

Christoph Hornfeck

Vergleichende zerstörungsfreie
Charakterisierung von Schäden in
Faserverbundstrukturen (GFK) mittels
mobiler Prüfverfahren

Masterarbeit

BEI GRIN MACHT SICH IHR WISSEN BEZAHLT



- Wir veröffentlichen Ihre Hausarbeit, Bachelor- und Masterarbeit
- Ihr eigenes eBook und Buch - weltweit in allen wichtigen Shops
- Verdienen Sie an jedem Verkauf

Jetzt bei www.GRIN.com hochladen
und kostenlos publizieren



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de/> abrufbar.

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlanges. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

Impressum:

Copyright © 2014 GRIN Verlag
ISBN: 9783656718598

Dieses Buch bei GRIN:

<https://www.grin.com/document/278575>

Christoph Hornfeck

**Vergleichende zerstörungsfreie Charakterisierung von
Schäden in Faserverbundstrukturen (GFK) mittels
mobiler Prüfverfahren**

GRIN - Your knowledge has value

Der GRIN Verlag publiziert seit 1998 wissenschaftliche Arbeiten von Studenten, Hochschullehrern und anderen Akademikern als eBook und gedrucktes Buch. Die Verlagswebsite www.grin.com ist die ideale Plattform zur Veröffentlichung von Hausarbeiten, Abschlussarbeiten, wissenschaftlichen Aufsätzen, Dissertationen und Fachbüchern.

Besuchen Sie uns im Internet:

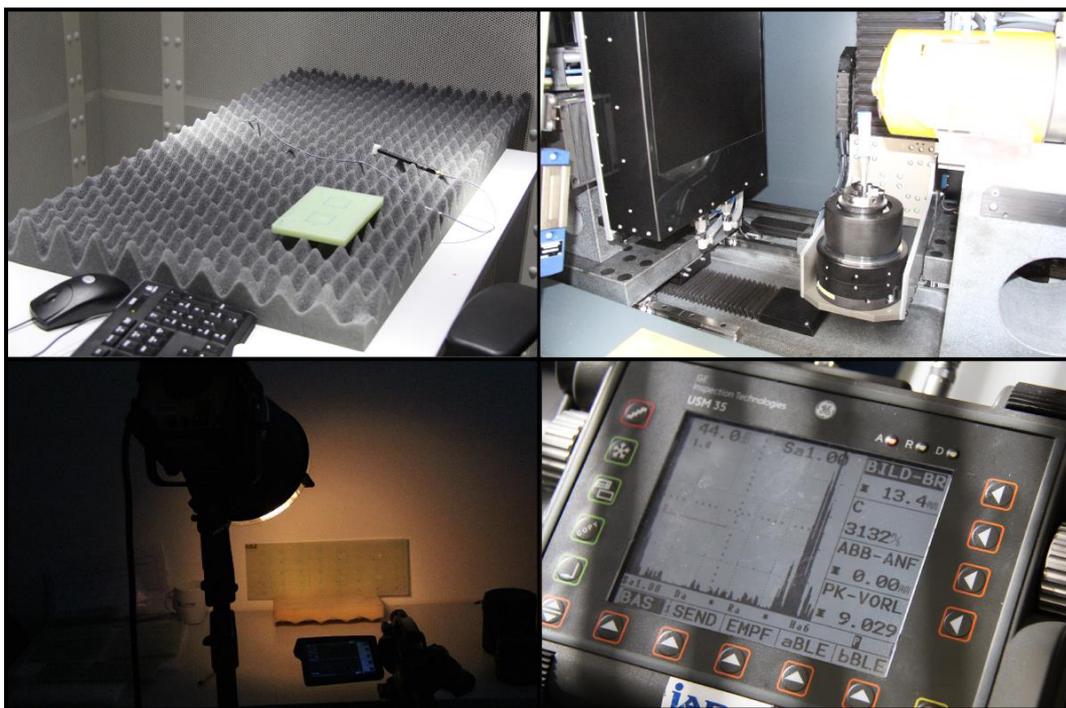
<http://www.grin.com/>

<http://www.facebook.com/grincom>

http://www.twitter.com/grin_com

Vergleichende zerstörungsfreie Charakterisierung von Schäden in Faserverbundstrukturen (GFK) mittels mobiler Prüfverfahren

Christoph Hornfeck



Masterarbeit

Fakultät für Maschinenwesen

1. August 2014

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN - Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung

www.ZfP.tum.de



Aufgabenstellung für eine Masterarbeit

**Titel: Vergleichende zerstörungsfreie Charakterisierung von Schäden in Faser-
verbundstrukturen (GFK) mittels mobiler Prüfverfahren**

Motivation:

Faserverstärkte Kunststoffe weisen gegenüber anderen Materialien eine Reihe von Vorteilen auf, wie z.B. eine erhöhte Festigkeit bei gleichzeitig geringem Gewicht. Dies führt dazu, dass Faserverbundwerkstoffe eine zunehmende Verbreitung in der Automobilindustrie, der Windenergie oder im Behälterbau finden. Da die komplexen Schädigungsmechanismen dieser Faserverbunde in vielen Fällen durch eine (visuelle) Oberflächenprüfung nicht erkennbar sind, bedarf es geeigneter zerstörungsfreier Prüfungen des Materialvolumens, um die vorliegenden Schädigungsmerkmale zu detektieren. Für die Prüfung von Bauteilen und Komponenten im Betrieb ist sehr häufig der Einsatz mobiler Prüftechniken während der Wartungs- und Inspektionszyklen erforderlich. Es existieren bereits verschiedene mobile Methoden zur zerstörungsfreien Prüfung von Faserverbunden; die Übertragbarkeit der Ergebnisse zwischen diesen Methoden und die Bestimmung der Schädigungscharakteristik anhand der Messergebnisse bereiten aktuell jedoch Schwierigkeiten.

