

Untersuchung von GFK-Bauteilen mit akustischen Verfahren am Beispiel der Rotorblätter von Windenergieanlagen

Von der Fakultät für Bau- und
Umweltwissenschaften der Universität Stuttgart zur
Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

Dipl.-Geophys. Anne Jüngert

aus Villingen-Schwenningen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Christian U. Große
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Martin Kühn

Tag der mündlichen Prüfung: 10.02.2010

**Institut für Werkstoffe im Bauwesen
Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart**

2010



Universität Stuttgart

Englische Zusammenfassung - Abstract

Facing the climate change and the limited supplies of fossile fuels combined with the growing energy demand, the use of renewable energy sources gains in importance. The European Union has decided to reduce greenhouse gases by 20 percent and to increase the rate of renewables at the overall energy consumption to 20 percent by 2020. In Germany and Central Europe especially the use of wind energy will play a major role. The use of wind energy has a long tradition. Wind power is used for sailing, water pumps and mills for centuries. The first windmills for electricity generation were built in the 19th century. Modern wind turbines use buoyancy to convert wind energy into electric energy and are used since the early 20th century. Nowadays common wind energy plants have three aerodynamically shaped turbine blades.

Wind energy plants have to withstand great forces. The abrasion affects the machine parts of the nacelle, the tower and the turbine blades. All these parts have to be inspected at regular intervals. Although accidents at wind energy plants are quite rare and generally no persons get injured, a great financial loss is linked to every failure. To reduce down-times the use of advanced inspection techniques is preferable.

Wind turbine blades are mainly built from fiber reinforced plastics (FRP) and sandwich-compounds containing plastic foams or wood. The blades have to be inspected every two to four years by experts. These surveys are limited to visual inspections and simple tapping tests. The use of non-destructive testing techniques can help to detect damages which are not visible at the surface at an early stage and avoid blade breakdowns. Non-destructive testing at FRP is common in aerospace industries. Unfortunately the material thicknesses and qualities in aerospace industries are different and therefore the established techniques can't be transferred directly to the use at wind turbine blades. Furthermore, damages in wind turbine blades are multifaceted. The blades commonly are manufactured as two halves and glued together afterwards. The bonding

areas are critical areas and can't be inspected from outside the blade. Moreover, delaminations of fiber layers or sandwich layers can arise in the whole blade due to abrasion or previous smaller damages.

In this thesis two non-destructive testing techniques using sonic and ultrasonic waves are presented. The first technique is the ultrasound-echo techniques, which is well established for damage detection in metals or concrete. The use at FRP (especially glas fiber reinforced plastics, GFRP) required special adaptations. Due to the fiber layers within the material, ultrasonic waves are highly scattered and damped. Therefore the use of low frequency ultrasonic transducers is sensible. Combined with a high energy ultrasonic pulse, several centimeters of GFRP can be penetrated and damages can be detected. Especially the bonding areas can be inspected using this technique.

In this thesis the differences between ultrasonic transducers is shown. A dry coupling of ultrasonic transducers is an advantage for the use at wind turbine blades. A technique for a dry coupling is shown in this thesis. The energy loss due to the dry coupling compared to a wet coupling is quantified. The ultrasound-echo techniques then is applied to small turbine blade pieces and to a entire blade. It is shown, that the bonding areas can be detected and evaluated. Finally the measurement equipment is linked to an automated system. Measurements can take place without the direct presence of an expert. This is an great advantage especially for the application at offshore wind turbines.

For the detection of near-surface delaminations and air bubbles a second technique was developed. Based on the common simple tapping tests, the so-called local resonance spectroscopy was applied. Using a special impact hammer, the surface is tapped and the excited sound is recorded by a microphone. Due to the impact the structure starts to vibrate and a sound is generated. The sound depends on the contact stiffness between the structure and the hammer. A material change causes a change in contact stiffness and therefore a change in the excited sound. The change can be visualized using the frequency spectra of the microphone data. Furthermore it is possible to record the contact force and contact time of hammer and surface. A change in contact stiffness also causes a change in contact time. This provides additional information about the health of the structure. The technique is very simple to apply and the equipment is small, so it can be carried by experts even when they are roping from the nacelle to inspect the turbine blades.

In this thesis the influence of the hammer force on the contact stiffness

is determined. At small pieces of turbine blades the ability to detect damages is shown. The advantage of the use of sound recorded by a microphone compared to commonly used ultrasonic transducers is discussed. The technique also is applied to areas of an entire blade. Damages like trapped air within the GFRP laminates can be detected.

Both techniques are compared and the strengths and weaknesses of the techniques are discussed in this thesis. Finally an outlook concerning the application at wind turbine blades as manual and automated techniques is given. The adaptation to other industries like naval architecture and sewer rehabilitation is possible and offers new opportunities.

Vorwort

Die Arbeit entstand während meiner Tätigkeit in der Arbeitsgruppe *Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen* des Instituts für Werkstoffe im Bauwesen und der Abteilung *Zerstörungsfreie Prüfung und Überwachungstechnik* der MPA Universität Stuttgart. Die Untersuchungen wurden im Rahmen eines vom BMWi unter der Fördernummer 16IN0354 geförderten InnoNet-Projektes mit dem Titel *RIWEA - Roboter zur Inspektion der Rotorblätter von Windenergieanlagen mit Thermographie und Ultraschall* durchgeführt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil Christian Große, durch dessen Betreuung diese Arbeit überhaupt ermöglicht wurde. Dank seines Engagements und seiner guten Kontakte bekam ich die Möglichkeit im Projekt RIWEA mitzuarbeiten. Er betreute meine Arbeit die ganze Zeit über mit großem Interesse und die regelmäßigen Gespräche und Besprechungen gaben eine Reihe von Anregungen. Seine Fachkompetenz und seine Offenheit für Neues schafften ein Klima, in dem Forschung wirklich Freude bereitete.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Kühn, Inhaber des Stiftungslehrstuhls Windenergie an der Universität Stuttgart, danke ich für die Übernahme des Korreferats. Seine reichhaltige Erfahrung und seine zahllosen Kontakte in der Windenergiebranche waren für diese Arbeit sehr hilfreich.

Dr. Markus Krüger war bei der Entwicklung des Ultraschallsystems stark beteiligt und eine große Hilfe. Seine Erfahrungen bei der Soft- und Hardwareentwicklung waren Gold wert. Darüberhinaus hatte er immer wieder praktische schnelle Lösungen parat, wenn ich mal wieder nicht weiter wusste. Dafür möchte ich ihm danken.

Unser Techniker Gerhard Bahr war mit seiner großen Erfahrung bei vielen Messungen eine Hilfe. Darüber hinaus schaffte er es, meine Vorstellungen in eine Software umzusetzen. Verbesserungsvorschläge wurden immer sofort eingearbeitet. Dafür, vor allem aber für sein Engagement auch bei kurzfristigen Messungen, sei ihm gedankt. Helmut Ernst beschäftigte sich mit der Steuerung unserer Messachse, was ihm viel Kopfschmerzen gemacht und mir erspart hat. Dafür möchte ich ihm danken.

Meine Kollegen Sebastian Bachmaier und Frank Lehmann danke ich für die vielen wissenschaftlichen und unwissenschaftlichen Gespräche. Der interdisziplinäre Austausch half dabei, immer wieder über den Tellerrand zu schauen. In der Arbeitsgruppe herrschte eine Atmosphäre, die ein entspanntes aber produktives Arbeiten ermöglichte.

Unseren wissenschaftlichen Hilfskräften Anne Lehan und Ronald Richter danke ich für die Mithilfe bei vielen Messungen. Ohne ihre Bereitschaft zu Arbeiten jeglicher Art und ihre gute Laune auch unter widrigsten Bedingungen, wäre die Arbeit sehr viel schwieriger gewesen. Meinem Diplomand Eric Holfert danke ich für die zahlreichen Vorbereitungsmessungen, die im Rahmen seiner Diplomarbeit durchgeführt wurden.

Frau Inge Bathelt hat mir sehr viel Arbeit abgenommen, wenn es z.B. um die Planung von Dienstreisen oder um Organisatorisches im Projekt ging. Dafür und für viele schöne Gespräche möchte ich ihr von Herzen danken.

Frau Heidi Bauer, Frau Gisela Baur und Frau Regina Jäger haben mir sehr bei den Abrechnungen meines Projektes geholfen. Ohne ihre Hilfe wäre die Organisation meines Projekt wesentlich schwieriger gewesen.

Dr. Jochen Aderhold und seine Kollegen am WKI lieferten sehr gute Kontakte zu verschiedenen Anwendern von ZfP an Windenergieanlagen. Auch waren sie immer sehr hilfsbereit wenn es um den Austausch von Material ging. Dafür und für die gute Zusammenarbeit im Projekt danke ich ihnen. Auch Dr. Norbert Elkmann und den Kollegen am IFF möchte ich ebenfalls für die gute Zusammenarbeit im Projekt danken. Die gemeinsamen Messungen waren eine große Hilfe.

Dr. Bernd Frankenstein und seinen Mitarbeitern am IZFP Dresden danke ich für die Möglichkeit an einem Testrotorblatt des IZFP Messungen durchführen zu können. Die Erfahrungen die dabei gesammelt werden konnten, waren für diese Arbeit sehr wichtig.

Ohne meine Eltern wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen. Zu wissen, dass man jemanden hat, der immer an einen glaubt und für einen da ist, ist unbezahlbar.

Dominik danke ich für den Glauben an mich, wenn er mir selbst fehlte.
Aaron danke ich für jedes Lächeln.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	19
2	Stand der Technik	25
2.1	Windenergieanlagen	25
2.1.1	Die Leistung des Windes	27
2.1.2	Leistungsbegrenzung an modernen Anlagen	29
2.2	Rotorblätter von Windenergieanlagen	30
2.2.1	Begutachtung von Rotorblättern	33
2.2.2	Schädigungen in Rotorblättern	34
2.3	ZfP faserverstärkter Kunststoffe	36
2.3.1	ZfP an Rotorblättern von WEA	39
3	Messtechnische Grundlagen	41
3.1	Ausbreitung elastischer Wellen	41
3.2	Ultraschall-Echo-Verfahren	43
3.2.1	Messprinzip	44
3.2.2	Sensorik und Auflösungsvermögen	46
3.2.3	Signalverarbeitung und Darstellung	48
3.3	Lokale Resonanzspektroskopie	49
3.3.1	Messprinzip	50
3.3.2	Signalverarbeitung der Klangsignale	54
3.3.3	Signalverarbeitung der Kraftanregung	56
4	Ultraschall-Echo-Messungen	59
4.1	Verwendung verschiedener Sensoren	59
4.1.1	Eine Methode zur trockenen Ankopplung	63
4.2	Labormessungen	67
4.3	Automatisierte Messung	72
5	Lokale Resonanzspektroskopie	77
5.1	Bestimmung der Stoßparameter	77

5.2	Versuche an kleinen Probestücken	79
5.2.1	Variation der Anregung	80
5.2.2	Lagerung der Proben	85
5.2.3	Detektion von Schäden	89
5.3	Messungen an großen Probestücken	94
5.3.1	Vergleich von Luft- mit Körperschall	97
6	Vergleich der Methoden	99
7	Anwendung an einem Rotorblatt	109
7.1	Testobjekt	109
7.1.1	Schädigungen	111
7.2	Ultraschall-Echo	112
7.2.1	Ergebnisse der ersten Messungen	113
7.2.2	Vergleich mit Wiederholungsmessungen	117
7.3	Lokale Resonanzspektroskopie	122
7.3.1	Messfeld 3	123
7.3.2	Messfeld 1	127
8	Diskussion	131
8.1	Bewertung des Ultraschall-Echo-Verfahrens	131
8.1.1	Auflösungsvermögen Ultraschall-Echo	131
8.1.2	Anwendbarkeit am Rotorblatt	135
8.1.3	Automatisierung des Ultraschall-Echo-Verfahrens	136
8.1.4	Ausblick: Ultraschall-Echo	136
8.2	Bewertung der LRS	137
8.2.1	Anwendbarkeit am Rotorblatt	139
8.2.2	Ausblick: Lokale Resonanzspektroskopie	140
8.3	Verwertung der Verfahren	140
9	Zusammenfassung	141
	Abkürzungsverzeichnis	147
	Symbolverzeichnis	149
	Literaturverzeichnis	151
A	Messungen am Rotorblatt	161
A.1	Ergebnisse auf der Saugseite	161

A.2	Ergebnisse auf der Druckseite	163
A.3	Lokale Resonanzspektroskopie an Messfeld 2	165
B	Klangmuster auf einer GFK-Platte	169
C	Verwendete Geräte	173
C.1	Ultraschall-Echo-System	173
C.2	Lokale Resonanzspektroskopie	176

Abbildungsverzeichnis

2.1	Aufbau einer Windenergieanlage (Nordmann, A., 2007).	26
2.2	Leistungsbeiwerte unterschiedlicher Windradtypen.	28
2.3	Querschnitt eines Rotorblattes.	31
2.4	Begutachtung eines Rotorblattes	33
3.1	Reflexion und Brechung elastischer Wellen.	43
3.2	Messprinzip einer Ultraschall-Echo-Messung.	44
3.3	Darstellung des Alias-Effekts.	47
3.4	Messprinzip der lokalen Resonanzspektroskopie.	50
3.5	Kontaktsteifigkeit zwischen Stahl und GFK.	53
3.6	Bestimmung der Halbwertsbreite eines Signals.	57
4.1	Unterschiedliche Sensoren auf GFK.	61
4.2	Frequenzspektrum des Signals des Sensor B1SL.	62
4.3	Frequenzspektrum des Signals des Sensors B2SN.	62
4.4	Foto der Sensoren mit aufgeschraubten Silikonmembranen.	65
4.5	Nass-/Trockenankopplung C602.	66
4.6	Nass-/Trockenankopplung C603.	66
4.7	Nass-/Trockenankopplung C601.	67
4.8	Rotorblattstück mit Stegverklebung.	68
4.9	A-Scans zweier Signale.	69
4.10	B-Scans der Labormessungen.	70
4.11	Automatisiertes Prüfsystem.	72
4.12	Effektive Kraft unter einem Winkel.	73
4.13	Zeitreihen der automatisierten UE-Messung	74
4.14	Korrektursignal.	75
4.15	B-Scan der automatisierten Ultraschall-Echo-Messungen.	76
5.1	Sprunghöhe einer Stahlkugel auf GFK.	79
5.2	Impulshammer.	81
5.3	Anregung mit Delrinspitze.	82
5.4	Anregung mit hartem Gummiaufsatz.	83

5.5	Vergleich unterschiedlicher Hammeraufsätze.	84
5.6	Halbwertsbreiten an gebogener Probe.	86
5.7	Amplitudenspektren an gebogener Probe.	87
5.8	Summen der Amplitudenspektren auf gebogener Probe.	88
5.9	Aufsicht und Querschnitt einer Rotorblattprobe	90
5.10	Halbwertsbreiten an Probe aus Flanschbereich.	91
5.11	Amplitudenspektren an Probe aus Flanschbereich.	93
5.12	Rotorblattstück, 5 m lang.	95
5.13	Zeitreihen der Klanganregung.	96
5.14	Vergleich von Hammer- und Mikrofondaten.	96
5.15	Vergleich von Luftschall und Körperschall.	98
6.1	Foto der durchleuchteten Musterplatte.	100
6.2	Thermographie an Musterplatte.	101
6.3	Halbwertsbreiten an Musterplatte.	102
6.4	Normierte Amplitudenspektren an Musterplatte.	104
6.5	D-Scan der Summen der Amplitudenspektren.	105
6.6	Energiegehalt des Frequenzbandes von 120 Hz bis 135 Hz.	106
6.7	Energie bei 3,68 μ s und 3,75 μ s.	107
6.8	Energie bei 4,34 μ s und 6,77 μ s	108
7.1	Rotorblatt im Prüfstand der IMA und des IZFP Dresden.	110
7.2	B-Scan einer Messzeile auf der Saugseite.	114
7.3	Ausschnitt aus dem B-Scan, Saugseite 32 m - 37 m.	115
7.4	Ausschnitt aus dem B-Scan, 20 m - 25 m Saugseite.	116
7.5	B-Scans auf Druckseite.	117
7.6	Vergleich der B-Scans, Saugseite.	118
7.7	Vergleich Saugseite: Ausschnitt 20 - 26 m	119
7.8	Vergleich der B-Sans auf der Druckseite.	120
7.9	Foto Messfeld 1.	122
7.10	Foto Messfeld 3	123
7.11	Markierte Fehlstellen an Messfeld 3.	124
7.12	Halbwertsbreiten an Messfeld 3.	125
7.13	Vergleich der Halbwertsbreiten mit Foto.	126
7.14	Amplitudenspektren an Messfeld 3.	126
7.15	Halbwertsbreiten an Messfeld 1.	127
7.16	Halbwertsbreiten Messfeld 1; Primärraster	129
7.17	Halbwertsbreiten Wiederholungsmessung	129
A.1	B-Scans der Ultraschall-Echo-Messungen auf der Saugseite.	162

A.2	B-Scans auf Druckseite, 25 m bis 35 m.	164
A.3	Messfeld 2 mit Messraster	165
A.4	Halbwertsbreiten an Messfeld 2.	166
A.5	Amplitudenspektren an Messfeld 2.	167
B.1	Energieverteilung im Frequenzband von 229 Hz bis 247 Hz.	169
B.2	Energieverteilung im Frequenzband von 293 Hz bis 305 Hz.	170
B.3	Energieverteilung im Frequenzband von 348 Hz bis 363 Hz.	170
B.4	Energieverteilung im Frequenzband von 391 Hz bis 409 Hz.	171
B.5	Energieverteilung im Frequenzband von 684 Hz bis 714 Hz.	171
C.1	Ultraschallsystem.	173
C.2	Frequenzantwort des Sensors V101.	174
C.3	Frequenzantwort des Sensors C602.	175
C.4	Frequenzantwort des Sensors C603.	175
C.5	Frequenzantwort des Impulshammers	176

Tabellenverzeichnis

4.1	Pulser-Einstellungen.	59
4.2	Sensormerkmale.	60
4.3	Merkmale der Sensoren mit Gewinde.	64
5.1	Stoßzahlen verschiedener Materialien.	78
5.2	Hammeranregung mit unterschiedlichen Aufsätzen.	82
C.1	Einstellungen am Messsystem.	174

1 Einleitung

Der Mensch nutzt die Energie des Windes schon seit Jahrhunderten. In Europa wurden Windmühlen bereits im 12. Jhd. zum Mahlen von Getreide verwendet. Später weitete sich die Nutzung auch auf das Pumpen von Wasser, das Dreschen von Getreide und das Sägen aus. In der zweiten Hälfte des 19. Jhd. wurden erste Versuche unternommen, die Windenergie auch zur Stromerzeugung zu nutzen. Das Urmodell der modernen Windenergieanlagen (WEA) wurde schließlich 1957 von Ulrich Hütter auf der Schwäbischen Alb aufgestellt (Kühn, 2007). Seit 1991, mit Inkrafttreten des Stromeinspeisungsgesetzes, das die Vergütung und Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien regelte, wächst die Windenergiebranche kontinuierlich und gewinnt im Hinblick auf den drohenden Klimawandel und die knapper werdenden fossilen Brennstoffe immer mehr an Bedeutung. In den gemäßigten Breiten Mitteleuropas und den USA spielt die Windenergie als regenerative Stromquelle zusammen mit der Wasserkraft die größte Rolle. Im Juli 2000 wurde das Stromeinspeisungsgesetz durch das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) ersetzt. Dieses setzte fest, dass bis zum Jahr 2010 der Anteil der regenerativen Energien an der Stromversorgung in Deutschland 12,5 Prozent betragen soll (Bundestag, 2004). Tatsächlich wurde dieser Zielwert bereits 2007 deutlich überschritten und lag Ende 2008 bei 15 Prozent. In der im Januar 2009 in Kraft getretenen Neufassung des EEG sind die Ziele angepasst worden. Bis zum Jahr 2020 sollen 30 Prozent des Stromverbrauchs über erneuerbare Energien gedeckt werden (BMU, Juni 2009). Das ist die Umsetzung eines umfassenden Klima- und Energiepakets, das die Europäische Kommission Anfang 2007 vorgestellt hatte und das Mitte 2009 als EU-Richtlinie 2009/28/EG in Kraft trat (Europäisches Parlament, 2009). Diese soll die EU langfristig unabhängiger von Energieimporten machen, die fossilen Rohstoffe schonen und durch die CO₂-Einsparungen zum Klimaschutz beitragen. In dieser Richtlinie wurde eine Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien am Gesamtenergieverbrauch der EU auf 20 Prozent bis zum Jahr 2020, ausgehend von 6,7 Prozent im Jahr 2005, festgeschrieben.

Die Nutzung von Windenergie erfuhr deshalb in den letzten Jahren ein starkes Wachstum, das sich voraussichtlich auch in den nächsten Jahren fortsetzen wird. Immer mehr und immer leistungsstärkere WEA werden aufgestellt und neue Gebiete für die Windenergienutzung erschlossen. Vor allem im Offshore-Bereich werden große Anstrengungen unternommen das Potential der Windenergie weiter auszunutzen. Zusätzlich werden ältere Anlagen schon vor Ablauf der eigentlichen Lebensdauer durch leistungsfähigere ersetzt (Repowering). Es bleibt dabei nicht aus, dass zukünftig Menschen in unmittelbarer Nachbarschaft zu WEA leben werden. Außerdem wird die wirtschaftliche Bedeutung der Windenergie weiter zunehmen und Stillstandszeiten der Windenergieanlagen müssen möglichst kurz gehalten werden. Komplettausfälle ganzer Anlagen ziehen einen enormen finanziellen Schaden für die Windparkbetreiber nach sich. Die Standsicherheit der Anlagen spielt deshalb eine immer größere Rolle.

Die Rotorblätter der Windenergieanlagen sind, neben dem Getriebe und dem Turm, im Betrieb starken Belastungen ausgesetzt und immer wieder kommt es vor, dass Rotorblätter stark beschädigt oder völlig zerstört werden und ganz oder teilweise herabstürzen. Eine von Windenergiegegner betriebene Internetseite dokumentierte seit 1997 alle WEA-Unfälle in Deutschland. Inzwischen ist die Seite nicht mehr erreichbar, wurde aber teilweise von www.wind-watch.org übernommen. Die Rotorblatthersteller stehen durch das starke Marktwachstum und die daraus resultierende große Nachfrage nach Rotorblättern unter dem Druck, sehr schnell und trotzdem günstig zu produzieren. Eine gründliche Qualitätssicherung der produzierten Blätter war bisher aus Zeitgründen und aus Mangel an geeigneten einfachen Verfahren nicht möglich.

Regelmäßige Überprüfungen von WEA alle zwei bis vier Jahre sind von der jeweils zuständigen Baubehörde vorgeschrieben. Neben Getriebewartungen und Inspektionen des Turmes, werden dabei auch die Rotorblätter auf Schädigungen kontrolliert. Diese Prüfungen werden bisher manuell durchgeführt. Eine Sichtkontrolle ergänzt durch simples Abklopfen auf Hohlstellen wird von einem Sachverständigen vorgenommen. Da die Rotoren für diese Inspektionen nicht abgenommen werden, ist der Einsatz von Hubsteigern oder Industriekletterern nötig.

Zerstörungsfreie Prüfverfahren für den Einsatz an Rotorblättern von Windenergieanlagen existieren im Moment lediglich im experimentellen Stadium. Ein serienreifes System ist aufgrund der großen Anzahl unterschiedlicher Rotorblatttypen und -hersteller bisher nicht erhältlich.

Erfahrungen aus anderen Disziplinen, wie z.B. der Luft- und Raumfahrtstechnik, lassen sich aufgrund anderer Schadensbilder nicht direkt auf die Anwendung am Rotorblatt übertragen. Die Prüfaufgabe an Rotorblättern ist schon aufgrund der großen Anzahl unterschiedlicher Rotorblatttypen sehr kompliziert. In der Herstellung werden viele verschiedene Materialien und Materialverbünde verwendet, die sich in ihren Dicken sehr stark unterscheiden. Je nach Materialdicke kann ein anderes Untersuchungsverfahren zielführend sein. Die Schadensbilder können, aufgrund der großen Varianz in der Bauweise der Rotorblätter, ebenfalls sehr vielfältig sein. In dieser Arbeit werden häufig auftretende Schädigungen herausgegriffen und die Detektion dieser Schädigungen in faserverstärkten Kunststoffen und Sandwichbereichen untersucht.

Die Arbeit wurde im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unter der Fördernummer 16IN0354 geförderten Innonet-Projekts (*RIWEA - Roboter zur Inspektion der Rotorblätter von Windenergieanlagen mit Thermographie und Ultraschall*) angefertigt. Ziel des Projektes war die Entwicklung eines automatisierten Systems, das über die Verwendung von Wärme- und Schallwellen Schäden in Rotorblättern detektieren kann. Diese Arbeit stellt die Entwicklung des Teils des Prüfsystems vor, das Schäden in Rotorblättern von Windenergieanlagen mit Hilfe von Ultraschall- und Schallwellen detektieren kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Untersuchungen an bestehenden Anlagen ohne Abbau der Rotorblätter möglich sind. Das Messsystem muss robust sein und auch bei niedrigen Temperaturen, starkem Wind und Feuchtigkeit funktionieren. Eine weitere wichtige Randbedingung ist hierbei, dass die zu entwickelnden Verfahren eine gleichzeitige Thermografiemessung nicht beeinflussen. Darüber hinaus soll das Verfahren sich soweit automatisieren lassen, dass die Datenaufnahme von einem automatisierten Prüfroboter übernommen werden kann. Die Darstellung der Messergebnisse soll zur Interpretation möglichst intuitiv sein.

Zwei derartige Verfahren werden in dieser Arbeit vorgestellt. Beim ersten Verfahren handelt es sich um ein konventionelles Ultraschall-Echo-Verfahren, wie es bereits an unterschiedlichsten Materialien seit Jahren in ähnlicher Form angewandt wird. Die Anwendung an dicken Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen stellt besondere Anforderungen an die verwendeten Geräte. Ein leistungsstarker Ultraschallpuls in Verbindung mit geeignet empfindlichen Sensoren erfüllt die Eigenschaften. Die Auswahl der Sensoren ist in Kapitel 4.1 beschrieben. Die Ausstattung

des entwickelten Messsystems ermöglicht außerdem den Einbau in automatisierte Prüfsysteme, die besonders für Rotorblattuntersuchungen Offshore wünschenswert sind. Die Ergebnisse der ersten vollautomatisierten Messungen sind in Kapitel 4.3 vorgestellt. Bei Ultraschallmessungen werden die Ultraschallsensoren normalerweise über Flüssigkeiten oder viskose Gele an das Untersuchungsobjekt angekoppelt. Diese Ankopplung hat bei der Anwendung an Rotorblättern von Windenergieanlagen vor allem den Nachteil, dass große Mengen eines Koppelmittels benötigt würden. Um das Messsystem, sowohl für den Einsatz an automatisierten Prüfsystemen als auch für manuelle Messungen während des Abseilens von der Rotornabe, klein und kompakt zu halten, wurde eine Methode zur trockenen Ankopplung der Ultraschallsensoren erprobt. Der Energieverlust durch die trockene Ankopplung ist in Kapitel 4.1.1 für zwei unterschiedliche Sensoren quantifiziert. Da es sich beim Ultraschall-Echo-Verfahren um ein konventionelles Verfahren handelt, liegt das Hauptaugenmerk bei den Laborversuchen in der Auswahl geeigneter Sensorik und der Untersuchung der trockenen Ankopplung. Die anschließende Anwendung an einem Testrotorblatt, die in Kapitel 7 beschrieben ist, soll die Grenzen des Verfahrens aufzeigen.

Das zweite Verfahren ist einem unkonventionellen Verfahren nachempfunden, was unter dem Name Coin-Tap-Test schon seit vielen Jahren Anwendung findet. Das Untersuchungsobjekt wird mit einem harten Gegenstand, z.B. einer Münze abgeklopft. Strukturelle Änderungen im Innern zeigen sich in Änderungen des angeregten Klangs. Das Verfahren wurde zwar bereits in den 80er Jahren theoretisch untersucht, vollständig verstanden sind die Effekte bisher jedoch nicht. Auch fehlt eine instrumentierte Anregung und Datenerfassung, um die Ergebnisse auf objektive Aussagen zu stützen. Das instrumentierte Verfahren wird auch als lokale Resonanzspektroskopie bezeichnet. Eine lokale Untersuchung der Klangsignale im Frequenzraum, die mit Hilfe eines Mikrofons aufgezeichnet werden, ist dabei aber nur ein Teil der Auswertung. Gleichzeitig werden die Kontaktzeiten zwischen Anregungshammer und Untersuchungsobjekt mit einem Kraftsensor aufgezeichnet und geben zusätzlich Auskunft über strukturelle Veränderungen im Innern des Probekörpers.

Die Anwendung von Klopffprüfungen an Rotorblättern von Windenergieanlagen ist zwar üblich, das Verfahren ist jedoch wenig untersucht. In Laborversuchen wird ermittelt, wie sich Materialänderungen und Schädigungen in kleinen Probekörpern auf die Kontaktsteifigkeiten zwischen Hammer und Prüfobjekt auswirken (Kapitel 5.1). Neben einfachen Ver-

suchen nach der Newton'schen Mechanik, werden Versuche zur Reproduzierbarkeit der Hammeranregung durchgeführt. Anschließend wird das Verfahren an kleineren Probestücken getestet und hierbei die Effekte, die durch die räumliche Begrenzung entstehen untersucht (Kapitel 5.2). Das Verfahren wurde entwickelt, um an vollständigen Rotorblättern von Windenergieanlagen angewandt zu werden. Die Probleme, die durch die Begrenzung und Lagerung von kleinen Proben auftreten, sind dann nicht mehr zu erwarten. In dieser Arbeit wurden diese Effekte dennoch untersucht, da es grundsätzlich sehr schwierig ist, größere Rotorblattproben oder vollständige Rotorblätter zu Testzwecken zu bekommen. Zu Beginn standen also nur kleinere Probestücke zur Verfügung. Außerdem ist es wichtig die Probleme zu kennen, da man die Anwendbarkeit eines Verfahrens an einem neuen Material oder Bauteil oft nur anhand von kleinen Proben überprüfen kann. Das Verfahren wird schließlich an drei geschädigten Stellen eines Testrotorblattes angewandt. Die Schädigungen sind vergleichbar mit Schäden, die an Rotorblättern von Windenergieanlagen im Betrieb entstehen können.

Ein Vergleich der beiden Methoden wird in Kapitel 6 anhand von Messungen mit beiden Verfahren am selben Probekörper angestellt.

Abschließend wird in Kapitel 8 diskutiert wie gut sich die beiden Verfahren für die Schadensdetektion in Rotorblättern eignen und wo die Stärken und die Schwächen beider Verfahren liegen. Die Verwertbarkeit der Verfahren als eigenständige Prüfsysteme oder als Kombination mit anderen Verfahren wird auch für andere Industriezweige angesprochen. Außerdem werden weiterführende Aspekte der Signalauswertung und Vereinfachung der in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren und Messsysteme besprochen.

2 Stand der Technik

2.1 Windenergieanlagen

Windenergieanlagen (WEA) nutzen die kinetische Energie des Windes und wandeln sie in elektrische Energie um. Die heute üblichen Anlagen sind Auftriebsläufer und besitzen in der Regel drei Rotorblätter, die sternförmig um eine horizontal ausgerichtete Nabe angebracht sind. Diese Rotorblätter besitzen ein aerodynamisches Profil ähnlich einem Flugzeugflügel. Durch die unterschiedlichen Umströmungsgeschwindigkeiten der beiden Seiten des Rotorblattes entsteht ein Druckunterschied und dadurch ein Auftrieb. Der Auftrieb wird in ein Drehmoment gewandelt und damit ein Generator angetrieben.

Der Aufbau einer Windenergieanlage ist in Abbildung 2.1 zu sehen. Auf dem Turm sitzt die Gondel an der die Rotornabe mit dem Rotor befestigt ist. Der Rotor steht bei modernen Anlagen auf der dem Wind zugewandten Seite des Turms (Luvläufer). Im Gegensatz zu Leeläufern, müssen die Anlagen dem Wind nachgeführt werden. Diese Nachführung befindet sich unterhalb der Gondel, in der sich die Bremse und das Getriebe der WEA befinden.

Die erste, von Ulrich Hütter errichtete WEA, die bereits 1951 in Serie produziert wurde, hatte einen Rotordurchmesser von 11 m und eine Nennleistung von 10 kW. Heutzutage sind Anlagen mit Nennleistungen von 2 MW und Rotordurchmessern von 80 m die Regel. Die derzeit weltweit höchste WEA, eine Fuhrländer FL2500, steht in Brandenburg und besitzt eine Nabenhöhe von 160 Metern. Mit 2,5 MW Nennleistung ist sie allerdings weit entfernt von der derzeit leistungsstärksten Anlage, der Enercon E 126, die eine Nennleistung von 6 MW vorzuweisen hat. Offshore werden inzwischen WEA mit Rotordurchmesser von über 120 Metern gebaut. Die Prognose für die nächsten Jahrzehnte spricht von Offshore-Windenergieanlagen mit 180 m Rotordurchmesser.

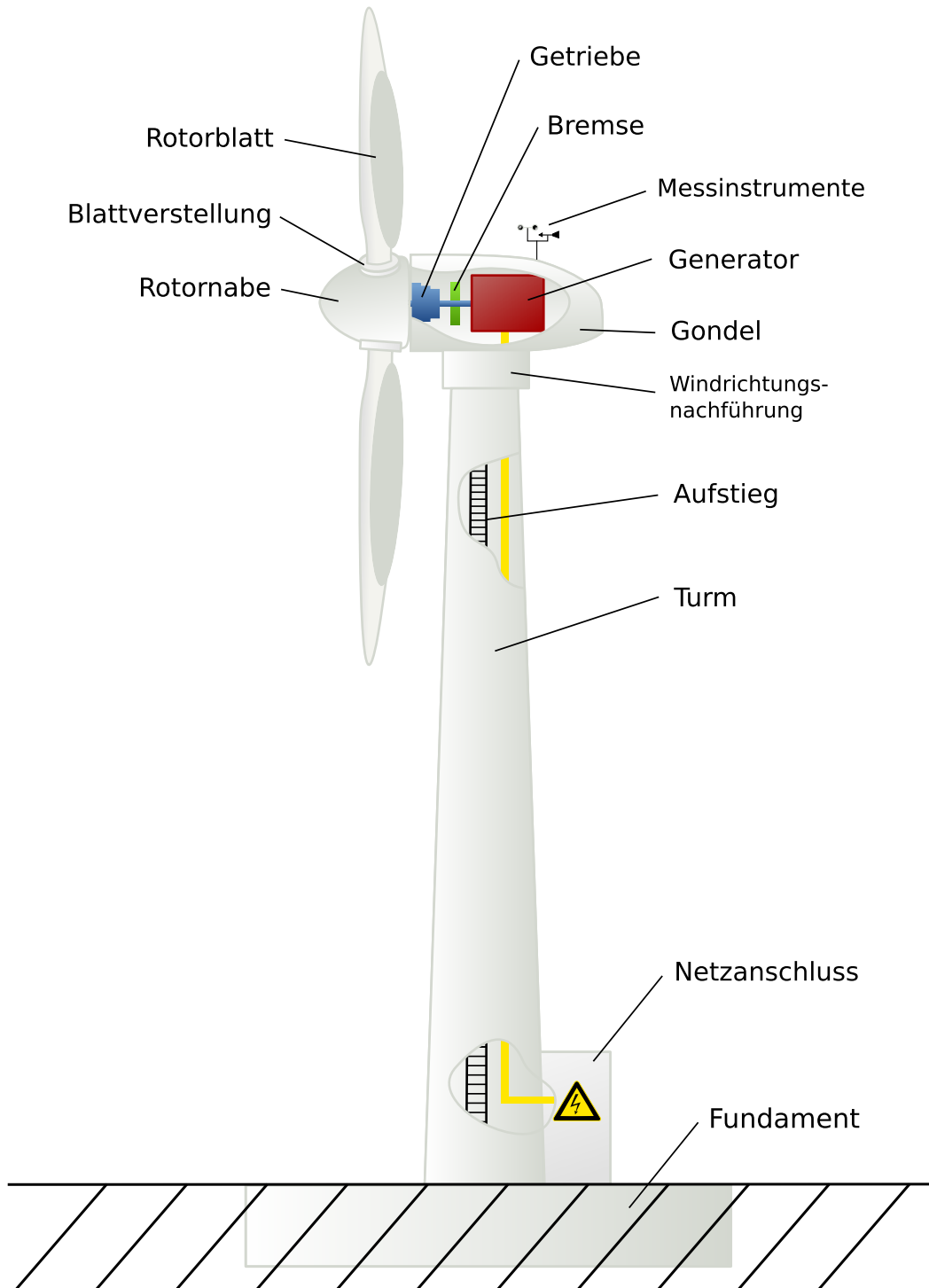


Abbildung 2.1: Aufbau einer Windenergieanlage (Nordmann, A., 2007).

2.1.1 Die Leistung des Windes

Die Entwicklung im Bereich der Windenergie war in den letzten Jahrzehnten enorm. Den Grundstein legte Albert Betz bereits 1926 (Betz, 1926), als er berechnete, wie viel Energie dem Wind theoretisch entzogen werden kann. Außerdem machte er Versuche zur Aerodynamik von Rotorblättern, deren Erkenntnisse heute noch gültig sind.

Der theoretische Wirkungsgrad c (Leistungsbeiwert) einer WEA lässt sich als Quotient aus ankommender Windleistung und tatsächlich genutzter Windleistung berechnen. Es handelt sich hierbei nicht um einen Wirkungsgrad im eigentlichen Sinne, da die ungenutzte Energie im Wind erhalten bleibt und nicht in eine dissipative Energieform umgewandelt wird.

Die ankommende Windleistung P_0 ergibt sich aus der kinetischen Energie des Windes und der Querschnittsfläche A des Rotors:

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A v^3. \quad (2.1)$$

Die Leistung P_{eff} , die tatsächlich genutzt werden kann, wird aus den Windgeschwindigkeiten vor und hinter der Anlage ermittelt. v_1 ist die Windgeschwindigkeit vor dem Rotor, v_2 die Windgeschwindigkeit nach dem Rotor. Der Quotient aus beiden $b = v_2/v_1$ beschreibt die Abbremsung, die der Wind beim Durchgang durch den Rotor erfährt. Der Wirkungsgrad c der WEA ergibt sich nach Betz zu

$$c = \frac{P_{eff}}{P_0} = \frac{1}{2} \cdot (1 + b) \cdot (1 - b^2). \quad (2.2)$$

Bei vollständiger Abbremsung des Windes, $v_2 = 0$, staut sich der Wind vor der Anlage auf, hinter der Anlage ist es windstill. Es findet kein Massenstrom mehr statt und der Wirkungsgrad wird null. Findet dagegen keine Abbremsung des Windes statt, $v_2 = v_1$ ist der Wirkungsgrad ebenfalls null. Dem Wind wird keine Energie entnommen. Der maximale Leistungsbeiwert einer Windenergieanlage liegt also dazwischen. Nach Betz findet man ihn bei $b = 1/3$. Der sogenannte Betz'sche Leistungsbeiwert c_{Betz} ergibt sich als Lösung eines Extremwertproblems zu

$$c_{Betz} = \frac{16}{27} \approx 0,593. \quad (2.3)$$

Das bedeutet, dass selbst eine ideale WEA maximal 59,3 Prozent der

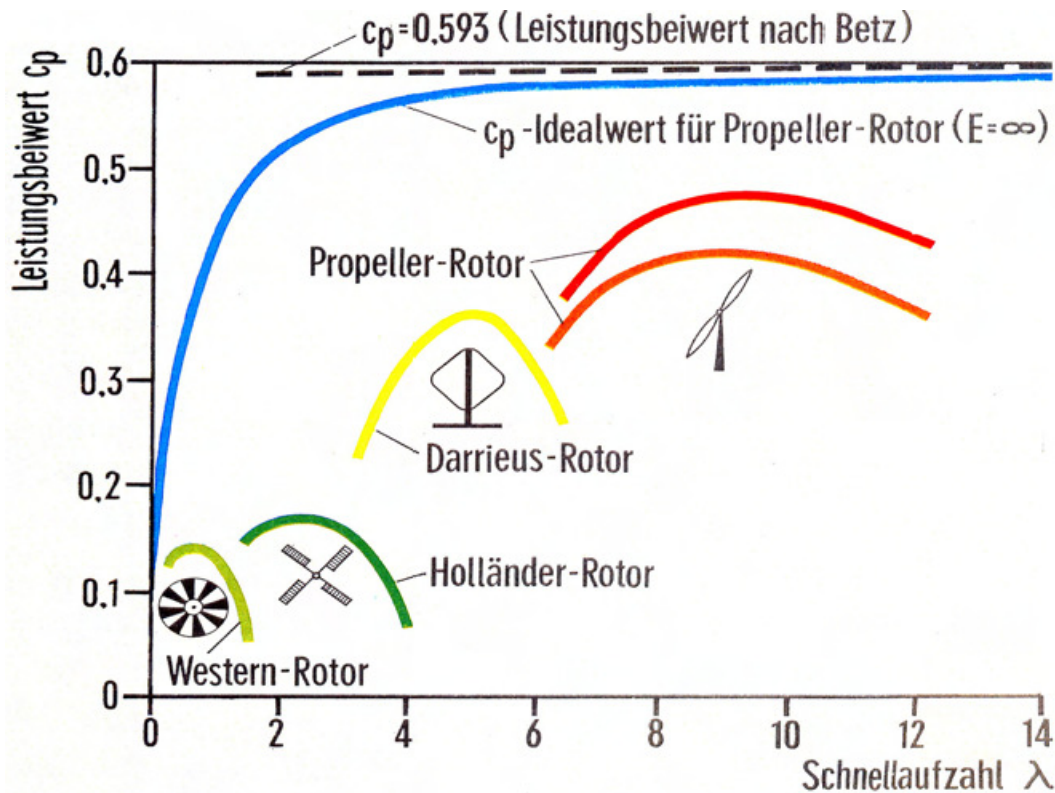


Abbildung 2.2: Leistungsbeiwerte unterschiedlicher Windradtypen (Hau, 2008).

Windenergie in Strom umwandeln kann. Moderne Windenergieanlagen haben Leistungsbeiwerte zwischen 0,4 und 0,5 und wandeln somit etwa 70 bis 85 Prozent der maximal nutzbaren Energie um.

Eine weitere wichtige Kenngröße einer WEA ist die Schnelllaufzahl λ_s . Sie gibt das Verhältnis der Blattspitzengeschwindigkeit u zur Windgeschwindigkeit v_w an. Windräder mit einer Schnelllaufzahl $\lambda_s > 2,5$ werden als Schnellläufer bezeichnet. Sie haben erfahrungsgemäß bessere Leistungsbeiwerte als die sogenannten Langsamläufer mit geringeren Schnelllaufzahlen.

In Abbildung 2.2 sind die Leistungsbeiwerte verschiedener Windenergieanlagentypen über der Schnelllaufzahl λ_s aufgetragen (Hau, 2008). 3-Blatt-rotoren haben sich im Laufe der Windenergienutzung als optimal erwiesen. 1- und 2-Blattrotoren bieten zwar den Vorteil, dass die Material- und Transportkosten für ein bzw. zwei Rotorblätter eingespart werden, allerdings liegen ihre Leistungsbeiwerte unter denen der 3-Blattrotoren. Ein zusätzliches Problem sind die mit der Höhe zunehmenden Windgeschwindigkeiten. Bei einer 2-Blattanlage mit durchschnittlichem Rotordurchmesser, beträgt der Höhenunterschied von Blattspitze zu Blattspitze bis zu 80 Metern. Die daraus resultierenden unterschiedli-

chen Geschwindigkeiten, die an den beiden Blättern angreifen, führen zu Unwuchten und somit zu schnellerem Verschleiß von Nabe und Rotor. Durch den 120°-Winkel der bei den 3-Blattrotoren zwischen den Rotorblättern liegt, können diese Unwuchten am besten ausgeglichen werden.

2.1.2 Leistungsbegrenzung an modernen Anlagen

WEA sind auf mittlere Windgeschwindigkeiten zwischen 4 m/s und 13 m/s optimiert. Bei Geschwindigkeiten über 13 m/s wird die Rotorleistung größer als die Nennleistung der Anlage und muss begrenzt werden, um Schädigungen an der Anlage vorzubeugen.

Die älteste Methode der Leistungsbegrenzung wurde in den 50er Jahren in Dänemark entwickelt und ist die **Stallregelung**. Hierbei ist der Generator der WEA fest an die Netzfrequenz gekoppelt. Dadurch erhält sie eine konstante Drehfrequenz. Bei höheren Windgeschwindigkeiten ändern sich, bei gleichbleibender Drehfrequenz, die Anströmverhältnisse an den Rotorblättern, es kommt zum Strömungsabriss und zu Turbulenzen. Die angreifende Windkraft wird dadurch reduziert. Mit steigenden Windgeschwindigkeiten verstärken sich diese Effekte und halten die WEA auf einer konstanten Leistung. Zur Verstärkung des Stalleffektes sind oftmals Zackenbänder, Vortexgeneratoren oder Stalleisten an den Rotorblättern angebracht. Bei starken Stürmen mit Windgeschwindigkeiten über 25 m/s muss die Anlage angehalten werden. Als aerodynamische Bremsen dienen drehbare Rotorblattspitzen. Das Verdrehen einer Spitze reicht aus um die Aerodynamik zu zerstören und die Anlage zu stoppen.

Die meisten neuen WEA auf dem Markt besitzen eine **pitchgeregelte** Leistungsbegrenzung. Die Rotorblätter können dabei um ihre Längsachse gedreht werden. Sie haben, im Gegensatz zu den Stall-geregelten Anlagen, keine konstante Drehfrequenz bis sie ihre Nennleistung erreichen. Bei stärkerem Wind und gleichbleibendem Anstellwinkel erhöht sich die Blattspitzengeschwindigkeit. Hat bei wachsender Windstärke der Rotor seine Nennleistung erreicht, wird der Anstellwinkel der Rotorblätter der größeren Windstärke angepasst und dadurch die Umlaufgeschwindigkeit beibehalten. Bei zu geringem oder zu starkem Wind werden die Rotorblätter auf einen Pitchwinkel von 90° gestellt.

Seltener findet man die sogenannte **Aktiv-Stall-Regelung**. Auch hier können, ähnlich wie bei der Pitch-Regelung, die Rotorblätter im Gan-

zen verdreht werden. Allerdings wird hier der Blattwinkel zu kleineren Anstellwinkeln hin verdreht um einen Strömungsabriss zu erzeugen. Für eine Leistungsregulierung sind nur sehr kleine Winkel nötig. Durch die Aktiv-Stall-Regelung wird die Nabe stark belastet, weshalb sie nur selten Anwendung findet.

Die Leistungsbegrenzung der Windenergieanlagen wirkt sich auf die Rotorblätter und auf die regelmäßigen Begutachtungen aus. Während die pitchgeregelten Anlagen über durchgehende Rotorblätter verfügen, besitzen die stallgeregelten Anlagen drehbare Rotorblattspitzen. Da der Mechanismus hierfür im Rotorblatt eingebaut ist, unterscheidet sich der Aufbau an diesen Stellen von den üblichen Querschnitten eines Rotorblattes.

2.2 Rotorblätter von Windenergieanlagen

Unterschiedliche Hersteller von Windenergieanlagen verwenden unterschiedliche Formen der Gondeln und Türme. Auch für die Rotorblätter werden unterschiedliche Materialien verwendet; die aerodynamische Form ist allerdings bei allen Herstellern nahezu identisch. Die Auftriebskraft, die das Rotorblatt erfährt, ist bei einem idealen Profil entlang der Längsachse immer maximal. Die Anströmgeschwindigkeit nimmt von der Nabe zur Spitze linear zu. Der Auftrieb hängt maßgeblich von der Anströmgeschwindigkeit ab. Deshalb sind die Profile nahe der Nabe dick und werden zur Spitze hin schmaler. Da auch die Richtung der Anströmung sich mit der Geschwindigkeit ändert, sind die Blätter in sich verwunden, um an jeder Stelle den optimalen Anstellwinkel zu gewährleisten.

Rotorblätter moderner Windenergieanlagen sind im Schnitt 40 Meter lang und zwischen fünf und sechs Tonnen schwer. Die leistungsstärksten Anlagen im Offshorebereich weisen inzwischen sogar Blattlängen bis zu 61 Meter auf. Durch den stetig wachsenden Bedarf an WEA ist die Nachfrage nach Rotorblättern gestiegen. Demzufolge muss die Industrie sowohl schnell als auch kostengünstig produzieren. Die Rotorblätter müssen trotzdem robust genug sein, um durch die ständigen Lastwechsel nicht zerstört zu werden. Nachdem an kleineren WEA auch Aluminiumrotorblätter eingesetzt wurden, sind die heute verwendeten Materialien faserverstärkte Kunststoffe, Kunststoffschäume und Holz, die als Verbund zusammenwirken.

2.2. ROTORBLÄTTER VON WINDENERGIEANLAGEN

Ein typischer Rotorblattquerschnitt ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Er zeigt den prinzipiellen Aufbau und die aerodynamische Form des Rotorblattes. Je nach Hersteller, können Material und Lage der konstruktiven Element sehr stark von diesem Beispiel abweichen.

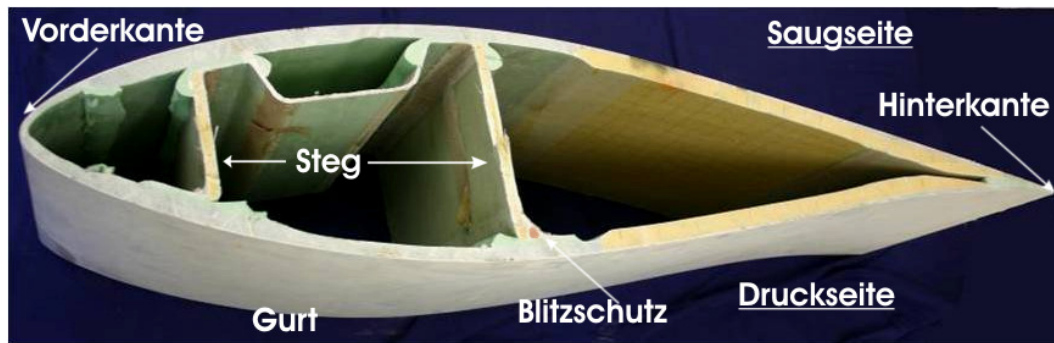


Abbildung 2.3: Querschnitt eines Rotorblattes.

Die obere Seite ist die Saugseite des Rotorblattes, da durch die Aerodynamik an ihr im Vergleich zur unteren Seite (Druckseite) ein Unterdruck entsteht und das Blatt nach oben gesaugt wird. Zur Stabilisierung des Blattes sind auf den sogenannten Gurten die Stege angebracht. Links im Bild befindet sich die Vorderkante des Rotorblattes, die vom Wind angeströmt wird. Die Hinterkante ist dementsprechend rechts im Bild zu sehen.

Die unterschiedlichen Materialien, aus denen das Rotorblatt aufgebaut ist, sind ebenfalls zu erkennen. Die Vorderkante des Blattes ist besonders stark dem Wind ausgesetzt und besteht deshalb aus mehreren Zentimetern dicken GFK-Laminaten. Zum weiteren Schutz der Vorderkante ist es üblich, eine Erosionsschutzfolie aufzukleben. Die Hinterkante ist besonders bei Stallblättern durch den dort entstehenden Strömungsabriss stark beansprucht und besteht ebenfalls aus GFK-Laminaten. Aus GFK- oder seltener CFK-Laminaten bestehen auch die zwei Gurte, auf denen die Stege angebracht sind. Die Bereiche zwischen Vorder-, bzw. Hinterkante und den Gurten sind zur Gewichtsreduktion und Formgebung mit Hartschäumen oder Holz ausgefüllt. Bei dieser sogenannten Sandwichbauweise nehmen die Deckschichten aus faserverstärkten Kunststoffen die Kräfte auf. Die Kernschicht überträgt lediglich Schubkräfte und stützt die Deckschichten. Ebenfalls ist ein dickes Kupferkabel in Abbildung 2.3 zu sehen, das als Blitzableiter dient.

Die Produktion der Rotorblätter erfolgt meist in Halbschalenbauweise. Die beiden Hälften werden hierbei einzeln laminiert und anschließend mit

einem Kunstharz zusammengeklebt. Die Klebestellen sind an der Vorder- bzw. der Hinterkante und an den Stegen in Abbildung 2.3 zu sehen. Wo früher noch häufig von Hand laminiert wurde, wird heute das Vakuuminjektionsverfahren eingesetzt. Nach Einlegen der Glasfasermatten in die Formen, wird das Harz mittels eines Vakuums injiziert. Das Verfahren hat gegenüber dem Handlaminierten den Vorteil, dass es schneller ist und vor allem Größe und Zahl von Fehlstellen wie Lufteinschlüsse und Luftblasen deutlich reduziert werden können. Da die Glasfaserlaminatate nicht UV-beständig sind und durch den starken Windangriff schnell erodieren, sind die Rotorblätter mit einer Gelcoat-Beschichtung versehen, die das Rotorblatt auch gegen Feuchtigkeitseintritt schützt. Sie ist selten dicker als 1 mm und besteht aus Kunstharz, das mit Kieselsäure angedickt ist und in der gewünschten Farbe eingefärbt werden kann.

Die aerodynamische Form haben alle Rotorblätter gemeinsam. Jedoch hängt die innere Struktur des Blattes stark vom Hersteller und von der Produktionsserie ab. Die Verwendung zweier Stege ist zwar üblich, Form und Lage dieser Stege kann jedoch sehr unterschiedlich sein. Auch gibt es inzwischen Hersteller, die nur einen Steg verwenden, um Material einzusparen. Die Hauptgurte und die Kanten der Rotorblätter können aus GFK, aus CFK oder aus einem Verbund beider Materialien hergestellt sein. Die Sandwichbereiche enthalten oft Kunststoffschäume, manche Hersteller bevorzugen Balsaholz. Es existieren außerdem Rotorblätter, deren tragende Strukturen vollständig aus Holz gefertigt sind.

Die Halbschalenbauweise ist zwar bei vielen Herstellern üblich, jedoch gibt es auch Rotorblätter, die als Ganzes laminiert werden und somit die Problematik der Klebung umgehen. Während beim Aufbau in Abbildung 2.3 die aerodynamische Form des Rotorblattes auch tragende Funktion übernimmt, gibt es auch Rotorblätter, deren Aerodynamik um einen Torsionskasten modelliert ist und keine tragende Funktion besitzt.

Es existieren so viele unterschiedliche Bauarten von Rotorblättern, wie es Hersteller gibt. Von außen ist der innere Aufbau des Rotorblatts meist nicht zu erkennen und Baupläne sind bei Rotorblattuntersuchungen üblicherweise nicht zugänglich. Die Untersuchungsverfahren an Rotorblättern müssen demzufolge sehr flexibel sein, um eine große Zahl unterschiedlicher Bauarten abzudecken. Die in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren, wurden für die Anwendung an GFK- und CFK-Blättern entwickelt, schließen also die Untersuchung von kompletten Holzrotorblättern nicht mit ein. Die Zahl an Holzrotorblättern ist im Vergleich zu den Kunststoffblättern gering. Daher fehlten hier die nötigen Infor-

2.2. ROTORBLÄTTER VON WINDENERGIEANLAGEN

mationen über mögliche Schadensbilder, so dass die Entwicklung eines Prüfsystems auch für diese Blätter wenig Sinn machte.

2.2.1 Begutachtung von Rotorblättern

Vom Bundesverband für Windenergie (BWE) wurden 2007 Grundsätze für die Prüfung zur zustandsorientierten Instandhaltung von Windenergieanlagen (BWE, 2007) herausgegeben. Zur regelmäßigen Zustandsprüfung der Anlagen gehört auch eine Kontrolle der Rotorblätter. Dabei sollen Schädigungen festgestellt und Empfehlungen für deren Behebung gegeben werden. Laut den Grundsätzen sollen regelmäßige Prüfungen für Anlagen, die mehr als 300 kW produzieren, alle 2 Jahre durchgeführt werden. Neben der Überprüfung der Mechanismen zur Blattverstellung, des Getriebes und des Blitzschutzes, werden die Rotorblätter im Ganzen einer Sichtprüfung unterzogen. Die Strömungselemente wie z.B. Vortexgeneratoren werden begutachtet und der Blattkörper wird auf Risse, Lufteinschlüsse und Delaminationen untersucht. Hierfür seilt sich der Gutachter entweder von der Rotornabe ab (Abbildung 2.4) oder es kommen Hubsteiger oder Kräne zum Einsatz.



