

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Lehrstuhl für Leichtbau

**Schadensidentifikation und -bewertung von
CFK-Bauteilen mittels
phasenmodulierter Thermographie**

Martin Perterer

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen
Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. V. St. Senner

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Baier
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. ehr. C. U. Große

Die Dissertation wurde am 07.05.2012 bei der Technische Universität München ein-
gereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 04.10.2012 angenommen.

für meine geliebte Frau Nicole

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Professor Dr.-Ing. Horst Baier, der mich während der Durchführung meiner Forschungsarbeit immer im richtigen Maß förderte und unterstützte. Herrn Professor Dr.-Ing. Dipl.-Sportl. Veit Senner und Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Dipl.-Geophys. Christian U. Große danke ich für die Übernahme des Vorsitzes bzw. die Aufgabe als Zweitprüfer.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Kollegen am Lehrstuhl für Leichtbau, die mir in freundschaftlicher Zusammenarbeit immer mit Rat und Tat zur Seite gestanden sind. Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Matthias Friemel, Dipl.-Ing. Max Wedekind und Ögmundur Petersson M.Sc. für die Unterstützung und die konstruktiven Diskussionen. Besonderer Dank gilt auch den Mitarbeitern des Fachgebietes für Sportgeräte und Materialien (SpGM), hier im speziellen Herrn Dipl.-Ing. Franz Höchtl für die gute Zusammenarbeit.

An dieser Stelle möchte ich mich auch bei allen Industriepartnern bzw. universitären Partnern bedanken, die besonders durch das Bereitstellen von Probekörpern diese Arbeit unterstützt haben.

Besonderer Dank gilt meiner Familie für die Unterstützung von ganzem Herzen, wobei ich meine Frau Nicole besonders erwähnen möchte, die mir immer wieder neue Motivation gab, meine Ziele nicht aus den Augen zu verlieren und mir durch eine komplementäre Sichtweise wichtige Dinge eröffnet und nähergebracht hat.

Garching im Mai 2012

Martin Perterer

Kurzfassung

Faserverbundwerkstoffe werden aufgrund ihrer im Vergleich zu metallischen Werkstoffen guten gewichtsspezifischen mechanischen Eigenschaften in den unterschiedlichsten Industriezweigen immer häufiger eingesetzt. Da sich sowohl die Schadensausprägungen als auch die Schadensmechanismen grundlegend von denen metallischer Werkstoffe unterscheiden und die Schädigungen oft im Inneren des Bauteils auftreten, müssen geeignete zerstörungsfreie Prüfmethoden (ZfP) entwickelt und eingesetzt werden.

Diese sollen auch eine erste Abschätzung über den Schadenseinfluss liefern, indem sowohl die Schadensposition, die Schadensausprägung als auch der lokale Beanspruchungszustand berücksichtigt werden.

Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit ein neues zerstörungsfreies Prüfsystem auf Basis der optisch angeregten Lock-In Thermographie entwickelt. Durch den Einsatz von kostengünstigen Komponenten bei einer gleichzeitigen Reduktion des Prüfaufbaus und dem Einsatz leistungsfähiger Auswertalgorithmen kann ein effizientes, defektsensitives Thermographiesystem aufgebaut werden.

Diese Sequenzielle Phasenmodulierte Thermographie (SPT) verzichtet im Gegensatz zur Lock-In Methode auf die Kopplung der Anrege- und Aufzeichnungseinheit, wobei die Datenaufzeichnung und die -analyse sequentiell ablaufen. Die Validierung dieser Vorgehensweise erfolgt mit Hilfe einer Referenzplatte aus CFK, welche unterschiedliche Defektypen und Defektgeometrien aufweist.

Darüber hinaus wird ein Vergleich zu der in vielen Industriezweigen zentralen ZfP-Methode, nämlich der Impuls-Echo Ultraschallprüfung, angestellt, wobei neben der CFK Referenzplatte auch real auftretende Defekte in komplexen, gekrümmten Strukturen betrachtet werden.

Um eine Schadensbewertung als Ergebnis erzielen zu können, wird die SPT-Methode durch Zusatzfunktionalitäten ergänzt, welche Schädigungen zunächst aus dem Auswertungsbild extrahieren. Danach erfolgt eine Evaluierung unterschiedlicher Einflussparameter, welche die Reduktion der mechanischen Kennwerte beim Vorhandensein von Schädigungen beeinflussen. Diese Einflüsse werden in einem Kennwert zusammengefasst, welcher die Grundlage für die abschließende Schadensbewertung bildet.

Die in dieser Arbeit vorgestellte SPT Prüf- und Bewertungsmethode soll einen Beitrag liefern, um in Zukunft kostengünstigere aber dennoch leistungsfähige Systeme zu schaffen, welche neben der reinen Prüfung auch eine erste Bewertung des Schädigungseinflusses ermöglichen.

Abstract

Due to their good specific mechanical properties fiber-reinforced plastics are increasingly used for structures in different industries. The defect behavior as well as the damage mechanisms differ strongly from metallic structures. In most cases, damage occurs in the structure and cannot be visually detected from the outside, which is the reason why appropriate non-destructive inspection (NDI) methods have to be developed and applied.

These methods should also allow a first damage evaluation by means of „effects of defects“. Different damage types as well as the damage position and the load case have to be taken into account.

That is the reason why in this work a new NDI-System is introduced, which is based on an optically excited Lock-In thermography system. Low-cost off-the-shelf components together with a modified test setup and efficient algorithms lead to an effective system with high defect sensitivity.

This sequential phase-modulated thermography (SPT) eliminates the synchronization between excitation and data acquisition and splits the data acquisition and the data analysis into two subsequent parts. A CFRP plate containing different damage types and damage geometries is used for validation. Additionally a comparison using the CFRP test plate as well as complex, curved structures containing real defects is made between the SPT method and impuls-echo ultrasonics, which represents the reference NDI system in most industries.

In order to achieve a damage evaluation, the SPT System is expanded by additional modules that extract damage automatically from the NDI results in the first step. Thereafter characteristic parameters are defined, which influence the reduction of the mechanical properties if defects are present. These parameters are used for building a reference value that is the basis for the definition of the damage influence in the last step.

The SPT system together with the damage evaluation methods proposed in this work should help for future cost effective and damage sensitive systems that provide more than damage inspection but the characterization of the effects of the detected defects.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Indizes	v
Abbildungsverzeichnis	xiii
Tabellenverzeichnis	xix
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Motivation	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Gliederung der Arbeit	4
2 Stand der Wissenschaft und Technik	7
2.1 Qualitätssicherungs- und Prüfmethode für Faserverbundwerkstoffe .	7
2.2 Zerstörungsfreie Prüfmethode	9
2.3 Möglichkeiten und Grenzen von ZfP-Verfahren	17
2.4 Schadstellendetektion und -bewertung	19
3 Physikalische Grundlagen für thermische und akustische ZfP Systeme	23
3.1 Analyse thermischer Wellen zur Beschreibung thermischer ZfP Systeme	23
3.1.1 Begriffsdefinition	23
3.1.2 Grundprinzip der Lock-In Thermographie	26
3.1.3 Mögliche Alternativen zu konventionellen Lock-In Systemen .	31
3.2 Grundlagen der Materialprüfung mittels Ultraschall	32
3.2.1 Ausbreitung von Festkörperwellen	33
3.2.2 Streuungsphänomene und Interaktion mit Inhomogenitäten . .	34
3.2.3 Visualisierung von Inhomogenitäten	36
4 Sequentielle Phasenmodulierte Thermographie (SPT)	39
4.1 Hauptkomponenten der Prüfmethode	39
4.1.1 Modulares Anregungsmodul	39
4.1.2 Infrarotsensor	41
4.2 Messprinzip und Messaufbau	42
4.3 Auswertungsmethodik	47

5	Simulationsmodell zur Bewertung experimenteller Ergebnisse der SPT	
	Methode	49
5.1	Grundlagen für die numerische Betrachtung thermischer Prüfsysteme	49
5.1.1	Finite Elemente Methode (FEM)	49
5.1.2	Modellierung thermischer Wellen	51
5.2	Modellierung und Simulation der Referenzplatte	54
5.2.1	Schematischer Aufbau	54
5.2.2	Modellierung und Vernetzung	57
5.2.3	Simulationsrandbedingungen	60
5.2.4	Diskussion der Ergebnisse	62
6	Zerstörungsfreie Prüfung ebener und gekrümmter Bauteile	69
6.1	Schadensarten bei Faserverbundwerkstoffen	69
6.2	Schadenseinbringung	70
6.2.1	Impactschäden	71
6.2.2	Fertigungsfehler	73
6.2.3	Thermische Degradation	76
6.3	Bewertung der Detektionsfähigkeit anhand unterschiedlicher Schädigungstypen, -größen und -geometrien in verschiedenen Tiefen	79
6.3.1	Akustische Analyse	79
6.3.2	Sequentielle Phasenmodulierte Thermographie (SPT)	86
6.3.3	Detektionsgrenzen beider Testverfahren	94
7	Schadensidentifikation und -statistik	101
7.1	Schwellwertbildung und Unterdrückung von Störstellen	101
7.2	Bestimmung der Schadensfläche bei gekrümmten Strukturen	104
7.2.1	Einfachkrümmung	104
7.2.2	Mehrfachkrümmung	107
7.3	Kombination von Einzelmessungen	110
7.4	Definition statistischer Bewertungsparameter	114
8	Bewertung des mechanischen Verhaltens beim Vorhandensein von Schäden	117
8.1	Mechanische Schadenscharakterisierung	117
8.1.1	Bewertungsmethoden	118
8.1.2	Einflussparameter auf die Reduktion mechanischer Kennwerte beim Vorhandensein von Schäden	124
8.1.3	Berücksichtigung der Einflussparameter in Form eines Vergleichswertes	135
8.2	Grafische Darstellung von identifizierten und bewerteten Schäden	136
8.3	Praktische Umsetzung	137
8.3.1	Implementierung	138
8.3.2	Grafische Benutzeroberfläche (GUI)	142

9 Validierung des Identifikations- und Bewertungsprozesses anhand repräsentativer Anwendungsbeispiele	147
9.1 Schadensbewertung an stark gekrümmten Strukturen am Beispiel eines Hochleistungsfahrradrahmens	147
9.1.1 Simulationsmodell	148
9.1.2 Bestimmung des lokalen Beanspruchungszustandes	149
9.1.3 Versuchsaufbau zur Einbringung des Schlagschadens	150
9.1.4 Prüfstand für Ermüdungsuntersuchungen	151
9.1.5 Ergebnisse der Identifikations- und Bewertungsmethode	152
9.1.6 Validierung der Ergebnisse mit Ermüdungsuntersuchung	153
9.2 Kombination von Einzelmessungen und Schädigungsstatistik am Beispiel eines integralen CFK Panels	154
9.2.1 Versuchsaufbau zur Einbringung von Schlagschäden	155
9.2.2 Simulationsmodell	156
9.2.3 Bestimmung des lokalen Beanspruchungszustands	158
9.2.4 Ergebnisse der visuellen Inspektion	159
9.2.5 Ergebnisse des Kombinations- und Identifikationsprozesses	160
10 Zusammenfassung und Ausblick	165
Literaturverzeichnis	169
Appendix	177
A.1 Approximationsparameter: Einfluss der Bauteilkrümmung	177
A.2 CFK Referenzplatte	178
A.3 Flussdiagramm zur Schadstellenbewertung	186

Abkürzungen und Indizes

Abkürzungen

<i>AOI</i>	Area of Interest (engl. Bezeichnung für relevanter Bereich)
<i>BEM</i>	Boundary Element Methode (engl. Bezeichnung für Randelementmethode)
<i>BVID</i>	Barely Visible Impact Damage (engl. Bezeichnung für kaum sichtbare Schäden)
<i>CAI</i>	Compression after Impact (engl. Bezeichnung für Druckversuch nach Schlagschädigung)
<i>CFK</i>	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
<i>CLT</i>	Classical Laminate Theory (engl. Bezeichnung für klassische Laminattheorie)
<i>CT</i>	Computer Tomographie
<i>DIN</i>	Deutsche Industrie Norm
<i>DOF</i>	Degree of Freedom (engl. Bezeichnung für Freiheitsgrad)
<i>EoD</i>	Effects of Defects (engl. Bezeichnung für den Schädigungseinfluss)
<i>ESPI</i>	Electronic-Speckle-Pattern-Interferometry (eng. Bezeichnung für auf Speckle basierte Interferometrie)
<i>FDM</i>	Finite Differenzen Elemente
<i>FEA</i>	Finite Element Analyse
<i>FEM</i>	Finite Elemente Methode
<i>FFT</i>	Fast Fourier Transformation
<i>FKV</i>	Faserkunststoffverbund
<i>FVW</i>	Faser-Verbund-Werkstoff
<i>GFK</i>	Glasfaserverstärkter Kunststoff
<i>GUI</i>	Graphical User Interface (engl. Bezeichnung für Benutzeroberfläche)
<i>IR</i>	Infrarot
<i>MCT</i>	Mercury Cadmium Telluride Sensor (engl. Bezeichnung für Quecksilber-Cadmium-Tellurid Sensor)
<i>NDI</i>	Non Destructive Inspection (engl. Bezeichnung für Zerstörungsfreie Prüfung)
<i>PC</i>	Personal Computer (engl. Bezeichnung für Arbeitsplatzrechner)

<i>PTFE</i>	Polytetrafluorethylen
<i>RTM</i>	Resin Transfer Moulding (engl. Bezeichnung für ein druckbasiertes Harzinfiltrationsverfahren)
<i>SPT</i>	Sequentielle Phasenmodulierte Thermographie
<i>SHM</i>	Structural Health Monitoring (engl. Bezeichnung für strukturelle Zustandsüberwachung)
<i>US</i>	Ultraschall
<i>ZfP</i>	Zerstörungsfreie Prüfung

Lateinische Formelzeichen

a	Sensorabstand / Abstand
b	Horizontaler Abstand zwischen der Symmetrieebene und der perspektivischen Ebene
b_{fl}	Breite ebener Probenkörper
b_{Pixel}	Pixelbreite
b_{max}	Maximale Schadensbreite bei Vorhandensein mehrerer Schädigungen
b_{min}	Minimale Schadensbreite bei Vorhandensein mehrerer Schädigungen
$b_{Schaden}$	Schadensbreite
c	Perspektivisches Abbild des Rohraußenradius in der Sichtebene
c_{th}	spezifische Wärmekapazität
d	Perspektivisches Abbild des Rohraußenradius in Projektionsebene
d_b	Bohrungsdurchmesser
$d_{Deckschicht}$	Tiefenlage des oberflächennächsten Defektes
e	Projektion von c in Rohrsymmetrieebene
e_{fl}	Exzentrizität der Bohrung bei Lochleibungsproben
f	Frequenz
f_e	Anstrengungsfaktor
f_{eq}	Vertikales reales Äquivalent zu virtueller Bildgröße
f_{Pixel}	Pixelbezogener zeitabhängiger thermischer Verlauf
$f_{Lock-In}$	Lock-In Frequenz bzw. Anregungsfrequenz
f_{max}	Maximalfrequenz
f_{min}	Minimalfrequenz
f_z	Vergößerungsfaktor von der Einzel- zur Kombinationsmessung
f_{abtast}	Abtastrate
g	Vertikale virtuelle Bildgröße
h	Höhe bzw. vertikale Materialhöhe
h_{Pixel}	Pixelhöhe
h_{max}	Maximale Schadenshöhe bei Vorhandensein mehrerer Schädigungen
h_{min}	Minimale Schadenshöhe bei Vorhandensein mehrerer Schädigungen
$h_{Schaden}$	Schadenshöhe
i	Imaginäre Einheit
k	Zählvariable
k_{bea}	Mechanischer Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung des Belastungszustandes
k_{dyn}	Mechanischer Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung von Dauerbeanspruchung

k_{ges_d}	Vergleichswert für die Abminderung festigkeitsrelevanter Strukturkennwerte
k_{ges_E}	Vergleichswert für die Abminderung steifigkeitsrelevanter Strukturkennwerte
k_{kr}	Mechanischer Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Bauteilkrümmung allgemein
$k_{kr,d}$	Abminderungsfaktor der Restdruckfestigkeit infolge Krümmung
$k_{kr,E}$	Abminderungsfaktor der Reststeifigkeit infolge Krümmung
k_{lam}	Abminderungsfaktor für Laminatgüte
k_{pos}	Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Schadensposition
l	Länge
m	Anzahl vertikaler Pixel, welche den Prüfling darstellen
n	Gesamtanzahl vertikaler Pixel
n_{abtast}	Anzahl sequentieller Messungen
n_{betr}	Anzahl der betrachteten thermischen Perioden
n_{mess}	Anzahl der für ein Kombinationsbild verwendeten Einzelmessungen
n_{stat}	Anzahl der gemittelten Messungen
$n_{Def.}$	Anzahl der zu betrachtenden Defekttypen
p	Schalldruck
p_i	Pixeleckpunkt in Referenzebene
$p_{i,3D}$	Pixeleckpunkt im dreidimensionalen Prüfraum
p_{mittel}	Pixelmittelpunkt in Referenzebene
$p_{mittel,3D}$	Pixelmittelpunkt im dreidimensionalen Prüfraum
p_{rand}	Randabstand
\vec{s}	Positionsvektor eines Schadens relativ zum untersuchten Bauteil
t	Zeitvariable bzw. Zeit
t_b	Beobachtungszeit
t_{fl}	Wandstärke bzw. Dicke eines ebenen Probenkörpers
t_{Rohr}	Wandstärke bzw. Dicke rohrförmiger Probenkörper
r_i	Innenradius
r_a	Außenradius
r_x	Horizontaler Sensorversatz
r_y	Vertikaler Sensorversatz
u, \vec{u}	Verschiebung bzw. Verschiebungsvektor
u_r	Radialverschiebung
u_t	Tangentialverschiebung
v_c	Geschwindigkeit einer Druckwelle
v_s	Scherwellengeschwindigkeit

x	Erste Raumkoordinate
x'	Horizontale Pixelkoordinate des Sensorbildes
x_{dim}	Anzahl horizontaler Pixel des Sensorbildes
x_{mittel}	X-Koordinate des Schnittpunkts eines Sichtstrahles durch den Pixelmittelpunkt mit dem zu messenden 3-D Objekt
$x_{s,i}$	X-Koordinate des Schnittpunkts eines Sichtstrahles mit dem zu messenden 3-D Objekt
y	Zweite Raumkoordinate
y'	Vertikale Pixelkoordinate des Sensorbildes
y_{dim}	Anzahl vertikaler Pixel des Sensorbildes
y_{mittel}	Y-Koordinate des Schnittpunkts eines Sichtstrahles durch den Pixelmittelpunkt mit dem zu messenden 3-D Objekt
$y_{s,i}$	Y-Koordinate des Schnittpunkts eines Sichtstrahles mit dem zu messenden 3-D Objekt
z	Dritte Raumkoordinate
z_{mittel}	Z-Koordinate des Schnittpunkts eines Sichtstrahles durch den Pixelmittelpunkt mit dem zu messenden 3-D Objekt
$z_{s,i}$	Z-Koordinate des Schnittpunkts eines Sichtstrahles mit dem zu messenden 3-D Objekt
A	Fläche, Übertragungsfläche bzw. Schadensfläche
A_{max}	Maximale detektierte Schadensfläche
A_{min}	Minimale detektierte Schadensfläche
A_{mittel}	Mittlere detektierte Schadensfläche
$A_{p,v}$	Virtuelle Pixelfläche
A_{Pl}	Plattenfläche
A_{th}	Thermische Amplitude
A_{ω}	Resultierende thermische Antwortamplitude
D	Rohraußendurchmesser
E	Elastizitätsmodul
E_{imp}	Schlagenergie
E_{rel}	Relative prozentuale Reststeifigkeit
E_{th}	Strahlungsaustauschgrad
E_{therm}	Thermische Energie
$E_{ak,refl}$	Reflektierte Schallenergie
F	Wirkende äußere Kraft
F_w	Fouriertransformierte thermische Zeitfunktion
G	Schubmodul
K_{ges}	Gesamtsteifigkeit

K_i	Thermische Konstanten
M_b	Biegemoment
P_{max}	Maximalleistung der Wechselspannung
P_{mod}	Modulierte Eingangsleistung
$P_{mod,Str}$	Modulierte abgegebene Leistung
\hat{P}	Abgegebene Spitzenleistung
Q	Wärmemenge (in der Thermodynamik auch als Wärme bezeichnet)
R	Rohraußenradius
R_{12}	Reflektionskoeffizient
R_σ	Spannungsverhältnis bei zyklischer Beanspruchung
\vec{R}	Ortsvektor eines Punktes
$\underline{\underline{S}}$	Deformationstensor
T	Temperatur
T_A	Schrittweite
T_{mess}	Messdauer
$\underline{\underline{T}}$	Spannungstensor
V_{mod}	Hüllkurve eines modulierten Wechselspannungssignals
V_{stell}	Moduliertes Gleichspannungssignal
\hat{V}	Maximale Gleichspannungsamplitude
W_k	Thermischer Kontaktwiderstand
X'	Horizontale Pixelkoordinate des Kombinationsbildes
X'_{pos}	Horizontale Pixelkoordinate der Einzelmessung im Kombinationsbild
X_{dim}	Anzahl horizontaler Pixel des Kombinationsbildes
Y'	Vertikale Pixelkoordinate des Kombinationsbildes
Y'_{pos}	Vertikale Pixelkoordinate der Einzelmessung im Kombinationsbild
Y_{dim}	Anzahl vertikaler Pixel im Kombinationsbild
Z_{ak}	Akustische Impedanz
Z	Thermische Impedanz

Griechische Formelzeichen

α	Temperaturleitfähigkeit
α_{opt}	Halber vertikaler Sensoröffnungswinkel
α_{ak}	Neigungswinkel einer akustischen Druckwelle relativ zur Flächennormalen
$\hat{\alpha}_{ak}$	Neigungswinkel einer akustischen Scherwelle relativ zur Flächennormalen
β'	Winkel des obersten Umfangsteilstückes
β_1	Winkel des ersten sichtbaren Umfangsteilstückes
β_2	Winkel des zweiten sichtbaren Umfangsteilstückes
β_3	Winkel des dritten sichtbaren Umfangsteilstückes
$\beta_{\frac{m}{2}}$	Winkel des zur Symmetrieebene am nächsten liegenden Umfangsteilstückes
β	Halber vertikaler Sensoröffnungswinkel
γ	Neigungswinkel zwischen Einzelmessung und Kombinationsbild
γ_k	Krümmungsradius
γ_{th}	Thermischer Phasenversatz
ϵ	Dehnung
ϵ_{th}	Emissivitätskoeffizient
λ_{th}	Wärmeleitfähigkeit
λ	Wellenlänge einer akustischen Welle
μ	Thermische Eindringtiefe
ν	Poisson Zahl, Querkontraktionszahl
ρ	Dichte
σ	Normalspannung, Spannung
$\sigma_{zul.}$	Zulässige Normalspannung, zulässige Spannung
$\sigma_{r,rel}$	Relative prozentuale Restdruckfestigkeit
σ_B	Stefan-Boltzmann Konstante ($5,6705 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$)
τ	Schubspannung
$\tau_{zul.}$	Zulässige Schubspannung
φ	Sensorrollwinkel
φ_w	Resultierender thermischer Phasenwinkel
ω	Kreisfrequenz
$\omega_{Lock-In}$	Lock-In Kreisfrequenz bzw. Anregungskreisfrequenz
$\Delta_{rel,h}$	Relativer vertikaler Fehler
ΔT	Temperaturunterschied
ΔT_{max}	Maximaler Temperaturunterschied
ΔT_{min}	Minimaler Temperaturunterschied

Abbildungsverzeichnis

1.1	Thermisches Phasenbild einer Lock-In Untersuchung an einem Faser-verbund-Heckkonus einer Dornier 328 [96] bzw. [25]	2
2.1	Informationszuwachs von der reinen zerstörungsfreien Prüfung bis hin zur Schadensbewertung	20
3.1	Prinzipskizze Lock-In Thermographie in Anlehnung an [76]	27
3.2	Modale Bestimmungsstücke der Lock-In Thermographie [75]	30
3.3	Prinzip der unterschiedlichen Darstellungsarten bildgebender Ultraschallsysteme: A-Bild, B-Bild und C-Bild (v.l.n.r.)	37
4.1	Modulare Anregungsquelle zur Aufbringung zeitlich leistungsvarii-ter thermischer Signale und IR Sensor	40
4.2	Prinzip Phasenanschnittsteuerung	41
4.3	Prinzipskizze Sequentielle Phasenmodulierte Thermographie (SPT) in Anlehnung an [48]	43
4.4	Punktuelle Messung des zeitabhängigen Temperaturverlaufs an CFK-Testplatte (links) und Frequenzspektrum der Punktmessung (rechts) [76]	44
4.5	Phasenbild einer Untersuchung nach einer 10 J Schlagbeanspruchung an einem CFK Rohr ($[+45, -45, 0]_s$, $\varnothing 50 \text{ mm}$ und einer Dicke von 1,6 mm) mit globaler Skalierung (links) bzw. mit selektiver Werteskalierung (rechts)	48
5.1	Schematischer Aufbau und Bereichseinteilung der CFK Referenzplatte mit unterschiedlichen Fehlertypen [72]	55
5.2	Geometrische Anordnung der Überlappungsfehler [75]	57
5.3	Thermisches Schalenelement SHELL 132 [11]	58
5.4	Darstellung der zur Abgrenzung der einzelnen Fehlerbereiche definierten Flächenbereiche (links); Ausschnitt der Vernetzung der Referenzplatte zur Simulation des thermischen Verhaltens künstlicher Defekte (rechts)	60
5.5	Einschwingverhalten thermischer Wellen	61
5.6	Simulationsergebnisse der Referenzplatte: Phasenbild bei 0,02 Hz thermischer Anregung	62
5.7	Simulationsergebnisse der Referenzplatte: Phasenbild des ersten Bereiches bei 0,02 Hz thermischer Anregung	63

5.8	Simulationsergebnisse der Referenzplatte: Phasenbild des zweiten Bereiches bei 0,02 Hz thermischer Anregung: Stufenkeil, kontinuierlicher Keil und Harznester (oben) bzw. rückseitige Sacklochbohrungen unterschiedlicher Tiefe und Größe (unten)	64
5.9	Simulationsergebnisse der Referenzplatte: Phasenbild des dritten Bereiches bei 0,02 Hz thermischer Anregung	65
5.10	Simulationsergebnisse der Referenzplatte: Phasenbild des fünften Bereiches bei 0,02 Hz thermischer Anregung	67
6.1	Fallturm: Normvorrichtung nach DIN 65561 [1] (links); modifizierte Vorrichtung zur Bestimmung der dissipierten Energie (rechts)	71
6.2	Sammlung unterschiedlicher Impactorgeometrien zur Verwendung in einer Fallbolzenanlage	72
6.3	Darstellung von Porosität durch Variation von Fertigungsparameter	74
6.4	CFK Probenplatte bei 3,0 bar Überdruck ohne zusätzlichen Vakuumdruck	75
6.5	Schematische Darstellung eines Zweikammersystems (links) bzw. Detailansicht des Probenkorbes und der Durchführungen bzw. Lagerungen (rechts)	77
6.6	Flussdiagramm der Thermalsteuerung	78
6.7	Ultraschall Prüfeinrichtung zur automatisierten Prüfung von Rohrstrukturen [74]	80
6.8	Ultraschallprüfung nach Impactbelastung bei unterschiedlichen Objektdurchmessern: Darstellung des Rückwandsignals (links: Ø 15 mm; mittig: Ø 35 mm; rechts: Ø 50 mm)	81
6.9	Ultraschalluntersuchung an Referenzplatte mit künstlichen Fehlstellen (10 MHz Prüfkopf): Dämpfung des Rückwandechos (links) und Darstellung der Fehlertiefe (rechts)	83
6.10	Problematik bei der Herstellung künstlich eingebrachter Delaminationen	84
6.11	Teilausschnitt Referenzplatte: Bereich fünf mit sich überlappenden metallischen Einschlüssen: Schwächung des Rückwandsignals – Erste Reihe: Titan; zweite Reihe: Stahl; dritte Reihe: Aluminium (10 MHz Prüfkopf)[76]	85
6.12	SPT Untersuchung nach Impactbelastung bei variablen Durchmessern (links: Ø 15 mm; Mitte: Ø 35 mm; rechts: Ø 50 mm)	86
6.13	Referenzplatte: Ausschnitt Bereich eins: Phasenbild bei 0,02 Hz (links), Ultraschall C-Scan - Schwächung des Rückwandsignals (rechts)[76]	88
6.14	Referenzplatte: Ausschnitt Bereich zwei: Phasenbild der kreisförmigen rückseitigen Fehlstellen bei unterschiedlichen Anregungsfrequenzen: 0,02 Hz, 0,05 Hz, 0,15 Hz und 0,40 Hz (v.l.n.r.)[75]	89
6.15	Referenzplatte: Ausschnitt Bereich zwei: Phasenbild künstlich eingebrachte Harznester bei 0,10 Hz	90

6.16	Referenzplatte: Ausschnitt Bereich drei: Phasenbild bei 0,01 Hz (in Anlehnung an [76])	91
6.17	Referenzplatte: Bereich fünf: Mehrfachfehlstellen: Phasenbild bei 0,01 Hz (oben) bzw. bei 0,10 Hz (unten)[78]	92
6.18	Referenzplatte: Auswertung Phasenwinkel Bereich 5: Horizontale geglättete Schnitte durch die Fehlerbereiche (oben 0,01 Hz Anregungsfrequenz; unten 0,10 Hz Anregungsfrequenz) [78]	93
6.19	Vergleich der mittels SPT-Methode und mittels Impuls-Echo Ultraschall ermittelten Schadensfläche infolge Impactbelastung	95
6.20	Faserverbund-Metallhybridplatten mit eingebrachten Fehlstellen: Stahl-CFK-Hybrid mit 16 Lagen 1.4310 Stahl (0,25 mm Stärke) oben und Titan-CFK-Hybrid mit 16 Lagen Ti15-3 Titan (0,25 mm Stärke) unten [78]	96
6.21	Thermisches Phasenbild des CFK-Stahllaminates (oben) bei einer Anregungsfrequenz von 0,02 Hz (links) bzw. thermisches Phasenbild des CFK-Titanlaminates bei einer Anregungsfrequenz von 0,01 Hz (rechts); Ergebnisse einer Ultraschalldurchschallungsprüfung (unten): CFK-St-Hybrid (links) bzw. CFK-Ti-Hybrid (rechts) [78]	97
6.22	Schwächung Rückwandsignal des Impuls-Echo Ultraschallverfahren mit 1 Mhz Prüfkopf: CFK-Titan Hybridplatte - zusammengesetzt aus Messungen von Vorder- (rechts) und Rückseite (links) - (oben) bzw. CFK-Stahl Hybridplatte - zusammengesetzt aus Messungen von Vorder- (rechts und links) und Rückseite (Mitte) - (unten) [78]	98
7.1	Vorgehen Schwellwertbildung und Fehleridentifikation am Beispiel einer Probenplatte aus CFK mit Fehlstellen: oben links: Ursprungsphasenbild mit Referenzbereich; oben Mitte: Anwenden des Schwellwertes; oben rechts: Definition Phasenversatz; unten links: Elimination der nicht schadhafte Bereiche; unten Mitte: Anwendung von Schadenscharakteristiken; unten rechts: Schadensidentifikation	102
7.2	Prinzipskizze der Rohrprüfung: Definition der geometrischen Größen	105
7.3	Relativer vertikaler geometrischer Fehler in vertikaler Rohrsymmetrieebene	106
7.4	Prinzipskizze der Rohrprüfung: Pixelzuordnung	106
7.5	Prinzipielles pixelweises Vorgehen zur Bestimmung der Schadensfläche bei mehrfach gekrümmten Strukturen	108
7.6	Prinzipskizze zur Kombination von Einzelmessungen: Geometrische Größen	111
7.7	Hochleistungsfahrradrahmen der Firma CUBE Pending Systems vom Typ Elite HPC	112
7.8	Beispiel für ein aus fünf Einzelmessungen erstelltes Kombinationsbild eines Hochleistungsfahrradrahmens	113

8.1	CAI-Vorrichtung nach DIN 65561 [1]: 1 Druckplatte, 2 Probenkörper, 3 Stützeinrichtung bzw. X Schneidengeometrie (links) und modifizierte CAI-Vorrichtung ohne Kopfstück zur Prüfung dünnwandiger Prüflinge: 1 Druckplatte, 2 Probenkörper, 3 Stützeinrichtung, 4 Anpressschrauben, 5 Führungsbolzen für Kopfstück und 6 Doppelschneiden (rechts)	119
8.2	Zwei-Punkt-Biegevorrichtung zur Untersuchung des Einflusses von Impactschäden auf die mechanischen Eigenschaften rohrförmiger Probenkörper: a) 3D Ansicht, b) Detail Einspannung und c) Detail Lasteinleitung	120
8.3	Vergleich von Simulation und Experiment mit Hilfe eines Spannungs-Dehnungsverlaufes einer Rohrprobe mit T700 Faser und Epoxidmatrix, Rohrdurchmesser $\varnothing 50 \text{ mm}$, Wandstärke $t_{\text{Rohr}} = 1,6 \text{ mm}$, Lagenaufbau $[+45, -45, 0]_s$ (links) bzw. Simulationsergebnisse des gleichen CFK-Rohres für die Rohrdurchbiegung beim Erreichen der Maximaldruckspannung des Laminates an der Rohroberseite: Versagensursache (rechts)	121
8.4	Ergebnisse einer Restfestigkeitsanalyse an CFK Probenkörpern (T700/Epoxidmatrix, Wandstärke bzw. Dicke: $t = 1,6 \text{ mm}$, Lagenaufbau $[+45, -45, 0]_s$) nach Impactbelastung als Funktion der Impactenergie	122
8.5	Ergebnisse einer Steifigkeitsanalyse an CFK Probenkörpern (T700/Epoxidmatrix, Wandstärke bzw. Dicke: $t = 1,6 \text{ mm}$, Lagenaufbau $[+45, -45, 0]_s$) nach Impactbelastung als Funktion der Impactenergie	123
8.6	Zusammenhang zwischen Impactenergie und Schadensfläche für CFK Probekörper (T700/Epoxidmatrix, Wandstärke bzw. Dicke: $t = 1,6 \text{ mm}$, Lagenaufbau $[+45, -45, 0]_s$)	125
8.7	Zusammenhang zwischen Restdruckfestigkeit und ZfP Schadensfläche (links) bzw. daraus abgeleiteter Abminderungsfaktor $k_{kr,d}$ als Funktion der Schadensfläche (rechts) für CFK Probenkörper mit T700 Faser und Epoxidmatrix, Wandstärke bzw. Dicke: $t = 1,6 \text{ mm}$ und einem Lagenaufbau von $[+45, -45, 0]_s$)	126
8.8	Zusammenhang zwischen Reststeifigkeit und ZfP Schadensfläche (links) bzw. daraus abgeleiteter Abminderungsfaktor $k_{kr,E}$ als Funktion der Schadensfläche (rechts) für CFK Probenkörper mit T700 Faser und Epoxidmatrix, Wandstärke bzw. Dicke: $t = 1,6 \text{ mm}$ und einem Lagenaufbau von $[+45, -45, 0]_s$)	127
8.9	Wöhlerlinien eines HTA/982A CFK-Laminates $[(\pm 45, 0_2)_2]_s$ nach Impactschädigung (Messpunkte) bzw. ohne Schädigung (Linien) bei unterschiedlichen Spannungsverhältnissen R_σ [14]	131
8.10	Versuchsaufbau Lochleibungsversuche: a) Zugversuch [77] und b) Detail Prüfling: Lagenaufbau $[[0^\circ/90^\circ, \pm 45^\circ]_8]_s$, Werkstoff: 8.3508.80 mit Epoxidmatrix	133

8.11	Versagensarten bei Lochleibungsversuchen [77] an CFK Proben (Lagenaufbau $[[0^\circ/90^\circ, \pm 45^\circ]_8]_s$, Werkstoff: 8.3508.80 mit Epoxidmatrix): Lochleibungsversagen (links), Wangenbruch (Mitte) und Spaltbruch (rechts)	134
8.12	Flussdiagramm des Softwarepakets zur Schadstellenbewertung	139
8.13	Ausschnitt des GUI: Erstellung Amplituden- und Phasenbild am Beispiel eines Ausschnitts aus Bereich 5 der Referenzplatte	143
8.14	Ausschnitt des GUI: Definition der Referenzfläche und Bestimmung der Fehlertypen: CAI Probenkörper nach Impact mit Randdelamination	144
9.1	Dreidimensionales Modell des Hochleistungsrahmens mit Definition des Impactortes (links), abgeleitetes FE-Modell (rechts)	148
9.2	Anstrengungsfaktor bezüglich Zug und Druck basierend auf dem Versagenkriterium der maximalen Hauptspannungen [67]	150
9.3	Versuchsaufbau für Impacteinbringung [73]	151
9.4	Prüfstand für Gesamtstrukturdauerversuche [73]	151
9.5	Ansicht auf das Unterrohr des Versuchsobjektes: Überlagerung der perspektivischen Ansicht mit Ergebnissen aus SPT-Untersuchungen gemäß des in Kapitel 8.2 definierten Bewertungsschemas	152
9.6	Dauerversuche an Hochleistungsfahrradrahmen [73]: a) Bruchbild eines ungeschädigten Hochleistungsfahrradrahmens, b) Bruchort eines durch Impact vorgeschädigten (mittels SPT als kritisch eingestuft) Hochleistungsrahmens und c) Detailansicht der Bruchstelle des vorgeschädigten Rahmens	154
9.7	Rückansicht des CAD Modells des CFK Panels (links) und Skizze der gewählten Impactorte an der Panelvorderseite: fünf vertikale Reihen mit spaltenweise gleichen Impactenergien (rechts)	155
9.8	Versuchsaufbau zur Einbringung von Impactschäden in ein CFK Panel	156
9.9	FEM Simulation des CFK Panels: Diskretisierung für vereinfachtes FEM Modell oben links: Darstellung der unterschiedlichen Elementtypen, der Kräfte und Randbedingungen; Druckanstrengung in Panel-längsrichtung (Y-Richtung) oben rechts; Schubanstrengung in Panelebene (XY-Richtung) unten links; vertikale Verformung (Z-Richtung) unten rechts	157
9.10	SPT Untersuchung CFK Panel: Durchgeführte Einzelmessungen: thermische Amplitude am Messbeginn (links) bzw. thermisches Phasenbild bei einer Anregungsfrequenz von $0,05 \text{ Hz}$ mit linearem Übergang der Einzelmessungen	160
9.11	Schadensdetektion CFK Panel: thermisches Phasenbild bei einer Anregungsfrequenz von $0,05 \text{ Hz}$ mit detektierten Schadstellen (rot dargestellt)	162
9.12	Schadensbewertung CFK Panel: Darstellung der Schädigungen bzw. ihrer Relevanz am 3D-CAD Modell	164

A.1	Ablageplan CFK Probenplatte: 3D-Ansicht	178
A.2	Ablageplan CFK Probenplatte: Lage 1 bis Zwischenlage 6	179
A.3	Ablageplan CFK Probenplatte: Lage 7 bis Zwischenlage 9-10	180
A.4	Ablageplan CFK Probenplatte: Lage 10 bis Zwischenlage 12-13	181
A.5	Ablageplan CFK Probenplatte: Lage 13 bis Lage 15 mit Legende	182
A.6	Mechanische Bearbeitung: 3D-Ansicht	183
A.7	Mechanische Bearbeitung: Positionierung Schnittebenen	183
A.8	Mechanische Bearbeitung: Schnitte I	184
A.9	Mechanische Bearbeitung: Schnitte II	185
A.10	Ausführliches Flussdiagramm des Softwarepakets zur Schadstellenbe- wertung	186

Tabellenverzeichnis

2.1	Zusammenfassung und Bewertung der wichtigsten ZfP-Methoden (in Anlehnung an Hellier [51])	18
6.1	Abgeleitete maximal detektierbare materialspezifische Fehlertiefen [76]	91
6.2	Approximationsparameter zur Bestimmung der Ausgleichslinie der ermittelten Schadensflächen	95
6.3	Gegenüberstellung der wichtigsten experimentellen Ergebnisse der SPT Methode sowie der Impuls-Echo Ultraschallmethode (10 MHz Prüfkopf)	99
8.1	Einfluss der Probenbreite b_{fl} und der Bohrungsexzentrizität e_{fl} auf die ertragbare Lochleibungsfestigkeit in (MPa) (links) und als prozentualer Wert (%) in Bezug zur Referenzprobe (rechts)	134
8.2	3-Zonen Bewertungssystem nach DIN EN 614-1 [7] als Visualisierungsgrundlage zur Darstellung der Defektrelevanz mit spezifischen Merkmalen in Anlehnung an [12]	137
9.1	Maßgebliche Belastungen und Anstrengungsfaktoren an den eingebrachten Schadensorten des CFK Panels	159
9.2	Schadensstatistik der mittels SPT detektierten Schäden des CFK Panels	162
9.3	Schadensbewertung der mittels SPT detektierten Schäden des CFK Panels	163
A.1	Approximationsparameter zur Messwertapproximation für die Restfestigkeitsanalyse von flachen und gekrümmten Bauteilen aus CFK . .	177
A.2	Approximationsparameter zur Messwertapproximation für die Steifigkeitsdegradation von flachen und gekrümmten Bauteilen aus CFK . .	177
A.3	Approximationsparameter zur Messwertapproximation für die Bestimmung der Schadensfläche infolge von Impactschädigung	178

1 Einleitung

Der vermehrte Einsatz von Faserverbundwerkstoffen für Hochleistungsstrukturen in diversen Industriezweigen, wie etwa der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie, aber auch beispielsweise der Sportgeräteindustrie, bedingt ein Anwachsen von geeigneten Prüfmethode, um die Bauteilsicherheit gewährleisten zu können.

Faserverbundwerkstoffe weisen aufgrund des hohen Anisotropiegrades gänzlich andere Schadensmechanismen auf als metallische Werkstoffe (siehe beispielsweise [80]). Das meist annähernd isotrope Verhalten und die auftretenden möglichen Schädigungen metallischer Werkstoffe sind im Gegensatz dazu sehr gut bekannt. Bei Faserverbundwerkstoffen sind die auftretenden Schädigungen, wie Delaminationen, Faserbrüche, Zwischenfaserbrüche, etc. (vgl. [80]), oft im Inneren des Bauteils, ohne von außen deutlich sichtbar zu sein. Daher müssen zerstörungsfreie Prüfmethode (ZfP-Methoden) (siehe beispielsweise [41], [51], [85] oder [25]) eingesetzt werden, um Strukturen verlässlich bewerten zu können.

Diese weisen in der Regel höhere Komplexität bzw. einen höheren Prüfaufwand als typische Prüfmethode für metallische Strukturen auf. In diesem Zusammenhang ist beispielsweise die Farbeindringprüfung zu nennen. Eine Zusammenstellung unterschiedlicher Methoden findet sich beispielsweise in [15].

Trotzdem müssen kritische, mitunter komplexe Faserverbundbauteile vor ihrem Einsatz geprüft werden, um die Betriebssicherheit der Gesamtstruktur zu gewährleisten. Eine Prüfung von Halbzeugen, wie es bei Metallen häufig der Fall ist, kann in der Regel nicht erfolgen, da der Faserverbundwerkstoff erst zusammen mit der eigentlichen Struktur bzw. zusammen mit dem Bauteil während des Fertigungsverfahrens entsteht (vergleiche z.B. [34]).

1.1 Problemstellung und Motivation

In der Praxis werden verschiedenartige zerstörungsfreie Prüfsysteme eingesetzt, um Schäden in oft mehrfach gekrümmten Faserverbundstrukturen auffinden zu können. Neben der Ultraschalluntersuchung, welche in der Luft und Raumfahrt eines der wenigen zertifizierten ZfP-Systeme darstellt, werden thermische Prüfmethode aufgrund ihrer großflächigen Bewertungsmöglichkeiten sowie der guten Eignung für beliebig gekrümmte Strukturen immer häufiger eingesetzt. Ein sensitives und daher für die meisten Anwendungen sehr geeignetes Verfahren stellt die Lock-In Thermographie dar

(siehe beispielsweise [65], [66] oder [26]), welche modulierte thermische Wellen einsetzt, um das Bauteil anzuregen und somit Fehlstellen sichtbar zu machen. Abbildung 1.1 zeigt beispielhaft ein Ergebnis einer derartigen Untersuchung an einem Heckkonus eines Passagierflugzeuges (Dornier Do 328).

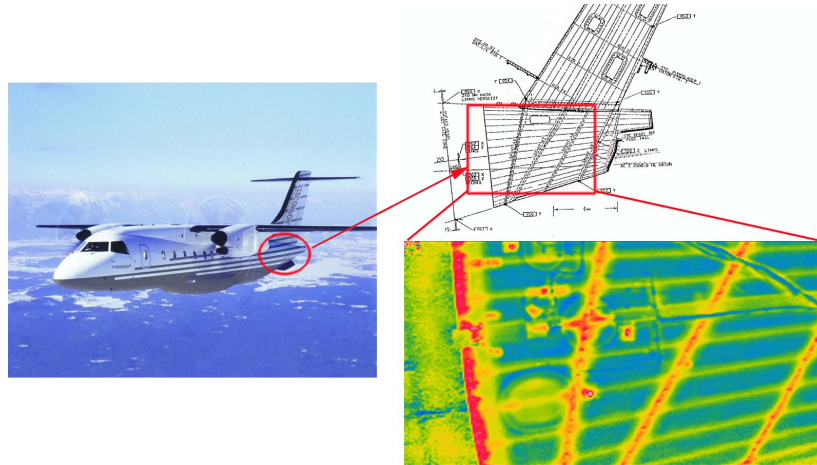


Abbildung 1.1: Thermisches Phasenbild einer Lock-In Untersuchung an einem Faser-verbund-Heckkonus einer Dornier 328 [96] bzw. [25]

Im vorliegenden Fall wurde eine optisch angeregte Form der Lock-In Thermographie gewählt (6 Anregungsquellen mit jeweils 1000 W Leistung), wobei die Anregungsfrequenz bei $0,015 \text{ Hz}$ lag¹. Schädigungen, welche in Form von feuchtigkeitsgefüllten Honigwaben und Impactschäden vorhanden sind, können als einzelne Punkte im Phasenbild unten rechts erkannt werden. Die Abbildung macht aber auch deutlich, wo Probleme bei der zerstörungsfreien Prüfung liegen. Neben den Schädigungen werden auch eine Vielzahl an weiteren Strukturmerkmalen, wie angebundene Stringer, Spanten etc., welche sich mit den detektierten Defekten überlagern, angezeigt und erschweren somit die Auswertung. Auch die Bewertung der korrekten Stringeranbindung an die Rumpfhaut erfordert das Fachwissen eines geübten Prüfers, da, obwohl die einzelnen Stringer leicht abweichende Indikationen im Phasenbild (unterschiedliche Färbung) aufweisen, alle Stringer gut an die Haut angebunden sind.

Somit gestaltet sich die Schadensdetektion langwierig und schwierig. Sie erfordert in jedem Fall hohe fachliche Kompetenz des Prüfers. Auch die farbliche Kodierung des Auswertungsbildes sagt zunächst nichts über das Vorhandensein einer Schädigung aus (sowohl für gut befundene Stringeranbindungen als auch detektierte Schädigungen weisen den gleichen Farbwert auf).

Neben der großen fachlichen Ansprüche an den Prüfer stellen die hohen Anschaffungskosten dieser Prüfsysteme wesentliche Probleme für den Einsatz solcher ZiP-Systeme bei klein- und mittelständische Firmen dar. Da vor allem im Bereich der Konsumgüter bzw. der Hochleistungssportgeräte diese Firmenstruktur häufig anzufinden ist, aber

¹in den folgenden Kapiteln werden diese Begriffe sowie die Funktionsweise dieses Systems detailliert betrachtet

immer häufiger auch Faserverbundwerkstoffe eingesetzt werden, ergibt sich besonders hier eine große Nachfrage für preiswerte, aber dennoch effiziente Systeme.

Trotz der in der Luft- und Raumfahrtindustrie bzw. im Automobilbau vorherrschenden Firmenstruktur von großen Unternehmen, welche an sich ausreichendes Kapital für die Anschaffung kostenintensiver ZfP-Methoden besitzen, ergab sich auch hier in den letzten Jahren ein Bedarf von günstigeren Methoden und Systemen zur Bewertung von Faserverbundstrukturen.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt im Zuge der zerstörungsfreien Prüfung ist die Frage nach der Auswirkung der detektierten Fehlstellen auf das mechanische Verhalten der Gesamtstruktur. Streng genommen geht diese Forderung bereits über die reine Prüfung hinaus, allerdings stellt sie das übergeordnete Ziel jeder Prüfung dar. Aufgrund der hohen Komplexität und auch des großen Inhomogenitätsgrades von Faserverbundstrukturen ist es schwierig, eine Korrelation zwischen dem detektierten Schaden und der Reduktion mechanischer Kennwerte zu finden. Aus diesem Grund werden in der Regel zwei Ansätze verfolgt, um dieses Problem zu lösen. Für kostengünstige Faserverbundkomponenten wird der Austausch forciert während für große, hochkomplexe und auch kostenintensive Bauteile versucht wird, die Fehlstelle zu reparieren ([87] zeigt beispielsweise Reparaturmethoden mit Hilfe geklebter Patches). Nur in den seltensten Fällen wird das Vorhandensein von Fehlstellen bis zu einer bestimmten Größe im Betrieb akzeptiert, indem eine Vergleichsrechnung erfolgt, welche zum Ergebnis eine Bewertung der Kritikalität dieser Defekte liefert.

1.2 Zielsetzung

In der vorliegenden Arbeit sollen nun genau diese Probleme, nämlich der Kostenfaktor und auch die Fragestellung nach der Schadensbewertung im Sinne von „Effects of Defects“, adressiert werden. Das Ziel ist die Bereitstellung eines kostengünstigen ZfP-Verfahrens, welches die aktuellen Anforderungen der Industrie erfüllt.

Im Detail soll versucht werden, durch eine Kombination von kostengünstigen Standardkomponenten aus alternativen Anwendungen zusammen mit effizienten Algorithmen zur Datenauswertung ein System zu schaffen, welches alle relevanten Schädigungstypen bzw. -größen verlässlich detektiert. Im Gegensatz zur Entwicklung konventioneller ZfP Systeme, bei denen in der Regel der Treiber die Reduktion der auffindbaren Schadensgröße und die Anhebung der Sensitivität gegenüber kleinsten Inhomogenitäten ist, wird in der vorliegenden Arbeit der Kostenfaktor bzw. die Systemeffizienz in den Vordergrund gerückt. Zusätzlich soll die Bewertung bzw. die Prüfbarkeit von stark gekrümmten Strukturen in den Mittelpunkt gestellt werden, da dies einerseits in der Literatur kaum behandelt wird, andererseits aber speziell im Bereich von Hochleistungssportgeräten, aber auch in der Automobilindustrie oder Luftfahrtindustrie häufig anzufinden ist.

Darüber hinaus wird eine erste Schadensbewertung der detektierten Schädigungen angestrebt. Führt man sich das Auswertungsbild von Abbildung 1.1 vor Augen, so muss eine geeignete Vorgehensweise gefunden werden, um die Schadstellen von den übrigen Anzeigen im Phasenbild zu trennen.

Da bei der zerstörungsfreien Prüfung selbst der Kostenfaktor als eine wesentliche Zielsetzung identifiziert wurde, sollen auch hier einfach anzuwendende Methoden ausgewählt und implementiert werden, um den Aufwand für die Analyse der Schädigung in Grenzen zu halten. Das primäre Ziel ist somit, eine schnelle Bewertung der Schadstellen zu ermöglichen, welche die Grundlage für weitere Maßnahmen, wie Reparaturen oder Austausch darstellen soll.

Zusätzlich soll eine geeignete grafische Benutzeroberfläche (GUI) geschaffen werden, welche die zerstörungsfreie Prüfung und die Schadensbewertung vereint. Durch intuitive Darstellung der Bewertungsergebnisse soll auch weniger geschultem Personal die Möglichkeit gegeben werden, eine effiziente Prüfung und Bewertung von Faserverbundstrukturen durchzuführen.

Das primäre Ziel dieser Arbeit ist somit die Entwicklung einer Methode bzw. eines Systems, das alle oben genannten Punkte berücksichtigt und die prinzipielle Machbarkeit dieses Gesamtprozesses verdeutlicht.

1.3 Gliederung der Arbeit

Zunächst wird der Blick auf die aktuelle Forschung gerichtet, um die verschiedenen verfügbaren zerstörungsfreien Prüfsysteme zu untersuchen und in weiterer Folge miteinander vergleichen zu können. Kapitel 2 beschreibt die wichtigsten Aufgaben von Qualitätssicherungs- und Prüfmethoden (Kapitel 2.1) allgemein, bevor die unterschiedlichen ZfP-Systeme detailliert beschrieben werden (Kapitel 2.2). In Kapitel 2.3 erfolgt schließlich eine vergleichende Bewertung der Methoden, wobei speziell auf die Prüfbarkeit von komplexen, gekrümmten Strukturen eingegangen wird. Diese Gegenüberstellung bildet im Weiteren die Grundlage für die Auswahl des in dieser Arbeit entwickelten Sequenziellen Phasenmodulierten Thermographiesystems (SPT), wobei als Vergleichssystem die in der Luft- und Raumfahrtindustrie zertifizierte Ultraschall Impuls-Echo Prüfung definiert wird. Abschließend wird in Kapitel 2.4 der aktuelle wissenschaftliche Stand in Bezug auf die Schadstellendetektion und Schadstellenbewertung erläutert.

Kapitel 3 umfasst die für das Verständnis der Funktionsweise und für die Ergebnisinterpretation wichtigen Grundlagen thermischer sowie akustischer Prüfmethoden.

In Kapitel 3.1 erfolgt die theoretische Betrachtung thermischer Wellenphänomene, also die Grundlage für eine phasensensible thermische Betrachtung. Hierbei wird als Grundlage die konventionelle Lock-In Thermographie verwendet. Es werden Möglichkeiten aufgezeigt, um eine Reduktion der Systemkomplexität zu erreichen, was den Grundgedanken der SPT-Methode darstellt.

Die Grundlagen der akustischen Vergleichsmethode sind in Kapitel 3.2 zu finden, wobei speziell auf die am häufigsten angewendete Methode, nämlich auf die Impuls-Echo Prüfung, eingegangen wird.

Kapitel 4 stellt schließlich alle Entwicklungsschritte der SPT Methode zusammen, wobei in Kapitel 4.1 die verwendeten Standardkomponenten genauer beschrieben werden. Das in Bezug zur konventionellen Lock-In Methode abgewandelte Messprinzip bzw. die angepasste Auswertungsmethodik wird in Kapitel 4.2 bzw. 4.3 behandelt.

Die Validierung der Methode erfolgt mittels Simulationsergebnissen der konventionellen Lock-In Methode in Kapitel 5, wobei wiederum in Kapitel 5.1 die wichtigsten Simulationsgrundlagen für die Modellierung thermischer Wellen aufgezeigt werden. Als Vergleichsobjekt dient eine Referenzplatte aus CFK, welche in Kapitel 5.2 detailliert beschrieben wird. Dieses Kapitel umfasst ebenfalls eine Beschreibung des verwendeten Simulationsmodells und der -ergebnisse, welche die Basis für den Vergleich mit experimentellen Resultaten des SPT Systems in Kapitel 6 bilden.

Kapitel 6 stellt die experimentellen Untersuchungen zur Charakterisierung und vergleichenden Bewertung des SPT Systems zusammen. In Kapitel 6.2 wird dafür zunächst auf die Methoden zur Schadenseinbringung in Faserverbundstrukturen detailliert eingegangen, bevor Kapitel 6.3 die Problematik der Detektion unterschiedlicher Defektypen in flachen aber auch stark gekrümmten Strukturen beschreibt. In diesem Kapitel werden experimentelle Ergebnisse aus Ultraschall- und SPT Untersuchungen verwendet, um die Defektsensitivität beider Systeme miteinander vergleichen zu können. Diese Ergebnisse werden auch mit den Simulationsergebnissen aus Kapitel 5.2 verglichen, um eine Validierung und eine Einordnung des SPT Systems zu ermöglichen.

Kapitel 7 behandelt die nach der Erstellung der Amplituden- und Phasenbilder notwendigen Schritte zur Schadensidentifikation und beschreibt die statistische Analyse, wobei zunächst auf die Schwellwertbildung bzw. die Unterdrückung von Störungen genauer eingegangen wird (Kapitel 7.1), bevor Vorgehensweisen zur Bestimmung der Schadensflächen bei einfach und mehrfach gekrümmten Strukturen vorgestellt werden (Kapitel 7.2). In Kapitel 7.3 werden alle erforderlichen Schritte zur Kombination von Einzelmessungen erläutert. In Kapitel 7.4 erfolgt schließlich die Beschreibung der statistischen Bewertungsmöglichkeiten der gesammelten Daten.

Kapitel 8 befasst sich mit der Schadensbewertung. Diese erfolgt als nächster Schritt nach der Schadstellenidentifikation. Dazu werden in Kapitel 8.1 die Herangehensweisen zur mechanischen Schadenscharakterisierung vorgestellt, wobei zunächst verschiedene Bewertungsmethoden und danach unterschiedliche Einflussparameter betrachtet werden. Am Ende wird die Vorgehensweise zur Erstellung eines Vergleichswertes zur mechanischen Bewertung des Schädigungseinflusses beschrieben.

In Kapitel 8.2 wird ein geeignetes Farbschema zur visuellen Kodierung der bewerteten Fehlstellen beschrieben. Kapitel 8.3, welches die praktische Umsetzung des vorge-

stellten Systems zur Schadensdetektion und Schadensbewertung beschreibt, bildet den Abschluss dieses Abschnittes.

In Kapitel 9 werden schließlich zwei Anwendungsfälle beschrieben, um die Leistungsfähigkeit des beschriebenen Prüf- und Bewertungssystems anhand realer Prüfaufgaben zu veranschaulichen. Dazu dient zum einen ein Hochleistungsfahrradrahmen aus CFK (Kapitel 9.1), zum anderen ein gekrümmtes CFK-Panel (Kapitel 9.2).

Kapitel 10 fasst schließlich alle vorgestellten Ergebnisse und Sachverhalte zusammen und gibt einen Ausblick auf weitere Anwendungsmöglichkeiten bzw. weist auf weiteres Verbesserungspotential der vorgestellten Methode hin.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

In diesem Kapitel wird ein Überblick über aktuelle Forschungsarbeiten im Bereich der vorliegenden Untersuchung gegeben. Im Fokus steht dabei neben der Darstellung aktueller Strategien zur Qualitätssicherung bzw. zur Wahrung der Betriebssicherheit im Betrieb ein Vergleich der unterschiedlichen zerstörungsfreien Prüfmethoden, welche in diesem Zusammenhang speziell bei faserverstärkten Kunststoffen (z.B. CFK) zum Einsatz kommen. Dieser Vergleich dient im Folgenden als Grundlage, um die Grenzen der heute am Markt verfügbaren ZfP Verfahren aufzuzeigen. Bei diesem Vergleich steht vor allem die Anwendbarkeit der Methoden bei realen Prüfaufgaben im Mittelpunkt. Abschließend wird auf die Vorgehensweise zur Schadstellendetektion bzw. zur -bewertung detailliert eingegangen und verschiedene Systeme miteinander verglichen, wobei gezielt kritische Teilaspekte angesprochen werden.