Aufgabenstellung:

Ziel der Masterarbeit ist die Evaluierung gängiger und neuer zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Untersuchung von Schädigungen in glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK). Zu den Verfahren zählen u.a. die Ultraschalltechnik (USPA), die lokale akustische Resonanzspektroskopie (LARS) und die Mikrocomputertomographie (μ CT). Dazu sollen generische GFK-Platten

sowohl mit künstlich eingebrachten Fehlstellen (Referenzdefekten, z.B. Bohrloch) als auch mit beanspruchungsnahen Schädigungen (z.B. Impact) untersucht werden. Die hierbei eingebrachte Defektcharakteristik kann zusätzlich durch Variation verschiedener Parameter (Material: Plattendicke, Fasergehalte, Lagenaufbau, Harzmaterial und Prüfung: Impactenergie, Impactorform) beeinflusst werden. Die fertigungs- und beanspruchungsbedingte Defektcharakteristik soll an ausgewählten GfK-Proben mithilfe einer hochauflösenden Referenzmethode (μ CT) dreidimensional beschrieben werden. Als Referenzmethode für die Oberflächenprüfung erfolgt eine visuelle Prüfung mit lichtoptischer Dokumentation. Anschließend werden die GfK-Proben mittels mobiler zerstörungsfreier Prüfverfahren (USPA und LARS) analysiert. Alle Messergebnisse werden ausgewertet und interpretiert mit dem Ziel, die wesentlichen Merkmale / Parameter der jeweiligen Schädigungen zu ermitteln. Daraus sollen Ableitungen für die Vergleichbarkeit der Messergebnisse entwickelt werden.

Schwerpunkte der Masterarbeit:

- Literaturrecherche zu den zerstörungsfreien Prüfung mittels USPA (Ultraschall Phased Array Prüfung und LARS (lokale akustische Resonanzspektroskopie) mit dem Fokus der Anwendung auf Faserverbunde (Mehrlagen) sowie der
- Einarbeitung in die Messgeräte (unter Anleitung TUM) und Beschreibung der ausgewählten Prüfverfahren (US, LARS, etc.)
- Auswahl geeigneter GfK-Materialien und Vorbereitung von geeigneten Probekörpern anhand der Literaturrecherche
- Einbringung definierter Defekte (Referenzdefekte) in die Probekörper und Einbringung von beanspruchungsbedingten Defekten
- Systematische zerstörungsfreie Prüfung auf Basis eines zuvor erarbeiteten Messkonzeptes.
- Auswertung der Daten, Fehlerrechnung, Analyse und Interpretation der Einzeldaten sowie vergleichende Analyse. Einfluss der Mess- und Bewertungsgrößen (Detektionswahrscheinlichkeit, Auflösungsvermögen, Detektionstiefe, Sensitivität hinsichtlich unterschiedlicher Schädigungen, Einfluss von Rand- und Oberflächeneffekten, Materialparameter etc).
- Anfertigung der schriftlichen Ausarbeitung unter Berücksichtigung des Layouts des Lehrstuhls. Vorstellung der Ergebnisse und Abgabe aller Schriftstücke und Daten in elektronischer Form.

Die Bewertungskriterien für die Masterarbeit liegen vor und sind dem Kandidaten bekannt. Die Vorstellung der Ergebnisse erfolgt in einem etwa 30-minütigen Vortrag, an den sich die Notenfindung anschließt. Zu diesem Zeitpunkt liegt die korrigierte Endversion der Masterarbeit den Prüfern vor.

Beginn der Masterarbeit: nach Vereinbarung

Voraussichtliche Dauer: 5 Monate

Abstract

Fiber reinforced plastics become more and more important in many areas of mechanical and civil engineering. The technique has a lot of potential in the construction of lightweight materials, but challenging damage mechanisms require reliable and sophisticated methods to ensure the quality of fiber reinforced parts.

This thesis compares the non-destructive characterization of impact damages and reference flaws in glasfiber reinforced plastics (Vetronit EGS 619) with mobile methods of nondestructive evaluation. The specimen have been made with blind holes of different deepness and impact damages have been produced in the specimen covering a range of non-visible to clearly visible impact damage.

A first impression of the emergence of the impact damage is given by a clip from a high speed camera. Measures of the impact damage are given by the visible turbidity.

In ongoing stepsthe specimen have been examined with ultrasound testing, optically locked in thermography and a new technique, the local acoustic resonance spectroscopy. To have a deeper insight in some damage structures some specimen have been examined with computertomography.

The results of the nondestructive evaluation have been compared with each other, with the aim to identify strengths and weaknesses of the different methods, and consequently areas of operation of the different methods.

The methods of nondestructive evaluation are investigated on the application of rotorblades of wind power plants.

This thesis shows the high potential of the new technique local acoustic resonance spectroscopy. A simpler version, the coin tap method is already used in the nondestructive evaluation of rotorblades of wind power plants. Ultrasound testing yields good results on single spots, the optically locked in thermography gives the worker an Overview over the damaged part. For both methods there lies great potential for the investigation of rotorblades of wind power plants in the development of air coupled methods.