Abbildung 2.4: Begutachtung eines Rotorblattes

Die Methoden der Begutachtung beschränken sich in der Regel auf visuelle Inspektionen und einfache Klopfprüfungen. Über eine Sichtprüfung können lediglich Schädigungen, die bereits an die Oberfläche durchgedrungen oder sehr oberflächennah sind, detektiert werden. Durch Abklopfen des Rotorblattes mit einem Hammer, den Fingerknöcheln oder den Fingernägeln kann der Gutachter über eine Klangänderung auf innere Mängel schließen. Beide Verfahren erfordern ein hohes Maß an Erfahrung, die besonders bei den Industriekletterern oftmals fehlt. Es reicht meist nicht aus, einen oberflächlichen Riss zu detektieren, wenn die Ursache des Risses nicht benannt werden kann.

2.2.2 Schädigungen in Rotorblättern

Die Schadensbilder in Rotorblättern sind sehr vielfältig. Übliche Schäden, die durch die starke Beanspruchung der Rotorblätter im Betrieb entstehen, sind **Delaminationen** an der Hinterkante und Erosionsschäden an der Vorderkante. Besonders die Hinterkantendelaminationen sind an der Rotorblattoberfläche oft durch eine visuelle Prüfung zu erkennen. Allerdings sind die Schäden, wenn sie an der Oberfläche sichtbar werden, meist schon weit fortgeschritten. Delaminationen können im Betrieb, bedingt durch Produktionsfehler oder Vorschädigungen in allen Bereichen des Rotorblattes auftreten. Die Deckschichtlaminaten können sich vom Sandwich trennen oder sich, ausgehend von anderen Fehlstellen, in den Gurtlaminaten ausbreiten. Delaminationen, die parallel zur Oberfläche verlaufen können über eine Sichtprüfung meist nicht entdeckt werden.

Schwieriger zu detektieren sind Fehlstellen, die ihre Ursache bereits in der Produktion der Rotorblätter haben. Große Teile der Rotorblattproduktion werden noch immer von Hand durchgeführt. Trotz des automatisierten Vakuuminjektionsverfahrens, treten schon beim Laminieren Fehler auf. Die wichtigsten Fehler sind folgende:

- **Lufteinschlüsse:** Die Glasfasergelege werden von Hand in die Formen gelegt. Unregelmäßigkeiten können dazu führen, dass bei der anschließenden Injektion des Harzes in bestimmten Bereichen Luftblasen erhalten bleiben. Negative Auswirkungen auf die Festigkeit haben solche Lufteinschlüsse, wenn sie gehäuft in einem kleinen Bereich auftreten oder sehr groß sind.
- **Ondulationen:** Beim Einlegen der Glasfasermatten kann es au-

ßerdem passieren, dass diese nicht komplett glatt gezogen werden und sich Wellen bilden. Werden die Matten dann mit Harz durchtränkt, bleiben die Wellen erhalten und dadurch die faserparallele Druckfestigkeit wird herabgesetzt.

- **Trockenes Laminat:** Es kann vorkommen, dass einzelne Bereiche der Faserlaminat nicht mit Harz durchtränkt werden. Hier liegt das Laminat trocken und die Steifigkeit und Festigkeit des Werkstoffes ist deutlich herabgesetzt.
- **Verklebungsfehler:** Besonders kritische Stellen sind alle Klebeverbindungen. Nachdem die beiden Rotorblatthälften aufeinander gesetzt sind, gibt es nur begrenzt Möglichkeiten die Verklebungen zu überprüfen. Eine visuelle Überprüfung der Klebestellen ist nur im ersten Drittel des Rotorblattes möglich. Die Fehler, die bei der Verklebung auftreten können, sind vielfältig. Wird zu wenig Klebstoff eingebracht, so haften die Hälften nicht vollständig aufeinander (missing bond). Wird jedoch zu viel Klebstoff eingebracht, so werden die Verklebungsbereiche zu dick und zu schwer oder der Klebstoff verteilt sich in angrenzenden Bereichen. Unwuchten entstehen oder Kräfte werden falsch eingeleitet. Das kann zu Spannungen und Rissen in den Laminaten und im Klebstoff führen. Eine Lageortung des Klebemittels ist im Fertigungsprozess über den Einsatz von Thermographiekameras möglich. Das Aushärten des Klebeharzes ist meist ein exothermer Prozess und die Beobachtung der Wärmeentwicklung gibt Auskunft über die Bereiche, in denen sich das Harz befindet. Jedoch ist die Anwesenheit des Harzes keine Garantie für eine Haftung. Auch bei vorhandenem Klebstoff können sich die Materialien vor dem Aushärten wieder voneinander gelöst haben (kissing bond). Da eine korrekte Verklebung für die Stabilität des Rotorblattes essenziell ist, ist es wichtig, diese Bereiche zuverlässig überprüfen zu können.

Die Schädigungen können nach dem Produktionsprozess oft nicht durch Sichtprüfungen detektiert werden. Der Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren (ZfP) ist hier wünschenswert. Je nach Schadensbild kann ein anderes zerstörungsfreies Prüfverfahren zielführend sein. Mit Thermographieuntersuchungen ist es in der Regel einfach, oberflächennahe Luft einschüsse oder trockenes Laminat zu erkennen. Schwieriger sind die Steg-

verklebungen zu überprüfen, da sie unter mehreren Zentimetern GFK liegen. Hier sind Ultraschallverfahren besser geeignet.

2.3 Zerstörungsfreie Prüfung faserverstärkter Kunststoffe

Faserverstärkte Kunststoffe bestehen aus einer Kunststoffmatrix, in die als Bewehrung Fasern eingebracht werden. Die Fasern werden aus unterschiedlichen Materialien hergestellt und leiten im Verbundwerkstoff die Kräfte. Da die spezifischen Festigkeiten und Steifigkeiten der Fasern besonders groß sind, weisen die Verbundwerkstoffe in Faserrichtung ebenfalls besonders hohe Steifigkeiten und Festigkeiten auf. Die Fasern werden durch die Kunststoffmatrix fixiert und gegen Knicken durch Querkräfte und Witterungseinflüsse geschützt.

Zur optimierten Herstellung eines Kunststofffaserverbundwerkstoffes sollten die Eigenschaften der Fasern und der Matrix bekannt sein. Nicht jede Faser bildet mit jeder Matrix einen sinnvollen Verbund. Fasern, deren Elastizitätsmodul sich quer zur Faserrichtung stark von dem der Matrix unterscheidet, führen bei einer Querbelastrung zu einer Dehnung der Matrix und die Festigkeit des Verbundmaterials wird herabgesetzt. Der Elastizitätsmodul der Fasern in Faserrichtung sollte allerdings höher sein, als der des Matrixmaterials.

Fasern mit sehr großen E-Moduln in Faserrichtung und relativ kleinen quer dazu, sind beispielsweise Kohlefasern. Sie finden heutzutage, vor allem auch wegen ihres geringen Gewichts, in der Luft- und Raumfahrttechnik Anwendung, werden aber auch bei der Herstellung von Sportgeräten, wie Fahrrädern oder Rennautos, wo eine Gewichtseinsparung sinnvoll ist, auf Festigkeit aber nicht verzichtet werden kann, verwendet. Kohlefasern sind allerdings relativ teuer und ihre Verwendung ist deshalb für viele Industriezweige nicht wirtschaftlich. Eine kostengünstigere Alternative bilden Glasfasern. Sie haben ein amorphes Gefüge und deshalb isotrope mechanische Eigenschaften. Ein Vorteil sind außerdem die geringe Temperaturleitfähigkeit und die isolierenden Eigenschaften gegenüber elektrischem Strom.

Da die verstärkende Wirkung der Fasern nur in Faserrichtung besteht, werden die Fasern in mehreren Richtungen eingebettet. Die Fasern können zur besseren Verarbeitbarkeit miteinander verwoben, geflochten

und vernäht werden, bevor sie mit Harz durchtränkt werden. Dies führt jedoch zu Ondulationen, welche die Druckfestigkeiten herabsenken. In hochwertigen Bauteilen werden deshalb Gelege verwenden. Hier liegen die Fasern ideal gestreckt und parallel nebeneinander. In der Regel sind Gelege unidirektional (UD). Zur Abdeckung aller Raumrichtungen werden mehrere Gelege in unterschiedlicher Richtung aufeinander gelegt um biaxiale oder multiaxiale Gelege herzustellen. Festigkeitsberechnungen faserverstärkter Kunststoffe können über die Laminattheorie angestellt werden. Genaueres hierzu findet sich z.B. in Ehrenstein (2006).

Auch für die Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren an faserverstärkten Kunststoffen ist es wichtig, über die Materialparameter Bescheid zu wissen. Für den Transport elastischer Wellen sind die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der unterschiedlichen Wellentypen und die Dichte des Materials von Bedeutung. Diese Eigenschaften hängen stark von den verwendeten Materialien und dem Fasergehalt ab. Ein GFK, bestehend aus 40 % Epoxidharz und 60 % Fasern, hat in etwa eine Dichte ρ von $2,0 \text{ g/cm}^3$. Aufgrund des Aufbaus des GFKs mit Hilfe von Faser-matten, ist der Werkstoff bezüglich der Ausbreitung elastischer Wellen anisotrop. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit in Faserrichtung ist größer als die Ausbreitungsgeschwindigkeit quer dazu. Elastische Wellen, die senkrecht zur Faserrichtung eingebracht werden, erfahren zusätzlich eine Schallschwächung, da es an jedem Wechsel von Matrix zu Faser zu einer Reflexion der einfallenden Wellen kommt.

In der Luft- und Raumfahrttechnik hat sich der Einsatz von CFK, im allgemeinen Sprachgebrauch als Carbon bezeichnet, bereits etabliert. Auch aramidfaserverstärkte Kunststoffe, z.B. Kevlar, finden in unterschiedlichen Industriezweigen Anwendung. GFK spielen, neben der Windenergiebranche, unter anderem im Schiffbau eine Rolle. Dort wo Bauteile großen Kräften ausgesetzt sind und die Haltbarkeit sicherheitsrelevant ist, sind zerstörungsfreie Prüfmethode sehr gut erforscht und werden auch in der serienmäßigen Produktion eingesetzt. Neben Röntgenverfahren spielen Ultraschall- und Thermographieuntersuchen eine große Rolle.

In der Luft- und Raumfahrttechnik hat man häufig mit impaktinduzierten Schädigungen zu tun. Flug- und Raumfahrzeuge bewegen sich mit sehr hohen Geschwindigkeiten und schon sehr kleine und leichte Körper erzeugen beim Aufprall auf die Oberfläche einen starken Impuls. Oberflächlich sind die Schädigungen meist kaum sichtbar, im In-

nen des Werkstoffes kommt es aber typischerweise zu Delaminationen. Diese oft sehr kleinräumigen Delaminationen sind sicherheitsrelevant und müssen zuverlässig lokalisiert werden. Unterschiedliche zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP) können innere Schädigungen sichtbar machen. Neben standardisierten Ultraschallmessungen in Durchschallung, werden auch neuere Verfahren, wie luftgekoppelter Ultraschall (Hillger und Gebhardt, 1999; Stoessel, 2004) unter Einsatz von Oberflächen- und Plattenwellen (Kaczmarek, 2003; Gridin und Craster, 2004; Castaings und Cawley, 1996) verwendet. Moderne tomographische Auswertalgorithmen (Schwarz et al., 1999; Jansen et al., 1994) finden ebenfalls Anwendung in der Luft- und Raumfahrttechnik.

Einfache Klopfprüfungen, sogenannte Coin-Tap-Tests, werden an unterschiedlichen Bauteilen zur schnellen qualitativen Untersuchung bereits seit vielen Jahren verwendet. Mit einem harten Gegenstand wird auf ein Bauteil geklopft, so dass es lokal zu schwingen beginnt. Anhand von Klangänderungen können Schädigungen detektiert werden. Theoretische Beschreibungen von ähnlichen Klopfprüfungen wurden bereits in den 80er Jahren (Cawley und Adams, 1988) basierend auf der Hertz'schen Kontakttheorie (Hertz, 1881) formuliert. Jedoch ist bis heute die Theorie nicht vollständig verstanden, da sehr viele elastische und inelastische, oftmals hochgradig nichtlineare Prozesse zusammenwirken (Wu und Siegel, 2000). Mit der steigenden Rechnerleistung der letzten Jahre, wurden diese Effekte modelliert und mit experimentellen Ergebnissen verglichen (Kim, 2008; Shi und Polycarpou, 2005). Das Verfahren findet in den letzten Jahren verstärkt Anwendung zur Überprüfung von Verklebungen faserverstärkter Kunststoffe (Whittingham et al., 2006; White et al., 2007). Ähnliche Verfahren werden im Bauwesen beispielsweise zur Überprüfung von Industriefußböden verwendet (Felicetti, 2008). Kommerzielle Geräte, die die Kontaktzeit zwischen einem Hammer und dem Prüfobjekt ausnutzen, um Schädigungen zu detektieren, existieren bereits seit einigen Jahren (Pfund, 1996; Mitsunashi et al., 1989). Jedoch fehlt bisher eine gleichzeitige Untersuchung von Kraftanregung und erzeugtem Klangsignal.

2.3.1 Zerstörungsfreie Prüfverfahren an Rotorblättern von Windenergieanlagen

In den letzten Jahren, mit dem starken Wachstum der Windenergiebranche, wird zunehmend versucht, etablierte ZfP-Verfahren aus anderen Industriezweigen für die Anwendung an Rotorblättern von Windenergieanlagen anzupassen (Sutherland et al., 1994). Bisher existieren unterschiedliche Ansätze. Neben grundlegenden Untersuchungen zum Materialverhalten unter Last (Mandell et al., 1992) und zur Anwendbarkeit von ZfP-Verfahren (Sutherland und Mandell) werden statische und dynamische Überwachungssysteme (CMS) für Rotorblätter entwickelt (Sundaresan et al., 1999; Volkmer, 2003). Während die Überwachungssysteme meist auf der Basis der Eigenschwingungen der vollständigen Rotorblätter arbeiten, existieren auch Prüfsysteme für bestimmte Bereiche der Rotorblätter, z.B. für den GFK-Metallverbund im Flanschbereich (Gieske und Rumsey, 1996) oder auf bestimmten Verfahren basierende Techniken, wie z.B. die Thermographie (Ferber und Wandelt, 2006). Ultraschallverfahren werden zur Überprüfung unterschiedlicher Bereiche der Rotorblätter erprobt. Besonders die Stegbereiche sind hier von Bedeutung. Die meisten der genannten Verfahren sind jedoch erst in der Erprobung oder sind aufgrund der Größe der Rotorblätter nicht geeignet, um an Windenergieanlagen im Betrieb angewandt zu werden. Besonders im Offshore-Bereich entsteht ein großer Markt für automatisierte Prüfsysteme, die auf den risikoreichen Einsatz von Industriekletterern verzichten. Neben automatisierten Verfahren ist eine Entwicklung von kleinen und preiswerten Prüfgeräten für den manuellen Einsatz an kleineren Anlagen sinnvoll. Auch die Rotorblatthersteller setzen vermehrt auf eine verbesserte Qualitätskontrolle bereits in der Fertigung. Auch hier ist der Einsatz von zerstörungsfreien Prüfverfahren gewünscht.

3 Messtechnische Grundlagen

3.1 Ausbreitung elastischer Wellen

Die Verfahren, die in dieser Arbeit beschrieben werden, verwenden elastische Wellen. Deshalb ist ihre Ausbreitung grundlegend für die Untersuchungen.

Wellen sind Schwingungen, die sich im Raum ausbreiten und dabei Energie transportieren. Sie werden beschrieben durch ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit, ihre Amplitude und ihre Wellenlänge. Elastische Wellen benötigen ein Medium um sich auszubreiten, elektromagnetische Wellen können sich dagegen auch im Vakuum ausbreiten. Das Verhalten elastischer Wellen in Festkörpern und Flüssigkeiten wird in der Geophysik verwendet um das Innere der Erde darzustellen. Die Herleitung ist z.B. in Lay und Wallace (2003) gut dargestellt und wird hier nur kurz zusammengefasst.

Die elastische Wellenausbreitung in einem anisotropen inhomogenen Medium wird durch folgende Differentialgleichung beschrieben:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = f_i \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad i, j = 1, 2, 3. \quad (3.1)$$

f ist eine antreibende Kraft, σ_{ij} ist der Spannungstensor, der aufgrund der Drehimpulserhaltung symmetrisch ist. Die Wellengleichung ist ein System aus drei partiellen Differentialgleichungen, deren Lösung nicht trivial ist. Für linear elastische Medien, kleine Deformationen und homogene, isotrope Medien lässt sich die Wellengleichung vereinfachen zu

$$\rho \ddot{\vec{u}}(\vec{x}, t) = \vec{f} + (\lambda + 2\mu) \nabla(\nabla \cdot \vec{u}(\vec{x}, t)) - \mu \nabla \times (\nabla \times \vec{u}(\vec{x}, t)). \quad (3.2)$$

Die elastischen Eigenschaften des Mediums werden nur noch von den beiden Lamé-Parametern λ und μ beschrieben. Nimmt man an, dass die

Lamé-Parameter sich innerhalb des Mediums nicht ändern, kann das Verschiebungsfeld $\vec{u}(\vec{x}, t)$ als Summe aus einem wirbelfreien Skalarpotential und einem quellfreien Vektorpotential dargestellt werden, die jeweils für sich Lösungen der Wellengleichung sind. Das führt zu zwei unterschiedlichen Wellentypen, die sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}} \quad \text{und} \quad v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

im Medium ausbreiten. Bei den sogenannten P-Wellen mit der Geschwindigkeit v_p handelt es sich um Longitudinalwellen, d.h. die Partikelbewegung findet in Richtung der Wellenausbreitung statt. P-Wellen können sich in Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen ausbreiten. Beim zweiten Wellentyp, den sogenannten S-Wellen, schwingen die Partikel senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Ihre Geschwindigkeit v_s hängt neben der Dichte ρ nur vom Parameter μ ab, der auch als Schermodul bekannt ist. In Flüssigkeiten und Gasen, die keine Scherfestigkeit besitzen, können sich S-Wellen deshalb nicht ausbreiten. Schon an den Gleichungen, die die Wellengeschwindigkeiten beschreiben, kann man erkennen, dass die P-Welle sich immer schneller ausbreitet als eine S-Welle im gleichen Material.

An Grenzflächen zwischen zwei Materialien werden Wellen reflektiert und konvertiert. In Abbildung 3.1 sind Brechung und Reflexion einer einfallenden P-Welle schematisch dargestellt.

Eine unter dem Winkel α_1 einfallende Welle wird an der Grenzschicht im gleichen Winkel reflektiert. Außerdem wird die Welle unter einem Winkel α_2 ins zweite Medium gebrochen. Der Brechungswinkel hängt von den Schallgeschwindigkeiten der beiden Materialien ab und gehorcht dem Snellius-Brechungsgesetz:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_{P1}}{v_{P2}}. \quad (3.3)$$

Trifft die Longitudinale Welle nicht senkrecht auf die Grenzfläche, so entstehen an der Grenzfläche Scherwellen, die sich gemäß des Snellius-Gesetzes unter den Winkeln β_1 und β_2 in beiden Materialien ausbreiten. Umgekehrt entstehen bei auf Grenzflächen schräg einfallenden Scherwellen immer auch Longitudinalwellen.

In endlichen Körpern kommen zu den beiden bereits beschriebenen Wellentypen noch andere hinzu, die durch die mehrfache Reflexion und Überlagerung von P- und S-Wellen zustande kommen. An der Oberfläche

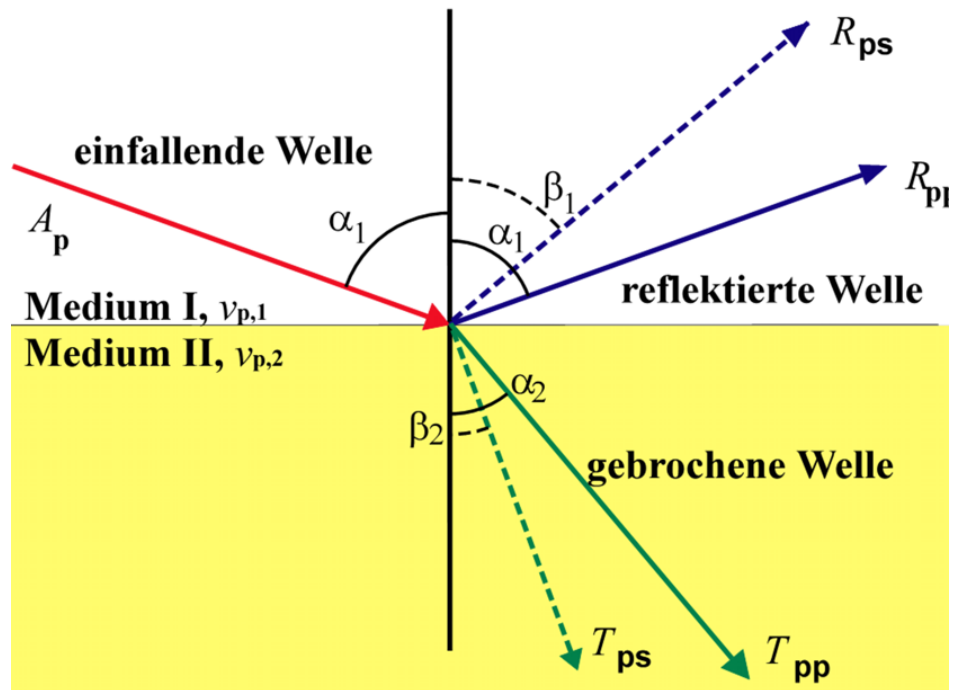


Abbildung 3.1: Reflexion und Brechung elastischer Wellen.

von Halbräumen bilden sich Wellen aus, die sich hauptsächlich an der Oberfläche ausbreiten und deren Amplitude mit der Eindringtiefe stark abnimmt. Über homogenen Halbräumen sind Rayleighwellen zu beobachten, die aus der Überlagerung von P- und S-Wellen entstehen. In komplexer aufgebauten Strukturen, z.B. in geschichteten Medien, kommen zusätzlich noch Love-Wellen als Überlagerung von S-Wellen vor.

In räumlich noch begrenzteren Strukturen wie Stäben oder Platten, kommt es zusätzlich zu Plattenwellen, wenn die Wellenlängen in der gleichen Größenordnung liegen wie die Bauteilabmessungen. Man unterscheidet Biege-, Dehn- und Torsionswellen. Diese Plattenwellen eignen sich auch zur zerstörungsfreien Untersuchung unterschiedlicher Materialien. Die Ausbreitungsgeschwindigkeiten sind in der Regel frequenzabhängig. Die Dispersionskurven unterschiedlicher Materialien werden zur Schadensdetektion verwendet (Viktorov, 1967).

3.2 Ultraschall-Echo-Verfahren

Das Ultraschall-Echo-Verfahren verwendet Ultraschall zur Schadensdetektion in Werkstoffen. Als Ultraschall bezeichnet man Schallwellen im Frequenzbereich oberhalb von 20 kHz. In dieser Arbeit wird das Ul-

traschall-Echo-Verfahren verwendet um die Stegverklebungen in Rotorblättern von Windenergieanlagen von außen zu überprüfen. Der Vorteil des Verfahrens ist, dass es einfach durchzuführen ist und eine schnelle Überprüfung kritischer Stellen möglich macht. Eine besondere Herausforderung ist die große Dicke der Bauteile kombiniert mit der starken Schallschwächung im Material.

3.2.1 Messprinzip

Das Messprinzip einer Impuls-Echo-Messung ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Ein Ultraschallpuls wird über einen Sensor in das Bauteil gesendet. Die Wellen breiten sich im Bauteil aus und werden an der Bauteilrückwand oder an inneren Schädigungen im Bauteil reflektiert. Die Reflexionen sind stärker, je größer die Unterschiede in der akustischen Impedanz sind. An der Grenze zwischen GFK und Luft wird z.B. 99 % der Energie reflektiert.

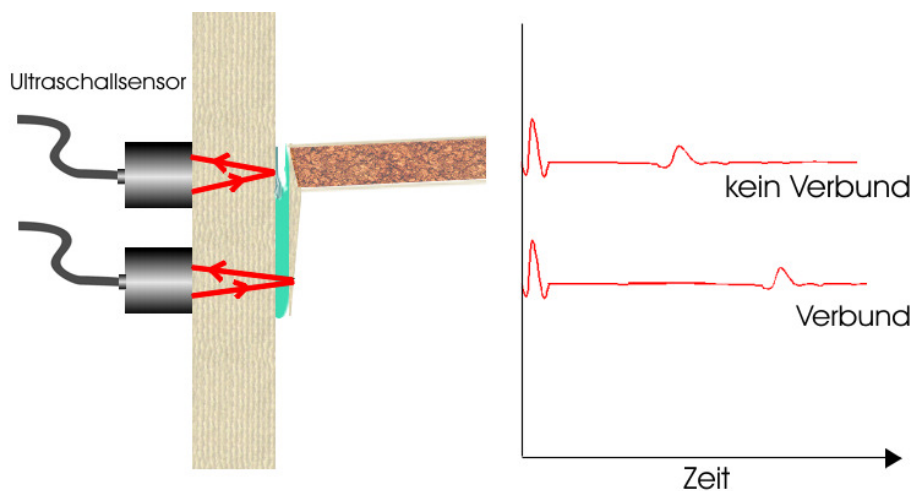


Abbildung 3.2: Messprinzip einer Ultraschall-Echo-Messung.

Über ein Ultraschallgerät, wie z.B. einen Pulser/Receiver, wird der Puls generiert und die im Bauteil erzeugten Echos registriert. Der Zeitpunkt 0 des Pulses wird vom Messgerät bestimmt und aufgezeichnet. Der Zeitpunkt t der Reflexion der Wellen im Bauteil kann so jeweils genau bestimmt werden. Bei Kenntnis der Schallwellengeschwindigkeit im Bauteil und senkrechter Einstrahlung der Wellen, kann über die Gleichung

$$v = \frac{2d}{t} \quad \Rightarrow \quad d = \frac{1}{2}v \cdot t \quad (3.4)$$

die Tiefenlage d der Reflexionen berechnet werden.

Ultraschall-Echo-Messungen können mit einem geeigneten Messgerät sowohl mit einem Sensor, der als Sender und Empfänger fungiert, durchgeführt werden, als auch mit zwei getrennten Sensoren für Sender und Empfänger. Die Verwendung von nur einem Sensor hat den Vorteil, dass der Laufweg der Welle senkrecht zur Oberfläche verläuft und eine Tiefenbestimmung somit sehr einfach ist. Zusätzlich ist der Sendepuls klar zu erkennen und Störungen durch Oberflächen- und Plattenwellen sind gering. Allerdings entsteht durch das interne Umschalten von Senden auf Empfangen eine Totzeit im System, in der keine Signale registriert werden können. Manchmal ist es sinnvoll, eine Messung mit getrennten Sender- und Empfänger durchzuführen. Besonders für die Detektion flach liegender Defekte hat sich auch die Verwendung von kombinierten Prüfköpfen, die sowohl Sender als auch Empfänger enthalten, die akustisch von einander abgekoppelt sind, durchgesetzt. Der Sendepuls wird durch die akustische Abkopplung nicht direkt aufgezeichnet. Außerdem besteht die Möglichkeit, die Sender- und Empfängerflächen in einem Winkel zueinander anzuordnen und die Wellen so auf eine bestimmte Tiefenlage zu fokussieren.

Das Ultraschall-Echo-Verfahren wurde appliziert, um die Stegverklebungen der Rotorblätter von Windenergieanlagen zu überprüfen. Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, erfolgt die Verklebung der Rotorblatthälften blind und die Haftung der zwei Hälften aufeinander kann bisher nur schwer überprüft werden. Um nachträglich von außen die Verklebungen zu inspizieren, wird ein energiereicher Ultraschallpuls in das Bauteil geschickt. Von der Rückwand des GFK nach einigen Zentimetern erwartet man ein sehr starkes Echo, wenn hinter dem GFK Luft liegt. Folgt auf die mehreren Zentimeter GFK allerdings eine Schicht aus Klebstoff und darauf die Klebelasche des Steges, so wird sich das Echo im Vergleich zu den Messungen auf unverklebten Bereichen zeitlich nach hinten verschieben. In Bereichen, wo diese Verschiebung stattfindet, haftet der Steg gut, in Bereichen, wo ein starkes Rückwandecho registriert wird, ist die Verklebung vermutlich fehlerhaft oder nicht vorhanden.

3.2.2 Sensorik und Auflösungsvermögen

Die Erzeugung von Ultraschallwellen kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Für sehr tieffrequente Anregungen, noch im Bereich des hörbaren Schalls, können beispielsweise Impaktereignisse mit Stahlkugeln verwendet werden. Für Anregungen im Ultraschallbereich werden Sensoren verwendet, die aus Materialien bestehen, die sich bei Anlegen einer Spannung mechanisch deformieren. Ein Beispiel dafür ist die Verwendung der Magnetostriktion an ferromagnetischen Stoffen. Diese Stoffe haben die Eigenschaft sich bei einem angelegten Magnetfeld in der Länge auszuweiten. Häufiger verbreitet sind piezoelektrische Sensoren. Sie bestehen aus bestimmten Keramiken oder Mineralien, die die Eigenschaft besitzen, bei plastischer Verformung eine Spannung zu erzeugen. Umgekehrt erzeugt eine anliegende Spannung eine Deformation.

Die mittels der Sensoren registrierten Signale werden digitalisiert und auf einem PC weiter verarbeitet. Bei der Digitalisierung gehen durch die Abtastung des Signals immer Informationen verloren. Die größte noch auflösbare Frequenz, die sogenannte Nyquistfrequenz f_{Ny} , eines Datensatzes ist kleiner als die halbe Abtastfrequenz,

$$f_{Ny} < \frac{1}{2} f_{Abtast}. \quad (3.5)$$

Wird dieser Zusammenhang nicht beachtet, kann es zu Aliasing kommen und es werden Frequenzen registriert, die in den Daten nicht vorhanden sind. In Abbildung 3.3 wird das Zustandekommen des Aliasing dargestellt. Durch die Abtastung einer hohen Frequenz in zu großen zeitlichen Abständen, wird eine sehr viel tieffrequenterer Funktion erkannt.

Allerdings können mit Wellenverfahren nur Defekte detektiert werden, die größer sind als die kleinste verwendete Wellenlänge. Die kleinste verwendete Wellenlänge wird durch die Nyquistfrequenz festgelegt und hängt damit stark von der verwendeten Hardware ab.

Hochfrequente Signale bieten zwar eine gute Auflösung kleiner Fehlstellen, jedoch werden hohe Frequenzen im Gegensatz zu tiefen Frequenzen über den gleichen Laufweg stärker gedämpft, da Streu- und Dämpfungseffekte in der Regel pro Periode angreifen. Will man also tieferliegende Defekte detektieren, so ist der Einsatz von tieferen Frequenzen zu bevorzugen, damit die reflektierte Energie stark genug ist, um ein signifikantes Echo zu erzeugen. Es gilt also, ein geeignetes Maß zwischen minimal detektierbarer Defektgröße und Streuverlusten im Material zu

3.2. ULTRASCHALL-ECHO-VERFAHREN

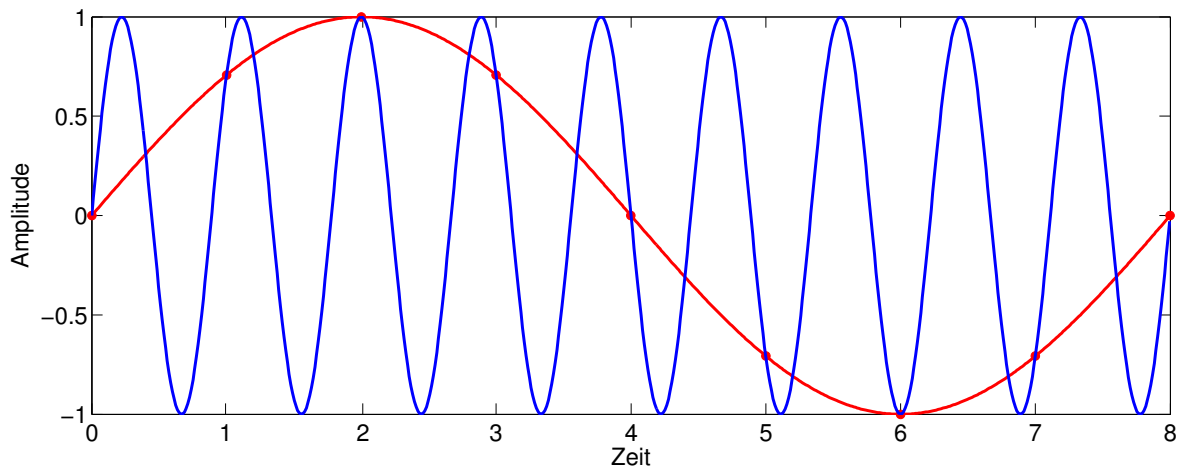


Abbildung 3.3: Darstellung des Alias-Effekts.

finden. In sehr homogenen Materialien, wie Metallen, ist der Einsatz von Frequenzen im Megahertzbereich sinnvoll. Im Bauwesen, wo Untersuchungen an stark heterogenen Materialien wie Beton und Bauteilen größerer Dicke durchgeführt werden, sind Frequenzen unter einem Megahertz üblich. GFK sind durch die vielen Lagen von Glasfasergelegen ebenfalls stark schallschwächend. Für die Anwendung an Rotorblättern von Windenergieanlagen haben sich breitbandige Sensoren mit Mittenfrequenzen von 1 MHz und 0,5 MHz bewährt.

Ultraschallwellen werden an Impedanzunterschieden stark reflektiert. Besonders stark ist der Impedanzunterschied von Festkörpern oder Flüssigkeiten zu Luft, wo die Schallgeschwindigkeit rapide abnimmt. Wird ein Ultraschallpuls über einen piezoelektrischen Sensor in das Material eingebracht und registriert, so muss der Schall in der Regel einen schmalen Luftspalt zwischen Sensor und Material überbrücken, da es meist nicht gelingt, den Sensor plan auf die Oberfläche aufzudrücken. Dabei geht sehr viel Energie verloren und Reflexionen sind teilweise nicht mehr erkennbar. Um solche Verluste gering zu halten, wird der Luftspalt normalerweise mit einem anderen Material gefüllt. Neben den aus der Medizin bekannten Ultraschallgels werden außerdem Wasser, Öle und Fette verwendet. Für längerfristige Ankopplung werden die Sensoren mit aushärtenden Koppelmitteln wie Klebstoff, Wachs oder Zement angekoppelt. Je nach Anwendung können unterschiedliche Koppelmittel sinnvoll sein.

Bei der Anwendung des Ultraschall-Echo-Verfahrens an Rotorblättern von Windenergieanlagen, wäre es jedoch günstig eine berührungslose oder koppelmittelfreie Ankopplung realisieren zu können. Dadurch kann die Messung mit anderen Verfahren, wie der Thermografie, kombiniert

werden. Außerdem werden Messungen an montierten Rotorblättern möglich, da man auf die Mitnahme großer Mengen Koppelmittels verzichten kann. Um dennoch eine reproduzierbare Ankopplung zu gewährleisten, wird z.B. die Kraft, mit der der Sensor auf das Bauteil aufgedrückt wird, konstant gehalten und ebenfalls aufgezeichnet. Durch eine reproduzierbare Anpressung der Ultraschallsensoren soll gewährleistet sein, dass die eingebrachte Energie möglichst konstant gehalten wird. Problematisch ist dabei die Krümmung der Rotorblätter, durch die die Koppelfläche der Sensoren nicht immer vollständig aufliegt.

3.2.3 Signalverarbeitung und Darstellung

Die aufgezeichneten Signale werden im Zeitbereich betrachtet. Die Zeitpunkte der Reflexionen geben Auskunft über die Tiefenlage der Rückwand oder der Schädigungen. Bei dieser Anwendung des Ultraschall-Echo-Verfahrens geht es vor allem um die Überprüfung der Stegverklebungen. Messungen werden punktuell an nebeneinanderliegenden Punkten durchgeführt und die gemessenen Signale miteinander verglichen. Dabei werden sowohl die Zeitpunkte von Reflexionen registriert, als auch die Amplituden der Signale miteinander verglichen.

Die Zeitpunkte der Reflexionen können aus den Zeit-Amplituden-Diagrammen direkt abgelesen werden. Problematisch wird die Ablesung, wenn die Ergebnisse durch Reflexionen an den Glasfaserschichten stark gestört sind. Eine Identifikation der Echos ist dann nicht immer einfach. Das Verfahren funktioniert also nur über den Vergleich benachbarter Messpunkte. Über die Darstellung der Energie statt der Amplitude, können die Zeitpunkte der Rückwandechos leichter identifiziert werden. Bei einer reproduzierbaren Ankopplung der Sensoren ist es außerdem möglich die einzelnen Messungen quantitativ zu vergleichen. Bei bekannten P-Wellengeschwindigkeiten der Materialien lässt sich zusätzlich die Wanddicke d nach der Formel

$$d = \frac{1}{2}v \cdot t \quad (3.6)$$

bestimmen.

Ultraschallsignale können auf unterschiedliche Art dargestellt werden. Bei Betrachtung eines einzigen Zeitsignals spricht man von einem A-Scan. Beim B-Scan werden nach einem linienförmigen Abtasten mehrere Zeitsignale benachbarter Messpunkte nebeneinander dargestellt, was die

Änderungen benachbarter Messungen deutlich macht. Für die Darstellung eines Flächenscans bietet sich oft ein C-Scan oder ein D-Scan der Messdaten an. Die bei einem Flächenscan aufgezeichneten Daten ergeben einen Datenwürfel mit dem Messraster in x- und y-Richtung und den Zeitsignalen in z-Richtung. Der C-Scan zeigt einen Schnitt durch den Datenwürfel zu einem bestimmten Zeitpunkt, bzw. bei einer bestimmten Materialdicke. Man erkennt somit die Verteilung der Energie zu einem bestimmten Zeitpunkt. Beim D-Scan wird ein signifikantes Merkmal des Signals, z.B. der Zeitpunkt der maximalen Reflexion, herausgesucht und dieses an jedem Punkt des Messrasters dargestellt. Man erhält so eine flächige Darstellung eines Merkmals, z.B. der Materialdicke. Je nach Aufgabenstellung kann die Verwendung eines D-Scans sinnvoll sein, da die Interpretation sehr intuitiv ist. Allerdings ist die Begrenzung auf nur ein Merkmal des Signals eine Reduktion des Informationsgehalts. Das kann zu Fehlinterpretationen führen und sollte nur nach genauerer Betrachtung der Messdaten durchgeführt werden. Für die Darstellung der Ultraschall-Echo-Messungen an Rotorblättern hat sich ein farbcodierter B-Scan als sinnvoll herausgestellt.

Der Ultraschallsendepuls des verwendeten Systems sieht je nach Einstellung des Pulsers und angeschlossenem Sensor unterschiedlich aus. Der Sendepuls kann so teilweise die registrierten Echos überlagern. Wird vor Beginn einer Messreihe eine Kalibriermessung durchgeführt, so kann der Sendepuls des Signals zur Darstellung der Ergebnisse aus den Signalen heraus gerechnet werden.

3.3 Lokale Resonanzspektroskopie

Das Prinzip der lokalen Resonanzspektroskopie basiert auf Klopfprüfungen oder Resonanzanalysen, wie sie in den unterschiedlichsten Industriezweigen Anwendung finden. Vom Prinzip ähnelt sie den Klangprüfungen, die beispielsweise zur Risserkennung in Keramik, Metall oder Porzellan angewandt werden. Das Untersuchungsobjekt wird durch Anschlagen im Ganzen zum Klingen gebracht. Der Körper schwingt in seinen Eigenmoden, die von Form und Material abhängen. Durch Risse ändert sich das Schwingungsverhalten und somit auch der erzeugte Klang. Über eine Frequenzanalyse können im Produktionsablauf sehr schnell fehlerhafte Teile aussortiert werden (Hertlin und Herkel, 2003).

Der wesentliche Unterschied der lokalen Resonanzspektroskopie zu die-

sen Eigenfrequenzmethoden ist, dass bei der lokalen Resonanzspektroskopie die Untersuchungsobjekte in der Regel größer sind und durch den Hammeranschlag nur ein lokaler Bereich rund um den Anregungspunkt zum Schwingen angeregt wird. Das hat einerseits den Nachteil, dass zur vollständigen Untersuchung großer Bauteile, viele Punkte abgeklopft werden müssen. Die Schädigungen, die eine Klangänderung hervorrufen, liegen in unmittelbarer Nähe des jeweiligen Anregungspunktes. So ist es mit der lokalen Resonanzspektroskopie möglich, Schädigungen zu lokalisieren. Dies ist ein Vorteil gegenüber den Eigenfrequenzmethoden, wo lediglich eine Schadensdetektion möglich ist.

3.3.1 Messprinzip

Mit einem Hammer (z.B. sind Modalanalysehammer geeignet) wird das Untersuchungsobjekt, hier das Rotorblatt, an kritischen Stellen punktweise abgeklopft. Durch den Hammer-Impakt wird das Rotorblatt zu Schwingungen angeregt. Im Allgemeinen schwingt ein Bauteil, das eine einmalige Anregung erfährt, in seinen Eigenschwingungsmoden. Die Bestimmung der Eigenfrequenzen eines komplexen Bauteils, wie eines Rotorblattes einer Windenergieanlage, das aus verschiedenen Werkstoffen besteht und eine spezielle Form hat, ist nur über komplizierte computergestützte Modellierungen möglich.

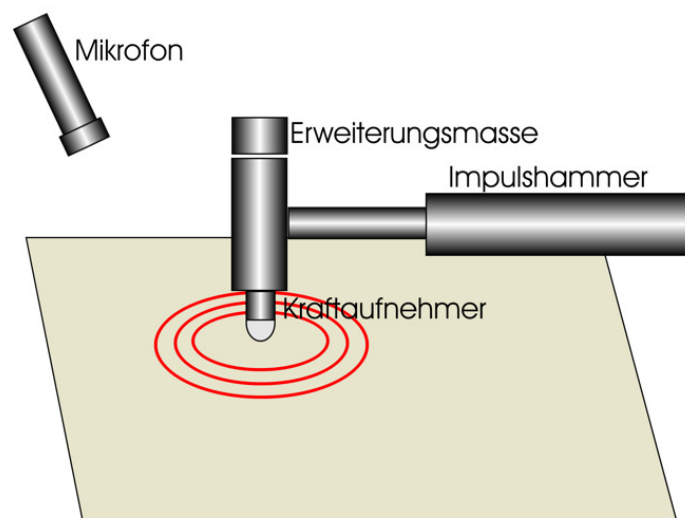


Abbildung 3.4: Messprinzip der lokalen Resonanzspektroskopie.

Die lokale Resonanzspektroskopie orientiert sich an den Klopfprüfun-

gen, die von Rotorblattgutachtern bisher manuell durchgeführt werden. Auch in der Luft- und Raumfahrttechnik werden ähnliche einfache Verfahren verwendet, die sogenannten coin-tap tests, wo CFK-Strukturen mit einer Münze auf Hohlräume abgeklopft werden. Geschädigte Bereiche lassen sich über eine Änderung des erzeugten Klangs detektieren. Das Prinzip einer instrumentierten Messung ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Mit einem Modalanalysehammer wird das Bauteil punktweise abgeklopft. Das Bauteil fängt lokal an zu schwingen und erzeugt einen Klang. Dieser Klang wird über eine Messmikrofon aufgezeichnet. Zusätzlich dazu kann die Kraftanregung des Hammers, über einen in der Hammerspitze eingebauten Kraftsensor, aufgezeichnet werden.

Nach einem ähnlichen Prinzip wird z.B. auch die Qualitätssicherung an der Magnetschwebbahn Transrapid durchgeführt. Der Transrapid ist zu großen Teilen in Leichtbauweise aus Verbundmaterialien gebaut, die den Materialien am Rotorblatt ähneln. Hier kann es produktionsbedingt oder im Fahrbetrieb zu Delaminationen einzelner Schichten kommen. Mit einem kommerziellen Gerät, dem Mitsui Woodpecker (Mitsubishi et al., 1989) werden die relevanten Fahrzeugbereiche nach jeder Fahrt abgeklopft. Schädigungen werden über Veränderungen der Kraftanregung bezüglich einer Referenzmessung detektiert. Eine Auswertung der Klangsignale ist hier jedoch nicht vorgesehen.

Grundsätzlich ist anzunehmen, dass die erzeugten Schwingungen an benachbarten Punkten bei identischer Anregung ähnlich sind, da die schwingenden Strukturen sich stark ähneln oder sogar identisch sind. Allerdings sind die Klangunterschiede bei lokal kleinen Schädigungen deutlich hörbar, auch wenn die Anregungspunkte nebeneinander liegen. Das lässt darauf schließen, dass die Klanganregung eine große Rolle spielt. Sie ändert sich in geschädigten Bereichen aufgrund der Änderung des Kontaktes von Impakthammer und Oberfläche.

Ein einfaches Modell für den Kontakt zweier Körper bei einem Stoß liefert die Newtonsche Mechanik. Bei einem vollelastischen Stoß zweier Körper folgt aus Energie- und Impulserhaltung, dass die Summe der Geschwindigkeiten der Körper vor und nach dem Stoß gleich groß ist. In der Realität hat man es in der Regel mit teilelastischen Stößen zu tun, d.h. ein Teil der Energie des Stoßes wird in andere Energieformen, wie Wärmeenergie oder elastische Wellen, umgewandelt. Der Stoßparameter k gibt an, wieviel der Energie durch diese Effekte verloren geht. Er ist definiert als Verhältnis der Differenzen der Geschwindigkeiten der zwei Körper vor (v'_i) und nach dem Stoß (v_i).

$$k = \frac{v'_1 - v'_2}{v_2 - v_1}. \quad (3.7)$$

Der Stoßparameter eines teilelastischen Stoßes lässt sich sehr leicht aus einem Kugelsprungversuch bestimmen. Eine Stahlkugel wird aus der Höhe h_1 auf einen Halbraum fallen gelassen. Aus der Sprunghöhe h_2 , die die Kugel nach dem Stoß mit dem Halbraum erreicht, kann der Stoßparameter ermittelt werden:

$$k = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}}. \quad (3.8)$$

Der Stoßparameter ist für unterschiedliche Materialien unterschiedlich groß. Aus Erfahrung lässt sich sagen, dass der Stoßparameter größer ist, je härter die stoßenden Materialien sind. Je weicher ein Material ist, umso mehr Energie geht durch Umwandlung in andere Energieformen verloren. Eine genauere Beschreibung von Kontaktdauer und Kontaktfläche zwischen zwei elastischen Körpern, kann der Hertzschen Kontakttheorie (Hertz, 1881) entnommen werden.

Für die lokale Resonanzspektroskopie spielt die Kontaktdauer zwischen Hammer und zu untersuchender Oberfläche eine große Rolle. Die Anregungsdauer hängt von der Kontaktsteifigkeit des angeregten Materials ab (Cawley und Adams, 1988). Sie kann als Feder mit der Steifigkeit k_c betrachtet werden, die aus der Hertzschen Kontakt Theorie berechnet werden kann. Die Kontaktsteifigkeit gibt an, wie stark sich zwei sich berührende Körper unter Einwirkung einer Normalkraft F deformieren.

$$\frac{1}{k_c} = \frac{d\delta}{dF} \quad (3.9)$$

Die Deflexion δ der Körper hängt von Materialeigenschaften, wie Elastizitätsmodul E und Poissonverhältnis ν der Materialien und von der Geometrie der Körper ab. Bei Kontakt eines Halbraumes mit einer Kugel mit Radius r , beträgt die Deflexion δ gemäß der Hertzschen Kontakttheorie (Shi und Polycarpou, 2005)

$$\delta = \left(\frac{9F^2}{16rE^{*2}} \right)^{1/3} \quad (3.10)$$

3.3. LOKALE RESONANZSPEKTROSKOPIE

$$\text{mit } \frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}.$$

Die Deflexion wird nun nach der Kraft abgeleitet. Der Kehrwert führt zur Kontaktsteifigkeit zwischen einer Kugel und einem Halbraum.

$$k_c = \frac{3}{2} \left(\frac{16rE^{*2}}{9} \right)^{1/3} \cdot F^{1/3} \quad (3.11)$$

Da die Deflexion in der Regel nicht linear von der einwirkenden Kraft abhängt, hängt die Kontaktsteifigkeit von der einwirkenden Kraft ab. Je größer die einwirkende Kraft, umso größer ist auch die Kontaktsteifigkeit. Für die Anwendung der lokalen Resonanzspektroskopie bedeutet das, dass bei Anregung mit dem Impulshammer die Anregungskraft möglichst konstant gehalten werden muss. Für den einfachen Fall einer Stahlkugel ($E_1 = 210\text{kN/mm}^2$, $\nu_1 = 0.29$) mit 8 mm Durchmesser auf einen GFK-Halbraum ($E_2 = 13\text{kN/mm}^2$, $\nu_2 = 0.25$) ergeben sich Kontaktsteifigkeiten, die in Abbildung 3.5 dargestellt sind. Aufgrund der Abhängigkeit von der dritten Wurzel der Kraft sind die Änderungen in der Steifigkeit bei kleineren Kräften größer. Die Einflüsse unterschiedlicher Anregungsstärken in der Praxis werden in Kapitel 5.2.1 untersucht.

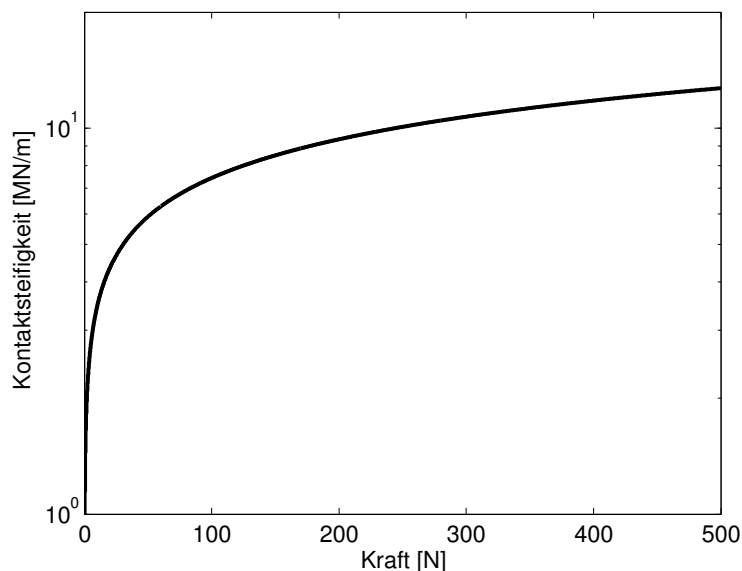


Abbildung 3.5: Kontaktsteifigkeiten zwischen Stahlkugel und GFK-Halbraum.

Die lokale Resonanzspektroskopie untersucht Änderungen in der Kontaktsteifigkeit zwischen Hammer und zu untersuchendem Material und

die daraus resultierenden Änderungen im erzeugten Klang. Durch die Anwesenheit oberflächennaher Defekte wird die effektive Steifigkeit herabgesetzt und setzt sich nach Cawley und Adams (1988) aus Kontaktsteifigkeit k_c des ungeschädigten Materials und Defektsteifigkeit k_d zusammen. Die Defektsteifigkeit eines runden Defekts mit dem Durchmesser d in einer Tiefe h kann berechnet werden:

$$k_d = 64\pi D/d^2, \quad (3.12)$$

wobei D sich aus den elastischen Eigenschaften E-Modul E und Poissonverhältnis ν des Materials zusammensetzt,

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)}. \quad (3.13)$$

Betrachtet man Gleichung (3.12), so ist zu bemerken, dass die Defektsteifigkeit proportional zur dritten Potenz der Defekttiefe und umgekehrt proportional zum Quadrat des Defektdurchmesser ist. Ein Defekt mit 5 mm Durchmesser in 1 mm Tiefe erzeugt die gleiche Änderung der effektiven Steifigkeit, wie ein Defekt mit 26 mm Durchmesser in 3 mm Tiefe. Das Verfahren reagiert also sehr viel sensitiver auf oberflächennahe Defekte.

Die Verringerung der effektiven Steifigkeit führt zu einer Verlängerung der Kontaktzeit von Anregungsimpakt und dem zu testenden Material. Diese Verlängerung des Kraftsignals des Hammer führt zwangsläufig zu einem schmaleren Frequenzspektrum der angeregten Schwingungen und somit auch zu einem anderen angeregten Klang.

3.3.2 Signalverarbeitung der Klangsignale

Die Aufzeichnung der Kraft- und Klangsignale erfolgt im Zeitbereich. Zur weiteren Untersuchung wird eine Fouriertransformation durchgeführt um die Daten zusätzlich im Frequenzbereich zu betrachten. Die Fouriertransformation beruht auf der Tatsache, dass jede beliebige periodische oder aperiodische Schwingung eine Superposition einzelner Sinusschwingungen unterschiedlicher Frequenz, Phase und Amplitude ist. Die Fouriertransformation berechnet die Anteile bestimmter Frequenzen im Signal. Die Fouriertransformation $\hat{x}(\omega)$ einer Funktion $x(t)$ berechnet

3.3. LOKALE RESONANZSPEKTROSKOPIE

sich nach der Formel

$$\hat{x}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{i\omega t} dt. \quad (3.14)$$

Die reelle Funktion $x(t)$ wird auf eine komplexe Funktion $\hat{x}(\omega)$ abgebildet. Der Betrag dieser komplexen Funktion ist das Amplitudenspektrum und stellt zu jeder Frequenz eine Amplitude dar. Das Argument der komplexen Funktion gibt für jede Frequenz eine Phase an und wird Phasenspektrum genannt. Für die Untersuchungen der Kraft- und Klangsignale ist vor allem das Amplitudenspektrum von Bedeutung, da es angibt, welche Frequenzen im Signal vorkommen.

In den Amplitudenspektren der Klangsignale ist also zu erkennen, welche Frequenzen im Signal mit welchen Amplituden enthalten sind. Der Frequenzgehalt der Klangsignale, die auf intakten Bereichen erzeugt werden, unterscheidet sich von dem der Klangsignale, die auf geschädigten Bereichen angeregt werden. Diese Frequenzänderungen sind sehr deutlich messbar und meist auch hörbar.

Werden Messungen entlang von Linien durchgeführt (Linienscans), so ist auch bei der lokalen Resonanzspektroskopie eine Darstellung als B-Scan sinnvoll und aussagekräftig. Lokale Resonanzspektroskopien werden jedoch häufig als Flächenscans durchgeführt. Um die Ergebnisse flächig als D-Scan darzustellen, muss ein signifikantes Merkmal ausgewählt werden, das die Eigenschaften des Amplitudenspektrums gut wieder spiegelt. In den meisten Fällen ist dies nicht einfach oder sogar unmöglich. Je nach Anwendung kann ein anderes Merkmal sinnvoll sein. In der Praxis hat es sich manchmal als hilfreich erwiesen, die Frequenz mit der maximalen Amplitude anzuzeigen, wenn diese maximale Frequenz auch in etwa dem Frequenzbereich des maximalen Energieübertrags entspricht. Nicht immer sind die Zusammenhänge so einfach. Manchmal äußert sich eine Klangänderung auch in der Verbreiterung des Spektrums oder in der An- oder Abwesenheit bestimmter Frequenzen. Bei komplizierteren Spektren ist eine Darstellung der Amplitudenspektren als B-Scan sinnvoller, da man bei der Interpretation keine Informationen ausklammert und somit ein vollständigeres Bild beschreiben kann.

Allerdings ist die Darstellung als B-Scan weniger intuitiv und die Interpretation erfordert etwas Erfahrung.