2.1 Qualitätssicherungs- und Prüfmethoden für Faserverbundwerkstoffe

Funktionelle Strukturen, sei es im Automobilbau, in der Luft- und Raumfahrt oder in der Sportindustrie, müssen ein hohes Maß an Qualität, Wirtschaftlichkeit und Sicherheit besitzen (vgl. z.B. [16]). Aus diesem Grund ist es von essentieller Bedeutung, den Zustand einer Struktur nicht nur nach der Fertigung sondern vor allem auch im Betrieb (evtl. auch während Wartungsintervallen) genau zu kennen, um das Versagen einzelner Komponenten bzw. des Gesamtsystems zu verhindern.

Die Gewährleistung der Betriebssicherheit oder auch der Funktionsfähigkeit steht somit an erster Stelle. Um dieses Ziel zu erreichen, werden Maßnahmen zur Instandhaltung bzw. -setzung durchgeführt. DIN 31051 [9] charakterisiert Instandsetzung als *„Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Betrachtungseinheit zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes oder der Rückführung in diesen, so dass sie die geforderte Funktion erfüllen kann“*. Diese im eigentlichen Sinne zur Beschreibung einer Maschine bzw. eines Systems gedachte Definition gilt auch für Teil- und Gesamtstrukturen, da in dieser Hinsicht äquivalente Anforderungen hinsichtlich der Funktion bzw. der Funktionserfüllung gestellt werden.

Um dieses Ziel zu erreichen, gibt es zwei unterschiedliche Strategien. Erstens kann der Zustand einer Struktur durch permanente Überwachung festgestellt werden. In diesem Fall spricht man von Zustandsüberwachungssystemen (engl. Structural Health Monitoring - SHM). Das Ziel dabei ist der Austausch oder die Instandsetzung der Komponente ab einer festgelegten kritischen Schädigungsakkumulation, welche den sicheren Einsatz des Bauteils nicht mehr gewährleistet. Zweitens können häufig fest vorgeschriebene Wartungsintervalle benutzt werden, wobei nach einer festgelegten Zeitspanne eine Inspektion („Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Istzustandes einer Betrachtungseinheit einschließlich der Bestimmung der Ursachen, der Abnutzung und dem Ableiten der notwendigen Konsequenzen für eine künftige Nutzung und damit gekoppelte Instandsetzung“ [9]) erfolgt. Nicht nur die Inspektion per se, sondern auch bereits die Festlegung der Wartungsintervalle setzt eine genaue Kenntnis der Struktur bzw. der auftretenden Schädigungen und Fehlermechanismen voraus.

Während die Schadensmechanismen aufgrund ihrer meist isotropen Werkstoffeigenschaften bei Metallen weitgehend bekannt sind und bei geometrisch unterschiedlichen Bauteilen vergleichbare Ausprägungen zeigen [54], ist dies beim Einsatz von faserverstärkten Werkstoffen (FVW) nicht der Fall. Die Anisotropie des Werkstoffs und die damit verbundenen variierenden Eigenschaften bzw. Schadensmechanismen [58] stellen sowohl an die Qualitätssicherung als auch an die Inspektion während des Betriebs spezielle Ansprüche (Heterogenität, Dämpfung, etc.). Auch sind Schädigungen, welche bereits deutlichen Einfluss auf die Funktion eines Bauteils haben, bei Verbundwerkstoffen unter Umständen äußerlich nicht erkennbar, während bei metallischen Werkstoffen Risse bzw. kleine plastische Verformungen beobachtbar sind. Aus diesem Grund bedeutet der Qualitätssicherungsprozess bei FVW eine Kombination verschiedener Prüfungen bzw. Prüfmethoden.

Neben den meist zur Materialqualifikation bzw. während der Produktion teilweise stichprobenartig durchgeführten zerstörenden Prüfungen (diese reichen von Proben- und Coupontests über Komponenten- und Strukturtests bis hin zur Prüfung des Gesamtsystems) werden vor allem die zerstörungsfreien bzw. -armen Prüfmethoden (ZfP) in vermehrtem Maße eingesetzt.

Eine wichtige Frage bei der Inspektion von FVW stellt im Weiteren die kritische Schadensgröße dar. Neben automatisierten Fertigungsprozessen (vergleiche [34]), wie beispielsweise das RTM Verfahren oder die Wickeltechnik, stellt das großteils manuell durchgeführte Prepreg-Verfahren [34] in vielen Industriezweigen den Großteil der Faserverbundproduktion dar. Beide Prozesse führen zu unterschiedlichen charakteristischen Fertigungsmustern wie beispielsweise Porosität, Faservolumengehalt, Ondulationen oder Harznestern. Erst ab einer gewissen Anhäufung dieser Fertigungsfehler wird die Funktion des Bauteils beeinträchtigt. Zusätzlich dazu treten im Betrieb Schädigungen auf, welche von Matrixrissen über Faser- und Zwischenfaserbrüchen bis hin zu Delaminationen reichen können. Diese Vielzahl an unterschiedlichen Fehlstellen muss nun mit Hilfe zuverlässiger zerstörungsfreier Prüfmethoden untersucht und bewertet werden, wobei dies eine Festlegung der kritischen Fehlergrößen voraussetzt.

Diese hängt neben der reinen örtlichen Ausdehnung von vielen weiteren Faktoren, wie dem Schadensort, dem vorherrschenden Lagenaufbau, dem Beanspruchungsniveau an dieser Stelle, u.v.m. ab. Diese Einflüsse werden nur unzureichend in der Literatur behandelt. Darüber hinaus wird ebenfalls kein praktikabler Ansatz geliefert, um diese effektiv in die Bewertung miteinzubeziehen.

Ein weiterer Aspekt der Qualitätssicherung ist der damit verbundene Aufwand. Da der Wartungs- und Prüfprozess im Allgemeinen sehr zeit- und kostenintensiv ist, gibt es auch eine zu diesem Vorgehen konkurrierende Methode, nämlich das Safe-Life-Prinzip. Bei diesem Verfahren wird davon ausgegangen, dass ein Bauteil nach einer gewissen Lastwechselanzahl versagt. Nach einer meistens statistischen Voruntersuchung wird diese kritische Lastspielanzahl ermittelt. Durch den Einsatz eines geeigneten Sicherheitsfaktors wird im nächsten Schritt die Einsatzdauer dieses Bauteils, das in vielen Fällen nicht sicherheitsrelevant ist, festgesetzt. Nach dem Ablauf dieser Zeitdauer erfolgt ein Austausch dieser Komponente ohne diese jedoch auf den tatsächlichen Zustand hin zu überprüfen. Mit Hilfe dieser Methode ist es also möglich, sowohl Zeit als auch in vielen Fällen Kosten zu sparen, allerdings setzt sie auch Bauteile mit gleichbleibender Qualität voraus, was wiederum speziell bei kritischen Fertigungsprozessen durch zerstörungsfreie Prüfmethode während und nach dem Herstellungsprozess gewährleistet werden kann. Somit wird in diesem Fall ebenfalls ein effektives, zerstörungsfreies Prüfverfahren benötigt, wobei der Einsatz nicht an der Gesamtstruktur im Sinne einer Wartungs- bzw. Instandsetzungsmaßnahme durchgeführt wird, sondern schon bei der Qualitätssicherung der Einzelkomponente erfolgt.

Aus diesem Grund erfordert ein effizienter Einsatz von Faserverbundwerkstoffen – im Sinne der Ausnutzung der Möglichkeiten des Werkstoffs – einen gezielten und flächendeckenden Einsatz von kostengünstigen zerstörungsfreien Prüfmethode.

2.2 Zerstörungsfreie Prüfmethode

Derzeit gibt es auf dem Markt eine Vielzahl verfügbarer zerstörungsfreier Prüfverfahren. Der Begriff der zerstörungsfreien Prüfung wird nach Hellier [51] als eine Untersuchung, ein Test oder eine Evaluation definiert, welche auf ein Prüfobjekt jeglicher Art angewendet wird, ohne dabei dessen Eigenschaften in irgendeiner Weise zu verändern. Ziel dabei ist das Auffinden von Diskontinuitäten bzw. lokalen Ereignissen, die den Gebrauch bzw. die Einsatzfähigkeit des Bauteils beeinflussen.

Allen diesen Verfahren ist gemein, dass zunächst Energie in das Bauteil eingebracht wird. Diese Energie kann einerseits direkt aus dem Fertigungsprozess (z.B.: Abkühlungsthermographie [65]) bzw. aus den Lasten im Betrieb stammen (z.B.: Akustische Emissionsanalyse [51]) oder extern aufgebracht werden. Diese Energiezufuhr führt zu einer Interaktion mit den im Bauteil vorhandenen Inhomogenitäten bzw. Fehlstellen. Diese lokale Änderung der Energiedichte kann folglich von einem Sensor eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens erfasst werden [85]. In den meisten Fällen kommt es

aber nicht zu einer defektselektiven Darstellung, d. h. einer reinen Abbildung von Fehlstellen bzw. Diskontinuitäten, sondern es werden strukturimmanente geometrische Eigenschaften sowie Werkstoffeigenschaften oder eventuelle vorhandene Schäden überlagert angezeigt (Fallbeispiele siehe z.B.: [26]). Diese Tatsache stellt den Regelfall dar und bedingt in vielen Fällen Expertenkenntnisse zur Auswertung und Bewertung der Struktur [51] [65]. Nichts desto trotz gibt es einige Vorgehensweisen, welche nicht die Gesamtstruktur als solche, sondern lediglich Fehlstellen anregen und gleichzeitig die Bildung störender Bauteileinflüsse minimieren. Typische Vertreter sind beispielsweise die akustische Emissionsanalyse bzw. thermische Lock-In-Verfahren mit Ultraschallanregung [27].

Die Unterteilung der unterschiedlichen ZfP-Verfahren kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Großteils wird das physikalische Wirkprinzip als Klassifikationskriterium herangezogen (in Anlehnung an Staszewski [59] und Berger [16]).

- Visuelle Prüfverfahren
- Akustische Prüfverfahren
- Optische Prüfverfahren
- Elektrische/ magnetische Prüfverfahren
- Radiografische Prüfverfahren
- Mechanische Prüfverfahren
- Thermische Prüfverfahren

Die einzelnen Prüfverfahren werden dabei (vergleiche Schmiedel [85]) in Abhängigkeit vom Prüfobjekt bzw. vom Prüfziel nicht gesondert, sondern oft in Kombinationen untereinander angewendet. In dieser Arbeit werden speziell thermische, aber auch akustische und visuelle Verfahren zur Fehlstellendetektion angewendet. Die Auswahl wird in Kapitel 2.3 mit Hilfe eines Vergleichs der einzelnen Verfahren in Bezug auf die Eignung zur Prüfung von (stark) gekrümmten CFK-Strukturen getroffen und begründet. Aus diesem Grund soll auf diesen Verfahren das Hauptaugenmerk liegen, wobei die anderen Methoden zum Zwecke der Vollständigkeit in ihren Grundzügen beschrieben werden.

Visuelle Prüfverfahren

Die visuelle Prüfung war die erste zerstörungsfreie Testmethode, welche in der Industrie, vor allem wegen des in vielen Fällen geringen instrumentellen Aufwands, oft eingesetzt wurde [51]. Zentrales Element der Sichtprüfung ist das menschliche Auge, welches als Strahlungsdetektor betrachtet werden kann und einen Wellenlängenbereich von ca. 400 *nm* bis etwa 760 *nm* abdeckt. Dabei werden die Wellenlängen und die Intensität der Strahlung gemessen und der Ursprung des Lichts festgestellt. Die Kodierung der Informationen erfolgt in einem Farbschema, um die einzelnen Wellenlängen voneinander unterscheidbar zu machen. Die Wahrnehmung wird dabei von verschiedenen Faktoren (nach Hellier [51]) beeinflusst.

- Helligkeit
- Sauberkeit
- Oberflächenzustand
- Form
- Größe
- Temperatur
- Kontrast
- Sehwinkel / Distanz
- menschl. Faktoren

Diese Einflüsse und im speziellen die menschlichen Faktoren gewährleisten nur in beschränktem Maße eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und implizieren eine starke Subjektivität. Des Weiteren können nur oberflächige bzw. tiefliegende Schäden, welche zur Oberfläche hin offen sind (wie etwa Risse) erkannt werden, welche die Sichtbarkeitsgrenze (d.h. eine Mindestgröße) erreicht haben. Kleinere Schäden können vom menschlichen Sehvermögen nicht detektiert werden und bleiben unerkannt.

Aus diesem Grund gibt es neben der reinen Sichtprüfung noch die gerätegestützte visuelle Prüfung, wobei einerseits durch die konventionelle Sichtprüfung nicht zugängliche Bereiche, wie etwa bei Hinterschneidungen, etc. unter der Verwendung von Endoskopen und Minikameras geprüft werden können; andererseits kann durch die in diesen Geräten in vielen Fällen integrierte Vergrößerungsfunktion die erkennbare Schadensgröße in Grenzen reduziert werden. Nach [5] wird zusätzlich noch nach direkter und indirekter Sichtprüfung unterschieden. Ausschlaggebend dafür ist der vom Prüfobjekt zum Auge führende Strahlengang. Erfolgt dieser direkt, so handelt es sich um eine direkte Sichtprüfung. Wird der Strahlengang mit Hilfsmittel, wie beispielsweise Spiegel abgelenkt, so handelt es sich um eine indirekte Methode. Auch bei der gerätegestützten visuellen Prüfung können die oben genannten Einflussfaktoren das Ergebnis entscheidend beeinflussen.

Um diesem Problem entgegenzuwirken und gleichzeitig auch kleine äußere Risse sichtbar zu machen kann die Bauteiloberfläche durch das Aufbringen verschiedener Flüssigkeiten vorbehandelt werden. Dabei wird speziell der in engen Zwischenräumen vorherrschende Kapillareffekt im Zusammenspiel mit geeigneten Kontrastmitteln ausgenutzt, um diese sichtbar zu machen. Man spricht bei diesem zweistufigen Verfahren von der sogenannten Eindringprüfung [51] [3], welche speziell zur Qualitätssicherung aber auch für Inspektionen häufig angewendet wird.

Allen beschriebenen visuellen Verfahren ist allerdings gemein, dass diese nicht zur Charakterisierung von inneren Fehlstellen geeignet sind. Aus diesem Grund müssen andere Prüfverfahren einzeln oder in Kombination angewendet werden, welche folgend beschrieben sind.

Akustische Prüfverfahren

Der wichtigste Vertreter der akustischen Prüfverfahren ist das Ultraschallverfahren [60], welches in der Luft- und Raumfahrt ein häufig eingesetztes ZfP-Verfahren darstellt. Je nach Anwendungsgebiet finden unterschiedliche Testmethoden und Konfigu-

rationen bzw. Prüfköpfe Anwendung. Betrachtet man die Anordnung der Prüfköpfe, so unterscheidet man die Transmissions- oder Durchschallungs- und die Reflektions- oder Impuls-Echo-Methode. Bei der letztgenannten Methode befindet sich der Sender wie auch der Empfänger auf der gleichen Probenseite, wodurch das Prüfobjekt nur von einer Seite zugänglich sein muss (typische Prüfbedingung). Gegenüber der Transmissionsmethode, bei der das zu prüfende Objekt zwischen einem Sende- und einem Empfangskopf platziert wird, sind allerdings deutliche Einbußen im Signal-Rauschverhältnis bzw. in der Tiefenreichweite zu verzeichnen, was durch den doppelten Schalldurchlauf zu erklären ist [85]. Das Wasserbad bei wassergekoppelten Systemen bedingt meist einen beschränkten Prüfraum, wodurch großflächige Bauteile nur mit erhöhtem Aufwand prüfbar sind. Dies ist speziell für die Wartung größerer Bauteile problematisch.

Daher befassen sich neben dem konventionellen wassergekoppelten Ultraschall aktuelle Forschungsvorhaben mit luftgekoppelten Systemen (siehe beispielsweise [55] [57]), wobei allerdings meistens die Durchschallungsmethode unter Verwendung von speziellen intensitätsmodulierten Burst-Signalen angewendet wird. Speziell bei in Wasser reaktiven Medien, welche keine Prüfung im Wasserbad oder mit Wasserankopplung zulassen, bringt dieses Verfahren Vorteile mit sich. Durch eine Schrägeinschallung und durch die damit mögliche Kopplung des Ultraschallsignals mit Plattenwellen¹ (vergleiche [94]) kann auch bei einseitigem Zugang zum Prüfling mittels luftgekoppelter Ultraschallwellen gearbeitet werden.

Darüber hinaus wird eine deutliche Kontrast- und Auflösungssteigerung gegenüber der konventionellen Senkrechteinstrahlung erzielt [31] [30] [38]. Aufgrund der Ausnutzung von Plattenwellen, welche sich je nach Werkstoff nur oberflächennah ausbilden und je nach Werkstoff sehr stark im Probeninneren gedämpft werden, hängt die Eindringtiefe dieses Verfahrens stark vom zu prüfenden Objekt ab.

Neben den Ultraschallverfahren, zählt auch die akustische Schallemissionsanalyse zu der Gruppe der akustischen Verfahren. Bei der Entstehung einer Schädigung im Bauteil wandelt sich die dadurch freiwerdende Energie zum Teil in Körperschall um, welcher sich mit der Bauteilschallgeschwindigkeit im Prüfkörper ausbreitet [85] und akustisch detektiert werden kann. Daher wird dieses Verfahren in vielen Fällen der strukturellen Überwachung und nur am Rande der zerstörungsfreien Prüfung zugeordnet.

Eng verwandt mit der Schallemissionsanalyse ist die Klangprüfung. Das zu prüfende Objekt wird bei diesem Verfahren gezielt angeregt und zur Schallabstrahlung gezwungen. Anschließend wird der Klang bewertet. Aufgrund des einfachen Prüfaufbaus findet dieses Verfahren großflächig Anwendung. Die erzielbare Auflösung liegt allerdings deutlich unter den Möglichkeiten des Ultraschallverfahrens.

¹Plattenwellen sind Festkörperwellen, welche bevorzugt bei dünnen, plattenförmigen Strukturen auftreten und unterschiedliche Ausprägungen aufweisen können: z.B.:Lambwellen, Rayleighwellen

Optische Prüfverfahren

Zu den optischen Prüfverfahren zählen neben der Spannungsoptik und dem Moiré-Verfahren [56] auch die optische Interferometrie [45] [81] [56] bzw. eine davon abgeleitete Methode, nämlich die Shearographie [91]. Den Verfahren ist gemein, dass diese Verschiebungen an der Bauteiloberfläche teils zweidimensional, teils in allen drei Raumrichtungen messen können. Wird ein Probenkörper geeignet angeregt, d. h. in einer Weise Energie zugeführt, sodass die in der Tiefe liegenden Defekte bzw. Inhomogenitäten zu lokalen Verformungen auf der Oberfläche führen, können Rückschlüsse über die Defektlage bzw. die Art der Fehlstelle gezogen werden. Die Tiefenreichweite variiert mitunter stark vom Werkstoff des Probenkörpers. Die Ergebnisse sind dabei von der Oberflächenbeschaffenheit abhängig.

Um vergleichbare und reproduzierbare Resultate zu erhalten, werden in den meisten Fällen Speckle Muster eingesetzt, welche speziell bei stark reflektierenden und glatten Oberflächen vor der Prüfung aufgebracht werden müssen. Das am häufigsten angewandte Interferometrie Verfahren, nämlich das ESPI-Verfahren (Electronic-Speckle-Pattern-Interferometrie) [62], zeichnet sich durch eine sehr gute Ortsauflösung aus. Diese liegt etwa bei 10^{-6} m, womit die detektierbare Fehlergröße unter der Oberfläche (je nach Tiefenlage) unter einem Millimeter betragen kann. Der Nachteil dieses Systems ist allerdings die Anfälligkeit gegenüber Schwingungen.

Durch eine Modifizierung des Wirkprinzips und den Einsatz zweier örtlich getrennter Kameras kann die Anfälligkeit gegenüber störenden Schwingungseinflüssen reduziert werden, was allerdings mit einer geringen Auflösungseinbuße einhergeht. Die Shearographie bringt somit den Vorteil, dass diese auch mobil zu Wartungs- und Überwachungszwecken eingesetzt werden kann. Besonders hat sich dieses System für dünnwandige Strukturen, wie beispielsweise Sandwichstrukturen, bewährt. Anzumerken ist allerdings, dass dickwandige, steife Strukturen, wie beispielsweise CFK-Lamine über 5 - 10 mm Dicke, schwer oder gar nicht prüfbar sind.

Elektrische und magnetische Prüfverfahren

Diese Prüfverfahren nutzen magnetische bzw. elektrische Felder, um durch deren Interaktion mit Unstetigkeiten im Bauteil Rückschlüsse über dessen innere Struktur ziehen zu können. Als magnetisches Prüfverfahren sei hier das magnetische Teilchenprüfverfahren (engl. Magnetic Particle Testing) [51] genannt. Mit Hilfe dieses Prüfverfahrens können allerdings nur ferromagnetische Stoffe effektiv untersucht werden, wobei der Prüfkörper direkt magnetisiert wird. Für Verbundwerkstoffe (mit Ausnahme von einigen metallischen Verbunden) kann dieses Verfahren allerdings im Allgemeinen nicht angewendet werden.

Zu den wichtigsten Vertretern der elektrischen Prüfverfahren zählt das Wirbelstromprüfverfahren (engl. Eddy Current testing) [51]. Gegenüber dem magnetischen Teilchenprüfverfahren hat es den Vorteil, dass es nicht nur für ferromagnetische Stoffe, sondern auch für Kohlenstofffaserverbunde eingesetzt werden kann. Ihre geringe elektrische Leitfähigkeit genügt, um ausreichend gute Ergebnisse zu erzielen.

Mit Hilfe eines elektrischen Feldes wird im Prüfkörper ein Wirbelstromfeld erzeugt, das bei homogenen Werkstoffen sich gleichmäßig ausbreitet. Ist nun eine Fehlstelle in Form eines Risses vorhanden, so wird dieses Feld gestört und es kommt zu einer lokalen Verstärkung des Feldes, was wiederum detektiert werden kann. Prinzipiell ist dieses Verfahren für alle Probengeometrien anwendbar, allerdings wird das hervorge-rufene Wirbelstromfeld durch die Bauteilgeometrie stark beeinflusst, wobei es in den Randbereichen zu Reflektionen und Interferenzen kommen kann. Daher ist die Auswertung der gewonnen Ergebnisse in manchen Fällen äußerst aufwendig und kann nur von geschultem Personal vorgenommen werden. Die Ergebnisse werden i.d.R. grafisch mit Hilfe geeigneter Farbskalen [42] dargestellt. Die minimale Fehlergröße ist neben den Gerätespezifikationen insbesondere von der Lage relativ zum eingebrachten Wirbelstromfeld bzw. von der absoluten Tiefenlage des Defektes abhängig.

Radiografische Prüfverfahren

Nicht nur in der Medizintechnik hat sich die Röntgentechnik als eines der wichtigsten zerstörungsfreien Prüfverfahren etabliert. Aufgrund der Vielzahl an prüfbareren Materialien (neben Metallen auch eine Vielzahl an Kunststoffen und Textilien) sind radiografische Verfahren in allen Sparten der Technik zu finden. Bei der Detektion von Schäden in CFK-Bauteilen, beispielsweise der Charakterisierung von Rissen bzw. Faser- und Matrixbrüchen, ist allerdings aufgrund der ähnlichen Absorptionskoeffizienten von Matrix und Fasern in manchen Fällen ein Kontrastmittel (meist Zinkjodid) erforderlich [57], das in die beschädigte Stelle injiziert wird. Je nach Röntgenquelle und -leistung sind unterschiedliche Auflösungsgrenzen möglich. Die am weitesten verbreitete Methode hierbei ist die Radiographie [51], wobei das zu prüfende Objekt zwischen einer Röntgenquelle und einem Detektor positioniert ist.

Eine Abwandlung des Verfahrens im Sinne der zerstörungsfreien Prüfung stellt die Röntgentopographie [52] dar, welche eine Kopplung zwischen einem fokussierten Röntgenstrahl und einem zweidimensionalen Manipulator darstellt, wobei der Prüfling analog zu den konventionellen Ultraschallverfahren (vgl. z.B.: [60], [85]) mäanderförmig abgetastet wird. Durch diese Modifikation lässt sich eine Ortsauflöung von etwa $10\mu m$ erreichen bei einer strukturellen Auflösung zwischen 10^{-1} bis $10^{-7} mm$, was alle relevanten Einzeldefekte im Sinne der traditionellen ZfP-Aufgaben abdeckt. Auch lassen sich bei Röntgentopographieverfahren Streuungs- und Brechungseffekte mit einbeziehen. An dieser Stelle sei auf weiterführende Literatur [43], [44], [23] und [32] verwiesen.

Zur dreidimensionalen Darstellung von Schäden können mehrere unter verschiedenen Winkeln aufgenommene Röntgenbilder verwendet werden. Man spricht in diesem Fall von der Röntgentomographie bzw. von der Computertomographie (CT) [84], welche den Vorteil gegenüber zweidimensionalen Verfahren besitzt, dass redundante Informationen vorliegen, was Streusignale und andere Artefakte bei entsprechender Daten- und Bildverarbeitung minimiert und somit das Signal-Rauschverhältnis verbessert.

Neben Röntgenstrahlung kann insbesondere auch Neutronenstrahlung [82] zur zerstörungsfreien Prüfung verwendet werden (siehe beispielsweise [36]). Diese Strahlungsart ist speziell für wasserstoffreiche Materialien, wie beispielsweise Kunststoffe, welche zu großen Teilen aus Kohlenwasserstoffgruppen aufgebaut sind, gut geeignet. Die Funktionsweise dieser Verfahren ist in Analogie zur Röntgentechnik zu sehen. Der große Vorteil ist der deutlich höhere Kontrast bei faserverstärkten Kunststoffen in Folge der Neutronenstrahlung im Vergleich zur Röntgenstrahlung.

Mechanische Prüfverfahren

Mechanische Prüfverfahren charakterisieren sich durch eine statische oder dynamische Anregungsform in Kombination mit einer Dehnungs-, Weg- oder Beschleunigungsmessung. Dabei können die entstehenden Verformungen mittels Dehnmessstreifen oder faseroptischen Sensoren (statischer Fall) bzw. die Änderung der modalen Parameter, wie Eigenfrequenz bzw. die Schwingungsform mit Hilfe von Beschleunigungsaufnehmern (dynamischer Fall) gemessen werden. Durch Veränderung dieser Parameter können Rückschlüsse auf die Gesamtstruktur gezogen werden. Globale Methoden, welche allerdings nur beschränkt eine Aussage über den Schadensort liefern können und nur für großflächige Fehlstellen geeignet sind, stellen die experimentelle Modalanalyse [50] bzw. die statische Verformungsmessung dar.

In vielen Fällen werden aus Gründen der Fehlerlokalisierung Körperschallwellen (wie beispielsweise Lamb- und Rayleighwellen) zur Strukturüberwachung eingesetzt (siehe dazu beispielsweise [93] [92] oder [53]). Mittels auf der Struktur verteilter Aktoren und Sensoren werden die Schwingungsformen analysiert. Beim Vorhandensein einer Unstetigkeit werden an dieser Stelle die sich ausbreitenden Wellenfronten beeinflusst. Dadurch, dass verschiedene, örtlich getrennte Empfänger diese Signale zeitversetzt erfassen, kann der Schadensort rekonstruiert werden. Ein großer Nachteil dieses Verfahrens ist, dass sich bei stark gekrümmten bzw. bei geometrisch komplexen Bauteilen hochkomplexe Überlagerungszustände der Körperschallwellen ergeben, was eine individuelle von Bauteil zu Bauteil unterschiedliche Positionierung der Aktuatoren und Rezeptoren bedingt.

Zu beachten ist auch, dass diese Methode zumeist nicht im klassischen Sinn als zerstörungsfreie Prüfmethode im Schadensfall bzw. bei vorgeschriebenen Wartungsintervallen eingesetzt wird, sondern oftmals die Struktur im Betrieb überwacht (vgl. Kapitel 2.1: SHM-Methoden) und somit auch bei der Festsetzung von flexiblen Wartungsintervallen behilflich sein kann.

Hillger [53] stellt einen Vergleich der Lambwellentechnik mit der konventionellen punktuellen Ultraschallmessung an, wobei er vor allem die flächige Information der Lambwellentechnik als besonderen Vorteil dieses Verfahrens nennt. Der Aufwand der Auswertung ist allerdings je nach Komplexitätsgrad des Prüflings deutlich größer als bei der konventionellen akustischen Prüfung.

Thermische Prüfverfahren

Thermographische Inspektionsmethoden (vergleiche [65] oder [66]) können in aktive und passive Verfahren eingeteilt werden. Bei der passiven Methode wird die eigene vom Prüfobjekt emittierte Wärmestrahlung erfasst und bildhaft dargestellt. Der thermische Kontrast zur Darstellung der Fehlstelle im Inneren des Bauteils hängt von dessen Tiefenlage ab. Betrachtet man einen Abkühlvorgang eines homogen erwärmten Bauteils so wird der Fehlerkontrast nach einer endlichen Zeitspanne maximal. Die verstrichene Zeit ist proportional zur Tiefenlage der Diskontinuität, womit die Fehlertiefe eindeutig bestimmbar ist. Die passive Thermographie wird beispielsweise im Bauwesen eingesetzt, um Kältebrücken in Wänden oder Türen zu identifizieren [35]. Zur Detektion von für Faserverbundwerkstoffe typischen Fehlstellen, wie Delaminationen, Poren etc. ist die passive Methode nur bedingt geeignet, wobei die aktive Methode deutlich bessere Ergebnisse erzielt.

Die aktive Methode basiert auf einer externen Energieeinbringung und bewertet simultan bzw. nachgeschaltet die thermische Bauteilantwort. Dabei unterscheidet man zwischen verschiedenen Anregungsquellen, wie beispielsweise der Wirbelstromanregung, der Ultraschallwellenanregung, der konvektiven Erwärmung, der optischen Anregung, etc. Die Anregung selbst kann wiederum kontinuierlich, impulsartig oder periodisch erfolgen [66], wobei die periodische Anregung meist sinusförmig erfolgt und als Lock-In Thermographie [21] [83] bezeichnet wird. Der Vorteil der konventionellen aktiven Thermographie (kontinuierliche Erwärmung bzw. Abkühlung) liegt einerseits im Vergleich zu Lock-In Methoden im einfachen messtechnischen Aufwand (kein Kopplungs- und Regelungsmodul von Nöten) und andererseits in vergleichsweise kurzen Messzeiten, da nur der Aufheiz- bzw. der Abkühlvorgang betrachtet wird. Nachteilig ist der Einfluss unterschiedlicher Emissivitätskoeffizienten ϵ_t der betrachteten Oberflächen. Nur bei homogenen, vorzugsweise diffus reflektierenden Oberflächen ist eine direkte Messung möglich. Bei inhomogenen Oberflächen und bekannten Abstrahlbedingungen lässt sich durch lokale Korrektur der Emissivität dieses Problem lösen. Da bei dieser Methode lediglich die Amplitude des Temperatursignals zur Auswertung verwendet wird [65], hat aber auch die Bauteilkrümmung bzw. die Lage der gemessenen Fläche relativ zur Kameraposition einen deutlichen Einfluss auf die Messung.

Diese Probleme können zum großen Teil durch eine modulierte Anregung bei gleichzeitiger Auswertung der Amplitude und der Phase der Oberflächentemperatur gelöst werden, da das Phasensignal keine Abhängigkeit von Emissivitätskoeffizienten bzw. von der Winkellage des Prüfobjektes zur Detektorposition aufweist (siehe beispielsweise [95]). Ein weiterer Vorteil dieser Methode ist, dass durch das Aufbringen und die Auswertung von Signalen unterschiedlicher Frequenz Fehlstellen in verschiedenen Tiefen besser detektiert und separiert werden können. Damit ist auch eine Tiefenortung von im Bauteil vorhandenen Inhomogenitäten möglich [83]. Gleichzeitig steigt die Prüfzeit, da die Messungen bei unterschiedlichen Frequenzen nacheinander erfol-

gen müssen.

Eine Ausnahme bildet die Impulsthermographie. In diesem Fall wird ein kurzzeitiger Energiestoß auf die Probe aufgebracht und die thermische Antwort gemessen. Zur Auswertung kann einerseits das Amplitudenbild (konventionelle Methode) und andererseits das Phasenbild (hier spricht man vom der Puls-Phasenthermographie [66] [29]) herangezogen werden. Da die Impulsanregung je nach Impulslänge ein definiertes Frequenzspektrum umfasst, können alle darin enthaltenen Frequenzen ausgewertet werden. Somit ist auch bei diesem Verfahren eine Tiefenortung möglich. Die in Bezug zur Lock-In-Thermographie deutlich kürzere Messzeit geht allerdings einher mit einem deutlich schlechteren Signal-zu-Rausch Verhältnis.

Ein Nachteil der Lock-In-Thermographie sowie der Puls-Phasen-Thermographie ist der komplexe instrumentelle Aufbau, da in den meisten Fällen eine Synchronisierung der Anregungsquelle mit dem Thermographiesystem erforderlich ist. Je nach dem zu prüfenden Material erfordern phasensensitive Systeme bzw. Puls-Systeme gekühlte, kostenintensive IR-Sensoren, um die moduliert eingebrachten Signale ausreichend genau auflösen und deren Phasenwinkel bestimmen zu können. Im Gegensatz dazu werden bei der Wärmeflussthermographie in den meisten Fällen Sensoren mit Bolometerkühlung eingesetzt, die sich durch einen deutlich geringeren Investitions- und Wartungsaufwand charakterisieren.

2.3 Möglichkeiten und Grenzen von ZfP-Verfahren

An dieser Stelle sollen die gebräuchlichsten zerstörungsfreien Prüfmethode in Anlehnung an Hellier [51] hinsichtlich ihrer Einsatzgebiete, der Vor- und Nachteile bzw. der Eignung zum Einsatz bei komplexen Strukturen bewertet werden. Diese Evaluation berücksichtigt insbesondere Querschnitte mit starker Krümmung (In dieser Arbeit werden Probenkörper mit Krümmungsradien zwischen $\gamma_k = 5 \text{ mm}$ und $\gamma_k = 25 \text{ mm}$ behandelt), wie man sie besonders im Bereich der Sportgeräteindustrie und auch im Automobilbau häufig findet.

Tabelle 2.1 stellt einen Methodenvergleich her, der neben der Eignung zur Fehlererkennung bei gekrümmten Strukturen die wichtigsten Anwendungsfälle, die Vorteile und Einschränkungen der wichtigsten ZfP-Verfahren umfasst. So sind besonders visuelle (Sichtprüfung, Eindringprüfung), optische (hier vor allem die schwingungsresistentere Shearographie) und thermische Verfahren (im Speziellen die Lock-In-Methoden) zum Auffinden von Fehlstellen und Schäden in stark gekrümmten Strukturen geeignet. Die erstgenannten zwei Methoden werden wegen ihres Wirkprinzips nur zum Auffinden von Fehlstellen an der Bauteiloberfläche bzw. von Schäden in der Tiefe, welche zur Oberfläche hin offen sind, herangezogen.

Verfahren	Anwendung	Vorteile	Einschränkungen	Eignung für gekrümmte Strukturen und Bauteile
Sichtprüfung	Oberflächenfehler (in Produktion und bei der Wartung)	kostengünstig, geringes Fachwissen erforderlich	ausreichende Beleuchtung, nur zur Oberfläche geöffnete Fehler detektierbar	sehr gute Eignung, da unabhängig von der Geometrie
Eindringprüfung	alle nicht absorbierenden Materialien mit unlackierten Oberflächen	kostengünstig, geringes Fachwissen erforderlich, automatisierbar	saubere und glatte Oberfläche erforderlich, Oberflächenbehandlung	sehr gute Eignung auch bei komplexen Geometrien
Ultraschallprüfung	bei den meisten Materialien mit guter Oberflächengüte und niedriger Komplexität	hochauflösende Darstellung mit Tiefeninformation	meist Kopplungsmedium (Wasser) erforderlich, Probleme bei hochkomplexen Bauteilen	gute Eignung für Rohrquerschnitte, bedingt für mehrfach stark gekrümmte Strukturen geeignet
ESPI Shearographie	Bewertung oberflächennaher Fehlstellen bei dünnwandigen Strukturen	breites Material und Bauteilspektrum, kurze Prüfzeiten (speziell Shearographie)	Schwingungsanfällig (ESPI), begrenzte Tiefenreichweite	gut geeignet, teilweise mehrere redundante Aufnahmen notwendig
Wirbelstromprüfung	alle elektrisch leitfähigen Materialien (auch CFK)	kurze Prüfzeiten, automatisierbar	teils Expertenwissen zur Auswertung erforderlich, nicht für Kunststoffe geeignet	mäßige bis geringe Eignung aufgrund der daraus resultierenden Randeffekte
Radiographie Röntgen-tomographie	breites Material und Bauteilspektrum, zur Qualitätssicherung oder im Betrieb	hohe Empfindlichkeit, gute Volumeninformation	limitierte Probendicke (materialabhängig), teilweise begrenzter Prüfraum, Strahlungsschutz erforderlich	bedingte Eignung, da Ergebnisse zwar unabhängig von der Geometrie, aber die Prüfung von größeren Bauteilen schwierig
Thermographie	alle thermisch leitenden Materialien	flexible Größe des Prüffeldes, breites detektierbares Fehlerspektrum, mobile Systeme möglich, automatisierbar	teilweise Oberflächenbehandlung und homogene Energieeinbringung nötig (nur statische Methoden)	speziell bei Lock-In-Methoden sehr gute Eignung, da kein Einfluss der Kameraposition und -ausrichtung bzw. des Emissivitätskoeffizienten auf das Phasenbild

Tabelle 2.1: Zusammenfassung und Bewertung der wichtigsten ZfP-Methoden (in Anlehnung an Hellier [51])

Ultraschallprüfverfahren sind prinzipiell zur Prüfung von stark gekrümmten Strukturen geeignet (siehe dazu Hellier [51]). Aufgrund ihres Wirkprinzipes [63], d.h. der Reflexion und Brechung akustischer Wellen, erweisen sich Untersuchungen an mehrfach gekrümmten Strukturen schwierig. Als Beispiel sind hier Rohrknottenverbindungen genannt, die wegen der Geometrie der Verbindungsstellen (komplexe Querschnittsübergänge, Dickensprünge, etc.) das Ultraschallsignal teilweise diffus streuen und somit die Prüfung erschweren. Darüber hinaus kommt bei der Prüfung von Faserverbundwerk-

stoffen die zusätzliche Schwächung von Ultraschallsignalen aufgrund ihrer geschichteten inhomogenen Struktur hinzu.

Auch elektrische oder magnetische Prüfverfahren, wie die Wirbelstromprüfung, weisen Probleme bei komplexen gekrümmten Strukturen auf, da Randbereiche bzw. Querschnittsübergänge zu Störeffekten des eingebrachten Feldes führen und die Signaländerung aufgrund von Fehl- und Störstellen in vielen Fällen überlagern.

Radiographische Prüfverfahren sind prinzipiell zur Prüfung beliebiger Geometrien geeignet, wobei die maximal prüfbare Wandstärke je nach Werkstoff variiert. Spezielle Verfahren, wie die Tomographie sind allerdings meistens für Objektgrößen von Substrukturen und Komponenten ausgelegt. Darüber hinaus erfordern Maßnahmen zum Strahlenschutz kostenintensive bauliche Einrichtungen, was den Gesamtprüfaufbau kostenintensiv gestaltet.

Basierend auf Tabelle 2.1 fällt im Zuge dieser Arbeit die Wahl auf phasensensitive thermische Methoden, wobei sowohl der Kostenfaktor als auch die Schadensbewertung, also der weiterführende Schritt nach der Schadensdetektion, als zentrale Verbesserungspunkte identifiziert werden.

Da nicht zuletzt in der Luft- und Raumfahrt das Ultraschallverfahren das zentrale Prüfsystem darstellt und als einziges eine Luftfahrtzertifizierung besitzt, soll dieses Verfahren auch in dieser Arbeit als Referenzsystem dienen. Die Bewertung der SPT-Methode erfolgt mittels einer mit diversen künstlich eingebrachten Fehlstellen versehenen Probenplatte aus CFK - im Folgenden als Referenzplatte bezeichnet - bzw. mittels charakteristischen gekrümmten CFK-Strukturen (vergleiche dazu Kapitel 6). Darüber hinaus werden auch Simulationsergebnisse der konventionellen Lock-In-Methode als Bewertungs- und Vergleichsmaßstab herangezogen.

Da wie zuvor beschrieben die meisten Ultraschallverfahren und -vorrichtungen für die Prüfung von flachen und schwach gekrümmten Strukturen entwickelt wurden, bleibt eine Weiterentwicklung bzw. Anpassung dieses Verfahrens zur Bewertung (stark-) gekrümmter Strukturen nicht aus, um die Ergebnisse mit dem in dieser Arbeit beschriebenen SPT-Verfahren vergleichen zu können.

2.4 Schadstellendetektion und -bewertung

Die zerstörungsfreie Prüfung als solches verfolgt primär das Ziel, Fehlstellen zu detektieren. Dabei ist die Grundforderung eine Bewertung im Sinne von „ein Schaden bzw. eine Fehlstelle ist vorhanden“, wie Abbildung 2.1 zeigt.

Der nächst höhere Detaillierungsgrad ist die Bestimmung der geometrischen Parameter der Fehlstelle, im einfachsten Sinne die Bestimmung der Schadensfläche oder mit anderen Worten die Ausdehnung des geschädigten Bereiches. Diese geometrische Eingrenzung ist in einigen Fällen allerdings nur mit nachgeschaltetem, gesteigerten Auswertungsaufwand möglich, da bei verschiedenen Prüfmethoden die detektierte

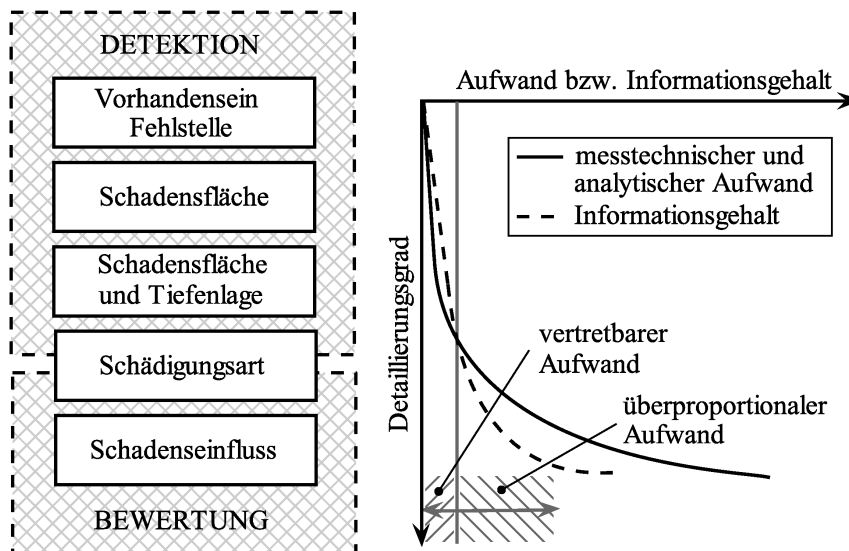


Abbildung 2.1: Informationszuwachs von der reinen zerstörungsfreien Prüfung bis hin zur Schadensbewertung

Inhomogenität in ihren Abmessungen nicht der meist bildgebend visualisierten charakteristischen ZfP-Größe (Dämpfungswert, Reflexionsanzeigen, Zeitverlauf, Phasenverschiebungen, Modekonvertierungen, Oberflächendeformation, etc.) entspricht. Als Beispiel sei hierfür die ESPI Methode [62] bzw. die Shearographie [91] genannt, welche der Gruppe der optischen zerstörungsfreien Prüfmethoden angehören. Die messbare oberflächliche Verwerfung, welche beide Methoden in gewisser Weise erfassen, entspricht dabei nicht direkt der Schadensgröße der Fehlstelle, die eben diese Verwerfung bewirkt. Je nach Tiefenlage und Art der Schädigung rufen bestimmte Anregungsarten bzw. Anregungsgrößen unterschiedliche Verformungen an der Oberfläche hervor, was eine Bewertung erschwert bzw. analytische Auswertungsroutinen erfordert.

Will man neben der Schädigungsfläche auch ihre Tiefenlage exakt bestimmen, steigt der Grad an Komplexität weiter. Während einige Verfahren die Schadensfläche und die Tiefenlage des Defektes mit nur einer Messung ermitteln können, als Beispiel sei hier das Ultraschallverfahren genannt [60], sind bei anderen Verfahren mehrere Messungen notwendig (beispielsweise bei thermischen Lock-In-Verfahren [65], [66]). Bei diesen Verfahren steigt somit neben dem erhöhten Auswertungsaufwand auch der messtechnische Aufwand deutlich an. Im Durchschnitt über alle ZfP-Methoden ist allerdings die Steigerung des Gesamtaufwandes für diesen Schritt in Analogie zum vorhergehenden als moderat zu bezeichnen.

Geht man noch einen Schritt weiter und will neben den geometrischen Parametern der Schadensgröße und der Tiefenlage, noch den Schädigungstyp ermitteln, so kann in vielen Fällen dieser Informationszugewinn nur mit einem überproportional großen Aufwand erreicht werden. Da verschiedene Schädigungsarten ähnliche bzw. im schlimmsten Fall sogar analoge Ausprägungen in den Ergebnissen der zerstörungsfreien Prüfung der einzelnen Methoden aufweisen können, müssen vergleichende Untersuchun-

gen mit komplementären Methoden durchgeführt werden. Auch ist eine genaue Kenntnis des zu prüfenden Objektes (Lagenaufbau, Materialien, etc.) zwingend erforderlich, um zu einem eindeutigen Ergebnis zu kommen. Aus diesem Grund bildet die Bestimmung der Schadensart die Grenze von der reinen Schadensdetektion hin zur Schadensbewertung, wobei der Begriff beiden Kategorien zugeordnet werden kann.

Der größtmögliche Informationsgehalt im Sinne einer zerstörungsfreien Bewertung, und auch das eigentliche Ziel, stellt die Forderung nach der Charakterisierung des Schadenseinflusses auf die Strukturkennwerte dar. Zu diesem Zweck ist eine genaue Kenntnis der Schadensposition, der geometrischen Parameter, der Strukturparameter, der vorherrschenden Belastungen, etc. notwendig, um mit ausreichender Genauigkeit eine solche Bewertung durchführen zu können. Somit ist der analytische Aufwand nach der Schadensdetektion als sehr groß einzuschätzen, was auch erklärt, wieso dieser Schritt in der Praxis nur sehr selten durchgeführt wird und in der Regel andere Lösungswege gesucht werden (Austausch, Instandsetzung, etc.). Diese Einflussparameter werden auch in der Literatur deswegen nur selten behandelt, wobei in den meisten Fällen lediglich CAI-Untersuchungen mit variierenden Lagenaufbauten und Schädigungsenergien durchgeführt werden (siehe beispielsweise [71]).

In der vorliegenden Arbeit wird versucht, eine vereinfachte Vorgehensweise zu erarbeiten, um zumindest eine erste Bewertung des Schädigungseinflusses durchführen zu können und gleichzeitig den dafür erforderlichen messtechnischen und analytischen Aufwand gering zu halten.

3 Physikalische Grundlagen für thermische und akustische ZfP Systeme

In diesem Kapitel werden die Grundlagen geschaffen, um die Messergebnisse der in dieser Arbeit behandelten ZfP-Methoden verstehen und interpretieren zu können. Dazu werden zunächst Eigenschaften thermischer Wellen, wie deren Ausbreitungs-, Reflektions- und Dämpfungsverhalten in Kapitel 3.1 beschrieben, bevor in Kapitel 2.4 näher auf die Eigenschaften akustischer Wellen eingegangen wird. Abschließend wird besonders auf die Visualisierung der Messergebnisse eingegangen.

3.1 Analyse thermischer Wellen zur Beschreibung thermischer ZfP Systeme

Um die thermischen Wellen beschreiben zu können, ist es notwendig, zunächst auf die Grundlagen der Wärmetransportphänomene bzw. der Strahlungsphysik näher einzugehen, da damit die Grundlagen für die Fehlerbewertung geschaffen werden. Dies geht mit einer Begriffsdefinition einher, wie sie beispielsweise von Hellier [51] bzw. Baehr [13] vorgeschlagen wird.

3.1.1 Begriffsdefinition

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Begriffe erläutert, die zum Verständnis der in dieser Arbeit durchgeführten thermischen Messungen benötigt werden.

Thermische Energie

Die thermische Energie E_{therm} ist eine spezielle Form der Energie und wird häufig auch als Wärmeenergie bezeichnet. Sie beschreibt eine Zustandsgröße und ist Teil der inneren Energie. Physikalisch gesehen bezeichnet diese Form der Energie eine ungeordnete Atom- oder Molekülbewegung eines Stoffes. Die thermische Energie kann geschrieben werden als

$$E_{therm} = c_{th} \cdot m \cdot T , \quad (3.1)$$

wobei c_{th} die spezifische Wärmekapazität, m die Masse des Stoffes und T dessen absolute Temperatur bezeichnet. Durch eine Wärmezufuhr steigt die kinetische Energie der einzelnen Moleküle, wobei diese als eine ungeordnete Bewegung vieler Körper betrachtet werden kann. Da sowohl die Masse m als auch die spezifische Wärmekapazität c_{th} immer größer null sind, befindet sich ein Körper, dessen Moleküle keine kinetische Energie aufweisen am absoluten Nullpunkt. Dieser Punkt bildet den Bezugspunkt der Kelvin-Temperaturskala. Setzt man die Masse m und die spezifische Wärmekapazität c_{th} als konstant voraus, kann die absolute Temperatur und die thermische Energie direkt korreliert werden.

Grenzen zwei Körper ungleicher Temperatur aneinander so kommt es zu einem Wärmeaustausch zwischen diesen Körpern. Dabei gibt es drei unterschiedliche Mechanismen, nämlich die *Wärmeleitung* (vorwiegend in Festkörpern und Fluiden), die *Konvektion* (in Fluiden und Gasen) und die *Wärmestrahlung*. Letztere benötigt kein Trägermedium. Der Wärmeaustausch selbst kann entweder konstant oder zeitabhängig, also transient, sein.

Wärmeleitung

Die Wärmeleitung tritt in Feststoffen oder ruhenden Fluiden auf. Sie basiert auf dem Kontakt zwischen benachbarten Molekülen, die sich gegenseitig beeinflussen. Der Grad der gegenseitigen Beeinflussung oder mit anderen Worten ausgedrückt, die pro Zeiteinheit übertragene Wärmemenge bzw. der Wärmestrom $\dot{Q} = \frac{dQ}{dt}$ hängt neben geometrischen Größen (Übertragungsfläche A , Materialdicke Δx) auch von der Wärmeleitfähigkeit λ_{th} und dem Temperaturunterschied ΔT ab. Das Gesetz nach Fourier beschreibt diesen Zusammenhang wie folgt (eine Diskussion des Fourier'schen Gesetzes ist nachzulesen bei Polifke und Kopitz [79] oder Liu [64])

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = \lambda_{th} A \frac{\Delta T}{\Delta x} . \quad (3.2)$$

Eine hohe Wärmeleitfähigkeit begünstigt somit die Prüfbarkeit von Materialien, da sie direkt proportional zur übertragenen Wärmemenge ist. Setzt man die Wärmeleitfähigkeit ins Verhältnis zur spezifischen Wärmekapazität c_{th} , so erhält man die *Temperaturleitfähigkeit* α , welche die Ausbreitung der Wärme innerhalb eines Körpers wie folgt beschreibt.

$$\alpha = \frac{\lambda_{th}}{c_{th} \cdot \rho} \quad (3.3)$$

Temperaturleitfähigkeit ist nach [79] ein „Maß dafür, wie schnell sich Temperaturstörungen im Material ausgleichen“. Der Divisor $c_{th} \cdot \rho$ steht für das Speichervermögen des Stoffes und wirkt als Gewichtungsfaktor.

Konvektion

Die Konvektion spielt beim Wärmeübergang in Fluiden und Gasen eine wichtige Rolle. Dabei unterscheidet man zwischen natürlicher und erzwungener Konvektion (siehe [79] oder [51]). Die erzwungene Konvektion ist durch künstlich erzeugte Fluidströme bedingt. Die natürliche Konvektion in Fluiden tritt unter Gravitation auf. Dazu muss zunächst ein Temperaturunterschied ΔT zwischen Feststoff und Fluid vorhanden sein. Dieser Temperaturunterschied bedingt eine Erwärmung des Fluids und somit eine Änderung der Fluidichte ρ , welche zu einer Umschichtung des Fluids unter Gravitationsbedingungen führt. Dieses Phänomen tritt typischerweise bei der aktiven Thermographie infolge der Erwärmung des Prüfobjektes auf. Betrachtet man die natürliche Konvektion an einer senkrechten ebenen Platte, so beschreibt das Newton'sche Gesetz diesen Wärmeübergang bzw. den Wärmestrom $\dot{Q} = \frac{dQ}{dt}$ wie folgt:

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = \alpha \cdot h \cdot A \cdot \Delta T . \quad (3.4)$$

Dabei ist die übertragene Wärmemenge pro Zeiteinheit $\frac{dQ}{dt}$ (auch Wärmeverlust genannt) proportional zur Plattenhöhe h , zu der zum Fluid zeigenden Fläche A und dem Temperaturunterschied ΔT zwischen Platte und Temperatur des Fluids im Fernfeld. Obwohl die Konvektion für die thermische Schadenscharakterisierung meist keine zentrale Rolle spielt, müssen derartige Phänomene dennoch beachtet werden, da die Konvektion in vielen Fällen die Messergebnisse beeinflussen kann und für die Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden muss.

Wärmestrahlung

Neben der *Wärmeleitung* stellt die *Wärmestrahlung* den dritten wesentlichen Mechanismus bei der thermischen Fehlerdetektion dar [79]. Jeder Körper, der eine Temperatur größer dem absoluten Nullpunkt besitzt, emittiert elektromagnetische Strahlung mit einer bestimmter Wellenlänge, welche von dessen Temperatur und dessen Emissivitätsgrad ϵ_{th} abhängt. Die Erdatmosphäre absorbiert diese Strahlung in bestimmten Wellenlängenbereichen, wobei zwei Bereiche bzw. Wellenlängenbänder existieren, in denen die Atmosphäre transparent ist. Infrarotkameras nutzen diese zwei Bereiche. In Abhängigkeit vom Infrarotsensor und dessen spektraler Empfindlichkeit werden typischerweise zwei Wellenlängenbereiche, welche zwischen $2 \mu m$ und $6 \mu m$ bzw. zwischen $8 \mu m$ und $15 \mu m$ liegen, zur Fehlercharakterisierung verwendet [51]. Die Formel nach Stefan-Boltzmann [90] [19] beschreibt die pro Zeiteinheit abgegebene Wärmemenge mit

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = \epsilon_{th} \cdot \sigma_B \cdot T^4 \cdot A . \quad (3.5)$$

Die Größe σ_B stellt die Stefan-Boltzmann Konstante ($5,6704 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2K^4}$) dar. Die Größe ϵ_{th} beschreibt den Emissivitätsgrad der Oberfläche und T ihre absolute Temperatur. Die emittierende Fläche wird als A bezeichnet. Handelt es sich um einen schwarzen Körper, so ist dessen Emissivität mit eins beziffert, alle natürlich vorkommenden Materialien weisen eine geringere Emissivität auf. Da bei vielen Materialien während der zerstörungsfreien Prüfung die Maximaltemperatur vorgegeben ist, kann durch eine geeignete Oberflächenbehandlung ϵ_{th} beeinflusst werden, um eine Erhöhung der Wärmeabstrahlung zu bewirken. Bei geeigneter Abschirmung des Testbereiches und der Minimierung von umgebenden Strahlungsquellen kann Gleichung 3.5 zur Berechnung der emittierten Energie verwendet werden.

Betrachtet man den Strahlungsaustausch zwischen zwei strahlenden Körpern, so muss die Nettostrahlung zwischen zwei Körpern berücksichtigt werden. Die Nettostrahlung bezeichnet dabei die resultierende ausgetauschte Wärmemenge pro Zeiteinheit $\dot{Q} = \frac{dQ}{dt}$. Im einfachsten Fall, nämlich bei zwei parallelen plattenförmigen Oberflächen der Fläche A_{Pl} erhält man folgende Gleichung

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = \sigma_B \cdot A_{Pl} \cdot E_{th} \cdot (T_1^4 - T_2^4) , \quad (3.6)$$

wobei T_1 der Temperatur der ersten Platte und T_2 der Temperatur der zweiten Platte entspricht. Der Parameter E_{th} wird als Strahlungsaustauschgrad [8] bezeichnet und errechnet sich aus den Emissionsgraden der einzelnen Platten, $\epsilon_{th,1}$ und $\epsilon_{th,2}$, zu

$$E_{th} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_{th,1}} + \frac{1}{\epsilon_{th,2}} - 1} . \quad (3.7)$$

Die geometrischen Verhältnisse bei realen Tests sind um ein vielfaches komplexer als beim behandelten Beispiel zweier paralleler Platten. Da kein Mehrwert im Sinne des Verständnisses für das Funktionsprinzip der optischen Anregung geschaffen werden kann, wird an dieser Stelle auf dieses Problem nicht genauer eingegangen, sondern auf weiterführende Literatur mit verschiedenen Lösungswegen, wie beispielsweise [79], [13] oder [20] verwiesen.

3.1.2 Grundprinzip der Lock-In Thermographie

Die Lock-In Thermographie, welche zur Gruppe der aktiven Thermographiemethoden zählt [66], nutzt, wie in Kapitel 2.2 skizziert, sowohl die Amplituden- als auch

die Phaseninformation von thermischen Wellen zur Fehlerdetektion. Die Generierung des thermischen Signals kann auf verschiedene Weise erfolgen, wobei in dieser Arbeit auf die optische Anregung genauer eingegangen werden soll, da diese auch die Anregungsart für das vorgeschlagene SPT-System darstellt.

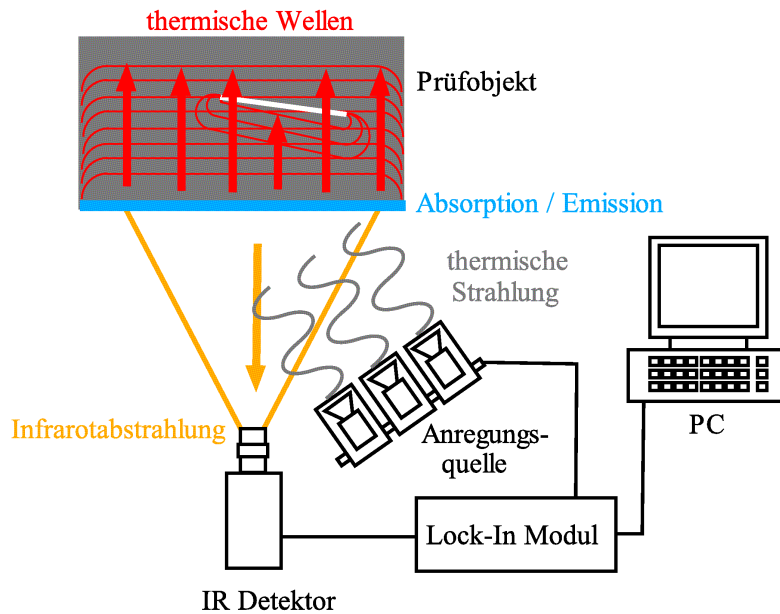


Abbildung 3.1: Prinzipskizze Lock-In Thermographie in Anlehnung an [76]

Abbildung 3.1 zeigt das Grundprinzip einer Lock-In Messung anhand eines typischen Versuchsaufbaus mit allen dafür benötigten Einzelkomponenten.