Keywords: Non-Destructive Testing (NDT), fibre reinforced plastics, wind energy plant, ultrasound testing, local acoustic Resonancespectroscopy.

Zusammenfassung

Faserverstärkte Kunststoffe werden verstärkt in immer mehr Bereichen des Bau- und Maschinenwesens und der Luft- und Raumfahrttechnik eingesetzt. Die richtungsabhängigen Eigenschaften der Fasern erlauben eine anwendungsspezifische Bauteilauslegung, so dass faserverstärkte Strukturen ein hohes Potential im Leichtbau haben. Die schwierigen Schädigungscharakteristiken erfordern allerdings auch zuverlässige und ausgeklügelte Verfahren um die Qualität sicher zu stellen.

Diese Arbeit befasst sich mit der vergleichenden zerstörungsfreien Charakterisierung von Schäden in glasfaserverstärkten Kunststoffen mit mobilen Verfahren der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. Dazu wurden zunächst Prüflinge des nach DIN genormten Materials Vetronit EGS619 mit künstlich eingebrachten Defekten und beanspruchungsnahen Schlag- schäden / Kreisscheibenreflektoren hergestellt. Platten mit 2 mm, 6 mm und 11 mm Dicke wurden mit Sacklochbohrungen unterschiedlicher Tiefe und Durchmesser versehen. Außerdem wurden Schlagschädigungen eingebracht, welche für jede Prüflingsdicke den Bereich vom nicht sichtbaren bis zum gut sichtbaren Schaden abdeckten.

Einen ersten Eindruck der Schadensentstehung liefern die Aufnahmen einer Hochgeschwindigkeitskamera. Quantitative Parameter wurden durch die Ausmaße der Trübungen im Material und der Messung der Eindringtiefe sowie der Ausbeulung erfasst.

Danach wurden die Prüflinge mit verschiedenen Methoden geprüft. Neben etablierten zerstörungsfreien Prüfverfahren wie der Ultraschallprüfung, oder der optischen Lockin- Thermographie, kam ein neues Verfahren, die lokale akustische Resonanzspektroskopie zum Einsatz. Um ein eingehenderes Bild der Schadensmerkmale zu bekommen, wurden von ausgewählten Schlagschäden Computertomographien erstellt. Die Qualität der Ergebnisse der zerstörungsfreien Prüfung wurde verglichen und dadurch Folgerungen über Stärken und Schwächen der Verfahren gemacht. Praktisches Anwendungsbeispiel der zerstörungsfreien Prüfung von glasfaserverstärkten Kunststoffen in dieser Arbeit ist die Prüfung von Rotorblättern von Windenergieanlagen. Die Evaluierung der Methoden der zerstörungsfreien Prüfung soll Anregungen für ein ganzheitliches Konzept der Überwachung von Rotorblätter geben.

Die Arbeit zeigte, dass das neue Verfahren lokale akustische Resonanzspektroskopie ein hohes Potential in der Prüfung von Windenergieanlagen hat. Eine einfachere Version, die Klopfprüfung wird bereits jetzt verwendet. Während die Ultraschallprüfung gute Ergebnisse auf einzelnen Messpunkten lieferte, gibt die Thermographie einen Überblick über große Bereiche des Bauteils. Vor allem in der kontaktfreien Ankopplung liegt bei beiden Methoden ein hohes Potential, da so auch die Automatisierung weiter vorangetrieben werden kann.

Schlüsselwörter: Zerstörungsfreie Prüfung, glasfaserverstärkte Kunststoffe, GFK, Windenergieanlagen, Ultraschall, lokale akustische Resonanzspektroskopie.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist in Zusammenarbeit der IABG mbH und des Lehrstuhls für zerstörungsfreie Prüfung entstanden. Ein besonderer Dank gilt Prof. Dr.–Ing. habil. Christian Große, der diese Arbeit durch die Betreuung des Lehrstuhls ermöglichte. Mein besonderer Dank gilt auch M.Sc. Christian Geiss, Dipl.-Ing. Markus Rücker, Dipl.–Ing Matthias Decker und Dr. Ing Susanne Guder die die praktische Betreuung übernahmen. Den Kollegen aus der Abteilung TA31 danke ich für die freundliche und fördernde Atmosphäre.

Ohne die Unterstützung anderer Abteilungen im Resort Tests und Analysen der IABG wäre diese Arbeit ebenfalls nicht möglich gewesen. Die Impaktierung der Proben wäre ohne den Fallturm von Nicolas Abramovici nicht möglich gewesen. Genauso wichtig war die Messtechnik, bei der mir René Etten und Manuel Prause weitergeholfen haben. Der Dank geht hier an Herrn Bauer und Herrn Dr. Rödling, die die Bereitstellung der Messtechnik ermöglichten. In diesem Zuge bedanke ich mich auch bei Ludwig Fröschl, der mir die Videoaufnahme der Impaktierung mit einer High Speed Kamera ermöglichte.

Auch bei der zerstörungsfreien Prüfung war ich auf die Hilfe von in- und externen Kollegen angewiesen. Die Computertomographie wurde von GE übernommen. Dieter Sommerfeldt half mir hier weit über das zu erwartende Maß hinaus.

Bei der lokalen akustischen Resonanzspektroskopie halfen mir Dipl. Geophys. Robin Groeschup und Marina Nahn vom Lehrstuhl für zerstörungsfreie Prüfung. Ein Dank auch an M. Sc. Gaetano Andreisek und Prof. Dr. -Ing. Seeber, welche mir die Messung im Fachgebiet Audio- Signalverarbeitung in einer Schallkammer ermöglichten.