3.3.3 Signalverarbeitung der Kraftanregung

Die Kraftsignale der Anregung haben in etwa die Form von Gaußkurven. Die Fouriertransformation einer Gaußkurve ist wieder eine Gaußkurve. Je breiter das Signal im Zeitbereich ist, umso schmaler wird es im Frequenzbereich und umgekehrt. Da man es in beiden Fällen mit Gaußkurven zu tun hat, ist die Auswertung äquivalent. Eine Auswertung im Zeitbereich bietet sich an, da dann auf eine Fouriertransformation verzichtet werden kann.

Zur flächenhaften Darstellung der Ergebnisse als D-Scan, muss ein Parameter, der an jedem Messpunkt ausgewertet wird, festgelegt werden. In diesem Fall ist es sinnvoll, die Breite der Gaußkurve des Hammersignals als Messgröße zu verwenden. Diese lässt sich auf unterschiedliche Art und Weise beschreiben. Eine Möglichkeit ist es, die Fläche unter der Gaußkurve als Maß für die Breite des Signals zu verwenden. Die Fläche unter der Kurve beschreibt die Energie des Hammerschlags. Bei ideal gleicher Anregung müsste diese Fläche immer gleich groß sein. Eine breitere Kurve hat ein geringeres Maximum, eine schmalere Kurve ein höheres. Um einen Unterschied in den Flächeninhalten deutlich zu machen, müssen die Anregungssignale auf ihre Maximalamplitude normiert werden. Dann zeigt sich eine Verbreiterung des Signals in einer größeren Fläche. Allerdings werden bei dieser Betrachtung große Verbreiterungen des Pulses verstärkt dargestellt und kleine Änderungen sind nicht mehr gut sichtbar.

Deshalb hat sich für die Darstellung der Ergebnisse die Halbwertsbreite des Anregungspulses als sinnvoll erwiesen. Die Halbwertsbreite ist z.B. in der Telekommunikation ein gebräuchliches Maß für Richtbreiten von Antennen (siehe Abbildung 3.6).

Die Halbwertsbreite gibt an, wie breit ein Signal bei seiner halben Höhe ist. Der Vorteil der Halbwertsbreite im Vergleich zur vollen Breite des Signals ist ihre vergleichsweise einfache Bestimmung. Auch in stark ver-räuschten Datensätzen ist sie leicht abzulesen, wohingegen ein Beginn oder Endpunkt des Signals komplizierter zu bestimmen ist. Die Halbwertsbreite eines Kraftsignals ist ein Maß für die Dauer des Kontaktes zwischen Hammer und zu untersuchendem Material. Diese Kontaktzeit

3.3. LOKALE RESONANZSPEKTROSKOPIE

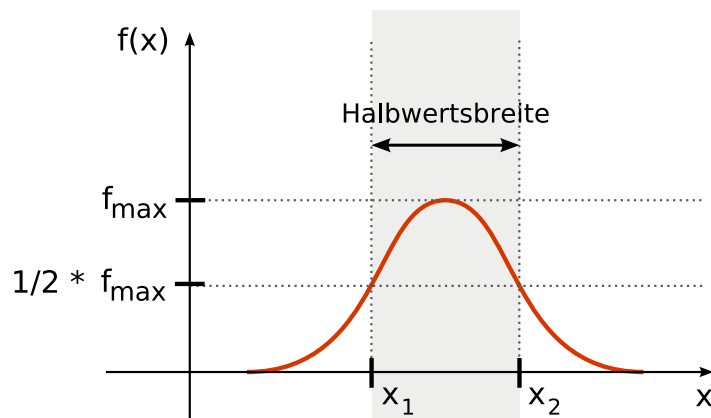


Abbildung 3.6: Bestimmung der Halbwertsbreite eines Signals.

gibt an, wie sich die Kontaktsteifigkeit ändert und zeigt somit Materialveränderungen an. Diese Art der Auswertung liefert für jeden Messpunkt exakt einen Messwert. Eine flächige Darstellung ist somit sehr einfach und schnell zu realisieren.

4 Ultraschall-Echo-Messungen

4.1 Verwendung verschiedener Sensoren

Die Prüfaufgabe, Schäden an Rotorblättern von Windenergieanlagen aufzufinden, stellt besondere Anforderungen an die verwendeten Sensoren. Aufgrund der vergleichsweise großen Dicken der Bauteile, müssen die Sensoren empfindlich genug sein, auch schwache Reflexionen zu detektieren. Dazu kommt, dass das Material durch die vielen Fasergelege stark schallschwächend ist, da an jeder Lage Energie reflektiert wird. Es ist also sinnvoll Sensoren auszuwählen, deren Mittenfrequenzen so tief liegen, dass die verwendeten Wellenlängen zu groß sind, um die einzelnen Glasfasermatten zu "sehen". Allerdings sind die Wellenlängen dann auch zu groß, um Fehler von wenigen Millimetern Größe aufzulösen. Es muss ein guter Kompromiss zwischen Auflösungsvermögen und Tiefenreichweite gefunden werden. Ebenso wichtig ist die Größe der Koppelfläche der Sensoren. Je größer die Koppelfläche, umso größer ist auch die Energie, die bei einem gleichstarken Puls in das Material eingebracht wird. Jedoch sind größere Koppelflächen auf stark gekrümmten Oberflächen wesentlich schwieriger anzukoppeln. Außerdem vergrößert sich mit der Koppelfläche des Sensors auch die Breite des ausgesandten Schallkegels.

Tabelle 4.1: Pulser-Einstellungen.

Pulsstärke	100 V
Pulsbreite	200 ns
Dämpfung	47 Ω
Verstärkung	30 dB
Hochpassfilter	0,6 MHz
Tiefpassfilter	aus

Das registrierte Signal ist immer ein Summenbild aus einer Fläche, die so groß ist, wie die Schnittfläche des Schallkegels mit der Untersuchungsebene. Das bedeutet, je größer die Koppelfläche bei Sensoren

gleicher Abstrahlcharakteristik ist, umso größer ist das Gebiet aus dem Signale registriert werden können. Mit größeren Schallköpfen können kleinere Defekte in der x-y-Ebene weniger genau lokalisiert werden. Auch hier muss also ein Maß zwischen einer großen Koppelfläche und somit einer großen Menge eingebrachter Energie und einer kleinen Koppelfläche und deshalb genaueren Lokalisierung in der Fläche gefunden werden.

Im folgenden Experiment wurden verschiedene Sensoren unterschiedlicher Resonanz- oder Mittenfrequenzen an einer 22 mm dicken GFK-Platte getestet. Die Einstellungen des Ultraschallpulsers wurden zur besseren Vergleichbarkeit für alle Messungen gleich gewählt und sind in Tabelle 4.1 zu sehen. Bei den Hoch- und Tiefpassfiltern handelt es sich um analoge Filter, die auf der Pulser/Receiverkarte sitzen und mit diesen Werten vom Hersteller angegeben werden. Die Datenerfassung erfolgt über eine separate Datenerfassungskarte, die zusätzlich Möglichkeiten zur Filterung (Anti-Aliasing) bietet. Getestet wurden neun verschiedene Sensoren. Ihre Mittenfrequenzen und Koppelflächen sind in Tabelle 4.2 dargestellt.

Tabelle 4.2: Sensormerkmale.

Sensor	Mittenfrequenz [MHz]	Durchmesser der Koppelfläche [mm]
Panametrics C602	1,0	25
Panametrics C603	1,0	13
Panametrics V101	0,5	25
Krautkrämer B0.5SL	0,5	39
Krautkrämer B1SL	1,0	39
Krautkrämer B2SN	2,0	39
Krautkrämer MB2.5SN	2,5	15
Krautkrämer K1SM	1,0	33
Kretztechnik	1,0	25

Die Sensoren wurden auf der GFK-Platte über ein Ultraschallgel angekoppelt. Die Platzierung und der Andruck der Sensoren erfolgte per Hand. Die Zeitsignale der Messungen sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Zum Zeitpunkt 0 ist bei allen Sensoren der Sendepuls zu erkennen. Der elektrische Sendepuls soll laut Pulser-Einstellungen eine Länge von 200 ns haben. Tatsächlich sind die mechanischen Sendepulse in Abbildung 4.1 länger. Das liegt daran, dass die Sensormaterialien träge sind und eine gewisse Zeit, abhängig von der mechanischen Dämpfung durch das

4.1. VERWENDUNG VERSCHIEDENER SENSOREN

Dämpfungselement, zum Nachschwingen benötigen. Es wird aber auch deutlich, dass dieses Nachschwingverhalten für unterschiedliche Sensoren unterschiedlich aussieht. Der Pulser bietet die Möglichkeit einen Widerstand R zwischen 47Ω und 621Ω einzustellen, der eine elektrische Dämpfung des Nachschwingens des Sensors bewirkt. Für diese Messung wurde die kleinste Dämpfungseinstellung gewählt. Besonders ausgeprägt ist das Nachschwingen bei den Sensoren B0.5Sl, B1SL der Firma Krautkrämer, dem Sensor der Firma Kretztechnik und den Sensoren C602 und C603 der Firma Panametrics.

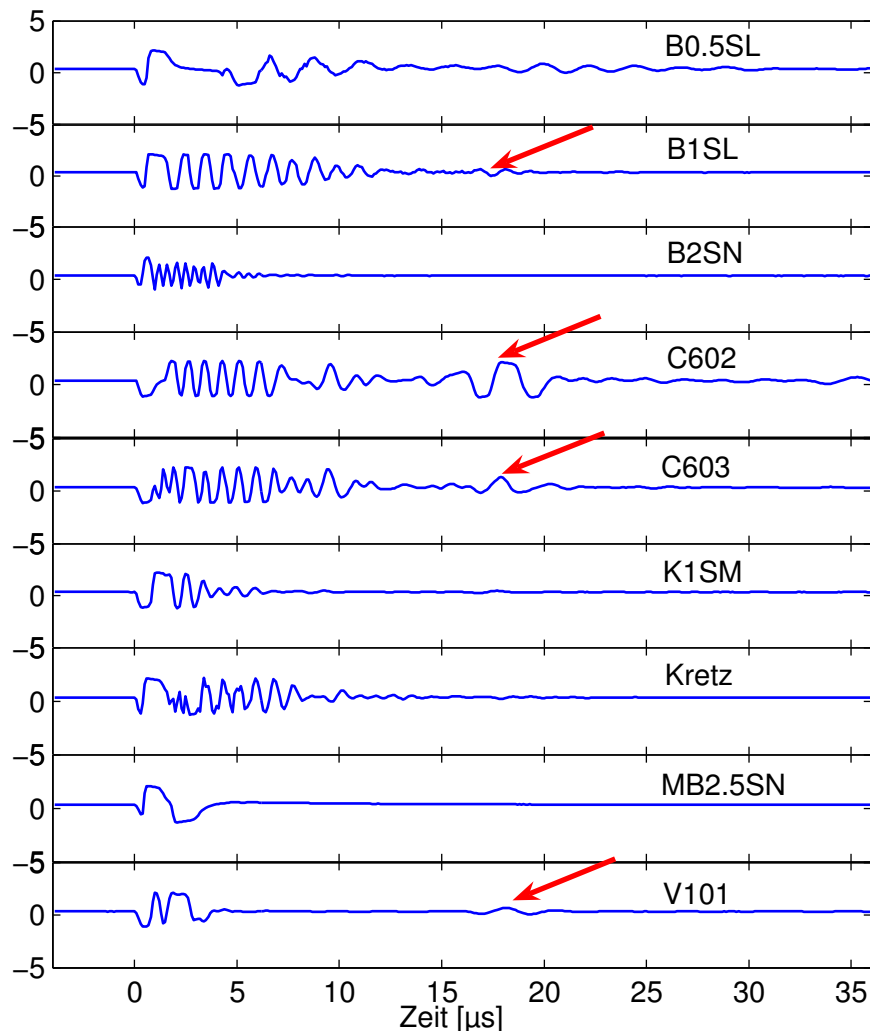


Abbildung 4.1: Ultraschall-Echo-Messungen mit unterschiedlichen Sensoren an einer GFK-Platte.

Hier sind in den ersten $10 \mu\text{s}$ oder länger deutlich monofrequente

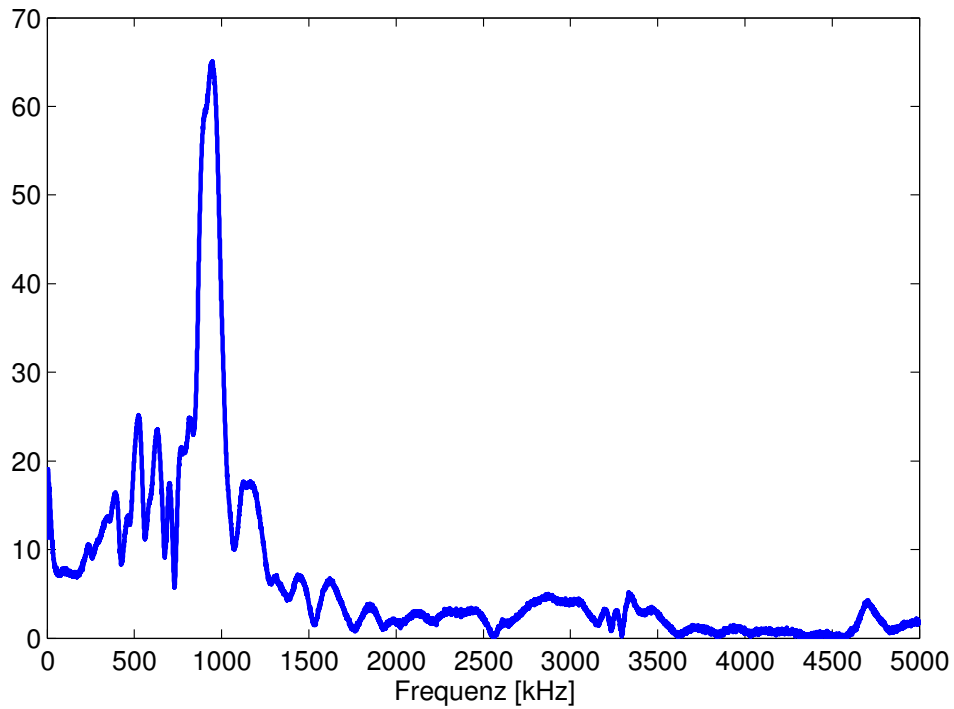


Abbildung 4.2: Frequenzspektrum des Signals des Sensor B1SL.

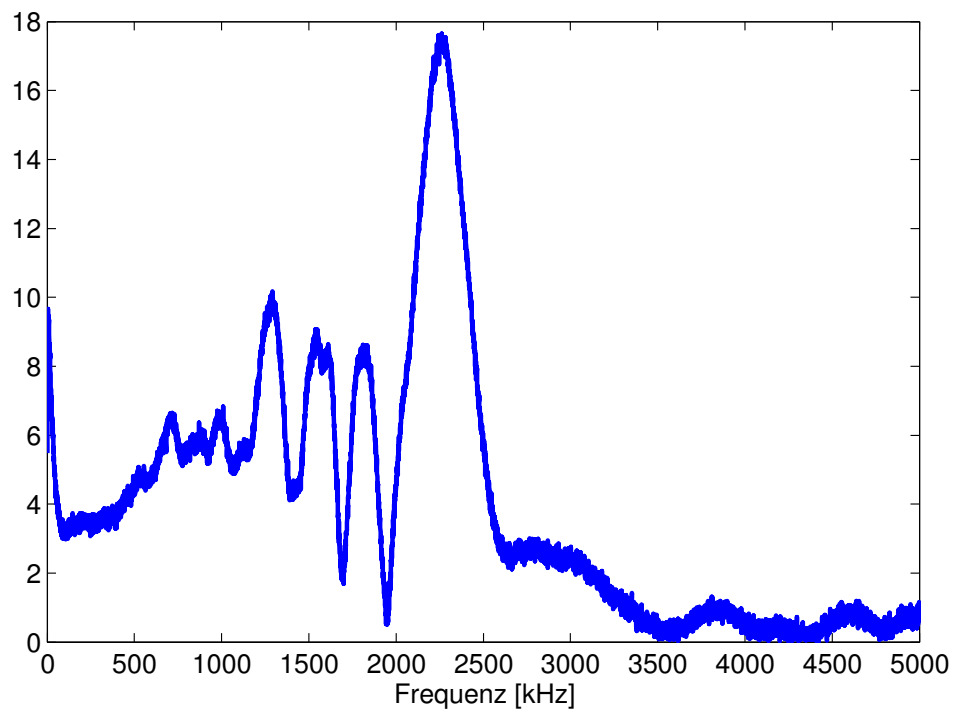


Abbildung 4.3: Frequenzspektrum des Signals des Sensors B2SN.

Schwingungen zu erkennen, bei denen es sich um das Nachschwingen des Sensors handelt. Der Sensor B2SN zeigt ebenfalls ein monofrequentes Nachschwingen, jedoch ist es höherfrequent und bereits nach etwa $5 \mu\text{s}$ abgeklungen. Die höhere Frequenz liegt an der höheren Mittenfrequenz des Sensors. Betrachtet man das Frequenzspektrum des Sensors B1SL in Abbildung 4.2, so erkennt man deutlich eine Resonanz bei einer Frequenz von 1 MHz, im Frequenzspektrum des Sensors B2SN in Abbildung 4.3 liegt diese Resonanz etwas über 2 MHz. Diese Frequenzen korrespondieren gut mit den Mittenfrequenzen der verwendeten Sensoren und zeigen, dass es sich bei den monofrequenten Signalen um das Nachschwingen der Sensoren handelt.

Das Augenmerk dieser Messung lag jedoch nicht auf dem Schwingungsverhalten der Sensoren, sondern auf dem Vermögen ein Rückwandecho zu detektieren. In einem gesonderten Experiment wurde die Schallgeschwindigkeit der GFK-Platte bestimmt und aus dieser und der Dicke der Platte der Zeitpunkt des Rückwandechos berechnet. Dieses Rückwandecho ist nach ca. $18 \mu\text{s}$ zu erwarten. Es lässt sich in den Messungen mit den Sensoren der Bezeichnung C602 und C603 sehr deutlich erkennen (rote Pfeile in Abbildung 4.1). Wesentlich schwächer, aber dennoch zu erkennen, ist es bei den Sensoren mit den Bezeichnungen B1SL und V101. Leicht angedeutet ist das Rückwandecho auch beim Sensor K1SM und beim Kretztechnik-Sensor. Alle anderen Sensoren scheinen für die Prüfaufgabe nicht geeignet zu sein.

Die Sensoren, die ein Rückwandecho erkennen lassen, besitzen alle eine Mittenfrequenz von 1 MHz oder weniger. Diese Frequenzen scheinen geeignet zu sein zur Untersuchungen von GFK-Platten mehrerer Zentimeter Dicke. Besonders gut geeignet sind die Sensoren C602, C603 und V101. Die beiden erstgenannten eignen sich besonders zur Untersuchung sehr dicker Bauteile, da sie sehr empfindlich sind. Für die Untersuchung dünnerer Bauteile oder zur Detektion oberflächennaher Fehlstellen, ist der Sensor V101 besser geeignet, da er, bedingt durch die Bauart, eine kürzere Nachschwingzeit aufweist. Die Frequenzantwortfunktionen dieser Sensoren befinden sich im Anhang dieser Arbeit.

4.1.1 Eine Methode zur trockenen Ankopplung

Ultraschallsensoren müssen für Messungen in der Regel über eine Flüssigkeit oder ein viskoses Gel an das Prüfobjekt angekoppelt werden. Der Unterschied in der akustischen Impedanz zwischen Festkörpern und Luft

ist signifikant, so dass ein Luftspalt zwischen Sensor und Prüfobjekt einen großen Energieverlust hervorruft. Die Verwendung viskoser Gels bietet sich auf der glatten Oberfläche der Rotorblätter an. Zur Prüfung der großen Flächen der Rotorblätter benötigt man jedoch eine große Menge des Koppelmittels. Dadurch wird die Überprüfung eines ganzen Rotorblattes schnell unhandlich und teuer. Eine Alternative bietet eine trockene Ankopplung der Sensoren, die im Rahmen einer Diplomarbeit untersucht wurde (Holfert, 2008).

Tabelle 4.3: Merkmale der Sensoren mit Gewinde.

Sensor	Mittelfrequenz [MHz]	Durchmesser der Koppelfläche [mm]
Panametrics C602	1,0	25
Panametrics C603	1,0	13
Panametrics V601	0,5	25

Zur trockenen Ankopplung wird über ein Gewinde eine Silikonmembran vor der Koppelfläche des Sensors angebracht und das Koppelmittel zwischen Membran und Koppelfläche eingebracht. Ein Foto der Sensoren mit angebrachten Membranen ist in Abbildung 4.4 zu sehen. Für dieses Verfahren sind nicht alle der in Kapitel 4.1 untersuchten Sensoren geeignet. In Tabelle 4.2 sind die Eigenschaften der für die trockene Ankopplung verwendeten Sensoren dargestellt. Zu beachten ist der Sensor V601. Dieser hat die gleichen Eigenschaften, wie der zuvor verwendete Sensor V101. Der Unterschied liegt in der Ausführung als Sensor mit geschützter Koppelfläche, die ein Anbringen der Membran ermöglicht.

Mit den in Tabelle 4.3 aufgeführten Sensoren wurden Messungen an einer GFK-Platte von 22 mm Dicke sowohl mit konventioneller Nassankopplung als auch mit der trockenen Ankopplung über die Membran durchgeführt. Der Sensor wurde während der Dauer der Messung über eine Halterung mit einem konstanten Anpressdruck, der über eine Kraftmessdose kontrolliert wurde, angedrückt. Ein Vergleich der Amplituden der Signale wird dadurch möglich (Dill-Langer et al., 2005).

In Abbildung 4.5 sind die Zeitreihen der Messungen mit Nassankopplung über Silikongel und Trockenankopplung über die Silikonmembran dargestellt. Das erste Echo an der Rückwand ist in beiden Kurven etwa bei 0,018 ms zu sehen. Nach der doppelten Zeit erkennt man erneut ein Echo. Hierbei handelt es sich um die erste multiple Reflexion an der Rückwand der Platte.

4.1. VERWENDUNG VERSCHIEDENER SENSOREN



Abbildung 4.4: Foto der Sensoren mit aufgeschraubten Silikonmembranen.

Durch die trockene Ankopplung geht beim Eintritt der Welle in den Probekörper und beim Austritt der Welle aus dem Probekörper mehr Energie verloren als bei der Nassankopplung. Das zeigt sich in einer niedrigeren Amplitude der Echos. Für die weitere Verwendung der trockenen Ankopplung ist eine Quantifizierung dieser Dämpfung sinnvoll. Im Beispiel in Abbildung 4.5 beträgt die Echohöhe des ersten Echos etwa 60 Prozent des Sendepulses bzw. der Echohöhe bei Nassankopplung. Ausgewertet wurden die maximalen positiven Ausschläge. Echo und Sendepuls sind bei der Nassankopplung gleich groß, da ein Hardware-Clipper auf der Pulser-Karte verhindern soll, dass ein zu hoher Eingangspuls die Karte zerstört. In der Abbildung wird das rote Signal vom blauen Signal überdeckt. Dieser Clipper begrenzt sowohl den Sendepuls als auch das erste Echo auf eine Amplitudenspanne von 3 V. Eine Quantifizierung des tatsächlichen Energieverlustes durch die trockene Ankopplung in Bezug auf die Nassankopplung ist also aus dem ersten Rückwandecho nicht möglich. Es kann jedoch die Echoamplitude mit der größten Amplitude, die vom System registriert werden kann, verglichen werden. Im Fall von Abbildung 4.5 beträgt die Amplitude des ersten Echos 60 Prozent des Sendepulses. Ein Echo dieser Stärke ist bei normalen Messbedingungen einwandfrei zu identifizieren. Neben der dargestellten Messung, wurden identische Versuche mit unterschiedlichen Koppelmitteln durchgeführt, deren Ergebnisse sich im Großen und Ganzen mit den hier dargestellten decken.

Betrachtet man das zweite Rückwandecho, das nach der doppelten Zeit, bei 0,038 ms ankommt, kann man die Amplituden der beiden Signa-

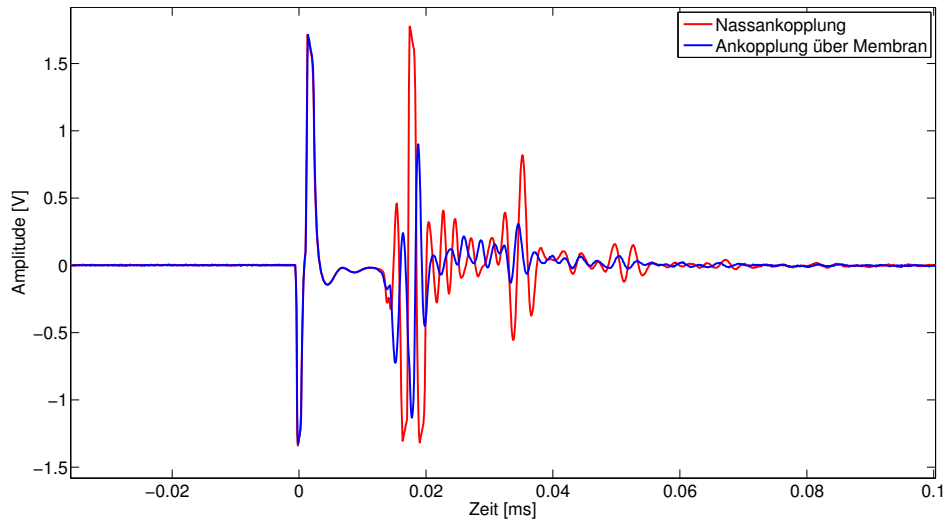


Abbildung 4.5: Vergleich zwischen Nass- und Trockenankopplung des Sensors C602.

le vergleichen. Die Amplitude des zweiten Rückwandechos der trockenen Ankopplung (blaue Kurve) erreicht noch etwa 40 Prozent der Energie des Echos der Nassankopplung (rote Kurve). Auch dieses Echo setzt sich deutlich vom Rauschen ab und kann identifiziert werden.

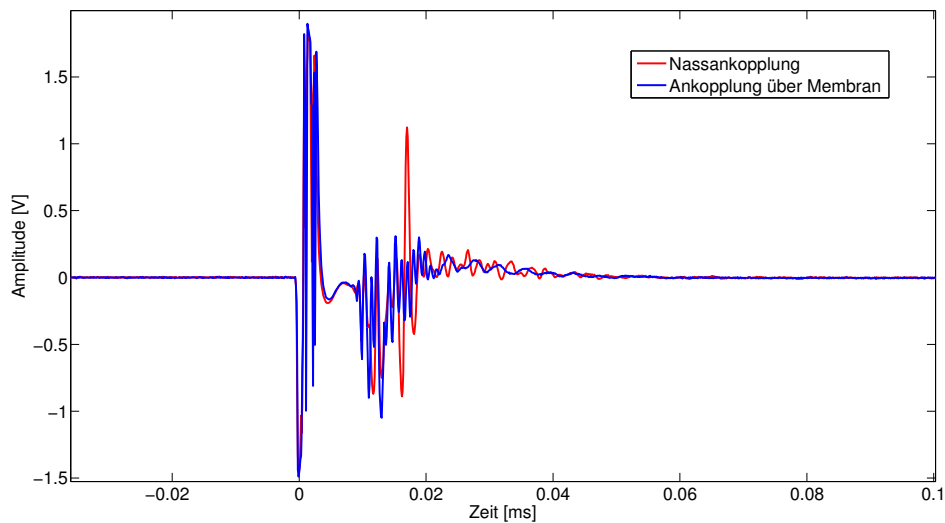


Abbildung 4.6: Vergleich von Nass- und Trockenankopplung des Sensors C603.

In Abbildung 4.5 fällt auf, dass die Echos bei der trockenen Ankopplung mit einer leichten Verzögerung ankommen. Dies ist auf den verlängerten Laufweg zurückzuführen. Wird ein größeres Bauteil untersucht, muss eventuell die Membran getauscht werden. Durch das erneute Einfüllen des Koppelmittels kann es zu einer Änderung der Laufzeitverzögerung kommen. Nach jedem Tausch der Membran sollte also eine Kalibrierung an einer definierten Stelle durchgeführt werden.

4.2. LABORMESSUNGEN

Für die beiden anderen, in Tabelle 4.3 genannten Sensoren, wurden vergleichbare Messungen durchgeführt, die in den Abbildungen 4.6 und 4.7 zu sehen sind. In den Signalen des Sensors C603 (Abb. 4.6) fällt auf, dass bei der trockenen Ankopplung über die Membran kein Echo zu identifizieren ist. Dieser Sensor eignet sich für eine trockene Ankopplung an dicken GFK-Bauteilen folglich nicht.

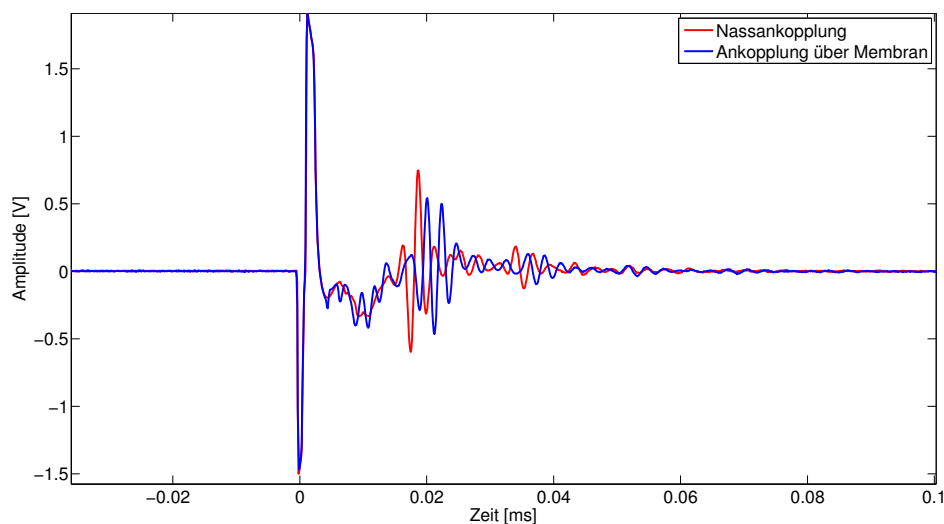


Abbildung 4.7: Vergleich von Nass- und Trockenankopplung des Sensors V601.

Der Sensor V601 ist aufgrund seiner Bauart weniger empfindlich als die Sensoren der C-Serie. Die Rückwandechos der Nass- und der Trockenankopplung sind, verglichen mit dem Sensor C602, geringer. Deshalb ist in diesem Fall die Amplitude des ersten Rückwandechos nicht durch den Hardware-Clipper begrenzt worden und die Amplituden der ersten Rückwandechos von nasser und trockener Ankopplung können direkt verglichen werden. Die Amplitude des ersten Echos der Nassankopplung beträgt etwa 40 Prozent der Amplitude des Sendepulses. Die Amplitude des Echos bei Trockenankopplung ist nicht sehr viel kleiner und beträgt etwa 30 Prozent des Sendepulses. Damit beträgt die Dämpfung der Amplitude durch die trockene Ankopplung nur 25 Prozent. Auch dieser Sensor lässt sich also über eine trockene Ankopplung für die Untersuchung von GFK-Bauteilen verwenden.

4.2 Labormessungen

Das Ultraschall-Echo-Verfahren ist ein Standardverfahren der zerstörungsfreien Prüfung, das in unterschiedlichen Industriezweigen, z.B. zur

Überprüfung von Schweißnähten, schon seit Jahren Anwendung findet. Aufgrund der besonderen Herausforderungen durch das Material und durch die gekrümmten Oberflächen, muss die Anwendbarkeit an Rotorblättern von Windenergieanlagen überprüft werden.

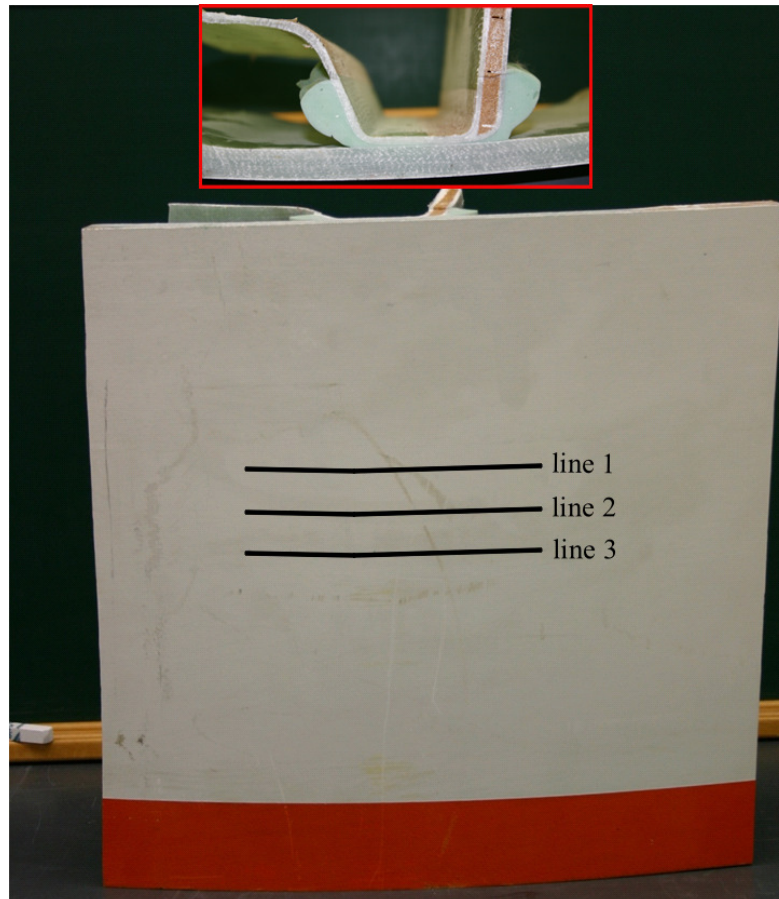


Abbildung 4.8: Rotorblattstück mit Stegverklebung.

Im Labor wurden hierfür Messungen an einem Musterstück aus einem Rotorblatt durchgeführt. Das Musterstück ist 50 cm lang und 50 cm breit und beinhaltet eine Stegverklebung. In Abbildung 4.8 sind drei Messlinien eingezeichnet. Entlang dieser Linien werden mit dem Sensor der Bezeichnung C602 im Abstand von 3 cm Messungen an jeweils acht Messpunkten durchgeführt. Die Geschwindigkeit im GFK des Rotorblattstücks senkrecht zur Faserrichtung beträgt 3000 ± 100 m/s. Die Dicken des GFK im untersuchten Bereich liegen zwischen 20 mm und 25 mm. Reflexionen von der Rückwand sind also bei etwa $15 \mu\text{s}$ zu erwarten. Da beim verwendeten Messobjekt keine Schädigungen der Stegverklebung sichtbar sind, werden zunächst Signale, die auf den Stegverklebung aufgenommen wurden, mit Signalen, die neben der Stegverklebung

4.2. LABORMESSUNGEN

aufgenommen wurden, verglichen. In Abbildung 4.9 sind die A-Scans zweier Messungen zum Vergleich in einer Grafik dargestellt. Das blaue Signal wurde auf der intakten Stegverklebung aufgezeichnet. Bei etwa $16 \mu\text{s}$ ist ein Echo zu erkennen. Bei einer P-Wellengeschwindigkeit von 3000 m/s , entspricht das nach Gleichung 3.6 einer Wanddicke von 24 mm . Die rote Kurve hat ein sehr viel ausgeprägteres Rückwandecho, was bereits bei $14 \mu\text{s}$ zu sehen ist. Dieses Signal wurde in einem Bereich abseits der Stegverklebung aufgezeichnet. Das starke Echo ist das Echo an der Rückwand der GFK-Platte. Die berechnete zugehörige Wanddicke beträgt hier etwa 21 mm . Die Anwesenheit einer intakten Stegverklebung reduziert das klare Echo an der GFK-Rückwand. Es ist also zu erwarten, dass man aus dem Unterschied der Amplituden und Zeitpunkte der Reflexionen die Güte der Stegverklebung beurteilen kann.

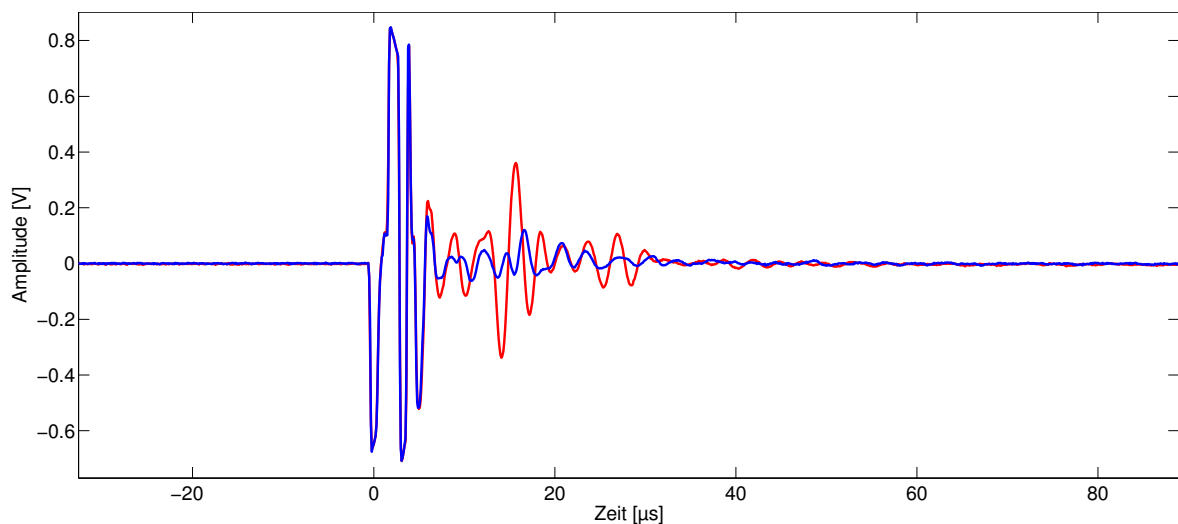


Abbildung 4.9: A-Scans zweier Signale: blau: aufgezeichnet über Stegverklebung, rot: aufgezeichnet über GFK ohne Stegverklebung.

Die Daten der jeweils 3 Messreihen lassen sich am einfachsten als B-Scan interpretieren. In Abbildung 4.10 sind farbcodierte B-Scans der drei Messreihen dargestellt. Die Messpunkte 1, 2, 7 und 8 liegen abseits der Stegverklebungen. Hier erwartet man ein kräftiges Echo. Die Messpunkte 3 bis 6 liegen auf den Stegverklebungen und es ist ein reduziertes Echo zu erwarten. Die oberste Messlinie in Abbildung 4.10 zeigt genau das erwartete Bild. Ein starkes Echo zwischen $14 \mu\text{s}$ und $15 \mu\text{s}$ ist an den Messpunkten 1, 2, 7 und 8 zu erkennen und wird deutlich abgeschwächt bei den Messpunkten 3 bis 6. Auch die dritte Messlinie zeigt dieses Verhalten. Allerdings ist hier bei Messpunkt 8 ein zusätzliches Echo schon bei $9 \mu\text{s}$

μs zu erkennen. Es ist zu vermuten, dass es sich hier um eine Inhomogenität im GFK handelt. Da hier schon ein beträchtlicher Teil der Energie reflektiert wird, ist das Rückwandecho dementsprechend reduziert. Ein Unterschied zwischen den verklebten Bereichen und den Bereichen, die abseits der Verklebung liegen, ist jedoch deutlich zu erkennen.

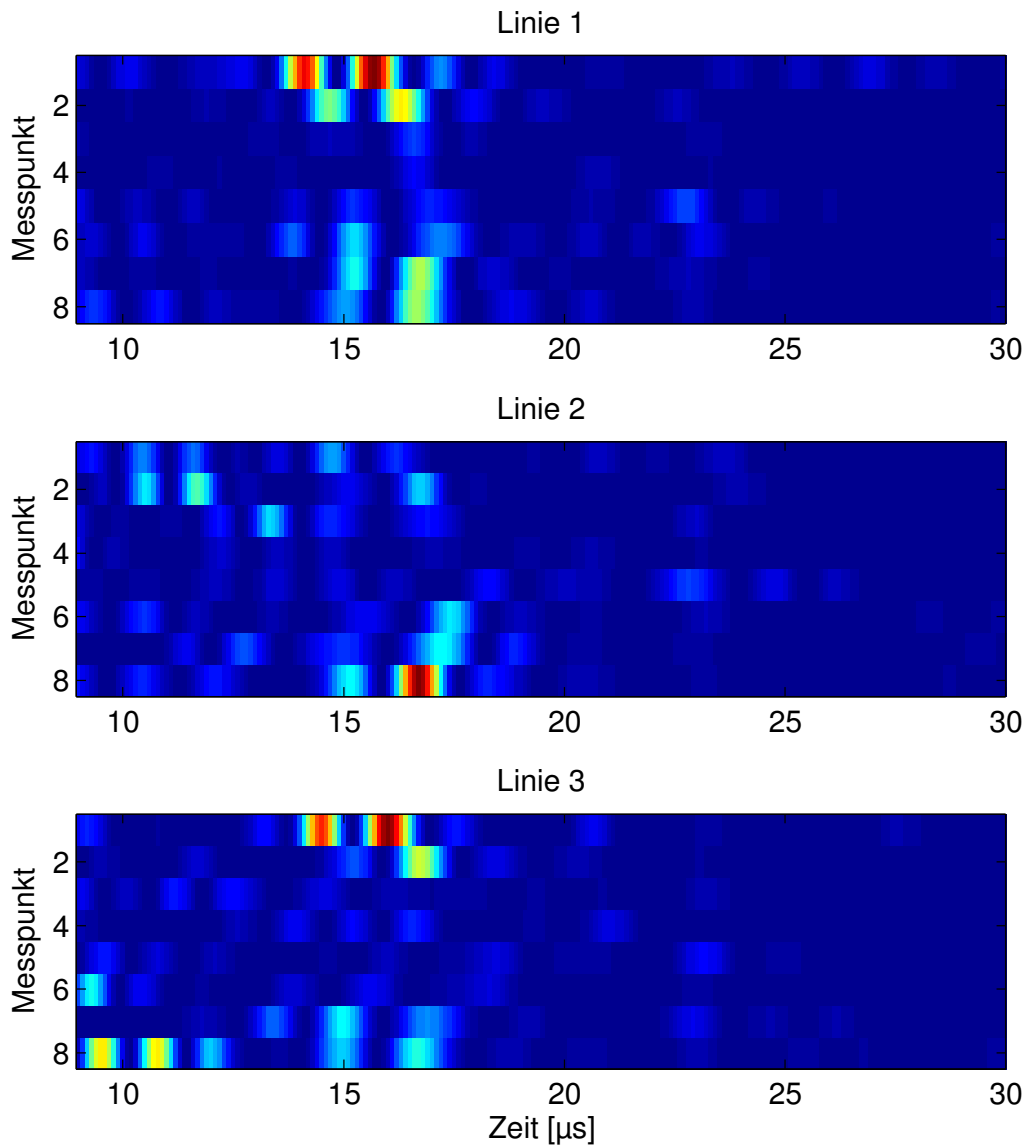


Abbildung 4.10: B-Scans der Messungen an Rotorblattstück über die Stegverklebung mit Sensor C602.

Bei der zweiten Messlinie ist die Stegverklebung nur sehr schwer zu identifizieren. Messpunkt 1 und 2 weisen, ebenso wie Messpunkt 8 der dritten Messlinie, ein frühes Echo auf, was die Intensität des Rückwandechos stark mindert, so dass es kaum noch zu erkennen ist. Auch könnte

4.2. LABORMESSUNGEN

hier die bisher nicht automatisierte Ankopplung eine Rolle spielen. Allerdings haben Vergleichsmessungen mit einem anderen Ultraschallgeber ähnliche Ergebnisse geliefert. Eventuell sind hier Lufteinschlüsse im GFK vorhanden, die eine klare Aussage über die Güte der Stegverklebung unmöglich machen.

Grundsätzlich würde man erwarten in den B-Scans die Stegverklebung als zusätzliches späteres Echo zu registrieren. Das ist in diesen Messungen nicht der Fall. Vermutlich ist die Klebeschicht in diesem Fall zu stark schallschwächend und das reflektierte Signal ist zu klein um noch registriert zu werden. Bei der Anwendung am Rotorblatt wird sich noch zeigen, dass das nicht immer der Fall ist.

4.3 Automatisierte Messung

Manuelle Ultraschall-Echo-Messungen an einem montierten Rotorblatt sind immer noch zeitaufwendig. Deshalb ist es sinnvoll ein automatisiertes Prüfsystem zu verwenden. In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb- und automatisierung wurde ein Prüfroboter entwickelt. In Abbildung 4.11 ist der Demonstrator mit der Halterung für den Ultraschallsensor zu sehen.

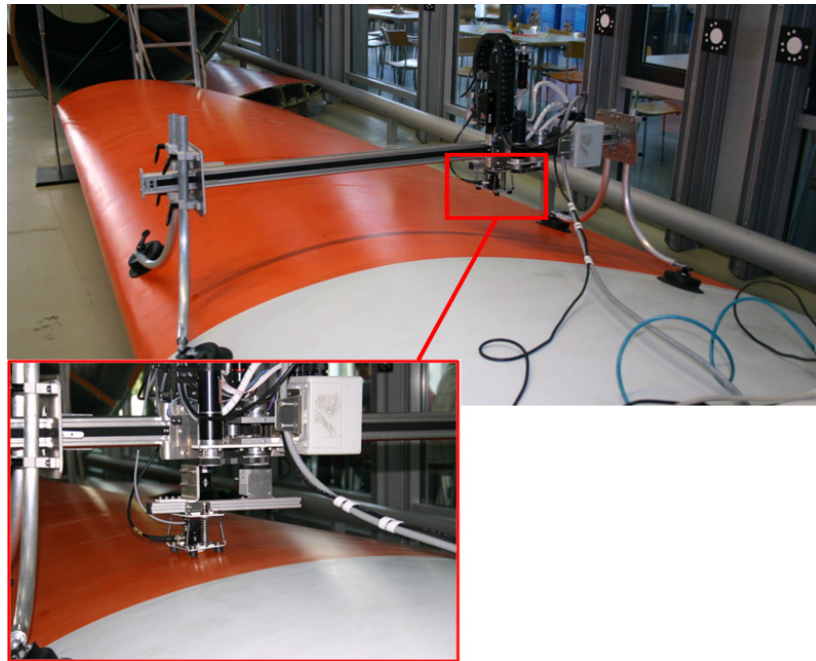


Abbildung 4.11: Automatisiertes System zur Ultraschallprüfung der Rotorblättern von Windenergieanlagen.

Der Demonstrator besteht aus einem Linienportal, das über Saugnäpfe auf der Rotorblattoberfläche angebracht wird. Der Sensor ist in der Z-Achse in einer speziellen Halterung eingesetzt. Der Sensor wird mit einer einstellbar konstanten Kraft angedrückt. Nach einigen Sekunden, bzw. wenn das Messsystem die erfolgreiche Messung an den Roboter zurückmeldet, wird der Sensor zum nächsten Punkt weitergesetzt. Die Kommunikation von Ultraschallmesssoftware und Steuerungsrechner des Portals erfolgt über TCP/IP. Der Ultraschallsensor wird über einen Verschraubungsring in ein Blech eingeschraubt, das über vier Federn beweglich in der Halterung gelagert ist. Die vier Federn sorgen dafür, dass der Sensor auf leicht gekrümmten oder schrägen Flächen senkrecht aufgedrückt werden kann. Bei den Messungen mit dem automatisierten Sys-

4.3. AUTOMATISIERTE MESSUNG

tem wird der Sensor über die in Kapitel 4.1.1 beschriebene Membran trocken angekoppelt. Das System ist so in der Lage selbständig Messungen durchzuführen. Eine Interpretation der aufgezeichneten Daten im Nachhinein ist jedoch notwendig. Das hier entwickelte System soll die Arbeit der Rotorblattgutachter unterstützen. Eine reproduzierbare Ankopplung kann über einen reproduzierbaren konstanten Anpressdruck gewährleistet werden. Durch die Krümmung der Rotorblätter wird der Sensor meist in einem Winkel aufgesetzt. Da die Anpresskraft \vec{F} weiterhin vertikal wirkt, ist die effektive Kraft \vec{F}_{res} auf den Sensor abhängig vom Winkel α (siehe Abbildung 4.12). Für geringe Winkeländerungen ist die Änderung in der Kraft zu vernachlässigen, für größere Änderungen muss die Anpresskraft korrigiert werden.

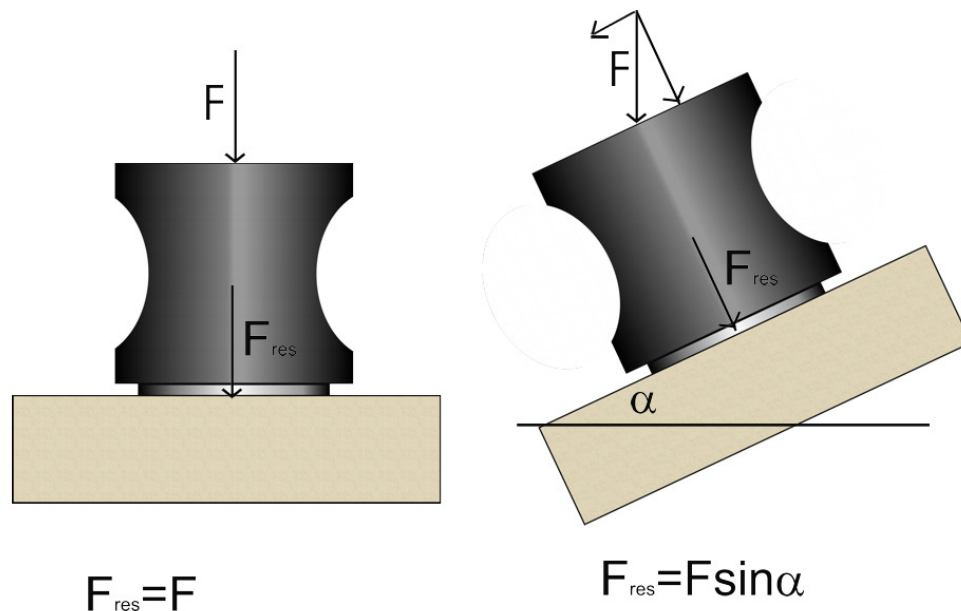


Abbildung 4.12: Einfluss des Winkels auf die effektive Kraft, mit der ein Sensor an die Oberfläche gedrückt wird.

Mit Hilfe des vorgestellten Prüfsystems wurden entlang eines Rotorblattquerschnitts automatisiert Messungen durchgeführt. Die Zeitreihen in Abbildung 4.13 der Messungen zeigen Auffälligkeiten, die durch die Automatisierung zustande kommen. Dargestellt sind die Zeitreihen von 25 Messungen, die in einer Linie im Abstand von je 5 cm durchgeführt wurden. Die oberen 5 und die unteren 2 Zeitreihen zeigen eine sehr starke monofrequente Schwingung. Diese Schwingung besitzt etwa eine Frequenz von 500 kHz. Sie tritt in den Bereichen auf, wo die Krümmung des Rotorblattes im Vergleich zum gerade aufsitzenden Portal so groß wird,

dass die Anpresskraft des Portals zu gering wird. Die Membran wird nicht vollflächig auf die Oberfläche aufgesetzt und das System aus Koppelflüssigkeit und Membran kann frei schwingen. Die Sensorhalterung ist demzufolge für den Ausgleich von Krümmungen noch nicht perfekt optimiert. Eine stabilere Halterung mit besserem Kraftübertrag kann diesen Effekt unterdrücken.

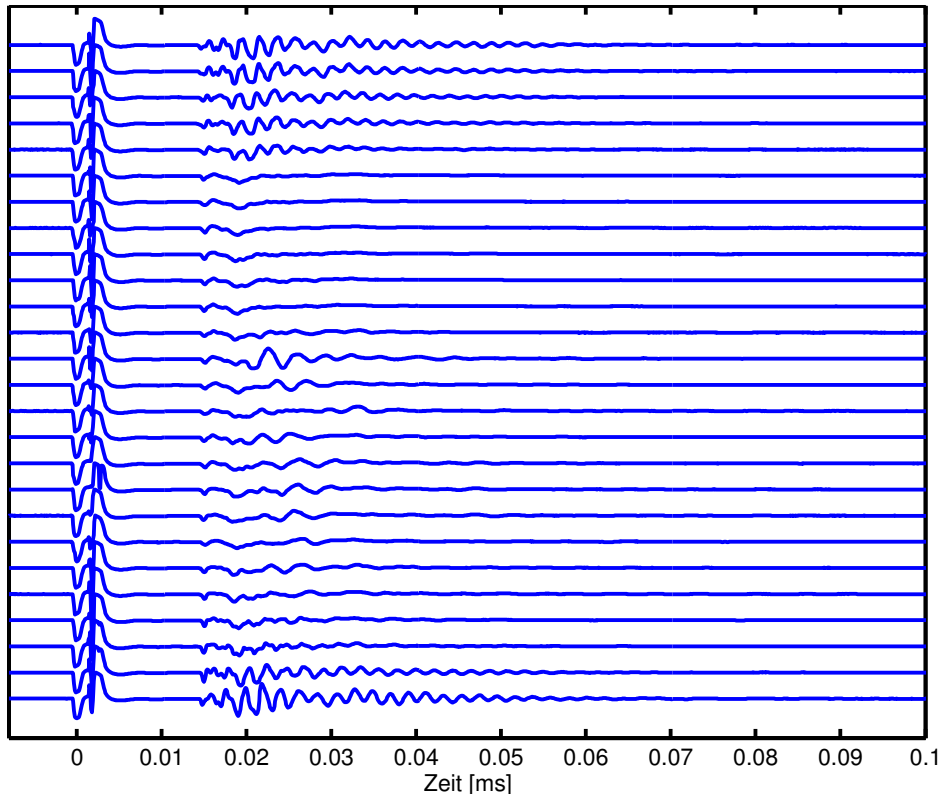


Abbildung 4.13: Zeitreihen der automatisierten Ultraschall-Echo Messungen.

In Abbildung 4.13 wird deutlich, dass bei allen Zeitreihen hinter dem Sendepuls eine Systemtotzeit zu beobachten ist. Einige der Messungen zeigen ein beinahe identisches Signal, was ebenfalls systemabhängig ist und bei Variation der Pulser/Receiver-Einstellungen seinen Verlauf ändert. Die betreffenden Signale wurden in den Sandwich-Bereichen des Rotorblattes aufgezeichnet. In diesen Bereichen erwartet man lediglich ein sehr frühes Echo von der GFK-Grenze. Dieses Echo geht in der Systemtotzeit unter. Die aufgezeichneten Amplituden werden vom System aus Sensor und Pulser/Receiver erzeugt. Diese Signale sind in allen anderen Messlinien ebenfalls enthalten. Um die Störeinflüsse zu regulieren, kann ein solches Signal von den folgenden Messungen abgezogen werden. Damit werden systemspezifische Störeinflüsse ausgeschaltet. Ein

4.3. AUTOMATISIERTE MESSUNG

typisches Signal, das an einer Stelle über dem Kunststoffschäum aufgenommen wurde und im folgenden zur Korrektur der Daten verwendet wurde, ist in Abbildung 4.14 zu sehen.

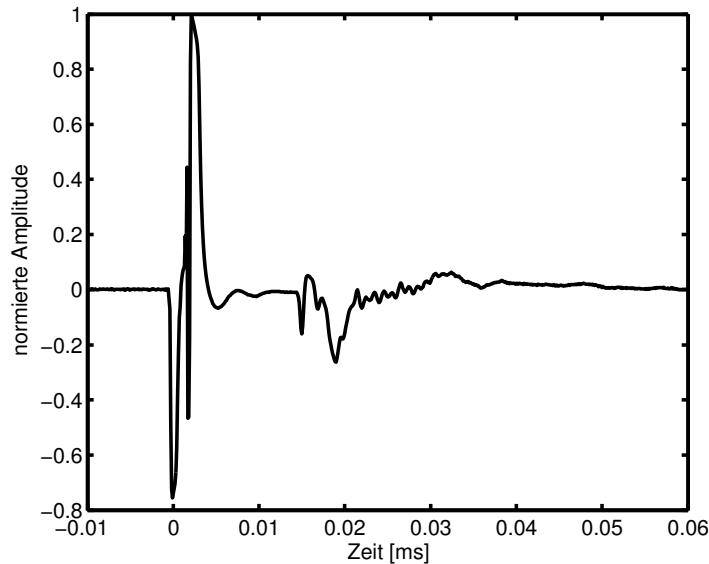


Abbildung 4.14: Signal zur Korrektur der aufgezeichneten Messdaten.