- **Steuereinheit (Personal Computer):** Diese ist sowohl für die Generierung des Anregungssignals als auch für die Messung der Bauteilantwort zuständig.
- **Lock-In Modul:** Dieses Modul erhält vom Steuerrechner die Information für das aufzuprägende Signal und synchronisiert gleichzeitig die Anregungsquelle und die Messeinheit. Zusätzlich dazu kann es über eine Einheit zur Leistungsregelung verfügen, welche die Eingangsgrößen für die Anregungsquelle (harmonischen Signal mit adaptiven Frequenzen und Signalverläufen) erzeugt. Alternativ kann diese Leistungsregelung auch durch ein Zusatzmodul erfolgen.
- **Infrarot (IR) Detektor:** Dieses Modul ist für die Aufzeichnung der zeitlich veränderlichen Bauteiloberflächentemperatur zuständig.
- **Anregungsquelle:** Die Anregungsquelle prägt das vom Steuerrechner vorgegebene Anregungssignal auf die Bauteiloberfläche auf.

Die Funktionsweise der Lock-In Thermographie ist ebenfalls anhand eines im Bauteil (oben in Abbildung 3.1 dargestellt) vorhandenen und zur Bauteiloberfläche hin geneigten flächigen Defekts bildlich veranschaulicht. Die Anregungsquelle (in vielen Fällen handelt es sich um ein Array aus parallel geschalteten Anregungsquellen,

um eine gleichmäßige Bauteilausleuchtung bzw. Bauteilerwärmung gewährleisten zu können) bringt modulierte thermische Energie auf die Bauteiloberfläche auf. Das Bauteil nimmt diese Energie durch Absorption auf. Diese Absorption führt nun ihrerseits zu einer thermischen Welle, welche sich im Bauteil ausbreitet (schematisch in Form von sich ausbreitenden Wellenfronten dargestellt). Diese Welle interagiert mit Unstetigkeiten im Bauteil und es kommt zu einer Reflektion der sich im Bauteil ausbreitenden Welle. Um diesen Vorgang genauer beschreiben zu können, muss daher zunächst die Ausbreitung der thermischen Welle im Bauteil erfasst und charakterisiert werden. Geht man von einer eindimensionalen Wärmeleitung in Bauteildickenrichtung, die im Folgenden als z-Richtung bezeichnet wird, aus (unendliche Bauteilabmessungen) und nimmt man eine zeitlich konstante, sinusförmige Anregungsamplitude an, so kann nach [28] die zeitlich und örtlich abhängige Temperatur $T(z, t)$ geschrieben werden als

$$T(z, t) = (T_{ob}(t) - T_0) \cdot e^{-\frac{z}{\mu}} \cdot e^{i(\omega t - \frac{z}{\mu})} + T_0. \quad (3.8)$$

Die Größe T_0 entspricht dabei der Bauteilanfangstemperatur und $T_{ob}(t)$ der Bauteiloberflächentemperatur, welche durch die optische Anregung hervorgerufen wird und somit zeitabhängig ist. Die orts- und zeitabhängige Temperatur, welche exponentiell in Bauteildickenrichtung (z-Richtung) gedämpft wird, hängt hierbei von der Kreisfrequenz der Anregung ω und von der thermischen Eindringtiefe μ ab. Diese wiederum lässt sich als Funktion der Kreisfrequenz der Anregung ω und der Temperaturleitfähigkeit α schreiben als

$$\mu = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha}{\omega}}. \quad (3.9)$$

Der Gleichung 3.8 wird die Wärmediffusion im Werkstoff zu Grunde gelegt, welche als

$$\frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = \frac{\lambda_{th}}{\rho c_{th}} \cdot \frac{\partial^2 T(z, T)}{\partial z^2} \quad (3.10)$$

geschrieben werden kann (siehe beispielsweise [61]). Die z-Richtung entspricht hierbei der Richtung maximalen Temperaturgefälles unter Annahme einer eindimensionalen Wärmeleitung und einer konstanten Wärmeleitfähigkeit der Probe. Verwendet man die Definition der Temperaturleitfähigkeit aus Gleichung 3.3 und bringt alle Terme auf die linke Seite der Gleichung, so erhält man

$$\frac{\partial^2 T(z, T)}{\partial z^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = 0. \quad (3.11)$$

Die Gleichung 3.8 entspricht dabei der Lösung der homogenen Gleichung für die Wärmediffusion in Gleichung 3.11. Die thermische Eindringtiefe μ wird in der Regel so definiert, dass in dieser Tiefe der Wert der Eingangsamplitude des thermischen Signals auf e^{-1} abgefallen und es zu einer Phasenverschiebung von 57° (entspricht etwa 1 rad) gekommen ist (siehe beispielsweise [83]). Unter Kenntnis der Materialparameter, hier im speziellen der Temperaturleitfähigkeit α , kann durch gezielte Wahl der Lock-In Frequenz ω die thermische Eindringtiefe festgelegt werden.

Nun bleibt noch die Frage nach dem Einfluss von Fehlstellen bzw. Inhomogenitäten auf die Temperaturverteilung $T(z, t)$. Dazu muss zunächst der thermische Wellenwiderstand betrachtet werden, der auch als Impedanz bezeichnet wird. Dieser stellt ein Maß für die Wellenausbreitungsfähigkeit thermischer Wellen dar. Treffen zwei unterschiedliche Materialien aufeinander, führt der Impedanzunterschied ΔZ ($\Delta Z = |Z_1 - Z_2|$), der sich im Stoßbereich der unterschiedlichen Stoffe eins und zwei ergibt, zu einer Behinderung des Wärmeabflusses und kann in einer Reflektion der thermischen Welle resultieren.

Fehlstellen, wie Materialeinschlüsse, Delaminationen oder Risse weisen in der Regel eine bzw. mehrere solcher Grenzflächen auf, da Stoffe mit unterschiedlicher Impedanz vorliegen. Zusätzlich zum Impedanzunterschied, welcher zwei unterschiedliche Stoffe voraussetzt, können bei Defekten Kontaktprobleme auftreten. Dies ist dann der Fall, wenn die Bindung in einem Werkstoff reduziert wird ohne dass sich eine klare Grenzfläche ausbildet. Somit stoßen zwei Materialien mit gleicher Impedanz aufeinander, wobei der Wärmefluss zwischen diesen Stoffen aufgrund der fehlenden Bindung dennoch in gewissem Maße behindert wird. Ein Maß für diese Behinderung ist der thermischen Kontaktwiderstand W_k .

Will man diese zwei Einflüsse in Form eines Reflektionskoeffizienten R_{12} für thermische Wellen zusammenfassen, welcher ein Maß für die Reflektion thermischer Wellen darstellt, kann in Anlehnung an [83] geschrieben werden

$$R_{12} = \frac{Z_2 - Z_1 + W_k}{Z_2 + Z_1 + W_k} \quad (3.12)$$

Der Reflektionskoeffizient R_{12} ist dabei eine komplexe Größe, was impliziert, dass sich der Phasenwinkel auch in Abhängigkeit von der Frequenz ändern kann. Somit kann sich die reflektierte Welle von der ursprünglichen thermischen Welle in Amplitude und Phase unterscheiden. Durch die Superposition an der Bauteiloberfläche mit der von außen aufgetragenen Wärmewelle wird in weiterer Folge eine Veränderung des Phasenwinkels und der Amplitude des an der Bauteiloberfläche resultierenden Temperaturfeldes hervorgerufen.

Abbildung 3.2 zeigt diesen Vorgang schematisch anhand einer Punktmessung. Dabei ist das auf die Bauteiloberfläche aufgeprägte Signal mit einer durchgezogenen Linie, das an der Bauteiloberfläche gemessene strichliert dargestellt. Durch die Interaktion mit einer Inhomogenität im Bauteilinneren (siehe Prinzipskizze in Abbildung 3.1) ist

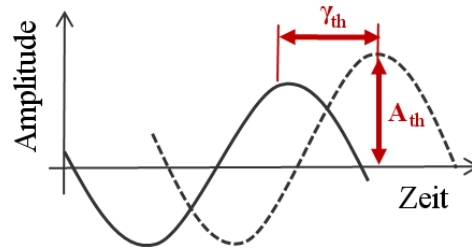


Abbildung 3.2: Modale Bestimmungstücke der Lock-In Thermographie [75]

die Amplitude A_{th} des gemessenen Signals im vorliegenden Fall größer als die aufprägte Amplitude wobei auch ein Phasenversatz γ_{th} zu beobachten ist.

An dieser Stelle wird die Mehrfachreflektion, d.h. die folgenden Reflektion der an der Fehlstelle zurückgeworfenen Welle an Bauteiloberfläche bzw. in weiterer Folge wieder an inneren Inhomogenitäten, aufgrund des exponentiellen Abfalls der Signalhöhe und des daraus resultierenden marginalen Einflusses vernachlässigt.

Durch die Anwendung einer diskreten Fouriertransformation bei der Lock-In Frequenz ω lassen sich die modalen Parameter der resultierenden Welle für jeden betrachteten Bildpunkt bestimmen. In Anlehnung an Riegert [83] kann bei einer Messdauer T_{mess} und einer Abtastrate von f_{Abtast} die transformierte Funktion F_ω geschrieben werden als:

$$F_\omega = \int_0^{T_{mess}} f(t)e^{-i\omega t} dt \approx \sum_{\kappa=0}^{T_{mess} \cdot f_{Abtast}} f\left(\frac{\kappa}{f_{Abtast}}\right) e^{\frac{i\omega\kappa}{f_{Abtast}}} \quad (3.13)$$

$$= \sum_{\kappa=0}^{T_{mess} \cdot f_{Abtast}} f\left(\frac{\kappa}{f_{Abtast}}\right) \cdot \left[\cos\left(\frac{\omega\kappa}{f_{Abtast}}\right) - i \sin\left(\frac{\omega\kappa}{f_{Abtast}}\right) \right] \quad (3.14)$$

$$\approx \text{Re}(F_\omega) + i\text{Im}(F_\omega) . \quad (3.15)$$

Die sich daraus ergebende resultierende Amplitude A_ω und die resultierende Phase φ_ω können gemäß Gleichung 3.16 und 3.17 berechnet werden.

$$A_\omega = \sqrt{\text{Re}(F_\omega)^2 + \text{Im}(F_\omega)^2} \quad (3.16)$$

$$\varphi_\omega = \arctan\left(\frac{\text{Im}(F_\omega)}{\text{Re}(F_\omega)}\right) \quad (3.17)$$

Führt man Messungen bei verschiedenen Lock-In Frequenzen am gleichen Bauteil durch, können unterschiedliche Eindringtiefen realisiert werden. Durch einen Vergleich dieser Messungen können Aussagen über die Tiefenlage von eventuell vorhandenen Fehlstellen bzw. Defekten getroffen werden.

Die praktische Realisierung dieser Tiefenauflösung bzw. der Einfluss der Lock-In Frequenz auf die Tiefenreichweite thermischer Wellen wird beispielsweise von Gleiter [39] experimentell behandelt. Er verwendet dazu ein optisch angeregtes Thermographieverfahren zur Charakterisierung von mittels rückseitig angebrachten Sacklöcher künstlich realisierten Fehlstellen in unterschiedlichen Tiefen. Durch ein Subtraktionsverfahren mit einer Referenzmessung lässt sich die absolute Fehlertiefe bestimmen. Der Zusammenhang zwischen Fehlertiefe und Anregungsfrequenz ist dabei stark nichtlinear.

3.1.3 Mögliche Alternativen zu konventionellen Lock-In Systemen

Die Synchronisation der Anregungs- und Messeinheit stellt ein wesentliches Element der Lock-In Thermographie dar. Um schnelle und effektive Algorithmen, wie das Vier-Punkte-Messverfahren (siehe beispielsweise [95]) für die Bildauswertung heranziehen zu können, muss der initiale Phasenversatz zwischen Anregung und Aufzeichnung genauso minimiert werden, wie die Differenz der eingebrachten thermischen Welle von einer theoretisch perfekten Funktion. Ist dies nicht der Fall, verschlechtert sich die Güte der Messergebnisse.

Die Synchronisation bringt im Weiteren den Vorteil einer absoluten Information des Phasenversatzes zur einfallenden Welle, was bei der Defektcharakterisierung behilflich ist. Da der Phasenversatz neben der gewählten Lock-In Frequenz im Wesentlichen von der Inhomogenität (Beschaffenheit bzw. Eigenschaften beider aufeinandertreffender Materialien) abhängt, können Rückschlüsse auf eben diese Inhomogenität gezogen werden. Somit können etwa unterschiedliche Fehlstellen in einem Faserverbundlaminat, welche sich in gleicher Tiefe befinden, aufgrund ihrer Materialeigenschaften voneinander abgegrenzt werden.

Diese Vorteile und die gute Defektsensitivität bringen allerdings einen hohen messtechnischen Aufwand mit sich, welcher insbesondere durch die Synchronisationseinheit auch wirtschaftlich relevant ist. Das ist ein Grund, wieso derzeit auf dem Markt verfügbare Systeme im Vergleich zu Systemen mit konstanten Anregungsquellen bzw. Schockanregung deutlich teurer sind.

Durch den Fortschritt in der Rechenleistung, drängt sich nun die Frage auf, ob diese Synchronisation von essentieller Bedeutung für die Gesamtmessung ist, oder, ob auf diese unter Umständen mit einigen Abstrichen in den Messergebnissen auch verzichtet werden kann.

Ein Verzicht auf diese Einheit würde eine zweistufige Auswertung mit sich bringen,

wobei zunächst die Messung durchgeführt wird, und danach eine Bewertung der Bilderfolge erfolgt. Der dadurch entstehende variable initiale zeitliche Phasenversatz bedingt eine Anpassung der Auswerteverfahren, um nun relative Phasen und Amplitudenbilder erstellen zu können.

In dieser Arbeit wird das daraus resultierende System als Sequentielle Phasenmodulierte Thermographie (SPT) bezeichnet. Ziel dieser Technologie ist es, die Kosten von Lock-In Systemen deutlich zu senken, um eine breitere Anwendung von phasensensiblen thermographischen Systemen zu gewährleisten. Aus diesem Grund wird sowohl der Prozess der Datenaufzeichnung, -auswertung und Defektbewertung, als auch der Versuchsaufbau bzw. deren Komponenten detailliert betrachtet, wobei neben den technischen Aspekten auch die Wirtschaftlichkeit sowie die Systemkosten im Vordergrund stehen. Zur Bewertung der Ergebnisse dieses neuen Systems sollen einerseits Vergleiche mit Ultraschallmessungen herangezogen werden, da diese nicht nur in der Luft- und Raumfahrt das Referenzsystem zur zerstörungsfreien Prüfung darstellen, andererseits Simulationsergebnisse dienen, welche die Ergebnisse einer konventionellen Lock-In Messung darstellen.

3.2 Grundlagen der Materialprüfung mittels Ultraschall

Die Ultraschallprüfung nutzt elastische Festkörperwellen und deren Eigenschaften zur Charakterisierung des inneren Zustandes verschiedener Materialien und Strukturen. Langenberg [63] weist darauf hin, dass die Interpretation von Ultraschallsignalen aufgrund der Tatsache, dass akustische Wellen in Festkörpern in zweierlei Formen, nämlich als Druck- und Scherwellen, vorliegen, einen hohen Komplexitätsgrad aufweist. Erst durch das Verständnis der Wellenausbreitungsphänomene lassen sich mathematisch – numerische Modelle aufstellen, welche für die Interpretation der gemessenen Daten und für die Charakterisierung von Fehlstellen verwendet werden können.

In den meisten Fällen ist die zu messende Größe der Schalldruck p , sprich die Bauteilantwort an einem bestimmten Messpunkt. Dieser Schalldruck wird in einem A-Bild¹ dargestellt [63]. Zunächst ist von einer skalaren Größe $p(\vec{R}, t)$ die Rede, welche an einem bestimmten Messpunkt als Funktion der Zeit angegeben werden kann. Der Vektor \vec{R} bezeichnet den Ortsvektor zu diesem Punkt. Dieser skalare Wert wird bedingt durch eine Teilchenverschiebung im Festkörper, welche vektoriell als $\vec{u}(\vec{R}, t)$ geschrieben werden muss. Dieser Verschiebungsvektor kann in drei skalare Komponenten zerlegt werden. Diese bilden die Grundlage für den symmetrischen Deforma-

¹Als A-Bild wird in der Ultraschallprüfung eine Punktmessung bezeichnet, wobei der Schalldruck in Abhängigkeit der Zeit betrachtet wird. Der Schalldruck wird in vielen Fällen vereinfacht als Amplitude des gemessenen akustischen Signals bezeichnet, wobei es zwei unterschiedliche Darstellungsformen (gleichgerichtet und nicht gleichgerichtet) gibt [51].

tionstensor $\underline{S}(\vec{R}, t)$, welcher aus neun skalaren Komponenten besteht. Über ein allgemeines Werkstoffgesetz (im einfachsten Fall über das Hooksche Gesetz) kann dieser mit einem Spannungstensor $\underline{T}(\vec{R}, t)$ verknüpft werden.

Unter Berücksichtigung dieses Zusammenhangs können die Hauptmechanismen akustischer Wellen, welche sich die zerstörungsfreien Prüfung zu Nutze macht, formuliert werden. In Anlehnung an [63] sind dies:

- Ausbreitung von Festkörperwellen in homogenen und inhomogenen Werkstoffen
- Abstrahlungsphänomene von verschiedenen Quellentypen für akustische Wellen (Volumenquelle, Flächenquelle)
- Streuungsphänomene an Inhomogenitäten
- Visualisierung von Inhomogenitäten

Um die in dieser Arbeit durchgeführten Messungen mittels wassergekoppelter Impuls-Echo Technik besser nachvollziehen zu können, soll im Folgenden die Ausbreitung von Festkörperwellen sowie Streuungs- und Reflexionsprinzipien detaillierter beschrieben werden. Für eine detaillierte Beschreibung der Abstrahlungsphänomene bzw. der verschiedenen Quellentypen sei hier auf die entsprechende Literatur (beispielsweise [63]) verwiesen. Abschließend wird das Augenmerk auf die Visualisierung bzw. Fehlerdarstellung gelegt.

3.2.1 Ausbreitung von Festkörperwellen

Die Ausbreitung von Festkörperwellen bzw. genauer gesagt, die Ausbreitungsgeschwindigkeit v von Festkörperwellen hängt im Wesentlichen von zwei Werkstoffeigenschaften ab. Neben der Dichte ist der E-Modul des Werkstoffes entscheidend, wobei Werkstoffe mit hohem E-Modul eine höhere Ausbreitungsgeschwindigkeit aufweisen als Materialien mit geringem E-Modul. Genau gegenteilig verhält es sich mit Werkstoffen unterschiedlicher Dichte ρ unter der Annahme eines konstanten E-Moduls. Dort zeigen Materialien mit geringer Dichte eine höhere Ausbreitungsgeschwindigkeit. Die beiden vorherrschenden Wellenarten (Druck- und Scherwellen) weisen dabei unterschiedliches Verhalten auf, wobei sie zusätzlich von der Querkontraktionszahl ν abhängen. Dies resultiert in unterschiedlichen Geschwindigkeiten der einzelnen Wellentypen in einem Werkstoff. In Anlehnung an [51] kann die Geschwindigkeit v_c der Druckwelle geschrieben werden als

$$v_c = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1 - \nu}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}}, \quad (3.18)$$

während die Geschwindigkeit der Scherwelle v_s bei isotropen Werkstoffen mit Hilfe der Gleichung

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1 + \nu)}}, \quad \text{bzw.} \quad v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3.19)$$

unter Einbeziehung des Schubmoduls G berechnet werden kann. Handelt es sich um einen orthotropen Werkstoff kann diese Beziehung nicht verwendet werden. An dieser Stelle sei kurz auf die ebenso auftretenden Oberflächenwellen (z.B. Rayleigh Wellen) hingewiesen, welche etwa 90% der Geschwindigkeit der Scherwellengeschwindigkeit v_s aufweisen, die für eine konventionelle Ultraschallprüfung allerdings nur eine untergeordnete Rolle spielen.

Betrachtet man die Wellenlänge einer akustischen Welle, so hängt diese direkt von der Ausbreitungsgeschwindigkeit v der akustischen Welle und deren Frequenz f gemäß der Beziehung

$$\lambda = \frac{v_c}{f} \quad (3.20)$$

ab. Die minimal mittels Ultraschallprüfung detektierbare Fehlergröße wird durch die Wellenlänge λ festgelegt. Die minimale Fehlergröße, welche mittels Ultraschallprüfung nachweisbar ist, beträgt etwa ein Fünftel der Wellenlänge (vergleiche [70]). Somit kann unter Verwendung verschiedener Prüfköpfe gezielt die minimal detektierbare Fehlergröße eingestellt werden.

3.2.2 Streuungsphänomene und Interaktion mit Inhomogenitäten

Grenzen zwei Materialien in einem Bauteil aneinander, welche unterschiedliche akustische Eigenschaften besitzen (Dichteunterschied, unterschiedlicher E-Modul, etc.), so kann es zu einer Teil- bzw. Vollreflektion der auftreffenden akustischen Wellen kommen [63]. Das Maß der Reflektion hängt im Wesentlichen vom Grad des Materialunterschieds ab. Die entsprechende physikalische Größe wird als akustische Impedanz Z_{ak} bezeichnet und kann geschrieben werden als [51]:

$$Z_{ak} = \rho \cdot v, \quad (3.21)$$

wobei ρ wiederum die Dichte des jeweiligen Materials darstellt und v dessen Ausbreitungsgeschwindigkeit für Festkörperwellen. Im Folgenden wird vorausgesetzt, dass

der Einfallswinkel des akustischen Signals senkrecht zur Grenzfläche bzw. zur Inhomogenität ist. Um den Grad der Reflektivität zu berechnen, muss die Differenz der Impedanzen benachbarter Materialien berechnet werden. Kennzeichnet man den ersten Partner, welcher Träger der eingekoppelten akustischen Welle ist mit dem Index 1 und den zweiten, angrenzenden Partner mit dem Index 2, so kann man den relativen Anteil der reflektierte Schallenergie $E_{ak,refl}$ in Anlehnung an [51] als

$$E_{ak,refl} = \left(\frac{Z_{ak,1} - Z_{ak,2}}{Z_{ak,1} + Z_{ak,2}} \right)^2 \cdot 100\% = \left(\frac{\rho_1 \cdot v_1 - \rho_2 \cdot v_2}{\rho_1 \cdot v_1 + \rho_2 \cdot v_2} \right)^2 \cdot 100\% \quad (3.22)$$

schreiben. Betrachtet man als Beispiel eine Delamination in einem CFK Laminat und setzt für die Impedanz des Laminates² $Z_{ak,CFK} = \rho_{CFK} \cdot v_{CFK} = 1,7 [g/cm^3] \cdot 2500 [m/s] = 4,25 [kg/(m^2s)]$ sowie für einen vorhandenen Luftspalt ($Z_{ak,Luft} = \rho_{Luft} \cdot v_{Luft} = 1,29 [kg/m^3] \cdot 333 [m/s] = 0,00043 [kg/(m^2s)]$) voraus, so errechnet sich der Anteil der reflektierten Schallenergie zu

$$E_{ak,refl} = \left(\frac{4,25 - 0,00043}{4,25 + 0,00043} \right)^2 \cdot 100\% = (0,9998)^2 \cdot 100\% = 99,96\% . \quad (3.23)$$

Somit wird das eingeleitete Schallsignal zu 99,96% wieder reflektiert. Befinden sich nun andere Fehlstellen oder Inhomogenitäten im Laminat, welche im Vergleich zu Luft eine deutlich höhere akustische Impedanz aufweisen, verringert sich der reflektierte Anteil entsprechend. Fehlstellen, welche sich unterhalb von Delaminationen bzw. dünnen Luftschichten befinden, können in der Regel nicht mehr detektiert werden.

Neben der Reflexion gibt es noch weitere physikalische Phänomene, die bei der Betrachtung des Schalles und dessen Interaktion mit einer Grenzfläche auftreten und welche speziell bei nicht senkrecht zur Inhomogenität einfallenden Wellen berücksichtigt werden müssen. Fällt ein akustisches Signal unter einem bestimmten Winkel $\alpha_{ak,1}$ relativ zur Normalen der Inhomogenität auf diese Grenzfläche, so kann es zu einer Brechung der Welle kommen. Ordnet man dem Medium 1 eine Festkörperwellengeschwindigkeit v_1 und dem Medium 2 eine entsprechende Geschwindigkeit v_2 zu, kommt es zu einer Brechung gemäß [51], wobei $\alpha_{ak,2}$ den Ausfallwinkel der akustischen Welle relativ zur Normalen der Inhomogenität darstellt. Somit kann der Zusammenhang wie folgt beschrieben werden.

$$\frac{\alpha_{ak,1}}{v_1} = \frac{\alpha_{ak,2}}{v_2} . \quad (3.24)$$

²Die Werte für die Dichte ρ_{CFK} und der Schallgeschwindigkeit für kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe sind Richtwerte, welche in der Literatur häufig Anwendung finden. Es sei an dieser Stelle explizit darauf hingewiesen, dass sich diese Werte je nach betrachtetem Laminat und Lagenaufbau deutlich unterscheiden können.

Gleichzeitig kann ein schräg einfallender akustischer Strahl eine Umwandlung der Wellenart hervorrufen. Trifft zum Beispiel ein Druckwelle unter einem bestimmten Winkel auf die Grenzschicht von Medium 1 zu Medium 2, wobei gilt $v_1 < v_2$, so kommt es neben einer Brechung auch zu einer Reflektion des Signals bei gleichzeitiger Umwandlung der Druck- hin zu einer Scherwelle. Da allerdings beide Wellenarten unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten aufweisen ($v_c \neq v_s$ wie in Gleichung 3.18 und 3.19 zu sehen) unterscheidet sich der Ausfallswinkel $\alpha_{ak,2}$ der Druckwelle vom Ausfallswinkel $\hat{\alpha}_{ak,2}$ der Scherwelle. In einigen Fällen können beide Wellenformen ähnliche Amplituden aufweisen, wobei eine Überlagerung beider Wellen zu komplexen akustischen Zuständen führt, was eine Interpretation der Ergebnisse schwierig macht.

Die Phänomene der Brechung und der Modeumwandlung werden vor allem bei der Schrägeinschallung mittels Winkelprüfköpfen genutzt. Bei Senkrechteinschallung spielen diese Prinzipien nur eine untergeordnete Rolle, wobei sie vor allem beim Vorhandensein von zur Einschallungsrichtung geneigten Grenzflächen, wie dies beispielhaft bei der Untersuchung von Gewebelaminaten der Fall ist, im erhöhten Maß Störsignale hervorrufen, welche die Interpretation der Ergebnisse erschwert.

Da in dieser Arbeit vorwiegend multidirektionale Schichtlamine untersucht werden, bei denen dieser Effekt nur am Rande eine Rolle spielt, soll hier nicht detaillierter darauf eingegangen, sondern auf einschlägige Literatur verwiesen werden (vergleiche hier [63]).

3.2.3 Visualisierung von Inhomogenitäten

Die Darstellung von gesammelten Ultraschalldaten kann auf verschiedene Weise erfolgen, wobei es zunächst keine Rolle spielt, ob es sich um Impuls-Echo-Methoden oder Durchstrahlungsverfahren handelt. Die Grunddarstellungsformen sind allen Methoden gemein. Die einfachste Weise stellt hierbei das A-Bild [51] dar, wobei dieses ein Amplituden-Zeitverlauf des empfangenen Ultraschallsignals ist.

Betrachtet man die Impuls-Echo-Technik, so erhält man für das A-Bild eines endlich dicken, flachen Probenkörpers mit teilreflektierender Inhomogenität den in Abbildung 3.3 a) dargestellten Verlauf eines punktuellen Signals. Dabei bezeichnet das erste Maximum die Reflektion des Ultraschallsignales an der Bauteiloberfläche, das zweite, mittige Maximum, die Teilreflektion der Welle an der innenliegenden Inhomogenität (z.B.: Defekt) und das letzte Maximum die Reflektion an der Bauteilrückseite.

Führt man punktuelle Messungen entlang einer definierten Linie durch und kombiniert die Einzelmessungen miteinander, so erhält man das B-Bild [51], welches ein Tiefenbild des Prüflings ist. Durch eine Graustufenkodierung der Amplitude des A-Bildes und einer Aneinanderreihung dieser Signale erhält man den in Abbildung 3.3 b) dargestellten Verlauf, welcher einen Schnitt durch einen Probenkörper endlicher Dicke darstellt. Das B-Bild weist in der Mitte eine flächige Fehlstelle auf. Diese Fehlstelle weist

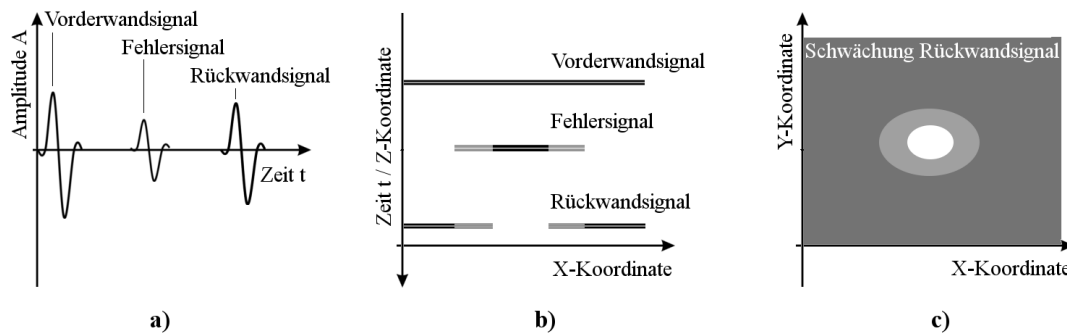


Abbildung 3.3: Prinzip der unterschiedlichen Darstellungsarten bildgebender Ultraschallsysteme: A-Bild, B-Bild und C-Bild (v.l.n.r.)

eine vollständige Reflexion des Ultraschallsignals in der Mitte auf (dunkler Bereich), während es bei den Randbereichen nur zu einer Teilreflexion kommt (graue, hellere Bereiche). Dies führt zu einem verminderten, aber noch messbaren Rückwandsignal (grauer, hellerer Bereich des Rückwandsignals).

Ergänzt wird das Tiefenbild durch ein flächig orientiertes C-Bild [41]. Dieses kann auf verschiedene Arten generiert werden. Eine häufig angewandte Vorgehensweise ist die flächige farbige Kodierung der Intensität des Rückwandsignals (Dies ist schematisch in Abbildung 3.3 rechts dargestellt). Wird dieses geschwächt, so befinden sich im inneren des Prüflings eine oder mehrere Inhomogenitäten an dieser Stelle. Eine Aussage über die Tiefenlage des Defekts kann daraus nicht erfolgen. Eine alternative Vorgehensweise ist die Darstellung der innerhalb der Bauteilgrenzen, also zwischen Eingangs- und Rückwandecke, vorliegenden Reflektoren, welche gemäß der Tiefenlage farblich codiert werden. Es entsteht dabei ebenfalls ein flächiges C-Bild des Bauteils, wobei die Tiefenlage der Defekte direkt anhand der Grauwertabstufung abgelesen werden kann.

Die plastischste Darstellung der Messergebnisse stellt die dreidimensionale Darstellung der Prüfergebnisse dar und wird in der Regel als D-Bild (bzw. engl. *D-Scan*) bezeichnet. Diese Darstellungsweise bietet sowohl flächige Fehlerinformation als auch Tiefeninformation, wird aber meist nur zu Visualisierungszwecken bzw. zum besseren Verständnis eingesetzt, da eine direkte Auswertung mit B- und C-Bildern einen geringeren Rechenaufwand bedeutet. Ein Beispiel für die dreidimensionale Darstellung ist in [22] zu sehen, wobei die Gruppenstrahlertechnik zur Erstellung der plastischen Darstellung verwendet wird.

Zusammengefasst bleibt zu konstatieren, dass die Darstellung je nach Messaufgabe und Messobjekt variieren kann. In [17] werden exemplarisch unterschiedliche Prüfaufgaben beschrieben, wobei einige zuvor theoretisch beschriebene Analyse- und Darstellungsverfahren experimentell angewendet werden.

4 Sequentielle Phasenmodulierte Thermographie (SPT)

In dieser Arbeit wird ein zweistufiges System vorgestellt, welches im Gegensatz zur konventionellen optisch angeregten Lock-In Thermographie (siehe [21] oder [65]) keine Synchronisation der Anregungsquelle und des Sensors erfordert. Auf diese Weise werden die Datenerfassung und die Datenauswertung (Berechnung von Amplituden- und Phasenbildern) voneinander getrennt, was den Wegfall des für konventionelle Systeme erforderlichen Synchronisationsmoduls bedeutet. Dieses Sequentielle Phasenmodulierte Thermographiesystem (SPT) besteht darüber hinaus kostengünstige Standardkomponenten, was, wie in den späteren Kapiteln gezeigt, zu einer erheblichen Kostenersparnis führt. Zusammen mit der in Kapitel 8 vorgestellten Methode zur Schadensbewertung wird ein leistungsfähiges, intuitiv bedienbares, zerstörungsfreies Prüfsystem geschaffen, das eine erste Bewertung des Einflusses der aufgefundenen Schäden auf relevante mechanische Parameter bzw. Kennwerte zulässt. Mit anderen Worten ausgedrückt, kann eine Antwort auf die Frage nach dem betriebssicheren Einsatz einer geschädigten Komponente gegeben werden.

4.1 Hauptkomponenten der Prüfmethode

Im Zuge dieser Arbeit wird darauf Wert gelegt, möglichst kostengünstige Standardkomponenten sowie einfache und effiziente Algorithmen zu verwenden, um damit den Aufbau eines günstigen und gleichermaßen effektiven ZfP-Systems zu realisieren. Sieht man von den eingesetzten Softwaremodulen ab, sind die zwei Hauptbestandteile des Versuchsaufbaus das Anregungsmodul und die Messeinheit, welche in den folgenden Unterkapiteln genauer beschrieben werden.

4.1.1 Modulares Anregungsmodul

Die Anregungsquelle bzw. das Anregungsmodul besteht im Wesentlichen aus zwei Hauptkomponenten, nämlich dem Lichtquellenarray und der Regeleinheit. Beide Komponenten sind mit Hilfe einer dreh- und schwenkbaren Haltevorrichtung auf einer mobilen Einheit montiert.

4.1.1.1 Anregungsquelle

Als Anregungsquelle dient ein Array aus Halogen-Bühnenstrahlern, welches in Abbildung 4.1 zusammen mit der Modulationseinheit und dem verwendeten IR Sensor zu sehen ist.

Dieses ist modular aufgebaut, wobei je nach Prüfungsgröße und -geometrie einzelne oder mehrere Strahler in beliebiger Kombination verwendet werden können.

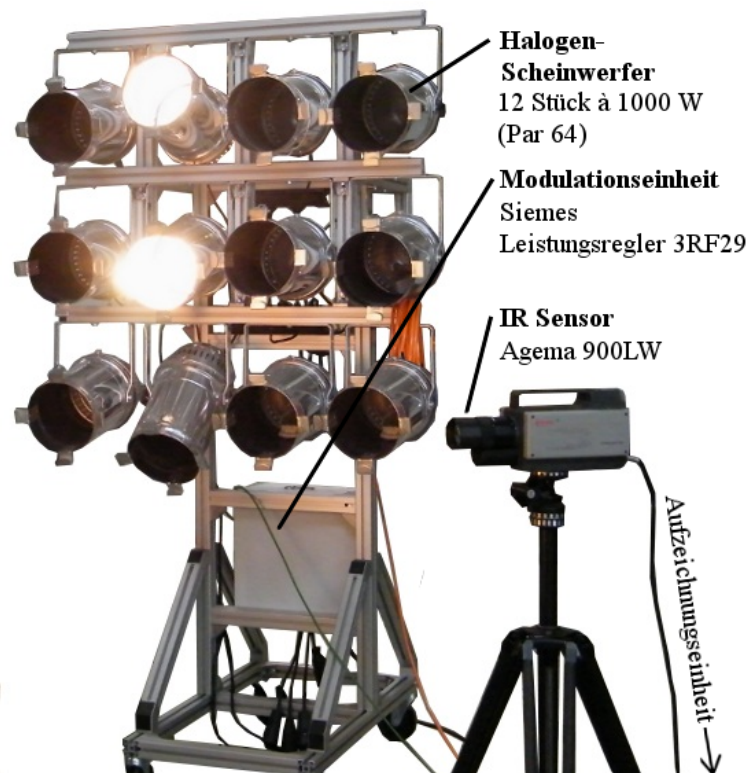


Abbildung 4.1: Modulare Anregungsquelle zur Aufbringung zeitlich leistungsvariiert thermischer Signale und IR Sensor

Die Einzellichtquellen können dabei alle parallel ausgerichtet sein, oder die Ausrichtung erfolgt individuell, was speziell bei mehrfach gekrümmten Geometrien manchmal von Vorteil ist, um eine homogene Probenausleuchtung zu gewährleisten. Im Falle von Abbildung 4.1 befinden sich zwei Lichtquellen im Einsatz, die individuell auf das Prüfobjekt ausgerichtet worden sind.

Das primäre Einsatzgebiet der verwendeten Halogenstrahler vom Typ PAR 64 ist die Bühnentechnik, was einen günstigen Anschaffungspreis mit sich bringt aber auch unter Umständen Einbußen in der Abstrahlungsgüte bedeutet. Um eben diese Abstrahlungscharakteristik zu spezifizieren, werden in Kapitel 4.2 Messungen an einer CFK-Probenplatte durchgeführt.

4.1.1.2 Steuereinheit

Die Steuereinheit besteht im Wesentlichen aus zwei handelsüblichen Leistungsstellmodulen des Typs 3RF29 der Firma Siemens, die mittels Phasenanschnittsteuerung die Leistung einer Wechselspannung variieren können. Dies erfolgt wie in Abbildung 4.2 dargestellt mittel symmetrischer Phasenanschnittsteuerung. Die gestrichelte Linie beschreibt die Netzwechselspannung, während die durchgezogene Linie die abgegebene Wechselspannung darstellt. Es ist zu erkennen, dass ein Teil der Eingangswelle abgeschnitten wird.

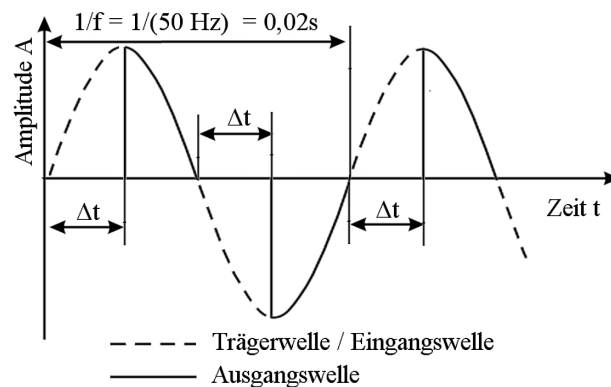


Abbildung 4.2: Prinzip Phasenanschnittsteuerung

Durch eine zeitliche Variation der Größe Δt , welche die Sperrdauer bedeutet, kann eine beliebige Modulation der Ausgangsleistung $P_{mod}(t)$ hervorgerufen werden. Gleichung 4.2 veranschaulicht den Sachverhalt für eine sinusförmige Leistungsvariation. Diese Modulation erfolgt dabei im Vergleich zur Netzspannung niederfrequent. Für die zerstörungsfreie thermische Prüfung charakteristische Frequenzen sind in der Regel kleiner als 1 Hz . Zusammen mit der thermischen Trägheit der gewählten Halogenstrahler kann somit sichergestellt werden, dass die gewählte Vorgehensweise der Phasenanschnittsteuerung zur Leistungsmodulation keine Signalartefakte in der von den Strahlungsquellen abgegebenen thermischen Leistung verursacht. Die Variation der Sperrdauer an sich wird durch einen analogen Signaleingang mittels handelsüblichen Signalgebers sichergestellt.

Die Notwendigkeit für zwei Leistungsregleinheiten bedingt die gewählte Maximalanzahl an Anregungsquellen (kumulierte Gesamtspitzenleistung: $3 \cdot 4 \cdot 1000 \text{ W} = 12000 \text{ W} = 12 \text{ kW}$), da die gewählten Leistungsstellmodule nur eine maximale Ausgangsleistung von etwa 8 kW unterstützen.

4.1.2 Infrarotsensor

Für die Messung der resultierenden Oberflächentemperatur kommt eine Vielzahl unterschiedlicher Infrarotdetektoren in Frage. Sowohl gekühlte als auch ungekühlte Senso-

ren erfüllen die in dieser Arbeit gestellten Anforderungen zur Bewertung von Faserverbundstrukturen. Im Gegensatz zu metallischen Strukturen erfolgt der thermische Ausgleich deutlich langsamer, was die Messung mit kostengünstigen Bolometer gekühlten Detektoren erlaubt. Dieser Detektortyp weist eine deutlich höhere Trägheit als stickstoffgekühlte Sensoren auf. Dadurch ist die Zeitspanne zur Detektion eines Infrarotbildes deutlich größer. Diese Zeitspanne wird häufig auch als thermische Integrationszeit bezeichnet.

Durch das in Kapitel 7.3 vorgestellte Vorgehen zur Kombination von Einzelmessungen ist die geometrische Auflösung des IR Sensors zweitrangig. Was die thermische Auflösung betrifft, so ist ein Auflösungsvermögen von $0,08\text{ K}$ bis $0,10\text{ K}$ ausreichend, wie Testmessungen an CFK Prüflingen ergeben haben (vergleiche dazu Kapitel 4.2).

Die in dieser Arbeit gezeigten Ergebnisse wurden mit einem stickstoffgekühlten IR-Detektor der Firma Agema vom Typ 900LW erstellt (siehe Abbildung 4.2). Die Eckdaten des verwendeten Sensors sind:

- Detektor: Quecksilber-Cadmium-Tellurid Sensor (MCT¹-Sensor)
- maximale Aufnahmefrequenz: 15 Hz (bei einer Verringerung der geometrischen Auflösung - Halbbild - bis 30 Hz möglich)
- nominelle Temporaufauflösung: $0,08\text{ K}$
- nominelle geometrische Auflösung: $136 \times 272\text{ Pixel}$
- spektrale Empfindlichkeit: $8 - 12\mu\text{m}$

Moderne, kostengünstige Bolometer gekühlte Kameras weisen im Allgemeinen ähnliche bzw. in Hinblick auf die geometrische und thermische Auflösung, in vielen Fällen bessere Werte als der verwendete Sensor auf. Aus diesem Grund sind die dargestellten Ergebnisse direkt auf Bolometer gekühlte Systeme übertragbar. Mit anderen Worten können diese Systeme ohne Einschränkungen in das vorgestellte zerstörungsfreie Prüfsystem als solches integriert werden.

4.2 Messprinzip und Messaufbau

Abbildung 4.3 zeigt das Prinzip dieser zweistufigen Vorgehensweise, wobei links die Datenaufzeichnung und die Datenreduktion beschrieben wird, während auf der rechten Seite die Erstellung der Amplituden- und Phasenbilder abgebildet ist.

Die Messung der Temperaturverteilung auf der Oberfläche erfolgt mit einem gekühlten Infrarotsensor, welcher in Abbildung 4.3 mit *IR Detektor* bezeichnet wird. Die Temperaturunterschiede am Prüfobjekt (*Prüfling mit Fehlstelle*) werden dabei mittels mo-

¹Die Abkürzung MCT stammt von der englischen Bezeichnung: Mercury Cadmium Telluride

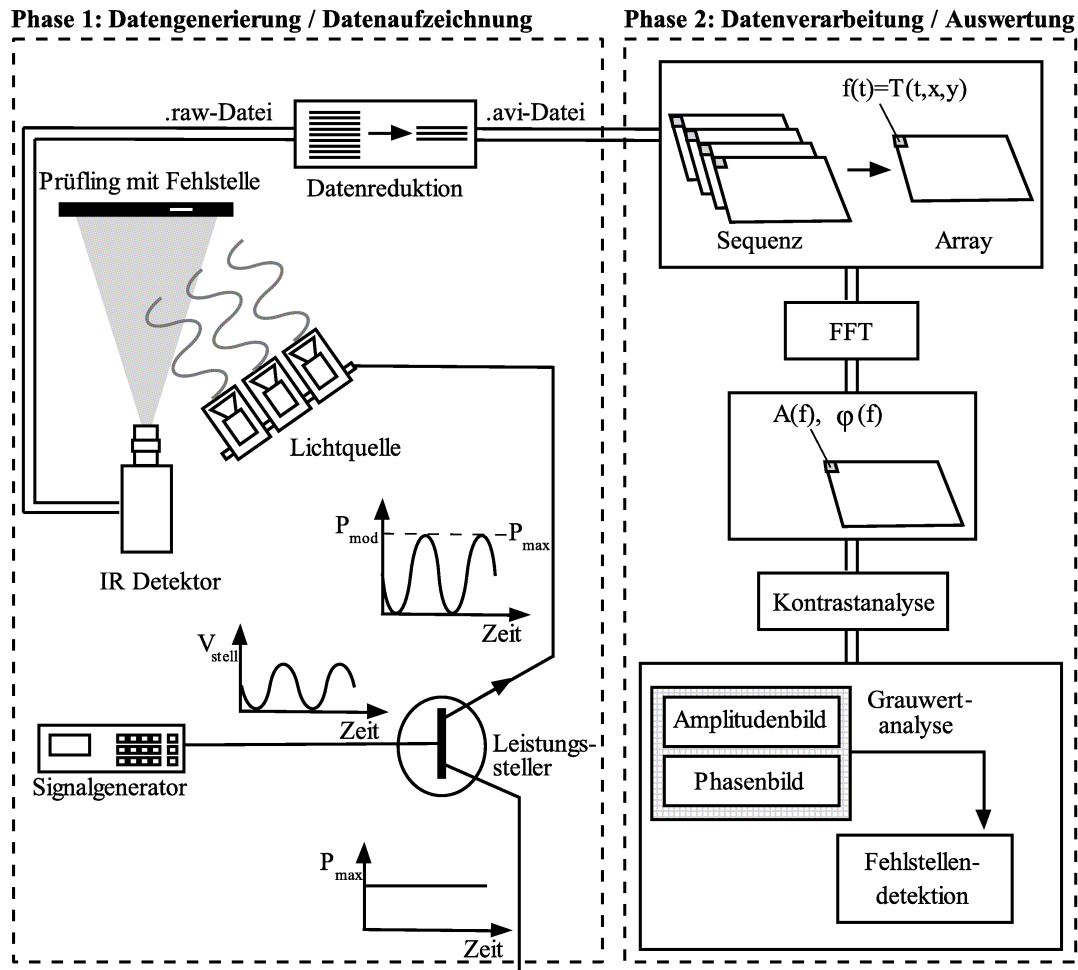


Abbildung 4.3: Prinzipskizze Sequentielle Phasenmodulierte Thermographie (SPT) in Anlehnung an [48]

dulierter thermischer Wellen hervorgerufen. Das Array aus Halogenstrahlern (*Lichtquelle*) wird, wie zuvor beschrieben, über zwei *Leistungssteller* angesteuert, welche die zugeführte Leistung gemäß der Hüllkurve P_{mod}

$$P_{mod}(t) = \frac{P_{max}}{2} \cdot \sin \left(\omega_{Lock-In} \cdot t + \frac{3}{2} \cdot \pi \right) \quad (4.1)$$

variieren. P_{max} bezeichnet die Spitzenleistung und $\omega_{Lock-In}$ ist der Anregungsfrequenz gleich zu setzen.

Die Variation dieser Einhüllenden erfolgt wie zuvor beschrieben mittels eines analogen Gleichspannungssignals am *Leistungssteller*.

Dieses Steuersignal wird mit Hilfe eines Signalgenerators erzeugt. Zur Erzeugung der in Gleichung 4.2 gezeigten Hüllkurve wird das entsprechende Gleichspannungsäquivalent $V_{stell}(t) = \hat{V} \cdot \sin \left(\omega_{Lock-In} \cdot t + \frac{3}{2} \cdot \pi \right)$ als Steuersignal gewählt. Die Leistungsvariation an der Strahlungsquelle führt ihrerseits zu einer Änderung in der abgegebenen Leistung $P_{mod,Str}(t)$ der Wärmequellen welche als

$$P_{mod,Str}(t) = \frac{\hat{P}}{2} \cdot \sin \left(\omega_{Lock-In} \cdot t + \frac{3}{2} \cdot \pi \right) \quad (4.2)$$

geschrieben werden kann. Wendet man dieses Vorgehen an einem Fallbeispiel (homogener plattenförmiger Prüfkörper aus kohlefaserverstärktem Kunststoff mit $0^\circ / 90^\circ$ Lagenausrichtung bei einer Schichtdicke von $0,27 \text{ mm}$ und einer Gesamtdicke von ca. 4 mm) an, so führt diese Leistungsvariation an der Oberfläche zu einer sinusförmigen zeitabhängigen Wärmeverteilung, die in Abbildung 4.4 links abgebildet ist. Dabei handelt es sich um die Auswertung des zeitlichen Temperaturverlaufes eines Punktes an der Prüflingsvorderseite. Abbildung 4.4 links zeigt dabei einen Ausschnitt des für die Transformation in den Frequenzbereich verwendeten Signals (Messdauer: 125 Sekunden bzw. 2,5 Wellenlängen), welche auf der rechten Seite zu sehen ist. Für die Transformation wurden sieben Perioden verwendet, da die Anregungsfrequenz $0,02 \text{ Hz}$ betrug (vergleiche dazu Gleichung 4.3).

Zusätzlich zu den gemessenen Werten ist in Abbildung 4.4 links eine berechnete Sinusfunktion mit gleicher Frequenz, einem konstanten Verschiebungsanteil und angepasster Amplitude (Minimierung des Quadrats der Abstände zwischen Simulationswerten und gemessenen Werten) eingetragen. Der gemessene Unterschied zwischen Messergebnissen und simuliertem Signal ist als „Abweichung von Referenz“ bezeichnet und beträgt im Durchschnitt $4,65 \%$ der gemessenen Amplitude. Die lokalen Differenzen sind maximal 10% .

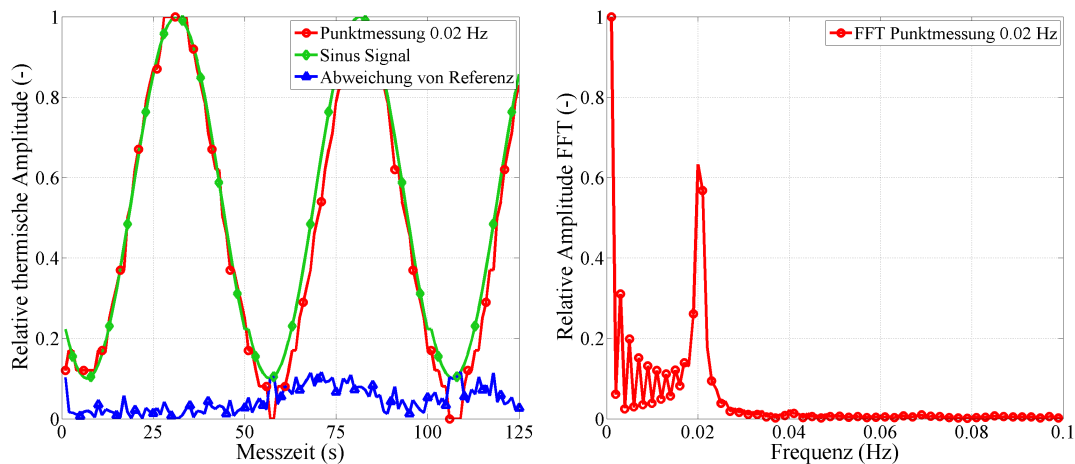


Abbildung 4.4: Punktuelle Messung des zeitabhängigen Temperaturverlaufs an CFK-Testplatte (links) und Frequenzspektrum der Punktmessung (rechts) [76]

Betrachtet man das resultierende Spektrum des gemessenen Signals, so erkennt man einerseits große Amplituden im Frequenzbereich um 0 Hz , andererseits eine Häufung bei $0,02 \text{ Hz}$, was der Anregungsfrequenz entspricht. Die Häufung im niederfrequenten Bereich ist der Tatsache zuzuschreiben, dass in dem zu messenden Signal ein konstanter Anteil enthalten ist. Dieser Anteil könnte durch eine Signalverschiebung reduziert werden, ist aber in diesem Bereich für die Auswertung nicht relevant.

Durch das Aneinanderreihen von Messungen endlicher Messdauer zur Generierung eines für die nachfolgende Transformation erforderlichen periodischen Signals kann es zu weiteren Störungen im Spektrum kommen, falls der Anfangszeitpunkt der Messung nicht mit einem Minimum der Funktion zusammenfällt.

Diese Anteile können zwar durch die Multiplikation des Messsignals mit geeigneten Fensterfunktionen, wie beispielsweise Hanning, Blackman oder Blackman-Harris (für einen Vergleich verschiedener Filter bzw. den Effekt auf das Messsignal siehe beispielsweise [46]), reduziert werden, führen allerdings in der Regel auch zu einer Reduzierung der Amplitude des zu messenden Signals, was sich in weiterer Folge im Spektrum durch eine kleinere Amplitude bemerkbar macht. Da für die weiterführende Betrachtung bzw. für die Auswertung des Signals lediglich ein enger Bereich im Spektrum um die Lock-In Frequenz verwendet wird, kann auf den Einsatz einer Fensterfunktion zu Gunsten des Nutzsignals verzichtet werden.

An dieser Stelle sei auf die Abhängigkeit der Temperaturspreizung von der gewählten Lock-In Frequenz hingewiesen. Ein Anstieg der Lock-In Frequenz bewirkt einen Rückgang der auf der Oberfläche messbaren Temperaturdifferenz (Maximal- und Minimalleistung der Anregung). Typische Anregungsfrequenzen befinden sich zwischen $0,005 \text{ Hz}$ und $0,5 \text{ Hz}$. Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass auch bei $0,5 \text{ Hz}$ noch ein ausreichender Temperaturunterschied vorhanden ist, und in weiterer Folge diese Frequenz im entsprechenden Spektrum eindeutig erkennbar bleibt.

Die Thermographiemessung erfolgt über variable Zeiträume, welche von der jeweiligen Anregungsfrequenz abhängen. Bei hohen Frequenzen werden zehn Perioden betrachtet, während bei niedrigeren Frequenzen diese Zahl zu Gunsten der Messzeit zurückgeht. Die Reduktion des betrachteten Zeitintervalls führt zu einem Anstieg der niederfrequenten Frequenzanteile im Spektrum, da die Länge des Nutzsignals bei gleicher Abtastung¹ abnimmt. Aufgrund der höheren Signalgüte (größere Temperaturdifferenz und besseres Signal-/Rauschverhältnis) hält sich aber der Einfluss in Grenzen. Für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wird folgende Wahl für die Anzahl der betrachteten Perioden n_{betr} getroffen.

$$n_{betr} = \begin{cases} 5, & \text{wenn } 0,005 \text{ Hz} \leq f_{Lock-In} < 0,075 \text{ Hz} \\ 7, & \text{wenn } 0,075 \text{ Hz} \leq f_{Lock-In} < 0,100 \text{ Hz} \\ 10, & \text{wenn } 0,100 \text{ Hz} \leq f_{Lock-In} < 0,150 \text{ Hz} \\ 20, & \text{wenn } 0,150 \text{ Hz} \leq f_{Lock-In} \leq 0,500 \text{ Hz} \end{cases} \quad (4.3)$$

Da die Lock-In-Frequenz der größten zu messenden Frequenz entspricht, wird auch die Abtastrate in Abhängigkeit der Frequenz variiert. Das Nyquist-Shannonsche Abtasttheorem (erstmalig 1949 formuliert von Claude Elwood Shannon [86]) besagt, dass ein kontinuierliches Signal, welches sich in einem Bereich von $f_{min} = 0 \text{ Hz}$ bis

¹Anzahl der Messpunkte pro Betrachtungsperiode

f_{max} befindet, mit mindestens der doppelten maximal im Signal enthaltenen Frequenz ($f_{abtast} \geq f_{max}$) abgetastet werden muss, um das Ursprungssignal nach der Abtastung wieder rekonstruieren zu können. Ist die Abtastung geringer, so gehen ursprünglich im Signal enthaltene Frequenzen verloren.

Aus diesem Grund muss mindestens die doppelte Anregungsfrequenz als Abtastfrequenz f_{abtast} gewählt werden ($f_{abtast} > 2 \cdot f_{Lock-In}$). Für die Durchführung der Messung wird als Abtastfrequenz in der Regel die zehnfache Anregungsfrequenz gewählt, um auch bei stark verrauschten Signalen bzw. bei kleinen Signal zu Rausch Verhältnissen ausreichend Messpunkte zur Verfügung zu haben.

Als Beispiel soll eine Messung bei einer Lock-In-Frequenz von $f_{Lock-In} = 0,10 \text{ Hz}$ zur Ermittlung der Anzahl der gemessenen Bilder bzw. Einzelmessungen dienen. Man erhält bei einer Beobachtungszeit von $t_b = n_{betr} \cdot \frac{1}{f_{Lock-In}} = 200 \text{ s}$ und einer Abtastfrequenz f_{abtast} von $f_{abtast} = 10 \cdot f_{Lock-In} = 1,0 \text{ Hz}$ 200 Einzelmessungen mit jeweils $x_{dim} \cdot y_{dim}$ Bildpunkten (geometrische Kameraauflösung).

Eine Möglichkeit, das Rauschen der Temperaturwerte schon vor der nachfolgenden Datenaufbereitung zu reduzieren, stellt die Mittelung der Temperaturwerte der einzelnen Bildpunkte während der Messung dar. Mit anderen Worten können die Messwerte, die zwischen den einzelnen Abtastpunkten liegen, in die Messung miteinbezogen werden. Der dadurch generierte Fehler ist aufgrund der Tatsache zu vernachlässigen, dass die relevanten zu messenden Frequenzen um mindestens eine Größenordnung niedriger liegen. So wird zwar im höherfrequenten Bereich die Genauigkeit reduziert, um den Bereich der Lock-In-Frequenz allerdings gleichzeitig erhöht. Da die maximale Bildfrequenz des für die Messungen eingesetzten Infrarotsensors 15 Hz beträgt, wird für die Messung bei einer exemplarischen Anregungsfrequenz von $0,10 \text{ Hz}$ eine Mittelung von 15 Bildern und eine integrale Aufzeichnung des Mittelwertes der einzelnen Bildpunkte vorgenommen, was wiederum einer Abtastfrequenz von 1 Hz , wie oben hergeleitet, entspricht.

Die Aufzeichnung der Rohdaten erfolgt im Rohdatenformat *.raw*, wobei die Temperaturwerte mit einer Auflösung von $0,08 \text{ K}$, wie zuvor beschrieben, Bild für Bild in Abhängigkeit der Zeit aufgelöst werden. Um das Datenvolumen zu reduzieren und zwischen zu speichern, erfolgt eine Umwandlung in das komprimierte schwarz-weiß avi-Format. Die Skalierung der aufzuzeichnenden Rohdaten kann hierbei auf bestimmte relevante Bildbereiche eingestellt oder automatisch auf alle Bildpixel angepasst werden.

