	B
Anregungsdauer t_{exc} [s]	10, 15, 20, 25, 30	15, 20, 25, 30, 35
Abstand k [mm]		89
Aufnahmedauer t_{rec} [s]		30
Aufnahmefrequenz [Hz]		20

Datenauswertung

Um die in den Thermogrammsequenzen enthaltenen Informationen effizient zu extrahieren, können verschiedene Signalverarbeitungs Algorithmen angewendet. Die gebräuchlichsten fortschrittlichen Nachbearbeitungsmethoden sind die thermografische Signalrekonstruktion, die Hauptkomponentenanalyse (principal component analysis, PCA), der absolute thermische Kontrast und die Phasen-Fourier-Analyse [52, 53]. Diese Datenverarbeitungsmethoden reduzieren Wärmebildartefakte, die durch ungleichmäßige Erwärmung oder Wärmereflexionen aus der Umgebung verursacht werden. Auf diese Weise wird die Erkennbarkeit von Defekten erhöht und eine Quantifizierung ist möglich [54]. Während die PCA allgemeine orthogonale Funktionen verwendet, arbeitet die Phasen-Fourier-Analyse auf der Basis von harmonischen Funktionen. Da bei der Langpuls-Thermografie die Probe mit nur einem Lichtpuls angeregt wird, sind schwingende Signale in den Thermografiedaten weniger stark ausgeprägt, weshalb die Anwendung der PCA hier naheliegender ist, wie verschiedene Untersuchungen zeigen. Wang et al. führten einen quantitativen Vergleich von Impuls-, Step-Heating und Langpuls-Thermografie durch [46]. Dazu modifizierten sie ebenfalls eine GFK-Platte mit Flachbohrungen, die in verschiedenen Abständen unterhalb der anzuregenden Oberfläche lagen. Für die Datenauswertung wurden eine Phasenbildanalyse sowie eine PCA für alle Anregungsmethoden verwendet. Die Ergebnisse der Langpuls-Thermografie in Kombination mit einer PCA zeigten die meisten Defekte auf. Ein Verhältnis von Tiefe zu Durchmesser von 0,4 bzw. 0,6 wurde erreicht. Wei et al. haben ähnliche Ergebnisse durch die Kombination von Langpuls-Thermografie und PCA an einer GFK-Platte erzielt, die mit Flachbohrungen modifiziert wurde [49]. Panella et al. führten eine Fallstudie an einer GFK-Platte durch, die mit verschiedenen Flachbohrungen modifiziert wurde, indem sie Langpuls-Thermografie mit Halogenlampen als Anregung verwendeten [48]. Dabei wurden unterschiedliche Anregungsdauern zwischen 5 s und 40 s auf den Prüfling angewendet. Mit Hilfe der PCA konnten Defekte mit einem Verhältnis von Tiefe zu Durchmesser von 0,825 (Tiefe = 6,6 mm, Durchmesser = 8 mm) erkannt werden.

Das sogenannte Kontrast-Rausch-Verhältnis (CNR) ist eine häufig verwendete Größe [55, 56] zur Quantifizierung der Defektdetektierbarkeit, da der Kontrast zwischen einem Defekt und seiner Umgebung entscheidend für die Defektdetektion ist. Dabei wird der Kontrast zwischen zwei Bildregionen (z. B. defektbehafteter Bereich und defektfreier/umliegender Bereich) als Signal definiert und zum Umgebungsrauschen in Beziehung gesetzt wird [48, 50].

Die thermografische Datenauswertung ist für die Vorversuche in ein drei Abschnitte eingeteilt, wie in Abbildung 40 zu sehen ist. Implementiert sind die entsprechenden Algorithmen in der OpenSource Programmiersprache Python.



Abbildung 40: Signalflussdiagramm der Bildverarbeitungsvorgänge.

Als ersten Schritt, der Vorverarbeitung, wird die PCA (adaptiert von Rajic [57, 58]) auf die thermografischen Daten angewendet, um die Erkennbarkeit von Defekten zu erhöhen und die gewünschten Informationen aus den thermischen dreidimensionalen Rohdaten zu extrahieren. Diese Methode nutzt eine Singulärwertzerlegung, um Kontrastinformationen aus den räumlichen und zeitlichen Informationen der aufgenommenen Bildsequenz (3D-Matrix) zu extrahieren, die dann als Bild visualisiert werden können.

Im zweiten Schritt werden die Daten gefiltert und der Hintergrund der Daten wird entfernt, sodass der Kontrast nochmals gesteigert wird. Für die Filterung des Bildes und damit die Kontrastverbesserung muss das Rauschen in den aus der Vorverarbeitung resultierenden Bildern mittels eines Tiefpassfilters reduziert werden. Eine zusätzliche Kontrastverbesserung wird durch die Entfernung des Hintergrunds erreicht. Um das resultierende Bild der Hintergrundentfernung zu glätten, wird derselbe Tiefpassfilter wie zuvor angewendet. Damit ist die Filterung des Bildes abgeschlossen.

In einem letzten Schritt wird eine automatische Defekterkennung durchgeführt. Hier sucht der Erkennungsalgorithmus nach Bildmaxima. Diese Maxima werden nun als potenzielle Defekte erkannt (Merkmalsextraktion) und mit einem roten Kreis hervorgehoben. Um die Sichtbarkeit potenzieller Defekte zu beurteilen und zwischen verschiedenen Bildern vergleichen zu können, wird das CNR gebildet. Das CNR wird aus dem absoluten Kontrast berechnet

$$C_{a,A-B} = |\hat{I}_A - \hat{I}_B|$$

zwischen den Flächen A und B der vorverarbeiteten Daten und der entsprechenden Standardabweichung $S_{A-B} = \sqrt{S_A^2 + S_B^2}$:

$$CNR = \frac{|\hat{I}_A - \hat{I}_B|}{\sqrt{S_A^2 + S_B^2}}$$

Der absolute Kontrast $C_{a,A-B} = |\hat{I}_A - \hat{I}_B|$ berechnet sich aus der Differenz der mittleren Intensitätswerte \hat{I}_A und \hat{I}_B zweier Flächen A und B [55, 56].

Ergebnisse

Abbildung 41 zeigt die Ergebnisse aus Versuchsreihe 1 für den ROI A bei einer Anregungsdauer von 25 s und einem Abstand $k = 89$ mm. In Abbildung 41a ist das unbearbeitete Thermogramm zu sehen, welches bei einer Aufnahmedauer von $t_{rec} = 0$ s erzeugt wurde und somit direkt den Beginn der Abkühlphase darstellt. Die Kanten des Probekörpers sind deutlich zu erkennen. Auf dem Probekörper selbst zeichnen sich helle Bereiche ab, welche durch die Bohrungen im Probekörper hervorgerufen werden. Der schwarze Punkt am unteren Rand des Bildes ist die Markierungsbohrung (Nr. 4). Für die Auswertung der Bilder mit dem Algorithmus wird aus den Rohdaten der ROI festgelegt und zugeschnitten. Abbildung 41b zeigt den ROI des unverarbeiteten, normierten Thermograms, welches innerhalb der Bildsequenz den höchsten Kontrast zwischen Defektbereich und Umgebungsbereich darstellt. Dieses Bild dient als Referenzbild. Die Bohrungen

1 bis 3 sind mit Nummern im Bild markiert. Abbildung 41c zeigt das verarbeiteten und anschließend normierte Referenzbild (ohne PCA, da eine PCA bei einem Einzelbild nicht möglich ist).

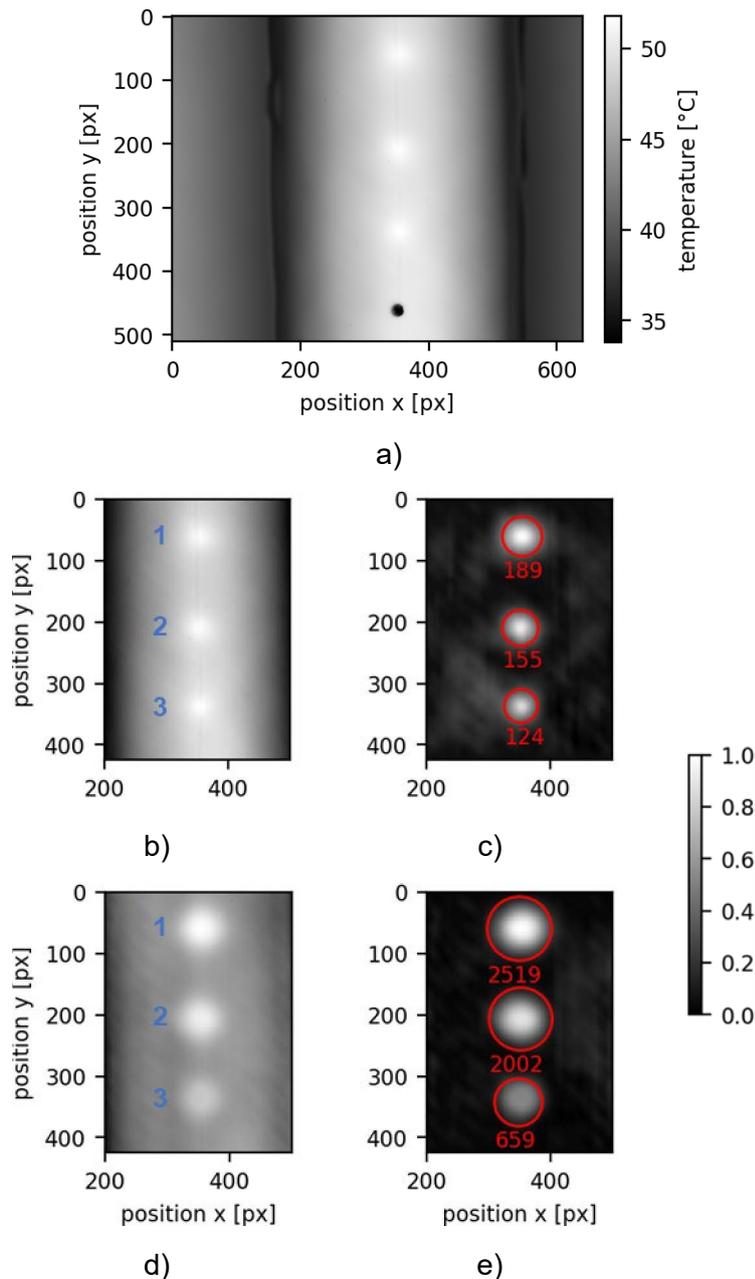


Abbildung 41: Versuchsreihe 1 für den ROI A bei einer Anregungsdauer von 25 s und einem Abstand $k = 89$ mm, a) Oberflächentemperatur des gesamten FOV, b) Rohbild aus Sequenz mit höchstem Kontrast bei $t_{\text{rec}} = 0$ s (Referenzbild), c) Referenzbild mit Filterung, Hintergrundentfernung, automatischer Defektdetektion und Berechnung des CNR, d) Ergebnisbild der PCA ohne weitere Bildverarbeitung, e) PCA-basiertes Bild mit Filterung, Hintergrundentfernung, automatischer Defektdetektion und Berechnung des CNR.

Alle Defekte wurden detektiert und deren CNR berechnet. Der CNR verhält sich entsprechend der Erwartung und sinkt bei größer werdendem Tiefe-zu-Durchmesser-Verhältnis. Bohrung 1 ist mit einem Tiefe-zu-Durchmesser-Verhältnis von 0,5 (vgl. Tabelle 5) am deutlichsten zu erkennen, was sich in einem vergleichsweise hohen CNR widerspiegelt. Abbildung 41d zeigt das normierte Resultat der PCA. Die Defektbereiche sind im Vergleich zum Referenzbild deutlich größer und auch der

Kontrast erscheint höher. Der Hintergrund bzw. Der Bereich, der ohne defekte ist, ist deutlich gleichmäßiger und als im Referenzbild und weist keinen Krümmungseffekt bei der Temperaturverteilung an der Oberfläche auf. Abbildung 41e zeigt das verarbeitete und anschließend normierte PCA-basierte Ergebnis. Der CNR ist für alle detektierten Defekte deutlich angestiegen was beweist, dass die Anwendung der PCA zu einer besseren Detektierbarkeit von defekten beiträgt.

Abbildung 42 zeigt die Ergebnisse aus Versuchsreihe 2 für den ROI B bei einer Anregungsdauer von 25 s und einem Abstand $k = 89$ mm. Der Aufbau der Abbildung ist identisch mit dem von Abbildung 41. Im unbearbeiteten Thermogramm Abbildung 42a sind im Gegensatz zu Abbildung 41a keine erhöhten Intensitäten im Defektbereich zu erkennen. Auch das normierte und zurechtgeschnittene Referenzbild in Abbildung 42b zeigt keine Auffälligkeiten. Allein durch Anwenden der Filterung, Hintergrundentfernung und Defektdetektion mit anschließender Berechnung des CNR kann Defekt 6 in Abbildung 42 c sichtbar und detektierbar gemacht werden. Der CNR ist sehr gering, was bei einem hohen Tiefe-zu-Durchmesser-Verhältnis von in diesem Fall 0,73 zu erwarten ist. Nach der Anwendung der PCA in Abbildung 42d sind bereits hellere Bereiche im Bild zu sehen. In Abbildung 42e können alle Defekte 5 bis 7 detektiert werden. Insbesondere bei Tiefe-zu-Durchmesser-Verhältnissen, die sich dem Wert 1 nähern, scheint die PCA ein wichtiges Hilfsmittel für die Extraktion von zeitlichen Veränderungen innerhalb einer Bildsequenz zu sein.

Bei einem direkten Vergleich der Tiefe-zu-Durchmesser-Verhältnisse, der jeweiligen CNR und der Bohrungsparameter zwischen Defekt 3, Defekt 5 und Defekt 6 fallen einige vermeidliche Unstimmigkeiten auf. Defekt 3 mit einem Tiefe-zu-Durchmesser-Verhältnis von 0,75 besitzt einen wesentlich höheren CNR als Defekt 6 mit einem ähnlichen Tiefe-zu-Durchmesser-Verhältnis von 0,73 und auch als Defekt 5 mit einem geringeren Tiefe-zu-Durchmesser-Verhältnis von 0,69. Dies ist mit der Tiefe, in der die Defekte liegen zu erklären. Defekt 3 mit einem hohen CNR liegt ca. 1 mm dichter an der Oberfläche als defekt 5 und 6. Und Defekt 5 liegt tiefer im Material als Defekt 6. Dies zeigt, dass insbesondere bei thermisch trägen Materialien wie GFK die Tiefe, in der ein Defekt liegt, einen größeren Einfluss auf die Detektierbarkeit besitzt als der Durchmesser des Defektes. Daher sind Aussagen, die allein auf Basis des Tiefe-zu-Durchmesser-Verhältnisses getätigt werden, unter Vorbehalt zu betrachten.

Neben der Untersuchung auf eine bestimmte Defektdetektierbarkeit hin wurden zusätzlich Versuche durchgeführt, die zum Ziel das Finden eine optimale Anregungsroutine haben. Abbildung 43 zeigt die CNR-Werte, die bei unterschiedlichen Anregungsdauern erreicht wurden. Dabei ist bei der Interpretation der Daten vor allem die Tiefe, in der die Defekte liegen zu berücksichtigen. Abbildung 43a zeigt die CNR-Werte der detektierten Defekte 1 bis 3 (Tiefe ca. 1,5 mm) bei der Verwendung der Referenzbilder. Das Optimum der Anregungsdauer stellt sich ca. 25 Sekunden ein. In Abbildung 43b sind die Ergebnisse für die detektierten Defekte mit Anwendung der PCA zu sehen. Die optimale Anregungsdauer beträgt für Defekt 1 und 2 wie erwartet 25 Sekunden. Defekt 3 hingegen scheint bereits bei 20 Sekunden am besten detektiert zu werden. Defekt 5 und 6, die in einer Tiefe von 2,5 mm liegen, benötigen eine längere Anregungsdauer, die über die 35 s hinaus geht. Defekt 7 ist nicht aufgezeichnet, da dieser nur in wenigen Fällen detektiert wurde.

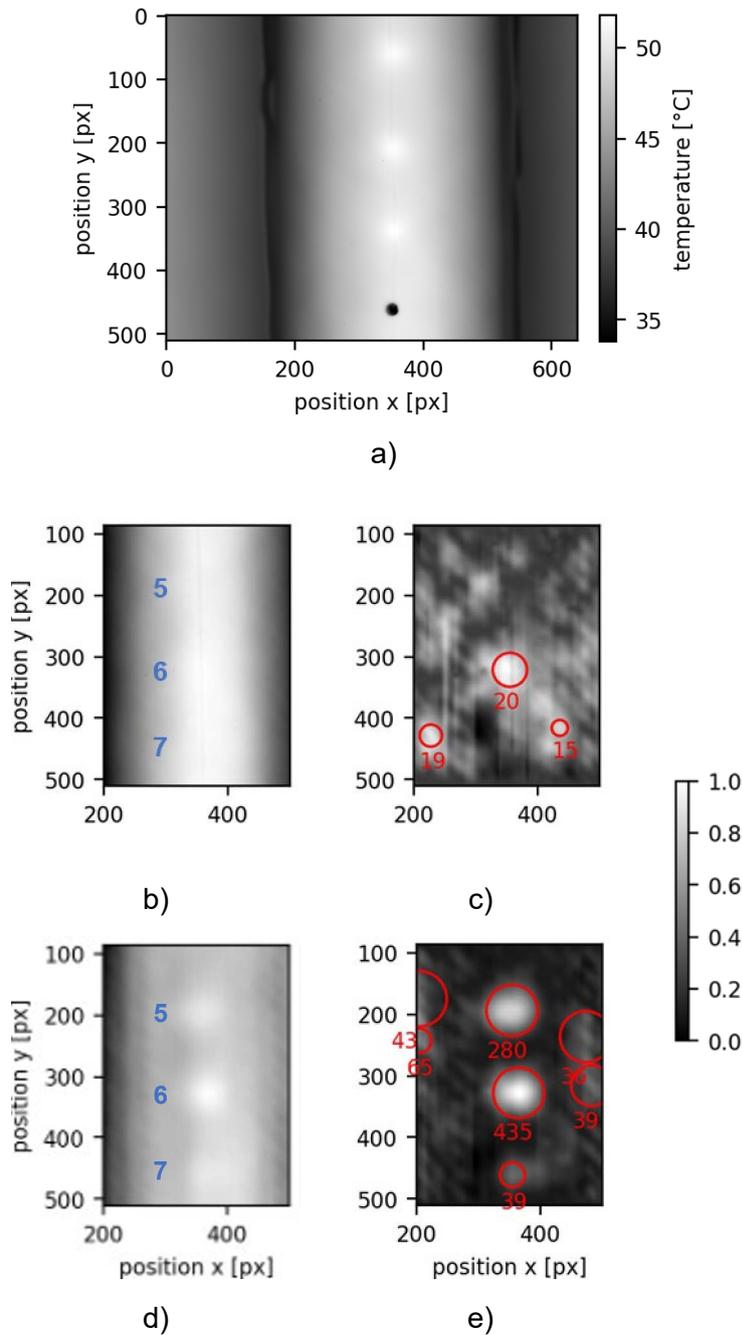


Abbildung 42: Versuchsreihe 2 für den ROI A bei einer Anregungsdauer von 25 s und einem Abstand $k = 89$ mm, a) Oberflächentemperatur des gesamten FOV, b) Rohbild aus Sequenz mit höchstem Kontrast bei $t_{rec} = 0$ s (Referenzbild), c) Referenzbild mit Filterung, Hintergrundentfernung, automatischer Defektdetektion und Berechnung des CNR, d) Ergebnisbild der PCA ohne weitere Bildverarbeitung, e) PCA-basiertes Bild mit Filterung, Hintergrundentfernung, automatischer Defektdetektion und Berechnung des CNR.

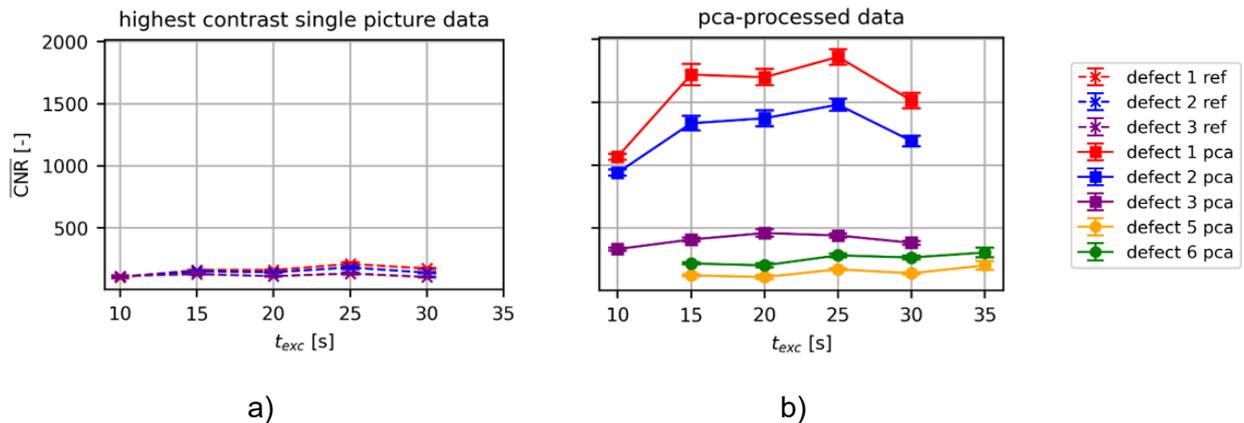


Abbildung 43: Mittlere CNR, gemittelt über den Abstand k bei verschiedenen t_{exc} der Defekte 1 bis 6 mit Fehlerbalken, die die Standardabweichung des gemittelten CNR-Wertes, a) Referenzdaten mit Filterung - Anmerkung: Defekt 5 und 6 konnten nicht erkannt werden, b) PCA-basierte Daten mit Filterung.

Die Ergebnisse der thermografischen Randzonenanalyse zeigen, dass Defekte mit einem Tiefe-zu-Durchmesser-Verhältnis von bis zu 1.04 detektiert werden können, was bedeutet, dass der Defektdurchmesser der Tiefe entsprechen muss, in welcher der Defekt liegt. Somit erfüllt das thermografische Messverfahren die aus dem Projekt hervorgegangene Anforderung nicht ausreichend, dass Defekte mit einem Durchmesser von ca. 1 mm sowohl in der Lack- als auch in der Spachtelschicht (zusammen ca. 1 mm bis 1,5 mm) detektiert werden müssen, da diese Auswirkungen auf frühzeitiges Auftreten von Erosion haben. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass das in den Versuchen maximal detektierte Tiefe-zu-Durchmesser-Verhältnis bei einer Tiefe von 2,5 mm lag. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass Defekte, die dichter an der Oberfläche liegen, besser detektiert werden können, weshalb es im Projekt auch möglich sein kann, Defekte mit einem Tiefe-zu-Durchmesser-Verhältnis von > 1 zu detektieren, beispielsweise bei einem 1 mm Defekt, der 1,5 mm unterhalb der Oberfläche liegt, wie gefordert. Außerdem konnten alle Defekte, die in der für die Hauptversuche relevanten Tiefe lagen, auch ohne die Anwendung der aufwändigen PCA detektiert werden. Es kann daher bei geringen Defekttiefen auf die PCA verzichtet werden. Als optimale Anregungsdauer werden 25 s empfohlen, sofern die Defekte ca. 1,5 mm unterhalb der Oberfläche liegen. Für andere Tiefen ist die Anregungsdauer entsprechend zu verkürzen oder zu verlängern.

