

**Multimodale zerstörungsfreie
Charakterisierung der Grenzflächen von
Metall-CFK-Hybridstrukturen**

Dissertation
zur Erlangung des Grades
des Doktors der Ingenieurwissenschaften
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität des Saarlandes

von
Michael Schwarz

Saarbrücken

2019

Tag des Kolloquiums: 28.06.2019

Dekan: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Guido Kickelbick

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herrmann
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre

Akad. Mitarbeiter: Dr.-Ing. Wolfgang Ripplinger

Kurzzusammenfassung

Metall-CFK-Hybridstrukturen erfreuen sich in der heutigen Zeit immer größerer Beliebtheit und rücken aus vielfältigen Gründen in den Fokus der Industrie. Da durch die Kombination aus Metall und CFK Grenzflächen entstehen, die Schwachpunkte der Verbindung darstellen, bedarf es der Überprüfung dieser Bereiche durch zerstörungsfreie Prüfverfahren.

In dieser Arbeit werden die Grenzflächen einer Aluminium-CFK-Hybridstruktur mithilfe der beiden zerstörungsfreien Prüfverfahren der aktiven Thermografie mit den Anregungsmethoden Blitz, induktiv sowie IR-Array und des elektromagnetisch induzierten Ultraschalls (EMUS) untersucht.

Dabei wird zunächst gezeigt, dass beide Verfahren zur Grenzflächencharakterisierung sowie zur Fehlerdetektion geeignet sind. Um die gewonnenen Messergebnisse zu verbessern und eine optimierte Grenzflächencharakterisierung zu erzielen, kommen verschiedene Vorgehensweisen zum Einsatz.

So wird bei der Blitzthermografie zusätzlich eine Fast Fourier Transformation (FFT) angewandt, die Ergebnisse der Blitzthermografie und der induktiven Thermografie werden fusioniert sowie die Ergebnisse aus aktiver Thermografie und EMUS mithilfe eines neu entwickelten Auswertalgorithmus kombiniert.

Durch den abschließenden Einsatz der Referenzmethode der Computertomografie (CT) werden zum einen die zuvor erzielten Ergebnisse validiert und zum anderen- mithilfe des Auswertalgorithmus- gezeigt, dass EMUS-Messungen sensitiver auf Grenzflächendefekte reagieren als Thermografiemessungen.

Abstract

Metal-CFRP-hybrid structures enjoy great popularity today and come to the fore of industry for various reasons. Due to the combination of metal and CFRP (carbon-fibre-reinforced-polymer) interfaces, which are weak points in the connection, arise. These weak points have to be characterised by non-destructive testing methods.

In this work the interfaces of an aluminium-CFRP-hybrid structure are characterised with two non-destructive testing methods: active thermography with its excitation techniques flash, inductive and IR-Array as well as ultrasonic testing with EMAT (electromagnetic acoustic transducer).

It is shown that both methods are very suitable for the characterisation of the interfaces as well as for defect detection. To improve the results obtained and to optimise interface characterisation different approaches are utilised.

For flash thermography a Fast Fourier transformation (FFT) is used, the results of flash and inductive thermography are combined with a data fusion and the results of thermography and ultrasonic testing with EMAT are combined by means of a new evaluation algorithm.

Finally, by using the reference method of computer tomography (CT) on one hand the results gained can be validated, on the other hand it can be shown- with help of the evaluation algorithm- that EMAT is more sensitive for the detection of defects at the interface than thermography.

Danksagung

Die hier vorliegende Dissertation ist das Ergebnis von Untersuchungen am Lehrstuhl für Leichtbausysteme von Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herrmann an der Universität des Saarlandes.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Herrmann, der es mir durch die Bereitstellung des sehr interessanten Themas ermöglicht hat, meine Dissertation an seinem Lehrstuhl zu verfassen. Auch war er immer mit Ideen und konstruktiver Kritik bereit, mich bei meiner Dissertation voranzubringen.

Weiterhin möchte ich mich bei meinen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls für Leichtbausysteme bedanken. Die letzten viereinhalb Jahre, in denen ich als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig war, haben mich sehr bereichert und werden mir immer in guter Erinnerung bleiben.

Auch möchte ich mich bei allen Kollegen der Abteilung Zustandsüberwachung und Lebensdauermanagement des Fraunhofer IZFP bedanken, die für ein gutes Arbeitsklima und für gute fachliche Gespräche gesorgt haben.

Ebenso muss ich ganz speziellen Menschen danken, die mich seit nunmehr 10 Jahren begleiten und einen großen Teil dazu beigetragen haben, dass ich neben der ganzen Wissenschafterei die essentiellen Dinge des Lebens nicht vergesse. Getreu dem Motto: „Sechs studierte Leut‘...“.

Schließlich gilt mein ganz persönlicher Dank meiner Familie und besonders meiner Frau Julia. Ohne dich und deine Unterstützung würde ich heute nicht da stehen, wo ich bin.

Ich liebe dich!

Saarbrücken, 2019

Michael Schwarz

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Michael Schwarz
Geburtsdatum und -ort: 01.04.1988 in Saarbrücken
Familienstand: verheiratet
Staatsangehörigkeit: deutsch

Beruflicher Werdegang

Seit Mai 2014 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Leichtbausysteme der Universität des Saarlandes von Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herrmann
Oktober 2010 – April 2014 wissenschaftliche Hilfskraft am Lehrstuhl für Adhäsion und Interphasen in Polymeren von Prof. Dr. rer. nat. Wulff Possart

Studium und Schule

Oktober 2011 - April 2014 Master Werkstofftechnik an der Universität des Saarlandes, Master-Thesis: „Mechanische Eigenschaften von PU-Al-Klebungen - Einfluss der Interphase“
Oktober 2008 – September 2011 Bachelor Materialwissenschaft und Werkstofftechnik an der Universität des Saarlandes, Bachelor-Thesis: „Thermomechanische Charakterisierung eines Polyurethans mit isothermen Zugversuchen“
August 2007- September 2008 Freiwilliges Soziales Jahr im Bereich Sport
August 1998- Juni 2007 Ludwigsgymnasium Saarbrücken, Erwerb der Allgemeinen Hochschulreife

Publikationen

1. Michael Schwarz, Jannik Summa, Steven Quirin, Hans-Georg Herrmann, „New Approaches in Nondestructive Characterisation of Defects in Metal-CFRP Hybrids”, *Materials Science Forum*, Volumes 825+826, pp. 976-982, 2015.
2. Daniel Brabandt, Florian Baumann, Dietrich Berger, Gisela Lanza, Jannik Summa, Michael Schwarz, Hans-Georg Herrmann, Markus Pohl, Markus Stommel, „Großserientaugliche Verbindungselemente für den hybriden Leichtbau“, *lightweight design*, Band 2/2015, Springer Verlag Wiesbaden, pp. 48-53, 2015.
3. Michael Schwarz, Jannik Summa, Hans-Georg Herrmann, „Using nondestructive testing methods to characterise production-induced defects in a metal-cfrp hybrid structure“, *Proceedings 2nd International Conference Euro Hybrid Materials and Structures*, Euro Hybrid Kaiserslautern, pp. 207-210, 2016.
4. Jannik Summa, Michael Schwarz, Simon Bernarding, Hans-Georg Herrmann, „Thermography assisted characterisation of production-induced defects in CFRP and their influence on the mechanical behaviour“, *Proceedings 2nd International Conference Euro Hybrid Materials and Structures*, Euro Hybrid Kaiserslautern, pp. 201-206, 2016.
5. Michael Schwarz, Jannik Summa, Hans-Georg Herrmann, „Characterising Metal - CFRP Hybrid Structures by Nondestructive Testing Methods”, *Proceedings 5th International Conference on Integrity, Reliability & Failure*, IRF Porto, pp. 127-136, 2016.
6. Jannik Summa, Michael Schwarz, Hans-Georg Herrmann, „Evaluating the Severity of Defects in a metal to CFRP hybrid-joint with in situ passive thermography damage monitoring”, *Proceedings 5th International Conference on Integrity, Reliability & Failure*, IRF Porto, pp. 117-126, 2016.
7. Hans-Georg Herrmann, Michael Schwarz, Jannik Summa, „New Approaches in Nondestructive Characterisation of the Interface in Metal - CFRP Hybrid Structures”, *Proceedings 19th World Conference of Non-Destructive Testing*, WCNDT München, pp. 1-8, 2016.

8. Dietrich Berger, Gisela Lanza, Jannik Summa, Michael Schwarz, Hans-Georg Herrmann, „Conception of an Eddy Current In-Process Quality Control for the Production of Carbon Fibre Reinforced Components in the RTM Process Chain”, *Proceedings 10th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*, CIRP ICME Ischia, pp. 39-44, 2016.
9. Dietrich Berger, Daniel Brabandt, Tim Hornung, Can Bakir, Gisela Lanza, Jannik Summa, Michael Schwarz, Hans-Georg Herrmann, Markus Pohl, Markus Stommel, „Effects of defects in series production of hybrid CFRP lightweight components - detection and evaluation of quality critical characteristics”, *Measurement Journal*, Volume 95, pp. 389-394, 2017.
10. Markus Pohl, Markus Stommel, Dietrich Berger, Florian Baumann, Gisela Lanza, Jannik Summa, Michael Schwarz, Hans-Georg Herrmann, „Ganzheitliche Entwicklungsstrukturen am Beispiel intrinsischer Hybridverbunde im Leichtbau - Entwicklung, Produktion, Schadenscharakterisierung“, *Werkstatt Technik Online*, Band 7/8, pp. 546-550, 2017.
11. Dietrich Berger, Marielouise Zaiß, Gisela Lanza, Jannik Summa, Michael Schwarz, Hans-Georg Herrmann, Markus Pohl, Fabian Günther, Markus Stommel, „Predictive quality control of hybrid metal-CFRP components using information fusion”, *Production Engineering*, Band 12, pp. 1-12, 2018.
12. Wolfgang Ripplinger, Michael Schwarz, Stefan Diebels, Hans-Georg Herrmann, „Auxetic aluminum sheets in lightweight structures“, *Materials Testing*, Band 60, Ausgabe 11, pp. 1-6, 2018.
13. Michael Schwarz, Mathias Schwarz, Simon Herter, Hans-Georg Herrmann, „Nondestructive testing of a complex aluminium-CFRP hybrid structure with EMAT and thermography”, *Journal of Nondestructive Evaluation* (2019) 38:35.

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung	i
Abstract.....	ii
Danksagung	iii
Lebenslauf	iv
Publikationen.....	v
Inhaltsverzeichnis	vii
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis.....	x
Abbildungsverzeichnis	xiii
1. Einleitung	1
2. Aktueller Stand der Wissenschaft	4
3. Grundlagen	8
3.1 Thermografie	8
3.1.1 Prinzip der Thermografie	8
3.1.2 Aktive Thermografie	15
3.1.2.1 Verwendete Anregungsmethoden der aktiven Thermografie	16
3.1.2.2 Pulsthermografie (PT).....	18
3.1.2.3 Puls-Phasen-Thermografie (PPT)	19
3.1.2.4 Lock-In-Thermografie (LT).....	21
3.1.3 Passive Thermografie	23
3.2 Ultraschall.....	24
3.2.1 Wellenarten	27
3.2.2 Ultraschallerzeugung und -darstellung.....	29
3.3 Theorie der Datenfusion	34
3.3.1 Theorie der Datenfusion aus Blitzthermografie und induktiver Thermografie.....	35

3.3.2	Theorie der Datenfusion aus EMUS und Thermografie	36
3.4	Computertomografie (CT) /-laminografie (CL)	38
3.5	Probengeometrie und Versuchsaufbau	39
3.5.1	CFK-Proben	40
3.5.2	Geklebte Proben	40
3.5.3	Hybridproben	41
3.5.4	Künstlich eingebrachte Defekte	42
3.5.5	Versuchsaufbau	44
4.	Durchführung der Messungen	46
4.1	Thermografie	46
4.1.1	CFK-Proben und geklebte Proben.....	46
4.1.2	Metall-CFK-Hybridstrukturen	51
4.1.2.1	Abhängigkeit der Helligkeitswerte von der Temperatur.....	51
4.1.2.2	Grenzflächendefekte und andere Fehler.....	51
4.1.2.3	EMUS-Sensoren als Anregungsquelle	69
4.1.2.4	Probability of Detection (POD)	73
4.2	EMUS	80
4.2.1	Sensoranordnung	80
4.2.2	Verschiedene Prüfköpfe	83
4.2.3	Grenzflächenuntersuchung an Metall-CFK-Hybridstrukturen.....	84
4.3	Datenfusion.....	90
4.3.1	Datenfusion aus Blitzthermografie und induktiver Thermografie	91
4.3.2	Datenfusion aus EMUS und Thermografie	96
4.3.3	Bestimmung des Sensitivitätsgrades der Prüfverfahren EMUS und Thermografie	103
4.4	Referenzmessungen mit Computertomografie (CT)	108

5. Zusammenfassung	113
6. Ausblick.....	118
7. Literaturverzeichnis.....	121
8. Anhang	129
8.1 Datenfusionsalgorithmen.....	129
8.1.1 Algorithmus für die Fusion von Blitz- und induktiver Thermografie.....	129
8.1.2 Algorithmus für die Fusion von EMUS und Thermografie	129
8.2 Zusätzliche Thermografiebilder mit EMUS-Sensoren als Anregungsquelle	132
8.3 Zusätzliche Bilder und Diagramme zur POD-Berechnung	133
8.4 Lage der künstlich eingebrachten Defekte	136

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
CL	Computerlaminografie
CT	Computertomografie
EMUS	Elektromagnetisch induzierter Ultraschall
FFT	Fast Fourier Transformation
FPA	Focal Plane Array (=2D-Anordnung von Strahlungsdetektoren zur Bildgebung)
ILT	Induktive Lock-In-Thermografie
LASUS	Laserangeregter Ultraschall
LWIR	Langwelliges Infrarot
MIDA	Mechanisch induzierte Wärmedissipationsanalyse
MWIR	Mittelwelliges Infrarot
NIR	Nahes Infrarot
OLT	Optische Lock-In-Thermografie
POD	Probability of Detection (=Detektionswahrscheinlichkeit)
PPA GF30	Polyphthalamid mit 30 % Glasfaservolumengehalt
PPT	Puls-Phasen-Thermografie
PT	Pulsthermografie
QWIP	Quantentopf-Infrarot-Photodetektor
ROI	Region of Interest (=betrachtungsrelevanter Bereich)
RTM	Resin transfer moulding (=Harzinjektionsverfahren)
SH-Welle	Shear horizontal (=horizontal polarisierte) Welle
SV-Welle	Shear vertical (=vertikal polarisierte) Welle
SWIR	Kurzwelliges Infrarot
TSA	Thermoelastische Spannungsanalyse
ULT	Ultraschallangeregte Lock-In-Thermografie
zfP	Zerstörungsfreie Prüfverfahren

α_λ	spektraler Absorptionsgrad	[]
ρ_λ	spektrale Reflektivität	[]
τ_λ	spektrale Transmissivität	[]
$L_{\lambda b}$	elektromagnetische Strahlung	$\left[\frac{W}{m^2 \mu m}\right]$
λ	Wellenlänge	[m]
T	Temperatur	[K]
h	Plancksches Wirkungsquantum	$6,626 \cdot 10^{-34}$ [Js]
c_0	Lichtgeschwindigkeit	$2,998 \cdot 10^8$ $\left[\frac{m}{s}\right]$
k_B	Boltzmannkonstante	$1,38 \cdot 10^{-23}$ $\left[\frac{J}{K}\right]$
ϕ_λ	spektrale spezifische Ausstrahlung	$\left[\frac{W}{m^2 \mu m}\right]$
P_b	abgestrahlte Leistung in den Halbraum	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$,
σ :	Stefan-Boltzmann Konstante	$5,67 \cdot 10^{-8}$ $\left[\frac{W}{m^2 K^4}\right]$
ϵ_λ	Emissivität für eine bestimmte Wellenlänge	[]
\dot{q}	Wärmestromdichte	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
λ	Wärmeleitfähigkeit	$\left[\frac{W}{m K}\right]$
\dot{Q}	Wärmestrom	[W]
∇^2	Laplace-Operator	[]
ρ	Massedichte	$\left[\frac{g}{cm^3}\right]$
c_p	spezifische Wärmekapazität	$\left[\frac{J}{kg K}\right]$
Q	Absorbierte Energiedichte	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
α	Thermische Diffusivität (Temperaturleitfähigkeit)	$\left[\frac{m^2}{s}\right]$
μ	thermische Diffusionslänge	[m]
f	Modulationsfrequenz	$\left[\frac{1}{s}\right]$
E	E-Modul	[GPa]

Z	Schallwellenwiderstand	[]
R	Reflexionsfaktor	[]
D	Durchlässigkeitsfaktor	[]
F _L	Lorentzkraft	[N]
I	induzierter Strom	[A]
B ₀	magnetische Flussdichte	$\left[\frac{\text{N}}{\text{A m}}\right]$

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Wissenschaftliche Hypothesen dieser Dissertation	3
Abb. 2: Abgestrahlte Strahlungsdichte bei verschiedenen Temperaturen.....	10
Abb. 3: Stefan-Boltzmann Gesetz für verschiedene Emissivitäten.....	12
Abb. 4: Atmosphärische Durchlässigkeit bei verschiedenen Wellenlängen (nach [45])	15
Abb. 5: Blitzlichteinheit zusammen mit Dual-Band Kamera.....	17
Abb. 6: Verschiedene Spulengeometrien für die Thermografiemessung.....	17
Abb. 7: IR-Array zur Thermografieprüfung.....	18
Abb. 8: Verschiedene thermische Anregungen der Puls-thermografie (nach [51]).....	19
Abb. 9: Prinzip der FFT in der Puls-Phasen-Thermografie (nach [51]).....	20
Abb. 10: Prinzip der induktiv angeregten Lock-In-Thermografie (angelehnt an [58]).....	23
Abb. 11: Skizze einer Longitudinalwelle (angelehnt an [61]).....	24
Abb. 12: Skizze einer Transversalwelle (angelehnt an [62]).....	25
Abb. 13: Reflexion einer Ultraschallwelle an einer Grenzfläche (nach [62]).....	26
Abb. 14: Reflexion und Brechung einer Ultraschallwelle an einer Grenzfläche (nach [62]).....	27
Abb. 15: Skizze einer Rayleighwelle und einer Lovewelle (nach [62]).....	28
Abb. 16: Skizze der symmetrischen und asymmetrischen Mode der Lambwelle (nach [61])	28
Abb. 17: Skizze einer Stoneley- und einer Kriechwelle.....	29
Abb. 18: Skizze einer SH-Welle.....	29
Abb. 19: Skizze zur Veranschaulichung des piezoelektrischen Effekts.....	30
Abb. 20: Prinzip der Lorentzkraft und Magnetostriktion (angelehnt an [64])	32
Abb. 21: Vergleich zwischen konventionellem Ultraschall und geführten Wellen	32
Abb. 22: Dispersionsdiagramm für einen 800 kHz Prüfkopf und 4 mm Probendicke.....	33
Abb. 23: Prinzipien der Datenfusion (angelehnt an [66])	35
Abb. 24: Schema der Datenfusionsarchitektur (angelehnt an [44])	36
Abb. 25: Vorgehensweise bei der Datenfusion aus EMUS und Thermografie mittels eines MATLAB-Algorithmus am Beispiel einer Hybridprobe	37
Abb. 26: Prinzip der Computertomografie	38
Abb. 27: Prinzip der Rotationslaminografie.....	39
Abb. 28: Geometrie der CFK-Probe nach DIN EN ISO 527-4:1997 Typ 3 [68].....	40

Abb. 29: Geometrie der geklebten Probe	41
Abb. 30: Komponenten des Hybridverbunds: 1) Aluminiumeinleger, 2) Einleger mit Thermoplast, 3) fertiger Hybridverbund	42
Abb. 31: Künstlich eingebrachte Defekte in den Hybridverbund	43
Abb. 32: Lage und Größe der Gappingdefekte im Hybridverbund	43
Abb. 33: Versuchsaufbau Thermografie (am Beispiel der induktiven Thermografie) in a) Reflexionsanordnung und b) Transmissionsanordnung	45
Abb. 34: Versuchsaufbau EMUS: a) Abstimmereinheit und b) Prüfkopfhalter.....	45
Abb. 35: Defektfreie CFK-Probe vor der mechanischen Prüfung	46
Abb. 36: CFK-Probe nach quasistatischer Prüfung nach a) 28 ms, b) 250 ms und c) 950 ms	47
Abb. 37: CFK-Probe nach dynamischer Prüfung nach a) 21 ms, b) 208 ms und c) 1 s.....	48
Abb. 38: Vorder- und Rückansicht geklebter Proben.....	49
Abb. 39: Thermografiebilder von geklebten Proben a) ohne Defekt und b) Klebung mit Lufteinschluss	50
Abb. 40: Geklebte Probe mit verschiedenen künstlichen Defekten	50
Abb. 41: Thermografiebilder einer defektfreien Probe bei a) 7 ms und b) 1 s nach der Blitzanregung	52
Abb. 42: Thermografiebilder von Proben mit verschiedenen Oberflächendefekten, aufgenommen 7 ms nach der Blitzanregung	53
Abb. 43: Thermografiebilder von Proben mit Falten a) in der ersten CFK-Lage, aufgenommen 0,35 s nach der Blitzanregung und b) in der zweiten CFK- Lage, aufgenommen nach 0,7 s nach der Blitzanregung.....	54
Abb. 44: Probe FG3-1 mit Styroporkugeln als Fremdkörper zwischen einzelnen CFK- Lagen, aufgenommen 0,7 s nach der Blitzanregung	54
Abb. 45: Thermografiebilder von a) Gappingdefekten und b) einer Teflonfolie in zweiter Lage, aufgenommen 1 s nach der Blitzanregung.....	55
Abb. 46: Thermografiebilder der Probe JS4 nach mechanischer Belastung, aufgenommen a) 7 ms und b) 2,1 s nach der Blitzanregung	56
Abb. 47: Thermografiebilder der Probe A123 nach mechanischer Belastung, aufgenommen a) 0,25 s und b) 0,7 s nach der Blitzanregung	57

Abb. 48: Thermografiebilder a) der Probe A80, aufgenommen 1,7 s nach der Blitzanregung und b) der Probe A92, aufgenommen 0,9 s nach der Blitzanregung	58
Abb. 49: Probe FG3-1 a) Amplitudenbild und b) Phasenbild bei einer Frequenz von 0,2 Hz	60
Abb. 50: Amplituden- und Phasenbild der Probe JS4 nach einem Laststeigerungsversuch bei einer Frequenz von 0,2 Hz	61
Abb. 51: Amplituden- und Phasenbild der Probe A123 nach einem dynamischen Zugversuch bei einer Frequenz von 0,2 Hz.....	62
Abb. 52: Probe FG3-1, a) Amplituden- und b) Phasenbild bei einer induktiven Frequenz von 0,2 Hz	63
Abb. 53: Induktives Phasenbild der Probe JS4 nach einem Laststeigerungsversuch bei einer Frequenz von 0,2 Hz.....	64
Abb. 54: Induktives Phasenbild der Probe A123 nach einem dynamischen Zugversuch bei einer Frequenz von 0,28 Hz.....	64
Abb. 55: IR Thermografie der Probe FG3-1 mit Fremdkörpern a) Amplituden- und b) Phasenbild bei einer Frequenz von 0,2 Hz	66
Abb. 56: Phasenbild der Probe JS4 nach Anregung mit IR-Arrays bei einer Frequenz von 0,2 Hz	67
Abb. 57: IR Thermografie der Probe A123 a) Amplituden- und b) Phasenbild bei einer Frequenz von 0,2 Hz	68
Abb. 58: Anregung der Probe JS4 durch EMUS-Sensoren nach a) 2,5 min und b) 12,5 min.....	70
Abb. 59: Temperaturverlauf der Probe JS4 bei Anregung durch EMUS-Sensoren.....	71
Abb. 60: Anregung der Probe A123 durch EMUS-Sensoren nach a) 2,5 min und b) 12,5 min.....	71
Abb. 61: Temperaturverlauf der Probe A123 bei Anregung durch EMUS-Sensoren.....	72
Abb. 62: POD-Kurve der Proben mit Gappingdefekten in der zweiten CFK-Lage und in Reflexionsanordnung	74
Abb. 63: POD-Kurve der Proben mit Gappingdefekten in der dritten CFK-Lage und in Reflexionsanordnung.....	75

Abb. 64: POD-Kurve der Proben mit Gappingdefekten in der zweiten CFK-Lage und in Transmissionsanordnung.....	76
Abb. 65: POD-Kurve der Proben mit Gappingdefekten in der dritten CFK-Lage und in Transmissionsanordnung.....	77
Abb. 66: Positionierung der Prüfköpfe (T: Sender; R: Empfänger) hintereinander.....	80
Abb. 67: Positionierung der Prüfköpfe (T: Sender; R: Empfänger) auf gegenüberliegenden Seiten.....	80
Abb. 68: Signalbild bei Positionierung der Prüfköpfe hintereinander	81
Abb. 69: Signalbild bei Positionierung der Prüfköpfe auf gegenüberliegenden Seiten	82
Abb. 70: Vergleich von Prüfköpfen mit 3 mm bzw. 4 mm Wellenlänge.....	84
Abb. 71: Vergleich der Signalamplituden nach 0 min und 12,5 min	85
Abb. 72: Vergleich von Proben mit und ohne Thermoplast.....	86
Abb. 73: Vergleich der Schadensbilder am Anfang der Fügestelle der Proben JS4, A92, A80 und A123	87
Abb. 74: Vergleich der Probe JS4 mit einer defektfreien Probe	88
Abb. 75: Vergleich der Proben JS4 und A123 mit einer defektfreien Probe	89
Abb. 76: Vergleich der Proben A80 und A92	90
Abb. 77: Phasenbilder einer Probe mit Kaptonstreifen a) mit Blitzanregung und b) induktiv angeregt, aufgenommen mit einer Frequenz von 0,2 Hz.....	92
Abb. 78: Fusion aus Blitzanregung und induktiver Anregung.....	93
Abb. 79: a) Amplitudenbild (Blitzanregung) und b) Phasenbild (induktiv angeregt) einer Probe mit Teflonstreifen, aufgenommen mit einer Frequenz von 0,4 Hz... ..	94
Abb. 80: Fusion aus Amplitudenbild der Blitzanregung und Phasenbild der induktiven Anregung bei einer Frequenz von 0,4 Hz.....	95
Abb. 81: a) Fusion aus Blitzanregung und induktiver Anregung und b) Anregung mittels IR-Arrays bei einer Frequenz von 0,14 Hz.....	96
Abb. 82: Thermografiebild der beschädigten Vollaluminiumprobe, aufgenommen a) 7 ms und b) 1,4 s nach der Blitzanregung	97
Abb. 83: a) Amplituden- und b) Phasenbild der beschädigten Vollaluminiumprobe bei einer Frequenz von 0,1 Hz.....	98
Abb. 84: Signalamplituden der beschädigten Vollaluminiumprobe	98

Abb. 85: Automatisch ausgewertetes Blitzthermografiebild und EMUS-Signal einer Vollaluminiumprobe mit Aussage über den Bauteilzustand vor der mechanischen Prüfung	100
Abb. 86: Automatisch ausgewertetes Blitzthermografiebild (mit einem Grauwert von >220) und EMUS-Messung einer Vollaluminiumprobe mit Aussage über den Bauteilzustand nach der mechanischen Prüfung	101
Abb. 87: Automatisch ausgewertetes Blitzthermografiebild (mit einem Grauwert von >80) und EMUS-Messung einer Vollaluminiumprobe mit Aussage über den Bauteilzustand nach der mechanischen Prüfung	102
Abb. 88: Automatisch ausgewertetes Blitzthermografiebild und EMUS-Signal mit Aussage über den Bauteilzustand nach der mechanischen Prüfung.....	104
Abb. 89: Automatisch ausgewertetes Blitzthermografiebild mit relevantem Bereich und EMUS-Signal mit Aussage über den Bauteilzustand nach der mechanischen Prüfung	105
Abb. 90: a) Bereich der betrachteten Probe JS4, b) CT-Bild in XZ-Ebene und c) CT-Bild in XY-Ebene.....	107
Abb. 91: CT-Messung der Probe JS4 a) in der YZ-Ebene, b) in der XZ-Ebene und c) in der XY-Ebene.....	109
Abb. 92: CT-Messung der Probe A123 a) in der YZ-Ebene, b) in der XZ-Ebene und c) in der XY-Ebene.....	110
Abb. 93: CT-Messung der Probe A92 a) in der YZ-Ebene, b) in der XZ-Ebene und c) in der XY-Ebene.....	111
Abb. 94: CT-Messung der beschädigten Vollaluminiumprobe in a) XZ- und b) XY-Ebene	112
Abb. 95: Anregung der Probe A80 durch EMUS-Sensoren nach a) 2,5 min und b) 12,5 min.....	132
Abb. 96: Anregung der Probe A92 durch EMUS-Sensoren nach a) 2,5 min und b) 12,5 min.....	133
Abb. 97: Thermografiebild in Reflexionsanordnung von einer Probe mit Gappingdefekt a) 1 s nach der Blitzanregung und b) Phasenbild bei einer Frequenz von 0,24 Hz	134

Abb. 98: Thermografiebild in Transmissionsanordnung von einer Probe mit Gappingdefekt a) 1,25 s nach der Blitzanregung und b) Phasenbild bei einer Frequenz von 0,24 Hz	134
Abb. 99: POD-Kurve der Gappingdefekte in der zweiten CFK-Lage und in Transmissionsanordnung.....	135
Abb. 100: POD-Kurve der Gappingdefekte in der zweiten CFK-Lage und in Transmissionsanordnung einer geschwärzten Probe.....	135
Abb. 101: Lage der künstlich eingefügten Kaptonstreifen im Hybrid	136
Abb. 102: Lage der Teflonfolie (Breite 10mm oder 20mm) im Hybrid.....	136

1. Einleitung

Das Ziel dieser Dissertation ist es, unter multimodalem Einsatz von zerstörungsfreien Prüfverfahren, die Grenzflächen von Metall-CFK-Hybridstrukturen zu charakterisieren. Der Materialmix aus Metall und Carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) bietet vielfältige Vorteile und bildet daher einen bedeutenden Konstruktionswerkstoff im Automobilbau der Zukunft.

Gesetzliche Vorgaben bezüglich des Schadstoffausstoßes von PKW und LKW, wie beispielsweise festgelegte Grenzwerte für Kohlenstoffdioxid oder Stickoxide, aber auch Kundenwünsche, wie ein geringer Kraftstoffverbrauch sowie gute Beschleunigungswerte, fordern heutzutage immer mehr den Einsatz besonders leichter und dennoch mechanisch leistungsfähiger Materialien. Zu diesen Materialien gehört neben den Leichtmetallen, wie Aluminium, Magnesium oder Titan, auch der Verbundwerkstoff CFK. Hinsichtlich seiner spezifischen mechanischen Eigenschaften ist der Einsatz von CFK im Grunde alternativlos. Kein anderes Material ist so leicht und besitzt zugleich eine Struktur mit so hoher Festig- und Steifigkeit. Da der Preis für die Herstellung von CFK im Vergleich zu anderen Materialien, wie beispielsweise Aluminium, jedoch sehr hoch ist, ist der Werkstoff trotz seiner positiven Materialeigenschaften für den Einsatz auf dem Massenmarkt ungeeignet. Stattdessen spielen Carbonfaserverstärkte Kunststoffe bisher nur im hochpreisigen Automobilbau, in der Luft- und Raumfahrt sowie im Rennsport eine Rolle. Um die Vorteile des CFK jedoch auch für die übrigen Fahrzeugsegmente nutzen zu können, kommen immer häufiger kostengünstigere Hybridstrukturen zum Einsatz. Diese Hybridstrukturen vereinen die Vorteile der einzelnen Materialien und eröffnen somit neue Einsatzmöglichkeiten.

Die in dieser Arbeit verwendete Hybridstruktur aus Aluminium und CFK entspringt dem DFG-Projekt „Einfluss, Detektion und Vorhersage von Defekten in großserientauglichen Hybridverbunden für Metall/CFK – Leichtbautragstrukturen“, das im Rahmen des SPP-Schwerpunktprogramms „Intrinsische Hybridverbunde für Leichtbautragstrukturen - Grundlage der Fertigung, Charakterisierung und Auslegung“ gefördert wird. Um eine Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften aufgrund von Faserumlenkungen oder -unterbrechungen zu vermeiden, wird die hier verwendete Hybridstruktur nicht- wie meist üblich- durch Schraub- oder Nietverbindungen gefügt, sondern stattdessen eine

formschlüssige Verbindung verwendet. Um den Steifigkeitsunterschied zwischen Aluminium und CFK zu überbrücken, wird zusätzlich ein Thermoplast um die Aluminiumstruktur gespritzt. Dabei entstehen in der Struktur zwei Grenzflächen, die durch zerstörungsfreie Prüfverfahren kontrolliert werden sollen. Zum Einsatz kommen dabei die beiden zerstörungsfreien Prüfverfahren Thermografie- mit den drei Anregungsmethoden Blitz, induktiv über Wirbelstrom sowie IR-Arrays- und der elektromagnetisch induzierte Ultraschall (EMUS).

Die vorliegende Dissertation beginnt mit der Einordnung des Themas in den aktuellen Forschungsstand sowie einer Abgrenzung von bereits untersuchten Fragestellungen (Kap. 2). In einem anschließenden Grundlagenkapitel (Kap. 3) wird das Fundament der Arbeit gelegt. In diesem werden zunächst die beiden verwendeten Verfahren, Thermografie und Ultraschall, vorgestellt. Danach folgt eine Einführung in die Datenfusion sowie eine Vorstellung der Referenzmethoden der Computertomografie (CT) beziehungsweise -laminografie (CL). Am Ende des Grundlagenkapitels werden die untersuchten Probengeometrien und Defektarten eingeführt und der Versuchsaufbau der Messungen beschrieben.

Die Untersuchung der dieser Arbeit zugrundeliegenden Hypothesen (siehe Abb. 1) erfolgt in Kapitel 4. Die erste wissenschaftliche Hypothese besagt, dass mittels der beiden zerstörungsfreien Prüfverfahren der Thermografie und EMUS die Grenzflächen sowie andere Defekte der verwendeten Hybridstruktur aus Aluminium und CFK charakterisiert werden können. Um die Grenzfläche zwischen CFK und Thermoplast, aber auch Defekte im CFK selbst zu charakterisieren, wird die Thermografie verwendet. Der elektromagnetisch induzierte Ultraschall (EMUS) hingegen kommt zum Einsatz, um die Grenzfläche zwischen Aluminium und Thermoplast zu charakterisieren. Der Einsatz der EMUS-Sensoren an CFK wird in dieser Arbeit nicht untersucht, da CFK nicht magnetisch und kaum elektrisch leitend ist.

Eine weitere Hürde bei der Durchführung der Thermografie liegt in der verhältnismäßig kleinen und zugleich komplexen Struktur des Hybridbauteils. Diese sorgt dafür, dass es zu einer ungleichmäßigen Erwärmung sowie Reflexionen an der Oberfläche kommt. Auf dieser Schwierigkeit beruht die zweite Hypothese, die besagt, dass mithilfe der Fast Fourier Transformation eine Verbesserung der Thermografiemessungen zu erwarten ist, da durch die Anwendung dieses Algorithmus aus den aufgenommenen Abkühlbildern

Amplituden- und Phasenbilder ohne Störeinflüsse berechnet werden können. Im Anschluss daran erfolgt die Überprüfung der dritten wissenschaftlichen Hypothese, die ebenfalls auf eine Verbesserung der Thermografieergebnisse abzielt. Diese besagt, dass durch eine Datenfusion von Blitzthermografie und induktiver Thermografie die zuvor erzielten Messergebnisse der einzelnen Verfahren optimiert werden können. Durch die Anwendung der Datenfusion sollen die Vorteile beider Anregungsmethoden kombiniert werden.

Die vierte wissenschaftliche Hypothese dieser Arbeit lautet, dass durch eine Datenfusion von Thermografie und EMUS eine verbesserte Grenzflächencharakterisierung zu erreichen ist. Darüber hinaus soll durch die Kombination überprüft werden, welches der beiden Verfahren sensitiver auf Grenzflächendefekte reagiert.

Im Anschluss an die Überprüfung der wissenschaftlichen Hypothesen folgt ein Kapitel, in dem die erzielten Ergebnisse der Thermografie und EMUS mithilfe der Computertomografie validiert werden.

Zum Abschluss werden die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst sowie ein Ausblick auf weiterführende Untersuchungen gegeben.

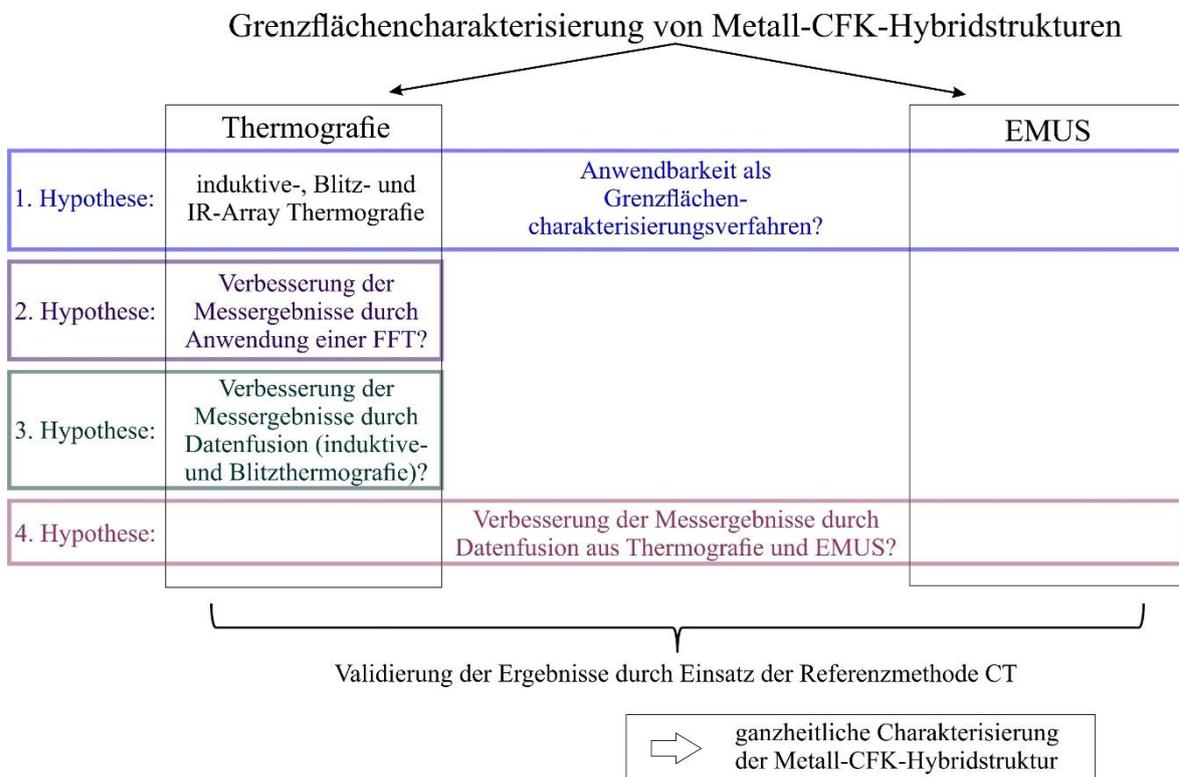


Abb. 1: Wissenschaftliche Hypothesen dieser Dissertation

2. Aktueller Stand der Wissenschaft

Im Folgenden wird diese Arbeit in den aktuellen Stand der Forschung eingeordnet.

Die **aktive Thermografie** als zerstörungsfreie Prüfmethode wird schon lange zur Defektcharakterisierung in verschiedensten Materialien sowie mittels verschiedener Anregungsmethoden genutzt. So detektierten beispielsweise Usamentiaga et al. [1] oder Park et al. [2] Defekte in Metallen mittels Halogenlampen [1] und ultraschallangeregter Thermografie [2], wohingegen Keo et al. [3] Fehler in CFK mittels Halogenlampen und Laser untersucht haben.

Besonders relevant für diese Dissertation sind Arbeiten, die sich mit **Carbonfaserverstärkten Kunststoffen** sowie dem **Materialmix aus Metall und CFK** beschäftigen und in denen die **Anregungsmethoden Blitz, induktiv über Wirbelstrom** und **IR-Arrays** eingesetzt wurden. Arbeiten, in denen CFK mittels **Blitzthermografie** untersucht wurde, sind unter anderem Maierhofer et al. [4], Li et al. [5], Liew et al. [6] sowie Meola et al. [7]. In diesen Arbeiten [4]- [7] wurden CFK-Teile mit Impactschäden charakterisiert. Neben den Impactschäden wurden in Lizaranzu et al. [8], Yuanlin et al. [9], Huo et al. [10], Waugh et al. [11] und Mayr et al. [12] weitere Fehler im CFK, wie Falten und Einschlüsse [8], Delaminationen durch Teflonfolie ([8], [11]), Flachbohrungen ([9], [10]) und Porosität [12] durch Blitzthermografie detektiert. Neben Defekten in CFK-Prüfkörpern wurden in Lizaranzu et al. [8] und Waugh et al. [11] auch geklebte CFK-Teile charakterisiert. So haben Lizaranzu et al. [8] geklebte CFK-Proben mit Defekten in der Klebfuge und Waugh et al. [11] eine geklebte CFK Single-Lap Joint Probe mit Defekten in der Klebfuge überprüft.

Darüber hinaus wurde in zahlreichen Arbeiten auch die **induktive Thermografie durch Wirbelstromanregung** über eine Spule zur Charakterisierung verschiedener Defekte verwendet. So detektierten He et al. [13], Yang et al. [14] und Pan et al. [15] Delaminationen durch künstlich eingefügte Teflonfolie, Yang et al. [16], Cheng et al. [17], Thomas et al. [18] und He et al. [19] Impactschäden und damit einhergehende Delaminationen und Cheng et al. [20] Risse im CFK.

Als dritte relevante Anregungsmethode der aktiven Thermografie wurden in Yang et al. [21], Sojasi et al. [22], Pickering et al. [23], Roy et al. [24] und Maierhofer et al. [25] Defekte mittels **IR-Arrays** charakterisiert. In den Arbeiten [21] und [22] wurden künstlich

eingefügte Teflonfolien als Delamination detektiert, wohingegen in [23]- [25] künstliche Bohrungen im CFK untersucht wurden. Chulkov et al. [26] zeigten in ihrer Arbeit, dass die Verwendung von mehreren IR-Arrays das Signal-Rausch-Verhältnis verbessert.

Die **Fourier Transformation (FFT)** an CFK-Bauteilen wurde in der Vergangenheit bereits in anderen Veröffentlichungen verwendet. So zeigten Duan et al. [27], dass der Einsatz der FFT die Ergebnisse verbessert und somit die Auffindwahrscheinlichkeit von Defekten in CFK erhöht. Auch Keo et al. [3], Maierhofer et al. [4] und Waugh et al. [11] zeigen in ihren Veröffentlichungen, dass der Einsatz der FFT an CFK zu einer Verbesserung der Ergebnisse führt. Der Einsatz der FFT an Aluminium-CFK-Hybridstrukturen, wie sie in dieser Arbeit verwendet werden, wurde bisher noch nicht untersucht, sodass diese Arbeit in dieser Hinsicht einen Neuheitswert darstellt.

Da das Hauptaugenmerk dieser Dissertation auf der **Grenzflächencharakterisierung** liegt, werden nachfolgend bisherige Arbeiten zum Thema Defektcharakterisierung an **CFK-Grenzflächen** vorgestellt. Al-Mosawe et al. [28], Agarwal et al. [29], He et al. [30] und Tashan et al. [31] untersuchten in ihren Arbeiten Klebungen von CFK und Stahl. Hierbei wurden allerdings nur die mechanischen Kennwerte ermittelt, um Aussagen über die Qualität der Grenzfläche treffen zu können. Lai et al. [32] und Grinzato et al. [33] untersuchten die Grenzfläche zwischen Beton und geklebtem CFK mittels Thermografie. In der Veröffentlichung von Genest et al. [34] wurde eine Delamination zwischen geklebtem CFK und Aluminium mithilfe der Thermografie charakterisiert. Die dabei verwendeten Proben sind in ihrer Geometrie sehr einfach gehalten, nämlich rechteckig und eben. Waugh et al. [11] haben in ihrer Arbeit CFK-Platten durch Epoxidklebstoff zu Single Lap Joints verbunden und eine künstlich eingebrachte Delamination mit Thermografie detektiert. Auch in dieser Veröffentlichung ist die Geometrie sehr einfach gehalten. In weiteren Arbeiten zur Grenzflächencharakterisierung, wie Liew et al. [6] und Meola et al. [7], wurden CFK-Komponenten durch eine Klebschicht mit Honigwabenstrukturen zu sogenannten Sandwichstrukturen verbunden und dabei künstlich eingebrachte Impactschäden mit Thermografie detektiert.

Neben der Charakterisierung der **Grenzfläche CFK/Thermoplast** mit **Thermografie** wird in dieser Arbeit auch die **Grenzfläche Aluminium/Thermoplast** untersucht. Dies geschieht mit durch **EMUS** angeregten, geführten SH-Wellen. Vorarbeiten zur Grenzflächencharakterisierung mit geführten SH-Wellen beschränken sich ausschließlich

auf flache, geklebte Proben. So wurden in Pérès et al. [35], Arun et al. [36] und Castaings [37] jeweils zwei 250 mm lange Aluminiumplatten mit einer 0,2 mm dicken und 50 mm breiten Klebschicht miteinander verbunden und die Qualität dieser Klebung untersucht. Brotherhood et al. [38] untersuchten ebenfalls eine Klebung zwischen zwei Aluminiumteilen. Im Gegensatz zu den zuvor erwähnten Arbeiten waren hier die Proben jedoch zylinderförmig und die Klebschicht zwischen den beiden Aluminiumzylindern 2 mm dick. Bei den Messungen wurden die SH-Wellen senkrecht in das Aluminium eingeschallt und die Klebung auf sogenannte Kissing Bonds untersucht. Fei et al. [39] untersuchten die Faserausrichtung eines CFK-Laminats, das sich zwischen zwei Aluminiumblöcken befand, sowohl im unausgehärteten als auch ausgehärteten Zustand. Neuhaus [40] zeigte in ihrer Bachelorarbeit Signalamplituden von Messungen an geklebten Aluminiumblechen. In Quirin [41] wurden Aluminiumrohre an einem Ende mit einem Epoxid verklebt. Dabei wurde untersucht, wie gut die Anbindung zwischen dem Aluminium und dem Epoxidharz ist. Das Ergebnis dieser Arbeit zeigt, dass je nach Güte der Anbindung die Signalamplitude variiert. Andere Arbeiten zum Thema geführte SH-Wellen mit EMUS beschäftigen sich z.B. mit der Dickenmessung einer Stahlprobe [42]. Putkis et al. [43] zeigen, dass die Anwendung von EMUS-Sensoren an CFK möglich ist, obwohl dieses nicht magnetisch und kaum elektrisch leitend ist. Dazu klebten die Autoren eine Aluminiumfolie auf den Carbonfaserverstärkten Kunststoff, um die Anbindung der EMUS-Sensoren am CFK zu verbessern. Diese Vorgehensweise kann in dieser Arbeit nicht verfolgt werden, da Putkis et al. die SH-Wellen mit einem Piezoprüfkopf anregen, der mehr Energie in das Material einbringen kann, als die in dieser Arbeit verwendeten EMUS-Sensoren und darüber hinaus die Ultraschallanregung in dieser Arbeit koppelmittelfrei erfolgen soll.

Neben den zFP-Methoden Thermografie und EMUS wird in dieser Arbeit die **Datenfusion** behandelt. Dabei werden die Ergebnisse aus einzelnen Messmethoden, ähnlich wie in Gros et al. [44], kombiniert. Im Gegensatz zu Gros et al. [44], die Ergebnisse aus Wirbelstrom- und Thermografieprüfung fusionieren, werden in dieser Arbeit jedoch die Ergebnisse der **Blitzanregung** und der **induktiven Anregung** sowie **Thermografie** und **EMUS** miteinander kombiniert.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bis zum jetzigen Zeitpunkt zwar Arbeiten existieren, in denen Carbonfaserverstärkte Kunststoffe sowie der Materialmix aus Metall

und Kunststoff mittels Blitzthermografie, induktiver Thermografie und IR-Arrays untersucht wurden, sich diese Arbeiten jedoch auf die Charakterisierung von größeren, ebenen Proben oder Klebungen mit jeweils einfacher Geometrie beschränken. Außerdem handelt es sich bei den untersuchten Defekten ausschließlich um künstlich in die Probe eingebrachte Fehler, die Impactschäden oder Delaminationen simulieren sollen. Im Gegensatz dazu stehen die in dieser Arbeit untersuchten Prüfkörper mit komplexer Geometrie. Neben künstlich in die Probe eingebrachten Fehlern, wie Teflonstreifen oder Gappings, werden darüber hinaus zusätzlich produktionstechnische Fehler, die aufgrund der komplexen Geometrie im Herstellungsprozess entstehen, im CFK detektiert.

Neben reinem CFK werden in dieser Arbeit auch die Grenzflächen zwischen CFK und Thermoplast sowie Aluminium und Thermoplast näher betrachtet. Untersuchungen von Defekten an CFK-Grenzflächen gibt es bisher selten. Existierende Arbeiten beschäftigen sich entweder nur mit mechanischen Kennwerten oder mit künstlich eingebrachten Defekten, die mittels Thermografie an geometrisch einfachen Strukturen untersucht werden. In dieser Arbeit hingegen werden auch reelle Defekte an der Grenzfläche zwischen CFK und Thermoplast untersucht, die durch mechanische Belastung, wie beispielsweise Zug- oder Ermüdungsversuche, entstehen. Insgesamt stellt die Grenzflächencharakterisierung mittels aktiver Thermografie, wie sie in dieser Arbeit durchgeführt wird, eine Neuerung und somit eine Erweiterung des aktuellen Forschungsstandes dar.

Weiterhin zeigen die bisherigen Veröffentlichungen zum Thema EMUS, dass eine Charakterisierung von Aluminium-Grenzflächen mittels SH-Wellen prinzipiell möglich ist. Bisher wurden jedoch noch keine komplexen Hybridbauteile, wie sie in dieser Dissertation verwendet werden, untersucht. Somit stellt dieser Forschungsansatz ebenfalls eine Erweiterung der bisherigen Arbeiten hinsichtlich Grenzflächenuntersuchungen mit EMUS dar.

Auch die abschließende Datenfusion der Ergebnisse der Blitzanregung und der induktiven Anregung sowie Thermografie und EMUS ist gänzlich neu.

3. Grundlagen

Im nachfolgenden Kapitel werden die verwendeten zerstörungsfreien Prüfverfahren, Thermografie und EMUS, das Verfahren der Datenfusion, die Referenzmethoden Computertomografie und –laminografie, der Versuchsaufbau sowie die Geometrie der verwendeten Proben näher erläutert.

3.1 Thermografie

Die Thermografie ist ein bildgebendes Verfahren zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, bei dem die Oberflächentemperatur von Bauteilen oder Prüfkörpern gemessen wird (siehe Kapitel 3.1.1). In der Industrie wird die Thermografie sehr häufig genutzt, da sie zahlreiche Vorteile birgt. Zu diesen zählen unter anderem die Möglichkeit kontaktloser Messungen ohne Oberflächenbehandlung auch auf großen Oberflächen, sehr kurze Messzeiten sowie objektive, leicht zu interpretierende Ergebnisse. Außerdem bietet die Thermografie eine gute Handhabbarkeit (Portabilität) und ist zudem sehr umweltfreundlich.

Bei der Thermografie unterscheidet man zwei verschiedene Verfahrensvarianten: aktive und passive Thermografie. Bei der aktiven Thermografie (siehe Kapitel 3.1.2) wird der Versuchskörper aktiv durch eine externe Quelle, z.B. Blitzlampen oder Laserstrahlung, thermisch angeregt. Bei der passiven Thermografie (siehe Kapitel 3.1.3) hingegen wird die Temperatur an der Oberfläche des Versuchskörpers, ausgelöst durch die Umgebung oder einen Prozess, wie beispielsweise einem mechanischen Versuch, mithilfe einer Infrarotkamera erfasst.

Obwohl die passive Thermografie, im Gegensatz zur aktiven Thermografie, nicht Gegenstand dieser Arbeit ist, soll sie dennoch der Vollständigkeit wegen kurz thematisiert werden.

3.1.1 Prinzip der Thermografie

Beim zFP-Verfahren Thermografie wird mithilfe einer Infrarotkamera die Wärmestrahlung einer Probe aufgezeichnet. Diese Wärmestrahlung entsteht, da die Oberfläche jedes Objektes mit einer Temperatur größer als 0 K Energie in Form von Infrarotstrahlung emittiert [45]. Da die emittierte Strahlung eine Funktion der Temperatur ist, kann

geschlussfolgert werden, dass mit steigender Temperatur die Intensität der Strahlungsenergie steigt. Trifft nun Strahlung auf die Oberfläche eines Objekts, gibt es drei Möglichkeiten: die Strahlung wird reflektiert, absorbiert oder sie transmittiert [46]. Je nach Materialeigenschaft variiert dabei der Grad der Reflektivität, der Absorption beziehungsweise der Transmissivität [47]. Reflexion, Absorption und Transmission sind wellenlängenabhängig und ihre Summe muss unabhängig von der Wellenlänge eins betragen (siehe Gleichung (1)).

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (1)$$

mit α_λ : spektraler Absorptionsgrad, ρ_λ : spektrale Reflektivität, τ_λ : spektrale Transmissivität

Dabei entspricht der spektrale Absorptionsgrad α_λ dem Anteil der absorbierten Strahlung eines Körpers, die spektrale Reflektivität ρ_λ dem Anteil an reflektierter Strahlung und die spektrale Transmissivität τ_λ dem Anteil an transmittierter Strahlung.

Materialien oder Körper, die eine Reflektivität und eine Transmissivität von null haben, werden schwarze Strahler genannt. In diesen Materialien wird die gesamte Strahlung absorbiert ($\alpha_\lambda = 1$).

Die elektromagnetische Strahlung $L_{\lambda b}$, die von einem schwarzen Strahler ausgeht, kann durch das Plancksche Strahlungsgesetz dargestellt werden [48] (siehe Gleichung (2)).

$$L_{\lambda b}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 (\exp(\frac{c_2}{\lambda T}) - 1)} \quad (2)$$

mit $L_{\lambda b}$: elektromagnetische Strahlung [$\frac{W}{m^2 \mu m}$], λ : Wellenlänge [m], T: Temperatur [K], c_1 und c_2 : Konstanten

$$c_1 = 2hc_0^2 = 1,191 \cdot 10^{-16} \quad [W m^2]$$

$$c_2 = \frac{hc_0}{k_B} = 1,439 \cdot 10^4 \quad [K m]$$

mit h: Plancksches Wirkungsquantum [Js], c_0 : Lichtgeschwindigkeit [$\frac{m}{s}$],

k_B : Boltzmannkonstante [$\frac{J}{K}$]

Durch dieses Strahlungsgesetz lässt sich nun die spektrale Leistungsdichte, die abhängig von der Wellenlänge und der Temperatur ist, bestimmen. Abb. 2 zeigt die abgestrahlte Strahlungsdichte bei verschiedenen Temperaturen. Es wird deutlich, dass je höher die

Temperatur des Objektes ist, desto höher ist auch die Strahlungsdichte. Außerdem lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Temperatur des Objektes und der Wellenlänge der maximalen Strahlungsdichte erkennen. Dabei gilt: je höher die Temperatur, desto kleiner die Wellenlänge der maximalen Strahlungsdichte.