Die so erstellten thermischen Bildreihen bilden die Grundlage für die nachfolgende Auswertung der Daten und für die Erstellung der Amplituden und Phasenbilder, wie sie in Kapitel 4.3 beschrieben wird, sowie für die darauf folgende Bildbearbeitung, Fehleridentifikation und Fehlerklassifizierung sowie abschließenden Bewertung, worauf in Kapitel 7 und Kapitel 8 genauer eingegangen wird.

4.3 Auswertungsmethodik

Ziel der Datenauswertung ist die Erstellung von Amplituden und Phasenbildern im Bereich der gewählten Anregungsfrequenz. Dabei unterscheiden sich diese beiden Darstellungen in gewisser Weise geringfügig von denen konventioneller Lock-In-Systeme. Während diese in der Lage sind, durch die Synchronisierung absolute Werte für die Phasenverschiebung zu liefern, ist durch den Wegfall der Synchronisierung eine exakte Bestimmung nicht mehr möglich. Für die meisten Anwendungen ist dies jedoch nicht von Relevanz, da entweder nur relative Aussagen gemacht werden müssen bzw. Referenzbereiche mit bekannten Eigenschaften vorhanden sind.

Kalibrations- bzw. Referenzobjekte oder -bereiche können zur Kalibrierung dieser relativen Werte verwendet werden, wobei dadurch wiederum auch mit diesem System absolute Aussagen gemacht werden können.

Wie in der Systemübersicht in Abbildung 4.3 rechts zu sehen, ist der erste Schritt der Datenverarbeitung die Umsortierung dieser bildbezogenen, komprimierten Werte hin zu pixelbezogenen zeitabhängigen nicht komprimierten Vektoren, und der nachfolgende Aufbau einer dreidimensionalen Matrix, welche die Dimensionen $x_{dim} \cdot y_{dim} \cdot n_{abtast}$ aufweist.

Im nächsten Schritt können die zeitabhängigen Funktionen $f_{Pixel}(t) = f(t, x, y)$ in den Frequenzbereich überführt werden. Zu diesem Zweck wird die Fouriertransformation bzw. deren numerisch stabile Approximation, die FFT, angewendet. Das erstellte Spektrum enthält nun die Amplituden- und Phasenwerte der einzelnen im Signal enthaltenen Frequenzen, wobei sich die Schrittweite bzw. die kleinste darstellbare Frequenz f_{min} zu $f_{min} = \frac{1}{T_A}$ ergibt. Zur Berechnung der Phasen und Amplitudenbilder sind nun nur Frequenzen von Interesse, welche sich in unmittelbarer Umgebung der Anregungsfrequenz befinden. Um eventuelle Unsicherheiten bzw. Ungenauigkeiten in der Signalerstellung bzw. Diskretisierung auszugleichen, werden die zwei jeweils in Bezug zur Anregungsfrequenz benachbarten Werte für die Berechnung miteinbezogen, indem ein Mittelwert über die Bereiche gebildet wird.

Diese Phasen- und Amplitudenwerte werden als Grundlage für die Erstellung der Auswertungsbilder verwendet. Durch die Transformation in den Frequenzbereich und die Auswertung in einem begrenzten Intervall um die Anregungsfrequenz wird die dritte Dimension der Ursprungsmatrix von n_{abtast} Abtastpunkten auf zwei (Phasen- und Amplitudenwert) reduziert.

Die Anpassung des Grauwertintervalls der Phasen- und Amplitudenbilder erfolgt entweder global in Bezug auf das Gesamtbild, oder relativ, wobei einzelne Teilbereiche ausgewählt werden können. Dies ist vor allem dann sinnvoll, wenn der zu untersuchende Prüfling nicht den gesamten Bildausschnitt der Messung ausfüllt, und somit Hintergrundeffekte die Messung dominieren.

Abbildung 4.5 zeigt beispielhaft diese Problematik. Links ist das Phasenbild einer Untersuchung nach einem Impact Ereignis am Unterrohr eines Hochleistungsfahrradrah-

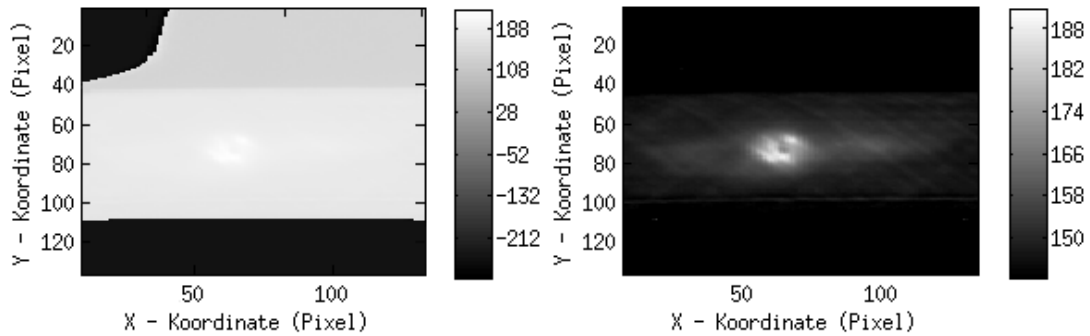


Abbildung 4.5: Phasenbild einer Untersuchung nach einer $10 J$ Schlagbeanspruchung an einem CFK Rohr ($[+45, -45, 0]_s$, $\varnothing 50 \text{ mm}$ und einer Dicke von $1,6 \text{ mm}$) mit globaler Skalierung (links) bzw. mit selektiver Werteskalierung (rechts)

mens aus CFK zu sehen, wobei alle vorkommenden Grauwerte des Phasenbildes dargestellt sind. Auf der rechten Seite wurden nur Grauwerte im relevanten Bildausschnitt betrachtet und die Spreizung der Grauwertskala dementsprechend angepasst. Somit ist die Schädigung hier erkennbar.

Des Weiteren werden auch die Schichtausrichtungen des multiaxialen Schichtlaminates mit einem Lagenaufbau von $[+45, -45, 0]_s$ schematisch sichtbar, was der höheren Wärmeleitfähigkeit der Kohlenstofffaser gegenüber der Epoxidmatrix und der damit verbundenen unterschiedlichen Phasenverschiebung zuzuschreiben ist.

Nach der Erstellung der Phasen- und Amplitudenbilder kann mittels Analyse der Grauwertverteilung und weiterführender, in Kapitel 7 vorgestellter Maßnahmen die Schädigungen identifiziert und vom umliegenden, intakten Bereich getrennt werden. Die Auswirkungen dieser Schädigungen, was das übergeordnete Ziel jeder ZfP-Untersuchung darstellt, werden in Kapitel 8 beschrieben.

5 Simulationsmodell zur Bewertung experimenteller Ergebnisse der SPT Methode

Die in Kapitel 4 vorgestellte Sequentielle Phasenmodulierte Thermographie (SPT) weicht von konventionell verfügbaren Lock-In Methoden in mehreren Kernpunkten ab. Sowohl das Funktionsprinzip, als auch die verwendeten Komponenten und somit der Prüfaufbau, sind unterschiedlich. Aus diesem Grund wird diese Methode mit Hilfe einer vergleichenden Simulationsrechnung im Folgenden validiert.

Um diese Validierung durchzuführen, ist es zunächst notwendig, die wichtigsten Grundlagen bzw. Methoden zur Modellierung und Simulation des thermischen Verhaltens von Faserverbundwerkstoffen zu besprechen, wozu Kapitel 5.1 dient. Danach wird die gewählte Vorgehensweise für die Modellierung des transienten thermischen Problems zur Simulation phasensensibler Thermographiemethoden mit Hilfe modulierter Wellen hergeleitet und begründet.

Als Vergleichsobjekt dient eine Referenzplatte mit künstlich eingebrachten Fehlstellen, deren thermisches Verhalten zunächst simuliert und anschließend mit experimentellen Ergebnissen der SPT Methode verglichen wird, um diese Methode zu validieren. Die entsprechende Vorgehensweise wird in Kapitel 5.2 verdeutlicht.

5.1 Grundlagen für die numerische Betrachtung thermischer Prüfsysteme

Dieses Kapitel bildet die Grundlage für eine thermisch transiente Simulation, die als Vergleich zu den experimentell ermittelten Ergebnissen der Sequentiellen Phasenmodulierten Thermographiesystem (SPT) dient.

5.1.1 Finite Elemente Methode (FEM)

Die Analyse bzw. die Auslegung einfacher Strukturen, wie Platten oder Tragwerke, kann in vielen Fällen analytisch erfolgen. Sind die äußeren Lasten sowie die entsprechenden Randbedingungen bekannt, können Differential- oder Integralgleichun-

gen aufgestellt werden, welche das System vollständig beschreiben. Dieses Vorgehen führt in weiterer Folge zu einer analytisch eindeutigen Gesamtlösung.

Bei der Vielzahl der realen Aufgabenstellungen (z.B.: Flugzeugrumpfstruktur oder Fahrzeugkarosserie) kann aufgrund deren großer Komplexität diese Vorgehensweise nicht mehr verwendet werden. Die in der Regel mehrdimensionalen Randwert- bzw. Anfangswertaufgaben können nur numerisch gelöst werden, wobei drei unterschiedliche finite Berechnungsmethoden [15] Anwendung finden:

- Finite Element Methode (FEM)
- Finite Differenzen Methode (FDM)
- Boundary Element Methode (BEM)

Bei der FEM wird die zu untersuchende Struktur in Punkte zerlegt, welche über finite Einzelemente miteinander gekoppelt werden. Diese finiten Elemente besitzen eine physikalische Formulierung und verknüpfen das Verhalten der Knotenpunkte miteinander. Neben den mechanischen und thermischen Elementformulierungen gibt es noch weitere Elementtypen, welche für diverse andere Problemstellungen, wie elektrische Leitfähigkeit, etc. verwendet werden können. Da diese Elementtypen in dieser Arbeit keine Anwendung finden, wird für eine detaillierte Beschreibung der entsprechenden Elementansätze beispielsweise auf [11] verwiesen.

Je nach Problemstellung kommen 1-D Elemente, wie Stäbe oder Balken, 2-D Elemente, wie Scheiben oder Platten und 3-D Elemente wie Schalen oder Volumenelemente zum Einsatz. Diese Elemente können je nach Anforderung miteinander kombiniert werden.

Somit müssen zur Lösung des Gesamtproblems diese Elementgleichungen gelöst und entsprechende Rand- und Anfangsbedingungen berücksichtigt werden. In Anlehnung an [15] gibt es zwei Methoden beim Lösungsprozess des Gleichungssystems, nämlich die *Verschiebungsmethode*, bei der die Knotenverschiebungen als Unbekannte eingeführt werden, bzw. die *Kraftgrößenmethode*, bei der die Kräfte als Unbekannte dienen.

Die allgemeine Vorgehensweise beider Methoden soll im Folgenden anhand einer mechanischen Problemstellung erläutert werden. Für jedes Element kann unter Berücksichtigung der Materialgesetze, im einfachsten Fall das linear elastische Hookesche Gesetz, die Elementsteifigkeitsmatrix K_i aufgestellt werden. Die Summe aller Einzelmatrizen ergibt die Gesamtsteifigkeitsmatrix K_{ges} . Somit ist das Kraft-Verschiebungsgesetz der Struktur bekannt und kann geschrieben werden als

$$[K_{ges}] \{U\} = \{F\} , \quad (5.1)$$

wobei $\{U\}$ den Vektor der diskreten Verschiebungen der Knotenpunkte und $\{F\}$ die wirkenden äußeren Knotenkräfte darstellt. Da allerdings in den meisten praktischen Fällen die äußeren Kräfte bekannt und die Verschiebungen unbekannt sind, muss die

Gleichung 5.1 entsprechend umgestellt werden. Nach der numerischen Lösung des Gleichungssystems für die Gesamtstruktur, können die auftretenden globalen und lokalen Dehnungen bzw. die Spannungen mittels einer Rückrechnung mit Hilfe der einzelnen finiten Elemente berechnet und ausgewertet werden.

Die Lösung von thermischen Problemstellungen erfolgt in analoger Weise, wobei neben den äußeren Kräften auch Temperaturlasten bzw. Wärmeflüsse als Einflussfaktoren auf die Struktur aufgebracht werden können. Die entsprechenden finiten Elemente verfügen über zusätzliche thermische Freiheitsgrade an den Knotenpunkten und über zusätzlich Ansätze, welche die Temperaturen an den Knotenpunkten miteinander verknüpfen und somit die Wärmeflussprozesse abbilden können.

Die Methode der Finiten Differenzen (FDM) ist in Analogie zur FEM ein Gebietsverfahren, wobei die finiten Gleichungen für einen Zentralpunkt aufgestellt werden. Unter Zuhilfenahme der virtuellen Arbeit bzw. der virtuellen Verrückungen führt diese Methode zur Lösung des Problems.

Die Methode der Randelemente (BEM) stellt eine Integralgleichungsmethode dar, welche die Lösung der Differentialgleichung mit Hilfe der Greenschen Funktion und der Belastungsfunktion auf eine Integralgleichung zurückführt.

Da die beiden letztgenannten Methoden in der Arbeit keine Rolle spielen, wird an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen, sondern auf weiterführende Literatur verwiesen (vgl. [15]).

5.1.2 Modellierung thermischer Wellen

Bei der rein thermischen Modellierung sind in der Regel die Temperaturlasten bekannt und die Bauteiltemperaturen an den Knotenpunkten stellen die Unbekannten dar. Im vorliegenden Fall der Lock-In Thermographie handelt es sich um ein transientes Problem mit veränderlichen Randbedingungen. Betrachtet man den realen Vorgang der Aufbringung thermischer Wellen mittels optischer Anregung oder mit anderen Worten mit Hilfe von Wärmestrahlung (vergleiche dazu Kapitel 4.2), so kann dieser Vorgang in drei Einzelschritte zerlegt werden:

- Erzeugung der thermischen Welle mit Hilfe einer oder mehrerer punktueller Wärmequellen
- Modellierung der Wärmestrahlung zwischen Wärmequelle und Prüfling zur Generierung des auf die Probenoberfläche aufgetragenen Temperatursignals
- Modellierung der zeitabhängigen Wärmeleitung im Probenkörper (theoretische Grundlagen dazu siehe Kapitel 3.1)

Darüber hinaus muss während des gesamten Prüfvorgangs die Wärmeabgabe des Prüflings über natürliche Konvektion berücksichtigt werden. Die gleichzeitige Betrachtung der Wärmestrahlung, Wärmeleitung und der Konvektion führt zu einem komplexen

thermischen Problem. In Hinblick auf eine zeitlich effiziente Simulation muss diese physikalisch begründete Vorgehensweise vereinfacht werden, ohne die erhaltenen Ergebnisse, und speziell die veränderliche Bauteiloberflächentemperatur, dadurch in zu großem Maße zu beeinflussen.

Als erster Schritt wird daher untersucht, ob der Prozess der punktuellen Generierung der Wärmestrahlung, des nachfolgenden Durchgangs durch Atmosphäre und der abschließenden Absorption vereinfacht simuliert werden kann. Zu diesem Zweck wird ein semi-empirischer Ansatz verfolgt. Falls die im Experiment auf der Oberfläche messbare punktuelle zeitabhängige Temperatur durch eine Sinusfunktion angenähert werden kann, ist es in weiterer Folge zulässig, dem Simulationsmodell direkt dies als Anregung aufzuprägen, wobei die Parameter der periodischen Sinusfunktion, und hier im speziellen der effektiven Amplitude, entsprechend im Modell gesetzt werden müssen. Wie in Abbildung 4.4 links an einem fehlerfreien Prüfling aus Faserverbundwerkstoff exemplarisch veranschaulicht, ist die Abweichung der punktuell gemessenen zeitlich veränderlichen Temperaturverteilung bei einer Lock-In Frequenz von $0,02 \text{ Hz}$ zu einer Sinuswelle mit entsprechend angepasster Amplitude minimal.

Auch der Frequenzfehler zwischen dem gemessenen Signal in Bezug auf das durch Strahlungsquellen generierte Signal mit entsprechender Lock-In Frequenz kann dabei vernachlässigt werden. Die Probenkörperdicke wird so gewählt, dass die exponentiell gedämpfte thermische Welle (vergleiche Gleichung 3.8) bei allen maßgeblichen Anregungsfrequenzen die thermische Eindringtiefe μ der Welle übersteigt, womit eine Reflektion der Welle an der Probenrückwand und eine Überlagerung der reflektierten Welle mit der einfallenden thermischen Welle vernachlässigt werden kann. Auch werden die flächigen Abmessungen in Bezug zur Probenkörperdicke so gewählt, dass Randeffekte vernachlässigt werden können.

Somit kann näherungsweise durch eine frequenzspezifische Anpassung der effektiven Amplitude die thermische Welle mittels zeitlich veränderlicher thermischer Randbedingungen der Knoten, welche die Bauteiloberfläche im Modell symbolisieren, aufgebracht werden.

Im zweiten Schritt soll der Einfluss der Konvektion auf die Simulationsergebnisse evaluiert werden. Der Wärmeübertrag infolge natürlicher Konvektion hängt gemäß Gleichung 3.4 in Kapitel 3.1 von der zum Fluid zeigenden Fläche A , von der vertikalen Bauhöhe h und vom Temperaturunterschied ΔT ab. Betrachtet man diese Parameter, so beschreiben h und A im zu betrachtenden Fall zeitlich unveränderbare Größen, wobei ΔT von der Temperatur des Fluides bzw. der Umgebung sowie von der Bauteiltemperatur abhängt und somit im Falle der Lock-In Thermographie indirekt auch zeitabhängig ist.

Folgende Annahmen werden für die Bestimmung des Wärmeübertrages infolge Konvektion getroffen. Als Umgebungstemperatur wird 298 K und als Probenmaximaltemperatur während der Messung 343 K angenommen, da in dieser Arbeit Faserverbundwerkstoffe die zentrale Werkstoffgruppe der untersuchten Probenkörper und Struk-

turen darstellt. Diese weisen in Abhängigkeit des verwendeten Matrixsystems in der Regel maximale Einsatztemperaturen zwischen 343 K und 393 K auf. Berücksichtigt man darüber hinaus eine infolge der Anregung sinusförmige Temperaturbeaufschlagung an der Vorderseite mit einer Amplitude von 5 K, so ergeben sich Temperaturdifferenzen von $\Delta T_{min,Vor} = 35 K$ und $\Delta T_{max,Vor} = 45 K$ an der Vorderseite in Bezug auf die Temperatur des Fernfeldes. Die gewählte Temperaturdifferenz entspricht dabei den bei der niedrigsten Lock-In Frequenz gemessenen Werten an der Bauteilvorderseite.

Die Temperaturdifferenzen an der Bauteilrückseite errechnen sich zu $\Delta T_{min,Rueck} = K_1 \cdot 35 K$ und $\Delta T_{max,Rueck} = K_2 \cdot 45 K$. K_1 und K_2 sind unter Berücksichtigung einer instationären Wärmeleitung nicht konstant sondern von der Oberflächentemperatur und der Bauteiltemperatur abhängige Größen (vergleiche dazu die nichtstationäre Wärmeleitung am halbbunendlichen Körper, wie sie beispielsweise in [15] beschrieben wird). Da die Bauteiloberflächentemperatur direkt mit der optischen Anregung zusammenhängt und der Temperaturgradient im Bauteil im stationären Fall konstant ist, gibt es auch einen direkten Zusammenhang zwischen den Konstanten K_1 und K_2 und der sinusförmigen Anregung an der Bauteiloberfläche, welcher sich durch folgende Gleichung beschreiben lässt.

$$K_i = A_{th,K_i} \cdot \sin \left(\omega_{Lock-In} \cdot t + \frac{3}{2} \cdot \pi + \varphi_{\omega,i} \right) \quad \text{für } i=1,2 \quad (5.2)$$

Der Parameter A_{th,K_i} beschreibt einen Gewichtungsfaktor, welcher eine Funktion der Temperaturleitfähigkeit α des betrachteten Werkstoffes und dessen Dichte ρ ist. Der Schwingungsanteil der Gleichung wird analog zu Gleichung 4.2 gewählt und durch einen Phasenversatz $\varphi_{\omega,i}$ ergänzt.

Betrachtet man nun den Fall, dass zum Zwecke der thermischen zerstörungsfreien Prüfung nur Lock-In-Frequenzen Verwendung finden, welche zu einer thermischen Eindringtiefe μ führen, welche kleiner als die Bauteildicke ist, so ist die Temperatur an der Bauteilrückwand näherungsweise konstant und entspricht der mittleren Bauteiltemperatur T_{mittel} .

Wendet man dieses Prinzip auf die Probenplatte mit künstlich eingebrachten Fehlstellen an und vernachlässigt die seitlichen Randflächen aufgrund ihrer in Bezug zur Vorder- und Rückwand geringen Fläche, so kann die durch Konvektion abgegebene Wärmemenge pro Zeiteinheit \dot{Q}_{ges} geschrieben werden als

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{ges} &\cong \dot{Q}_{Vorderseite} + \dot{Q}_{Rueckseite} \\ &\cong (h_{Platte} \cdot A_{Platte} \cdot [\Delta T_{max,Vor} - ((1 - \sin(\omega_{Lock-In}t)) \cdot \Delta T_{min,Vor})] \\ &\quad + h_{Platte} \cdot A_{Platte} \cdot [T_{mittel} - T_{Umgebung}]) \cdot \alpha . \end{aligned} \quad (5.3)$$

Die gesamte Wärmemenge pro Zeiteinheit \dot{Q}_{ges} setzt sich somit aus einem konstanten Rückwandanteil und einem der aufgebrachten Wärmemenge proportionalem Anteil zusammen, welcher in Phase zur Anregung ist. Diese Tatsache erlaubt es im vorliegenden Fall, den Einfluss der Konvektion auf die zu messende Temperaturverteilung an der Bauteiloberfläche in Form eines Vergrößerungsfaktors in Abhängigkeit der Lock-In Frequenz darzustellen. Dieser wird empirisch ermittelt und bei der Aufbringung des zeitlich variablen Wärmefluss an der Bauteiloberfläche berücksichtigt.

Unter der Voraussetzung, dass die getroffenen Annahmen erfüllt sind, ergibt sich eine effektive Amplitude für die aufzubringende thermische Welle in der Simulation, welche den konvektiven Wärmeverlust einerseits und die atmosphärische Vorlaufstrecke der optischen Anregung andererseits miteinbezieht, und die transiente Analyse somit beträchtlich erleichtert.

5.2 Modellierung und Simulation der Referenzplatte

Die zuvor beschriebene Vorgehensweise bildet die Basis für die thermisch, transiente Simulation der Referenzplatte zur Charakterisierung des SPT Systems. Durch das Einbringen verschiedenartiger Fehl- und Schadstellen eignet sich diese generische Platte im speziellen zur Bewertung der Defektsensitivität (siehe dazu Kapitel 6.3.1.2 bzw. Kapitel 6.3.2.2), d.h., inwiefern unterschiedliche Defekttypen und Defektgrößen erkannt bzw. voneinander unterschieden werden können.

5.2.1 Schematischer Aufbau

Die in dieser Arbeit verwendete Referenzplatte aus CFK weist Grundabmessungen von $320\text{ mm} \times 320\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ auf. Sie soll repräsentative Defekte, welche typischerweise in der Luft- und Raumfahrtindustrie vorkommen, und zusätzlich Fehlstellen beinhalten, welche auch in der Literatur nur wenig Beachtung finden, sich aber zur Charakterisierung der Leistungsfähigkeit des SPT Systems eignen. Mehrfachfehler können an dieser Stelle beispielhaft genannt werden bzw. die Fragestellung nach dem Auffinden von Fehlstellen, welche sich unterhalb anderer Fehlstellen befinden. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen mit den Ergebnissen von Ultraschalluntersuchungen verglichen werden, um das vorgestellte SPT-System in den Gesamtkontext zerstörungsfreier Prüfsysteme einordnen zu können (siehe dazu Kapitel 6.3.1.2 und Kapitel 6.3.2.2).

Die Probenplatte mit künstlich eingebrachten Fehlstellen, welche einen Lagenaufbau von $[(0/90)_7/0/(90/0)_7]$, eine Lagendicke von $0,27\text{ mm}$ und eine daraus resultierende Probendicke von ca. 4 mm besitzt, kann in fünf Bereiche eingeteilt werden, welche die folgenden unterschiedlichen Fehlertypen bzw. -gruppen darstellen (siehe Abbildung 5.1).

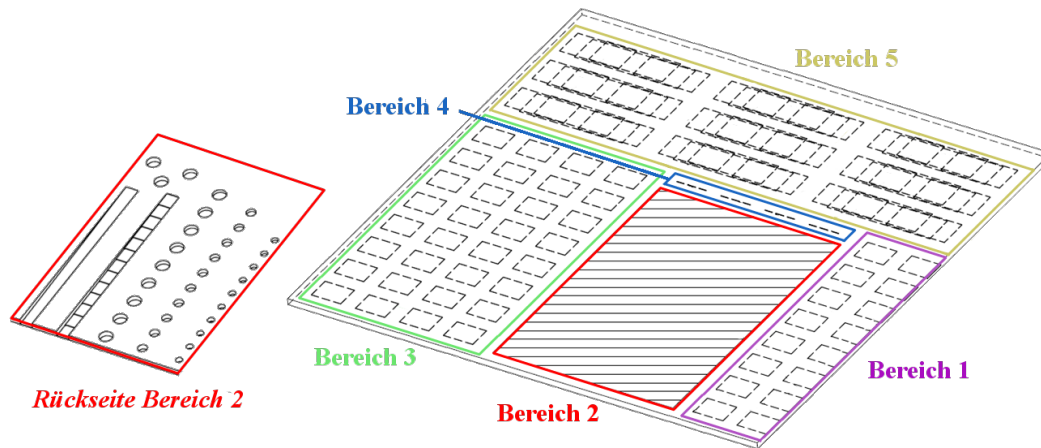


Abbildung 5.1: Schematischer Aufbau und Bereichseinteilung der CFK Referenzplatte mit unterschiedlichen Fehlertypen [72]

- Durch PTFE-Folien hervorgerufene Delaminationen in unterschiedlicher Tiefe
- Rückseitige, mechanische Bearbeitung: simulierte Defekte / Delaminationen
- Einlagerungen von Fremdkörpern in unterschiedlicher Tiefe
- Durch Schnitte in Einzellagen simulierte Faserbrüche
- Mehrfacheinlagerungen von Fremdkörpern in unterschiedlicher Tiefe sowie mit unterschiedlichem Überlappungsgrad

Für eine detaillierte Beschreibung bzw. für eine Fertigungszeichnung und einen Ablageplan der Referenzplatte sei auf Appendix A.2 verwiesen, welcher einen detaillierten Zuschnittsplan der einzelnen Prepreglagen bzw. eine Skizze der mechanischen Bearbeitung enthält. Im Folgenden werden die fünf einzelnen Bereiche im Detail erläutert.

Der Bereich eins, welcher sich auf der rechten unteren Seite der Probenplatte befindet, stellt simulierte Delaminationen in unterschiedlichen Tiefen dar. Die Darstellung der Fehlstellen wird durch das Einlaminiere von $0,1 \text{ mm}$ dicker Teflontrennfolien (PTFE-Folien) zwischen den einzelnen Faserlagen realisiert, wie es auch in der Literatur aufgrund der guten Trennwirkung von Teflon speziell für akustische Prüfsysteme häufig Anwendung findet (vgl. beispielsweise [98] oder [47]). Die Grundabmessungen der Fehlstellen betragen 20 mm in der Breite und 15 mm in der Höhe.

Aufgrund der effektiven Lagendicke der Prepreglagen ergeben sich im vorliegenden Fall Fehlertiefen von $0,27 \text{ mm}$ (rechts unten) bis maximal $2,16 \text{ mm}$ (oberste Fehlstellen im ersten Bereich). Wie aus Abbildung 5.1 zu entnehmen, befinden sich jeweils zwei rechteckige Fehlstellen, welche sich in gleicher Tiefe befinden, nebeneinander. Die äußeren Folien werden überstehend gefertigt, was ein nachträgliches Entfernen der Folien nach dem Autoklavprozess ermöglichen soll. Dies dient der Vergleichbarkeit der durch Teflonfolie generierten künstlichen Fehlstelle mit einem $0,1 \text{ mm}$ mes-

senden Luftspalt, was in erster Näherung einer realen, geöffneten Delamination entspricht.

Der Bereich zwei stellt Fehlstellen dar, wie sie in der Regel zur Charakterisierung thermischer Prüfverfahren verwendet werden (vergleiche dazu beispielsweise eine Versuchsreihe zur Charakterisierung der Impuls-Thermografie-Prüftechnik in [68], in welcher eine CFK-Probenplatte mit rückseitigen Flachbohrungen in unterschiedlicher Tiefe zum Einsatz kommt). Dieser Bereich ist wiederum in einzelne Gebiete gegliedert, welche in Abbildung 5.1 links als Detailansicht zu sehen sind. Neben Bohrungen mit variablem Durchmesser von 5 mm bis hin zu 10 mm in unterschiedlichen Tiefen (Restwandstärken von $0,2\text{ mm}$ bis $2,0\text{ mm}$ in $0,2\text{ mm}$ Schritten) befinden sich zwei Keile (Breite jeweils 10 mm) in diesem Bereich, ein kontinuierlicher Keil und ein Stufenkeil mit $0,3\text{ mm}$ Stufenhöhe. Der Stufenkeil eignet sich besonders gut zur Charakterisierung der relativen Tiefensensitivität bzw. -auflösung.

Ergänzt werden diese Fehlstellen durch drei Sacklöcher mit einem Durchmesser von 10 mm mit unterschiedlichen Tiefen im oberen linken Bereich des zweiten Bereichs. Diese Bohrungen wurden nach der mechanischen Bearbeitung mit Harz ausgefüllt, was künstlich eingebrachte Harznester darstellt.

Bereich Nummer drei umfasst metallische und nichtmetallische Inserts, welche wiederum in unterschiedlichen Tiefen in entsprechenden Ausschnitten der Prepreglagen zu finden sind. Die Grundabmessungen sind analog zu den zuvor beschriebenen eingebrachten Folien. Die Dicke dieser Materialien entspricht im Wesentlichen der Lagendicke des Laminats, wobei allerdings die Dicke von $0,27\text{ mm}$ in einigen Fällen aufgrund von Fertigungs- und Lieferbedingungen nicht exakt eingehalten werden kann. Die Schwankungen liegen im Bereich von $\pm 0,02\text{ mm}$. Als metallische Einlagerungen werden Stahl-, Aluminium- und Titanfolien verwendet. Zusätzlich dazu werden Patches aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK), welcher die gleiche Epoxidmatrix wie das Grundlaminat aufweist, eingebracht.

Insgesamt befinden sich diese Fehlstellen in acht unterschiedlichen Tiefen im Laminat. Die oberflächennächsten Fehlstellen sind nach der ersten CFK-Lage in $0,27\text{ mm}$ Tiefe in der Nähe des Plattenrandes anzufinden. Die tiefsten Fehlstellen befinden sich in $2,16\text{ mm}$ Tiefe. Die Schrittweite beträgt jeweils einer Lagendicke, nämlich $0,27\text{ mm}$.

In Bereich Nummer vier sind Fehlstellen zu finden, welche künstlich eingebrachte Faserbrüche in unterschiedlicher Tiefe erzeugen. Dabei handelt es sich um 20 mm lange Schnitte, welche in den noch nicht ausgehärteten Prepreglagen durchgeführt werden und die Fasern durchtrennen. Diese Schnitte befinden sich in der dritten, fünften und siebten Lage (von rechts nach links) und dementsprechend in $0,54\text{ mm}$, in $1,08\text{ mm}$ und in $1,62\text{ mm}$ Tiefe.

Der Bereich fünf nimmt den gesamten oberen Plattenbereich ein. In drei Reihen befinden sich jeweils drei Bereiche mit sich überlappend angeordneten Fehlstellen. Jede Reihe weist die gleichen Fehlergruppierungen auf, unterscheidet sich jedoch im eingebrachten Zusatzmaterial. Während in der obersten Reihe Titanfolien als Substitut zum

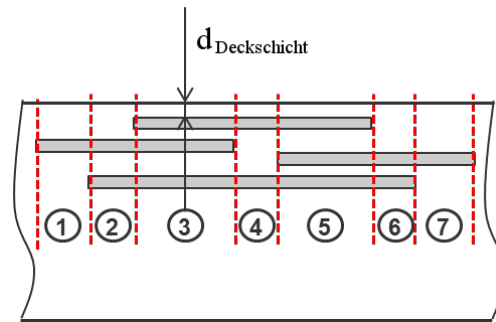


Abbildung 5.2: Geometrische Anordnung der Überlappungsfehler [75]

Einsatz kommen, befinden sich in der zweiten Reihe Folien aus einer Stahllegierung und in der dritten Folien aus Aluminiumlegierung.

Alle drei Fehlergruppierungen pro gewähltem Werkstoff weisen zueinander die gleiche Tiefensequenz und horizontale Positionierung auf. Sie unterscheiden sich jeweils durch die Tiefenlage $d_{Deckschicht}$ der obersten Fehlstelle. Die Positionierung der Einzelfehler zueinander ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Jeder Defektkomplex besteht aus vier zueinander horizontal verschobenen Streifen, welche in einzelnen Prepreglagen in dafür geschaffenen Ausschnitten eingebettet sind. Zwischen zwei Lagen mit eingebetteten Fremdkörpern befindet sich mindestens eine ungestörte CFK-Lage.

Im Fall des oberflächennächsten Defektkomplexes befinden sich die Einzellagen in den Schichten zwei, vier, sechs und acht, was Tiefen von $0,27\text{ mm}$, $0,81\text{ mm}$, $1,35\text{ mm}$ und $1,89\text{ mm}$ entspricht. Die Defekte in den Einzellagen sind dabei so angeordnet, dass sich sieben unterschiedliche Überlappungsbereiche ergeben (vgl. Abbildung 5.2). Die Zonen eins und sieben weisen keine Überlappungen mit anderen Blechen auf, die Fremdkörper befinden sich allerdings in unterschiedlicher Tiefe. Die Zonen zwei, vier und sechs weisen jeweils zwei übereinanderliegende Fremdkörper auf, welche sich durch die Tiefenlage und durch die zwischen ihnen sich befindende CFK Lagenanzahl unterscheiden. Drei übereinanderliegende Fehlstellen sind in den Bereichen drei und fünf zu finden.

5.2.2 Modellierung und Vernetzung

Die einzelnen Defektbereiche müssen in geeigneter Weise in ein Finite Elemente Modell überführt und in die Referenzplatte dementsprechend eingebettet werden. Dazu ist zunächst die Frage zu klären, ob ein dreidimensionales Modell mit Volumenelementen aufgebaut werden muss, oder ob ein auf die dritte Dimension erweitertes zweidimensionales Modell ausreichend ist. Ein Vorteil der $2\frac{1}{2}D$ Modellierung ist, falls anwendbar, die deutlich geringere Anzahl an Rechenoperationen und damit eine geringere Rechenzeit. Da zur Darstellung des Lock-In Vorgangs transiente Wärmeleitungsvorgänge simuliert werden müssen, ist die Minimierung der Rechenzeit besonders in den Mittelpunkt zu rücken.

Für die Simulation wird das Finite Elemente Programm ANSYS® verwendet, wobei als Elementtyp das *SHELL 132* Element gewählt wird. Dieses Element ist schematisch in Abbildung 5.3 dargestellt.

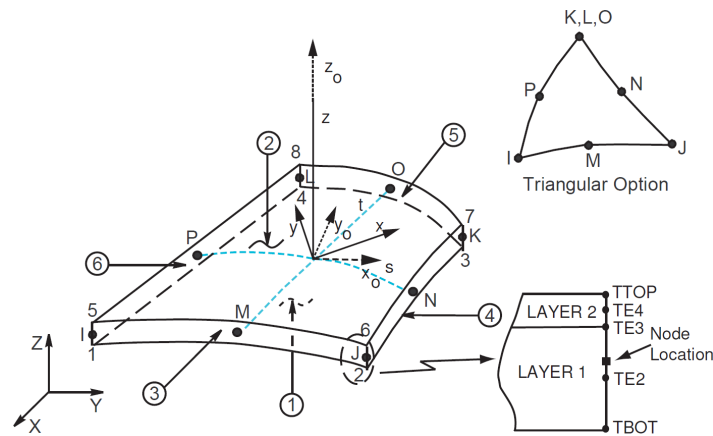


Abbildung 5.3: Thermisches Schalenelement SHELL 132 [11]

Dieses Schalenelement erlaubt es, geschichtete Werkstoffe, wie sie beispielsweise Faserverbundwerkstoffe darstellen, mit Hilfe einer zweidimensionalen Grundformulierung und Erweiterungen in die zur Fläche senkrechte Richtung thermisch zu beschreiben. Dies ermöglicht neben einer Wärmeleitung in der Ebene, welche durch das Element aufgespannt wird, auch einen Wärmeübergang in dazu senkrechter Richtung. Das Element besitzt acht Knoten, welche jeweils 32 Temperaturfreiheitsgrade besitzen. Diese unterschiedlichen Freiheitsgrade stellen anschaulich die Temperatur an den Randstellen von aus Einzellagen (in der Abbildung 5.3 mit *LAYER* bezeichnet) bestehenden Werkstoffen dar, falls in den Einzellagen ein linearer Verlauf der Temperatur in Tiefenrichtung angenommen wird. In diesem Fall ist es möglich, bis zu 31 unterschiedliche Schichten mit jeweils unterschiedlichen Dicken und Materialeigenschaften zu definieren. Wird ein quadratischer Ansatz für den Temperaturverlauf innerhalb einer Schicht verwendet, so sind bis zu 15 Einzellagen möglich [11].

Um den Einfluss eines linearen und eines quadratischen Ansatzes zu bestimmen, wird ein vereinfachtes Modell aufgebaut. Dieses Modell umfasst zehn Einzelschichten mit unterschiedlichen Materialeigenschaften. Die Ergebnisse bei modulierter thermischer Anregung zeigen keinen signifikanten Einfluss der unterschiedlichen Ansätze auf die Temperaturverteilung an der Plattenoberseite, was die zu messende Größe darstellt. Somit kann ein linearer Ansatz gewählt werden.

Im vorliegenden Fall soll ein Laminat mit 15 Einzelschichten aufgebaut werden, wobei auch Fehlstellen zwischen den Einzellagen (z.B. einlamierte PTFE-Folien siehe Abbildung 5.1 erster Bereich) im Simulationsmodell betrachtet werden müssen. Daher ergeben sich bei 15 Einzellagen und 14 Zwischenlagen 29 Schichten mit unterschiedlichen Eigenschaften, welche im Simulationsmodell berücksichtigt werden müssen. Somit kann die Platte mit einem *SHELL 132* Element in Dickenrichtung modelliert werden.

An den Stellen, bei denen Fremdkörper zwischen den Lagen vorgesehen sind, werden die Materialkennwerte der entsprechenden Zwischenlage angepasst. Befinden sich Fremdkörper in Ausschnitten einzelner Schichten, so erfolgt eine Anpassung der Einzelschicht.

Die Ausschnitte, welche durch die mechanische Bearbeitung auf der Probenrückseite entstehen, werden durch Anpassung der Materialkennwerte der entsprechenden Lagen bzw. Zwischenlagen durch die thermischen Eigenschaften von der umgebenden Atmosphäre realisiert. Der kontinuierlich vorgesehene Keil kann in diskreten Schritten dargestellt werden, was lediglich eine geringe Abweichung von der realen Geometrie mit sich bringt. Im Fall der mit Epoxidharz gefüllten Bohrungen werden die Materialeigenschaften ebenfalls an die der Matrix angepasst.

Im nächsten Schritt muss der Frage nach der Elementgröße nachgegangen werden, wobei diese so groß wie möglich gewählt werden muss, um die Simulationszeit minimieren zu können, aber gleichzeitig klein genug sein muss, um eine Konvergenz der Ergebnisse zu gewährleisten. Zugleich bedingt das Vorhandensein von unterschiedlichen Defektgeometrien (Kreisquerschnitte mit unterschiedlichen Radien, Rechteckquerschnitte mit variierenden Seitenverhältnissen bis hin zur Darstellung von Einschnitten) die Notwendigkeit nach einer gerichteten und kontrollierten Vernetzung zur Gewährleistung von Elementen mit zulässiger Geometrie (siehe dazu die speziellen Anforderungen des Elementtyps in [11]). Aus diesem Grund wird in der Arbeit eine Parameterstudie von gerichteten Vernetzungen und unterschiedlichen Elementgrößen durchgeführt. Das Ergebnis dieser Studien ist in Abbildung 5.4 dargestellt, was die einzelnen zur Unterteilung der Fehlerbereiche definierten Flächen des Schalenmodells und einen Ausschnitt des für die weiteren Simulationen gewählten Finite Elementnetz zeigt.

Die optimale Elementgröße (Seitenlänge des Elementes) ergibt sich zu $2,5 \text{ mm}$, was eine Elementanzahl von 19424 bedeutet. In Abbildung 5.4 rechts im Ausschnitt des FE-Netzes ist zu erkennen, dass zur Netzgenerierung sowohl quadratische als auch dreieckige Elemente verwendet werden.

Besonderes Augenmerk muss bei der Vernetzung auf die kreisförmigen Fehlstellen gelegt werden. Hier sind insbesondere die Bohrungen mit dem kleinsten Durchmesser kritisch, da dieser Kreis unter Berücksichtigung der bevorzugten Elementgröße durch ein Polygon genähert werden muss. Um die Bohrung in das umgebende regelmäßige Netz einzubetten, wird um jede Bohrung ein quadratischer Bereich definiert, welchem in Abhängigkeit des jeweiligen Durchmessers ein bis zwei konzentrische Kreise eingeschrieben sind. Die Fläche, welche durch den äußersten Kreis begrenzt ist, wird für eine gerichtete Vernetzung zusätzlich in vier kongruente Teilflächen zerlegt (siehe Detailansicht in Abbildung 5.4). Dadurch wird die Anzahl an Knotenpunkten durch den gezielten Einsatz von dreiecksförmigen Elementen von außen nach innen kontinuierlich verringert, bis der innerste Kreis, der die Defektfläche darstellt, mit einem Polygon mit radial angeordneten Dreieckselementen versehen wird.

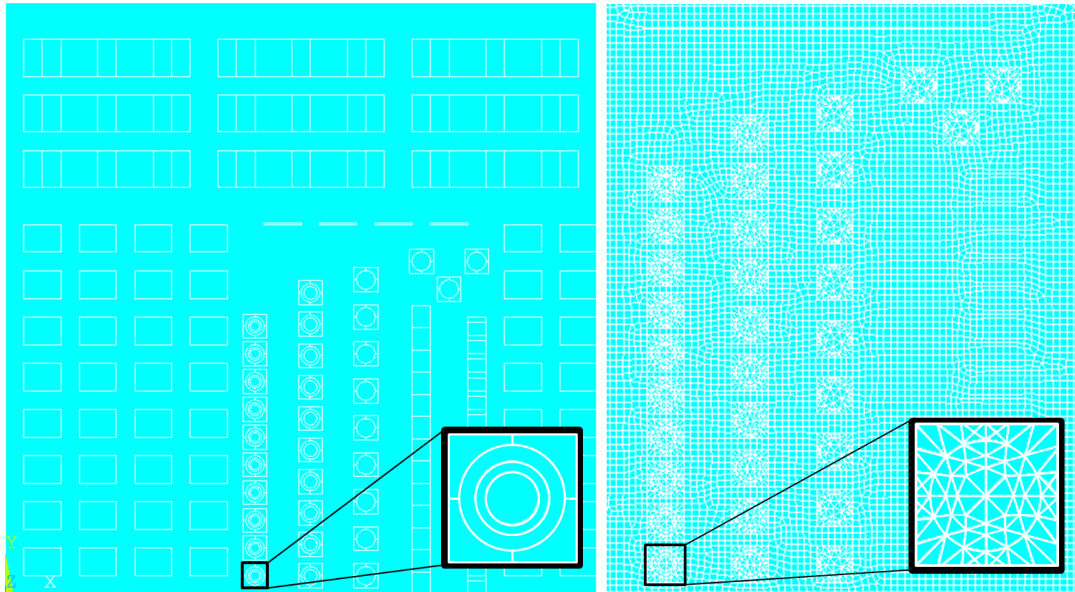


Abbildung 5.4: Darstellung der zur Abgrenzung der einzelnen Fehlerbereiche definierten Flächenbereiche (links); Ausschnitt der Vernetzung der Referenzplatte zur Simulation des thermischen Verhaltens künstlicher Defekte (rechts)

Als weiterer kritischer Bereich in Hinblick auf die Vernetzung ist die Zone der simulierten Faserbrüche (Bereich Nummer vier) zu nennen, wobei die geringe geometrische Erstreckung senkrecht zur Hauptausdehnung zu Problemen führen kann. Aus diesem Grund wird die Höhe der Einschnitte etwas größer als in der Realität, nämlich mit $h_{Einschnitt} = 0,5 \text{ mm}$ statt mit $h_{Einschnitt,real} = 0,1 \text{ mm}$ bis $0,2 \text{ mm}$ modelliert. Der Übergang zum regelmäßigen Netz der Restplatte erfolgt hier, wie auch bei der Darstellung des kontinuierlichen Keiles, mit Hilfe von Dreieckselementen, welche die Knotenpunkte miteinander verbinden, um den Übergang von unterschiedlichen Knotenpunktanzahlen von eng beieinanderliegenden Linien zu gewährleisten.

5.2.3 Simulationsrandbedingungen

Bevor eine Simulation durchgeführt werden kann, müssen einerseits Randbedingungen dem Modell vorgegeben werden, andererseits eine im Falle der Lock-In Technik zeitlich variable Temperaturlast definiert werden.

Die Aufbringung einer zeitlich variierenden Temperaturlast erfolgt stufenweise, indem in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz eine thermische Schrittweite definiert und das kontinuierliche thermische Sinussignal gemäß dieser Schrittweite in diskrete Werte aufgesplittet wird.

Diese Werte werden für die transiente Simulation schrittweise als Eingabeparameter für die äußere thermische Last verwendet, wobei diese Last während der definierten Zeitspanne (thermische Schrittweite) konstant bleibt.

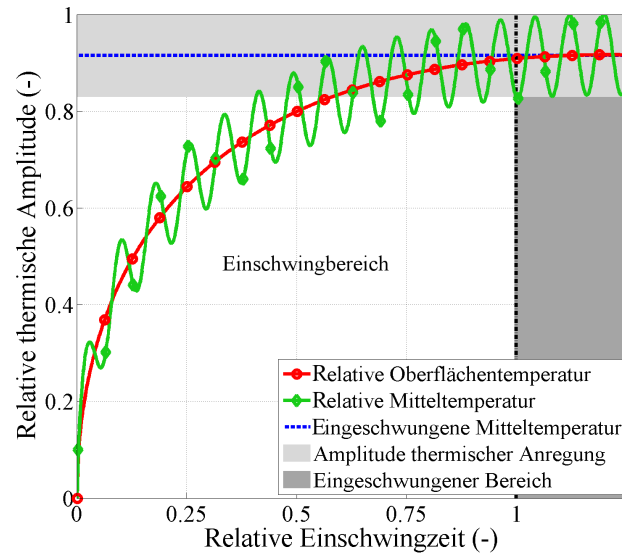


Abbildung 5.5: Einschwingverhalten thermischer Wellen

Die Rand- und Anfangsbedingungen werden wie folgt gewählt:

- Randbedingungen:** Wie in Kapitel 5.1.2 bzw. in Gleichung 5.3 beschrieben, werden keine konvektiven Wärmeströme modelliert. Auch der atmosphärische Strahlungsverlust wird nicht explizit modelliert, sondern es werden beide Faktoren durch einen empirisch ermittelten Faktor, welcher die thermische Amplitude beeinflusst, berücksichtigt. Dadurch ist es möglich, die thermische Randbedingung (als Wärmestrom) direkt auf die Elemente der Bauteiloberfläche aufzubringen.
- Anfangsbedingungen:** Die wichtigste Anfangsbedingung ist die Bauteilmitteltemperatur T_{mittel} . Wird dabei die Raumtemperatur gewählt, so kommt es je nach eingebrachter Wärmeleistung zu einer Überlagerung einer harmonischen Schwingung aufgrund der sinusförmig modulierten Anregungsquelle und eines asymptotischen Anteils, welcher den Anstieg der Mitteltemperatur bedeutet. Dieses Phänomen ist in Abbildung 5.5 dargestellt. Nach einer definierten Zeitspanne, der sogenannten Einschwingzeit, bleibt die Bauteilmitteltemperatur konstant. Wählt man für die Simulation diese Mitteltemperatur als Bauteilanfangstemperatur aus, welche durch einen vorgeschalteten Simulationsvorlauf bestimmt werden kann, so genügt die Simulation einer thermischen Welle, um ein periodisches Signal zu erstellen, das zur weiteren Auswertung (Extraktion der modalen Parameter) verwendet werden kann.
- Übergangsbedingungen:** Die Berechnung der thermischen Bauteilantwort infolge eines zeitlich variierenden Wärmeflusses erfolgt in diskreten Zeitschritten. Der aufgebrachte Wärmestrom ist dabei während dieser Intervalle konstant. Die Bauteilantwort bzw. das hervorgerufene Temperaturfeld im Probenkörper nach

diesem Zeitschritt wird als Anfangsbedingung für den nächsten Rechenlauf verwendet.

Nachdem die transiente Simulation abgeschlossen ist, werden die zeitlich veränderlichen effektiven Oberflächentemperaturen grafisch mit Hilfe einer Grauwertzuordnung für jeden Zeitschritt kodiert und in Form einer Bilderfolge gespeichert. Diese Bilderfolge kann nun analog zu den experimentellen Ergebnissen in Hinblick auf die Amplituden- und Phasenlage der simulierten Oberflächentemperatur relativ zur aufgetragenen thermischen Welle ausgewertet werden, was einer Simulation einer optisch angeregten Lock-In Messung entspricht (siehe dazu Kapitel 4.1.2). In den meisten Fällen wird das Phasenbild herangezogen, um Fehlstellen innerhalb der Struktur zu bewerten, da dieses im Hinblick auf schwankende Emissivitätskoeffizienten bzw. ungleichförmige Beleuchtung unempfindlicher ist.

5.2.4 Diskussion der Ergebnisse

In Abbildung 5.6 ist exemplarisch das Phasenbild einer Simulation bei $0,02\text{ Hz}$ Anregung dargestellt. Der aufgetragene Phasenwinkel entspricht dabei der absoluten Phasenverschiebung des Oberflächensignals in Bezug zur aufgetragenen thermischen Anregung.

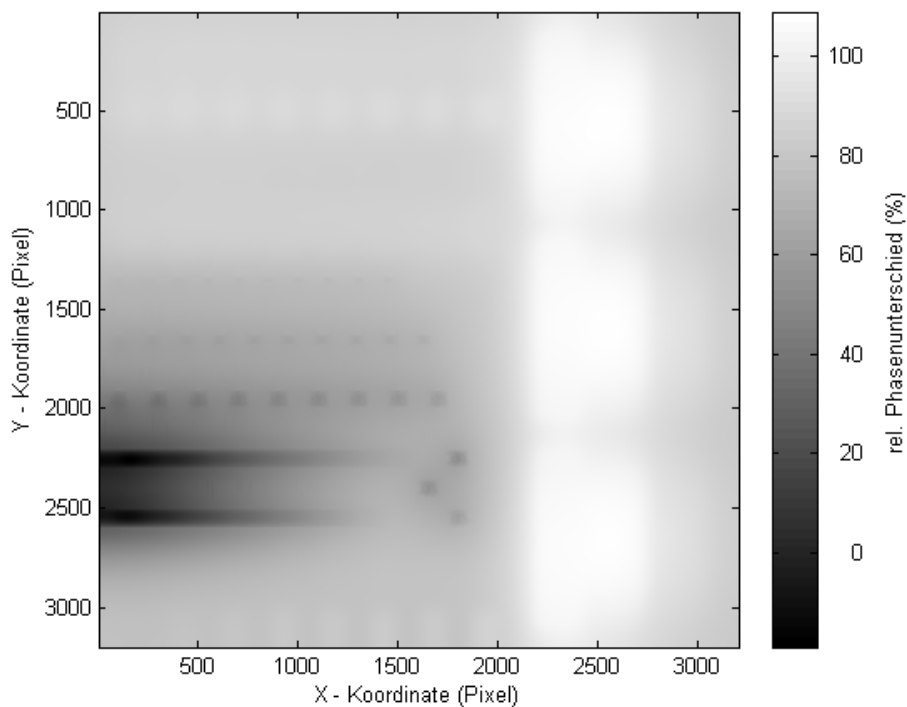


Abbildung 5.6: Simulationsergebnisse der Referenzplatte: Phasenbild bei $0,02\text{ Hz}$ thermischer Anregung

Da die einzelnen Plattenbereiche unterschiedliche Phasenwinkel aufweisen, wobei die Spreizung des Phasenwinkels kleiner als die der Gesamtplatte ist, werden im Folgenden die Bereiche einzeln bewertet, wobei der Phasenkontrast im jeweiligen Bereich maximiert wird.

Bereich 1 - Delaminationen durch Einbringung von Trennfolien:

Der erste Bereich, (siehe Abbildung 5.7) umfasst zwei Reihen von Fehlstellen, welche einerseits einlamierte Teflonfolien (Dicke: $0,1\text{ mm}$), andererseits Luftspalte, welche experimentell durch das Herausziehen entsprechender Trennfolien erreicht werden sollen, darstellen. In der Simulation werden die entsprechenden Sektionen der Schalelemente mit den thermischen Eigenschaften der Luft bzw. der PTFE-Folie belegt.

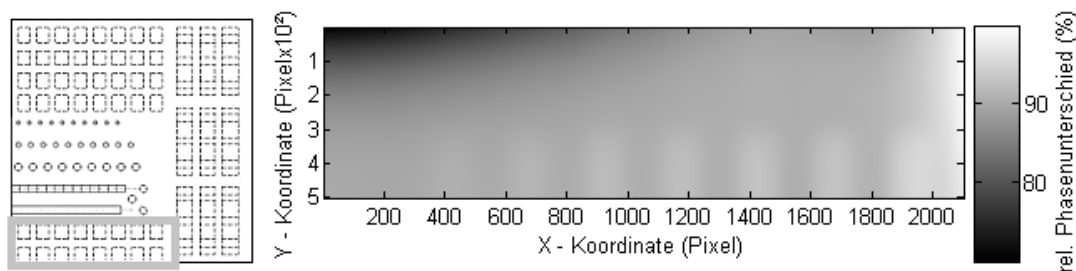


Abbildung 5.7: Simulationsergebnisse der Referenzplatte: Phasenbild des ersten Bereiches bei $0,02\text{ Hz}$ thermischer Anregung

Abbildung 5.7 zeigt, dass die Luftspalte am Rand der Probenplatte zwar erkannt werden können, da sie eine Phasenverschiebung des messbaren Oberflächensignals hervorrufen. Die eingebrachten PTFE-Folien können aber aufgrund ihrer zum Grundlaminat sehr ähnlichen thermischen Eigenschaften nicht eindeutig detektiert werden. Wie zu erwarten, sind die Einschnitte in größerer Tiefe schwieriger als die oberflächennäheren Fehlstellen zu erkennen. Die Tiefenlage der Fehlstellen steigt von rechts nach links um jeweils ca. $0,28\text{ mm}$ an.

Die experimentellen Ergebnisse der in dieser Arbeit durchgeführten thermischen Untersuchung (siehe beispielsweise Abbildung 6.13 links) stützen dieses Ergebnis, wobei sich die entfernten Folien¹ bzw. der sich daraus ergebende Luftspalt im Phasenbild noch deutlicher abzeichnet. Gründe dafür können neben den bei der Simulation angenommenen Vereinfachungen auch fertigungsinhärente Größen sein. Aus diesem Grund sei hier auf diese geringfügige systematische Abweichung hingewiesen, wobei bei der weiteren Beschreibung der Bereiche zwei bis fünf, welche ähnliches Verhalten aufweisen, nicht mehr explizit darauf eingegangen wird.

¹Die experimentelle Entfernung der PTFE-Folien war problematisch, weshalb nur die ersten drei Folien (die erste vollständig, die zweite und dritte teilweise) entfernt werden konnten. Die übrigen Folien verblieben im Laminat. Die dahinterliegende Fertigungsproblematik ist in Abbildung 6.10 zu sehen und wird in Kapitel 6.3.1.2 beschrieben.

Bereich 2 - Defekte durch rückseitige mechanische Bearbeitung:

In Abbildung 5.8 sind die Simulationsergebnisse des zweiten Bereiches dargestellt. Das Äquivalent zur rückseitig ausgeführten mechanischen Bearbeitung zur Darstellung von Fehlstellen bzw. Grenzflächen in unterschiedlichen Tiefen und Formen wird durch die Eigenschaftsmanipulation der Einzelsektionen der Schalenelemente bewerkstelligt. Für die mechanisch bearbeiteten Stellen werden die thermischen Eigenschaften der Luft und für die mit Epoxidharz gefüllten Sacklochbohrungen die der Matrix den einzelnen Sektionen zugewiesen. Zu beachten ist an dieser Stelle, dass die Modellierung des Stufenkeiles durch die endliche Anzahl an verfügbaren Sektionen schrittweise erfolgt und somit nur eine, wenn auch gute, Näherungslösung darstellt.

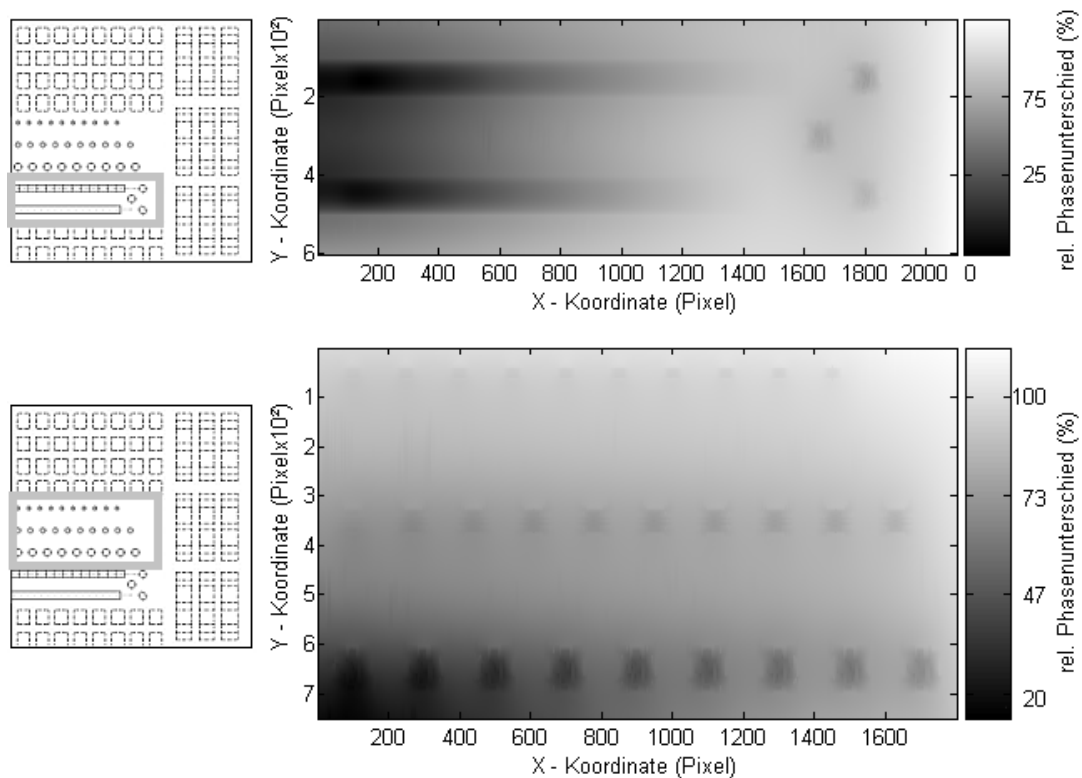


Abbildung 5.8: Simulationsergebnisse der Referenzplatte: Phasenbild des zweiten Bereiches bei $0,02 \text{ Hz}$ thermischer Anregung: Stufenkeil, kontinuierlicher Keil und Harznester (oben) bzw. rückseitige Sacklochbohrungen unterschiedlicher Tiefe und Größe (unten)

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass vor allem die eingebrachten Keile und die Bohrungen mit $\varnothing 10 \text{ mm}$ und $\varnothing 7 \text{ mm}$ einen großen Phasenkontrast liefern, welcher natürlich tiefenabhängig ist.