Die Versuchsreihen wurden mit beiden zur Verfügung stehenden Kameras durchgeführt. Mit der VarioCam hr head wurde dabei ähnliche Ergebnisse wie mit der Image IR 8300 erzielt.

5.5.2.3. Untersuchung der Defekt-/Regenerosionsentwicklung

Probekörper

Für die Untersuchung der Defektentwicklung bei der Belastung durch Regen werden die in AP 1 gefertigten Probekörper verwendet.

Versuchsaufbau und -durchführung

Für die Untersuchung der Proben bei den Hauptversuchen wurde der Versuchsstand aus den Vorversuchen erweitert. Um den gesamten Abkühlungsprozess der Probe aufzunehmen, wurde die Anregungseinheit entsprechend verändert. Sie besteht jetzt aus zwei Halogenstrahlern mit je 1 kW Strahlleistung, die oberhalb und unterhalb der Infrarotkamera platziert sind, sodass eine gleichmäßige Anregung weiterhin gegeben ist. Da die Vorversuche gezeigt haben, dass der Einfluss unterschiedlicher geringer Abstände zwischen Anregungseinheit und Probe keine signifikante Rolle

spielt, sind die beiden Halogenstrahler in einem ähnlichen projizierten Abstand angeordnet wie in den Vorversuchen. Die Halogenstrahler sind in einem Winkel von ca. 45° zur Probe angeordnet, was in einem direkten Abstand zwischen Halogenstrahler und Probekörper von 204 mm resultiert. Die Anregungseinheit kann auf zwei Schienen parallel zur Kameraachse verschoben werden. Abbildung 44 zeigt den angepassten Versuchsaufbau.

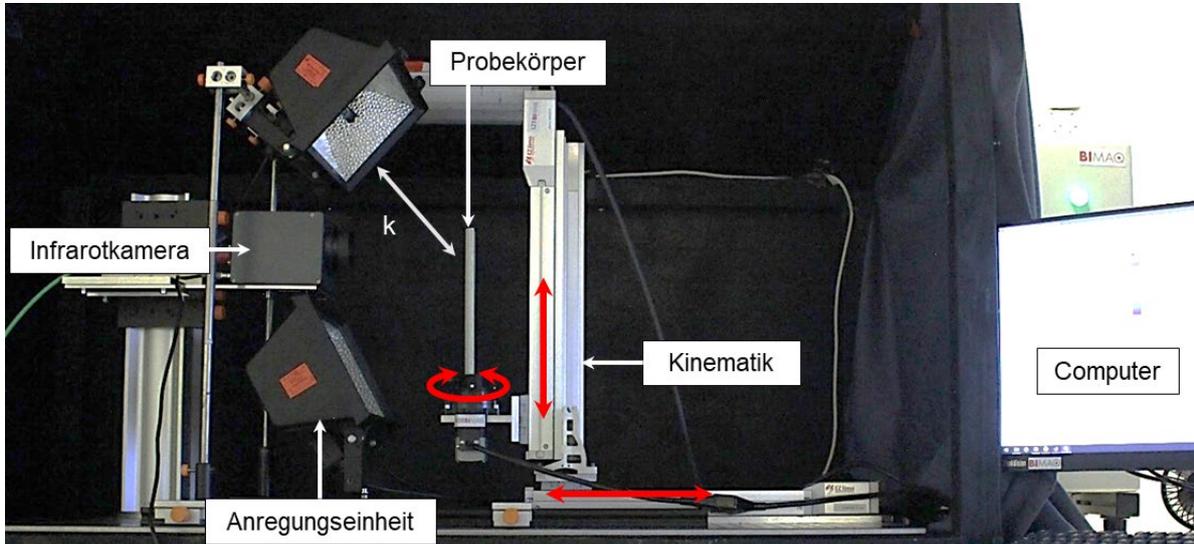


Abbildung 44: Foto des weiterentwickelten Versuchsaufbaus mit dem Abstand $k = 204$ mm zwischen Anregungseinheit und Probekörper.

Da die Vorversuche gezeigt haben, dass mit der preiswerteren VarioCam head hr annähernd die selben Ergebnisse erzielt werden konnten wie mit der preislich höher veranschlagten Image IR 8300, wird für die Hauptversuche ausschließlich auf die VarioCam hr head zurückgegriffen. Diese besitzt zusätzlich den Vorteil gegenüber der Image IR 8300, dass sie im langwelligen Bereich zwischen $7,5 \mu\text{m}$ und $14 \mu\text{m}$ sensitiv ist. Dies ist insbesondere bei der Wartung im Freifeld von Vorteil, da die Kamera weniger anfällig für Störungen durch das Sonnenlicht ist. Tabelle 8 fasst die Parameter des erweiterten Versuchsstandes zusammen.

Tabelle 8: Überblick über die experimentellen Parameter des thermografischen Messaufbaus.

Parameter	VarioCam hr head
Bildformat [px ²]	(640 x 480)
Temperaturaufösung [K]	0,035
Wellenlängenbereich [μm]	7,5 - 14
Objektiv	100 mm
Abstand zwischen Kamera und Probekörper [mm]	170
Anregungsleistung	2 Halogenstrahler mit je 1 kW

Die Durchführung der Versuche ist vom Vorgehen her dieselbe wie bei den Vorversuchen. Durch den erweiterten Versuchsstand ist es jedoch nicht mehr nötig, die Anregungseinheit beiseitezuschwenken. So kann die Messung einschließlich der Anregung nach dem manuellen Einspannen des Probekörpers automatisiert erfolgen. Aufgrund der unterschiedlichen Probekörpermodifikationen in verschiedenen Materialtiefen der variierenden Dicken des Beschichtungssystems, werden je nach Probe unterschiedliche Anregungsdauern verwendet, um mehrere Tiefen der Probe beobachten zu können. Die Versuchsparameter mit den entsprechenden

Anregungsdauern sind in Tabelle 9. dargestellt. Die Messungen werden entsprechend der AP 3 und AP 4 sowohl vor der ersten Belastung als auch nach jedem weiteren Belastungszyklus durchgeführt, um so das Schadenswachstum zu dokumentieren.

Tabelle 9: Übersicht über die Versuchsparameter der Hauptversuche.

Defektyp	Anregungsdauer	Aufnahmedauer	Aufnahme-frequenz
	t_{exc} [s]	t_{rec} [s]	[Hz]
Referenz ohne Defekte	20		
Luftblasen im Lack	10		
Luftblasen im Spachtel	10	30	10
Luftblasen im GFK	30		
Delaminationen	30		

Datenauswertung

Die Ergebnisse aus den Vorversuchen zeigen, dass Defekte die nahe an der Oberfläche liegen (bis ca. 1,5 mm) auch ohne die Anwendung der PCA detektiert werden können. Daher wird die Datenverarbeitung für die Hauptversuche angepasst. Thermografisch detektierte Defekte sind im Thermogramm als lokale Temperaturänderungen bzw. Intensitäten an der Oberfläche des Probekörpers zu sehen. Intensitätssprünge, wie sie am Rand eines Defektes (Grenze zwischen Defekt und Umgebung) zu sehen sind, werden in der Bildverarbeitung als Kanten bezeichnet. Daher wird zur Auswertung der Thermogramme eine Bildverarbeitung auf der Basis eines Kantendetektionsalgorithmus angewandt, der die manuelle Sichtprüfung unterstützt. Ziel ist es, jeden lokalen Defekt zu erkennen und zu prüfen, welche Art von Defekt vorliegt (oberflächennaher Defekt oder Oberflächendefekt). Außerdem solle der vom Defekt eingenommene prozentuale Flächenanteil des Probekörpers im Bildausschnitt bestimmt werden, um eine Aussage über den aktuellen Schadenszustand des Probekörpers treffen zu können.

Der für die Hauptversuche angepasste Auswertalgorithmus ist erneut in der Programmiersprache Python implementiert und gliedert sich ebenfalls in drei Schritte: Vorverarbeitung, Defektdetektion und Defektvisualisierung inklusive einer Defektunterscheidung. Abbildung 45 zeigt die Auswirkung der Bildverarbeitungsschritte auf Thermogramme für einen oberflächennahen bzw. einen Oberflächenschaden. Während Defekte unter der Oberfläche typischerweise als kleine runde Bildmerkmale (Hot Spot) im Thermogramm erscheinen (bekannt aus den Vorversuchen), siehe Abbildung 45a, erscheinen frühe Oberflächenschäden als kleine runde Bildauffälligkeiten in Donut-Form, siehe Abbildung 45b. Der innere, dunklere Kreis stellt dabei den Oberflächenschaden dar, während der umgebende, hellere Bereich anzeigt, dass sich der Schaden weiter unterhalb der Oberfläche erstreckt als an der Oberfläche ersichtlich ist. Der Rand eines Oberflächendefekts hat also die gleichen Eigenschaften wie ein Defekt nahe der Oberfläche.

Der erste Schritt in der Bildauswertung ist eine Vorverarbeitung. Es beginnt mit der Subtraktion des letzten Bildes von allen vorherigen Thermografieaufnahmen, sodass die Thermogramme nur die Temperaturänderung während der Aufnahme bzw. während der Abkühlphase zeigen. Dadurch werden äußere Einflüsse wie die Reflexion der Kamera eliminiert. Da sich die Aufnahmen einer Probe Versuchsbedingt in drei Bilder teilen, müssen diese im Rahmen der Vorverarbeitung zusammengesetzt werden, um schließlich eine Thermogrammsequenz der gesamten Probe zu erhalten. Dabei werden zunächst die Ränder des Probekörpers im Bild bestimmt und das Bild entsprechend zurechtgeschnitten und falls erforderlich gedreht, um nach dem Zusammensetzen

eine gemeinsame vertikale Achse aufzuweisen. Anschließend werden die Einzelbilder im Grauton aufeinander angepasst. Ein durch den Messaufbau vorgegebener Überlappungsbereich wird genutzt, um die Bildausschnitte zu einem thermografischen Gesamtbild zusammenzufügen, das den gesamten Prüfling zeigt.

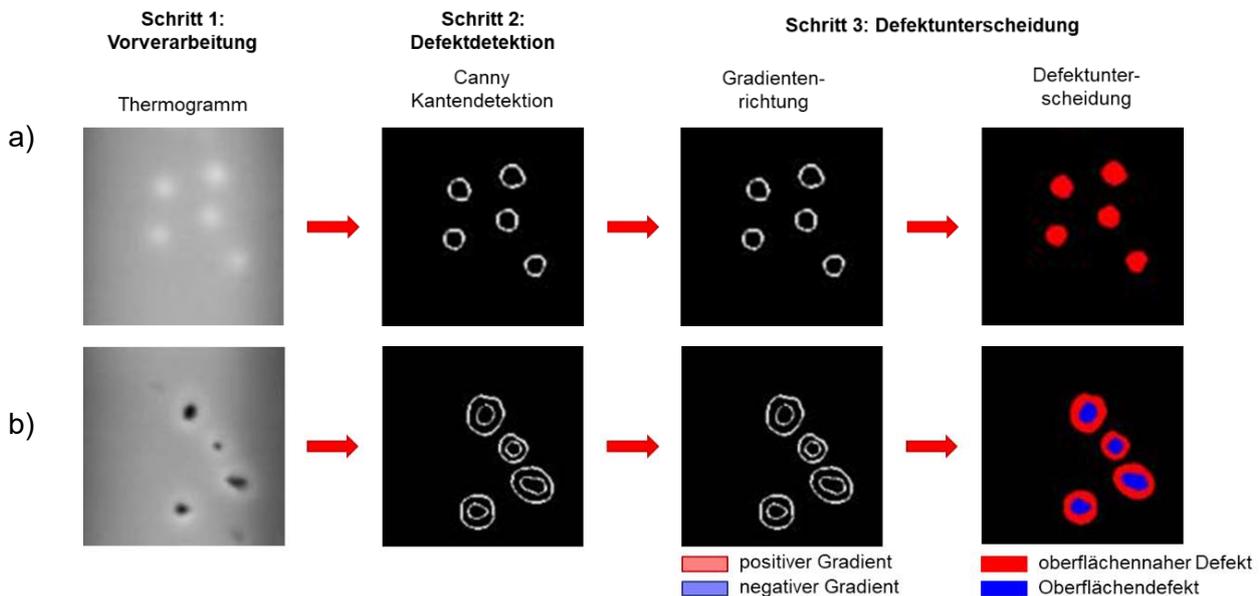


Abbildung 45: Auswirkung der Bildverarbeitungsalgorithmen auf Thermogramme von a) oberflächennahen Defekte (Hot Spot) und b) Oberflächendefekten (donut-förmig). Von links nach rechts: Beginnend mit dem Thermogramm, gefolgt von den Ergebnissen der Kantendetektion, die Überprüfung der Gradientenrichtung und die Ergebnisse der Defektunterscheidung die auf der Gradientenrichtung basiert.

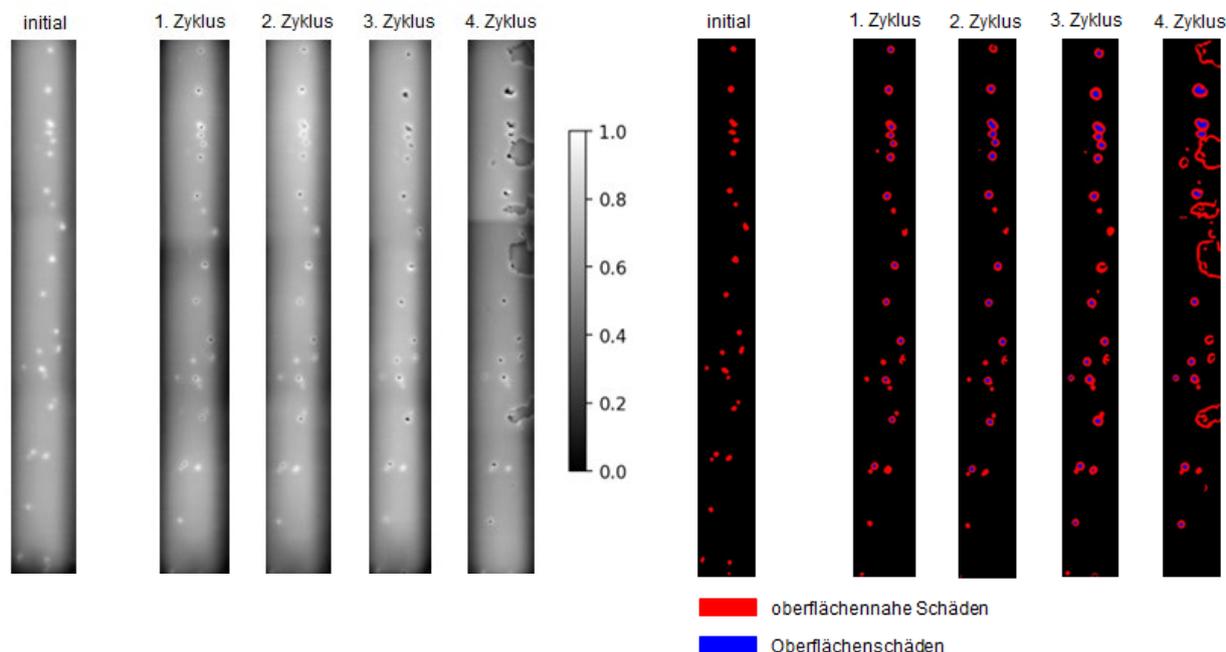
Der zweite Schritt der Bildverarbeitung ist die automatische Defekterkennung mit Hilfe eines Kantenerkennungsalgorithmus. [59] und [60] führten vergleichende Studien verschiedener Kantendetektionsalgorithmen durch und kamen zu dem Schluss, dass der Canny-Algorithmus trotz seiner Komplexität gut für die Kantendetektion von unterschiedlich geformten Kanten in verrauschten Bildern geeignet ist. Untersuchungen von [61] zur thermografischen Schadenserkennung von Photovoltaikanlagen zeigen, dass der Canny-Algorithmus zur Erkennung von Oberflächenschäden verwendet werden kann. Auch unter der Oberfläche liegende Defekte in modifizierten Metallrohren konnten mit dem Canny-Ansatz erkannt und visualisiert werden [62]. Da bei der Untersuchung der Erosionsentwicklung sowohl unter- als auch oberflächliche Defekte erkannt werden sollen, wird hier der Canny-Algorithmus zur automatischen Defektdetektion in Thermogrammen eingesetzt. Der angewandte Canny-Algorithmus ist eine Kombination aus dem Laplacian-of-Gaussian-Operator und dem Sobel-Filter, um die Vorteile beider [63], mit anschließenden zusätzlichen Merkmalen [64] zu nutzen, um das Ergebnis des ursprünglichen Canny-Algorithmus in Bezug auf die lückenlose Darstellung der erkannten Kanten zu verbessern. Für die Erkennung der Defekte wird das Thermogramm zunächst mit einem Gaußschen Tiefpassfilter geglättet, um Bildrauschen zu unterdrücken. Die anschließende Anwendung des Laplace-Operators hebt Regionen mit starken Intensitätsschwankungen (Kanten im Bild) hervor und dient somit als Vorbereitung für die Anwendung des Sobel-Operators. Mit dem Sobel-Operator werden die Intensitätsgradienten des Thermogramms für jedes Pixel sowie deren Richtung bestimmt. Anschließend werden die zusätzlichen Merkmale nach Lourenco implementiert, bestehend aus einer Nicht-Maximum-Unterdrückung, einem Gradienten-Matching und einer Hysterese [64]. Alle drei Merkmale werden verwendet, um die erkannten Kanten auf Lücken zu

prüfen. Pixel, die eine Lücke darstellen, werden dann auf der Grundlage des Status der benachbarten Pixel neu bewertet, so dass z. B. im Thermogramm unscharfe Kanten im ausgewerteten Bild dennoch als geschlossene Kanten angezeigt werden. Das Gesamtergebnis ist eine binäre Matrix, die die Information über den Zustand eines Pixels enthält bzw. ob das Pixel Teil einer Kante ist oder nicht, siehe Abbildung 45.

Der dritte Schritt der Bildverarbeitung ist die Visualisierung der Defekte und deren Unterscheidung. Es gibt mehrere Möglichkeiten, zwischen den Defekten zu unterscheiden, zum Beispiel Intensität, Größe und Form eines Defekts. Zur Unterscheidung von oberflächennahen- und Oberflächendefekten konzentriert sich die Bildverarbeitung hier ausschließlich auf die Auswertung der Intensitätsgradienten. Zunächst werden die detektierten Kanten hinsichtlich ihrer Gradientenrichtung analysiert. Um zu entscheiden, ob es sich um einen oberflächennahen- oder oberflächlichen Defekt handelt, werden alle ersten linksseitigen Gradienten eines detektierten Defekts gemittelt, um einen mittleren Gradienten für die linke Seite des Defekts zu berechnen. Je nach Gradientenrichtung der linken Kante, d.h. dem Vorzeichen des Gradienten, wird die Kontur des Defekts rot oder blau ausgefüllt. Ein positiver Gradient definiert einen oberflächennahen Defekt (rot), ein negativer Gradient (blau) einen oberflächlichen Defekt, siehe Abbildung 45.

Ergebnisse

In Abbildung 46 sind die Ergebnisse der Thermografiemessungen einer Probe mit eingebrachten Luftblasen in der Lackschicht dargestellt, in Abbildung 46a als vorverarbeitetes, normiertes Thermogramm und in Abbildung 46b als Ergebnisbild nach den Verarbeitungsschritten der Defektdetektion und der Defektunterscheidung.



a)

b)

Abbildung 46: Thermografische Schadensentwicklung eines Probekörpers mit eingebrachten Luftblasen im Lack bei einer Anregungsdauer von 10 s, dargestellt als a) vorverarbeitetes Thermogramm und b) nach durchgeführter Defektunterscheidung.

Es ist jeweils das Ergebnis für die Initialuntersuchung sowie für die Untersuchung nach jedem Belastungszyklus zu sehen. Bei der initialen Untersuchung der Probe in Abbildung 46a sind die eingebrachten Luftblasen unter der Oberfläche als helle Punkte im Thermogramm zu sehen. Bereits

nach der ersten Belastung der Probe mit Regen weist die Oberfläche des Probekörpers sichtbare Schäden auf, welche dabei ausschließlich an den Positionen auftreten, an denen zuvor die Luftblasen unter der Oberfläche detektiert werden konnten. Diese entstandenen Pin-holes werden mit laufender Belastung größer, wie in den Thermogrammen eindeutig zu sehen ist. In Abbildung 46b lassen sich die Phänomene aus den vorverarbeiteten Thermogrammen einfacher darstellen und interpretieren. Hier kann anhand der Farbe eindeutig eine Schadensart zugeordnet werden. Es ist festzuhalten, dass der Algorithmus zur Defektunterscheidung noch Verbesserungspotential besitzt, da insbesondere große beschädigte Bereiche, die bis zum Probenrand reichen, nicht zuverlässig eingefärbt werden. Dennoch kann mit Hilfe dieser ausgewerteten Daten in einem nächsten Schritt die Quantifizierung des Zustandes der Probe vorgenommen werden. Dazu werden zunächst alle Pixel, die einem oberflächennahen Schaden zuzuordnen sind, gezählt (rot) und der prozentuale Anteil dieser Fläche im gesamten Bild gebildet. Dasselbe wird mit den Pixeln durchgeführt, die zu einem oberflächlichen Schaden gehören.

Die so berechneten prozentual beschädigte Flächenanteile können in einem Diagramm dargestellt werden. In Abbildung 47 sind die prozentualen beschädigten Flächenanteile sind in beide Schadensarten farblich unterteilt für eine Probe mit eingebrachten Luftblasen im Lack dargestellt.



Abbildung 47: Thermografisch ermittelte prozentuale Fläche von oberflächennahen und oberflächlichen Defektbereichen für eine Probe mit Luftblasen im Lack nach unterschiedlichen Belastungsdauern.

Während im initialen Zustand die Probe von außen betrachtet als unbeschädigt betrachtet wird, zeigt der Blick ins Material mit Hilfe der aktiven Thermografie, dass die Probe bereits zu gut 2 % beschädigt ist. Der Anteil der oberflächennahen Schädigung steigt mit andauernder Belastung bis zu einem Anteil von 8 %. Oberflächenschädigungen setzten bei diesem Probekörper bereits nach der ersten Belastung mit Regen ein. Wie bei den oberflächennahen Schäden wächst der prozentuale Anteil an Oberflächenschäden mit andauernder Belastung. Insbesondere nach dem letzten Belastungszyklus ist ein größerer Anteil an beschädigter Oberfläche zu verzeichnen, insbesondere da der Algorithmus zum Einfärben der unterschiedlichen Schadensarten bei großen Abplatzungen

noch Verbesserungspotential aufweist. Dieses Diagramm zeigt also die Erosionsrate zu Beginn der Erosion, wie sie in der Literatur unter [65] dargestellt wird.