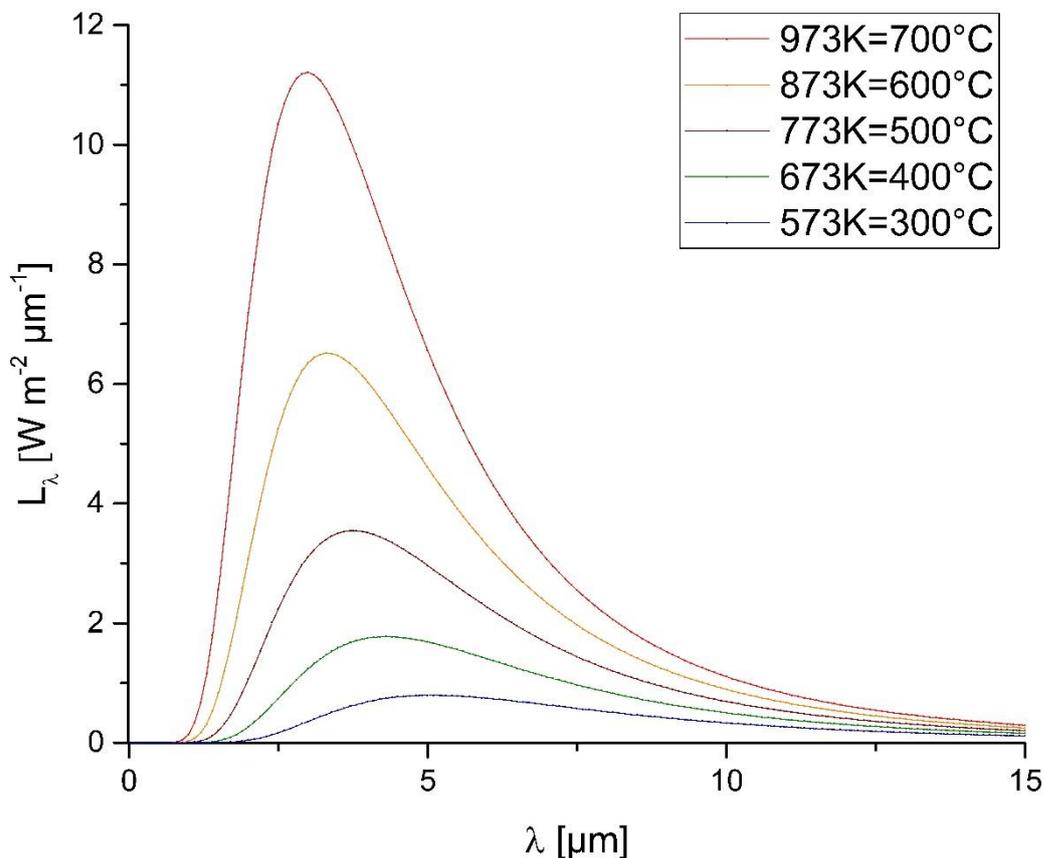


Abb. 2: Abgestrahlte Strahlungsdichte bei verschiedenen Temperaturen

Die Wellenlänge, bei der sich das Maximum der Strahlungsdichte befindet, lässt sich über das Wiensche Strahlungsgesetz berechnen. Dieses ergibt sich aus dem Planckschen Strahlungsgesetz, wenn $\lambda T \ll c_2$, die Wellenlänge also sehr klein ist (Gleichung (3)).

$$\phi_\lambda(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) \right)} \quad (3)$$

mit ϕ_λ : spektrale spezifische Ausstrahlung $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \mu\text{m}} \right]$

Zur Bestimmung der Wellenlänge λ_{max} wird nun die Ableitung des Wienschen Strahlungsgesetzes nach der Wellenlänge gebildet. Das Ergebnis stellt das Wiensche

Verschiebungsgesetz dar, mit dessen Hilfe die Wellenlänge bestimmt werden kann, bei der ein schwarzer Körper in Abhängigkeit von der Temperatur die maximale Strahlungsleistung besitzt (Gleichung (4)).

$$\lambda_{\max} = \frac{0,0029}{T} \quad (4)$$

Um nun die thermisch abgestrahlte Leistung eines schwarzen Körpers in den Halbraum zu bestimmen, wird Gleichung (2) über alle Wellenlängen integriert. Dadurch erhält man das Stefan-Boltzmann Gesetz:

$$P_b = \sigma T^4 \quad (5)$$

mit P_b : abgestrahlte Leistung in den Halbraum [$\frac{W}{m^2}$], σ : Stefan-Boltzmann Konstante

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k_b^4}{15 h^3 c^2} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$$

Da das Stefan-Boltzmann Gesetz nur für schwarze Strahler gilt, muss eine verallgemeinerte Formel hergeleitet werden. Die Emissivität eines realen Körpers für eine bestimmte Wellenlänge wird definiert als Quotient aus seiner emittierten Energie und der emittierten Energie, die ein schwarzer Körper ausstrahlen würde.

$$\varepsilon_\lambda(\lambda, T, \theta', \phi') = \frac{L_\lambda(\lambda, T, \theta', \phi')}{L_{\lambda,b}(\lambda, T)} \quad (6)$$

mit ε_λ : Emissivität für eine bestimmte Wellenlänge

Ein realer Körper emittiert nur einen Bruchteil der thermischen Energie, die ein schwarzer Körper bei derselben Temperatur abstrahlt. Falls diese abgestrahlte Energie konstant und unabhängig von der Wellenlänge ist, kann der Körper als grauer Körper bezeichnet werden. In diesem Fall kann folgende Gleichung verwendet werden:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{L_\lambda}{L_{\lambda,b}} = \frac{L}{L_b} = \varepsilon \quad (7)$$

Da die abgestrahlte Energie eines realen Körpers aber weder konstant noch unabhängig von der Wellenlänge ist, kann ein solcher nicht als grauer Körper bezeichnet werden. Jedoch kann die Emissivität für kurze Wellenlängenbereiche als konstant angenommen werden. Diese Annahme ermöglicht es, einen realen Körper im Wellenlängenbereich des benutzten Infrarotsensors als grauen Körper zu behandeln.

Durch Einsetzen von Gleichung (7) in Gleichung (5) erhält man das Stefan-Boltzmann Gesetz für graue Körper (Gleichung (8)). Abb. 3 zeigt das Gesetz für verschiedene Emissivitäten.

$$P = \varepsilon \sigma T^4 \quad (8)$$

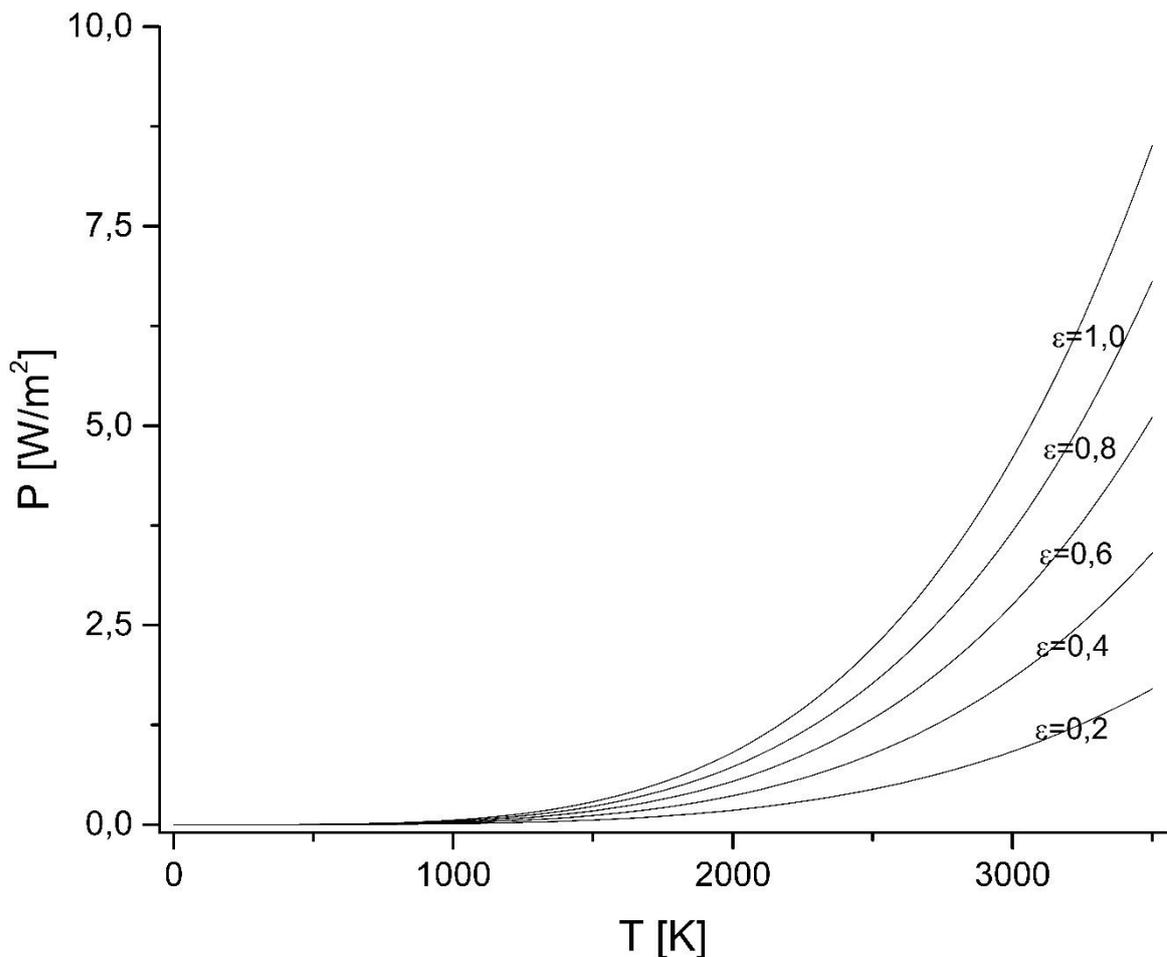


Abb. 3: Stefan-Boltzmann Gesetz für verschiedene Emissivitäten

Sind die Reflektivität und Transmissivität eines Körpers gleich null, folgt aus Gleichung (1), dass der Absorptionsgrad eins ist. Da die gesamte absorbierte Energie eines schwarzen Körpers bei einer konstanten Temperatur wieder abgestrahlt werden muss, muss die Emissivität ebenfalls eins sein. Das Kirchhoffsche Gesetz beschreibt diesen Zusammenhang, indem es besagt, dass bei einer bestimmten Temperatur und Wellenlänge die Emissivität und der Absorptionsgrad eines jeden Körpers gleich sind (Gleichung (9)).

$$\alpha_\lambda = \varepsilon_\lambda \quad (9)$$

mit α : Absorptionsgrad, ε : Emissivität

Die absorbierte Strahlung diffundiert durch den bestrahlten Körper. Dieser Prozess der Wärmediffusion kann mithilfe der allgemeinen Wärmeleitungsgleichung (Fouriersches Gesetz der Wärmeleitung) beschrieben werden (Gleichung (10)).

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \text{grad}(T) \quad (10)$$

mit \dot{q} : Wärmestromdichte [$\frac{W}{m^2}$], λ : Wärmeleitfähigkeit [$\frac{W}{m K}$], T: Temperatur [K]

Die Wärmestromdichte ist abhängig vom Gradienten der Temperatur und von der Wärmeleitfähigkeit. Im eindimensionalen Fall reduziert sich Gleichung (10) zu:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \dot{q} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (11)$$

mit \dot{Q} : Wärmestrom [W]

Will man ein allgemeines Temperaturfeld mit konstanten Stoffwerten beschreiben, so ergibt sich Gleichung (12).

$$\dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda [\nabla^2 T] \quad (12)$$

mit ∇^2 : Laplace-Operator, ρ : Massedichte [$\frac{g}{cm^3}$], c_p : spezifische Wärmekapazität [$\frac{J}{kg K}$]

Es wird deutlich, dass die Wärmestromdichte in einem betrachteten Temperaturfeld nicht nur abhängig von der Wärmeleitfähigkeit und dem Gradienten der Temperatur über einen bestimmten Bereich ist, sondern auch vom Temperaturgradienten über die Zeit.

Als Lösung dieser Gleichung lässt sich die Temperaturverteilung in der Tiefe z eines Körpers bestimmen. Gleichung (13) gilt hierbei für eine gepulste Wärmequelle, die ihre Energie in kürzester Zeit abgibt (Dirac-Impuls).

$$T(z,t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi} \sqrt{\lambda \rho c} \sqrt{t}} \exp\left(-\frac{z^2}{4\alpha t}\right) \quad (13)$$

mit Q : absorbierte Energiedichte [$\frac{W}{m^2}$], α : Diffusivität (Temperaturleitfähigkeit) [$\frac{m^2}{s}$]

Aus dieser Gleichung lässt sich ablesen, dass sich die Temperatur mit $\frac{1}{\sqrt{t}}$ reduziert und von der Diffusivität α abhängig ist. Für die Randbedingung, dass nur die Oberfläche betrachtet wird ($z = 0$), ist die Temperaturverteilung unabhängig von der Diffusivität.

Neben der thermischen Diffusivität ist die Effusivität (Wärmeeindringkoeffizient) eine weitere wichtige Materialkenngröße der Thermografie (Gleichung (14)). Die Effusivität gibt an, wie gut ein Material Wärme aufnehmen kann.

$$e = \sqrt{\lambda \rho c} \quad (14)$$

mit λ : Wärmeleitfähigkeit, ρ : Massedichte, c : spezifische Wärmekapazität

Die elektromagnetische Strahlung, die der Körper wieder abgibt, wird von einer Infrarotkamera aufgenommen. Das elektromagnetische Spektrum ist abhängig von der Wellenlänge in verschiedene Bereiche, auch Bänder genannt, aufgeteilt. Das gesamte Infrarotspektrum reicht vom Ende des sichtbaren Bereichs bis zu den Mikrowellen, also von $0,8 \mu\text{m}$ bis $1000 \mu\text{m}$.

Große Bereiche des Infrarotspektrums können für die Infrarotthermografie nicht sinnvoll genutzt werden, da sie von der Atmosphäre geblockt werden. Die nutzbaren Bereiche werden folgendermaßen eingeteilt:

Name des Infrarots	Wellenlängenbereich
Nahes Infrarot (NIR)	$0,8 \mu\text{m} - 1,7 \mu\text{m}$
Kurzwelliges Infrarot (SWIR)	$1 \mu\text{m} - 2,5 \mu\text{m}$
Mittleres Infrarot (MWIR)	$2 \mu\text{m} - 5 \mu\text{m}$
Langwelliges Infrarot (LWIR)	$8 \mu\text{m} - 14 \mu\text{m}$

Tabelle 1: Einteilung der Infrarotbereiche nach ihrer Wellenlänge

Von den hier aufgelisteten Infrarotbereichen werden in der Thermografie hauptsächlich das mittlere und das langwellige Infrarot genutzt. Dies geschieht aus zwei Gründen: zum einen aufgrund der maximalen Intensität der Bänder und zum anderen wegen der atmosphärischen Durchlässigkeit.

Wie in Abb. 2 zu sehen ist, ist die maximale Intensität abhängig vom Zusammenspiel der Wellenlänge und der Temperatur. Demnach erfolgt die effektivste Messung bei der Wellenlänge mit der höchsten Intensität. Messungen bei abweichenden Wellenlängen

erfordern eine sensitivere Kamera, um ähnlich gute Ergebnisse zu erhalten. Aus diesem Grund werden für die meisten Applikationen Wellenlängen genutzt, die oberhalb des kurzwelligen Infrarots liegen.

Infrarotstrahlung wird in der Atmosphäre an verschiedenen Partikeln, die sich in der Luft befinden, absorbiert. Größtenteils geschieht dies durch CO_2 und H_2O [49]. Der Anteil, der in der Luft absorbiert wird, ist abhängig von der Wellenlänge der Infrarotstrahlung. Im mittleren und langwelligen Infrarot ist diese Absorption sehr gering, sodass mehr Strahlung die Kamera erreicht.

In Abb. 4 ist die atmosphärische Durchlässigkeit abgebildet. Es ist zu erkennen, dass im sichtbaren Bereich ($0,4 \mu\text{m}$ bis $0,7 \mu\text{m}$) nur ca. 60 % der emittierten Strahlung transmittiert werden. Im Bereich von $5,5 \mu\text{m}$ bis $7,5 \mu\text{m}$ wird keine Strahlung transmittiert. Aus diesem Grund verwenden Infrarotmessgeräte den mittleren oder den langwelligen Infrarotbereich.

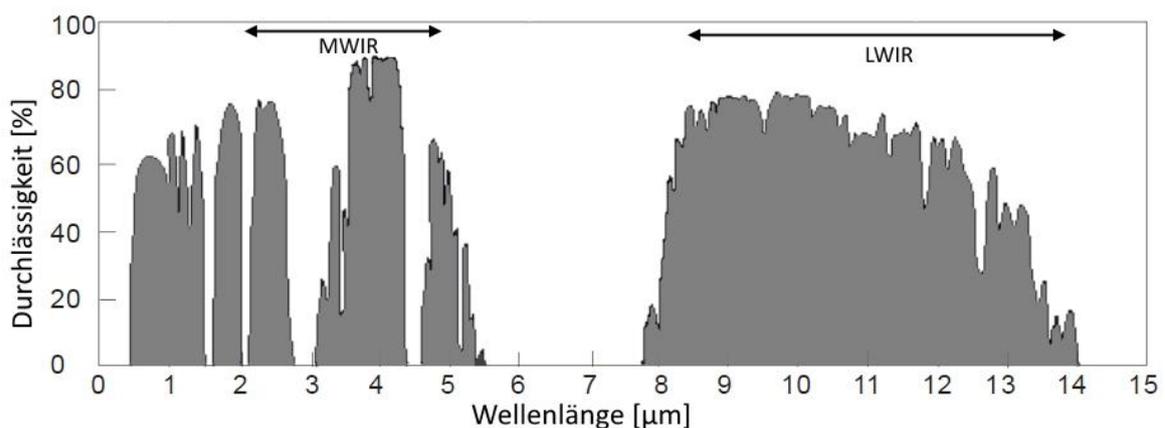


Abb. 4: Atmosphärische Durchlässigkeit bei verschiedenen Wellenlängen (nach [45])

Bei den Thermografiemessungen in dieser Arbeit wird eine sogenannte Dual-Band Kamera verwendet. Diese ist in der Lage, infrarote Strahlung im mittleren ($4,4 \mu\text{m}$ - $5,2 \mu\text{m}$) und im langwelligen Infrarot ($7,8 \mu\text{m}$ - $8,8 \mu\text{m}$) gleichzeitig aufzuzeichnen.

3.1.2 Aktive Thermografie

In der vorliegenden Arbeit kommt als zerstörungsfreie Prüfmethode die aktive Thermografie zum Einsatz. Diese dient dazu, Defekte und Grenzflächen in Bauteilen zu charakterisieren. Bei der aktiven Thermografie wird das zu prüfende Bauteil mithilfe einer externen Wärmequelle thermisch angeregt und so ein Wärmefluss im Prüfobjekt erzeugt.

Befinden sich im Objekt verborgene Inhomogenitäten, zeigt sich an diesen Stellen ein veränderter Wärmefluss aufgrund einer abweichenden Wärmeleitfähigkeit. Im Thermografiebild erscheinen diese Stellen, an denen die Defekte wie eine Wärmebarriere agieren, heller.

In der aktiven Thermografie gibt es verschiedene Verfahren, die zur thermischen Anregung in Frage kommen. Dabei unterscheidet man zwischen optischen Anregungsmethoden (z.B. Blitzlicht, Halogenstrahler, IR-Arrays oder Laser), Ultraschallanregung sowie induktiver Anregung (z.B. durch Wirbelstromspulen). Daneben ist eine Unterscheidung zwischen einmaliger (z.B. Pulsthermografie (PT) sowie die darauf basierende Puls-Phasen-Thermografie (PPT)) und periodischer Anregung (z.B. Lock-In-Thermografie (LT)) möglich. Die zerstörungsfreie Prüfung mittels aktiver Thermografie wird durch die Norm DIN 54192 [50] beschrieben.

In dieser Arbeit wird aktive Thermografie mit Blitzlichtanregung, Wirbelstromanregung und im infraroten Bereich durch IR-Arrays verwendet, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

3.1.2.1 Verwendete Anregungsmethoden der aktiven Thermografie

Blitzlichtanregung

Eine Möglichkeit der Anregung ist die optische Anregung mittels Blitzlicht (siehe Abb. 5). Dabei werden kurze Energiepakete, die in Kondensatoren gespeichert werden, in einer mit Edelgas (Xenon oder Krypton) gefüllten Röhre entladen. Durch die spezielle Anordnung von Kathode und Anode kommt es beim Anlegen einer Mindestspannung zur Glimmentladung und folglich zu einem Blitz. Durch die Anwendung von Blitzlicht kann ein einzelner Single-Puls mit einer Energie von 3,2 kJ (einmalige Anregung) oder auch mehrere aufeinanderfolgende Pulse (periodische Anregung) genutzt werden.

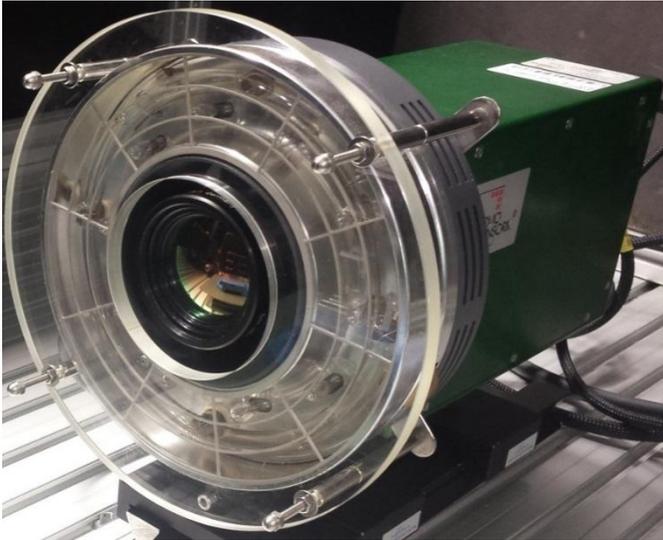


Abb. 5: Blitzlichteinheit zusammen mit Dual-Band Kamera

Wirbelstromanregung

Bei der induktiv angeregten Thermografie wird mittels einer Wirbelstromspule ein Strom in ein elektrisch leitendes Material induziert. Eine solche Wirbelstromspule wird mit geringem Abstand am Prüfobjekt positioniert. Als Spulengeometrie können dabei Ringspulen, Spiralspulen oder Stabspulen eingesetzt werden (siehe Abb. 6). Durch die Spulen wird über einen bestimmten Zeitraum periodisch Energie in das Prüfobjekt eingeleitet und dabei mit der Kamera aufgenommen. Durch eine Variation der Frequenz oder der Spulengeometrie sowie der Position der Spule lassen sich verschiedene Defekte in verschiedenen Tiefen detektieren.



Abb. 6: Verschiedene Spulengeometrien für die Thermografiemessung

IR-Array Anregung

Bei der Thermografiemessung mit IR-Arrays wird- ähnlich der Anregung mit Blitz- das Prüfobjekt durch optische Stimulation erwärmt. Der Unterschied jedoch ist, dass durch die IR-Arrays die Probe mit elektromagnetischer Strahlung im infraroten Bereich (940 nm) angeregt wird. Dies geschieht durch 64 Dioden, die auf einer LED-Platine angeordnet sind (siehe Abb. 7). Mit diesem IR-Array sind sowohl Single-Shot Messungen als auch dauerhafte, periodische Messungen möglich.

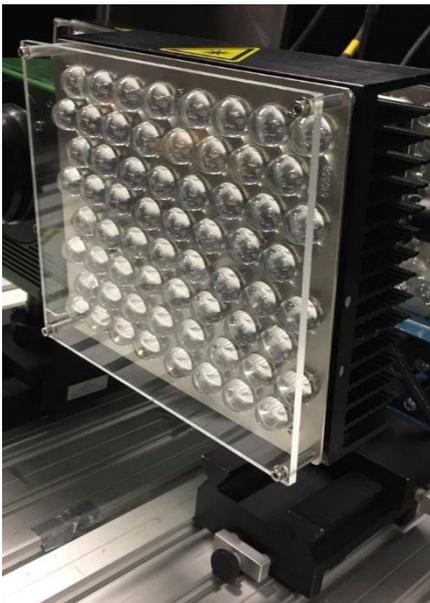


Abb. 7: IR-Array zur Thermografieprüfung

3.1.2.2 Pulsthermografie (PT)

Wie bereits in Kapitel 3.1.2 erwähnt, sind bei der aktiven Thermografie zwei verschiedene Anregungsverfahren möglich: einmalige und periodische Anregung.

Bei der einmaligen Anregung, auch Impuls- oder Pulsthermografie genannt, handelt es sich um eine kontaktlose Prüfmethode, bei der das Abkühlverhalten eines Prüfobjektes untersucht wird. Dazu nutzt man einen entweder extern (z.B. Heizplatten, Heißluftgebläse oder Blitzlampe) oder intern (z.B. induktive Erwärmung) angeregten thermischen Wärmepuls (siehe Abb. 8), der die Oberfläche des Prüfobjektes innerhalb kurzer Zeit gleichmäßig und sehr stark erwärmt. Der durch den Wärmeimpuls ausgelöste Wärmefluss durchdringt durch Diffusion das Objekt und wird an Defekten daran gehindert, weiter in

das Prüfobjekt einzudringen. An diesen Stellen entstehen an der Oberfläche wärmere Bereiche, die von einer IR-Kamera erfasst werden.

Nachteile der Pulsthermografie sind die hohe thermische Belastung der Prüfobjektoberfläche durch die einmalige Energieeinbringung in die Probe, die zudem nicht gleichförmig erfolgt, sowie die Sensitivität auf Unterschiede in der Emissivität an der Oberfläche.

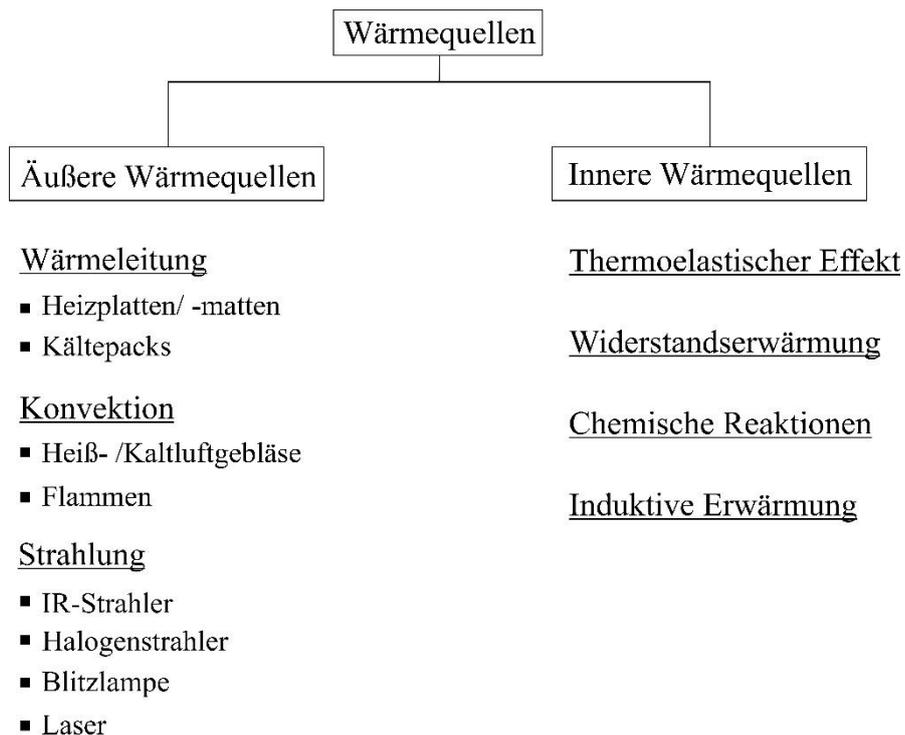


Abb. 8: Verschiedene thermische Anregungen der Pulsthermografie (nach [51])

3.1.2.3 Puls-Phasen-Thermografie (PPT)

Die ungleichförmige Energieeinbringung in das Prüfobjekt sowie die unterschiedliche Emissivität an der Oberfläche, die Nachteile der Pulsthermografie bilden, lassen sich durch die Anwendung der Puls-Phasen-Thermografie vermeiden. Dazu werden mittels einer Fast Fourier Transformation die Abkühlbilder der Pulsthermografie ausgewertet. Laut Arndt et al. [51] entstehen dabei für „jede diskrete Frequenz f Amplituden- und Phasenbilder, die analog zur Lock-In-Thermografie (LT) ausgewertet werden können“ (siehe Abb. 9).

Die Fast Fourier Transformation der einzelnen Pixel der aufgenommenen Abkühlbilder kann dabei durch die Gleichungen (15) und (16) beschrieben werden:

$$F(x,y,f) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} F(x,y,t) \cdot e^{-2\pi i f t} \quad (15)$$

$$= \text{Re}(x,y,f) + i \cdot \text{Im}(x,y,f) \quad (16)$$

mit x, y : Ortsvariablen der verwendeten Einzelbilder von $n=0$ bis $N-1$

Für jeden Bildpunkt des Temperatursignals $F(t)$ lassen sich so die Amplitude A sowie der Phasenwert Φ für die jeweils betrachtete Frequenz berechnen. Somit lässt sich die Puls-Phasen-Thermografie als Überleitung der zeitabhängigen, thermischen Antwort eines Prüfobjekts in den dazugehörigen Frequenzbereich definieren [52].

Dabei gilt:

$$\Phi(x,y,f) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}(x,y,f)}{\text{Re}(x,y,f)} \quad (17)$$

$$A(x,y,f) = \sqrt{\text{Re}(x,y,f)^2 + \text{Im}(x,y,f)^2} \quad (18)$$

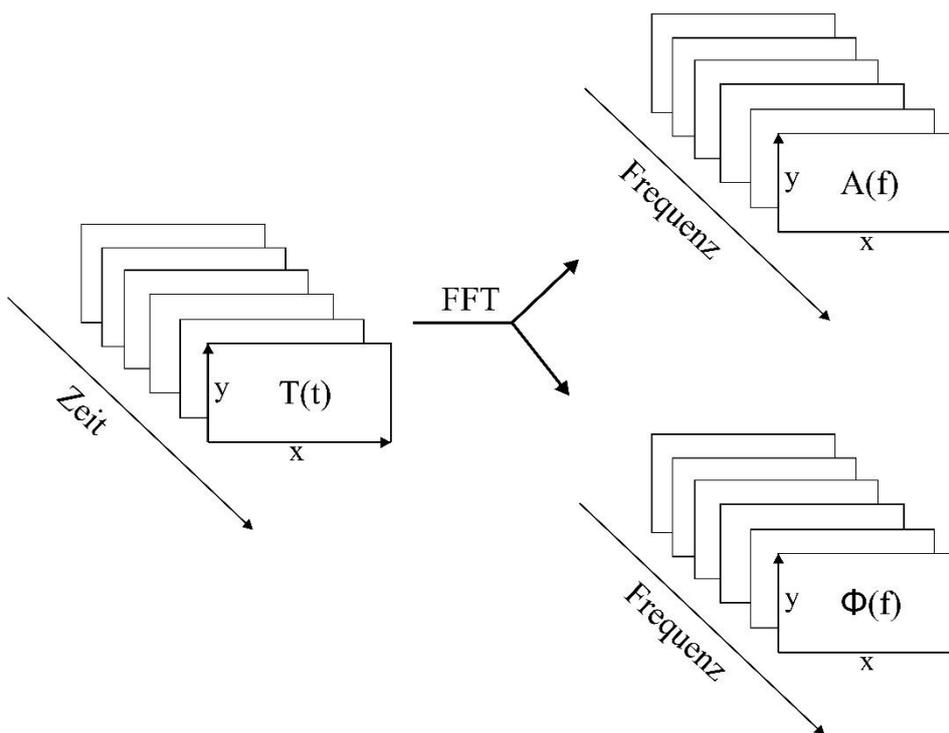


Abb. 9: Prinzip der FFT in der Puls-Phasen-Thermografie (nach [51])

Der in Gleichung (17) erhaltene Phasenwert Φ gibt die Zeit der thermischen Wellen bis zum Erreichen des Fehlers an und lässt sich durch ein Phasenbild grafisch abbilden. Im Gegensatz zu den Abkühlbildern sind auf den Phasenbildern aufgrund der FFT keine

Störeinflüsse, wie beispielsweise eine ungleichmäßige Erwärmung, Reflexionen und Inhomogenitäten der Oberfläche, mehr zu erkennen. Die erzeugten Phasenbilder zeigen die interne Struktur des Prüfkörpers in bestimmten Tiefenbereichen in Abhängigkeit der Frequenz (Bandpassfilter).

Amplitudenbilder hingegen, die durch Gleichung (18) errechnet werden, lösen die aufsummierte interne Struktur eines Prüfkörpers von hohen zu niedrigen Frequenzen auf. Dies erfolgt bis zu einer maximalen Tiefe, die abhängig vom Frequenzspektrum des Anregungspulses ist (Tiefpassfilter). Im Gegensatz zu den Phasenbildern sind hier Störeinflüsse, wie Oberflächeninhomogenitäten, im Bild zu erkennen [53].

Die Puls-Phasen-Thermografie ermöglicht also die Verarbeitung der in der Pulsthermografie erhaltenen Bildsequenzen zu einem einzigen Bild, was zu einer verbesserten Nachweisempfindlichkeit sowie höheren Nachweistiefe im Vergleich zur einfachen Bildauswertung führt [52].

3.1.2.4 Lock-In-Thermografie (LT)

Um eine kurzzeitige, hohe thermische Belastung der Oberfläche des Prüfobjektes wie bei der Pulsthermografie zu vermeiden, wird die Lock-In-Thermografie angewandt. Im Gegensatz zur Pulsthermografie wird hier nicht der Abkühlprozess ausgewertet, sondern ein definierter Aufheizvorgang. Bei diesem wird das Prüfobjekt periodisch mittels optischer Verfahren (z.B. Blitzlicht, Halogenstrahler, IR-Arrays oder Laser), Ultraschall oder Induktion (z.B. durch Wirbelstromspulen) angeregt.

Im Falle der Prüfung der CFK-Bauteile in dieser Arbeit wird durch eine mit einer Frequenz von 174 kHz angeregte Wirbelstromspule eine Wärmewelle ausgelöst, die homogen durch das Bauteil läuft. Diese Wärmewelle entsteht durch die Erwärmung des CFK, die einerseits durch die dielektrischen Verluste der Matrix (kapazitiv) und andererseits durch den Widerstand der Fasern (resistiv) ausgelöst wird [54]. Gleichzeitig nimmt eine IR-Kamera die an der Oberfläche des Prüfobjekts austretende Strahlung während des Heizvorgangs auf. Durch Defekte im Prüfobjekt wird die eindringende Wärmewelle reflektiert. Diese reflektierte Welle weist abweichende Phasen- und Amplitudenbilder zur ursprünglich induzierten Welle auf. Durch den Vergleich der beiden unterschiedlichen Wellen können nun Informationen zu den Defekten gewonnen werden.

Genauere Informationen über Defekte im Prüfobjekt können durch die thermische Diffusionslänge, die in Gleichung (19) beschrieben ist, erzielt werden.

$$\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}} \quad (19)$$

mit μ : thermische Diffusionslänge [m], α : thermische Diffusivität [$\frac{m^2}{s}$],
f: Modulationsfrequenz [$\frac{1}{s}$]

Mithilfe der thermischen Diffusionslänge kann nun die Detektionstiefe bestimmt werden. Laut Liu [55] entspricht die Detektionstiefe der Gleichung (20).

$$z = C_1 \cdot \mu \quad (20)$$

Liu [55] nimmt dabei für $C_1 = 1,8$ an, wohingegen laut Busse [56] C_1 im Bereich zwischen 1,5 und 2 liegen darf. Durch eine Variation der Modulationsfrequenz, die im Bereich von 0,01 Hz und 1 Hz liegen kann, können nun Informationen aus verschiedenen Tiefen ermittelt werden.

Aufgrund einer geringen Messzeit und einer hohen Nachweisempfindlichkeit [57] wird diese berührungslose Anregungsmethode besonders häufig in der optischen Lock-In-Thermografie (OLT) sowie in der in dieser Arbeit verwendeten induktiv angeregten Lock-In-Thermografie (ILT) (siehe Abb. 10) angewandt. Eine weitere, jedoch nicht kontaktlose Anwendung kommt bei der ultraschallangeregten Lock-In-Thermografie (ULT) zum Einsatz. Durch die Auswertung des zeitlichen Temperaturverlaufs der aufgenommenen Thermografiesequenzen mittels Fourier Transformation können Phasenbild und Amplitudenbild bestimmt werden (siehe Kapitel 3.1.2.3).

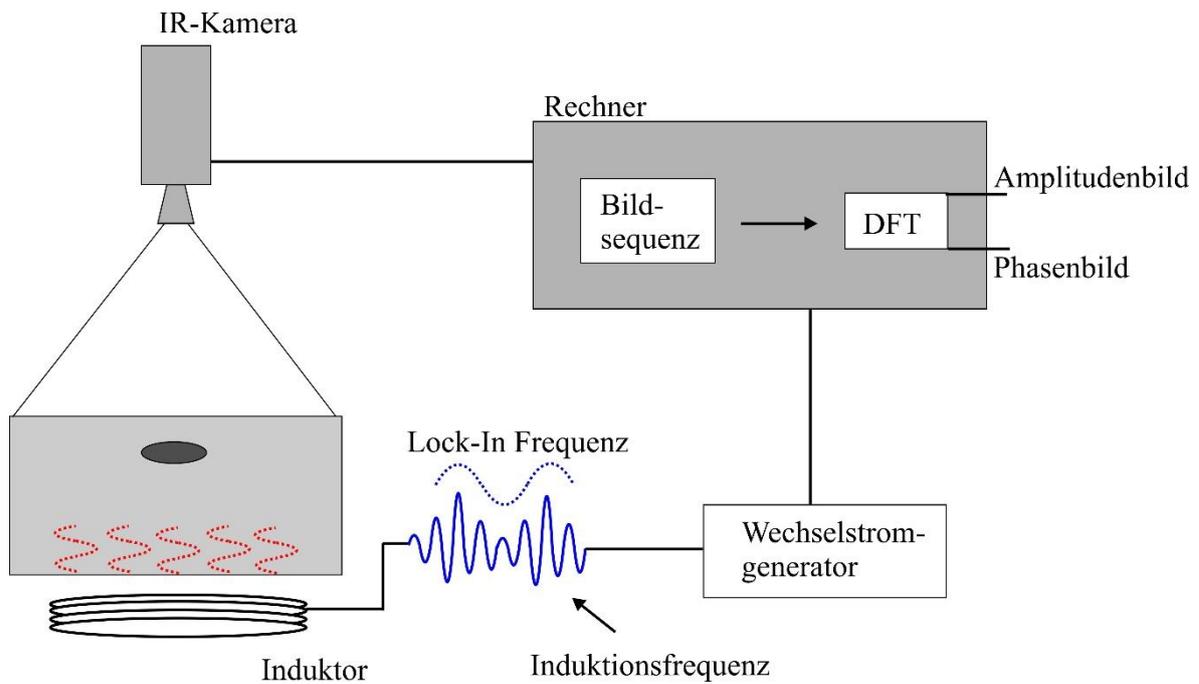


Abb. 10: Prinzip der induktiv angeregten Lock-In-Thermografie (angelehnt an [58])

3.1.3 Passive Thermografie

Wie bereits zu Beginn des Kapitels 3.1 beschrieben, wird die passive Thermografie der Vollständigkeit wegen erwähnt, kommt in dieser Arbeit jedoch nicht zum Einsatz.

Anders als bei der aktiven Thermografie wird bei der passiven Thermografie keine externe Anregungsmethode benötigt. Da Deformationsprozesse ebenso wie Reibung dissipative Vorgänge innerhalb des Materials verursachen, kann diese Methode als In situ-Schadensmonitoring verwendet werden. Temperaturunterschiede, die durch innere Wärmedissipation auftreten, können als eine Überlagerung von thermoelastischen Temperaturschwankungen ΔT_{el} , Wärmedissipation ΔT_{diss} und Wärmeaustausch mit der Umgebung ΔT_{loss} beschrieben werden (Gleichung (21) [59]).

$$\begin{aligned} \Delta T(t) &= T(t) - T_0 \\ &= \Delta T_{el}(t) + \Delta T_{diss}(t) + \Delta T_{loss}(t) \end{aligned} \quad (21)$$

mit ΔT : absolute Temperaturänderung, T_0 : absolute Referenztemperatur zum Zeitpunkt $t=0$

Allgemein genutzte Methoden der passiven Thermografie sind die MIDA (mechanisch induzierte Wärmedissipationsanalyse) oder die TSA (thermoelastische Spannungsanalyse), die es ermöglichen, Schwachstellen oder Defekte durch lokale Temperaturhotspots während der mechanischen Prüfung zu identifizieren.

3.2 Ultraschall

Neben der Prüfmethode der Thermografie wird in dieser Dissertation auch die Ultraschallprüfung genutzt. Dabei wird die Ausbreitung von mechanischen Schwingungen in Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen mittels Ultraschall untersucht. Diese Ausbreitung wird als Welle bezeichnet, welche nur Energie und keine Masse transportiert [60]. In unendlich ausgedehnten isotropen Festkörpern breiten sich Volumenwellen aus, die in Longitudinal- und Transversalwellen unterschieden werden können. Bei einer Longitudinalwelle stimmt die Schwingungsrichtung der Teilchen mit der Ausbreitungsrichtung der Welle überein (siehe Abb. 11). Aus diesem Grund können sich Longitudinalwellen nicht nur in festen, sondern auch in flüssigen und gasförmigen Stoffen ausbreiten [60]. Die Wellengleichung einer Longitudinalwelle lautet wie folgt:

$$\frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2} = \frac{\rho}{D} \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial t^2} \quad (22)$$

Löst man Gleichung (22) gemäß des D'Alembertschen Ansatzes, so erhält man die Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwelle:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (23)$$

mit c_L : Schallgeschwindigkeit Longitudinalwelle, E: E-Modul, ρ : Dichte

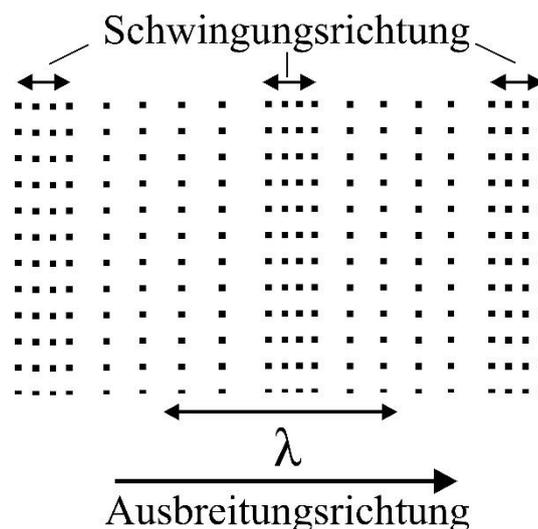


Abb. 11: Skizze einer Longitudinalwelle (angelehnt an [61])

Im Gegensatz zu Longitudinalwellen schwingen bei einer Transversalwelle die Teilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung (siehe Abb. 12), weshalb sie sich nur in Festkörpern ausbreiten können. Eine Ausbreitung in gasförmigen oder flüssigen Stoffen ist nicht möglich, da deren Schubmodul gleich null ist. Die Wellengleichung der Transversalwelle lautet:

$$\frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial x^2} = \frac{\rho}{D} \frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial t^2} \quad (24)$$

Analog zur Longitudinalwelle kann die Schallgeschwindigkeit der Transversalwelle bestimmt werden.

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (25)$$

mit c_T : Schallgeschwindigkeit Transversalwelle, G : Schubmodul, ρ : Dichte

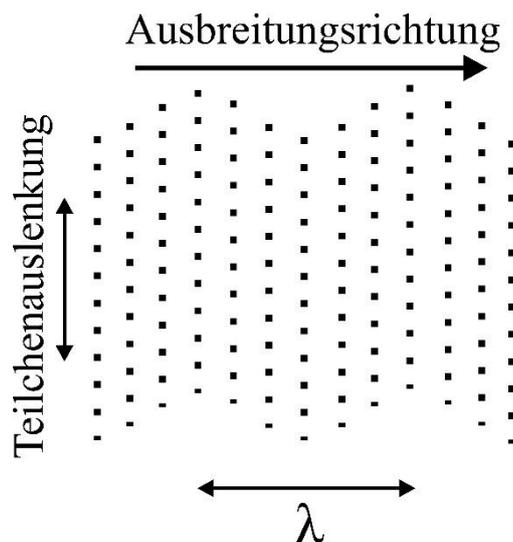


Abb. 12: Skizze einer Transversalwelle (angelehnt an [62])

Durch Umrechnen der Materialkonstanten D und G mithilfe des Hookeschen Gesetzes kann die Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit des E-Moduls und der Poissonzahl angegeben werden [60].

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (26)$$

$$c_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\mu)}} \quad (27)$$

mit c_T/c_L : Schallgeschwindigkeit der Transversal- bzw. Longitudinalwelle, E: E-Modul, ρ : Dichte, μ : Poissonzahl

Bei der Prüfung mit Ultraschallwellen treten physikalische Eigenschaften wie Reflexion und Brechung ebenso auf wie Absorption und Streuung.

Betrachtet man eine Ultraschallwelle, die senkrecht auf eine Grenzfläche zweier Medien mit unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten trifft, so wird ein Teil dieser Welle reflektiert, während der andere Teil transmittiert wird (siehe Abb. 13). Wie groß der Anteil der reflektierten Welle ist, wird über den Reflexionsfaktor und der Anteil der transmittierten Welle über den Durchlässigkeitsfaktor bestimmt. Beide Faktoren hängen vom Schallwiderstand Z beider Materialien ab [62].

$$Z = \rho \cdot c \quad (28)$$

Durch den Wert des Schallwellenwiderstands können nun der Reflexionsfaktor R und der Durchlässigkeitsfaktor D bestimmt werden. Dabei repräsentieren Z_1 und Z_2 die verschiedenen Schallwellenwiderstände der unterschiedlichen Medien.

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (29)$$

$$D = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (30)$$

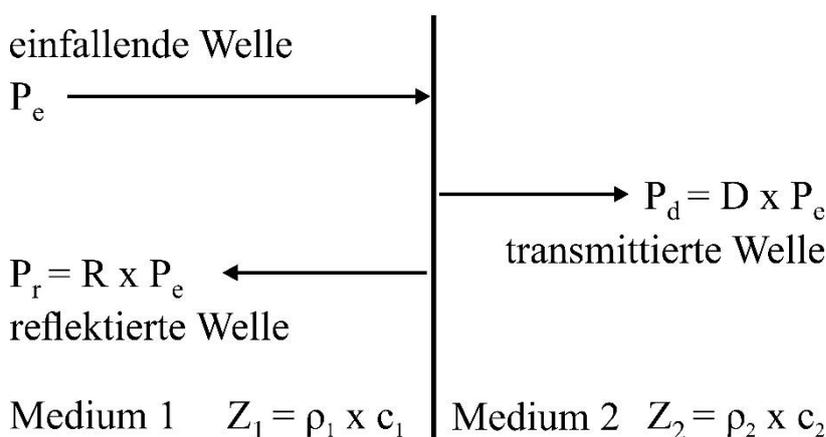


Abb. 13: Reflexion einer Ultraschallwelle an einer Grenzfläche (nach [62])

Der Idealfall, dass Schallwellen unter einem Winkel von 90° auf eine Grenzfläche stoßen, tritt im Allgemeinen nicht auf. Vielmehr treffen Schallwellen unter bestimmten Winkeln auf Hindernisse. Dabei werden sie entweder reflektiert oder gebrochen (siehe Abb. 14). Für den Fall, dass sie reflektiert werden, kommt das Reflexionsgesetz (Gleichung (31)) zur Anwendung, wenn sie gebrochen werden, wird das Snelliussche Brechungsgesetz (Gleichung (32)) verwendet.

$$\alpha = \beta \quad (31)$$

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = \frac{c_1}{c_2} \quad (32)$$

mit c_1 : Ausbreitungsgeschwindigkeit in Medium 1, c_2 : Ausbreitungsgeschwindigkeit in Medium 2

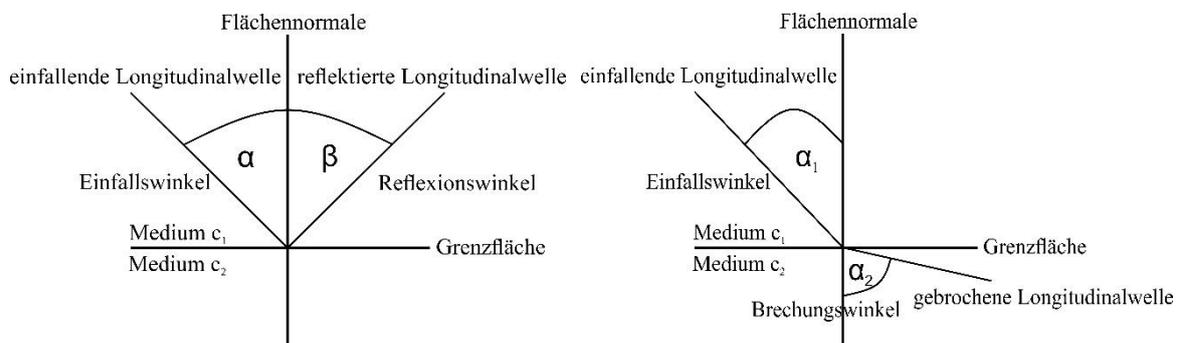


Abb. 14: Reflexion und Brechung einer Ultraschallwelle an einer Grenzfläche (nach [62])

Die Absorption von Wellen erfolgt in Abhängigkeit von der Frequenz und der Wellenart und ist bei Temperaturen $<600^\circ\text{C}$ vernachlässigbar. In flüssigen und gasförmigen Medien tritt nur Absorption auf [62]. Das Phänomen der Streuung tritt an Defekten, Korngrenzen in Metallen oder an Fasern in Faserverbundwerkstoffen auf.

3.2.1 Wellenarten

Wie bereits in Kapitel 3.2 beschrieben, können Wellen in longitudinale und transversale Wellen unterschieden werden. Dabei können sich Longitudinalwellen in allen Körpern ausbreiten, Transversalwellen jedoch nur in Festkörpern. Beide Wellenarten verlaufen im Volumen eines Prüfkörpers. Daneben können zudem auch Oberflächenwellen auftreten. Oberflächenwellen entstehen an freien Grenzflächen, wie z.B. beim Übergang eines Metalls zur Luft und verlaufen in der Regel langsamer als Volumenwellen [62].

Als Oberflächenwellen sind einerseits die Rayleighwellen und andererseits die Lovewellen zu nennen. Rayleighwellen sind Wellen, die aus einer Wechselwirkung zwischen Longitudinal- und Transversalwellen entstehen. Dabei oszilliert die Welle senkrecht zur Ausbreitungsrichtung an der Oberfläche und wird deshalb auch als SV-Welle (shear vertical (=vertikal polarisiert)) bezeichnet. Im Gegensatz dazu entstehen Lovewellen durch Überlagerung von parallel zur Oberfläche oszillierenden SH-Wellen (shear horizontal (=horizontal polarisiert)) (siehe Abb. 15).

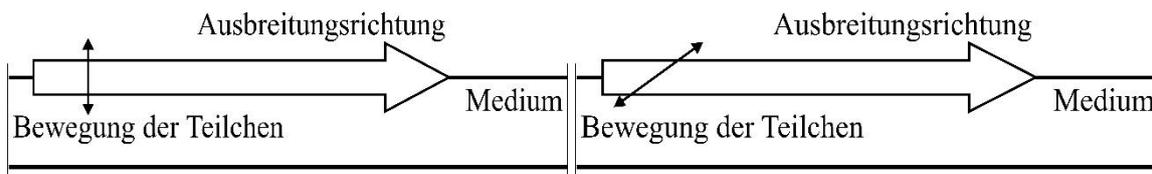


Abb. 15: Skizze einer Rayleighwelle und einer Lovewelle (nach [62])

Ein Spezialfall der Oberflächenwellen sind Plattenwellen. Plattenwellen entstehen, wenn die Dicke des Prüfkörpers kleiner oder gleich der Wellenlänge der Rayleighwellen ist ($d \leq \lambda$). In diesem Fall überlagern sich die Wellen, die am oberen und unteren Ende des Prüfkörpers verlaufen. Diese überlagerte Welle bezeichnet man als Lambwelle.

Lambwellen können wiederum in eine symmetrische und eine asymmetrische Mode unterschieden werden. Bei einer symmetrischen Mode fallen zwei Wellenberge zusammen, bei der asymmetrischen Mode ein Wellenberg und ein Wellental (siehe Abb. 16).

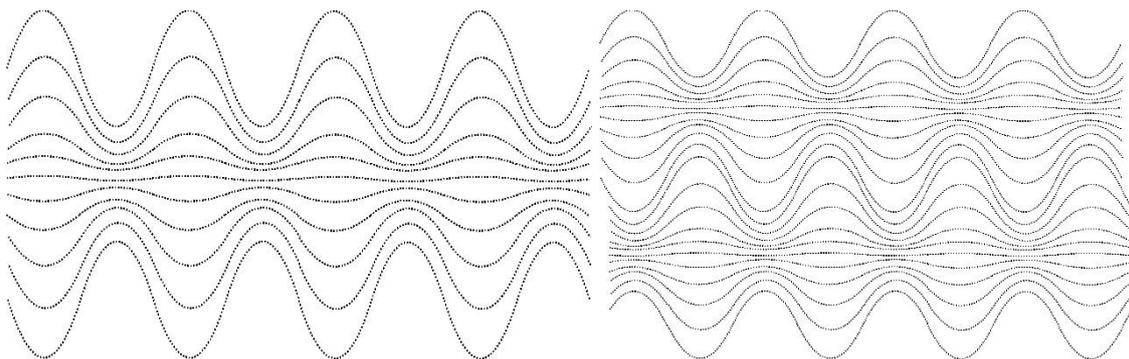


Abb. 16: Skizze der symmetrischen und asymmetrischen Mode der Lambwelle (nach [61])

Verlaufen Wellen an Oberflächen oder Grenzflächen, so spricht man von geführten Wellen. Zu den geführten Wellen gehören neben den bereits beschriebenen Lamb-, Rayleigh- und Lovewellen, auch die Stoneley- oder Kriechwellen. Stoneleywellen

verlaufen an Grenzflächen, wohingegen Kriechwellen als abgespaltener Anteil einer auf eine Grenzfläche eingestrahlten Longitudinalwelle entlang einer Oberfläche laufen (siehe Abb. 17).