Nachdem die Signale korrigiert wurden, kann man sie in üblicher Weise als farbcodierter B-Scan betrachten. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.15 zu sehen. Zum Vergleich ist ein Foto des Rotorblattquerschnitts neben den Messdaten dargestellt. Zur besseren Übersicht, sind in Abbildung 4.15 die Messpunkte, an denen der Winkel zwischen Sensor und Oberfläche zu groß geworden ist, nicht dargestellt. Außerdem wurde der Sendepuls abgeschnitten. Reflexionen zeigen sich als blaue und rote Bereiche.

Bis zur Position 0,6 m erkennt man keine deutlichen Signale. Diese Messpunkte lagen auf den Sandwichbereichen des Rotorblattes. Hier wird kein eindeutiges Echo registriert, da die Kunststoffschäume sehr porös und somit stark schallschwächend sind. Außerdem ist der Impedanzunterschied zur aufliegenden GFK-Schicht sehr groß, so dass wenig Energie vom einen ins andere Material transportiert wird. Ein sehr starkes Echo ist bei Position 0,60 m bei etwa 0,022 ms zu sehen. Die Messung an Position 0,60 m war die erste, die auf dem GFK-Gurt durchgeführt wurde. Das starke Echo gehört zur Rückwand des GFK. Bei einer P-Wellengeschwindigkeit v_p von 2700 m/s, entspricht das Zeitsignal einer Wanddicke von etwa 3 cm, was mit der tatsächlichen Wanddicke sehr gut übereinstimmt. In den folgenden Messungen zwischen 0,65 m und 1,0 m

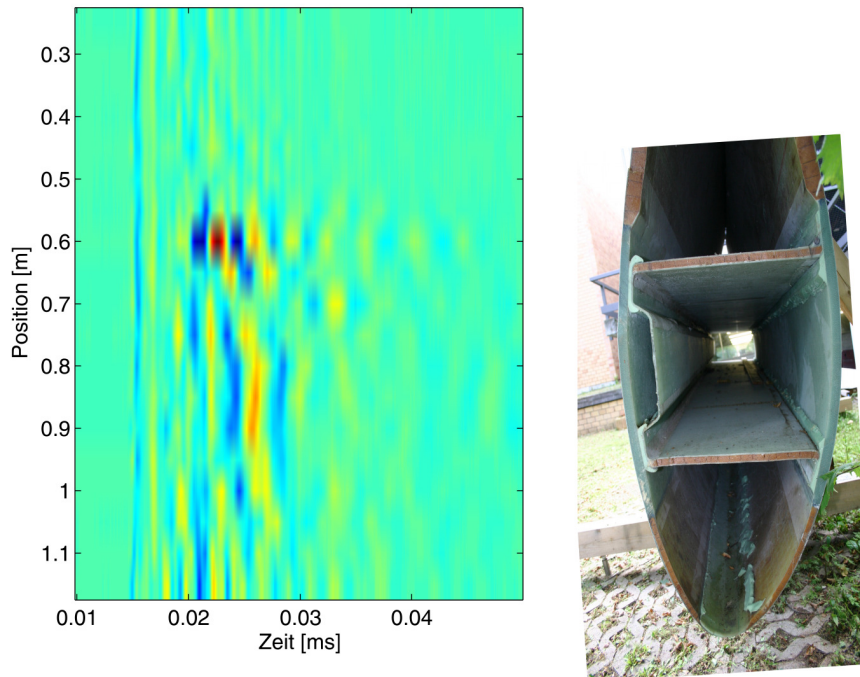


Abbildung 4.15: B-Scan der automatisierten Ultraschall-Echo-Messungen.

sind ebenfalls klare Echos zu erkennen, die in ihrer Amplitude allerdings geringer sind als das Echo bei 0,60 m. Vergleicht man den farbcodierten B-Scan mit dem Foto des Rotorblattquerschnitts, so sieht man, dass der Gurtbereich sehr gut als Bereich starker Echos abgebildet wird. Die Lageänderung der Echos spiegelt die Dickenänderung über den Steg wieder. Die Stegverklebungen befinden sich bei 0,70 m und 0,95 m. An diesen Stellen ist im B-Scan das Rückwandecho verschmiert und nicht mehr sehr deutlich zu erkennen.

Die Energie des Echos bei 0,6 m ist verglichen mit den anderen Messreihen besonders groß. Für die Messung lag das Rotorblattstück flach auf dem Boden und das Linienportal wurde senkrecht darüber montiert. Durch die Krümmung des Rotorblattes war die Position 0,6 m die einzige, in der der Sensor vollständig senkrecht aufgedrückt wurde. Das bedeutet, die effektive Kraft auf die Oberfläche war hier am größten. Dadurch ist auch die Ankopplung am besten. Es wird mehr Energie eingebracht und auch mehr reflektierte Energie wieder aufgezeichnet. Der Versuch zeigt deutlich, dass eine Optimierung der Sensorhalterung und eine Anpassung der Steuerungssoftware notwendig ist. Untersuchungen zum Verhältnis von aufgezeichneten Amplituden, Anpresskraft und Anpresswinkel sind für eine vollständig automatische Anwendung des Prüfroboters sinnvoll.

5 Lokale Resonanzspektroskopie

5.1 Bestimmung der Stoßparameter unterschiedlicher Materialien

In Kapitel 3.3.1 wird bereits beschrieben, dass für die Reaktionen unterschiedlicher Materialien auf einen Hammerimpakt, die Stoßzahl ein grobes Maß darstellt. Je kleiner die Stoßzahl ist, umso weicher ist das Material und umso länger ist auch die Kontaktzeit beim Impakt. Die Stoßzahlen unterschiedlicher Materialien lassen sich durch einen Kugelsprungversuch vergleichen. Nach Formel 3.8 lässt sich die Stoßzahl zwischen einer Kugel und einem Halbraum aus der Kugelsprunghöhe ermitteln (Bögner, 1999).

Für die Stoßversuche wird eine Stahlkugel mit 8 mm Durchmesser verwendet. Diese wird aus 25 cm Höhe auf unterschiedliche Materialien fallen gelassen. Der Fall, Aufprall und Sprung der Kugel wird mit einer Kamera mit 100 Bildern pro Sekunde aufgezeichnet (Abbildung 5.1). Aus den Einzelbildern des Kugelsprunges kann die Sprunghöhe der Kugel ermittelt werden. Es werden verschiedene Materialien und Materialverbünde, die in der Rotorblattherstellung verwendet werden, auf ihre Stoßeigenschaft hin überprüft. Zum Vergleich werden außerdem die Stoßzahlen an zwei Betonen ermittelt. Die Stoßzahlen der unterschiedlichen Materialien sind in Tabelle 5.1 dargestellt.

Die Stoßzahl zwischen Stahlkugel und idealem GFK ist mit einem Wert von $0,82 \pm 0,01$ deutlich höher als die an GFK aus einem Rotorblatt gemessene Stoßzahl von $0,66 \pm 0,02$. Die Qualität der Rotorblattprobe ist allerdings unterdurchschnittlich und es sind Lufteinschlüsse erkennbar. Dazu kommt, dass die Rotorblattprobe, im Vergleich zu den anderen Probekörpern, sehr dünn ist und ein Teil der Energie in Biegeschwingungen umgesetzt wird. Erwartungsgemäß weist die gleiche Probe in einem Bereich mit Kern aus Kunststoffschäum eine noch ge-

Tabelle 5.1: Stoßzahlen verschiedener Materialien.

Material	Stoßzahl	Fehler
GFK ideal	0,82	$\pm 0,01$
GFK Rotorblatt	0,66	$\pm 0,02$
GFK mit Holzkern	0,83	$\pm 0,01$
GFK mit Schaumkern	0,52	$\pm 0,02$
Kunststoffschaum	0,33	$\pm 0,03$
Beton I Zuschlag	0,90	$\pm 0,01$
Beton I Matrix	0,73	$\pm 0,01$
Beton II	0,62	$\pm 0,02$

ringere Stoßzahl von nur $0,52 \pm 0,02$ auf. Die Stoßzahl der Probe mit einem Holzkern hingegen ist mit einem Wert von $0,83 \pm 0,01$ vergleichbar mit der Stoßzahl von ideal laminiertem GFK. Die geringste Stoßzahl der Rotorblattmaterialien besitzt mit einem Wert von $0,33 \pm 0,03$ der Kunststoffschaum. Hier wird der Kugelstoß sehr stark gedämpft und die Kugel springt nur wenige Zentimeter nach oben. Es wird deutlich, dass die verwendeten Materialien sehr unterschiedliche Stoßeigenschaften besitzen und im Verbund je nach Qualität reagieren.

Die beiden Betonproben haben ebenfalls unterschiedliche Stoßparameter. Die Betonproben stammen aus anderen Versuchen. Die genauen Betoneigenschaften wie Größtkorn und w/z-Wert sowie Angaben zum Zement lagen nicht vor. Bei Beton I handelt es sich um einen Beton mit gebrochenem Zuschlag mit einem Größtkorn von etwa 20 mm. Man erhält unterschiedliche Stoßzahlen für Kugeln, die auf Zuschlagskörnern auftreffen und für diejenigen, bei denen zum Teil die Zementmatrix getroffen wird, da Matrix und Zuschlag unterschiedliche elastische Eigenschaften besitzen. Beton II ist ein sehr feinkörniger Beton (Größtkorn ca. 4 mm) und hat eine geringere Stoßzahl als Beton I.

Die angegebenen Fehlergrenzen errechnen sich aus den Ablesefehlern der Kugelhöhen. Die Abwurfhöhe konnte durch eine Abwurfvorrichtung relativ genau bestimmt werden. Hier wird ein Fehler von ± 3 mm angenommen. Die Ablesegenauigkeit der Sprunghöhen hängt von der Geschwindigkeit der Kamera ab, die auf 100 Bilder pro Sekunde begrenzt ist. Dazu kommen Ablesefehler durch die Parallaxe des Kameraobjektives. Der Ablesefehler kann dadurch minimiert werden, dass der Versuchsaufbau die maximale Sprunghöhe in der waagerechten Achse des Kameraobjektives platziert. Eine weitere Fehlerquelle liegt in der Flug-

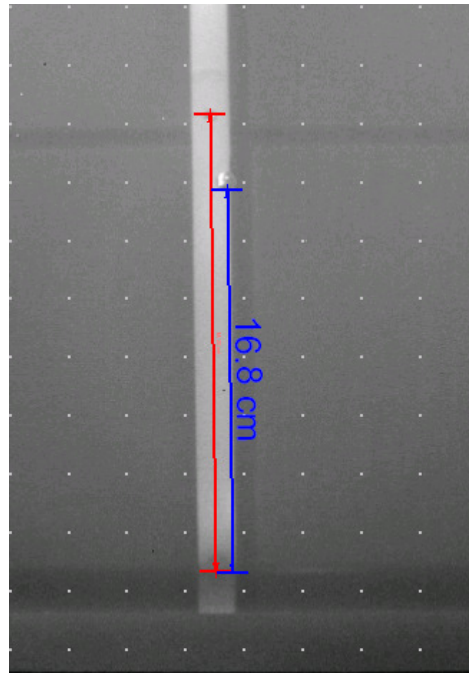


Abbildung 5.1: Ermittlung der Sprunghöhe einer Stahlkugel auf GFK aus dem Einzelbild einer Kamera.

bahn der Kugel. Theoretisch müsste die Kugel sich genau senkrecht nach oben bewegen. Es ist jedoch unvermeidbar, dass die Kugel zusätzlich eine Bewegung in eine der beiden anderen Raumrichtungen ausführt. Die Kugel beschreibt eine Parabel, deren Ausdehnung zu einer Reduktion der Sprunghöhe führt. Die Ablesefehler bei der Sprunghöhe werden insgesamt zu ± 5 mm angenommen. Die Fehler der Messwerte werden nach der gauß'schen Fehlerfortpflanzung berechnet. Der Ablesefehler macht sich bei geringeren Sprunghöhen und somit geringeren Stoßzahlen stärker bemerkbar, da er prozentual höher liegt. Die berechneten Fehler sind jedoch alle sehr gering und Mehrfachmessungen zeigen eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Alle Messungen wurden mehrfach durchgeführt und ein Mittelwert gebildet. Die statistisch ermittelten Fehler aus der Mittelwertbildung sind kleiner als die Fehler, die sich aus den Ableseungenauigkeiten ergeben.

5.2 Versuche an kleinen Probestücken

Die Verwendung von kleinen Probestücken ist dann sinnvoll, wenn die Zugänglichkeit von ganzen Bauteilen nicht gegeben oder sehr schwierig ist. Das Verfahren kann anhand der kleinen Proben auf seine Anwendbar-

keit an dem bestimmten Material getestet werden. Jedoch muss beachtet werden, dass aufgrund der Begrenzung des Probestückes, die Ergebnisse nur qualitativ auf das ganze Bauteil übertragen werden können. Die im Probestück durch einen Hammerschlag angeregten Frequenzen unterscheiden sich von denen im großen Bauteil, da die Begrenzung des Probestücks ein anderes Schwingungsverhalten hervorruft. Somit unterscheiden sich auch die Änderungen im Frequenzgehalt, durch die Klanganregung auf einer Schädigung an kleinen Proben, von denen im gesamten Bauteil. In Kapitel 6 wird gezeigt, dass bei kleinen Proben die Eigenschwingungen des Probestücks die lokalen Defekte überdecken können.

Messungen an kleinen Probestücken mögen auf den ersten Blick einfach erscheinen. Neben Effekten durch die Begrenzung der Probe können auch weitere Randbedingungen die Ergebnisse verfälschen oder überdecken. Besonders die Lagerung der Proben während des Versuchs muss gut überdacht werden. Im Folgenden sind die Effekte unterschiedlicher Anregungen und unterschiedlicher Lagerung der Proben dargestellt.

5.2.1 Variation der Anregung

Für die Messungen in dieser Arbeit wurde ein Impulshammer der Firma Kistler verwendet. Dieser ist mit verschiedenen Hammeraufsätzen ausgestattet, die nach Bedarf gewechselt werden können. Hammer und Aufsätze sind in Abbildung 5.2 zu sehen.

Die verschiedenen Aufsätze leiten, je nach Härte, unterschiedlich hohe Frequenzen in das Bauteil ein. Je weicher das Hammermaterial ist, um so kleiner ist die Kontaktsteifigkeit k_c zwischen Hammer und Material. Bei einer manuellen Anregung des Signals über einen Hammer kann nicht gewährleistet werden, dass bei jedem Impakt die gleiche Energie eingebracht wird. In Kapitel 3.3.1 wurde bereits darauf hingewiesen, dass die Kontaktsteifigkeit bei Kontakt zweier Materialien u.a. von der Kraft abhängt, die sie zusammendrückt. Eine Normierung der Daten macht zwar einen Vergleich der Anregung möglich, jedoch macht man dabei einen Fehler, der nun experimentell bestimmt werden soll.

Die folgenden Untersuchungen wurden an einer 22 mm dicken GFK-Platte durchgeführt, die ideal laminiert wurde und über keinerlei Schädigungen verfügt. Mit dem Impulshammer wurde mit jedem Aufsatz mehrmals auf die Platte geklopft und die Kraftanregung aufgezeichnet. In Abbildung 5.3 und 5.4 sind die Kraftsignale von je 4 Messungen dar-

5.2. VERSUCHE AN KLEINEN PROBESTÜCKEN

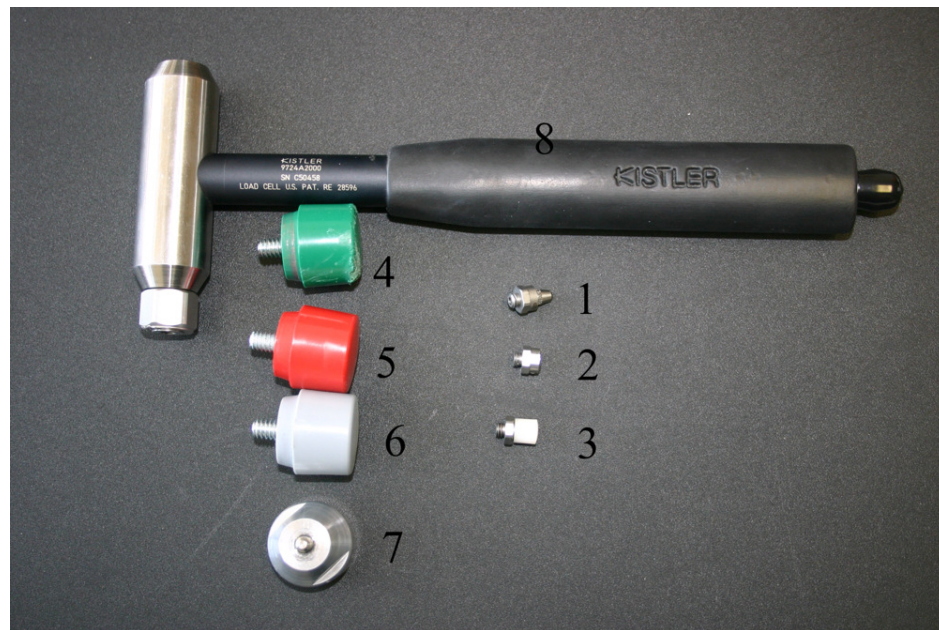


Abbildung 5.2: Impulshammer mit Aufsätzen: (1) Stahlspitze Durchmesser 2 mm, (2) Stahlspitze Durchmesser 7 mm, (3) Delrinspitze, (4) Gummiaufsatz hart, (5) Gummiaufsatz mittel, (6) Gummiaufsatz weich, (7) Adapter zum Anbringen der Gummiaufsätze.

gestellt. In den Abbildungen auf der linken Seite sind auf der y-Achse die gemessenen Amplituden zu sehen. Die Amplituden sind aufgrund unterschiedlich starkem Hammeraufsschlag unterschiedlich groß. Zum Vergleich der Signalformen und Halbwertsbreiten wurden die Signale in den Abbildungen rechts auf die Maximalamplituden normiert.

Die Kraftanregungssignale haben, entsprechend der Theorie, einen gaußförmigen Verlauf. In Tabelle 5.2 ist zu erkennen, dass die Kraftanregungen bei gleichem Hammeraufsatz und untersuchtem Material für kleinere Anregungskräfte, d.h. kleinere Amplituden, breiter werden. Dies war aus Formel (3.11) zu erwarten. Für die Anregung mit der 7 mm Delrinspitze variieren die Halbwertsbreiten zwischen $0,35 \pm 0,04$ ms und $0,40 \pm 0,04$ ms. Es ergibt sich ein Mittelwert von $0,37$ ms mit einer Standardabweichung von $0,03$ ms. Bei Delrin handelt es sich um einen Kunststoff, der sehr hart ist und außerdem über eine hohe Steifigkeit und einen geringen Reibungskoeffizient verfügt.

Regt man mit einem Gummiaufsatz an, so bewegen sich die Halbwertsbreiten zwischen $0,76 \pm 0,03$ ms und $0,96 \pm 0,03$ ms. Dies ergibt einen Mittelwert von $0,88$ ms mit einer Standardabweichung von $0,08$ ms. Der Fehler, der durch unterschiedlich starke Anregungskräfte gemacht wird, nimmt zu, je weicher das Hammermaterial ist und je geringer die

Tabelle 5.2: Maximalamplituden und Halbwertsbreiten der Anregungen mit einem Impulshammer.

	Maximalamplitude [μV]	Halbwertsbreite [ms]
Delrin 1 (grün)	175 ± 4	$0,35 \pm 0,04$
Delrin 2 (blau)	153 ± 4	$0,35 \pm 0,04$
Delrin 3 (rot)	73 ± 2	$0,39 \pm 0,04$
Delrin 4 (schwarz)	55 ± 2	$0,40 \pm 0,04$
Gummi 1 (grün)	67 ± 2	$0,76 \pm 0,03$
Gummi 2 (blau)	51 ± 2	$0,90 \pm 0,03$
Gummi 3 (rot)	50 ± 2	$0,90 \pm 0,03$
Gummi 4 (schwarz)	38 ± 1	$0,96 \pm 0,03$

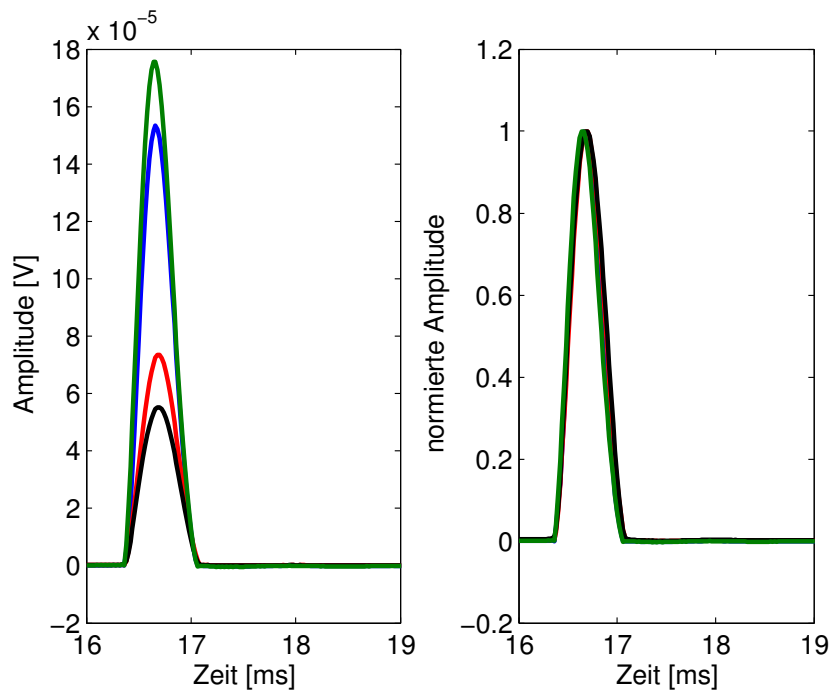


Abbildung 5.3: Zeitreihen der Hammeranregungen mit 7 mm Delrinspitze, links gemessen, rechts normiert.

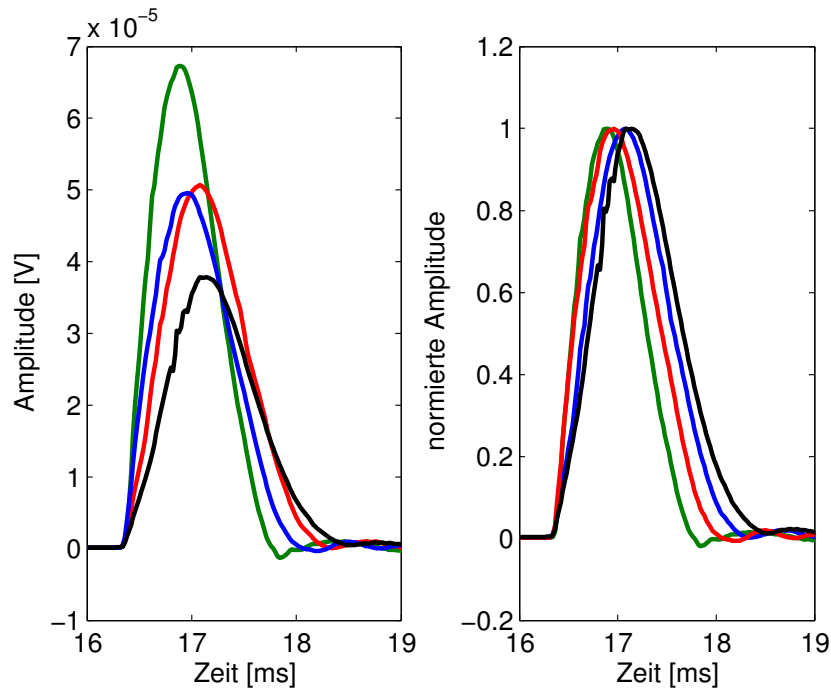


Abbildung 5.4: Zeitreihen der Hammeranregung mit hartem Gummiaufsatz, links gemessen, rechts normiert.

Anregungskraft ist. Es ist also von Vorteil für weitere Untersuchungen eine möglichst harte Spitze zu verwenden. Außerdem ist mit den breiten Gummiaufsätzen eine reproduzierbare Anregung schwieriger, da man sowohl mit der Kante des Aufsatzes als auch mit der vollen Fläche auf-treffen kann, was die Kontaktdauer erheblich verändern kann. Auch bei einer Anregung mit einer harten Spitze muss man beachten, dass sich bei sehr geringen Anregungskräften bzw. bei sehr stark variierenden An-regungskräften der Messfehler vergrößert. Eine möglichst kontinuierlich gleich starke Anregung sollte also angestrebt werden. Außerdem ist zu beachten, dass raue Oberflächen eine gute Reproduzierbarkeit negativ beeinflussen.

Bei diesen Messungen wurde gezielt mit unterschiedlich großen Kräf-ten manuell angeregt. Es ist anzunehmen, dass die Streuung in den Amplituden bei einer manuellen Anregung maximal in diesem Rahmen schwanken. Bei der Verwendung harter flacher Hammerspitzen, wie z.B. Delrin, ist der Fehler, der durch unterschiedlich starke Anregungen ge-macht wird, sehr gering. Bei Verwendung der Delrinspitze trat ledig-lich eine Änderung der Halbwertsbreiten um 0,05 ms auf. Die erwartete Verbreiterung der Signale durch einen Materialwechsel oder Defekte im

Material ist eine Größenordnung größer. Die Hammeranregung mit der Delrinspitze ist somit für die Untersuchung von GFK-Bauteilen gut geeignet, da sie aus Kunststoff besteht und durch ihre Verwendung eine Beschädigung des GFK ausgeschlossen werden kann.

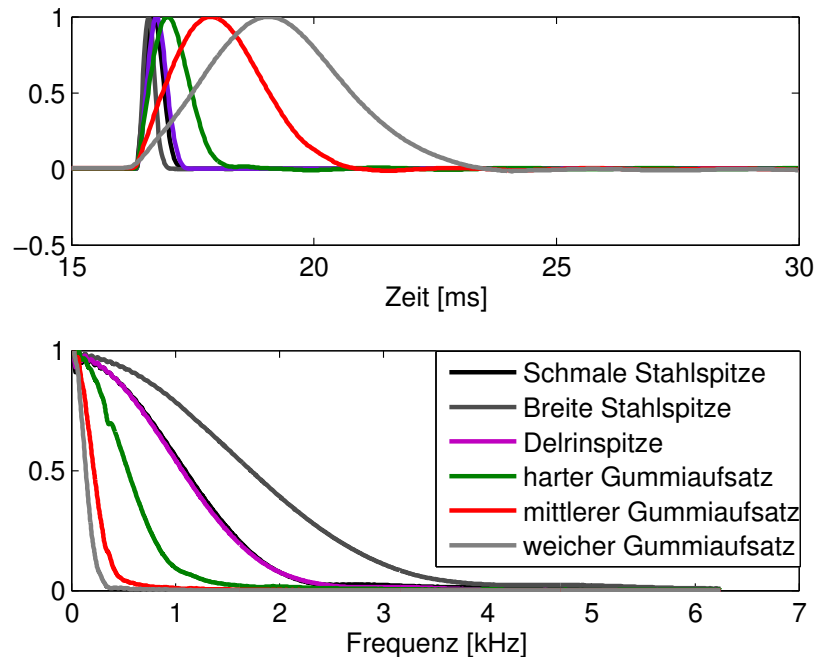


Abbildung 5.5: Vergleich der unterschiedlichen Hammeraufsätze; oben Zeitreihen, unten Amplitudenspektren.

In Abbildung 5.5 sind die gemittelten Kraftanregungssignale der verschiedenen Aufsätze im Vergleich dargestellt. Erwartungsgemäß sind die Zeitsignale breiter, je breiter und je weicher die Hammerspitze ist. Am schmalsten ist die Anregung bei der Verwendung der 7 mm Stahlspitze. Die 2 mm Stahlspitze erzeugte in diesem Fall ein breiteres Signal, weil es beim Impact auf die Oberfläche der GFK-Platte zu unelastischer Verformung der Oberfläche kam. Das bedeutet, die Stahlspitze beschädigte die Oberfläche des Probekörpers und die Kontaktzeit wurde durch die Deformation verlängert. Etwas breiter als die Signale der 7 mm Stahlspitze sind die Signale der Delrinspitze. Die Delrinspitze liefert ein hinreichend schmales Anregungssignal, so dass allzu große Messfehler durch unterschiedlich starke Anregungen minimiert werden können. Gegenüber Stahl bietet sie den Vorteil, dass das Material bei der Messung nicht beschädigt wird. Da die dünnen Beschichtungen auf Rotorblättern durch einen Impact mit einer Stahlspitze beschädigt werden könnten,

bietet die Delrinspitze hierfür eine Alternative. Die Amplitudenspektren der Kraftanregungssignale zeigen erwartungsgemäß ebenfalls annähernd einen gaußförmigen Verlauf. Je breiter ein Signal im Zeitbereich ist, um so schmaler ist es im Frequenzbereich. Dies ist ein weiterer Grund für die Wahl eines möglichst harten Hammeraufsatzes, da die Anregung eines möglichst breiten Frequenzspektrums gewünscht ist.

5.2.2 Lagerung der Proben

Besonders wichtig ist die Lagerung des Probestückes während des Versuchs. Um ein repräsentatives Bild der Schädigungen zu bekommen, sollte die zu untersuchende Probe nicht auf einem harten Untergrund liegen, da die vom Hammer erzeugten Schallwellen dann auch in die Unterlage eindringen und man das System aus Probestück und Unterlage prüft. Die Proben sollten demzufolge möglichst auf einer schwingungsdämpfenden Unterlage, wie z.B. Schaumstoff, gelagert sein.

Es lässt sich nicht vermeiden, dass die Probe insgesamt oder in Bereichen durch die Hammeranregung eine translatorische Bewegung ausführt. Damit diese Bewegung in allen Bereichen der Probe gleich ist, ist eine vollflächige Auflagerung der Probe wünschenswert. Eine Lagerung in den Schwingungsknoten, wie es bei der Modalanalyse üblich ist, ist hier ein Nachteil.

Bei gekrümmten Proben, wie Rotorblättern von Windenergieanlagen oder aus Teilen von Rohren ist es schwierig, eine flächige schwingungsdämpfende Lagerung zu realisieren. Es können hier geometrisch bedingt bestimmte Bereiche veränderte Anregungszeiten des Hammerimpaktes und veränderte Frequenzgehalte der Klangsignale aufweisen. Das muss bei der Interpretation der Daten beachtet werden.

Die im folgenden verwendete Probe ist sehr stark gekrümmt. Die Messungen wurden lediglich zu Testzwecken durchgeführt. Ein geeigneter Aufbau zur Lagerung der Proben stand nicht zur Verfügung. Um eine möglichst schwingungsdämpfende Lagerung zu gewährleisten und die Probe gut gegen Bewegungen abzustützen ohne sie zu fest zu halten, wurde das Probestück auf den Knien des Durchführenden gehalten. Die dabei auftretenden Effekte sind im Folgenden beschrieben.

Ein Beispiel für die Effekte, die durch inhomogene Lagerung und Krümmung kleiner Proben auftreten können, sind in Abbildung 5.6 zu sehen. Die Messungen wurden an einem 30 cm langen und 12 cm breiten Ausschnitt aus einem Kunststoffrohr mit einem Durchmesser von 50 cm

(DN 50) mit Nadelfilz als Trägermaterial durchgeführt. Die Probe wurde während der Messungen auf den Knien des Durchführenden gelagert. Es wurde ein Messraster mit 5 Punkten in x-Richtung und 14 Punkten in y-Richtung, die jeweils im Abstand von 2 cm zueinander lagen, verwendet. Die Lage der Messpunkte wird im Folgenden entsprechend der Abbildung 5.6 in Koordinaten (x/y) angegeben.

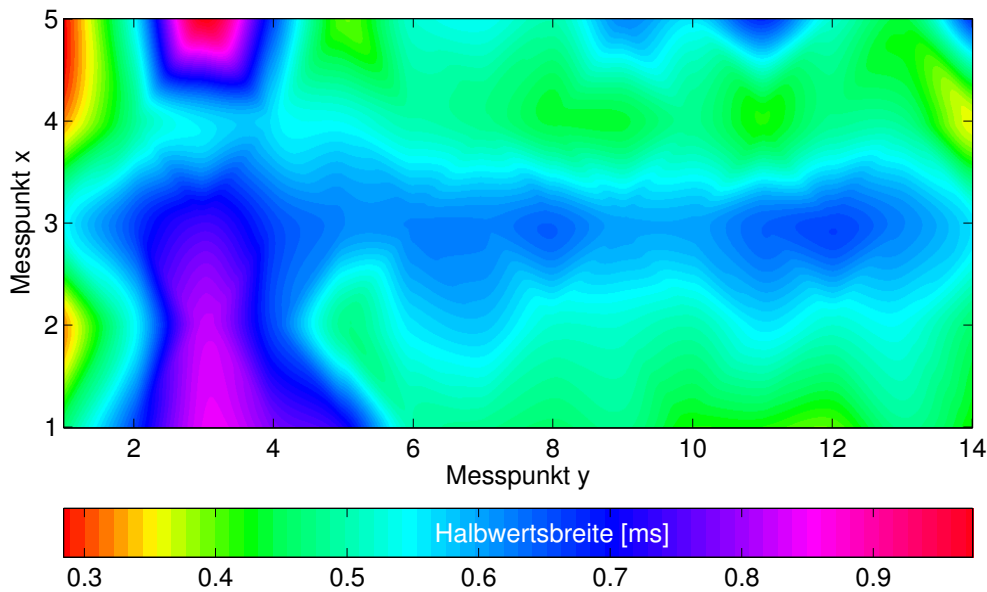


Abbildung 5.6: Halbwertsbreiten der Hammersignale auf einem gebogenen Probestück.

In Abbildung 5.6 ist in der Dauer der Anregungssignale die Krümmung des Rohres wieder zu erkennen. Bei den Messpunkten bei $x=3$ sind die Anregungssignale verbreitert. Das Probestück weist in diesem Bereich keine Schädigung auf. Die Anregung erfolgt hier direkt senkrecht auf die Rohrfläche, so dass das Probestück keine Rotationsbewegung, die die Kontaktzeit verkürzt, ausführen kann. Das Bild entsteht also durch die Geometrie und die Lagerung der Probe. Diese oder ähnliche Effekte können im Zweifelsfall die zu detektierenden Schädigungen überdecken.

Zusätzlich ist in Abbildung 5.6 ein Bereich vergrößerter Kontaktzeiten im Bereich der Messpunkte 2 bis 4 auf der y-Achse zu erkennen. In diesem Bereich lag die Probe auf dem Knie auf, was durch die weichere Unterlage zu einer Verbreiterung der Signale führt. Auch wird in diesem Bereich die Rotationsbewegung, die die Anregungszeiten verkürzt, durch die weiche Auflagerung abgemindert. Das zweite Knie zeichnet sich in den Halbwertsbreiten nicht ab. Dies kann daran liegen, dass das

5.2. VERSUCHE AN KLEINEN PROBESTÜCKEN

Probestück nicht exakt symmetrisch auf den Knien auflag und die Lagerung auf dem zweiten Bein härter war. Es wird deutlich, wie wichtig eine homogene Lagerung für die Interpretation der ausgewerteten Daten ist.

In den Spektren der aufgezeichneten Klangsignale erkennt man deutliche Unterschiede zwischen den Signalen, die auf den Knien angeregt wurden und denen, bei denen ein freies Schwingen der Probe möglich war. Als Beispiel sind in Abbildung 5.7 die normierten Amplitudenspektren von zwei Klangsignalen dargestellt. Das schwarze Signal gehört zur Anregung am Messpunkt mit den Koordinaten (4/4), wo das Probestück auf dem Knie auflag. Das rote Signal gehört zum Messpunkt mit den Koordinaten (2/8), wo das Probestück frei schwingen konnte.

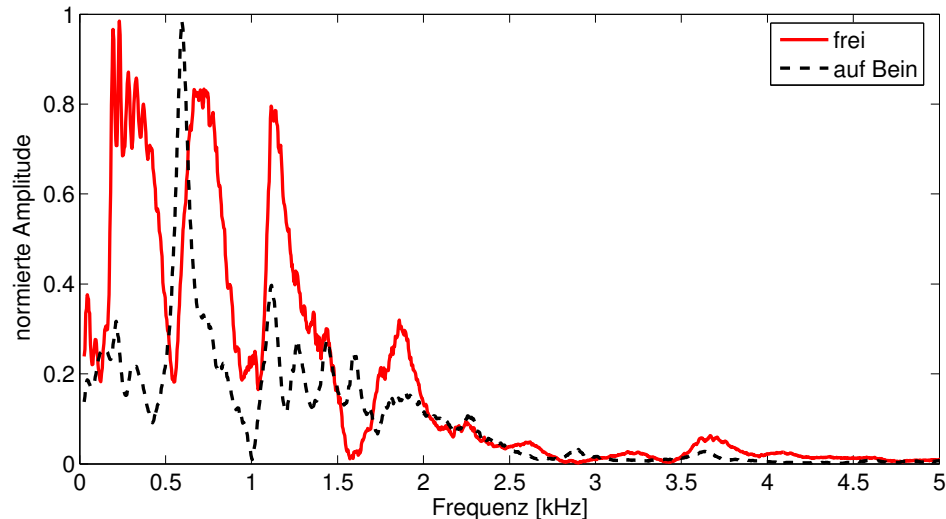


Abbildung 5.7: Normierte Amplitudenspektren zweier Klangsignale auf einem gebogenen Probestück.

Das schwarze Signal weist eine dominierende Frequenz bei etwa 0,6 kHz auf. Der wesentliche Unterschied des roten Signals ist, dass dieses drei dominante Frequenzen aufweist, also insgesamt im Klang breiter ist. Dieses Verhalten der Klangsignale zeigt sich über das gesamte Probestück in allen Bereichen. Der angeregte Klang wird durch die Lagerung auf den Knien deutlich verändert. Einige Frequenzen werden vom Knie sehr stark gedämpft.

Zur flächigen Darstellung dieser Ergebnisse, wurde für jeden Messpunkt die Fläche unter den normierten Amplitudenspektren dargestellt. Die Fläche ist deutlich größer, wenn mehrere Frequenzen im Signal stark vertreten sind, und wird kleiner, wenn nur eine dominante Frequenz enthalten ist. Das flächige Ergebnis ist in Abbildung 5.8 dargestellt.

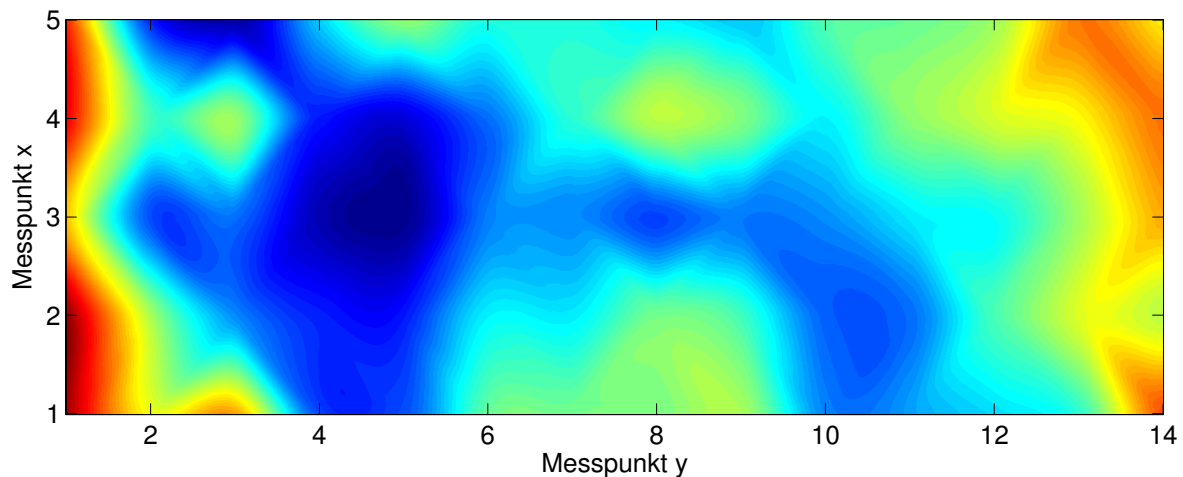


Abbildung 5.8: Summen der normierten Amplitudenspektren auf einem gebogenen Probestück.

Im oberen Drittel ist ein großer blauer Bereich zu erkennen. Dieser gehört zu einem Bereich in dem die Frequenzspektren sehr schmal sind, also nur eine dominante Frequenz enthalten. Dieser blaue Bereich zeigt sehr gut die Lage des Knies, auf dem die Probe gelagert war. Auch das zweite Knie, das in den Anregungssignalen in Abbildung 5.6 nicht zu sehen war, ist bei der Auswertung der Klangsignale gut als zweiter blauer Bereich zu erkennen. Interessant sind auch die oberen und unteren Randbereiche der Probe. Diese zeigen sich als rote Bereiche, also als Bereiche in denen viele Frequenzen im Spektrum enthalten sind. Auch in diesen Bereichen zeigte das Material keine Auffälligkeiten, was darauf schließen lässt, dass es sich hierbei um einen Effekt handelt, der durch die Begrenzung der Probe und deren Lagerung hervorgerufen wird. Hier kann ein sehr kleiner Bereich der Probe nach der Anregung frei schwingen. Dies verursacht einen veränderten Frequenzgehalt des Signals, der nicht auf eine Änderung im Material zurückzuführen ist.

Der Versuch macht deutlich, wie wichtig eine geeignete Lagerung der Proben ist. Darüberhinaus zeigt es außerdem die Sensitivität der beiden Messgrößen Kraftanregung und Klangsignal. Während die Kraftanregungen hauptsächlich auf sehr oberflächennahe oder sehr große Veränderungen reagieren, zeigen sich in den Klangsignalen auch Änderungen, die in größerer Tiefe liegen. Das linke Knie ist bei beiden Auswertungen gut zu erkennen. Hier lag die Probe flächiger auf Muskelbereichen auf. Auf dem rechten Bein lag die Probe auf den härteren Muskelpartien, wodurch es sich in den Anregungssignalen nicht zeigt. In den Klangsignalen ist es dennoch zu erkennen. Eine Auswertung von beiden Messgrößen ist

also in jedem Fall sinnvoll.

5.2.3 Detektion von Schäden

Während die bisher verwendeten Probestücke ungeschädigt waren, weist die in diesem Kapitel untersuchte Probe bereits sichtbar Schädigungen auf. Das Probestück ist in Abbildung 5.9 dargestellt. Es ist aus dem Bereich der Nabe eines Rotorblattes einer Windenergieanlage entnommen. Oberflächlich ist ein Riss zu erkennen, der sich im Querschnitt auch in mehrfachen Delaminationen der einzelnen Schichten zeigt. Die verschiedenen Materialien sind in diesem Bereich des Rotorblattes sehr dick. Außerdem ist zu erkennen, dass das Probestück aus sehr vielen unterschiedlichen Materialien besteht. Im mittleren Bild in Abbildung 5.9 ist die Innenseite des Blattanschlusses zu sehen. Die Außenseite (Abbildung 5.9 unten) ist sehr viel sauberer gearbeitet, da sie bei der Montage und bei Qualitätsüberprüfungen im Betrieb sichtbar ist. Auf der Innenseite sind ein Stück des Steges (① im Bild) und die Stegverklebung (②) zu sehen. Er ist auf einer etwa 6 mm dicken GFK-Schicht (③) aufgeklebt. Unter dieser Laminatschicht befinden sich im rechten geschädigten Teil eine mehrere Zentimeter dicke Harzschicht (④) und schließlich die etwa 1 cm dicke äußere Laminatschicht. Links des Steges ist unter der 6 mm dicken Laminatschicht eine in etwa ebenso dicke Schicht aus Kunststoffschaum (⑤) eingebracht. Diese erstreckt sich nicht bis zum linken Rand der Probe, sondern endet etwa 10 cm vom Rand der Probe entfernt. Unterhalb dieser Schaumschicht befinden sich zwei weitere Lagen GFK, die das Außenlaminat bilden. Ganz links ist die Probe etwas dicker. Dieser Bereich befindet sich im Verklebungsbereich der beiden Halbschalen (⑥). Es ist auch hier ein kleiner Bereich mit orangefarbenem Verklebungsharz zu erkennen. Die Innenseite der Probe wird durch eine senkrecht zu den Laminaten stehende Platte (⑧) von der Außenseite getrennt. Die Verklebung sieht unsauber aus und es sind einige großflächige Reste von Verklebungsharz (⑦) zu sehen. Die Außenseite des Probestückes besteht fast vollständig aus drei Schichten GFK-Laminat (⑨). Rechts im Bild verdickt sich die Probe, da hier ein Bereich von unverstärktem Harz (⑩) eingebracht ist. Auch links im Bild ist eine Verdickung der Probe (⑪) zu sehen, da hier die Verklebung der Halbschalen stattfindet. Außerdem erkennt man einen Rest einer Metallplatte (⑫), die wahrscheinlich zur Befestigung der Flanschbolzen eingebracht wurde. Über dieser Metallschicht ist eine weitere Schicht Harz aufgebracht.

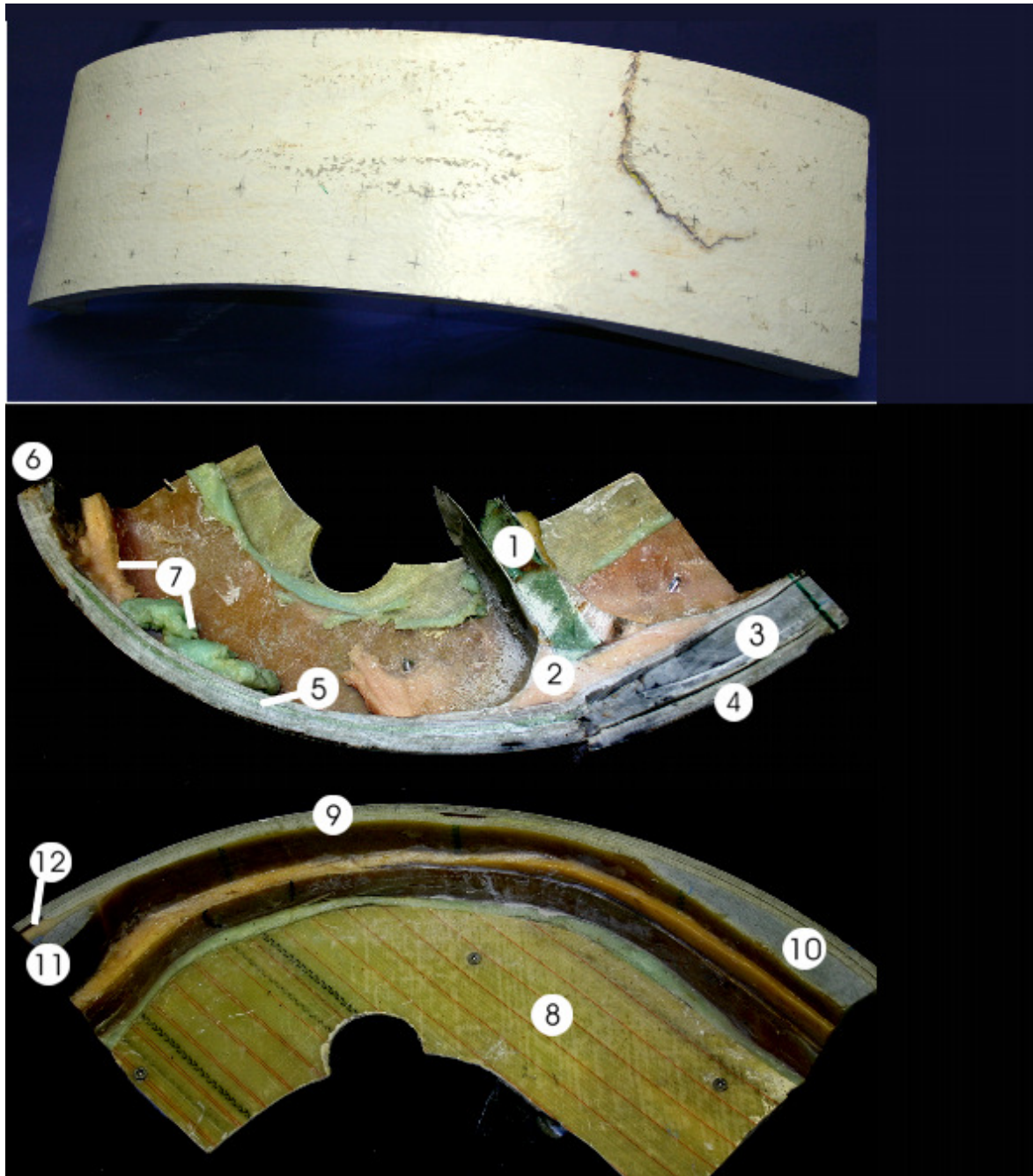


Abbildung 5.9: Aufsicht und Querschnitt der Rotorblattprobe.

5.2. VERSUCHE AN KLEINEN PROBESTÜCKEN

An diesem Probestück wurden Messungen entlang eines Rasters mit Messpunkten im Abstand von 5 cm durchgeführt. Die Messpunkte sind in Abbildung 5.9 auf der Oberfläche als Kreuze zu erkennen. An jedem der Punkte wurden zwei Messungen durchgeführt und die Messdaten gemittelt. Die Koordinaten der Punkte werden in der Form (x/y) angegeben.

Zuerst wurden die Halbwertsbreiten der Kraftsignale der Anregung ausgewertet. Die flächige Darstellung der Halbwertsbreiten ist in Abbildung 5.10 zu sehen. Als erstes springt der grüne und blaue Bereich rechts oben in Abbildung 5.10 ins Auge. Er beinhaltet die Punkte (12/1) bis (16/1), (12/2) bis (13/2) und (13/3). Die Halbwertsbreiten sind hier größer als in den anderen Bereichen des Probestückes. In diesem Bereich sind jenseits des Risses, der bis an die Oberfläche reicht, in Abbildung 5.9 Delaminationen der unterschiedlichen Schichten des Rotorblattes zu sehen. Die Delaminationen führen zu einer Verlängerung der Kontaktzeit des Hammers mit der Rotorblattoberfläche, da der Hammer die delaminierten Schichten zusammendrückt. Tatsächlich bildet sich hier die Delamination der obersten beiden Schichten ab. Die Delamination der untersten Schichten, die im Bereich der Koordinaten (14/2) bis (16/2) noch vorliegt, bewirkt keine signifikante Änderung in den Halbwertsbreiten, da hier etwa 4 cm ungeschädigtes Material über der Schädigung liegen.

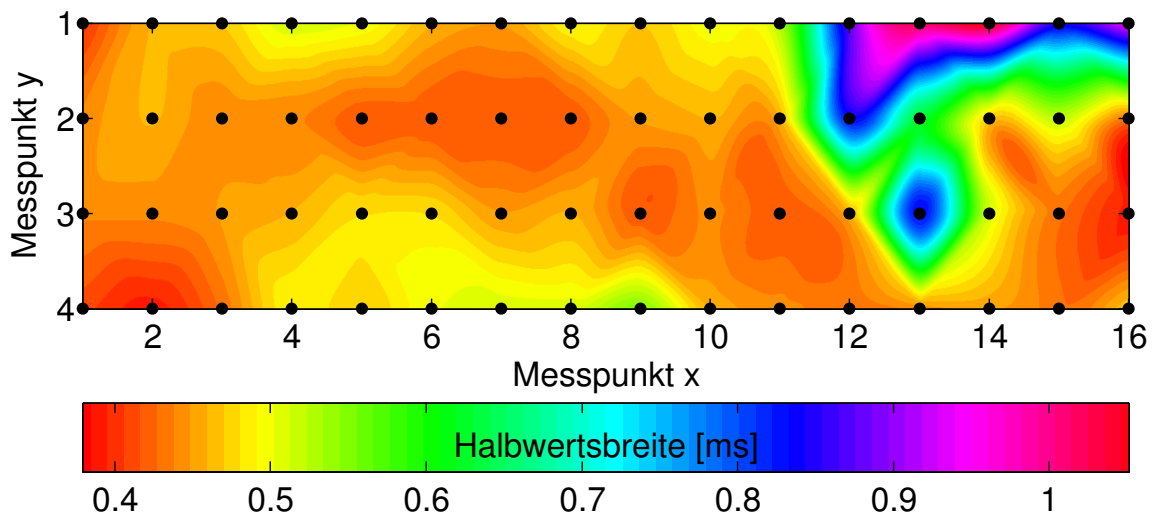


Abbildung 5.10: Halbwertsbreiten der Kraftsignale der Hammeranregung an Probestück aus Flanscbereich.

Der Bereich zwischen den x-Werten 1 bis 3 zeichnet sich durch sehr kurze Halbwertsbreiten aus. Hier ist das Material sehr dick und besteht

aus GFK und Harz, das insgesamt sehr hart und sehr steif ist. Dies führt zu sehr kurzen Kontaktzeiten und somit zu schmalen Halbwertsbreiten. Besonders kurz ist die Kontaktzeit an den Punkten mit den Koordinaten (4/1) und (4/2). Im Querschnitt ist hier ein Stück der eingelagerten Metallplatte zur Befestigung des Rotorblattes an der Nabe zu sehen. Dieses führt offensichtlich noch zu einer Erhöhung der Steifigkeit. Die Verdickung des Materials an der Stelle, wo die Trennwand angebracht ist, kann in Abbildung 5.10 entlang der x-Reihen 2 und 3 als roter Bereich identifiziert werden. Ab einem x-Wert von 10 wird das Material insgesamt wieder dicker, da hier der Steg aufgeklebt ist. Auch das zeigt sich in verkürzten Halbwertsbreiten.

Die wesentlichen strukturellen Bereiche der Rotorblattprobe bilden sich in Veränderungen der Halbwertsbreiten der Anregungssignale ab. Bereiche, die wesentliche Schädigungen aufweisen zeigen sich noch deutlicher, soweit die Schädigungen nahe genug an der Oberfläche liegen. Da nur sehr wenige Bereiche eines Rotorblatts so große Materialdicken aufweisen, wie dieses Probestück, ist zu erwarten, dass sich Schädigungen bei Untersuchung ganzer Rotorblätter in den Anregungssignalen gut abbilden.

Nachdem bereits die Hammeranregung Auskunft über mögliche Schädigungen gibt, werden nun die Klangsignale ausgewertet. Diese wurden mit einem Messmikrofon aufgezeichnet. Die Amplitudenspektren der Klangsignale, die am Probestück aufgezeichnet wurden, sind in Abbildung 5.11 zu sehen. Da die Klangänderungen sich hauptsächlich in Änderungen im Bereich höherer Frequenzen zeigen, sind die Amplitudenspektren der Klangsignale logarithmisch dargestellt. Für jede y-Koordinate sind die Amplitudenspektren der Klangsignale der 16 x-Werte farbcoodiert dargestellt.

Die oberste Messreihe zeigt ab x-Messwert 10 Änderungen im Frequenzgehalt der Klangsignale. Die Frequenzen zwischen 2 kHz und 5 kHz sind in den Spektren erhöht. Die erhöhten Frequenzen beginnen bei Messpunkt 10 und 11 etwa bei 2,5 kHz, bei den folgenden Messpunkten bereits bei 2 kHz. Ab Messpunkt 12 sind die Klangsignale auf dem geschädigten Material angeregt worden. Die Frequenzänderung ist ein Ergebnis der Materialveränderung durch die Schädigungen. Dass Änderungen bereits an den zwei Punkten vor der deutlichen Schädigung auftreten, liegt an der unmittelbaren Nähe der Schädigung. Durch die Schädigung ändert sich das lokale Schwingungsverhalten bereits im angrenzenden Bereich. Außerdem befindet sich hier die Stegverklebung,

5.2. VERSUCHE AN KLEINEN PROBESTÜCKEN

was eine Materialänderung zur Folge hat. Das wiederum beeinflusst den Klang. Auch das zweite Messprofil ($y=2$) zeigt Frequenzänderungen, beginnend an Messpunkt 11 und besonders stark für die x-Werte 12 und 13. Dies passt sehr gut zu den sichtbar geschädigten Bereichen und auch zu den Messungen der Hammeranregung, die für $y=2$ ebenfalls Änderungen für x-Werte 12 und 13 anzeigen.