5.5.2.4. Zusammenfassung der thermografischen Randzonenanalyse

Die Weiterentwicklung der Thermografischen Randzonenanalyse hat gezeigt, dass aktive Thermografie alle gestellten Anforderungen erfüllt. Die Versuche zeigen, dass die Messbarkeitsgrenze von Defekten unter den verwendeten Versuchsparametern und Randbedingungen liegt bei einem Tiefe-zu-Durchmesser-Verhältnis von 1,04. Ein Defekt kann demnach noch detektiert werden, wenn die Tiefe, in der er sich befindet in etwa seinem Durchmesser entspricht. Die Detektierbarkeit hängt dabei stark von der Tiefe ab und kann sich daher bei geringen Tiefen über einen Wert von 1,04 hinaus verbessern. Mit Hilfe aktiver Thermografie konnten Defekt in der Randzone der Probekörper dargestellt, und deren Defektwachstum detektiert und quantifiziert werden. Dabei kann eindeutig zwischen den zwei Schadensarten, nämlich oberflächennaher Schäden sowie Oberflächenschäden unterschieden werden. Anhand der Quantifizierung der Schadensflächen ist es möglich, den Schadenszustand des Probekörper bzw. der Rotorblattvorderkante zu bewerten.

5.5.3. Demonstrator

Nach einer Evaluierung der am besten geeigneten Messmethode wurde ein Demonstrator aufgebaut. Dieser sollte auf Basis der Erkenntnisse aus AP 5 und AP 6.2 in einer fertigungsnahen Umgebung zeigen, wie ein kommerzieller Sensor in der Qualitätssicherung eingesetzt werden kann.

Für die Inspektion in der fertigungsnahen Umgebung wurde daher ein mobiles Messsystem entwickelt, welches auf einem Stativ befestigt werden kann, um so flexibel den am Rotorblatt interessanten Bereich in das Bildfenster der Kamera zu bringen. Abbildung 48 zeigt das entsprechende CAD-Modell.

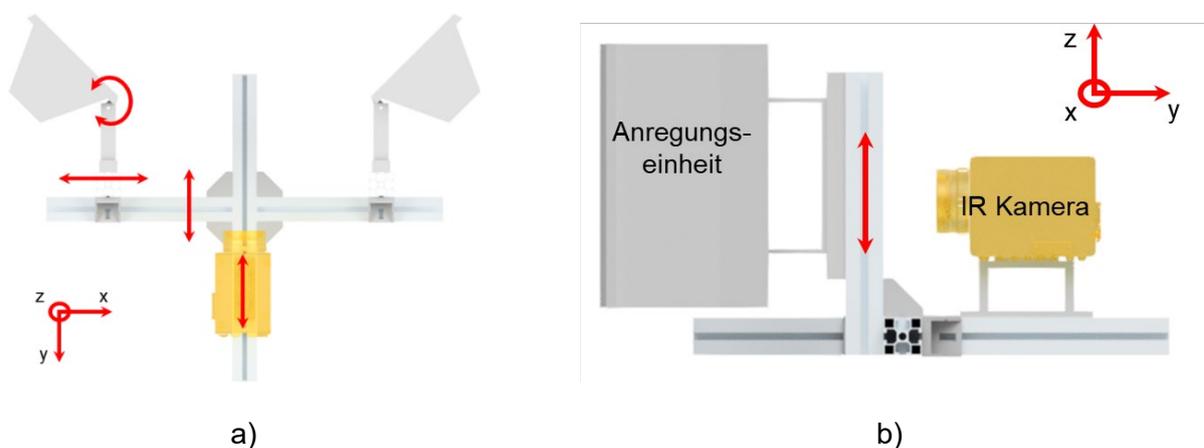


Abbildung 48: CAD-Modell des mobilen Messsystems mit markierten Bewegungsrichtungen, a) Ansicht von oben, b) Seitenansicht.

Ein modularer Aufbau des mobilen Messsystems ermöglicht eine flexible Anpassung an die Gegebenheiten vor Ort. Durch das Stativ ist das gesamte Messsystem in der Höhe sowie im Neigungswinkel verstellbar. Die für den Messsystemträger verwendeten MayTech-Profile ermöglichen eine Bewegung der Anregungseinheit in drei Richtungen. Ebenso kann die Kamera in der Messobjektnormalen bewegt werden, um so den optimalen Abstand zwischen Messobjekt und Kameraobjektiv einzustellen. Es ist ebenso möglich, das Kameramodell gegen ein anderen auszutauschen und auf dem Messsystemträger zu befestigen. Der Computer für die Messaufnahmen ist durch ein langes Kabel zur Kamera recht flexibel aufstellbar. Einzig eine

Stromversorgung muss in der Fertigungsumgebung bzw. an der Windenergieanlage vorhanden sein, um dieses Messsystem verwenden zu können. Abbildung 49 zeigt den standardmäßigen Aufbau des mobilen Messsystems an einem Rotorblatt.

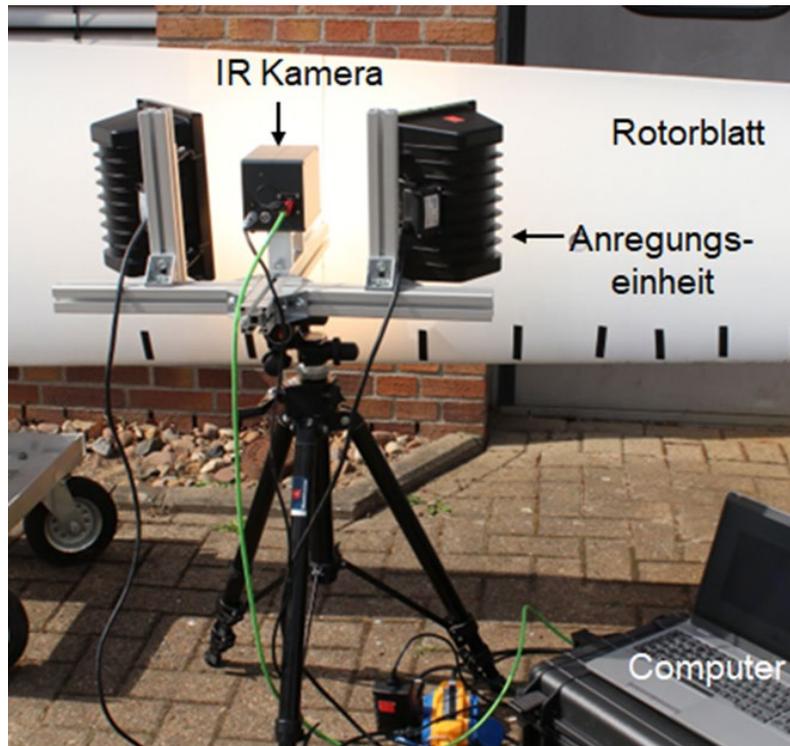


Abbildung 49: Foto des standardmäßigen Aufbaus des mobilen Messsystems.

Wie in diesem Foto zu sehen, ist es nicht immer möglich, die Rotorblattvorderkante ideal auszurichten bzw. das Messsystem passend dazu aufzustellen. Für diesen Fall lässt sich das Messsystem einfach vom Stativ trennen und auf andere Weise ideal zur Rotorblattvorderkante ausrichten, wie in Abbildung 50 zu sehen ist.

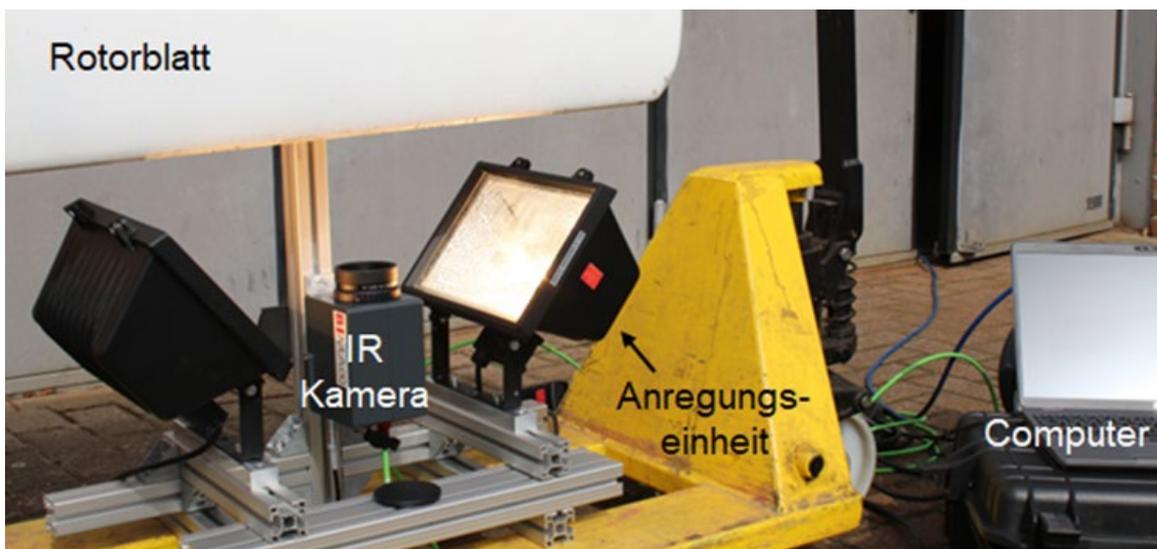


Abbildung 50: Foto des umgebauten und an die Messsituation angepassten mobilen Messsystems.

Um zu überprüfen, ob die thermografische Messung nicht nur im Labor, sondern auch im Freiland anwendbar ist, werden in-situ Messungen an einem realen Rotorblatt durchgeführt. Dazu wird das

im Projekt entwickelte mobile Messsystem verwendet, in dem die Thermografiekamera aus dem Laborprüfstand mit zwei 1 kW Halogenlampen montiert ist, siehe Abbildung 51.

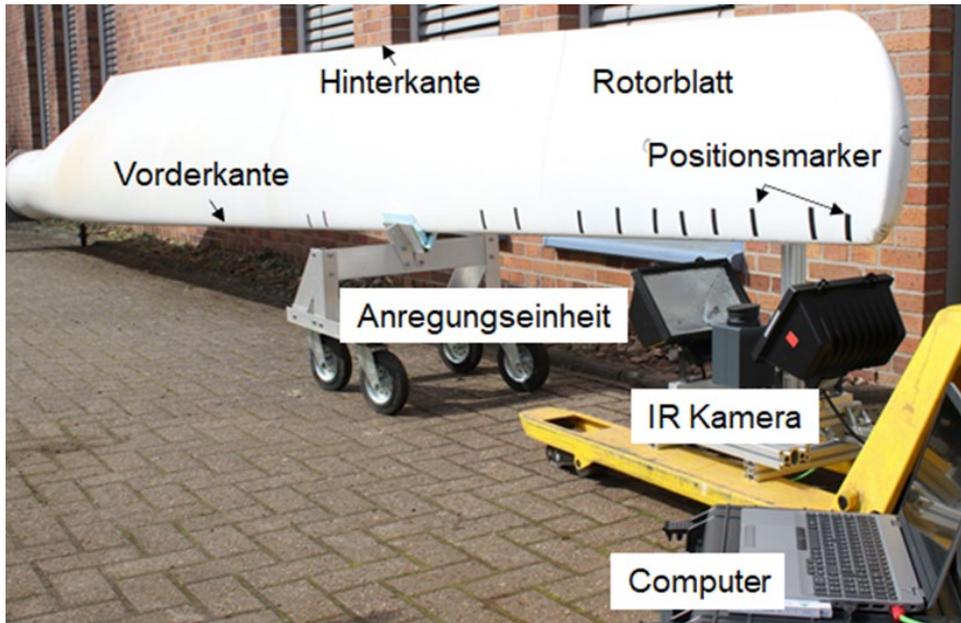


Abbildung 51: Foto des umgebauten mobilen Messsystems, positioniert an der Vorderkante eines Rotorblatts bei der Durchführung der in-situ Messungen.

Der mobile Messaufbau wird an der Vorderkante des Rotorblattes positioniert und so eingestellt, dass ein kleiner Bereich der Vorderkante optimal angeregt und aufgezeichnet werden kann. Die Erfahrung hat gezeigt, dass eine Aufnahmedauer von 30 s ausreicht, um die notwendigen Informationen aus der Abkühlphase in einer Thermogrammsequenz zu erfassen. Für die Messung der Randzone (ca. 1,5 mm unter der Oberfläche) sind kürzere Anregungsdauern bis zu 20 s geeignet, während längere Anregungsdauern von > 30 s und mehr die Gewinnung von Informationen aus tieferen Materialschichten ermöglichen. Abbildung 52 zeigt ein visuelles Bild der Rotorblattvorderkante und das entsprechende Thermogramm.

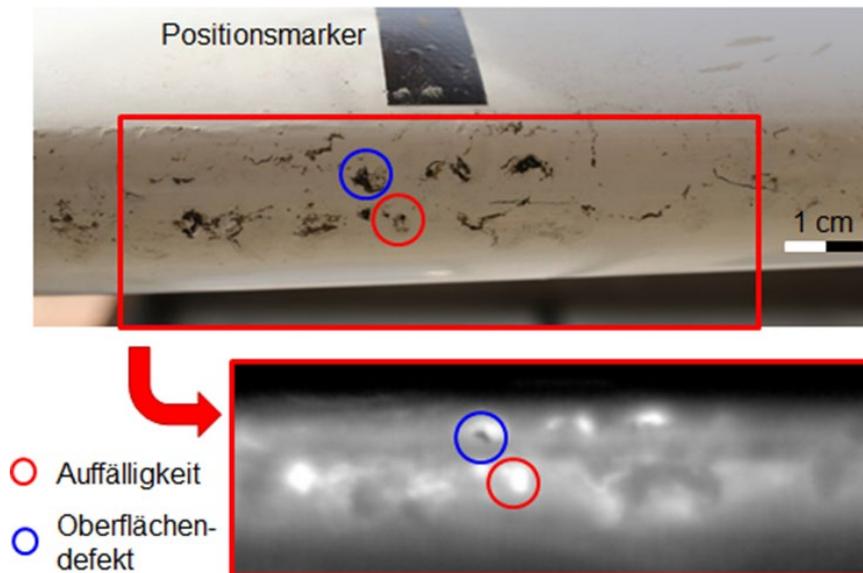


Abbildung 52: Visuelles und thermografisches Bild von in-situ Messungen an einer echten Rotorblattvorderkante.

Man beachte, dass die Bilder aus unterschiedlichen Winkeln aufgenommen wurden, so dass das visuelle Bild den schwarzen, angebrachten Positionsmarker und einen Teil der Rotorblattoberfläche zeigt, während das Thermogramm nur die Vorderkante zeigt (roter Kastenabschnitt). Vergleicht man das gesamte Thermogramm mit dem visuellen Bild, so stimmen die gefundenen Strukturen relativ gut mit den Laborversuchen überein. Nach der Interpretation im Thermogramm liegt innerhalb des blauen Kreises eine Oberflächenbeschädigung vor, die im visuellen Bild bestätigt werden kann. Die Theorie besagt, dass Hot Spots unter der Oberfläche liegende Defekte darstellen, innerhalb des roten Kreises sollte sich ebenfalls ein unterirdischer Defekt befinden. Bei der manuellen Prüfung wurde an dieser Stelle jedoch eine Delle entdeckt. Der thermografische Unterschied zwischen einer Delle und den zuvor untersuchten oberflächennahen und oberflächlichen Defekten wurde bisher nicht untersucht. Aus diesem Grund und wegen des Fehlens einer Referenzmessung kann keine eindeutige Aussage über die Unregelmäßigkeit im Thermogramm (roter Kreis) getroffen werden. Für eine eindeutige Interpretation der Thermogramme ist es jedoch notwendig, den Einfluss von Dellen an der Vorderkante explizit zu untersuchen. Damit sind thermografische In-situ-Messungen zwar möglich, aber die Interpretation des Thermogramms und der möglicherweise auftretenden Schäden ist eine erhöhte Herausforderung.

Für Untersuchungen an einer stehenden Windenergieanlage eignet sich das Messsystem auf dem Stativ jedoch nicht, da diese lediglich auf einem Hubsteiger platziert werden kann und somit immer eine Relativbewegung zwischen dem Messsystem und der Rotorblattvorderkante vorhanden ist. Daher wurde ein zweites mobiles Messsystem entwickelt, dessen CAD-Modell in Abbildung 53 zu sehen ist.

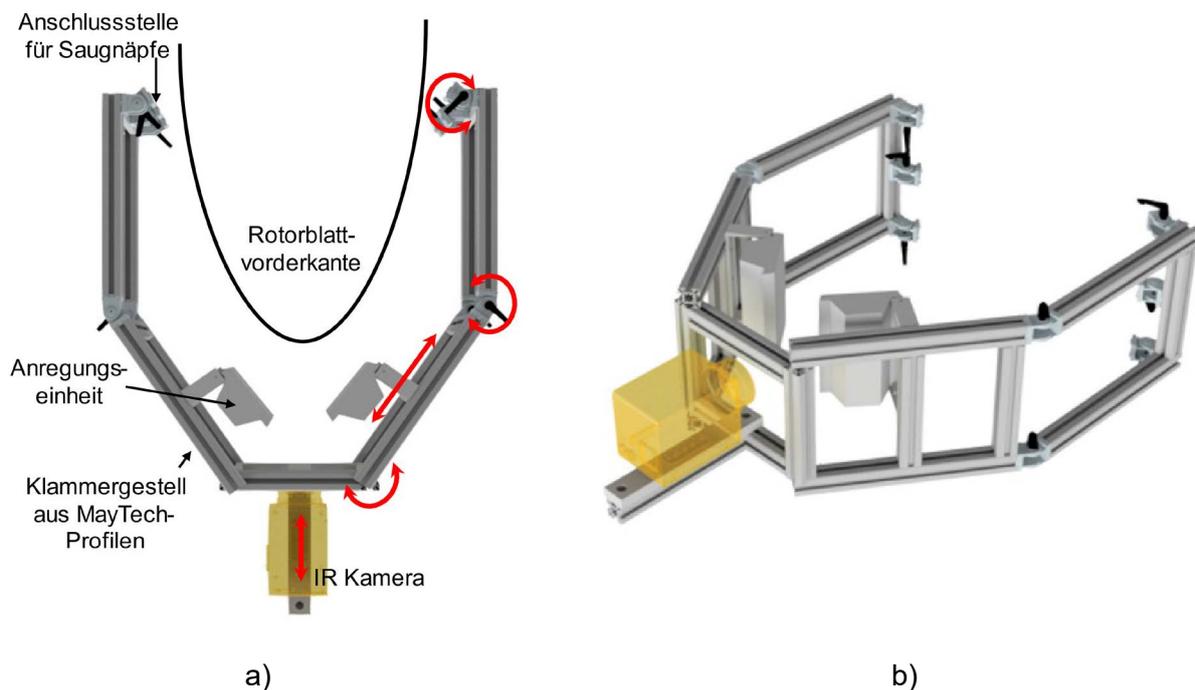


Abbildung 53: CAD-Modell des mobilen Klammersmesssystems mit markierten Bewegungsrichtungen, a) Ansicht von oben, b) isometrische Ansicht

Hauptaugenmerk lag bei der Konstruktion auf der Vermeidung der Relativbewegung sowie der Einstellung eines optimalen Messabstandes. Das mobile Messsystem funktioniert wie eine Klammer, die sich mittels starker Saugnäpfe am Rotorblatt befestigen lässt. Der optimale Messabstand kann über die Stützen unterhalb und oberhalb der Kamera eingestellt werden. Um Gewicht einzusparen, wurden die bisher verwendeten Halogenstrahler durch kleinere Modelle

ersetzt. Das verlängert jedoch die Dauer der Datenaufnahme um einige wenige Sekunden. Abbildung 54 zeigt den am Rotorblatt angebrachten Demonstrator während einer Messung.

Die Verwendung des thermografischen Messsystems in dieser mobilen Ausführung zeigt, dass die Messung an sich zwar berührungslos ist, das Messsystem optimal im Freifeld an der Windenergieanlage berührungslos zu positionieren jedoch eine Herausforderung darstellt, die im Rahmen des Projektes nicht gelöst werden konnte. Die Untersuchungen in diesem Projekt insbesondere die Ergebnisse aus AP 6.2 legen nahe, die Thermografie vorzugsweise in der Fertigungsumgebung als Qualitätsprüfung einzusetzen, um verborgene Defekte zu detektieren und zu markieren, um diesen in späteren Wartungen besonderen Aufmerksamkeit zu schenken. Der Einsatz von Thermografie während der Wartung an der Windenergieanlage ist zwar möglich, jedoch mit den beiden hier entwickelten Demonstratoren nicht berührungslos. Diese Herausforderung bietet daher weiteres Untersuchungspotential.

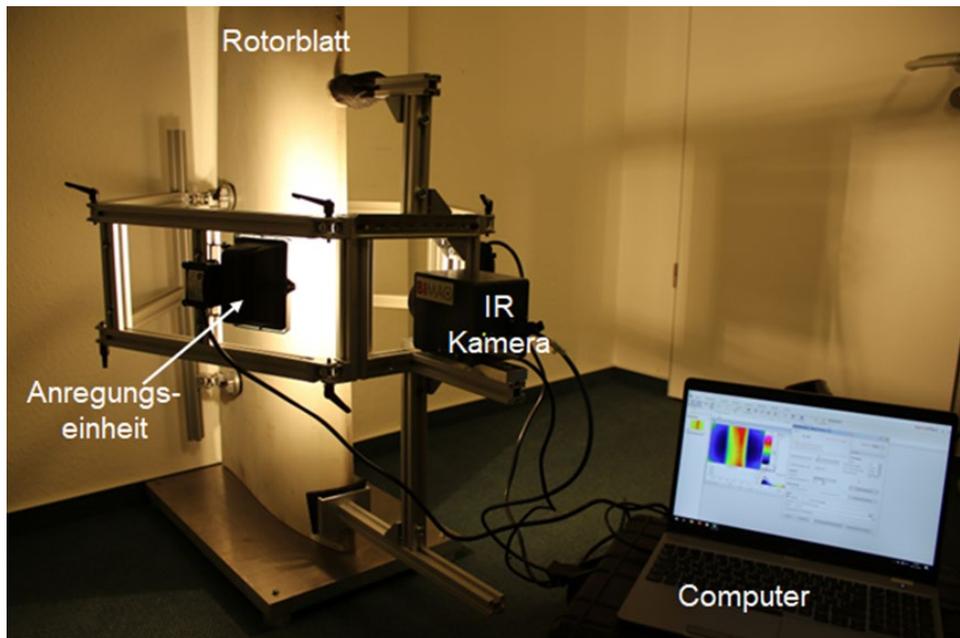


Abbildung 54: Foto des mobilen Klammersmesssystems im Einsatz an der Vorderkante eines Rotorblattabschnitts.

5.5.4. Evaluation

In der Evaluationsphase sollten weitere Messmethoden aus dem Screening auf ihre praktische Eignung zur Erkennung der Defektgrößen hin untersucht werden. Die Ergebnisse, die aus AP 6.1 – AP 6.3 im Zuge der Recherche sowie mittels aktiv thermografischer Messungen erzielt wurden waren sehr überzeugend und haben alle zum Projektbeginn festgelegten Messanforderungen erfüllt. Der zunächst vorgesehene Test auf praktische Eignung der am IFAM zur Verfügung stehenden verschiedenen Verfahren zur Qualitätssicherung im Herstellungsprozess war daher nicht erforderlich.