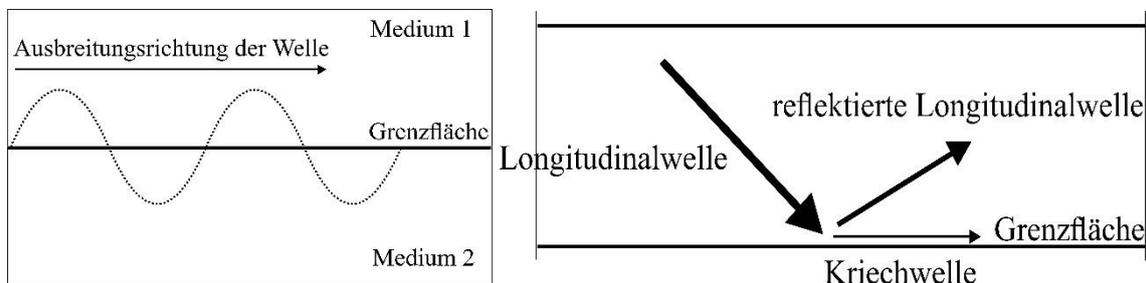
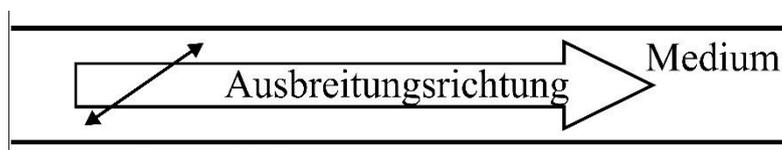


Abb. 17: Skizze einer Stoneley- und einer Kriechwelle

Die in dieser Dissertation verwendeten SH-Wellen sind ebenfalls den geführten Wellen zuzuordnen. Ähnlich den Lovewellen oszillieren hierbei die Teilchen parallel zur Oberfläche. Der Unterschied besteht darin, dass die Teilchen nicht nur an der Oberfläche oszillieren, sondern in der gesamten Tiefe (siehe Abb. 18). Trotz der Einordnung der SH-Wellen zu geführten Wellen und demnach zu Oberflächenwellen, können sie auf kurzen Distanzen als Volumenwellen behandelt werden [63]. Dadurch ist die Geschwindigkeit der SH-Welle die gleiche wie die einer Volumenwelle.



Bewegung der Teilchen

Abb. 18: Skizze einer SH-Welle

Geführte SH-Wellen, die durch EMUS-Prüfköpfe erzeugt werden, sind in Kapitel 3.2.2 genauer beschrieben, da sie in dieser Arbeit eingesetzt werden.

3.2.2 Ultraschallerzeugung und -darstellung

Bei der Erzeugung der zuvor genannten Wellenarten kommen verschiedene Anregungsarten zum Einsatz. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

Anregung durch piezoelektrische Prüfköpfe

Die bekannteste und am häufigsten verwendete Technik ist die Erzeugung von Wellen durch piezoelektrische Prüfköpfe. Dabei wird der piezoelektrische Effekt genutzt. Dieser tritt auf, wenn an der Oberfläche sogenannter Piezokristalle durch mechanische Beanspruchungen, wie Zug oder Druck, elektrische Ladungen und somit eine messbare elektrische Spannung entsteht. Zu den Piezokristallen gehören beispielsweise Bariumtitanat (BTO) oder Blei-Zirkonat-Titanat (PZT), die in polykristalliner Form als Keramiken verwendet werden.

Legt man eine elektrische Spannung an einen Piezokristall an, verformt sich dieser. Je nach Polarität der Spannung dehnt sich der Kristall entweder aus oder zieht sich zusammen (siehe Abb. 19). Dieser Effekt wird als inverser piezoelektrischer Effekt bezeichnet.

Aufgrund des piezoelektrischen und des inversen piezoelektrischen Effektes kann ein Piezokristall als Empfänger oder Sender für Ultraschallwellen genutzt werden.

Um die im Piezoprüfkopf erzeugten Ultraschallwellen in das zu prüfende Objekt einzuleiten, muss eine geringe, fast schallundurchlässige Luftschicht zwischen Prüfkopf und Prüfkörper überbrückt werden. Dies geschieht mithilfe von Koppelmitteln. Zur Einleitung von Longitudinal- oder SV-Wellen genügt ein flüssiges Koppelmittel wie Wasser. Werden jedoch SH-Wellen verwendet, muss das Koppelmittel deutlich zähflüssiger sein, um die Scherkräfte in den Prüfkörper übertragen zu können. Dazu kann beispielsweise Honig verwendet werden. Durch den notwendigen Einsatz von Koppelmitteln werden die Anwendungsgebiete der Piezoprüfköpfe reduziert.

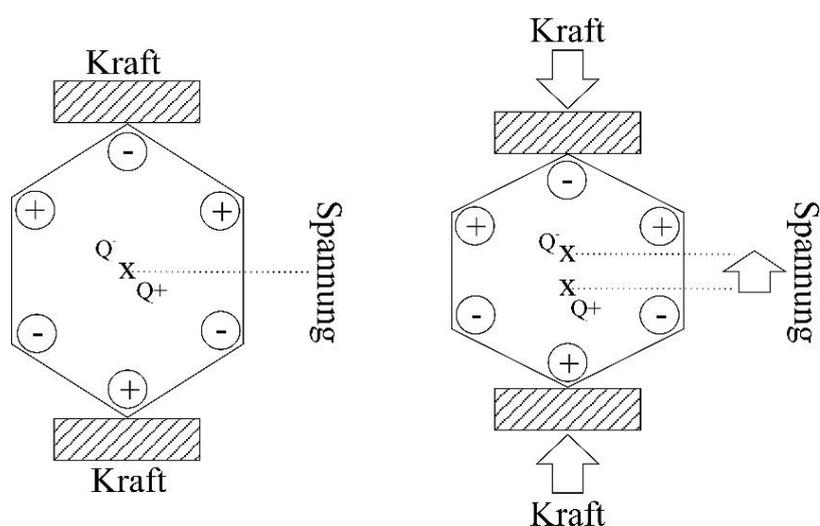


Abb. 19: Skizze zur Veranschaulichung des piezoelektrischen Effekts

Anregung durch Laser (LASUS)

Neben piezoelektrischen Prüfköpfen können Ultraschallwellen auch kontaktlos durch Laser erzeugt werden. Dabei wird ein ultrakurzer Laserpuls erzeugt, der an der Oberfläche des Prüfobjektes absorbiert wird. Infolgedessen tritt eine geringe lokale Erwärmung an der Oberfläche des Prüfkörpers auf, die zu einer thermoelastischen Expansion und Kontraktion parallel zur Oberfläche führt. Durch diese angeregten mechanischen Schwingungen entstehen im Prüfkörper Ultraschallwellen, die sich als Transversal- und Oberflächenwellen ausbreiten.

Anregung durch EMUS-Prüfköpfe

Um geführte SH-Wellen anzuregen, werden in der vorliegenden Arbeit EMUS-Prüfköpfe verwendet. Diese Prüfköpfe sind ähnlich aufgebaut wie Wirbelstromspulen und die induzierten Wirbelströme wirken direkt auf das Atom-Gitter des Prüfkörpers. Im Gegensatz zur Piezoelektrizität, bei der die Ultraschallwellen im Prüfkopf und somit außerhalb des Prüfkörpers erzeugt werden, werden die Ultraschallwellen hier also im Prüfkörper selbst erzeugt [64]. Die Anregung mittels EMUS-Prüfköpfen erfolgt somit kontaktlos und koppelmittelfrei. Je nach Material des Prüfkörpers, der stets elektrisch leitend sein muss, erfolgt die Anregung entweder durch Magnetostriktion oder durch die Lorentzkraft. Ferromagnetische Materialien werden durch Magnetostriktion angeregt. Dabei nutzt man den Umstand, dass neben den induzierten Wirbelströmen ein magnetisches Feld entsteht. Dieses magnetische Feld zieht dynamische Kräfte F_{ms} mit sich, die den Prüfkörper mechanisch verformen. Die auftretende Verformung erfolgt parallel zum Magnetfeld (siehe Abb. 20).

Ist der Prüfkörper wie in der vorliegenden Arbeit nicht ferromagnetisch (hier Aluminium), erfolgt die Ultraschallanregung durch die Lorentzkraft. Diese entsteht durch die Wechselwirkung zwischen einem durch eine Wirbelstromspule induzierten Strom I und der magnetischen Flussdichte B_0 . Dabei wirkt die resultierende Kraft F_L senkrecht zur magnetischen Flussdichte (siehe Abb. 20).

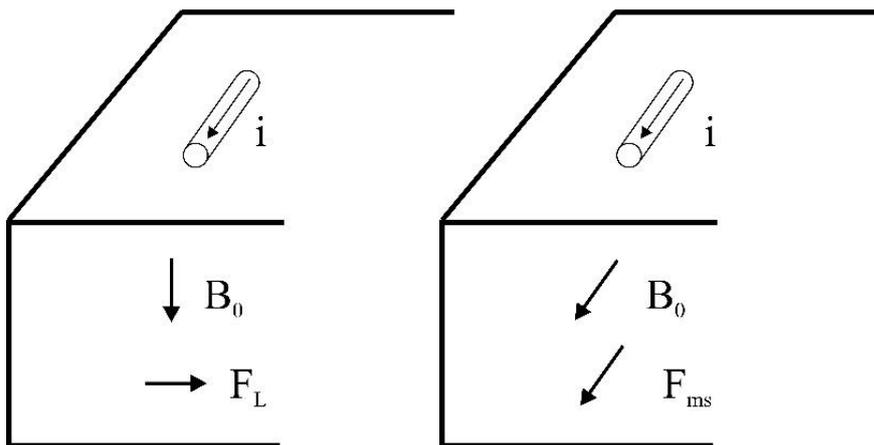


Abb. 20: Prinzip der Lorentzkraft und Magnetostriktion (angelehnt an [64])

Die resultierende Lorentzkraft F_L kann durch das Vektorprodukt in Gleichung (33) ausgedrückt werden:

$$F_L = I \times B_0 \quad (33)$$

Durch die Lorentzkraft werden die Gitteratome des Prüfkörpers parallel zur Oberfläche und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung ausgelenkt. Liegt die Auslenkung in derselben Größenordnung wie die Ultraschallwellenlänge, dann erfolgt die Auslenkung der Gitteratome in der gesamten Dicke des Prüfkörpers.

Da die erzeugten Ultraschallwellen sehr langreichweitig sind (siehe Abb. 21), können auch schwer zugängliche oder nicht direkt erreichbare Stellen untersucht werden. Insgesamt läuft die erzeugte Ultraschallwelle solange durch den Prüfkörper, bis sie an scharfen Kanten (z.B. am Ende des Prüfkörpers) reflektiert wird.



Abb. 21: Vergleich zwischen konventionellem Ultraschall und geführten Wellen

Bei der Ultraschallprüfung können die geführten SH-Wellen je nach Dicke des Prüfkörpers und Frequenz des EMUS-Prüfkopfes verschiedene Moden ausbilden. Die Grundmode SH_0 eignet sich dabei am besten für Messungen, da sie sich dispersionsfrei ausbreiten kann [37]. Eine dispersionslose Wellenausbreitung bedeutet, dass keine Änderung der

Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Frequenz sowie keine übermäßige Dämpfung stattfindet. Außerdem tritt auch keine Modulation der Wellenzahl auf [65]. Mithilfe eines Dispersionsdiagramms können auftretende Moden in einem Versuchsaufbau bestimmt werden. Abb. 22 zeigt die auftretenden Moden für die Untersuchungen in dieser Arbeit. Da die Prüfköpfe in dieser Arbeit mit 800 kHz betrieben werden, entsteht neben der SH_0 -Mode auch die asymmetrische Mode AS_1 . Symmetrische SH-Wellen breiten sich mit einer Geschwindigkeit von 3150 ms^{-1} in Aluminium aus, asymmetrische SH-Wellen hingegen mit einer geringeren Geschwindigkeit von 2740 ms^{-1} .

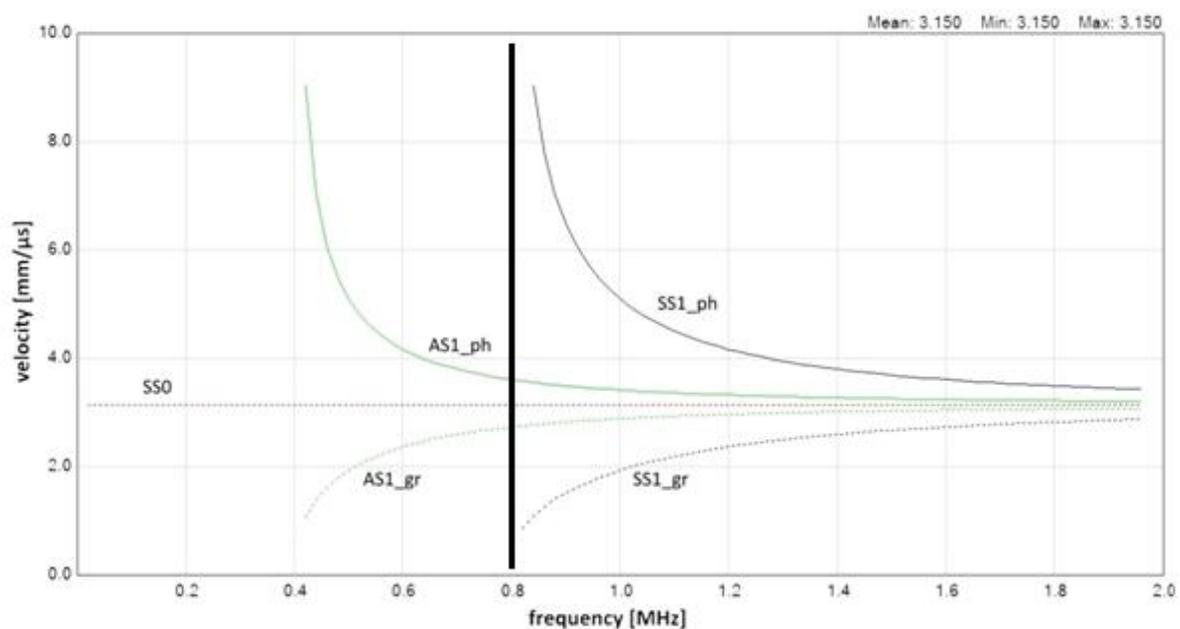


Abb. 22: Dispersionsdiagramm für einen 800 kHz Prüfkopf und 4 mm Probendicke

Darstellung der Ultraschallmessungen

Allgemein kann das Ergebnis von Ultraschallmessungen als HF-Bild, A-Bild, B-Bild oder C-Bild dargestellt werden. Beim HF-Bild werden die Spannungssignale, die direkt vom Messgerät ausgegeben werden, genutzt und über die Zeit aufgetragen. Durch diese Vorgehensweise kann man die Laufzeit und die Amplitudenverhältnisse bestimmen. Bei bekannter Schallgeschwindigkeit kann darüber hinaus die Wanddicke oder die Fehlertiefe ermittelt werden.

Das A-Bild stellt eine Erweiterung des HF-Bildes dar. Hier werden die Beträge der Signalamplituden des HF-Bildes über die Zeit aufgetragen. Dadurch können die Dämpfungen des Ultraschallsignals besser dargestellt werden. Ein Nachteil ist hierbei

jedoch, dass durch dieses Vorgehen Phasensprünge verloren gehen, was zu einer Fehlinterpretation der Ergebnisse führen kann.

Beim B-Bild, welches auch als Linienscan bezeichnet wird, wird das Querschnittbild eines Prüfkörpers dargestellt. Das B-Bild wird dabei aus den parallel angeordneten A-Bildern zusammengesetzt. Den Amplituden werden zusätzlich verschiedene Farb- bzw. Grauwerte zugewiesen, sodass sich ein zweidimensionales Schnittbild des Prüfkörpers ergibt.

Genau wie das B-Bild ist auch das C-Bild ein zweidimensionales Ultraschallauswerteverfahren. Bei diesem Verfahren, das auch als Flächenscan bezeichnet wird, wird der Summe der Amplituden aus den A-Bildern ein Farb- bzw. Grauwert zugeordnet. Jedes A-Bild erhält folglich einen Bildpunkt, die zusammengesetzt und die Farbwerte aufeinander abgestimmt werden.

Darüber hinaus lassen sich auch dreidimensionale Bilder erstellen. Diese sogenannten P-Bilder stellen Projektionen einzelner B- bzw. C-Bilder dar. Eine weitere Möglichkeit ein Volumenbild zu erhalten, ist die Erweiterung eines B-Bildes um eine zusätzliche Koordinate.

3.3 Theorie der Datenfusion

Um die Nachteile einzelner zerstörungsfreier Prüfverfahren zu eliminieren (wie z.B. die limitierte Tiefenauflösung oder lange Prüfzeiten) werden die Ergebnisse von mehreren Verfahren fusioniert. Da einzelne Sensoren nicht in der Lage sind, inhärente Unsicherheiten bei der Interpretation der Sensorsignale zu beheben, kann durch die Fusion mehrerer Sensoren die Wahrnehmungsfähigkeiten erweitert und die Glaubwürdigkeit der Sensoraussage erhöht werden [66].

Grundsätzlich können Fusionsverfahren in drei verschiedene Integrationsverfahren eingeteilt werden (siehe Abb. 23). Im Falle der konkurrierenden Integration werden Daten von Sensoren, die den gleichen Sichtbereich erfassen, kombiniert. Das Ziel dabei ist es, die Genauigkeit des Gesamtsystems, z.B. durch eine Mittelung der Daten, zu erhöhen. Bei einer komplementären Integration werden Daten von unabhängigen Sensoren, die unterschiedliche Sichtbereiche erfassen oder zu unterschiedlichen Zeiten messen, fusioniert. Dies geschieht, um Informationslücken zu vervollständigen. Eine Mittelung der Sensordaten würde sich in diesem Fall negativ auf die Messdaten auswirken. Liegt die

Nutzinformation so verteilt vor, dass alle Messdaten ausgewertet werden müssen, um auf die Messgröße schließen zu können, handelt es sich um eine kooperative Integration.

Sollten die Daten von verschiedenen Sensoren nicht verknüpft, sondern nur in einem gemeinsamen System verarbeitet werden, spricht man von einer unabhängigen Fusion.

Hinsichtlich der Verfahren, die in dieser Arbeit zum Einsatz kommen, können die mittels Blitz angeregten und die induktiven Thermografiebilder durch die konkurrierende Integration fusioniert und die Genauigkeit der Messergebnisse somit verbessert werden. Bei der Kombination der Ergebnisse aus Thermografie und EMUS-Messung handelt es sich um eine komplementäre Integration.

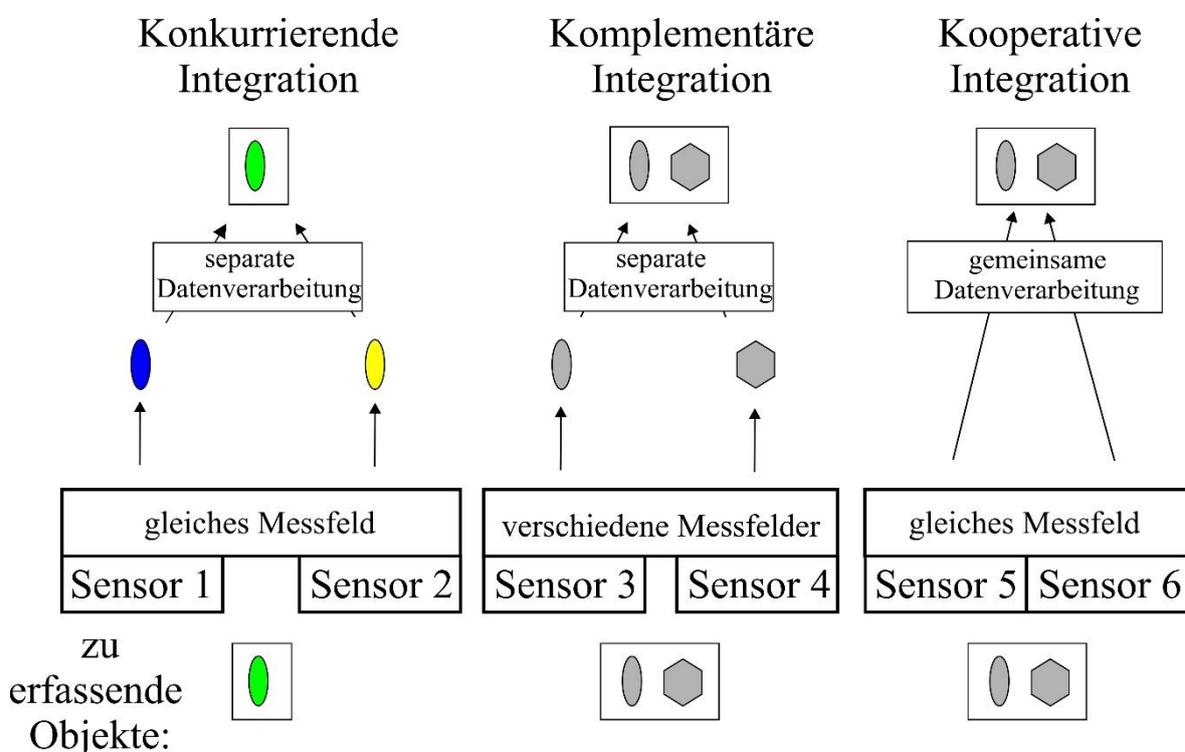


Abb. 23: Prinzipien der Datenfusion (angelehnt an [66])

3.3.1 Theorie der Datenfusion aus Blitzthermografie und induktiver Thermografie

Um eine Datenfusion der Ergebnisse aus induktiver Thermografie sowie Blitzthermografie durchführen zu können (siehe Abb. 24), werden zunächst die Rohdaten der beiden Prüfverfahren gesammelt und vorverarbeitet (z.B. durch Optimieren des Kontrastes oder der Anwendung einer „dead pixel correlation“ oder einer FFT). Erst dann erfolgt die eigentliche Fusion der gewonnenen Thermografiebilder, die nach ähnlichem Prinzip wie in

Gros et al. [44] pixelweise durchgeführt wird. Dabei werden die Thermografiebilder mittels eines einfachen mathematischen Algorithmus miteinander verrechnet (für weitere Informationen siehe Kapitel 8.1.1). Veranschaulichen lässt sich der Algorithmus durch folgende Gleichung:

$$C = |A - B| \Leftrightarrow c_{ij} = |(a_{ij} - b_{ij})_{i:1,\dots,n;j:1,\dots,m}| \quad (34)$$

mit C: fusioniertes Bild, A: Ausgangsbild A, B: Ausgangsbild B, i: Werte der Bildmatrixzeilen, j:Werte der Bildmatrixspalten

Das Ergebnis, das am Ende des Fusionsvorganges steht, kann wie folgt aussehen: 1) es werden zusätzliche Informationen gewonnen, 2) es erfolgt weder ein Gewinn noch ein Verlust von Informationen oder 3) es gehen Informationen verloren. Ziel der Fusion soll jedoch stets ein Zugewinn an Informationen sein.

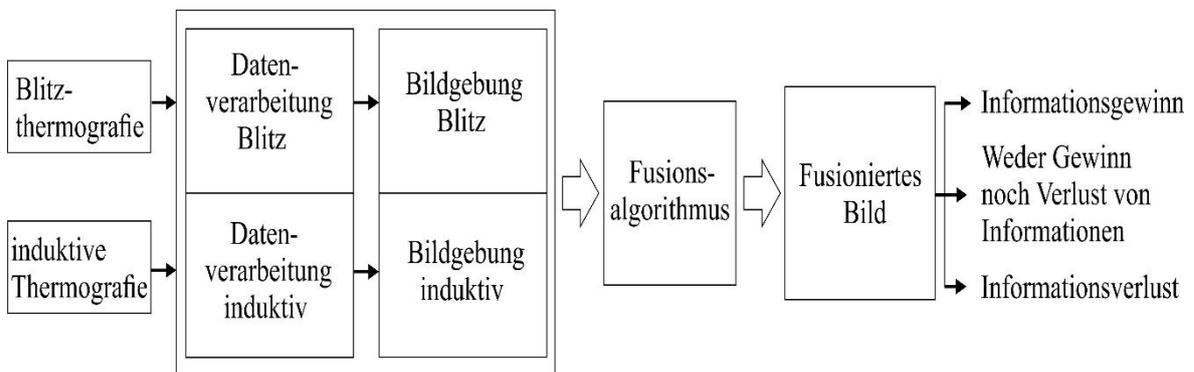


Abb. 24: Schema der Datenfusionsarchitektur (angelehnt an [44])

3.3.2 Theorie der Datenfusion aus EMUS und Thermografie

Neben der quantitativen Datenfusion aus induktiver Thermografie sowie Blitzthermografie besteht auch die Möglichkeit, die Ergebnisse der Blitzthermografie und der EMUS-Messungen qualitativ zu fusionieren.

Abb. 25 zeigt die Vorgehensweise bei der Charakterisierung einer Hybridprobe mittels EMUS und Thermografie. Da mittels EMUS keine Defekte im CFK detektiert werden können, kommt als Prüfaufgabe nur eine Überprüfung der Grenzfläche auf Defekte und Versagen in Betracht. Auch hier müssen in einem ersten Schritt die Rohdaten der EMUS-Messung und der Thermografie gesammelt und vorverarbeitet werden. Für die EMUS-Messung bedeutet dies, dass die Zeit der aufgenommenen Daten von Sekunden in Mikrosekunden umgerechnet wird, um eine bessere Darstellbarkeit zu erreichen. Die

Vorverarbeitung der Thermografiebilder hingegen erfolgt mittels einer Kontrastoptimierung, einer „dead pixel correlation“ oder einer FFT. Danach erfolgt zunächst die Definition der Bedingungen, bei der ein Defekt vorliegt und im Anschluss daran die Fusion der Ergebnisse mithilfe eines weiteren MATLAB-Algorithmus (siehe Kapitel 8.1.2). Dieser wertet beide Prüfverfahren zeitgleich aus. Werden bei beiden Prüfverfahren die festgelegten Defektbedingungen gleichzeitig nicht erfüllt, so gilt die Probe als „i.O.“ (in Ordnung) und die Mitteilung „Probe ist i.O.“ erscheint. Werden die Bedingungen von beiden Prüfverfahren erfüllt, so gilt die Probe als „n.i.O.“ (nicht in Ordnung) und die Mitteilung „Probe ist n.i.O.“ erscheint. Ein Spezialfall liegt vor, wenn jeweils ein Prüfverfahren „n.i.O.“ und das andere „i.O.“ ist. In diesem Fall erscheint die Mitteilung „Achtung! Weitere Überprüfung notwendig.“. Hierbei kann außerdem eine Beurteilung des Sensitivitätsgrades der Prüfverfahren erfolgen. Das Prüfverfahren, das zuerst die Mitteilung „Probe ist n.i.O.“ ausgibt, kann als das sensitivere Verfahren bezeichnet werden.

Die Fusion der beiden Prüfverfahren ermöglicht es also, eine qualitative Aussage über den Schädigungsstatus der untersuchten Probe treffen zu können und gleichzeitig beurteilen zu können, welches Prüfverfahren sensitiver ist.

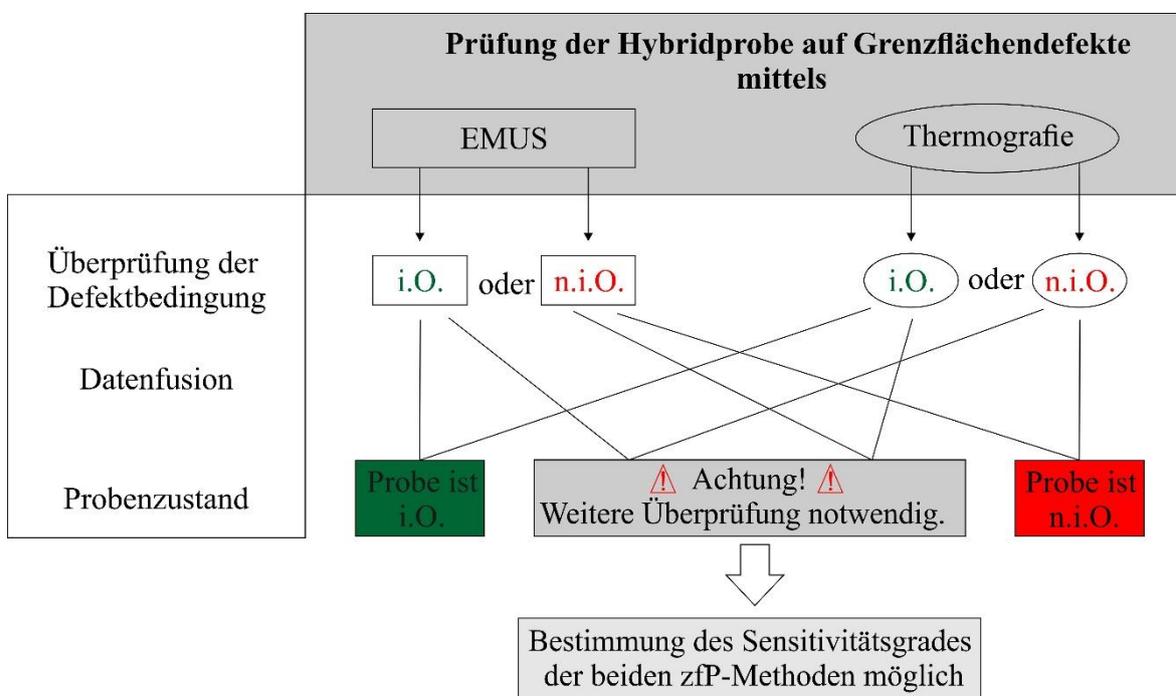


Abb. 25: Vorgehensweise bei der Datenfusion aus EMUS und Thermografie mittels eines MATLAB-Algorithmus am Beispiel einer Hybridprobe

3.4 Computertomografie (CT) /-laminografie (CL)

Um die Ergebnisse der Thermografie und des Ultraschalls zu validieren, kommen als weitere Prüfverfahren die Computertomografie bzw. die Computerlaminografie zum Einsatz.

Bei der Computertomografie wird ein Bauteil mit Röntgenstrahlen durchstrahlt, wobei die Röntgenstrahlen beim Durchgang geschwächt werden. Diese Schwächung tritt durch die Absorption der Röntgenstrahlen im Bauteil auf und ist abhängig vom Material des Bauteils. Wie auch bei der Röntgenprüfung wird der durchstrahlte Prüfkörper auf einem Detektor wiedergegeben, sodass man ein 2D-Röntgenbild erhält. Anders aber als bei der Röntgenprüfung wird der Prüfkörper um mindestens 180° (meistens sogar 360°) gedreht und dabei bei verschiedenen Winkelstellungen Einzelbilder aufgenommen (siehe Abb. 26). Diese werden dann durch ein mathematisches Verfahren zu einem Volumenbild rekonstruiert.

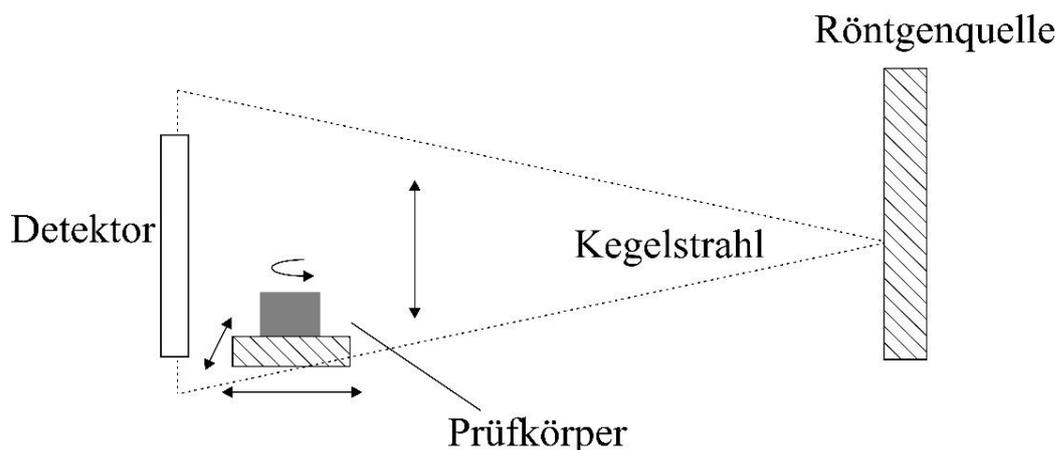


Abb. 26: Prinzip der Computertomografie

Da die Voraussetzung für eine gute Auflösung ein geringer Quelle-Objekt-Abstand ist, können bei flächigen Bauteilen Schwierigkeiten auftreten. Aus diesem Grund kann bei nicht ausreichender Qualität der CT-Bilder die Computerlaminografie zum Einsatz kommen.

Bei der Computerlaminografie werden ebenfalls Röntgenstrahlen verwendet, um einen Prüfkörper zu durchstrahlen. Im Gegensatz zur Computertomografie bleibt dabei jedoch der Prüfkörper in Ruhe und die Quelle und der Detektor bewegen sich um diesen. Bei der Prüfung wird durch geeignete Koordination von Quelle, Detektor und Probekörper eine

bestimmte Ebene im Prüfkörper, die sogenannte Fokusebene, auf die gleiche Stelle des Detektors und alle anderen Ebenen auf verschiedene Stellen projiziert. Dabei verwischen die übrigen Ebenen, weshalb man auch von Verwischungstomografie spricht. Durch geeignete Berechnung der projizierten Ebenen ist es dennoch möglich, auch dreidimensionale Prüfkörperprojektionen zu erhalten [67].

Prinzipiell kann die Computerlaminografie in lineare Abtastung und Kreisabtastung unterteilt werden. In Abb. 27 ist das Prinzip einer Variante der Kreisabtastung (Rotationslaminografie) zu sehen.

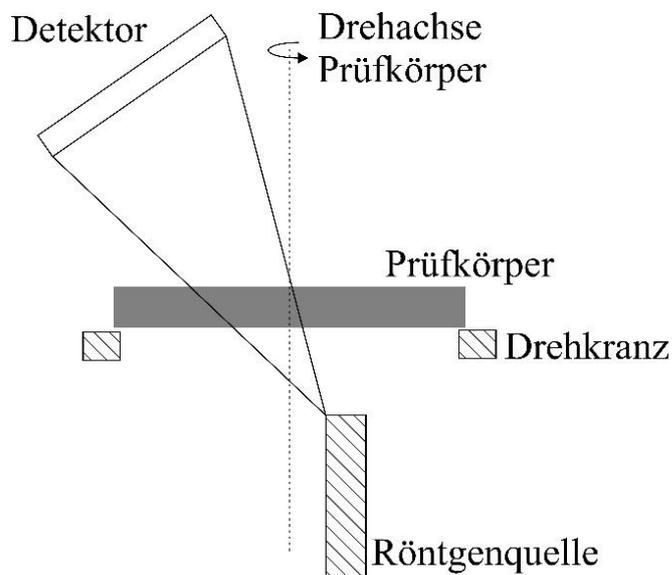


Abb. 27: Prinzip der Rotationslaminografie

3.5 Probengeometrie und Versuchsaufbau

Neben den verwendeten Prüfverfahren, die in den vorherigen Kapiteln beschrieben wurden, sind die Geometrie der Prüfkörper und der Versuchsaufbau essentiell. All diese Parameter beeinflussen sich gegenseitig, weshalb darauf geachtet werden muss, dass Schlüsse, die aus einfachen Probengeometrien gezogen werden können, nicht zwangsläufig auch für komplexere Geometrien gültig sind. Aus diesem Grund wird in den nachfolgenden Kapiteln die Entwicklung von einfachen zu komplexen Geometrien aufgezeigt und ein Zusammenhang zur endgültigen Geometrie hergestellt. Zuletzt wird der Versuchsaufbau skizziert und beschrieben.

3.5.1 CFK-Proben

Die in dieser Dissertation untersuchten Proben bestehen aus einem Verbund von Aluminium, einem Thermoplast und einem CFK. Der erste Schritt ist daher die Herstellung und Charakterisierung reiner CFK-Proben, um durch deren Eigenschaften Rückschlüsse auf den gesamten Hybridverbund ziehen zu können.

Die verwendeten CFK-Proben bestehen aus 30 % Kohlefaser sowie einem Epoxid als Matrix und werden nach DIN EN ISO 527-4:1997 Typ 3 angefertigt (siehe Abb. 28). Die Proben sind 120 mm lang, 20 mm breit, 1 mm dick und bestehen aus vier Lagen CFK. In diese Proben werden künstliche Defekte eingebracht, die in Kapitel 3.5.4 genauer beschrieben werden.

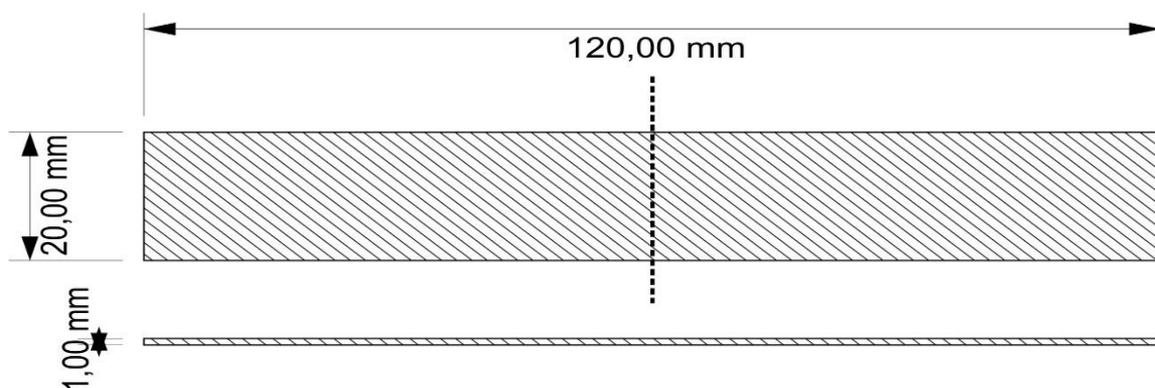


Abb. 28: Geometrie der CFK-Probe nach DIN EN ISO 527-4:1997 Typ 3 [68]

3.5.2 Geklebte Proben

Um sich der Geometrie des Hybrids anzunähern, werden in einem weiteren Schritt geklebte Proben hergestellt. Durch das Verbinden eines rechteckigen Aluminiumteils und einem 2 mm dicken CFK durch einen 2 K-Epoxidklebstoff wird ein Bauteil mit zwei Grenzflächen, wie sie auch in den später untersuchten Hybridproben vorkommen, erzeugt (siehe Abb. 29). Das Aluminiumteil ist 140 mm lang, 4 mm dick und 40 mm bzw. 60 mm breit. Die CFK-Platte besitzt Kohlenstofffasern mit einem Faser-Volumenanteil von 30% und eine Epoxidmatrix. In die geklebten Proben werden an beiden Grenzflächen künstliche Defekte eingebracht und diese mit aktiver Thermografie und EMUS untersucht.

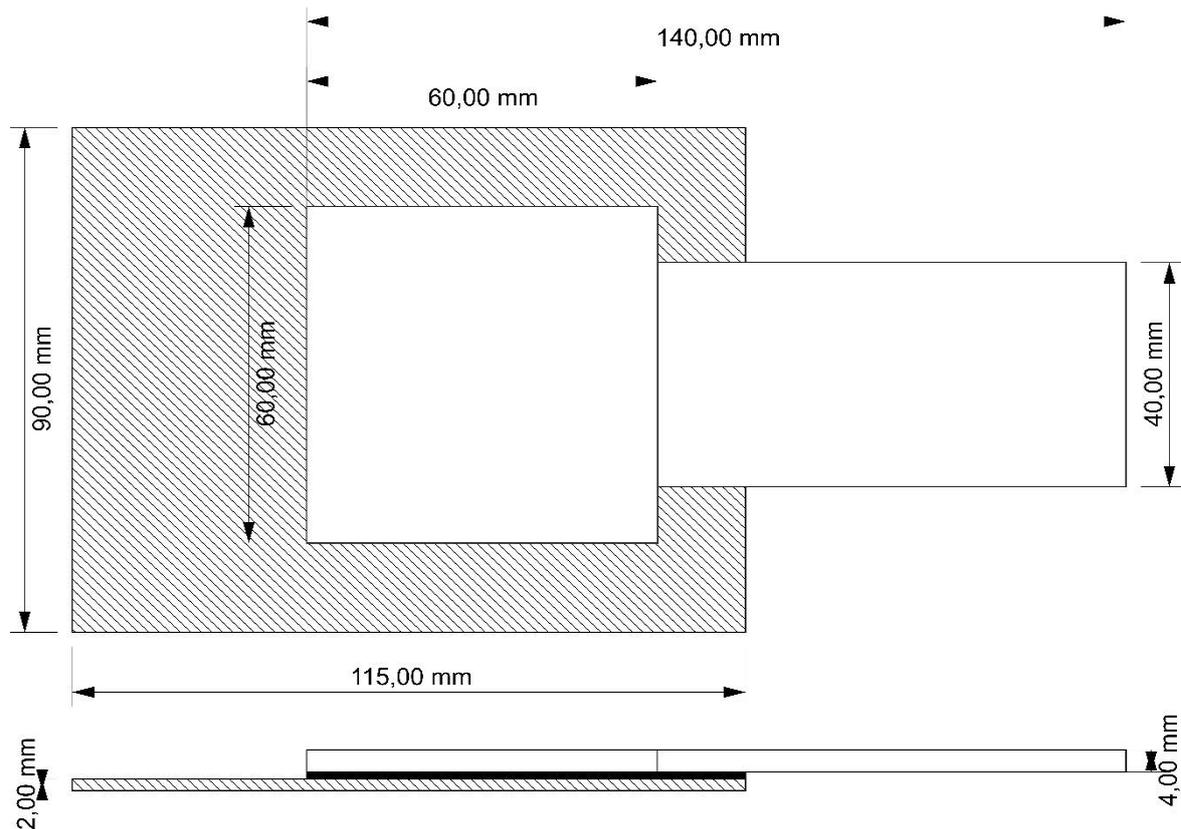


Abb. 29: Geometrie der geklebten Probe

3.5.3 Hybridproben

Wie bereits zuvor kurz beschrieben wurde, besteht das hier untersuchte Hybridbauteil aus Aluminium, einem Thermoplast und CFK. In Abb. 30 ist zu erkennen, dass das Aluminium 40 mm breit und 106 mm lang ist und eine komplexe Struktur besitzt. Um diese Aluminiumstruktur wird in einem Spritzgussprozess ein Thermoplast (siehe Abb. 30, Mitte) gespritzt, sodass sechs gleich lange Ärmchen entstehen. Der in dieser Arbeit eingesetzte Thermoplast besteht aus Polyphthalamid mit 30 % Glasfaservolumengehalt (PPA GF30). Die Dicke des Thermoplasts auf dem Aluminium beträgt 1,5 mm. In einem RTM-Verfahren (Resin Transfer Moulding) werden um den Verbund aus Aluminium und Thermoplast Preforms, also vorimprägnierte Carbonfasern, gelegt und bei 75 °C und einem Druck von 8 bar mit einer Epoxid-Matrix infiltriert. Die fertige CFK-Komponente besteht aus vier Lagen, wobei jede Lage aus 3K Kohlenstofffasern besteht, die mit Kett- und Schussfasern zu einem sogenannten Leinwandgewebe verarbeitet sind. Dabei sind die erste und die vierte Lage in 0°/90°-Orientierung und die zweite und dritte Lage in ±45°-Orientierung angeordnet ([0°/90°, ±45°]_s). Insgesamt besitzt die CFK-Komponente

einen Kohlenstofffaseranteil von ca. 30 %. Das so entstandene Hybridbauteil besitzt also sowohl Form- als auch Stoffschluss. Die Geometrie dieses Hybridbauteils kann als schalenförmig bezeichnet werden.

Damit während der Thermografiemessungen genügend emittierte Strahlung einer Probe von der Infrarotkamera aufgezeichnet werden kann, muss sichergestellt werden, dass der Absorptionsgrad und somit die Emissivität des Prüfobjekts ausreichend groß ist. Da sich normale Körper nicht wie schwarze Körper verhalten, kann es notwendig sein, die Oberfläche zu schwärzen, um Reflexionsprozesse zu minimieren. Da CFK bereits von Natur aus eine schwarze Farbe hat, ist es hier nicht zwingend notwendig die Proben zusätzlich zu schwärzen. Ob und wenn ja, welche Auswirkung eine zusätzliche Schwärzung auf die Ergebnisse hat, wird in Kapitel 4.1.2.4 gezeigt.

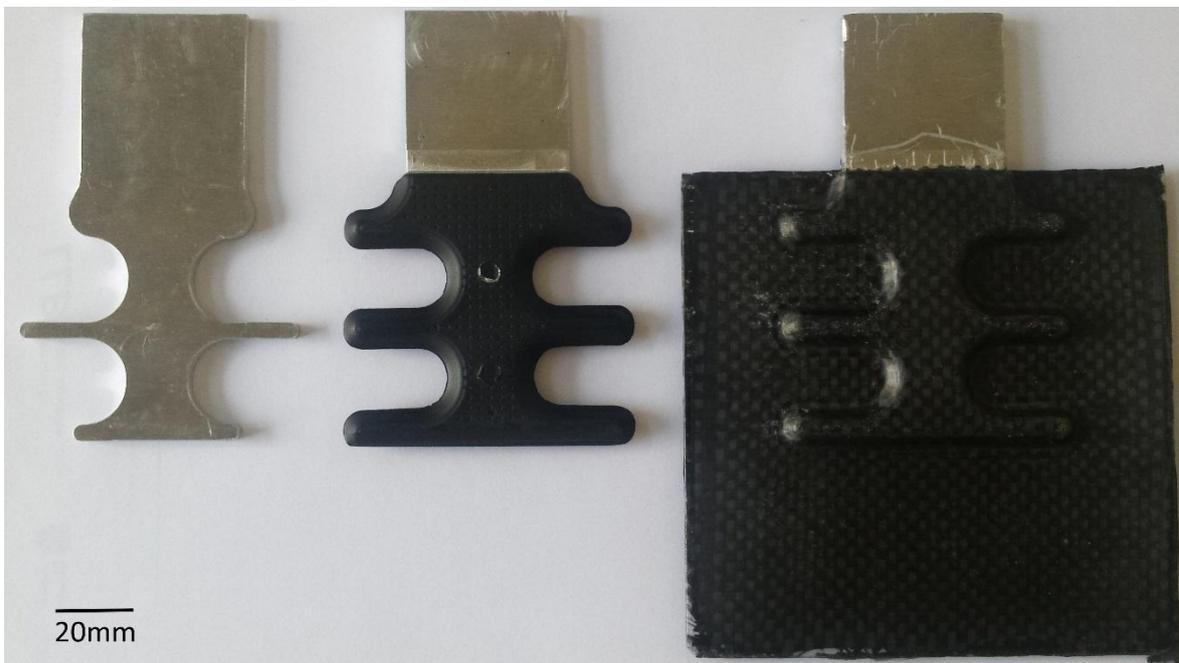


Abb. 30: Komponenten des Hybridverbunds: 1) Aluminiumeinleger, 2) Einleger mit Thermoplast, 3) fertiger Hybridverbund

3.5.4 Künstlich eingebrachte Defekte

Sowohl in die reinen CFK-Proben als auch in die Hybridproben werden künstliche Defekte eingebracht, um zum einen produktionstechnische und zum anderen auch durch mechanische Lasten hervorgerufene Defekte zu simulieren. Dabei werden Defekte, wie lokale Faseraufweitung (Gapping), fehlender Roving, Falte, 10 °-Faserfehlorientierung

oder Delamination (künstlich durch Teflonstreifen oder mechanisch durch Ablösung einzelner Schichten), betrachtet (siehe Abb. 31). Bis auf die Falte, die zu den dreidimensionalen Fehlern gehört, können alle der genannten Fehler den zweidimensionalen Fehlern zugeordnet werden.

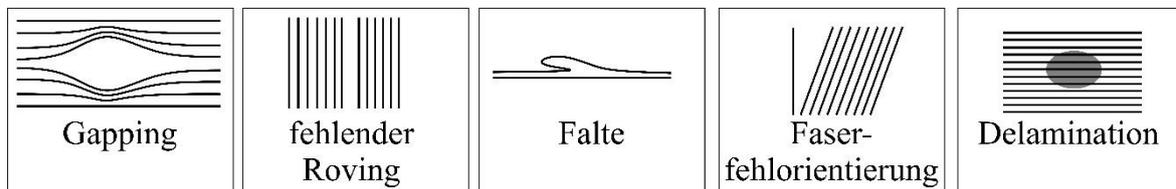


Abb. 31: Künstlich eingebrachte Defekte in den Hybridverbund

In dieser Arbeit werden unter anderem Hybridproben untersucht, die Gappingdefekte in einer der CFK-Lagen besitzen. Diese Proben mit Gappingdefekten beinhalten insgesamt sechs Fehler mit unterschiedlichen Durchmessern. Dabei haben die Defekte Durchmesser von 10 mm, 8 mm, 6 mm, 4 mm, 2 mm und 1 mm. Wie in Abb. 32 zu erkennen ist, sind diese Fehler oberhalb des Einlegers in die zweite Lage des CFK eingebracht.

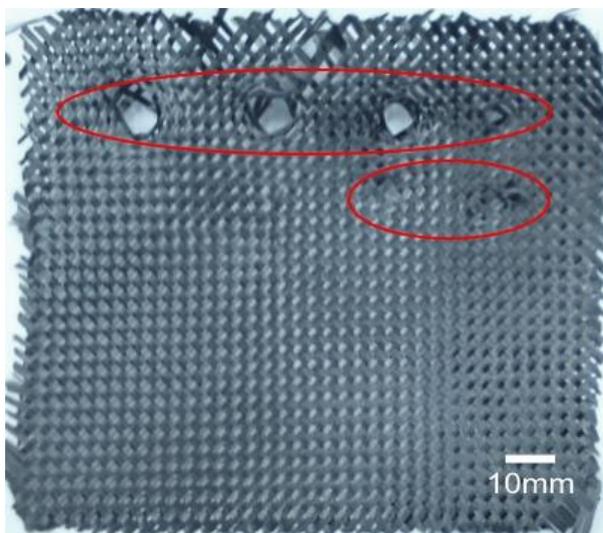


Abb. 32: Lage und Größe der Gappingdefekte im Hybridverbund

Die künstlich eingebrachten Defekte sind realen Fehlern nachempfunden. Wie diese Fehler in der Realität entstehen, ist abhängig von der Fehlerart. Der Fehler des fehlenden Rovings kann entstehen, wenn bei der Herstellung der Preform-Lagen eine Faser vergessen wird. Der Gapping-Defekt sowie auch die Falte können bei unsachgemäßem Gebrauch der

Preform-Lagen auftreten oder aber bei einer fehlerhaften Einstellung der Prozessparameter. Die 10 °-Faserfehlorientierung ist ebenfalls auf eine fehlerhafte Einstellung der Legemaschine, beziehungsweise auf Fehler durch die einlegende Person zurückzuführen. Die Delamination kann sowohl durch falsche Prozessparameter als auch durch eine Verschmutzung während des Herstellprozesses oder durch eine falsche Handhabung nach dem Herstellprozess (z.B. durch Fallenlassen der Proben) entstehen.

In Kapitel 4 werden die Auswirkungen dieser Defekte (Effects of Defects) untersucht.

3.5.5 Versuchsaufbau

Bei der Thermografie erfolgt die Charakterisierung der Proben mit einer Dual-Band Kamera. Bei dem gekühlten Detektor der Kamera handelt es sich um einen sogenannten QWIP-Detektor (Quantentopf-Infrarot-Photodetektor). Der Sensortyp der verwendeten Kamera entspricht einem FPA-Sensor (Focal Plane Array) mit einer lateralen Auflösung von 384 x 288 Pixeln. Die Temperaturempfindlichkeit liegt bei 25 mK. Zudem ist die Kamera in der Lage, Bilder mit einer Bildrate von bis zu 300 Hz aufzunehmen [69].

Die Thermografiemessung wird in einer abgeschlossenen Kammer durchgeführt. Um so wenige Reflexionseinflüsse wie möglich zuzulassen, sind die Wände dieser Kammer schwarz gefärbt.

Unabhängig von dem Anregungsverfahren der aktiven Thermografie (durch Blitz, induktiv mit Spule oder mit IR-Arrays) kann bei der Durchführung in Reflexions- und Transmissionsanordnung unterschieden werden. Bei der Reflexionsanordnung befindet sich die Anregungsquelle zwischen der Probe und der aufnehmenden Infrarotkamera. Bei der Transmissionsanordnung hingegen befindet sich die Probe zwischen Anregungsquelle und Kamera. Der Abstand der Probe zur Kamera ist immer gleich. In Abb. 33 ist der Versuchsaufbau exemplarisch für die induktive Thermografie in Transmissions- und Reflexionsanordnung zu sehen.

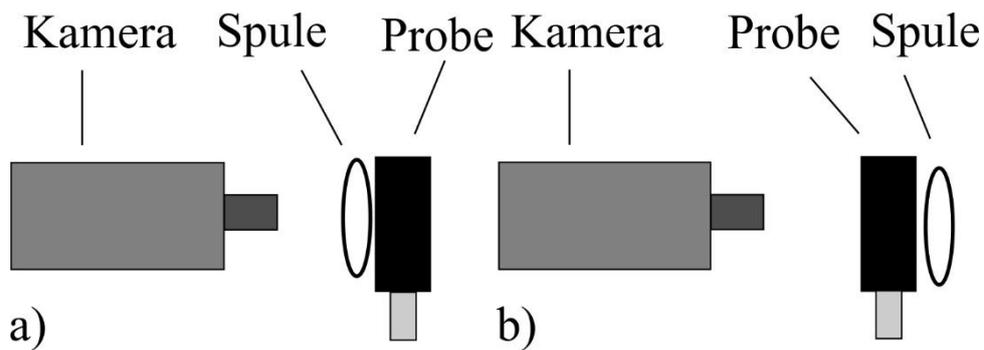


Abb. 33: Versuchsaufbau Thermografie (am Beispiel der induktiven Thermografie) in a) Reflexionsanordnung und b) Transmissionsanordnung

Bei den Messungen mit EMUS werden die Prüfköpfe an eine EMUS-Abstimmereinheit angeschlossen. Diese ist an einen PC gekoppelt, über den die Prüfparameter geladen werden. Weiterhin ist diese Einheit mit einem Oszilloskop verbunden, mit dem die Signale der Messung angezeigt und die Prüfdaten exportiert werden können (siehe Abb. 34 a)).

Die Prüfköpfe werden bei jeder Messung durch einen Probenhalter in derselben Position gehalten, um Abweichungen durch unterschiedliche Prüfkopfpositionen zu vermeiden (siehe Abb. 34 b)). Die Anordnung der Prüfköpfe (Sender und Empfänger) hat keine Auswirkungen auf die Messdaten (siehe Kapitel 4.2.1).