Die Bohrungen mit kleinerem Durchmesser sind nur schwach zu erkennen. An dieser Stelle ist auch anzumerken, dass die Diskretisierung der Platte bzw. die Elementgeometrie einen leichten Einfluss auf die Wärmeverteilung der kreisförmigen Bereiche hat.

Die kreisförmigen Bereiche mit fehlenden Kohlefasern (Abbildung 5.8 oben rechts) sind ebenfalls leicht zu erkennen, wobei die kreisförmige Kontur durch die Segmentierung bzw. die Elementwahl ebenfalls ein wenig von einem geometrisch perfekten Kreis abweicht.

Vergleicht man die Ergebnisse mit den experimentell gewonnenen Phasenbildern, welche in Abbildung 6.14 links bzw. in Abbildung 6.15 dargestellt sind, so stellt man fest, dass die Ergebnisse ähnlich sind, wobei die Bohrungen mit dem geringsten Durchmesser experimentell sich noch deutlicher zeigen als in der Simulation. Auch die Harznesten sind sowohl in der Simulation als auch im Experiment eindeutig zu erkennen.

Bereich 3 - Einlagerung unterschiedlicher Materialien:

Abbildung 5.9 zeigt das Phasenbild des dritten Bereiches bei einer Anregungsfrequenz von $0,02\text{ Hz}$. Die Modellierung der Einschlüsse mit jeweils unterschiedlichen Werkstoffen (horizontale Defektreihen weisen den gleichen Werkstoff auf) in ansteigenden Tiefen (v. r. n. l.) erfolgt analog zu den Bereichen eins und zwei durch eine Anpassung der Materialkennwerte in den entsprechenden Sektionen der Schalenelemente.

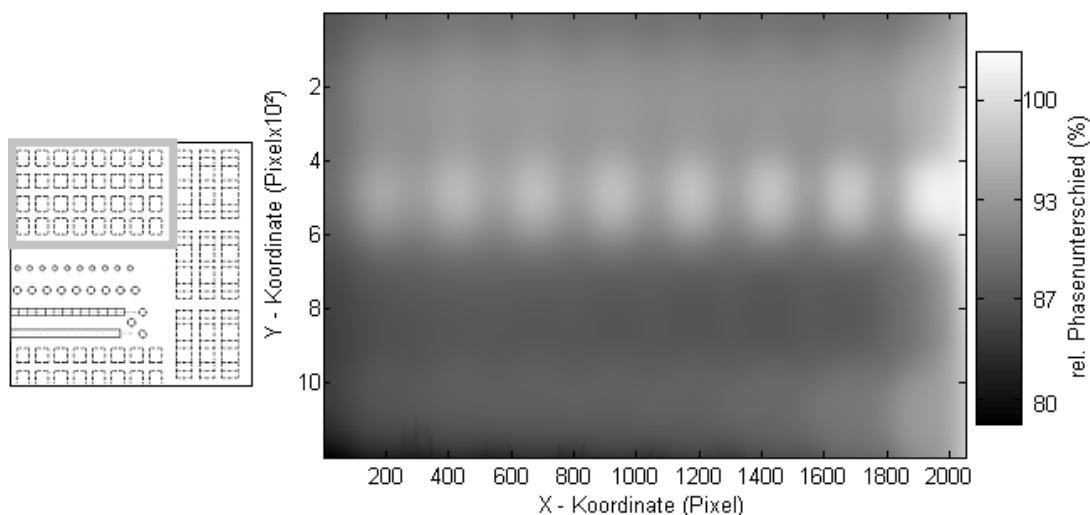


Abbildung 5.9: Simulationsergebnisse der Referenzplatte: Phasenbild des dritten Bereiches bei $0,02\text{ Hz}$ thermischer Anregung

Im Phasenbild ist zu erkennen, dass sich die Fehlstellen im Bereich drei nicht so deutlich abzeichnen wie beispielsweise im zuvor beschriebenen zweiten Bereich. Am deutlichsten sind die Fehlstellen der zweiten Reihe, in diesem Fall Einschlüsse aus GFK durch eine Anhebung des Phasenwinkels erkennbar. Die übrigen Einschlüsse - Stahlbleche: oberste Reihe, Titanbleche: zweitunterste Reihe und Aluminiumbleche: unterste Reihe - sind nur schwach zu erkennen. Vergleicht man diese Simulationsergebnisse mit den in Kapitel 6.3.2 vorgestellten experimentellen Ergebnissen, so sind Unterschiede im Fehlerkontrast sichtbar. Mit anderen Worten sind die metallischen Einschlüsse deutlich besser zu erkennen. Ein Grund dafür könnte neben den für die Simulation getroffenen Annahmen das Vorhandensein einer Grenzschicht zwischen

den metallischen Schichten und dem CFK-Laminat sein bzw. die fehlende Adhäsion dieser zwei Werkstoffe. Dieses Phänomen würde die Wärmeleitungseigenschaften in Tiefenrichtung gegenüber den GFK-Einschlüssen, welche die gleiche Matrix wie das Grundlaminat aufweisen und somit gut miteinander verbunden sein müssen, deutlich herabsetzen. Aus diesem Grund sind die Phasenunterschiede, welche durch die metallischen Einschlüsse bei Vorhandensein einer nicht perfekten Anbindung ans Laminat hervorgerufen werden, deutlich größer als in der Simulation.

Bereich 4 - Faserbrüche:

Die Darstellung der Faserbrüche - experimentell durch das Durchschneiden einzelner Faserbündel in der entsprechenden Prepreglage realisiert - erfolgt durch ein Einfügen mehrerer $0,5\text{ mm}$ in der Breite messender Elemente, welche die Materialeigenschaften der Matrix aufweisen. Der in Hinblick auf die Realität größere Spalt bzw. Einschnitt muss aufgrund von Elementrestriktionen in dieser Weise gewählt werden und stellt eine konservative Annahme dar, da dadurch eine größere Wärmebarriere gebildet wird. Die Ergebnisse der thermischen Simulation zeigen, dass diese Modifikationen in den Einzellagen keine ausreichende Phasenstörung hervorrufen, welche zu einer signifikanten Verschiebung des thermischen Oberflächensignals führt. Somit hätte auch jeder kleinere Einschnitt keine signifikanten Auswirkungen. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen in Kapitel 6.3.2.2 bestätigen diese Behauptung.

Bereich 5 - Mehrfacheinlagerungen unterschiedlicher Materialien:

Abbildung 5.10 zeigt die Ergebnisse des fünften Bereiches, der Mehrfacheinlagerungen, wobei jeweils unterschiedliche Materialien (vertikale Fehlerreihen) in drei Fehlerclustern in unterschiedlichen Tiefen (horizontal nebeneinanderliegende Fehlercluster weisen die gleiche Tiefenlage auf) verbaut sind. Abbildung 5.10 links zeigt Aluminiumeinschlüsse, Abbildung 5.10 mittig Stahleinschlüsse und Abbildung 5.10 rechts zeigt die Ergebnisse von sich überlappenden Titanblechen. Die Tiefenlage der einzelnen Einlagerungen ist Abbildung 5.2 zu entnehmen. Die Einbeziehung dieser Fehlerstellen in die Simulation erfolgt analog zu den übrigen Bereichen durch entsprechende Eigenschaftsänderungen einzelner Sektionen des Schalenmodells.

In allen drei Fällen kommt es zu einem Anstieg des Phasenwinkels von den Randbereichen mit nur einer Fehlstelle bis hin zur Mitte des Fehlerclusters, wobei die Überlappungsanzahl der Einzelfehlstellen ansteigt. Die einzelnen Überlappungszustände sind dabei nicht eindeutig voneinander zu trennen, sondern weisen einen kontinuierlichen Übergang auf. Die Stahlfolien führen zum größten Phasenversatz an der Bauteiloberfläche. Aluminiumeinlagerungen bewirken eine nur geringfügig niedrigere Phasenverschiebung, während die eingebrachten Titanfolien zu einem deutlich geringeren Phasenversatz führen.

Ebenfalls ist zu beobachten, dass sich die einzelnen Bereiche gegenseitig in gewissem Maße beeinflussen, was zu einem Verlust der Symmetrie bezüglich der Mitte der jeweiligen eingebrachten Fehlstellen führt.

Bei einem Vergleich mit den später detailliert beschriebenen experimentellen Ergeb-

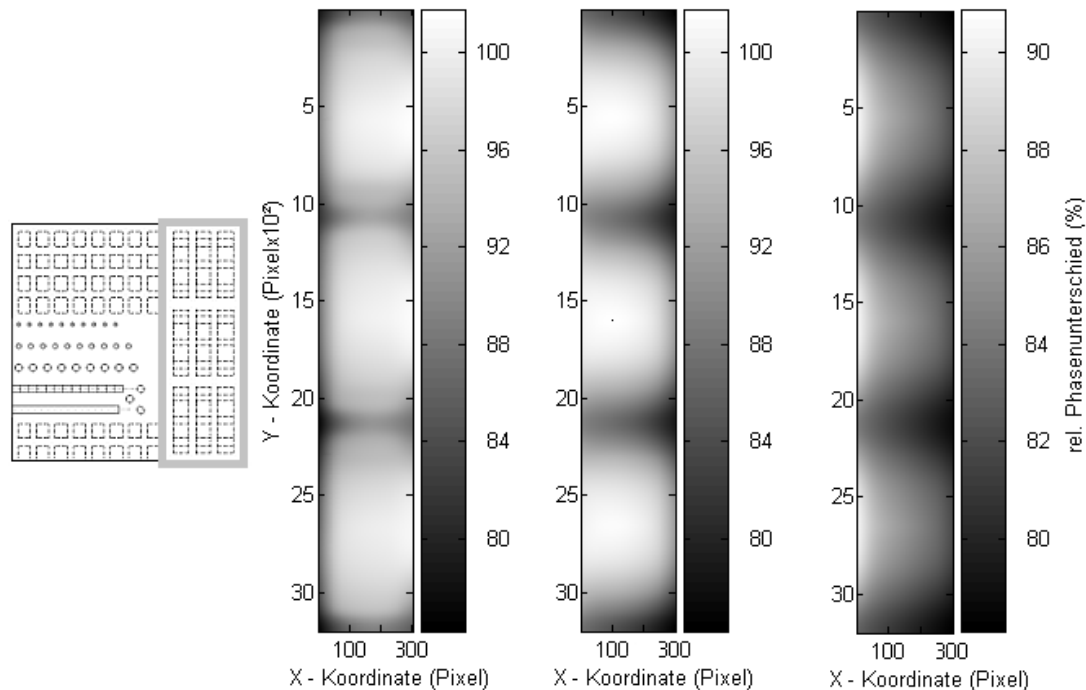


Abbildung 5.10: Simulationsergebnisse der Referenzplatte: Phasenbild des fünften Bereiches bei $0,02\text{ Hz}$ thermischer Anregung

nissen in Kapitel 6.3.2.2 ist ein ähnlicher Effekt wie bei Bereich drei zu beobachten. Die einzelnen Überlappungsbereiche grenzen sich im Experiment deutlicher voneinander ab.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Simulationsergebnisse insgesamt ähnliche Ergebnisse wie die experimentellen thermischen Analysen und Experimente in dieser Arbeit zeigen (vergleiche dazu Kapitel 4.1). In den meisten Fällen kann anhand der Simulationsergebnisse eine größere Anzahl an Fehlstellen identifiziert werden als experimentell, wobei die Abgrenzung der schadhafte Bereiche in einigen Fällen schlechter ist. Die höhere Defektsensitivität ist in nicht unbeträchtlichem Maße der Tatsache zuzuschreiben, dass die Simulationsergebnisse nicht von Störeinflüssen bzw. Rauschen behaftet sind und somit die auswertbaren Phasenintervalle beliebig klein gewählt werden können. Bei den experimentellen Ergebnissen ist dies nicht der Fall.

Nichts desto trotz bedeutet die gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment zum einen eine Validierung des Simulationsvorgehens und zum anderen einen Nachweis der Funktionsweise des in dieser Arbeit vorgestellten *Sequentiellen Phasenmodulierten Thermographiesystems* SPT bzw. der dazugehörigen Komponenten.

6 Zerstörungsfreie Prüfung ebener und gekrümmter Bauteile

Zur Charakterisierung der SPT-Methode sollen sowohl künstlich eingebrachte Fehlstellen an ebenen und gekrümmten Bauteilen als auch reale Fallbeispiele verwendet werden. Die Einbringung dieser Schädigungen erfolgt auf unterschiedliche Weise und wird in Kapitel 6.2 dargelegt. Diese künstlichen Schäden dienen im Weiteren als Referenzbeispiele zur Charakterisierung des Fehlerauffindungsvermögens. Dieses wird im Folgenden auch mit Defektsensitivität bezeichnet. Sie bezeichnet die Fähigkeit, das Vorhandensein von Inhomogenitäten zu identifizieren und die geometrischen Abmessungen und im besten Fall auch die Tiefenlage zu bestimmen. Um die gewonnenen SPT-Ergebnisse besser einordnen und bewerten zu können, erfolgt eine vergleichende Untersuchung mit den Ergebnissen einer Impuls-Echo Ultraschallmethode. Die Vorgehensweise und die Ergebnisse werden in Kapitel 6.3 beschrieben.

6.1 Schadensarten bei Faserverbundwerkstoffen

Das Auftreten von Schäden in Faserverbundwerkstoffen kann unterschiedliche Gründe haben. Schon in der Fertigung können Ungenauigkeiten in den Prozess- oder Herstellungsparametern auftreten, welche zu lokalen oder globalen Schäden führen. Bezieht man sich beispielsweise auf den Prepreg-Autoklavprozess zur Herstellung von Faserverbundbauteilen, so ist eine häufige Schadensursache eine Undichtigkeit des Vakuumcontainments, was zu Porosität bzw. ungenügender Verpressung der Einzelschichten führt. Darüber hinaus können Fremdstoffe in den Lagenaufbau geraten, wodurch eine Anbindung der Einzellagen verhindert wird. Die einzelnen Defektarten können einzeln oder in Kombination auftreten.

Weitere typische Schadensarten bei Nasslaminaten bzw. vakuum- oder druckbasierten Harzinfiltrationsverfahren sind ungenügende Fasertränkung bzw. Matrix- und Faserkonzentrationen, welche durch eine Verschiebung der Einzelfaserstränge infolge der Harzeinbringung entstehen können.

Neben Fertigungsfehlern können im Betrieb auftretende unvorhergesehene mechanische Belastungen zu Schäden in Faserverbundbauteilen führen. In [67] werden diese Belastungen als *unkonventionelle mechanische Belastungen* bezeichnet. Dazu zählen Schlag- und Stoßbelastungen (in dieser Arbeit auch Impactbelastungen genannt) oder

Erosion. Typische Schlagbelastungen treten beim Hantieren im Betrieb oder in Inspektionsintervallen (z.B.: fallengelassenes Werkzeug), durch Hagel- oder Steinschlag aber auch durch einen Zusammenprall mit anderen Festkörpern (z.B.: Vogelschlag) auf. Als Erosion wird in [67] die Interaktion zwischen kleinen Partikeln und der Struktur bezeichnet.

Da Kunststoffe wasser- sowie dampfdurchlässig und deren physikalische Eigenschaften temperaturabhängig sind (vgl. [67]), spielen Umweltbedingungen ebenfalls eine wichtige Rolle. Die langfristige Veränderung der Eigenschaften des Kunststoffes an sich infolge von Umwelteinflüssen wird als Alterung bezeichnet.

Im Faser-Matrix-Verbund kommt es zusätzlich bei Thermal- und Feuchtezyklierung aufgrund der unterschiedlichen Wärme- und Feuchtedehnkoeffizienten der einzelnen Werkstoffe (Faserwerkstoff, Matrixwerkstoff) zu Spannungen im Laminat, welche zu Schädigungen in Form von Mikrorissen oder zu Faser-Matrix-Ablösungen führen können.

Diese Vielfalt an unterschiedlichen Schadensarten gilt es, mittels zerstörungsfreier Prüfung aufzufinden. Um die Sensitivität der unterschiedlichen Systeme im Hinblick auf unterschiedliche Schadenstypen und -größen bewerten zu können, ist es notwendig, Parameterstudien durchzuführen.

Um definiert Schäden zu erzeugen, werden in dieser Arbeit drei unterschiedliche Methoden zur Schadenseinbringung verfolgt.

6.2 Schadenseinbringung

Eine in der Praxis häufig verwendete Vorgehensweise ist die Einbringung von Impactschäden in meist flache Probekörper. Diese Vorgehensweise, welche in Kapitel 6.2.1 genauer erläutert wird, führt in der Regel zu einer Kombination von verschiedenen Schädigungsmechanismen, welche zum Ausbilden von Delaminationen führen (für die Beschreibung der unterschiedlichen Schädigungsmechanismen siehe beispielsweise [24]).

In Kapitel 6.2.2 wird exemplarisch die Erzeugung eines zuvor beschriebenen Fertigungsfehlers, nämlich der Porosität, beschrieben. Dies geschieht durch eine Variation einzelner Prozessparameter.

Die dritte Vorgehensweise stellt eine Thermalzyklierung dar. In Kapitel 6.2.3 wird ein Zweikammersystem vorgestellt, welches es ermöglicht, in kurzer Zeit eine große Anzahl an Thermalzyklen durchzuführen, wobei die Differenztemperatur zwischen den Extrempositionen frei gewählt werden kann. Dadurch können sowohl zyklische Belastungen als auch Thermalschocks und thermische Gradienten realisiert werden.

6.2.1 Impactschäden

Die Schadenseinbringung erfolgt in Anlehnung an die Deutsche Norm DIN 65561 [1] mit Hilfe eines Fallturms. Der Normaufbau ist in Abbildung 6.1 links zu sehen, wobei die einzelnen Hauptkomponenten folgend aufgeführt sind:

- | | |
|-------------------------------------|------------------------------------|
| 1) Grundplatte mit Stellsäule | 4) Fallbolzen |
| 2) Arretier- und Auslösevorrichtung | 5) Stoßkörper |
| 3) Führungsrohr für Fallbolzen | 6) Auflage mit Einspannvorrichtung |

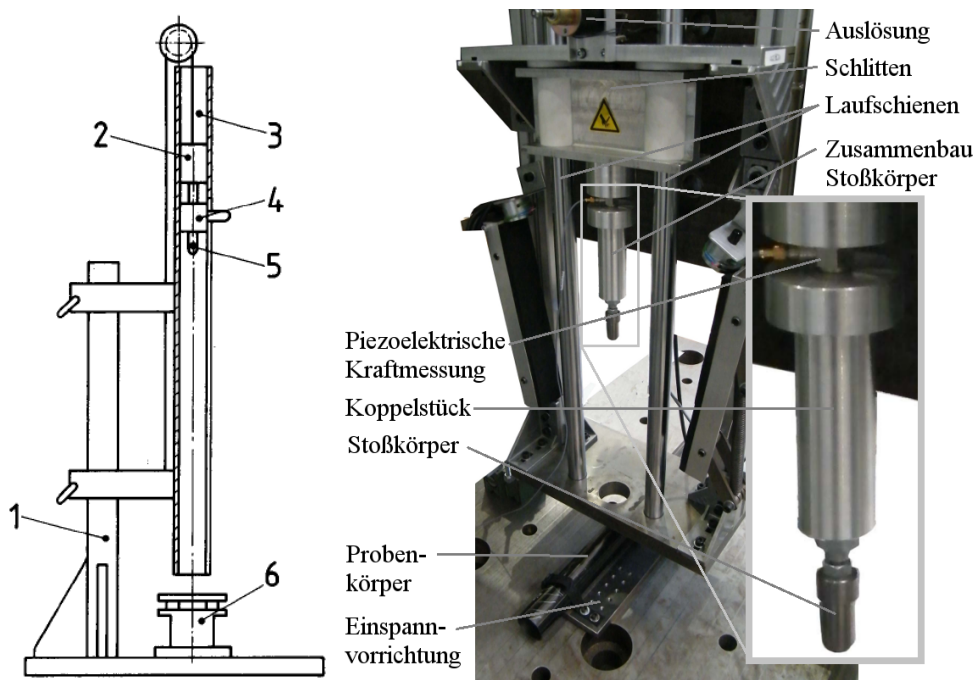


Abbildung 6.1: Fallturm: Normvorrichtung nach DIN 65561 [1] (links); modifizierte Vorrichtung zur Bestimmung der dissipierten Energie (rechts)

Die in dieser Arbeit verwendete Prüfvorrichtung ist in Abbildung 6.1 rechts zu sehen. Die Modifikation des Normaufbaus umfasst im Wesentlichen drei Punkte:

- **Führungsrohr für Fallbolzen** bzw. **Fallbolzen**: Das Führungsrohr und der darin gleitende Fallbolzen wurde durch ein System mit zwei Laufschienen ersetzt, welches die Führung eines Schlittens bzw. eines Querhauptes gewährleistet. Die Führung dieses Schlittens wurde mit entsprechenden Gleitlagerbuchsen ausgeführt, um die Reibung während des Impactversuches zu minimieren.
- **Arretier- und Auslösevorrichtung**: Die Arretier- bzw. Auslösevorrichtung wurde mit einer elektronischen Steuerung versehen, welche eine Fernauslösung ermöglicht, um gefahrlos den Versuch durchführen zu können und um gleichzeitig, falls erforderlich die Versuchsdaten simultan aufzeichnen zu können.

- **Stoßkörper:** Der Stoßkörper bzw. die Anbindung des Stoßkörpers an den Fallbolzen wurde durch ein zusätzliches Bauelement erweitert. Um während des Stoßprozesses die auftretenden Kräfte bzw. die Zeit des Stoßkontaktes messen zu können, wurde eine Kraftmessdose zwischen der Impactmasse und dem Stoßkörper eingebracht. Diese Daten können bei der späteren Analyse mit der eingebrachten Impactenergie korreliert werden. Zwei in Reihe angeordnete Lichtschranken, welche so platziert werden, dass der Fallbolzen diese direkt vor und nach dem Prüflingskontakt durchfährt, dienen als Vergleichsmessung.

Die Impactgeometrie welche in DIN 65561 [1] mit $\varnothing 16 \pm 0,2 \text{ mm}$ in Form einer Halbkugel vorgegeben ist, wird ebenfalls variiert, um verschiedenartige Schädigungen in die Prüflinge einbringen bzw. um den Einfluss der Impactorgeometrie charakterisieren zu können.



Abbildung 6.2: Sammlung unterschiedlicher Impactorgeometrien zur Verwendung in einer Fallbolzenanlage

Abbildung 6.2 zeigt eine Sammlung unterschiedlicher Impactorgeometrien, wobei die unterste Reihe vier Stoßkörper mit halbkreisförmigen Geometrien mit unterschiedlichem Radius beinhaltet. Die gewählten Durchmesser sind: $\varnothing 5 \text{ mm}$, $\varnothing 10 \text{ mm}$, $\varnothing 20 \text{ mm}$ und $\varnothing 25,4 \text{ mm}$.

In der mittleren Reihe befinden sich zwei weitere Stoßkörper mit gleichmäßig gerundeter Oberfläche (rechts), wobei die Impactradien mit 25 mm und 50 mm deutlich größer als die der ersten Reihe sind, sowie ein kegelförmiger Impactkörper mit abgerundeter Spitze. In der obersten Reihe werden die Stoßkörper durch zwei Hilfskörper ergänzt.

Da das Ziel der vorliegenden Arbeit die Detektion und Bewertung von inneren Schäden ist, wird an dieser Stelle lediglich darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse einer ver-

gleichenden Untersuchung anhand von CAI-Probenplatten mit unterschiedlichen Impactorgeometrien keine signifikant unterschiedlichen Schadensflächen zeigen. Verringert man den Kopfradius allerdings zu stark, so kommt es zu einem Durchdringen des Prüflings durch den Impactkörper, wobei eine weitere Erhöhung der Impactenergie zu keiner weiteren Steigung der Schadensfläche führt.

Misst man die jeweilige Schadensfläche und stellt sie mit der Schlagenergie in Relation, können Gesetzmäßigkeiten erarbeitet werden, welche für die betriebssichere Auslegung von Strukturen verwendet werden können. Für detaillierte Informationen sei auch an dieser Stelle auf die Literatur verwiesen (siehe beispielsweise [49]). In der vorliegenden Arbeit ist lediglich das Vorhandensein einer Schädigung und die Bewertung des Einfluss auf die Struktur entscheidend.

6.2.2 Fertigungsfehler

Neben den zuvor beschriebenen Impactschädigungen werden auch im Fertigungsprozess auftretende Fehlstellen im Zuge dieser Arbeit untersucht. Als Fertigungsprozess dient der Prepreg-Autoklav-Prozess. Zwei unterschiedliche Vorgehensweisen werden hier im Speziellen verfolgt. Die Prozessparameter werden gezielt variiert, um definiert Porosität zu generieren, was ein Versagen des Vakuums- oder Druckaufbaus nachstellen soll. Darüber hinaus werden weitere Fehler im Fertigungsprozess, wie beispielsweise das ungewollte Einbringen von Zusatz- und Fremdstoffen, untersucht.

6.2.2.1 Porosität

Die Aushärtung von mittels Prepregs erstellter Lamine im Autoklavprozess erfolgt in den meisten Fällen mit vom Hersteller fest vorgegebenen Temperatur- und Druckverläufen, um ein optimales Ergebnis zu erzielen. Der Temperaturverlauf dient dem Aushärtezyklus des Matrixwerkstoff und trägt nur unwesentlich zur Kompaktierung des Laminates und zur Unterdrückung von Porositäten bei. Die Wahl des geeigneten Autoklavdruckes bzw. des angelegten Vakuumdruckes hat einen großen Einfluss auf die Kompaktierung des Gesamtlaminates und somit auch auf die Entstehung von Poren. In der Praxis tritt dieses Phänomen oft bei zu niedrigen Autoklavdrücken und beim Versagen des Vakuumaufbaus auf, was zum Verlust des angelegten Vakuumdruckes führt.

Abbildung 6.3 zeigt die Ergebnisse einer Parameterstudie, wobei sowohl der Autoklavdruck als auch der Druck des Vakuumaufbaus variiert worden sind. Die verwendeten CFK Schichtlamine haben eine Dicke von 4 mm . Sie verfügen über eine Epoxidmatrix und werden mit beidseitigem Werkzeug gefertigt.

Der Porositätswert ist die integrale Porosität über die gesamte Probenplatte, deren Abmessung $350 \times 310\text{ mm}$ betragen. Der Porositätswert wird hierbei mit einem wassergekoppelten Impuls-Echo-Prüfverfahren mit Hilfe eines 5 MHz Prüfkopfes aus der

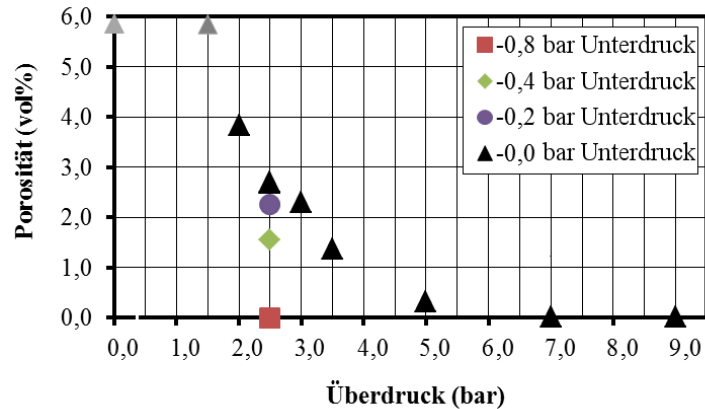


Abbildung 6.3: Darstellung von Porosität durch Variation von Fertigungsparameter

Schwächung des Rückwandechos berechnet, wobei die Probendicke sowie die verwendeten Faser- und Matrixmaterialien berücksichtigt werden. Dies geschieht semiempirisch, wobei die Materialparameter durch einen multiplikativen Faktor berücksichtigt werden, welcher mit Hilfe vergleichender Röntgen Computer Tomographie (CT) Untersuchungen bestimmt wird. Die Genauigkeit dieser Vorgehensweise beträgt $\pm 0,1 \text{ vol } \%$.

Betrachtet man die Ergebnisse bei unterschiedlichen Überdrücken ohne eine zusätzliche Anlegung eines Unterdruckes (Abbildung 6.3), so beobachtet man bei Drücken unter 5 bar einen näherungsweise quadratischen Anstieg der Porosität. Die Ergebnisse bei 0 bar und $1,5 \text{ bar}$ Überdruck können jedoch aufgrund der fast vollständigen Auslöschung des Rückwandsignals nicht genau bestimmt werden. Es ist lediglich möglich, einen Porositätswert größer als $5,8 \text{ vol } \%$ anzugeben. Aus diesem Grund sind diese Werte grau gekennzeichnet.

Bei einem Überdruck von $2,5 \text{ bar}$ wird der Vakuumdruck zusätzlich von 0 bis $-0,8 \text{ bar}$ variiert, um den Einfluss dieses Parameters zu klären. Die Ergebnisse zeigen, dass durch einen Anstieg des Vakuumdruckes eine Verbesserung im globalen Porositätswert erzielt werden kann, wobei ab einem Unterdruck von $-0,8 \text{ bar}$ keine Porosität mehr nachweisbar ist.

Betrachtet man die Porositäten lokal, so ist zu erkennen, dass es bedingt durch die Fertigung zu Zonen mit unterschiedlich hohen Porositätswerten innerhalb einer Platte eines Zyklus kommen kann. Dieses Phänomen ist exemplarisch an der Probenplatte mit $3,0 \text{ bar}$ Überdruck ohne zusätzlichem Vakuumdruck gezeigt und ist in Abbildung 6.4 a) dargestellt. Aufgrund quadratischer Werkzeugplatten ($350 \times 350 \times 10 \text{ mm}$) kommt es beim Anlegen des Autoklavdruckes zu einer geringfügigen Durchbiegung der Werkzeugplatten, da das Laminat nicht den gesamten Plattenbereich ausfüllt (Laminatabmessungen: Breite: 310 mm , Höhe: 350 mm). Dieses Phänomen verursacht einen ungleichmäßigen Verlauf der Plattendicke, welche um etwa $5/10 \text{ mm}$ schwankt. Da zur Berechnung der Porosität eine Funktion in Abhängigkeit der Plattendicke gewählt

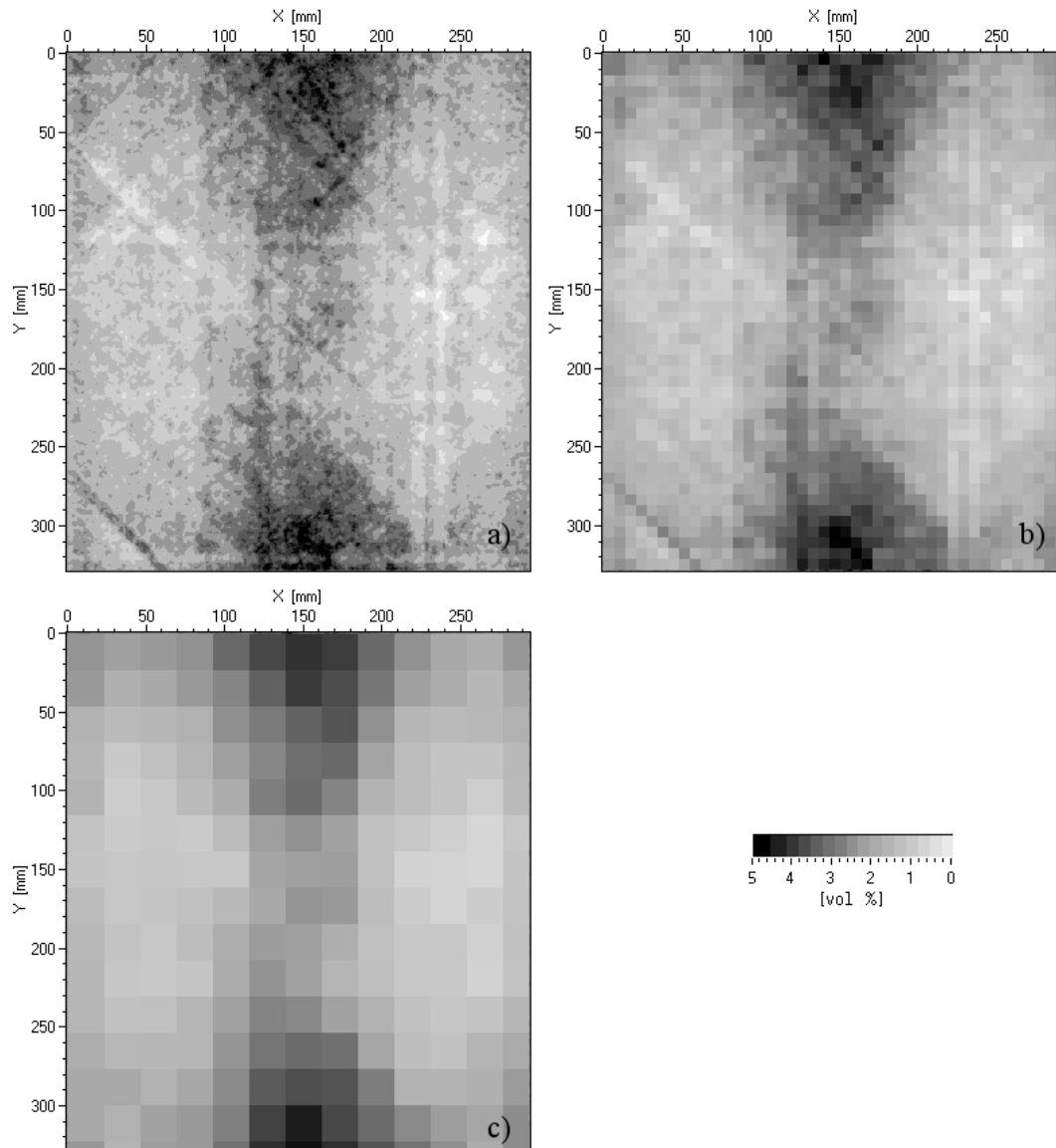


Abbildung 6.4: CFK Probenplatte bei 3,0 *bar* Überdruck ohne zusätzlichen Vakuumdruck

wird, kann die nicht konstante Plattendicke direkt berücksichtigt werden. Die gewählte geometrische Auflösung des wassergekoppelten Ultraschallprüfsystems beträgt im vorliegenden Fall 0,5 *mm*.

Bei genauerer Betrachtung des Porositätsplots ist zu erkennen, dass sich linienförmige Artefakte unter einem Winkel von 45° ausbilden, was von einer ungleichförmigen Verteilung der Faserstränge in den 45° -Lagen herrührt. Zudem unterscheiden sich auch jeweils benachbarte Messungen stark voneinander im Porositätswert, was als Rauschen zu sehen ist. Da im Allgemeinen Porosität mit Hilfe eines mechanischen Abminderungsfaktors flächig berücksichtigt wird, muss auch die zerstörungsfreie Prüfung entsprechende Bereiche mit gemittelten Porositäten bereitstellen. Nun stellt sich die Frage nach der sinnvollen Größe dieser Bereiche. Abbildung 6.4 b) zeigt eine integrale Po-

rositätsberechnung, welche sich auf Referenzelemente mit Abmaßen von $6 \times 6 \text{ mm}$ beziehen. Es ist zu erkennen, dass die lokalen Schwankungen der Porosität deutlich abgenommen haben. Vergrößert man die Fläche zur integralen Auswertung auf $20 \times 20 \text{ mm}$ (Abbildung 6.4 c), so ist der Grad an Inhomogenität weiter reduziert. Dabei lassen sich drei flächige Zonen erkennen, welche ähnliche Porositätskennwerte aufweisen. Bildet man einen durchschnittlichen Porositätswert für die gesamte Probenplatte, so erhält man ca. $2,2 \text{ vol } \%$.

6.2.2.2 Einschlüsse

Häufig zu beobachtende Fertigungsfehler sind Einschlüsse von Fremdmaterialien, wie etwa Verunreinigungen (Fette, Öle, Schmutz) aber auch Zusatzstoffe wie Folien, die im Prepregverfahren nicht vollständig von der entsprechenden Prepreglage entfernt oder in anderen Prozessschritten versehentlich in den Laminataufbauten integriert wurden. Um diese Effekte systematisch untersuchen zu können, wird in dieser Arbeit besonderes Augenmerk auf folienartige Einschlüsse gelegt, welche in einem speziellen Probenkörper, nämlich in der zuvor beschriebenen Referenzplatte, in unterschiedlichen Tiefen eingebracht werden (vergleiche dazu Abbildung 5.1: Bereich 1). Diese Referenzplatte umfasst sowohl nichtmetallische wie auch metallische, repräsentative Einschlüsse. Sie weist darüber hinaus Bereiche mit sich überlappenden Einschlüssen auf, um speziell die Detektierbarkeit von verdeckten Fehlstellen analysieren zu können.

6.2.3 Thermische Degradation

Ein wichtiger Treiber für die thermische Degradation von Faserverbundwerkstoffen stellen vor allem thermische Wechsellasten dar, wie sie im Betrieb von CFK-Strukturen im Flugzeugbau, aber auch in anderen Bereichen wie dem Automobilbau häufig auftreten. In Kombination mit anderen Umwelteinflüssen (z.B. feuchte Umgebung oder Vorhandensein korrosiver Medien) oder bei einer Vorschädigung, kann es zu einer Veränderung der mechanischen Kennwerte kommen. Aus diesem Grund ist es notwendig, verschiedenartige Thermalzyklen zu realisieren, um die realen Belastungen, welchen das Material später im Betrieb ausgesetzt wird, nachbilden zu können. Ein allgemeiner Begriff für die Degradation polymerbasierter Werkstoffe ist die Alterung, die durch die zuvor beschriebenen Umweltbedingungen beschleunigt wird (siehe [10] für eine Begriffsdefinition bzw. [4] für standardisierte Methoden zur experimentellen Auslagerung von Faserverbundwerkstoffen).

In der vorliegenden Arbeit sollen neben schwellenden bzw. alternierenden Thermallasten auch Thermalschockbelastungen betrachtet werden. Darüber hinaus soll es möglich sein, bestimmte Temperaturprofile, wie sie im Einsatz vorkommen, gezielt darstellen zu können.

Diese Forderungen sind mit einer konventionellen Temperaturkammer nur schwer in

einem zeitlich akzeptablen Rahmen zu realisieren. Aus diesem Grund wird für die vorliegenden Untersuchungen ein vertikales Zweikammersystem aufgebaut, das folgende Funktionalitäten beinhaltet: Temperaturzyklen, Temperaturprofile und Thermalshocks.

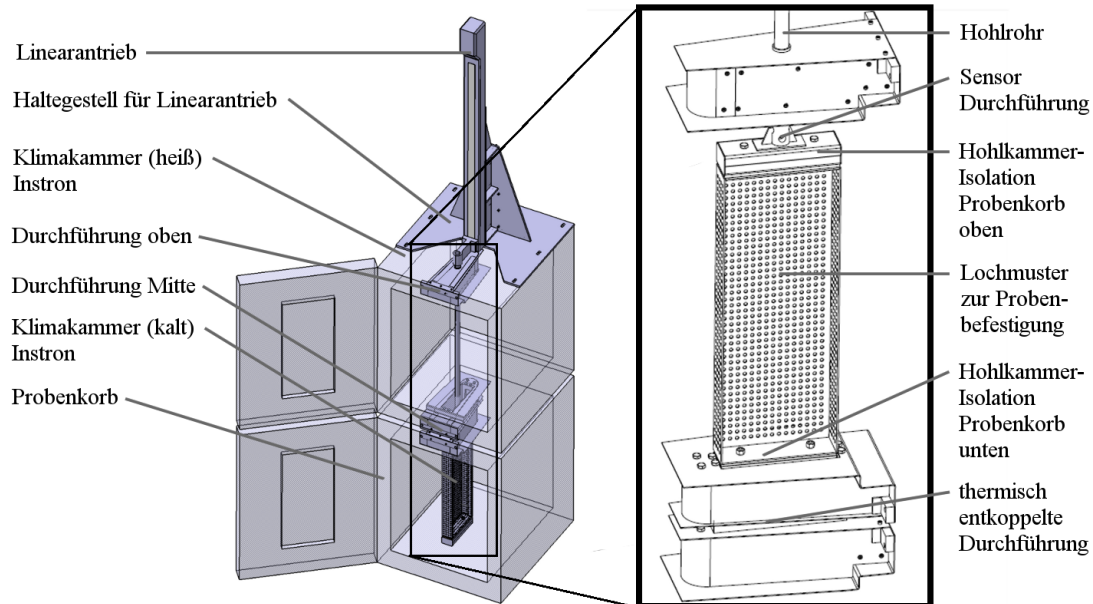


Abbildung 6.5: Schematische Darstellung eines Zweikammersystems (links) bzw. Detailansicht des Probenkorbes und der Durchführungen bzw. Lagerungen (rechts)

Das System besteht aus zwei Temperaturkammern, wie in Abbildung 6.5 gezeigt, die übereinander angeordnet sind und Temperaturen zwischen -150°C und $+350^{\circ}\text{C}$ erreichen können. Die maximal somit erzielbare Temperaturdifferenz zwischen kalter und warmer Kammer beträgt 500 Kelvin, was den Anforderungen in der Luft- und Raumfahrt in den meisten Fällen genügt. Der Probenkorb kann mittels eines Linearantriebes zwischen den Kammern verfahren werden. Abbildung 6.5 links zeigt die untere Position während die Detailansicht rechts die Verhältnisse in der oberen Position verdeutlicht. Darüber hinaus sind mit dem vorliegenden Aufbau auch Zwischenpositionen möglich.

Durch das gezielte Anfahren bzw. das Verweilen an verschiedenen Zwischenpositionen ist es möglich, verschiedene Temperaturprofile zu realisieren. Befindet sich der Probenkorb vollständig in einer der beiden Kammern, so werden diese durch ein thermisch vom Probenraum getrenntes Isolationsmodul (thermisch entkoppeltes Hohlprofil direkt ober- und unterhalb des Probenkorbes) voneinander isoliert. Auf diese Weise kann der konvektive Wärmeübergang zwischen den beiden temperierten Kammern verhindert werden. Die Steuerung und Regelung dieses Systems wird mit dem Softwarepaket Labview (siehe beispielsweise [37]) umgesetzt, wobei mit Hilfe objektorientierter Programmierung ein modular erweiterbares Konzept entwickelt wurde. Das Flussdiagramm in Abbildung 6.6 verdeutlicht diese Vorgehensweise. Abgebildet ist die Zyklensteuerung, die eine Teilprozedur des Gesamtablaufes bildet und über eine gra-

fische Benutzeroberfläche (GUI) die Bedienung ermöglicht. Die Grundbausteine sind ein zeitbasiertes und ein temperaturbasiertes Steuerungsmodul. Durch die Kombination beider Bausteine und unter Berücksichtigung von frei bestimmbaren Zwischenpositionen können somit auch vorgegebene Temperaturverläufe nachgefahren werden. Es stehen dabei drei Modi zur Verfügung.

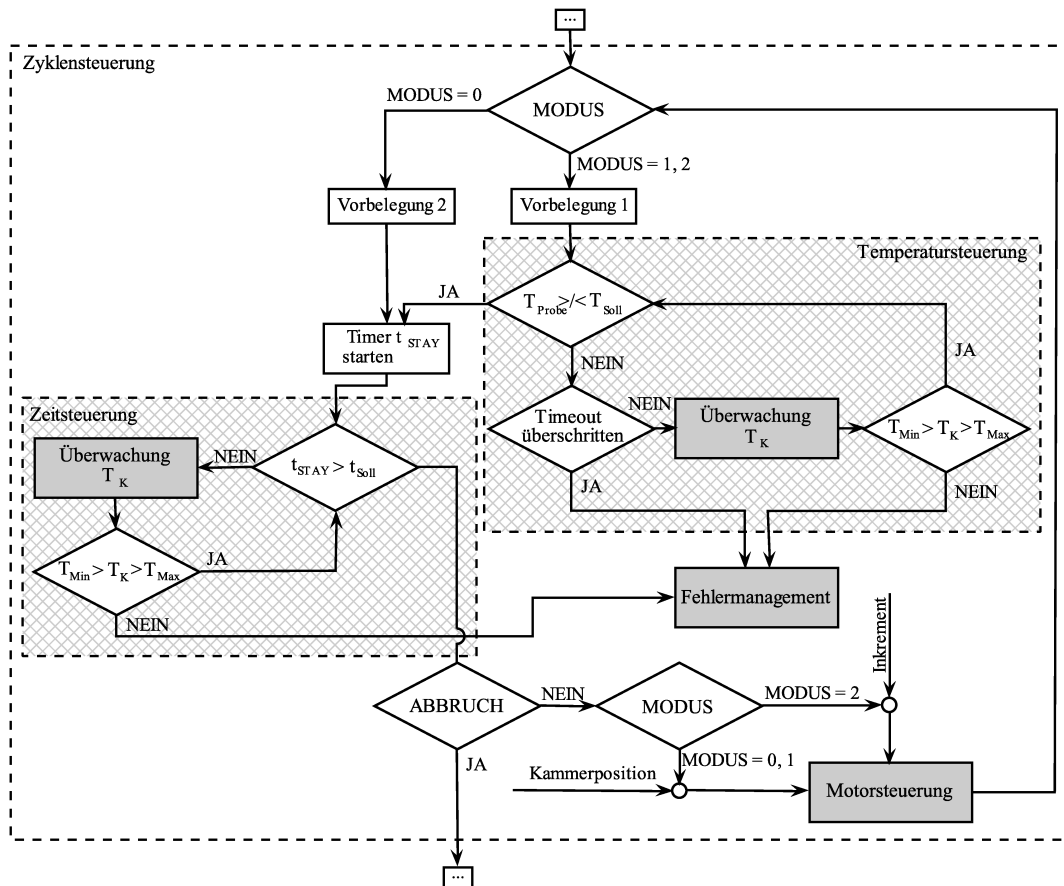


Abbildung 6.6: Flussdiagramm der Thermalsteuerung

- Zeitsteuerung (MODUS = 0):** In diesem Modus wird der Probenkorb zwischen beiden Klimakammern verfahren (evtl. mit Halt an der Mittelposition) und verweilt eine vorgegebene Dauer (t_{STAY}) in dieser Stellung (Baustein *Zeitsteuerung*), bevor erneut die andere Kammer angefahren wird (Baustein *Zeitsteuerung* unter Vorgabe der Kammerposition). Dieser Modus wird bevorzugt zur Darstellung von Schockzuständen verwendet. Zusätzlich wird die Kammertemperatur überwacht, wobei bei zu großen Schwankungen ein Abbruch des Versuchsablaufes erfolgt.
- Temperatursteuerung (MODUS = 1):** In dieser Betriebsart wird zunächst die Wunschposition angefahren, bevor die Probestemperatur mit einer gewünschten Solltemperatur verglichen wird (Baustein *Temperatursteuerung*). Gleichzeitig erfolgt auch eine Überwachung der Kammertemperatur. Wird die Wunschtemperatur nach einem gewissen Zeitintervall *Timeout* nicht erreicht, wird der Ver-

suchslauf unterbrochen. Wird die Wunschttemperatur erreicht, so wird nachgeschaltet der Zeitsteuerungsbaustein durchlaufen, um eine gewünschte Haltedauer nach Erreichen der Vorgabetemperatur realisieren zu können. Abschließend wird der Probenkorb in die nächste Kammer verfahren (Baustein *Zeitsteuerung* unter Vorgabe der Kammerposition).

- **Funktionssteuerung (MODUS = 2):** Die Funktionssteuerung ist eine Kombination aus den zuvor beschriebenen Betriebszuständen. Der Unterschied zu Modus 0 und 1 ist, dass neben den Kammerpositionen noch diverse Zwischenpositionen angefahren werden können. Durch geschickte Wahl dieser Positionen in Kombination mit festgelegten Haltezeiten können unterschiedliche Rampen bzw. Temperaturverläufe erreicht werden. Der variable Verfahrensweg ist im Flussdiagramm durch die Variable *Inkrement* bezeichnet, welche dem Modul Motorsteuerung übergeben wird.

6.3 Bewertung der Detektionsfähigkeit anhand unterschiedlicher Schädigungstypen, -größen und -geometrien in verschiedenen Tiefen

In diesem Kapitel soll die Leistungsfähigkeit des SPT-Systems mit Hilfe eines Vergleichs mit den Ergebnissen eines wassergekoppelten Impuls-Echo-Ultraschallsystems untersucht werden. Neben ebenen Probenkörpern mit diversen unterschiedlichen Fehlertypen dienen auch stark gekrümmte CFK-Bauteile, hier im speziellen CFK-Rohre, als Anwendungsbeispiele. Während, im folgenden Kapitel detailliert dargelegt, die thermische Prüfung dieser Strukturen ohne zusätzlichen Aufwand erfolgen kann, müssen bei der akustischen Prüfung entsprechende Hilfsvorrichtungen konzipiert und gebaut werden.

6.3.1 Akustische Analyse

Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, stellt die Ultraschallprüfung in vielen Fällen das Referenzsystem in Bezug auf zerstörungsfreie Prüfmethoden dar (siehe beispielsweise [63]). Sie liefert je nach Anforderung flächige und räumliche Informationen über den inneren Zustand einer Struktur. In der Luft- und Raumfahrt wird dieses System hauptsächlich für ebene oder leicht gekrümmte Strukturen eingesetzt. Stark gekrümmte Strukturen, wie Rohrstrukturen, treten nur vereinzelt auf. Da ein Schwerpunkt dieser Arbeit die Charakterisierung gekrümmter Strukturen darstellt, soll an dieser Stelle auf die Methodik für deren Bewertung genauer eingegangen werden, bevor der Schwerpunkt auf die Sensibilität des Systems zur Identifizierung unterschiedlicher Fehlstellen bzw. Defekte gelegt wird.

6.3.1.1 Prinzipien zur Messung gekrümmter Oberflächen

Stark gekrümmte Strukturen, wie Rohrstrukturen werden meist mit gerichteten Wellen zerstörungsfrei überprüft. Dazu werden in der Regel mittels Schrägeinschallung Wellen in das Bauteil eingeleitet, welche sich dann entlang eines Wellenpfades durch den Prüfling ausbreiten und an anderer, oder bei umlaufenden Rohrwellen an gleicher Stelle empfangen werden. Diese Prüfung ermöglicht eine integrale Aussage über den Schadensstatus entlang dieses bestimmten Wellenpfades (siehe dazu beispielsweise [51]). Sie liefert allerdings kein flächiges Schadensbild. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit ein komplementärer Ansatz gewählt.

Durch geeignete Ausrichtung und Fokussierung einer Impuls-Echo Sonotrode relativ zu einem dreidimensional gekrümmten Prüfling soll eine Teil- bzw. eine vollständige Reflektion des eingekoppelten Signals an Grenzflächen und insbesondere an der Bauteilrückwand erreicht werden. Diese Vorgehensweise erlaubt in weiterer Folge eine flächige Darstellung von Fehlstellen eines dreidimensionalen Prüfobjektes in Analogie zu ebenen Prüflingen.

Dieser Ansatz soll experimentell an einfach gekrümmten Strukturen verifiziert werden, wobei gleichzeitig der Einfluss der Krümmung auf die Prüfergebnisse evaluiert wird. Zu diesem Zweck wird eine Prüfvorrichtung konzipiert, die es ermöglicht, Rohrstrukturen mit variablem Durchmesser und mit variabler Länge untersuchen zu können [74]. Die Vorrichtung ist in Abbildung 6.7 dargestellt.

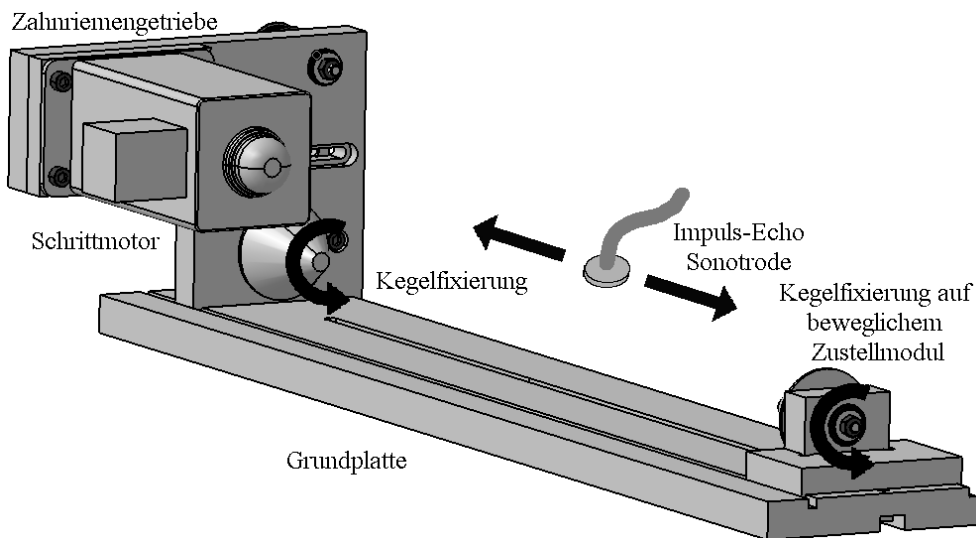


Abbildung 6.7: Ultraschall Prüfeinrichtung zur automatisierten Prüfung von Rohrstrukturen [74]

Die Fixierung des Prüflings erfolgt über zwei zentrisch zueinander ausgerichtete, drehbare Kegelfixierungen, welche mit einer Elastomerschicht zur Erhöhung des Reibbeiwertes versehen sind. Das rechte Modul ist in der Längsachse verschiebbar gestaltet, um unterschiedliche Rohrlängen von 10 bis 500 mm prüfen zu können. Des Weiteren können mittels der Kegelfixierung verschiedene Rohrrinnen- und Außendurch-

messer bis zu einem Außendurchmesser von 50 mm geprüft werden. Zur Erstellung eines flächigen Ultraschallbildes (beispielsweise C-Bild der Schwächung des Rückwandsignales) dient ein Schrittmotor in Verbindung mit einem spielfreien Zahnriemengetriebe, das den linken Kegelstumpf antreibt und mit der Messeinheit synchronisiert ist. Die gesamte Vorrichtung befindet sich während der Bauteilprüfung in einem Wasserbecken.

Die Erstellung eines flächigen Fehlerbildes geschieht durch eine Kopplung einer Li-
nearinheit mit der zuvor beschriebenen Dreheinheit bei gleichzeitiger Aufnahme der Prüfposition, welche eine Funktion der Längskoordinate x und des Drehwinkels φ ist. Durch eine nachgeschaltete Datenaufbereitung können die erhaltenen Daten sowohl planar als quasi C-Bilder als auch dreidimensional dargestellt werden. Die dreidimensionale Darstellung gewinnt vor allem bei der Prüfung von mehrfach gekrümmten Bauteilen an Bedeutung, da dann eine Abwicklung der Fläche nicht mehr möglich ist.

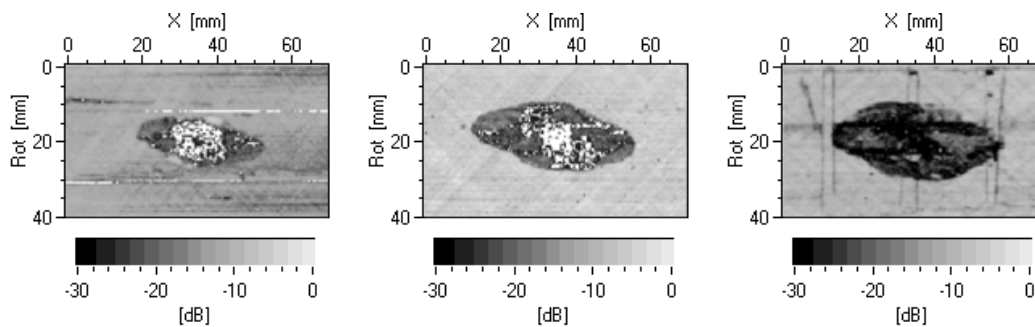


Abbildung 6.8: Ultraschallprüfung nach Impactbelastung bei unterschiedlichen Objektdurchmessern: Darstellung des Rückwandsignals (links: $\varnothing 15\text{ mm}$; mittig: $\varnothing 35\text{ mm}$; rechts: $\varnothing 50\text{ mm}$)

Zur Charakterisierung des Einflusses der Krümmung auf die Schwächung des eingekoppelten Signals erfolgt eine vergleichende Messung verschiedener Krümmungen im Bereich von 15 mm bis 50 mm Durchmesser. Die Probenkörper aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff weisen jeweils den gleichen Lagenaufbau $([+45, -45, 0]_s)$ und die gleiche Wandstärke von $1,6\text{ mm}$ auf. Abbildung 6.8 zeigt die Ergebnisse dreier Untersuchungen mit drei verschiedenen Durchmessern (von $\varnothing 15\text{ mm}$ über $\varnothing 35\text{ mm}$ bis $\varnothing 50\text{ mm}$) nach einer Impactlast von 5 J . Der Vergleich der Messungen zeigt, dass in allen drei Fällen die geschädigte Fläche eindeutig identifiziert und von den umliegenden ungeschädigten Bereichen isoliert werden kann. Somit lässt sich auch eine eindeutige Schadensfläche angeben, welche durch eine graustufenbasierte Auswertung gewonnen werden kann. Diese Fläche beträgt $866,7\text{ mm}^2$ für das $\varnothing 50\text{ mm}$ Rohr (Abbildung 6.8 rechts), $1748,5\text{ mm}^2$ für das $\varnothing 35\text{ mm}$ Rohr (Abbildung 6.8 Mitte) und $293,0\text{ mm}^2$ für das $\varnothing 15\text{ mm}$ Rohr (Abbildung 6.8 links). Somit ist eine sinkende Schadensfläche bei einer Reduzierung des Durchmessers zu beobachten.