5.6. Erosionsentwicklung – vom initialen Defekt zum Oberflächenschaden

5.6.1. Charakterisierung der Proben mit Kartografie des initialen Zustandes und nach Erosionsbelastung

Anhand der Probe A_S-2 werden exemplarisch die Untersuchungsergebnisse der im Projekt verwendeten Untersuchungsverfahren (3D-Profilometrie, Thermografie und μ -CT/XRM)

vergleichend zusammengestellt. Die Probe A_S-2 weist in den Spachtel eingebrachte Initialfehler in Form von Luftblasen (durch eingebrachte Styroporkugeln) auf.

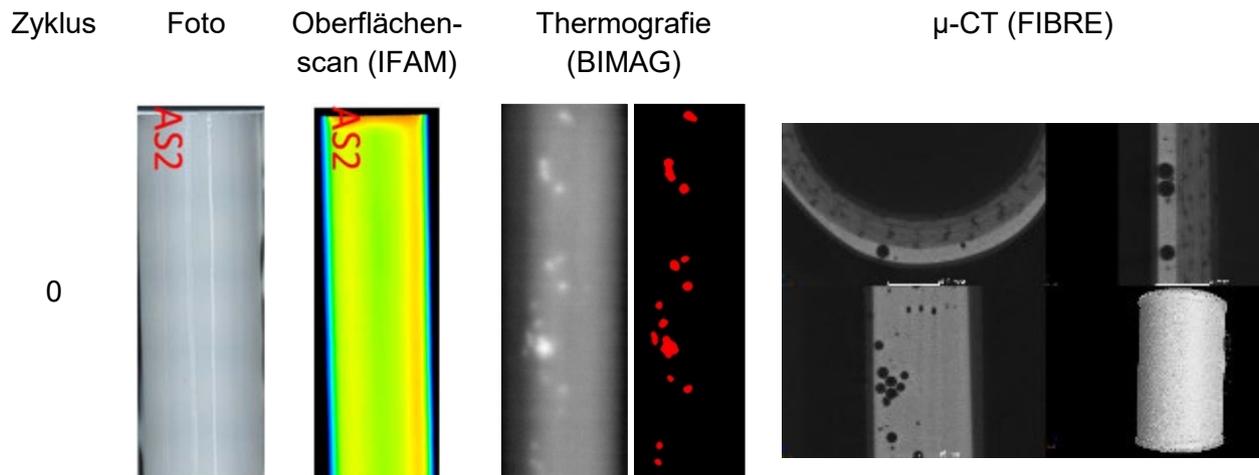


Abbildung 55: Vergleich der angewandten Messverfahren an einer Probe mit Luftblasen im Spachtel (A_S-2) vor dem ersten Regenbelastungszyklus.

Anhand der in Abbildung 55 dargestellten Messergebnisse wird deutlich, dass die Initialfehler im Spachtelsystem nicht mittels 3D-Profilometrie erfasst werden. Mittels Thermographie und μ -CT lassen sich hingegen deutlich die Luftblasen im Spachtel darstellen. Hier zeigen beide Messverfahren mit deutlichem Kontrast die Lokalisierung dieser einzelnen Initialdefekte.

In Abbildung 56 wird der zuvor dargestellte Bereich der Probe A_S-2 nach den entsprechenden Regenerationszyklen gezeigt, um exemplarisch den Regenerosionsschadensfortschritt nachvollziehen zu können.

Die bereits zuvor beschriebenen sichtbaren Luftblasen im Spachtel der Probe häufen sich an einer Stelle der Probe in Form eines Clusters an. Dieser Cluster von Luftblasen im Spachtelmaterial unterhalb der Oberfläche ist sehr deutlich mittels Thermographie als heller Fleck erkennbar. Auch im μ -CT zeigt sich dieser Cluster von Luftblasen aufgrund des erheblichen Dichteunterschieds zwischen Luft und Spachtelmaterial sehr deutlich. Anhand der Fotografie und des Oberflächenscans ist dieser Defekt unterhalb der Beschichtung nicht sichtbar, weder nach dem ersten Zyklus noch nach dem zweiten Zyklus. Nach dem zweiten Zyklus ist lediglich mittels Oberflächenscan ein Pin-hole Defekt an dieser Stelle an der Probe nachweisbar, welches aber nicht die tatsächliche Schädigung unterhalb der Oberfläche zeigt. Im Thermogramm sowie im μ -CT ist jedoch das tatsächliche Schadenswachstum, insbesondere das unterhalb der Oberfläche sichtbar. Während im μ -CT sehr detailliert die Veränderung des Schadens zu beobachten ist, kann im Thermogramm nur das ungefähre Ausmaß eines solchen Defekt-Clusters dargestellt werden. Dennoch liefert es ausreichend Hinweise auf das Schadensausmaß unterhalb der Oberfläche. Während des 3. Belastungszyklus hat das Beschichtungssystem der Probe A_S-2 der Regenerosion nicht standgehalten, sodass sich die Beschichtung inklusive Spachtel großflächig vom Probekörper ablöste und damit das GFK des Probekörpers freigelegt wurde. Es ist bemerkenswert, dass diese starke Beschädigung innerhalb des dritten Belastungszyklus entstand, ohne zuvor signifikante Schäden an der Oberfläche der Beschichtung aufzuweisen. Hierbei wird deutlich, dass eine reine Oberflächenanalyse der Beschichtung sich nicht für eine ausreichende Beurteilung des Beschichtungszustands eignet.

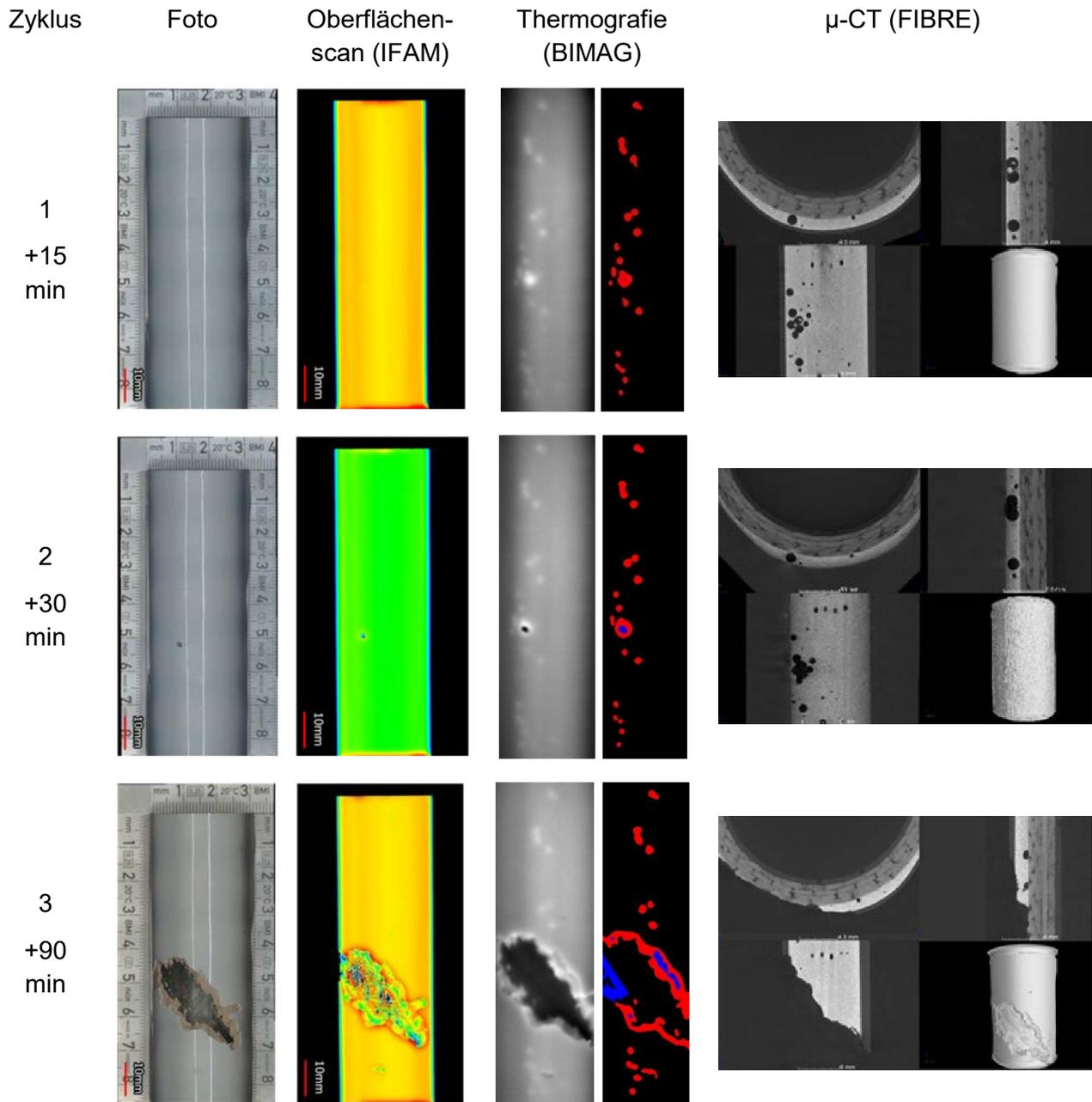


Abbildung 56: Vergleich der angewandten Messverfahren an einer Probe mit Luftblasen im Spachtel nach unterschiedlichen Belastungszyklen.

In Abbildung 57 wird die Kartographierung der entstandenen Erosionsschäden und Defekten an den Proben beispielhaft anhand eines Defekts auf der Probe A_S-2 aufgezeigt.

Die Kartographierung erfolgt anhand von x und y Koordinaten, welche sich aus der Fotoaufnahmen der Probe auf der Messplatte mit Skalierung an der x- und y-Achse ablesen lassen. Die Defekte und Fehlstellen werden zur Kartographierung mittig mit senkrechten Linien von beiden Achsen angepeilt. Durch die vergrößerte Darstellung des Defekts lässt sich ein größerer Hohlraum unterhalb der kreisförmigen Öffnung an der Oberfläche erkennen. In diesem Bereich hat die Regenerosion direkt am Spachtel gewirkt und im dritten Zyklus zu einer erheblichen Erosionsschädigung der Probe bis aufs GFK-Grundmaterial geführt.

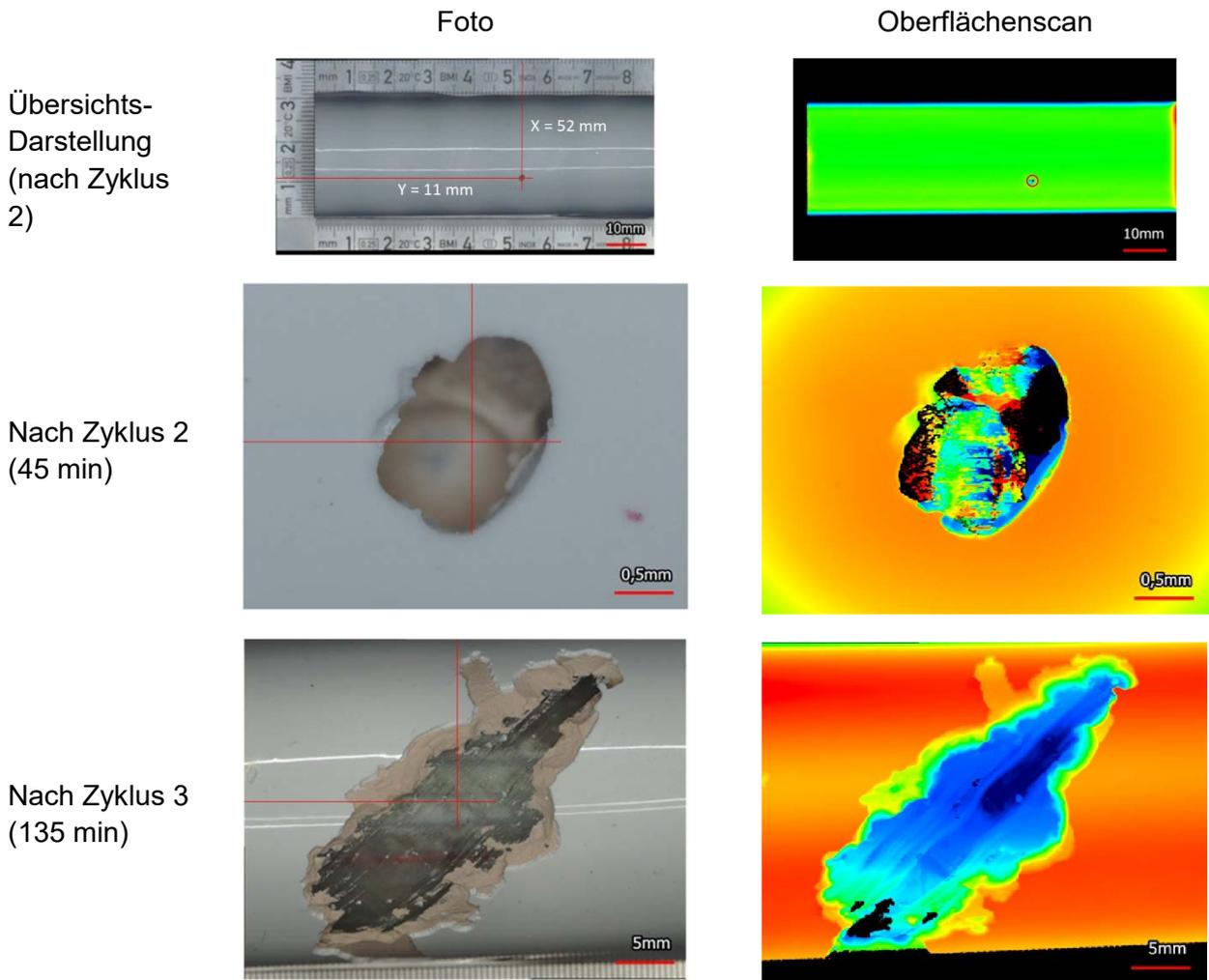


Abbildung 57: Darstellung der Kartographierung der Defekte und vergrößerte Aufnahme eines Defektes an Probe A_S-2 Position $x = 52 \text{ mm}$ & $y = 11 \text{ mm}$.

Abbildung 58 zeigt eine Erosionsschädigung der Probe A_S-2 bei $x = 80 \text{ mm}$ und $y = 15 \text{ mm}$. Diese beispielhafte Schädigung zeigt einen Erosionsfortschritt, der sich lediglich auf die LEP-Beschichtung der Probe begrenzt. Eine Beeinflussung des Spachtels der Probe ist trotz dessen Initialdefekten nicht erfolgt.

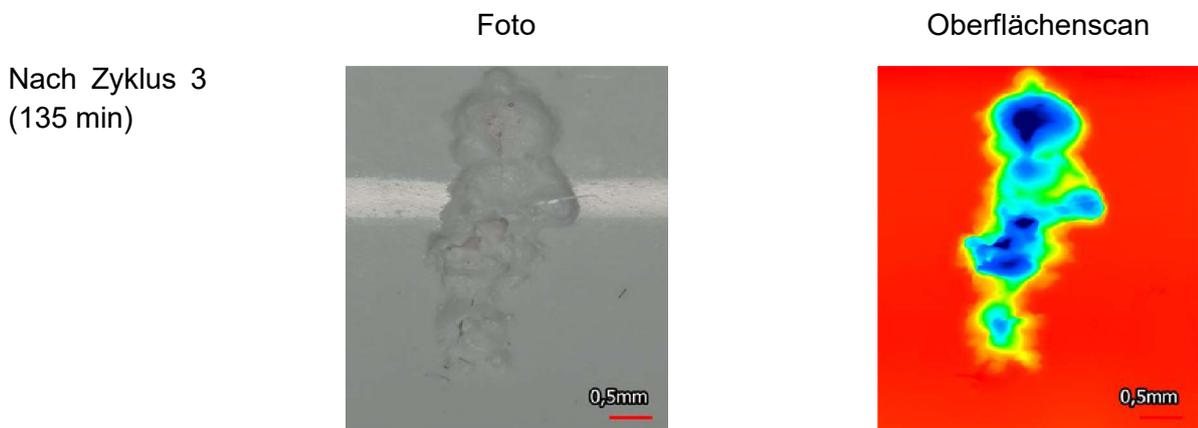


Abbildung 58: Vergrößerte Aufnahme eines Defektes an Probe A_S-2 Position $x = 80 \text{ mm}$ & $y = 15 \text{ mm}$.

Abbildung 59 zeigt vergrößerte Aufnahmen von einer exemplarischen Defektstelle ($x = 25 \text{ mm}$ und $y = 15 \text{ mm}$) der Probe A_B-2 mit Initialdefekten in der LEP-Beschichtung.

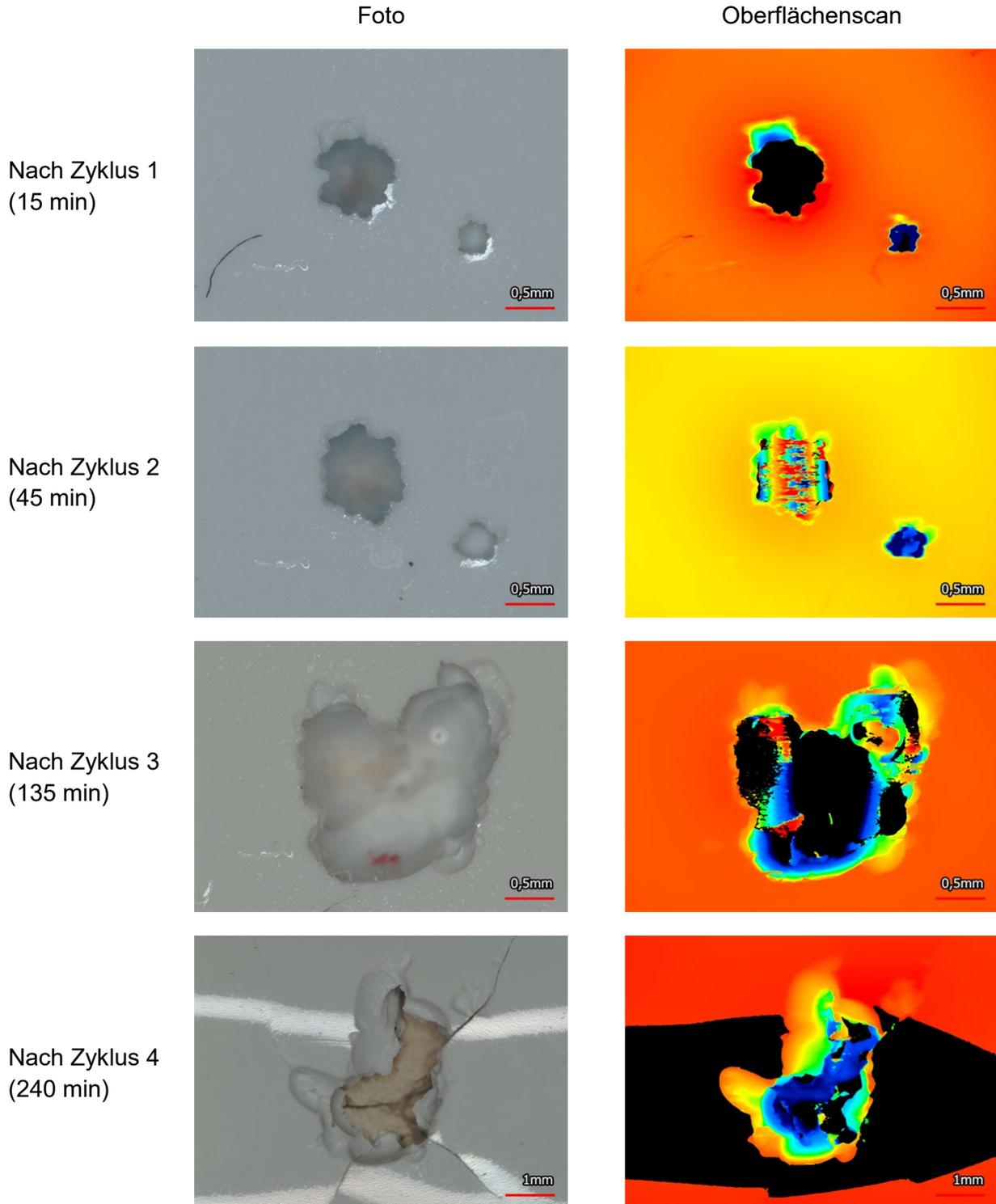


Abbildung 59: Vergrößerte Aufnahme eines Defektes an Probe A_B-2 Position $x = 25 \text{ mm}$ & $y = 15 \text{ mm}$.

Die Initialschädigung durch Luftblasen in der LEP-Beschichtung führt nach 1. und 2. Belastungszyklus an der Oberfläche zu keiner signifikanten Beschädigung. Nach dem 3. Zyklus wird der Schaden unter der Oberfläche sichtbar, der schließlich nach dem 4. Zyklus zu einem erheblichen

Erosionsschaden bis aufs Spachtelsystem incl. Rissbildung in der Beschichtung führt. Der grundsätzliche hohe Erosionswiderstand der LEP-Beschichtung führt dazu, dass erhebliche Erosionsschäden erst im 4. Belastungszyklus auftreten. Bis nach dem 3. Zyklus wird die LEP-Beschichtung nicht durch die Regenerosion durchbrochen. Das Spachtelmaterial mit geringerem Erosionswiderstand wurde somit nicht frühzeitig freigelegt, was die Schädigungsausbreitung verlangsamt.

5.6.2. Korrelation von Initialschäden und Erosionsschäden zur Aufklärung von Versagensmechanismen (Schadenskatalog)

Der Schadenskatalog als Hauptergebnis und vor allem als Medium zur Weitergabe des Wissens in die Industrie einschließlich einzelner Beschreibungen ist Anhang A zu entnehmen.

Anhand des Schadenskatalogs lassen sich nachfolgende Erkenntnisse festhalten:

- Durch Initialschäden in der LEP-Beschichtung beginnt bereits nach kurzer Regenerosionsbelastung ein stetiger Erosionsfortschritt, da die Beschichtung zwar den größten Erosionswiderstand bietet und mit seinen vergleichsweise elastischen Eigenschaften Kräfte aufnehmen kann, jedoch direkt der Regenbelastung ausgesetzt ist.
- Durch Initialschäden im Spachtel konnten Erosionsschäden an der Probenoberfläche grundsätzlich erst im späteren Belastungsverlauf (ca. nach dem 3. Zyklus) nachgewiesen werden. Sobald jedoch Oberflächenschäden vorhanden sind, kommt es zu einem plötzlichen Versagen des Beschichtungssystems, da die Belastung durch den Regen am vorgeschädigten spröden Spachtelmaterial zu großflächigen Beschichtungsablösungen führt.
- Durch Initialschäden im Laminat (sowohl Lufteinschlüsse als auch Delaminationen) konnte kein nachweisbarer Einfluss auf die Entstehung von Erosionsschäden an oder innerhalb der Probe ermittelt werden. Es ist zu vermuten, dass die durch Regenbelastung induzierten Kräfte nicht groß genug sind, um in den Tiefen des GFK von innen heraus ein Schadenswachstum zu veranlassen.
- Proben ohne Initialschäden wiesen dennoch Oberflächenschäden auf. Diese sind vermutlich durch natürliche, initiale Defekte, die bei der Herstellung nicht auszuschließen sind, entstanden.
- Die B-Proben der Versuchsreihe weisen grundsätzlich eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen Regenerosion als die A-Proben auf. Es kann festgestellt werden, dass die durchaus extremen Parameter der Regenerosionsversuche bei den meisten untersuchten B-Proben zu keinen signifikanten Regenerosionsschädigungen geführt haben, bei den A-Proben, insbesondere den initial beschädigten Proben hingegen schon.