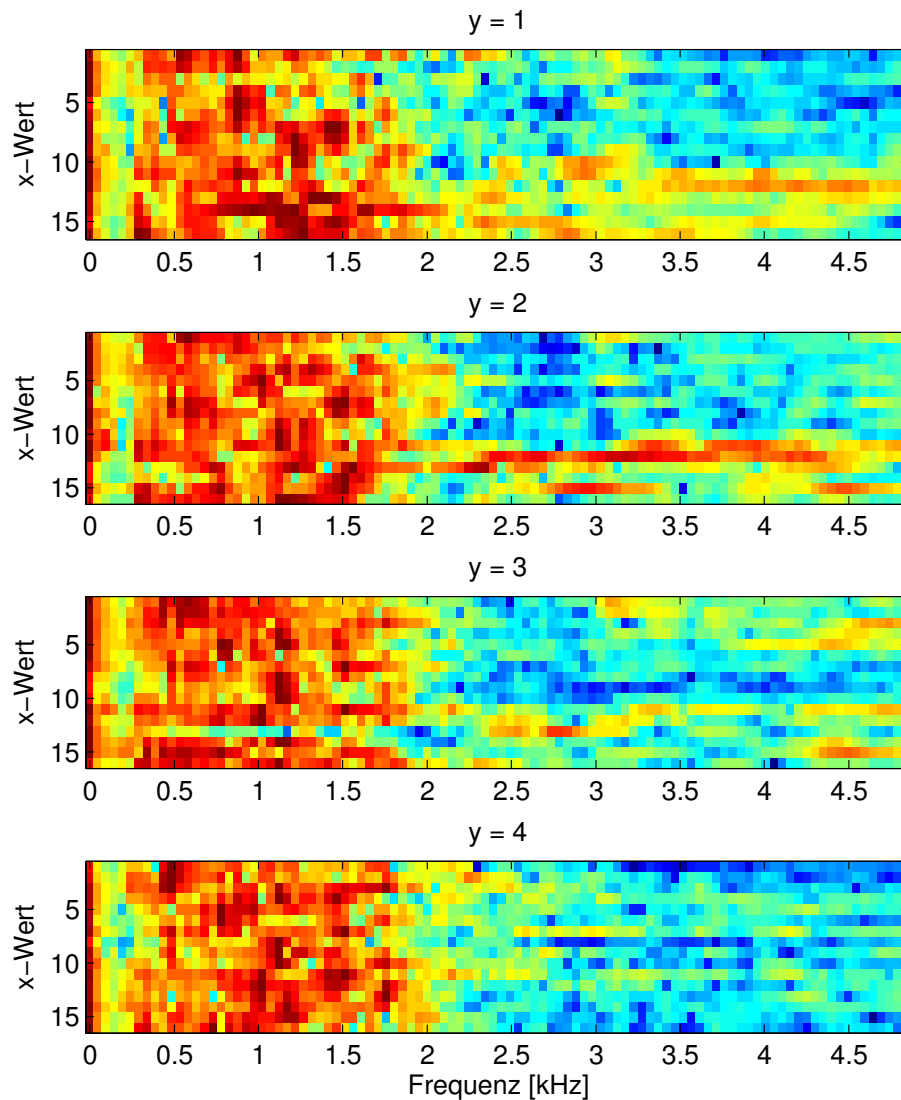


Abbildung 5.11: Logarithmierte Amplitudenspektren der Klangsignale, aufgezeichnet an Probestück nahe dem Flansch.

In der dritten Messzeile ($y=3$) sind die Frequenzänderungen geringer und hauptsächlich auf die x-Werte 12 und 13 konzentriert. Die sichtbare Schädigung ist hier wesentlich geringer und führt deshalb auch zu einer weniger starken Klangänderung. In dieser Messzeile sind außerdem

Frequenzänderungen zwischen 3 kHz und 5 kHz an den Messpunkten $x=1$ bis $x=5$ zu sehen. Schädigungen sind hier äußerlich keine zu erkennen. Allerdings können hier durchaus innere Materialveränderungen vorliegen, die von außen nicht sichtbar sind. In Messzeile $y=4$ sind keine eindeutigen Frequenzänderungen auszumachen, da hier das Material, zumindest äußerlich, ungeschädigt vorliegt.

Die Schädigungen im Material führen nach Anregung durch einen Hammerimpuls zu unterschiedlichen Klangsignalen. Die Unterschiede sind hörbar und lassen sich über eine Auswertung im Frequenzbereich auch sichtbar machen. Die Auswertung ist nicht ganz trivial und wird mit Sicherheit durch die Begrenzung des Probestücks stark beeinflusst. Die Ergebnisse lassen sich nicht direkt auf Messungen an vollständigen Rotorblättern übertragen, da das Materialverhalten im kompletten Rotorblatt, z.B. aufgrund von Spannungsverhältnissen, nicht mit einem kleinen Probestück vergleichbar ist. Außerdem ist das getestete Probestück aus einem Bereich des Rotorblattes, der für regelmäßigen Inspektionen mit den hier entwickelten zerstörungsfreien Prüfverfahren eher von geringer Relevanz ist. Im Flanschbereich hat man es mit dickeren und anderen Materialien zu tun als im restlichen Blattkörper. Eine visuelle Inspektion ist hier meist sehr gut möglich, da der Flanschbereich von innen und außen zugänglich ist. Die Schädigung am Probestück sind keine typischen Rotorblattschäden.

5.3 Messungen an großen Probestücken

Die Ergebnisse von Schwingungsuntersuchungen an kleinen Objekten lassen sich oft nicht direkt auf große Objekte übertragen. Das Schwingverhalten kleiner Proben wird durch die engen Begrenzungen des schwingenden Objektes stark beeinflusst. Um solche Effekte möglichst klein zu halten, wurden Versuche an 5 m langen Proben aus einem Rotorblatt durchgeführt. Das Prüfobjekt ist in Abbildung 5.12 zu sehen.

Das Rotorblatt enthält keine bekannten Vorschädigungen. Zur Untersuchung der unterschiedlichen Eigenschaften des Materialverbunds des Rotorblattes wurde es entlang seines Querschnitts von der Vorder- zur Hinterkante auf der Saugseite entlang dreier Messreihen abgeklopft und die Anregungssignale und der erzeugte Klang aufgezeichnet. Die Messpunkte lagen jeweils im Abstand von 5 cm. Die aufgezeichneten Zeitsignale der Hammeranregung sind in Abbildung 5.13 als farbcodierter



Abbildung 5.12: Rotorblattstück mit einer Länge von 5 m.

B-Scan zu sehen. Zum Vergleich ist ein Rotorblattquerschnitt daneben dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass die Anregungssignale der Messpunkte 1 bis 13 auf allen drei Messlinien etwa nur halb so groß sind, wie die der Messpunkte 14 bis 24. Der Vergleich zum Rotorblattquerschnitt zeigt, dass sich die Messpunkte 1 bis 13 auf den GFK-Laminaten befanden. Die Anregung ist aufgrund der geringeren Nachgiebigkeit der Lamine im Vergleich zu den Sandwichbereichen zu erklären.

Je schmaler ein Signal im Zeitbereich ist, um so breiter ist sein Frequenzspektrum. In Abbildung 5.14 sind sowohl die Spektren der Hammeranregung als auch die der am Mikrofon aufgenommenen Signale zu sehen. Die Spektren der Anregung sind erwartungsgemäß auf den GFK-Laminaten breiter. Die angeregten Frequenzen erstrecken sich, je nach Untergrund, bis zu 2 kHz. Das sind auch die Frequenzen, die im Klangsignal enthalten sind. Allerdings ist der Probekörper nicht für alle Frequenzen gleichermaßen durchgängig. Das bedeutet, dass die Struktur lokal in bevorzugten Frequenzen schwingt. Die Maxima der Klangspektren unterscheiden sich deshalb von denen der Hammeranregung. Bis zur Messung 14 wird kaum Energie bei Frequenzen kleiner als 500 Hz übertragen, obwohl die Anregung in diesem Bereich sehr große Amplituden aufweist. Lediglich bei Messung 5 und Messung 11 klingen auch tiefere Frequenzen mit.

Bei den Messung 14 bis 21 liegt das Amplitudenmaximum der ange-

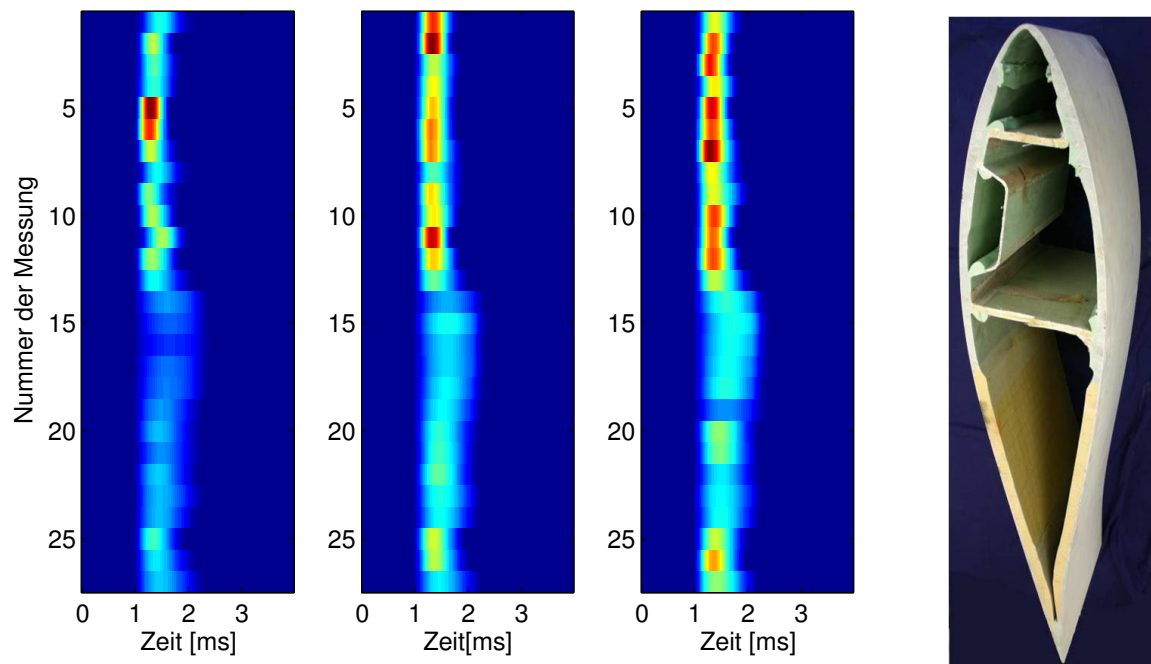


Abbildung 5.13: Zeitreihen der Klanganregung.

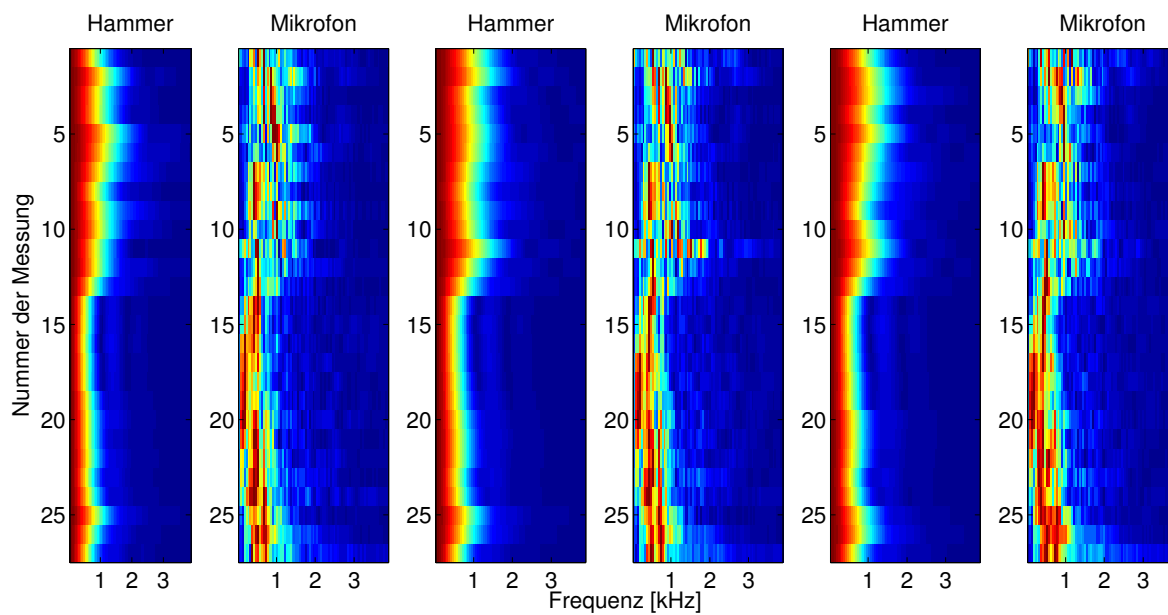


Abbildung 5.14: Amplitudenspektren der Hammeranregung und der Mikrofondaten.

regten Frequenzen im Frequenzbereich bis 500 Hz. Die Klangänderung im Vergleich zu den Hammerschlägen auf den GFK-Laminaten ist deutlich hörbar. In den Messungen 25 bis 27 sind die Maximalamplituden wieder zu höheren Frequenzen verschoben. Frequenzen unterhalb von 200 Hz klingen nicht mit. Diese letzten drei Messpunkte liegen auf den GFK-Laminaten der Hinterkante. In den Zeit- und Frequenzsignalen der Kraftsignale der Hammeranregung sind diese Bereiche nicht klar von den Messungen im Bereich des Sandwichs zu unterscheiden. Die Analyse der Klangsignale und der Anregungssignale im Vergleich liefert also zusätzliche Informationen.

5.3.1 Vergleich von Luft- mit Körperschall

Zusätzlich zu den Aufzeichnungen mit dem Mikrofon wurde der angeregte Körperschall an zwei Stellen auf dem Rotorblatt gemessen. Sensor 1 wurde auf dem Sandwich etwa 50 cm entfernt von den drei Messreihen angebracht. Die Position des Sensors 2 lag auf den GFK-Laminaten nahe der Vorderkante etwa 20 cm von den Messlinien entfernt. Die Amplitudenspektren des Körperschalls sind zum Vergleich zu den Mikrofonsignalen in Abbildung 5.15 zu sehen.

Grundsätzlich sieht der Frequenzverlauf des Körperschalls ähnlich aus wie der des Luftschalls. Die Körperschallmessungen zeigen allerdings nur Frequenzen oberhalb von 200 Hz, was auf die geringe Empfindlichkeit für tiefere Frequenzen der verwendeten Sensoren zurückzuführen ist. Die Tendenz, dass bei einem Hammerimpakt auf dem Sandwichbereich eher tiefe Frequenzen angeregt werden, ist trotzdem zu erkennen. Die Unterschiede zwischen den beiden Beschleunigungssensoren sind auf die unterschiedlichen Positionen bezüglich der Anregung und ihre Lage auf dem Rotorblatt zurückzuführen. Am Sensor 2 werden höhere Frequenzen aufgezeichnet als am Sensor 1. Die Schwingungsdämpfung hängt zum einen vom Material, zum anderen von der Entfernung zur Anregungsquelle ab. Höhere Frequenzen werden grundsätzlich mehr gedämpft als tiefe Frequenzen. Während tiefe Frequenzen von den Lufteinschlüssen im Sandwich nicht so stark beeinflusst werden, können hohe Frequenzen daran gestreut werden. Im Vergleich zu den Mikrofondaten zeigen beide Sensoren besonders bei den letzten Messpunkten die größten Schwächen. Da die Sensorpositionen fest waren, lagen die Anregungen hier am weitesten von den Sensoren entfernt. Die höheren Frequenzen, die sich in den Mikrofondaten zeigen, werden hier nicht mehr aufgezeichnet, da sie über

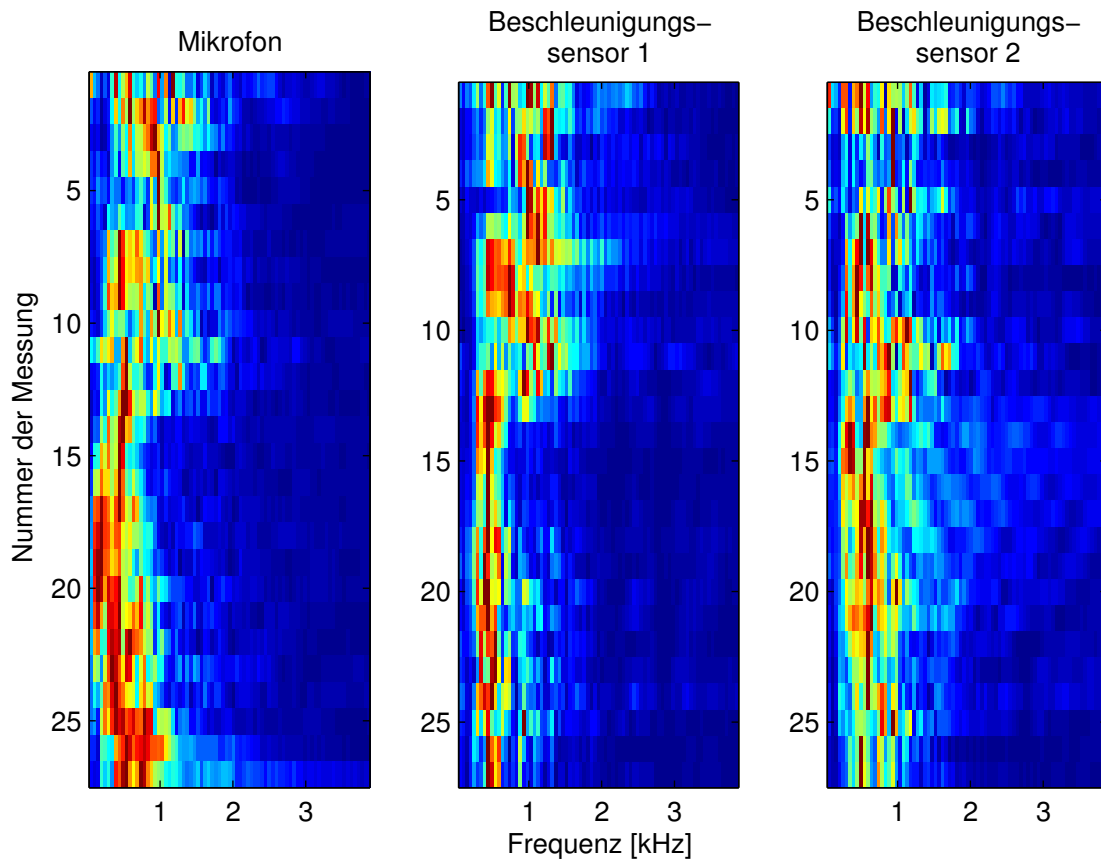


Abbildung 5.15: Vergleich von Luftschall und Körperschall.

den langen Laufweg stark gedämpft werden. An Sensor 1 werden zusätzlich fast durchgängig auch höhere Frequenzen aufgezeichnet, die in den Mikrofondaten besonders auf dem Sandwich nicht zu beobachten sind. Diese kommen durch die Überlagerung der Schwingung des Bauteils mit Oberflächenwellen und Reflexionen an Materialgrenzen zustande. Der Körperschall unterscheidet sich hier also vom erzeugten Luftschall durch den Hammerimpakt.

Die Messung über ein Mikrofon bietet also deutliche Vorteile gegenüber den Körperschallmessungen. Das Mikrofon kann sehr einfach immer nahe der Anregung positioniert werden. Ein Umsetzen der Sensoren ist durch das ständige neue Ankoppeln umständlich. Je nach Sensorposition können die gemessenen Körperschalldaten durch Oberflächenwellen oder Reflexionen von Materialgrenzen beeinträchtigt werden und zeigen nicht mehr das gleiche Verhalten wie der Luftschall. Eine Aufzeichnung des Luftschalls entspricht den bisherigen Klopfprüfungen und ist berührungslos durchführbar. Ein schneller Messfortschritt kann hier also gewährleistet werden.

6 Vergleich der Methoden

In den vorangegangenen Kapiteln wurden zwei Verfahren zur Untersuchung von Rotorblättern von Windenergieanlagen vorgestellt. Beide Verfahren zeigten sich unter Laborbedingungen geeignet, Schädigungen in faserverstärkten Kunststoffbauteilen zu detektieren. Jedes der Verfahren hat aufgrund verschiedener Randbedingungen bevorzugte Einsatzbereiche. Das Ultraschall-Echo-Verfahren ist nicht geeignet, um Schädigungen im Sandwichbereich der Rotorblätter zu detektieren. Allerdings können problemlos auch mehrere Zentimeter GFK durchdrungen werden. Die lokale Resonanzspektroskopie ist prinzipiell auf allen Materialien des Rotorblattes anwendbar. Allerdings reagiert sie sehr viel empfindlicher auf oberflächennahe Defekte.

Beide Verfahren wurden an einer GFK-Platte, in die bereits beim Laminieren Musterfehler eingebaut wurden, getestet. Die Platte ist 45 cm breit, 35 cm hoch und 1 cm dick und wurde freundlicherweise vom Fraunhofer WKI in Braunschweig zur Verfügung gestellt. Mit beiden Verfahren wurden entlang eines Messrasters im Abstand von 3 cm Messungen durchgeführt. Die Ultraschall-Echo-Messungen wurden mit einem Ultraschallprüfkopf des Typs V101 mit einer Mittenfrequenz von 0,5 MHz durchgeführt. Dieser Prüfkopf ist gut geeignet zur Untersuchung von Bauteilen mit geringerer Dicke. Lage und Form der eingebauten Fehler waren im Vorfeld der Prüfung nicht bekannt. Durch Durchleuchten der Platte von unten, konnte die Lage einiger Fehlstellen sichtbar gemacht werden. Ein Foto der durchleuchteten Platte ist in Abbildung 6.1 zu sehen. Durch Einlegen eines Gitters eines anderen Materials ist die Platte in neun Unterquadranten eingeteilt. Im Quadrant A1 sind zwei dunkle Stellen zu erkennen. Die Fehlstelle ist, wie es aussieht ein Gitter eines anderen Materials. In Quadrant A1 sind mehrere kleinräumige Materialveränderungen zu sehen. Im Quadrant A2 ist ein kleines Dreieck, was wohl aus einem anderen Material besteht, zu erkennen. Im Quadrant A3 sieht man einige diffuse dunkle Flecken, die auf eine unterschiedliche Materialdicke oder -qualität hindeuten können. Sehr deutlich ist am Übergang zwischen den Quadranten A2, A3, B2 und B3 ein dunkler Be-

reich zu erkennen, wo vermutlich ein anderes Material eingebracht wurde. Am unteren Rand der C-Quadranten sieht man die Laminatmatten, die vermutlich unzureichend mit Harz durchtränkt worden sind.

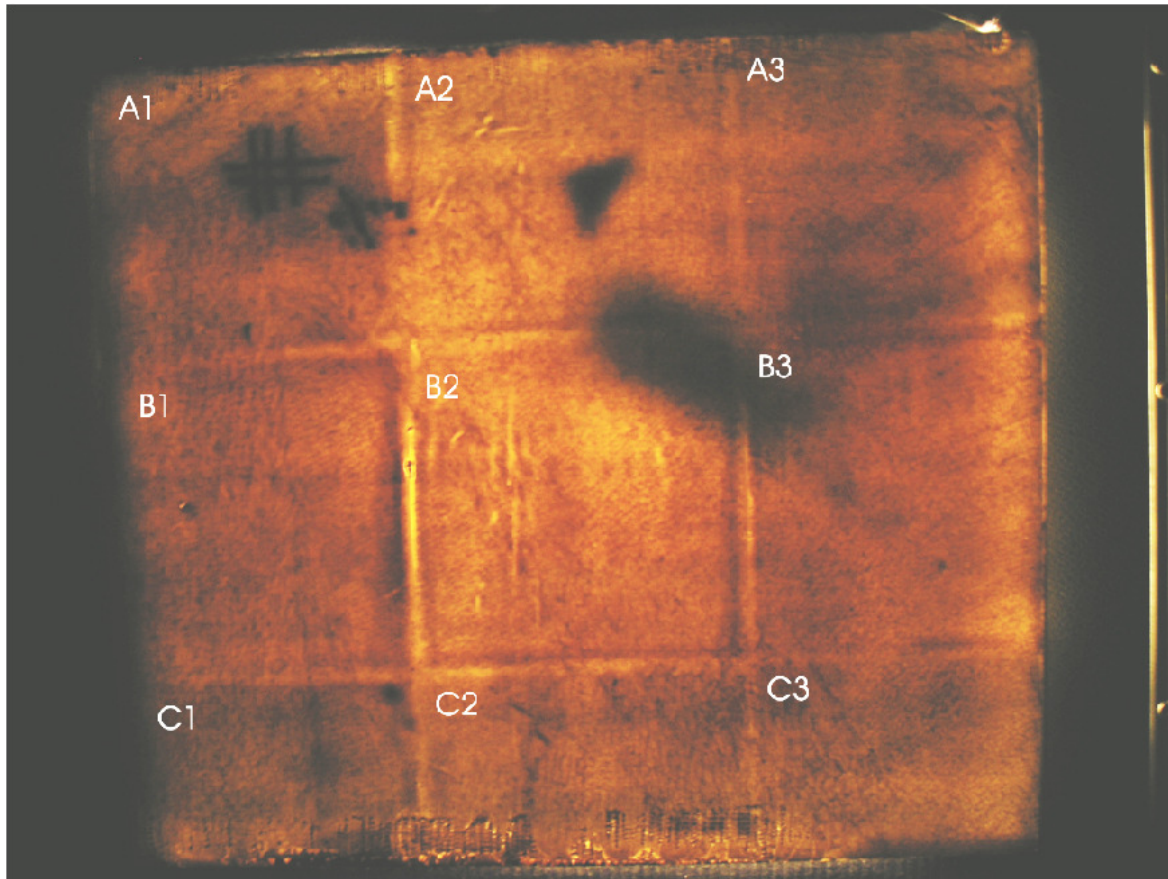


Abbildung 6.1: Foto der durchleuchteten Musterplatte.

Die Pläne über die tatsächlich eingebauten Fehlstellen standen nicht zur Verfügung. Das Foto der durchleuchteten Platte liefert die einzigen Informationen über von außen nicht sichtbare Schädigungen.

In Abbildung 6.2 ist eine Thermografieaufnahme zu sehen, die kurz nach Erwärmung der Platte, gemacht wurde. Hier erkennt man sehr deutlich eine dreiecksförmige Fehlstelle am unteren Rand der Platte. Es handelt sich hierbei um einen sehr oberflächennahen Lufteinschluss. Aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausbreitung in der sich im Dreieck befindenden Luft und dem GFK-Laminat zeigt sich diese Fehlstelle hier sehr deutlich.

Um einen groben Überblick über die inneren Schädigungen zu bekommen, bietet sich an, zuerst die Halbwertsbreiten der Anregungssignale der lokalen Resonanzspektroskopie zu betrachten, da sie sehr schnell ein

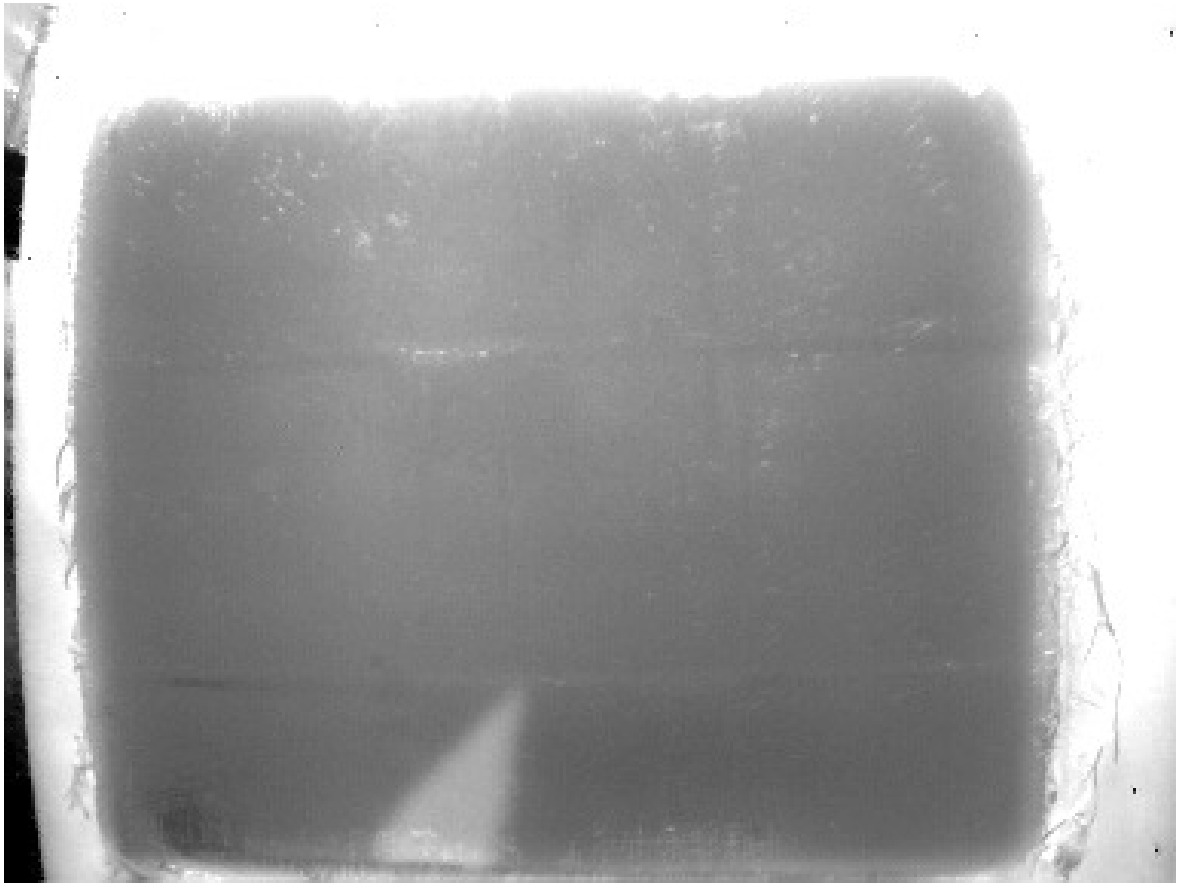


Abbildung 6.2: Thermographieaufnahme nach Erwärmung der Musterplatte. Bild zur Verfügung gestellt vom Fraunhofer WKI in Braunschweig.

grobes Bild der Schädigungen liefern. In Abbildung 6.3 ist der D-Scan der Halbwertsbreiten dargestellt. Als erstes springt der Bereich zwischen 12 cm und 18 cm am unteren Bildrand ins Auge. Hier war beim Durchleuchten keine Veränderung zu sehen. Es wird sich aber herausstellen, dass in diesem Bereich ein sehr oberflächennaher, dreiecksförmiger Lufteinschluss zu finden ist. Der Lufteinschluss war durch das Durchleuchten der Platte nicht zu sehen gewesen, da Luft für sichtbares Licht durchlässig ist. Links oben im Bild erkennt man einen kleinen Bereich mit leicht vergrößerten Halbwertsbreiten von 0,5 ms bis 0,6 ms. Dieser Bereich deckt sich gut mit den in Quadrant A1 vorhandenen inneren Materialänderungen. Auch der große Bereich zwischen Quadranten A2, A3, B2 und B3 lässt sich in verlängerten Halbwertsbreiten von etwa 0,7 ms wiederfinden.

Ein weiterer Bereich verbreiteter Kraftanregung zeigt sich bei der Koordinate (0,12/0,15) und den umgebenden Punkten. Dieser Bereich lässt sich keiner bekannten Schädigung zuordnen. Es könnte sich um tiefer-

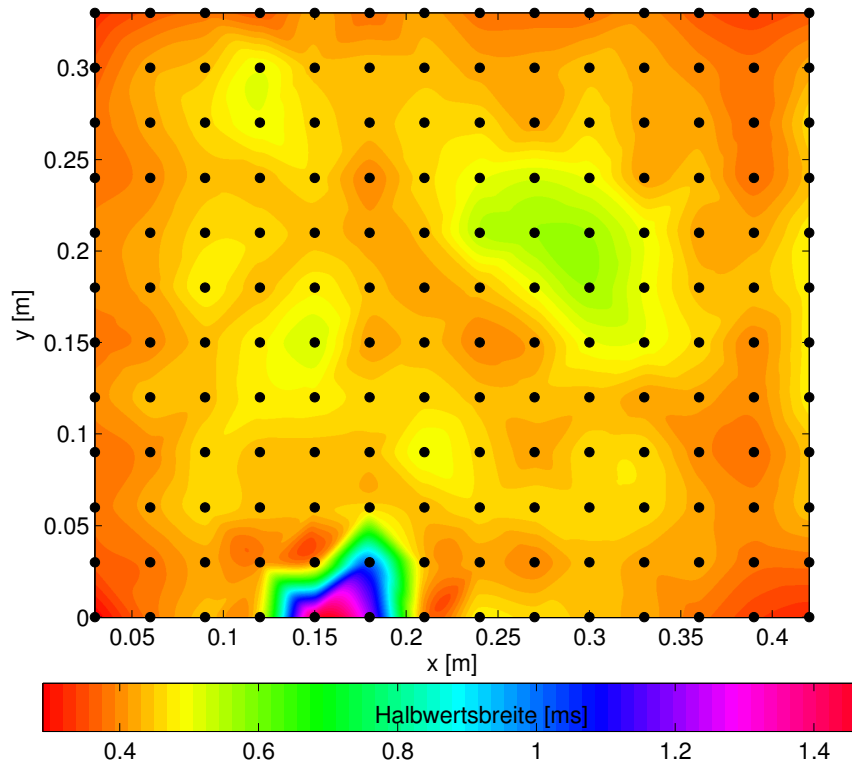


Abbildung 6.3: Halbwertsbreiten der Kraftanregung an der Musterplatte.

liegende Lufteinschlüsse handeln oder um einen Effekt durch die unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheit aufgrund des eingelegten Gitters. In den Halbwertsbreiten der Kraftanregungen zeigt sich das in Quadrant A2 eingelegte Dreieck nicht. Entweder liegt es zu weit entfernt von der Oberfläche, um das Hammersignal signifikant zu beeinflussen oder die Materialänderung hat keine Änderung der Kontaktsteifigkeit zur Folge.

Die Betrachtung der Klangsignale ist in diesem Fall nicht ganz so einfach. Auf einige Phänomene, die bei der Klopfprüfung an begrenzten Strukturen auftreten, wurde bereits in Kapitel 5.2 hingewiesen. Ein weiterer, bisher nicht behandelter Effekt, trat bei der Untersuchung an der Musterplatte auf. In Abbildung 6.4 sind die Amplitudenspektren der 12 Messreihen farbcodiert dargestellt. Es sind Unterschiede zwischen den einzelnen Messpunkten zu erkennen. Jedoch zeichnet sich in den Spektren bereits ab, dass es sich hierbei hauptsächlich um Geometrieeffekte der begrenzten Platte handelt, die sich unterschiedlich in den Frequenzspektren abzeichnen. Die eigentlichen Schädigungen stechen hier nicht ins Auge. Betrachtet man in einer flächigen Darstellung die Summen der normierten Amplitudenspektren, bzw. die Energien, wie es in voran-

gegangenen Kapiteln bereits erfolgreich war, so erkennt man in Abbildung 6.5 die inneren Schädigungen der Musterplatte nicht. Rote Bereiche entsprechen hier Bereichen mit geringen Summen, d.h. das Spektrum an diesen Punkten besteht aus wenigen Frequenzen. Lediglich die sehr oberflächennahe Störung am unteren Rand der Probe zeigt sich als roter Bereich. Ansonsten ist zu erkennen, dass sich die Platte in 3 vertikale Streifen unterschiedlicher spektraler Verteilungen trennt. Die rechte und die linke Seite sehen sich ähnlich und die Mitte unterscheidet sich von den beiden. In der Mitte der Musterplatte befindet sich ein roter Bereich, der beinahe rechteckförmig ist. Da nicht anzunehmen ist, dass die Materialien oder Materialdicken sich so abrupt stark verändern, ist darauf zu schließen, dass hier die Geometrie der Platte eine große Rolle spielt.

Deutlicher werden die Geometrieeffekte, wenn man statt der Gesamtenergie den Energiegehalt schmaler Frequenzbänder im Vergleich betrachtet. Als Beispiel ist in Abbildung 6.6 das Frequenzband von 120 Hz bis 135 Hz dargestellt. Sehr schwach zeichnet sich die Schädigung im unteren Bereich der Platte ab. Der Rest des Prüflings zeigt wieder ein sehr symmetrisches Bild. Die vier Ecken weisen im Vergleich zum Rest der Platte sehr große Energien auf.

Die Erklärung für die symmetrischen Muster, die sich in fast allen untersuchten Frequenzbändern in unterschiedlicher Weise zeigen, ist in der Akustik zu finden. Es handelt sich hierbei um ein ähnliches Phänomen, wie bei den sogenannten Chladni-Figuren (Chladni, 1802). Chladni hat Untersuchungen zu den Eigenschwingungen von runden und rechteckigen Platten gemacht. Hierfür hat er Sand auf eine Metallplatte gestreut und die Platte durch einen Ton zum Schwingen angeregt. Abhängig von der Frequenz des Tones hat die Platte begonnen in ihren Eigenfrequenzen zu schwingen und der Sand hat sich entlang der Schwingungsknoten der Platte angesammelt. Dadurch entstehen symmetrische Muster auf der Platte. Bei den hier beobachteten Mustern, handelt es sich um einen ähnlichen Effekt. Durch die starke Begrenzung der Platte werden durch den Hammerimpakt die Eigenschwingungen der Platte angeregt, so dass man es hier nicht mehr mit einer lokalen Untersuchung zu tun hat. Die lokalen Effekte werden durch die globalen überdeckt. Je nachdem, welcher Punkt zur Schwingungsanregung gewählt wird, wird eine andere Eigenschwingung der Platte angeregt und man erhält somit ein anderes Frequenzspektrum des Klages. Da die Platte symmetrisch ist, sind auch die Eigenschwingungsmoden symmetrisch. Bei der Auswertung der

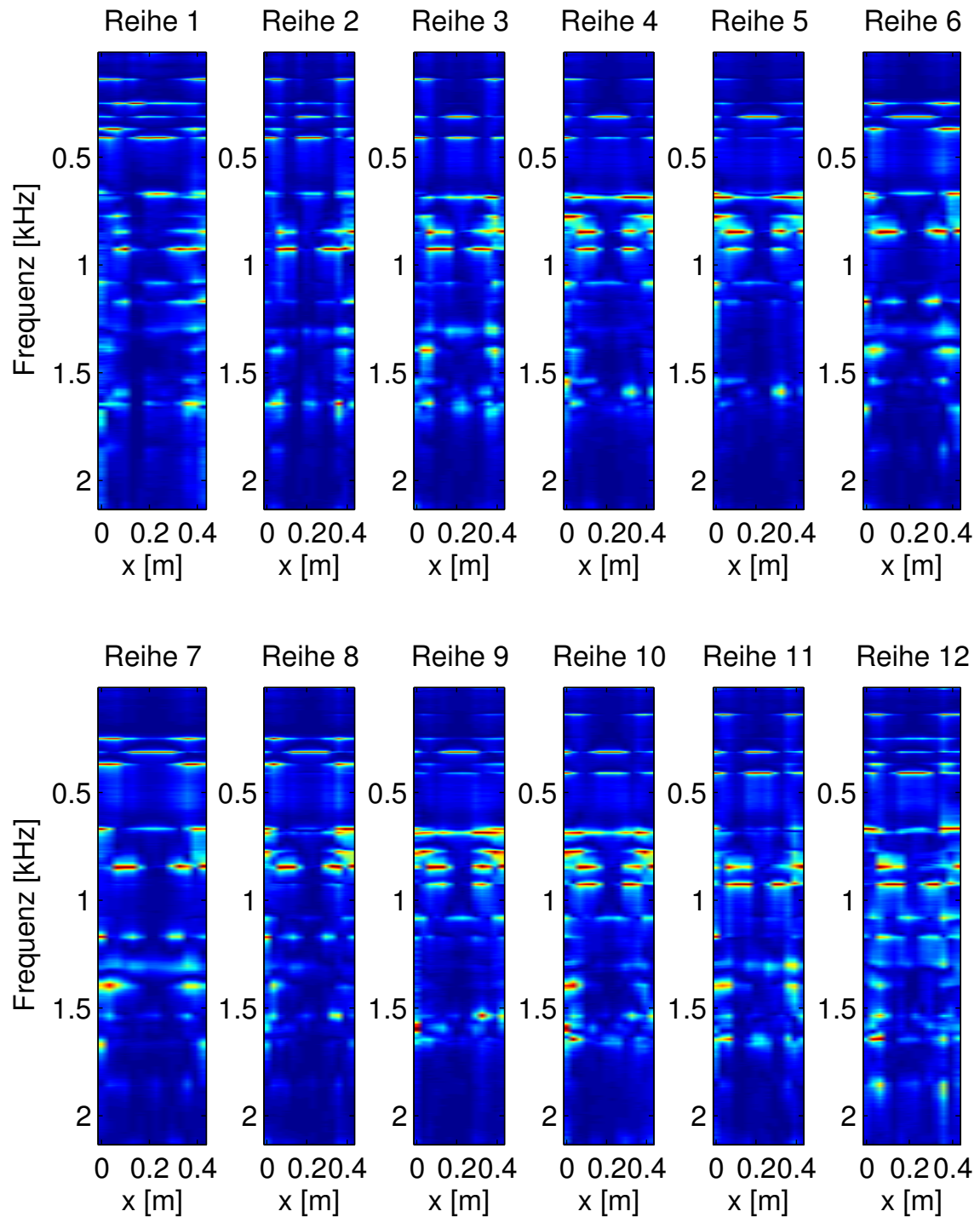


Abbildung 6.4: Normierte Amplitudenspektren der Klangsignale, aufgezeichnet an der Musterplatte.

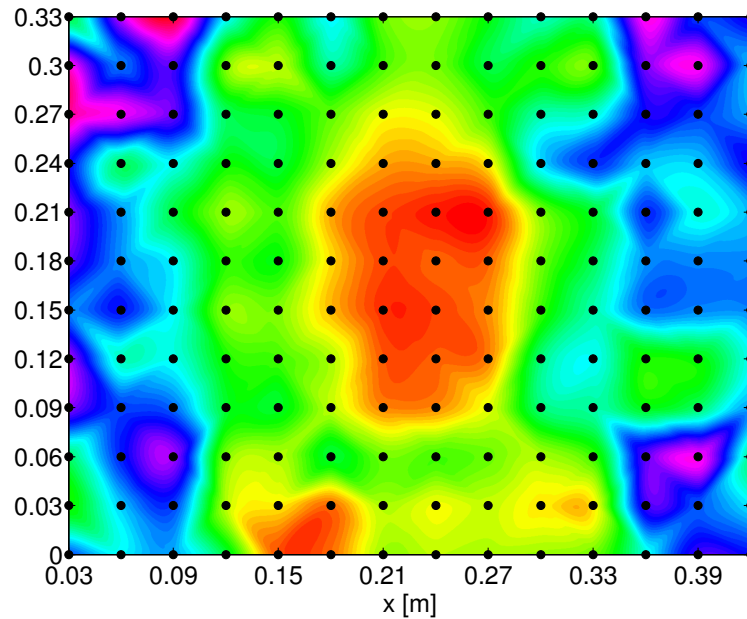


Abbildung 6.5: Flächige Darstellung der Summen der normierten Amplitudenspektren.

Klangsignale bilden sich so ebenfalls symmetrische Strukturen aus. Eine Aussage über innere Schädigungen ist in diesem Fall schwer oder gar nicht möglich. Dieser Effekt wird allerdings bei der Anwendung am kompletten Rotorblatt nicht auftreten, da das Rotorblatt zu groß ist und die Eigenschwingungen des Blattes in einem sehr viel tieffrequenteren Bereich als dem Messbereich zu erwarten sind. Weitere Bilder der symmetrischen Figuren anderer Frequenzbereiche befinden sich im Anhang dieser Arbeit.

Zum Vergleich der Daten der Ultraschall-Echo-Messungen mit der flächigen Darstellung der Halbwertsbreiten der Hammeranregungen der lokalen Resonanzspektroskopie ist eine flächige Darstellung ebenfalls wünschenswert. Eine flächige Darstellung lässt sich über einen C-Scan erreichen. Bestimmte Zeitpunkte werden ausgewählt und zu diesem Zeitpunkt die Amplituden der Signale dargestellt. Mit Hilfe der eigens für das Ultraschallsystem entwickelten Software ist es möglich, Schnitte zu jedem beliebigen Zeitpunkt anzufertigen.

In Abbildung 6.7a ist der Schnitt zum Zeitpunkt $3,68 \mu\text{s}$ dargestellt. Rote und gelbe Bereiche stehen für hohe Signalamplituden, blaue und grüne Bereiche für geringere Signalamplituden. Mit einer angenommenen P-Wellengeschwindigkeit im Material von 2700 m/s entspricht die-

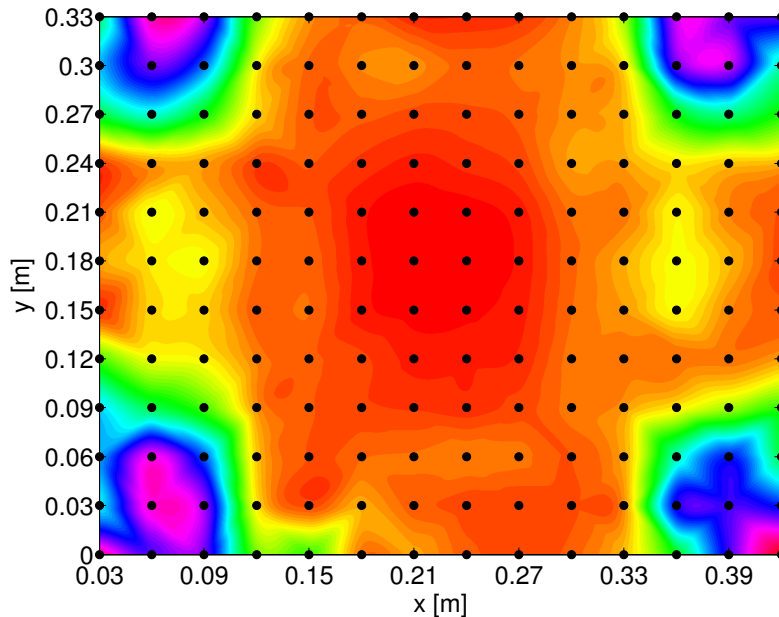


Abbildung 6.6: Energiegehalt des Frequenzbandes von 120 Hz bis 135 Hz.

ser Zeitpunkt einer Materialtiefe von 5 mm. Es ist zu erkennen, dass die Platte nach dieser kurzen Zeit sehr einheitlich abgebildet wird. Zu diesem Zeitpunkt schwingt der Sensor nach dem Sendepuls noch nach. Dieses Nachschwingen wird in der linken oberen Ecke und am linken unteren Rand der Platte von einem reflektierten Signal überlagert, so dass die Amplitude des gesamten Signals hier geringer ist als im Rest der Platte. Bewegt man sich zeitlich etwas weiter und dringt also tiefer in die Musterplatte ein, so erkennt man deutlicher, dass in diesen Bereichen Materialänderungen vorliegen. Deutlich heben sich in Abbildung 6.7b die eingebauten Fehler, die im Quadranten A1 beschrieben wurden, als starke Reflexionen heraus. Hier wird die Amplitudenverteilung zum Zeitpunkt $3,75 \mu\text{s}$ dargestellt. Ebenfalls deutlich zu erkennen ist das Dreieck an der unteren Kante der Platte. Außerdem ist hier noch ein einzelner Punkt erhöhter Energie am Punkt mit der Koordinate $(0,24/0,30)$ zu sehen. Dieser entspricht dem im Quadrant A2 eingebauten dreieckigen Fremdkörper, der durch die lokale Resonanzspektroskopie nicht entdeckt werden konnte.

Ein weiterer C-Scan bei $4,34 \mu\text{s}$ ist in Abbildung 6.8a zu sehen. Neben den bereits erwähnten Fehlstellen in Quadrant A1 und C2 sind hier zusätzlich die eingelegten Trennungen zwischen den Quadranten zu erkennen. Das Gitter zeichnet sich als grüne Linien im Bild ab. Der gewählte

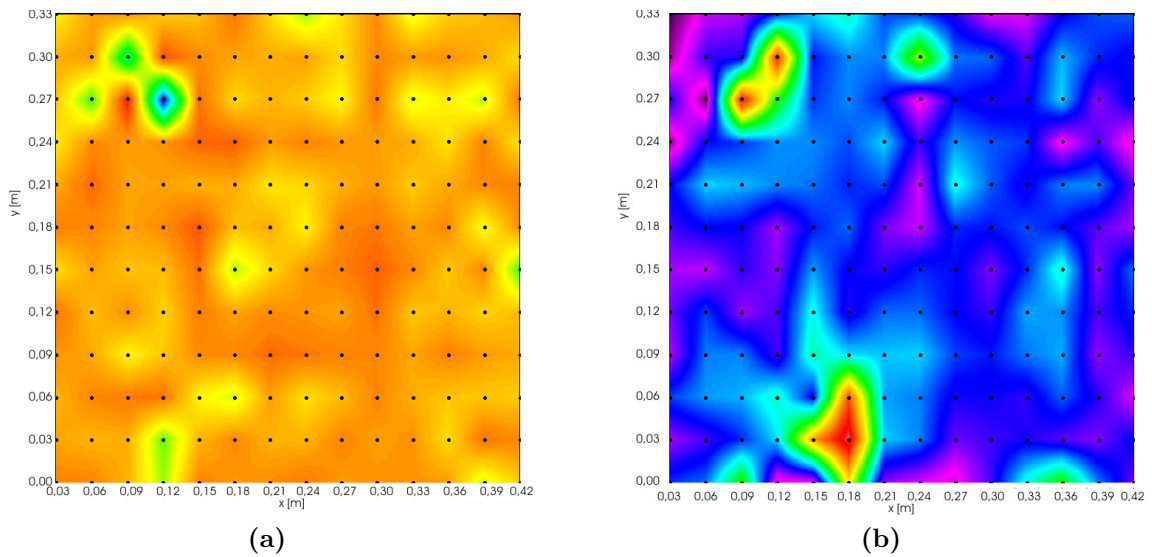


Abbildung 6.7: Energieverteilung der Ultraschall-Echo-Messungen zum Zeitpunkt a) $3,68 \mu\text{s}$ und b) $3,75 \mu\text{s}$.

Zeitpunkt von $4,43 \mu\text{s}$ entspricht bei einer P-Wellengeschwindigkeit von 2700 m/s einer Tiefe von etwa 6 mm . Das Gitter liegt jedoch der Oberfläche viel näher, da es durch die weiße Beschichtung sehr deutlich zu erkennen ist. Die grünen Bereiche kommen hier durch Mehrfachreflexionen zustande. Die Linien zeichnen sich außerdem etwas verschwommen und verbreitert ab. Das liegt an der Koppelfläche des verwendeten Ultraschallsensors von etwa $2,5 \text{ cm}$. Der Sensor ist nicht besonders fokussiert und liefert ein Bild, das die Summe der Effekte widerspiegelt, die über der Koppelfläche auftreten. Ein Defekt oder eine Materialveränderung von wenigen Millimetern Durchmesser erscheint in der Auswertung immer verbreitert. In Abbildung 6.8b ist der C-Scan bei $6,77 \mu\text{s}$ dargestellt. Bei einer angenommenen P-Wellengeschwindigkeit v_p von 2700 m/s entspricht das einer Eindringtiefe von etwa 9 mm . Dieser C-Scan unterscheidet sich in der Farbskalierung von den vorherigen. Hier werden lediglich die positiven Halbwellen der Ultraschallsignale angezeigt. Je nach Prüfaufgabe kann das ein besseres Bild liefern. Für die Darstellung der Materialänderung zwischen den Quadranten A2, A3, B2 und B3 ist diese Darstellung sinnvoll. Die Materialveränderung setzt sich deutlich von der schwarzen Umgebung ab.

Beide in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren eignen sich, um Fehlstellen in faserverstärkten Kunststoffen zu detektieren und zu lokalisieren. Die lokale Resonanzspektroskopie bietet über die Auswertung der

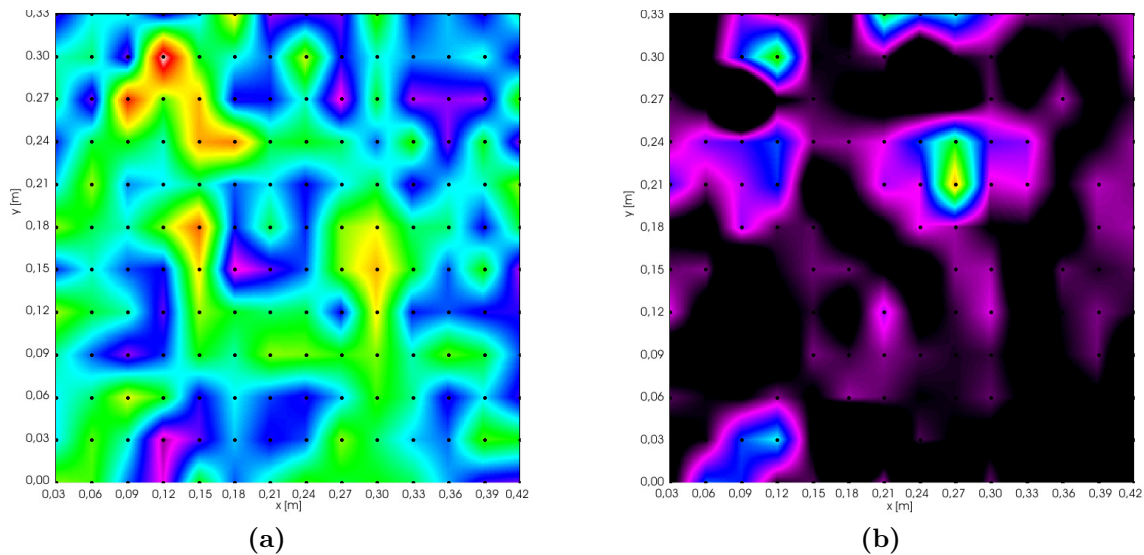


Abbildung 6.8: Energieverteilung der Ultraschall-Echo bei a) $4,34 \mu\text{s}$ und b) $6,77 \mu\text{s}$.

Kraftanregungssignale sehr schnell ein Bild der inneren Schädigungen. Beinahe alle Schädigungen, die in Abbildung 6.1 zu sehen sind, können im D-Scan der Kraftanregung identifiziert werden. Eine grobe Tiefenangabe kann über die Stärke der Verbreiterung der Anregungssignale gemacht werden, da sich oberflächennahe Defekte stärker abzeichnen. Die Auswertung der Klangsignale ist im Fall einer dünnen Platte sehr schwierig. Im Fall der hier verwendeten Platte liefert sie keine Aussage über Defekte im Innern der Platte, da die Eigenschwingungen der Platte sehr dominant hervortreten und alles andere überdecken.

Die Auswertung der Ultraschall-Echo-Daten ist etwas komplizierter, da neben den primären Reflexionen an Defekten und an der Rückwand der Platte auch noch Mehrfachreflexionen in den Daten enthalten sind. Jedoch eignet sich das Ultraschall-Echo-Verfahren auch sehr gut zur Detektion tieferliegender Defekte, die mit der lokalen Resonanzspektroskopie nicht mehr entdeckt werden können. Im Fall der hier verwendeten Musterplatte können mit dem Ultraschall-Echo-Verfahren alle im Vorfeld beschriebenen Fehlstellen detektiert werden. Bei bekannter Schallgeschwindigkeit im Material der Platte kann außerdem sehr leicht eine Aussage über die Tiefenlage von Defekten getroffen werden. Obwohl das Ultraschall-Echo-Verfahren für die Untersuchung wesentlich dickerer Bauteile entwickelt wurde, kann es, bei der Verwendung geeigneter Sensoren, auch an dünneren Platten angewandt werden.