Bei der Ultraschallprüfung hat mir Dieter Habermann, mit seiner fachlichen Kompetenz und Erfahrung im Bereich Ultraschallprüfung von Faserverbundwerkstoffen sehr weitergeholfen. Ohne die Freigabe der Gerätschaft von Michael Eppeneder und Herrn Bauer wäre auch diese Prüfung nicht möglich gewesen.

Die optische Lockin-Thermographie hat Dipl.-Ing. Benedikt Rauh vom Lehrstuhl für zerstörungsfreie Prüfung mit mir durchgeführt. Vielen Dank für die Geduld und die fachliche Beratung.

Besonders möchte ich mich bei meiner Familie und Amelie bedanken, welche mich immer unterstützten und mir immer den nötigen Rückhalt gaben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Stand der Technik.....	5
2.1	Grundlagen der Windenergieanlagen	5
2.1.1	Bauweise und Fertigung der Rotorblätter moderner Windenergieanlagen.....	7
2.1.2	Überwachung und Prüfung der Rotorblätter von Windenergieanlagen.....	9
2.2	Grundlagen der Faserverbundbauteile	13
2.2.1	Von den Komponenten Faser und Matrix zum Mehrschichtverbund.....	13
2.2.2	Beanspruchungsbedingte Schäden in Faserverbundwerkstoffen	20
2.3	Lokale akustische Resonanzspektroskopie	27
2.3.1	Physikalische Grundlagen.....	29
2.3.2	Prüfung mit der lokalen akustischen Resonanzspektroskopie	35
2.4	Ultraschall	42
2.4.1	Physikalische Grundlagen.....	43
2.4.2	Prüfung mit Ultraschall	46
2.5	Optische Lockin-Thermographie.....	50
2.5.1	Physikalische Grundlagen.....	51
2.5.2	Prüfung mit der optischen Lockin-Thermographie.....	54
2.6	Computertomographie.....	55
2.6.1	Physikalische Grundlagen.....	57
2.6.2	Prüfung mit der Computertomographie	58
3	Versuchsbeschreibung.....	61
3.1	Definierte Schädigung der Prüflinge	61
3.1.1	Das Fallwerk	61
3.1.2	Prüflinge.....	65
3.1.3	Impaktenergie.....	66
3.2	Zerstörungsfreie Schadenscharakterisierung.....	67
3.2.1	Messung sichtbarer Parameter	67
3.2.2	Aufnahmen mit der High Speed Kamera	69
3.2.3	Durchführung der lokalen akustische Resonanzspektroskopie.....	70
3.2.4	Durchführung der Ultraschallprüfung.....	72

3.2.5	Durchführung der optischen Lockin-Thermographie.....	74
3.2.6	Durchführung der Computertomographie	75
4	Versuchsauswertung	77
4.1	Auswertung der Messergebnisse	77
4.1.1	Auswertung der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen	77
4.1.2	Auswertung der Eindringtiefe, Ausbeulung und Abmessung der Trübung.....	78
4.1.3	Auswertung der Ergebnisse der lokalen akustischen Resonanzspektroskopie...	82
4.1.4	Auswertung der Ergebnisse der Ultraschallmessung	90
4.1.5	Auswertung der Ergebnisse der optischen Lockin-Thermographie	94
4.1.6	Auswertung der Ergebnisse der Computertomographie.....	96
4.2	Vergleich und Untersuchung der Übertragbarkeit der Ergebnisse.....	102
4.2.1	Vergleich lokale akustische Resonanzspektroskopie – Ultraschall.....	103
4.2.2	Vergleich Ultraschall – Computertomographie.....	103
4.2.3	Vergleich lokale akustische Resonanzspektroskopie – Referenzmethoden	105
4.2.4	Vergleich Optische Lockin-Thermographie – Referenzmethoden.....	106
4.3	Auswertung der Messergebnisse an realen Prüfobjekten	106
5	Diskussion	111
5.1	Impaktierung, Werkstoff, und Schadensmerkmale	111
5.2	Diskussion der Prüfung mit mobilen Prüfverfahren	114
5.2.1	Lokale akustische Resonanzspektroskopie.....	114
5.2.2	Ultraschallprüfung	117
5.2.3	Optischen Lockin Thermographie	118
5.3	Modell zur ganzheitlichen Schadenscharakterisierung	121
6	Zusammenfassung und Ausblick	125