Betrachtet man die Signalgüte genauer und hier im speziellen die Schadensfläche, so ist für das $\varnothing 50\text{ mm}$ Rohr an jedem Messpunkt ein auswertbares Signal vorhanden, was sich in einem der Dämpfung proportionalen Grauwert äußert. Mit anderen Worten

sind hier keine punktuellen Signalverluste¹ zu beobachten. Das $\varnothing 35 \text{ mm}$ Rohr weist vor allem im Zentrum der Schadensfläche einige weiße Bereiche auf, welche einem Signalverlust zu Grunde liegen. Setzt man diese Signalfehlstellen in Bezug zur integralen Schadensfläche, so ist bei Rohren mit $\varnothing 15 \text{ mm}$ Durchmesser dieses Phänomen relativ gesehen noch häufiger anzutreffen. Darüber hinaus kommt es, wie in Abbildung 6.8 links zu sehen, auch im ungeschädigten Bereich zu horizontal verlaufenden Linien mit fehlerhaften Signalen. Dies ist höchstwahrscheinlich auf die große Krümmung und die damit verbundene Streuung des Signals bei ungenügender zur Oberfläche rechtwinkliger Ausrichtung zurückzuführen. Im vorliegenden Fall befinden sich an den entsprechenden Stellen minimale Fertigungsfehler in Form von Längsnähten aufgrund des Fertigungsprozesses mit außen geschlossenen, geteilten Formen. Die Stoßstellen der geteilten Form resultieren in Grate, welche zu diesem Signalverlust führen. Obwohl die anderen Rohrstrukturen mit Durchmessern von $\varnothing 50 \text{ mm}$ und $\varnothing 55 \text{ mm}$ diese Nähte ebenfalls aufweisen, kommt es bei der akustischen Untersuchung in diesen beiden Fällen zu keinem Signalverlust. Diese Tatsache bestätigt die zuvor postulierte Vermutung.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Untersuchung von Impactschädigungen bei Rohrstrukturen zwischen Durchmessern von $\varnothing 15 \text{ mm}$ und $\varnothing 50 \text{ mm}$ möglich ist, wobei die Schadensgrenzen eindeutig detektierbar und die Schadensflächen somit ermittelbar sind. Soll eine automatisierte Auswertung und Bewertung der Schadensfläche erfolgen, so sind besondere Maßnahmen zu ergreifen, um die punktuellen Signalverluste in geeigneter Form zu berücksichtigen, sodass eine stabile Gesamtprozedur gewährleistet ist. In weiterer Folge stellt sich auch die Frage nach der Detektion von in Hinblick auf Stoßschäden abweichenden Schadensmustern bzw. Schädigungsarten oder mit anderen Worten ausgedrückt, nach der Defektsensitivität dieses Verfahrens.

6.3.1.2 Defektsensitivität

In der Literatur sind unterschiedliche und auch teilweise widersprüchliche Angaben über die Defektsensitivität von diversen Ultraschallverfahren zu finden. Die Empfindlichkeit des Systems hängt nicht nur von den gewählten Wirkprinzipien (Wasser- oder Luftankopplung, Schräg oder Senkrechteinschallung, Durchschallung oder Impuls-Echo-Verfahren, etc.) sondern insbesondere von den Prüfbedingungen, -aufbauten und den gewählten -frequenzen ab (siehe beispielsweise [40], [97], [18] oder [51]). Darüber hinaus gibt es zahlreiche Möglichkeiten, die Sensibilität zu steigern, beispielsweise durch die Einbindung von Festkörperwellen [89] oder die Einbindung von nichtlinearen Reflexionseigenschaften [88].

¹Das eingekoppelte Signal wird vollständig absorbiert bzw. in eine Weise reflektiert, dass das zurückgeworfene Signal nicht mehr auf den Sensor trifft

All diese Maßnahmen sind mit einer Erhöhung der Komplexität der Prüfung gekoppelt und bei realen Prüfaufgaben bisweilen nur bedingt praktikabel.

In dieser Arbeit wird ein experimenteller Ansatz gewählt, um die Leistungsfähigkeit bzw. die Sensitivität eines wassergekoppelten Referenzsystems, wie es sich in vielen Industriezweigen im täglichen Einsatz befindet, zu charakterisieren. Zu diesem Zweck wird die in Kapitel 5.2.1 beschriebene Referenzplatte aus Kohlenstofffaserverbundwerkstoff (Grundabmessungen: 320 mm x 320 mm x 4 mm) verwendet, welche in weiterer Folge auch mittels SPT untersucht wird und somit als Vergleichsgrundlage dient.

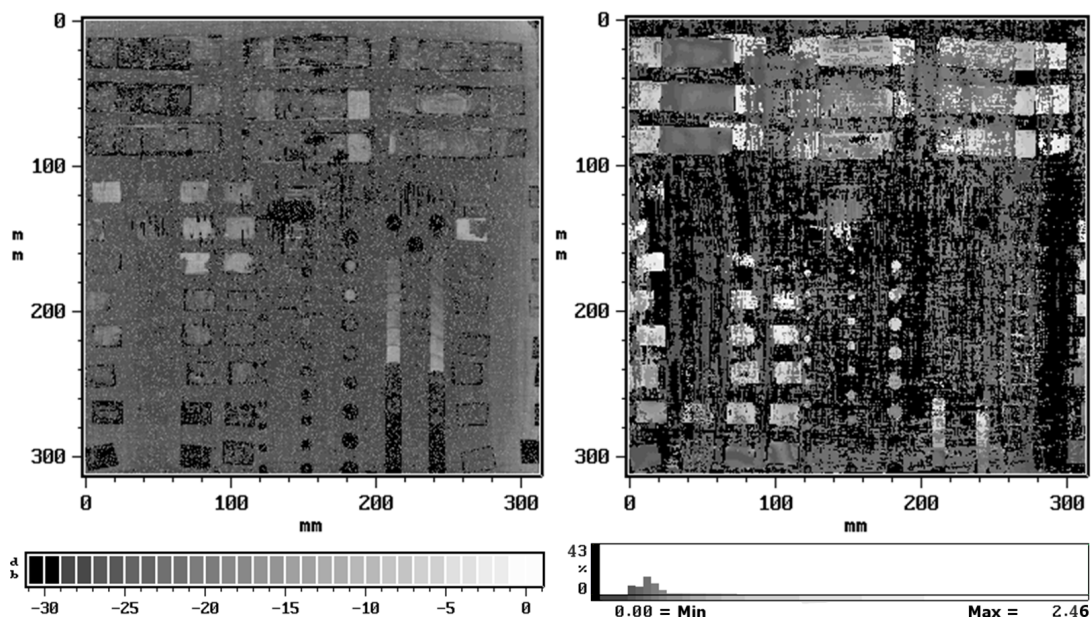


Abbildung 6.9: Ultraschalluntersuchung an Referenzplatte mit künstlichen Fehlstellen (10 MHz Prüfkopf): Dämpfung des Rückwandechos (links) und Darstellung der Fehltriefe (rechts)

In Abbildung 6.9 ist das Ergebnis einer Impuls-Echo-Ultraschalluntersuchung (Rastergröße: 250 μm) dargestellt. Abbildung 6.9 links zeigt ein flächiges Schadensbild, wobei hier die Dämpfung des Rückwandsignals einzelnen Grauwerten zugeordnet ist. Auf der rechten Seite dieser Abbildung ist ein flächiges Tiefenbild zu sehen.

In beiden Darstellungen ist deutlich zu erkennen, dass aufgrund von Fertigungseinflüssen die Defektpositionen im realen Bauteil in Bezug zur geplanten Position leicht verschoben sind (vgl. dazu Abbildung 5.1 bzw. Appendix A.2). Besonders groß sind die Abweichungen im ersten Bereich, wobei neben einer Verkipfung der inneren Fehlstellen eine Verschiebung der äußeren Defekte hin zum Probenrand zu erkennen ist. Da die Probenplatte nach der Fertigung mechanisch besäumt wurde, sind Teile der Fehlstellen der äußeren Reihe nicht mehr vorhanden.

Darüber hinaus konnten nach dem Autoklavprozess nicht alle außenliegenden und überstehenden PTFE-Streifen entfernt werden. Wie in Abbildung 6.10 dargestellt, führte das Verpressen der Einzellagen während des Autoklavprozesses zu einem Fließen

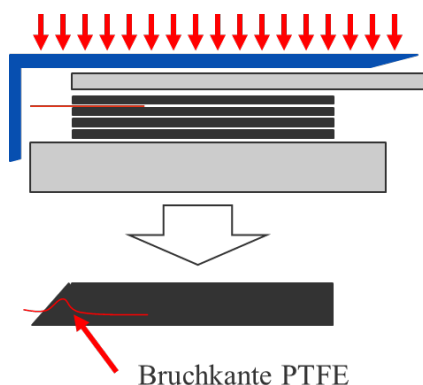


Abbildung 6.10: Problematik bei der Herstellung künstlich eingebrachter Delaminationen

in Verbindung mit einer etwa zehnpromtigen Dickenabnahme im Randbereich. Dies bewirkte eine geringfügige Verschiebung der Einzellagen zueinander im Randbereich, was in einer Wellenbildung der PTFE-Lagen resultiert. Beim Entfernen ergibt sich somit eine lokale Spannungsspitze im Bereich der Ondulation, was zu einem Reißen der Folie führt.

Im vorliegenden Fall konnten daher nicht alle Folien entfernt werden, wie in Abbildung 6.9 links durch eine Schwächung des Rückwandsignals größer gleich 30 dB am rechten unteren Plattenrand zu sehen ist, was einen charakteristischen Wert für den so entstehenden Luftspalt darstellt. Die darüber liegenden PTFE Folien befinden sich noch im Laminat (ca. -20 dB Signalschwächung). Die zweite Reihe der in unterschiedlichen Tiefen sich befindenden PTFE-Streifen verhält sich ähnlich. Lediglich bei den Übergangsbereichen ist ein Dämpfungsunterschied zu erkennen, die Innenbereiche aller Fehlstellen weisen ein ähnliches Verhalten wie die ungestörten Plattenbereiche auf. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass nicht wie beabsichtigt Grenzstellen geschaffen werden konnten, welche ähnliches Verhalten wie Delaminationen aufweisen würden.

Aus diesem Grund ist der Bereich zwei detaillierter zu betrachten, wobei die an der Rückseite angebrachten Bohrungen und mechanischen Einschnitte eben diese Grenzstellen (Übergang CFK-Platte zu Medium Luft) darstellen. Diese Vorgehensweise wird in der Regel für thermische Systeme favorisiert wird. Abbildung 6.9 links zeigt deutlich, dass der Großteil der mechanisch eingebrachten Fehlstellen durch eine Schwächung des Rückwandsignals zu erkennen sind.

Vergleicht man die Schwächung des Rückwandsignals (Abbildung 6.9 links) mit der Auswertung der Fehlertiefe (Abbildung 6.9 rechts), so sind Unterschiede zu erkennen. Diese Unterschiede rühren daher, dass im Fehlertiefenbild vor allem die der Vorder- und Rückseite nahen Fehlstellen den entsprechenden Begrenzungsechos des Ultraschallsignals zugeordnet werden und daher nicht im Fehlertiefenbild erscheinen.

Eine Erhöhung der Ultraschallfrequenz würde eventuell Abhilfe schaffen, wobei allerdings die Tiefenreichweite reduziert wird. Die tiefliegenden Fehlstellen können so-

mit schlechter detektiert werden. Prinzipiell können alle in Bereich zwei befindlichen Fehlstellen mittels Impuls-Echo-Ultraschall identifiziert werden. Auch die mit Harz gefüllten Bohrungen (Harznester) sind eindeutig erkennbar. Die Ergebnisse dieses Bereiches offenbaren darüber hinaus einen Fertigungsfehler links schräg oberhalb der eingebrachten Bohrungsreihen (fast vollständige Signaldämpfung des Rückwandechos - schwarz dargestellt - bzw. bezüglich der Tiefenlage nahe an der Oberfläche - dunkelgrau im Tiefenbild zu sehen). Dieser Defekt kann als oberflächennaher, trockener Bereich charakterisiert werden, welcher aufgrund der ungenügenden Fasertränkung Lufteinschlüsse aufweist, welche ein ähnliches akustisches Verhalten wie Delaminationen bewirken.

Die Ultraschallergebnisse des dritten Bereichs zeigen tendenziell gute Ergebnisse. Betrachtet man die Schwächung des Rückwandsignals, so sind alle metallischen Einschlüsse deutlich zu erkennen (Stahl-, Titan- und Aluminiumfolien), während die GFK-Einschlüsse nur schemenhaft erkannt werden können. Der Schwächungswert unterscheidet sich nicht signifikant von dem des Laminates (Ähnliches Verhalten wie die eingebrachten PTFE-Folien in Bereich 1).

Der vierte Bereich stellt bei der akustischen Prüfung ein Problem dar. Die in der Plattenfertigung durchtrennten Faserstränge können nicht detektiert werden. Die thermischen Simulationsergebnisse aus Kapitel 5.2.4 lassen ähnliche Ergebnisse auch für die thermische Untersuchung vermuten.

Der fünfte Bereich wird mit Hilfe eines gesonderten Detailausschnitts betrachtet, wobei in Abbildung 6.11 die dementsprechenden Ergebnisse zu sehen sind [76]. Im Großen und Ganzen sind die Antwortsignale aller drei eingebrachten Zusatzwerkstoffe (Aluminium-, Stahl- und Titanfolien) miteinander vergleichbar, wobei die jeweils der Oberfläche am nächsten liegenden Bereiche (in der Abbildung links) am deutlichsten zu erkennen sind. Aufgrund des relativ feinen Punktrasters von $100 \mu m$ sind die Grenzen der Einschlüsse deutlich zu erkennen.

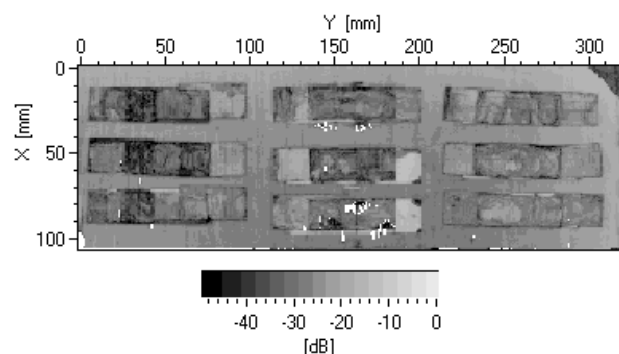


Abbildung 6.11: Teilausschnitt Referenzplatte: Bereich fünf mit sich überlappenden metallischen Einschlüssen: Schwächung des Rückwandsignals – Erste Reihe: Titan; zweite Reihe: Stahl; dritte Reihe: Aluminium (10 MHz Prüfkopf)[76]

Betrachtet man die Gruppierung aus Einschlüssen genauer und vergleicht diese mit der schematischen Darstellung in Abbildung 5.2, so können aus dem Dämpfungsbild fünf unterschiedliche Zonen erkannt werden, welche einen jeweils charakteristischen Dämpfungswert aufweisen. Die Bereiche eins und zwei bzw. sechs und sieben sind nicht voneinander zu trennen und weisen den gleichen Graustufenwert auf.

Zusammenfassend ist eine gute Eignung dieses Standardverfahrens zur Detektion der meisten eingebrachten Defekte zu beobachten.

6.3.2 Sequentielle Phasenmodulierte Thermographie (SPT)

Bevor auf die Ergebnisse der Untersuchung der Referenzplatte mittels SPT detailliert eingegangen wird, soll analog zur Beschreibung des US-Systems zunächst die Eignung der SPT-Methode für die Untersuchung von gekrümmten Strukturoberflächen untersucht werden.

Im Zuge der Ergebnisbeschreibung der Referenzplatte wird im Folgenden immer wieder ein Vergleich zu den zuvor präsentierten Resultaten des Ultraschall Referenzsystems gezogen, um Parallelitäten bzw. Unterschiede herauszuarbeiten zu können.

6.3.2.1 Prinzipien zur Messung gekrümmter Oberflächen

Die Messung von gewölbten und stark gekrümmten Strukturen bedarf, wie Ergebnisse einer vergleichenden Untersuchung an rohrförmigen Probenkörpern mit unterschiedlichem Außendurchmesser zwischen $\varnothing 15\text{ mm}$ und $\varnothing 50\text{ mm}$ zeigen (vergleiche dazu Abbildung 6.12), keinen im Bezug zur Plattenprüfung zusätzlichen Prüfaufwand. Der einzige Unterschied im Prüfaufbau, der benannt werden kann, ist die unter Umständen abweichende Anordnung der Anregungsquellen, um ausreichend Wärmeenergie in z.B. rohrförmige Prüflinge einkoppeln zu können. So ist es sinnvoll, mehrere Strahlungsquellen zur gleichförmigen Ausleuchtung zu verwenden, welche in unterschiedlichen Winkeln angeordnet sind.

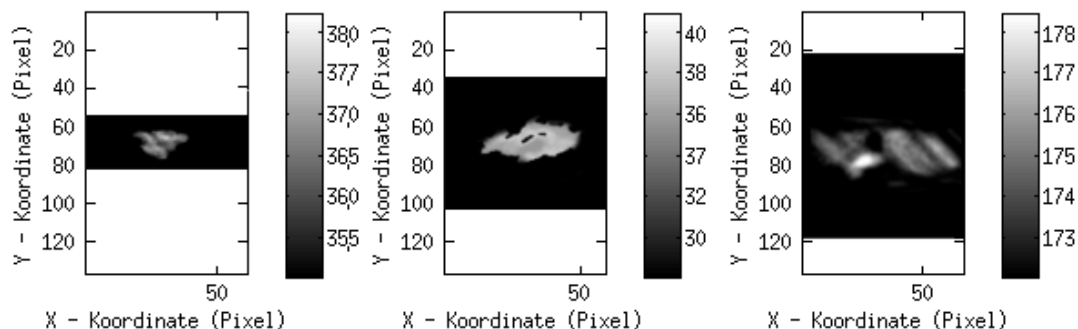


Abbildung 6.12: SPT Untersuchung nach Impactbelastung bei variablen Durchmessern (links: $\varnothing 15\text{ mm}$; Mitte: $\varnothing 35\text{ mm}$; rechts: $\varnothing 50\text{ mm}$)

Stellt man den gleichen Vergleich unterschiedlicher Probendurchmesser wie in Kapitel 6.3.1.1 für die SPT-Methode auf, so erhält man die in Abbildung 6.12 gezeigten Ergebnisse, wobei es sich um Phasenbilder von Rohrstrukturen mit unterschiedlichen Durchmessern handelt. Die entsprechenden Ergebnisse der akustischen Prüfung sind in Abbildung 6.8 dargestellt. An dieser Stelle ist zu beachten, dass die akustischen Ergebnisse eine Rohrabwicklung darstellen, wobei die thermischen Ergebnisse eine perspektivische Aufnahme der Rohroberfläche sind. Aus diesem Grund sind die aus beiden Grafiken zu entnehmenden Schadensflächen nicht direkt vergleichbar. In Kapitel 7.2.1 sind die entsprechenden Schritte beschrieben, um aus dem thermischen Phasenbild die entsprechende effektive Schadensfläche in Form einer Rohrabwicklung zu bestimmen.

Vergleicht man die Resultate der einzelnen CFK-Rohre ($\varnothing 15\text{ mm}$, $\varnothing 35\text{ mm}$ und $\varnothing 50\text{ mm}$) miteinander, so können zunächst ähnliche Schlüsse wie aus den akustischen Untersuchungen gezogen werden:

- Die thermisch messbare Schadensfläche, welche durch die 5 J Impactlast hervorgerufen wird, hängt ebenfalls vom Rohraußendurchmesser ab. Mit sinkendem Rohraußendurchmesser und somit mit steigender geometrischer Steifigkeit der Struktur, sinkt auch die thermisch detektierbare Schadensfläche.
- Die Schadensfläche kann eindeutig vom umliegenden, ungeschädigten Bereich getrennt werden (in Abbildung 6.12 wurde der nicht als Schadstelle identifizierte Bereich bereits ausgeblendet).

Es können allerdings an dieser Stelle auch Abweichungen zwischen beiden Untersuchungen beobachtet werden, welche sowohl die messbare Schadensfläche als auch die Abgrenzung der Schadensfläche von ungeschädigten Bereichen betreffen. Sowohl die Gestalt als auch die integrale Schadensfläche beider Untersuchungen unterscheiden sich leicht. Diese Tatsache kann unter anderem auf die den Verfahren zu Grunde liegenden unterschiedlichen physikalischen Prinzipien zurückgeführt werden. Ein Beispiel dafür sei folgend aufgeführt.

Delaminationen, welche eng aneinander liegen, oder auch unter Druck zusammengepresste Grenzflächen aufweisen, können zwar akustisch detektiert werden (in der Regel weisen derartige Fehlstellen eine große akustische Impedanz auf), für optisch angeregte thermische Systeme allerdings problematisch sein. Dies kann dadurch erklärt werden, dass diese aufeinandergepressten Grenzflächen thermisch in Bezug auf ungeschädigte Bereiche nur geringfügig abweichende Eigenschaften (in einigen Fällen kaum messbar) aufweisen können. Im Umkehrschluss können bestimmte thermisch leicht detektierbare Schäden auch für akustische Systeme schwierig zu identifizieren sein. Beispielsweise können geflochtene Bauteile aufgrund der welligen Kohlenstofffasern das Ultraschallsignal stark beeinträchtigen, während der Einfluss auf die thermischen Eigenschaften deutlich geringer ist. Somit ist für die Wahl des geeignetsten ZfP Systems das Wissen über die Eigenschaften des Prüflingswerkstoffs und die Kennt-

nis der zu erwartenden Schädigungen von essentieller Bedeutung. Eine Kombination mehrerer Prüfsysteme ist ebenfalls naheliegend.

In Analogie zu den akustischen Prüfsystemen muss an dieser Stelle auch der Frage nach der Defektsensitivität der SPT-Methode nachgegangen werden.

6.3.2.2 Defektsensitivität

Die in Kapitel 5.2.1 beschriebene Referenzplatte dient auch für die SPT-Methode als Referenz, wobei das Phasenbild aufgrund der höheren Fehlerempfindlichkeit und der geringeren Abhängigkeit gegenüber ungleichmäßigen Oberflächen- und Bestrahlungsbedingungen als Bewertungsgrundlage herangezogen wird.

Die Erstellung und Auswertung des Phasenbildes erfolgt bei unterschiedlichen Lock-In Frequenzen, um einerseits die Defekte erkennbar zu machen und andererseits die Tiefenlage dieser Defekte einordnen und bewerten zu können.

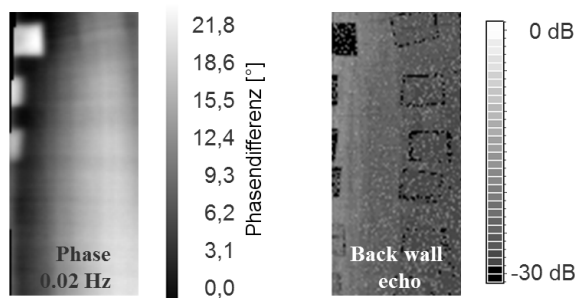


Abbildung 6.13: Referenzplatte: Ausschnitt Bereich eins: Phasenbild bei 0,02 Hz (links), Ultraschall C-Scan - Schwächung des Rückwandsignals (rechts)[76]

In Abbildung 6.13 links ist ein Phasenbild des ersten Bereiches bei 0,02 Hz zu sehen. Deutlich zu erkennen sind die durch das Herausziehen der 0,1 mm dicken Teflonfolien in 0,27 mm, 0,54 mm und 0,81 mm Tiefe liegenden Luftspalte. Die übrigen künstlich erzeugten Fehlstellen sind im Phasenbild zwar schemenhaft als leichte Grauwertfluktuationen erkennbar, allerdings liegen diese im Bereich des Bildrauschen und können nicht eindeutig identifiziert werden. Dies verstärkt die in Kapitel 6.3.1.2 aufgestellte Vermutung, dass eine ungewollt gute Anbindung der PTFE-Folien zum Laminat vorhanden ist. Zum Vergleich mit dem Ultraschall C-Scan ist rechts der entsprechende Bereich der Ultraschalluntersuchung dargestellt.

Aus diesem Grund wird auch zur Bewertung für das SPT-System der Bereich zwei herangezogen (thermisches Äquivalent zu Delaminationen in unterschiedlichen Tiefen). Zunächst soll die Frage nach der Tiefenauflösung geklärt werden. Dazu dient ein in Abbildung 6.14 dargestellter Vergleich verschiedener Messungen, der auf der Plattenrückseite sich befindende Sackbohrungen unterschiedlicher Tiefe umfasst. Rechts ist ein Phasenbild einer vergleichsweise höherfrequenten Messung bei $f_{Lock-In} = 0,40 Hz$ dargestellt. Dabei sind jeweils vier Bohrungen bei allen drei Lochreihen

(Durchmesser: 5 mm, 7 mm und 10 mm v. l. n. r.) zu sehen. Die fünfte Bohrung ist kaum zu erkennen, wobei der Graubereich im Bereich des Bildrauschen ist. Da sich die vierte Bohrung in einer Tiefe von 0,8 mm befindet (Bohrungen eins bis drei: 0,2 mm - 0,6 mm Tiefe) kann eine Eindringtiefe² der thermischen Welle bis ca. 0,8 mm angegeben werden.

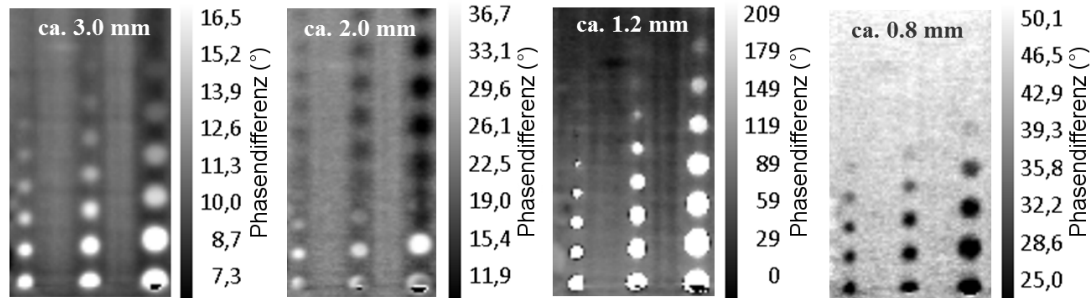


Abbildung 6.14: Referenzplatte: Ausschnitt Bereich zwei: Phasenbild der kreisförmigen rückseitigen Fehlstellen bei unterschiedlichen Anregungsfrequenzen: 0,02 Hz, 0,05 Hz, 0,15 Hz und 0,40 Hz (v.l.n.r.)[75]

Das zweite Bild von rechts in Abbildung 6.14 zeigt die Ergebnisse der SPT Messung mit 0,15 Hz. Die niedrigere Lock-In Frequenz bewirkt eine größere Eindringtiefe der thermischen Wellen. Betrachtet man die Lochreihe mit größtem Lochdurchmesser, so sind sechs Bohrungen eindeutig zu identifizieren. Die siebte Bohrung ist zwar schemenhaft zu erkennen, der geringe Abstand zum Bildrauschen verhindert allerdings eine eindeutige Identifikation. Die Bohrungen mit 7 mm Durchmesser weisen ein analoges Verhalten auf, während bei den Defekten mit 5 mm Durchmesser lediglich die ersten fünf Fehler zu sehen sind, was direkt auf die geringere Fehlergröße und die Dissipation der thermischen Welle zurückzuführen ist. Unter Betrachtung der Ø7 mm und Ø10 mm Sacklöcher ist eine thermische Eindringtiefe von ca. 1,2 mm festzustellen. Vergleicht man nun beide zuvor beschriebenen Phasenbilder ($f_{Lock-In} = 0,40 Hz$ und $f_{Lock-In} = 0,15 Hz$), so kann eine relative Tiefenordnung durchgeführt werden. Verfeinert man die Frequenzabstände zwischen den zwei Messungen, so kann die Tiefenlage der Fehlstellen noch genauer unterschieden werden.

Vermindert man die Lock-In Frequenz weiter und führt eine Messung bei 0,05 Hz durch, so sind alle Bohrungen mit den Durchmessern Ø7 mm und Ø10 mm zu erkennen, was somit einer Eindringtiefe von ca. 2,0 mm entspricht (siehe Abbildung 6.14 zweites Bild v. l.). Allerdings ist, wie auch schon zuvor beschrieben, der Kontrast teilweise sehr gering.

Eine weitere Verminderung der Lock-In Frequenz bietet in diesem Fall im Hinblick auf die Detektion der auf der Rückseite sich befindenden Bohrungen keinen Mehrwert, da die tiefste Fehlstelle sich in 2 mm Tiefe befindet. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung

²Da die Eindringtiefe von den Materialeigenschaften des Prüflings abhängt gelten die ermittelten Eindringtiefen nur für das untersuchte Material, nämlich CFK mit T700 Fasern und einer Epoxidmatrix bei einem 0°/90° - Lagenaufbau (thermisch isotrop).

6.14 links zu sehen. Hier kommt es zu einer Überlagerung von sich benachbarten Fehlstellen, was die Eingrenzung der Einzelfehlstellen erschwert.

Es kann resümiert werden, dass analog zu den Ultraschallergebnissen die künstlichen Fehlstellen, welche als Delaminationen interpretiert werden können, tiefenselektiv detektiert werden können. Die Schadensfläche wird bei niedrigen Lock-In Frequenzen aufgrund von thermischen Überlagerungen bzw. Wärmeströmen im Material an der Oberfläche unscharf abgebildet.

Die Untersuchungen an dem rückseitig eingebrachten kontinuierlichen Keil bzw. am Stufenkeil mit $0,3\text{ mm}$ Stufenhöhe bringen analoge Ergebnisse. Aus diesem Grund wird hier nicht näher darauf eingegangen.

Oben links im Bereich zwei befinden sich mit Epoxidharz gefüllte Fehlstellen (vergleiche dazu Abbildung 5.1 links bzw. die entsprechenden Ergebnisse der Ultraschalluntersuchung in Abbildung 6.9 links dargestellt). Abbildung 6.15 zeigt ein Phasenbild dieser künstlich hergestellten Harznester bei einer Lock-In Frequenz von $0,10\text{ Hz}$.

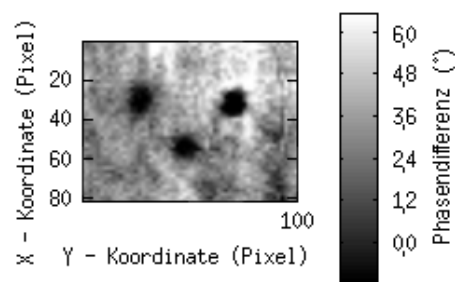


Abbildung 6.15: Referenzplatte: Ausschnitt Bereich zwei: Phasenbild künstlich eingebrachte Harznester bei $0,10\text{ Hz}$

Alle drei Bohrungen in unterschiedlicher Tiefe sind analog zu den Ultraschalluntersuchungen eindeutig zu erkennen. Die resultierende Phasenverschiebung der Fehlstellen in Bezug zum ungeschädigten Laminat beträgt etwa sechs Grad und ist bei allen drei Fehlstellen ähnlich.

Die Ergebnisse zur Charakterisierung von Fremdkörpern im Laminat (Bereich drei) sind in Abbildung 6.16 dargestellt. Die Lock-In Frequenz wird dabei mit $0,01\text{ Hz}$ so gewählt, dass alle eingebrachten Fehlstellen, welche eine maximale Tiefenlage von $2,16\text{ mm}$ aufweisen, ausreichend thermisch angeregt werden (thermische Eindringtiefe $\mu > 2,16\text{ mm}$). Die oberflächennahen Fehlstellen (Tiefe: $0,27\text{ mm}$) befinden sich im oberen Bildbereich, wobei sich die Tiefenlage um jeweils $0,27\text{ mm}$ (Entspricht der Dicke einer CFK-Einzelschicht) bei jedem Schritt erhöht. Deutlich zu sehen ist in Analogie zu den Ultraschallergebnissen, dass im Zuge der Fertigung ein Verrutschen bzw. ein Verkippen der einzelnen eingebrachten Fremdkörper zu verzeichnen ist, wobei die Position der auf der Rückseite eingebrachten Bohrungen $\varnothing 5\text{ mm}$ relativ zu den eingebrachten Aluminiumfolien geringer als in der Fertigungszeichnung (siehe Appendix A.2) angegeben, ist.

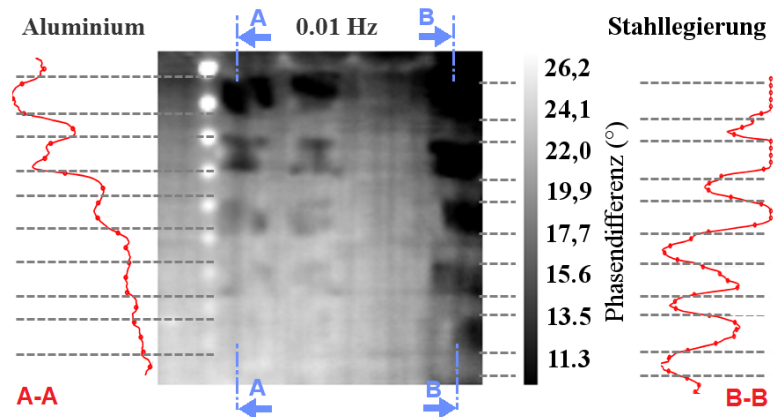


Abbildung 6.16: Referenzplatte: Ausschnitt Bereich drei: Phasenbild bei 0,01 Hz (in Anlehnung an [76])

Trotzdem können die Fehlstellen, welche sich direkt neben diesen mechanisch eingebrachten Defekten befinden, identifiziert und charakterisiert werden, da sich die resultierende Phasenverschiebung der eingebrachten Aluminiumfolien von der der eingebrachten Bohrungen deutlich unterscheidet. Diese Differenz wird durch die unterschiedlichen Grenzflächen bedingt (CFK - Luft bzw. CFK - Aluminium).

Wertet man das Phasenbild gemäß der eingebrachten unterschiedlichen Werkstoffe aus und leitet daraus eine maximal detektierbare Fehlertiefe für die eingebrachten Fremdkörper ab, so gelangt man zu Tabelle 6.1.

Material der Fehlstelle	Detektierte Folie [Nummer]	Abgeleitete maximale Detektionstiefe [mm]
GFK	1	ca. 0,3 mm
Folie: Aluminiumlegierung	3	ca. 0,8 mm
Folie: Titanlegierung	3	ca. 0,8 mm
Folie: Stahllegierung	alle	mehr als 2,2 mm

Tabelle 6.1: Abgeleitete maximal detektierbare materialspezifische Fehlertiefen [76]

Die geringste Detektionstiefe weisen die Fehlstellen aus glasfaserverstärktem Kunststoff mit zum Grundlaminat gleichem Matrixwerkstoff auf. Es kann lediglich die erste eingebrachte Fehlstelle in 0,27 mm Tiefe eindeutig detektiert werden. Tiefer liegende Fehlstellen sind zwar zum Teil schemenhaft zu erkennen, können aber aufgrund der minimalen Phasenverschiebung nicht eindeutig identifiziert werden (vergleiche dazu Abbildung 6.16 zweite vertikale Defektreiche von rechts). Dies führt zu einer maximalen abgeleiteten Detektionstiefe von ca. 0,3 mm. Auch die Ultraschallmessung (Abbildung 6.9) weist Probleme bei der Detektion dieser Fehlstellen auf.

Eingebettete Folien aus Aluminium- und Titanlegierung weisen im Phasenbild ein ähnliches Verhalten auf. Es können jeweils die ersten drei Defekte detektiert werden, wobei analog zu den GFK Fehlstellen tieferliegende Fehlstellen ebenfalls minimale

Einflüsse auf des Phasenbild aufweisen, allerdings nicht eindeutig identifiziert werden können. Dementsprechend ergibt sich eine maximale Detektionstiefe von etwa $0,8\text{ mm}$. Auffallend ist, dass es zu Schwankungen im Phasenwinkel in der detektierten Schadensfläche kommt. Dies kann nicht zuletzt auf die Problematik der teilweise möglichen, heterogenen Anbindung dieser Fremdmaterialien an das Grundlaminat zurückgeführt werden. Die so entstandenen unterschiedlichen Grenzflächen führen zu unterschiedlichen Phasenverschiebungen. Durch einen Vergleich mit Abbildung 6.17 oben wird diese Annahme gestützt, da die hier eingebrachten, sich überlappenden Fehlstellen aus gleichem Werkstoff homogene Schadensflächen zeigen.

Eingebettete Folien aus Stahl weisen in Hinblick auf die Phasenverschiebung der thermischen Welle den größten Wert auf. Es können alle eingebrachten Fehlstellen detektiert werden, was zu einer maximalen Detektionstiefe von mehr als $2,2\text{ mm}$ führt. Im Vergleich zu den Ultraschallergebnissen ist somit bei Einschlüssen aus Aluminium und Titan eine geringere Detektionsfähigkeit zu verzeichnen, wobei die restlichen Materialien vergleichbare Ergebnisse aufweisen.

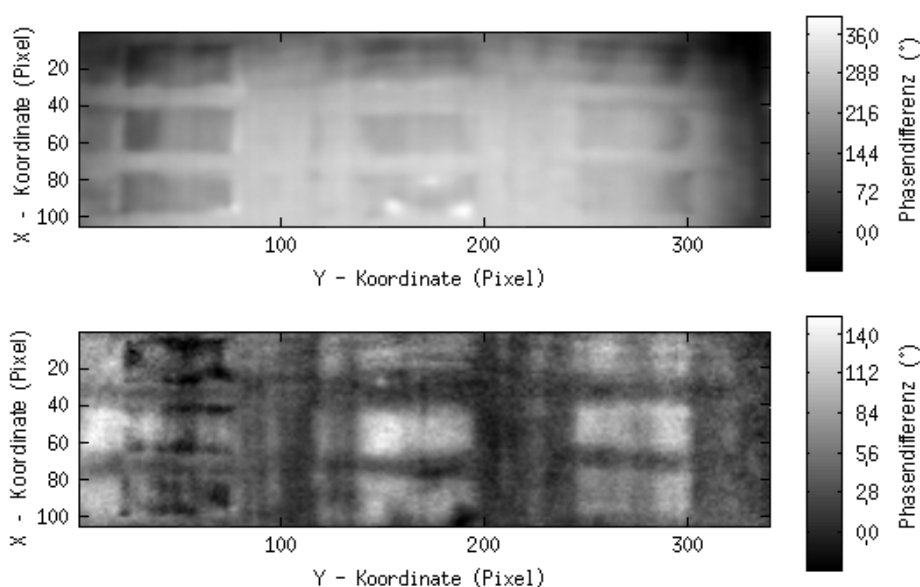


Abbildung 6.17: Referenzplatte: Bereich fünf: Mehrfachfehlstellen: Phasenbild bei $0,01\text{ Hz}$ (oben) bzw. bei $0,10\text{ Hz}$ (unten)[78]

Nachdem die Detektierbarkeit von Einlagerungen aus verschiedenen Materialien geklärt ist, soll zwei Fragen genauer nachgegangen werden. Ist die experimentelle Charakterisierung von sich überlappenden Fehlstellen bzw. Einlagerungen überhaupt möglich? Kommt es zu einer Schirmung von sich hinter metallischen Verstärkungselementen befindlichen Fehlstellen? Um diese Fragen zu klären, wird eine Untersuchung des Bereichs 5 der Referenzplatte bei unterschiedlichen Anregungsfrequenzen [78] durchgeführt. Die Ergebnisse bei einer Anregungsfrequenz von $0,01\text{ Hz}$ bzw. $0,10\text{ Hz}$ sind in Abbildung 6.17 zu sehen, wobei der Bereich des Phasenwinkels auf den Bildausschnitt angepasst wurden.

Betrachtet man die Ergebnisse der Messung bei $0,01\text{ Hz}$ genauer, so können prinzipiell bei der der Oberfläche am nächsten liegenden Fehlergruppierung (linke Fehlerreihe) alle sieben unterschiedlichen Überlappungsbereiche voneinander abgegrenzt werden. Die tieferliegenden Fehlergruppierung (in der Mitte und rechts) weisen ebenfalls charakteristische Verläufe im Phasenbild auf, wobei der Kontrast erwartungsgemäß etwas geringer ist (Für eine schematische Darstellung der Einzelbereiche der Fehlergruppierung siehe Abbildung 6.18 oben bzw. Abbildung 5.2).

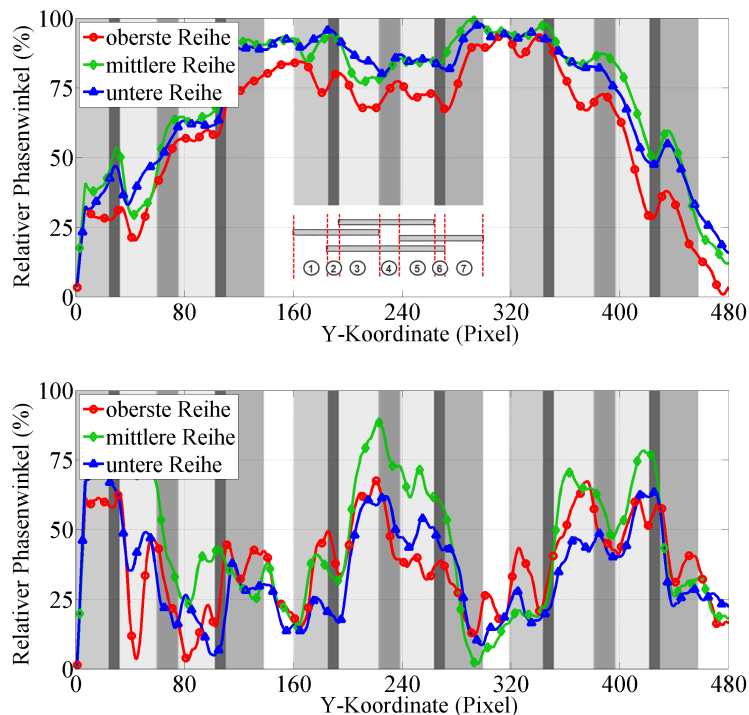


Abbildung 6.18: Referenzplatte: Auswertung Phasenwinkel Bereich 5: Horizontale geglättete Schnitte durch die Fehlerbereiche (oben $0,01\text{ Hz}$ Anregungsfrequenz; unten $0,10\text{ Hz}$ Anregungsfrequenz) [78]

Um die einzelnen Überlappungszonen besser erkennen bzw. quantifizieren zu können, kann Abbildung 6.18 herangezogen werden, welche den Phasenwinkel längs horizontaler Schnitte durch die Fehlergruppierung zeigt. Abbildung 6.18 oben zeigt dabei die Schnitte der $0,01\text{ Hz}$ Messung, während unten die Ergebnisse der $0,10\text{ Hz}$ Messung zu sehen sind. Diese einzelnen Überlappungsbereiche sind in Abbildung 6.18 durch unterschiedliche Grauzonen gekennzeichnet. Betrachtet man die Ergebnisse bei $0,01\text{ Hz}$, so ist deutlich zu erkennen, dass die dargestellten Kurven charakteristische Veränderungen an den Übergängen der verschiedenen Überlappungsbereiche aufweisen.

Die Messergebnisse der Untersuchung bei $0,10\text{ Hz}$ zeigen ähnliches Verhalten. Durch die Verringerung der Anregungsfrequenz sinkt die Eindringtiefe der thermischen Welle, was einerseits zu besserem Phasen- und Amplitudenkontrast der oberflächennahen Fehlstellen führt, andererseits aber auch bedeutet, dass Fehlstellen in größerer Tie-

fe nicht mehr eindeutig voneinander getrennt und bewertet werden können. Darüber hinaus ergibt sich durch die Erhöhung der Anregungsfrequenz um das Zehnfache aber auch eine geringere Messzeit, die in Hinblick auf praktische Messaufgaben möglicherweise den Informationsverlust der tieferen Fehlstellen im späteren Einsatz kompensieren kann.

Ein weiterer Effekt der erhöhten Anregungsfrequenz ist das Absinken der Phasenspreizung. Diese beträgt bei der Messung mit $0,01\text{ Hz}$ in etwa 36° , während die Messung bei $0,10\text{ Hz}$ lediglich einen Phasenspreizung von 14° aufweist. Dies bedeutet in weiterer Folge, dass das Signal zu Rausch Verhältnis, das im Wesentlichen den Quotienten aus der gemessenen Phasenspreizung und dem systemimmanenten Rauschen des Phasensignals (dieses ist unabhängig von der gewählten Anregungsfrequenz) darstellt, sinkt.

Vergleicht man die unterschiedlichen metallischen Bleche bzw. Folien miteinander so ist ein großteils sehr ähnliches Verhalten erkennbar, was sich vor allem in den Phasenkurven in Abbildung 6.18 zeigt. Die Messung bei $0,01\text{ Hz}$ zeigt für alle drei Materialien ähnliche Kurvenverläufe. Die Vergleichsmessung bei $0,10\text{ Hz}$ zeigt zwar drei Kurven mit ähnlicher Gestalt, allerdings weisen die Fehlstellen mit einlamierten Blechen aus Stahllegierung einen größeren Fehlstellenkontrast auf (Größere Amplituden bzw. größerer Phasenunterschied). Diese Beobachtung geht konform mit den Schlüssen der zuvor beschriebenen Einzeleinlagerungen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die SPT-Methode bei der Bewertung von sich überlappenden Fehlstellen deutlich bessere Ergebnisse als die wassergekoppelte Impuls-Echo Ultraschallprüfung liefert, wobei mit steigender Bauteildicke der Kontrast der thermischen Ergebnisse abnimmt. Mittels thermischer Prüfung können alle sieben unterschiedlichen Überlappungssituationen detektiert und voneinander unterschieden werden.

6.3.3 Detektionsgrenzen beider Testverfahren

Nachdem die wichtigsten Charakteristiken bezüglich der Defektsensitivität der SPT-Methode sowie des Impuls-Echo Ultraschallverfahrens geklärt sind, bleibt die Frage nach dem Unterschied der detektierten Schadensfläche beider Verfahren offen.

Da diese ein wesentliches Merkmal zur späteren Bewertung der Schädigung darstellt, soll an dieser Stelle ein detaillierter Vergleich anhand von Impactuntersuchungen an ebenen Probenkörpern aus CFK angestellt werden.

Abbildung 6.19 zeigt die Ergebnisse eines Impactversuchs an CAI-Probenkörpern mit quasiisotropem Lagenaufbau und einer Probendicke von 2 mm . Eine parametrische Variation der Impactenergie zwischen 0 J und 20 J dient zur Einbringung verschieden großer Schädigungen, welche sowohl thermisch als auch akustisch bewertet werden. Abbildung 6.19 zeigt den Zusammenhang dieser parametrischen Untersuchung zwi-

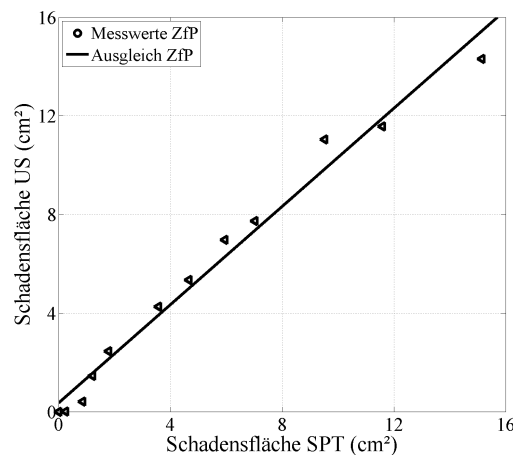


Abbildung 6.19: Vergleich der mittels SPT-Methode und mittels Impuls-Echo Ultraschall ermittelten Schadensfläche infolge Impactbelastung

schen beiden Verfahren. Die aus thermischen Phasenbildern extrahierte Schadensfläche ist dabei auf der horizontalen Achse aufgetragen, während die aus Ultraschall C-Bildern ermittelten Werte auf der Hochachse zu sehen sind. Es ist eindeutig zu erkennen, dass die gemessenen Werte sich sehr gut durch eine lineare Ausgleichskurve approximieren lassen, wobei es nur zu geringfügigen Abweichungen von dieser Geraden kommt. Die Parameter dieser Approximationsgeraden sind in Tabelle 6.2 zu finden.

Approximation $0 \leq A \leq 16 \text{ cm}^2$	Geometrie [-]	P_1 [cm^2]	P_2 [cm]
Korrelation: Schadensfläche US - Schadensfläche SPT $A_{US} = P_1 + P_2 \cdot A_{th}$	eben	0,353	0,9956

Tabelle 6.2: Approximationsparameter zur Bestimmung der Ausgleichslinie der ermittelten Schadensflächen

Die Steigung der Geraden ist nahe eins und auch der Offset, also der konstante Term dieser Gleichung ist mit $0,353 \text{ cm}^2$ sehr gering. Aus diesem Grund kann in erster Näherung und unter Berücksichtigung der systembedingten Ungenauigkeiten zur Bestimmung der geschädigten Flächen konstatiert werden, dass die mittels Impuls-Echo Ultraschall C-Bildern und die mittels SPT Phasenbildern erhaltenen Flächen gleich groß sind. Somit führen beide Methode zu analogen Ergebnissen, was die Schadensfläche dieses in der Realität sehr oft auftretenden Schadenstyps betrifft.

Ein weiterer in der Praxis oft auftretender Anwendungsfall für zerstörungsfreie Prüf-systeme, der bis dato nur am Rande angesprochen wurde, sind Fügestellen. Da mit- unter große Kräfte übertragen werden müssen, findet man oft dickwandige Strukturen

(Aufdickungen im Anbindungsbereich, die schrittweise bis zur Wandstärke des restlichen Bauteils hin verjüngt werden), da ungeachtet der guten Eignung für eine Verbindung durch strukturelle großflächige Klebungen auch für CFK-Strukturen Bolzen- und Nietverbindungen immer noch am häufigsten eingesetzt werden. Um die entstehenden Lochleibungsspannungen im Laminat besser zu verteilen, finden immer öfter Faserverbund-Metallhybride Beachtung.

Wie in Kapitel 6.3.2.2 beschrieben, zeigt das SPT Verfahren leichte Vorteile gegenüber dem akustischen Impuls-Echo Verfahren, was die Defektsensibilität sich überlappender metallischer Schichten angeht. So konnten mit Hilfe der SPT-Methode alle Überlappungszonen der in die Referenzplatte eingebrachten Fehlergruppierungen voneinander getrennt und somit bewertet werden, während das Ultraschallverfahren lediglich fünf der sieben Zonen unterscheiden kann (vgl. dazu Abbildung 6.11), was durch entsprechend große Reflexionen an den CFK-Metall-Übergängen erklärt werden kann. Mit anderen Worten ausgedrückt, kommt es zu einer Abschirmung der hinten liegenden Bereiche.



Abbildung 6.20: Faserverbund-Metallhybridplatten mit eingebrachten Fehlstellen: Stahl-CFK-Hybrid mit 16 Lagen 1.4310 Stahl (0,25 mm Stärke) oben und Titan-CFK-Hybrid mit 16 Lagen Ti15-3 Titan (0,25 mm Stärke) unten [78]

Die Fragestellung aus der Praxis ist nun die Detektierbarkeit von Fehlstellen hinter eben diesen metallischen, sich teilweise überlappenden Lagen, wobei es sich in den meisten Fällen um Delaminationen handelt. Um auch diesen Anwendungsfall in die Bewertung beider Verfahren bzw. in den Vergleich beider Verfahren einfließen zu lassen, werden zwei Referenzbauteile verwendet, welche mehrere übereinanderliegende Metall- und CFK-Schichten aufweisen, wobei in unterschiedlichen Tiefen künstlich eingebrachte Delaminationen zu finden sind [33]. Diese Delaminationen werden durch doppelt eingelegte kreisförmige Trennfolien in vier verschiedenen Tiefenlagen mit jeweils einer großen und einer kleinen Fehlstelle simuliert.

In Abbildung 6.20 sind die verwendeten Faserverbund-Metalllamine dargestellt³. Der obere, etwas länglichere Probenkörper weist 16 Titanlagen und der untere, etwas breitere Probenkörper 16 Stahllagen auf. In beiden Probenkörpern sind acht kreisfö-

³Die Probenbereitstellung erfolgte durch das Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptionik in Braunschweig.

mige Fehlstellen in unterschiedlichen Tiefen und zwei unterschiedlichen Durchmessern eingebracht.

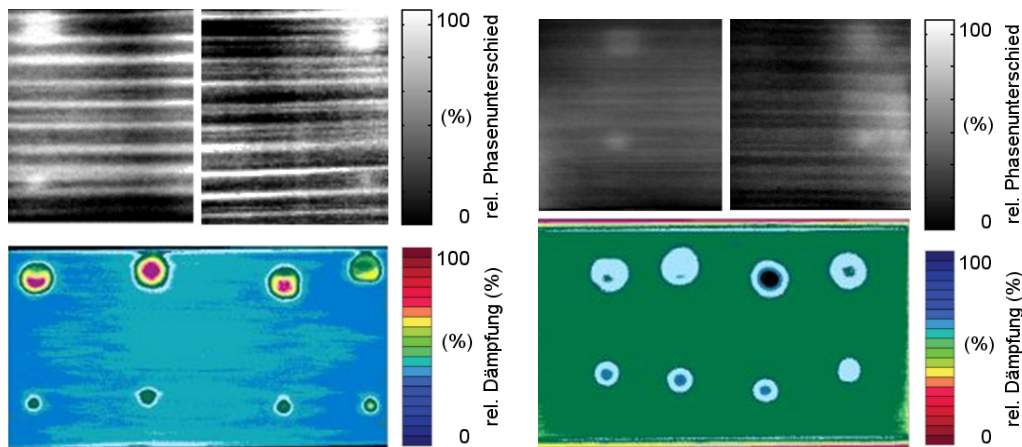


Abbildung 6.21: Thermisches Phasenbild des CFK-Stahllaminates (oben) bei einer Anregungsfrequenz von $0,02 \text{ Hz}$ (links) bzw. thermisches Phasenbild des CFK-Titanlaminates bei einer Anregungsfrequenz von $0,01 \text{ Hz}$ (rechts); Ergebnisse einer Ultraschalldurchschallungsprüfung (unten): CFK-St-Hybrid (links) bzw. CFK-Ti-Hybrid (rechts) [78]

In Abbildung 6.21 oben sind die SPT Ergebnisse des CFK-Stahlhybrids (links) und des CFK-Titanhybrids (rechts) zu sehen. In beiden Fällen konnten nicht alle Fehlstellen detektiert werden. Um die Position aller Fehlstellen und deren Größe zu zeigen sind darunter die Ergebnisse einer Ultraschalluntersuchung in Durchschallungstechnik dargestellt⁴, welche in dieser Arbeit aus Gründen der zwingenden beidseitigen Zugänglichkeit zur Probe ansonsten nicht behandelt wird, aber für diesen speziellen Fall gute Ergebnisse zeigt [33].

Die thermischen Ergebnisse der beiden Platten sind dabei jeweils eine Kombination aus einer Messung von der Plattenvorderseite (linker Teil des jeweiligen Phasenbildes) und einer Messung von der Plattenrückseite (rechter Teil des jeweiligen Phasenbildes), da Aufgrund der Plattendicke und der hohen Anzahl an metallischen Lagen eine vollständige thermische Durchdringung des Prüflings nicht möglich ist.

Betrachtet man die Phasenbilder genauer, so stellt man fest, dass nur die jeweils oberflächennächsten Fehlstellen detektiert werden können. Der Defektkontrast ist dabei bei den CFK-Stahl Hybridproben tendenziell etwas höher als bei den CFK-Titan Hybriden. Die kreisförmige Kontur der Fehlstellen ist in den Phasenbildern nicht zu erkennen. Dieser Effekt ist durch die im Bauteil vorhandenen inhomogenen Wärmeströme zu erklären, welche durch die niedrige Anregungsfrequenz von $0,01 \text{ Hz}$ bzw. $0,02 \text{ Hz}$ begünstigt werden [78]. Des Weiteren ist in beiden Fällen klar die Faserorientierung der obersten CFK-Schicht zu erkennen, welche in horizontaler Richtung (Probenlängsrichtung) verläuft. Die Verteilung der Faserbündel ist dabei nicht homogen über die Probenbreite, was zu inhomogenen Wärmeleitungseigenschaften in den CFK-Schich-

⁴Die Darstellung der relativen Dämpfungswerte basiert auf unterschiedlichen Farbskalen

ten führt und letztlich auch die thermisch detektierbare Schadensfläche beeinflusst. Zum Vergleich sind in Abbildung 6.22 die entsprechenden Ergebnisse des in dieser Arbeit untersuchten wassergekoppelten Impuls-Echo Ultraschallverfahrens dargestellt.

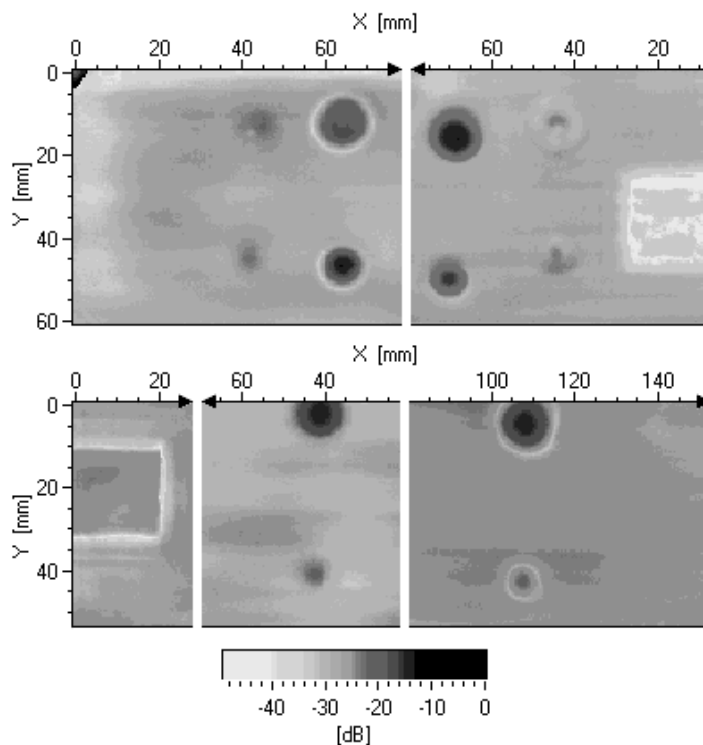


Abbildung 6.22: Schwächung Rückwandsignal des Impuls-Echo Ultraschallverfahren mit 1 *Mhz* Prüfkopf: CFK-Titan Hybridplatte - zusammengesetzt aus Messungen von Vorder- (rechts) und Rückseite (links) - (oben) bzw. CFK-Stahl Hybridplatte - zusammengesetzt aus Messungen von Vorder- (rechts und links) und Rückseite (Mitte) - (unten) [78]

In Analogie zu den thermischen Ergebnissen kann der Prüfling ebenfalls nicht vollständig durchdrungen werden. Aus diesem Grund sind auch hier die Ergebnisse aus Untersuchungen an der Probenvorder- und Probenrückseite zusammengesetzt. Aufgrund der großen Probendicke kommt bei diesen Messungen ein 1 *Mhz* Prüfkopf zum Einsatz. Durch die Verringerung der Prüffrequenz können energiereichere Signale in das Bauteil eingekoppelt werden, was zu einem Gewinn in der Tiefenreichweite führt. Allerdings sinkt gleichzeitig die Tiefenauflösung, da diese umgekehrt proportional von der Wellenlänge abhängt.

Im Fall der CFK-Titan Hybridplatten können mit diesem Aufbau jeweils die zwei der Oberfläche am nächsten liegenden Fehlstellenpaare, im Fall der CFK-Stahl Hybridplatten nur jeweils ein Defektpaar detektiert werden. Die Abgrenzung des Fehlerbereiches vom ungeschädigten Bereich ist dabei deutlicher als bei der SPT Methode, was auch zu erwarten ist, da dem Impuls-Echo Verfahren die gleichen physikalischen Prinzipien wie dem Durchschallungsverfahren zu Grunde liegen.

Aus den gezeigten Ergebnissen kann geschlossen werden, dass zur Bewertung dick-

wandiger Hybridstrukturen Prüfsysteme mit beidseitig angeordneten Prüfköpfen zu bevorzugen sind. Sowohl das thermische als auch das akustische Verfahren mit einseitigem Zugang weisen für diesen Anwendungsfall keine ausreichende Tiefenreichweite auf und sind daher für die Bewertung von dünnwandigen Bauteilen vorzuziehen (vergleiche dazu die Ergebnisse der Referenzplatte in Kapitel 6.3.1.2 bzw. Kapitel 6.3.2.2).