7 Anwendung an einem Rotorblatt

7.1 Testobjekt

Die IMA Dresden und das IZFP Dresden verwenden zur Entwicklung eines Condition Monitoring Systems (CMS) an Rotorblättern von Windenergieanlagen ein Blatt von 40 m Länge mit unterschiedlichen Vorschädigungen. An diesem Rotorblatt sollten mit Hilfe des Ultraschall-Echo-Verfahrens die Stegverklebung des Hauptsteges auf der gesamten Länge überprüft werden. Da das automatisierte System zum Zeitpunkt der Messungen noch nicht einsatzbereit war, wurden die Messungen manuell durchgeführt.

In Abbildung 7.1 ist das Rotorblatt, eingebaut in einen Prüfstand zur statischen und dynamischen Belastung, zu sehen. Dem Rotorblatt fehlt die übliche Gelcoat-Beschichtung. Dadurch sind die GFK-Laminat nicht gegen das Eindringen von Wasser und gegen Schädigungen durch UV-Strahlung geschützt. Allerdings bietet es die Möglichkeit, Strukturen wie die Hauptgurte und die Sandwichbereiche von außen erkennen zu können.

Der Aufbau des Rotorblattes unterscheidet sich von dem in Kapitel 2.2 in Abbildung 2.3 vorgestellten Querschnitt. Der genaue Aufbau war nicht bekannt, da eine detaillierte Beschreibung des Herstellers fehlte. Aufgrund der fehlenden Beschichtung waren jedoch der Hauptgurt, der sich als schwarzer Streifen vom umliegenden Sandwich absetzte, zu erkennen. Am Blattanschluss konnte man in das Rotorblatt hinein sehen. Das Rotorblatt enthält zwei Stege, die weiter auseinander liegen, als im Beispiel in Abbildung 2.3. Ein großer Hauptsteg ist auf dem Hauptgurt angebracht. Ein weiterer kleiner Steg verstärkt die aerodynamische Hinterkante. Im Bereich nahe der Nabe liegen die Stege weit auseinander, zur Rotorblattspitze hin nähern sie sich einander. Der kleine Steg ist dabei teilweise auf dem Sandwich verklebt.



Abbildung 7.1: Rotorblatt im Prüfstand der IMA und des IZFP Dresden.

Der Hauptgurt des Blattes, sowie Vorder- und Hinterkante, sind mit kohlefaserverstärkten Kunststoffen verstärkt, die unter einer ersten, sehr dünnen GFK-Schicht liegen. CFK weisen im Vergleich zu GFK höhere Steifigkeiten und Festigkeiten auf. Außerdem besitzen Kohlefasern ein progressives Spannungs-Dehnungs-Verhalten; mit höherer Belastung steigt auch der E-Modul. Kohlefasern sind allerdings sehr gute elektrische Leiter. Um bei einem Blitzschlag die CFK-Lamine zu schützen, werden sie von einem dünnen Kupfernetz (dem sogenannten Kupfermesh) bedeckt, das direkt unter der ersten GFK-Schicht sichtbar ist. Die Hauptgurte auf beiden Seiten des Rotorblattes enden etwa einen Meter von der Blattspitze entfernt. Der letzte Meter ist komplett in Sandwichbauweise ausgeführt. Die Spitze selbst besteht aus Gründen des Blitzschutzes aus Metall.

Im Folgenden werden Koordinaten auf dem Rotorblatt in den bei Gutachtern üblichen Koordinaten angegeben. Die Seiten der Rotorblätter werden abgekürzt als DS (Druckseite) und SS (Saugseite) angegeben. R ist der Abstand in Metern zur Rotornabe oder zum Blattanschluss. Bei anmontierten Rotorblättern verwendet man in der Regel den Abstand zur Nabe, also den Rotorradius, bei abmontierten Blättern aufgrund des fehlenden Mittelpunktes, den Abstand zum Blattanschluss. Die Profiltiefe (PT) wird in Prozent angegeben. Gerechnet wird immer von der Vorder- zur Hinterkante. Ein Punkt auf der Vorderkante hat eine PT von 0 %, ein Punkt auf der Hinterkante eine PT von 100 %.

Mit Hilfe des Ultraschall-Echo-Verfahrens wurden die Stegverklebungen des Rotorblattes überprüft. Die lokale Resonanzspektroskopie wurde an drei Bereichen angewandt, an denen im Vorfeld ein Hohlklang detektiert worden war. Es wurden lediglich die Stegverklebungen auf dem Hauptgurt untersucht. Die Verklebung des kleinen Stegs konnte aus Zeitgründen nicht überprüft werden. Außerdem war der Zugang aufgrund der Größe und der Lagerung des Rotorblattes schwierig. Darüberhinaus verlief die Stegverklebung zumindest teilweise auf dem Sandwich, wo eine Untersuchung mit Ultraschall aufgrund der großen Schallschwächung im Material ohnehin nicht möglich ist.

7.1.1 Schädigungen

Das Rotorblatt weist eine Reihe von äußerlich sichtbaren Schädigungen auf, die einige Monate vor den Messungen von einem Gutachter erfasst worden sind. Im Inneren des Blattes sind mehrere Bereiche erkennbar,

an denen die Stege auf nur wenigen Zentimetern ihrer Gesamtbreite verklebt sind. Zusätzlich gibt es Bereiche mit zu großen Klebedicken und Weißbrüchen in den Laminaten der Verklebungen.

An der Außenseite des Blattes sind oberflächennahe Lufteinschlüsse, vor allem in den Bereichen des Kupfermeshs als "Schneeflockenmuster" zu sehen. Solche Lufteinschlüsse liegen im Normalfall unter der Gelcoat-Beschichtung und sind dann durch eine Sichtprüfung nicht zu detektieren. Äußerlich sichtbar ist außerdem ein Riss, der sich über mehrere Meter entlang der Hinterkante erstreckt. An mehreren Stellen auf Druck- und Saugseite sind in kleineren Bereichen Hohklänge hörbar, die auf Delaminationen schließen lassen. Eine größere, oberflächlich sichtbare Schädigung wurde bereits im Vorfeld der Messungen repariert.

7.2 Ultraschall-Echo an Testrotorblatt

Entlang mehrerer Messlinien auf dem CFK-Hauptgurt wurden Ultraschall-Echo-Messungen zur Überprüfung der Stegverklebungen durchgeführt. Auf der Saugseite wurden in x-Richtung (vom Blattanschluss zur Rotorblattspitze) etwa 350 Messungen auf einem Raster mit einem Messpunktabstand von 10 cm gemessen. In y-Richtung wurden Messungen an vier bis fünf Punkten im Abstand von jeweils 5 cm durchgeführt. Die genaue Lage der Stegverklebung war nicht bekannt und von außen nicht sichtbar. Das Messraster wurde über den Bereich gelegt, in dem die Verklebung vermutet wurde. Bei Annäherung an die Rotorblattspitze konnte die Lage des Messrasters mit der Lage der Stegverklebung abgeglichen werden, da hier eine Probenentnahme im Verklebungsbereich stattgefunden hatte. Die Messreihen lagen teilweise unterhalb des Verklebungsbereichs, so dass das Messraster im hinteren Bereich der Saugseite nach oben erweitert bzw. verschoben wurde. So entstanden insgesamt sieben Messreihen auf der Saugseite, die jedoch nicht an allen Punkten Messungen enthalten.

Auf der Druckseite wurden die Messungen von der Rotorblattspitze zur Rotornabe durchgeführt. Aufgrund der Erfahrungen auf der Saugseite konnten die Messreihen hier besser über der Stegverklebung platziert werden. In x-Richtung wurden wieder etwa 350 Messpunkte im Abstand von 10 cm erfasst. In y-Richtung wurden jeweils fünf Messpunkte im Abstand von 5 cm berücksichtigt.

Auf beiden Seiten waren nicht an allen angezeichneten Punkten Mes-

sungen möglich. Auf der Saugseite war etwa 1 m des Messrasters nicht zugänglich, da das Rotorblatt hier auf einer Halterung auflag und der Gurt dadurch verdeckt war. Auf der Druckseite des Blattes waren im hinteren Drittel Schaumstoffwürfel aufgeklebt, um Bereiche für eine spätere statische Lasteinleitung zu markieren. Auf beiden Seiten des Rotorblattes waren außerdem bereits akustische Sensoren für spätere Messungen angebracht. Auch hier konnten keine Messungen durchgeführt werden.

Die Durchführung der Messungen war durch die degradierten Kunststoffschichten des Rotorblattes stark erschwert. Voruntersuchungen zur Ankopplung im Labor ließen sich nicht auf die Feldmessungen übertragen. Eine trockene Ankopplung war wegen der Porosität des degradierten GFK nicht möglich. Aus diesem Grund wurden zwei unterschiedliche Koppelmittel verwendet. Eine Silikonpaste, die im Labor stets gute Ergebnisse lieferte, wurde für die ersten Messpunkte verwendet. Durch das Auftragen der Paste war der Messfortschritt sehr gering. Der Sensor musste sehr stark angepresst werden, um eine gute Ankopplung zu erreichen. Deshalb wurde nach einigen Messungen Wasser als Koppelmittel gewählt. Durch Aufsprühen einige Sekunden vor der Messung konnte das Wasser in den Kunststoff eindringen. So war nur eine dünne, frisch aufgesprühte Wasserschicht notwendig, um eine gute Ankopplung zu erzielen. Der nötige Anpressdruck war bei der Wasserankopplung wesentlich geringer.

Das Rotorblatt wurde im Anschluss an die Messungen einem dynamischen Belastungstest unterzogen. Nach einer Million Lastzyklen wurden etwa ein Jahr nach den ersten Messungen Wiederholungsmessungen durchgeführt. Das Rotorblatt blieb für die Wiederholungsmessungen im Versuchsaufbau des Belastungstests eingebaut. Deshalb waren auch hier einige Bereiche des Rotorblatts für Messungen nicht zugänglich. Auf der Druckseite waren, ab einer Entfernung von 22,5 m zum Blattanschluss bis hin zur Blattspitze, Gewichte aufgebracht, um eine statische Last auf dem Rotorblatt zu erzeugen. Die Gewichte lagen genau auf dem Hauptgurt des Rotorblattes, so dass in diesen Bereichen keine Ultraschall-Echo-Messungen durchgeführt werden konnten.

7.2.1 Ergebnisse der ersten Messungen

Die aufgezeichneten Ultraschall-Echo-Signale wurden für die Darstellung bearbeitet. Um Systemeinflüsse weitgehend zu unterdrücken, wurden die Daten mit einer Kalibriermessung korrigiert. Durch die Korrektur wird

außerdem die Darstellung des Sendepulses unterdrückt. Zur Vereinfachung der Darstellung werden nur die positiven Amplituden des Signals dargestellt. Um zusätzlich kleinere Reflexionen besser sehen zu können, liegt das Maximum der Farbskala bei einem Drittel der maximalen Amplitude.

In Abbildung 7.2 sind die farbcodierten B-Scans einer Messzeile auf der Saugseite dargestellt. Diese Messzeile lag im Bereich der Stegverklebungen. Die Ergebnisse aller Messzeilen befinden sich im Anhang dieser Arbeit. Die Stellen, an denen keine Daten aufgezeichnet werden konnten, sind im B-Scan als blaue senkrechte Streifen zu erkennen (z.B. zwischen 30 m und 31 m). Hier wurden Nulllinien eingefügt um eine korrekte Darstellung entlang der x-Achse zu erhalten.

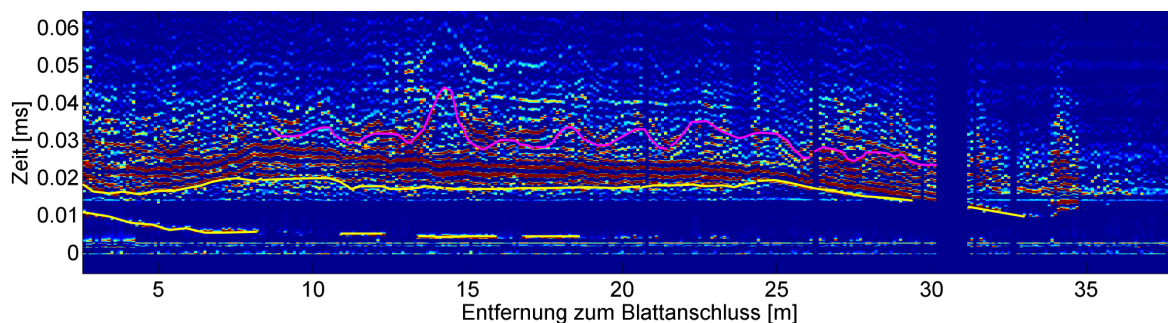


Abbildung 7.2: B-Scan einer Messzeile auf der Saugseite.

Die Reflexionen der unterschiedlichen Schichten des Rotorblattes zeigen sich als rote Linien in Abbildung 7.2. Die wichtigsten Reflexionshorizonte wurden mit farbigen Linien markiert, um die Identifizierung einfacher zu machen. Die früheste gelbe Linie gehört zu einer dünnen Schicht CFK, die nur auf den ersten Metern des Rotorblattes vorhanden ist. Ihre Dicke nimmt auf den ersten 5 Metern schnell ab. Die nächste Reflexion, die ebenfalls gelb markiert ist, gehört zur Rückwand des Hauptgurtes. Die Dickenänderung des Hauptgurtes vom Blattanschluss zur Blattspitze kann sehr gut nachvollzogen werden. In Nähe der Blattspitze ist Reflexion nicht mehr zu erkennen, da hier das Material so dünn ist, dass die Reflexion in der Systemzeit verschwindet. In magenta ist eine wellige Linie eingetragen, die zu den Reflexionen der Klebeschicht gehört. Der Reflexionshorizont ist sehr ungleichmäßig, was auf unterschiedliche Dicken des Klebstoffes und auf eine variable Qualität des Klebstoffes hindeutet. Die Identifikation der Klebeschicht und die Detektion von mangelhaft verklebten Bereichen war das Ziel der Messungen. Bis etwa 7 m Entfernung vom Blattanschluss sind neben den

Reflexionen der bereits erwähnten Schichten, eine Reihe von weiteren Schichten zu erkennen. Diese sind auf unterschiedliche Materialien und größere Materialdicken im Bereich des Blattanschlusses zurückzuführen.

In Abbildung 7.3 ist der B-Scan von Messzeile 4 der letzten fünf Meter des Rotorblattes zu sehen. Ab 33,7 m verändert sich das Ultraschall-Echo-Signal für etwa einen Meter. In diesem Bereich war das Rotorblatt im Vorfeld der Messung ausgebessert worden. Eine zusätzliche Schicht CFK wurde aufgebracht. Diese erzeugt sehr starke multiple Reflexionen. Der reparierte Bereich kann also eindeutig identifiziert werden. Wie bereits beschrieben, waren Messungen nicht an allen Punkten des geplanten Messrasters möglich.

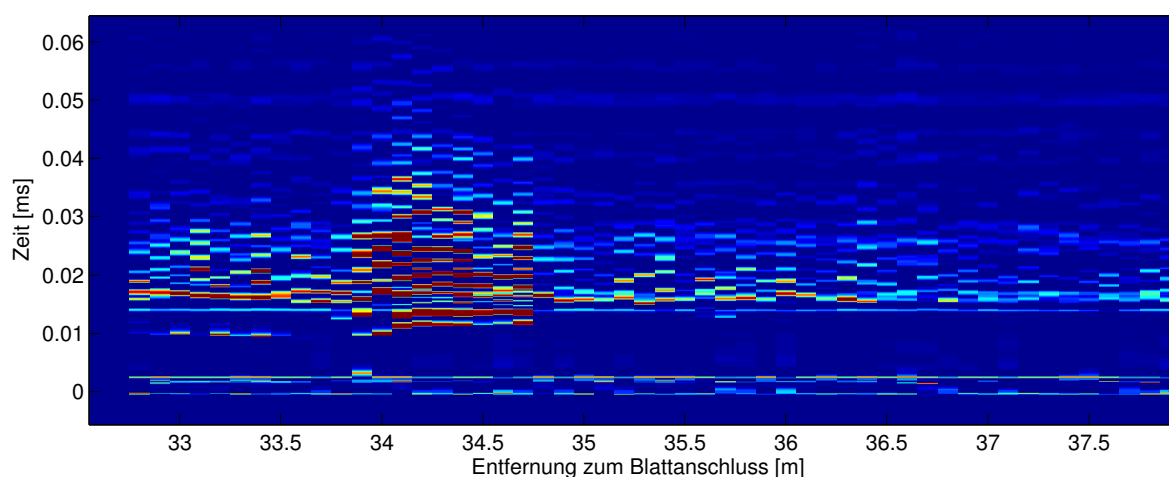


Abbildung 7.3: Ausschnitt der letzten fünf Meter eines Ultraschall-Echo-B-Scans auf der Saugseite des Rotorblattes.

In Abbildung 7.4 ist ein weiterer Ausschnitt aus dem B-Scan der Messzeile dargestellt. Hier wird vor allem die Reflexion der Verklebung betrachtet. Zwischen 23,5 m und 24,1 m verschwindet das Echo der Verklebung. Hier ist nur das Echo des Gurtlaminates zu erkennen. Das deutet auf eine mangelhafte Stegverklebung hin. Solche Bereiche konnten an verschiedenen Stellen des Rotorblattes identifiziert werden.

Die Druckseite war durch die Lagerung des Rotorblattes im Freien stärker von UV-Strahlung und Regen beeinträchtigt als die Saugseite. Die Degradation des Materials zeigt sich in einer schlechteren Qualität der aufgezeichneten Daten. In Abbildung 7.5 sind zwei Messzeilen auf der Druckseite dargestellt. Wie auch auf der Saugseite wurden die Messdaten mit einer Kalibrierung korrigiert und es werden die positiven Amplitudenwerte der Daten dargestellt.

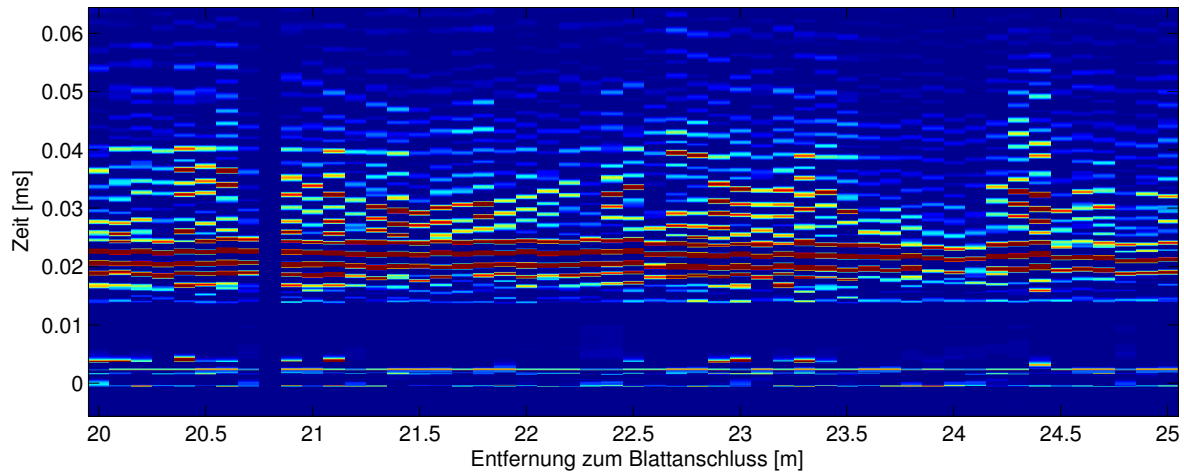


Abbildung 7.4: B-Scans auf der Saugseite des Rotorblattes, Ausschnitt von 20 m bis 25 m.

Die Reflexionen verschiedener Schichten können im B-Scan identifiziert werden. Der starke rote Reflexionshorizont ist das Echo des Hauptgurttes. Die Stegverklebung sollte unter der Messzeile 3 und in den Daten dieser Reihe zu erkennen sein. Aufgrund der schlechteren Datenqualität ist die Reflexion der Verklebung im B-Scan nicht zu sehen. Die Oberfläche des Rotorblattes war stark angegriffen und deshalb poröser als auf der Saugseite. Das führt zu einem starken Energieverlust zwischen Rotorblatt und Ultraschallgeber. Erst ab etwa 28 m kann man im B-Scan von Reihe 3 die welligen Reflexionen schwach erkennen. Hier ist das Gurtmaterial dünn genug, dass Energie von der Stegverklebung registriert werden kann. In den anderen Bereichen ist es schwierig über die Güte der Verklebungen Aussagen zu machen. Hierfür kann der Vergleich mit einer angrenzenden Messreihe hilfreich sein. Messzeile 2 liegt unterhalb der Verklebung. In Messzeile 2 ist fast auf der ganzen Länge des Rotorblattes die Reflexion des Gurtlaminats gut zu erkennen. Im Vergleich dazu sind diese Reflexionen in Messzeile 3 sehr viel schwächer. Wie in den Labormessungen in Kapitel 4.2 gezeigt wurde, kann die Stegverklebung dadurch detektiert werden, dass die Stärke der Reflexion am Gurtlaminat abnimmt. Dieser Effekt kann hier sehr gut beobachtet werden. Bis etwa 22 m vom Blattanschluss entfernt, ist das Echo der Gurtlaminats in Zeile 3 deutlich kleiner als in Zeile 2. Die Energie wird nicht an einer Grenzfläche zu Luft reflektiert sondern an einer Grenze zwischen zwei Festkörpern, dem Gurtlaminat und dem Klebstoff. An der Grenzfläche zwischen zwei Festkörpern wird weniger Energie reflektiert als an der Grenzfläche zu Luft. Deshalb sind die registrierten Amplituden in ver-

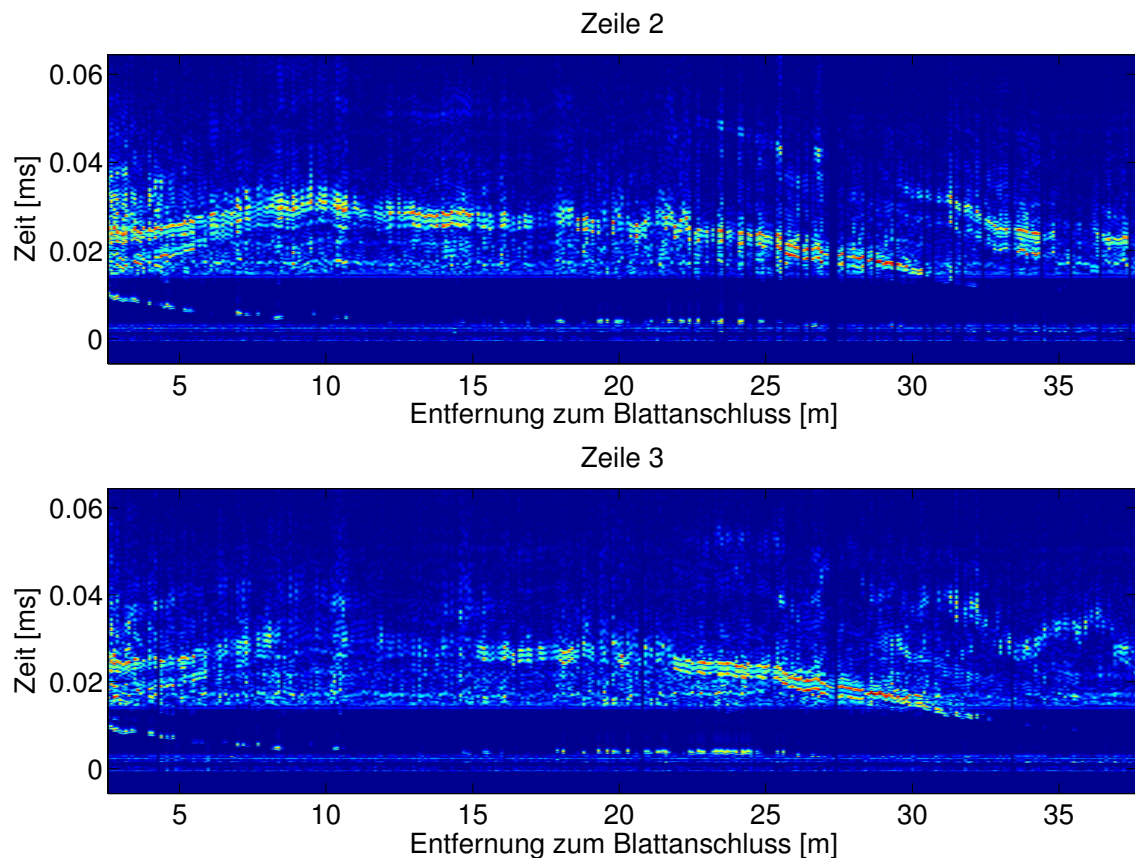


Abbildung 7.5: B-Scans zweier Messzeilen auf der Druckseite des Rotorblattes.

klebten Bereichen kleiner. Ab 22 m Entfernung zum Blattanschluss kann man schwach die Reflexion der Verklebung als wellige Linie erkennen.

Auf der Druckseite ist es in diesem Fall sehr viel schwieriger Aussagen über die Qualität der Verklebungen zu machen. Ein Bereich, in dem eine mangelhafte Verklebung zu vermuten ist, liegt zwischen 15 m und 18 m. Hier sind in Messzeile 2 und 3 die Amplituden des Echos des Gurtlaminates ungefähr gleich groß.

7.2.2 Vergleich mit Wiederholungsmessungen

Auf der Saugseite konnte bei den Wiederholungsmessungen das Messrastrer von 2,6 m bis 30,1 m der relevanten Messzeilen abgedeckt werden. Die Daten wurden analog zu denen der ersten Messungen aufbereitet. Auch hier wurde eine Kalibrierung von den Daten abgezogen um die systembedingten Effekte zu minimieren.

In Abbildung 7.6 sind die B-Scans einer Messzeile beider Messungen nebeneinander dargestellt. Um hier auch Änderungen in den Amplitu-

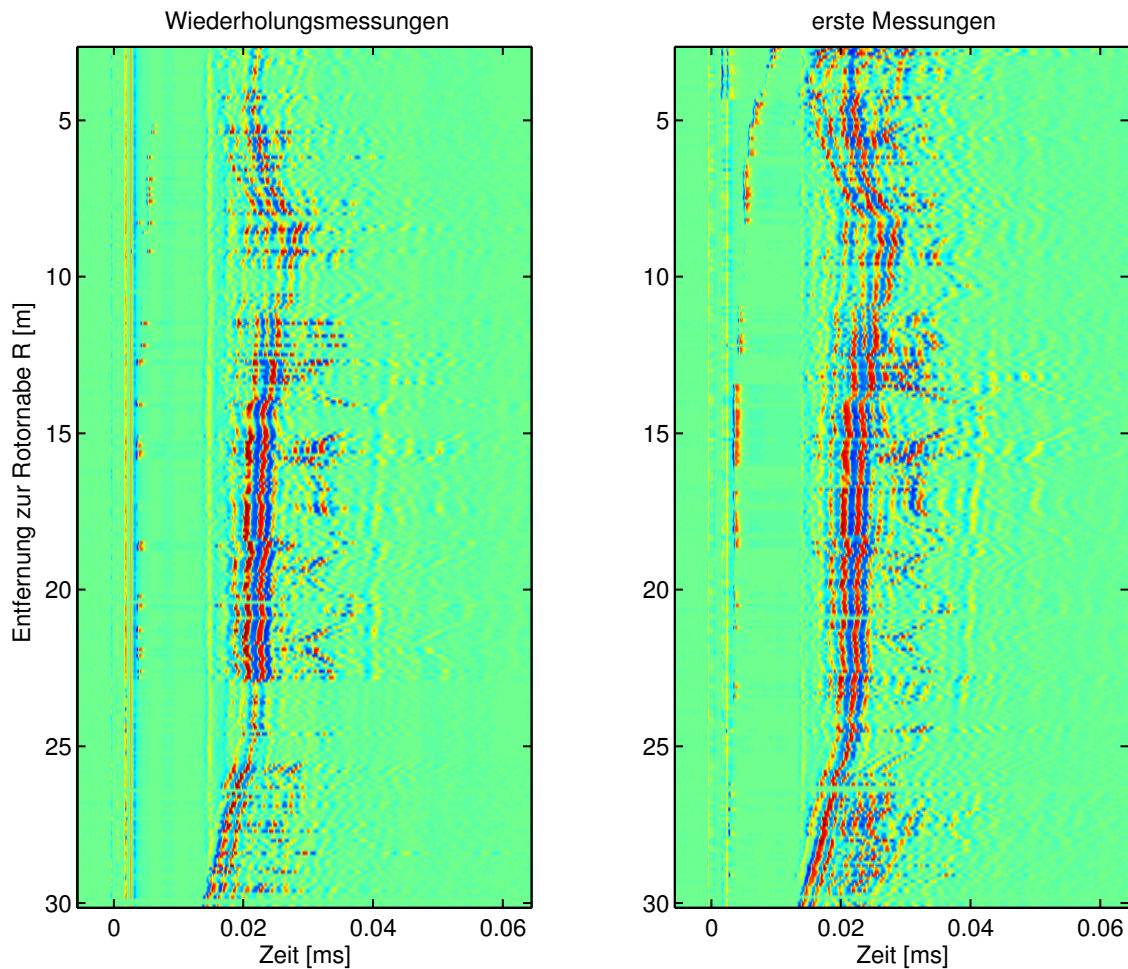


Abbildung 7.6: Vergleich der B-Scans einer Messzeile beider Messungen auf der Saugseite.

den besser vergleichen zu können, verwenden beide Bilder die gleiche Farbskala. Die Farbskala erstreckt sich von der minimalen Amplitude zur maximalen Amplitude der Messungen. Hier werden kleine Amplituden, im Gegensatz zum vorangegangenen Kapitel, nicht überhöht dargestellt. Auch sind hier positive sowie negative Amplituden dargestellt. Rote Farben entsprechen positiven, blaue Farben negativen Amplituden. In Abbildung 7.6 ist der Bereich der Messungen dargestellt, in dem bei beiden Messungen Daten aufgezeichnet wurden.

Die Ergebnisse beider Messungen sehen sich auf den ersten Blick sehr ähnlich. Die Reflexionen des CFK-Gurtes und der Verklebungen sind in beiden Bildern zu erkennen. Die Lage der Reflexionen stimmt überein. Die Messungen wurden unter sehr unterschiedlichen Lagerungsbedingungen durchgeführt. Bei der ersten Messung lag das Rotorblatt auf dem

7.2. ULTRASCHALL-ECHO

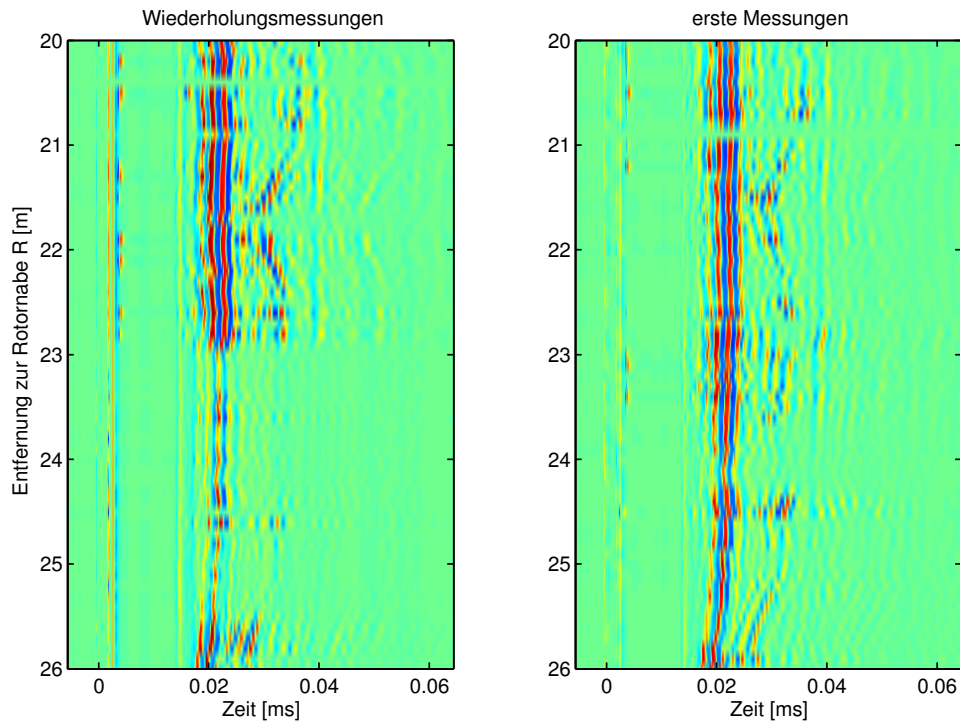


Abbildung 7.7: Vergleich der beiden Messungen auf der Saugseite; Ausschnitt von 20 m bis 26 m.

Boden. Die Vorderkante zeigte hierbei nach unten. Die Messungen wurden von der Seite durchgeführt, d.h. der Ultraschallsensor wurde für die Messungen horizontal angedrückt. Bei der zweiten Messung befand sich das Blatt unter einer statischen Last und war lediglich am Blattanschluss befestigt. Das Blatt war bezüglich der ersten Messungen um 45° gedreht. Der Andruck des Sensors erfolgte also vertikal. Trotz unterschiedlicher Messbedingungen konnten die wesentlichen Strukturen des Rotorblattes ein dreiviertel Jahr nach den ersten Messungen zuverlässig wieder abgebildet werden. Die Amplituden der aufgezeichneten Signale sind in weiten Teilen des Rotorblattes sehr ähnlich.

Es sind jedoch Unterschiede zwischen beiden Messungen zu erkennen, die die Veränderungen des Blattes durch die statischen und dynamischen Belastungen zeigen. Auf den ersten 7 m können bei den Wiederholungsmessungen die Reflexionen der verschiedenen Schichten schlecht oder gar nicht identifiziert werden. Das lässt darauf schließen, dass sich durch die Belastungsversuche der Verbund zwischen den einzelnen Schichten verschlechtert hat. Weitere Bereiche mit deutlich verschlechterter Signalqualität befinden sich zwischen 9,7 m und 10,5 m und zwischen 23,0 m und 25,5 m. Dieser Bereich ist vergrößert noch einmal in Abbildung

7.7 dargestellt. Es ist zu sehen, dass sich der Bereich, in dem die Reflexion der Stegverklebung nicht auszumachen ist, gegenüber den ersten Messungen vergrößert hat. Es ist anzunehmen, dass sich hier vermehrt Ablösungen im Verklebungsbereich befinden.

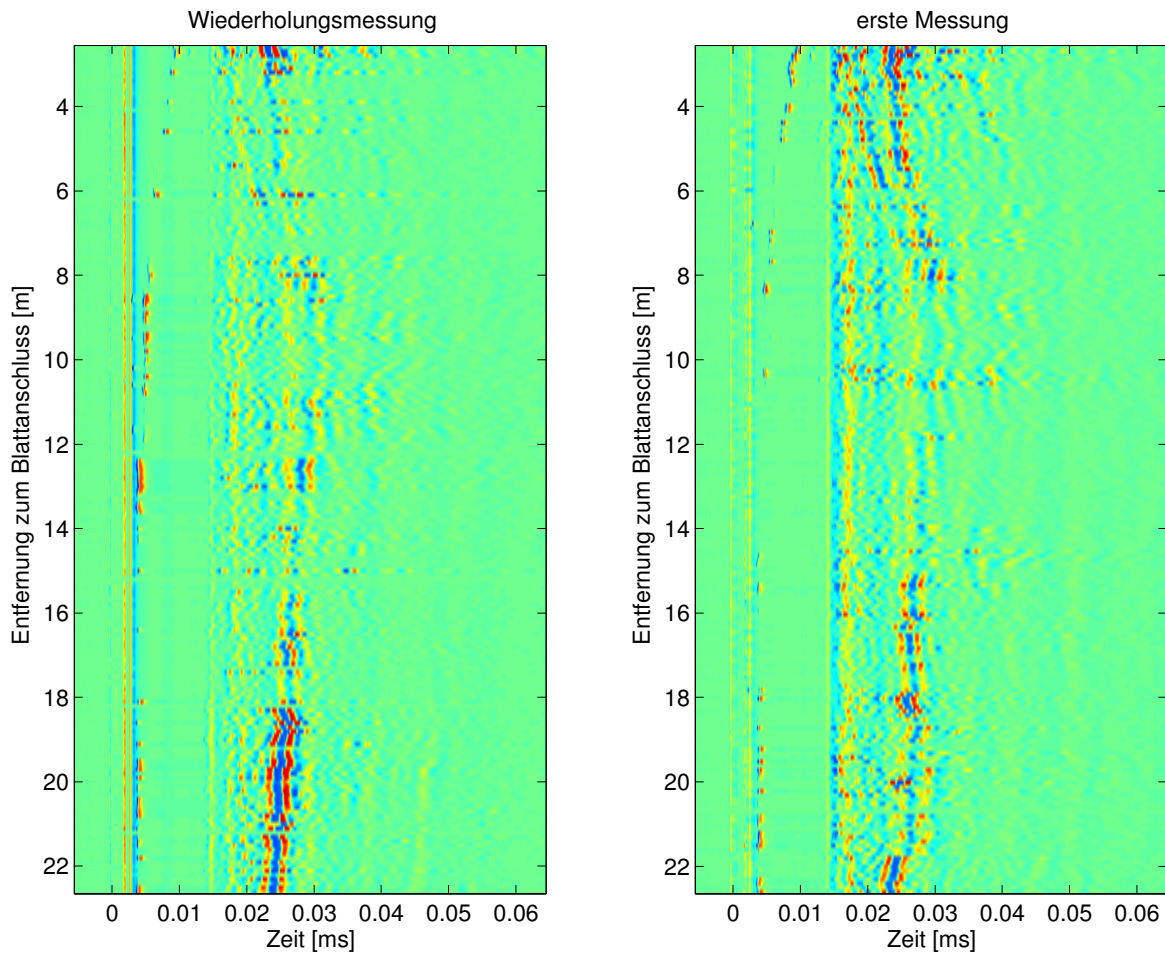


Abbildung 7.8: Vergleich der B-Sans auf der Druckseite.

Die Ergebnisse beider Messungen auf der Druckseite sind in Abbildung 7.8 dargestellt. Da bei den Wiederholungsmessungen der hintere Teil des Rotorblattes nicht für Messungen zugänglich war, endet die Darstellung bei 22,5 m. Wie auch auf der Saugseite wird deutlich, dass die Amplituden der Daten der Wiederholungsmessungen auf den ersten 8 m des Blattes geringer sind. Das ist auf eine Schwächung des Blattes in diesem Bereich zurück zu führen. Von 8 m bis 18 m sind die Amplituden der B-Sans vergleichbar. Es ist auch hier zu sehen, dass sich die Ergebnisse der ersten Messungen in den Wiederholungsmessungen gut reproduzieren lassen. Unterschiede sind jedoch trotzdem erkennbar. Zwischen 12,4 m und 13,1 m wird die Reflexion am CFK in den Daten der Wieder-

7.2. ULTRASCHALL-ECHO

holungsmessung deutlicher. Hier hat sich vermutlich die Stegverklebung gelöst. Ab 18 m Entfernung zum Blattanschluss wird die Reflexion des CFK-Gurtes in den Wiederholungsmessungen ebenfalls deutlicher. Auch hier liegt vermutlich eine strukturelle Veränderung der Verklebungen vor. Nach Durchführung der Messung wäre eine genaue Untersuchung des Rotorblattes in relevanten Bereichen sinnvoll. Zum Zeitpunkt der Messungen waren der Belastungsversuch des Rotorblattes noch nicht beendet, so dass die Verifikation der hier gezeigten Messergebnisse am Testobjekt noch aussteht.

7.3 Lokale Resonanzspektroskopie an Testrotorblatt

An dem in Kapitel 7.1 vorgestellten Rotorblatt befinden sich mehrere Bereiche, die aufgrund eines Hohlklangs markiert worden waren. Diese Bereiche wurden mit einer lokalen Resonanzspektroskopie untersucht. Zwei der Messfelder (Messfeld 1 und Messfeld 2) befinden sich auf der Saugseite, das dritte (Messfeld 3) auf der Druckseite des Rotorblatts. Die Messfelder 1 und 3 mit den aufgezeichneten Messrastern sind in den Abbildungen 7.9 und 7.10 zu sehen. Die Untersuchung des Messfeldes 2 ist im Anhang der Arbeit zu finden.

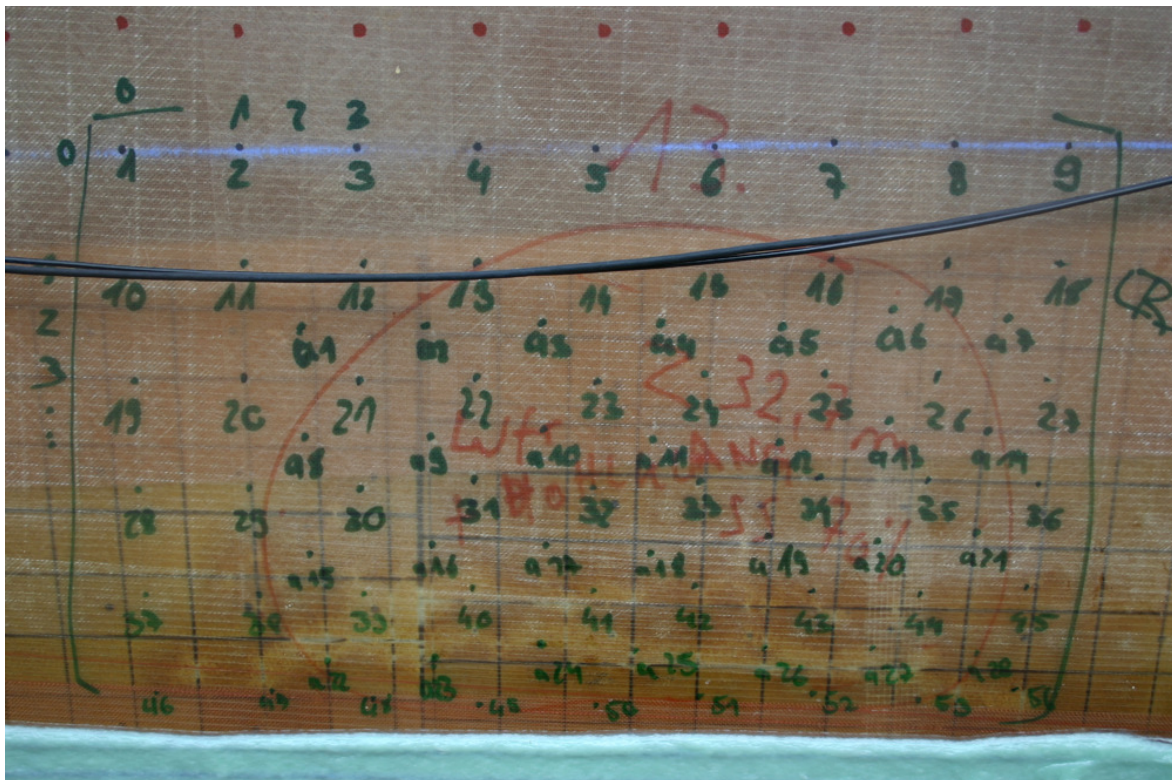


Abbildung 7.9: Foto von Messfeld 1

An allen drei Messfeldern wurden jeweils zwei ineinander geschachtelte Messraster mit Messpunktabstand von 5 cm angezeichnet. Die Schachtelung der Messraster hat eine Messrasterverdichtung in den relevanten Bereichen zur Folge. Das äußere Messraster wird im folgenden als primäres Messraster bezeichnet. Messfeld 1 wird von insgesamt 82, Messfeld 2 von insgesamt 114 und Messfeld 3 von 158 Messpunkten bedeckt. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Messfeldern auf der Saug-



Abbildung 7.10: Foto von Messfeld 3.

seite und dem Messfeld auf der Druckseite ist an der Oberfläche zu erkennen. Wie schon im vorherigen Kapitel beschrieben, war die Druckseite die Wetterseite des Rotorblattes und die Oberfläche hatte sich durch Regen und Sonne verändert. Dies zeigt sich als helle Schicht auf dem Rotorblatt, die nicht abgewaschen werden konnte. Deshalb sind die markierten Schädigungen auf der Druckseite nicht ohne weiteres zu erkennen.

7.3.1 Messfeld 3

Das Messfeld 3 befindet sich auf der Druckseite des Rotorblattes bei einem Radius von 13 m in einer Profiltiefe von etwa 40 %. In diesem Bereich war im Vorfeld ein Hohlklang markiert worden. Diese Markierungen waren jedoch durch Witterungseinflüsse kaum noch sichtbar. Abbildung 7.11 zeigt ein Foto der Markierungen, das etwa ein halbes Jahr vor den Messungen durchgeführt wurde. Deshalb ist das Messraster in diesem Foto nicht zu sehen. Messfeld 3 hatte eine horizontale Ausdehnung von 50 cm und eine vertikale Ausdehnung von 35 cm.

Zur Verifikation der Messergebnisse sind im Foto in Abbildung 7.11 die im Vorfeld auffälligen und markierten Bereich dargestellt. Im obe-



Abbildung 7.11: Markierte Fehlstellen an Messfeld 3.

ren Drittel des Fotos erkennt man den Übergang vom CFK-Gurt zum Sandwichbereich. Der Sandwichbereich lässt sich durch die Würfelstruktur leicht identifizieren. Die Kante des Kupfermeshs liegt zwischen den beiden gelben Klebepunkten. Bei den dunklen Punkten links in der Mitte und unten im eingekreisten Bereich, handelt es sich um oberflächliche Reparaturen. Im eingekreisten Bereich sind mit gestrichelten Linien zwei Bereiche markiert, in denen oberflächliche Lufteinschlüsse sichtbar sind. Zwischen diesen beiden Bereichen wurde ein Hohlklang festgestellt, der auf eine Delamination hindeutet.

In Abbildung 7.12 sind die Halbwertsbreiten der Kraftsignale der Hammeranregung farbcodiert über dem Messraster dargestellt. Zur flächigen Darstellung wird zwischen den Messwerten kubisch interpoliert. Ein Bereich mit vergrößerten Halbwertsbreiten ist in der Mitte der Abbildung als roter Bereich erkennbar. Hier erhält man maximale Halbwertsbreiten von über 0,75 ms. Die kleinsten Halbwertsbreiten von unter 0,5 ms erhält man im oberen Bereich des Messrasters, aber auch rechts unterhalb des roten Bereichs. Der rote Bereich mit den großen Halbwertsbreiten gibt sehr gut den Bereich wieder, in dem ein Hohlklang markiert ist. Die oberflächennahen Lufteinschlüsse sind als gelbe Bereiche ebenfalls im Bild zu erkennen. Die Anregungssignale geben also Auskunft über den inneren Zustand des Rotorblattes.

Zum Vergleich sind in Abbildung 7.13 das farbcodierte Bild der Halb-

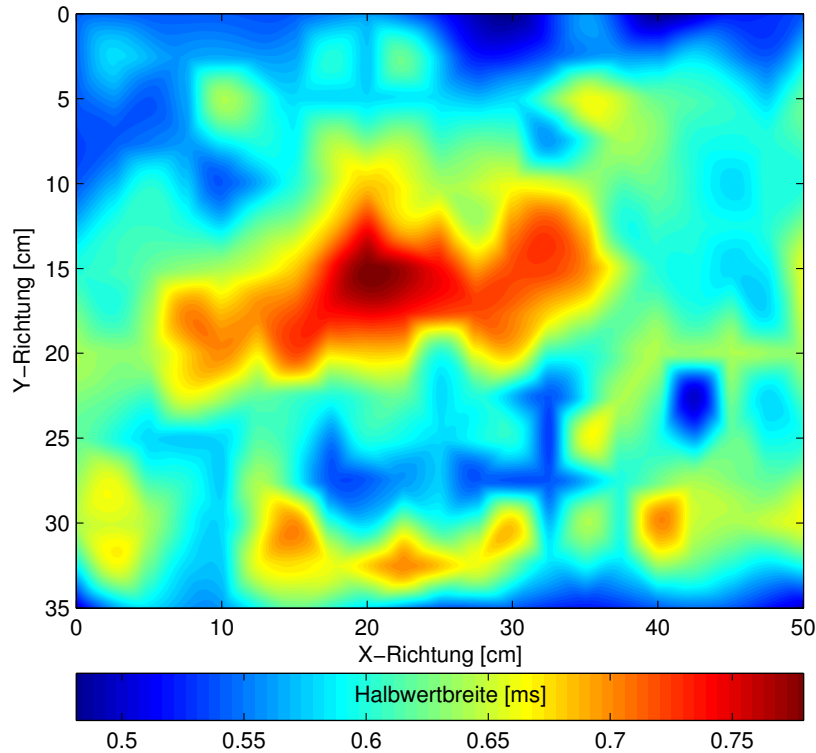


Abbildung 7.12: Halbwertsbreiten der Kraftsignale des Hammers an Messfeld 3.

wertsbreiten mit dem Foto der Fehlstellen überlagert dargestellt. Während die Anregungssignale schon von oberflächennahen Lufteinschlüssen beeinflusst werden, sind die Klangsignale auch für die Untersuchung tieferliegender Defekte geeignet.

Die zu Messfeld 3 gehörenden Klangsignale sind in Abbildung 7.14 zu sehen. Zur besseren Visualisierung sind hier nur die Ergebnisse des primären Messrasters dargestellt. Es kann in beinahe allen Messungen eine dominante Frequenz zwischen 0,5 kHz und 0,6 kHz identifiziert werden. Da das Material in diesem Bereich intakt ist, hat man es hier mit der dominanten Frequenz des ungeschädigten Rotorblatts zu tun. Von Zeile 2 bis Zeile 6 sind jeweils in der Mitte der Zeilen erhöhte Frequenzen zu erkennen. Diese stimmen in etwa mit dem Bereich, in dem der Hohlklang angezeichnet war, überein. Der Hohlklang befindet sich demzufolge hauptsächlich in der Mitte des Messfeldes. Das stimmt mit den Ergebnissen der Kraftsignale sehr gut überein. An den rechten Rändern der Messzeilen 1 bis 7 sind zusätzlich niedrigere Frequenzen mit großer Amplitude zu sehen. Außerdem zeigen Messzeilen 5 bis 8 zusätzlich Amplituden bei Frequenzen unterhalb von 0,2 kHz. Die zugehörigen

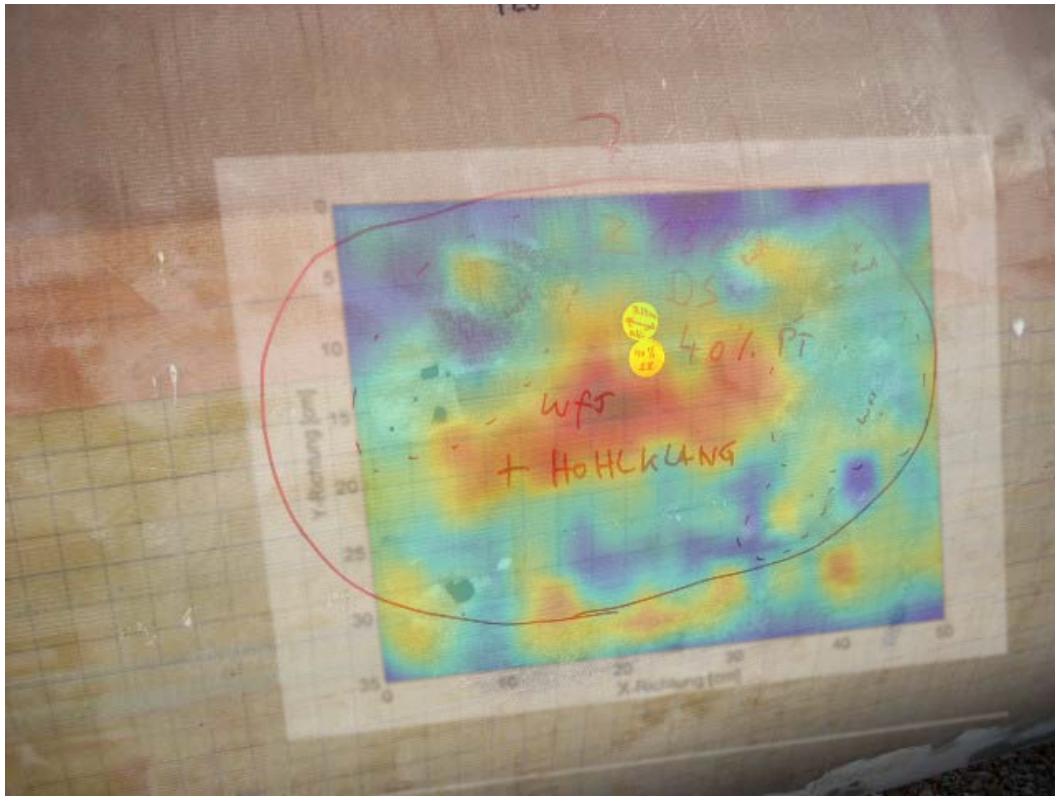


Abbildung 7.13: Vergleich der Halbwertsbreiten an Messfeld 3 mit den im Foto erkennbaren Fehlstellen.

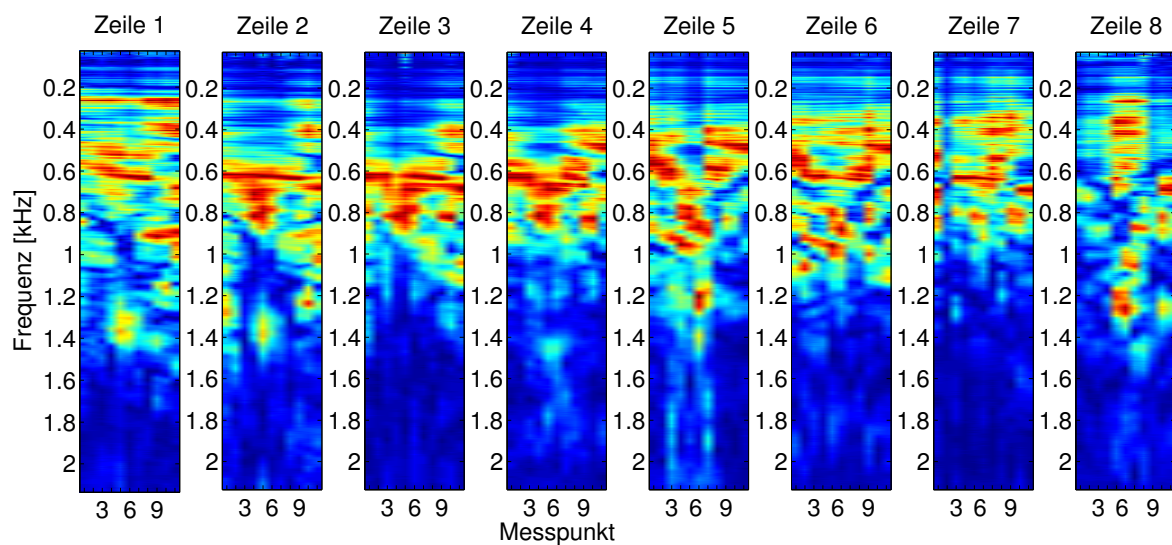


Abbildung 7.14: Amplitudenspektren der Klangsignale an Messfeld 3.

7.3. LOKALE RESONANZSPEKTROSKOPIE

Messpunkte passen gut zu den oberflächlich sichtbaren Lufteinschlüssen. Diese verursachen zusätzlich tiefe Frequenzen in den Spektren.

7.3.2 Messfeld 1

Zuerst wurden die Halbwertsbreiten der Hammersignale ausgewertet und farbcodiert flächig dargestellt. Die Ergebnisse wurden den Fotos der Messraster zum Vergleich überlagert. Die blauen Bereiche entsprechen einer niedrigen Halbwertsbreite, also einer geringen Kontaktzeit zwischen Hammer und Rotorblatt. Die roten Bereiche entsprechen vergrößerten Halbwertsbreiten. In Abbildung 7.15 ist zu sehen, dass die roten Bereiche, in denen die Halbwertsbreiten vergrößert sind, hauptsächlich in dem im Vorfeld gekennzeichneten Oval liegen. Der Hohlklang zeigt sich also in verlängerten Kontaktzeiten zwischen Hammer und Rotorblatt.