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: a) Entwicklung des weltweiten Marktes für CFK. Die Jahre 2013 bis 2020 des Diagramms sind Schätzungen. Daten aus [Witten, 2013]. b) Die Europaweite Produktion von GFK. Daten aus [Jahn, 2013].	1
Abbildung 1-2: Anzahl der jährlich neu installierten Onshore-Windenergieanlagen in Deutschland. Daten aus [statista 2013].	2
Abbildung 1-3: Größenvergleich eines Windrades der neuesten Generation mit dem Airbus A380, [Siemens 2012].	2
Abbildung 1-4: Windradunfall in einem Windpark in Kirtorf in Hessen, [Augsburger Allgemeine 2011].	3
Abbildung 2-1: a) Die erste Versuchsanlage zur Erzeugung elektrischen Stroms in Dänemark, [Hau 2008, S.24]. b) Der Erfinder Poul La Cour, [Kjaergaard 2014].	5
Abbildung 2-2: Schema einer modernen Windenergieanlage, nach [Hau, 2008, S.71], [Nordmann 2007].	6
Abbildung 2-3: Verschiedene Bauweisen der Rotorblättern von Windenergieanlagen, [Hau 2008, S.243].	7
Abbildung 2-4: Schematischer Aufbau eines modernen Rotorblattes, (Mit freundlicher Genehmigung des Lehrstuhls für Audio Signalverarbeitung, TU München).	8
Abbildung 2-5: a) Herstellung mit dem Vakuumsinfusionsverfahren, [Hau 2008, S.264]. b) Prepregverfahren bei MBB, [Hau 2008, S.263].	9
Abbildung 2-6: im Betrieb auftretende fertigungsbedingte Schäden. a) mangelhafte Blattschalenverklebung liefert nicht die nötige Steifigkeit an der Nasenkante. Dies führt zu Längsrißen an der Nasenkante. b) zu viel Klebstoff an der hinteren Blattschalenverklebung führt zu Querrissen, welche durch die Biegung des Rotorblattes entstehen, [Brassel 2011, S.21ff].	10
Abbildung 2-7: a) Folgen eines fehlerhaften Laminats, [Brassel 2011, S.27]. b) Ondulation im Laminat, [Cerbe 2010, S.11].	11
Abbildung 2-8: Betriebsbedingte Schäden: a): abgeplatzter Lack aufgrund von Erosion/Hagelschlag b): Erosion an der Nasenkante. c): Beschädigung durch Blitzschlag. d): abgeknicktes Rotorblatt, [Cerbe 2010, S13ff].	11
Abbildung 2-9: Die Eigenschaften verschiedener Fasern, [Flemming 1995, S.104].	14
Abbildung 2-10: Der Unterschied zwischen Duroplaste und Thermoplasten, [Flemming 1995, S.181].	16
Abbildung 2-11: Die Richtungsabhängigkeit einer unidirektionalen Schicht, nach [Bayer 2012, S.53].	18
Abbildung 2-12: schematische Darstellung von unidirektionalem (UD), biaxialem (Kreuzverbund) und triaxialem Gelege, [eigene Darstellung].	19
Abbildung 2-13: Verschiedene Gewebearten: a) Leinen. b) Köper. c) Atlas. d) kettstarkes Gewebe, nach [Schürmann 2007, S.60].	19
Abbildung 2-14: Überblick über verschiedene Versagensarten unidirektionaler Schichten bei verschiedenen Belastungen, nach [Schultz 1996], [Schürmann 2007, S344ff].	20

Abbildung 2-15: Schliffbild von Matrixbrüchen bei einem Impakt: In der oberen Lage sieht man den querverlaufenden Schubbruch durch Druck, in der unteren Lage sieht man einen gerade verlaufenden Matrixbruch, [Joshi 1985, S.55].....22

Abbildung 2-16: Die Erdnussförmige Ausbreitung von Delaminationen, nach [Liu 1988, S.678ff].....23

Abbildung 2-17: a) Skizze der tannenbaumförmigen Ausbreitung von Zwischenfaserbrüchen und Delaminationen über der Dicke des Laminats bei relativ dicken Laminaten. b) Skizze der umgekehrt tannenbaumförmigen Ausbreitung von Zwischenfaserbrüchen und Delaminationen über der Dicke des Laminats bei relativ dünnen Laminaten, nach [Schürmann 2007, S.386], [Abrate 2005, S144]23

Abbildung 2-18: a) Die Energie des Impakts über Delaminationsfläche, nach [Mitrovic 1999, S.2063]. b) Die Restdruckfestigkeit über der Impaktenergie, nach [Mitrovic 1999, S.2063]..24

Abbildung 2-19: Schnittbilder von Faserverbundwerkstoffen a) Faserverbundwerkstoff in großer Vergrößerung. b) Faserverbundwerkstoff in mittlerer Vergrößerung. [Agarwall et al. 1990].....25

Abbildung 2-20: Einfluss eines Impakts auf die Restzugfestigkeit eines Laminats, nach [Richardson et al. 1994, S.1128].26

Abbildung 2-21: a) Die Größe der beiden Schadensausbreitungsformen. b) Makrofotographie der Vorder und Rückseite zur Visualisierung der „primary damage zone“ und „secondary damage zone“, aus [Choong et al 2011].27

Abbildung 2-22:a) eine Anlage zur industriellen Resonanzprüfung, [Hertlin et al. 2003]. b) Der Mitsui Woodpecker, [JR Technology Limited 2012].....28

Abbildung 2-23: Prinzip der lokalen akustischen Resonanzspektroskopie, auf jeden Punkt des Messrasters wird geklopft, und der Schall sowie die Kraftanregung ausgewertet. Die Ergebnisse aller Messpunkte ergeben ein flächiges Bild des Prüflings, [eigene Darstellung].28

Abbildung 2-24: a) Ausbreitung einer Longitudinalwelle. b) Ausbreitung einer Transversalwelle, nach [Buschbaum 2009, S.44].....29

Abbildung 2-25: Das akustischen Spektrums, [eigene Darstellung].....31

Abbildung 2-26: Eine abklingende Schwingung im a) Zeitbereich. b) im Frequenzbereich, hier sind deutlich die Peaks der Resonanzfrequenzen sichtbar, nach [Hertlin et al. 2003] c) Die Visualisierung der Zerlegung eines Rechtecksignals, nach [Müller-Buschbaum 2008, S.57].....32

Abbildung 2-27: a) Die Abhängigkeit der aufgebrauchten Kraft über der Kontaktsteifigkeit, [eigene Darstellung].34