	SPT Methode	US: 10 MHz
max. Eindringtiefe CFK	ca. 6 mm	ca. 8 mm
min. Defektfläche	> 5 mm ² *	> 1 mm ² **
Detektion Harznester	> 2,2 mm	> 2,2 mm
Detektion GFK	0,3 mm	–
Detektion Aluminiumlegierung	0,8 mm	> 2,2 mm
Detektion Titanlegierung	0,8 mm	> 2,2 mm
Detektion Stahllegierung	> 2,2 mm	> 2,2 mm
Detektion Delaminationen	ca. 5 mm	ca. 7 mm
Detektion Faserbrüche	–	–
Prüfung Hybridwerkstoffe	prinzipiell geeignet***	geeignet
Detektion sich überlappender Fehlstellen	geeignet	bedingt geeignet****
Prüfung mehrfach gekrümmter Strukturen	geeignet	bedingt geeignet*****

* gilt für oberflächennahe Defekte. Die minimale Defektfläche ist von der Tiefenlage abhängig.

** abhängig von der Tiefenlage und vom gewählten Prüfkopf sowie dem Prüfraster.

*** Eignung zur Detektion oberflächennaher Fehlstellen

**** Eignung nur für dünnwandige Prüflinge. Reduktion der Prüffrequenz für dickwandige Bauteile.

***** Ausrichtung des Prüfkopfes relativ zur Oberfläche erfordert spezielle Manipulationseinheiten.

Tabelle 6.3: Gegenüberstellung der wichtigsten experimentellen Ergebnisse der SPT Methode sowie der Impuls-Echo Ultraschallmethode (10 MHz Prüfkopf)

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass unter Einbeziehung aller bisher beschriebenen experimentellen Ergebnisse beide Systeme vergleichbare Ergebnisse aufweisen, wobei je nach Anwendungsfall das eine bzw. das andere Verfahren zu bevorzugen ist. Auch ist das Ultraschallverfahren bei der Detektion metallischer Zusatzstoffe vorzuziehen, was allerdings in Hinblick auf die Detektion von Schäden in CFK Bauteilen nur von untergeordneter Bedeutung ist. Tabelle 6.3 fasst die wichtigsten experimentell ermittelten Merkmale beider untersuchten Systeme zusammen. Da die Ergebnisse der Ultraschallprüfung stark vom verwendeten Prüfkopf bzw. von der Prüffrequenz abhängt, beziehen sich die hier angegebenen Ergebnisse auf ein 10 MHz System. Für abweichende Prüffrequenzen ändern sich die entsprechenden Werte.

7 Schadensidentifikation und -statistik

Unabhängig von der gewählten zerstörungsfreien Prüfmethode muss der auftretende Schaden zunächst in Ort und Ausdehnung identifiziert werden. Nimmt man beispielsweise Phasenbilder, wie sie in Abbildung 4.5 zu sehen sind, als Grundlage für die weitere Bewertung, so muss die Schadensfläche im ersten Schritt aus dem Bild extrahiert werden. Da der Übergang zwischen geschädigter und ungeschädigter Fläche teilweise fließend erfolgt und nicht klar abgegrenzt ist, benötigt man geeignete Methoden, um die schadhaften von den ungeschädigten Bereichen unterscheiden zu können. Das in dieser Arbeit gewählte Vorgehen wird in Kapitel 7.1 detailliert beschrieben.

Nach der flächigen Abgrenzung des Schadens bzw. der Schäden im Prüfbild müssen die Schadensflächen von Pixelkoordinaten in räumliche bzw. flächige Abmessungen überführt werden. Dies ist bei ebenen Geometrien direkt nach eventueller Entzerrung des Ursprungsbildes durch eine lineare Abbildungsvorschrift möglich. Handelt es sich bei dem Prüfling nicht um einen ebenen Körper, sondern um eine gekrümmte Struktur (beispielsweise eine Rohrstruktur, vgl. Abbildung 4.5 rechts), so ist die Bestimmung der tatsächlichen Schadensfläche aufwendiger. Neben der Entzerrung des Bildes kann bei kleinen Krümmungen und weit umlaufenden Fehlstellen die Notwendigkeit bestehen, mehrere Aufnahmen aus unterschiedlichen Betrachtungswinkeln zu machen, welche danach in geeigneter Weise kombiniert und ausgewertet werden müssen. Kapitel 7.2 zeigt das gewählte Vorgehen zur Kombination von Einzelmessungen für einfach und mehrfach gekrümmte Strukturen.

7.1 Schwellwertbildung und Unterdrückung von Störstellen

Zum Zweck der Abgrenzung von schadhaften zu ungeschädigten Bereichen wird eine Schwelle (d.h. Grauwert) definiert, ab welcher ein Bildausschnitt als Fehler identifiziert wird. Als charakteristische Größe kann hier beispielsweise der Signal-Rausch-Abstand herangezogen werden (siehe beispielsweise [69]), was einen globalen Ansatz zur Fehleridentifikation darstellt. Eine andere lokale Methode ist eine manuelle Bestimmung eines Referenzbereiches, welcher die Eigenschaften eines ungeschädigten

Prüfbereiches festlegt. Der Vorteil dieser zweiten Methode ist die größere Flexibilität bei Messungen, welche eine große Anzahl an unterschiedlichen Störeinflüssen bzw. große globale Gradienten aufweisen. Während bei globalen Methoden die Aufindungswahrscheinlichkeit aufgrund des global ansteigenden Rauschwertes sinkt, hat dies nur wenig Einfluss auf lokale Methoden.

In diesem Fall werden lediglich Teilbereiche des Gesamtauswertungsbildes betrachtet, welche das Verhalten des ungeschädigten Bauteils am besten wiedergeben (vergleiche dazu den in Abbildung 7.1 oben links durch ein grünes Rechteck markierten Bereich).

Im globalen Fall werden die enthaltenen Grauwerte des Gesamtbildes analysiert, und die Häufigkeit des Auftretens bestimmt. Werte, welche eine gewisse relative Häufigkeit (d.h. prozentualer Anzahl an Bildpunkten in Bezug zur Summe aller betrachteten Bildpunkte) aufweisen, bilden die Grundlage der Schwellwertbildung und werden automatisch ausgewählt.

Die Bandbreite der so erhaltenen Grauwerte kann auch bei der globalen Methode weiter manuell eingegrenzt werden, um gezielt Defekte identifizieren zu können.

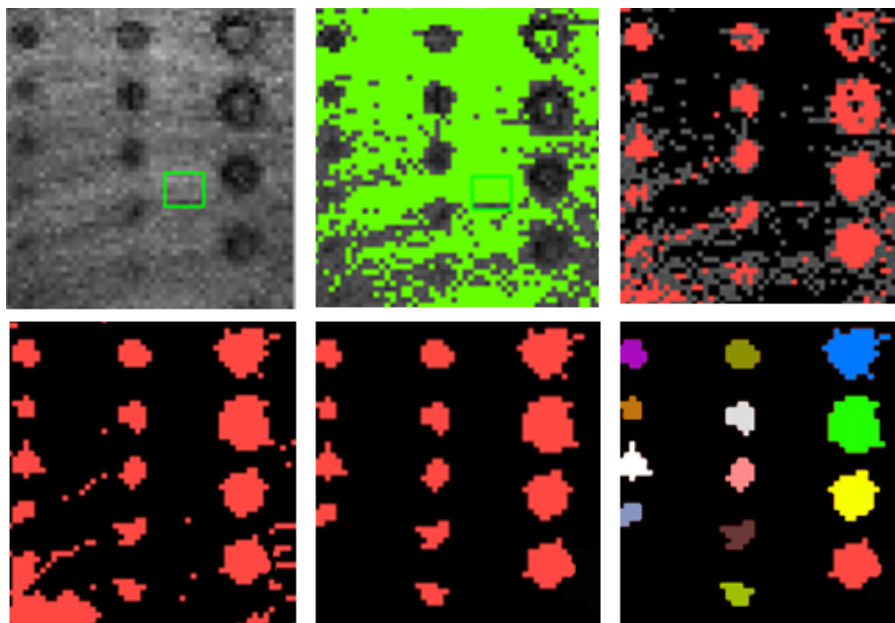


Abbildung 7.1: Vorgehen Schwellwertbildung und Fehleridentifikation am Beispiel einer Probenplatte aus CFK mit Fehlstellen: oben links: Ursprungsphasenbild mit Referenzbereich; oben Mitte: Anwenden des Schwellwertes; oben rechts: Definition Phasenversatz; unten links: Elimination der nicht schadhafte Bereiche; unten Mitte: Anwendung von Schadenscharakteristiken; unten rechts: Schadensidentifikation

In Abbildung 7.1 ist der Vorgang der Bildauswertung und Bildaufbereitung anhand einer Messung der in Kapitel 6.3.2.2 beschriebenen kohlenstofffaserverstärkten Referenzplatte ($f_{Lock-In} = 0.02 \text{ Hz}$) gezeigt. Es ist ein Bildausschnitt mit für thermische Untersuchungen simulierten Delaminationen zu sehen (Bereich zwei). Zur besseren Demonstration wird bewusst eine Messung mit einem hohen Rauschanteil gewählt.

Links oben ist das ursprüngliche Phasenbild der SPT Untersuchung zu sehen, wobei ein Referenzbereich gesetzt ist (grünes Rechteck). Nach der zuvor beschriebenen Grauwertanalyse und Einschränkung der Bandbreite der im Referenzbereich vorherrschenden Signale / Grauwerte erhält man das oben in der Mitte dargestellte Bild. Die Grauwertbereiche, welche als Referenz ausgewählt wurden, sind hier grün markiert. Es ist zu erkennen, dass dieser Bereich zwar nicht die künstlich eingebrachten Fehlstellen umfasst, aber auch nicht den gesamten ungeschädigten Bereich einschließt. Die als nicht geschädigt geltenden Bereiche werden im Folgenden nicht mehr berücksichtigt.

Im nächsten Schritt folgt die Wahl des bzw. der relevanten Phasenintervalle für die zu betrachtenden Fehlstellen. Dabei können unterschiedliche Bereiche identifiziert und gruppiert werden. Dies hat den Vorteil, dass schon in diesem Stadium Fehlstellen, welche unterschiedliche Charakteristiken aufweisen (Delaminationen, Einlagerungen von Fremdkörpern, etc.) bei vergleichbarer Fehlertiefe bzw. Fehlstellen einer Defektgruppe in unterschiedlichen Tiefen voneinander getrennt detektiert werden können. In Abbildung 7.1 oben rechts ist das hier gewählte charakteristische Phasenintervall rot dargestellt, während die Bildpunkte, welche zuvor als ungeschädigt identifiziert worden sind, schwarz dargestellt sind. Die übrigen Bildpunkte, welche in keine Kategorie eingeteilt werden, erscheinen mit ihren ursprünglichen Grauwerten.

Da die Detektion von Defekten, welche auf einer Analyse einzelner Pixel basiert, sehr anfällig gegenüber Störungen ist, müssen weitere Maßnahmen ergriffen werden, um eine effektive Detektion zu gewährleisten.

Zu diesem Zweck werden verschiedene Ansätze gewählt und miteinander verknüpft, um ein optimales Ergebnis zu erzielen. Zunächst werden Pixel, welche ein oder mehrere als Defekt identifizierte Pixel in unmittelbarer Nachbarschaft haben und selbst nicht als Defektfläche gelten, gefüllt. Das gleiche gilt für selbst nicht als Fehlstelle geltende Pixel innerhalb eines als Fehler identifizierten Bereiches. Sowohl horizontale, vertikale, als auch diagonal fehlende Pixel werden dabei betrachtet. Als Beispiele können die mittlere bzw. rechte identifizierte Fehlstelle in der obersten Reihe dienen (vgl. Abbildung 7.1 oben rechts).

Die Realisierung dieser Maßnahme erfolgt im vorliegenden Fall durch eine Kombination von Einzelmatrizen, welche in Kombination mit einem effektiven eindimensionalen Suchalgorithmus Lücken definierter Größe auffüllen.

Im Detail werden zunächst reihenweise horizontale, potentiell zusammengehörige Bereiche identifiziert und die dazwischenliegenden Pixel ausgefüllt. Danach wird dieser Prozess vertikal und in beide Diagonalenrichtungen wiederholt. Schließlich erfolgt ein Vergleich der ursprünglichen und modifizierten Defektflächen, wobei Defekte eliminiert werden, welche eindeutig auf Fehldetektionen zurückgeführt werden können (z.B. horizontale oder vertikale Pixellinien, etc.).

Nach dem Anwenden dieser Algorithmen und der Elimination nicht als Defektfläche identifizierter Bildbereiche gelangt man zu Abbildung 7.1 unten links. Es ist zu erkennen, dass die entsprechenden Fehlstellen vollständig identifiziert werden, indem

entsprechend zuvor nicht detektierte Bereiche gefüllt werden. Zusätzlich wird aber auch ein großflächiger Bereich als schadhaft gekennzeichnet (unten links), der keine Schadensfläche repräsentiert. Durch eine Definition von zulässigen Schadensgeometrien wie maximale und minimale Schadensgröße, Schadensbreite oder Schadenshöhe kann dieses Problem gelöst werden. Definiert man geeignete Maxima bzw. Minima und wendet man diese auf das vorliegende Bild (Abbildung 7.1 unten links) an, so erhält man ein bereinigtes Defektbild, welches in Abbildung 7.1 unten mittig dargestellt ist.

Abschließend werden die einzelnen Fehlstellen nummeriert, gezählt und kategorisiert, um eine Grundlage für eine statistische Auswertung zu bilden, welche in Kapitel 7.4 detailliert beschrieben wird. Abbildung 7.1 unten rechts stellt diese Zählung und Gruppierung grafisch dar.

7.2 Bestimmung der Schadensfläche bei gekrümmten Strukturen

Die Bestimmung der Schadensfläche setzt grundsätzlich die Kenntnis der Perspektive bzw. der Position des Sensors relativ zum Prüfobjekt und dessen Abbildungsvorschrift voraus. Über trigonometrische Beziehungen lässt sich ein Bezug zwischen dem in der Regel pixelbasierten zweidimensionalen Sensorbild und den geometrischen Abmessungen des Prüflings herstellen. Im nächsten Schritt kann die Geometrie des Prüflings zur Bestimmung der Schadensflächen genutzt werden.

Durch das Anbringen von Markern auf den Prüfling als Bezugspunkte und die Vermessung ihrer Position kann die geometrische Korrelation auch ohne Kenntnis der Sensorposition durchgeführt werden. Analog verhält es sich, wenn der Prüfling nicht den gesamten Bildbereich ausfüllt und somit seine Umrisse als Bezugspunkte gewählt werden können.

7.2.1 Einfachkrümmung

Am Beispiel von Untersuchungen an CFK Rohrstrukturen ($7,5 \text{ mm} < R < 25 \text{ mm}$) soll im Folgenden die Bestimmung der Schadensfläche einer einfach gekrümmten Struktur im Detail besprochen werden, wobei die Vorgehensweise sinngemäß auf komplexe, mehrfach gekrümmte Prüflinge übertragen werden kann. Als Ausgangspunkt für die nachfolgende Betrachtung soll das Phasenbild eines CFK-Rohres in Abbildung 4.5 rechts verwendet werden. Das Rohr, welches eine Schädigung in Bildmitte aufweist, befindet sich in horizontaler Position, wobei der Rohrdurchmesser vollständig innerhalb des Phasenbildes liegt. Diese sichtbare Außenkontur kann somit als Referenz zur Bestimmung der Schadensfläche, in diesem Fall des Schadens infolge einer Schlag-

beanspruchung, verwendet werden. In Abbildung 7.2 sind die der Prüfung zu Grunde liegenden geometrischen Größen schematischer abgebildet.

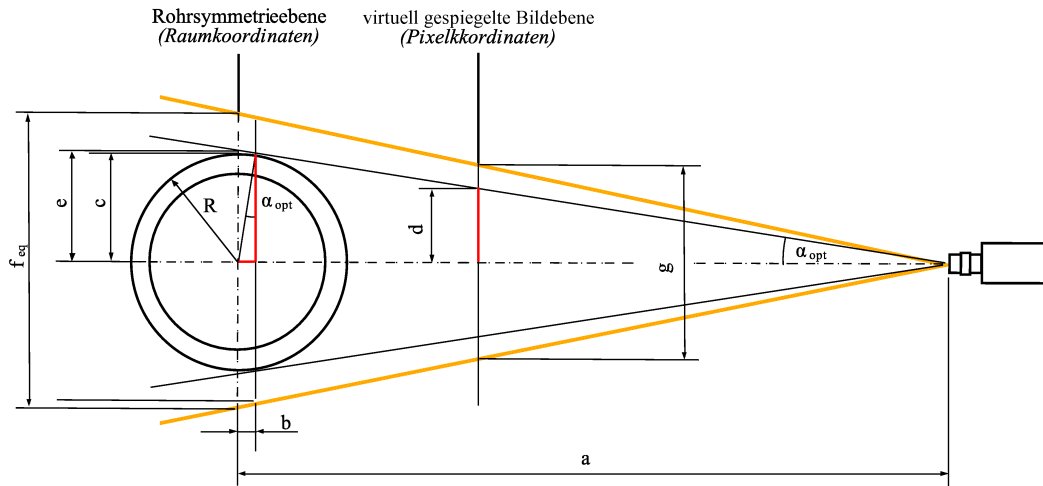


Abbildung 7.2: Prinzipskizze der Rohrprüfung: Definition der geometrischen Größen

Geht man von einem definierten Abstand von der Kameraposition zur Symmetrielinie des CFK Rohres aus, dem Abstand a , so ist die im Bildausschnitt aus Abbildung 4.5 rechts zu sehende Außenkontur des Rohres nicht dessen Durchmesser gleich zu setzen. Vielmehr ist der sichtbare vertikale Abstand mit $2 \cdot c$ in Abbildung 7.2 bezeichnet. Bezieht man diese Größe auf die vertikale Symmetrieebene des Rohres, so misst man den Abstand $2 \cdot e$. Für die in dieser Arbeit untersuchten Geometrien ($7,5 \text{ mm} < R < 25 \text{ mm}$) ist die Abweichung zwischen e und R gering, womit die im Auswertungsbild sichtbare Rohrkontur direkt als Rohrdurchmesser für die weitere Berechnung genähert werden kann.

Die dimensionslose prozentuale Abweichung $\Delta_{rel,h}$ der geometrischen Größen e und R kann unter Berücksichtigung der geometrischen Gegebenheiten aus Abbildung 7.2 als Funktion des Kameraabstandes a und des Rohraußenradius R geschrieben werden als

$$\Delta_{rel,h}(R, a) = \frac{e}{R} = \frac{a \cdot \cos \left[\arcsin \left(\frac{R}{a} \right) \right]}{a - \sqrt{R^2 - \left\{ R \cdot \cos \left[\arcsin \left(\frac{R}{a} \right) \right] \right\}^2}} . \quad (7.1)$$

Abbildung 7.3 zeigt diesen Zusammenhang grafisch, wobei sowohl der Rohraußenradius R ($0 \text{ mm} < R < 25 \text{ mm}$) als auch der Kameraabstand a ($500 \text{ mm} < a < 2000 \text{ mm}$) variiert werden, um deren Einfluss auf $\Delta_{rel,h}$ zu zeigen.

Der maximale Fehler tritt bei einer Kombination des minimalen Kameraabstandes a (500 mm) mit dem maximalen Rohraußenradius R (25 mm) auf und beträgt 0.12% , was die Näherungsbeziehung $e \approx R$ rechtfertigt.

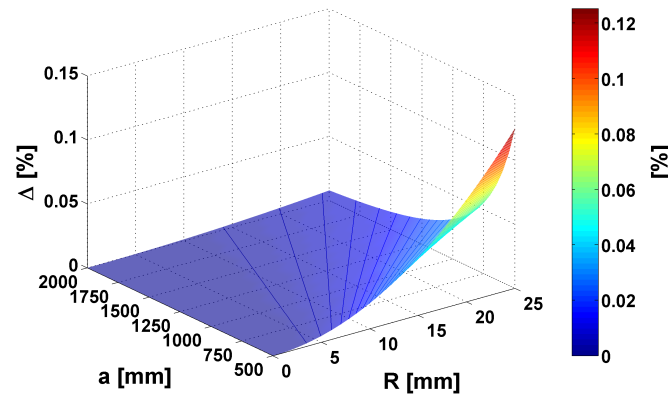


Abbildung 7.3: Relativer vertikaler geometrischer Fehler in vertikaler Rohrsymmetrieebene

Aufgrund der starken Neigung der Rohrrandbereiche in Bezug zur horizontalen Bildachse (vgl. Abbildung 7.2) steigt der Bereich der Rohroberfläche, welcher durch einen Pixel abgedeckt werden muss, je näher man in diese Randbereiche kommt. Gleichzeitig steigt aber auch die Anzahl an Störeinflüssen, wie beispielsweise Reflexionen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, diese Außenbereiche von der Schadensbewertung auszuschließen. Ragt ein zu charakterisierender Schaden in diesen Bereich, so sollte die Kameraposition geändert werden. Defekte, welche einen großen Bereich der Rohrmantelfläche umfassen, können durch eine Kombination von zwei oder mehreren Einzelmessungen erfasst und bewertet werden. Die Auswertemethodik ist dabei analog zu der einer Einzelauswertung, wobei zunächst mehrere Einzelmessungen miteinander zur Erstellung eines Gesamtbildes gekoppelt werden müssen. Dieser Vorgang wird zu einem späteren Zeitpunkt in Kapitel 7.3 erläutert. Abbildung 7.4 zeigt schematisch die Zuordnung der Rohrmantelfläche zu den einzelnen Bildpunkten.

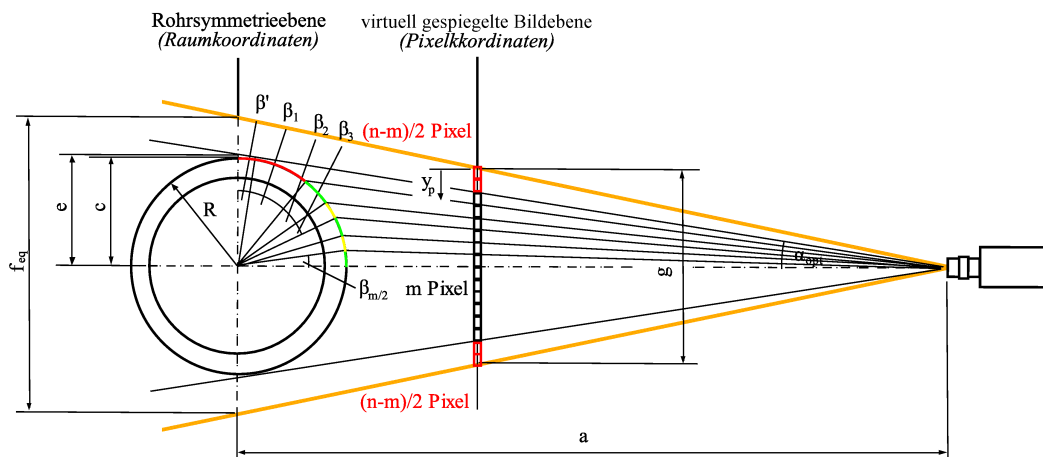


Abbildung 7.4: Prinzipskizze der Rohrprüfung: Pixelzuordnung

Die einzelnen Pixel (n Pixel in vertikaler Bildachse) werden als Quadrate in der Bildebene symbolisiert, wobei die schwarzen Elemente Pixel darstellen, welche die Rohrmantelfläche abbilden (Anzahl: m). Die helleren, roten Pixel zeigen die Umgebung ober- und unterhalb des Rohres (Anzahl: $n - m$). Jedem schwarzen Pixel wird ein Zylindersegment des Rohres zugeordnet. Diese Segmente besitzen unterschiedliche Öffnungswinkel β_1 bis $\beta_{m/2}$, welche in der Nähe der horizontalen Bildebene bzw. Rohrsymmetrieebene minimal werden und in Richtung zur Rohrunter- bzw. Rohroberseite hin ansteigen. Mit β' wird der Winkel des obersten und aus Symmetriegründen auch des untersten Umfangsteilstückes bezeichnet. Das Winkelsegment β' kann nicht betrachtet werden, da es sich in Bezug zum IR-Detektor in einem durch das Rohr abgeschatteten Bereich befindet. Alle übrigen Bogenlängen b_i oberhalb der horizontalen Rohrsymmetrieachse (b_1 bis $b_{m/2}$) können unter Berücksichtigung der das Rohr in vertikaler Richtung abbildenden Pixelanzahl m geschrieben werden als

$$b_i = \arcsin \left(\frac{\frac{m}{2} \cdot (\frac{m}{2} - i + 1)}{\frac{m}{2}} \right) \cdot R \cdot \pi \cdot \frac{1}{180^\circ} \quad \text{für} \quad 1 \leq i \leq \frac{m}{2}. \quad (7.2)$$

Aus Symmetriegründen sind die Bogenlängen $b_{m/2+1}$ bis b_m den Größen $b_{m/2}$ bis b_1 gleich zu setzen.

Abschließend bleibt die Frage nach dem auswertbaren Bereich der sichtbaren Mantelfläche. Aus experimentellen Untersuchungen, welche im Laufe dieser Arbeit an Probenstücken mit unterschiedlichen Krümmungen durchgeführt wurden, können Prüflingsflächen, welche bis zu 60 Grad zur Bildachse des Sensors geneigt sind, effizient charakterisiert und Fehler detektiert werden. Diese Grenze wird im Weiteren für alle später beschriebenen Untersuchungen eingehalten. In der Prinzipskizze in Abbildung 7.4 ist dies exemplarisch zu sehen. Der oberste und der unterste Pixel im relevanten Bildausschnitt (zugeordnet durch das Kreissegment mit dem Winkel β_1 bzw. β_m) erfüllen dieses Kriterium nicht und können somit nicht zur Schadenscharakterisierung herangezogen werden.

Nun, da die positionsabhängige Pixelgröße bestimmt ist, kann ein Algorithmus verwendet werden, welcher die Abwicklung der Schadensfläche bewerkstelligt. Das so entstehende Bild kann in Analogie einer ebenen Messung für die weiteren Betrachtungen bzw. die weitere Bewertung direkt verwendet werden.

7.2.2 Mehrfachkrümmung

Die Bestimmung der wahren Schadensgröße bei mehrfach gekrümmten Strukturen erfolgt im Wesentlichen ähnlich wie die Bestimmung der Fläche bei einfach gekrümmten Strukturen. Die Streckung bzw. Stauchung der einzelnen Sensorpunkte erfolgt nun in zwei Koordinatenrichtungen. Abbildung 7.5 zeigt das prinzipielle pixelweise Vorgehen zur integralen Bestimmung der Schadensfläche.

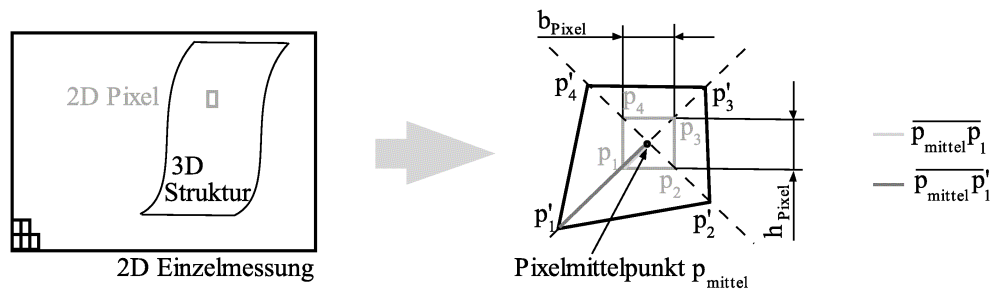


Abbildung 7.5: Prinzipielles pixelweises Vorgehen zur Bestimmung der Schadensfläche bei mehrfach gekrümmten Strukturen

Auf der linken Seite ist anhand einer Prinzipskizze ein typisches zweidimensionales Ergebnis einer zerstörungsfreien Untersuchung zu sehen, welches x_{dim} Pixel breit und y_{dim} Pixel hoch ist. Im ersten Schritt werden die Pixel identifiziert, welche das zu messende dreidimensionale, mehrfach gekrümmte Messobjekt zweidimensional abbilden. Dabei gelten die gleichen Voraussetzungen für die maximal zulässige Neigung der Bauteiloberfläche in Bezug zur Sichtachse wie zuvor bei einfach gekrümmten Strukturen beschrieben. Schadhafte Bereiche, welche diese Bedingung nicht erfüllen, werden für die Schadensauswertung dieser Einzelmessung nicht berücksichtigt.

Durch eine zusätzliche Messung unter einem abweichenden Winkel können auch diese geschädigten Flächen bewertet werden. In einigen Fällen kann durch eine Kombination beider Messungen ein Gesamtbild erstellt (vgl. Kapitel 7.3) und danach die Gesamtschadensfläche bestimmt werden. Ist die Bauteilkrümmung zu stark ausgeprägt, erfolgt die Bewertung der Gesamtschadensfläche direkt mit Hilfe der Einzelmessungen.

Zur prinzipiellen Darstellung des Vorgehens bei mehrfach gekrümmten Strukturen soll vereinfachend angenommen werden, dass alle geschädigten Bereiche diese geometrische Restriktion erfüllen. Die Bestimmung der Schadensfläche erfolgt pixelweise, wobei dieser Vorgang in folgende Hauptschritte unterteilt werden kann. Voraussetzung dafür ist die Kenntnis der Sensor- sowie der Prüflingsposition sowie der dreidimensionalen Probengeometrie.

Definition einer Referenzebene

Die durch die geometrischen Parameter der Kameraposition definierte Sichtebeine dient als Hilfs- bzw. Referenzebene, um in ihr die einzelnen wahren Pixelflächen zu bestimmen. Als Ausgangspunkt dient die Ursprungspixelhöhe h_{Pixel} bzw. Ursprungspixelbreite b_{Pixel} , welche eine ebene Struktur aufweisen würde, welche sich direkt in dieser Ebene befindet. Ist die Ebene nun zur Referenzebene in irgendeiner Form geneigt bzw. gekrümmt, so erhöht sich die durch einen Pixelpunkt repräsentierte Fläche entsprechend.

Sichtstrahl durch Pixelmittelpunkt bzw. durch Pixeleckpunkte

Dazu wird zunächst ein Sichtstrahl definiert, welcher ausgehend von der Sensorposition durch den Pixelmittelpunkt p_{mittel} verläuft (Dieser Pixelmittelpunkt ist in Abbil-

zung 7.5 zu sehen und befindet sich in der Referenzebene). Befindet sich das Messobjekt an dieser Pixelposition nicht in der Referenzebene, so schneidet dieser Sichtstrahl das Objekt vor oder nach dieser Ebene im Punkt $p_{mittel,3D}$. Auf ähnliche Weise werden die Schnittpunkte der Pixeleckpunkte $P_{i,3D}$ auf der dreidimensionalen Prüflingsoberfläche (Index: $3D$) und in der Referenzebene bestimmt.

Bestimmung der virtuellen Halbdagonalen

Als virtuelle Halbdagonalen werden die Strecken $\overline{p_{mittel} p'_i}$ in der Referenzebene bezeichnet. Die Bestimmung dieser Größen wird wie folgt durchgeführt.

Sind die geometrischen Schnittpunkte bekannt (räumliche Koordinaten der Eckpunkte bzw. des Pixelmittelpunktes) so kann eine Gerade vom Pixelmittelpunkt $p_{mittel,3D}$ zu den Eckpunkten $p_{i,3D}$ definiert werden, welche näherungsweise die reale Kontur wiedergibt. Diese Vereinfachung ist vor allem dann zulässig, wenn der lokale Krümmungsradius der Struktur γ_k im Vergleich zur Strecke $\overline{p_{mittel,3D} p_{i,3D}}$ groß ist.

Da diese Voraussetzung für die meisten zu prüfenden Strukturen sowohl in der Luft- und Raumfahrt als auch im Automobilbau durch die Forderung der Detektion von Fehlstellen im Millimeterbereich bei gleichzeitigen minimalen Krümmungsradien von $\gamma_{k,min} \gg 10 \text{ mm}$ gegeben ist (dies bedingt eine Pixelgröße von 1 - 2 mm), wird diese Näherung als zulässige Vereinfachung betrachtet und weiter verfolgt.

Die Länge dieser Strecken $\overline{p_{mittel,3D} p_{i,3D}}$ kann nun in die Referenzebene übertragen werden, wobei dies keine Projektion sondern einen Übertrag der realen Länge im Bezug zur virtuellen Pixelhöhe und Pixelbreite darstellt. Die Projektionsrichtung entspricht der durch die Geraden $\overline{p_{mittel} p_i}$ in der Referenzebene festgelegten Projektionsrichtungen, was zu den Punkten p'_i führt, welche sich in dieser Referenzebene befinden. Somit ist auch die virtuelle Länge der Halbdagonalen $\overline{p_{mittel} p'_i}$ bekannt (in Abbildung 7.5 zu sehen).

Bestimmung der virtuellen Pixelfläche

Die virtuelle Pixelfläche wird als $A_{p,v}$ bezeichnet und beschreibt die Fläche des unregelmäßigen Vierecks p'_1, p'_2, p'_3 und p'_4 . Sie stellt eine Näherungslösung für die durch den Pixel repräsentierte dreidimensionale Prüflingsoberfläche dar.

Bestimmung Gesamtschadensfläche

Unter der Voraussetzung, dass nur eine Schädigung in der Einzelmessung vorhanden ist, kann die Gesamtschadensfläche direkt aus den einzelnen ermittelten Pixelflächen bestimmt werden. Sind mehrere Schadstellen vorhanden, so muss zunächst eine Schadenszuordnung erfolgen, bevor die jeweils gruppierten Pixelmengen zur Schadensberechnung verwendet werden können. Im Gegensatz zur Bestimmung der Schadensfläche bei einfach gekrümmten Strukturen ist eine grafische Darstellung der Gesamtschadensfläche nicht sinnvoll, da keine exakte Abwicklung stattfinden kann. Durch die zweidimensionale Verzerrung der zuvor rechteckigen bzw. in den meisten Fällen quadratischen Pixel - setzt man eine konstante geometrische Auflösung des Sensors in horizontaler und vertikaler Richtung voraus - und den Übertrag in die Referenzebene können die so manipulierten Bildpunkte nicht mehr lückenlos aneinandergereiht wer-

den. Aus diesem Grund wird hier auf eine grafische Darstellung der Schadensfläche verzichtet und lediglich charakteristische geometrische Parameter der Schadensfläche ermittelt und für die spätere Auswertung verwendet (vgl. dazu Kapitel 7.4). Die Darstellung und Lokalisierung der Schäden erfolgt in der perspektivischen zweidimensionalen Prüfansicht.

7.3 Kombination von Einzelmessungen

Die Messung bzw. Charakterisierung einer Struktur oder eines Bauteils erfolgt in den meisten Fällen nicht durch eine Einzelmessung, welche das gesamte Bauteil abbildet. Da das Auflösungsvermögen aller bei der zerstörungsfreien Prüfung verwendeter Sensoren begrenzt ist, müssen in den meisten Fällen mehrere Messungen durchgeführt und diese dann gemeinsam bewertet werden. Aus diesem Grund wird dieses Problem thematisiert und ein Lösungsweg vorgeschlagen, um bei bildgebenden ZfP-Systemen die Bilder dieser Einzelmessungen zusammensetzen.

Zu diesem Zweck werden Sensorebenen definiert, welche jeweils für die Kombination bzw. das Zusammensetzen eines Gesamtbildes verwendet werden können. Die einzige Forderung an die Kameraposition ist dabei, dass die optische Achse senkrecht zu dieser Ebene steht. Alle anderen geometrischen Freiheitsgrade wie

- Sensorrollwinkel φ
- Sensorabstand a
- vertikaler Sensorversatz r_y
- horizontaler Sensorversatz r_x

können frei gewählt werden. Da in der vorliegenden Arbeit ein Thermographiesystem mit Objektiven mit geringen Öffnungswinkeln (zwischen 10° und 20°) verwendet wird, wobei der Sensorabstand relativ zum Prüfling in Relation zum lokalen Krümmungsradius γ_k groß ist, können die sich aus den unterschiedlichen Sensorpositionen ergebenden perspektivischen Unterschiede für die Schadflächenbestimmung vernachlässigt werden. Werden weitwinkliger Optiken bzw. sehr kleine Krümmungsradien bei geringem Sensorabstand verwendet, ist diese Näherung nicht mehr zulässig und muss in geeigneter Weise berücksichtigt werden.

Bei der Kombination der Einzelmessungen sollen zusätzlich relevante Teilbereiche (engl. *Area of Interest* bzw. AOI) definiert werden können, welche die Bereiche markieren, die für die Auswertung relevant sind. Damit werden alle nicht als AOI definierten Bereiche für die Kombination und die nachfolgende Auswertung nicht beachtet, wodurch die Recheneffizienz gesteigert wird. Veranschaulicht man sich nun die geometrischen Gegebenheiten bzw. Zusammenhänge, welche durch diese Forderungen entstehen, gelangt man zu der Prinzipskizze in Abbildung 7.6. Diese Skizze dient im

Folgenden zur Erläuterung der notwendigen Einzelschritte zur Erstellung eines Kombinationsbildes.

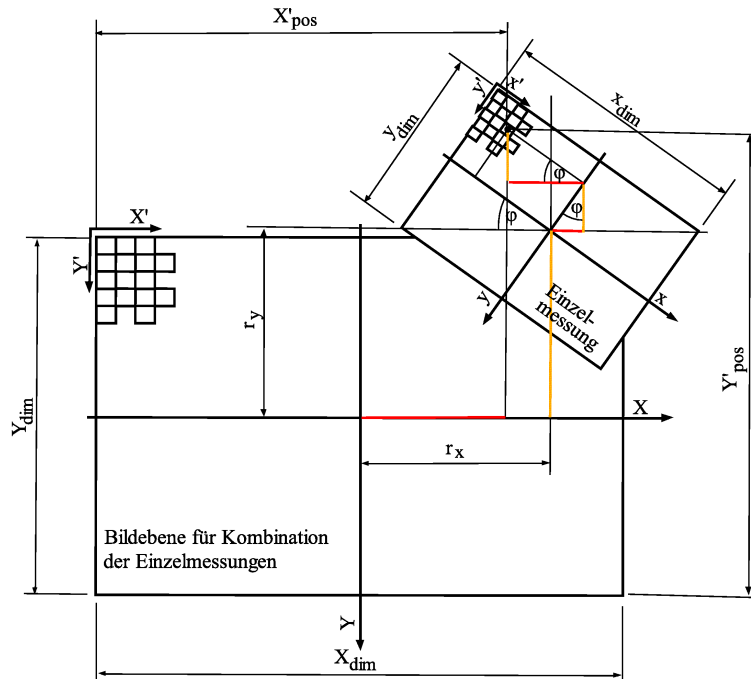


Abbildung 7.6: Prinzipskizze zur Kombination von Einzelmessungen: Geometrische Größen

Der erste Schritt zur Kombination von Einzelmessungen ist die Definition einer Ebene, in die aller Messungen mit unterschiedlichem Sensorabstand projiziert werden sollen. Danach wird die Ausrichtung des Kombinationsbildes bestimmt, bevor die Umrechnung der Einzelbilder in die Kombinationsebene stattfinden kann.

Dazu müssen im ersten Schritt die Bildpunkte der Einzelmessung den entsprechenden Bildpunkten der Kombinationsmessung zugeordnet werden. Führt man diese Operation beispielhaft an dem in Abbildung 7.6 markierten Pixel durch, so kann die Pixelposition X'_{pos} und Y'_{pos} bezüglich des Gesamtbildes geschrieben werden als

$$X'_{pos} = \left(\frac{X_{dim}}{2} \right) + r_x - \left[\left(\frac{x_{dim}}{2} - x' \right) \cdot \cos \varphi - \left(\frac{y_{dim}}{2} - y' \right) \cdot \sin \varphi \right] \cdot f_z \quad (7.3)$$

für die X-Komponente X'_{pos} bzw.

$$Y'_{pos} = \left(\frac{Y_{dim}}{2} \right) - r_y - \left[\left(\frac{x_{dim}}{2} - x' \right) \cdot \sin \varphi + \left(\frac{y_{dim}}{2} - y' \right) \cdot \cos \varphi \right] \cdot f_z \quad (7.4)$$

für die Y-Komponente Y'_{pos} . Der Faktor f_z berücksichtigt die unterschiedliche Pixelgröße zwischen Einzelmessung und Kombinationsbild, welche aus dem Unterschied

des Sensorabstandes zu Stande kommt. Die Größen X'_{pos} und Y'_{pos} stellen dimensionslose Größen dar, welche direkt die Pixelposition des jeweiligen Pixels der Einzelmessung im Kombinationsbild in Bezug zur linken oberen Ecke des Kombinationsbildes angeben.

Wie oben beschrieben, sollen lediglich die relevanten Bereiche bzw. die AOIs für das Kombinationsbild berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wird zum einen eine $X_{dim} \times Y_{dim} \times n_{mess}$ – dimensionale Matrix aufgebaut, welche alle entsprechend gestreckten und gedrehten Einzelmessungen beinhaltet, zum anderen diese Matrix mit einer zweiten $X_{dim} \times Y_{dim} \times n_{mess}$ Matrix multipliziert, welche die AOI-Geometrien als Masken enthält.

Nach der Matrixmultiplikation ergibt sich eine dreidimensionale Matrix, welche letztlich die Daten der zu kombinierenden relevanten Bereiche der Einzelmessungen beinhaltet. Dieser Schritt ermöglicht es, in weiterer Folge ein Gesamtbild der relevanten Bereiche zu erstellen und es können, falls nachträglich noch gewünscht, die AOIs des Gesamtbildes angepasst bzw. verändert werden, ohne alle Schritte zur Kombination von Einzelmessungen nochmals durchlaufen zu müssen.

Unterscheiden sich die Sensorabstände der einzelnen Messungen in Hinblick auf den Sensorabstand der Kombinationsebene bzw. ist ein Rotationswinkel zwischen beiden Bildern vorhanden, kann es bei der Drehung bzw. Vergrößerung des Bildes zu Pixeln bzw. Pixelbereichen im Kombinationsbild kommen, welchen zunächst kein Grauwert aus der jeweiligen Einzelmessung zugeordnet werden kann. Diese Pixelbereiche müssen daher gefüllt werden, um eine lückenlose Auswertung des Kombinationsbildes gewährleisten zu können. Da diese Bereiche in den meisten Fällen sehr klein sind und in vielen Fällen lediglich einen Pixel betreffen, geschieht dies mittels linearer Interpolationsfunktionen, welche sequenziell in beiden Hauptrichtungen des Kombinationsbildes (X' bzw. Y') durchgeführt werden.



Abbildung 7.7: Hochleistungsfahrradrahmen der Firma CUBE Pending Systems vom Typ Elite HPC

Der letzte Schritt zur Erstellung des Kombinationsbildes besteht in der Überlagerung der in die Kombinationsebene projizierten Einzelmessungen. In den meisten Fällen kommt es dabei zu Überschneidungen von Einzelmessungen, wie es in Abbildung 7.8 zu sehen ist. Diese Abbildung zeigt exemplarisch die Kombination von fünf Einzelmessungen an einem Hochleistungsfahrradrahmen aus CFK. Dabei handelt es sich, wie in Abbildung 7.7 zu sehen, um einen CFK-Fahrradrahmen der Firma CUBE Pending Systems vom Typ *Elite HPC*. In Abbildung 7.8 ist das Amplitudenbild einer SPT Untersuchung zu sehen, das zur Untersuchung der Wandstärkenschwankungen erstellt wurde.

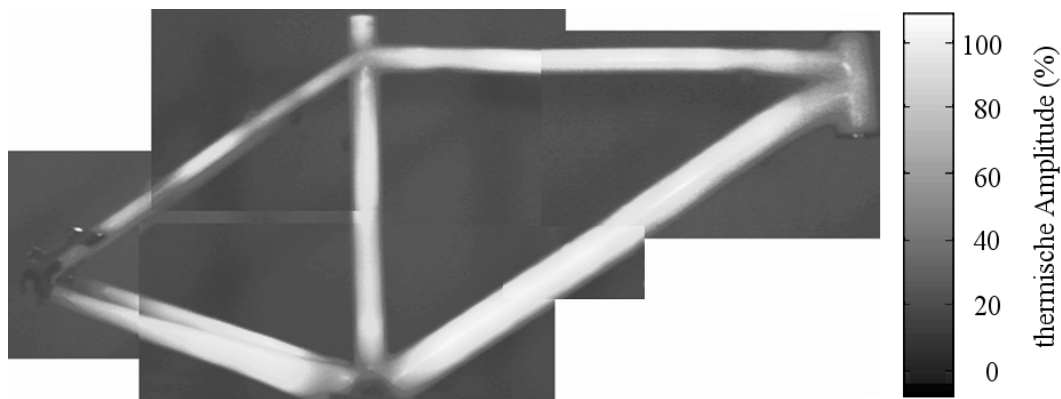


Abbildung 7.8: Beispiel für ein aus fünf Einzelmessungen erstelltes Kombinationsbild eines Hochleistungsfahrradrahmens

An den Übergangsbereichen ist an einigen Stellen ein geometrischer Fehler zu erkennen, welcher aus geometrischen und perspektivischen Ungenauigkeiten herrührt. Da das vorliegende Bild lediglich zur Bestimmung der Wandstärke entlang der jeweiligen Rohrmittelkontur diente, fällt dies nicht ins Gewicht und ist zu vernachlässigen.

Im Kombinationsbild in Abbildung 7.8 ist des Weiteren deutlich der Übergang zwischen den Einzelmessungen zu sehen. An den Überlappungsstellen ist ein unterschiedlich ausgeprägter, linienförmiger Graustufensprung zu erkennen. Dieser Gradient ist unter Umständen für den in Kapitel 7.1 vorgestellten Algorithmus zur Fehlstellendetektion problematisch. Aus diesem Grund besteht die Möglichkeit, in einem Postprozessingschritt diesen Grauwertsprung zu minimieren. Die Überschneidungsbereiche werden dabei graduell gefüllt. Dies bedeutet, dass diese Bereiche detektiert und mit einer jeweils von der Bildmitte des Einzelbildes abfallenden Intensität überlagert werden.

In beiden Fällen, also mit bzw. ohne gradueller Füllung der Überlappungsbereiche erhält man als Ergebnis eine $X_{dim} \times Y_{dim} \times 1$ Matrix, welche die Graustufenwerte der kombinierten Messungen enthält und als solches bei der Schadensauswertung als Einzelmessung behandelt werden kann. Dies ermöglicht es auch, die gleichen Algorithmen wie bei einer Einzelmessung zu verwenden, was den Implementierungsaufwand beträchtlich verringert.

7.4 Definition statistischer Bewertungsparameter

Der letzte Schritt der Analyse besteht in den meisten Fällen aus einer statistischen Bewertung der identifizierten Schäden. Je nach Anwendungsfall sind neben geometrischen Abmessungen (Schadensfläche bzw. Schadensgeometrie) auch prüfinhärente Parameter von Interesse. In die letztgenannte Kategorie fallen beispielsweise die mittels Ultraschallprüfung ermittelten Dämpfungswerte des akustischen Prüfsignals bzw. die ermittelte Laufzeit des Fehlerechos. Für die SPT Methode sind dies thermische Amplituden- und Phasenverschiebungen.

In diesem Kapitel soll vorwiegend auf die statistische Bewertung mittels der erstgenannten Kategorie eingegangen und vorausgesetzt werden, dass je nach Prüfmethode die charakteristischen Größen mitaufgezeichnet werden.

Nimmt man ein Phasenbild als Ausgangssituation (siehe dazu beispielsweise Abbildung 7.1 oben links) und extrahiert die detektierten Fehlstellen, so erhält man im einfachsten Fall ein binäres Bild (Abbildung 7.1 unten Mitte), wobei zwischen geschädigten Flächen und ungeschädigten Bereichen unterschieden wird. Die zusammengehörigen, gruppierten Flächen werden als Grundlage für die statistische Bewertung verwendet (Abbildung 7.1 unten rechts). Neben der Schadensgröße an sich werden noch weitere Kennwerte berechnet, welche für die nachgeschaltete Bewertung der gefundenen Defekte von Bedeutung sein können. Die wichtigsten Kennwerte sind:

- **Schadensfläche bzw. geom. Abmessungen $A_{Schaden}$, $b_{Schaden}$, $h_{Schaden}$:** Diese Kennwerte beschreiben die Schadensfläche bzw. die Längen der Hauptabmessungen (Breite und Höhe) einer einzelnen Schädigungen. Umfasst eine Messung eine Anzahl von i Fehlstellen, so beschreiben die Größen $A_{Schaden}$, $b_{Schaden}$ und $h_{Schaden}$ keine skalaren Größen, sondern jeweils Vektoren der Länge i .
- **Mittlere Schadensfläche A_{mittel} :** Dieser skalare Kennwert beschreibt die mittlere Schadensgröße einer Messung, die aus mehreren Einzelmessungen besteht, welche alle einem Bauteil bzw. einer Struktur zugeordnet sind.
- **Maximale bzw. minimale Schadensfläche A_{min} , A_{max} :** Diese beiden skalaren Kennwerte definieren die minimal bzw. maximal detektierte Schadensfläche. Speziell die maximal detektierte Schadensfläche spielt bei der ersten Abschätzung des Schadenseinflusses eine große Rolle, da, falls dieser Wert unter einer festgelegten Einflussgrenze liegt, das Bauteil als gut bewertet werden kann. Erst wenn die maximale Schadensfläche diesen zuvor festgelegten Wert übersteigt, müssen andere Parameter wie beispielsweise die Lage der Schädigung oder die Beanspruchungsverhältnisse sowie der Krümmungsradius an der Schadstelle miteinbezogen werden.
- **Maximale bzw. minimale geom. Abmessungen der detektierten Schadensflächen b_{min} , h_{min} bzw. b_{max} , h_{max} :** Diese Kenngrößen bezeichnen die minimalen bzw. maximalen Hauptabmessungen der vorhandenen Schädigungen.

gen. Je enger die Minima bzw. Maxima beieinander liegen, desto homogener ist das Schadensbild und desto geringer die Streuung der einzelnen Schädigungen. Dieses Phänomen ist besonders bei fertigungsinhärenten Schädigungen zu beobachten, da, falls der Fertigungsprozess fehlerhaft ist, immer ähnliche Schadensbilder in das Bauteil eingebracht werden.

- **Krümmungsradius der Struktur im Bereich der Schädigung γ_k** : Dieser Kennwert beschreibt den Krümmungsradius der Struktur im Mittelpunkt einer Einzelschädigung. Überschreitet ein schadhafter Bereich eine global festgelegte minimale Fläche, so muss dieser detailliert untersucht werden. Da die Bauteilkrümmung einen deutlichen Einfluss auf die mechanischen Kennwerte beim Vorhandensein einer Schädigung aufweist (vgl. dazu Kapitel 8.1.2.1) wird der Bauteilkrümmungsradius im Zentrum jeder detektierten Fehlstelle bestimmt.
- **Lage der Schädigung im Bezug zur untersuchten Struktur \vec{s}** : Der Positionsvektor \vec{s} beschreibt die Lage der Fehlstelle relativ zum Bauteilkoordinatensystem. Genauer gesagt zeigt dieser Vektor auf den Mittelpunkt der Schädigung, welcher auch zur Bestimmung des Krümmungsradius zuvor ausschlaggebend ist.

Die ermittelten statistischen Werte bilden die Grundlage zur Bewertung der vorhandenen Schädigungen in nachfolgendem Kapitel, wobei zusätzlich noch komplementäre Einflussparameter wie der Belastungszustand bzw. die Laminatgüte eine Rolle spielen.

8 Bewertung des mechanischen Verhaltens beim Vorhandensein von Schäden

In diesem Kapitel werden Methoden vorgestellt, welche eine erste Abschätzung des Schadenseinflusses im Sinne der englischen Bezeichnung „Effects of Defects“ (EoD) ermöglichen. Es werden wichtige Einflussfaktoren vorgestellt, wobei der Focus auf Schäden in stark gekrümmten CFK-Strukturen liegt. Darüber hinaus werden weitere Einflussfaktoren wie Fertigungseinflüsse oder Randeinflüsse betrachtet.

Zur Gewichtung der einzelnen Einflussfaktoren und zur Herleitung einer Gesetzmäßigkeit werden zwei charakteristische mechanische Kennwerte, nämlich der Festigkeits- und Steifigkeitsabfall infolge einer vorliegenden Schädigung, verwendet. Die Vorgehensweise und die Ergebnisse sind in Kapitel 8.1 zusammengefasst.

Nach der Bewertung des Schadenseinflusses müssen die Resultate geeignet visualisiert werden. Dazu wird eine farblich kodierte Darstellung der identifizierten und bewerteten Schadensflächen in Kapitel 8.2 vorgeschlagen.

Im letzten Schritt wird in Kapitel 8.3 das in dieser Arbeit implementierte Softwarepaket gezeigt, welches die zuvor beschriebenen Maßnahmen in einer grafischen Benutzeroberfläche (GUI) zusammenfasst.

8.1 Mechanische Schadenscharakterisierung

Wie zuvor beschrieben, wird der Einfluss von Schädigungen auf das mechanische Verhalten von flachen und stark gekrümmten Strukturen anhand zweier Kennwerte berücksichtigt. Das in dieser Arbeit verwendete Vorgehen wird im Folgenden gezeigt.

Da das Vorhandensein einer Fehlstelle allein kein ausreichendes Kriterium liefert, um die Degradation dieser mechanischen Kennwerte charakterisieren zu können, werden in Kapitel 8.1.2 die Haupteinflussgrößen identifiziert und besprochen. Dazu werden sowohl experimentelle Versuche als auch Simulationen und in der Literatur vorhandenes Wissen bzw. Ergebnisse verwendet.

8.1.1 Bewertungsmethoden

Die Darstellung der Methode zur Bewertung von Schäden erfolgt exemplarisch an Schlagschäden und kann sinngemäß auf beliebige in CFK auftretende Schäden übertragen werden. Die Impactenergie wird dabei gezielt variiert, um eine Parameterstudie mit unterschiedlich großen Impactenergien zu ermöglichen.

8.1.1.1 Vorgehen und Versuchsaufbau

Bei multidirektionalen Laminaten wird in den meisten Fällen ein aus der Luft- und Raumfahrt übernommenes Prüfverfahren für Plattenprobenkörper (DIN 65561 [1] bzw. DIN EN 6038 [2]) zur Ermittlung des Schadenseinflusses auf die mechanischen Druckkennwerte eingesetzt. Die Dicke der Normprobe wurde dabei so bemessen, dass bei einer Druckbeanspruchung einer ungeschädigten Probe bis zum Versagen kein Beulen bzw. kein Stabilitätsversagen auftritt, sondern der Bruch infolge einer Überschreitung der maximal ertragbaren Druck- bzw. Schublasten erfolgt.

Durch den Vergleich von geschädigten und ungeschädigten Probenkörpern können Relationen zwischen der Schädigungsenergie und der Reduzierung der Druckfestigkeit bzw. Drucksteifigkeit hergestellt werden.

Die Bildung eines Zusammenhangs mit der zerstörungsfrei ermittelten Schadensfläche und der Restfestigkeits- und Steifigkeitsreduktion kann danach erfolgen und stellt das Ziel des Vorgehens dar.

Die Ermittlung der mechanischen Kennwerte für ebene Probenkörper erfolgt mittels einer CAI¹-Vorrichtung nach DIN EN 6038 [2].

Um die Ergebnisse der gekrümmten und der ebenen Probenkörper besser vergleichen zu können, sollen analoge Probendicken für beide Untersuchungen verwendet werden. Die Dickenvorgabe der Norm für quasiisotrope Prüflinge mit den Abmaßen von 150 mm (Höhe) und 100 mm (Breite) beträgt 4 mm. Da in dieser Arbeit Rohrgeometrien mit einer Wandstärke von ca. 1,6 mm verwendet werden, muss die CAI-Vorrichtung in geeigneter Weise modifiziert werden, um vorzeitiges Stabilitätsversagen ausschließen zu können.

Abbildung 8.1 zeigt sowohl die Vorrichtung nach DIN 65561 links als auch die modifizierte Prüfeinrichtung rechts, welche durch den Einsatz von Doppelschneiden (Nummer 6 in der Abbildung) die freie Probenbreite einerseits herabsetzt, andererseits auch eine Sperrung der rotatorischen Freiheitsgrade gewährleistet. Somit ermöglicht es diese Einspannung, auch von der Norm abweichende, dünnwandigere Probenkörper zu testen.

¹CAI ist die Abkürzung für die englische Bezeichnung *Compression After Impact*, was mit *Druckbelastung nach einer Schlagschädigung* übersetzt werden kann.

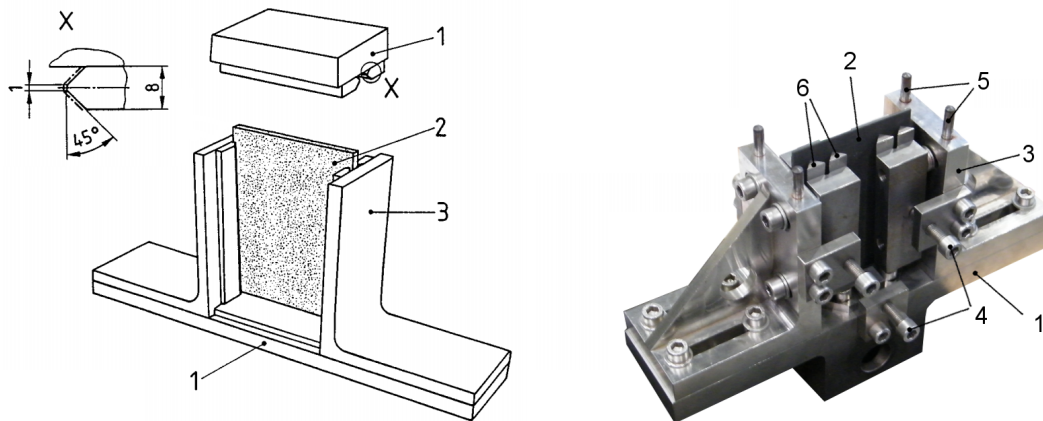


Abbildung 8.1: CAI-Vorrichtung nach DIN 65561 [1]: 1 Druckplatte, 2 Probenkörper, 3 Stützeinrichtung bzw. X Schneidengeometrie (links) und modifizierte CAI-Vorrichtung ohne Kopfstück zur Prüfung dünnwandiger Prüflinge: 1 Druckplatte, 2 Probenkörper, 3 Stützeinrichtung, 4 Anpressschrauben, 5 Führungsbolzen für Kopfstück und 6 Doppelschneiden (rechts)

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse von plattenförmigen auf schwach gekrümmte Geometrien wird in der Literatur ausführlich beschrieben. Verringert man allerdings den Krümmungsradius weiter, so verändert sich in den Laminaten selbst die Spannungsverteilung infolge der Stützwirkung, welche die Krümmung verursacht (vgl. [49]). Bei geschlossener Geometrie (rohrförmige Probenkörper) ist die Übertragbarkeit der aus ebenen Platten gewonnenen Ergebnisse nicht mehr gewährleistet.

Da der Zusammenhang zwischen der Schädigung und deren Einfluss zur Schadensbewertung essentiell ist, wird in dieser Arbeit ein experimenteller Ansatz gewählt, um auch für den Fall (stark) gekrümmter Strukturen eine Korrelation herstellen zu können. Dazu wird ein Rohrbiegeversuch konzipiert und durchgeführt, welcher sich zur Ermittlung von statischen als auch dynamischen Kennwerten eignet.