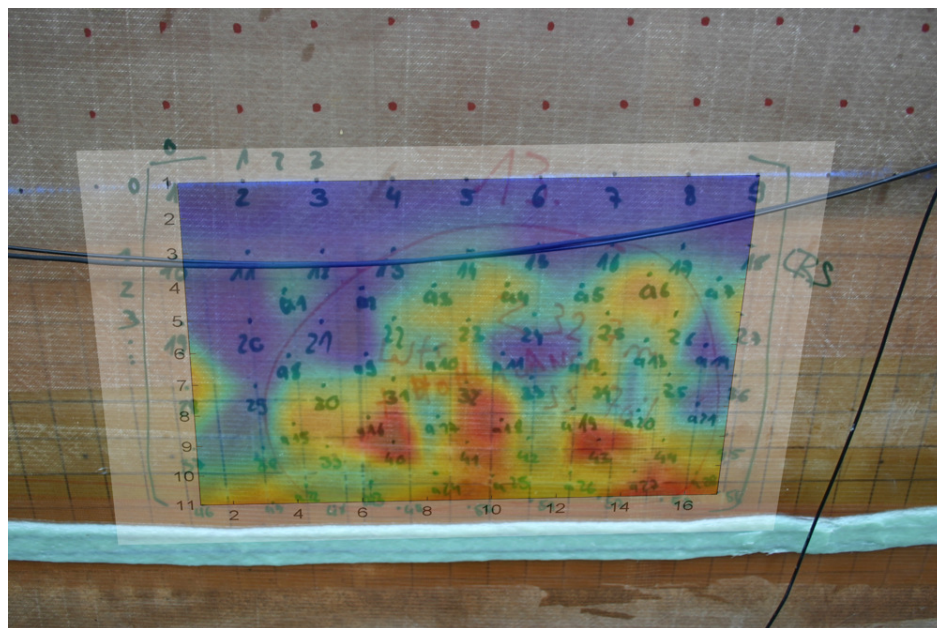


Abbildung 7.15: Halbwertsbreiten der Kraftsignale des Hammers an Messfeld 1.

An Messfeld 1 wurde im Rahmen der Wiederholungsmessungen auch die lokale Resonanzspektroskopie erneut durchgeführt. Aus Zeitgründen konnten Messungen jedoch nur auf dem Primärgitter durchgeführt werden. Um die Ergebnisse mit den ersten Messungen vergleichen zu können, sind in Abbildung 7.16 die Halbwertsbreiten der Daten der ersten Messung dargestellt, die auf dem primären Gitter aufgezeichnet wurden. Die groben Strukturen der Fehlstellen werden ebenfalls abgebildet, jedoch

können kleinere Anomalien aufgrund des größeren Messpunktabstands nicht mehr gut aufgelöst werden.

Die Halbwertsbreiten der Wiederholungsmessung sind in Abbildung 7.17 dargestellt. Zum Vergleich beider Messungen wurde eine identische Farbskala gewählt. Es fällt auf, dass die Halbwertsbreiten der Wiederholungsmessungen kürzer sind. Die Fehlstellen werden noch abgebildet, sind aber nicht mehr so deutlich. Durch die Belastungsversuche ist eigentlich zu erwarten, dass die Fehlstellen im Rotorblatt sich vergrößern. Trotzdem sind die Halbwertsbreiten geringer, was auf einen festeren Untergrund hindeutet. Die Erklärung für die veränderten Signale findet man in der Lagerung des Rotorblatts. Bei den ersten Messungen lag das Rotorblatt auf dem Boden und stand somit nicht unter Spannung. Im Versuchsaufbau für die dynamischen Belastungstests ist das Rotorblatt fast horizontal an einem Betonfundament befestigt. Das Rotorblatt trägt sein eigenes Gewicht, wodurch das Material unter Spannung steht. Zusätzlich ist eine statische Last aufgebracht, die die Spannungszustände im Rotorblatt noch verstärkt. Ein Material was unter Zug oder Druck steht verhält sich beim Aufprall des Hammers anders als ein ungespanntes Material. Die Halbwertsbreiten werden dadurch verändert.

Die Vergleiche der beiden Messungen an Messfeld 1 zeigen, dass der Spannungszustand des Rotorblattes die Ergebnisse der lokalen Resonanzspektroskopie beeinflusst. Möchte man an Rotorblättern regelmäßige Zustandserfassungen mittels dieses Verfahrens machen, so muss darauf geachtet werden, dass das Rotorblatt sich in einem ähnlichen Spannungszustand befindet. Es bietet sich an die Messungen am senkrecht vor dem Turm stehenden Rotorblatt durchzuführen. Die Rotorblattspitze zeigt nach unten. So wirken am wenigsten Kräfte, die durch sein Eigengewicht erzeugt werden, auf das Rotorblatt. Außerdem befindet sich das Rotorblatt damit im Windschatten des Turms und die Krafteinwirkung des Windes kann reduziert werden. Es ist zu erwarten, dass die Messungen dann reproduzierbar sind. Entsprechende Versuche stehen jedoch noch aus.

7.3. LOKALE RESONANZSPEKTROSKOPIE

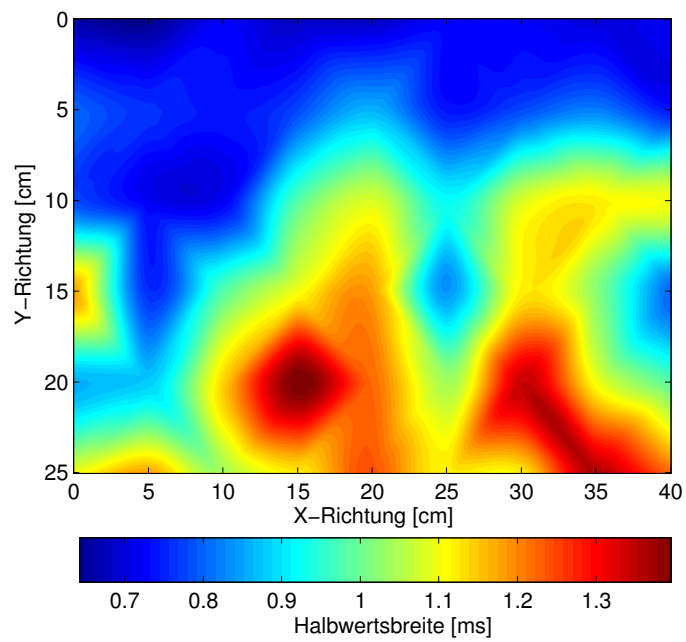


Abbildung 7.16: Halbwertsbreiten der Hammersignale der ersten Messung; Auswertung des primären Messrasters.

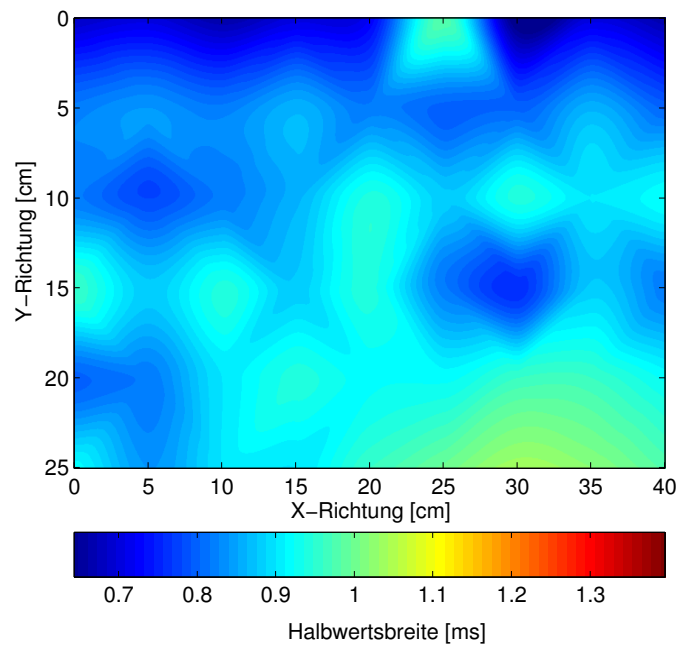


Abbildung 7.17: Halbwertsbreiten der Hammersignale der Wiederholungsmessung.

8 Diskussion

In dieser Arbeit wurden zwei verschiedene Verfahren zur Detektion und Lokalisierung von Schädigungen in faserverstärkten Kunststoffbauteilen vorgestellt. Die verwendeten Materialproben bestanden fast vollständig aus Rotorblättern von Windenergieanlagen. Teilweise wurden auch vergleichbare Materialien aus anderen Anwendungsbereichen untersucht. In diesem Kapitel sollen die Verfahren bezüglich ihres Vermögens Schäden zu detektieren und lokalisieren bewertet werden. Beim Ultraschall-Echo-Verfahren ist hierbei das Auflösungsvermögen, das von verschiedenen Faktoren abhängt, besonders wichtig. Außerdem soll bewertet werden, wie gut sich das Verfahren in ein automatisiertes Prüfsystem integrieren lässt. Bei der lokalen Resonanzspektroskopie geht es um eine grundsätzliche Aussage über die instrumentierte Anwendung an faserverstärkten Kunststoffen, da sie in der hier vorgestellten Form bisher nicht existierte. Die Anwendung der Verfahren an Rotorblättern von Windenergieanlagen wurde in dieser Arbeit erprobt. Die Schwierigkeiten hierbei und die Möglichkeiten für die Zukunft werden ebenfalls in diesem Kapitel diskutiert. Das Verwertungspotenzial für andere Industriezweige wird anhand eines Beispiels erläutert.

8.1 Bewertung des Ultraschall-Echo-Verfahrens

8.1.1 Auflösungsvermögen des Ultraschall-Echo-Verfahrens

Ein zerstörungsfreies Prüfverfahren ist nur dann brauchbar, wenn man in der Lage ist, Aussagen über die Genauigkeit und das Auflösungsvermögen des Verfahrens zu machen. Für das Auflösungsvermögen sind unterschiedliche Bedingungen ausschlaggebend. Als systembedingte Beschränkungen werden hier die Bedingungen vorgestellt, die nur von der

verwendeten Hardware abhängen. Die messtechnischen Beschränkungen liegen in der Durchführung des Verfahrens und sind nicht für jedes Untersuchungsobjekt identisch.

- **Systembedingte Beschränkungen**

Ein begrenzender Faktor des Auflösungsvermögens ist der Ultraschallprüfkopf. Für die Anwendung am Rotorblatt haben sich Prüfköpfe mit 2,5 cm Durchmesser als geeignet erwiesen. Bei der Verwendung kleinerer Prüfköpfe ist die Energie, die eingebracht wird, geringer und die Daten sind schwerer zu interpretieren. Durch die Größe der Koppelfläche hat auch der ausgesandte Schallkegel einen gewissen Durchmesser. Es gibt Ultraschallsensoren, die den Schallkegel fokussieren können. Somit erhält man in einer, vom Schallkopf abhängenden Tiefe, einen sehr kleinen Punkt, von dem ein genaues Abbild geliefert wird. Jedoch ist eine solche Fokussierung nur sinnvoll, wenn man die Defekttiefe sehr genau abschätzen kann und man einen dazu passenden Sensor wählt. Da bei der Anwendung an Rotorblättern von Windenergieanlagen die Materialdicken stark schwanken, ist die Verwendung eines fokussierenden Prüfkopfes nicht sinnvoll. Somit erhält man ein Abbild, das die Summe der Effekte der Schnittfläche von Schallkegel und Prüffläche zeigt. Diese Fläche ist mindestens so groß wie die Koppelfläche des Sensors. Defekte, die sehr klein sind, können in der Regel nicht aufgelöst werden, oder erscheinen nach Auswertung der Daten vergrößert oder verschmiert. Die Lokalisierung der Fehlstelle ist in der x-y-Fläche nur im Rahmen der Größe der Koppelfläche möglich.

Neben der Größe der Koppelfläche des Sensors ist die Frequenz des Sensors wichtig. Der Einsatz von Breitbandsensoren hat sich für die Prüfaufgabe als vorteilhaft erwiesen. Die Resonanzfrequenz eines Breitbandsensors liegt außerhalb des nutzbaren Bereichs. Sie verhalten sich über den gesamten nutzbaren Frequenzbereich relativ linear. Jedoch existieren keine Sensoren, die über alle Frequenzen gleich reagieren. In der Regel hat man es mit einer gaußförmigen Kurve zu tun, die angibt, in welchen Bereich der Sensor am empfindlichsten ist. Die Mitte dieser Gaußkurve wird als Mittenfrequenz des Sensors angegeben. In einem gewissen Frequenzbereich um diese Mittenfrequenz herum besitzt der Sensor ein breitbandiges Verhalten. Die Wahl der Mittenfrequenz des Sensors hat also

einen Einfluss auf die Genauigkeit der Messungen, da das Auflösungsvermögen von den zur Untersuchung verwendeten Frequenzen abhängt. Defekte, die kleiner als die verwendeten Wellenlängen sind, können nicht aufgelöst werden.

Faserverstärkte Kunststoffe sind mit Ultraschall nicht einfach zu untersuchen. Die Ultraschallwellen werden an den Faserschichten reflektiert und eine Dateninterpretation wird dadurch schwierig. Es ist also sinnvoll, für die Untersuchungen Wellenlängen zu wählen, die so groß sind, dass der Werkstoff als homogen betrachtet werden kann. Bei den Untersuchungen in dieser Arbeit wurden Ultraschallgeber mit Mittenfrequenzen von 0,5 MHz und 1 MHz verwendet. Bei üblichen P-Wellengeschwindigkeiten in GFK zwischen 2500 m/s und 3000 m/s entspricht das Wellenlängen zwischen 2,5 mm und 6 mm.

Durch die Wahl der Ultraschallprüfköpfe können also Defekte, die kleiner als etwa ein halber Zentimeter sind, nicht aufgelöst werden. Außerdem ist die Genauigkeit der Lokalisierung in x-y-Richtung durch die Koppelfläche gegeben und beträgt in diesem Fall $\pm 1,25$ cm.

Ein weiterer systembedingter begrenzender Faktor des Auflösungsvermögens des Verfahrens liegt in der Genauigkeit der Zeitbasis der Signalaufzeichnung. Zur Bestimmung der Tiefenlage eines Defekts, also der Lokalisierung entlang der z-Achse, muss zum einen der Zeitpunkt des Rückwandechos genau bestimmt werden. Dieser kann, je nach Datenqualität, pixelgenau bestimmt werden und wird deshalb in erster Linie durch die Samplingfrequenz der Datenerfassung begrenzt. Die Samplingfrequenz ist auf der Datenerfassungskarte einstellbar. Samplingfrequenzen zwischen 10 kHz und 1 MHz haben sich als sinnvoll erwiesen. Oftmals ist es einfacher, das Maximum des Rückwandechos zu bestimmen, als den Beginn des Echos. Dadurch wird ein systematischer Fehler bei der Tiefenbestimmung gemacht, der aber durch eine Offsetkorrektur ausgeglichen werden kann. Zur Bestimmung der Tiefenlage eines Defekts muss außerdem die P-Wellengeschwindigkeit im Material bekannt sein. Diese kann, aufgrund der Anisotropie der faserverstärkten Kunststoffe, nur in Durchschallung bestimmt werden. Das ist oft nicht möglich. Bei mehreren Schichten unterschiedlicher Materialien, z.B. GFK und Epoxidharz, müssen die P-Wellenge-

schwindigkeiten beider Materialien bekannt sein. Bei Messungen an Rotorblättern von Windenergieanlagen sind Materialdicken und -qualitäten sowie der Materialverbund über die Rotorblattlänge variabel. Geschwindigkeitsbestimmungen sind, wenn überhaupt, im Bereich der Flanschverbindungen möglich. Die hier gemessenen Geschwindigkeiten lassen sich nicht auf die Verhältnisse im kompletten Rotorblatt übertragen, so dass Aussagen über die Tiefenlagen von Defekten meist nur relativ möglich und sinnvoll sind. Bei genau im Labor bestimmten Geschwindigkeiten und sehr guten Material- und Signalqualitäten, lassen sich Tiefenlagen von Defekten jedoch auf einige Millimeter genau bestimmen.

Die Kombination aus Messsystem und gewähltem Ultraschallgeber beschränkt ebenfalls das Auflösungsvermögen. In Kapitel 4.3 sowie in den vorangegangenen Kapiteln werden A-Scans von Ultraschall-Echo-Messungen mit dem verwendeten Equipment gezeigt. Je nach Sensor und Einstellungen des Pulsers zeigt sich schon bei Leermessungen ein anderes Verhalten des Systems. Hier zeigt sich auch, dass das System über eine Totzeit verfügt, die von verschiedenen Einstellungen von Pulser und Datenerfassungskarte abhängen. Je nach verwendetem Sensor sind andere Einstellungen sinnvoll, da die Sensoren unterschiedliche Nachschwingverhalten haben. Ein Herausdämpfen des Nachschwingens hat allerdings oft eine vergrößerte Systemtotzeit zur Folge. Es ist also sinnvoll für bestimmte Materialdicken verschiedene Einstellungen und Sensoren zu wählen. Für sehr dünne Werkstoffe sollte die Systemtotzeit kurz gehalten werden. Werden größere Tiefen untersucht, können stärker nachschwingende Sensoren verwendet werden. Es ist allerdings schwierig mit ein und demselben Sensor verschieden dicke Bereiche zu untersuchen. Bei den Messungen am Rotorblatt (Kapitel 7) zeigte sich dieses Verhalten bei Messungen nahe der Blattspitze. Die eigentlichen Reflexionen gingen in der Systemzeit unter. Für die dickeren Bereiche waren Sensor und Systemeinstellungen jedoch angemessen ausgewählt worden.

- **Messtechnisch bedingte Beschränkungen**

Neben den Beschränkungen durch das Messsystem aus Pulser/Receiver und Ultraschallgeber, gibt es Beschränkungen des Auflösungsvermögens, die messtechnisch bedingt sind. Den größten Ein-

fluss hat im Moment jedoch das gewählte Messraster. Beim Ultraschall-Echo-Verfahren handelt es sich um ein punktuell-Verfahren, d.h. es werden einzelne Punktmessungen an einem vorgegebenen Raster ausgeführt. Wird ein Messraster mit einem Messpunkt-Abstand von 5 cm gewählt, so werden Defekte, die wesentlich kleiner sind und zwischen den einzelnen Messpunkten liegen, nicht erfasst. Es muss also im Vorfeld entschieden werden, wie groß die zu detektierenden Schädigungen sein sollen um danach ein Messraster zu definieren. Bei den Untersuchungen, die in dieser Arbeit beschrieben sind, wurden im Labor Messpunkt-Abstände von 3 bis 5 Zentimetern gewählt. Damit erhält man eine relativ dichte Überdeckung des Probekörpers und kann Schädigungen, die größer als ein Zentimeter sind, gut auflösen. Bei den Messungen am Rotorblatt betrug der Messpunkt-Abstand in y-Richtung 10 cm, da die automatisierte Datenerfassung noch nicht realisiert war und die Messungen sonst zu zeitaufwendig gewesen wären. Hier kann es passieren, dass Schäden, die genau zwischen den Messpunkten liegen, nicht detektiert werden, auch wenn sie größer als einige Zentimeter sind.

Abschließend lässt sich sagen, dass das Auflösungsvermögen des Ultraschall-Echo-Verfahrens zum einen von systembedingten Randbedingungen abhängt, zum anderen von Einflüssen wie Messrasterdichte und Signalqualität. Die systembedingten Fehler lassen sich sehr gut quantifizieren, spielen jedoch in der Praxis bisher eher eine untergeordnete Rolle. Das Messverfahren ist in der Lage, Defekte der Größe weniger Zentimeter zu detektieren. Bei guter Signalqualität können Aussagen über die Tiefenlagen in der Größenordnung einiger Millimeter gemacht werden. Es ist davon auszugehen, dass relevante Schädigungen in Rotorblättern von Windenergieanlagen in dieser Größenordnung zu finden sind. Luft-einschlüsse, die nur wenige Millimeter groß sind, beeinträchtigen in der Regel die Festigkeit der Rotorblätter nicht.

8.1.2 Anwendbarkeit am Rotorblatt

Aufgrund der schwierigen Materialverhältnisse in den Rotorblättern, sind spezielle Anforderungen an das Messsystem gestellt. Das Ultraschall-Echo-Verfahren wurde für die Untersuchung der Stegverklebungen entwickelt. Labormessungen und Messungen an einem Testrotorblatt zeigten, dass Stegverklebungen und Schädigungen lokalisiert werden konn-

ten. Das Ultraschall-Echo-Verfahren lässt sich nur für die Überprüfung der Gurtbereiche und die Vorder- und Hinterkante des Rotorblattes einsetzen. Durch die große Porosität der Kunststoffschäume, die oft in den Sandwichbereichen der Rotorblätter zum Einsatz kommen, unterliegen die Ultraschallwellen einer starken Dämpfung. An den Poren werden die Ultraschallwellen gestreut und es kommt praktisch keine Energie mehr am Sensor an. Da es auch in diesen Bereichen zu Lufteinschlüssen und Eliminationen kommen kann, ist die Kombination mit einem weiteren Prüfverfahren, z.B. der lokalen Resonanzspektroskopie, sinnvoll.

8.1.3 Automatisierung des Ultraschall-Echo-Verfahrens

Das Ultraschall-Echo-Verfahren ist in der momentanen Systemkonfiguration problemlos in ein automatisiertes Messsystem integrierbar. Über eine spezielle Sensorhalterung wird der Sensor mit einer definierten Kraft trocken oder nass angekoppelt und die Messung selbständig durchgeführt. Die Kommunikation des Messsystems mit dem automatisierten Trägersystem erfolgt über TCP/IP und wurde im Rahmen dieser Arbeit erprobt. Die Verwendung automatisierter Prüfsysteme, die selbständig Messungen durchführen können, ist vor allem dort anzustreben, wo die Rotorblätter schwer zugänglich sind oder der Zugang ein hohes Risiko für die Gutachter darstellt, was zum Beispiel bei Offshore-Anlagen der Fall ist. Die Gutachter übernehmen dann die Aufgabe der Begutachtung und Interpretation der gemessenen Daten. Ohne die nötigen Kenntnisse über Material und Messsystem ist eine Beurteilung des Rotorblattzustandes, trotz der automatisierten Messung, nicht möglich.

8.1.4 Ausblick: Ultraschall-Echo

Beim Ultraschall-Echo-Verfahren ist vor allem eine Verbesserung des Auflösungsvermögens über die Verwendung engmaschiger Messraster anzustreben. Um einen geringeren Messpunktastand bei trockener Ankopplung der Sensoren ohne gleichzeitige Erhöhung der Messzeit zu realisieren, ist ein System, das statt einem Sensor mehrere Sensoren verwendet, die gleichzeitig aufgesetzt werden, denkbar. Eine Alternative für Messungen im Produktionsablauf der Rotorblätter bietet ein System, dass die Ultraschallsensoren nass ankoppelt und über das Rotorblatt zieht und so eine quasikontinuierliche Messung realisiert. Die räumliche

Auflösung wird hier durch die Pulswiederholfrequenz des Pulsers und die Geschwindigkeit, mit der der Sensor bewegt wird, beeinflusst.

Zur genaueren Bestimmung der Tiefenlagen von Defekten können verschiedene Algorithmen zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses verwendet werden. Honarvar et al. (2004) nutzen eine Kombination aus Wienerfilter und autoregressiver spektraler Extrapolation zur besseren Identifikation von Echos in den Zeitsignalen. Die Anwendung auf die im Rahmen dieser Arbeit aufgezeichneten Daten erfolgte bisher nicht. Eine Vereinfachung der Interpretation ist jedoch zu erwarten.

Zur vollständigen Automatisierung des Messverfahrens sind ebenfalls weiterführende Untersuchungen durchzuführen. Die Anpresskraft des Sensors an die Rotorblattoberfläche sollte möglichst konstant gehalten werden. Die Druckkraft, die vom Roboter auf den Sensor ausgeübt wird, ändert sich jedoch mit dem Krümmungswinkel des Rotorblattes. Untersuchungen und Berechnungen zur Anpassung der Druckkraft je nach Krümmung des Rotorblattes sind notwendig um eine Amplitudenauswertung der Messdaten möglich zu machen. Außerdem ist es wünschenswert, dass die Messungen ohne Anwesenheit eines Prüflingenieurs durchgeführt werden können. Eine optische Kontrolle der Messdaten ist also nicht sofort möglich. Das Messsystem muss selbständig entscheiden, wann eine Messung erfolgreich war oder wann ein Signal unzureichend ist und die Aufzeichnung wiederholt werden muss, weil beispielsweise die Ankopplung aufgrund von Verschmutzungen der Oberfläche schlecht war. Ein geeignetes Kriterium für die Bewertung muss gefunden werden. Eine Datenbasis aus vielen Messungen an Rotorblättern kann hierbei helfen.

8.2 Bewertung der lokalen Resonanzspektroskopie

Bei der lokalen Resonanzspektroskopie handelt es sich zwar um ein Verfahren, das in ähnlicher Form seit vielen Jahren Anwendung findet, jedoch ist die theoretische Beschreibung und instrumentierte Auswertung bisher sehr lückenhaft. In dieser Arbeit wurde beschrieben, wie das Verfahren instrumentiert werden kann und es wurden Möglichkeiten zur Signalauswertung aufgezeigt. Damit eine Schädigung detektiert werden kann, muss sie eine Änderung (in der Regel eine Herabsetzung) der Kontaktsteifigkeit zwischen Impulshammer und Untersuchungsob-

jekt, hervorrufen. Bei Messungen an GFK-Bauteilen ist dies bei Delaminationen in den Laminatschichten, bei Lufteinschlüssen im Material oder bei Materialänderungen der Fall. Die Änderungen der Kontaktsteifigkeiten durch einen Defekt sind umso stärker, je näher der Defekt an der Oberfläche liegt. Das Verfahren reagiert also empfindlicher auf oberflächennahe Defekte. Defekte in einigen Zentimetern Tiefe können nicht mehr aufgelöst werden.

Die Änderung der Kontaktsteifigkeit lässt sich auf zwei Arten registrieren. Über eine Aufzeichnung der Krafterregung eines instrumentierten Impulshammers kann über die Dauer des Kontaktes vom Hammer mit dem Untersuchungsobjekt eine schnelle Aussage über Änderungen im Material gemacht werden. Ein ähnliches Verfahren wird bereits erfolgreich zur täglichen Zustandskontrolle am Transrapid (IAGB, 2009) angewandt. Darüberhinaus führt die Änderung in der Kontaktsteifigkeit zu einem veränderten Klang. Der Klang kann über ein Mikrofon aufgezeichnet werden und die Änderung in einer Frequenzänderung detektiert werden.

Das Verfahren ist in der Lage, Schädigungen bezüglich ihrer Lage in der Fläche zu detektieren. Eine Aussage über die Tiefenlage eines Defektes lässt sich nur qualitativ über die Stärke der Änderungen machen. Bisher ist es nicht möglich, aus den Messdaten eine Defekttiefe zu berechnen.

Das Verfahren ist ein punktuell Verfahren. Der Hammerimpakt ist auf etwa $0,5 \text{ cm}^2$ begrenzt. Das Auflösungsvermögen in der Fläche hängt vom gewählten Messraster ab. Bei einem Messraster mit einigen Zentimetern Abstand können Defekte, die kleiner als der Messpunkt Abstand sind, nur aufgelöst werden, wenn sie zufällig direkt unter dem Messpunkt liegen.

In der Arbeit wurden an verschiedenen Probestücken Messungen durchgeführt. Bei der Untersuchung von Proben, die kleiner als einige Meter sind, ist bei den Messungen zu berücksichtigen, dass eventuell angeregte globale Eigenschwingungen des Prüfobjektes die lokalen Schwingungen überdecken können und somit eine Aussage über Schädigungen nur bedingt möglich ist. Für die Messung sollten die Prüfobjekte außerdem möglichst vollflächig auf einer schwingungsdämpfenden Unterlage, wie z.B. Schaumstoff, gelagert werden.

Die Auswertung der Klangsignale ist nicht trivial. Je nach Untersuchungsobjekt zeigen sich Änderungen im Material durch Wegfallen oder Hinzukommen bestimmter Frequenzen. Bisher konnte kein Muster er-

kannt werden, nach dem die Frequenzänderungen funktionieren, da die untersuchten Probekörper sehr unterschiedlich waren. Für weitere Untersuchungen ist die Herstellung von Prüfkörpern mit definierten Schädigungen sinnvoll. Der Einsatz von Mustererkennungsalgorithmen wie z.B. neuronalen Netzen oder multidimensionalen Auswertalgorithmen könnte eine Möglichkeit zur besseren Darstellung der Ergebnisse sein.

8.2.1 Anwendbarkeit am Rotorblatt

Die lokale Resonanzspektroskopie bietet sich als sinnvolle Ergänzung zum Ultraschall-Echo-Verfahren an, da sich oberflächennahe Schädigungen auch im Sandwichbereich detektieren lassen, in denen das Ultraschall-Echo-Verfahren an seine Grenzen stößt. Die Messung ist einfach durchzuführen und die benötigte Ausrüstung klein und handlich.

Das Verfahren wurde, wie in Kapitel 7 gezeigt, am Rotorblatt getestet. Das Rotorblatt besaß allerdings keine Beschichtung und die Oberfläche des Blattes war durch Witterungseinflüsse beeinträchtigt. Trotzdem konnten mit der lokalen Resonanzspektroskopie im Vorfeld angezeichnete oberflächennahe Luftpfeifen und Hohlklänge verifiziert werden. Die Anwendbarkeit des Verfahrens wurde damit demonstriert.

Bei einer Wiederholungsmessung konnten die Ergebnisse qualitativ bestätigt werden. Jedoch sind im direkten Vergleich quantitativ große Unterschiede zwischen den ersten Messungen und den Wiederholungsmessungen zu sehen. Die gemessenen Halbwertsbreiten der Wiederholungsmessungen waren kleiner als die der ersten Messungen. Da das gleiche Messgerät mit identischen Einstellungen verwendet wurde und auch die Einflüsse durch eine veränderte Anregungskraft gering sind, ist diese Änderung auf die veränderte Lage des Rotorblattes zurückzuführen. Während es bei den ersten Messungen auf dem Boden an zwei Punkten aufliegende gelagert wurde, war es bei den den Wiederholungsmessungen nur an der Blattwurzel in einen Versuchsaufbau eingespannt und außerdem zusätzlich statisch belastet. Die Spannungszustände im Rotorblatt wurden verändert, was sich auf die Kontaktsteifigkeit auswirkt. Bei einer Anwendung an montierten Rotorblättern sollte also darauf geachtet werden, dass sich das Rotorblatt bei Wiederholungsmessungen in einem vergleichbaren Spannungszustand befindet. Da Rotorblattinspektionen in der Regel am senkrecht vor dem Turm hängenden Rotorblatt durchgeführt werden, kann man davon ausgehen, dass die Spannungszustände dann vergleichbar sind.

8.2.2 Ausblick: Lokale Resonanzspektroskopie

Bei der lokalen Resonanzspektroskopie liegt das größte Entwicklungspotential in der Auswertung der Klangsignale. Die Klangsignale enthalten eine große Anzahl von Informationen, die sich ohne Erfahrung nur sehr schwer interpretieren lassen. Wünschenswert wäre ein Verfahren, das einfach angewandt werden kann und das schnell ein Bild der Schädigungen liefert. Hierfür sind Mustererkennungsalgorithmen wie z.B. neuronale Netze oder auch andere multidimensionale Auswertungsalgorithmen denkbar. Wichtig ist hierfür die Erstellung einer Datenbasis von Signalen, die an bestehenden Windenergieanlagen aufgezeichnet werden.

8.3 Verwertung der Verfahren

Beide Verfahren wurden zusätzlich zu den hier vorgestellten Anwendungen erfolgreich an ähnlichen Materialien angewandt. Bei Messungen im Rahmen einer Kanalsanierung mit Schlauchinnenlinern zeigten sich beide Verfahren als geeignet. Schlauchliner zur Kanalsanierung bestehen aus Kunststoffen, die entweder mit Glasfasern oder mit Nadelfilz verstärkt sind. Die Materialien sind also denen in Rotorblättern von Windenergieanlagen ähnlich. Die Materialdicken der Liner für Kanäle mit großen Durchmessern sind ebenfalls mit denen in Rotorblättern von Windenergieanlagen vergleichbar. Zur Wanddickenbestimmung eignete sich das Ultraschall-Echo-Verfahren. Minderdicken von etwa einem halben Zentimeter konnten zuverlässig detektiert werden (Diburg et al., 2010). Mit der lokalen Resonanzspektroskopie konnten oberflächennahe Materialveränderungen sichtbar gemacht werden (Diburg et al., 2009). Somit ist die Verwertung der Ergebnisse dieser Arbeit auch in anderen Industriezweigen gezeigt worden. Besonders im Bereich der Kanalsanierung ist ein sehr großer Markt vorhanden. Insbesondere automatisierte Prüfsysteme sind hier erforderlich, da die Kanäle oft nur schwer oder gar nicht zugänglich sind. Weitergehende Anwendungen der Verfahren in anderen Bereichen, wie z.B. dem Schiffsbau, sind ebenfalls denkbar.

9 Zusammenfassung

Diese Arbeit behandelt zwei auf elastischen Wellen basierende Verfahren, mit deren Hilfe Schädigungen in dicken GFK-Bauteilen detektiert werden können. Die Verfahren wurden im Rahmen eines Innonet-Projekts (*RIWEA - Roboter zur Inspektion der Rotorblätter von Windenergieanlagen mit Thermographie und Ultraschall*) für die Anwendung an Rotorblättern von Windenergieanlagen entwickelt, sind aber auch an ähnlichen Werkstoffen und Bauteilen anwendbar. Im Projekt wurde ein Robotersystem entwickelt, das gleichzeitig Ultraschall- und Thermographiemessungen an Rotorblättern durchführen kann.

Windenergie wird bereits seit Jahrtausenden vom Mensch genutzt. Zur Stromerzeugung wird sie vor allem in den letzten Jahrzehnten vermehrt verwendet. Im Hinblick auf die rasch abnehmenden fossilen Brennstoffe, gewinnt ihre Nutzung zunehmend an Bedeutung. Deutschland spielt eine Vorreiterrolle bei der Entwicklung neuer und immer größerer Windenergieanlagen. Es gibt zahlreiche Hersteller, deren Anlagen sich durch Größe, Nennleistung und Art der Leistungsbegrenzung voneinander unterscheiden.

Die Rotorblätter von Windenergieanlagen werden in Betrieb stark belastet. Bereits kleinere Schädigungen, wie Lufteinschlüsse oder Delaminationen von wenigen Zentimeter Größe im Rotorblatt, können zu gravierenden Ausfällen an der Windenergieanlage führen. Begutachtungen der Rotorblätter finden regelmäßig statt, jedoch reichen visuelle Inspektionen und einfache Klopfprüfungen nicht aus, um zuverlässige Aussagen über den Zustand des Rotorblatts zu machen. Die Entwicklung zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Unterstützung der Inspektionen war Ziel dieser Arbeit.

Rotorblätter von Windenergieanlagen bestehen zum Großteil aus faserverstärkten Kunststoffen. Ähnliche Werkstoffe finden auch in der Luft- und Raumfahrttechnik Anwendung. In der Luft- und Raumfahrttechnik werden unterschiedliche Bauteile routinemäßig mit zerstörungsfreien Prüfverfahren untersucht. Die Verfahren sind meist recht gut erforscht, aber oft auch kostenintensiv und aufwendig. Die direkte Übertragung

auf die Anwendung an Rotorblättern von Windenergieanlagen war nicht möglich. Die besonders großen Dicken der Bauteile und die stark schallschwächenden Eigenschaften des Materials, verknüpft mit der Vielfältigkeit der möglichen Schädigungen, stellten besondere Anforderungen an die Verfahren. Zusätzlich mussten die Verfahren robust genug sein, auch im Freien und bei widrigen Witterungsverhältnissen zu funktionieren.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren, verwenden elastische Wellen zur Detektion von Schädigungen. Die Ausbreitung elastischer Wellen und ihr Verhalten an Materialübergängen bilden die Grundlage für die Untersuchungen.

Das Ultraschall-Echo-Verfahren ist ein in der ZfP bereits etabliertes Laufzeitverfahren. Es werden über geeignete Sensoren elastische Wellen (in der Regel Longitudinalwellen) in das Bauteil gesendet und die Reflexionen an Grenzschichten registriert. Die Auswertung erfolgt im Zeitbereich. Bei bekannten Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten können Zeitpunkte besonders starker Reflexionen direkt in Tiefenlagen umgerechnet werden.

Ultraschallsensoren müssen in der Regel über eine Flüssigkeit oder ein Gel an die Oberfläche des zu untersuchenden Bauteils angekoppelt werden. Das ist bei der Anwendung am Rotorblatt eher hinderlich, da eine große Menge Koppelmittel nötig ist. Außerdem schließt eine nasse Ankopplung der Sensoren eine gleichzeitige Thermographiemessung, die im Projekt vorgesehen war, aus.

Für die Anwendung am Rotorblatt ist die Wahl des Ultraschallprüfsystems besonders wichtig. Es wurden Versuche mit unterschiedlichen Sensoren durchgeführt. Die Wahl fiel auf breitbandige Sensoren, die neben ihrer hohen Empfindlichkeit die Möglichkeit einer trockenen Ankopplung boten. Die trockene Ankopplung führt zwangsläufig zu einem höheren Energieverlust der Ultraschallwellen beim Übergang von Sensor zum Bauteil und umgekehrt. Die Größe des Energieverlustes konnte quantifiziert werden. Mit dem entwickelten Ultraschallsystem konnten auch bei trockener Ankopplung zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden.

Das Ultraschall-Echo-Verfahren sollte hauptsächlich eingesetzt werden um Verklebungsfehler unter mehreren Zentimeter GFK zu detektieren. Hierzu wurden an geeigneten Proben Messungen durchgeführt. Die intakten Verklebungen konnten detektiert werden. Proben mit geschädigten Verklebungen lagen nicht vor.

Das Ultraschall-Echo-Verfahren sollte im Projekt als Teil eines automatisierten Messsystems angewandt werden. Hierfür war es notwendig

die Hard- und Software an eine robotergestützte Anwendung anzupassen. Eine Kommunikation zwischen Messsystem und Trägersystem wurde über TCP/IP verwirklicht. Der Ultraschallgeber wurde in eine spezielle Halterung geschraubt, durch die die Krümmung des Rotorblattes teilweise ausgeglichen werden konnte. Messungen mit dem automatisierten System fanden in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IFF in Magdeburg statt.

Die lokale Resonanzspektroskopie ist eine Weiterentwicklung der bei Rotorblattbegutachtungen üblichen Klopfprüfungen. Hierbei wird das Bauteil punktweise mit einem Hammer abgeklopft und Änderungen des Klangs werden mit einem Mikrofon aufgezeichnet. Im Gegensatz zum Ultraschall-Echo-Verfahren handelt es sich hierbei um ein Resonanzverfahren. Das bedeutet, die Auswertung der Klangsignale findet im Frequenzbereich statt.

Bei der Anregung eines Klangs durch einen Hammerimpakt, handelt es sich um einen teilelastischen Stoß zwischen Hammer und Bauteiloberfläche. Ein Teil der Energie wird beim Stoß in elastische Wellen und Wärmeenergie umgewandelt. Die Stoßzahl ist eine Materialkonstante und gibt an wie viel Prozent der eingebrachten Energie bei einem Stoß auf diese Weise verlorengehen. Die Änderung des durch einen Hammer erzeugten Klangs in Anwesenheit von Schädigungen wird durch eine Änderung der Kontaktsteifigkeit zwischen Hammer und Bauteilmaterial hervorgerufen. Diese Änderung der Kontaktsteifigkeit hat außerdem eine Änderung in der Dauer des Kontaktes zwischen Hammer und Bauteiloberfläche zur Folge, die über einen Prüfhammer mit integriertem Kraftmesser ebenfalls registriert werden kann.

Die lokale Resonanzspektroskopie ist als instrumentiertes Prüfverfahren noch wenig erforscht. In dieser Arbeit wurden zuerst die Stoßparameter unterschiedlicher Materialien, die in Rotorblättern vorkommen, über einen einfachen Kugelsprungversuch ermittelt. Die Stoßparameter sind für weichere Materialien kleiner als für härtere Materialien. Sie korrelieren mit den Änderungen der Kontaktzeiten zwischen Hammerimpakt und Bauteiloberfläche und somit auch mit den Kontaktsteifigkeiten.

Die Kontaktsteifigkeiten hängen allerdings auch vom Prüfhammer ab. Der in dieser Arbeit verwendete Prüfhammer verfügte über mehrere Aufsätze. Die Unterschiede von sehr weichen Gummiaufsätzen bis hin zu dünnen Stahlspitzen wurden in dieser Arbeit untersucht. Es zeigte sich, dass für die Anwendung am Rotorblatt die Verwendung von harten Kunststoffspitzen (Delrin) von Vorteil ist. Sie erzeugen ein repro-

duzierbares Signal mit großem Frequenzband ohne die Oberfläche des Rotorblattes zu beschädigen.

Da in der ersten Versuchsphase des Projektes keine vollständigen Rotorblätter zu Testzwecken zur Verfügung stand, musste die lokale Resonanzspektroskopie an kleineren Probestücken im Labor getestet werden. Die Übertragbarkeit auf größere Proben ist problematisch, da eine schwingungsfreie Lagerung der Probestücke nicht gewährleistet werden kann. Auch kann die Begrenzung der Probe zu sehr starken Eigenschwingungen führen, die im Zweifelsfall die durch Schäden entstehenden Effekte überlagern können. Dennoch konnten geeignete Probestücke gefunden werden, an denen im Labor Schädigungen detektiert werden konnten.

Beide hier vorgestellten Verfahren wurden an einer GFK-Platte mit mehreren Fehlstellen verglichen. Die Platte war für die Anwendung des Ultraschall-Echo-Verfahrens etwas dünn. Durch Verwendung eines anderen Ultraschallgebers konnten jedoch trotzdem Messungen durchgeführt werden. Die Platte wurde im Vorfeld durchleuchtet, so dass die Lage einiger Fehlstellen bereits bekannt war. Beide Verfahren waren in der Lage einen Großteil der Schäden zu detektieren. Die Klangsignale der lokalen Resonanzspektroskopie konnten hier nicht zur Lokalisierung zur Rate gezogen werden, da die Eigenschwingungen der Platte sehr dominant waren. Die Auswertung der Hammeranregung allein war jedoch aussagekräftig genug.

Gegen Ende der Projektlaufzeit wurden Messungen an einem kompletten Rotorblatt möglich. Dieses Rotorblatt war bereits vorgeschädigt. Mit dem Ultraschall-Echo-Verfahren wurden mehrere Tausend Messpunkte erfasst. Es konnte gezeigt werden, dass die Stegverklebungen detektiert werden konnten und eine Aussage über Verklebungsfehler möglich war. Die lokale Resonanzspektroskopie wurde an drei ausgewählten Messfeldern angewandt, in denen im Vorfeld von einem Sachverständigen mögliche Materialveränderungen markiert worden waren. Die Auswertung der Hammeranregung führte zu leicht verständlich und intuitiv interpretierbaren Ergebnissen, die die Materialveränderungen widerspiegeln. Die Anregung der Klangsignale war komplizierter, bestätigte aber die Auswertung der Hammersignale. Vergleichsmessungen etwa ein dreiviertel Jahr später und nach einer dynamischen Belastung des Rotorblattes zeigten die Reproduzierbarkeit beider Messverfahren. Auch konnten Änderungen zu den ersten Messungen festgestellt werden, die mit einer Verschlechterung des Zustandes des Rotorblattes gut korrelieren.

Abschließend werden die Grenzen der Verfahren und die Anwendbar-

keit an Rotorblättern von Windenergieanlagen diskutiert. Nötige weitere Arbeiten bis zur Marktreife der Messsysteme werden formuliert. Auch die mögliche Verwertung der Ergebnisse in anderen Industriezweigen wird hier angesprochen.

Abkürzungsverzeichnis

B-Scan	2-D Darstellung
B1SL	Sensortyp
B2SN	Sensortyp
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BWE	Bundesverband für Windenergie
C602	Sensortyp
C603	Sensortyp
CFK	Kohlefaserverstärkter Kunststoff
CMS	Condition Monitoring System
D-Scan	3D-Darstellung
DN 50	Rohrdurchmesser 50 cm
DS	Druckseite des Rotorblatts
E 126	Typ einer Enerconanlage
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
FL2500	Typ einer Fuhrländeranlage
FRP	Fiber Reinforced Plastic
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GFRP	Glassfiber Reinforces Plastic, GFK
IFF	Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung

IMA	Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH
IZFP	Fraunhoferinstitut für ZfP
K1SM	Sensortyp
kHz	Kilohertz
kW	Kilowatt
LRS	Lokale Resonanzspektroskopie
MHz	Megahertz
MW	Megawatt
ns	Nanosekunde
P-Welle	Elastische Longitudinalwelle
S-Welle	Elastische Transversalwelle
SS	Saugseite des Rotorblatts
UD	Gelegerichtung unidirektional
V	Volt
V101	Sensortyp
WEA	Windenergieanlage
WKI	Fraunhofer Institut für Holzforschung
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung
μ s	Mikrosekunde

Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
\vec{a}	Vektor	
a	Skalare Größe	
a_i	i-te Komponente eines Vektors	
a_{ij}	ij-te Komponente einer Matrix	
c	Leistungsbeiwert	
c_{Betz}	Betz'scher Leistungsbeiwert	
δ	Deflexion	
E	Elastizitätsmodul	N/m^2
f	Kraft	N
f_{Ny}	Nyquistfrequenz	Hz
k	Stoßzahl	
k_c	Kontaktsteifigkeit	N/m
k_d	Defektsteifigkeit	
λ	1. Laméscher Parameter	
λ_s	Schnelllaufzahl	
μ	2. Laméscher Parameter, Schermodul	Pa
P_0	Leistung des Windes	W

P_{eff}	Nutzbare Leistung des Windes	W
ρ	Dichte	kg/m ³
R	Widerstand	Ω
PT	Profiltiefe	%
R	Entfernung zur Rotornabe	m
σ_{ij}	Spannungstensor	
u	Blattspitzengeschwindigkeit	m/s
v_p	P-Wellengeschwindigkeit	m/s
v_s	S-Wellengeschwindigkeit	m/s
v_w	Windgeschwindigkeit	m/s
ν	Poissonzahl	

Literaturverzeichnis

- Bundesweite Datenbank der Windradunfälle (1996 - 2006). URL <http://tinyurl.com/c3mqnv>.
- ADERHOLD, J.; MEINLSCHMIDT, P.; BROCKE, H.; JÜNGERT, A. Rotor Blade Defect Detection using Thermal and Ultrasonic Waves. In: DEWI (Hg.), *DEWEK Tagung* (2008) .
- BAUER, N. (Hg.). *Leitfaden zur Wärmeflussthermographie: Zerstörungsfreie Prüfung mit Bildverarbeitung*. Nummer 8 in Vision. Erlangen (2005).
- BETZ, A. *Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen*. Dan-denhoeck & Ruprecht, Göttingen, 1 Auflage (1926).
- BMU. Erneuerbare Energien in Zahlen: Internet Update ausgewählter Daten (Dezember 2009).
- BMU. Erneuerbare Energien in Zahlen: Nationale und internationale Entwicklung. Berlin (Juni 2009).
- BMU. Erneuerbare Energien in Deutschland 1990 bis 2007. Berlin (November 2009).
- BÖGNER, H. *Entwicklung einer einfachen Stoßsonde und Zuordnung der Stoßeigenschaften zu den mechanischen Eigenschaften von verwittertem und unverwittertem Naturstein*. Diplomarbeit, Universität Stuttgart, Stuttgart (1999).
- BUCKLEY, J. (Hg.). *Principles and Applications of Air-Coupled Ultrasonics*, Developments in Ultrasonic Transducers (1997).
- BUCKLEY, J. Air Coupled Ultrasound - A millennial review. In: *15th WCNDT Rome 2000* (2000) .

- BUNDESTAG. Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich. In: *Bundesgesetzblatt* (2004). 40.
- BWE. Grundsätze der Prüfung zur zustandsorientierten Instandhaltung von Windenergieanlagen. Osnabrück (2007).
- CASTAINGS, M.; CAWLEY, P. The generation, propagation and detection of Lamb waves in plates using air-coupled ultrasonic transducers. In: *J. Acoust. Soc. Am.* (1996). 100, 3070–3077.
- CAWLEY, P.; ADAMS, R.D. The Mechanics of the Coin-Tap Method of Non-Destructive Testing. In: *Journal of Sound and Vibration* (1988). 122, 299–316.
- CHILDERS, D. G.; SKINNER, D. P.; KEMERAIT, R. C. The Cepstrum: A Guide to Processing. In: *Proceedings of the IEEE* (1977). 65(10), 1428–1443.
- CHLADNI, E. F. F. *Die Akustik*. Breitkopf und Härtel, Leipzig (1802).
- CONRY, M. Notes on Wave Propagation in Anisotropic Elastic Solids (2005). URL <http://www.acronymchile.com>.
- DIBURG, B.; JÜNGERT, A.; GROSSE, C. Praxiseinsatz innovativer Inspektionstechniken und Prüfverfahren in einer linersanierten, begehbaren Prüfstrecke: Teil 2: Einsatz der lokalen Resonanzspektroskopie und des Impakt-Echo-Verfahrens. In: *3R international* (2009). 48(12/2009).
- DIBURG, B.; JÜNGERT, A.; GROSSE, C.; ADERHOLD, J.; SCHLÜTER, F. Praxiseinsatz innovativer Inspektionstechniken und Prüfverfahren in einer linersanierten, begehbaren Prüfstrecke: Teil 3: Einsatz der Wärmefluss-Thermographie und des Ultraschall-Echo-Verfahrens sowie Bewertung der getesteten zerstörungsfreien Prüfverfahren. In: *3R international* (2010). 49(01/2010).
- DILIGENT, O. *Interaction between Fundamental Lamb Modes and Defects in Plates*. Dissertation, University of London (2003).
- DILL-LANGER, G.; AICHER, S.; BERNAUER, W. Reflection Measurements at Timber Glue-Lines by Means of Ultrasound Shear Waves. In: *Otto Graf Journal* (2005). (Vol. 16), 273–284.

- EDWARDS, R.S.; DIXON, S.; JIAN, X. Enhancement of the Rayleigh wave signal at surface defects. In: *J. Phys. D: Applied Physics* (2004). 37, 2291–2297.
- EHRENSTEIN, G. W. *Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Eigenschaften*. Hanser, München, 2., völlig überarb. Aufl. Auflage (2006). ISBN 978-3-446-22716-3.
- EUROPÄISCHES PARLAMENT. Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (2009). 140.
- FELICETTI, R. Assessment of an Industrial Pavement via the Impact Acoustic Method. In: *SACoMaTiS 2008 International RILEM Conference*, S. 127–136 (2008).
- FERBER, C.; WANDEL, M. WEA-Mängeln mit Wärmetechnik auf der Spur. In: *Erneuerbare Energien* (2006). (12), 35–38.
- FRAUNHOFER, WKI. Jahresbericht 2004. Braunschweig (2004).
- GIESKE, J.H.; RUMSEY, M.A. Nondestructive Evaluation (NDE) of Composite-to-Metal Bond Interface of a Wind Turbine Blade Using an Acousto-Ultrasonic Technique. In: *Sandia Report* (1996).
- GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A.; BAO, J. Embedded Active Sensors for In-Situ Structural Health Monitoring of Thin-Wall Structures. In: *Journal of Pressure Vessel Technology* (2002). 124, 293–302.
- GOMEZ, T. E.; MONTERO, F. Bridging the Gap of Impedance Mismatch between Air and Solid Materials. In: *IEEE Ultrasonic Symposium* (2000) S. 1069–1072.
- GRAPS, A. An Introduction to Wavelets. In: *IEEE Computational Science* (1995). 2(2).
- GRIDIN, D.; CRASTER, R.V. Quasi-modes of a weakly curved waveguide. In: *Proc. R. Soc. London* (2003). 459, 2909–2931.
- GRIDIN, D.; CRASTER, R.V. Lamb quasi-modes in curved plates. In: *Proc. R. Soc. Lond* (2004). 460, 1831–1847.

- GROSSE, C. *Akustische Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von Baustoffen und Bauteilen*. Habilitationsschrift, Universität Stuttgart, Stuttgart (2005).
- GROSSE, C.; REINHARDT, H.-W. Zerstörungsfreie Prüfung von Faserverbundwerkstoffen im Bauwesen. In: F. DEHN; K. HOLSCHMACHER; V. N. TUE (Hg.), *Faserverbundwerkstoffe: Innovation im Bauwesen*, S. 121–140. Bauwerk, Berlin, Heidelberg (2005).
- GUO, N.; CAWLEY, P. The interaction of Lamb waves with the delaminations in composite laminates. In: *J. Acoust. Soc. Am.* (1993). 94, 2240–2246.
- GUYOTT, C. C. H. Cawley P. Adams R. D. The Non-Destructive Testing of Adhesively Bonded Structure: A Review. In: *J. Adhesion* (1986). 20, 129–159.
- HAMSTAD, M.A.; O’GALLAGHER, A.; GARY, J. A Wavelet Transform Applied to Acoustic Emission Signals: Part 1: Source Identification. In: *Journal of Acoustic Emission* (2002a). 20, 39–61.
- HAMSTAD, M.A.; O’GALLAGHER, A.; GARY, J. A Wavelet Transform Applied to Acoustic Emission Signals: Part 2: Source Location. In: *Journal of Acoustic Emission* (2002b). 20, 62–82.
- HAU, E. *Windkraftanlagen: Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit*. Springer-11774. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 4., vollst. neu bearb. Aufl. Auflage (2008). ISBN 9783540721512.
- HERBST, J. *Zerstörungsfreie Prüfung von Abwasserkanälen mit Klopf-schall*. Dissertation, Universität Karlsruhe (2004).
- HERTLIN, I.; HERKEL, T. Riss- und Gefügeprüfung mit akustischer Resonanzanalyse im Schall- und Ultraschallbereich für Kfz-Sicherheitsteile. In: *DGZfP-Jahrestagung 2003* (2003).
- HERTZ, H. Über die Berührung fester elastischer Körper. In: *Journal für reine und angewandte Mathematik* (1881). (92), 156–171.
- HILLGER, W.; GEBHARDT, W. Bildgebende Ultraschallprüfung an CFK-Probekörpern mit Ankopplung über Luft. In: *DGZfP-Tagung Berichtsband 68*, S. 243–250 (1999).

- HOLFERT, E. *Ultraschall-Echo-Messungen an Rotorblättern von Windenergieanlagen: Untersuchung und Quantifizierung der Unterschiede verschiedener Koppelmittel und Koppelverfahren: Diplomarbeit*. Diplomarbeit, Universität Stuttgart, Stuttgart (2008).
- HOLSCHNEIDER, M.; DIALLO, M.S.; KULESH, M.; OHRNBERGER, M.; LÜCK, E.; SCHERBAUM, F. Characterization of dispersive surface waves using continuous wavelet transforms. In: *Geophys. J. Int.* (2005). 163, 463–478.
- HONARVAR, F.; SHEIKHZADEH, H.; MOLES, M.; SINCLAIR, A. N. Improving the time-resolution and signal-to-noise ratio of ultrasonic NDE Signals. In: *Ultrasonics* (2004). 41, 755–763.
- IAGB. IAGB Transrapid (2009). URL <http://www.iabg.de/transrapid/>.
- JAMES III, G.H.; CARNE, T.G.; LAUFFER, J.P. The Natural Excitation Technique (NExT) for Modal Parameter Extraction from Operating Wind Turbines. In: *Sandia Report* (1993).
- JANSEN, D.P.; HUTCHINS, D.A.; MOTTRAM, J.T. Lamb Wave Tomography of Advanced Composite Laminates Containing Damage. In: *Ultrasonics* (1994). 32(2), 83–90.
- JESKANEN, H.; PITKÄNEN, J.; KAUPPINEN, P. Applications of Materials Property Ultrasonic Probe. In: *8th ECNDT Proceedings, Barcelona* (2002) .
- JÜNGERT, A.; GROSSE, C. Inspection techniques for wind turbine blades using ultrasound and sound waves. In: *NDTCE'09, Nantes, France* (2009) S. 625–632.
- JÜNGERT, A.; GROSSE, C.; ADERHOLD, J.; MEINLSCHMIDT, P.; SCHLÜTER, F.; FÖRSTER, T.; FELSCH, T.; ELKMANN, N.; KRÜGER, M.; LUTZ, O. Zerstörungsfreie robotergestützte Untersuchung der Rotorblätter von Windenergieanlagen mit Ultraschall und Thermographie. In: *ZfP Zeitung* (2009). 115, 43–49.
- KACZMAREK, H. Lamb Wave Interaction with Impact-induced Damage in Aircraft Composite: Use of the A_0 Mode Excited by Air-Coupled Transducers. In: *Journal of Composite Materials* (2003). 37, 217–232.