Abbildung 2-28: Das Amplitudenspektrum verschiedener Hammerspitzen, [Kistler Instrumente GmbH 2005].....36

Abbildung 2-29: Darstellung der Kraftanregung. a) Visualisierung der Halbwertsbreite eines Signals. b) flächenmäßige Darstellung der Halbwertsbreiten von mehreren Kraftanregungen, [Jüngert 2010, S102ff].....37

Abbildung 2-30: a) Kraftanregung eines Stoßes auf defektem und intaktem Material. b) Amplitudenspektrum eines Schlages auf defektem und intaktem Material, [Cawley et al. 1988, S.300].....38

Abbildung 2-31: Verschiedene Darstellung der Schallsignale der lokalen akustischen Resonanzspektroskopie: a) Normiertes Amplitudenspektrum als B-Scan b) flächige Darstellung mit den Summen der normierten Amplitudenspektren, [Jüngert 2010, S.104ff]. 39

Abbildung 2-32: a) Die Wellenausbreitung in faserverstärkten Kunststoffen parallel zur Faserrichtung im Zeit- und Frequenzbereich. b) Die Wellenausbreitung elastischer Wellen in faserverstärkten Kunststoffen senkrecht zur Faserrichtung im Zeit- und Frequenzbereich. nach [Summerscales 1990, S.17]..... 40

Abbildung 2-33: Modell zur frequenzabhängigen Wellenausbreitung in Faserverbundwerkstoffen, [Summerscales 1990, S18]..... 41

Abbildung 2-34: a) Ultraschallprüfgeräte als Handgerät, [eigene Darstellung]. b) Ultraschallprüfung mit automatisierter Prüfanlage, [Areva 2011]. 42

Abbildung 2-35: Prinzip der Impuls Echo Messung: Ein Sender gibt einen Ultraschallimpuls. Dieser wird an der Rückwand oder an Fehlstellen reflektiert. Über die bis zum angezeigten Echo vergangene Zeit lassen sich Bauteilinformationen gewinnen, [eigene Darstellung]..... 43

Abbildung 2-36: Die Brechung von Wellen an der Grenzschicht zweier Medien unterschiedlicher Brechzahlen n_1 und n_2 . Longitudinal- und Transversalwellen breiten sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit und somit auch unterschiedlicher Richtung aus (dargestellt durch die gestrichelten Linien), [eigene Darstellung]..... 44

Abbildung 2-37: Verschieden starke Dämpfungen eines Ultraschallgerätes: a) Schwache Dämpfung mit schmalbandigem Frequenzanteil. b) Starke Dämpfung mit breitbandigem Frequenzanteil. nach [Krautkrämer 1966, S.107]..... 47

Abbildung 2-38: a) Die Veränderung des Fokusbereichs mit einer Vorlaufstrecke, [eigene Darstellung]. b) verschiedene Vorlaufstrecken, nach [Habermann 2014], [Schuster 2004] ... 48

Abbildung 2-39: Die Signale eines Ultraschallgerätes. a) Mögliche Fehlstelle in 2,62 mm Tiefe. b) Rückwandecho der Platte bei 5,82 mm, [eigene Darstellung] 49

Abbildung 2-40: Prinzip der optischen Lockin-Thermographie, [eigene Darstellung]..... 51

Abbildung 2-41: Ausbreitung elektromagnetischer Wellen, [Universität Regensburg 2005]. 52

Abbildung 2-42: Das elektromagnetische Spektrum, nach [Frank et al 2009]..... 52

Abbildung 2-43: Das Plancksche Strahlungsspektrum für Körper verschiedener Temperaturen, [Sch 2006]..... 53

Abbildung 2-44: Verschiedene Computertomographen für verschiedene Anwendungen: a) Ein medizinischer Computertomograph, [Siemens Medical 2003]. b) Computertomograph für industrielle Anwendungen. (Mit freundlicher Genehmigung von GE Measurement&Control) 56

Abbildung 2-45: Prinzip der Computertomographie. 56

Abbildung 2-46: a) ein Röntgenspektrum welches beim Abbremsen von Elektronen entsteht, [Müller-Buschbaum 2009, S.51]. b) die Skizze einer Röntgenröhre, [Müller-Buschbaum 2009, S.52]. 58

Abbildung 2-47: a) Die Computertomographie mit hoher Auflösung und kleinem gescanntem Bereich. b) Die Computertomographie mit niedriger Auflösung großem gescanntem Bereich. 59

Abbildung 2-48: Screenshot des graphischen Auswertungsprogramms VG Studios für Voxeldateien. 59