Abb. 34: Versuchsaufbau EMUS: a) Abstimmereinheit und b) Prüfkopfhalter

4. Durchführung der Messungen

4.1 Thermografie

4.1.1 CFK-Proben und geklebte Proben

CFK-Proben

Wie in Kapitel 3.5 beschrieben, erfolgt in einem ersten Schritt die Charakterisierung von reinen CFK-Proben. Als zerstörungsfreie Prüfmethode wird die aktive Thermografie mit Blitzlichtanregung verwendet. In Abb. 35 ist eine defektfreie CFK-Probe vor der mechanischen Prüfung zu sehen. Die mechanische Prüfung erfolgt entweder quasistatisch mit einer Geschwindigkeit von 2 mm/min oder dynamisch mit einer Frequenz von 5 Hz und einem Belastungsverhältnis von 0,1 (Quotient aus Maximalkraft und Minimalkraft). Bei der mechanischen Prüfung werden fehlerfreie CFK-Proben und CFK-Proben mit künstlichen Defekten untersucht.



Abb. 35: Defektfreie CFK-Probe vor der mechanischen Prüfung

In Abb. 36 ist das Thermografiebild nach Blitzanregung einer im Ausgangszustand fehlerfreien CFK-Probe zu sehen. Fehlerfreie CFK-Proben werden getestet, um analysieren zu können, welche möglichen Defekte durch mechanische Belastung auftreten können. Die Abbildung besteht aus drei Bildern, die jeweils zu verschiedenen Zeiten nach der Blitzanregung aufgenommen wurden. Bildteil a) zeigt die Probe 28 ms nach der Blitzanregung. Wie sehr gut zu erkennen ist, wird die Faserausrichtung der ersten Lage ($0^\circ/90^\circ$) gut abgebildet. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Probe durch die mechanische Belastung gerissen ist (siehe rote Markierung). Bild b) zeigt die Probe 250 ms nach der Anregung. In dieser Einstellung ist der Riss noch besser zu erkennen. Außerdem deutet sich ein weißer Bereich um den Riss an, der als Delamination zu identifizieren ist. Im Gegensatz zu Bildteil a) ist in diesem Bild zudem die Faserausrichtung der zweiten Lage ($\pm 45^\circ$) zu erkennen. In Bild c) ist die Delamination um den Riss am besten zu erkennen.

Weiterhin ist zu sehen, dass nach 950 ms die Faserausrichtung nur noch schwer zu detektieren ist. Dennoch kann man sagen, dass nach dieser Zeit die Faserausrichtung der vierten Lage zu erkennen ist.

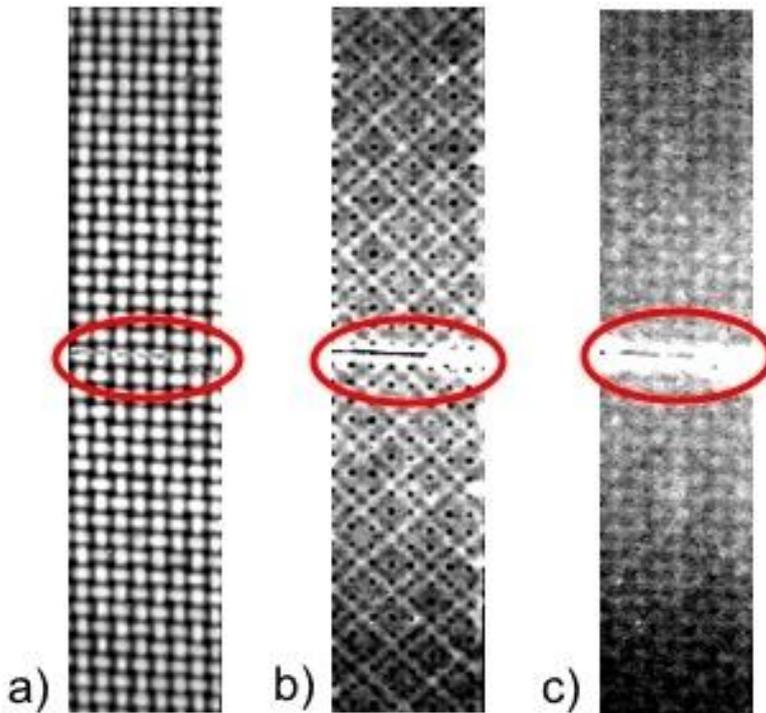


Abb. 36: CFK-Probe nach quasistatischer Prüfung nach a) 28 ms, b) 250 ms und c) 950 ms

Abb. 37 zeigt das Thermografiebild einer CFK-Probe, in die ein künstlicher Gappingdefekt in der ersten Lage eingebracht wurde (siehe rote Markierung). Die Probe wurde dynamisch mit einem Belastungsverhältnis von 0,1 getestet. Dabei wurde als Maximalkraft 4750 N gewählt und 475 N als Minimalkraft. Die getestete Probe hat mehr als eine Million Zyklen erreicht und ist nicht gerissen.

Bildteil a) des Thermografiebildes zeigt die Probe 21 ms nach der Blitzanregung. Neben dem künstlichen Gappingdefekt ist auch die Faserausrichtung der Probe ($0^\circ/90^\circ$) zu erkennen. 208 ms nach der Anregung sind in Bild b) am oberen rechten Rand der Probe und insbesondere auch um den künstlichen Defekt helle Bereiche zu sehen. Diese Bereiche deuten auf eine Delamination hin. Da die Delamination im Bereich des künstlich eingebrachten Defekts auftritt, spricht dies dafür, dass der Defekt die Struktur der Probe

schwächt. Neben der Delamination ist außerdem die Faserausrichtung der zweiten Lage zu erkennen.

1 s nach der Anregung mit Blitz ist die Faserausrichtung kaum noch zu erkennen. Die Delamination am oberen rechten Rand ist noch zu erkennen, verblasst jedoch allmählich. Dies zeigt, dass die Delamination in diesem Bereich nicht sehr ausgeprägt ist. Die Delamination um den künstlichen Defekt hingegen ist jetzt noch besser zu erkennen.

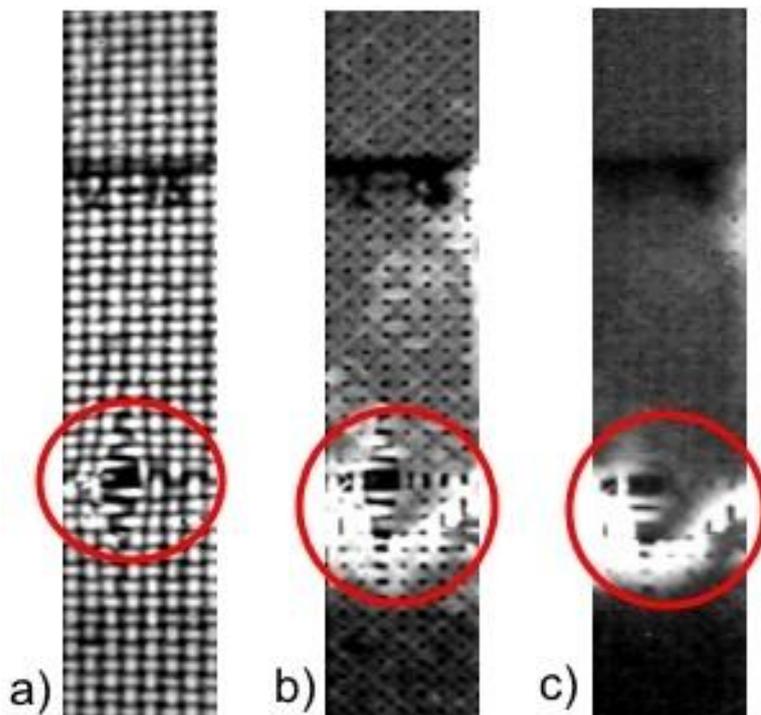


Abb. 37: CFK-Probe nach dynamischer Prüfung nach a) 21 ms, b) 208 ms und c) 1 s

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass mechanisch induzierte Defekte, wie beispielsweise Risse, oder auch künstliche Defekte, wie Gappings, Delaminationen auslösen. Dies wiederum zeigt, dass Defekte die Struktur dermaßen stören, dass die Proben in diesen Bereichen versagen.

Außerdem kann die Faserausrichtung in verschiedenen Tiefen der Probe bestimmt werden (vgl. [8]). So kann direkt nach der Blitzanregung die Faserausrichtung der ersten Lage und nach ca. 200 ms die Faserausrichtung der zweiten Lage ermittelt werden. Nach ca. 900 ms kann sogar die Faserausrichtung der hintersten Lage bestimmt werden.

Die Erkenntnisse, die durch die reinen CFK-Proben gewonnen werden konnten, werden nun durch Versuche an geklebten Proben erweitert. Der Fokus liegt dabei auf der Charakterisierung von Grenzflächen.

Geklebte Proben

Abb. 38 zeigt zwei geklebte Proben in Vorder- und Rückansicht, deren Geometrie in Kapitel 3.5.2 näher beschrieben ist. Die linke Probe ist ohne künstliche Defekte und mit perfekter Anbindung geklebt. Die rechte Probe hat einen großen Lufteinschluss zwischen dem Aluminium und der CFK-Platte.

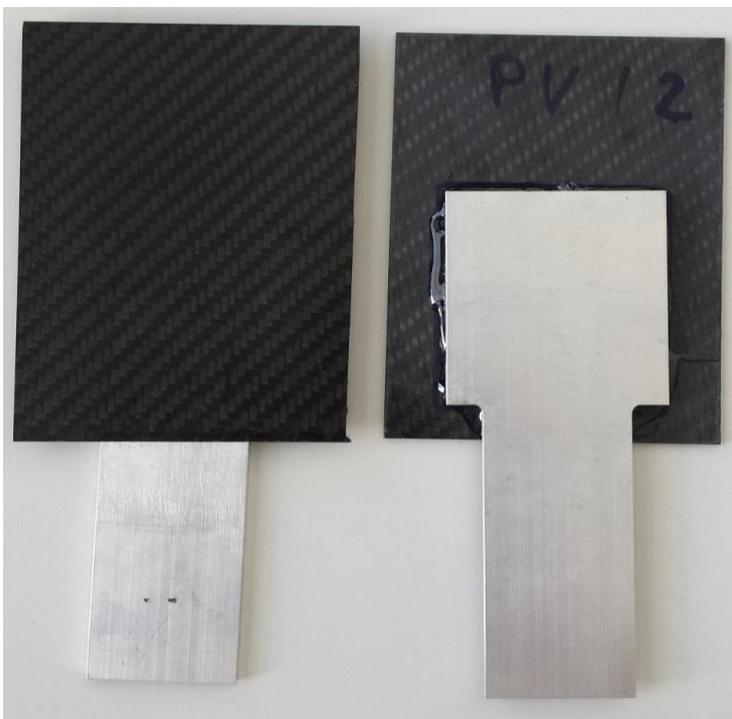


Abb. 38: Vorder- und Rückansicht geklebter Proben

Abb. 39 zeigt die Thermografiebilder der beiden Proben. Links ist die Probe mit perfekter Anbindung zu sehen. In der Mitte ist ein großer dunkler Bereich zu erkennen, der den geklebten Teil darstellt. Der helle Teil am Rand zeigt den ungeklebten Teil, also nur die CFK-Platte. Auch im rechten Bild ist in der Mitte ein dunkler Bereich zu erkennen, der die geklebte Fläche abbildet. Im Gegensatz zur Probe auf dem linken Bild ist bei dieser Probe ein großer heller Bereich erkennbar. In diesem Bereich fehlt die Klebung. Durch die

fehlende Klebung kann die Wärme, die durch die Blitzanregung eingebracht wird, nicht durch die Probe diffundieren, staut sich daher an der Oberfläche und erscheint hell.

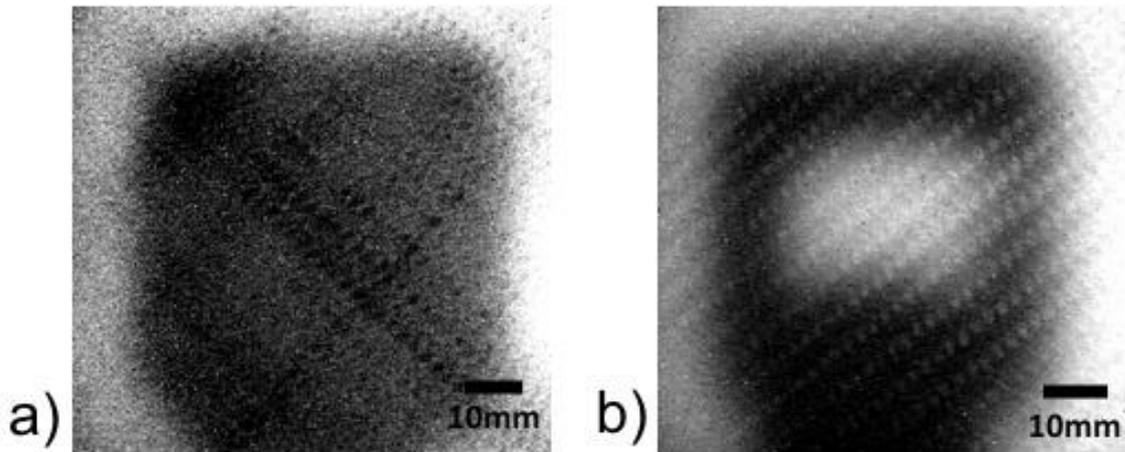


Abb. 39: Thermografiebilder von geklebten Proben a) ohne Defekt und b) Klebung mit Lufteinschluss

Abb. 40 zeigt eine Gegenüberstellung von Fehlerpositionen verschiedener künstlicher Defekte sowie das dazugehörige Thermografiebild. Wie in den Abbildungen zuvor ist die Klebung als dunkle Fläche erkennbar. Die Lufteinschlüsse im oberen Bereich der Klebung sind gut als helle Flächen zu erkennen, wohingegen die Fremdkörper (quadratische Alufolie) kaum zu sehen sind.

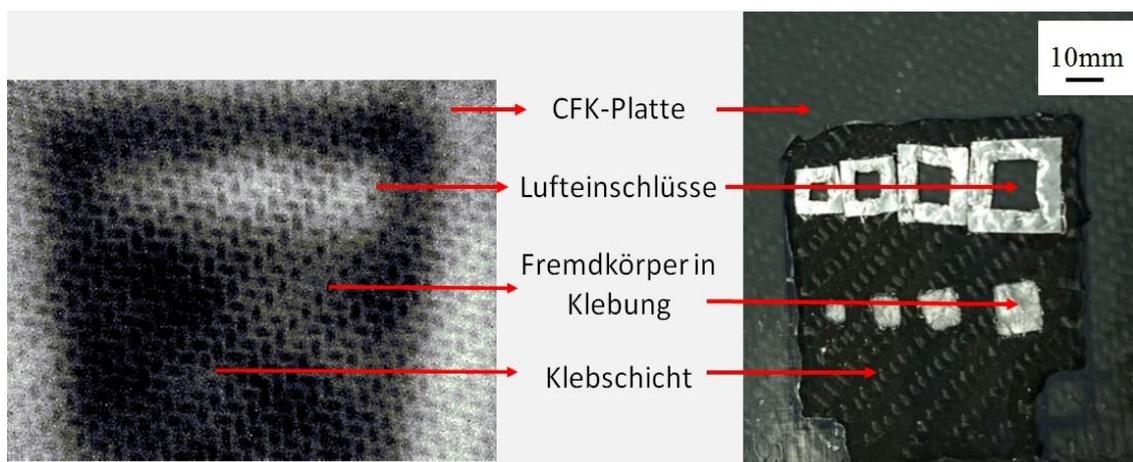


Abb. 40: Geklebte Probe mit verschiedenen künstlichen Defekten

Diese Vorversuche an CFK- und geklebten Proben zeigen bereits, dass künstliche Defekte gut durch die Thermografie zu detektieren sind und einen großen Einfluss auf die Struktur

der Prüfkörper haben. Außerdem sind Bereiche, in denen sich mechanisch induzierte oder auch künstliche Defekte befinden, prädestiniert für eine weitere Defektausbreitung. So können in diesen Bereichen zusätzliche Defekte, wie beispielsweise Delaminationen, auftreten. Diese Delaminationen, die als Grenzflächenfehler zu bezeichnen sind, sind auf Thermografiebildern sehr gut zu identifizieren. Für die Versuche an Metall-CFK-Hybridstrukturen, kann somit die Thermografie zur Defekt- und Grenzflächencharakterisierung verwendet werden.

4.1.2 Metall-CFK-Hybridstrukturen

In diesem Kapitel wird zunächst auf den kameraspezifischen Helligkeitswert zur Beurteilung von Thermografiebildern eingegangen und danach die in Kapitel 3.5.3 beschriebenen Hybridproben mittels aktiver Thermografie mit Blitzanregung untersucht.

4.1.2.1 Abhängigkeit der Helligkeitswerte von der Temperatur

Der Helligkeitswert, der von einer Kamera ausgegeben wird, ist kameraspezifisch und dient zur quantitativen Einschätzung der auftretenden Helligkeiten in den Thermografiebildern. Im Umfang der kameraeigenen Software ist ein Tool enthalten, das die gemessenen Helligkeitswerte in Temperaturwerte umrechnet. Da dabei jedoch der Anteil aus Reflektionen der Umgebung und die wellenlängenabhängige Empfindlichkeit des Kamerasystems nicht berücksichtigt werden, muss der erhaltene Temperaturwert kritisch betrachtet werden. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit gänzlich darauf verzichtet, die Helligkeitswerte in Temperaturwerte umzurechnen. Diese Vereinfachung kann erfolgen, da die von der kameraeigenen Software errechneten Temperaturen zum einen genügend Abstand von der Vicat-Erweichungstemperatur (nach ISO 306, Typ B) des verwendeten PPA GF30 (308 °C, [70]) besitzen, zum anderen aber auch weit entfernt von der Glasübergangstemperatur des verwendeten Epoxids (100 °C, [71]) liegen. Somit liegen die bei der Thermografie erreichten Temperaturen in einem für die mechanischen und thermischen Eigenschaften des Hybridbauteils unkritischen Bereich.

4.1.2.2 Grenzflächendefekte und andere Fehler

Im Folgenden werden zunächst defektfreie Proben charakterisiert, um Referenzthermografiebilder für die spätere Fehlercharakterisierung zu erhalten.

Anregung durch Blitzlicht

In Abb. 41 a) ist eine Hybridprobe 7 ms nach der Blitzanregung zu sehen. Die $0^\circ/90^\circ$ Faserausrichtung ist direkt zu bestimmen. Ebenso ist der Aluminiumeinleger mit seinen sechs Armen zu erkennen. Der Maximalwert der Helligkeit beträgt 4068. In Bild b) ist die gleiche Probe 1 s nach der Anregung zu sehen. Nach dieser Zeit ist die Faserausrichtung nur noch im Ansatz zu erkennen. Da es sich um eine fehlerfreie Probe handelt, sind auch keine übermäßig hellen Stellen auszumachen, sodass auch durch die Thermografie das Fehlen von Defekten bestätigt werden kann. Der Maximalwert der Helligkeit beträgt in diesem Bild 3562. Dieser Unterschied in den Maximalwerten der beiden Bilder entsteht dadurch, dass Bild b) zu einem späteren Zeitpunkt nach der Blitzanregung aufgenommen wurde.

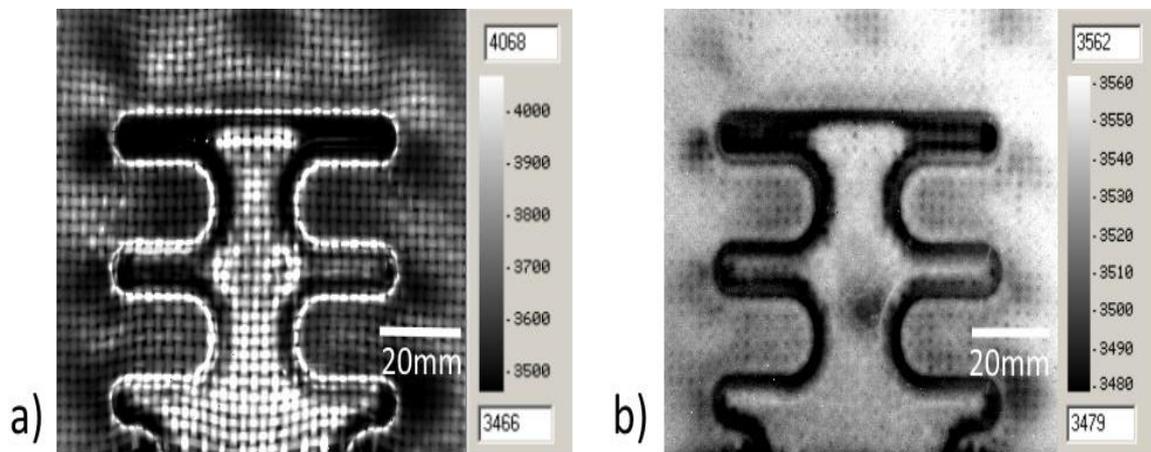


Abb. 41: Thermografiebilder einer defektfreien Probe bei a) 7 ms und b) 1 s nach der Blitzanregung

Um in dieser Arbeit Grenzflächendefekte untersuchen zu können, müssen diese erst von anderen Fehlern, wie beispielsweise Oberflächenfehlern, unterschieden werden. In Abb. 42 sind Proben gezeigt, die verschiedene Oberflächendefekte enthalten. Beide Bilder wurden 7 ms nach der Blitzanregung aufgenommen. In Bild a) kann ein Wegschwemmen der ersten Lage (siehe linke obere Ecke) beobachtet werden. Ebenso kann man erkennen, dass die Fasern der ersten Lage nicht in $0^\circ/90^\circ$ -Richtung verlaufen, sondern in $\pm 45^\circ$ -Richtung. In Bild b) ist zu erkennen, dass die Faserausrichtung der ersten Lage um ca. 10° verschoben ist. Die Maximalwerte der Helligkeiten beider Bilder liegen mit 3973 für Bild

a) und 4003 für Bild b) in einem ähnlichen Bereich, da beide zur selben Zeit nach der Blitzanregung aufgenommen wurden.

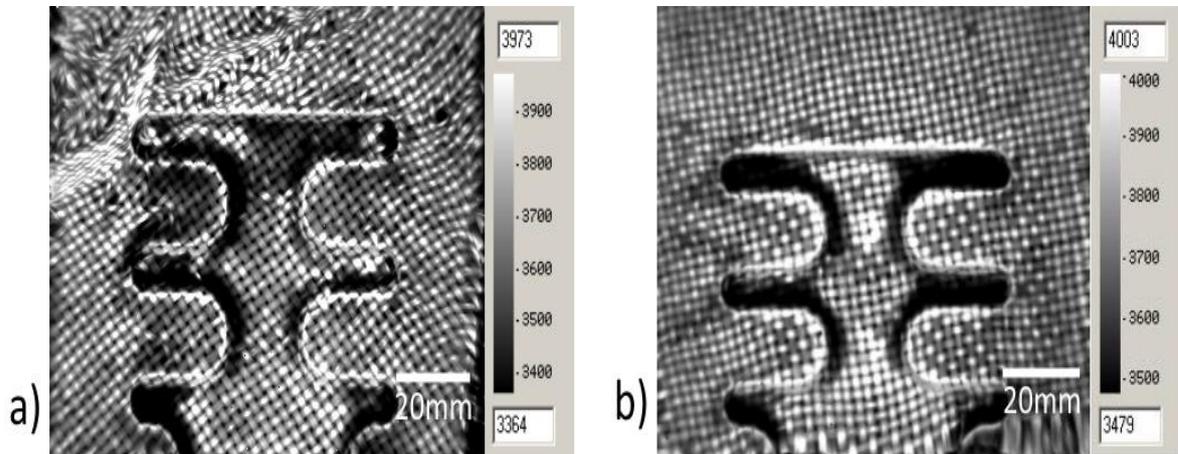


Abb. 42: Thermografiebilder von Proben mit verschiedenen Oberflächendefekten, aufgenommen 7 ms nach der Blitzanregung

In Abb. 43 sind zwei Proben mit einer Falte zu sehen. Bild a) zeigt eine Probe mit einer Falte, die sich in der ersten CFK-Lage befindet. Das Bild wurde 0,35 s nach der Blitzanregung aufgenommen. Die Falte ist als dunkler Streifen sehr gut über dem mittleren Arm zu erkennen. In Bild b) befindet sich die Falte in der zweiten CFK-Lage. Auch in diesem Bild ist sie als Streifen sehr gut zwischen dem oberen und dem mittleren Arm zu erkennen. Trotz des Eingriffs in verschiedene CFK-Lagen hat die Falte keine Auswirkung auf die Verbindung zwischen den einzelnen Lagen, sodass keine Delamination zu erkennen ist. Die Falte fügt sich viel mehr in den Lagenaufbau ein und erscheint deshalb auch eher dunkler als hell wie eine Delamination. Obwohl Bild a) etwas früher nach der Blitzanregung aufgenommen wurde als Bild b), liegen die Maximalwerte der Helligkeiten beider Bilder mit 3566 für Bild a) und mit 3526 für Bild b) in einem ähnlichen Bereich. Dies zeigt, dass der Großteil der eingebrachten Wärme sehr zeitnah nach der Blitzanregung durch die Probe diffundiert.

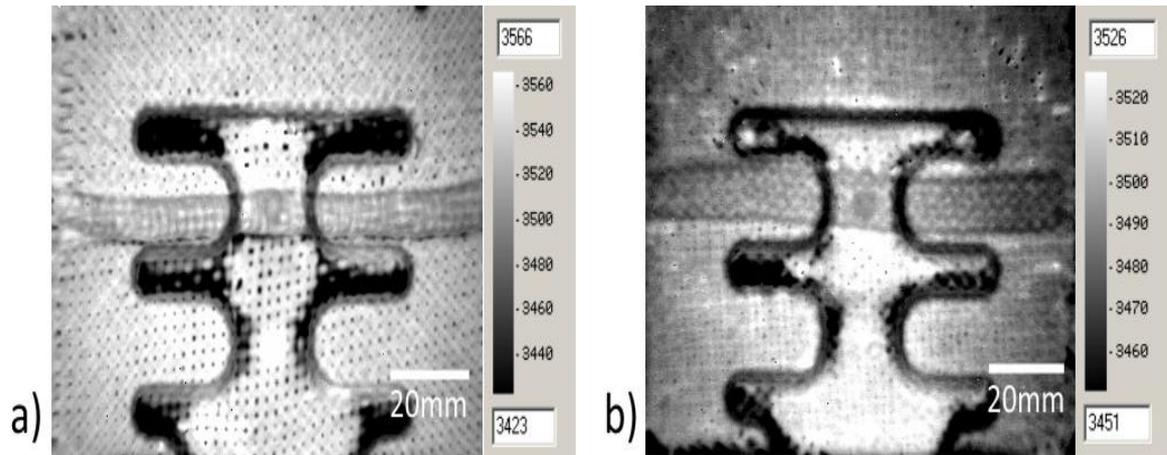


Abb. 43: Thermografiebilder von Proben mit Falten a) in der ersten CFK-Lage, aufgenommen 0,35 s nach der Blitzanregung und b) in der zweiten CFK-Lage, aufgenommen nach 0,7 s nach der Blitzanregung

Abb. 44 zeigt Probe FG3-1, in die Fremdkörper zwischen den einzelnen CFK-Lagen eingebracht wurden. Im Gegensatz zu bereits existierenden Arbeiten, wie z.B. Maierhofer et al. [72], in denen ebenfalls Fremdkörper in die Prüfobjekte eingebracht wurden, werden hier erstmals kugelförmige Styroporteilchen als Fremdkörper verwendet. Die eingebrachten Styroporkugeln lassen sich im Bild als drei helle Punkte über dem oberen Arm des Aluminiumeinlegers identifizieren. Weiterhin lassen sich zwei dunkle Stellen rechts des Einlegers erkennen, die als Oberflächeninhomogenitäten erklärt werden können. Der Maximalwert der Helligkeit liegt mit 3566 in einem ähnlichen Bereich wie die Proben aus Abb. 43.

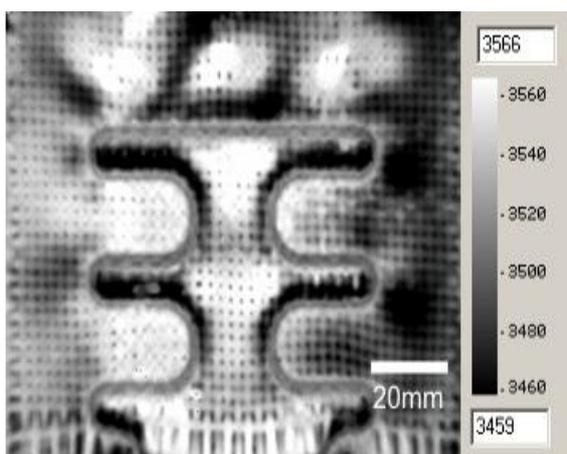


Abb. 44: Probe FG3-1 mit Styroporkugeln als Fremdkörper zwischen einzelnen CFK-Lagen, aufgenommen 0,7 s nach der Blitzanregung

In Abb. 45 sind weitere Defekte, die sich in tieferen Lagen befinden, zu sehen. In Bild a) ist eine Probe mit verschiedenen großen Gappingdefekten zu sehen. Die Größe der Defekte reicht dabei von 10 mm ganz links über 8 mm und 6 mm in der Mitte bis zu 4 mm ganz rechts (siehe rote Markierung). Diese Defekte sind als weiße, runde Flächen zu erkennen und werden in Kapitel 4.1.2.4 genauer untersucht. Bild b) zeigt eine Probe mit Teflonfolie zwischen der ersten und der zweiten CFK-Lage. Wie in Kapitel 3.5.4 oder auch in [8] und [73] beschrieben, soll die Teflonfolie wie eine Delamination wirken. Die weiße Fläche innerhalb der roten Markierung bestätigt dies. Neben dem künstlich eingebrachten Defekt lässt sich auf dem Einleger ein weiterer heller Bereich erkennen. Dieser kann als Drapierungsfehler in der CFK-Lage interpretiert werden. Die Maximalwerte der Helligkeiten beider Bilder liegen zwar etwas auseinander (3532 für Bild a) und 3416 für Bild b)), betrachtet man allerdings die Spanne zwischen Minimal- und Maximalwert, so liegen diese dennoch in einem ähnlichen Bereich.

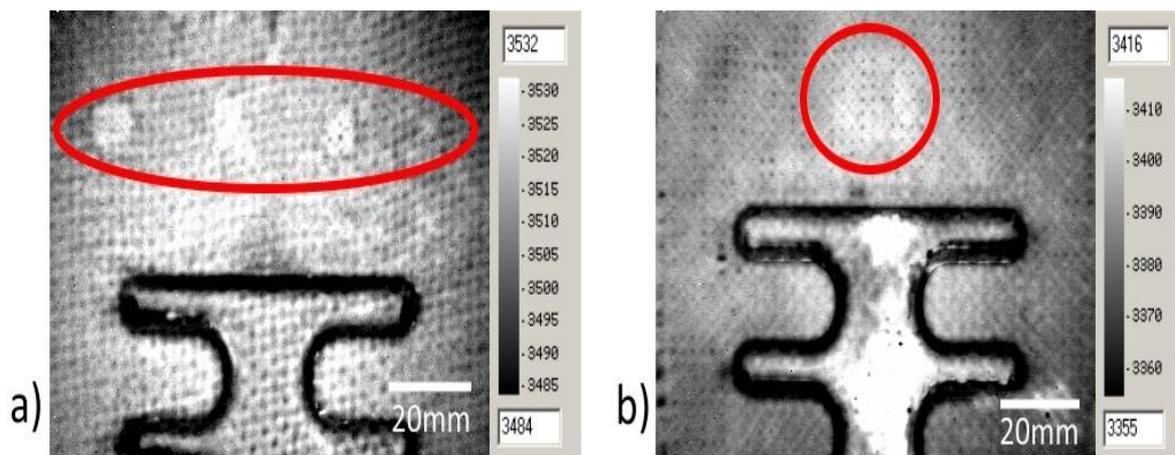


Abb. 45: Thermografiebilder von a) Gappingdefekten und b) einer Teflonfolie in zweiter Lage, aufgenommen 1 s nach der Blitzanregung

Abb. 46 zeigt die Probe JS4 nach einer mechanischen Belastung, aufgenommen zu verschiedenen Zeiten nach der Blitzanregung. Die mechanische Belastung bestand aus einem Laststeigerungsversuch, bei dem nach jeweils 50.000 Zyklen die Maximallast um 1 kN gesteigert wurde. Das Belastungsverhältnis betrug dabei 0,1. Zu Beginn der Prüfung lag die Maximallast bei 5,5 kN und konnte im Verlauf des Versuches bis auf 9,5 kN erhöht werden, ohne dass die Probe gebrochen ist. Es ist daher anzunehmen, dass diese Probe bei einer Maximallast von 7,5 kN ohne Versagen durchgelaufen wäre.

In Bild a) ist die Probe 7 ms nach der Blitzlichtanregung zu sehen. Man kann sehr deutlich die Faserausrichtung der ersten Lage erkennen, die um 10° zur Normallage verschoben ist. In Bild b) ist zu erkennen, dass um den Aluminiumeinleger mehrere helle Bereiche entstanden sind. Besonders über dem oberen Arm und an den Enden der übrigen Arme sind diese hellen Bereiche zu detektieren. Die hellen Bereiche repräsentieren Delaminationen zwischen dem CFK und dem Thermoplast. Man kann also sagen, dass, obwohl die Probe während des mechanischen Versuchs nicht gebrochen ist, trotzdem eine Schädigung aufgetreten ist und diese auch sehr gut mit Thermografie detektiert werden kann. Wie in den vorherigen Bildern auch, sieht man, dass sich die maximalen Helligkeitswerte der beiden Proben unterscheiden, da die zweite Probe längere Zeit nach der Blitzanregung aufgenommen wurde.

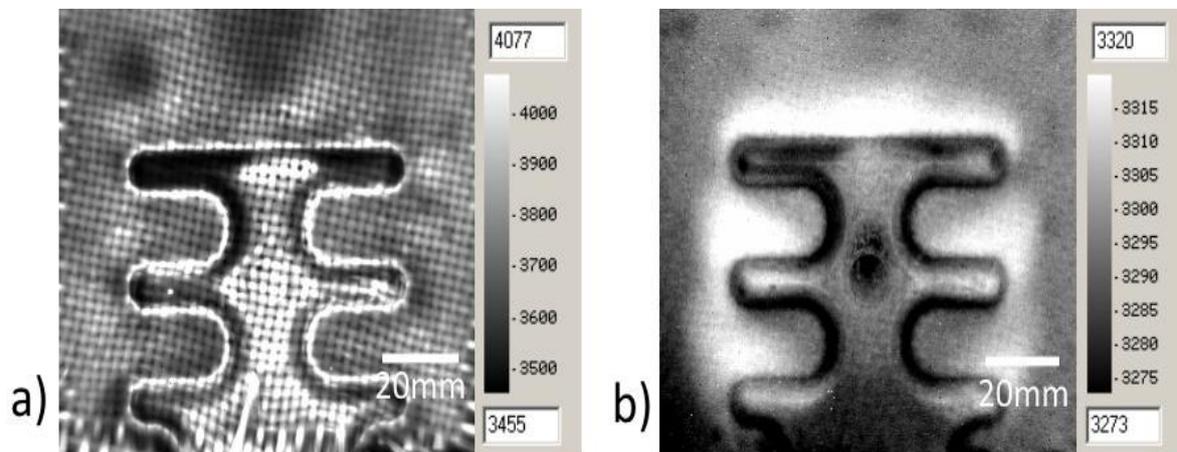


Abb. 46: Thermografiebilder der Probe JS4 nach mechanischer Belastung, aufgenommen a) 7 ms und b) 2,1 s nach der Blitzanregung

In Abb. 47 ist Probe A123 zu verschiedenen Zeiten nach einem dynamischen Zugversuch abgebildet. Die mechanische Prüfung wurde bei einer Maximallast von 7,5 kN und einem Belastungsverhältnis von 0,1 durchgeführt. Nach 221.000 Zyklen ist die Probe gebrochen. Bild a) zeigt die Probe 0,25 s nach der Blitzanregung. Es ist sofort zu erkennen, dass über dem oberen Arm des Einlegers und an den Enden der anderen Arme helle Bereiche auftreten. Zu einem solch frühen Zeitpunkt nach der Anregung sprechen diese hellen Stellen für Defekte zwischen den einzelnen CFK-Lagen. Bild b) zeigt die Probe 0,7 s nach der Anregung. Neben den hellen Bereichen, die bereits in dem zuvor aufgenommenen Bild zu erkennen waren, ist in diesem Bild ein großer heller Bereich um den Aluminiumeinleger

zu sehen. Wie bereits bei Probe JS4 (siehe Abb. 46) repräsentiert dieser helle Bereich eine Delamination zwischen CFK und Thermoplast. Im Gegensatz zur Probe JS4 ist die Delamination hier jedoch großflächiger und auch durchgehend, was für eine größere Schädigung durch den mechanischen Versuch spricht. Der Vergleich der maximalen Helligkeitswerte zeigt, dass diese für das Bild b) kleiner sind, da dieses zu einem späteren Zeitpunkt nach der Blitzanregung aufgenommen wurde. Im Vergleich zu den vorherigen Bildern liegen die Helligkeitswerte mit 7694 zu 4077 viel höher. Diese Diskrepanz liegt nicht daran, dass die Proben mehr Wärme aufgenommen haben, sondern an der Referenz, die dieser Software zu Grunde liegt.

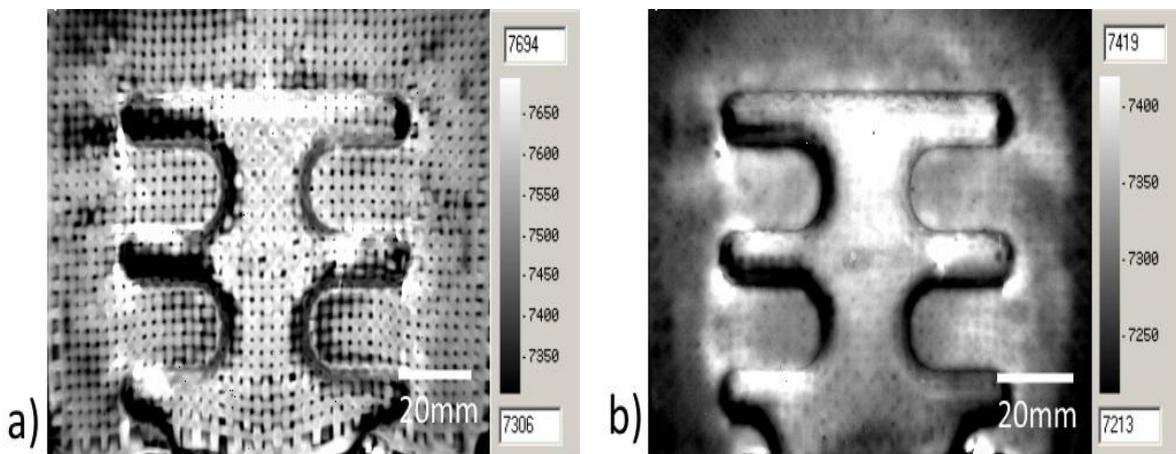


Abb. 47: Thermografiebilder der Probe A123 nach mechanischer Belastung, aufgenommen a) 0,25 s und b) 0,7 s nach der Blitzanregung

Abb. 48 zeigt die Thermografiebilder der Proben A80 und A92. Die Probe A80 wurde durch einen dynamischen Zugversuch mit einer Maximalkraft von 7,5 kN und einem Belastungsverhältnis von 0,1 bis zum Bruch belastet. Dabei wurde eine Zyklenzahl von 109.000 erreicht. Die Probe A92 wurde ebenfalls durch einen dynamischen Zugversuch bis zum Bruch belastet. Diese Probe brach erst nach 403.000 Zyklen.

In Bild a) ist um den Einleger ein heller Bereich zu erkennen. Dieser ist besonders oberhalb des oberen Arms und zwischen dem unteren und mittleren rechten Arm ausgeprägt. Neben der offensichtlichen Delamination kann man außerdem die künstlich eingebrachte Falte auf Höhe des mittleren Arms erkennen. Genau wie in Bild a) erkennt man auch in Bild b) einen hellen Bereich um den Einleger. In diesem Bild ist dieser Bereich jedoch homogener und zeigt nur oberhalb des oberen Arms eine noch höhere

Intensität. Wie in Bild a) lässt sich auch bei dieser Probe im Bereich des mittleren Arms eine künstlich eingebrachte Falte erkennen.

Vergleicht man nun die beiden Bilder, so lässt sich sagen, dass die Delamination der Probe A80 in Bild a) ausgeprägter ist als die der Probe A92 in Bild b). Diese Aussage soll in Kapitel 4.2.3 genauer untersucht werden.

Beim Vergleich der maximalen Helligkeitswerte fällt auf, dass die Werte aus Bild b) deutlich höher liegen als in Bild a). Der Vergleich der Helligkeitswerte führt also in diesem Fall zu keinem Ergebnis, sodass nur der qualitative Vergleich der hellen und dunklen Stellen zum Ziel führt.

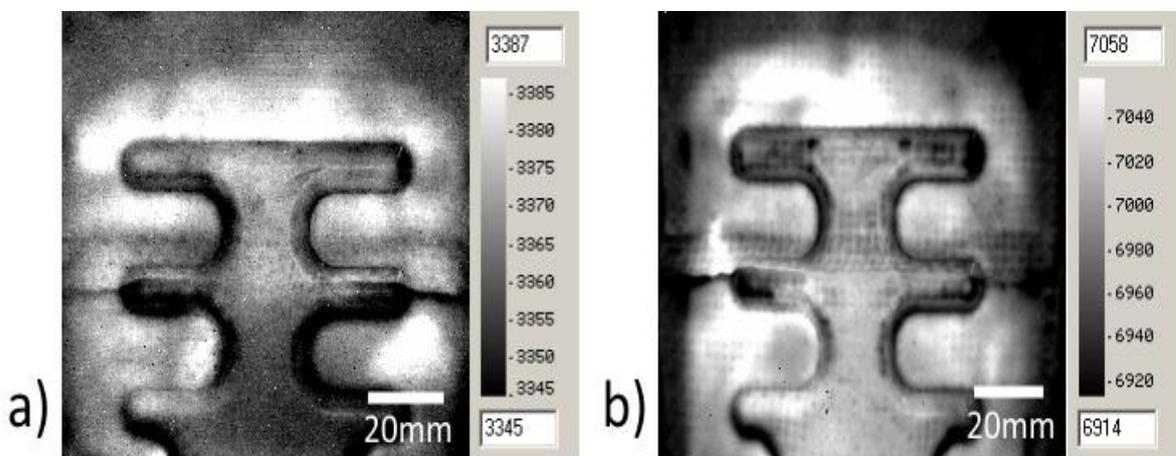


Abb. 48: Thermografiebilder a) der Probe A80, aufgenommen 1,7 s nach der Blitzanregung und b) der Probe A92, aufgenommen 0,9 s nach der Blitzanregung

Mit Blick auf die bisher erzielten Ergebnisse lässt sich die erste wissenschaftliche Hypothese, die besagt, dass mittels Thermografie die Grenzflächen sowie andere Defekte der verwendeten Hybridstruktur aus CFK und Thermoplast charakterisiert werden können, bestätigen. Dabei lassen sich Defekte wie Falten, Faserfehlorientierung, Styroporkugeln, Gappings und Teflonstreifen ebenso mit Blitzthermografie detektieren wie mechanisch induzierte Defekte. Hierbei können verschiedene Grade der Schädigung unterschieden werden. So kann eine beginnende Delamination an der Grenzfläche CFK/Thermoplast (siehe Abb. 46 b)) sehr gut von einer fortgeschrittenen Delamination (siehe Abb. 47 b)) unterschieden werden. Gleichzeitig können auch Grenzflächendefekte zwischen den einzelnen CFK-Lagen (siehe Abb. 47 a)) detektiert und von den Defekten an der Grenzfläche CFK/Thermoplast unterschieden werden. Mittels Thermografie lassen sich

also Defekte in verschiedenen Tiefen der Metall-CFK-Hybridproben detektieren und auch hinsichtlich der Defektart unterscheiden.

Einsatz der Fast Fourier Transformation (FFT)

Gemäß der zweiten wissenschaftlichen Hypothese soll in dieser Arbeit auch untersucht werden, inwieweit der Einsatz der Fast Fourier Transformation einen Einfluss auf die Qualität der Defektcharakterisierung nach Blitzanregung hat. Da das Hauptaugenmerk dieser Arbeit auf der Grenzflächencharakterisierung liegt, soll die FFT im Folgenden nur an Proben mit Defekten, die Auswirkungen auf die Verbindung zwischen den verschiedenen Materialien oder auch den einzelnen CFK-Lagen haben, gezeigt werden. Konkret werden die Proben mit eingebrachten Styroporkugeln (FG3-1), nach Laststeigerungsversuch (JS4) und nach dynamischem Zugversuch (A123) untersucht.

Probe FG3-1

Abb. 49 zeigt das Amplituden- und Phasenbild der Probe FG3-1 bei einer Frequenz von 0,2 Hz. Im Gegensatz zu dem Abkühlbild in Abb. 44 sind die künstlich eingebrachten Defekte im Amplitudenbild zwar klarer zu erkennen, jedoch ist die Faserausrichtung der obersten CFK-Lage schlechter zu bestimmen. Dieser Effekt kann dadurch erklärt werden, dass bei der Auswertung von Amplitudenbildern- je nach verwendeter Frequenz- verschiedene Tiefen fokussiert werden. So wird in diesem Fall bei einer Frequenz von 0,2 Hz genau jene Lage fokussiert, in der die künstlich eingebrachten Defekte liegen. Wie auch im Abkühlbild zuvor werden zwei dunkle Stellen rechts neben dem Einleger detektiert.

Das Phasenbild hingegen stellt keine Verbesserung bei der Anzeige der künstlich eingebrachten Defekte dar. Weiterhin stellt sich die in Abb. 44 vermutete Oberflächeninhomogenität rechts neben dem Einleger nicht als solche heraus, da diese durch die Berechnung des Phasenbildes verschwinden müsste. Vielmehr können diese zwei dunklen Bereiche nun als Produktionsfehler in den CFK-Lagen selbst definiert werden.

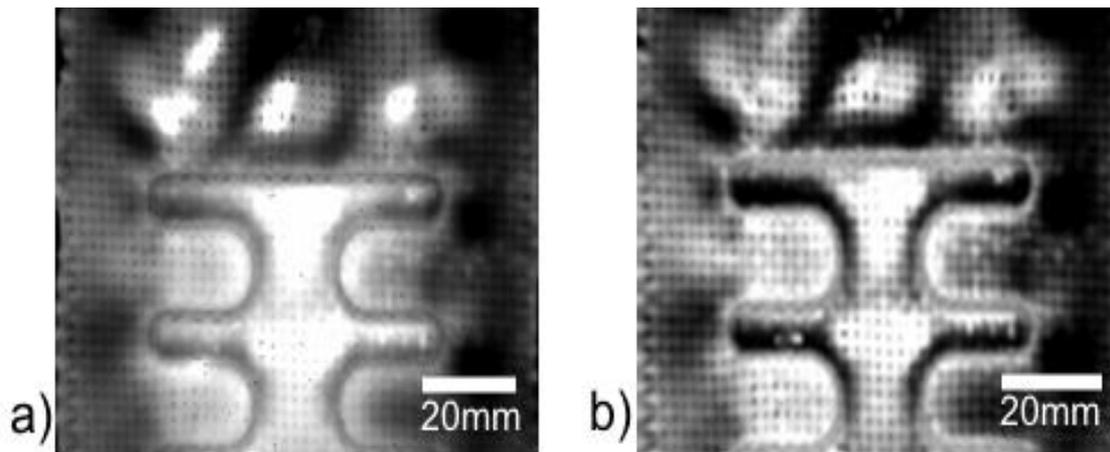


Abb. 49: Probe FG3-1 a) Amplitudenbild und b) Phasenbild bei einer Frequenz von 0,2 Hz

Probe JS4

Abb. 50 zeigt Amplituden- und Phasenbild der Probe JS4 nach dem Laststeigerungsversuch. Im Vergleich zum Abkühlbild in Abb. 46 b) lässt sich im Amplitudenbild kaum ein Defekt erkennen. Nur oberhalb des oberen Arms lässt sich ein einzelner heller Bereich erkennen, der als Delamination vermutet werden kann. Weiterhin kann man einen großen dunklen Bereich im oberen Bereich des Bildes detektieren. Dieser dunkle Bereich ist entweder eine Oberflächeninhomogenität und sollte dann im Phasenbild nicht mehr erkennbar sein oder aber er bildet einen Produktionsfehler ab, der Auswirkungen auf die CFK-Lagen hat.

Das Phasenbild zeigt mehrere dunkle Stellen im Bereich um den Einleger (siehe rote Markierungen). Zieht man nun Abb. 46 b) hinzu, können diese Stellen als Delaminationen identifiziert werden. Weiterhin zeigt das Phasenbild die bereits im Amplitudenbild detektierte dunkle Stelle im oberen Bereich des Bildes. Da diese Stelle nun auch hier erscheint, kann ausgeschlossen werden, dass es sich dabei um eine Oberflächeninhomogenität handelt, sondern es vielmehr ein Fehler in der CFK-Lage sein muss. In beiden Bildern kann die Faserorientierung der obersten CFK-Lage sehr gut detektiert werden. Dabei erkennt man, dass die Fasern der ersten Lage um ca. 10° verschoben sind.

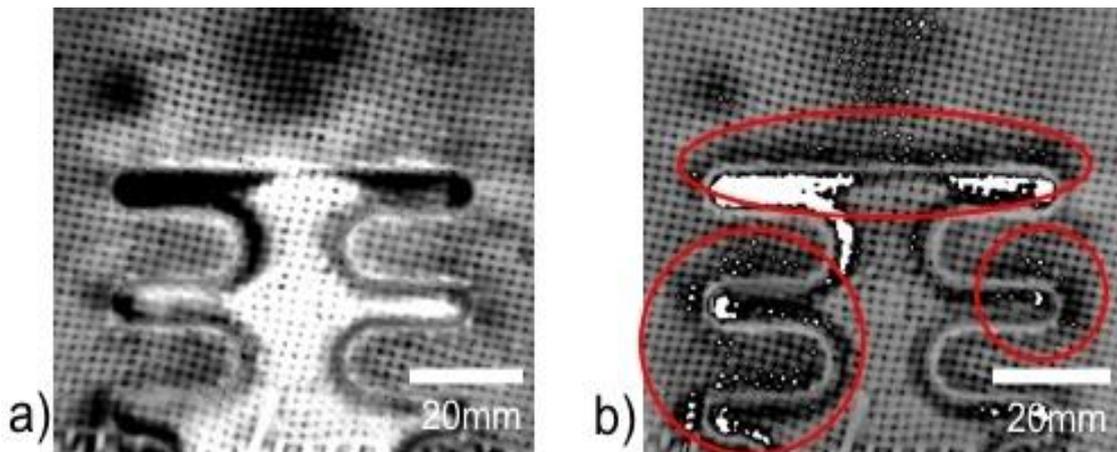


Abb. 50: Amplituden- und Phasenbild der Probe JS4 nach einem Laststeigerungsversuch bei einer Frequenz von 0,2 Hz

Probe A123

Abb. 51 zeigt das Amplituden- und Phasenbild der Probe A123 bei einer Frequenz von 0,2 Hz. Im Gegensatz zum Abkühlbild in Abb. 47 kann man im Amplitudenbild die Fehler an den einzelnen Armen des Einlegers kaum erkennen. Einzig an den beiden linken oberen Armen sind kleine helle Bereiche zu erkennen, die auf diese Fehler in der CFK-Lage hindeuten. Besonders aber lässt sich die Delamination zwischen CFK und Thermoplast erkennen.

Im Phasenbild kann man ebenfalls die Delamination zwischen CFK und Thermoplast in Form eines dunklen Bereichs erkennen. Im Gegensatz zum Amplitudenbild kann im Phasenbild auch die Faserorientierung der obersten CFK-Lage bestimmt werden. Des Weiteren können einige helle Stellen an den linken oberen Armen entdeckt werden. Diese hellen Stellen sind auf Fehler bei der Berechnung des Phasenbildes zurückzuführen und leisten keine Aussage über Fehler in der Probe.

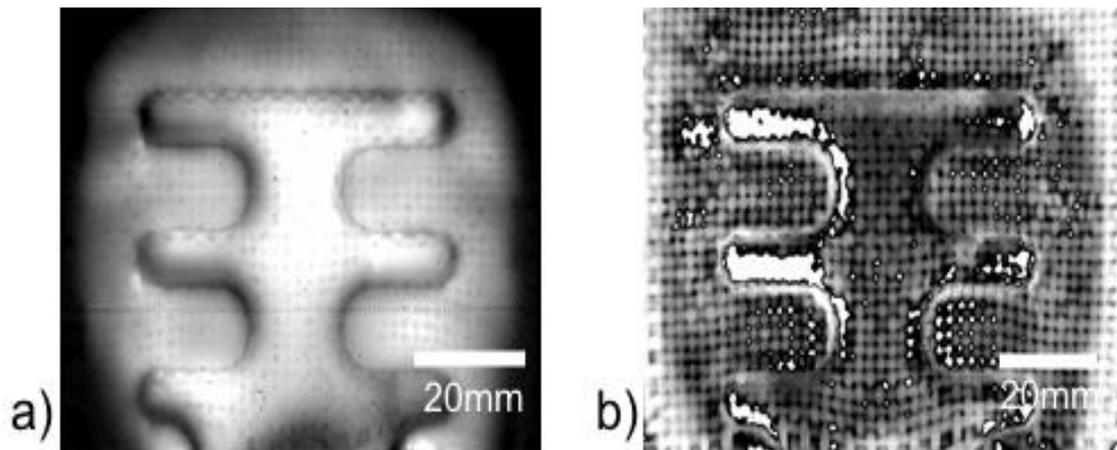


Abb. 51: Amplituden- und Phasenbild der Probe A123 nach einem dynamischen Zugversuch bei einer Frequenz von 0,2 Hz

Die Ergebnisse der Amplituden- und Phasenbilder zeigen, dass durch die Anwendung der Fast Fourier Transformation die Fehler im CFK und an der Grenzfläche im Allgemeinen besser zu erkennen sind. Dabei muss allerdings nach Defektart und nach Höhe des Schädigungsgrades der Probe unterschieden werden. Darüber hinaus können Produktionsfehler detektiert werden, die ohne eine Anwendung der FFT nicht sichtbar wären. Ausgehend von diesen Ergebnissen, lässt sich folglich auch die zweite Hypothese dieser Arbeit bestätigen.

Anregung durch induktive Thermografie

Wie in Kapitel 3 beschrieben, soll neben der Blitzthermografie auch die induktive Thermografie zur Defekt- und Grenzflächencharakterisierung angewendet werden. Dabei werden erneut die Proben FG3-1, JS4 und A123 näher untersucht.

Probe FG3-1

Abb. 52 zeigt das Amplituden- und Phasenbild der Probe FG3-1 nach induktiver Anregung. Im Amplitudenbild lassen sich oberhalb des Einlegers drei helle Bereiche erkennen, die als Fehlstellen interpretiert werden können. Neben diesen künstlich eingebrachten Fehlstellen lassen sich links des Einlegers und oberhalb des unteren Arms helle Stellen detektieren. Da sich die Wirbelstromspule direkt hinter der Probe befindet, deuten diese hellen Bereiche darauf hin, dass die Probe an diesen Stellen dünner ist als an anderen Stellen. Neben den hellen Bereichen befindet sich auch eine dunkle Stelle in der

Mitte des Bildes. Diese auffällige Stelle kann durch die runde Geometrie der Wirbelstromspule erklärt werden. In der Mitte der Spule ist der induzierte Strom gleich null, sodass keine Wärme entsteht. Im Gegensatz zu den Thermografiebildern mit Blitzanregung können rechts neben dem Einleger keine auffälligen Bereiche detektiert werden.