Zur finalen Bewertung des Schadenszustandes der einzelnen Proben sind in Abbildung 60 die prozentual beschädigten Flächenanteile aufgetragen über der Belastungsdauer dargestellt, welche aus den verarbeiteten Thermografiedaten hervorgehen. Abbildung 60a zeigt den prozentualen Flächenanteil von Oberflächenschäden und oberflächennahen Schäden für eine mit Luftblasen im Lack modifizierte Probe. In Abbildung 60b ist der Defektanteil für eine Probe mit Luftblasen im Spachtel zu sehen. Erkennbar ist, dass der Trend der Schädigung wie bei der Probe mit Luftblasen im Lack ein wachsender ist. Der Unterschied besteht nicht nur darin, dass der Anteil der Defekte unter der Oberfläche zu Beginn größer ist, sondern auch darin, dass die oberflächliche Schädigung erst zu einem deutlich späteren Zeitpunkt auftritt, sich dann aber vergleichsweise schnell entwickelt. Dies bestätigt die bisherigen Beobachtungen. Auffällig ist, dass der prozentuale Anteil von oberflächennahen Schäden nach den ersten zwei Belastungszyklen rückläufig ist. Dies liegt vermutlich daran, dass die Umgebungsbedingungen während der Versuche variiert haben, da die

Messungen an unterschiedlichen Tagen und zu unterschiedlichen Jahreszeiten aufgenommen wurden. Tatsächlich geht das Wachstum der Defekte, die sich unterhalb der Oberfläche befinden, nicht zurück, wie die μ -CT-Untersuchungen dazu zeigen. Der Schadensanteil bei einer Probe mit Luftblasen im GFK ist in Abbildung 60c zu sehen. Wie bei den Vergleichen der Untersuchung zuvor festgestellt, haben die Luftblasen in tieferen Schichten vermutlich keinen direkten Zusammenhang mit den Auftretenden Erosionsschäden. Da die Probe somit als annähernd ideal und Defektfrei betrachtet werden kann, uns insbesondere mit dem thermografischen Messverfahren auch keine Defekte im GFK detektiert werden konnten, treten sowohl die Schäden unter der Oberfläche als auch Schäden an der Oberfläche erst nach deutlich längerer Belastung auf. Einige der Proben mit Defekten im GFK weisen auch nach vier Belastungszyklen keine oder nur sehr geringe Schädigungen in der Lackschicht auf und wurden daher bei dieser Grafik vernachlässigt.

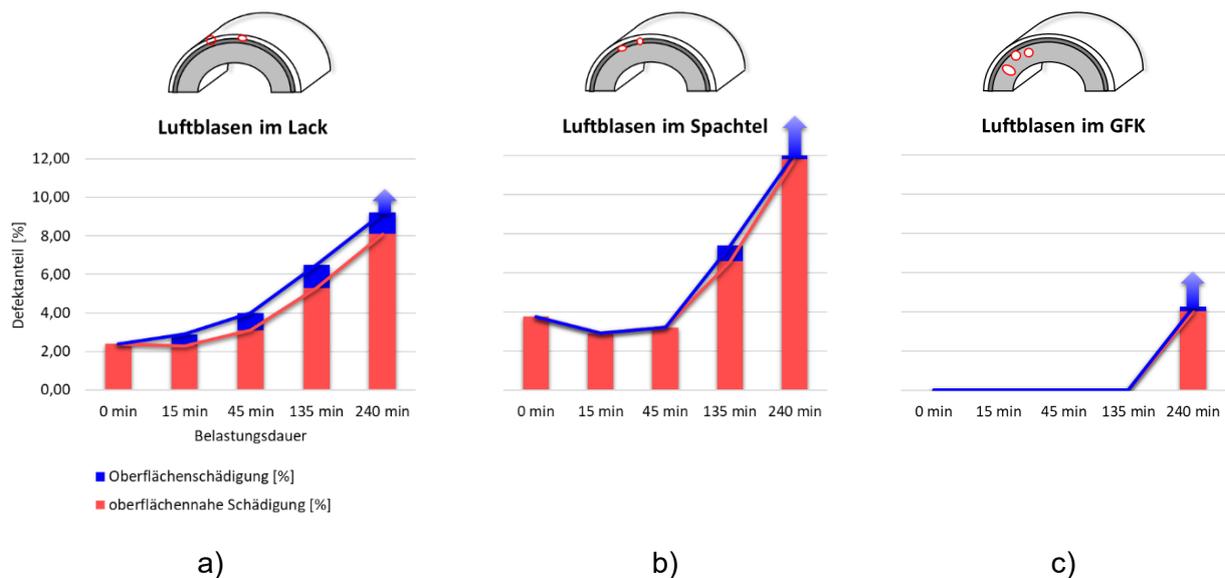


Abbildung 60: Thermografisch detektierte prozentuale Flächenanteile von oberflächennahen und oberflächlichen Defekten für unterschiedliche Probekörpermodifikationen jeweils für jede Messung vor und zwischen den Belastungszyklen.

Anhand der quantitativen Informationen über den Schädigungszustand in Form der Erosionsrate der Proben können diese Schadensstadien eingeordnet werden. Nach [66] und [65] kann der Erosionszustand einer Rotorblattvorderkante in unterschiedliche Stadien wie folgt eingeteilt werden:

I	Inkubationsperiode	keine Schäden in Form von Materialverlusten sichtbar
II	Anlaufphase	stetig steigende Erosionsrate, Auftreten von Pin-holes und/oder abgesplitterten Lackbereichen
III	Stadium der maximalen stetigen Erosionen	maximal konstante Erosionsrate, Pin-holes verschmelzen zu größeren erodierten Flächen
IV	Verzögerungsphase	abnehmende Erosionsrate, betroffene Bereiche werden größer und reichen in die Tiefe des Materials, erste Bereiche des GFK-Laminats sind sichtbar
V	Endstadium der stetigen Erosion	konstante Erosionsrate, große Bereiche des GFK-Laminats werden freigelegt

Die meisten Informationen zu den verschiedenen Schadensstadien existieren zwischen dem zweiten und letzten Zustand. Informationen über die Inkubationsperiode gibt es nur wenige, welche zu einem Großteil über zerstörende Prüfverfahren gewonnen wurden. Die in diesem Projekt

durchgeführten Versuche bieten nun mehr Informationen über das erste Schadensstadium und tragen somit zu einer verbesserten Bewertung des Schadenszustandes. Beispielsweise kann die Probe mit Luftblasen im Lack aus Abbildung X in die Schadensstadien I, II sowie III eingeordnet werden, wobei nur der initiale Zustand Informationen über die Inkubationsperiode hergibt. Bei der Probe mit Luftblasen im Spachtel dauert die Inkubationsperiode hingegen länger an, sodass hier mehr Informationen bereitgestellt werden können.

5.7. Zusammenfassung und Ausblick

Auf Grundlage der Projektergebnisse ist festzustellen, dass Regenerosionsschäden unter der Oberfläche teilweise größere Ausmaße annehmen als an der Oberfläche ersichtlich. Für eine Schadensbewertung einer Rotorblattvorderkante aus Faserverbund ist eine reine Sichtprüfung der Oberfläche demnach nicht zielführend, da die gänzliche Ausdehnung eines möglicherweise degradierten Bereiches unterhalb der Oberfläche nicht erfasst werden kann. Durch die eingebrachten Initialdefekte in LEP-Beschichtung, Spachtel und Faserverbund- Probekörper aus GFK konnte nachgewiesen werden, dass sich Erosionsschäden an diesen initialen Schwachstellen des Beschichtungssystems vornehmend ausbreiten.

- Durch Initialschäden in der LEP-Beschichtung beginnt bereits nach kurzer Regenerosionsbelastung ein stetiger Erosionsfortschritt, da die Beschichtung zwar den größten Erosionswiderstand bietet und mit seinen vergleichsweise elastischen Eigenschaften Kräfte aufnehmen kann, jedoch direkt der Regenbelastung ausgesetzt ist.
- Durch Initialschäden im Spachtel konnten Erosionsschäden an der Probenoberfläche grundsätzlich erst im späteren Belastungsverlauf (ca. nach dem 3. Zyklus) nachgewiesen werden. Sobald jedoch Oberflächenschäden vorhanden sind, kommt es zu einem plötzlichen Versagen des Beschichtungssystems, da die Belastung durch den Regen am vorgeschädigten spröden Spachtelmaterial zu großflächigen Beschichtungsablösungen führt.
- Durch Initialschäden im Laminat (sowohl Lufteinschlüsse als auch Delaminationen) konnte kein nachweisbarer Einfluss auf die Entstehung von Erosionsschäden an oder innerhalb der Probe ermittelt werden. Es ist zu vermuten, dass die durch Regenbelastung induzierten Kräfte nicht groß genug sind, um in den Tiefen des GFK von innen heraus ein Schadenswachstum zu veranlassen.
- Proben ohne Initialschäden wiesen dennoch Oberflächenschäden auf. Diese sind vermutlich durch natürliche, initiale Defekte, die bei der Herstellung nicht auszuschließen sind, entstanden.

Für die Interpretation der Ergebnisse muss hinzugefügt werden, dass die Einflussfaktoren wie beispielsweise die Schichtdicke bei Proben mit Defekten im Lack und/oder Spachtel gegenüber Proben mit anderen Defektarten variieren. Daher ist die Vergleichbarkeit der Defektarten untereinander nur eingeschränkt möglich. Auch undefinierte Defekte, die sich im Herstellungsprozess der Proben entwickelt haben, können die Ergebnisse, insbesondere bei den Referenzproben beeinflussen. Dieser Aspekt spielt jedoch auch in der Anwendung eine Rolle und unterstreicht die Wichtigkeit einer möglichst idealen Fertigung. Weiterhin variiert aufgrund des konstruktiven Aufbaus der Regenerosionsanlage die Anströmgeschwindigkeit entlang der Probe, was zu unterschiedlich starken Belastungen an der Probe führt und somit unterschiedlich stark ausgeprägte Schadensmuster entstehen können.

Die angewandten Messverfahren waren alle in der Lage, den Schadensverlauf, der durch Regenerosion generiert wurde, darzustellen. Dabei hat sich gezeigt, dass

- ein Oberflächenscan eine hohe geometrische Auflösung besitzt und somit einen wichtigen Bestandteil zur exakten Kartographierung der Oberflächenschäden beiträgt,
- mit μ -CT-Aufnahmen bereits vor der ersten Belastung kleinste Defekte unterhalb und an der Oberfläche hochauflösend dargestellt und das Schadenswachstum insbesondere unterhalb der Oberfläche detailliert visualisiert werden kann,
- die thermografische Randzonenanalyse (bis ca. 2 mm unterhalb der Oberfläche) als Messmethode für die Detektion von Defekten unterhalb der Oberfläche grundsätzlich geeignet ist und insbesondere für die Freifeldanwendung großes Potential bietet. Dabei können sowohl Defekte an der Oberfläche als auch unterhalb der Oberfläche detektiert und quantifiziert werden, wobei die geometrische Auflösung zwar geringer ist als bei den μ -CT-Messungen, sich die Defekte in ihrer Ausdehnung jedoch zumindest grob abschätzen lassen.

Anhand der erzielten Ergebnisse des Forschungsprojektes SurferCut konnte ein Schadenskatalog geschaffen werden, in dem der Verlauf der Schadensentwicklung für unterschiedliche initiale Defekte mit unterschiedlichen Messmethoden dargestellt wird.

Für zukünftige Arbeiten ist es hilfreich, den Schadenskatalog zu erweitern. Dazu gehören unter anderem Untersuchungen zum Einfluss der Schichtdicke des Beschichtungssystems sowie zum Einfluss „natürlicher“ Defekte. Auch initiale Defekte wie Materialeinschlüsse von Staubkörnern oder Füssen sollten in den Katalog mit einbezogen werden. Zudem sind intensivere Untersuchungen von Defekten in tieferen Schichten, wie beispielsweise Delaminationen oder Lufteinschlüsse im GFK erforderlich, um die Ergebnisse dieses Projektes (Defekte in tiefen Schichten haben keinen Einfluss auf frühzeitig auftretende Erosion) zu validieren. Die Anwendung von Verfahren der KI im Rahmen von SurferCut hat gezeigt, dass maschinelles Lernen und tiefes Lernen die herkömmlichen Bildverarbeitungssoftware für die automatisierte Auswertung der Messdaten ersetzen könnten. Das Training der neuronalen Netze hat eine kleine Menge an annotierten Datensätzen benötigt, damit war die größte Hürde für den Erfolg des Einsatzes von KI überwunden. Die Datenauswertung mithilfe der trainierten Netze lässt sich mit modernerer Hardware, insbesondere mit einer leistungsstarken Grafikkarte, noch beschleunigen. Ein relevanter Aspekt an dieser Stelle ist der Einsatz von Cloudcomputing als alternative zu einer Modernisierung der vorhandenen Hardware. Für ein erweitertes Wissen um die Entstehungsmechanismen von Erosionsschäden sollten Simulationen durchgeführt werden. Mit Hilfe der Simulationen kann eine gesamtheitliche Betrachtung von unterschiedlichen Defekten und unterschiedlichen Materialien (auch unterschiedliche Schichtdicken) variabel betrachtet werden. Zudem sind Simulationen interessant, um zu Versagensvorhersagen zu gelangen. So könnte anhand des im Freifeld aufgenommenen Zustandes einer Rotorblattvorderkante mit Hilfe von Simulationen vorhergesagt werden, wie sich die vorhandenen Erosionsschäden entwickeln werden und wann die nächste Inspektion/Reparatur angestrebt werden sollte. Ein weiterer Punkt, der zur Untersuchung aussteht, ist die Auswirkung der durch einen auftreffenden Regentropfen entstehenden Stoßwelle auf die Schadensentwicklung. Diese Untersuchungen könnten beispielsweise mit Druckmessungen und Akustikmessungen durchgeführt werden.

6. Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen des Antrags

AP	Ziele	Ergebnisse
AP 1	Materialauswahl/Probenherstellung	
AP 1	Materialauswahl/ Probenherstellung	<ul style="list-style-type: none"> In Zusammenarbeit mit dem pbA wurden Materialien und spezifische Fehler ausgewählt. Proben mit definiert eingebrachten Fehlern wurden hergestellt
AP 2	Charakterisierung der Proben mit Kartografie des initialen Zustandes	
AP 2	Vorversuche zur Versuchsdurchführung im Regenerosionsprüfstand	<ul style="list-style-type: none"> Mittels ausgewählter Probekörpern wurden Vorversuche zur Festlegung der Messzyklen sowie der jeweiligen Belastungszeiten durchgeführt Die Probekörper wurden mittels Oberflächenverfahren bewertet Belastung der Proben bis unterhalb der Zerstörschwelle auf Basis der Untersuchung und Auswertung wurde der Versuchsplan erstellt Kennzeichnung der Proben hinsichtlich einer einheitlichen Probenorientierung bei der Probenanalyse und damit der Vergleichbarkeit exakte Verortung und Verfolgung der Fehlstellen über die gesamte Versuchsreihe in der jeweiligen Probe mit den einzelnen Prüfverfahren aber auch vergleichend zwischen ihnen ist so möglich
	Charakterisierung initial Zustand	<ul style="list-style-type: none"> Alle Proben wurden vor den Erosionstest initial mit allen drei Messmethoden untersucht
AP 2.1	Analyse der Proben mittels μ -CT und XRM	<ul style="list-style-type: none"> Zur Vermeidung von Artefakten wurden die Halb-Zylinderrohre im Prüfraum so positioniert das keine Ringartefakte im Probekörper entstehen Voranalysen der Probekörper hinsichtlich Detektion der Materialien (Lack, Primer, GFK und Fremdkörper sowie prozessbedingten und eingebrachten Fehlstellen) Abgleich mit Lichtmikroskopie- und REM- Schnittbildern, dazu wurden die Proben im μ-CT gescannt, Schnittbilder erstellt und diesen anschließend (Licht- und REM-) Schlifffbilder zur Materialidentifikation gegenübergestellt, womit die μ-CT Schnittbilder validiert sind Vorarbeiten zur Messdurchführung: Optimierungsschritte zur Kontrastmaximierung im Rekonstruierten Datensatz (Bildraten in Volume Graphics 3.2) über Variation von Röhrenspannung, Filamentstrom, Winkelschritte ($360^\circ / x$), Anzahl der Bilder pro Winkelschritt, Bild-Belichtung, Bauteilposition (Auflösung) unter Berücksichtigung der Messzeit und des Datenvolumens Ergebnis: Prüfkörper werden in 6 - 7 Einzelscans (je ca. 20 min) erfasst und einzeln analysiert (128 GB Arbeitsspeicher, datenreduzierter Einzelscan 18 GB) Untersuchung zum Einfluss der Rekonstruktionssoftware auf Datensatz, festlegen der Rekonstruktionsparameter (insbesondere

		<p>Einstellung der Strahlaufhärtung da dieser Einfluss auf Bildkontrast hat)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Parameterstudie in Volume Graphics (VG) zur einheitlichen Oberflächenerkennung und der Durchführung der z.B. Porenanalyse (Styropor) • Messstrategie sowie Mess- und Analyseparameter ermittelt • Automatisierte Auswertung der Bilddaten sowie zur Fehlstellendetektion unter VG entwickelt
AP 2.3	Im Projekt wird eine Analysesoftware zur automatisierten Auswertung der Bilddaten sowie zur Fehlstellendetektion entwickelt	<ul style="list-style-type: none"> • Literaturrecherche zu den gängigen Ansätzen der automatisierten Auswertung von Schnittbildern eines 3D-Scans: Künstliche Intelligenz (KI) in Form von „machine learning“ und „deep learning“ ist eine erfolversprechende Lösung • Erarbeitung des notwendigen Wissens zur Auswertung mit KI. Definition der Arbeitsschritte und den relevanten Werkzeugen und die Limitierungen • Anwendung vom Verfahren der „Random Forest Classification“ (machine Learning) zur Erzeugung von annotierten Datensätzen zum Training von neuronalen Netzen • Untersuchung möglicher und relevanter Architekturen und Formen von neuronalen Netzen: U-Net und Sensor 3D • Training des U-Net und des Sensor 3D
AP 2.2	Analyse des initialen Zustands der Probenoberflächen mit bildgebenden Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Auswertung der Scans von einer Probe im initialen Zustand mit dem U-Net und Sensor 3D • Lokalisierung der Luftblasen mit Hilfe semantischer Segmentierung • Vergleich zwischen dem U-Net und Sensor 3D hinsichtlich Fehlstellenerkennung
AP 3	Zyklische Belastungstests zur Erosionsbeständigkeit	
AP 3	Durchführung der Belastungstests zur Erosionsbeständigkeit an den Probekörpern	<ul style="list-style-type: none"> • Basierend auf den Ergebnissen aus AP 2 und der Diskussion mit dem PBA sowie dem IWES wurde die Teststrategie zur Durchführung der Untersuchungen festgelegt • Es sollten insgesamt vier Erosionstestläufe beim Fraunhofer IWES durchgeführt werden
AP 4	Charakterisierung der Proben mit Kartographie nach Erosionsbelastung	
AP 4.1	Kartographie nach Erosionsbelastung	<ul style="list-style-type: none"> • Proben werden analog zu AP 2 mit hochauflösenden Mikroskopieverfahren, mit Verfahren zur großflächigen Erfassung der geometrischen Eigenschaften, thermografischen Messmethoden sowie mittels -CT und XRM untersucht
AP 4.3	zeitabhängige Kartierung	<ul style="list-style-type: none"> • Erste Untersuchungen mittels bildgebender Verfahren lassen auf Veränderungen schließen • Die Verortung der Abweichungen wird auf die XRM Messdaten übertragen anschließend die innere Struktur bewertet
AP 4.2	Zyklische Untersuchung Oberfläche und Erosionsschäden mit	<ul style="list-style-type: none"> • Auswertung der Scans der gleichen Probe im belasteten Zustand mit dem Sensor 3D • Lokalisierung der Defekte mit Hilfe semantischer Segmentierung

	bildgebenden und chemischen Verfahren	
AP 5	Korrelation Initialschäden und Erosionsschäden, (Versagensmechanismen)	
AP 5.1	Abgleich der initialen und zyklisch durchgeführten Kartierungen	<ul style="list-style-type: none"> • Darstellung der Segmentierung und der lokalisierten Fehlstellen als 3D-Form • Visualisierung der Entwicklung der Fehlstelle nach zyklischer Erosionsbelastung
AP 6	Methoden zur einfachen Bauteiluntersuchung in der Fertigung und bei der Wartung im Freifeld hinsichtlich beginnender Erosion	
AP 6.1	Erstellung eines Anforderungskatalogs an die Messmethoden einschließlich Messmethodenscreening	<ul style="list-style-type: none"> • Anforderungen an die Messmethoden zur zerstörungsfreien Detektion beginnender Erosion: <ul style="list-style-type: none"> ○ Detektion von Defekten unterhalb der Oberfläche sowie von Oberflächenschäden ○ Kontaktlose Messung ○ Schnelle Datenerhebung ○ Großflächige Messung ○ Einfacher Messaufbau ○ In-situ Messfähigkeit ○ Detektion von Defekten mit einem Durchmesser von ca. 1 mm in den Schichten Lack und Spachtel (Defekte in einer Tiefe von ca. 0.5 mm bis 1 mm) • Recherche zu verschiedenen, für das Detektieren von Erosionsschäden fähigen Messmethoden und deren Bewertung anhand des zuvor aufgestellten Anforderungskatalogs. • Ergebnis: Thermografie schneidet beim Messmethodenscreening am besten ab, besitzt großes Potential zum Monitoring von wachsender Erosion
AP 6.2	Machbarkeitsuntersuchung der thermografischen Randzonenanalyse bezüglich der Erosionserkennung unter Berücksichtigung der Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • Auswahl der Langpuls-Thermografie als geeignetes aktives thermografische Messprinzip anhand von Recherche • Durchführung von <u>Vorversuchen</u> insbesondere zur Weiterentwicklung der thermografischen Randzonenanalyse hinsichtlich der Detektierbarkeit von Defekten mit unterschiedlichen Tiefe-zu-Durchmesser-Verhältnissen <ul style="list-style-type: none"> ○ Entwicklung eines Versuchsstandes zur Untersuchung der Proben ○ Modifizierung von Probekörpern aus dem Vorgängerprojekt mit unterschiedlichen Defekten in der Form von Bohrungen ○ Auswahl zweier Kameras, einer High-End Kamera für Forschungszwecke bei den theoretischen Untersuchungen und eine kommerzielle Bolometerkamera für die spätere Anwendung in der Fertigungsumgebung sowie im Freifeld ○ Versuchsdurchführung mit einer Vielzahl an variierenden Versuchsparametern zur Entwicklung einer optimalen Anregungsroutine