Abbildung 2-49: Beispiele der Computertomographie an Faserverbundwerkstoffen mit einem Tool der Software VG Studio MAX, [VG Studio Max, 2012].	60
Abbildung 3-1: Skizze einer Gaspistole für Impaktschädigungen, [Hou et al. 1999, S.277].	61
Abbildung 3-2: a) Skizze der Impaktvorrichtung, [eigene Darstellung]. b) Foto der kompletten Impaktvorrichtung, [eigene Darstellung]. c) Detaillaufnahme vom Auftreffpunkt des Impaktorschlittens auf die Prüfplatte. Die Anbringung der Halterung am Fallturm ist erkennbar, [eigene Darstellung].	62
Abbildung 3-3: Der Zusammenhang der Halterung auf die Fläche der Delamination. Als Halterung wurden Lochplatten mit den Durchmessern 50 mm, 80 mm, 140 mm und 300 mm verwendet, [Cantwell 2006, S.1904].	63
Abbildung 3-4: Die Halterung der Platten beim Impaktversuch. a) Blick von oben, hier schlägt der Impaktstempel ein. b) Die Halterung der Prüflinge in der Totale: Man erkennt die Stahlplatten den schwarzen Nitrilkautschuk und in der Mitte den hellgrünen Prüfling, [eigene Darstellung].	63
Abbildung 3-5: Die Halterung der großen Platten beim Impaktversuch, [eigene Darstellung]. a) Halterung ohne Prüfling. b) Halterung mit Prüfling, [eigene Darstellung].	64
Abbildung 3-6: Schlagschädigung des Rotorblattes, [eigene Darstellung].	64
Abbildung 3-7: Die in dieser Arbeit verwendeten Prüflinge aus dem Material Vetronit EGS 619, [eigene Darstellung].	65
Abbildung 3-8: Die aus einer realen Windenergieanlage enthaltenen Prüflinge. a) Prüfling aus Rotorblattspitze mit deutlicher Schädigung und Reperatur, [eigene Darstellung]. b) Rotorblattsegment mit künstlich eingebrachten Schlagschäden, [eigene Darstellung].	66
Abbildung 3-9: a) Messung der Eindringtiefe sowie der rückseitigen Ausbeulung mit der Messuhr, [eigene Darstellung]. b) Messung der Eindringtiefe und Ausbeulung auf den Prüfplatten. Die Mittelwert der Höhendifferenzen Delta 1, 2, 3 und 4 ergeben den Wert für die Eindringtiefe und Ausbeulung. Das grün angezeichnete Quadrat hat die Ausmaße 30 mm x 30 mm, [eigene Darstellung].	68
Abbildung 3-10: a) Aufnahme der Makrofotografien auf dem Leuchttisch, [eigene Darstellung]. b) Beispiel einer Makroaufnahme mit der erste charakteristische quantitative Größen des Schadens erfassbar sind, [eigene Darstellung].	69
Abbildung 3-11: Messaufbau mit High Speed Kamera [Takeda et al. 1982]. a) im Jahre 1981, [Takeda et al. 1982, S.20]. b) im Rahmen dieser Arbeit, [eigene Darstellung].	70
Abbildung 3-12: a) Die Prüfung mit der lokalen akustischen Resonanzspektroskopie in einer schalldichten Kammer, [eigene Darstellung]. b) Prüfung der lokalen akustischen Resonanzspektroskopie im Labor, [eigene Darstellung].	71
Abbildung 3-13: Das Messraster der lokalen akustischen Resonanzspektroskopie beim Prüfling 2mmM, [eigene Darstellung].	71
Abbildung 3-14: Das Messraster der lokalen akustischen Resonanzspektroskopie der Prüflinge 6mmG, 2mmG und der Prüflinge im kleinen Format, [eigene Darstellung].	72
Abbildung 3-15: a) Durchführung der Prüfung. b) verwendetes Gerät der Ultraschallprüfung, [eigene Darstellung].	72

Abbildung 3-16: a) Bei der Ultraschallprüfung übliche Stufenkeile, [eigene Darstellung]. b) Die in dieser Arbeit verwendeten Referenzplatten aus Vetronit EGS619, [eigene Darstellung].	73
Abbildung 3-17: Bildschirmfoto des verwendeten Ultraschallgerätes Krautkrämer USM35X mit Erklärungen der grundlegenden Funktionen, [eigene Darstellung].	74
Abbildung 3-18: a) Durchführung der optischen Lockin-Thermographie, [eigene Darstellung]. b) Foto der verwendeten Thermographiekamera, [eigene Darstellung].	75
Abbildung 3-19: a) Die Präparation der Proben vor der Computertomographie, [eigene Darstellung]. b) Bild der Einspannung im Computertomographen, (mit freundlicher Genehmigung von GE Measurement&Controll).	76
Abbildung 4-1: 14 J Einschlag auf 2 mm dicken Prüfling als Sequenz, [eigene Darstellung].	78
Abbildung 4-2: Auswahl an Schlagschädigungen in 2 mm Vetronit EGS 619, [eigene Darstellung].	79
Abbildung 4-3: Eindringtiefen in Abhängigkeit von der Impaktenergie in Vetronit EGS 619 (2 mm Dicke). Unterschiedliche Schadensausmaße bei gleicher Impaktenergie sind zwischen den Prüflingen deutlich erkennbar, [eigene Darstellung].	79
Abbildung 4-4: Auswahl an Schlagschädigungen in 6 mm Vetronit EGS 619, [eigene Darstellung].	80
Abbildung 4-5: Ausmaß der Schädigung in Abhängigkeit von der Impaktenergie in den Prüflingen mit 6 mm Dicke, [eigene Darstellung].	81
Abbildung 4-6: Auswahl an Schlagschädigungen in 11 mm Vetronit EGS 619 von 11 J – 115 J. An den Rückseiten der 11 mm dicken Prüflingen ist optisch kein Schaden erkennbar, [eigene Darstellung].	81
Abbildung 4-7: Ausmaß der Schädigung in Abhängigkeit von der Impaktenergie in den Prüflingen mit 11 mm Dicke, [eigene Darstellung].	82
Abbildung 4-8: Die Halbwertsbreiten der Kraftanregung in Millisekunden bei zwei identischen Prüfungen des Prüflings 2mmM, [eigene Darstellung].	83
Abbildung 4-9: a) Das qualitative Kraftanregungssignal auf Prüflingen mit 2 mm Dicke. b) Das Kraftanregungssignal auf Prüflingen mit 11 mm Dicke, [eigene Darstellung].	83
Abbildung 4-10: Drei normierte Signale der Kraftanregung, jeweils typisch für die 2 mm, 6 mm und 11 mm dicken Prüflinge, [eigene Darstellung].	84
Abbildung 4-11: Die Schallsignale auf den Prüflingen unterschiedlicher Dicke im Zeitbereich und als Spektrogramm, [eigene Darstellung].	85
Abbildung 4-12: Vergleichsmessungen auf intaktes und defektes Material an Impakte in Prüflinge 2mmG. a) Halbwertsbreite jedes Messpunkts, [eigene Darstellung]. b) Makrofotografie des geprüften Impakt, [eigene Darstellung].	86
Abbildung 4-13: Vergleich der Spektrogramme der Schallsignale zweier ausgewählter Messpunkte auf dem Prüfling 2mmG, [eigene Darstellung].	86
Abbildung 4-14: Vergleichsmessungen auf intaktes und defektes Material an Impakts in Prüflinge mit 6 mm Dicke. a) zeigt die Halbwertsbreiten jedes Messpunkts, [eigene Darstellung]. b) Makrofotografie des geprüften Impakt, [eigene Darstellung].	87
Abbildung 4-15: Vergleich der Spektrogramme der Schallsignale zweier ausgewählter Messpunkte auf dem Prüfling 6mmK, [eigene Darstellung].	87