Genau wie das Amplitudenbild zeigt auch das Phasenbild drei Bereiche oberhalb des Einlegers, die als künstliche Fehlstellen gedeutet werden können. Im Gegensatz zum Amplitudenbild zeigt das Phasenbild jedoch keine hellen Stellen links des Einlegers. Dennoch kann man auch im Phasenbild zwei helle Stellen rechts neben dem Einleger erkennen, die auch bereits durch die Blitzanregung deutlich wurden. In der Mitte des Bildes erscheint eine helle Stelle, die, wie im Amplitudenbild auch, durch die Geometrie der Wirbelstromspule erklärt werden kann.

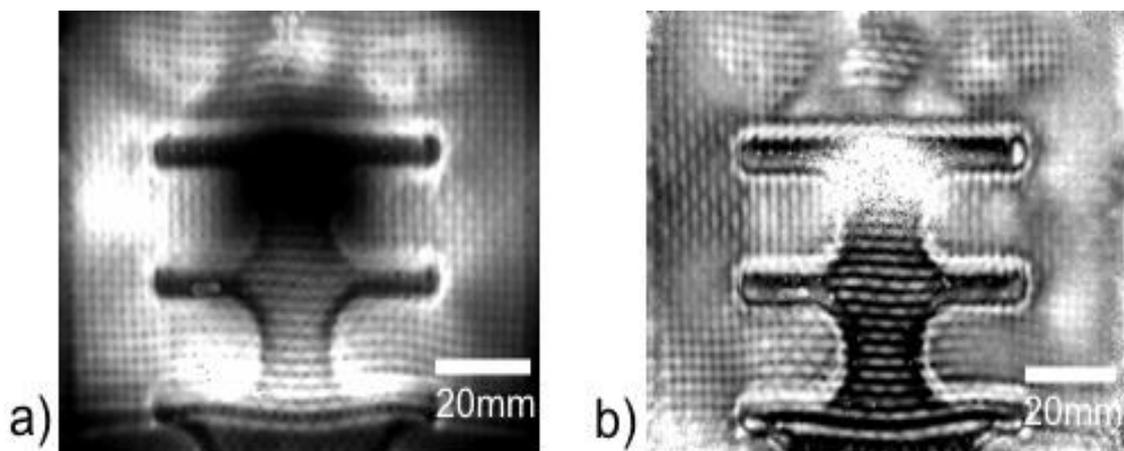


Abb. 52: Probe FG3-1, a) Amplituden- und b) Phasenbild bei einer induktiven Frequenz von 0,2 Hz

Probe JS4

In Abb. 53 ist das induktive Phasenbild der Probe JS4 nach dem Laststeigerungsversuch zu sehen. Auf den ersten Blick sind- analog zur Blitzanregung- die dunklen Stellen oberhalb des Einlegers zu erkennen. Weiterhin ist die Faserausrichtung mit der Fehlstellung von ca. 10° sichtbar. Die Delamination um den Einleger lässt sich leider nur sehr vage in Form von dunklen Bereichen erkennen (siehe rote Markierung). Wie auch in den vorherigen Bildern der induktiven Thermografie befindet sich in der Mitte dieses Bildes ein Bereich,

der aufgrund der Spulengeometrie keine Information bezüglich Defekten in der Probe liefern kann.

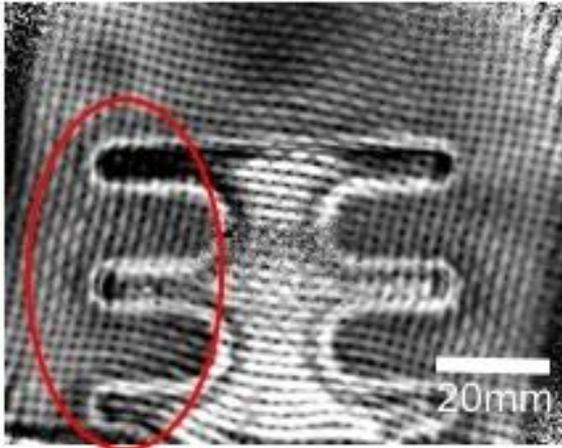


Abb. 53: Induktives Phasenbild der Probe JS4 nach einem Laststeigerungsversuch bei einer Frequenz von 0,2 Hz

Probe A123

Abb. 54 zeigt das induktive Phasenbild der Probe A123 nach einem dynamischen Zugversuch. Neben der Faserorientierung, die bei der induktiven Thermografie grundsätzlich sehr gut zu erkennen ist, lassen sich an den Enden und oberhalb der Arme des Einlegers helle Bereiche detektieren. Diese Bereiche repräsentieren die Delamination um den Einleger. Die große Delamination zwischen CFK und Thermoplast kann allerdings nicht detektiert werden.

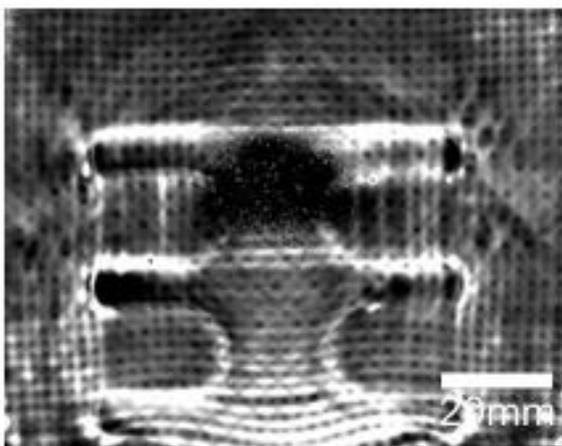


Abb. 54: Induktives Phasenbild der Probe A123 nach einem dynamischen Zugversuch bei einer Frequenz von 0,28 Hz

Durch die Auswertung der Amplituden- und Phasenbilder der induktiven Thermografie wird deutlich, dass die induktive Thermografie zwar sehr gut geeignet ist, um die Faserorientierung der CFK-Komponente zu bestimmen, jedoch bei der Charakterisierung von Delaminationen keinen Mehrwert gegenüber der Blitzanregung bietet. Andere Defekte, wie beispielsweise Fremdkörper, können allerdings gut detektiert werden. Ein weiterer Vorteil der induktiven Thermografie ist, dass die Spule einerseits als Anregung für die aktive Thermografie genutzt werden kann, andererseits aber auch die Möglichkeit besteht, den Infiltrationsvorgang beim RTM-Prozess mithilfe der Spule zu kontrollieren. Im Gegensatz zur Anregung mit Blitz muss bei der induktiven Thermografie außerdem nicht darauf geachtet werden, dass beteiligte oder sogar unbeteiligte Personen durch den hohen Energieausstoß der Blitzlampe zu Schaden kommen.

Anregung durch IR-Arrays

Als dritte Methode wird in dieser Arbeit die Anregung mittels IR-Arrays untersucht. Die Anregung über IR-Arrays ist im Vergleich zur Blitz- oder Wirbelstromanregung materialschonender, da die Oberfläche der Probe während der Anregung weniger stark thermisch belastet wird.

Probe FG3-1

In Abb. 55 ist das Amplituden- und Phasenbild der Probe FG3-1 bei einer Frequenz von 0,2 Hz zu sehen. Das Amplitudenbild zeigt oberhalb des Einlegers helle Bereiche, die die Fremdkörpereinschlüsse repräsentieren. Weiterhin erscheinen zwei helle Bereiche zwischen den Armen links und zwei dunkle Bereiche auf der rechten Seite der Arme. Da bei den bisher verwendeten Anregungsmethoden die hellen Bereiche ebenfalls nur im Amplitudenbild vorkamen, kann davon ausgegangen werden, dass diese hellen Bereiche Oberflächeninhomogenitäten darstellen. Die dunklen Bereiche traten bei der Blitzthermografie sowie der induktiven Thermografie auch im Phasenbild auf, sodass diese als Fehler in der Probe gewertet werden können.

Zur Überprüfung dieser Vermutung kann das Phasenbild herangezogen werden. In diesem sind die hellen Bereiche links des Einlegers kaum noch zu sehen, sodass die Vermutung bezüglich der Oberflächeninhomogenitäten bestätigt werden kann. Da die dunklen Bereiche auch im Phasenbild auftauchen, kann ebenfalls bestätigt werden, dass diese

Stellen wirklich Fehler in der Probe selbst sind. Auch hier können die hellen Bereiche oberhalb des Einlegers detektiert werden. Es kann also festgehalten werden, dass durch die IR-Anregung Fremdkörper- wie Styroporkugeln- detektiert werden können. Neben den künstlich eingebrachten Defekten kann auch bei dieser Anregung die Faserorientierung des CFK bestimmt werden.

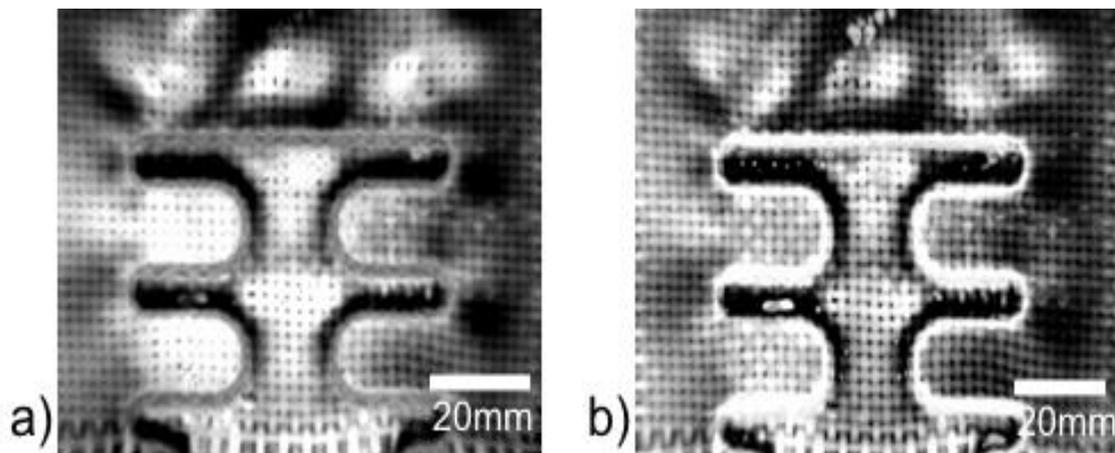


Abb. 55: IR Thermografie der Probe FG3-1 mit Fremdkörpern a) Amplituden- und b) Phasenbild bei einer Frequenz von 0,2 Hz

Probe JS4

In Abb. 56 ist das Phasenbild der Probe JS4 bei einer Frequenz von 0,2 Hz zu sehen. Wie bei den beiden vorherigen Anregungsmethoden sind auch hier zwei dunkle Stellen am oberen Bildrand zu erkennen. Aufgrund der Tatsache, dass diese Bereiche hier zu sehen sind, lässt sich schlussfolgern, dass es sich um Fehler im Aufbau des CFK handeln muss. Im Gegensatz zum Phasenbild der induktiven Anregung (siehe Abb. 53) kann bei der Anregung mit IR-Arrays gut ein dunkler Bereich um die Einlegerarme detektiert werden. Diese dunklen Bereiche stellen eine Delamination an den Einlegerarmen dar, wie sie schon durch die Blitzanregung detektiert wurde. Zusätzlich zur Delamination kann durch die Anregung mittels IR-Arrays auch die Faserorientierung des CFK bestimmt werden.

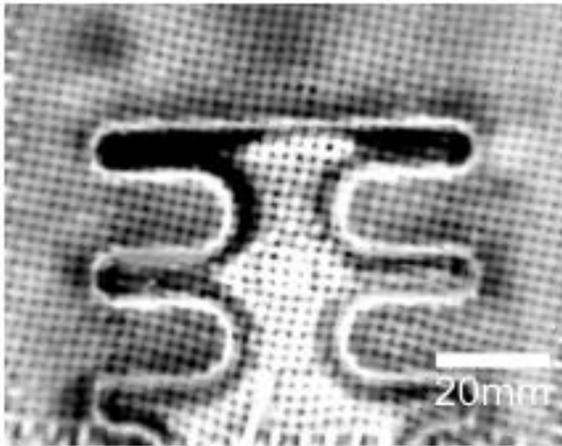


Abb. 56: Phasenbild der Probe JS4 nach Anregung mit IR-Arrays bei einer Frequenz von 0,2 Hz

Probe A123

Abb. 57 zeigt das Amplituden- und Phasenbild von Probe A123 nach Anregung mit IR-Arrays. Im Amplitudenbild sind auf der linken Seite am Ende der Arme helle Stellen zu sehen (siehe rote Markierung). Erneut lassen sich diese Bereiche als Defekte im CFK deuten. Auf der rechten Seite des Einlegers sind ebenfalls helle Bereiche zu erkennen. Diese können entweder als Defekte im Hybrid oder als Oberflächeninhomogenitäten gedeutet werden, jedoch kann eine abschließende Bewertung erst nach Betrachten des Phasenbildes erfolgen. Nach der Auswertung des Phasenbildes wird deutlich, dass es sich bei den genannten Stellen um Oberflächeninhomogenitäten handelt, da diese Bereiche im Phasenbild nicht zu sehen sind. Allerdings kann im Phasenbild ein großer dunkler Bereich um den Einleger detektiert werden. Dieser Bereich repräsentiert die Delamination zwischen CFK und Thermoplast, wie sie auch schon bei der Blitzanregung detektiert werden konnte. Im Gegensatz zum Amplitudenbild kann im Phasenbild auch die Faserorientierung des CFK bestimmt werden.

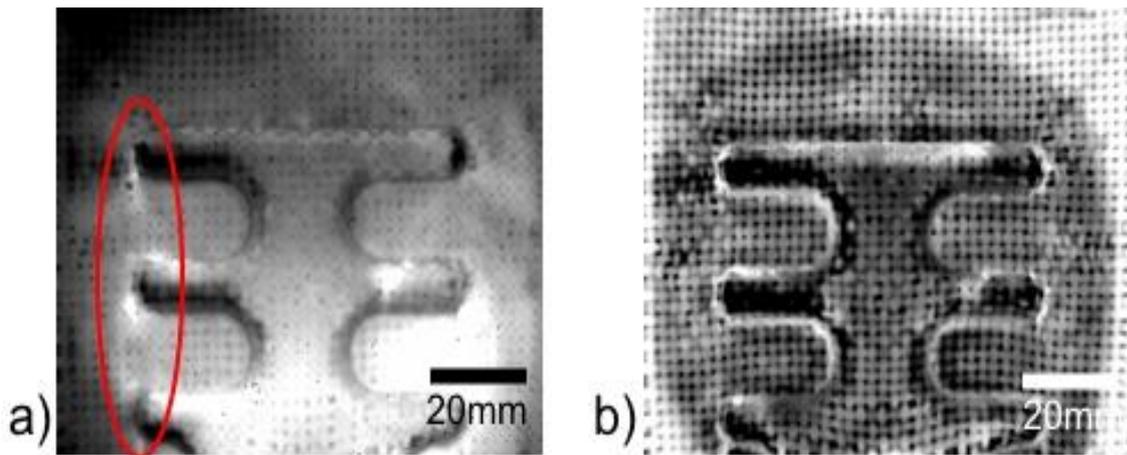


Abb. 57: IR Thermografie der Probe A123 a) Amplituden- und b) Phasenbild bei einer Frequenz von 0,2 Hz

Zusammengefasst liefert die Anregung mittels IR-Arrays sehr gute Ergebnisse hinsichtlich der Charakterisierung von Fremdkörpern und Delaminationen im CFK beziehungsweise Delaminationen an einer Grenzfläche und ist folglich mit der Blitzanregung vergleichbar. Ein Nachteil der Anregung mittels IR-Arrays ist jedoch, dass die Auswertung der Ergebnisse länger dauert, da nicht nur Abkühlbilder sondern Amplituden- und Phasenbilder ausgewertet werden müssen. Um besser nachvollziehen zu können, wann (in welcher Tiefe) welche Defekte auftreten, werden bei der Blitzlichtanregung die Abkühlbilder ausgewertet. Zwar kann die Tiefe der Defekte sehr wohl auch bei den Amplitudenbildern der Anregung mittels IR-Arrays bestimmt werden, jedoch dauert dies im Vergleich ungleich länger. Aus diesem Grund ist die Blitzthermografie der Anregung mit IR-Arrays für schnelle, qualitative Auswertungen vorzuziehen.

Vergleicht man die Anregung mit IR-Arrays mit der induktiven Thermografie, so bietet die erstgenannte Methode deutliche Vorteile. Dies liegt insbesondere daran, dass Delaminationen an der Grenzfläche CFK/Thermoplast von der induktiven Thermografie nicht ausreichend dargestellt werden können. Im Gegensatz dazu sind die Delaminationen in den Amplituden- und Phasenbildern der Anregung mit IR-Arrays zu erkennen.

Um die einzelnen Vorteile der verschiedenen Anregungsmethoden bestmöglich nutzen zu können, werden in Kapitel 4.3.1 die Daten der Anregungsmethoden fusioniert.

Da bei den mechanischen Versuchen oftmals mehr als nur die Grenzfläche zwischen CFK und Thermoplast beschädigt wird und man mit der Thermografie nicht in der Lage ist, die tieferliegende Grenzfläche zwischen Aluminium und Thermoplast zu untersuchen, wird in

Kapitel 4.2.3 mit dem elektromagnetisch induzierten Ultraschall (EMUS) eine Methode angewandt, mit der es gelingt, diese innenliegende Grenzfläche zu charakterisieren. Eine Kombination aus Thermografie und EMUS ermöglicht es also, Defekte im gesamten Hybridverbund zu detektieren.

4.1.2.3 EMUS-Sensoren als Anregungsquelle

In diesem Kapitel wird EMUS als zusätzliche Anregungsmethode für die Thermografie verwendet. Der Einsatz von Ultraschallsensoren als Anregungsquelle für die Thermografie wurde unter anderem schon in [74] und [75] vorgestellt. EMUS-Sensoren als Anregungsquelle hingegen wurden noch nicht als solche verwendet.

Wie auch bei einer regulären EMUS-Messung werden dabei die EMUS-Sensoren von beiden Seiten am Aluminium befestigt und eingeschaltet. Während die Sensoren eingeschaltet sind, nimmt die Thermografiekamera alle 15 Sekunden ein Bild auf, anhand derer mögliche Temperaturänderungen erkannt werden können.

Der Einsatz der EMUS-Sensoren als Anregungsquelle birgt den Vorteil, dass zwei Messungen gleichzeitig durchgeführt werden können. Im Falle der hier charakterisierten Hybridstruktur bedeutet dies, dass beide Grenzflächen zur gleichen Zeit geprüft werden können. Durch die parallele Messung der Grenzflächen lässt sich zeitlich sehr ökonomisch arbeiten. Im Folgenden werden die beiden Proben JS4 und A123 mit EMUS-Sensoren als Anregungsquelle untersucht.

Probe JS4

Abb. 58 a) zeigt die Probe JS4 2,5 min nachdem die EMUS-Sensoren eingeschaltet wurden. Die Struktur des Aluminiemeinlegers ist im Ansatz zu erkennen.

Bild b) zeigt die Probe JS4 12,5 min nachdem die Sensoren eingeschaltet wurden. Die Struktur des Aluminiemeinlegers ist nun besser zu erkennen.

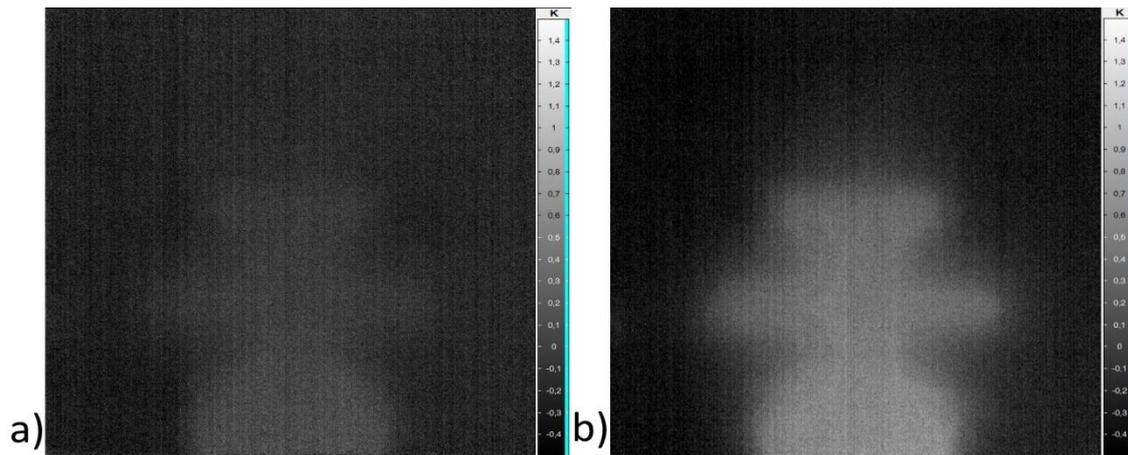


Abb. 58: Anregung der Probe JS4 durch EMUS-Sensoren nach a) 2,5 min und b) 12,5 min

Abb. 59 zeigt den Temperaturverlauf der Probe JS4 von Beginn der Messung bis 12,5 min danach (Bild 50). Mithilfe der Thermografiekamera wurde dazu die Oberflächentemperatur der Probe im Bereich des Einlegers gemessen. Es wurden drei verschiedene Messpunkte festgelegt.

Messpunkt 1 (blaue Linie) befindet sich im unteren Bereich des Aluminiumeinlegers und ist den EMUS-Sensoren somit am nächsten. Punkt 2 (rote Linie) liegt in der Mitte des Einlegers und Punkt 3 (grüne Linie) in Höhe des oberen Arms. Bei dieser Probe ist die Temperatur am unteren Ende am höchsten und am oberen Ende am niedrigsten. Je näher der Messpunkt also an den EMUS-Sensoren liegt, desto wärmer ist der Bereich.

Vergleicht man die Temperaturen am oberen Ende des Aluminiumeinlegers zu Beginn und nach 2,5 min, so wird deutlich, dass die Temperatur um 0,3 K ansteigt. Beim Vergleich mit Bild 50 zeigt sich, dass die Temperatur um weitere 0,7 K angestiegen ist. Dieser moderate Temperaturanstieg zeigt, dass EMUS-Sensoren als Anregungsmethode nur bedingt einsetzbar sind, da der Temperaturanstieg sehr gering ist und die Aufheizung des Materials daher sehr lange dauert.

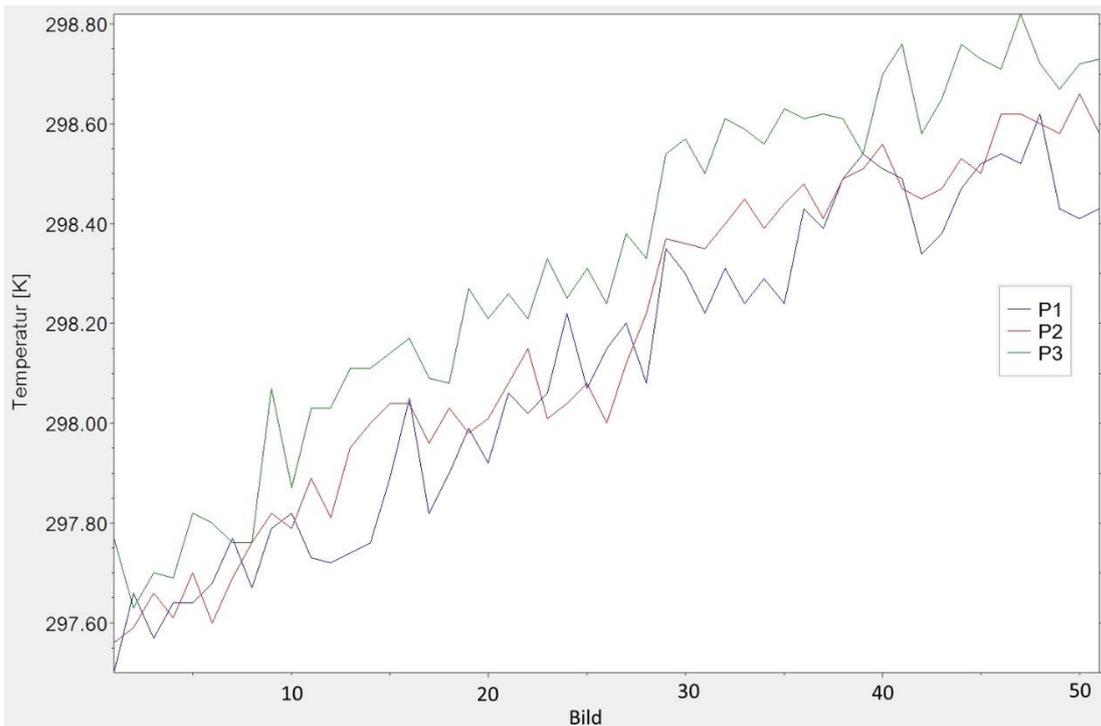


Abb. 59: Temperaturverlauf der Probe JS4 bei Anregung durch EMUS-Sensoren

Probe A123

Abb. 60 zeigt die Probe A123 zu verschiedenen Zeiten nach Einschalten der EMUS-Sensoren. In Bild a), das 2,5 min nach dem Einschalten der Sensoren aufgenommen wurde, ist die Aluminiumstruktur kaum zu erkennen. In Bild b) hingegen, 12,5 min nachdem die Sensoren eingeschaltet wurden, ist die Aluminiumstruktur deutlich zu sehen.

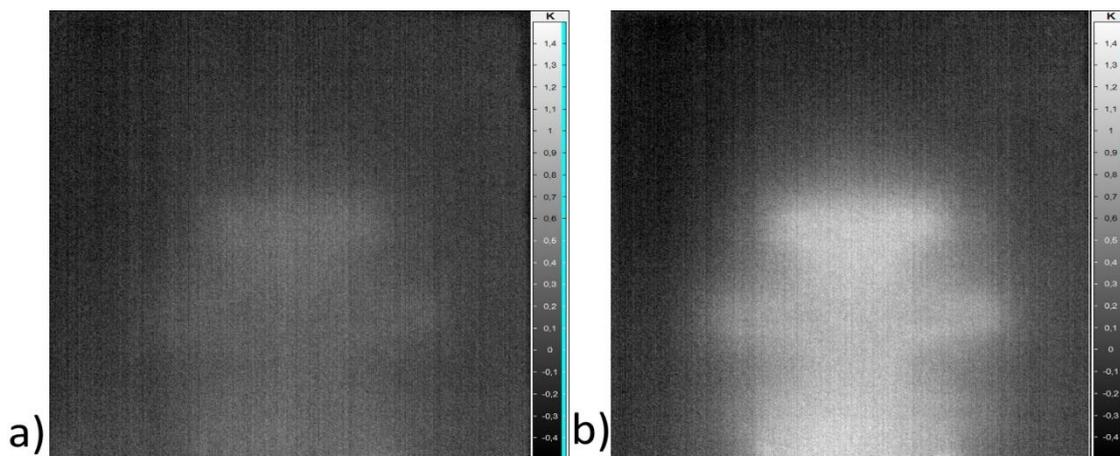


Abb. 60: Anregung der Probe A123 durch EMUS-Sensoren nach a) 2,5 min und b) 12,5 min

Abb. 61 zeigt den Temperaturverlauf der Probe A123. Der Unterschied der Temperatur zu Beginn der Messung und nach 2,5 min liegt bei ca. 0,1 K und ist damit deutlich geringer als bei Probe JS4. Im Vergleich zu Probe JS4 ist die Temperatur bei Probe A123 zwischen Bild 10 und Bild 50 schneller gestiegen. Dafür erreicht die Temperatur von Probe JS4 im betrachteten Zeitintervall insgesamt einen höheren Wert (1 K Temperaturdifferenz). Der gesamte Temperaturanstieg der Probe A123 bis Bild 50 beträgt 0,8 K.

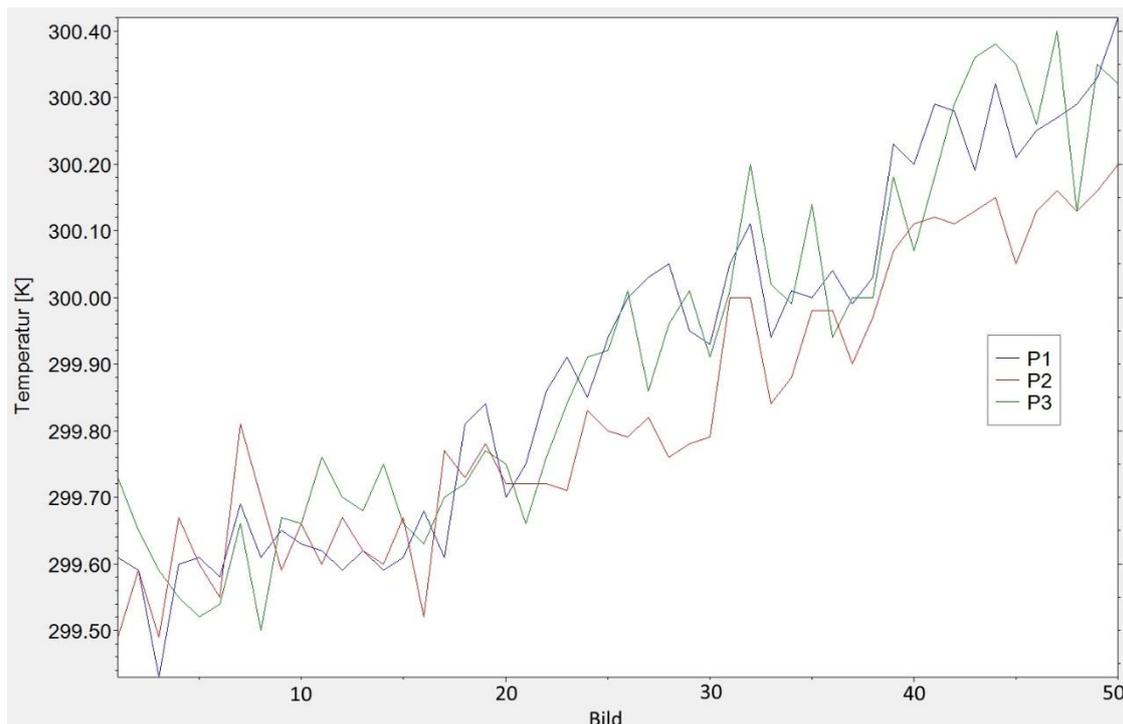


Abb. 61: Temperaturverlauf der Probe A123 bei Anregung durch EMUS-Sensoren

Der Vergleich der Proben zeigt, dass bei einer guten beziehungsweise kaum geschädigten Anbindung die Temperatur konstant ansteigt, wie dies bei Probe JS4 der Fall ist. Dies liegt daran, dass bei intakten Grenzflächen die Wärme durch Wärmeleitung bis an die CFK-Oberfläche geleitet wird. Liegt eine Schädigung einer Grenzfläche wie bei Probe A123 vor, führt dies zu einer sehr kleinen Anbindungsfläche zwischen Aluminium/Thermoplast sowie zwischen Thermoplast/CFK (siehe Abb. 92). Statt durch eine regelmäßige Wärmeleitung wird die Wärme dann an den restlichen intakten Grenzflächen sowie über die Wärmestrahlung des Aluminiums an die CFK-Oberfläche geleitet. Durch den Anteil der Wärmestrahlung verändert sich bei Probe A123 die Temperatur zu Beginn der Messung kaum und steigt auch erst nach längerer Zeit deutlich an. Weitere

Thermografiebilder zur Anregung mit EMUS-Sensoren sind im Anhang (siehe Kapitel 8.2) zu finden.

Zusammengefasst können EMUS-Sensoren also prinzipiell als Anregungsquelle und als Nachweisverfahren für die Qualität der Grenzflächen in einem Hybridbauteil verwendet werden. Der zeitökonomische Vorteil, der durch das gleichzeitige Messen beider Grenzflächen entsteht, wird jedoch dadurch aufgehoben, dass es sehr lange dauert bis eine Messung abgeschlossen ist und somit ein Fazit zum Bauteilzustand gezogen werden kann.

4.1.2.4 Probability of Detection (POD)

In Kapitel 4.1.2.2 wurden zur Charakterisierung von Hybridproben mit Gappingdefekten Thermografiemessungen in verschiedenen Anordnungen durchgeführt. Anhand dieser soll in diesem Kapitel nun eine "Probability of detection" (POD), also die Auffindwahrscheinlichkeit dieser Gappingdefekte bestimmt werden. Für die Berechnung der POD-Kurven wird die Software mh1823 [76] verwendet. Dabei werden detektierte Defekte als „1“ und nicht detektierte Defekte als „0“ ausgedrückt. Laut Annis et al. [77] kann das Verwenden von weniger als 60 Defekten numerisch instabile Situationen, nicht-konvergierende Parameterabschätzungen oder zu große Vertrauensbereiche verursachen. Da die genannten Probleme laut Annis et al. aber nur selten auftreten, wird nachfolgend untersucht, ob bereits 7 Proben mit insgesamt 42 Fehlermerkmalen (Gappingdefekte) ausreichen, um eine Auswertung der Ergebnisse zu ermöglichen. Diese Reduzierung der Defektanzahl führt zu einer Prüfzeitverkürzung und damit zu einer schnelleren Einschätzung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit.

Neben der POD-Kurve werden folgende Werte berechnet: die 50 %ige Wahrscheinlichkeit (a_{50}), die 90 %ige Wahrscheinlichkeit (a_{90}) sowie die 90 %ige Wahrscheinlichkeit mit 95 %igem Vertrauensbereich ($a_{90/95}$) einen Fehler mit einem bestimmten Durchmesser zu detektieren. Laut [78] ist der Wert $a_{90/95}$ unabhängig von der Defektanzahl. Im Folgenden werden ausschließlich die Graphen der berechneten POD vorgestellt. Im Anhang sind die dazugehörigen Thermografiebilder von ausgewählten Proben mit Gappingdefekt als Anschauungsbeispiele zu sehen.

In Kapitel 3.5.4 wurde bereits erläutert, wo genau die verschiedenen Defekte im Hybridverbund liegen. Abb. 62 zeigt eine POD-Kurve der Proben mit Gappingdefekten in der zweiten CFK-Lage. Die Thermografiemessung wurde in Reflexionsanordnung

durchgeführt. Anhand der Legende wird auf den ersten Blick ersichtlich, dass 28 der 42 vorhandenen Gappingdefekte detektiert werden konnten. Des Weiteren hat die POD-Kurve einen charakteristischen Verlauf mit einem normal großen Vertrauensbereich. Dies zeigt, dass die geringere Anzahl an Defekten keinen Einfluss auf die POD-Berechnung hat.

Defekte mit einem Durchmesser von einem Millimeter konnten nicht detektiert werden. Von den Defekten mit zwei Millimeter Durchmesser konnte nur einer detektiert werden, wohingegen von den Defekten mit vier Millimeter Durchmesser nur einer nicht detektiert werden konnte. Die Defekte mit größerem Durchmesser konnten allesamt detektiert werden. Ein Fehler mit einem Durchmesser von 2,799 mm wurde noch mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % detektiert. Ein Fehler mit einem Durchmesser von 4,104 mm konnte noch mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % detektiert werden und ein Fehler mit einem Durchmesser von 6,211 mm konnte mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % und einem gleichzeitigem Vertrauensbereich von 95 % detektiert werden.

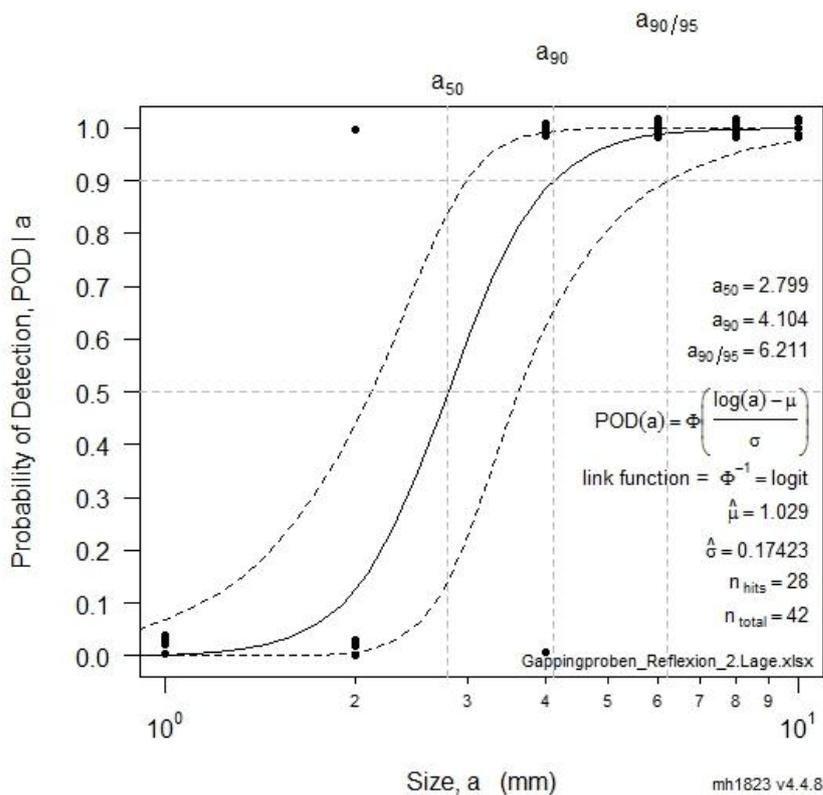


Abb. 62: POD-Kurve der Proben mit Gappingdefekten in der zweiten CFK-Lage und in Reflexionsanordnung

Abb. 63 zeigt eine POD-Kurve der Proben mit Gappingdefekten in der dritten CFK-Lage und in Reflexionsanordnung. Von den 42 betrachteten Defekten konnten nur 19 detektiert

werden. Im Vergleich zur vorherigen Probe (siehe Abb. 62) lässt sich die geringere Anzahl auf die größere Tiefe der dritten Lage zurückführen. Defekte mit einem kleineren Durchmesser als 4 mm konnten nicht detektiert werden. Bei einem Durchmesser von 6 mm konnte die Hälfte der betrachteten Defekte detektiert werden. Alle Defekte mit einem Durchmesser größer als 8 mm konnten komplett detektiert werden. Die Tatsache, dass die Grenze für die Detektion bzw. Nichtdetektion der Defekte bei einem Durchmesser von 6 mm liegt, erklärt den sehr engen Verlauf der POD-Kurve. Durch diesen Verlauf liegen auch die berechneten Werte näher zusammen. So konnte ein Fehler mit einem Durchmesser von 5,918 mm noch mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % detektiert werden. Ein Fehler mit einem Durchmesser von 6,117 mm wurde noch mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % detektiert und ein Fehler mit einem Durchmesser von 6,308 mm konnte mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % und einem gleichzeitigem Vertrauensbereich von 95 % detektiert werden.

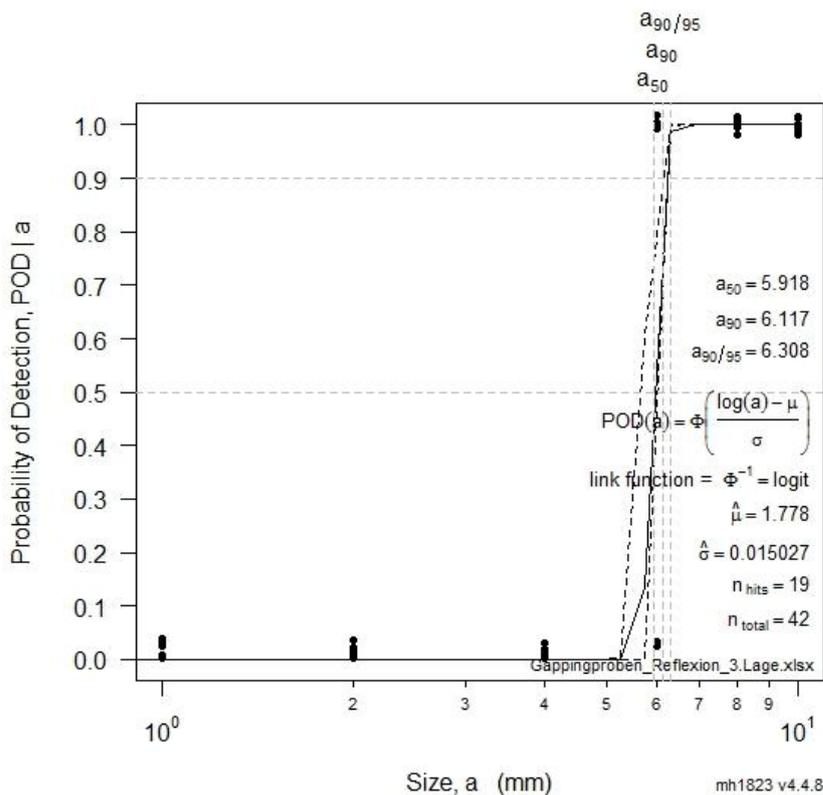


Abb. 63: POD-Kurve der Proben mit Gappingdefekten in der dritten CFK-Lage und in Reflexionsanordnung

Abb. 64 zeigt die POD-Kurve der Proben mit Gappingdefekten in der zweiten Lage bei Durchführung der Messung in Transmissionsanordnung. Von den 42 eingebrachten

Defekten konnten 33 detektiert werden. Dies ist ein erstes Indiz dafür, dass die Durchführung der Messung in Transmissionsanordnung für die Charakterisierung von Proben mit Gappingdefekten geeigneter ist als die Reflexionsanordnung. Bei dieser Anordnung konnte selbst ein Fehler mit einem Durchmesser von 1 mm detektiert werden. Bei einem Durchmesser von 2 mm konnten nur wenige Defekte nicht detektiert werden. Alle Fehler mit einem Durchmesser größer als 4 mm konnten ohne Probleme detektiert werden. So ergeben sich für den Wert a_{50} ein Durchmesser von 1,713 mm und für den Wert a_{90} ein Durchmesser von 2,925 mm. Ein Fehler mit einem Durchmesser von 5,184 mm konnte mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % und einem gleichzeitigen Vertrauensbereich von 95 % detektiert werden.

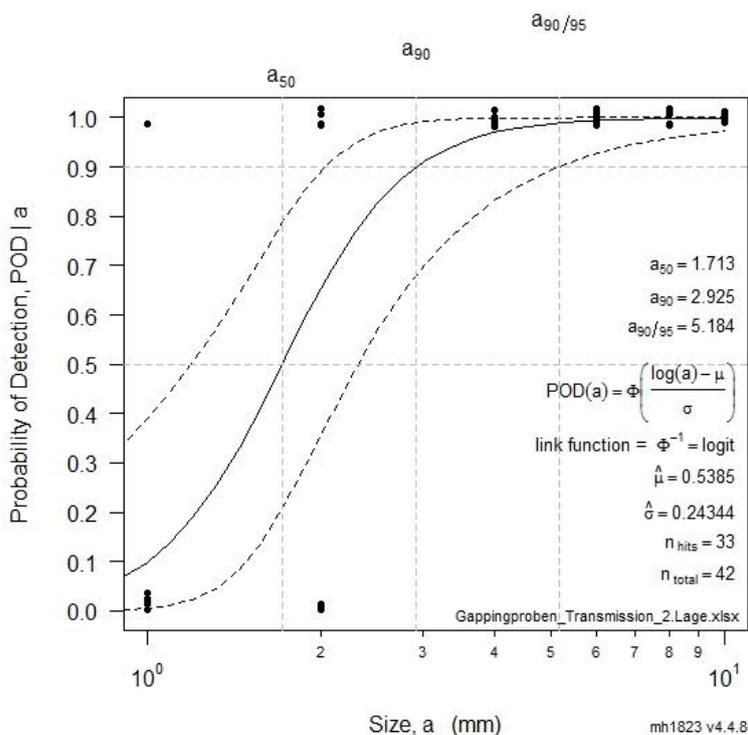


Abb. 64: POD-Kurve der Proben mit Gappingdefekten in der zweiten CFK-Lage und in Transmissionsanordnung

Abb. 65 zeigt die POD-Kurve für die untersuchten Proben mit Gappingdefekten in der dritten Lage bei Transmissionsanordnung. Von 42 betrachteten Defekten konnten 23 detektiert werden. Im Vergleich zur POD-Kurve in Reflexionsanordnung konnten in Transmissionsanordnung mehr Defekte erkannt werden. Gappingdefekte mit einem Durchmesser, der kleiner als 2 mm war, konnten nicht detektiert werden. Bei einem Durchmesser von 4 mm konnten nur zwei Defekte gefunden werden. Alle Defekte mit

einem Durchmesser größer als 6 mm wurden detektiert. Der enge Kurvenverlauf kann genau wie in Abb. 63 dadurch erklärt werden, dass die Grenze von Detektion und Nichtdetektion bei 4 mm Durchmesser liegt. Ein Fehler mit einem Durchmesser von 4,073 mm kann noch mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 %, ein Fehler mit einem Durchmesser von 4,254 mm mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % und ein Fehler mit einem Durchmesser von 4,357 mm mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % und einem gleichzeitigen Vertrauensbereich von 95 % detektiert werden.

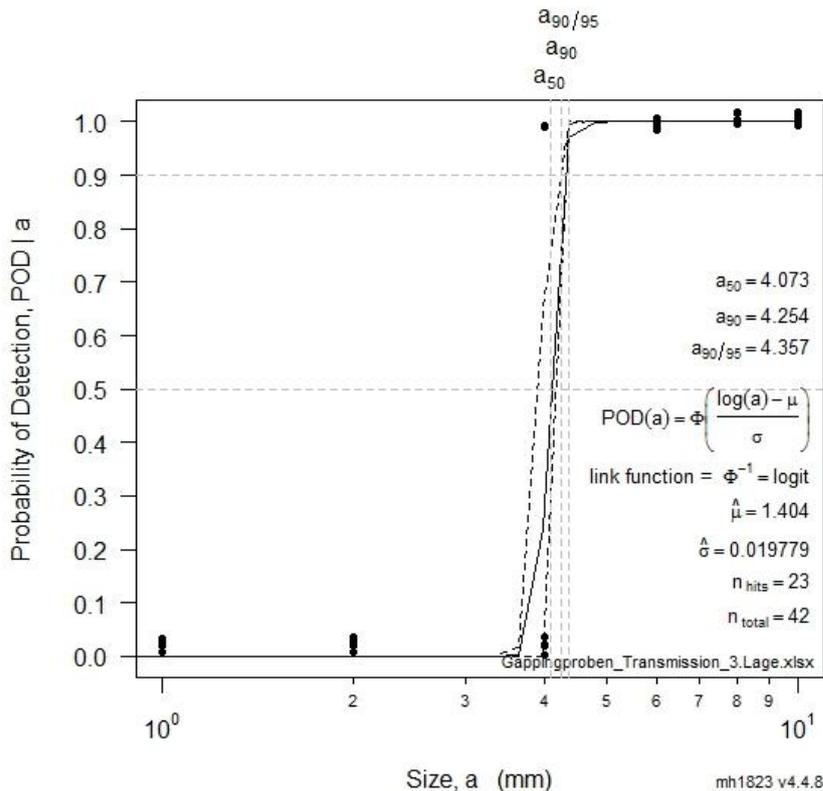


Abb. 65: POD-Kurve der Proben mit Gappingdefekten in der dritten CFK-Lage und in Transmissionsanordnung

In der folgenden Tabelle werden die Werte aller Messungen der Proben mit Gappingdefekten zusammengefasst (siehe Tabelle 2). Anhand der Messergebnisse wird ersichtlich, dass bei den Messungen in Transmissionsanordnung mehr Defekte und insbesondere auch Defekte mit kleineren Durchmessern detektiert werden konnten. Gleichzeitig wird deutlich, dass Defekte in der zweiten Lage besser detektiert werden konnten als Defekte in der tieferen dritten Lage. Obwohl in Kapitel 4.1.2.2 gezeigt wurde, dass mithilfe der FFT Defekte besser detektiert werden können, trifft dies hier nicht in

allen Fällen zu. Lediglich bei den Proben mit Fehlern in der dritten Lage, die in Transmissionsanordnung gemessen wurden, tritt eine Verbesserung mittels FFT ein.

	a_{50} [mm]	$a_{90/95}$ [mm]	Anzahl Defekte	Anzahl Defekte mit FFT
Reflexion zweite Lage	2,80	6,20	28	25
Reflexion dritte Lage	5,92	6,31	19	18
Transmission zweite Lage	1,71	5,18	33	32
Transmission dritte Lage	4,07	4,36	23	28

Tabelle 2: Minimale Fehlergrößen bei unterschiedlichen Auffindwahrscheinlichkeiten (50% bzw. 90%) aller Proben mit unterschiedlichen Anordnungsvarianten und zusätzlicher FFT

Auch Tabelle 3 beinhaltet die Werte aller Messungen von Proben mit Gappingdefekten. Im Gegensatz zu Tabelle 2 wurden hier jedoch die Proben vor den Messungen geschwärzt, um den Reflexionsanteil so gering wie möglich zu halten. Im Anhang (siehe Kapitel 8.3) werden ausgewählte POD-Kurven von geschwärzten und ungeschwärzten Proben verglichen (siehe Abb. 99 und Abb. 100).

Anhand der Werte wird deutlich, dass auch hier bei den Messungen in Transmissionsanordnung mehr Defekte detektiert werden konnten als in Reflexionsanordnung. Durch die zusätzliche Anwendung einer FFT konnten im Gegensatz zu den ungeschwärzten Proben eine verbesserte Detektion der Defekte in allen Anordnungen und Lagen, bis auf Proben mit Defekten in der dritten Lage, die in Transmissionsanordnung gemessen wurden, erzielt werden. Vergleicht man die a_{50} -Werte der geschwärzten und ungeschwärzten Proben, so wird deutlich, dass durch die Schwärzung kleinere Defekte besser detektiert werden konnten. So konnten beispielsweise bei ungeschwärzten Proben, die in Transmissionsanordnung gemessen wurden und deren Fehler sich in der dritten Lage befanden, Defekte mit einem Durchmesser von 4,07 mm mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % detektiert werden. Bei sonst gleichen

Messbedingungen konnten bei einer geschwärzten Probe noch Defekte mit einem Durchmesser von 1,89 mm zu 50 % detektiert werden.

	a_{50} [mm]	$a_{90/95}$ [mm]	Anzahl Defekte	Anzahl Defekte mit FFT
Reflexion zweite Lage	2,12	2,52	29	31
Reflexion dritte Lage	4,88	8,22	21	24
Transmission zweite Lage	1,56	4,52	34	35
Transmission dritte Lage	1,89	5,70	32	30

Tabelle 3: Minimale Fehlergrößen bei unterschiedlichen Auffindwahrscheinlichkeiten (50% bzw. 90%) aller geschwärzten Proben mit unterschiedlichen Anordnungsvarianten und zusätzlicher FFT

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass man bei Messungen in Transmissionsanordnung bessere Ergebnisse erhält als bei Messungen in Reflexionsanordnung. Dies lässt sich dadurch erklären, dass in Transmissionsanordnung der Aufheizvorgang und in Reflexionsanordnung der Abkühlvorgang beobachtet wird. Da die Gappingdefekte im Inneren der Probe liegen, dauert es zu lange bis der Abkühlvorgang beobachtet werden kann. Ein möglicher Wärmestau an diesen Defekten löst sich somit bereits wieder auf, sodass die Gappingdefekte nicht mehr richtig detektiert werden können. Durch das Schwärzen wird der Absorptionsgrad der Proben erhöht, wodurch der Kontrast zwischen fehlerbehafteten und defektfreien Bereichen verbessert wird und dadurch kleinere Fehler besser detektiert werden können.

Schließlich wird ersichtlich, dass 42 Fehlermerkmale ausreichend sind, um eine Aussage über die Auffindwahrscheinlichkeit der einzelnen Defekte treffen zu können, da die zu erwartenden Fehler wie numerisch instabile Situationen, nicht-konvergierende Parameterabschätzungen oder zu große Vertrauensbereiche (gemäß Annis et al. [77]) nicht auftreten.

4.2 EMUS

4.2.1 Sensoranordnung

Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, erfolgt die Messung mit zwei EMUS-Prüfköpfen, einem Sender und einem Empfänger. Dabei ist es denkbar, die Prüfköpfe hintereinander (siehe Abb. 66) oder aber auf den gegenüberliegenden Seiten des Prüfkörpers (siehe Abb. 67) zu positionieren. Um zu untersuchen, ob die Positionierung der Prüfköpfe einen Einfluss auf die Charakterisierung hat, werden zunächst beide Anordnungsmöglichkeiten an einer einfachen rechteckigen Aluminiumprobe ohne CFK-Komponente (siehe Abb. 29) getestet.

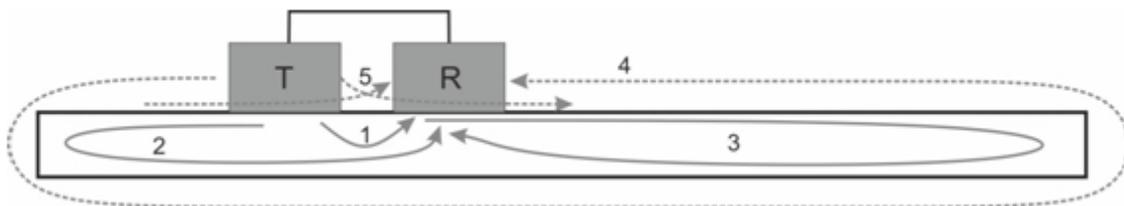


Abb. 66: Positionierung der Prüfköpfe (T: Sender; R: Empfänger) hintereinander

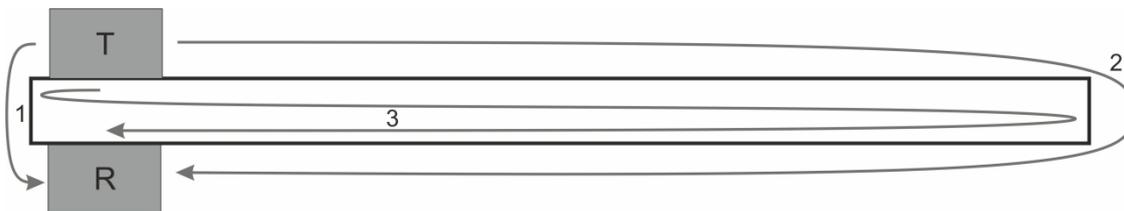


Abb. 67: Positionierung der Prüfköpfe (T: Sender; R: Empfänger) auf gegenüberliegenden Seiten

Für die Bestimmung der Laufzeit der induzierten Wellen sowie deren Reflexionsort wird Gleichung (35) angewendet. Dabei beträgt die Geschwindigkeit für symmetrische SH-Wellen 3150 ms^{-1} und für asymmetrische SH-Wellen 2740 ms^{-1} (siehe Kapitel 3.2.2).

$$s = v \cdot t \quad (35)$$

mit s : zurückgelegte Strecke der SH-Wellen, v : Geschwindigkeit der SH-Wellen,
 t : Zeitpunkt der Amplituden

Die Signaltbilder der Ultraschallmessungen werden als A-Bild dargestellt, da man auf diesen Unterschiede in den Amplituden besser erkennen kann als auf HF-Bildern. Darüber hinaus ist man mit den erzeugten A-Bildern ebenso in der Lage, die Laufzeit anzugeben.