		<ul style="list-style-type: none"> ○ Entwicklung eines bildgebenden Auswertalgorithmus zum quantitativen Vergleich der Detektierbarkeit unterschiedlicher Defekte (Anwendung PCA und CNR). • Durchführung von <u>Hauptversuchen</u> zur Untersuchung der Defekt- bzw. Regenerosionsentwicklung <ul style="list-style-type: none"> ○ Weiterentwicklung des Versuchsstandes für verbesserte Messungen an den für das Projekt gefertigten und modifizierten Proben, wobei die Messungen ausschließlich mit der kommerziellen Bolometerkamera durchgeführt wurden ○ Versuchsdurchführung mit gezielt angepassten Parametern, die aus den Vorversuchen hervorgingen, Messungen wurden vor dem ersten sowie nach jedem Belastungszyklus durchgeführt ○ Entwicklung eines weiteren Auswertalgorithmus mit geänderter Zielsetzung zur Unterscheidung zwischen oberflächennahen und oberflächlichen Defekten sowie der quantitativen Bewertung des geschädigten Probenbereichs (Anwendung Kantendetektion und prozentualer Flächenanteil) • Ergebnisse <ul style="list-style-type: none"> ○ Minimal detektierbare Defekte besitzen ein Tiefe-zu-Durchmesser-Verhältnis von 1,04: ein Defekt, der detektiert werden soll, darf demnach nur in einer Tiefe liegen, die seinem Durchmesser entspricht. ○ optimale Anregungsroutine: für jede Tiefe gibt es charakteristische Anregungsdauern, die jedoch je nach Material variieren und ineinander verschimmen. Für die im Projekt verwendeten Proben und Defektkonstellationen haben sich eine Anregungsdauer von 10 s für Defekte in den oberen Modellschichten (Lack und Spachtel) als praktikabel erwiesen, 30 s Anregung wurden für tieferliegende Defekte verwendet, jedoch konnten keine Defekte aus den Laminatschichten erkannt werden ○ Mittels Langpuls-Thermografie können sowohl oberflächennahe als auch oberflächliche Defekte und Schäden detektiert und innerhalb eines Bildes dargestellt und voneinander unterschieden werden ○ Mittels Langpuls-Thermografie kann das Schadenswachstum bildlich dargestellt und quantifiziert werden. Der Schaden, der an der Oberfläche ersichtlich ist, erstreckt sich in den meisten Fällen unterhalb der Oberfläche weiter
AP 6.3	Entwicklung eines technischen Konzeptes zur praxisgerechten Realisierung in einer fertigungsnahen Umgebung mit kommerziellen Sensoren zur Qualitätssicherung	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung zweier Demonstratoren bestehend aus einer kommerziellen Bolometerkamera sowie einer kostengünstigen Anregungseinheit aus zwei Halogenstrahlern <ul style="list-style-type: none"> ○ Demonstrator 1 für den <u>Einsatz in der Fertigungsumgebung</u>: Konstruktionsgerüst mit Kamera und Anregung kann sowohl auf dem Boden liegend als auch auf einem Stativ platziert werden ○ Demonstrator 2 für den <u>Einsatz an der WEA im Freifeld</u>: Konstruktionsgerüst mit Kamera und Anregung kann über Saugnapfe an einem Rotorblatt befestigt werden

		<ul style="list-style-type: none"> • Beide Demonstratoren sind funktionsfähig und wurden getestet, weisen jedoch noch großes Potential für Verbesserungen auf, bevor sie regulär einsatzfähig sind • Für eine eindeutige Interpretation der Ergebnisse müssen weitere Untersuchungen hinsichtlich anderer Defekte wie Risse und Dellen durchgeführt werden
AP 6.4	Untersuchung weiterer Messmethoden auf ihre praktische Eignung zur Erkennung von Fehlgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • Theoretische Betrachtungen zur Anwendung unterschiedlichster ZfP Verfahren (Ultraschall, Sherographie, Bildgebende - Oberflächenverfahren, Oberflächenschallwellen ...) zeigen Defizite in der Detektion, der im Projekt kartographierten, relevanten Fehlstellen gegenüber der Thermografie insbesondere beim Einsatz an einer WEA • Daher könnte die Thermografie das Goldstandard zur ZfP Anwendung an WEA werden
AP 7	Berichtswesen	<ul style="list-style-type: none"> • Zwischenberichte wurden termingerecht erstellt. Treffen mit dem pbA wurden durchgeführt.

7. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Ergebnisse

7.1. Wissenschaftlich-technischer Nutzen

Im Projekt wurde erstmalig das μ -CT und XRM-Verfahren zur zerstörungsfreien Charakterisierung mehrfach zyklisch belasteter Probekörper angewandt und das an realgroßen Probekörper mit Auflösungen bis zu einem Mikrometer. Die bildbasierte Prüfmethode ermöglicht die Identifizierung, Verortung und Charakterisierung der prozessbedingten- und künstlichen Fehlstellen. Die Anwendung der Röntgenverfahren auf die mehrfach zyklisch belasteten Probekörper ermöglicht die Identifizierung und Bewertung von initial Schädigungen "Effects of defects" und in Abhängigkeit von Position, Fehlergröße auf das Bauteilversagen. Am Ende der Untersuchungen steht ein Katalog von aufzufindenden Fehler, die in der Produktion zu vermeiden sind und nach der Produktion sowie in der Anwendung der WEA aufgefunden werden müssen.

Ein wesentlicher Aspekt war die Entwicklung von automatisierte Auswerteverfahren der μ -CT und XRM-Bilddaten. Im Projekt wurden Methoden der Künstliche Intelligenz (KI) in Form von „machine learning“ und „deep learning“ erprobt und angewandt. Dazu wurden Verfahren wie das „Random Forest Classification“ (machine Learning) zur Erzeugung von annotierten Datensätzen zum Training von neuronalen Netzen angewandt sowie Untersuchung möglicher und relevanter Architekturen und Formen von neuronalen Netzen (z.B. U-Net und Sensor 3D) durchgeführt. An ausgewählten Proben wurden Vergleiche zwischen dem U-Net und Sensor 3D hinsichtlich Fehlstellenerkennung durchgeführt wobei sich das Sensor 3D als das geeignetere zeigte. Auch wurden Verfahren zur Visualisierung der Entwicklung der Fehlstelle nach zyklischer Erosionsbelastung entwickelt und angewandt.

Im Projekt wurde erstmalig aktive Thermografie zur Defektdetektion an rotorblattähnlichen, mehrfach zyklisch mit Regen belasteten Probekörpern erfolgreich angewandt. Es wurde gezeigt, dass aktive Thermografie, insbesondere Langpuls-Thermografie auch ohne besonders starke und komplizierte Datenverarbeitung ein mächtiges Tool bei der Defektdetektion an thermisch trägen Materialien darstellt, speziell bei der Qualitätssicherung Wartung von Rotorblättern an Windenergieanlagen.

Darüber hinaus konnten wichtige Informationen zu den allgemeinen Schadensstadien der Erosion an Rotorblättern gesammelt und ergänzt werden und somit Lücken, die insbesondere im Anfangsstadium von Erosionsschäden bestanden, geschlossen werden.

7.2. Wirtschaftlicher Nutzen

Da der Schwerpunkt des Projektes auf der Klärung der Ursachen von Erosionsschäden lag können die gewonnenen Erkenntnisse und Auswertestrategien insbesondere mit Hilfe des Schadenskataloges direkt von der Wirtschaft genutzt werden.

Durch die Korrelation des initialen Probenzustands mit den unter Erosionsbelastung auftretenden Schäden sowie der Identifizierung der ursächlichen Fehler konnten erste Ergebnisse in eine industrielle Umsetzung bereits während Projektlaufzeit erfolgen. Der finanzielle Aufwand für die Nutzung der Ergebnisse an herstellerspezifischen Produkten beschränkt sich auf die Durchführung von Messungen in entsprechend ausgestatteten Laboren, während und im Anschluss der Fertigung bzw. im Freifeld an der WEA.

Damit können die Hersteller von Rotorblättern die vorhandenen Kenntnisse von ursächlichen Fehlerquellen direkt nutzen und die Qualität ihrer Produkte ggf. mit geringem Kostenaufwand deutlich verbessern.

Die Kenntnisse, die im Rahmen des Projektes über die Ursachen von Erosionsschäden gewonnen wurden, sind für alle angesprochenen Branchen (Produzenten, Betreiber, Instandhalter, etc.) von direktem Nutzen. Das vergrößerte Wissen über die Ursachen und die Entwicklung von Erosionsschäden kann direkt in die Verbesserung von Fertigungsqualitäten und für den Serviceeinsatz (Früherkennung und Vermeidung von Folgeschäden) genutzt werden. Mithilfe der neuen Mess- und Bewertungsmethoden können die KMU ihren Einstieg in eine bedarfsgerechte Wartung beschleunigen und damit Wettbewerbsvorteile erzielen.

Durch den erfolgreichen Machbarkeitsnachweis des thermografischen Messverfahrens kann unmittelbar im Anschluss des Projektes ein ZIM-Vorhaben zur Entwicklung eines Thermografie-Messsystems für den mobilen Freifeldeinsatz initiiert werden.

7.3. Innovativer Beitrag der erzielten Forschungsergebnisse

Im Projekt wurde erstmalig das μ -CT und XRM-Verfahren zur zerstörungsfreien Charakterisierung mehrfach zyklisch belasteter Probekörper angewandt und das an realgroßen Probekörper mit Auflösungen bis zu einem Mikrometer. Das Projekt generiert einen wesentlichen Beitrag zum tieferen Verständnis zur Ursache und Entwicklung von Erosionsschäden. Die Ergebnisse wurden hinsichtlich Fehlerart, Fehlerverortung sowie Belastung katalogisiert. Die Daten und Erkenntnisse lassen sich auf weitere Szenarien übertragen.

Im Projekt wurde erstmalig aktive Thermografie zur Defektdetektion an rotorblattähnlichen, mehrfach zyklisch mit Regen belasteten Probekörpern erfolgreich angewandt. Mit Hilfe der thermografischen Aufnahmen und simpler Methoden der Bildverarbeitung konnten sowohl oberflächennahe Defekte und oberflächliche Schäden, die sich innerhalb eines Thermograms befinden, automatisch erkannt, voneinander unterschieden und entsprechend markiert werden. Dies ermöglicht eine quantitative Bewertung des Schadenszustands einer Rotorblattvorderkante, die nicht nur die Schadensstadien im sichtbaren Bereich abdeckt, sondern auch Informationen aus dem ersten Stadium bereithält, bei dem das Schadenswachstum unterhalb der Oberfläche im Verborgenen stattfindet.

8. Ergebnistransfer in die Wirtschaft

geplante spezifische Maßnahme	Art des Transfers	Ziel	Datum/ Zeitraum <u>während</u> des Bewilligungs- zeitraums	Datum/ Zeitraum <u>nach</u> dem Bewilligungs- zeitraum
Information der Unternehmen des Projekt-begleitenden Ausschusses (pbA)	Sitzungen des pbA	Fortschrittsbericht, Präsentation und Diskussion von Ergebnissen, Festlegung weiterer Maßnahmen	19.11.2019 28.07.2020 12.08.2020	-
Zwischen-berichte und Abschlussbericht	Schriftliches Dokument an pbA	Übersicht und Diskussion über aktuelle Projektergebnisse, Zusammenstellung und Diskussion aller Projektergebnisse	Zwischen-berichte: 2019 2020	Abschlussbericht 2022 (inkl. Zwischenbericht 2021)
Teilnahme an Fachtagungen, Fachmessen	MAPEX Center for Materials and Processes - Uni Bremen; Tagung der CU Ost- AG Faser-Matrix Haftung und Matrices; PbA-Treffen vom RotorBeWi 20497 2200-107	Präsentation und Diskussion der neuesten Projektergebnisse mit breitem Fachpublikum, Informationsaustausch mit interessierten Unternehmen, insbesondere KMU	MAPEX: 08.09.2021 CU Ost-AG: 02.12.2021	RotorBeWi: 19.07.2022
Teilnahme an wissenschaftlichen Tagungen	Vorträge bei: Sensors and Measurement Science International (SMSI); Quantitative InfraRed Thermography Conference (QIRT)	Präsentation von Projektergebnissen vor wissenschaftlichem Publikum, Darstellung von Forschung in Anwendung, Diskussion neuer Verfahren	SMSI 2020 SMSI 2021	QIRT 2022

Beratung und Unterstützung für KMU im Bereich Qualitätssicherung von OF-Beschichtung-en für WEA	Beratung vor Ort beim Kunden, Beratung im IFAM, Durchführung gemeinsamer Projekte	Beratung in Hinsicht auf die Möglichkeiten zur industriellen Umsetzung erreichter Erkenntnisse.	-	fortlaufend auf Anfrage
Wissenschaft-liche Publikationen, Dissertationen; in Fachzeit-schriften oder sonstigen gedruckten und digitalen Veröffentlichungen	Journal of Applied Sciences (Appl.Sci) Journal of Non-destructive Testing & Evaluation international (NDT&E international) Tagungsbänder der SMSI	Wissenschaftliche Publikationen der im Projekt gewonnen Ergebnisse und Darstellung ihrer Anwendungen zum Wissenstransfer an das internationale, englischsprachige Fachpublikum sowie Unternehmen oder sonstigen Interessierten	Appl. Sci: 2021	NDT & E international: 2022 eingereicht Kooperations-paper SurferCut: vsl. 2022 Dissertation: vsl.2023
Einbeziehung der Forschungsergebnisse in die akademische Lehre / Lehrgänge an den beteiligten Forschungseinrichtungen, Abschlussarbeiten	Vorlesungen /Seminare und Abschlussarbeiten im Rahmen der Studentenausbildung am IFAM und der Universität Bremen,	Anleitung der Studenten/Weiterzubildenden zur Anwendung der Ergebnisse in der Praxis, Mitarbeit im Projektgeschehen	jährlich wiederholende, reguläre Seminare/ Vorlesungen ab 2020 Bachelorarbeiten: 2021 & 2022 Masterarbeit: 2021	fortlaufend: jährlich wiederholende, reguläre Seminare/Vorlesungen
Übernahme von Ergebnissen in akademische Lehre und berufliche Weiterbildung an der Universität Bremen und dem Fraunhofer IFAM	Berufliche Weiterbildungsangebote im Bericht der Klebtechnik und der Faserverstärkten Kunststoffe	Die Projektergebnisse fließen des Weiteren in die beruflichen Weiterbildungsangebote des IFAM im Bereich Klebtechnik (EAB, EAS, EAE) sowie FVK-Werkstoffe ein.	Über gesamte Projektlaufzeit	fortlaufend

Planung von Folgeprojekten und Produkt-entwicklung	Zusammenarbeit mit Mitgliedern des pbA sowie weiteren interessierten KMUs, bilaterale Produktentwicklung Weiterführende Projekte sind geplant, insbesondere zur Detektion der Regeninduzierten Schallwellen im Probekörper	Einbeziehung der gewonnenen Projektergebnisse in zukünftige Industrie- und Forschungsprojekte, Nutzung der Ergebnisse zur Verbesserung der Demonstratoren	ab 2021 projektbegleitend	fortlaufend
---	---	---	---------------------------	-------------

Veröffentlichungen:

- F. Jensen, M. Terlau, M. Sorg, A. Fischer: Active thermography for the detection of sub-surface defects on a curved and coated GFRP-structure. Applied Sciences 11(20):9545 (19 pp.), 2021. doi: 10.3390/app11209545

Eingereicht in 2022:

- F. Jensen, J. F. Jerg, M. Sorg, A. Fischer: Active Thermography for the Interpretation and Detection of Rain Erosion Damage Evolution on GFRP Airfoils. NDT & E international (10 pp.)

Tagungsbeiträge:

- F. Jensen, M. Sorg, A. Fischer: Detection of initial subsurface defects on coated glass-fiber reinforced composite components by means of active micro-thermography. Sensor and Measurement Science International (SMSI 2020), Proceedings, 2020, No. C4.2, pp. 171-172. doi: 10.5162/SMSI2020/C4.2
- F. Jensen, M. Sorg, A. Fischer: Detection of initial subsurface defects in rotor blade leading edges of wind turbines by means of active thermography. Sensor and Measurement Science International (SMSI 2021), E-conference, 3.-6.5.2021, No. D9.4, pp. 289-290. doi: 10.5162/SMSI2021/D9.4
- F. Jensen, M. Sorg, A. Fischer: Damage development of initial defects in coated GFRP-structures due to rain exposure. 16th Quantitative InfraRed Thermography Conference (QIRT 2022), Paris, 5.-8.7.2022, No. 2.3.1 (6 pp.).

Abschlussarbeiten:

- M. Terlau: Untersuchung der Wärmeausbreitung in Rotorblattvorderkanten bei der aktiven Thermografie. Masterarbeit, 2021.
- H. Kruse: Automatisierte Defektdetektion in thermografischen Datensätzen. Bachelorarbeit, 2022.
- C. E. Erarslan: Entwicklung eines mobilen Thermografiemesssystems zur Untersuchung der Rotorblattvorderkante an Windenergieanlagen. Bachelorarbeit, 2021.

Literatur

- [1] M. H. Keegan, D. H. Nash und M. M. Stack, „On erosion issues associated with the leading edge of wind turbine blades“, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Jg. 46, Nr. 38, S. 383001, 2013, doi: 10.1088/0022-3727/46/38/383001.
- [2] Fraunhofer Institut für Windenergiesysteme, *Kleine Regenerosionsschäden an der Rotorblatt-Oberfläche mindern die Leistung: Regenerosion an Rotorblättern effektiv vorbeugen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.windkraft-journal.de/2017/12/11/kleine-regenerosionsschaeden-an-der-rotorblatt-oberflaeche-mindern-die-leistung/113942> (Zugriff am: 25. August 2022).
- [3] E. Cortés, F. Sánchez, A. O'Carroll, B. Madramany, M. Hardiman und T. M. Young, „On the Material Characterisation of Wind Turbine Blade Coatings: The Effect of Interphase Coating-Laminate Adhesion on Rain Erosion Performance“ (eng), *Materials (Basel, Switzerland)*, Jg. 10, Nr. 10, 2017, doi: 10.3390/ma10101146.
- [4] S. Zhang, „Accelerated rain erosion of wind turbine blade coatings“. Dissertation, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Technical University of Denmark, Denmark, 2014.
- [5] A. Sareen, C. A. Sapre und M. S. Selig, „Effects of leading edge erosion on wind turbine blade performance“, *Wind Energ.*, Jg. 17, Nr. 10, S. 1531–1542, 2014, doi: 10.1002/we.1649.
- [6] Redaktion all electronics, *Windenergieanlagen: Schutz gegen Erosion und Vereisung*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.all-electronics.de/windenergieanlagen-schutz-gegen-erosion-und-vereisung/> (Zugriff am: 25. August 2022).
- [7] K. Braun-Wanke, P.-O. Busch, C. Fischer und A. Wanke, „Energiewende: Atomausstieg und Klimaschutz“, *Dokumentation der Fachtagung des BMU*, 2002.
- [8] 3M, „Studie von 3M zeigt erstmals den Zusammenhang von Erosion und Effizienz bei Windkraftanlagen“, *Windkraft-Journal*, 2011. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.windkraft-journal.de/2011/09/06/3513/3513>
- [9] B. Weber, „Der Einfluss von Erosion auf die Effizienz von Windenergieanlagen und innovative Ansätze zur Vermeidung von Erosionsschäden“. Hamburg, 2012.
- [10] S. Zhang, K. Dam-Johansen, S. Nørkjær, P. L. Bernad und S. Kiil, „Erosion of wind turbine blade coatings – Design and analysis of jet-based laboratory equipment for performance evaluation“, *Progress in Organic Coatings*, Jg. 78, S. 103–115, 2015, doi: 10.1016/j.porgcoat.2014.09.016.
- [11] A. Sareen, C. A. Sapre und M. S. Selig, „Effects of Leading-Edge Protection Tape on Wind Turbine Blade Performance“, *Wind Engineering*, Jg. 36, Nr. 5, S. 525–534, 2012, doi: 10.1260/0309-524X.36.5.525.
- [12] IRW Windenergie, *Siemens veröffentlicht Blitzstatistik*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.windbranche.de/news/nachrichten/artikel-34078-siemens-veroeffentlicht-blitzstatistik>.
- [13] GBI Research, *Europäische Wind-Service-Studie*.
- [14] *Beschichtungen an Rotorblättern für Windenergieanlagen*, 002-00-13 AA, DIN-Normenausschuss Beschichtungsstoffe und Beschichtungen (NAB).
- [15] H. Oehler, M. Bargmann, D. Lellinger und I. Alig, „Warum ist der Lack ab?“, *Farbe und Lack*, Nr. 1, 2011.
- [16] S. C. Garcea, Y. Wang und P. J. Withers, „X-ray computed tomography of polymer composites“, *Composites Science and Technology*, Jg. 156, S. 305–319, 2018, doi: 10.1016/j.compscitech.2017.10.023.
- [17] M. Krumm, C. Sauerwein, V. Hämmerle, R. Oster, B. Diewel und M. Sindel, „Capabilities and Application of Specialized Computed Tomography Methods for the Determination of Characteristic Material Properties of Fiber Composite Components“ in *4th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT)*, Wels, Austria, 2012.