Abbildung 4-16: a) Die Halbwertsbreiten der Kraftsignale bei 11mm dicken Prüflingen, [eigene Darstellung]. b) Lichtbild des betrachteten Prüflings, [eigene Darstellung]. 88

Abbildung 4-17: Flächig aufgetragene Halbwertsbreiten des Prüflings 2mmM. Oben die mit der lokalen akustischen Resonanzspektroskopie erhaltene Prüfung. Unten ein künstliche erstelltes Bild des zu erwartenden Ergebnis. 89

Abbildung 4-18: Vergleich der Signale bei a) 2 mm, b) 6 mm und c) 11 mm Dicke. Gut zu sehen ist jeweils das Rückwandecho der Prüflinge, [eigene Darstellung]. 90

Abbildung 4-19: Das Prüfen der Referenzplatten mit der Ultraschallprüfung, [eigene Darstellung]. a) Lichtbild der Prüfung. b) Signal bei der Grenzfläche in 0,5 mm Tiefe. c) Signal bei der Grenzfläche in 1 mm Tiefe. d) Signal bei der Grenzfläche in 1,5 mm Tiefe. Ein hoher Rauschanteil bei den Messungen ist erkennbar. 91

Abbildung 4-20: Vergleich der Signale einer intakten und einer schlaggeschädigten Stelle in Prüflingen mit 2 mm Dicke, [eigene Darstellung]. a) Signalbild einer intakten Stelle. b) Signalbild einer defekten Stelle. 92

Abbildung 4-21: Vergleich der Signale einer intakten und einer schlaggeschädigten Stelle in Prüflingen mit 6 mm Dicke, [eigene Darstellung]. a) Signalbild einer intakten Stelle. b) Signalbild einer defekten Stelle. 92

Abbildung 4-22: Vergleich der Signale einer intakten und einer schlaggeschädigten Stelle im Prüfling mit 11 mm Dicke, [eigene Darstellung]. a) Signalbild einer intakten Stelle. b) Signalbild einer defekten Stelle. 93

Abbildung 4-23: a) Lichtbild des Prüflings 2mmG, [eigene Darstellung]. b) Phasenbild des Prüflings 2mmG, [eigene Darstellung]. 94

Abbildung 4-24: Phasenbild des Prüflings 6mmG, [eigene Darstellung]. a) Lichtbild des Prüflings 6mmG. b) Phasenbild der optischen Lockin-Thermographie des Prüflings 6mmG, [eigene Darstellung]. 95

Abbildung 4-25: a) Phasenbild der Referenzplatten mit einer Lockin-Frequenz von 0,001 Hz, [eigene Darstellung]. b) Fotografie der Prüflinge in Prüfanordnung, [eigene Darstellung]. 95

Abbildung 4-26: Mit unterschiedlicher Lockinfrequenzen erzeugte Phasenbilder, [eigene Darstellung]. 96

Abbildung 4-27: Der Unterschied eingebrachter Schädigungen bei 2 mm Platten und 6 mm Platten, [eigene Darstellung]. 98

Abbildung 4-28: Zug und Schubbrüche in schlaggeschädigten Strukturen eines Prüflings mit 2 mm Dicke, [eigene Darstellung]. 99

Abbildung 4-29: Schnittbilder der untersuchten Impakte an den 2 mm dicken Prüflinge, [eigene Darstellung]. 99

Abbildung 4-30: Deutlicher Riss außerhalb des Zentrums beim Prüfling 2mmK bei einer Impaktenergie von 6 J. Die grüne Ebene veranschaulicht die Position des Schnittbildes, [eigene Darstellung]. 100

Abbildung 4-31: Schnittbilder der tomographierten 6 mm dicken Prüflinge, [eigene Darstellung]. 101

Abbildung 4-32: Schnittbilder der Prüflinge mit 11 mm Dicke. Beim Prüfling mit der größeren Energie ist die tannenbaumförmige Ausbreitung von der Oberfläche aus sichtbar, [eigene Darstellung]. 102