Abb. 68 zeigt das Signalbild bei der Positionierung der Prüfköpfe hintereinander. Analog zu den Ultraschallwegen in Kapitel 3.2 sind den einzelnen Signalpeaks Nummern zugeordnet. Peak 1 und 2 treten nach $12,5 \mu\text{s}$ beziehungsweise $25 \mu\text{s}$ auf. Der erste Peak repräsentiert den Weg zwischen beiden Prüfköpfen, der zweite Peak den Weg des Ultraschallsignals nach der Reflexion am kurzen Ende der Probe. Peak 3a tritt nach $65 \mu\text{s}$ auf und ist das Signal für die Reflexion am fernen Ende. Peak 4a hingegen, welcher nach $75 \mu\text{s}$ erscheint, stellt den Weg zwischen Sender und Empfänger mit komplettem Umlauf, beginnend am kurzen Ende, dar. Korrespondierend dazu steht Peak 5a ($99 \mu\text{s}$) für den Weg von Sender zu Empfänger mit komplettem Umlauf, beginnend am fernen Ende. Genau wie der zweite Peak repräsentiert Peak 6a ($111 \mu\text{s}$) den Weg des Ultraschallsignals nach der Reflexion am kurzen Ende mit zusätzlich einem kompletten Umlauf um die Probe. Neben den Peaks, die den Zusatz "a" tragen und die symmetrischen Moden repräsentieren, gibt es Peaks, die um den Buchstaben "b" erweitert wurden. Diese repräsentieren die asymmetrischen Moden. Da asymmetrische Moden mit einer geringeren Geschwindigkeit als symmetrische Moden verlaufen, erscheinen diese Peaks zu einem späteren Zeitpunkt als die korrespondierenden symmetrischen Peaks. Aufgrund dieser zeitlichen Verschiebung können symmetrische und asymmetrische Peaks unterschiedlicher Schallwege zur gleichen Zeit auftreten (siehe Peak 3b/4a).

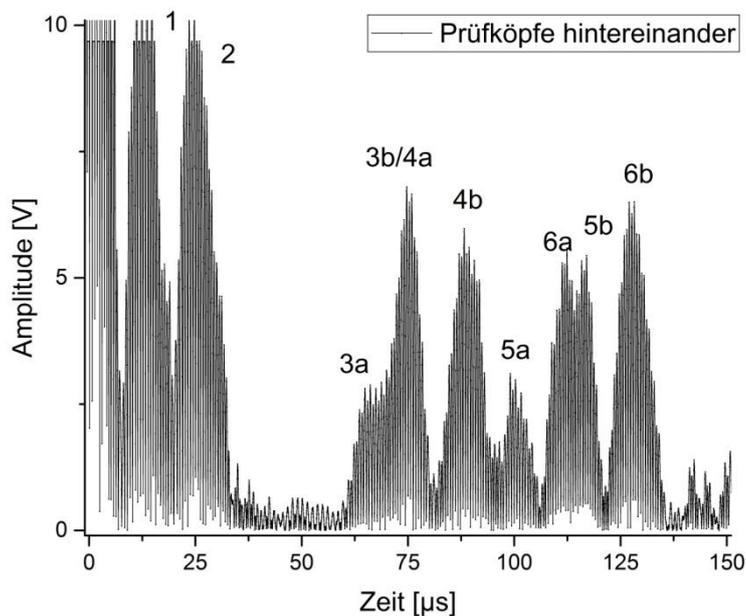


Abb. 68: Signalbild bei Positionierung der Prüfköpfe hintereinander

Analog zu Abb. 68 erfolgt in Abb. 69 die Identifizierung der Signalpeaks bei gegenüberliegender Anordnung der Prüfköpfe. Der erste Peak tritt nach $14\ \mu\text{s}$ auf und repräsentiert das Signal zwischen Sender und Empfänger. Peak 2a, der nach $77\ \mu\text{s}$ erscheint, stellt den Weg des Ultraschallsignals, das am fernen Ende reflektiert wird, dar. Peak 3a ($90,5\ \mu\text{s}$) ist das Signal für den Schallweg über das kurze und das ferne Ende. Peak 4a ($103\ \mu\text{s}$) repräsentiert das reflektierte Signal vom kurzen Ende über das ferne Ende wieder hin zum kurzen Ende und von dort zum Empfänger. Wie bereits in Abb. 68 treten auch hier asymmetrische Signalpeaks auf.

Zusätzlich zu den symmetrischen und asymmetrischen Signalpeaks tritt ein weiterer Peak auf, der mit dem Buchstaben "m" ($84\ \mu\text{s}$) gekennzeichnet ist. Dieser Peak ist entweder durch Interferenzen der Ultraschallwellen zu erklären oder aber durch eine sogenannte Modenkonversion, bei der sich eine symmetrisch verlaufende Ultraschallwelle in eine asymmetrische umwandelt.

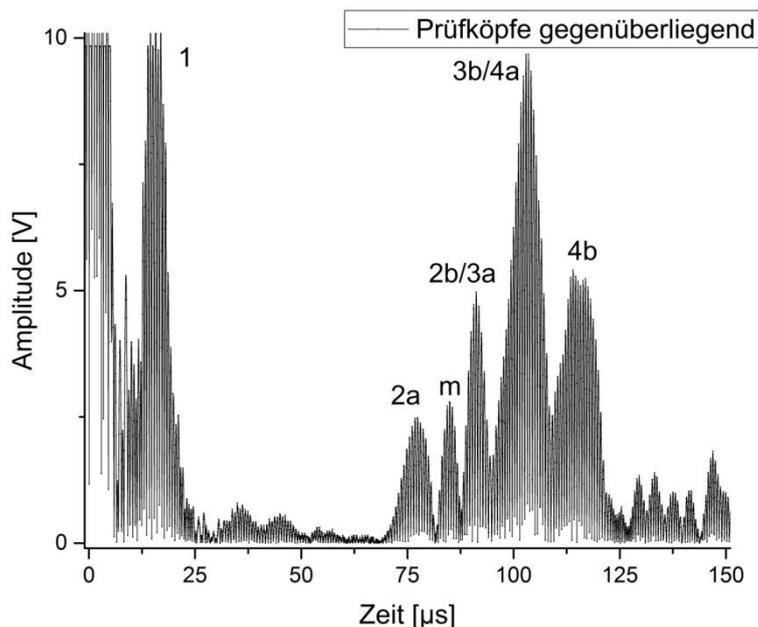


Abb. 69: Signalbild bei Positionierung der Prüfköpfe auf gegenüberliegenden Seiten

Durch eine unterschiedliche Prüfkopfpositionierung erhält man also unterschiedliche Signalpeaks. Vergleicht man nun die beiden Signalbilder miteinander, so ist das Fehlen des zweiten Peaks in Abb. 69 am auffälligsten. Dies ist damit zu erklären, dass die Reflexion des Signals am kurzen Ende und das Signal zwischen Sender und Empfänger genau gleich

sind und folglich statt zwei Peaks nur einer entsteht. Ein weiterer Unterschied zwischen beiden Anordnungsmöglichkeiten ist, dass bei der gegenüberliegenden Anordnung der Prüfköpfe weniger Signalpeaks erscheinen. Dies liegt daran, dass alle Signalpeaks, die mit der Reflexion des Signals am kurzen Ende zusammenhängen, wegfallen beziehungsweise mit anderen Schallwegen zusammenliegen. Dies ist auch der Grund dafür, dass die Signalpeaks in Abb. 69 größer sind.

Trotz der Unterschiede in den Signalbildern lässt sich abschließend sagen, dass alle Peaks der Signalbilder zugeordnet werden können und somit die Grenzfläche am Aluminium unabhängig von der Prüfkopfanzordnung vollends mit EMUS charakterisiert werden kann.

4.2.2 Verschiedene Prüfköpfe

Neben der Möglichkeit die Anordnung der Prüfköpfe zu variieren, ist es außerdem möglich, verschiedene Prüfköpfe einzusetzen. So können die Messungen an dieser Stelle mit Prüfköpfen mit einer Wellenlänge von 4 mm und einer Frequenz von 800 kHz oder mit Prüfköpfen mit einer Wellenlänge von 3 mm und einer Frequenz von 1 MHz durchgeführt werden.

Abb. 70 zeigt die Signalamplituden von Prüfköpfen mit 3 mm bzw. 4 mm Wellenlänge. Die Signalamplituden des 4 mm Prüfkopfes entsprechen denen aus Abb. 68. Zur besseren Übersicht werden die Peaks der Signalamplituden der 4 mm-Prüfköpfe in roter Farbe und die Peaks der Signalamplituden der 3 mm-Prüfköpfe in schwarzer Farbe dargestellt.

Obwohl beide Prüfkopfvarianten in derselben Anordnung an der Probe angebracht sind, kann man sehen, dass sich die Signalamplituden unterscheiden. Dies liegt einerseits daran, dass die 3 mm-Prüfköpfe kleiner sind und so enger zusammenliegen. Andererseits können laut Dispersionsdiagramm bei der Verwendung der 3 mm-Prüfköpfe Moden höherer Ordnung entstehen und somit mehr Amplituden, die sich zudem überlagern. Das Signal der 3 mm-Prüfköpfe zwischen Sender und Empfänger ist nicht vom Anregungsimpuls zu unterscheiden (Peak 1, 9 μ s). Peak 2 (18 μ s) zeigt die Reflexion des Signals am kurzen Ende. Im Vergleich zum gleichen Peak der 4 mm-Prüfköpfe ist dieser viel kleiner und erscheint zu einem früheren Zeitpunkt. Zwischen Peak 2 und 3 kann sehr viel Rauschen beobachtet werden. Ab Peak 3 (79 μ s) können die nachfolgenden Peaks nicht mehr richtig zugeordnet werden, da diese zu nah beieinanderliegen. Im Vergleich zu den Peaks der

4 mm-Prüfköpfe sind diese auch kleiner. Ab Peak 7 (105 μ s) erscheinen nur noch kleine Peaks, die ebenfalls nicht mehr zugeordnet werden können.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass die Peaks der 3 mm-Prüfköpfe sehr ungünstig für eine zweifelsfreie Bestimmung der Reflexionen sowie möglicher Defekte liegen. Des Weiteren sind die Signalamplituden auch kleiner und können so potenziell nicht vom Untergrundrauschen unterschieden werden. Ein weiterer Punkt, der gegen die Verwendung der 3 mm-Prüfköpfe spricht, wird in [40] mit der mangelnden Reproduzierbarkeit der Messungen begründet. Aus diesen Gründen werden in der vorliegenden Arbeit für weitere Messungen 4 mm-Prüfköpfe verwendet.

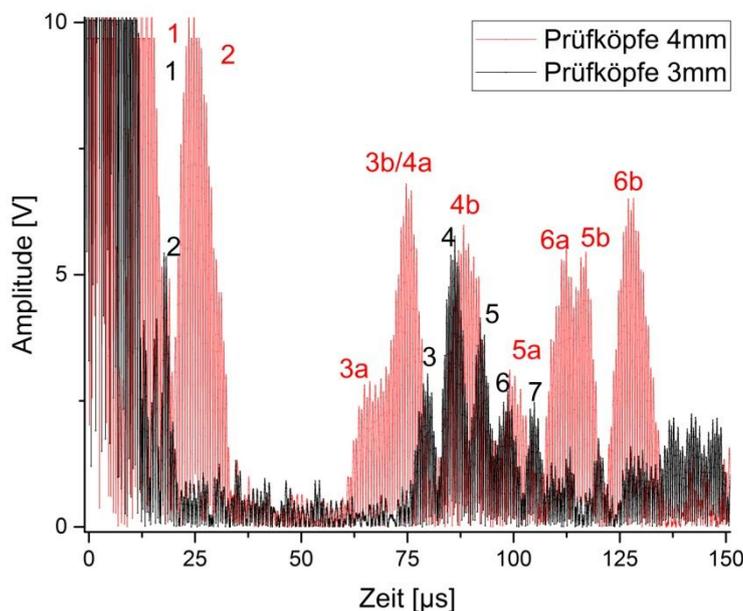


Abb. 70: Vergleich von Prüfköpfen mit 3 mm bzw. 4 mm Wellenlänge

4.2.3 Grenzflächenuntersuchung an Metall-CFK-Hybridstrukturen

Um die Grenzflächen der Metall-CFK-Hybridstruktur untersuchen zu können, müssen zunächst Vorüberlegungen getätigt werden. Wie in Kapitel 4.1.2.3 bereits gezeigt wurde, erwärmt sich der Thermoplast beim Einsatz der EMUS-Sensoren ab einer Zeit von ca. 2 min. Da die einzelnen Messungen an den Hybridproben kürzer sind, lässt sich vermuten, dass die Erwärmung des Thermoplasts nicht während der Messungen eintritt. Um dennoch sicher zu gehen, dass eine mögliche Erwärmung des Thermoplasts keine

Auswirkungen auf die Signalamplituden hat, wird in Abb. 71 ein Vergleich der Ultraschallmessungen zu verschiedenen Zeiten angestellt.

Der schwarze Kurvenverlauf zeigt die Signalamplituden unmittelbar nach Beginn der Messung und die rote Kurve stellt die Signalamplituden nach einer Messzeit von 12,5 min dar. Auf dem Bild ist deutlich zu erkennen, dass beide Kurven kongruent verlaufen. Daraus lässt sich schließen, dass die Eigenerwärmung der EMUS-Sensoren und damit einhergehend die Erwärmung der Probe keinen Einfluss auf die Signalamplituden der EMUS-Messung hat.

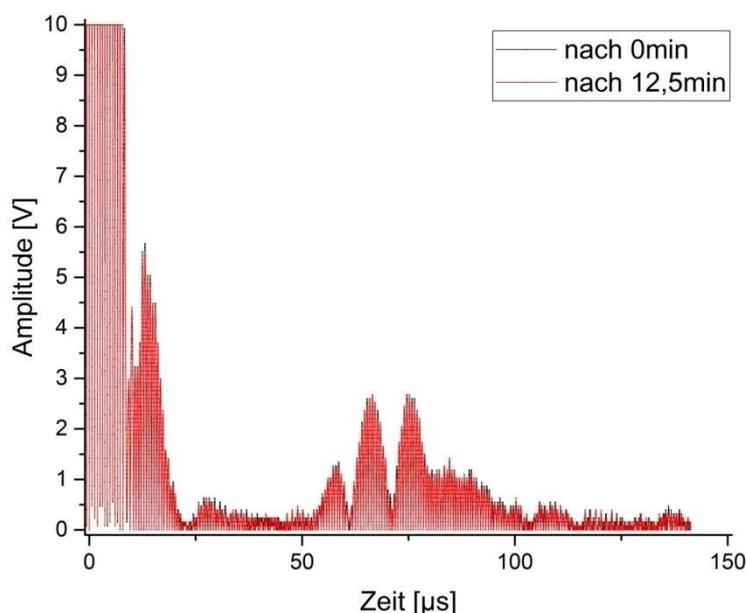


Abb. 71: Vergleich der Signalamplituden nach 0 min und 12,5 min

Abb. 72 zeigt den Vergleich der Signalamplituden zweier Proben, die dieselbe Aluminiumgeometrie besitzen. Die Proben unterscheiden sich lediglich darin, dass eine Probe mit Thermoplast umspritzt wurde (siehe schwarze Kurve), die andere hingegen nicht (siehe rote Kurve) (siehe Abb. 30). Laut Quirin [41] sollte die Prüfung der beiden Proben verschiedene Signalamplituden zeigen. Für die Signalamplituden der Probe ohne Thermoplast lassen sich einzelne Amplituden unterscheiden. Im Gegensatz dazu unterscheiden sich die Signalamplituden der Probe, die mit einem Thermoplast umspritzt wurde (siehe schwarze Kurve), erheblich. So erscheint Peak 1 (13 µs) noch bei beiden Proben gleich, jedoch lässt sich bei der Probe mit Thermoplast danach keine

Signalamplitude mehr messen. Peak 1 stellt dabei das Signal zwischen den beiden Prüfköpfen dar und ist unabhängig von der Verwendung eines Thermoplasts. Dies zeigt, dass durch den Thermoplast die Ultraschallwellen gänzlich an der Grenzfläche CFK/Thermoplast gedämpft werden, was das Ergebnis aus [41] bestätigt. Ausgehend von dieser Erkenntnis, lässt sich die Hypothese bestätigen, dass der Zustand der Grenzfläche CFK/Thermoplast einer Probe vollständig mit EMUS charakterisiert werden kann.

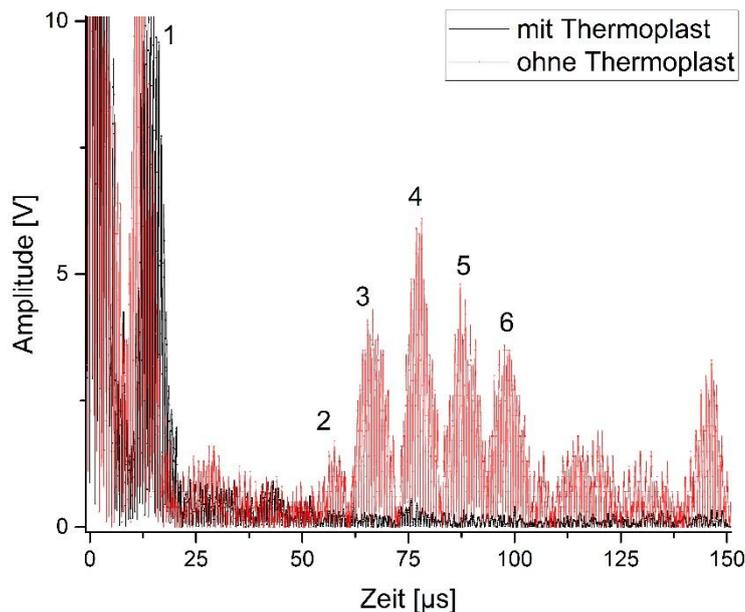


Abb. 72: Vergleich von Proben mit und ohne Thermoplast

In Kapitel 4.1.2.2 wurde neben Thermografiebildern von fehlerfreien Hybridproben auch gezeigt, welchen Einfluss eine Delamination der CFK-Komponente vom Thermoplast hat. Analog zu den Thermografiemessungen werden nun die Proben A80, A92, JS4 und A123 mit EMUS auf Grenzflächendefekte untersucht. Um ein besseres Verständnis für die gemessenen EMUS-Signalamplituden zu bekommen, sind in Abb. 73 Schadensbilder der vier untersuchten Proben zu sehen. Dabei wird der Fokus auf den Bereich der Probe gelegt, an dem der Thermoplast sowie die CFK-Komponente auf dem Aluminium aufliegen. Das erste Bild zeigt die Probe JS4. Es ist zu erkennen, dass die Anbindung des CFK und des Thermoplasts an das Aluminium sehr gut ist. Das zweite Bild zeigt Probe A92. Bei dieser Probe sind leichte Ablösungen des CFK vom Thermoplast zu erkennen. Der Thermoplast hingegen zeigt immer noch eine gute Anbindung an das Aluminium (siehe rote

Markierung). Unten links ist ein Bild der Probe A80 zu sehen. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die CFK-Komponente vom Thermoplast abgelöst hat. Weiterhin wird deutlich, dass der Thermoplast immer noch eine gute Anbindung an das Aluminium hat. Das Bild unten rechts zeigt Probe A123. Bei dieser Probe sieht man sehr gut, dass sich sowohl die CFK-Komponente als auch der Thermoplast vom Aluminium abgelöst hat.

Vergleicht man nun die Thermografiebilder dieser vier Proben miteinander (siehe Abb. 46 für Probe JS4, Abb. 47 für Probe A123 und Abb. 48 für Proben A80 und A92), so ist zu erkennen, dass die Delamination an der Grenzfläche zwischen CFK und Thermoplast für die beiden Proben JS4 und A80 am geringsten ausfällt. Die Delamination für die Proben A92 und A123 hingegen fällt sehr stark aus. Vergleicht man die Thermografiebilder mit Abb. 73, so wird deutlich, dass die Thermografiebilder der Proben JS4 und A123 in ihrer Ausprägung wie erwartet ausgefallen sind. Lediglich die Thermografiebilder der Proben A80 und A92 zeigen ein umgekehrtes Schadensbild als anhand ihrer Bilder zu erwarten war. Dies lässt sich damit erklären, dass in Abb. 73 nur der Bereich gezeigt wird, der sich direkt am Anfang der Fugestelle befindet, wohingegen die Thermografiebilder den kompletten Bereich des Einlegers abbilden.

In einem nächsten Schritt wird nun die tieferliegende Grenzfläche zwischen Thermoplast und Aluminium charakterisiert und mit den Bilder aus Abb. 73 verglichen.

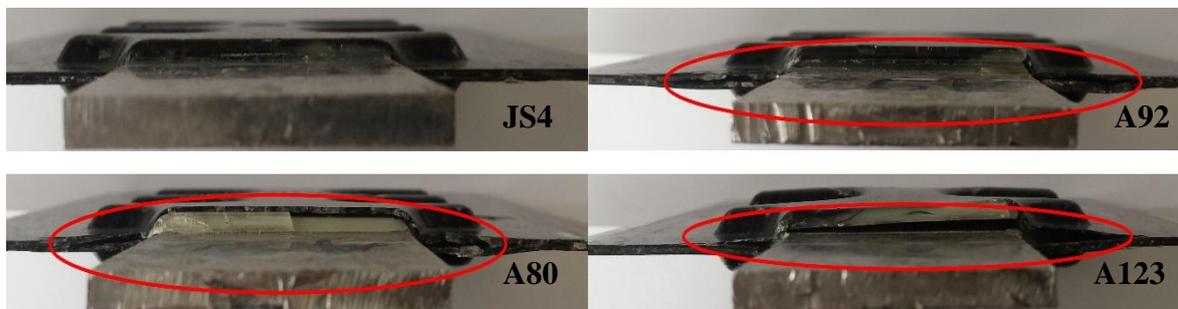


Abb. 73: Vergleich der Schadensbilder am Anfang der Fugestelle der Proben JS4, A92, A80 und A123

Abb. 74 zeigt die Signalamplituden einer defektfreien Probe (siehe schwarze Kurve) und der Probe JS4 (siehe rote Kurve). Mit Blick auf Abb. 46 sowie Abb. 73 ist bei Probe JS4 kein Ausschlag der EMUS-Signale zu erwarten, da die aufgezeichnete Delamination sehr gering war und zudem an der Grenzfläche zwischen CFK und Thermoplast erschien. Entgegen der Erwartung erscheinen jedoch im Bereich der Peaks 2 und 3 ($57 \mu\text{s}$ und $67 \mu\text{s}$)

kleine Signale. Dies weist darauf hin, dass trotz einer nur geringen Ausprägung der Delamination an der Grenzfläche zwischen CFK und Thermoplast und einer sonst augenscheinlich defektfreien Probe, die Grenzfläche zwischen Aluminium und Thermoplast defekt sein muss.

Aus diesem Grund ist die Charakterisierung mittels EMUS sehr wichtig. Durch dieses Vorgehen können Proben, die einer eventuell nur kurzzeitigen oder nur mit geringer Kraft erfolgten Belastung ausgesetzt waren, auf Grenzflächendefekte hin untersucht werden. Auch mögliche Schäden an der Grenzfläche, die während der Produktion entstehen können, können durch die EMUS-Messung entweder bestätigt oder ausgeschlossen werden.

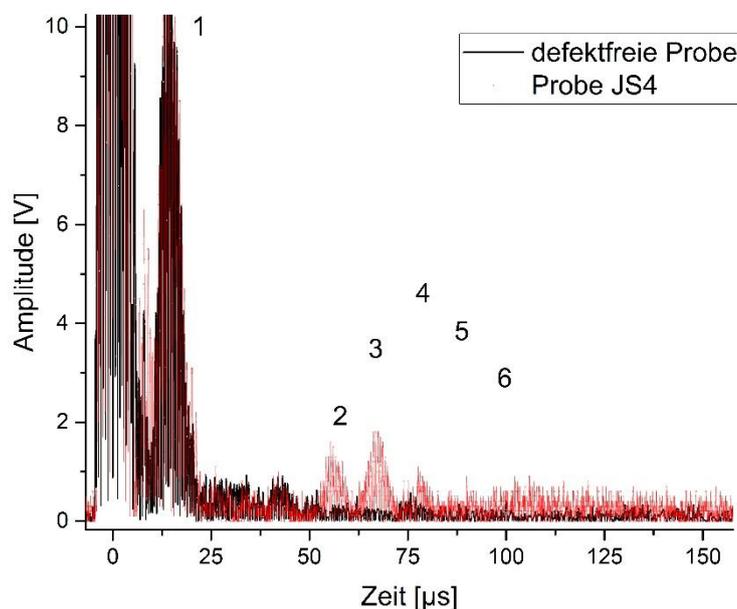


Abb. 74: Vergleich der Probe JS4 mit einer defektfreien Probe

In Abb. 75 werden neben den Signalamplituden einer defektfreien Probe (siehe blaue Kurve) und der Probe JS4 (siehe graue Kurve) auch die Amplituden der Probe A123 (siehe rote Kurve) abgebildet. Analog zum Vergleich der Thermografiebilder beziehungsweise der Schadensbilder aus Abb. 73 wird sofort ersichtlich, dass sich die fortgeschrittene Schädigung der Probe A123 auch in den Signalamplituden zeigt. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Thermografiebilder die Schädigung an der oberflächennahen Grenzfläche zeigen, wohingegen die EMUS-Messungen die innenliegende Grenzfläche

charakterisieren. Folglich lässt sich mittels EMUS-Messungen zeigen, dass die Grenzfläche zwischen Aluminium und Thermoplast ebenfalls große Schädigungen aufweist. Im Vergleich zu Probe JS4 ist die Schädigung an dieser Grenzfläche jedoch stärker ausgeprägt.

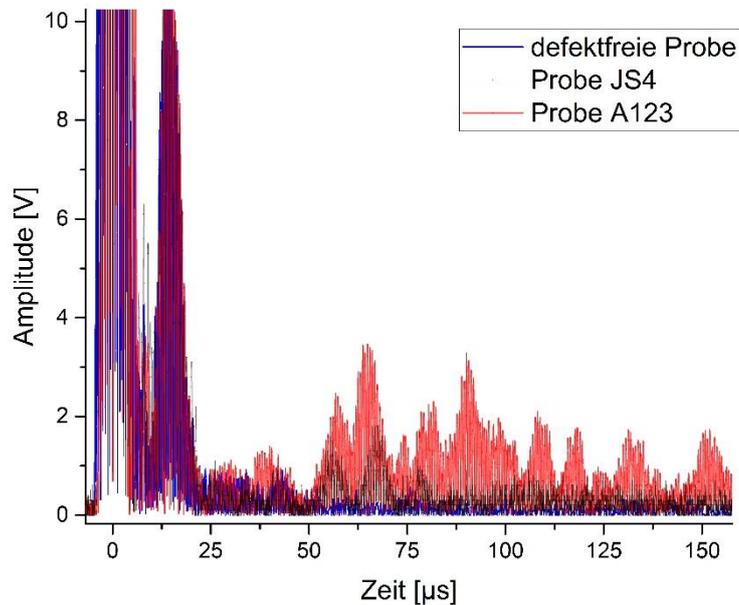


Abb. 75: Vergleich der Proben JS4 und A123 mit einer defektfreien Probe

Abb. 76 zeigt die Signalamplituden der Proben A80 (siehe schwarze Kurve) und A92 (siehe rote Kurve). Die Thermografiebilder beider Proben (siehe Abb. 48) haben gezeigt, dass die Proben A80 und A92 ähnliche Schadensbilder an der Grenzfläche zwischen CFK und Thermoplast aufweisen. Dies wurde durch den Vergleich der Bilder in Abb. 73 bestätigt. Da diese Bilder keine Ablösung des Thermoplasts vom Aluminium zeigen, kann man davon ausgehend die Hypothese aufstellen, dass die Signalamplituden der EMUS-Messungen ähnlich aussehen müssen. Betrachtet man allerdings die Signalamplituden beider Proben, stellt man fest, dass diese unterschiedlich sind. Die Signalamplitude der Probe A80 ist dabei geringer als die der Probe A92. Dies spricht für eine geringere Schädigung der Grenzfläche der Probe A80.

Der Vergleich der Proben zeigt, dass trotz ähnlicher Schadensbilder beziehungsweise Thermografiebilder keine Aussage über die tieferliegende Grenzfläche ohne eine EMUS-Messung getätigt werden kann.

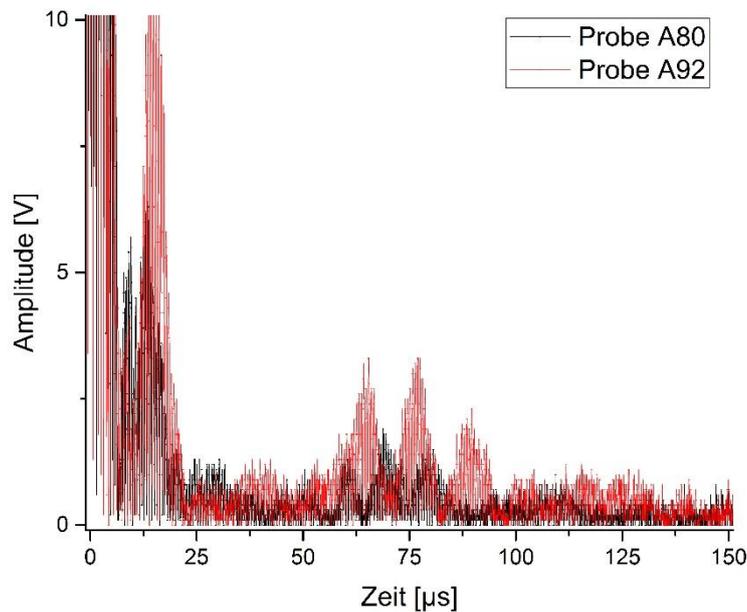


Abb. 76: Vergleich der Proben A80 und A92

Anhand der Proben A80, A92, A123 und JS4 konnte gezeigt werden, dass ein Vergleich der Bilder der Fügestellen nicht ausreicht, um eine Aussage über den Schädigungsgrad der Proben tätigen zu können. Erst durch den Vergleich der Thermografiebilder kann eine erste Einschätzung der tatsächlichen Schädigung gegeben werden. Jedoch kann durch die Thermografie keine Aussage über die tieferliegende Grenzfläche getroffen werden. Erst mittels EMUS-Messungen kann diese Charakterisierung erfolgen. Die Messungen haben gezeigt, dass Proben trotz ähnlicher Schädigung an der Grenzfläche CFK/Thermoplast unterschiedliche Schädigungen an der Grenzfläche Thermoplast/Aluminium aufweisen können. Um also eine Aussage über die gesamte Schädigung einer Hybridprobe treffen zu können, muss neben der Thermografie auch die EMUS-Messung angewendet werden. Durch diese Erkenntnis kann die erste Hypothese also für beide zFP-Verfahren bestätigt werden.

4.3 Datenfusion

Im nachfolgenden Kapitel werden die Ergebnisse der verschiedenen Thermografiemessungen fusioniert, um eine mögliche Verbesserung der Probencharakterisierung zu erreichen. Neben der Fusion der einzelnen

Thermografiemethoden sollen auch Ergebnisse der Thermografie mit Ergebnissen der EMUS-Messung kombiniert werden.

4.3.1 Datenfusion aus Blitzthermografie und induktiver Thermografie

In Abb. 77 sind die Phasenbilder einer Hybridprobe mit Kaptonstreifen zu sehen (die genaue Lage der Kaptonstreifen kann in Abb. 101 im Anhang (siehe Kapitel 8.4) eingesehen werden). Bild a) zeigt das Phasenbild nach Blitzanregung mit einer Frequenz von 0,2 Hz. Es ist zu erkennen, dass sich im linken oberen Teil des Thermografiebildes drei dunkle Bereiche befinden. Mit Blick auf die Lage der Kaptonstreifen wird deutlich, dass es sich bei diesen Bereichen um die Streifen handeln muss. Neben den Kaptonstreifen erscheint in der Mitte über dem Einleger ein weiterer dunkler Bereich (siehe obere rote Markierung). Da dieser jedoch nicht auf einen Kaptonstreifen zurückzuführen ist, muss es sich um einen produktionstechnischen Fehler im Lagenaufbau handeln. Der Einleger erscheint insgesamt dunkel, sodass hier keine Fehler zu detektieren sind. Direkt über dem Einleger ist am oberen Arm ein weiterer dunkler Streifen zu erkennen (siehe schmale rote Markierung). Dieser kann aufgrund einer fehlenden mechanischen Belastung als produktionstechnischer Fehler bestimmt werden. Ebenso lässt sich ein kleiner dunkler Punkt rechts neben dem oberen Arm erkennen. Die Faserausrichtung kann nicht detektiert werden.

Bild b) zeigt das Phasenbild der induktiven, per Wirbelstrom angeregten Thermografie bei einer Frequenz von 0,2 Hz. Zunächst sind einige unscharfe Bereiche zu erkennen (rechts oben und unten sowie in der Mitte), die dadurch entstanden sind, dass in diesen Bereichen der induzierte Strom null ist und daher durch die FFT-Berechnung keine Informationen generiert werden konnten. Daneben kann man, genau wie in Bild a), den dunklen Bereich in der Mitte über dem Einleger (siehe obere rote Markierung) sehen. Weiterhin ist auch hier der dunkle Streifen oberhalb des oberen Arms (siehe schmale rote Markierung) detektierbar. Der dunkle Punkt rechts neben dem oberen Arm kann wegen der unscharfen Stellen nicht erkannt werden. Die Kaptonstreifen sind mit dieser Methode nicht detektierbar. Im Gegensatz zu dem Thermografiediagramm der Blitzanregung lässt sich die Faserausrichtung in diesem Fall sehr gut detektieren.

Vergleicht man die Ergebnisse der beiden Methoden, so zeigt sich, dass beide Verfahren ihre Vorteile bieten. Durch die induktive Anregung kann die Faserausrichtung sehr gut bestimmt werden, wohingegen durch die Blitzanregung Fremdkörper, zum Beispiel in Form von Kaptonstreifen, detektiert werden können. Zusätzlich erscheinen in Blitzanregung keine unscharfen Bereiche, die durch die Geometrie der Wirbelstromspule bedingt sind. Um die Vorteile beider Verfahren zu nutzen, werden im Folgenden die Ergebnisse dieser Verfahren konkurrierend fusioniert. Um die Thermografiebilder pixelweise kombinieren zu können, kommen verschiedene mathematische Rechenverfahren zum Einsatz.

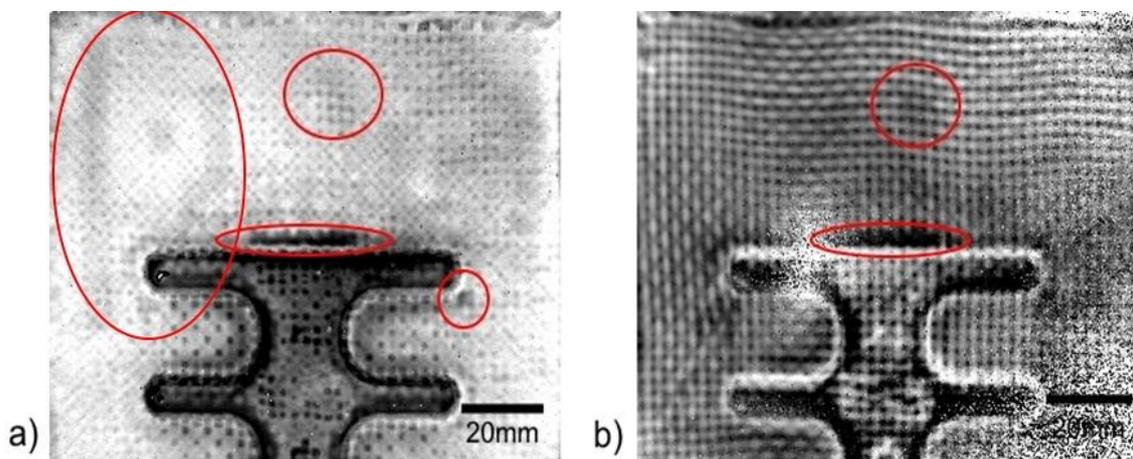


Abb. 77: Phasenbilder einer Probe mit Kaptonstreifen a) mit Blitzanregung und b) induktiv angeregt, aufgenommen mit einer Frequenz von 0,2 Hz

Abb. 78 zeigt die Kombination der blitzangeregten und der induktiven Thermografie. Die Fusion der beiden Thermografiebilder erfolgt über den in Kapitel 3.3.1 beschriebenen Algorithmus. Wie in Abb. 77 a) kann man auch hier die künstlich eingebrachten Kaptonstreifen sehr gut erkennen. Zusätzlich zu den Kaptonstreifen kann man in dem fusionierten Bild nun auch die Faserausrichtung bestimmen. Neben dem dunklen Punkt, der in Abb. 77 rechts neben dem oberen Arm zu erkennen war, kann auch der dunkle Streifen oberhalb des oberen Armes detektiert werden. Dieser Streifen war in den Bildern der Blitzanregung und der induktiven Thermografie nur auf einen kurzen Bereich beschränkt, erscheint nun jedoch im fusionierten Bild durchgängig und erstreckt sich über die gesamte Breite des Arms. Neben den bereits bekannten Fehlern (siehe grüne Markierungen) wird durch die Fusion zudem ein weiterer Fehler sichtbar (siehe rote

Markierung), der in den Einzelbildern nicht detektiert werden konnte. Dieser befindet sich unter dem großen dunklen Bereich und über dem langen dunklen Streifen oberhalb des oberen Arms.

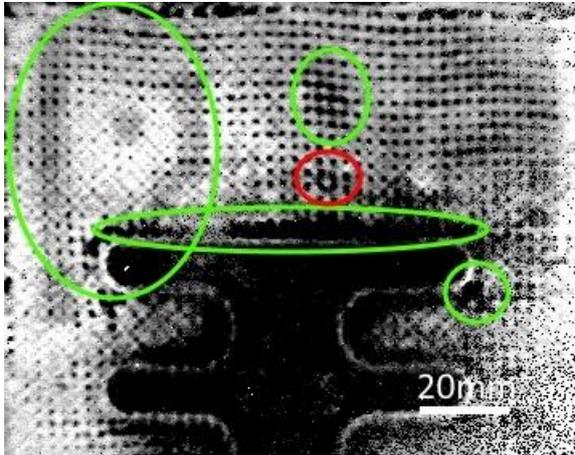


Abb. 78: Fusion aus Blitzanregung und induktiver Anregung

Auffällig ist an dieser Stelle, dass das gewonnene Fusionsbild in Abb. 78 dem Thermografiebild der Anregung mittels IR-Arrays (siehe Abb. 81 b)) sehr ähnlich ist. Aus diesem Grund stellt sich die Frage, ob eine Anregung mittels IR-Arrays eine Datenfusion aus Blitzanregung und induktiver Anregung ersetzen kann. Diese Frage soll am Ende des Kapitels beantwortet werden.

Abb. 79 zeigt eine Hybridprobe mit einem Teflonstreifen als künstlichem Defekt, der sich zwischen dem mittleren und dem oberen Arm befindet (siehe rote Markierung, im Anhang in Abb. 102 genauer zu erkennen). Die Breite des Teflonstreifens beträgt 10 mm. Bild a) zeigt das Amplitudenbild der Blitzanregung bei einer Frequenz von 0,4 Hz. Es ist sofort zu erkennen, dass oberhalb des oberen Arms ein dunkler Punkt detektiert werden kann. Weiterhin sind dunkle Stellen neben dem oberen Arm und neben dem mittleren Arm zu erkennen. Diese Stellen repräsentieren entweder eine inhomogene Oberfläche oder einen produktionstechnischen Fehler im Lagenaufbau. Da die Probe vor der Prüfung visuell überprüft wurde, kann eine Oberflächeninhomogenität ausgeschlossen werden. Es muss sich folglich also um Fehler im Lagenaufbau handeln. Der Bereich, in dem der Teflonstreifen eingebracht ist, erscheint nur minimal heller als die Umgebung. Aus diesem

Grund kann nicht mit hinreichender Sicherheit behauptet werden, dass der Teflonstreifen durch die Blitzanregung detektiert werden kann.

Bild b) zeigt das Phasenbild der induktiven Thermografie. Wie in Bild a) erscheinen auch hier dunkle Stellen oberhalb des oberen Arms und an den Seiten der beiden oberen Arme. Da in einem Phasenbild Oberflächeninhomogenitäten nicht abgebildet werden, bestätigt dies, dass es sich bei den dunklen Stellen um Fehler im Lagenaufbau handeln muss. Der Bereich, in dem der Teflonstreifen eingebracht ist, erscheint zwar minimal dunkler als die Umgebung, jedoch reicht dieser Kontrast nicht für eine sichere Detektion des Streifens aus. Sowohl Bild a) als auch Bild b) erlauben eine Bestimmung der Faserausrichtung.

Da beide Verfahren alleine keine sichere Detektionsmöglichkeit des Teflonstreifens bieten, soll eine Fusion beider Verfahren durchgeführt werden.

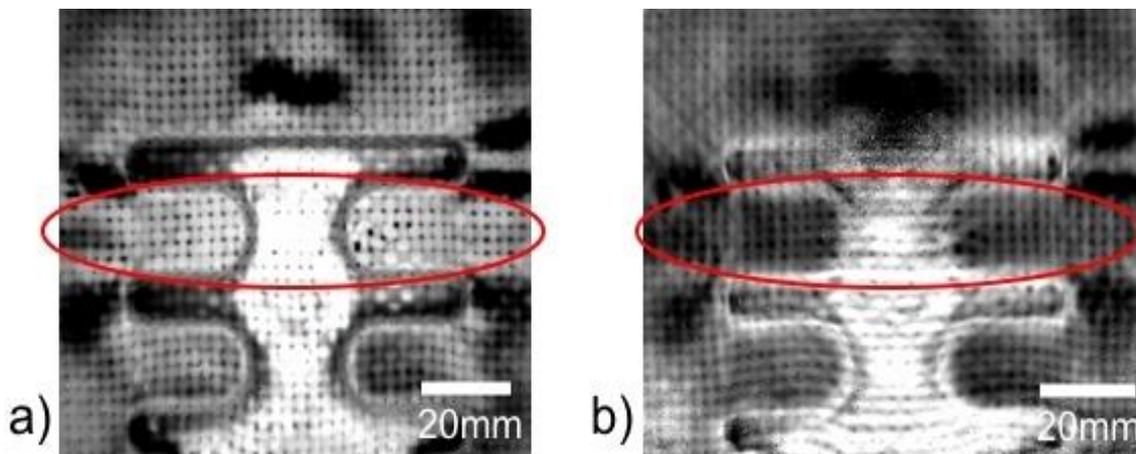


Abb. 79: a) Amplitudenbild (Blitzanregung) und b) Phasenbild (induktiv angeregt) einer Probe mit Teflonstreifen, aufgenommen mit einer Frequenz von 0,4 Hz

Abb. 80 zeigt die Fusion aus Amplitudenbild der Blitzanregung und Phasenbild der induktiven Anregung. Das Ergebnis der pixelweisen Fusion lässt den Bereich des Teflonstreifens (siehe rote Markierung) hell erscheinen, weshalb er deutlich von seiner Umgebung zu unterscheiden ist. Auch im Bereich des Einlegers sind helle Stellen zu erkennen. Dies spricht dafür, dass durch den Teflonstreifen die Anbindung in diesem Bereich massiv gestört ist. Weiterhin lässt sich oberhalb des oberen Arms eine helle Fläche erkennen, die einen durch den Teflonstreifen bedingten Fehler in der Anbindung der einzelnen CFK-Lagen repräsentiert. Durch die Fusion der beiden Thermografieanregungsmethoden kann der künstlich eingebrachte Teflonstreifen also klar

detektiert werden. Weiterhin werden durch die Fusion der beiden Bilder die dunklen Störstellen neben den beiden oberen Armen und oberhalb des oberen Arms eliminiert.

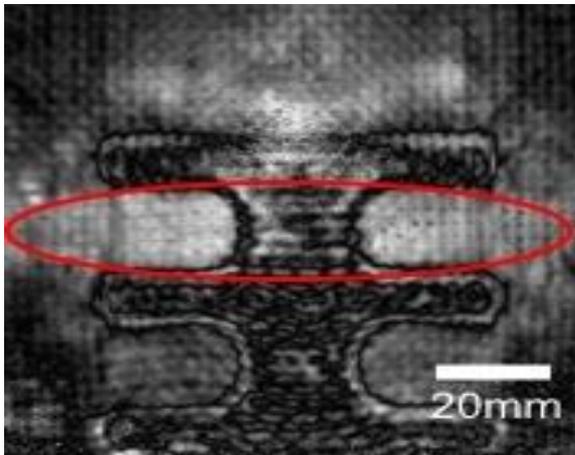


Abb. 80: Fusion aus Amplitudenbild der Blitzanregung und Phasenbild der induktiven Anregung bei einer Frequenz von 0,4 Hz

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass durch einen einfachen Algorithmus (siehe Kapitel 3.3.1) die Informationen zweier Bilder bzw. thermografischer Anregungsmethoden so fusioniert werden können, dass ein Mehrwert für die Defektcharakterisierung erzielt werden kann. Künstlich eingebrachte Defekte, wie Teflonstreifen oder Kaptonstreifen, die eine Delamination im Hybrid simulieren, sind durch die Datenfusion klar zu detektieren. Dabei können nicht nur die bisher detektierten Defekte erkannt werden, sondern zusätzlich auch weitere Fehler, die ohne die Fusion unentdeckt geblieben wären, abgebildet werden. Diese Erkenntnis bestätigt die zu Beginn dieser Dissertation aufgestellte dritte Hypothese.

Abschließend soll nun noch die Frage beantwortet werden, ob eine Anregung mittels IR-Arrays eine Datenfusion aus Blitzanregung und induktiver Anregung ersetzen kann. Dazu wird das Fusionsbild aus Blitzanregung und induktiver Anregung mit dem Thermografiebild der Anregung mittels IR-Arrays verglichen.

Abb. 81 b) zeigt das Thermografiebild der Anregung mit IR-Arrays. Genau wie in Abb. 81 a) sind auch hier die eingebrachten Kaptonstreifen sichtbar. Ebenso können der große dunkle Bereich in der Mitte oberhalb des oberen Arms, der dunkle Streifen unmittelbar über dem oberen Arm und der kleine dunkle Punkt rechts neben dem oberen Arm detektiert werden. Die Faserausrichtung ist ebenfalls schwach erkennbar. Der Fehler oberhalb des dunklen Streifens, der im Fusionsbild erscheint, ist im Thermografiebild der

Anregung mittels IR-Arrays jedoch nicht zu erkennen. Somit kann die Anregung mittels IR-Arrays eine Datenfusion aus Blitz- und induktiver Anregung nicht ersetzen.

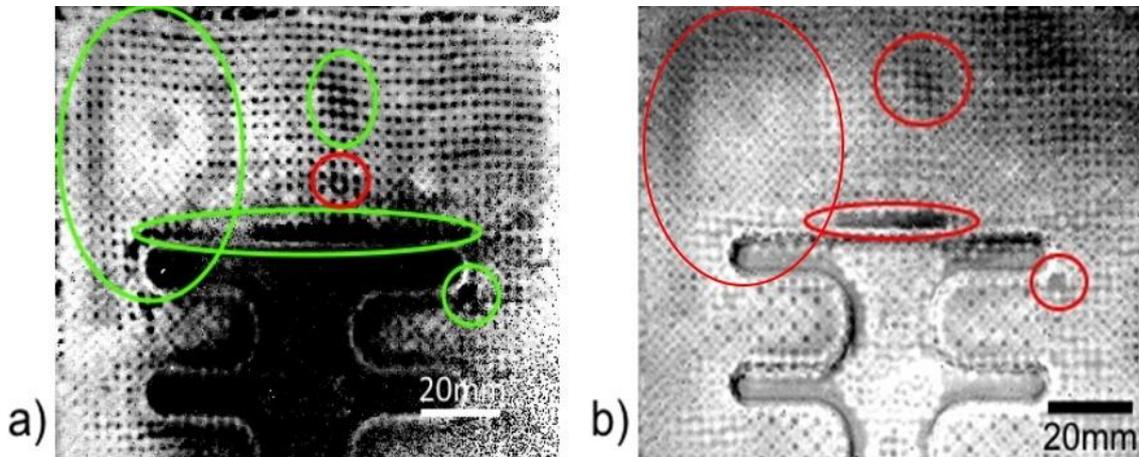


Abb. 81: a) Fusion aus Blitzanregung und induktiver Anregung und b) Anregung mittels IR-Arrays bei einer Frequenz von 0,14 Hz

4.3.2 Datenfusion aus EMUS und Thermografie

Eine weitere Möglichkeit der Datenfusion liegt in der qualitativen Fusion der Ergebnisse aus EMUS und Thermografie. Hierbei werden verschiedene Sensortypen eingesetzt, deren Informationen ausgewertet werden müssen, um eine Aussage über den Probenzustand treffen zu können. Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, handelt es sich hier also um eine komplementäre Fusion.

Da bei den in dieser Dissertation verwendeten zFP-Methoden zwei unterschiedliche Grenzflächen gemessen werden, stellt dies ein großes Problem dar. Eine Fusion der Ergebnisse im ursprünglichen Sinne kann hier also nicht erfolgen.

Um möglicherweise doch eine Fusion von EMUS und Thermografie durchführen zu können, sollen- statt der bisher verwendeten Hybridproben mit zwei Grenzflächen-Hybridproben ohne thermoplastische Zwischenschicht getestet werden, die folglich nur eine zu untersuchende Grenzfläche zwischen CFK und Aluminium besitzen. Bei diesen Vollaluminiumproben übernimmt das Aluminium sowohl den gesamten Raum als auch die Geometrie, die zuvor Aluminium und Thermoplast zusammen eingenommen haben. Die Struktur des CFK bleibt gleich.

Abb. 82 zeigt die Thermografiebilder einer beschädigten Vollaluminiumprobe. Bild a) zeigt die Probe 7 ms nach der Blitzanregung. Auf diesem Bild ist nichts weiter als die

Reflexion des Blitzes zu erkennen. Die maximale Helligkeit beträgt 4371. Bild b) zeigt die Probe 1,4 s nach der Blitzanregung. Im Gegensatz zu Bild a) kann man hier eine helle Fläche um den Einleger erkennen, die als Delamination definiert werden kann. Neben der eindeutigen Delamination zwischen CFK und Aluminium sind im unteren Bereich der Probe zwei helle Bereiche zu erkennen, die aufgrund des Schädigungsbildes als Beschädigung des CFK angenommen werden können. Die maximale Helligkeit dieses Bildes beträgt 3782. Im Vergleich zu Bild a) ist die maximale Helligkeit deutlich geringer, da das Bild zu einem späteren Zeitpunkt nach der Blitzanregung aufgenommen wurde.

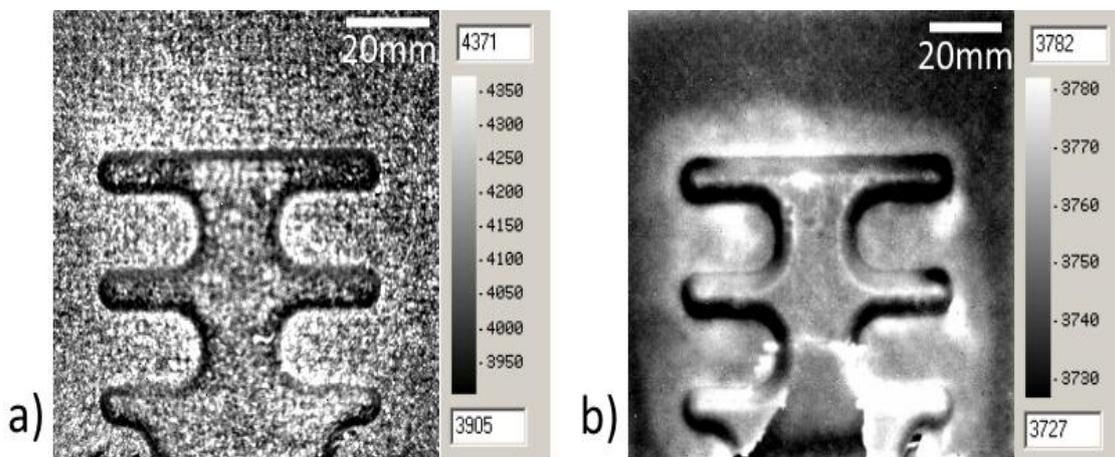


Abb. 82: Thermografiebild der beschädigten Vollaluminiumprobe, aufgenommen a) 7 ms und b) 1,4 s nach der Blitzanregung

Abb. 83 zeigt das Amplituden- und das Phasenbild der beschädigten Vollaluminiumprobe. Sowohl im Amplituden- (Bild a)) als auch im Phasenbild (Bild b)) ist die Delamination um den Einleger sichtbar. Die hellen Stellen im unteren Bereich der Probe, die in Abb. 82 detektiert werden konnten, sind auch hier zu erkennen.

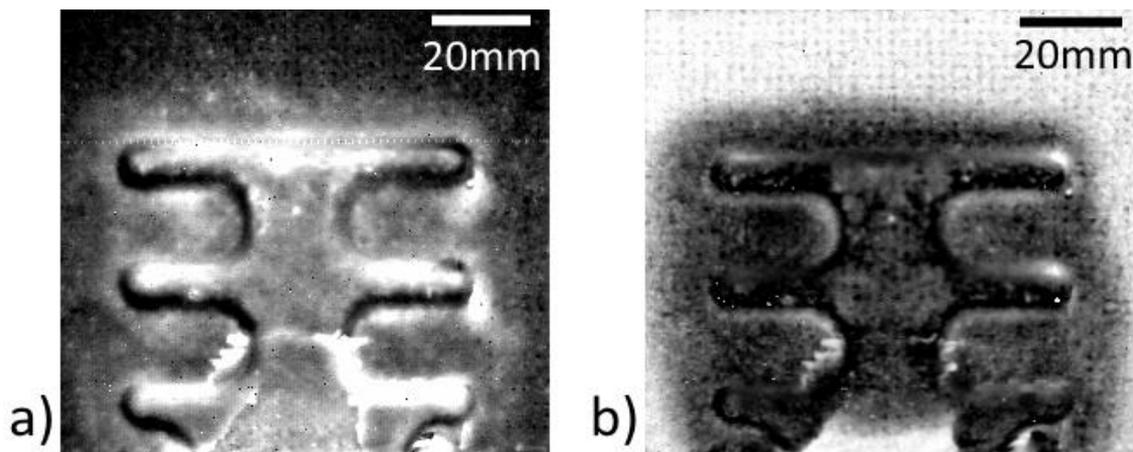


Abb. 83: a) Amplituden- und b) Phasenbild der beschädigten Vollaluminiumprobe bei einer Frequenz von 0,1 Hz

Abb. 84 zeigt die Signalamplituden der beschädigten Vollaluminiumprobe nach einer EMUS-Messung. Neben der ersten großen Amplitude, die das Signal zwischen Sender und Empfänger darstellt, sind weitere kleine Amplituden zu erkennen. Diese repräsentieren eine Schädigung der Grenzfläche zwischen CFK und Aluminium.