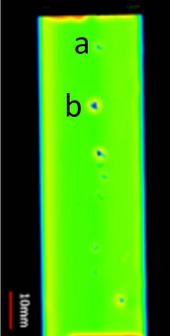
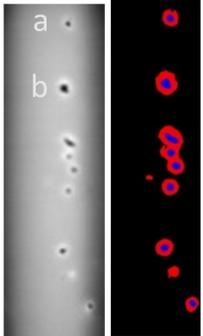
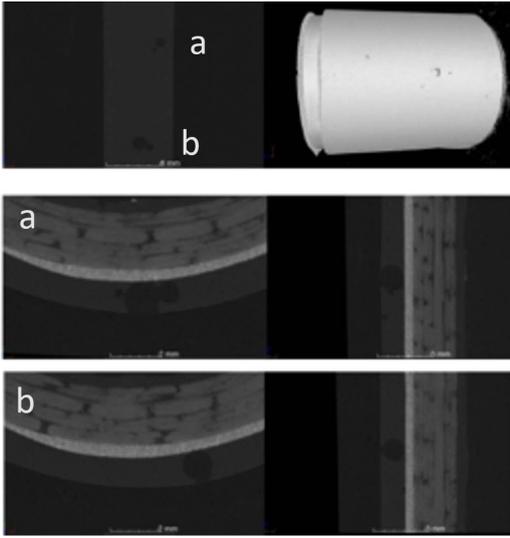
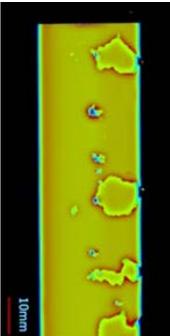
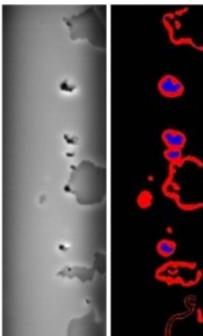
- [18] R. HANKE, „Computertomographie in der Materialprüfung: Stand der Technik und aktuelle Entwicklungen“ in *DGZTP-Jahrestagung*, 2010.
- [19] J. KASTNER, B. Plank, D. Salaberger, J. Sekelja, „Defect and Porosity Determination of Fibre Reinforced Polymers by X-ray Computed Tomography“ in *2nd International Symposium on NDT in Aerospace*, 2010.
- [20] B. Yu, R. S. Bradley, C. Soutis und P. J. Withers, „A comparison of different approaches for imaging cracks in composites by X-ray microtomography“ (eng), *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, Jg. 374, Nr. 2071, S. 20160037, 2016, doi: 10.1098/rsta.2016.0037.
- [21] Geyer *et al.*, „X-ray Computed Tomography of Structural Parts made by Injection Molding and a local Reinforcement with Thermoplastic UD-Sheets“ in *19th World Conference on Non-Destructive Testing*, 2016.
- [22] Focke *et al.*, „Multiscale non-destructive investigations of aeronautic structures: from a single fiber to complex shaped fiber-reinforced composites“ in *8th Conference on Industrial Computed Tomography*, Austria, 2018.
- [23] D. Nash, G. Leishman, C. Mackie, K. Dyer und L. Yang, „A Staged Approach to Erosion Analysis of Wind Turbine Blade Coatings“, *Coatings*, Jg. 11, Nr. 6, S. 681, 2021, doi: 10.3390/coatings11060681.
- [24] L. Mishnaevsky, S. Fæster, L. P. Mikkelsen, Y. Kusano und J. I. Bech, „Micromechanisms of leading edge erosion of wind turbine blades: X-ray tomography analysis and computational studies“, *Wind Energy*, Jg. 23, Nr. 3, S. 547–562, 2019, doi: 10.1002/we.2441.
- [25] H.-T. Bang, S. Park und H. Jeon, „Defect identification in composite materials via thermography and deep learning techniques“, *Composite Structures*, Jg. 246, S. 112405, 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112405.
- [26] A. Badran *et al.*, „Automated segmentation of computed tomography images of fiber-reinforced composites by deep learning“, *J Mater Sci*, Jg. 55, Nr. 34, S. 16273–16289, 2020, doi: 10.1007/s10853-020-05148-7.
- [27] O. Ronneberger, P. Fischer und T. Brox, *U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation*.
- [28] C. Meola und G. M. Carlomagno, „Infrared thermography to evaluate impact damage in glass/epoxy with manufacturing defects“, *International Journal of Impact Engineering*, Jg. 67, S. 1–11, 2014, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2013.12.010.
- [29] A. Katunin, A. Wronkiewicz-Katunin und D. Wachla, „Impact damage assessment in polymer matrix composites using self-heating based vibrothermography“, *Composite Structures*, Jg. 214, S. 214–226, 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.02.003.
- [30] B. Zhou, X. Zhang und H. Li, „Study on Air Bubble Defect Evolution in Wind Turbine Blade by Infrared Imaging with Rheological Theory“, *Applied Sciences*, Jg. 9, Nr. 22, S. 4742, 2019, doi: 10.3390/app9224742.
- [31] H. Tuo, T. Wu, Z. Lu und X. Ma, „Evaluation of damage evolution of impacted composite laminates under fatigue loadings by infrared thermography and ultrasonic methods“, *Polymer Testing*, Jg. 93, S. 106869, 2021, doi: 10.1016/j.polymertesting.2020.106869.
- [32] Y. Li und Y.-J. Song, „A Novel Thermographic Methodology to Predict Damage Evolution of Impacted CFRP Laminates Under Compression-Compression Fatigue Based on Inverted Weibull Model“, *IEEE Sensors J.*, Jg. 21, Nr. 10, S. 11393–11400, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2020.2997458.
- [33] C. Colombo, T. Bhujangrao, F. Libonati und L. Vergani, „Effect of delamination on the fatigue life of GFRP: A thermographic and numerical study“, *Composite Structures*, Jg. 218, S. 152–161, 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.03.023.

- [34] E. Hau, *Windkraftanlagen: Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit*, 5. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [35] I. H. Abbott, A. E. Dodenhof und L. S. Stivers Jr., „NACA TR 824 - Summary of airfoil data“, 1945.
- [36] *Evaluation of erosion and delamination for leading edge protection systems of rotor blades*, DNVGL-RP-0573, DNVGL, Dez. 2020.
- [37] B. Provencher, N. Piché und M. Marsh, „Simplifying and Streamlining Large-Scale Materials Image Processing with Wizard-Driven and Scalable Deep Learning“, *Microsc Microanal*, Jg. 25, S2, S. 402–403, 2019, doi: 10.1017/S1431927619002745.
- [38] *Dragonfly*. 2020.2. Montreal, Canada, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.theobjects.com/dragonfly>
- [39] A. Novikov, D. Major, M. Wimmer, D. Lenis und K. Bühler, „Deep Sequential Segmentation of Organs in Volumetric Medical Scans“, *IEEE Trans. Med. Imaging*, Jg. 38, Nr. 5, S. 1207–1215, 2019, doi: 10.1109/TMI.2018.2881678.
- [40] KEYENCE, *3D-Profilometer: Modellreihe VR*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.keyence.de/products/microscope/macroscope/vr-3000/> (Zugriff am: 25. August 2022).
- [41] R. Yang, Y. He und H. Zhang, „Progress and trends in nondestructive testing and evaluation for wind turbine composite blade“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 60, S. 1225–1250, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.02.026.
- [42] N. Beganovic und D. Söffker, „Structural health management utilization for lifetime prognosis and advanced control strategy deployment of wind turbines: An overview and outlook concerning actual methods, tools, and obtained results“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 64, S. 68–83, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.05.083.
- [43] Y. Du, S. Zhou, X. Jing, Y. Peng, H. Wu und N. Kwok, „Damage detection techniques for wind turbine blades: A review“, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Jg. 141, S. 106445, 2020, doi: 10.1016/j.ymssp.2019.106445.
- [44] P. Meinschmidt und J. Aderhold, „Thermographic Inspection of Rotor Blades“ in *9th European Conference on NDT*, Berlin, 2006.
- [45] D. P. Almond, S. L. Angioni und S. G. Pickering, „Long pulse excitation thermographic non-destructive evaluation“, *NDT & E International*, Jg. 87, S. 7–14, 2017, doi: 10.1016/j.ndteint.2017.01.003.
- [46] Z. Wang, G. Tian, M. Meo und F. Ciampa, „Image processing based quantitative damage evaluation in composites with long pulse thermography“, *NDT & E International*, Jg. 99, S. 93–104, 2018, doi: 10.1016/j.ndteint.2018.07.004.
- [47] M. Lizaranzu, A. Lario, A. Chiminelli und I. Amenabar, „Non-destructive testing of composite materials by means of active thermography-based tools“, *Infrared Physics & Technology*, Jg. 71, S. 113–120, 2015, doi: 10.1016/j.infrared.2015.02.006.
- [48] F. W. Panella, A. Pirinu und V. Dattoma, „A Brief Review and Advances of Thermographic Image - Processing Methods for IRT Inspection: a Case of Study on GFRP Plate“, *Exp Tech*, 2020, doi: 10.1007/s40799-020-00414-4.
- [49] Y. Wei, Z. Su, S. Mao und D. Zhang, „An Infrared Defect Sizing Method Based on Enhanced Phase Images“ (eng), *Sensors (Basel, Switzerland)*, Jg. 20, Nr. 13, 2020, doi: 10.3390/s20133626.
- [50] C. Maierhofer *et al.*, „Evaluation of Different Techniques of Active Thermography for Quantification of Artificial Defects in Fiber-Reinforced Composites Using Thermal and Phase Contrast Data Analysis“, *Int J Thermophys*, Jg. 39, Nr. 5, 2018, doi: 10.1007/s10765-018-2378-z.

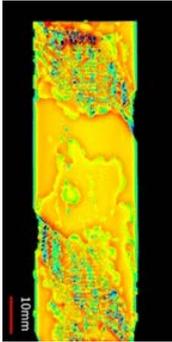
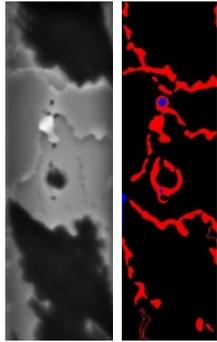
- [51] P. Kamińska, J. Ziemkiewicz, P. Synaszko und K. Dragan, „Comparison of Pulse Thermography (PT) and Step Heating (SH) Thermography in Non-Destructive Testing of Unidirectional GFRP Composites“, *Fatigue of Aircraft Structures*, Jg. 2019, Nr. 11, S. 87–102, 2019, doi: 10.2478/fas-2019-0009.
- [52] C. Ibarra-Castanedo, N. P. Avdelidis, M. Grenier, X. Maldague und A. Bendada, „Active thermography signal processing techniques for defect detection and characterization on composite materials“ in *SPIE Defense, Security, and Sensing*, Orlando, Florida, 2010, 766100, doi: 10.1117/12.850733.
- [53] J.-M. Roche, F.-H. Leroy und D. L. Balageas, „Images of TSR coefficients: A simple way for a rapid and efficient detectin of defects“, *Materials Evaluation*, Jg. 72, Nr. 1, S. 73–82, 2013.
- [54] F. Lopez, X. Maldague und C. Ibarra-Castanedo, „Enhanced image processing for infrared non-destructive testing“, *Opto-Electronics Review*, Jg. 22, Nr. 4, 2014, doi: 10.2478/s11772-014-0202-2.
- [55] A. Rodriguez-Molares *et al.*, „The Generalized Contrast-to-Noise Ratio: A Formal Definition for Lesion Detectability“ (eng), *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, Jg. 67, Nr. 4, S. 745–759, 2020, doi: 10.1109/TUFFC.2019.2956855.
- [56] C. Dollinger, „Thermografische Strömungsvisualisierung an Rotorblättern von Windenergieanlagen“. Dissertation, Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft, Universität Bremen, Bremen, 2018.
- [57] N. Rajic, „Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures“, *Composite Structures*, Jg. 58, Nr. 4, S. 521–528, 2002, doi: 10.1016/S0263-8223(02)00161-7.
- [58] N. Rajic, „Principal Component Thermography“, DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory DSTO-TR-1298, 2002.
- [59] G. T. Shrivashan und C. Chandrasekar, „A Comparison of varoius Edge Detection Techniques used in Image Processing“, *International Journal of Computer Science Issues*, Jg. 9, Nr. 1, 2012.
- [60] R. Maini und H. Aggarwal, „Study and Comparison of Various Image Edge Detection Techniques“, *International Journal of Image Processing*, Jg. 3, Nr. 1, 2009.
- [61] J. A. Tsanakas, D. Chrysostomou, P. N. Botsaris und A. Gasteratos, „Fault diagnosis of photovoltaic modules through image processing and Canny edge detection on field thermographic measurements“, *International Journal of Sustainable Energy*, Jg. 34, Nr. 6, S. 351–372, 2015, doi: 10.1080/14786451.2013.826223.
- [62] P. W. Tse und G. Wang, „Sub-surface defects detection of by using active thermography and advanced image edge detection“, *J. Phys.: Conf. Ser.*, Jg. 842, S. 12029, 2017, doi: 10.1088/1742-6596/842/1/012029.
- [63] J. Canny, „A Computational Approach to Edge Detection“, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, PAMI-8, Nr. 6, S. 679–698, 1986, doi: 10.1109/TPAMI.1986.4767851.
- [64] L. H. Lourenco, D. Weingaertner und E. Todt, „Efficient Implementation of Canny Edge Detection Filter for ITK Using CUDA“ in *13th Symposium on Computing Systems*, IEEE, 2012, S. 33–40, doi: 10.1109/WSCAD-SSC.2012.21.
- [65] F. J. Heymann, „Liquid impingement erosion.“ in *ASM Handbook*, Ohio, 1992, S. 221–232.
- [66] N. Gaudern, „A practical study of the aerodynamic impact of wind turbine blade leading edge erosion“, *J. Phys.: Conf. Ser.*, Jg. 524, S. 12031, 2014, doi: 10.1088/1742-6596/524/1/012031.

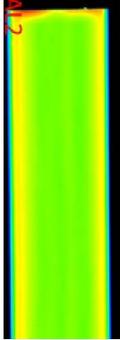
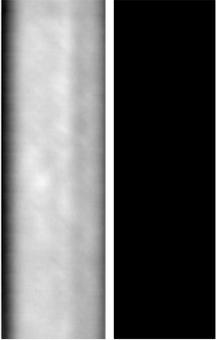
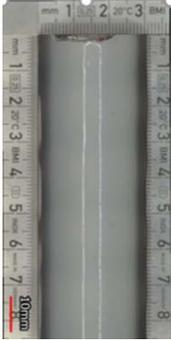
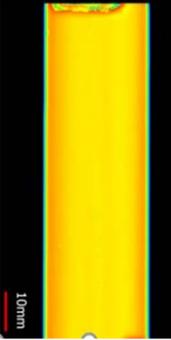
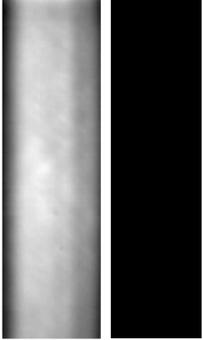
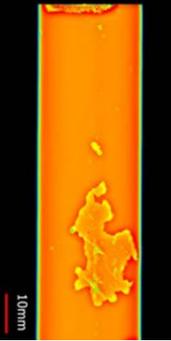
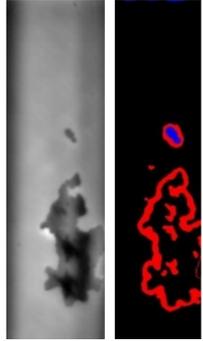
Anhang – Schadenskatalog

Probe A_B-2 Bereich 1 (Luftblasen im Lack)				
Zyklus	Foto	Oberflächen-scan (IFAM)	Thermografie (BIMAQ)	μ-CT (FIBRE)
0				
1 +15 min				
2 +30 min				

3 +90 min				
4 +105 min				
<p>Beschreibung: Im Initialzustand zeigen sich die eingebrachten Initialdefekte der Probe sehr deutlich anhand thermografischen und der CT-Messdaten. In den Messdaten der Thermografie erkennt der Auswertalgorithmus die hellen Flecken, welche durch die Luftblasen im Lack verursacht werden. Diese Luftblasen finden sich in den CT-Daten anhand dunklerer Bereiche in der Beschichtung wieder. In den Fotoaufnahmen und Oberflächenscans der Probe lassen sich diese oberflächennahen Initialschäden ebenfalls anhand örtlicher Erhebungen (Pickel) an der Oberfläche erkennen. Nach den Belastungszyklen eins bis drei ist eine langsam fortschreitende Regenerosionsschädigung der Probenoberfläche anhand von Pin-holes an der Oberfläche sowohl in der Fotoaufnahme als auch in den Oberflächenscans sichtbar. Auch die Auswertung der thermografischen Messdaten stellt den Regenerosionsfortschritt anhand der sukzessiven Vergrößerung der automatisch erkannten Grenzbereiche dar. Die CT-Daten zeigen im Querschnitt größere Hohlräume unterhalb der Beschichtungsoberfläche, welche sich bis zum Spachtelsystem ausbilden. Nach Zyklus vier zeigen sich als Resultat der Regenerosionsversuche ganze Ablösung einzelner Lackschichten auf der mehrfach beschichteten Probe. Es ist erkenntlich, dass diese Schichtablösungen durch die zuvor beschriebenen Pin-holes initiiert werden. Eine Vorzugsrichtung der Erosionserscheinungen sind schwerkraftbedingt entsprechend der Probeneinspannung und der Rotationsrichtung im Regenerosionsteststand nach rechts erkenntlich. Der Tropfenaufschlag und die damit einhergehende Stoßwelle verursacht entsprechend diese Vorzugsrichtung. Es sind neben den Schichtablösungen der Lackschicht keine großflächigen Regenerosionsschäden am Spachtel oder gar am GFK aufgetreten.</p>				

Probe A_S-3 Bereich 1 (Luftblasen im Spachtel)				
Zyklus	Foto	Oberflächen-scan (IFAM)	Thermografie (BIMAQ)	μ-CT (FIBRE)
0				
1 +15 min				
2 +30 min				
3 +90 min				

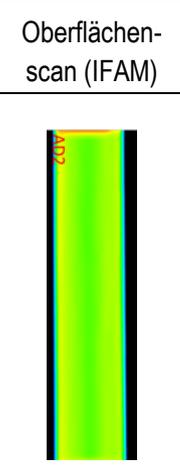
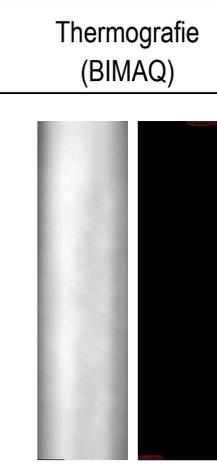
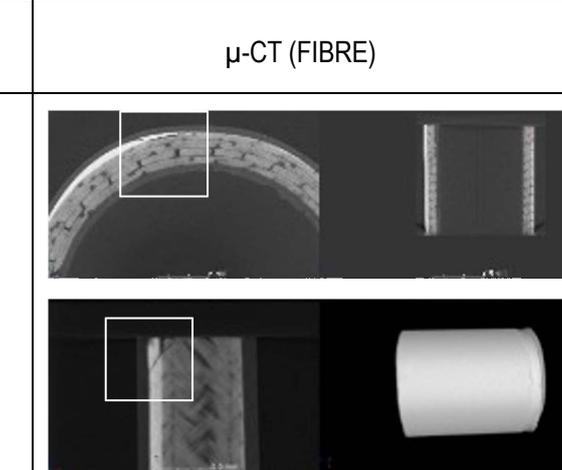
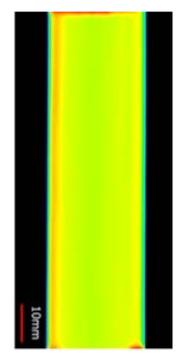
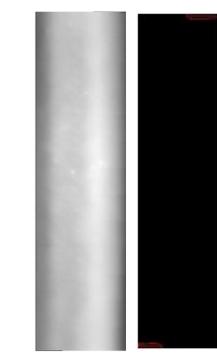
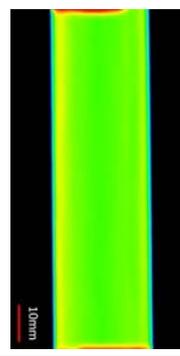
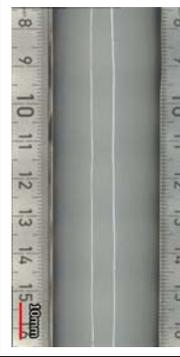
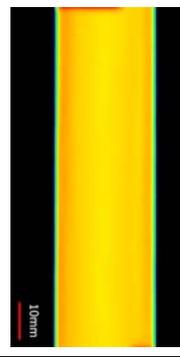
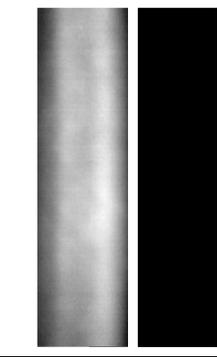
<p>4 +105 min</p>				
<p>Beschreibung: Die Initialdefekte im Spachtel sind grundsätzlich nicht auf der Probenoberfläche mittels Oberflächenscan nachweisbar. Aufgrund einer ausreichenden Tiefenwirkung sind diese tieferliegenden Initialfehler hingegen gut mittels Thermografie erfassbar. Auch mittels CT lassen sich Luftblasen im Spachtel sehr deutlich aufgrund eines hohen Kontrasts durch den großen Dichteunterschied zwischen Spachtel und Luft erkennen. Die Initialschäden im Spachtel führen nach anfänglicher geringer Erosionsschadenswirkungen im ersten bis dritten Zyklus nach dem vierten Zyklus zu einer erheblichen Beschädigung auf der Probe. Das geschwächte Spachtelmaterial bietet der Regenerosion im späteren Belastungsverlauf weniger Widerstand und es kommt dadurch zu großflächigen Ablösungen des gesamten Beschichtungssystems bis aufs GFK.</p>				

Probe A_L-2 Bereich 1 (Luftblasen im GFK)				
Zyklus	Foto	Oberflächen-scan (IFAM)	Thermografie (BIMAQ)	μ-CT (FIBRE)
0				
3 +90 min				
4 +105 min				
<p>Beschreibung: Anhand der durchgeführten Regenerosionsversuche lassen sich für Luftblasen im GFK, die durch Luftzug im Herstellungsprozess erzeugt wurden, keinen signifikanten Auswirkungen auf die Regenerosionsschadenswirkung der Proben nachweisen. So hat sich der Zustand der Probe bis nach dem dritten Belastungszyklus nicht verändert. Erst nach dem vierten Zyklus ist die dünne Beschichtung an einigen Stellen abgetragen und zeigt erste Stellen des GFK. Diese sind jedoch nicht an einer Stelle zu lokalisieren, an der sich im GFK Lufteinschlüsse befunden haben.</p>				

Probe A_L-3 Bereich 1 (Luftblasen im GFK)				
Zyklus	Foto	Oberflächen- scan (IFAM)	Thermografie (BIMAQ)	μ-CT (FIBRE)
0				
1 +15 min				
2 +30 min				
3 +90 min				

Beschreibung: Sowohl auf den Fotos als auch bei den Oberflächenscans und den Thermogrammen sind vor dem ersten Zyklus sowie bis nach dem zweiten Zyklus keine Defekte in oder auf der Probe sichtbar. Erst nach dem dritten Belastungszyklus sind kleine Bereiche mit abgetragenem Lack zu sehen, die den Spachtel offenlegen. Die Ergebnisse der CT-Untersuchungen zeigen sowohl im initialen Zustand als auch nach dem dritten Belastungszyklus, dass sich im Bereich des Oberflächenschadens keine Luftblasen im GFK befinden. Lediglich kleine „natürlich“ Defekte (nicht manuell eingebrachte Defekte) in der obersten Lackschicht sind im Initialzustand erkennbar. Die Ergebnisse zeigen, dass sich

Initialdefekte im GFK vermutlich nicht auf die Erosionsschadensentwicklung auswirken, jedoch kleine Oberflächendefekte wie Mini-Poren oder Risse bereits Auswirkung auf die Widerstandsfähigkeit des Materials gegen Regeneinschlag besitzen.

Probe A_D-2 Bereich 2 (Delamination im GFK)				
Zyklus	Foto	Oberflächen- scan (IFAM)	Thermografie (BIMAQ)	μ-CT (FIBRE)
0				
1 +15 min				
2 +30 min				
3 +120 min				

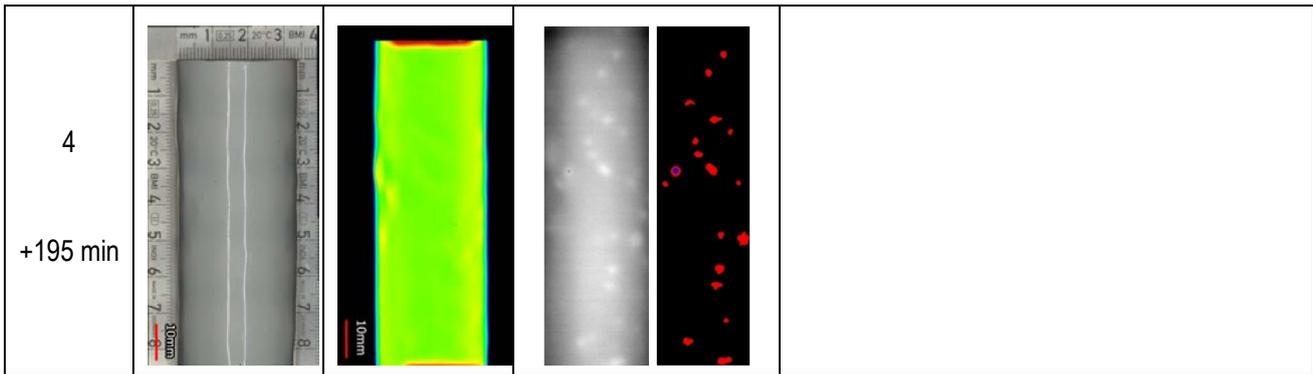
Beschreibung: Anhand Oberflächenanalyse, Thermografie sowie CT ist keine Beeinflussung der Regenerosionsschädigung der Probe durch die eingebrachte Delamination im GFK auszumachen. Auftretende Regenerosionsschäden werden hier vorwiegend durch zufällige, natürliche Fehlstellen in Beschichtung und Spachtel beeinflusst, so wie bei den Referenzproben. Lediglich die CT-Daten zeigen eine Rissbildung zwischen GFK und Spachtel am Randbereich der Probe auf.