- KESSLER, S.S.; SPEARING, M.S; SOUTIS, C. Damage Detection in composite materials using Lamb wave methods. In: *Smart Materials and Structures* (2002). 11, 269–278.
- KESSLER, S.S.; SPEARINGS, M.S.; SOUTIS, C. Structural Health Monitoring in Composite Materials Using Lamb Wave Methods. In: *ASC-2001* (2001). 043.
- KIM, S. J. Damage Detection in Composite Laminates using Coin-Tap Method. In: *Acoustics '08 Paris*, S. 405–409 (2008).
- KÜHN, M. Windenergie - Rückenwind für zukunftsfähige Technik. In: *Physik unserer Zeit* (2007). 38(3), 116–122.
- LAY, T.; WALLACE, T. C. *Modern global seismology*, Band 58 von *International geophysics series*. San Diego, Calif. Academic Press, [Nachdr.] Auflage (2003). ISBN 978-0127328706.
- LEONARD, K. R.; HINDERS, M. K. Guided wave helical ultrasonic tomography of pipes. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* (2003). 114(2), 767–774.
- LITWILLER, D. Resonant Ultrasound Spektroskopie and the Elastic Properties of Several Selected Materials (2000).
- LUCKS, Ch. Sind Rotorblattexperten die Schamanen der Windkraft? In: *Erneuerbare Energien* (2005). 6.
- MAL, A. Structural Health Monitoring. In: *Mechanics* (2004). 33(11-12).
- MALISCHEWSKI, P.G.; WUTTKE, F.; ZIEGERT, A. Nutzung akustischer Oberflächenwellen zur zerstörungsfreien Materialprüfung. In: *Schriftenreihe Werkstoffwissenschaften* (2002). 17, 135–140.
- MANDELL, J.F; REED, R.M; SAMBORSKY, D.D. Fatigue of Fiberglass Wind Turbine Blade Materials. In: *Sandia Contractor Report* (1992).
- MAW, N.; BARBER, J. R.; FAWCETT, J. N. The Oblique Impact of Elastic Spheres. In: *Wear* (1976). 38, 101–114.
- MITSCH, F. Schwingungstechnik in Windkraftanlagen. In: *Erneuerbare Energien* (2004). 9.

- MITSUHASHI, K.; JYOMUTA, C.; OKA, F.; NISHIKAWA, H. Method and Apparatus for Impact-type Inspection of Structures (1989). US Patent No. 05,048,320.
- MOLLY, J. P. Status der Windenergienutzung in Deutschland (2007).
- NAG, A.; MAHAPATRA, D.; GOPALAKRISHNAN, S. Identification of Delamination in a Composite Beam Using a Damaged Spectral Element. In: *Structural Health Monitoring* (2002). 1(1), 105–126.
- NORDMANN, A. Schema einer Windenergieanlage (2007). URL <http://de.wikipedia.org/wiki/Windenergieanlage>.
- PAGNEUX, V.; MAUREL, A. Lamb wave propagation in inhomogeneous elastic waveguides. In: *Proc. R. Soc. Lond* (2002). 485, 1913–1930.
- PETERS, J.; KOMMAREDDY, V.; LIU, Z.; FEI, D.; HSU, D. Non-Contact Inspection of Composites using Air-Coupled Ultrasound. In: *AIP Proceedings*, Band 657 (2003) S. 973–980.
- PFUND, B. Portable Test Hammer Apparatus (1996). US Patent No 05,686,652.
- PIERCE, S.G.; CULSHAW, B.; MANSON, G.; WORDEN, K.; STASZEWSKI, W.J. The application of ultrasonic Lamb wave techniques to the evaluation of advanced composite structures. In: *Proceedings SPIE*, Band 3986 (2000) S. 93–103.
- REUTER. Einführung in die Ultraschallprüfung: Skript (1999).
- SAMPAIO, R.P.C; MAIA, N.M.M.; SILVA, J.M.M. Damage Detection using Frequency-Response-Function Curvature Method. In: *Journal of Sound and Vibration* (1999). 226(5), 1029–1042.
- SCHWARZ, W.G.; READ, M.E.; KREMER, M.J. and Hinder M.K.; SMITH, B.T. Lamb wave tomographic imaging system for aircraft structural health assessment. In: *SPIE*, Band 3586 (1999) S. 292–296.
- SHI, X.; POLYCARPOU, A. A. Measurement and Modeling of Normal Contact Stiffness and Contact Damping at the Meso Scale. In: *Journal of Vibration and Acoustics* (2005). 127, 52–60.

- STOESSEL, R. *Air-Coupled Ultrasound Inspection as a New Non-Destructive Testing Tool for Quality Assurance*. Dissertation, Universität Stuttgart (2004).
- SU, Z.; YE, L. Fundamental Lamb Mode-based Delamination Detection for CF/EP Composite Laminates Using Distributed Piezoelectrics. In: *Structural Health Monitoring* (2004). 3(1).
- SUNDARESAN, M.J.; SCHULZ, M.J.; GHOSHAL, A. Structural Health Monitoring Static Test of a Wind Turbine Blade. Colorado 80401-3393 (1999).
- SUTHERLAND, H.J.; BEATTIE, A.; HANSCH, B. The Application of Non-Destructive Techniques to the Testing of a Wind Turbine Blade. In: *Sandia Report* (1994).
- SUTHERLAND, H.J.; MANDELL, J.F. Application of the U.S. High Cycle Fatigue Data Base to Wind Turbine Blade Lifetime Predictions ().
- TOWFIGHI, S.; KUNDU, T.; ESHANI, M. Elastic Wave Propagation in Circumferential Direction in Anisotropic Cylindrical Curved Plates. In: *Journal of Applied Mechanics* (2002). 69, 283–291.
- VALENS, C. A Really Friendly Guide to Wavelets. In: (1999).
- VIKTOROV, I. A. *Rayleigh and Lamb Waves: Physical Theory and Applications*. Plenum Press, New York (1967).
- VOLKMER, P. Zusammenfassung von Messungen mit dem Rotorblatt-Überwachungssystem CM-RBL an Rotorblättern verschiedener Windkraftanlagen im Betrieb und an Rotorblättern am Boden: Übersichts-Messbericht. Technischer Bericht, IGUS - ITS GmbH, Dresden (2003).
- WAGNER, U.; ROUVEL, L.; SCHAEFER, H. Nutzung regenerativer Energien. In: *IfE Schriftenreihe* (1999). 1.
- WHITE, C.; WHITTINGHAM, B.; LI, H. C. H.; HERSZBERG, I.; MOURITZ, A. P. Vibration based Structural Health Monitoring of Adhesively Bonded Composite Scarf Repairs. In: *5th Australasian Congress on Applied Mechanics, ACAM 2007* (2007).

WHITTINGHAM, B.; LI, H. C. H.; HERSZBERG, I.; CHIU, W. K. Disbond Detection in Adhesively Bonded Composite Structures using Vibration Signatures. In: *Composite Structures* (2006). 75, 351–363.

WU, H.; SIEGEL, M. Correlation of Accelerometer and Microphone Data in the "Coin Tap Test". In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* (2000). 49(3).

A Weitere Ergebnisse der Messungen am Rotorblatt

A.1 Ergebnisse auf der Saugseite

Die B-Scans für insgesamt 7 Messlinien auf der Saugseite sind in Abbildung A.1 zu sehen. Die signifikanten Reflexionen sind mit farbigen Linien gekennzeichnet. Der Nullpunkt der Messungen liegt bezüglich der Koordinaten des Rotorblattes bei $R=2,60$ m.

Die Darstellung der Amplituden erfolgt farbcodiert. Der Maximalwert der Farbskala ist auf $1/3$ der Maximalamplitude skaliert, um kleinere Reflexionen im Vergleich stärker hervorzuheben. Als gelbe Linien sind die unterschiedlichen Schichten des Rotorblattes gekennzeichnet. Im Bereich bis etwa 9 m ist eine frühe Reflexion zu erkennen, die vermutlich zu der dort vorhandenen CFK-Schicht gehört, die im weiteren Verlauf des Rotorblattes nicht mehr zu sehen ist. Im Bereich bis 6 m erkennt man, dass hier das Material aus mehreren Schichten aufgebaut ist. Es sind mehrere Reflektoren zu erkennen. Ab 6 m ist hauptsächlich ein deutlicher Reflektor zu erkennen, der die Gurtdicke widerspiegelt. Als rosafarbene Linien sind die Reflexionen der Verklebung zu sehen. Die Verklebung sieht sehr wellig aus, was vermutlich auf unterschiedlicher Kleberdicke und -qualität zurückzuführen ist. Aufgrund der Darstellung sind die Unterschiede überhöht zu sehen. Es handelt sich hierbei vermutlich um Dickenunterschiede von weniger als einem Zentimeter.

In Reihe 3 ist die Reflexion von der Klebeschicht etwa bis 12 m zu erkennen. In Reihe vier ist sie überall zu sehen. Das Messraster lag nicht parallel zur Stegverklebung, so dass sich die Stegverklebung in den ersten 12 Metern des Blattes in Reihe 3 und 4, ab Meter 12 aber in den Messreihen 4 und 5 zeigt. Dies wurde erst spät bemerkt, so dass die Anpassung des Messrasters erst bei etwa 29 m erfolgte.

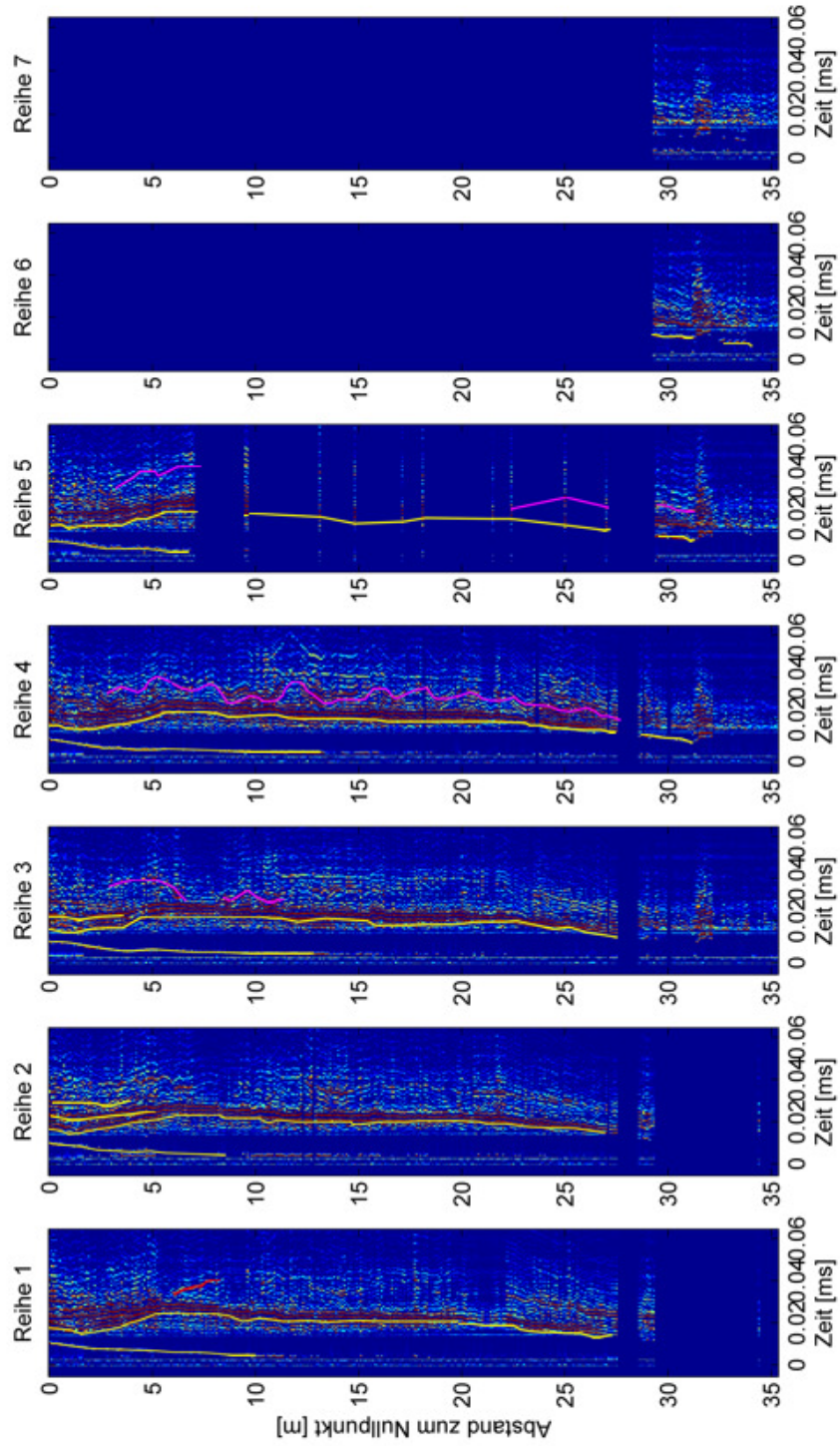


Abbildung A.1: B-Scans der Ultraschall-Echo-Messungen auf der Saugseite.

A.2 Ergebnisse auf der Druckseite

Auf der Druckseite, die bedingt durch die Lagerung des Rotorblattes die Wetterseite war, war die Oberflächenbeschaffenheit anders als auf der Saugseite. Deshalb waren auch die Ankoppelbedingungen nur bedingt vergleichbar. Die Daten sind stärker verrauscht und die Energie des Ultraschallpulses konnte nicht so weit in das Bauteil eindringen. So sind in Abbildung A.2 keine Reflexionen an der Klebeschicht zu erkennen. Man erkennt jedoch die Abnahme der Reflexionsenergie an den Gurtlaminaten in den Bereichen der Stegverklebung. Deutlich zu sehen ist, bis etwa 8 m, die Reflexion an der CFK-Schicht, die nur nahe der Rotornabe enthalten ist. Die Reflexion an der Rückwand der Laminate ist besonders in Reihe 1 und Reihe 2 sehr gut zu erkennen. In weiten Bereichen der Reihen 3 und 4 sind die Reflexionen wesentlich geringer. Das lässt darauf schließen, dass sich in diesen Bereichen die Stegverklebung befindet und intakt ist. Jenseits von 30 m kann man in Reihe 3 dann die Reflexion der Stegverklebung selbst wieder ausmachen.

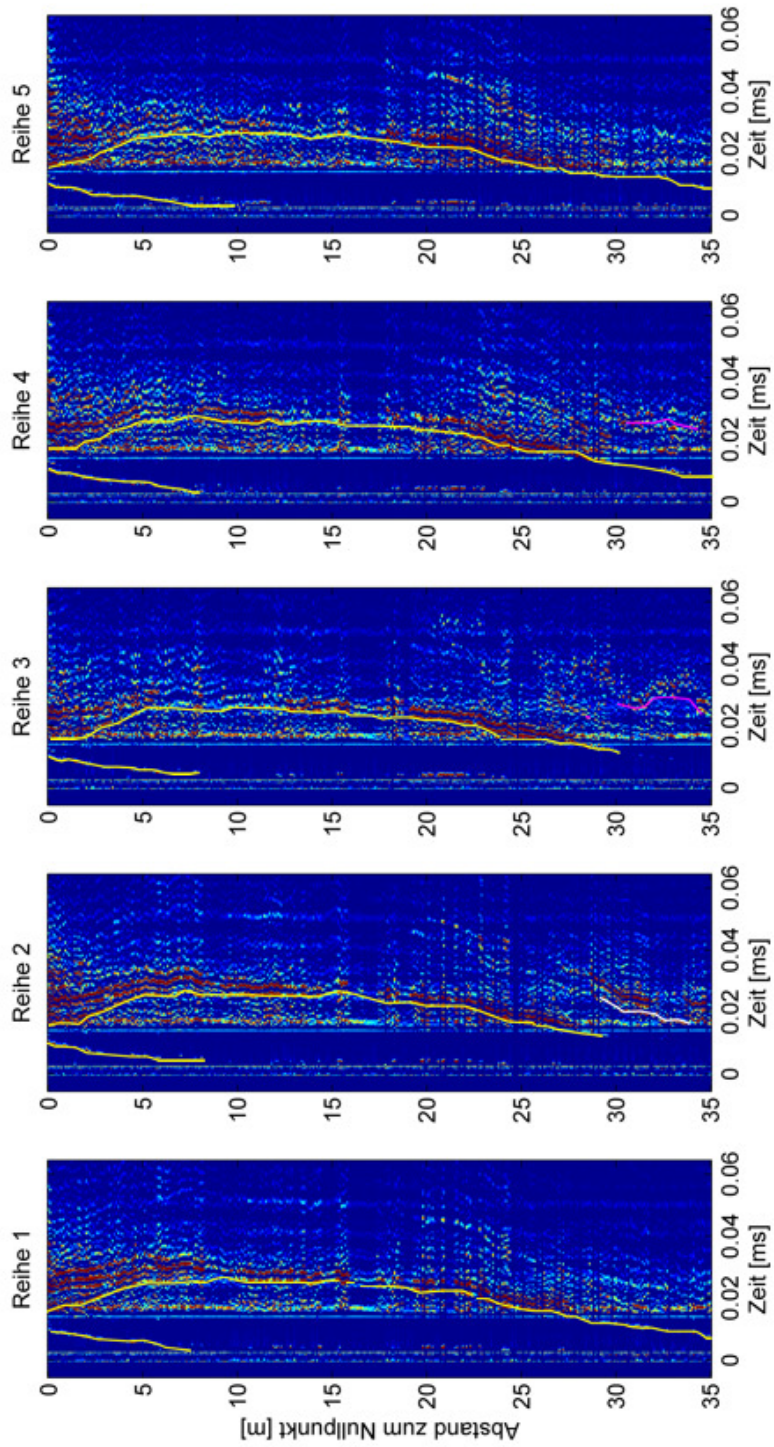


Abbildung A.2: B-Scans der Ultraschall-Echo-Messungen auf der Druckseite.

A.3 Lokale Resonanzspektroskopie an Messfeld 2

In Messfeld 2 sind schon auf dem Foto in Abbildung A.3 Materialveränderungen sichtbar. Das Foto mit den überlagerten Halbwertsbreiten der Klangsignale ist in Abbildung A.4 zu sehen.

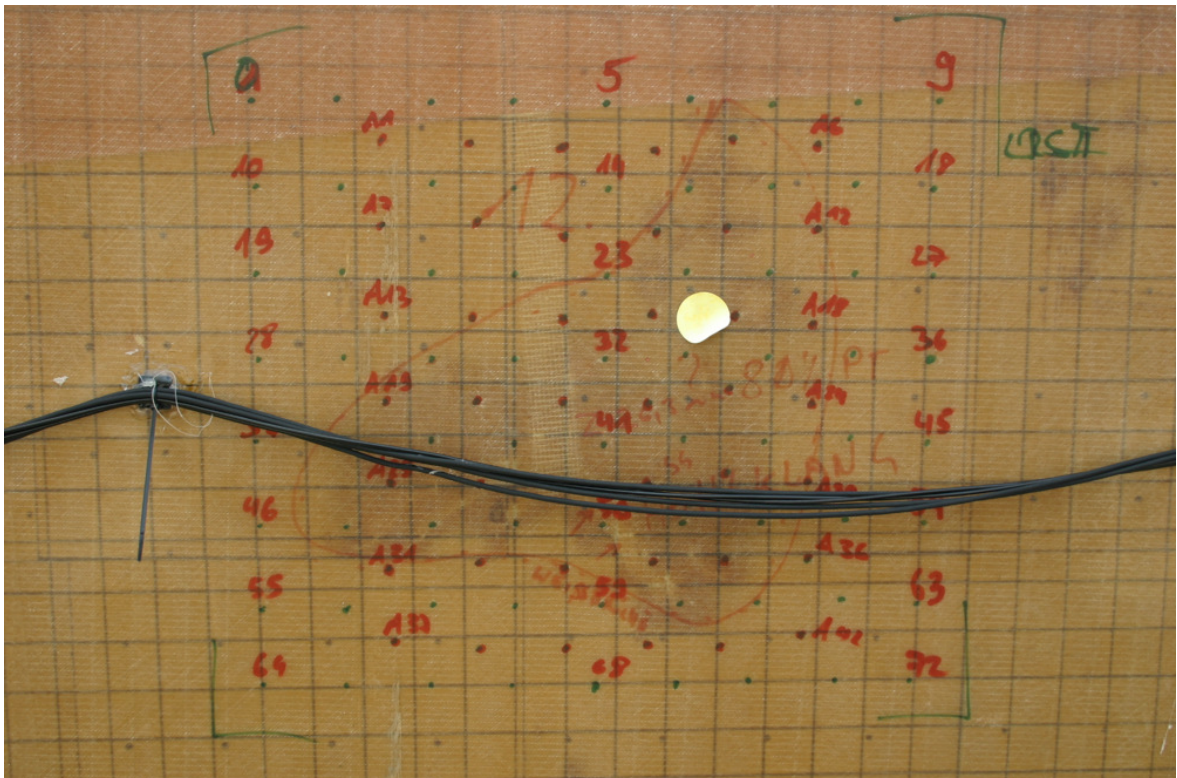


Abbildung A.3: Messfeld 2 mit Messraster

Die optische sichtbare Materialveränderung wirkt sich nicht auf die Hammeranregung aus. Die Bereiche verbreiteter Kraftsignale stimmen nicht damit überein. Vielmehr ist zu erkennen, dass im untersuchten Bereich einige Stellen verbreiterte Kraftanregungen zeigen, obwohl oberflächlich keine Materialänderung zu erkennen ist. Die Veränderungen im Material sind hier eher kleinräumig. Unten in der Mitte des Messfeldes sind Weißbrüche eingezeichnet. Diese zeichnen sich durch stark verbreiterte Kraftanregungen in den Messdaten ab. Die Signale der Kraftanregung werden sehr stark durch oberflächennahe Veränderungen beeinflusst.

Zur besseren Interpretation werden die Amplitudenspektren der Klangsignale in Abbildung A.5 betrachtet. In Zeile 1 bis 3 und Zeile 5 und 6 ist

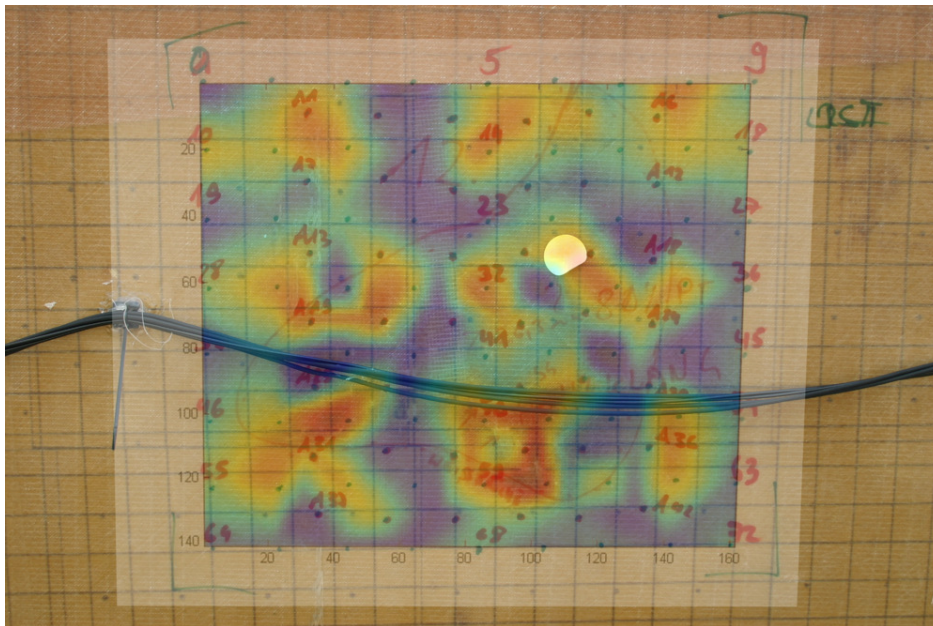


Abbildung A.4: Halbwertsbreiten der Kraftsignale des Hammers an Messfeld 2.

die dominante Frequenz bei 0,6 kHz, die schon bei Messfeld 1 zu sehen war, wieder zu erkennen. In Zeile 1 und Zeile 2 sind zusätzlich große Amplituden bei Frequenzen von 0,2 kHz und 0,4 kHz. In Zeile 3 werden die Frequenzen bei 0,4 kHz weniger dominant, dafür sind auch höhere Frequenzen über 1 kHz zu erkennen. In Zeile 4 liegt der Hauptteil der Energie im Bereich unterhalb von 0,4 kHz. Die einzige Ausnahme ist hierbei Messpunkt 9, der wieder eine starke Amplitude bei 0,6 kHz zeigt. In Zeile 6 bis 8 wird der Frequenzbereich um 0,4 kHz sehr dominant. In Zeile 6 ist die Frequenz bei 0,6 kHz in den meisten Messungen noch stark vertreten, verschwindet aber in Zeile 8 schließlich vollständig. Wie auch die Kraftanregungssignale zeigen auch die Amplitudenspektren ein anderes Bild, als die optisch sichtbaren Materialveränderungen. Es ist davon auszugehen, dass die Zeilen 7 und 8 das Klangbild des ungeschädigten Sandwichbereiches zeigen. Die Frequenzen liegen tiefer als in Messfeld 1, was am unterschiedlichen Aufbau des Rotorblattes im Messbereich liegen kann. Zeile 4 zeigt starke Frequenzveränderungen, was z.B. auf eine Ablösung von Material schließen lässt.

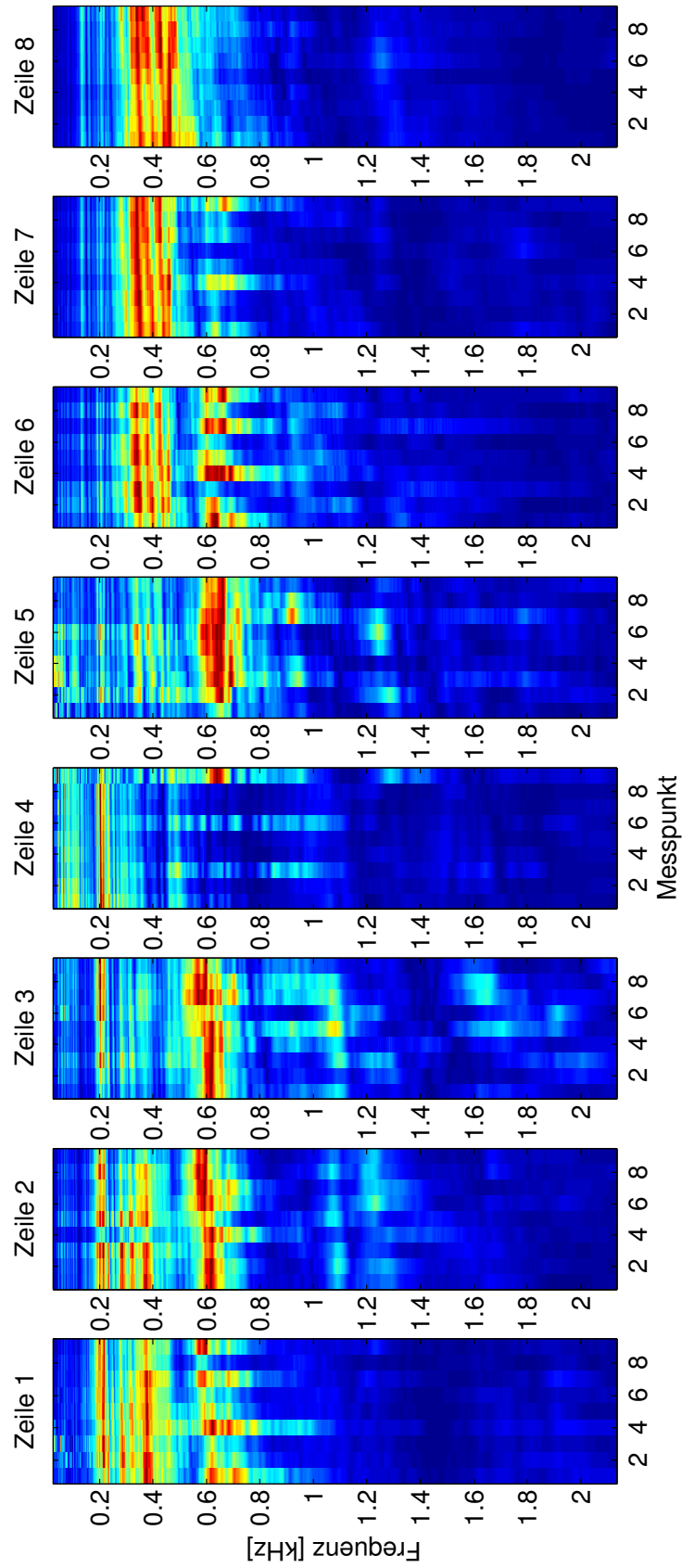


Abbildung A.5: Amplitudenspektren der Klangsignale an Messfeld 2.

B Klangmuster auf einer GFK-Platte

In Kapitel 6 wurden Messungen mit der lokalen Resonanzspektroskopie an einer GFK-Platte durchgeführt. Während die Auswertung der Kraftanregungssignale des Hammers ein gutes Abbild der inneren Schädigungen der Platte lieferte, zeigten sich in der Auswertung der Klangsignale symmetrische Muster auf der Platte. Hierbei handelt es sich um die Eigenschwingungen der Platte. Die Entstehung der Muster kann mit denen der berühmten Chladnifiguren verglichen werden, obwohl man es hier mit dem umgekehrten Effekt zu tun hat.

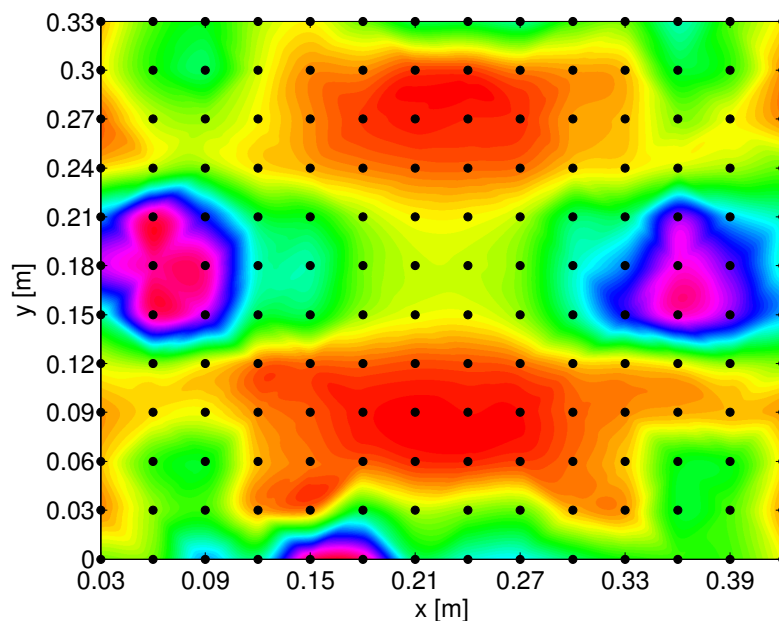


Abbildung B.1: Energieverteilung im Frequenzband von 229 Hz bis 247 Hz.

Während Chladni eine Platte von außen mit einer bestimmten Frequenz angeregt hat, werden hier punktweise über einen Impakt alle Eigenfrequenzen angeregt. Je nach Anregungsort werden unterschiedliche Eigenmoden angeregt und somit sind auch andere Frequenzen im Klang

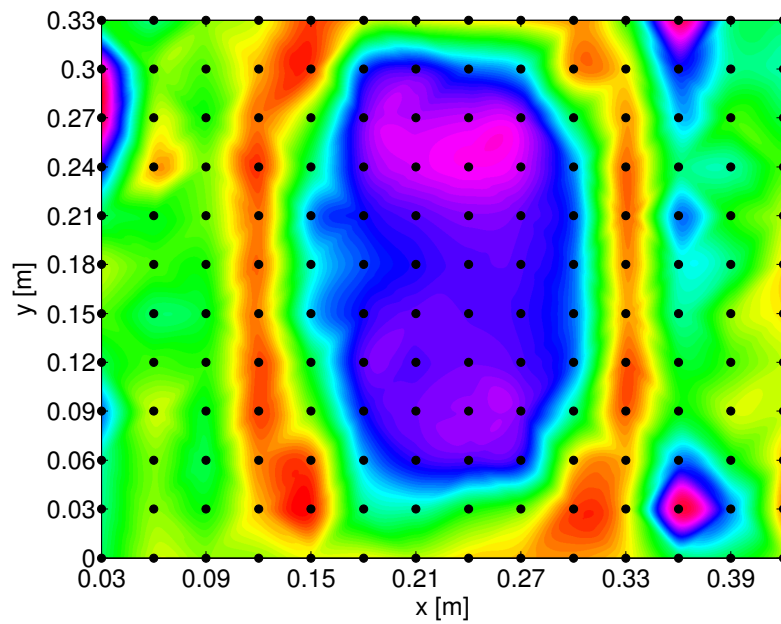


Abbildung B.2: Energieverteilung im Frequenzband von 293 Hz bis 305 Hz.

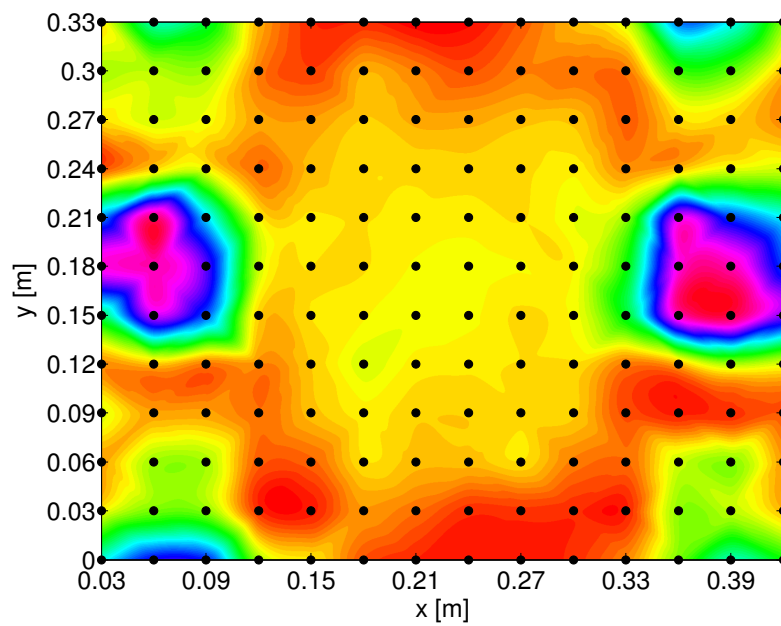


Abbildung B.3: Energieverteilung im Frequenzband von 348 Hz bis 363 Hz.

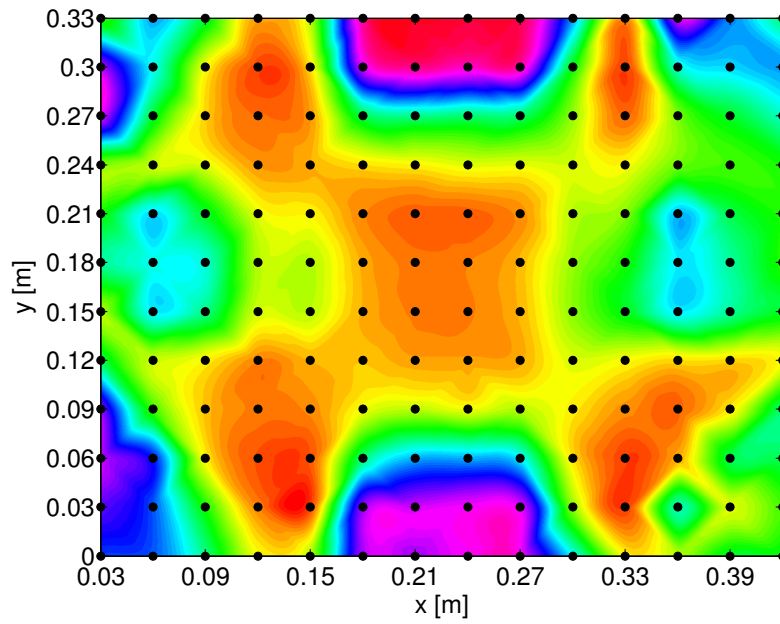


Abbildung B.4: Energieverteilung im Frequenzband von 391 Hz bis 409 Hz.

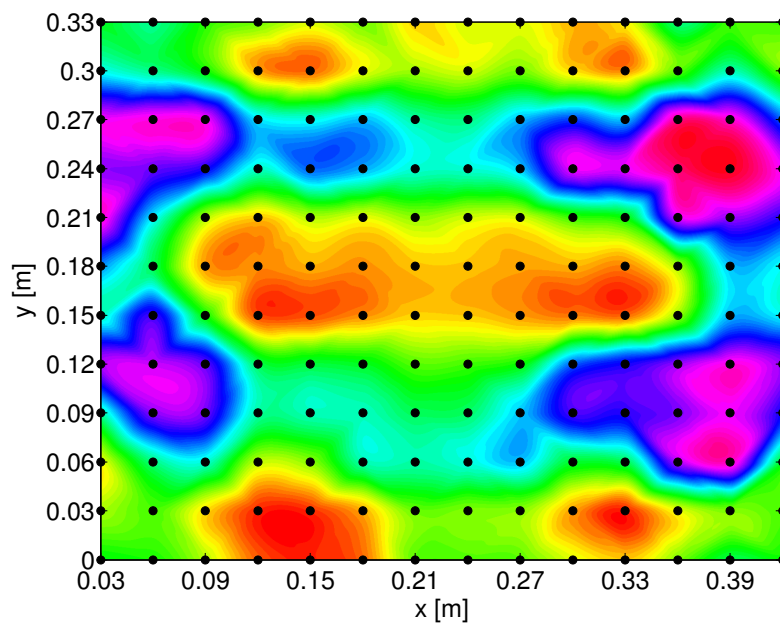


Abbildung B.5: Energieverteilung im Frequenzband von 684 Hz bis 714 Hz.

ANHANG B. KLANGMUSTER AUF EINER GFK-PLATTE

enthalten. Ein Beispiel für so ein symmetrisches Muster in in Kapitel 6 zu sehen. Die Klangmuster für andere Frequenzbänder sind in den Abbildungen B.1 bis B.5 dargestellt.

C Verwendete Geräte

C.1 Ultraschall-Echo-System

Das Messgerät für das Ultraschall-Echo-Verfahren wurde für die Aufgabe an Rotorblättern an der MPA Universität Stuttgart im Rahmen dieser Arbeit entwickelt. Es besteht aus einem Industrie-PC, der mit einer leistungsstarken Pulser/Receiver-Karte und einer Datenerfassungskarte ausgestattet ist. Das Messsystem ist in Abbildung C.1 zu sehen

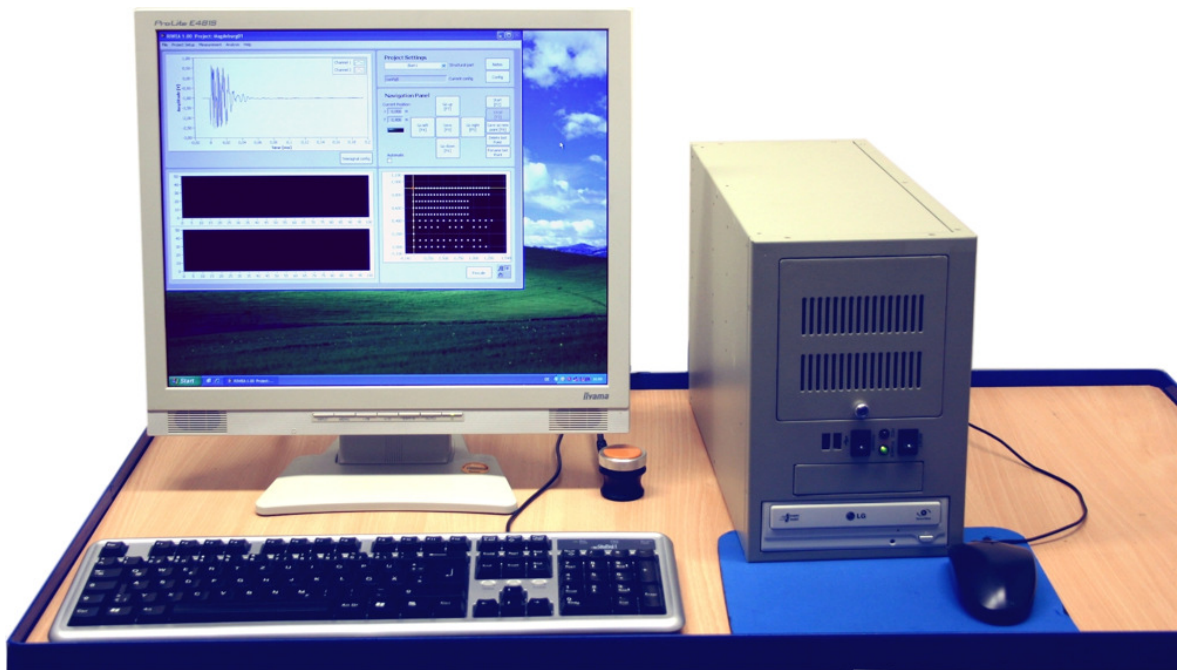


Abbildung C.1: Ultraschallsystem.

Die Pulser/Receiver-Karte bietet eine Reihe von Einstellmöglichkeiten. Besonders wichtig war hierbei die Möglichkeit der Begrenzung des Nachschwingens der Sensoren durch das Vorschalten eines in Stufen regelbaren Widerstandes zwischen 50Ω und 620Ω . Ebenso ist das Einstellen großer Pulsbreiten bis zu $2 \mu s$ und hoher Pulsstärken bis $900 V$ eine Besonderheit des Systems (siehe Tabelle C.1). Die Datenerfassung erfolgt über eine separate Datenerfassungskarte.

Tabelle C.1: Einstellungen am Messsystem.

Dämpfung [Ω]	50 - 620	8 festgelegte Werte
Pulsbreite [ns]	160 - 2000	in 256 Stufen
Pulsstärke [V]	0 - 900	in 256 Stufen
Verstärkung [dB]	0 - 80	in 0.1 dB Schritten

Die verwendeten Ultraschallsensoren sind Breitbandsensoren der Firma *Olympus NDT* mit Mittenfrequenzen von 0,5 MHz (V101) und 1 MHz (C602, C603). Die Frequenzantwortfunktionen der drei Sensoren wurden mit einem Netzwerkanalysator ermittelt und sind in Abbildung C.2, C.3 und C.4 zu sehen.

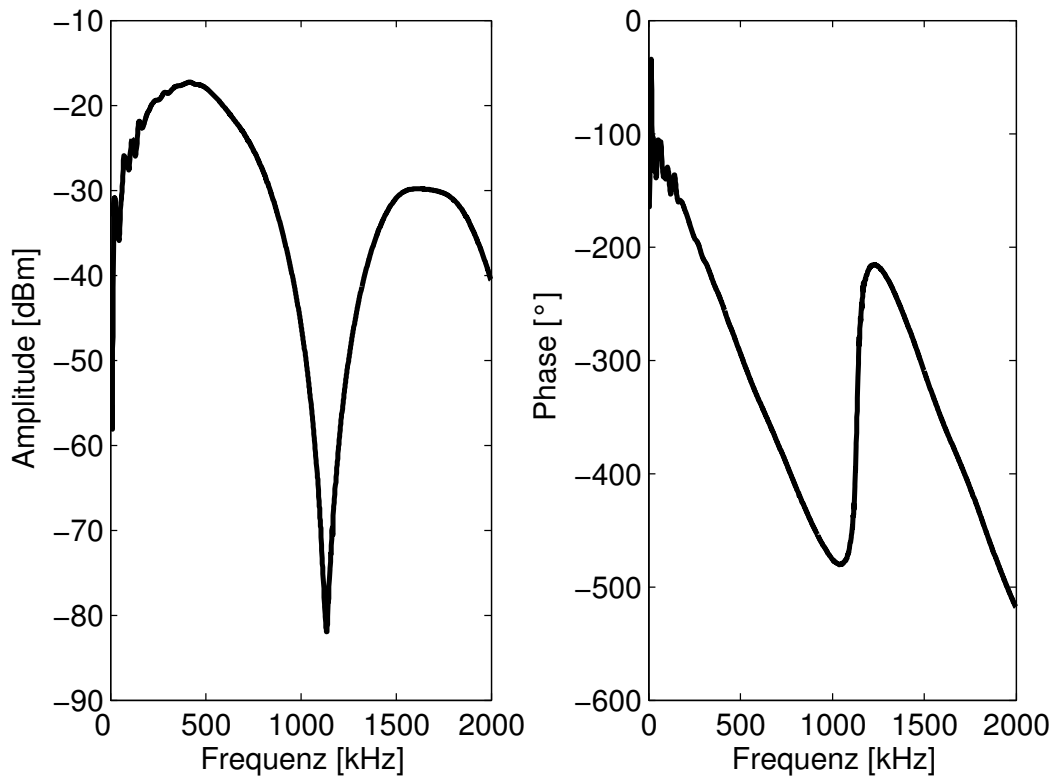


Abbildung C.2: Frequenzantwort des Sensors V101.

Die Software wurde ebenfalls für die Bedürfnisse der Messungen am Rotorblatt angepasst. Die Angabe eines Messrasters im Vorfeld und die Definition der globalen Koordinaten auf dem Rotorblatt lassen die Ergebnisse leicht den jeweiligen Rotorblattabschnitten zuordnen. Neben der Möglichkeit manuelle Messungen punktuell durchzuführen, bietet die Software die Möglichkeit, über eine TCP/IP-Kommunikation mit einem

C.1. ULTRASCHALL-ECHO-SYSTEM

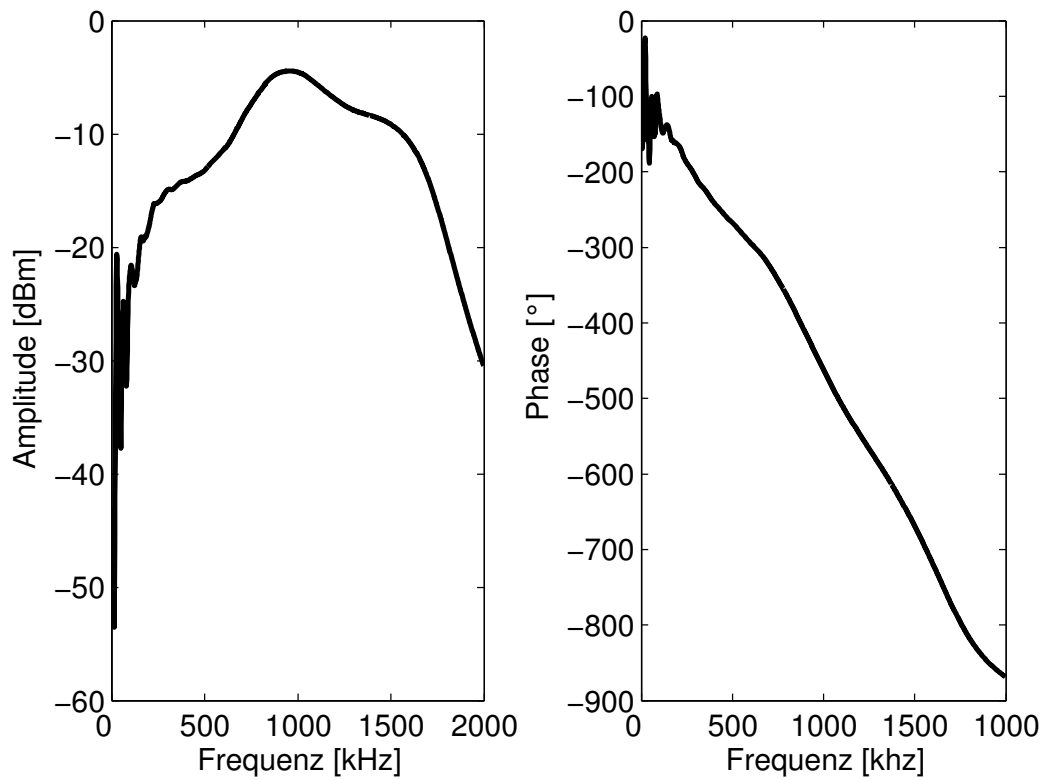


Abbildung C.3: Frequenzantwort des Sensors C602.

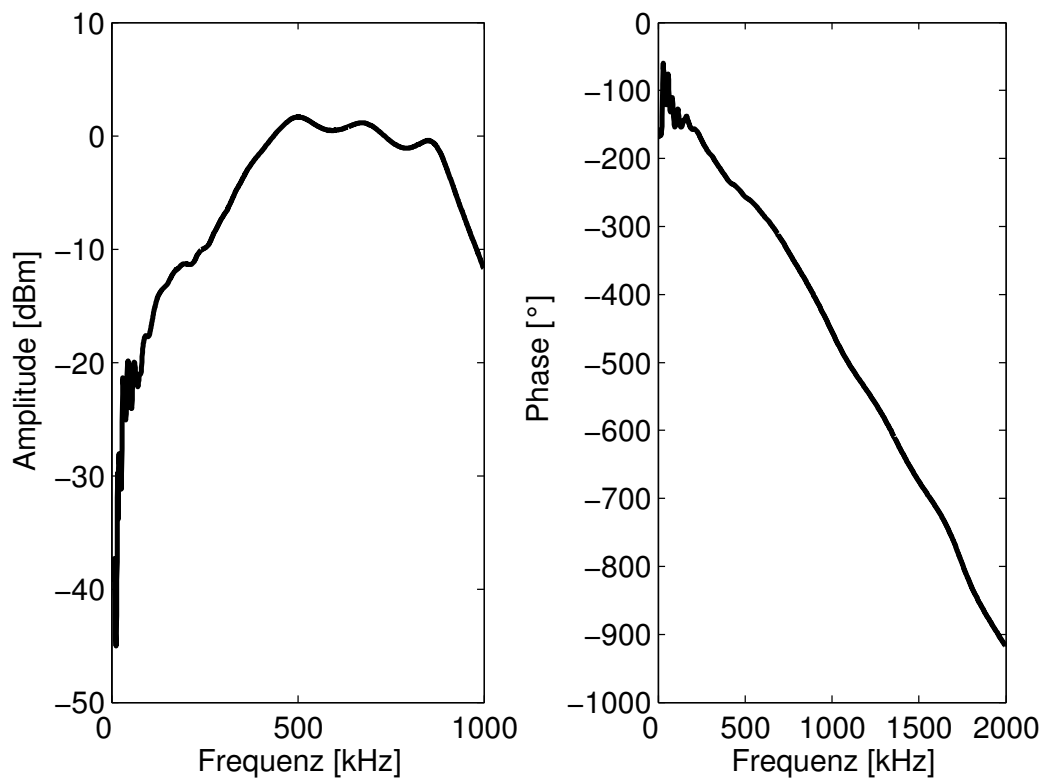


Abbildung C.4: Frequenzantwort des Sensors C603.

automatisierten Messsystem kombiniert zu werden. Die aktuelle Sensorposition wird hier vom Trägersystem an das Messprogramm übermittelt und daraufhin eine Messung gestartet. Ist die Messung erfolgt, so sendet das Messprogramm den Befehl zum Umsetzen des Sensors an der Trägersystem. So kann die Aufnahme der Messdaten völlig selbständig durchgeführt werden. Eine Weiterentwicklung zu einem kleineren System hin ist bereits geplant.

Die Auswertung der Daten für diese Arbeit erfolgte hauptsächlich mit *Matlab*. Außerdem wurden ausgewählte Auswerteroutinen Stück für Stück in das Messsystem implementiert und die an der MPA programmierte C-Scan-Darstellung hier verwendet.

C.2 Lokale Resonanzspektroskopie

Die Datenaufnahme der lokalen Resonanzspektroskopie erfolgt über das Modalanalysegerät *Pimento* der Firma *LMS*. Das Gerät selbst ist akubetrieben und wird über ein kompaktes Notebook angesteuert. Auf zwei Kanälen können der Impulshammer und das Mikrofon angeschlossen werden.

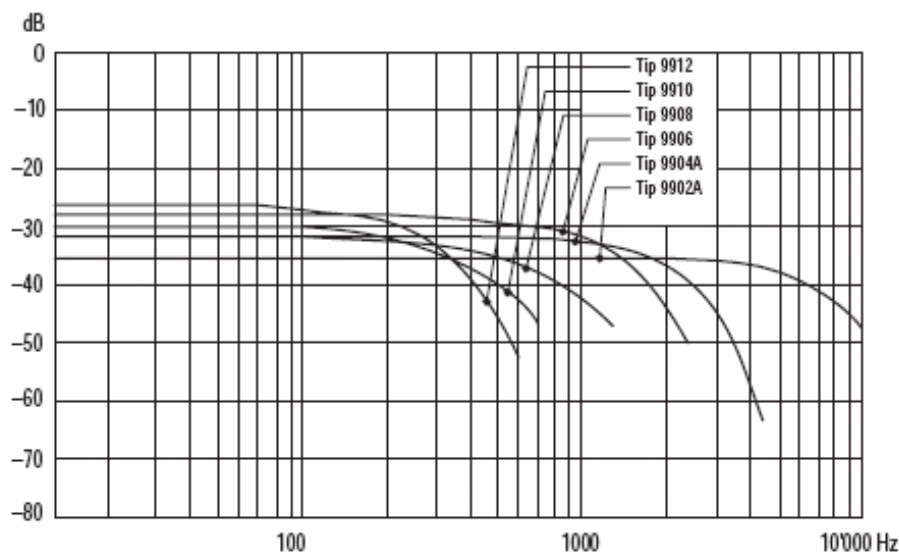


Abbildung C.5: Frequenzantwort des Impulshammers für unterschiedliche Aufsätze.

Der Impulshammer ist von der Firma *Kistler* und ist in Kapitel 5.2.1

C.2. LOKALE RESONANZSPEKTROSKOPIE

beschrieben. Die Frequenzantwortfunktion des Hammers ist in Abbildung C.5 zu sehen. Das verwendete Messmikrofon ist ein ICP-Mikrofon der Firma *PCB Piezotronics* und kann Frequenzbereiche bis 80 kHz auflösen. Die Messdaten werden im LMS-eigenen Format als Amplitudenspektren aufgezeichnet. Anschließend werden die Daten exportiert und mit *Matlab* weiterverarbeitet. Ein Umbau des Systems in ein kompaktes, vom Modalanalysegerät unabhängiges, Messsystem ist bereits geplant. Die Auswerterroutinen werden an die Bedürfnisse angepasst und ebenfalls implementiert.

Lebenslauf

Persönliches

Name: Anne Jüngert, geb. Chudziak
Geboren: am 26. Juni 1980 in Villingen-Schwenningen
Staatsangehörigkeit: deutsch
Familienstand: verheiratet, 1 Sohn

Schulische Ausbildung

1986 - 1990 Erich-Kästner-Grundschule Donaueschingen
1990 - 1999 Fürstenberg-Gymnasium Donaueschingen
Juni 1999 Abitur

Studium

10.1999 - 03.2005 Universität Karlsruhe(TH) Studium der Geophysik
17.02.2005 Diplom in Geophysik
Thema der Diplomarbeit: *Verstärkungseffekte an Rändern von Sedimentbecken: Eine 2D-Finite Differenzen Modellierung am Beispiel von Delhi, Indien*

Arbeitsverhältnisse

06.2005 - 02.2007 wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Arbeitsgruppe *Zerstörungsfreie Prüfung* am IWB Universität Stuttgart
02.2007 - 06.2009 dem Referat *Bauwerksinspektion und Qualitätssicherung* an der MPA Universität Stuttgart zugeordnet
06.2009 - 12.2009 Elternzeit
seit Januar 2010 wissenschaftliche Mitarbeiterin im Referat *ZfP im Anlagen- und Maschinenbau* an der MPA Universität Stuttgart