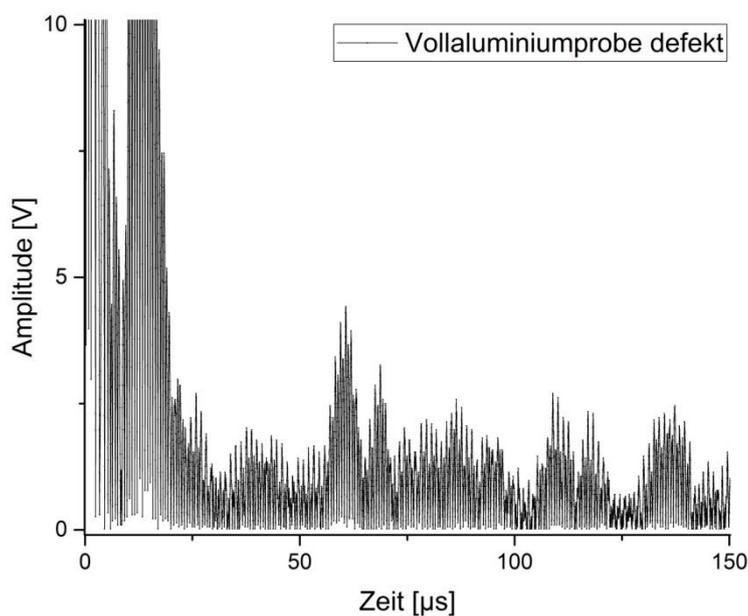


Abb. 84: Signalamplituden der beschädigten Vollaluminiumprobe

Sowohl die Thermografiemessungen in Abb. 82 und Abb. 83 als auch die EMUS-Messung in Abb. 84 haben gezeigt, dass die Grenzfläche zwischen CFK und Aluminium beschädigt

ist. Sofern die Probengeometrie es erlaubt, ermöglichen also beide zFP-Verfahren eine Charakterisierung der gleichen Grenzfläche. Dennoch stellt die Fusion der beiden Verfahren auch hier ein Problem dar. Während man durch die Thermografiemessung Helligkeitswerte erhält, die die gesamte Probe abbilden, erhält man bei der EMUS-Messung Spannungsamplituden, die Reflexionen an den Kanten des Aluminiums oder Reflexionen an Defekten der Grenzfläche repräsentieren. Eine ortsgenaue beziehungsweise pixelweise Fusion der Ergebnisse beider Verfahren, wie sie in Kapitel 4.3.1 bei verschiedenen Thermografieanregungsmethoden angewandt wurde, ist daher ohne Informationsverlust nicht möglich.

Um dennoch eine Fusion der beiden Prüfverfahren erfolgreich durchführen zu können, ist der Einsatz eines weiteren MATLAB-Algorithmus notwendig (siehe Kapitel 3.3.2). Dieser ermöglicht es, beide Prüfverfahren zeitgleich auf Defekte zu überprüfen und eine Mitteilung über den Probenzustand auszugeben.

Im Folgenden wird eine Vollaluminiumprobe- jeweils vor einer mechanischen Prüfung und nach einer mechanischen Prüfung- mittels EMUS und Blitzthermografie untersucht und durch den Algorithmus ausgewertet.

Abb. 85 zeigt die Ergebnisse der zerstörungsfreien Prüfung mittels EMUS und Blitzthermografie einer mechanisch nicht geprüften und somit unbeschädigten Probe. Das Programm gibt gleichzeitig sowohl ein EMUS-Signal als auch ein Blitzthermografiebild aus. Beide Ergebnisse werden dabei als „i.O.“ bewertet. Auch bei dem eigentlichen Fusionsschritt, der die Ergebnisse beider Verfahren zusammenführt, erhält man das Ergebnis „Probe ist i.O.“. Das Ergebnis stimmt also mit dem tatsächlichen Zustand der Probe überein.

Verglichen mit Abb. 72 lässt sich jedoch im Signalbild der EMUS-Messung erkennen, dass hier die Signalamplituden nach einer Zeit von 25 μ s höher liegen (bis zu 2 V im Vergleich zu max. 1 V), obwohl beide Proben ungeprüft und folglich intakt sind. Dies lässt sich durch die unterschiedliche Geometrie der Hybridproben erklären. Dadurch, dass der Metalleinleger hier auch den Raum der Thermoplastkomponente einnimmt, ist die Oberfläche nicht eben, sodass es zu einem erhöhten Rauschen des Signals kommt. Die höheren Signalamplituden sind daher als unkritisch zu bewerten.

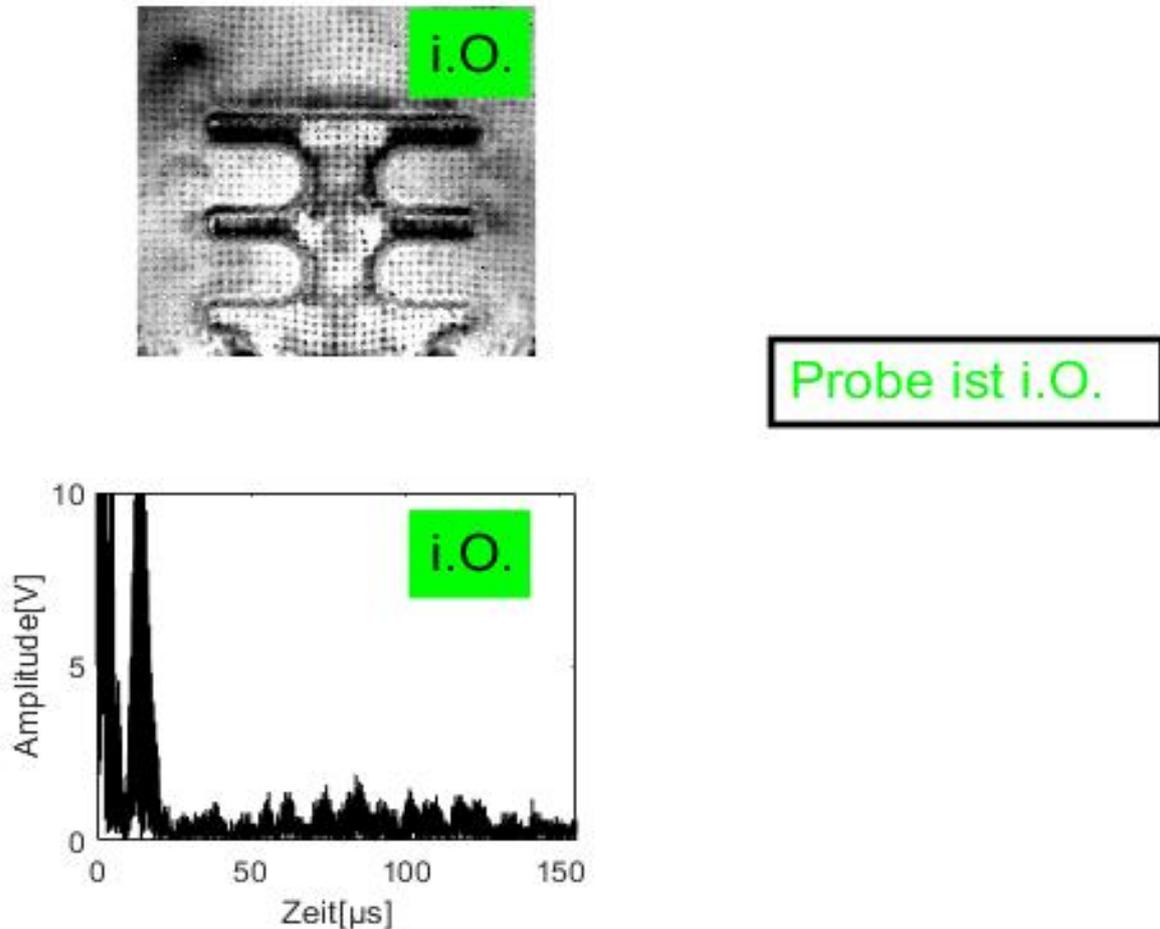


Abb. 85: Automatisch ausgewertetes Blitzthermografiebild und EMUS-Signal einer Vollaluminiumprobe mit Aussage über den Bauteilzustand vor der mechanischen Prüfung

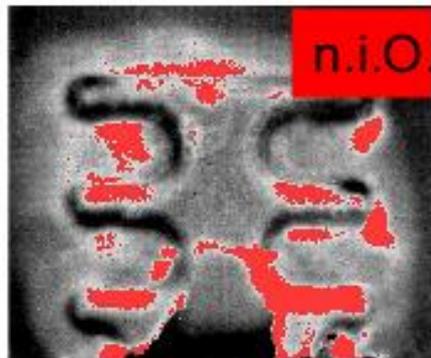
Abb. 86 und Abb. 87 zeigen die Ergebnisse der zerstörungsfreien Prüfung mittels Blitzthermografie und EMUS einer mechanisch geprüften Probe, an der im Voraus ein quasistatischer Zugversuch durchgeführt wurde. Wie bereits zuvor werden auch hier zeitgleich ein Blitzthermografiebild und ein EMUS-Signal ausgegeben.

Bei dem Thermografiebild, das in Abb. 86 zu sehen ist, wurde die Bedingung für die Defekterkennung auf einen Grauwert von >220 festgelegt. Es ist zu erkennen, dass nur wenige Bereiche rot markiert sind. Diese Bereiche repräsentieren sehr helle Stellen, wie Risse oder Schwächungen im CFK, weshalb das Thermografiebild als „n.i.O.“ gekennzeichnet wird.

Auch das Bild der EMUS-Messung wird vom Programm automatisch als „n.i.O.“ deklariert. Dies lässt sich leicht nachvollziehen, da die Signalamplituden einen Wert von

2 V klar überschreiten, was auf eine Schädigung der Grenzfläche CFK/Aluminium hinweist.

Nach der Fusion des Thermografiebildes und der EMUS-Signale wird der Zustand der Probe durch das Programm daher folgerichtig als „n.i.O.“ beurteilt.



Probe ist n.i.O.

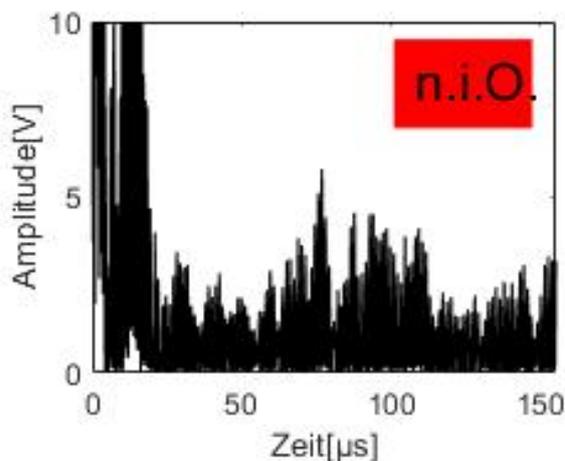


Abb. 86: Automatisch ausgewertetes Blitzthermografiebild (mit einem Grauwert von >220) und EMUS-Messung einer Vollaluminiumprobe mit Aussage über den Bauteilzustand nach der mechanischen Prüfung

Abb. 87 zeigt das Thermografiebild derselben Probe, bei dem die Bedingung für die Defekterkennung sensitiver, nämlich für einen Grauwert von >80 , eingestellt wurde. Verglichen mit Abb. 86 sind mehr rot markierte Bereiche zu sehen. Aufgrund der deutlich sensitiver eingestellten Bedingung für die Defekterkennung lassen sich auch weniger helle Bereiche, wie Delaminationen an der Grenzfläche CFK/Aluminium, automatisch detektieren. Die EMUS-Messung wird wie bereits in Abb. 86 als „n.i.O.“ angezeigt.

Insgesamt wird der Zustand der Probe nach der Fusion durch das Programm auch hier als „n.i.O.“ bewertet.

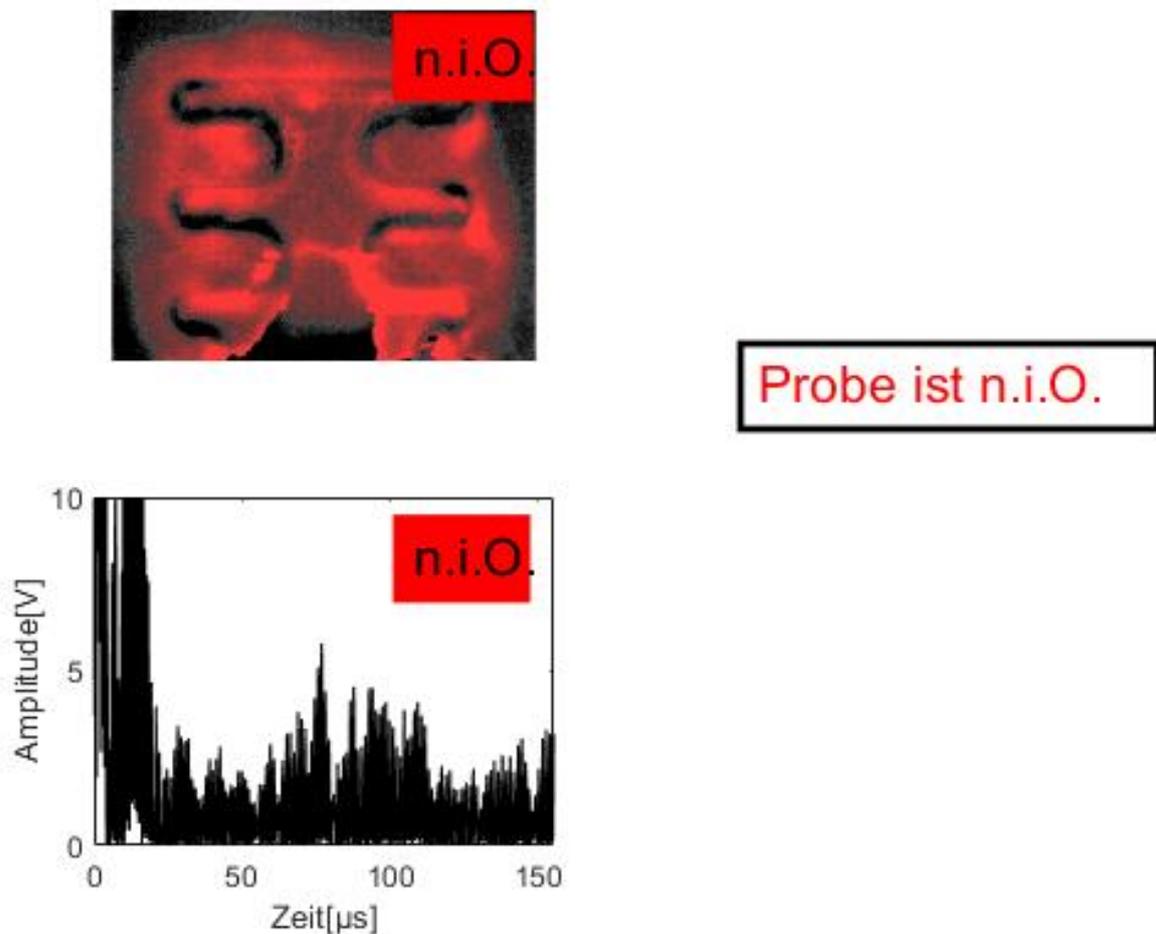


Abb. 87: Automatisch ausgewertetes Blitzthermografiebild (mit einem Grauwert von >80) und EMUS-Messung einer Vollaluminiumprobe mit Aussage über den Bauteilzustand nach der mechanischen Prüfung

Anhand der getesteten Vollaluminiumprobe lässt sich einerseits zeigen, dass mithilfe des Algorithmus verschiedene Defektarten, wie Risse oder Delaminationen, durch eine Variation der Defektbedingung nachgewiesen und unterschieden werden können.

Andererseits wird aber auch gezeigt, dass mittels EMUS und Blitzthermografie nicht nur Grenzflächendefekte an Proben mit zwei verschiedenen Grenzflächen (CFK/Thermoplast und Thermoplast/Aluminium, siehe Kapitel 4.1.2.2 und Kapitel 4.2.3) detektiert werden können, sondern, dass beide zFP-Verfahren auch eingesetzt werden können, um die gleiche Grenzfläche (Aluminium/CFK) zu charakterisieren.

Da die Versuche nicht in situ durchgeführt werden konnten, kann bislang jedoch keine Aussage darüber getroffen werden, welches Prüfverfahren sensitiver auf Grenzflächendefekte reagiert. Um diese Frage beantworten zu können, sollen im nachfolgenden Kapitel daher neben den EMUS- und Blitzthermografiemessungen auch CT-Messungen zur Hilfe genommen werden.

4.3.3 Bestimmung des Sensitivitätsgrades der Prüfverfahren EMUS und Thermografie

Um nun eine Aussage darüber treffen zu können, welches zFP-Verfahren sensitiver auf Grenzflächendefekte reagiert, müssen die Ergebnisse der Thermografie- und EMUS-Messungen mit den CT-Messungen verglichen werden. Die Messungen werden an der Aluminium-Thermoplast-CFK-Probe JS4 durchgeführt.

Abb. 88 zeigt das Blitzthermografiebild und die EMUS-Signale der Probe JS4. Durch den Einsatz des MATLAB-Algorithmus wird unmittelbar ersichtlich, dass die Probe Schädigungen aufweist. Im Thermografiebild ist zu erkennen, dass durch den mechanischen Versuch an den Enden der Arme des Einlegers Delaminationen entstanden sind. Die Bereiche der Delamination liegen- mit Ausnahme kleinerer Bereiche an den Enden der unteren Arme- aber hauptsächlich in der CFK-Komponente. Im EMUS-Signal sind bei einer Zeit von ca. 55 μs und 65 μs zwei Signalpeaks zu erkennen, die eine Schädigung der Grenzfläche repräsentieren. Im finalen Fusionsschritt wird die Probe als „n.i.O.“ definiert.

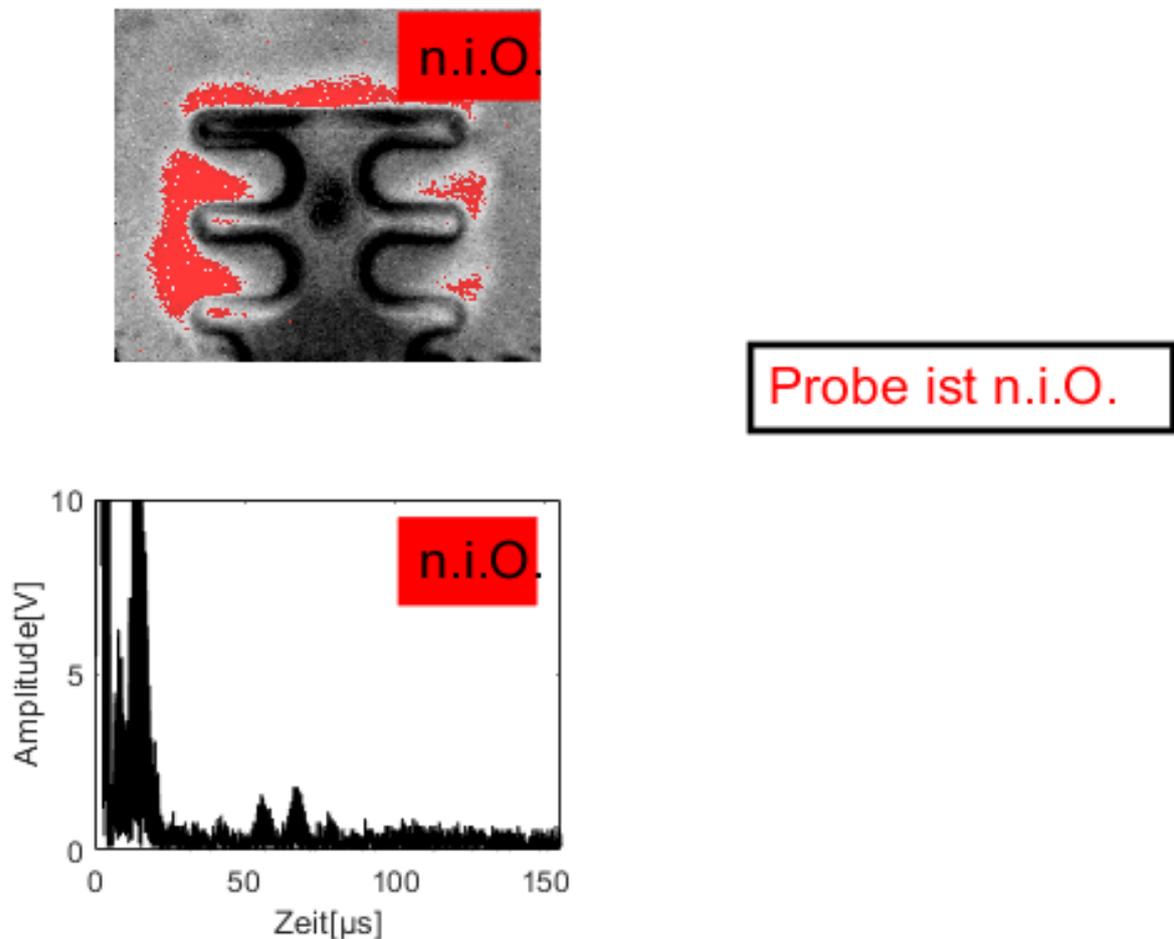


Abb. 88: Automatisch ausgewertetes Blitzthermografiebild und EMUS-Signal mit Aussage über den Bauteilzustand nach der mechanischen Prüfung

Da die auf dem Thermografiebild sichtbaren Delaminationen hauptsächlich in der CFK-Komponente liegen, das EMUS-Signal jedoch nur Informationen im Bereich des Einlegers bereitstellt, muss in einem nächsten Schritt der Fokus der Thermografiemessung auf genau diesen Bereich, die sogenannte „Region of Interest“ (ROI) gelegt werden (siehe rot markierter Bereich in Abb. 89). Erst dann kann eine genauere Aussage hinsichtlich der Grenzflächendefekte getroffen werden.

Abb. 89 zeigt, dass das Thermografiebild durch das Programm dabei nun als „i.O.“ bewertet wird. An der festgelegten „Region of Interest“, der Grenzfläche CFK/Thermoplast, ist folglich keine Schädigung durch den zuvor durchgeführten mechanischen Versuch aufgetreten. Im Gegensatz zu den Messungen in Abb. 88, bei denen sowohl die Thermografiemessung als auch die EMUS-Messung als „n.i.O.“ beurteilt wurden, liegt nun der Fall vor, dass zwar die EMUS-Messung weiterhin als „n.i.O.“

deklariert wird, die Thermografiemessung jedoch als „i.O.“. Nach der Fusion der Ergebnisse erscheint daher nun die Mitteilung „Achtung! Weitere Überprüfung notwendig.“. Diese Überprüfung erfolgt mittels CT.

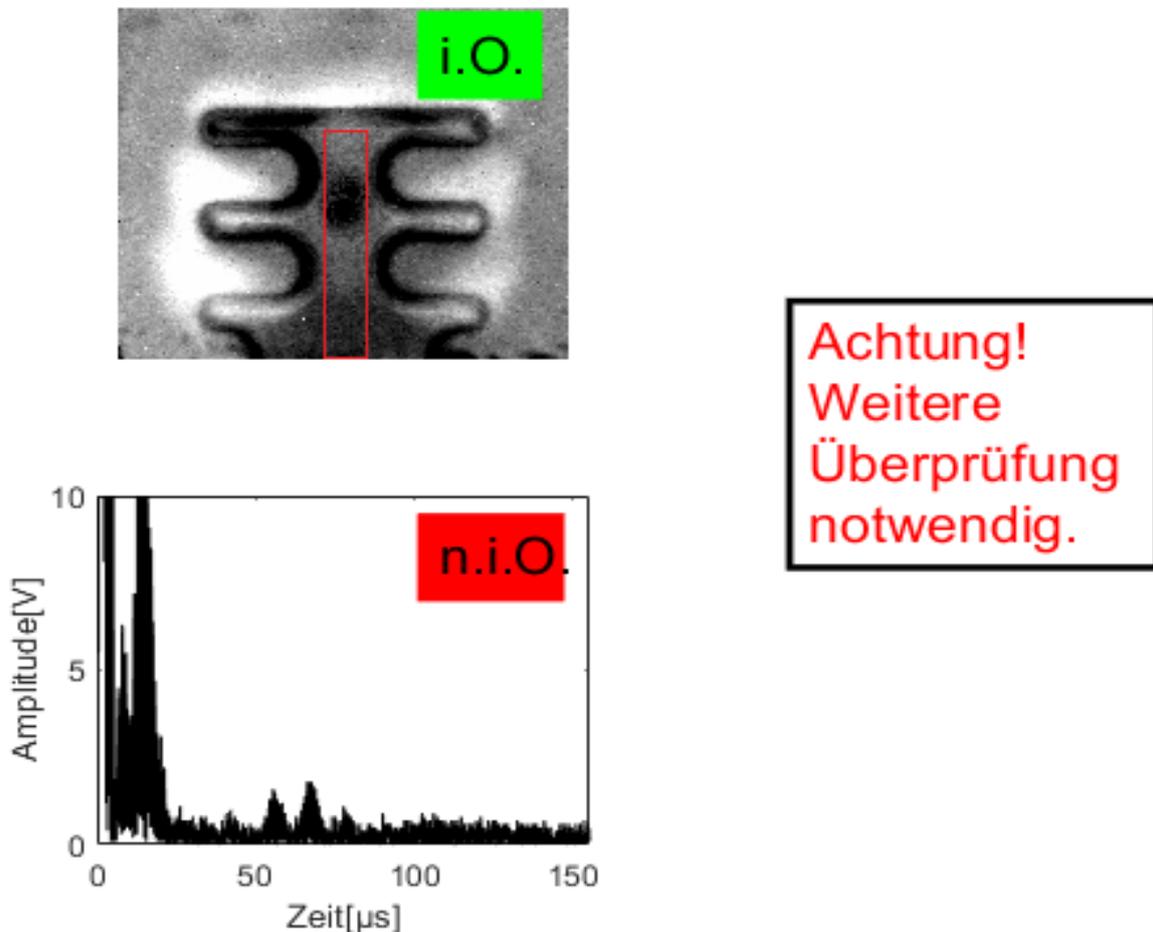


Abb. 89: Automatisch ausgewertetes Blitzthermografiebild mit relevantem Bereich und EMUS-Signal mit Aussage über den Bauteilzustand nach der mechanischen Prüfung

Für die weitere Überprüfung der Probe JS4 mittels CT-Messung wurde ein Bereich, der den gesamten unteren Arm der Probe umfasst, ausgewählt. Dieser Bereich ist in Abb. 90 a) zu sehen (siehe rote Markierung). Bild b) zeigt das CT-Bild der Probe in der XZ-Ebene (Betrachtung von der Seite) und Bild c) das CT-Bild in der XY-Ebene (Betrachtung von oben).

Ausgehend von den Ergebnissen der Blitzthermografie- und EMUS-Messungen in Abb. 89 wäre für die CT-Messung nun zu erwarten, dass die CT-Bilder eine intakte Grenzfläche für den Bereich zwischen CFK und Thermoplast und eine defekte Grenzfläche zwischen dem

Aluminium und dem Thermoplast anzeigen. Abb. 90 b) zeigt, dass in dem ausgewählten Bereich eine leichte Ablösung des CFK vom Thermoplast zu erkennen ist (siehe rote Markierung). Da Bild b) aber nur die Seitenansicht der Probe zeigt, muss zusätzlich eine weitere Ebene der Probe betrachtet werden (siehe Bild c)). Bild c) zeigt verschiedene Schädigungsgrade an der Grenzfläche CFK/Thermoplast. Im oberen und unteren Bereich des Bildes, was dem linken beziehungsweise rechten Arm der Probe in Bild a) entspricht, ist die Ablösung des CFK vom Thermoplast sehr gut zu erkennen. Im mittleren Bereich, der auch in Bild a) die Mitte des betrachtungsrelevanten Bereichs darstellt, ist zwischen CFK und Thermoplast ein dünner schwarzer Streifen erkennbar. Dies spricht für eine leichte Ablösung des CFK vom Thermoplast. Entgegen der Erwartungen zeigt das CT-Bild im Gegensatz zum Thermografiebild (siehe Abb. 89) also doch keine intakte Grenzfläche zwischen CFK und Thermoplast.

Vergleicht man darüber hinaus nun die Ergebnisse der CT- und der EMUS-Messung, so fällt auf, dass die Grenzfläche zwischen Aluminium und Thermoplast im CT-Bild (siehe Abb. 90, Bild c)) intakt dargestellt wird. Im Gegensatz dazu sind im Ultraschalldiagramm der EMUS-Messung (siehe Abb. 74) Signalamplituden zu erkennen, die auf eine Schädigung der Grenzfläche hinweisen. Da Brotherhood in [38] bereits gezeigt hat, dass Schädigungen wie Kissing Bonds zwar durch die SH-Wellen der EMUS-Messung detektiert werden können, mittels CT jedoch- wie hier gezeigt- nicht nachweisbar sind, lässt sich vermuten, dass es sich bei der hier vorliegenden Schädigung ebenfalls um Kissing Bonds handelt. Vermeintlich hat hier also eine Ablösung des Thermoplasts vom Aluminium stattgefunden, diese ist jedoch nicht mehr erkennbar.

Die Betrachtung von Kissing Bond-Defekten kann weiterhin auch dazu genutzt werden, eine Aussage darüber zu treffen, welches zFP-Verfahren- Thermografie oder EMUS- sensitiver auf Grenzflächendefekte reagiert. Da die Messungen gezeigt haben, dass die Blitzthermografie nicht geeignet ist, um eine leichte Ablösung des CFK vom Thermoplast anzuzeigen, wird es folglich auch nicht möglich sein, einen Kissing Bond-Defekt mittels Blitzthermografie nachzuweisen. Diese logische Schlussfolgerung kann durch die Ergebnisse von Tighe et al. [79], die gezeigt haben, dass ein Kissing Bond in einem Hybridverbund nur unter eingebrachter Last zu erkennen ist, bestätigt werden. Daher lässt sich festhalten, dass der Kissing Bond nicht mittels Thermografie, aber bei der EMUS-

Messung nachgewiesen werden kann. Die EMUS-Messung reagiert also sensitiver auf Grenzflächendefekte als die Blitzthermografie.

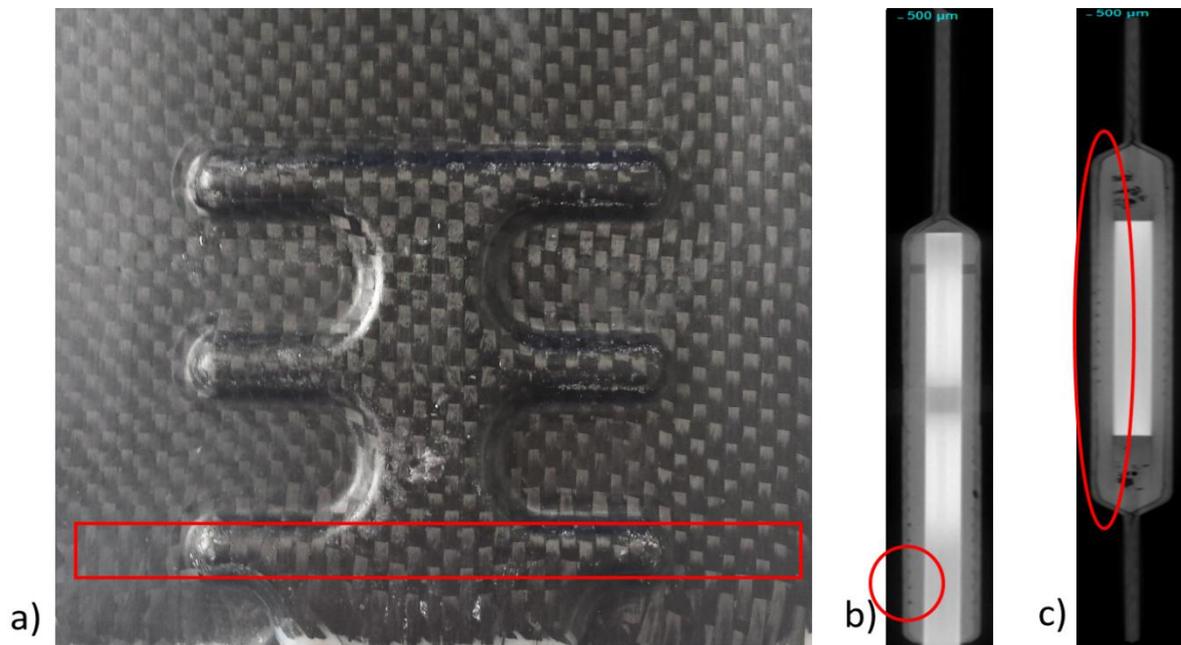


Abb. 90: a) Bereich der betrachteten Probe JS4, b) CT-Bild in XZ-Ebene und c) CT-Bild in XY-Ebene

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass mithilfe des hier verwendeten Computerprogramms sowie der vorgestellten Algorithmen eine Charakterisierung der Grenzflächen CFK/Aluminium, CFK/Thermoplast und Thermoplast/Aluminium mittels Thermografie und EMUS möglich ist. Darüber hinaus lässt sich im Thermografiebild je nach Einstellung der Defektbedingung eine Unterscheidung zwischen Defekten im CFK sowie Defekten an der Grenzfläche erzielen. Der verwendete Algorithmus lässt sich somit für unterschiedliche Fragestellungen einsetzen und variieren. Zudem kann der betrachtungsrelevante Bereich variiert werden, sodass verschiedene „Region of Interest“ charakterisiert werden können. Durch die anschließende Fusion der Ergebnisse der Thermografie sowie EMUS lässt sich eine genaue Aussage über den Zustand der Probe treffen. Somit kann hier von einer Verbesserung der Grenzflächencharakterisierung und damit verbunden von einer höheren Zuverlässigkeit der Defekterkennung gesprochen werden.

Durch den Vergleich der Ergebnisse der Blitzthermografie und der EMUS-Messung mit den Ergebnissen der CT kann außerdem gezeigt werden, dass nur mittels EMUS Kissing

Bond-Defekte charakterisiert werden können. Gleichzeitig lässt dieses Ergebnis eine Bewertung des Sensitivitätsgrades der einzelnen zFP-Methoden hinsichtlich Kissing Bond-Defekten zu: EMUS reagiert dabei sensitiver auf Grenzflächendefekte als CT sowie Thermografie und CT reagiert sensitiver als Thermografie. Im Sinne einer optimierten Prüfstrategie kann die Thermografie also als „grobes“ Prüfverfahren eingesetzt werden, um eine Probe oberflächlich auf Fehler zu untersuchen. Möchte man die Probe hingegen genauer auf mögliche Defekte untersuchen, so sollte in einem weiteren, „feineren“ Untersuchungsschritt EMUS verwendet werden. Diese Vorgehensweise kann auch als adaptives Sampling bezeichnet werden [80].

Die vierte Hypothese dieser Dissertation, die besagt, dass durch eine Datenfusion von Thermografie und EMUS eine verbesserte Grenzflächencharakterisierung zu erreichen ist, kann letztlich also bestätigt werden.

4.4 Referenzmessungen mit Computertomografie (CT)

Um die in den vorherigen Kapiteln erzielten Ergebnisse zu validieren, werden im folgenden Kapitel Computertomografiemessungen (CT) an den Proben JS4, A123, A92 und der Vollaluminiumprobe durchgeführt.

Probe JS4

Abb. 91 zeigt die CT-Messungen der Probe JS4. Dabei sind Bilder verschiedener Ebenen zu sehen. Bild a) zeigt die Ebene YZ. Bei der Draufsicht auf die Probe fällt auf, dass durch die CT-Messung alle drei Probenkomponenten abgebildet werden. Das Aluminium erscheint dabei am hellsten. Auch der Thermoplast um das Aluminium und die CFK-Komponente sind deutlich voneinander zu unterscheiden. Selbst die Faserausrichtung des CFK kann bestimmt werden ($\pm 45^\circ$, zweite/dritte Lage). Darüber hinaus sind im Bereich des CFK dunkle Bereiche um die Arme des Einlegers zu erkennen (siehe obere rote Markierung). Diese dunklen Stellen repräsentieren eine leichte Ablösung des CFK vom Thermoplast. Außerdem sind an den Enden des oberen und unteren Arms Poren im Thermoplast zu sehen (siehe untere rote Markierung). Ansonsten erscheint der Thermoplast intakt. Die blauen Linien in Bild a) markieren die Schnittflächen der Ebenen XZ und XY.

Bild b) zeigt die Ebene XZ, die eine Sicht von der Seite auf die Probe ermöglicht. Wie bereits in Ebene YZ erkennt man auch hier die Poren im Thermoplast (siehe rote Markierung). In dieser Ebene wird jedoch erstmals sichtbar, dass sich die CFK-Komponente vom Thermoplast gelöst hat (siehe schwarze Linie um die Poren innerhalb der roten Markierung). Auch die Betrachtung dieser Ebene zeigt, dass der Thermoplast intakt ist (siehe heller Bereich im mittleren Arm).

Bild c) zeigt die Ebene XY, die eine Sicht von oben auf die Probe erlaubt. Die roten Umrandungen markieren die Bereiche im Thermoplast, in denen Poren auftreten. Innerhalb der roten Markierungen lässt sich weiterhin erkennen, dass sich die CFK-Komponente vom Thermoplast gelöst hat (siehe schwarze Linien um die Poren). Die Grenzfläche zwischen Aluminium und Thermoplast scheint intakt (keine schwarzen Linien um den hellen Bereich in der oberen roten Markierung erkennbar).

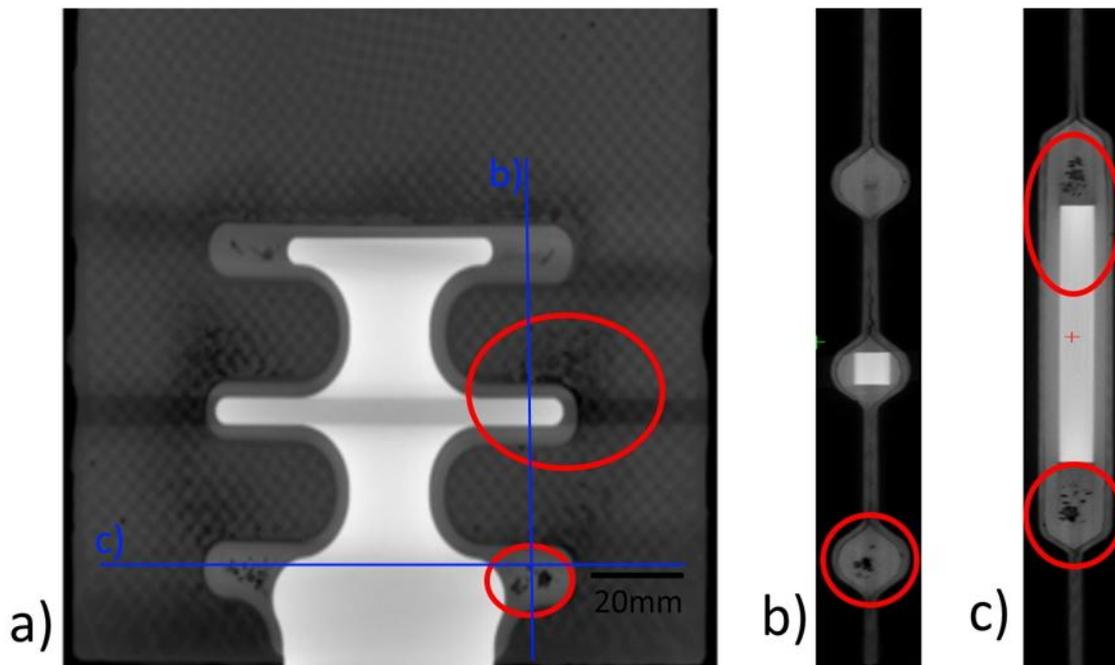


Abb. 91: CT-Messung der Probe JS4 a) in der YZ-Ebene, b) in der XZ-Ebene und c) in der XY-Ebene

Probe A123

Abb. 92 zeigt die CT-Messung der Probe A123 in verschiedenen Ebenen. In Bild a) erscheint der Aluminiumeinleger leicht verbogen und mit einem Riss im linken oberen Arm. Der Thermoplast ist komplett zerstört. Neben deutlichen Rissen an einigen Stellen

zeigt er im unteren Arm zahlreiche Poren. Der große dunkle Bereich um Thermoplast und Aluminium repräsentiert eine Ablösung des CFK vom Thermoplast.

Bild b) zeigt die Seitenansicht der Probe (Ebene XZ). Dabei fällt auf, dass zwischen allen drei Komponenten schwarze Bereiche auftreten (siehe rote Markierung). Diese Bereiche weisen darauf hin, dass sich die einzelnen Komponenten voneinander gelöst haben und die Grenzflächen zerstört sind. Lediglich am oberen Ende scheint die Grenzfläche zwischen Aluminium und Thermoplast noch intakt (siehe Bereich oberhalb der roten Markierung).

Bild c) zeigt die Ebene XY im Bereich der gerade beschriebenen, noch intakten Verbindung zwischen Aluminium und Thermoplast. Im Bereich der roten Markierung sieht man, dass sich die CFK-Komponente vom Thermoplast abgelöst hat. Des Weiteren ist der Thermoplast gerissen. Im oberen Bereich des Aluminiums ist der Riss, der auch in Bild a) zu sehen ist, zu erkennen.

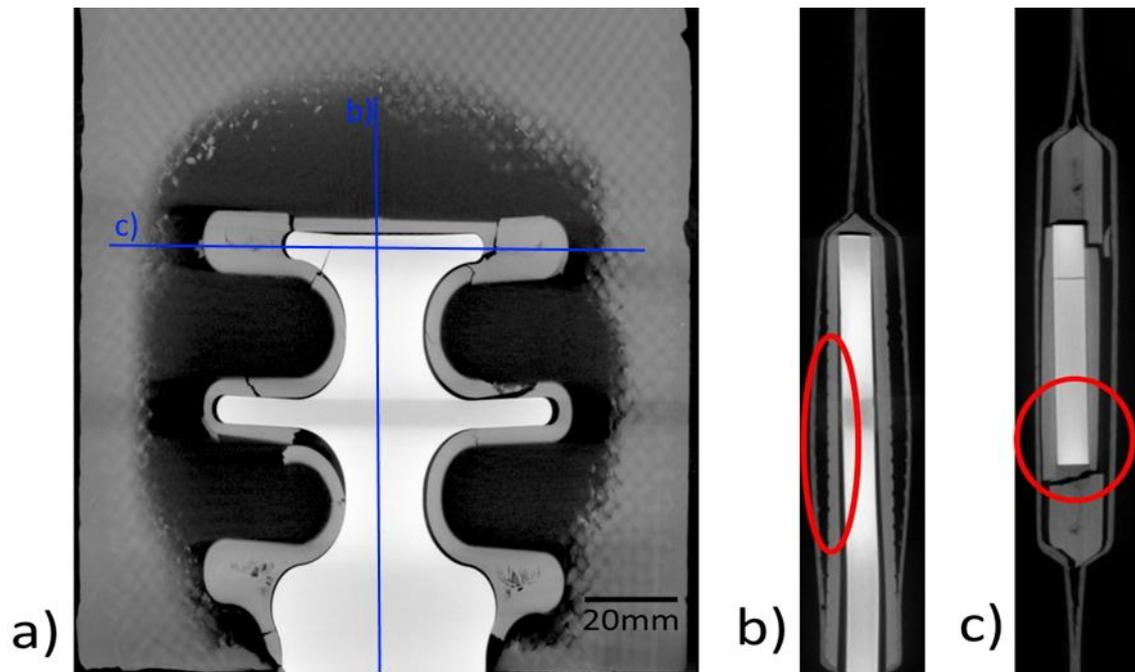


Abb. 92: CT-Messung der Probe A123 a) in der YZ-Ebene, b) in der XZ-Ebene und c) in der XY-Ebene

Probe A92

Abb. 93 zeigt die CT-Messung der Probe A92. Bild a) zeigt die CT-Messung in der YZ-Ebene. Um den Einleger und den Thermoplast, die beide gut voneinander zu unterscheiden sind, ist eine große dunkle Fläche erkennbar. Diese Fläche kann als Delamination der CFK-Komponente vom Thermoplast gedeutet werden. Des Weiteren sind im Thermoplast

an den Enden des unteren Arms Poren zu sehen. Nichtsdestotrotz scheint der Thermoplast insgesamt aber intakt zu sein.

Bild b) zeigt die Ebene XZ. Hier ist sehr gut zu erkennen, dass die CFK-Komponente vom Thermoplast abgelöst ist (siehe obere rote Markierung). Auch oberhalb des Einlegers haben sich die einzelnen CFK-Lagen voneinander gelöst. Innerhalb der unteren roten Markierung ist der Bereich zu erkennen, in dem sich die CFK-Komponente zwar vom Thermoplast abgelöst hat, der Thermoplast jedoch am Aluminium verbleibt.

Auch in Bild c), in dem die Ebene XY abgebildet ist, wird deutlich, dass sich die CFK-Komponente vom Thermoplast abgelöst hat. Die Grenzfläche zwischen Aluminium und Thermoplast scheint auch in diesem Bild fehlerfrei. Betrachtet man jedoch die auftretenden Signalpeaks im Ultraschall-Diagramm der EMUS-Messung (siehe Abb. 76), so weisen diese darauf hin, dass trotz der laut CT-Bildern scheinbar fehlerfreien Bindung eine Schädigung der Grenzfläche vorliegen muss. Wie bereits bei Probe JS4 handelt es sich hierbei um sogenannte Kissing Bonds.

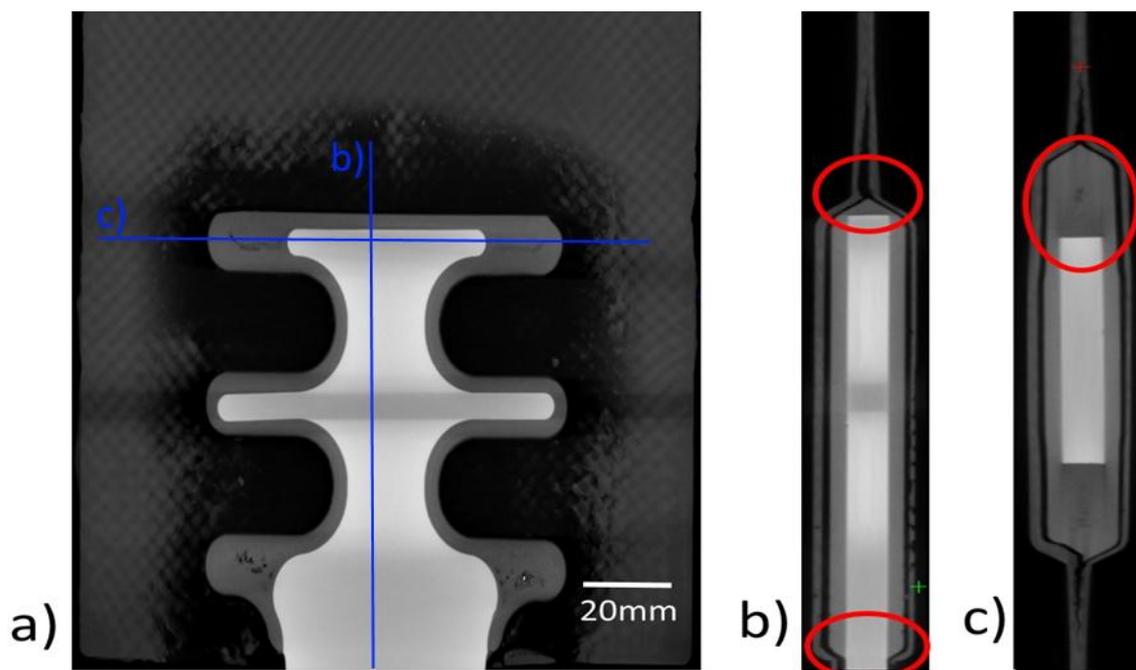


Abb. 93: CT-Messung der Probe A92 a) in der YZ-Ebene, b) in der XZ-Ebene und c) in der XY-Ebene

Vollaluminiumprobe

Abb. 94 zeigt CT-Messungen der beschädigten Vollaluminiumprobe aus Kapitel 4.3.2. Bild a) zeigt die CT-Messung der Ebene XZ. Die obere rote Markierung zeigt, dass sich

die einzelnen Lagen des CFK voneinander gelöst haben. Innerhalb der unteren roten Markierung ist zu sehen, dass die Probe am CFK selbst gerissen ist. Des Weiteren ist im gesamten Bereich um den Aluminiumeinleger eine Delamination des CFK vom Aluminium zu erkennen.

Bild b) zeigt die CT-Messung in der Ebene XY, also die Sicht von oben auf die Probe. Auch in dieser Ansicht kann man erkennen, dass einerseits die Lagen des CFK voneinander gelöst sind, andererseits aber auch die CFK-Komponente vom Aluminiumeinleger getrennt ist.

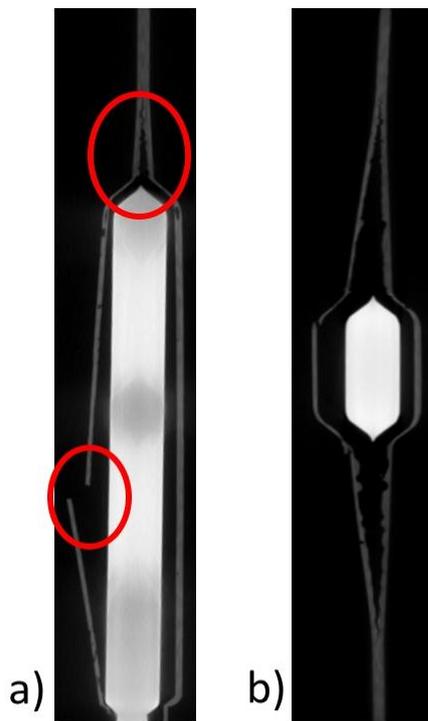


Abb. 94: CT-Messung der beschädigten Vollaluminiumprobe in a) XZ- und b) XY-Ebene

Die Messungen haben gezeigt, dass die Ergebnisse aus Thermografie und EMUS-Messung mithilfe der Computertomografie validiert werden können. Zeitgleich wird durch die CT-Messungen bestätigt, dass die Verfahren der Thermografie und EMUS sehr gut geeignet sind, um die Grenzflächen eines komplexen Hybridverbundes zu charakterisieren.

Weiterhin hat sich sogar auch gezeigt, dass Defekte im Thermoplast, wie beispielsweise Poren, zwar nicht mittels Thermografie und EMUS, jedoch durch CT detektiert werden konnten. Da die CT-Messung trotz der flächigen Hybridbauteile bereits sehr gute Ergebnisse liefert, ist ein zusätzlicher Einsatz der Computerlaminografie nicht notwendig.

5. Zusammenfassung

Die Ergebnisse dieser Dissertation zeigen, dass die Charakterisierung einer komplexen Hybridstruktur mit zwei Grenzflächen mittels verschiedener zFP-Methoden möglich ist.

Zunächst wurde durch Messungen an CFK-Proben mit einfacher Rechteckgeometrie nachgewiesen, dass künstlich eingebrachte Defekte (z.B. Gappings) sowie durch mechanische Versuche entstandene Delaminationen mittels Blitzthermografie zweifelsfrei detektiert werden können. Auch auf geklebte Aluminium/CFK-Proben wurde dieses Verfahren angewandt und dabei die Klebung sowie klebfreie Stellen nachgewiesen.

In einem weiteren Schritt wurde dann gezeigt, dass auch an komplexen Aluminium/CFK-Hybriden künstlich eingebrachte Defekte, wie beispielsweise Falten in verschiedenen Lagen des CFK, Gappingdefekte, Styroporkugeln sowie Kapton- und Teflonstreifen, sehr gut mittels Blitzthermografie detektiert werden können. Neben den künstlich eingebrachten Defekten konnten darüber hinaus auch Delaminationen an der Grenzfläche zwischen CFK und Thermoplast, die durch quasistatische oder dynamische Zugversuche hervorgerufen wurden, zweifelsfrei detektiert werden. Zusätzlich zur Blitzthermografie wurde in dieser Arbeit auch die induktive, durch eine Wirbelstromspule angeregte Thermografie verwendet. Dabei hat sich gezeigt, dass mittels induktiver Thermografie zwar sehr gut die Faserorientierung der zu untersuchenden Probe charakterisiert werden kann, Delaminationen, die durch mechanische Versuche induziert worden sind, jedoch nicht oder nicht besser als bei der Blitzthermografie detektiert werden können. Als dritte Anregungsmethode wurde die Anregung mittels IR-Arrays genutzt. Genau wie bei der Blitzthermografie war es auch hier möglich, künstlich eingebrachte Defekte sowie Defekte an der Grenzfläche zu detektieren. Da die Auswertung der Amplituden- und Phasenbilder der IR-Array-Thermografie jedoch deutlich länger dauert, ist die Blitzthermografie dieser vorzuziehen. Als erstes Fazit lässt sich folglich zusammenfassen, dass künstlich eingebrachte Defekte und Defekte an der Grenzfläche CFK/Thermoplast mittels Blitzthermografie, induktiver Thermografie sowie IR-Array-Thermografie detektiert werden können. Durch diese Erkenntnis kann der erste Teil der ersten wissenschaftlichen Hypothese, der besagt, dass mittels Thermografie die Grenzflächen sowie andere Defekte der verwendeten Hybridstruktur aus Aluminium und CFK charakterisiert werden können, bestätigt werden.

Der zweite Teil der ersten wissenschaftlichen Hypothese bezieht sich auf die Grenzflächencharakterisierung mittels EMUS-Sensoren. Diese wurden genutzt, um die tieferliegende Grenzfläche zwischen Aluminium und Thermoplast zu untersuchen. Da die zu untersuchenden Hybridbauteile eine komplexe Geometrie aufweisen, wurde anfangs sichergestellt, dass die Position der EMUS-Sensoren keinen Einfluss auf die Messergebnisse hat. Danach wurde gezeigt, dass es sinnvoll ist 4 mm Prüfköpfe einzusetzen, da nur so reproduzierbare Ergebnisse erhalten werden. Die im Anschluss durchgeführten Messungen haben gezeigt, dass es mittels EMUS-Sensoren möglich ist, an äußerlich intakten Hybridproben Schädigungen der innenliegenden Grenzfläche zwischen Aluminium und Thermoplast nachzuweisen. Außerdem konnten dabei verschiedene Schädigungsstadien der Hybride unterschieden werden. Der zweite Teil der ersten wissenschaftlichen Hypothese kann also ebenfalls bestätigt werden.

Neben der Möglichkeit die EMUS-Sensoren zur Grenzflächencharakterisierung zu nutzen, wurden diese auch als Anregungsquelle für die Thermografie eingesetzt. Dabei wurde mithilfe der EMUS-Sensoren Energie so in das Hybridbauteil eingebracht, dass der Wärmestrom durch eine Thermografiekamera aufgezeichnet werden konnte. Es war zu erkennen, dass bis zu einer Zeit von ca. 2,5 min nur eine geringe Erwärmung der Probe von ca. 0,3 K eintritt. Ein klarer Wärmekontrast konnte sogar erst nach ca. 12,5 min detektiert werden. Dieses Ergebnis zeigt, dass die EMUS-Sensoren als Anregungsmethode eher ungeeignet sind, da es sehr lange dauert bis eine Messung abgeschlossen ist und ein Urteil über den Zustand des Bauteils gefällt werden kann.