Probe A_S-2 Bereich 1 (Luftblasen im Spachtel)				
Zyklus	Foto	Oberflächen-scan (IFAM)	Thermografie (BIMAQ)	μ-CT (FIBRE)
0				
1 +15 min				
2 +30 min				
3 +90 min				

Beschreibung: Die Luftblasen im Spachtel der Probe häufen sich an einer Stelle der Probe in Form eines Clusters an. Dieser Cluster von Luftblasen im Spachtelmaterial unterhalb der Oberfläche ist sehr deutlich mittels Thermografie als heller Fleck erkennbar. Auch im CT zeigt sich dieser Cluster von Luftblasen aufgrund des erheblichen Dichteunterschieds zwischen Luft und Spachtelmaterial sehr deutlich. Anhand der Photographie und des Oberflächenscans ist dieser Defekt unterhalb der Beschichtung nicht sichtbar, weder nach dem ersten Zyklus noch nach dem zweiten Zyklus. Nach dem zweiten Zyklus ist lediglich mittels Oberflächenscan ein Pin-hole Defekt an dieser Stelle an der Probe nachweisbar,

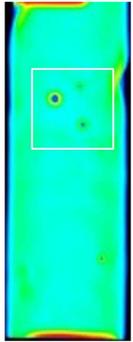
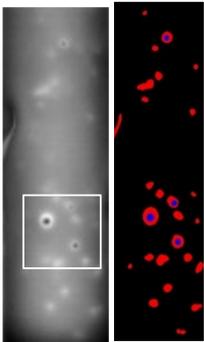
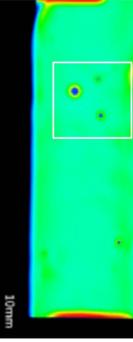
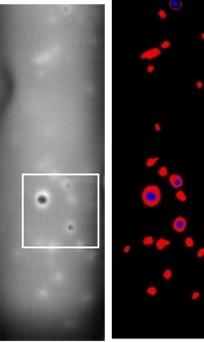
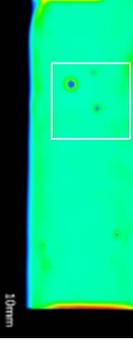
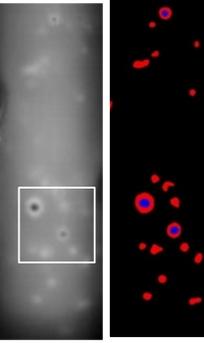
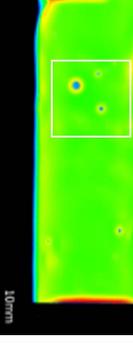
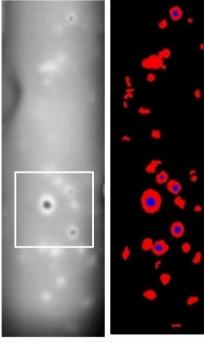
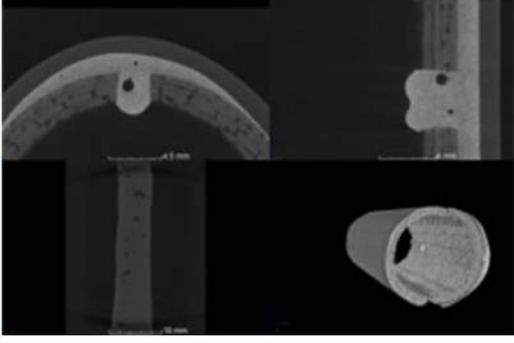
welches aber nicht die tatsächliche Schädigung unterhalb der Oberfläche zeigt. Während des 3. Belastungszyklus hat das Beschichtungssystem der Regenerosion nicht standgehalten, sodass sich die Beschichtung inklusive Spachtel großflächig vom Probekörper ablöste und damit das GFK des Probekörpers freigelegt wurde.

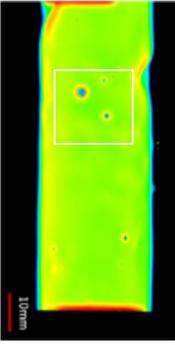
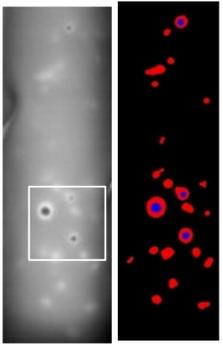
Probe B_S-2 Bereich 1 (Luftblasen in Lack und Spachtel)				
Zyklus	Foto	Oberflächen-scan (IFAM)	Thermografie (BIMBAQ)	μ-CT (FIBRE)
0				
1 +15 min				
2 +30 min				
3 +120 min				

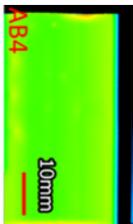
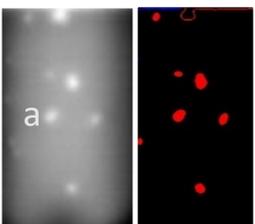
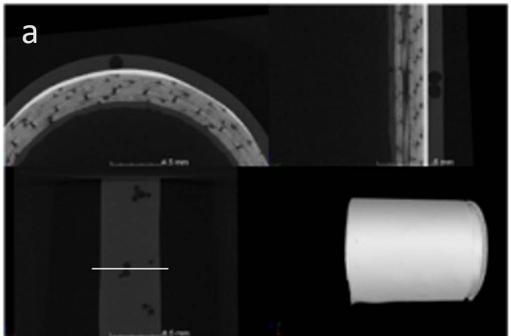
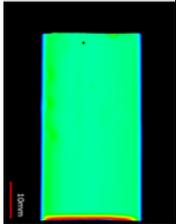
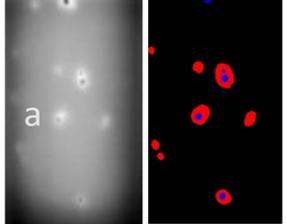
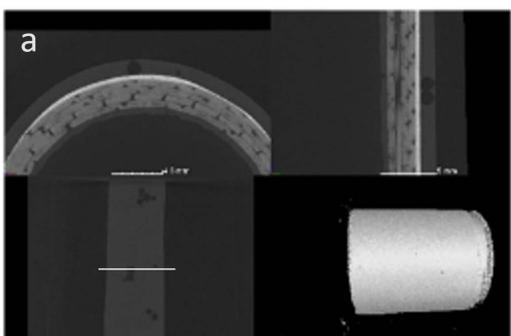
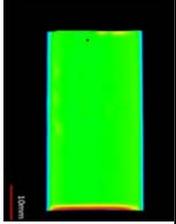
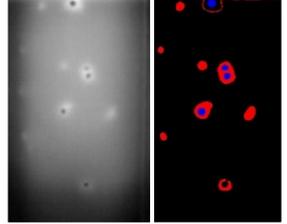
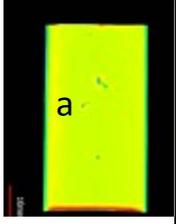
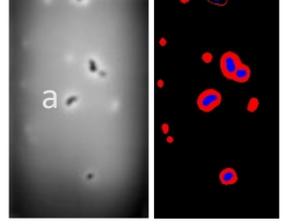
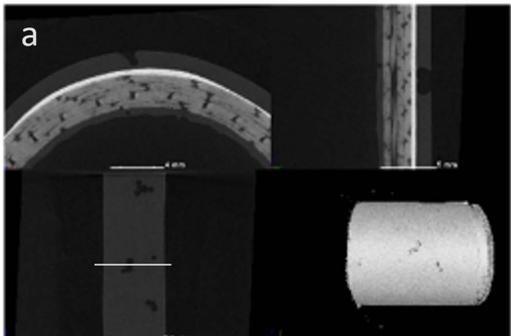
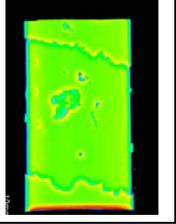
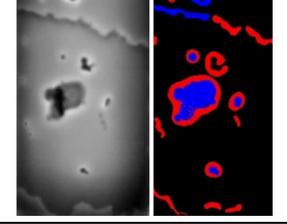


Beschreibung: Die Initialfehler im Lack sowie im Spachtel sind in den Thermogrammen und den CT-Aufnahmen zu erkennen. Lediglich ein Pin-hole im initialen Zustand kann im Oberflächenscan lokalisiert werden. Dieser Defekt bleibt während aller vier Belastungszyklen konstant, es bildet sich kein Schadenswachstum aus.

Anmerkung: Im CT ist lokalisierbar, in welcher Schicht (Lack oder Spachtel) sich die eingebrachten Luftblasen befinden. In den Thermogrammen ist dies mit der verwendeten Auswertungsmethode hingegen nicht möglich. Eine andere Art der Thermografe (bspw. Lock-in Thermografie) sowie eine andere Auswertungsmethode könnten in der Lage sein, die Lokalisierung der Defekte in Tiefen zu ermöglichen.

Probe B_S-1 Bereich 3 (Luftblasen in Lack und Spachtel)				
Zyklus	Foto	Oberflächen-scan (IFAM)	Thermografie (BIMAQ)	μ-CT (FIBRE)
0				
1 +15 min				
2 +30 min				
3 +120 min				

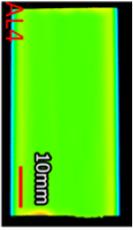
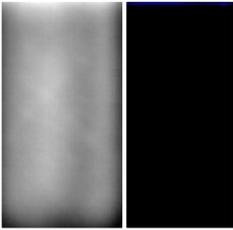
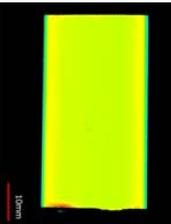
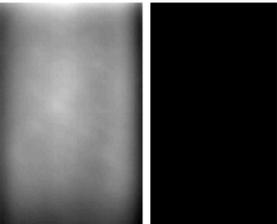
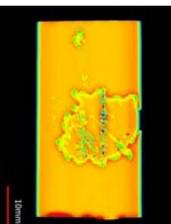
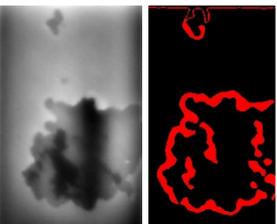
<p>4 +190 min</p>				
<p>Beschreibung: Im initialen Zustand sind bereits offene Poren an der Oberfläche sichtbar, die sich vermutlich durch sehr oberflächennah eingebrachte Luftblasen noch während des Fertigungsprozesses eingestellt haben. Die Belastung mit Regen zeigt jedoch auch nach dem vierten Zyklus keine Auswirkungen auf die anfänglich existierenden Pin-holes.</p> <p><i>Anmerkung:</i> bei dieser Probe ist eine erhöhte Schichtdicke im CT sichtbar im Vergleich zu anderen Proben.</p>				

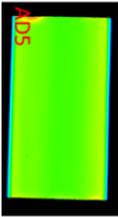
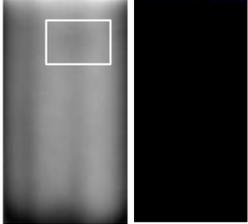
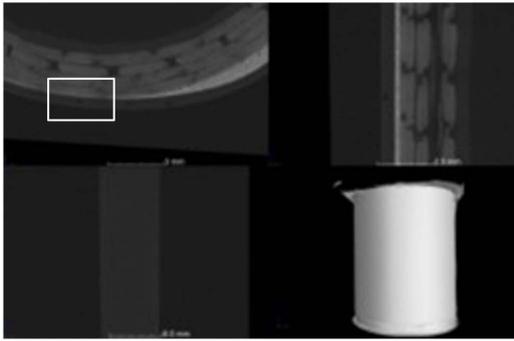
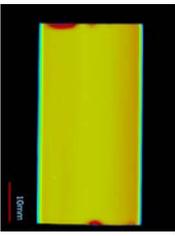
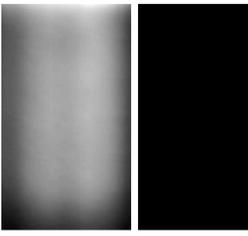
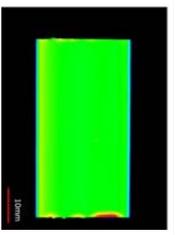
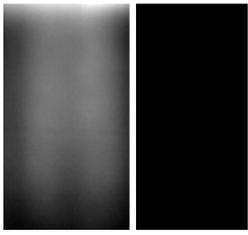
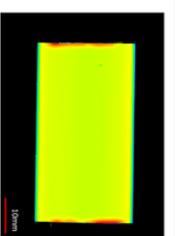
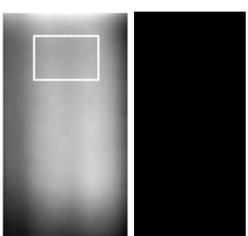
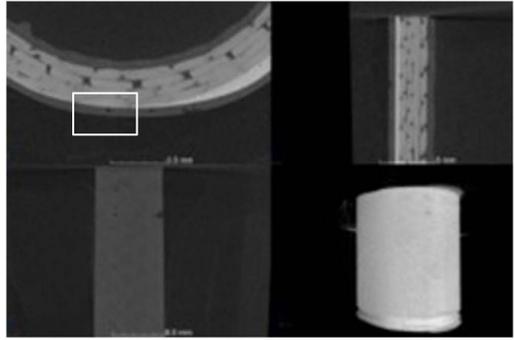
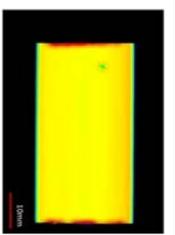
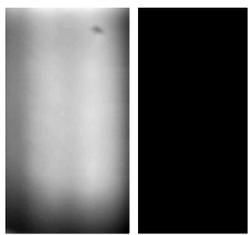
Probe A_B-4 (Luftblasen im Lack)				
Zyklus	Foto	Oberflächen-scan (IFAM)	Thermografie (BIMAQ)	μ-CT (FIBRE)
0				
1 +15 min				
2 +30 min				
3 +90 min				
4 +105 min				

Beschreibung: Anhand der Thermogramme sowie der CT Daten zeigt sich eine Pore im Lack, die im initialen Zustand noch mit einer Lackschicht überdeckt ist (im CT sichtbar). Diese schützende Schicht versagt bereits nach dem ersten Zyklus, sodass eine fortschreitende Erosionsschädigung der Probe in diesem Bereich erfolgt. Die Pore wurde dabei Stück für Stück erweitert, sodass es schließlich zu einem erheblichen Schadensbild aufgrund fehlender Schutzwirkung durch die Lackierung kam. Nach dem vierten Zyklus sind großflächige Lackschichtablösung erkennbar, was auf Adhäsionseinschränkungen zwischen einzelnen Lackschichten (mehrlagige Auftragung des Lacks) des Beschichtungssystems deuten könnte.

Probe A_S-6 (Luftblasen im Spachtel)				
Zyklus	Foto	Oberflächen-scan (IFAM)	Thermografie (BIMAQ)	μ-CT (FIBRE)
0				
1 +15 min				
2 +30 min				
3 +90 min				
4 +105 min				

Beschreibung: Die in den Thermografie- und CT-Daten dargestellte Pore im Spachtel führt zu einer Schwächung der darüber liegenden Lackschicht. Der Defekt wächst zunächst unter der Oberfläche, bis die Lackschicht oberhalb des beschädigten Spachtels nachgibt. Schließlich führt dieser Defekt zu einer erheblichen Erosionsschädigung der Probe.

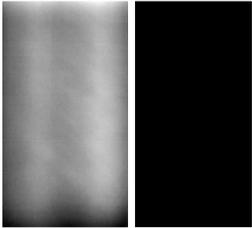
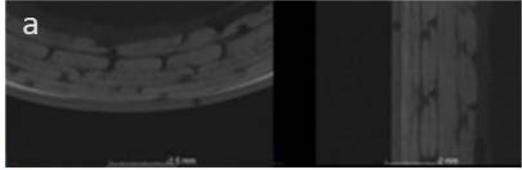
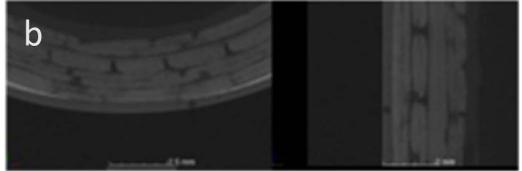
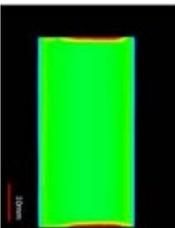
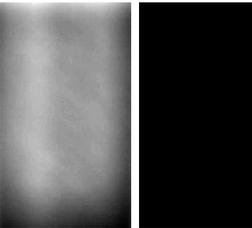
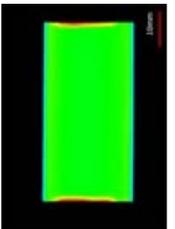
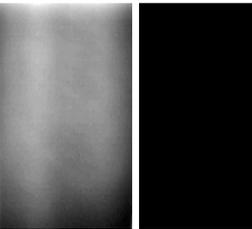
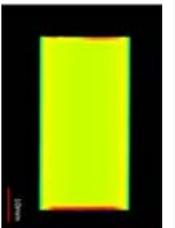
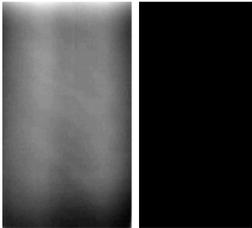
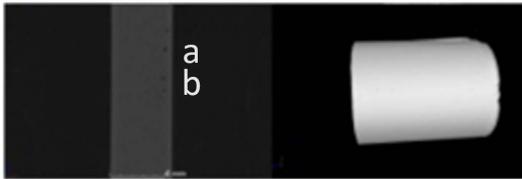
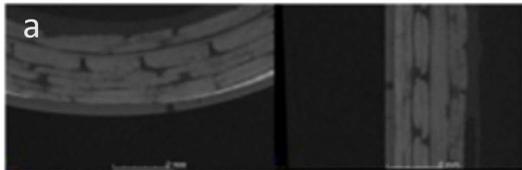
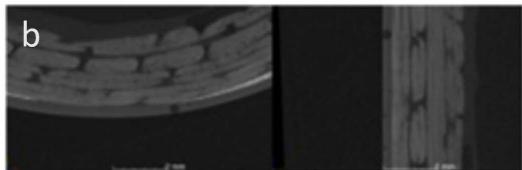
Probe A_L-4 (Luftblasen im GFK)				
Zyklus	Foto	Oberflächen-scan (IFAM)	Thermografie (BIMAQ)	μ-CT (FIBRE)
0				
3 +90 min				
4 +105 min				
<p>Beschreibung: Vom initialen Zustand bis nach dem dritten Belastungszyklus konnten in den Messdaten keine initialen Defekte oder Erosionserscheinungen erkannt werden. Erst nach dem vierten Zyklus sind Schäden an der Oberfläche sichtbar. Diese sind jedoch verhältnismäßig groß und reichen bis zum GFK. Anhand der durchgeführten Regenerosionsversuche lassen sich für Luftblasen im GFK, die durch Luftenzug im Herstellungsprozess initiiert wurden, keinen signifikanten Auswirkungen auf die Regenerosionsschadenswirkung der Proben nachweisen, da unterhalb des registrierten Schadens keine eingeschlossenen Luftblasen im Spachtel vorhanden waren. Auftretende Regenerosionsschäden werden hier vorwiegend durch zufällige, natürliche Fehlstellen in Beschichtung und Spachtel beeinflusst, wie bei Referenzproben.</p>				

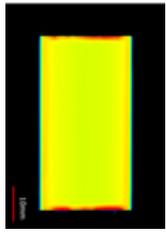
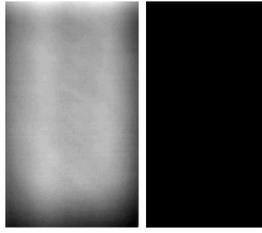
Probe A_D-5 (Delamination im GFK, mechanisch beansprucht nach Zyklus 3)				
Zyklus	Foto	Oberflächen-scan (IFAM)	Thermografie (BIMAQ)	μ-CT (FIBRE)
0				
1 +15 min				
2 +30 min				
3 +90 min				
4 +105 min				

Beschreibung: Anhand Oberflächenanalyse, Thermografie sowie CT ist keine Beeinflussung der Regenerosionsschädigung der Probe durch die eingebrachte Delamination im GFK, die sich in mittleren Bereich der Probe befindet, nachweisbar. Auch nach mechanischer Beanspruchung zwischen dem dritten und vierten Zyklus, was eine Delamination im Randbereich der Probe hervorgerufen hat, konnten nach dem vierten Zyklus keine damit zusammenhängenden Erosionsschäden beobachtet werden.

Probe A_R-3 (Referenzprobe)				
Zyklus	Foto	Oberflächen-scan (IFAM)	Thermografie (BIMAQ)	μ-CT (FIBRE)
0				
1 +15 min				
2 +30 min				
3 +90 min				
4 +105 min				

Beschreibung: Die Referenzprobe zeigt wie erwartete vor der ersten Belastung und nach den ersten zwei Zyklen keinerlei Auffälligkeiten. Nach dem dritten Zyklus sind sehr kleine Schäden an der Oberfläche des Lacks sichtbar. Der große Erosionsschaden nach dem vierten Zyklus, welcher das GFK freilegt, ist mit keinen der Messdaten in diesem Ausmaß zu erklären.

Probe B_L-4 (Luftblasen im GFK)				
Zyklus	Foto	Oberflächen-scan (IFAM)	Thermografie (BIMAQ)	μ-CT (FIBRE)
0				  
1 +15 min				
2 +30 min				
3 +90 min				  

<p>4 +105 min</p>				
<p>Beschreibung: Die CT-Daten zeigen, dass abschnittsweise kein Spachtelmaterial zwischen Lack und GFK vorhanden ist. Bei der Beschichtung der Probe haben sich zwei kleinere Fehlstellen in Form von Luftblasen im Lack ergeben, welche ebenfalls lediglich über die CT-Daten dargestellt werden können. Trotz dieser aufgezeigten Fehlstellen ist keine Beschädigung der Probe nach allen vier Zyklen nachweisbar.</p>				

Probe B_S-4 (Luftblasen in Lack und Spachtel)				
Zyklus	Foto	Oberflächen-scan (IFAM)	Thermografie (BIMAQ)	μ-CT (FIBRE)
0				
1 +15 min				
2 +30 min				
3 +120 min				
4 +195 min				

Beschreibung: Während des initialen Zustandes sowie nach den ersten drei Belastungszyklen sind in den Oberflächenscans keine Schäden sichtbar. Erst nach dem vierten Zyklus ist lediglich ein Pin-hole an der Oberfläche zu sehen. Die Thermogramme und μ-CT-Daten zeigen jedoch, dass sich dieses Pin-hole an einer Stelle befindet, an der eine Anhäufung von Initialschäden vorhanden ist. Anhand der μ-CT-Daten wird eine innerliche Strukturschädigung sichtbar, die sich während der ersten drei Belastungszyklen unterhalb der Oberfläche verändert hat und erst nach der vierten Belastung an die Oberfläche gelangt.