Die zweite wissenschaftliche Hypothese dieser Arbeit besagte, dass mithilfe der Fast Fourier Transformation eine Verbesserung der Thermografiemessungen zu erwarten ist. Um diese Annahme beweisen zu können, wurde in einem ersten Schritt aus den bereits zuvor gewonnenen Abkühlsequenzen Amplituden- und Phasenbilder ohne Störeinflüsse berechnet. Danach wurden diese mit den Abkühlbildern verglichen. Dabei zeigte sich, dass der Einsatz der Fast Fourier Transformation stellenweise zu einer Verbesserung der Ergebnisse führt. So gelang es beispielsweise durch die FFT eine größere Anzahl an Gappingdefekten in der dritten CFK-Lage sowie in Transmissionsanordnung zu detektieren. Außerdem ermöglichte es die Anwendung der FFT auch Defekte zu detektieren, die erst im Laufe des Produktionsprozesses in das Material eingebracht

wurden und die durch die Auswertung der Abkühlbilder nicht zu detektieren waren. Auch die zweite wissenschaftliche Hypothese dieser Arbeit lässt sich somit bestätigen.

Aufbauend auf den Thermografiemessungen wurde zusätzlich eine POD-Berechnung durchgeführt. Dabei wurde die Auffindwahrscheinlichkeit von Gappingdefekten mit verschiedenen Durchmessern, in verschiedenen Lagen des CFK sowie mit unterschiedlicher Prüfanordnung (Reflexion oder Transmission) berechnet. Weiterhin wurden geschwärzte und ungeschwärzte Proben untersucht. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass Defekte in der zweiten Lage besser zu detektieren sind als Defekte in der dritten Lage. Außerdem sind Fehler in Transmissionsanordnung besser zu detektieren als Fehler in Reflexionsanordnung. Der Einsatz der FFT bringt nur im Fall der geschwärzten Proben einen Vorteil, da nur bei diesen durch den Einsatz der FFT mehr Defekte detektiert werden konnten. Weiterhin wurde gezeigt, dass die Charakterisierung von 42 Defekten ausreichend ist, um eine valide POD-Berechnung zu erreichen.

Im Anschluss daran erfolgte die Überprüfung der dritten wissenschaftlichen Hypothese. Diese besagte, dass durch eine Datenfusion von Blitzthermografie und induktiver Thermografie die zuvor erzielten Messergebnisse der einzelnen Verfahren optimiert werden können. Es hat sich gezeigt, dass durch die Fusion die Vorteile der einzelnen Verfahren genutzt werden können. So konnten bei der Charakterisierung einer Probe mit Kaptonstreifen als Fremdkörper, die zuvor nur durch die Blitzanregung zu detektieren waren, die Streifen auch im fusionierten Bild erkannt werden. Darüber hinaus konnte im gleichen Bild auch die Faserausrichtung der CFK-Struktur gesehen werden, die sonst nur durch die induktive Thermografie detektiert werden konnte. Außerdem konnte nachgewiesen werden, dass durch die Fusion Fehler detektiert werden können, die von den einzelnen Verfahren nicht detektiert werden konnten. Ein weiterer Vorteil der Datenfusion zeigte sich zudem darin, dass künstlich in die Probe eingebrachte Delaminationen mit besserem Kontrast detektiert werden konnten. Insgesamt konnten die zuvor erzielten Messergebnisse durch den Einsatz der Datenfusion also verbessert werden, womit auch die dritte wissenschaftliche Hypothese dieser Dissertation bestätigt wäre.

Die vierte wissenschaftliche Hypothese dieser Arbeit lautete, dass durch eine Datenfusion von Thermografie und EMUS eine verbesserte Grenzflächencharakterisierung zu erreichen sei. Bei der Fusion der Daten von Thermografie und EMUS bestand zunächst das Problem, dass die Geometrie der Hybridstruktur mit eingefügtem Thermoplast es nicht zuließ, mit

beiden Verfahren dieselbe Grenzfläche zu charakterisieren. Um doch noch eine Datenfusion von Thermografie und EMUS zu ermöglichen, wurde stattdessen eine Hybridstruktur ohne Thermoplast und mit nur einer Grenzfläche untersucht. Doch auch hier zeigte sich, dass die Ergebnisse der beiden Verfahren nicht vollends in Einklang gebracht werden konnten. Dies lag insbesondere daran, dass die Thermografiebilder Helligkeitswerte zeigten, die die gesamte Probe abbildeten, wohingegen die EMUS-Messungen nur Reflexionen an den Kanten des Aluminiums oder Reflexionen an Defekten der Grenzfläche wiedergaben. Durch die Verwendung eines MATLAB-Algorithmus konnten die Daten der beiden zFP-Verfahren letztlich jedoch so kombiniert werden, dass eine automatische Defekterkennung möglich war. Darüber hinaus konnten die erzielten Ergebnisse dazu verwendet werden, eine Aussage hinsichtlich des Sensitivitätsgrades der beiden Methoden treffen zu können. Da es jedoch nicht möglich war, die Versuche in situ durchzuführen, musste neben dem entwickelten Algorithmus auch das Prüfverfahren der Computertomografie zur Hilfe genommen werden. Dabei konnte gezeigt werden, dass man mittels EMUS in der Lage ist, Grenzflächendefekte, wie beispielsweise Kissing Bonds, zu detektieren. Da dies mit Blitzthermografie und CT nicht möglich war, konnte an dieser Stelle eine Aussage über den Sensitivitätsgrad der zFP-Methoden getroffen werden: EMUS reagiert sensitiver auf Grenzflächendefekte als die Thermografie sowie CT, darüber hinaus reagiert CT sensitiver als die Thermografie. Ausgehend von diesem Ergebnis kann das Oberflächenprüfverfahren Thermografie also als erster „grober“ Scan einer Probe zur Vorauswahl von eventuell vorliegenden Defekten gesehen werden. In einem weiteren, „feineren“ Untersuchungsschritt hingegen sollte dann das Volumenprüfverfahren EMUS verwendet werden. Diese Vorgehensweise entspricht dem adaptiven Sampling, was eine Prüfzeitersparnis nach sich zieht. Des Weiteren war es durch eine Anpassung der Defektbedingungen im Algorithmus möglich, verschiedenen Prüfanforderungen gerecht zu werden. So konnten durch eine Variation der Defektbedingung im Thermografiebild Risse im CFK und Delaminationen an der Grenzfläche CFK/Aluminium voneinander unterschieden werden. Des Weiteren konnte man für die Prüfung relevante Bereiche im Sinne der „Region of Interest“ auswählen und eingrenzen.

Insgesamt lässt sich also zusammenfassen, dass mit beiden Verfahren zwar keine ortsgenaue Datenfusion, wie sie zur Bestätigung der dritten Hypothese durchgeführt wurde, möglich ist, jedoch eine Grenzfläche gleichzeitig von zwei zFP-Verfahren

automatisch auf Defekte untersucht werden kann. Dieses Ergebnis zeigt, dass die vierte Hypothese dieser Arbeit bestätigt werden kann.

Um die Ergebnisse der verschiedenen Messungen dieser Arbeit zu validieren, wurden abschließend CT-Messungen durchgeführt. Durch die CT-Messungen konnten die Ergebnisse der Thermografie- und EMUS-Messungen bestätigt werden sowie Poren im Thermoplast nachgewiesen werden.

Zusammengefasst zeigt diese Arbeit, dass die Grenzflächen in komplexen, formoptimierten Hybridstrukturen aus Aluminium und CFK durch Thermografie und EMUS unter den gegebenen Bedingungen charakterisiert werden können. Ebenso können die gewonnenen Ergebnisse durch den Einsatz der Fast Fourier Transformation sowie der Datenfusion verbessert werden.

6. Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit wurden unter Einhaltung verschiedener Randbedingungen erzielt. Zu nennen sind dabei einerseits die Laborbedingungen, wie eine konstante Temperatur sowie Umgebungsstrahlung, und andererseits die bekannte Probengeometrie und Werkstoffauswahl (Lagenaufbau, CFK, Thermoplast und Aluminium). Obwohl diese Arbeit zeigt, dass Defekte in verschiedenen Probengeometrien detektiert werden können, gibt es eine Vielzahl anderer möglicher Geometrien einer Metall-CFK-Verbindung, die im Rahmen von weiteren Arbeiten näher untersucht werden könnten. Im Gegensatz zu den in dieser Arbeit verwendeten Hybridstrukturen mit einer 2D-Geometrie, könnten zukünftig auch Messungen an 3D-Geometrien durchgeführt werden. Dabei könnten sowohl die CFK-Komponente als auch der Aluminiemeinleger aus der Ebene heraustreten. Durch diese Erhöhung des Komplexitätsgrades würden sich jedoch die EMUS-Messung sowie die Thermografiemessung schwieriger gestalten. Da die CFK-Komponente bei einer dreidimensionalen Geometrie nicht mehr in einer Ebene läge, wäre es schwierig, die Oberfläche genau zu fokussieren. Aus diesem Grund müssten bei solchen komplexen Strukturen verschiedene Eingangsbedingungen, wie beispielsweise der Neigungswinkel der Oberflächen, mitberücksichtigt werden.

Neben der geometrischen Anpassung der Aluminium- und CFK-Struktur könnte in zukünftigen Arbeitsschritten auch die Thermoplastkomponente angepasst werden. Diese könnte dabei durch kleine Pins an der Oberfläche topologieoptimiert werden. Diese Optimierung würde dann für eine bessere Anbindung der Thermoplastkomponente an CFK sorgen. Weiterhin könnte für eine bessere Anbindung des CFK an den Thermoplast die Matrix aus einem thermoplastischen Material statt einem Duroplast hergestellt werden. Durch die ähnlichen Eigenschaften der beiden Materialien könnte man sich neben dem Formschluss dann auch einen Stoffschluss über adhäsive Wechselwirkungen zu Nutzen machen.

Zudem liefert diese Arbeit keine Aussage darüber, wie die zFP-Verfahren auf eine Variation der Werkstoffe reagieren. So könnte statt Aluminium Titan verwendet werden oder statt kohlefaserverstärktem Kunststoff aramid- oder glasfaserverstärkter Kunststoff eingesetzt werden. Auch die Verwendung von auxetischen Materialien wäre denkbar. Auxetische Materialien zeichnen sich durch eine negative Poissonzahl aus, werden also im

Gegensatz zu herkömmlichen Materialien bei einer Zugbelastung breiter statt dünner. Durch eine Kombination von Materialien mit verschiedenen Poissonzahlen könnte der auftretende Steifigkeitsunterschied von Aluminium und CFK ausgeglichen werden. Diese Variante könnte also eine potentielle Alternative zur Verwendung der Thermoplastkomponente darstellen. Eine Untersuchung dieser Modifikationen könnte ebenfalls in zukünftigen Arbeiten erfolgen.

Weiterhin sollen die Ergebnisse dieser Arbeit in Zukunft dazu genutzt werden, die erfolgreich angewandten Verfahren zur Grenzflächencharakterisierung weiter zu optimieren. Dabei wäre es beispielsweise denkbar, EMUS-Sensoren auch in situ zu verwenden, um während einer mechanischen Belastung auftretende Schädigungen sofort detektieren zu können. Durch die In situ-Anwendung könnten darüber hinaus Bauteile auch im eingebauten Zustand überprüft werden, was einen teuren Ausbau überflüssig machen würde. Zudem sollten die Ergebnisse der EMUS-Messung zukünftig quantitativ ausgewertet werden. Ein erster Schritt hinsichtlich der quantitativen Auswertung der EMUS-Messung wäre die Bestimmung der Delaminationsfläche. Bei dieser anfangs eindimensionalen Methode müssen die Amplitudendifferenzen der EMUS-Signale mit der Delaminationsfläche korreliert werden. Mögliche Ansätze hierzu werden in der Bachelorarbeit von S. Herter [81] vorgestellt.

Darüber hinaus wäre es denkbar, die Größe des Defekts (z.B. Fläche der Falte, Fläche des Teflonstreifens oder Winkel der Faserfehlorientierung) mit den mechanischen Kennwerten, wie beispielsweise Zyklenzahl oder maximale Zugfestigkeit, zu korrelieren (Effects of Defects). Dabei müsste gewährleistet werden, dass der Aushärtegrad der Epoxidmatrix bei allen untersuchten Proben gleich ist, um eine Verfälschung der Ergebnisse zu vermeiden. Aus diesem Grund könnte eine dem Produktionsprozess nachgelagerte Homogenisierung oder sogar Nachvernetzung der Epoxidmatrix durch erhöhte Temperaturen notwendig werden.

Auch die thermografische Anregungsmethode mittels IR-Arrays könnte in zukünftigen Arbeiten noch verbessert werden. Eine mögliche Vorgehensweise bestünde beispielsweise darin, mehrere IR-Arrays gleichzeitig zu nutzen. Dabei könnten z.B. zwei Arrays zwischen der Probe und der Kamera und zwei Arrays hinter der Probe angeordnet werden. Durch diese Anordnung wären also auch gleichzeitig eine Transmissions- und eine Reflexionsmessung durchführbar. In einem weiteren Schritt könnte hier dann auch

überprüft werden, ob diese spezielle Anordnung eine Datenfusion aus Reflexions- und Transmissionsmessungen ersetzen könnte. Eine weitere Anpassung der Methode wäre das gezielte Ansteuern einzelner LED-Zeilen des Arrays (analog zum Sampling Phased Array beim Ultraschall). Dabei müssen alle erhaltenen Thermografiebilder aus den verschiedenen Anregungskonfigurationen gespeichert und in einer nachgelagerten Rekonstruktion dieser Einzelbilder zu einem Gesamtbild der Probe verrechnet werden. Ansätze zu diesem Vorgehen liefern Burgholzer et al. [82].

Auch die in dieser Arbeit angewandte Datenfusion könnte in Zukunft noch weiter entwickelt werden. So könnte bei der Blitzthermografie und der induktiven Thermografie durch eine Fusion von Amplituden- und Phasenbildern bei verschiedenen Frequenzen eine Vielzahl an Kombinationen erreicht und dadurch die Charakterisierung von Grenzflächen und Defekten verbessert werden.

Bei der Datenfusion von Thermografie und EMUS wäre ein Modell hilfreich, bei dem die Ergebnisse aus EMUS und Thermografie so angepasst werden, dass diese pixelweise fusionierbar sind und dadurch eine quantitative Auswertung möglich ist. Konkret bedeutet dies, dass beispielsweise die Signalamplituden der EMUS-Messung in Helligkeitswerte umgewandelt werden, um diese letztlich einfacher vergleichen und fusionieren zu können. Alternativ wäre auch die Umwandlung der Helligkeitswerte der Thermografiekamera in Signalamplituden denkbar. Welche der beiden Methoden letztlich bessere Ergebnisse erzielt, sollte dabei in Zukunft ebenso überprüft werden.

Um das volle Potenzial des hier entwickelten MATLAB-Algorithmus zu nutzen, könnten in Zukunft andere Probeneinspannungen entworfen werden, um In situ-Versuche zu ermöglichen. Durch diese Erweiterung wäre man in der Lage, Proben während der mechanischen Prüfung zu überwachen und dabei die maximale Kraft beziehungsweise Zyklenzahl, bei der noch keine Schädigung eintritt, zu bestimmen. Unabhängig von der hier gezeigten Probengeometrie kann der Algorithmus in Zukunft zum Monitoring von Proben während einer mechanischen Belastung eingesetzt werden.

7. Literaturverzeichnis

- [1] R. Usamentiaga, P. Venegas, J. Guerediaga, L. Vega, J. Molleda und F. G. Bulnes, „Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing,“ *Sensors*, Bd. 14, Nr. 7, pp. 12305-12348, 2014.
- [2] H. Park, M. Choi, J. Park und W. Kim, „A study on detection of micro-cracks in the dissimilar metal weld through ultrasound infrared thermography,“ *Infrared Physics & Technology*, Bd. 62, pp. 124-131, 2014.
- [3] S. A. Keo, F. Brachelet, F. Breaban und D. Defer, „Defect detection in CFRP by infrared thermography with CO₂ Laser excitation compared to conventional lock-in infrared thermography,“ *Composites Part B: Engineering*, Bd. 69, pp. 1-5, 2015.
- [4] C. Maierhofer, P. Myrach, M. Reischel, H. Steinfurth, M. Röllig und M. Kunert, „Characterizing damage in CFRP structures using flash thermography in reflection and transmission configurations,“ *Composites Part B: Engineering*, Bd. 57, pp. 35-46, 2014.
- [5] Y. Li, W. Zhang, Z.-w. Yang, J.-y. Zhang und S.-j. Tao, „Low-velocity impact damage characterization of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) using infrared thermography,“ *Infrared Physics & Technology*, Bd. 76, pp. 91-102, 2016.
- [6] C. K. Liew, M. Veidt, N. Rajic, K. Tsoi, D. Rowlands und H. Morton, „Inspections of Helicopter Composite Airframe Structures using Conventional and Emerging Nondestructive Testing Methods,“ *Journal of Testing and Evaluation*, Bd. 39, Nr. 6, pp. 1-12, 2011.
- [7] C. Meola, G. M. Carlomagno, A. Squillace und A. Vitiello, „Non-destructive evaluation of aerospace materials with lock-in thermography,“ *Engineering Failure Analysis*, Bd. 13, pp. 380-388, 2006.
- [8] M. Lizaranzu, A. Lario, A. Chiminelli und I. Amenabar, „Non-destructive testing of composite materials by means of active thermography-based tools,“ *Infrared Physics & Technology*, Bd. 71, pp. 113-120, 2015.
- [9] L. Yuanlin, T. Qingju, B. Chiwu, M. Chen, W. Pinshan und Z. Jiansuo, „Pulsed

- infrared thermography processing and defects edge detection using FCA and ACA,“ *Infrared Physics & Technology*, Bd. 72, pp. 90-94, 2015.
- [10] Y. Huo, H.-J. Li, Y.-J. Zhao und C.-L. Zhang, „Study on detecting CFRP composites using pulsed infrared thermography,“ *International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2011: Advances in Infrared Imaging and Applications*, Bd. 8193, Beijing, China, 2011.
- [11] R. Waugh, J. Dulieu-Barton und S. Quinn, „Modelling and evaluation of pulsed and pulse phase thermography through application of composite and metallic studies,“ *NDT&E International*, Bd. 66, pp. 52-66, 2014.
- [12] G. Mayr, B. Plank, J. Sekelja und G. Hendorfer, „Active thermography as a quantitative method for non-destructive evaluation of porous carbon fiber reinforced polymers,“ *NDT&E International*, Bd. 44, Nr. 7, pp. 537-543, 2011.
- [13] Y. He und R. Yang, „Eddy Current Volume Heating Thermography and Phase Analysis for Imaging Characterization of Interface Delamination in CFRP,“ *IEEE Transactions on industrial informatics*, Bd. 11, Nr. 6, pp. 1287-1297, 2015.
- [14] R. Yang und Y. He, „Pulsed inductive thermal wave radar (PI-TWR) using cross correlation matched filtering in eddy current thermography,“ *Infrared Physics & Technology*, Bd. 71, pp. 469-474, 2015.
- [15] M. Pan, Y. He, G. Tian, D. Chen und F. Luo, „Defect characterisation using pulsed eddy current thermography under transmission mode and NDT applications,“ *NDT&E International*, Bd. 52, pp. 28-36, 2012.
- [16] R. Yang und Y. He, „Polymer-matrix composites carbon fibre characterisation and damage inspection using selectively heating thermography (SeHT) through electromagnetic induction,“ *Composite Structures*, Bd. 140, pp. 590-601, 2016.
- [17] L. Cheng und G. Y. Tian, „Transient Thermal Behavior of Eddy-Current Pulsed Thermography for Nondestructive Evaluation of Composites,“ *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Bd. 62, Nr. 5, pp. 1215-1222, 2013.
- [18] R. Thomas, M. Libin und K. Balasubramanian, „Scanning Induction Thermography (SIT) on damaged Carbon-Fiber Reinforced Plastics (CFRP) components,“ *AIP Conference Proceedings*, Bordeaux, France, 2015.

- [19] Y. He, G. Tian, M. Pan und D. Chen, „Impact evaluation in carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates using eddy current pulsed thermography,“ *Composite Structures*, Bd. 109, pp. 1-7, 2014.
- [20] L. Cheng und G. Y. Tian, „Pulsed Electromagnetic NDE for Defect Detection and Characterisation in Composites,“ *Proceedings IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, pp. 1902-1907, Graz, Austria, 2012.
- [21] R. Yang und Y. He, „Optically and non-optically excited thermography for composites: A review,“ *Infrared Physics & Technology*, Bd. 75, pp. 26-50, 2016.
- [22] S. Sojasi, F. Khodayar, F. Lopez, C. Ibarra-Castando, X. Maldague, V. Vavilov und A. Chulkov, „Infrared Testing of CFRP Components: Comparisons of Approaches using the Tanimoto Criterion,“ *NDT in Canada*, Edmonton, Canada, 2015.
- [23] S. Pickering, K. Chatterjee, D. Almond und S. Tuli, „LED optical excitation for the long pulse and lock-in thermographic techniques,“ *NDT&E International*, Bd. 58, pp. 72-77, 2013.
- [24] D. Roy, K. Chatterjee und S. Tuli, „Characterization and Energy absorption efficiency determination of LED as an effective photothermal excitation source in lock-in thermography,“ *IEEE Sensors Journal*, Bd. 15, Nr. 10, pp. 6010-6016, 2015.
- [25] C. Maierhofer, P. Myrach, H. Steinfurth, M. Reischel und M. Röllig, „Development of standards for flash thermography and lock-in thermography,“ *12th International Conference on quantitative infrared thermography*, Bordeaux, France, 2014.
- [26] A. Chulkov, V. Vavilov und A. Malakhov, „A LED-based thermal detector of hidden corrosion flaws,“ *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Bd. 52, Nr. 10, pp. 588-593, 2016.
- [27] Y. Duan, P. Servais, M. Genest, C. Ibarra-Castaneda und X. P. Maldague, „ThermoPoD: A reliability study on active infrared thermography for the inspection of composite materials,“ *Journal of Mechanical Science and Technology*, Bd. 26, Nr. 7, pp. 1985-1991, 2012.
- [28] A. Al-Mosawe, R. Al-Mahaidi und X.-L. Zhao, „Bond behaviour between CFRP laminates and steel members under different loading rates,“ *Composite Structures*, Bd. 148, pp. 236-251, 2016.

- [29] A. Agarwal, S. J. Foster und E. Hamed, „Wet thermo-mechanical behavior of steel-CFRP joints - An experimental study,“ *Composites Part B: Engineering*, Bd. 83, pp. 284-296, 2015.
- [30] J. He und G. Xian, „Debonding of CFRP-to-steel joints with CFRP delamination,“ *Composite Structures*, Bd. 153, pp. 12-20, 2016.
- [31] J. Tashan und R. Al-mahaidi, „Investigation of the parameters that influence the accuracy of bond defect detection in CFRP bonded specimens using IR thermography,“ *Composite Structures*, Bd. 94, Nr. 2, pp. 519-531, 2012.
- [32] W. L. Lai, S. C. Kou, C. S. Poon, W. F. Tsang, S. P. Ng und Y. Y. Hung, „Characterization of Flaws Embedded in Externally Bonded CFRP on Concrete Beams by Infrared Thermography and Shearography,“ *Journal of Nondestructive Evaluation*, Bd. 28, Nr. 1, pp. 27-35, 2009.
- [33] E. Grinzato, R. Trentin, P. Bison und S. Marinetti, „Control of CFRP strengthening applied to civil structures by IR thermography,“ *Proceedings Volume 6541, Thermosense XXIX*, Defense and Security Symposium, Orland, Florida, United States, 2007.
- [34] M. Genest, M. Martinez, N. Mrad, G. Renaud und A. Fahr, „Pulsed thermography for non-destructive evaluation and damage growth monitoring of bonded repairs,“ *Composite Structures*, Bd. 88, Nr. 1, pp. 112-120, 2009.
- [35] P. Peres, D. Barnoncel, K. Balasubramaniam und M. Castaings, „New experimental investigations of adhesive bonds with ultrasonics SH guided waves,“ *Proceedings 18th International Conference on Composite Materials*, Jeju, Korea, 2011.
- [36] K. Arun, R. Dhayalan, K. Balasubramaniam, B. Maxfield, P. Peres und D. Barnoncel, „An EMAT-based shear horizontal (SH) wave technique for adhesive bond inspection,“ *Proceedings of the National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation*, pp. 82-86, Chennai, India, 2011.
- [37] M. Castaings, „SH ultrasonic guided waves for the evaluation of interfacial adhesion,“ *Ultrasonics*, Bd. 54, pp. 1760-1775, 2014.
- [38] C. J. Brotherhood, B. W. Drinkwater und S. Dixon, „The detectability of kissing bonds in adhesive joints using ultrasonic techniques,“ *Ultrasonics*, Bd. 41, pp. 521-529, 2003.

- [39] D. Fei und D. K. Hsu, „A model and experimental study of fiber orientation effects on shear wave propagation through composite laminates,“ *The Journal of the Acoustical Society of America*, Bd. 111, Nr. 2, pp. 840-855, 2002.
- [40] S. Neuhaus, „Geführte SH-Ultraschallwellen an mit Polymeren gefügten Blechen,“ *Bachelorarbeit am Lehrstuhl für Leichtbausysteme, Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP), Universität des Saarlandes*, 2015.
- [41] S. Quirin, S. Neuhaus und H.-G. Herrmann, „Testing ultrasonic SH waves to estimate the quality of adhesive bonds in small hybrid structures,“ *Proceedings of Euro Hybrid Materials and Structures*, Kaiserslautern, Germany, 2016.
- [42] W. Luo und J. L. Rose, „Guided wave thickness measurement with EMATs,“ *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, Bd. 45, Nr. 11, pp. 735-739, 2003.
- [43] O. Putkis, R. Dalton und A. Croxford, „The anisotropic propagation of ultrasonic guided waves in composite materials and implications for practical applications,“ *Ultrasonics*, Bd. 65, pp. 390-399, 2016.
- [44] X. Gros, J. Bousigue und K. Takahashi, „NDT data fusion at pixel level,“ *NDT&E International*, Bd. 32, pp. 283-292, 1999.
- [45] C. Meola, *Infrared Thermography: Recent Advances and Future Trends*, New York, NY: Bentham Science, 2012.
- [46] K.-P. Möllmann, D. Karstädt, F. Pinno und M. Vollmer, „Selected critical applications for thermography: Convections in fluids, selective emitters and highly reflecting materials,“ *Proceedings of the Infrared Camera Calibration Conference*, Bd. 6, pp. 161-173, Las Vegas, USA, 2005.
- [47] J. R. Howell, M. M. Pinar und S. Robert, *Thermal Radiation Heat Transfer*, Bd. 5, New York, NY: Taylor & Francis, 2010.
- [48] X. P. Maldague, *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*, New York, NY: John Wiley & Sons, 2001.
- [49] M. Vollmer und K.-P. Möllmann, *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*, Weinheim: Wiley, 2011.
- [50] *DIN 54192:2010-11, Zerstörungsfreie Prüfung - Aktive Thermografie*, Berlin, Beuth

Verlag GmbH.

- [51] R. Arndt, B. Hillemeier, C. Maierhofer, C. Rieck, M. Röllig, H. Scheel und A. Walther, „Zerstörungsfreie Ortung von Fehlstellen und Inhomogenitäten in Bauteilen mit der Impuls-Thermografie,“ *Bautechnik*, Bd. 81, Nr. 10, pp. 786-793, 2004.
- [52] T. Krell, J. Wolfrum und B. Deus, „Puls-Phasen-Thermografie an definiert geschädigten und reparierten Faserverbundbauteilen,“ *Thermografie Kolloquium*, 2007.
- [53] C. Maierhofer, R. Arndt, M. Röllig, F. Weritz und H. Wiggerhauser, „Untersuchung von Betonstrukturen mit der Puls-Phasen-Thermografie,“ *Thermografie Kolloquium*, 2003.
- [54] S. Yarlagadda, H. J. Kim, J. W. Gillespie, N. B. Shevchenko und B. K. Fink, „A Study on the Induction Heating of Conductive Fiber Reinforced Composites,“ *Journal of Composite Materials*, Bd. 36, Nr. 4, pp. 401-421, 2002.
- [55] B. Liu, H. Zhang, H. Fernandes und X. Maldague, „Experimental Evaluation of Pulsed Thermography, Lock-in Thermography and Vibrothermography on Foreign Object Defect (FOD) in CFRP,“ *Sensors*, Bd. 16, Nr. 5, 2016, 743.
- [56] G. Busse und A. Rosencwaig, „Subsurface imaging with photoacoustics,“ *Applied Physics Letters*, Bd. 36, Nr. 10, pp. 815-816, 1980.
- [57] V. Carl und G. Zenzinger, „Automatische Rissprüfung mit induktiv angeregter Thermografie,“ *DGZfP-Jahrestagung*, Bd. 94, Rostock, Deutschland, 2005.
- [58] G. Riegert, „Induktions-Lockin-Thermografie - ein neues Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung,“ *Dissertation am Institut für Kunststofftechnik der Universität Stuttgart*, 2007.
- [59] H. Rösner, U. Netzelmann, J. Hoffmann, W. Karpen, V. Kramb und N. Meyendorf, „Thermographic Materials Characterization,“ *Nondestructive Materials Characterization*, Bd. 67, pp. 246-285, Berlin, Heidelberg, Springer Series in Materials Science, 2004.
- [60] A. Erhard, *Verfahren der zerstörungsfreien Materialprüfung - Grundlagen*, Berlin, 2014.
- [61] Krautkrämer, *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*, Springer-Verlag, 1986.

- [62] Schiebold, *Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung - Ultraschallprüfung*, Springer-Verlag, 2015.
- [63] P. Petcher, S. Burrows und S. Dixon, „Shear horizontal (SH) ultrasound wave propagation around smooth corners,“ *Ultrasonics*, Bd. 54, Nr. 4, pp. 997-1004, 2014.
- [64] G. Hübschen, „Elektromagnetische Ultraschall (EMUS-) Wandler zur Erzeugung horizontal polarisierter Transversalwellen,“ *NDT.net*, Bd. 3, Nr. 3, 1998.
- [65] S. Zhongqing, Y. Lin und L. Ye, „Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review,“ *Journal of Sound and Vibration*, Bd. 295, Nr. 3-5, pp. 753-780, 2006.
- [66] H. Ruser und F. Puente León, „Informationsfusion - Eine Übersicht,“ *Technisches Messen*, Bd. 74, Nr. 3, pp. 93-102, 2007.
- [67] M. Maisl, C. Schorr, F. Porsch und U. Haßler, „Computerlaminographie, Grundlagen und technische Umsetzung,“ *Fachtagung "Industrielle Computertomographie"*, pp. 261-266, FH OÖ Campus Wels, 2010.
- [68] M. Schwarz, J. Summa, S. Quirin und H.-G. Herrmann, „New Approaches in Nondestructive Characterisation of Defects in Metal - CFRP Hybrids,“ *Materials Science Forum*, Bd. 825+826, pp. 976-982, 2015.
- [69] Thermosensorik, *Infrared Camera Head QWIP 384 Dualband - Operating Manual*, Erlangen, 2009.
- [70] E. I. AG, „Vestamid HTplus M1033 - PA66/6T-GF30,“ *Produktdatenblatt*, 2018.
- [71] S. D. GmbH, „Biresin CR170 mit Biresin CH150-3 Härter,“ *Produktdatenblatt*, 2017.
- [72] C. Maierhofer, M. Röllig, K. Ehrig, D. Meinel und G. Cespedes-Gonzales, „Validation of flash thermography using computed tomography for characterizing inhomogeneities and defects in CFRP structures,“ *Composites Part B: Engineering*, Bd. 64, pp. 175-186, 2014.
- [73] F. Pinto, F. Maroun und M. Meo, „Material enabled thermography,“ *NDT&E International*, Bd. 67, pp. 1-9, 2014.
- [74] B. Yang, Y. Huang und L. Cheng, „Defect detection and evaluation of ultrasonic infrared thermography for aerospace CFRP composites,“ *Infrared Physics & Technology*, Bd. 60, pp. 166-173, 2013.

- [75] T. Ummenhofer und R. Plum, „Ultraschallangeregte Thermografie zur Risserkennung im Stahlbau - Ein Verfahren auf dem Prüfstand,“ *Stahlbau*, Bd. 80, Nr. 4, pp. 233-239, 2011.
- [76] C. Annis, „Statistical best-practices for building Probability of Detection (POD) models,“ *R package mh1823, version 4.4.8*, 2016, <http://StatisticalEngineering.com/mh1823/>.
- [77] C. Annis, L. Gandossi und O. Martin, „Optimal sample size for probability of detection curves,“ *Nuclear Engineering and Design*, Bd. 262, pp. 98-105, 2013.
- [78] A. M. Koshti, „Applicability of a Conservative Margin Approach for Assessing NDE Flaw Detectability,“ *Aging Aircraft*, Palm Springs, CA, US, 2007.
- [79] R. Tighe, J. Dulieu-Barton und S. Quinn, „Identification of kissing defects in adhesive bonds using infrared thermography,“ *International Journal of Adhesives and Adhesion*, Bd. 64, pp. 168-178, 2016.
- [80] S. Thompson, „Adaptive Sampling,“ *Proceedings BaNoCoSS*, Norrfällsviken, Schweden, 2011.
- [81] S. Herter, „Quantitative Untersuchungen von Klebverbindungen und Hybridbauteilen mittels geführter Ultraschallwellen an geometrisch komplexen Strukturen,“ *Bachelorarbeit am Lehrstuhl für Leichtbausysteme, Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP)*, Universität des Saarlandes, 2018.
- [82] P. Burgholzer, M. Thor, J. Gruber und G. Mayr, „Three-dimensional thermographic imaging using a virtual wave concept,“ *Journal of Applied Physics*, Bd. 121, 105102, 2017.

8. Anhang

8.1 Datenfusionsalgorithmen

Die folgenden Algorithmen nehmen Bezug auf Kapitel 3.3.

8.1.1 Algorithmus für die Fusion von Blitz- und induktiver Thermografie

Der folgende Algorithmus wird verwendet, um zwei Thermografiebilder quantitativ miteinander zu verrechnen:

```
>> Bild1=imread('C:\Users\Documents\MATLAB\Thermografiebild1.BMP');  
Bild2=imread('C:\Users\Documents\MATLAB\Thermografiebild2.BMP');  
Bild_Diff = imsubtract(Bild2, Bild1);  
  
b_min = 0;  
b_max = 256;  
  
figure('Name','Fusionsbild','NumberTitle','off');  
I = imshow(Bild_Diff,'Displayrange',[b_min b_max])  
colormap gray
```

Dabei werden zwei Thermografiebilder durch den Befehl „imread“ eingelesen. Durch den Befehl „imsubtract“ werden die beiden Bilder voneinander subtrahiert. Die Variablen „b_min“ und „b_max“ geben die Skala der Bildwerte wieder. Durch „figure“ wird der Bildname definiert und durch den Befehl „imshow“ wird das fusionierte Bild schließlich durch das Programm ausgegeben. Der Befehl „colormap“ definiert abschließend, in welchen Farben dieses Bild dargestellt wird (in diesem Fall in Grauwerten).

8.1.2 Algorithmus für die Fusion von EMUS und Thermografie

Im Folgenden ist der Algorithmus zur Auswertung von Thermografiebildern und EMUS-Signalen dargestellt:

```
>> I=imread('C:\Users\Documents\MATLAB\Thermografiebild.BMP');
%figure; imshow(I)
I2= repmat(I,[1 1 3]); G=I2(:,:,1); ind=(G>220) & (G<255);
Y=G; Y(ind)=55;
B=I2(:,:,3); R=I2(:,:,2);
RGB=cat(3,R,Y,Y);
figure; subplot(2,2,1); imshow(RGB)
    if
        any(Y(ind)==55)
        annotation('textbox', [0.62 0.85 0.1 0.1], 'String',{'n.i.O.'}, 'FontSize',20,
'FontName','Arial', 'LineStyle','-','EdgeColor',[1 0 0], 'LineWidth',2,
'BackgroundColor',[1 0 0], 'Color',[0 0 0]);
        else
        annotation('textbox', [0.62 0.85 0.1 0.1], 'String',{'i.O.'}, 'FontSize',20,
'FontName','Arial', 'LineStyle','-','EdgeColor',[0 1 0], 'LineWidth',2,
'BackgroundColor',[0 1 0], 'Color',[0 0 0]);
        end
subplot(2,2,3);
data=xlsread('C:\Users\Documents\MATLAB\EMUS-Signal.xlsx')
x=data(:,1); y=data(:,2);
plot(x,y,'Color',[0,0,0]);
ylabel('Amplitude[V]'); xlabel('Zeit[μs]');
yticks(0:5:10); axis([0 155 0 10]);
    if any(x>25 & y>2)
        annotation('textbox', [0.7 0.75 0.1 0.1], 'String',{'n.i.O.'}, 'FontSize',20,
'FontName','Arial', 'LineStyle','-','EdgeColor',[1 0 0], 'LineWidth',2,
'BackgroundColor',[1 0 0], 'Color',[0 0 0]);
        else
        annotation('textbox', [0.7 0.75 0.1 0.1], 'String',{'i.O.'}, 'FontSize',20,
'FontName','Arial', 'LineStyle','-','EdgeColor',[1 0 0], 'LineWidth',2,
'BackgroundColor',[1 0 0], 'Color',[0 0 0]);
    end
```

```

end

subplot(2,2,[2,4]);
set(gca,'visible','off')

    if (x>25 & y>2) && (ind==(G>220) & (G<255))
annotation('textbox', [0.3 0.5 0.1 0.1], 'String',{'Probe ist n.i.O.'},
'FontSize',28, 'FontName','Arial', 'LineStyle','-','EdgeColor',[0 0 0], 'LineWidth',2,
'BackgroundColor',[1 1 1], 'Color',[1 0 0]);
    elseif (x>25 & y<2) && (ind~=(G>220) & (G<255))
figure; annotation('textbox', [0.3 0.5 0.1 0.1], 'String',{'Probe ist i.O.'},
'FontSize',20, 'FontName','Arial', 'LineStyle','-','EdgeColor',[0 0 0], 'LineWidth',2,
'BackgroundColor',[1 1 1], 'Color',[0 1 0]);
    else
annotation('textbox', [0.04 0.5 0.92 0.1], 'String',{'Achtung! Weitere
Überprüfung notwendig.'}, 'FontSize',20, 'FontName','Arial', 'LineStyle','-','
EdgeColor',[0 0 0], 'LineWidth',2, 'BackgroundColor',[1 1 1], 'Color',[1 0 0]);
    end

```

Nach dem Einlesen und Vorverarbeiten der Daten werden bestimmte Bedingungen für die Defekterkennung definiert. So wird bei einem Thermografiebild ein Defekt erkannt, wenn der Grauwert einen bestimmten Wert übersteigt. In diesem Fall liegt der Grauwert bei 220. Wird dieser Grenzwert überschritten, so werden alle Pixel, die einen Grauwert größer als 220 haben, rot gefärbt. Parallel dazu läuft eine if-Schleife, die eine Textbox mit den Worten „n.i.O.“ ausgibt, sobald ein Pixel rot gefärbt werden sollte. Wird kein Pixel rot gefärbt, so steht in der Textbox „i.O.“. Zusätzlich lässt sich mit dem Befehl „figure; imshow(I)“ gleichzeitig das eingelesene Thermografiebild öffnen. Dadurch besteht die Möglichkeit bei der Meldung eines Defekts die Bilder zur Kontrolle zu vergleichen.

Für die EMUS-Messungen werden Defekte erkannt, wenn das Signal eine Amplitude von 2 V überschreitet. Dabei muss beachtet werden, dass nur Signalamplituden nach einer Zeit von 25 μ s betrachtet werden. Durch die Verwendung einer if-Schleife wird festgelegt, dass bei einem Überschreiten der Grenze von 2 V eine Textbox mit den Worten „n.i.O.“

erscheint. Wird dieser Wert nicht überschritten, erscheint eine Textbox mit den Worten „i.O.“.

In einem weiteren Schritt erstellt das Programm eine Mitteilung, die je nach Kombination der erfüllten Bedingungen die Worte „Probe ist i.O.“ (beide Bedingungen nicht erfüllt), „Probe ist n.i.O.“ (beide Bedingungen erfüllt) oder „Achtung! Weitere Überprüfung notwendig.“ (jeweils eine Bedingung erfüllt, die andere nicht erfüllt) ausgibt.

Der Befehl „subplot“ öffnet das Thermografiebild, die EMUS-Messung und die Mitteilung in demselben Fenster.

Alle weiteren Einträge im Algorithmus beziehen sich auf die Beschriftung, Skalierung und Darstellung der EMUS-Signale sowie auf die Darstellung der Textbox in Thermografiebild und EMUS-Signal.

8.2 Zusätzliche Thermografiebilder mit EMUS-Sensoren als Anregungsquelle

Abb. 95 und Abb. 96 zeigen zusätzliche Thermografiebilder von Proben, die mittels EMUS-Sensoren angeregt wurden (siehe Kapitel 4.1.2.3). Die Thermografiebilder wurden dabei 2,5 min sowie 12,5 min nach der Anregung aufgenommen. Auch bei diesen Proben ist zu erkennen, dass nach 2,5 min noch keine Erwärmung auftritt und erst nach 12,5 min eine signifikante Erwärmung zu erkennen ist.

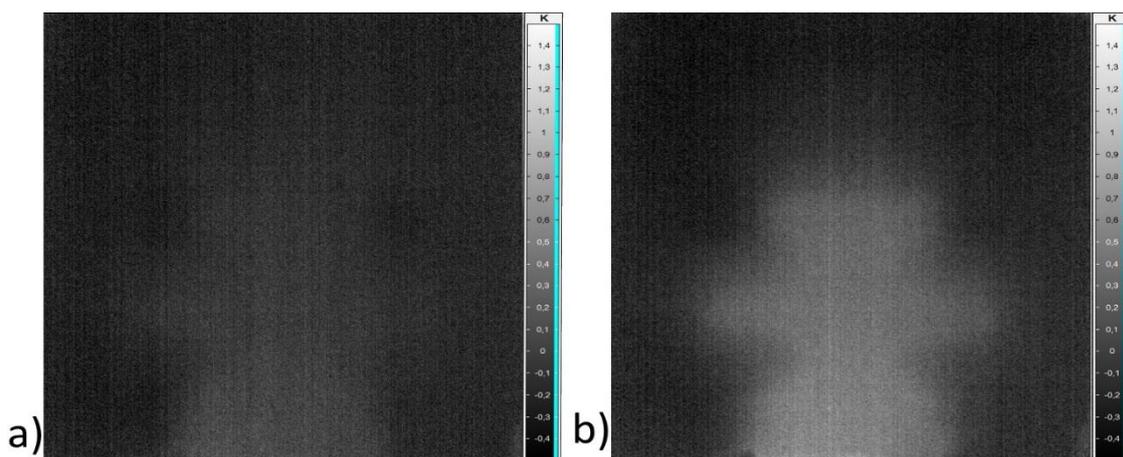


Abb. 95: Anregung der Probe A80 durch EMUS-Sensoren nach a) 2,5 min und b) 12,5 min

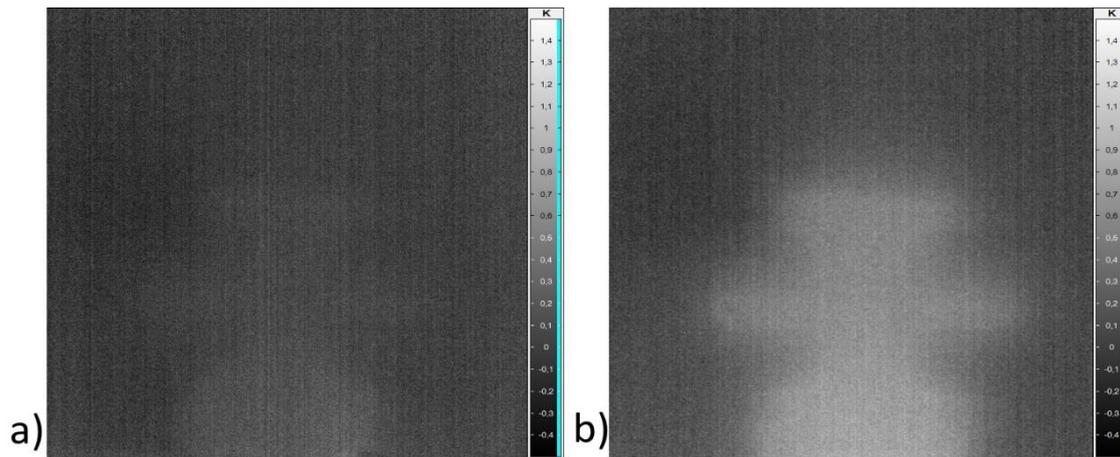


Abb. 96: Anregung der Probe A92 durch EMUS-Sensoren nach a) 2,5 min und b) 12,5 min

8.3 Zusätzliche Bilder und Diagramme zur POD-Berechnung

Die nachfolgenden Thermografiebilder zeigen Beispiele für Thermografiebilder von Proben mit Gappingdefekt. Es handelt sich hierbei um geschwärzte Proben. Abb. 97 zeigt die Thermografiebilder in Reflexionsanordnung a) 1 s nach der Blitzanregung und b) das Phasenbild bei einer Frequenz von 0,24 Hz. Bei beiden Bildern sind Defekte bis zu einem Durchmesser von 4 mm zu erkennen. Der Einsatz der FFT ermöglicht es an dieser Stelle nicht, kleinere Defekte mit einem Durchmesser unter 4mm zu detektieren. Jedoch kann durch die FFT ein zusätzlicher länglicher Defekt oberhalb des oberen Arms dargestellt werden.

Abb. 98 zeigt die Thermografiebilder in Transmissionsanordnung a) 1,25 s nach der Blitzanregung und b) das Phasenbild bei einer Frequenz von 0,24 Hz. In beiden Bildern lassen sich Gappingdefekte bis zu einem Durchmesser von 2 mm detektieren. Auch in diesem Fall ist durch den Einsatz der FFT für die Detektion der Gappingdefekte kein Mehrwert zu erzielen.

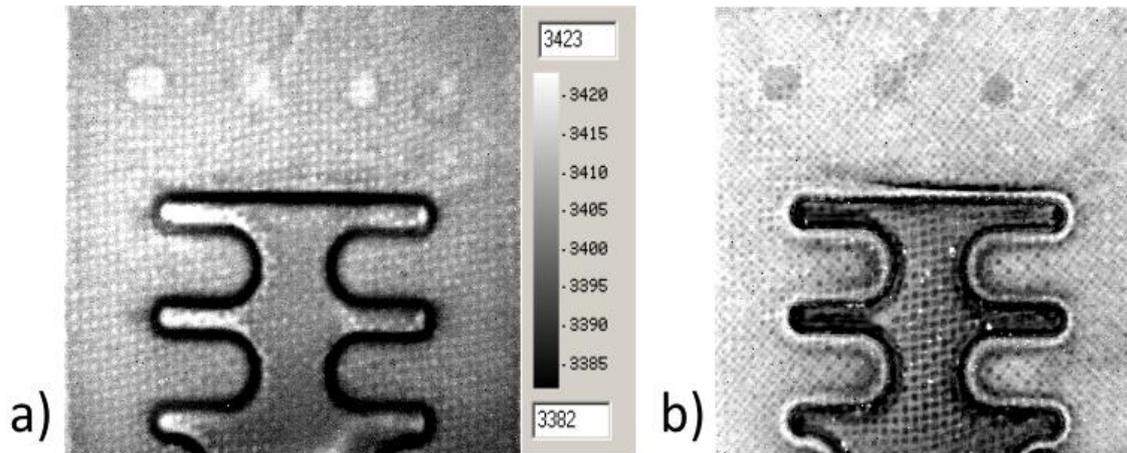


Abb. 97: Thermografiebild in Reflexionsanordnung von einer Probe mit Gappingdefekt a) 1 s nach der Blitzanregung und b) Phasenbild bei einer Frequenz von 0,24 Hz

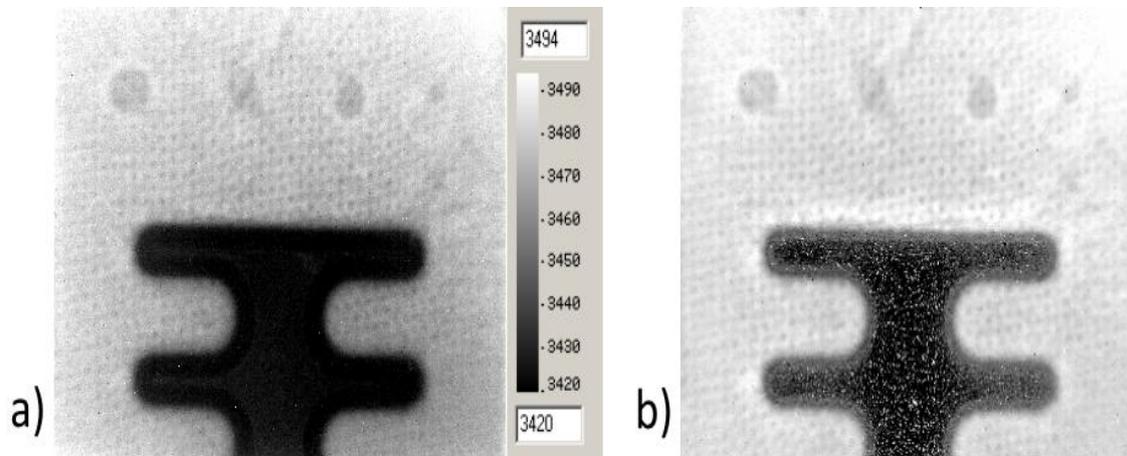


Abb. 98: Thermografiebild in Transmissionsanordnung von einer Probe mit Gappingdefekt a) 1,25 s nach der Blitzanregung und b) Phasenbild bei einer Frequenz von 0,24 Hz

Die beiden nachfolgenden Abbildungen zeigen POD-Kurven von ungeschwärzten (siehe Abb. 99) und geschwärzten Proben (siehe Abb. 100). Bei beiden Messungen befinden sich die Gappingdefekte in der zweiten Lage und die Messung wurde in Transmissionsanordnung durchgeführt. Vergleicht man die Kurven miteinander, so ist zu erkennen, dass bei der geschwärzten Probe kleinere Defekte detektierbar sind als bei der ungeschwärzten Probe. Außerdem wurden bei der geschwärzten Probe 34 der 42 Defekte detektiert, wohingegen bei der ungeschwärzten Probe nur 33 der 42 Defekte detektiert werden konnten.

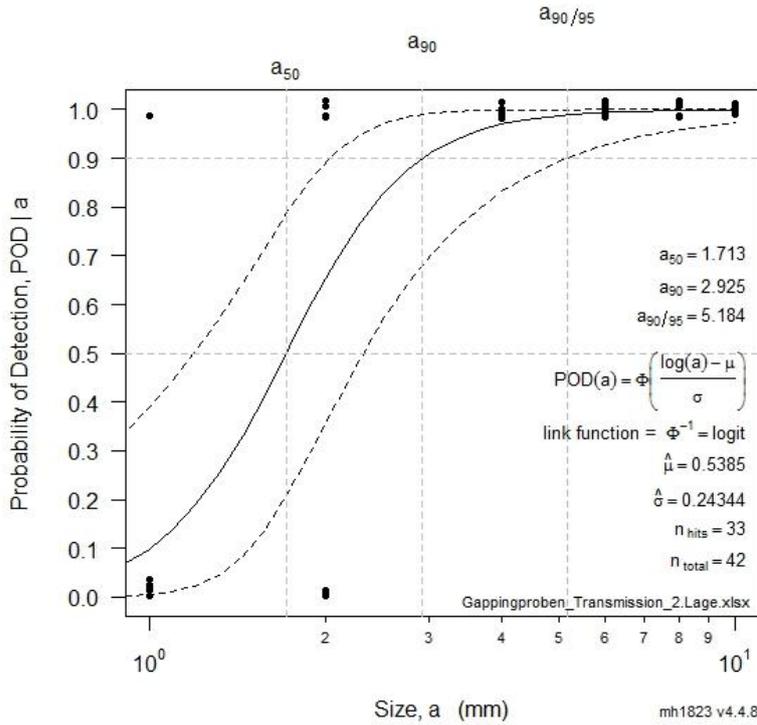


Abb. 99: POD-Kurve der Gappingdefekte in der zweiten CFK-Lage und in Transmissionsanordnung

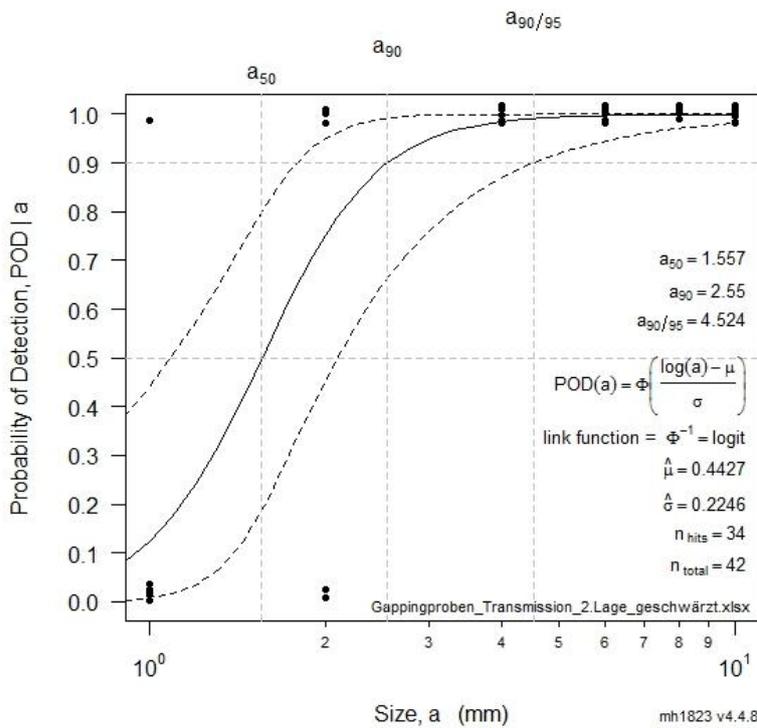


Abb. 100: POD-Kurve der Gappingdefekte in der zweiten CFK-Lage und in Transmissionsanordnung einer geschwärzten Probe

8.4 Lage der künstlich eingebrachten Defekte

Abb. 101 zeigt die Lage der künstlich eingebrachten Kaptonstreifen, die in Kapitel 4.3.1 durch Thermografie detektiert werden. Die Kaptonstreifen befinden sich dabei zwischen der ersten und der zweiten CFK-Lage.



Abb. 101: Lage der künstlich eingefügten Kaptonstreifen im Hybrid

Abb. 102 zeigt eine Hybridprobe mit zwei Teflonstreifen. Der Teflonstreifen, der in Kapitel 4.3.1 detektiert wird, hat eine Breite von 10 mm (siehe linker Teflonstreifen).



Abb. 102: Lage der Teflonfolie (Breite 10mm oder 20mm) im Hybrid