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 8.2 a schematisch für einen Rohrdurchmesser von $\varnothing 50 \text{ mm}$ dargestellt. Es handelt sich um eine 2-Punkt Rohrbiegevorrichtung. Es können analog zur zuvor beschriebenen Ultraschall-Rohrprüfung Probekörper zwischen 10 mm und 50 mm Durchmesser mechanisch geprüft werden. Die Probeneinspannung verfügt, wie in Abbildung 8.2 b dargestellt, über eine mittels mehrerer Radien realisierte Verrundung, welche an den Biegeverlauf des Rohres angenähert ist (vergleiche dazu Abbildung 8.3 rechts, welche die Ergebnisse einer Simulationsrechnung, nämlich die vertikale Deformation eines CFK Rohres – T700 Faser mit Epoxidharzmatrix – mit $\varnothing 50 \text{ mm}$ Außendurchmesser, einer Wandstärke von $1,6 \text{ mm}$ und einem Lagenaufbau von $[+45, -45, 0]_s$ zeigt). Durch eine abschließende Verrundung läuft die Einspannung aus, um ein Kantentragen zu verhindern und somit eine Spannungsüberhöhung im Übergang des Einspannbereiches zum freien Bereich zu minimieren.

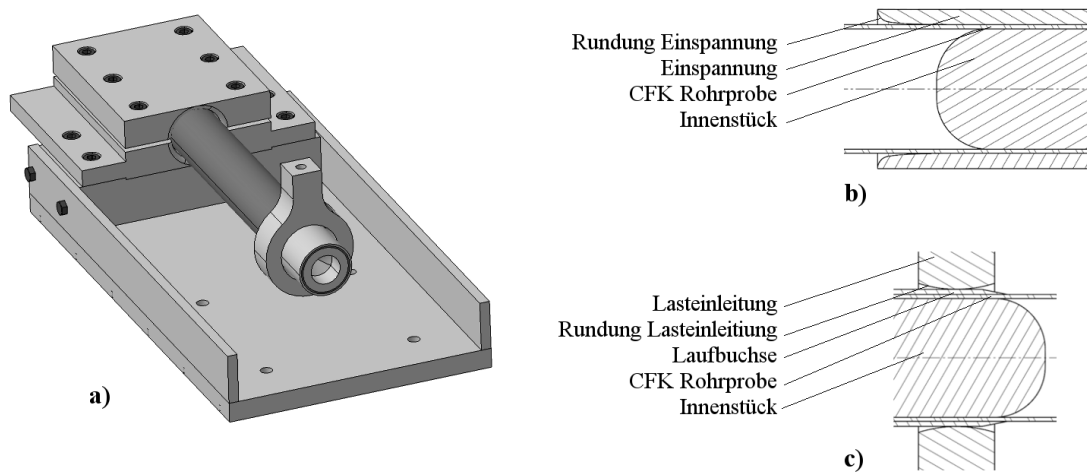


Abbildung 8.2: Zwei-Punkt-Biegevorrichtung zur Untersuchung des Einflusses von Impactschäden auf die mechanischen Eigenschaften rohrförmiger Probenkörper: a) 3D Ansicht, b) Detail Einspannung und c) Detail Lasteinleitung

Im Einspannungsbereich wird ein abgerundeter Innenzapfen aus einer in Relation zur zweigeteilten Stahleinspannung weichen Aluminiumlegierung eingebracht, um die Klemmkräfte über diesen Innenzapfen von oberer zu unterer Rohrrinnenseite zu übertragen. Um verschiedene Rohrdurchmesser prüfen zu können, können unterschiedliche Einlegmodule verwendet werden.

Die Krafteinleitung, welche Abbildung 8.2 c) zeigt, besteht aus einer Gleit- bzw. Laufbuchse und einer Kulisse bzw. Lasteinleitung. Die Laufbuchse verfügt auf der einen Seite über eine Fase, die das Montieren in die Prüfvorrichtung erleichtert. Die Geometrie der Kulisseninnenseite ist wiederum in Analogie zur Einspannung der Biegelinie der Rohrprobenkörper angenähert. Die Prüfung unterschiedlicher Probekörper mit verschiedenen Außendurchmessern erfolgt mit unterschiedlichen Kulissen.

In Analogie zur Einspannstelle wird auch hier ein einseitig abgerundeter Innenbolzen verwendet, welcher zusätzlich fixiert werden muss, da ohne Last keine Klemmkräfte vorliegen. Eine Schraubenverbindung in der Nähe der Rohrstirnseite am Rohrumfang gewährleistet eine lösbare Verbindung. Dies garantiert eine Wiederverwendbarkeit des Innenstücks bei einer nachfolgenden Prüfung.

Die experimentellen Ergebnisse werden mit Simulationsergebnissen verglichen, um den Einfluss der Verrundung in der Einspannung charakterisieren zu können. Die Simulationsmodelle der Rohrstrukturen mit unterschiedlichen Rohraußendurchmessern werden mit Hilfe von Schalenelementen aufgebaut. In Analogie zur Modellierung der Referenzplatte, welche in Kapitel 5.2.2 beschrieben ist, handelt es sich um eine 2 1/2D Modellierung.

Die Lagerung des Modells erfolgt durch eine Sperrung aller Freiheitsgrade im Bereich der Rohreinspannung. Die Kraftaufbringung erfolgt auf die einzelnen Knotenpunkte

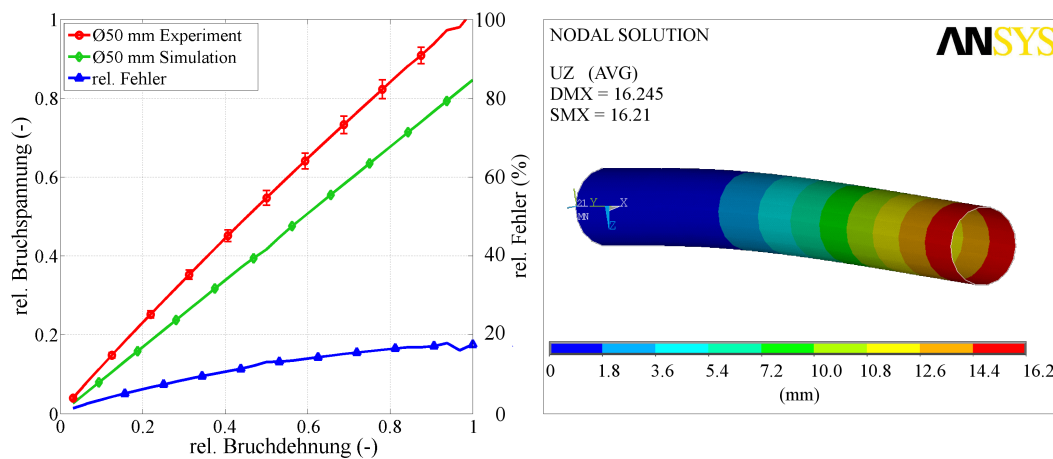


Abbildung 8.3: Vergleich von Simulation und Experiment mit Hilfe eines Spannungs-Dehnungsverlaufes einer Rohrprobe mit T700 Faser und Epoxidmatrix, Rohrdurchmesser $\varnothing 50 \text{ mm}$, Wandstärke $t_{\text{Rohr}} = 1,6 \text{ mm}$, Lagenaufbau $[+45, -45, 0]_s$ (links) bzw. Simulationsergebnisse des gleichen CFK-Rohres für die Rohrdurchbiegung beim Erreichen der Maximaldruckspannung des Laminates an der Rohroberseite: Versagensursache (rechts)

des Simulationsmodells längs eines Umfangsschnittes an der Position der Krafteinleitungskulisse.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abbildung 8.3 zu sehen. Links ist ein Vergleich der experimentellen und simulierten Spannungs-Dehnungsverläufe für ein Rohr mit Durchmesser $\varnothing 50 \text{ mm}$ dargestellt ($n_{\text{stat}} = 6$: Mittelung aus sechs Messungen). Die Spannungs- und Dehnungswerte der Simulationsrechnung werden auf die experimentellen Ergebnisse bezogen.

Die Resultate zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und simulierten Bruchdehnungen, wobei sich die Bruchspannungen aus Simulation und Experiment je nach Durchmesser um 10 % bis 20 % unterscheiden. Die Rohrbiegesteifigkeit ist im Versuch etwas höher als in der Simulation. Diese Abweichung kann mehrere Gründe haben. Neben Messungenauigkeiten können auch in der Simulation getroffene Modellierungsvereinfachungen (z.B. gleichmäßige Kraftaufbringung längs eines Umfangsschnittes) diese Abweichung erklären.

Abbildung 8.3 rechts zeigt die simulierte Verformung beim Versagen. Dieses tritt in der Simulation infolge des Erreichens der maximalen Druckspannung an der Rohroberseite in der Nähe der Einspannung auf. Dabei ist eine maximale vertikale Verformung von etwa 16 mm zu verzeichnen. Die Experimente zeigten einen ähnlichen Mittelwert von ($15,6 \text{ mm}$).

Dieser Prüfaufbau wird im Folgenden verwendet, um Aussagen über die Restfestigkeit von geschädigten, stark gekrümmten Strukturen treffen zu können und, um die Ergebnisse der CAI-Versuche für ebene Probenkörper zu ergänzen.

8.1.1.2 Restfestigkeitsanalyse

Die Restfestigkeitsanalyse erfolgt für ebene Prüflinge im Druckversuch, während für stark gekrümmte Prüflinge der zuvor beschriebene Biegeversuch durchgeführt wird. Die Schädigung befindet sich dabei im Druckbereich an der Rohroberseite (vgl. Abbildung 8.2). Um diese Messungen miteinander vergleichen zu können, wird eine äquivalente Druckspannung für gekrümmte Strukturen berechnet.

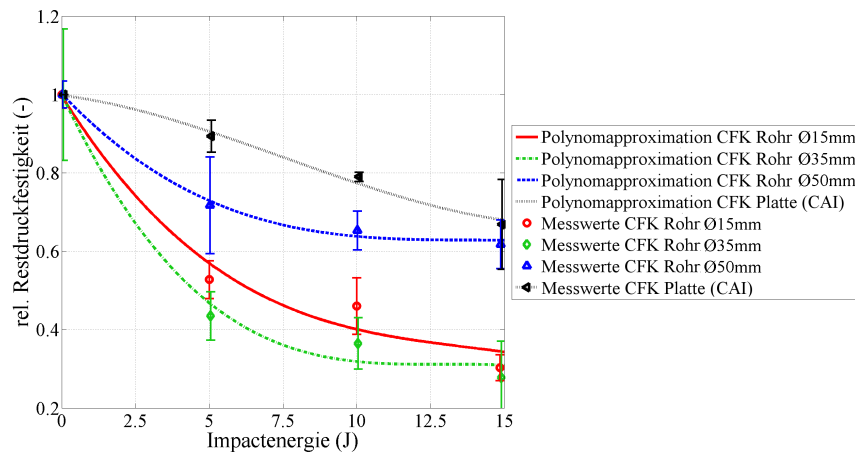


Abbildung 8.4: Ergebnisse einer Restfestigkeitsanalyse an CFK Probenkörpern (T700/Epoxidmatrix, Wandstärke bzw. Dicke: $t = 1,6 \text{ mm}$, Lagenaufbau $[+45, -45, 0]_s$) nach Impactbelastung als Funktion der Impactenergie

Abbildung 8.4 zeigt die Ergebnisse der experimentellen Restfestigkeitsuntersuchung an ebenen CAI Probenkörpern und an Rohrprobenkörper unterschiedlichen Durchmessers ($\varnothing 15 \text{ mm}$ bis $\varnothing 50 \text{ mm}$) als Funktion der Impactenergie. Beide unterschiedlichen Probenkörperkollektive weisen den gleichen Lagenaufbau ($[+45, -45, 0]_s$) sowie den gleichen Werkstoff (T700/Epoxidmatrix) auf. Zusätzlich zu den Messpunkten sind Approximationskurven, welche auf einem Polynomansatz beruhen, eingetragen. Die ermittelten Parameter dieser Polynomapproximationskurven sind im Anhang A.1 in Tabelle A.1 zusammengefasst.

Aus den Ergebnissen kann geschlossen werden, dass die Restfestigkeit unter Druckbelastung bei einem Vorhandensein von Impactschädigungen in allen Fällen deutlich abnimmt. Gekrümmte Strukturen zeigen einen deutlicheren Restfestigkeitsabfall für geringe Schädigungen als ebene Prüflinge. Bei Vergrößerung der Schlagenergie von 5 J auf 10 J und 15 J wird die weitere Reduktion der Druckfestigkeit deutlich geringer.

Bei ebenen Prüflingen ist ein etwas abweichender Verlauf zu erkennen. Die gemessenen Werte in Abbildung 8.4 zeigen zunächst nur eine mäßige Abnahme der Restfestigkeitswerte. Dadurch liegt der Verlauf der ebenen Probenkörper über den Verläufen der gekrümmten Probenkörper. Bei Erhöhung der Impactenergie bis hin zu 15 J nähert sich der Verlauf der ebenen Probenkörper der Kurve der $\varnothing 50 \text{ mm}$ Rohrprobenkörper an.

Die Kurven der $\varnothing 35 \text{ mm}$ und der $\varnothing 15 \text{ mm}$ Probekörper. unterscheiden sich im gesamten Verlauf nur geringfügig. Obwohl der Restfestigkeitsabfall der $\varnothing 15 \text{ mm}$ CFK Rohre zunächst im Vergleich zu der Kurve der $\varnothing 35 \text{ mm}$ Proben etwas geringer ist, nähern sich die beiden Kurven mit steigenden Impactenergien immer weiter an. Bei Schlagschäden von 15 J ist kein signifikanter Unterschied mehr zu erkennen.

Diese analytischen Ausgleichskurven bilden im Folgen die Grundlage zur Bildung einer Korrelation zwischen zerstörungsfrei gemessener Schadensfläche und der Restfestigkeitsabnahme, welche in Kapitel 8.1.2.1 bzw. in Abbildung 8.7 beschrieben ist.

8.1.1.3 Steifigkeitsdegradation

Neben der Betrachtung der Restfestigkeit soll auch der Einfluss von Schäden auf die Steifigkeitsdegradation ermittelt werden. Während für ebene Probekörper in der Literatur einige Studien zu finden sind, gibt es für gekrümmte Strukturen kaum Erfahrungswerte. Aus diesem Grund wird der Einfluss der Schädigung auf das Steifigkeitsverhalten von (stark) gekrümmten CFK-Strukturen ebenfalls experimentell betrachtet. Dafür wird der gleiche Versuchsaufbau, das gleiche Probenkollektiv, sowie die gleiche Schädigungsart (Schlagschäden: 5 J bis 15 J) wie zur Bestimmung des Restfestigkeitsabfalls angestrengt.

Maßgeblicher Parameter ist die Steigung des linear-elastischen Spannungs- Dehnungsverlaufs bis zum Auftreten der ersten Unstetigkeit.

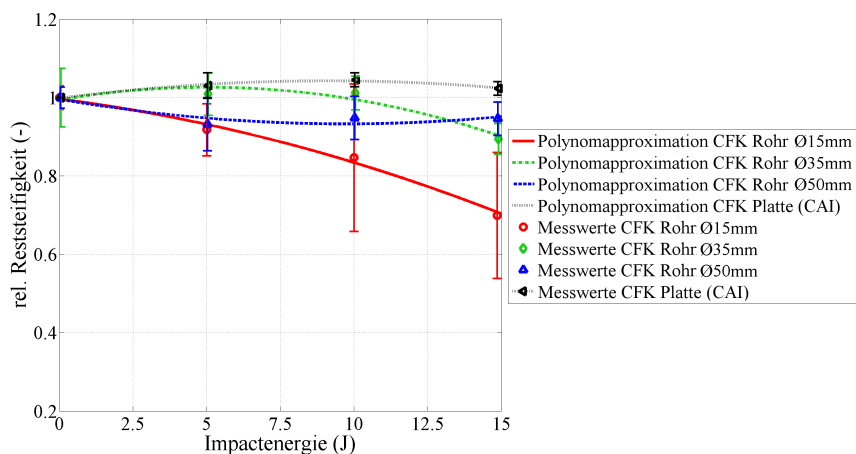


Abbildung 8.5: Ergebnisse einer Steifigkeitsanalyse an CFK Probekörpern (T700/Epoxidmatrix, Wandstärke bzw. Dicke: $t = 1,6 \text{ mm}$, Lagenaufbau $[+45, -45, 0]_s$) nach Impactbelastung als Funktion der Impactenergie

Auch in diesem Fall wird ein Polynomansatz zur Näherung der Messwerte verwendet. Die ermittelten Approximationsparameter sind in Anhang A.1 in Tabelle A.2 zusammengefasst und besitzen wiederum eine Gültigkeit bis zu Schädigungen von 15 J .

Die Ergebnisse zeigen, dass bei ebenen Probenkörpern kein signifikanter Abfall der Reststeifigkeit beim Einbringen von Impactschäden bis zu 15 J beobachtet werden kann. Bei den $\varnothing 50 \text{ mm}$ und den $\varnothing 35 \text{ mm}$ Prüflingen ist ebenfalls mit steigender Impactschädigung keine deutliche Abnahme der Steifigkeit zu beobachten. Lediglich Probekörper mit einem Durchmesser von $\varnothing 15 \text{ mm}$ weisen einen signifikanten Abfall der Steifigkeit bei einer Erhöhung der Impactlast auf, wobei diese Probekörper im Speziellen auch eine große Streuung der Messwerte zeigen.

8.1.2 Einflussparameter auf die Reduktion mechanischer Kennwerte beim Vorhandensein von Schäden

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Einflussparameter zur mechanischen Charakterisierung von Bauteilen beim Vorhandensein von Schäden beschrieben. Wesentliche Einflussparameter auf die Reduktion der Bauteilsteifigkeit bzw. -festigkeit sind:

- a) Bauteilkrümmung
- b) Beanspruchungszustand
- c) Laminatgüte
- d) Position / Einfluss Bauteilrand

8.1.2.1 Bauteilkrümmung

In Kapitel 8.1.1.2 wurde der Zusammenhang zwischen der Restdruckfestigkeit und in Kapitel 8.1.1.3 der Zusammenhang zwischen der Steifigkeitsreduktion und der eingebrachten Schädigung beschrieben. Um im nächsten Schritt eine Korrelation zwischen der zerstörungsfrei ermittelten Schadensfläche und den mechanischen Kennwerten beim Vorhandensein von Schäden als Funktion des Krümmungsradius aufstellen zu können, muss zunächst der Zusammenhang zwischen der Impactenergie und der zerstörungsfrei gemessenen Schadensfläche betrachtet werden.

Wie in Kapitel 6.3.3 gezeigt, ist die Schadensfläche, welche mittels der SPT Methode ermittelt wurde, analog zur Fläche, die mittels Ultraschalluntersuchungen ermittelt wurde (vgl. Abbildung 6.19).

Aus diesem Grund wird in den folgenden Abbildungen und Tabellen nicht mehr explizit zwischen thermischen und akustischen Untersuchungen unterschieden. Die ermittelte Schadensfläche wird als *ZfP Schadensfläche* bezeichnet.

Abbildung 8.6 zeigt diese Schadensfläche als Funktion der Impactenergie für ebene und gekrümmte Prüflinge. Die Messwerte werden durch Approximationskurven ergänzt. Die Parameter dieser Approximation sind in Anhang A.1 in Tabelle A.3 aufgelistet.

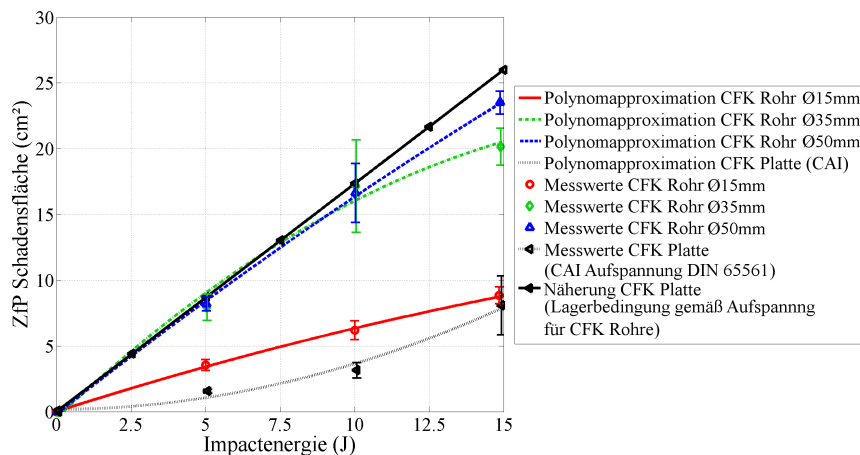


Abbildung 8.6: Zusammenhang zwischen Impactenergie und Schadensfläche für CFK Probekörper (T700/Epoxidmatrix, Wandstärke bzw. Dicke: $t = 1,6 \text{ mm}$, Lageraufbau $[+45, -45, 0]_s$)

Bezieht man sich auf die jeweils ermittelten mittleren Schadensflächen, so ist bei den $\varnothing 15 \text{ mm}$ und $\varnothing 50 \text{ mm}$ Rohren ein fast linearer Zusammenhang erkennbar. Die Ergebnisse der Messungen an $\varnothing 35 \text{ mm}$ Rohren zeigen ähnliches Verhalten wie die Resultate der $\varnothing 50 \text{ mm}$ Probekörper, wobei ein degressives Schadenswachstum mit steigender Impactenergie zu verzeichnen ist.

Betrachtet man die Kurve der ebenen CAI Probekörper, so ist zu beobachten, dass diese deutlich unter den Kurven gekrümmter Bauteile liegt. Der Hauptgrund für dieses Verhalten ist die unterschiedliche Lagerung bei der Einbringung des Impactschadens. Während die CAI Probekörper umlaufend gelagert sind (vergleiche dazu die Einspannvorrichtung in DIN65561 [1]), erfolgt die Lagerung der Rohrprobekörper linienförmig entlang der Rohrlängsachse (wie in Abbildung 6.1 rechts unter der Impactvorrichtung zu sehen). Darüber hinaus verursacht die Ausführung der gekrümmten Probekörper als Rohrprobekörper eine zusätzliche Versteifung der Gesamtstruktur, was ebenfalls zu einer größeren Schadensfläche führt. Somit ist ein direkter Vergleich der beiden Messkurven nicht sinnvoll.

Aus den Ergebnissen der $\varnothing 35 \text{ mm}$ und der $\varnothing 50 \text{ mm}$ Kurven kann geschlossen werden (diese sind bei Impactenergien bis ca. 10 J nahezu deckungsgleich), dass sich der Kurvenverlauf in diesem Bereich auch bei weiterer Vergrößerung des Krümmungsradius nicht signifikant verändern wird. Betrachtet man die Messwerte bei 15 J , so liegen die Werte der $\varnothing 50 \text{ mm}$ deutlich höher als die der $\varnothing 35 \text{ mm}$ Rohre. Das degressive Verhalten der Kurven der $\varnothing 35 \text{ mm}$ Rohre ist deutlich stärker ausgeprägt als bei den CFK-Rohren mit Durchmesser $\varnothing 50 \text{ mm}$. Diese Probekörper zeigen einen fast linearen Verlauf. Für den Extremfall einer ebenen Platte (Krümmung unendlich groß ($\gamma \rightarrow \infty$)) kann somit unter Berücksichtigung eines geringen Fehlers ein linearer Zusammenhang zwischen der Schadensfläche und der Impactenergie angenommen werden.

Im nächsten Schritt kann ein Kennwert für die Festigkeitsreduktion $k_{kr,d}$ bzw. für die Steifigkeitsdegradation $k_{kr,E}$ in Abhängigkeit der Krümmung beim Vorhandensein einer Schlagschädigung bestimmt werden.

Zunächst wird die Reduktion der Festigkeit betrachtet. Die Approximationskurven der Restfestigkeit als Funktion der Impactenergie (vgl. Abbildung 8.4) und die Approximationskurven der Schadensfläche als Funktion der Impactenergie (vgl. Abbildung 8.6) dienen Grundlage für Bildung des Zusammenhangs zwischen der Restdruckfestigkeit bzw. der Steifigkeitsdegradation und der zerstörungsfrei gemessenen Schadensfläche.

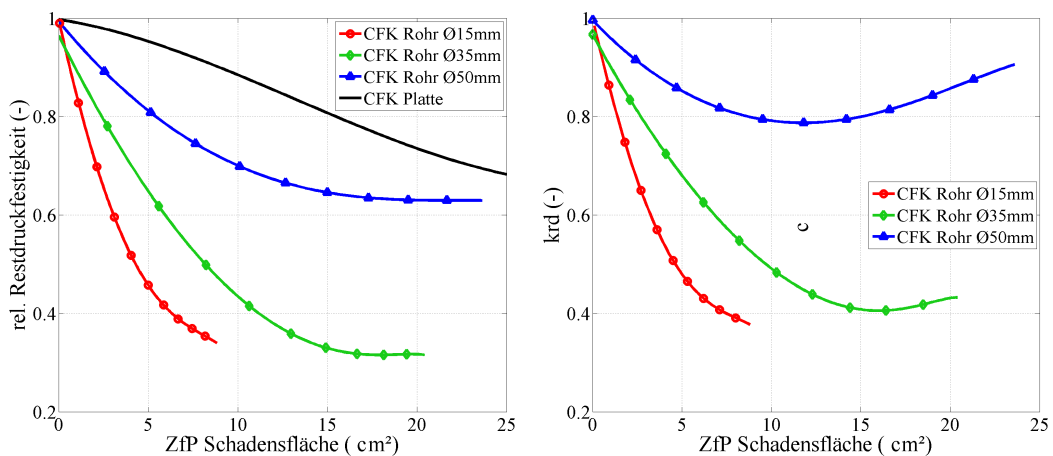


Abbildung 8.7: Zusammenhang zwischen Restdruckfestigkeit und ZfP Schadensfläche (links) bzw. daraus abgeleiteter Abminderungsfaktor $k_{kr,d}$ als Funktion der Schadensfläche (rechts) für CFK Probenkörper mit T700 Faser und Epoxidmatrix, Wandstärke bzw. Dicke: $t = 1,6 \text{ mm}$ und einem Lagenaufbau von $[+45, -45, 0]_s$)

Abbildung 8.7 links zeigt den Abfall der Restdruckfestigkeit als Funktion der detektierten Schadensfläche für ebene und stark gekrümmte Probenkörper. Auffällig ist der steile Abfall aller Kurven gekrümmter Probenkörper beim Auftreten der ersten Schädigung. Je kleiner dieser Krümmungsradius gewählt wird, umso steiler fällt die Kurve zunächst ab. Bei größeren Schadensflächen zeigen alle Kurven einen geringen zusätzlichen Abfall der Restdruckfestigkeit, was in einigen Fällen zu einer Plateaubildung führt.

Dieses Verhalten ist vor allem bei den CFK-Rohren mit größerem Durchmesser zu beobachten ($\varnothing 35 \text{ mm}$ bzw. $\varnothing 50 \text{ mm}$). Die Kurve der $\varnothing 15 \text{ mm}$ Proben zeigt zwar einen Rückgang, weist aber keinen Abschnitt mit näherungsweise horizontalem Verlauf auf. Es ist jedoch zu vermuten, dass dies auch hier bei einer Extrapolation der Kurve der Fall ist.

Die Kurve der ebenen Probenkörper zeigt anfangs einen geringeren Abfall als die der gekrümmten Probenkörper, weist aber ansonsten einen ähnlichen Verlauf auf. Auch eine Abnahme des Gradienten der Steigung ist zum Ende hin deutlich erkennbar. Darüber hinaus liegt die Kurve wie erwartet, immer oberhalb der Kurven der ge-

krümmten Probenkörper. Bezeichnet man die ebenen CFK-Platten als gekrümmte Platten mit unendlicher Krümmung, so kann durchgehend eine deutliche Absenkung der Kurven mit sinkendem Krümmungsradius beobachtet werden (Grenzen: $\infty > \gamma > 15 \text{ mm}$).

Normiert man die Ergebnisse der gekrümmten Kurven auf die Kurve der ebenen Prüflinge, so erhält man den direkten Zusammenhang zwischen der zusätzlichen Abminderung der Restfestigkeit durch die Bauteilkrümmung und der gemessenen Schadensfläche, welcher mit $k_{kr,d}$ bezeichnet ist. Abbildung 8.7 rechts zeigt diesen Sachverhalt. Betrachtet man die $\varnothing 50 \text{ mm}$ Kurve so ist eine maximale Abnahme um 20% bei Schadensflächen zwischen 10 cm^2 und 15 cm^2 gegenüber ebenen Probenkörpern zu verzeichnen. Davor und danach ist die Abminderung geringer. Die Kurven der $\varnothing 35 \text{ mm}$ und $\varnothing 50 \text{ mm}$ liegen darunter und zeigen mit sinkendem Krümmungsradius eine Zunahme der relativen Restfestigkeitsreduktion, wobei der Gradient der Kurve immer geringer wird und im Fall der $\varnothing 35 \text{ mm}$ Kurve sogar wieder leicht zunimmt.

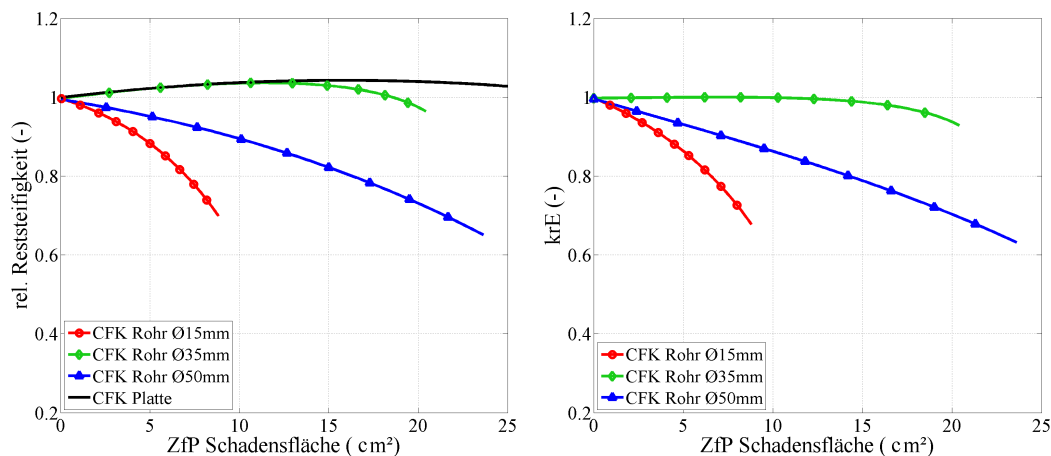


Abbildung 8.8: Zusammenhang zwischen Reststeifigkeit und ZfP Schadensfläche (links) bzw. daraus abgeleiteter Abminderungsfaktor $k_{kr,E}$ als Funktion der Schadensfläche (rechts) für CFK Probenkörper mit T700 Faser und Epoxidmatrix, Wandstärke bzw. Dicke: $t = 1,6 \text{ mm}$ und einem Lagenaufbau von $[+45, -45, 0]_s$

Die Bestimmung des Einflussfaktors für den Steifigkeitsabfall $k_{kr,E}$ erfolgt analog. Abbildung 8.8 links zeigt den Zusammenhang zwischen der Reststeifigkeit und der ermittelten Schadensfläche. Bezieht man die Ergebnisse der Rohruntersuchungen auf die Abminderung der Steifigkeit ebener Prüflinge, so erhält man Abbildung 8.8 rechts. Aus dieser Abbildung kann der Abminderungsfaktor direkt für die geprüften Krümmungsradien entnommen und für abweichende Radien interpoliert werden. Auffällig ist, dass sich die Kurve der $\varnothing 35 \text{ mm}$ Rohrstrukturen in Abbildung 8.8 links wider der Tendenz der übrigen Probenkörper verhält. Während die Kurven der Reststeifigkeit für ebene, $\varnothing 50 \text{ mm}$ und $\varnothing 15 \text{ mm}$ Rohre mit sinkendem Krümmungsradius steilere Kurven mit schneller ansteigenden Gradienten aufweisen, ist dies für die Kurve der $\varnothing 35 \text{ mm}$ Rohre nicht der Fall.

Um dennoch eine Gesetzmäßigkeit für den Einflussfaktor $k_{kr,E}$ ableiten zu können, werden lediglich die Kurven der ebenen, der $\varnothing 50 \text{ mm}$ und der $\varnothing 15 \text{ mm}$ Rohrprobenkörper berücksichtigt. Die Kurve der $\varnothing 35 \text{ mm}$ Probenkörper wird als Ausreißer betrachtet, wobei diese Maßnahme eine konservative Vereinfachung des Sachverhalts bedeutet. Da, wie bereits zuvor erwähnt, die vorgestellten Methoden nur für eine erste Abschätzung des Schädigungseinfluss und nicht zur exakten Bewertung dienen, ist diese Vereinfachung an dieser Stelle zulässig.

Beide Einflussfaktoren, also $k_{kr,d}$ und $k_{kr,E}$, können für beliebige Krümmungen durch Interpolation der in Abbildung 8.7 rechts und Abbildung 8.8 rechts dargestellten Kurven ermittelt und für die Vergleichswertberechnung in Kapitel 8.1.3 berücksichtigt werden.

8.1.2.2 Beanspruchungszustand

Der Beanspruchungszustand spielt bei der Bewertung der Relevanz einer Schadstelle eine große Rolle. Je nach Art der zu erwartenden Schädigungsmechanismen sind unterschiedliche Beanspruchungszustände kritisch. Im Falle einer Delamination ist im speziellen Druck und Schub kritisch. Sind vorwiegend Faserbrüche vorhanden, kann auch Zugbeanspruchung zum vorzeitigen Versagen führen.

Da in dieser Arbeit vorwiegend Impactschädigungen behandelt werden, wird dieser Schädigungstyp als Beispiel verwendet. In diesem Fall dominieren Delaminationen, wobei Faserbrüche und Zwischenfaserschäden auch vorhanden sind. Im speziellen wird folgenden zwei Fragestellungen nachgegangen:

- Einfluss von Druck-, Scher-, und Zuglasten bei durch Impact geschädigten Bauteilen
- Einfluss von Impactschädigungen auf das Ermüdungsverhalten bei unterschiedlichen Spannungsverhältnissen R_σ

Die Erkenntnisse werden analog zum vorherigen Kapitel in Abminderungsfaktoren zusammengefasst, wobei k_{bea} den Abminderungsfaktor infolge unterschiedlicher Beanspruchung und k_{dyn} infolge zyklischer Beanspruchung bezeichnet.

Druck-, Scher-, und Zugbeanspruchung

Die Spannungsverhältnisse am Ort des Impacts sollen im Zuge der Bewertung in drei Kategorien eingeteilt werden. Die Einteilung erfolgt hierbei in *Druck-*, *Scher-* oder *Schub-* sowie *Zugbeanspruchung*. Es wird dabei die dominierende bzw. dimensionierende Beanspruchungsform identifiziert und für die Vergleichswertberechnung verwendet.

Da niedrigbeanspruchte Bereiche zwar eine dominierende Beanspruchungsart aufweisen, aber Fehler in diesen Bereichen nicht als kritisch anzusehen sind, wird für diese Bereiche der Abminderungsbeiwert k_{bea} zu 1 gesetzt.

Um niedrigbeanspruchte Bereiche von hochbeanspruchten Bereichen zu trennen, wird

ein vereinfachtes Versagenskriterium der maximalen Hauptspannungen nach [67] verwendet, welches in der Regel für die Vordimensionierung bzw. eine Grobabschätzung verwendet wird. Unter Verwendung der Indizes 11 und 22 für die Hauptachsen sowie d für eine Druckbeanspruchung unter dem Winkel α und R für die jeweiligen Versagensspannungen, kann nach [67] für die Versagensbedingungen geschrieben werden

$$\sigma_{xx} \cos^2 \alpha < R_{11}, \quad \sigma_{xx} \sin^2 \alpha < R_{22}, \quad (8.1)$$

$$\sigma_{xx} \cos^2 \alpha < R_{11}^d, \quad \sigma_{xx} \sin^2 \alpha < R_{22}^d \quad (8.2)$$

für Zug- und Druck bzw.

$$\sigma_{xx} \sin \alpha \cos \alpha < R_{12} \quad (8.3)$$

für Schub. Führt man Anstrengungsfaktoren f_e ein, die den Quotienten aus der vorherrschenden Beanspruchung und der Versagensspannung bilden, so kann ein Maß für die Werkstoffreserven gebildet werden. Werte kleiner als 0,25 weisen Bereiche niedriger Beanspruchung auf, während größere Werte Bereiche aufweisen, in denen das Vorhandensein eines Defektes potentiell zum Versagen führen kann. Der Grenzwert wird dabei entsprechend experimenteller Untersuchungen festgesetzt.

Zuglasten sind beim Vorhandensein von Impactschädens i.d.R. unkritisch und finden in der Literatur kaum Beachtung. Druck- und Scherlasten sind deutlich kritischer (vgl. [80]). Unter reiner Zugbeanspruchung kommt es in den meisten Fällen lediglich zu einer geringen Reduktion der Zugfestigkeit (in einigen Fällen kaum messbar), wobei diese Reduktion wiederum vom Lagenaufbau des Laminates abhängig ist. Aus diesem Grund wird für eine Zugbeanspruchung ein Reduktionsfaktor von $k_{bea} = 1$ verwendet.

Beim Vorhandensein von Delaminationen ist die Restdruckfestigkeit nicht zuletzt wegen der wegfallenden Stützwirkung des Matrixverbundes deutlich reduziert (vgl. Abbildung 8.7). Da in Kapitel 8.1.1.2 bereits der Einfluss der Krümmung ausführlich behandelt worden ist, wird hier genauer auf den Kurvenverlauf der ebenen Probekörper eingegangen. Die Abnahme der Restdruckfestigkeit erfolgt zunächst progressiv, wobei ab Schädigungen von ca. $12,5 \text{ cm}^2$ ein degressives Verhalten zu verzeichnen ist.

Extrapoliert man den Kurvenverlauf der Plattenprobekörper für Schädigungen größer als 15 J , so ist eine weitere Abflachung der Kurve zu erwarten, wobei der Wert 0,6 mit großer Wahrscheinlichkeit nicht unterschritten wird. Somit ist auch für größere Schädigungen eine Festigkeitsreduktion um maximal 40% zu erwarten. Ab einer bestimmten Impactenergie kommt es zu einem Durchschlag des Impactkörpers durch den Prüfling. Dadurch hat eine Erhöhung der Impactenergie ab diesem Zeitpunkt keinen weiteren Einfluss auf die hervorgerufene Schadensfläche. Um eine konservative Abschätzung zu gewährleisten, wird dieser asymptotische Grenzwert von 0,6 für den

Abminderungsfaktor k_{bea} verwendet. Alternativ dazu kann die Kurve für ebene Probenkörper aus Abbildung 8.7 direkt verwendet werden, um den Faktor k_{bea} als Funktion der Schadensfläche zu bestimmen.

Scher- oder Schubspannungen sind beim Vorhandensein von Schäden ebenfalls nicht zu vernachlässigen, da hier insbesondere bei Schichtverbunden die Zwischenfaserbereiche einen Großteil der Lasten aufnehmen müssen. Durch das Vorhandensein einer Schädigung werden eben diese Bereiche wesentlich geschwächt. Will man diese Beobachtung in einen charakteristischen Abminderungsbeiwert überführen und lehnt sich an experimentelle Ergebnisse aus der Luftfahrt an, so ist diese Beanspruchung geringfügig unkritischer als reine Druckbeanspruchung. Aus diesem Grund werden in der Praxis in den meisten Fällen CAI Tests durchgeführt, wobei die Abminderung der ertragbaren Drucklast ermittelt wird. Mit Hilfe eines Reduktionsfaktors wird daraus die ertragbare Schublast beim Vorhandensein von Fehlstellen ermittelt.

In dieser Arbeit wird der Abminderungsfaktor k_{bea} zu 0,75 gesetzt, wobei experimentelle Untersuchungen zu Grunde gelegt werden. Die Abminderungskennwerte k_{bea} ergeben sich somit zu:

$$k_{bea} = \begin{cases} 1 & , \text{ wenn } f_e < 0,25 \\ 1 & , \text{ bei vorwiegender Zugbelastung und } f_e \geq 0,25 \\ 0,6 & , \text{ bei vorwiegender Druckbelastung und } f_e \geq 0,25 \\ 0,75 & , \text{ bei vorwiegender Scherbelastung und } f_e \geq 0,25 \end{cases} \quad (8.4)$$

Schadenseinfluss bei zyklischer Belastung

In den meisten praktischen Anwendungen von CFK-Bauteilen treten zyklisch wechselnde Belastungen auf. Aus diesem Grund ist es essentiell, den Einfluss von vorhandenen Schädigungen auf den Verlauf der Bauteilwöhlerlinie zu kennen. Beheshty und Harris [14] führten Studien zum Schwingfestigkeitsverhalten von Faserverbunden nach Impactschädigung durch. Sie stellten einen Vergleich von ungeschädigten und geschädigten Prüflingen an, indem sie die beiden Wöhlerkurven miteinander verglichen.

Abbildung 8.9 zeigt einige Ergebnisse der Untersuchung, wobei vier unterschiedliche Spannungsverhältnisse (R_σ) untersucht wurden. Diese umfassten neben fast ausschließlichen Zugschwelllasten mit nur marginalem Druckanteil ($R_\sigma = 0,1$) über Wechsellasten mit unterschiedlichen Zug- und Druckanteilen ($R_\sigma = -0,3$ und $R_\sigma = -1,5$) auch Druckschwelllasten ($R_\sigma = 10$).

Betrachtet man die Messwerte der $R_\sigma = 0,1$ Kurve, so ist ersichtlich, dass keine signifikante Abweichung der Messpunkte von der Mittelkurve der ungeschädigten Prüflinge zu erkennen ist. Mit steigendem Druckanteil kommt es zu einer Verschiebung der Messwerte hin zu vergleichsweise niedrigeren Werten. Würde man eine Ausgleichskurve durch die Messpunkte legen, so ist eine Abflachung der Kurve mit

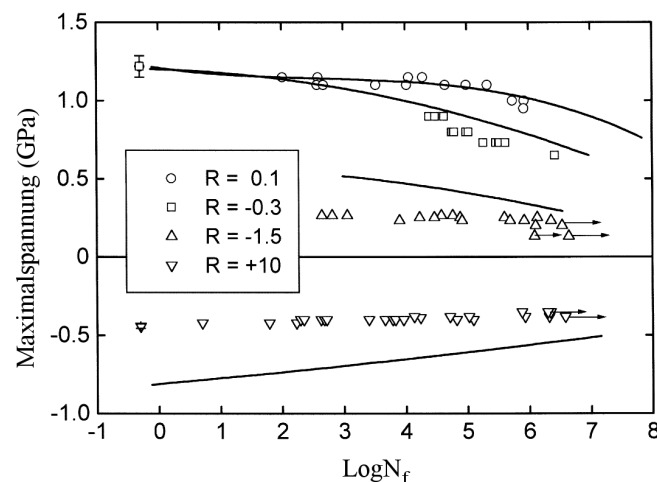


Abbildung 8.9: Wöhlerlinien eines HTA/982A CFK-Laminates $[(\pm 45, 0_2)_2]_s$ nach Impactschädigung (Messpunkte) bzw. ohne Schädigung (Linien) bei unterschiedlichen Spannungsverhältnissen R_σ [14]

steigendem Druckanteil der zyklischen Belastung zu beobachten. Dies bedeutet in weiterer Folge, dass geschädigte Prüflinge unter steigender Drucklast eine geringere Dauerschwingempfindlichkeit aufweisen. Die Messungen der geschädigten Proben bei $R_\sigma = -0,5$ und $R_\sigma = +10$ liegen hierbei sogar fast auf einer horizontalen Linie. Will man diesen Einfluss in der Schadensbewertung berücksichtigen, so reicht es nach [14] aus, den Abfall der statischen Kennwerte infolge der Schädigung zu berücksichtigen, da die entsprechenden Wöhlerlinien einen ähnlichen bzw. mit steigendem Druckanteil sogar flacheren Verlauf aufweisen. Diese Annahme ist vor allem bei Druckschwelllasten konservativ, wird jedoch dadurch gerechtfertigt, da somit lediglich statische Kennwertdegradationen berücksichtigt werden müssen, was die Bestimmung des Schädigungseinflusses deutlich vereinfacht.

Somit wird in dieser Arbeit der Reduktionsfaktor k_{dyn} zu eins gesetzt. Bei einer exakten Einbeziehung der dynamischen bzw. zyklischen Phänomene muss dieser Kennwert dementsprechend verändert werden.

8.1.2.3 Laminatgüte

Die Berücksichtigung der Laminatgüte soll in dieser Arbeit in Anlehnung an [15] auch mittels eines Abminderungsfaktors erfolgen, welcher experimentell ermittelt wird. Diese Vorgehensweise spiegelt eine integrale Form der Miteinbeziehung der Fertigungsfehler und -ungenauigkeiten wider, wobei die zu Grunde liegenden Mechanismen phänomenologisch betrachtet werden. Eine alternative Möglichkeit bildet die Aufspaltung der Fertigungseinflüsse in einzelne Parameter wie Faservolumengehalt, Porosität, Fremdkörpereinschlüsse, Welligkeit, Oberflächengüte, etc., welche jeder für sich genommen einen charakteristischen Einfluss aufweisen. Durch die unterschiedlich gewichtete Summation dieser einzelnen Einflussparameter können verschiedene Ferti-

gungsmethoden und -güten nachgebildet und berücksichtigt werden. Diese Vorgehensweise erfordert allerdings eine breite statistische Basis der einzelnen Parameter, was in vielen praktischen Fällen nicht gegeben ist. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit lediglich ein integraler Faktor, welcher als k_{lam} bezeichnet wird und Werte zwischen 0 und 1 aufweist, experimentell ermittelt. Der Wert 1 bedeutet ein weitgehend perfektes Laminat, während 0 einen Abfall der mechanischen Kennwerte um 100% bedeutet, was gleichbedeutend mit einer Zerstörung des Laminates ist und nur theoretische Relevanz besitzt.

Zur Ermittlung dieses Faktors werden in dieser Arbeit Probenkörperversuche durchgeführt, um die wesentlichen mechanischen Parameter wie die Zug-, Druck und Scherfestigkeit bzw. die dazugehörigen Steifigkeiten zu ermitteln. Aus diesen mechanischen Kennwerten wird im nächsten Schritt ein Vergleichswert ermittelt, der den Quotienten der experimentellen Werte und der theoretischen Werte für perfekte Laminat darstellt (Faktor k_{lam}).

Untersuchungen an verschiedenen CFK Laminaten in der Prepreg-Autoklavtechnik wie auch in der RTM-Technik zeigten je nach Fertigungsqualität typischerweise Werte für k_{lam} zwischen 0,7 und 0,95.

8.1.2.4 Position/ Randeinfluss

Gleich ausgeprägte Schäden können je nach Position unterschiedliche Einflüsse auf das Tragverhalten der Struktur aufweisen. Befinden sich Schäden in unmittelbarer Nähe zum Bauteilrand bzw. zu kritischen Bauteilbereichen, ist ein deutlicher Abfall der mechanischen Kennwerte zu beobachten. Dies wird nachfolgend anhand experimenteller Untersuchungen gezeigt.

Befindet sich z.B. eine Delamination in einem Schichtlaminat in der Nähe des Bauteilrandes, so kann es durch eine Lastumlagerung zu erhöhten Bauteilspannungen im Bereich zwischen der Schädigung und dem Bauteilrand kommen. Dies kann ein weiteres Schadenswachstum der Delamination hin zum Bauteilrand bedingen. Betrachtet man eine Delamination in der Bauteilmitte, so kommt es auch in dieser Situation zu einer Lastumlagerung, welche allerdings im ungestörten und ungeschädigten umgebenden Bereich stattfinden kann. Da diese Lastumlagerung kontinuierlich und großflächig erfolgt, kann ein weiteres Schadenswachstum vermieden werden.

Die Erfassung dieses Einflussfaktors k_{pos} bezüglich gefährdeter Bauteilbereiche (Bauteilrand, Fügepositionen, Inserts, Dickensprünge, etc.) ist aufgrund der Vielzahl möglicher Ausprägungen dieser Bereiche gerade im Zusammenhang mit unterschiedlichen Defektypen und möglichen Lagenaufbauten des CFK Grundwerkstoffes äußerst schwierig. An dieser Stelle wäre eine Simulation der tatsächlichen geometrischen Verhältnisse zielführend, was aber in der Praxis aufgrund des sehr hohen Aufwands in den meisten Fällen nicht tragbar ist. Aus diesem Grund soll auch hier eine Näherungsbeurteilung erfolgen, um diesen Einfluss in der Gesamtbewertung der Schädigung zumindest ansatzweise berücksichtigen zu können.

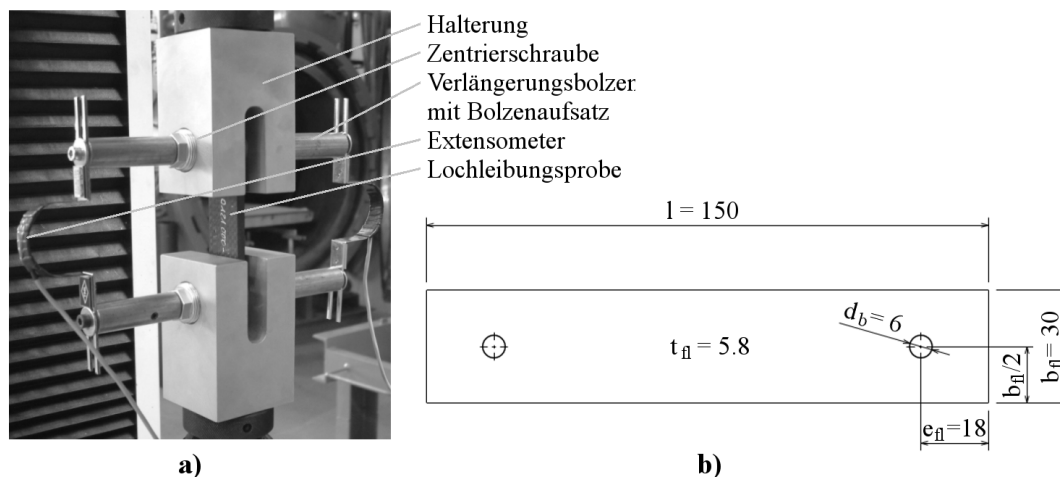


Abbildung 8.10: Versuchsaufbau Lochleibungsversuche: a) Zugversuch [77] und b) Detail Prüfling: Lagenaufbau $[[0^\circ/90^\circ, \pm 45^\circ]_8]_s$, Werkstoff: 8.3508.80 mit Epoxidmatrix

Zu diesem Zweck werden die Ergebnisse von Lochleibungsversuchen an ebenen Laminaten herangezogen, welche an Prüflingen mit unterschiedlicher Geometrie durchgeführt wurden.

Durch die Einleitung einer Lochleibungsspannung mittels einer $\varnothing 6 \text{ mm}$ Bohrung in ein CFK-Schichtlaminat wird die zuvor beschriebene Umlagerung des Kraftflusses um die Bohrung provoziert. Abbildung 8.10 zeigt den Versuchsaufbau und die Probeneinspannung links bzw. die Probengeometrie auf der rechten Seite. Die geometrischen Abmessungen der Referenzprobe sind in Millimeter angegeben. Die Größen b_{fl} (Probenbreite), e_{fl} (Bohrungsexzentrizität) und t_{fl} (Probendicke) werden im Folgenden variiert, um den Randeinfluss auf die Lochleibungsfestigkeit und somit der das Bauteil schwächenden Komponente unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bauteildicken zu analysieren. Als Bewertungsparameter wird die Lochleibungsfestigkeit und das Schadensbild verwendet. Zur Feststellung des ersten Versagens erfolgt eine Dehnungsmessung mit Hilfe zweier Omega-Extensometer, welche mit Hilfe von Verlängerungsbolzen mit den zwei Bohrungen gekoppelt sind (vergleiche Abbildung 8.10 links).

Bei ausreichendem Randabstand ist als Versagensmechanismus ein Lochleibungsversagen (Abbildung 8.11 links), also ein Versagen im Druckbereich der Bohrung zu beobachten, was auch bei einer unendlich ausgedehnten Platte der Fall wäre. Kommt es zum Wangen- oder Spaltbruch (Abbildung 8.11 Mitte und Abbildung 8.11 rechts), ist von einem Einfluss der Probenabmessungen auf das Versagen auszugehen. Zusammen mit der Reduktion der Lochleibungsfestigkeit kann der Einfluss schließlich klassifiziert werden.

Betrachtet man die Variation der Probenbreite b_{fl} bzw. der Bohrungsexzentrizität e_{fl} unter Berücksichtigung unterschiedlicher Probendicken, so kommt man mit Hilfe einer

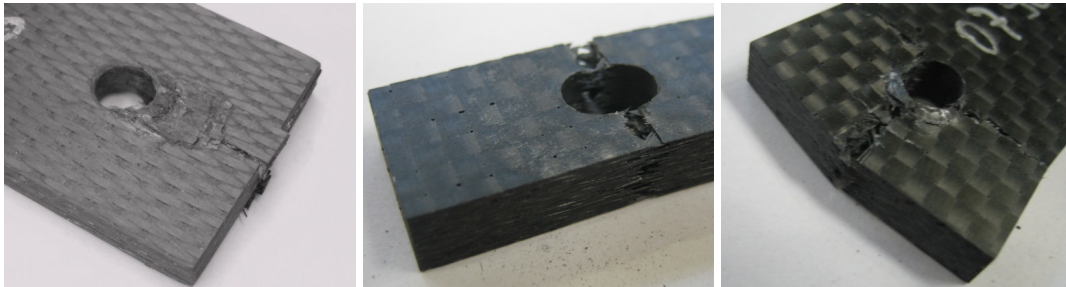


Abbildung 8.11: Versagensarten bei Lochleibungsversuchen [77] an CFK Proben (Lagenaufbau $[[0^\circ/90^\circ, \pm 45^\circ]_8]_s$, Werkstoff: 8.3508.80 mit Epoxidmatrix): Lochleibungsversagen (links), Wangenbruch (Mitte) und Spaltbruch (rechts)

teilkategoriellen Analyse zu den Ergebnissen bzw. Randwerten der Lochleibungsfestigkeit, die in Tabelle 8.1 zu sehen sind.

Dicke [mm]	Breite b_{fl} [mm]			Exzentrizität e_{fl} [mm]			Dicke [mm]	Breite b_{fl} [mm]			Exzentrizität e_{fl} [mm]		
	15	21	30	9,5	13	18		15	21	30	9,5	13	18
2,2	-	-	-	-	-	565	2,2	-	-	-	-	-	67
3,6	-	-	-	-	-	734	3,6	-	-	-	-	-	87
5,8	468	722	839	490	685	839	5,8	56	86	100	58	82	100

Lochleibungsfestigkeit in N/mm^2

Tabelle 8.1: Einfluss der Probenbreite b_{fl} und der Bohrungsexzentrizität e_{fl} auf die ertragbare Lochleibungsfestigkeit in (MPa) (links) und als prozentualer Wert (%) in Bezug zur Referenzprobe (rechts)

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Lochleibungsfestigkeit der Prüflinge (Vergleichswert aus jeweils 5 Probenkörpern mit gleichen Abmessungen - $n_{stat} = 5$) sowohl bei einer Verringerung der Probenbreite als auch des Randabstandes (Exzentrizität) deutlich abnimmt. Diese Beobachtung ist auch durch die Versagensarten der Prüflinge zu belegen. Nur die Prüflinge mit $b_{fl} = 30 \text{ mm}$ und $e_{fl} = 18 \text{ mm}$ zeigen durchwegs reines Lochleibungsversagen. Verringert man die jeweiligen Parameter, so ist eine Kombination von Lochleibungsversagen und Wangen- bzw. Spaltbruch zu beobachten. Die Proben mit den jeweils geringsten geometrisch charakteristischen Werten versagen großteils durch Wangenbruch ($b_{fl} = 15 \text{ mm}$) bzw. Spaltbruch ($e_{fl} = 9,5 \text{ mm}$). Normiert man die Randabstände auf den Bohrungsdurchmesser (in Analogie zum Durchmesser eines vorhandenen Schadens), so bekommt man für die nicht durch Randinflüsse dominierte Probe ($b_{fl} = 30 \text{ mm}$, $e_{fl} = 18 \text{ mm}$) Randabstände p_{rand} von $2,5 \cdot d_{fl}$ stirnseitig und $2 \cdot d_{fl}$ für die Seitenwangen. Bezieht man sich auf den größeren Wert und definiert diesen als Maß für den minimalen Randabstand für randeinflussfreie Schädigungen, kann der Abminderungsfaktor k_{pos} zu eins gesetzt werden. Alle Schä-

den, die sich näher an Bauteilrändern befinden, weisen geringere Restfestigkeiten auf. Da allerdings keine ausreichende experimentelle Basis für eine exakte Bestimmung der Abminderung vorhanden ist, soll an dieser Stelle für die in dieser Arbeit vorgestellte erste Abschätzung der Abminderungsfaktor für diese Schäden zu $k_{pos} = 0,5$ gesetzt werden. Somit wird folgende Fallunterscheidung getroffen:

$$k_{pos} = \begin{cases} 1 & , \text{ wenn } p_{rand} \geq 2,5 \cdot b_{Schaden} \\ 0,5 & , \text{ wenn } 0 \leq p_{rand} < 2,5 \cdot b_{Schaden} \end{cases} \quad (8.5)$$

Abschließend kann noch der Einfluss der Probendicke auf die Lochleibungsfestigkeit in Tabelle 8.1 betrachtet werden. Normiert man die Werte der dünneren Probenkörper wiederum auf die Lochleibungsfestigkeit des Referenzstückes, so sind auch hier deutliche Abnahmen zu verzeichnen. Vergleichsstudien zeigen auch für dünnwandige Probenkörper eine ähnliche Tendenz bei der Verringerung des Randabstandes wie hier für Proben mit $t_{fl} = 5,8 \text{ mm}$ gezeigt.

8.1.3 Berücksichtigung der Einflussparameter in Form eines Vergleichswertes

Nachdem die einzelnen Einflussparameter k_i beschrieben sind, muss eine Zusammenführung dieser Einflüsse in einen Vergleichswert erfolgen, um eine Basis für die Bewertung des Schädigungseinflusses schaffen zu können. Ein Bauteil- bzw. ein Gesamtstrukturversagen kann sowohl durch ein Überschreiten der Restfestigkeit als auch infolge einer Steifigkeitsreduktion und in weiterer Folge einer Umlagerung der Kräfte und damit verbundener Überlastung anderer Bauteile / Strukturen erfolgen. Daher wird im Folgenden zwischen einem Festigkeits- und einem Steifigkeitsvergleichswert unterschieden. Diese integralen Kennwerte entsprechen im Wesentlichen einer Reduktion der lokalen Sicherheitsbeiwerte und geben so Aufschluss über die lokale Schädigungsrelevanz.

Unter Berücksichtigung aller zuvor beschriebenen Einflussfaktoren kann der festigkeitsrelevante Vergleichs- bzw. Reduktionsfaktor geschrieben werden als

$$k_{ges_d} = k_{kr,d} \cdot k_{bea} \cdot k_{dyn} \cdot k_{lam} \cdot k_{pos} \cdot \quad (8.6)$$

Der steifigkeitsrelevante Vergleichs- oder Reduktionsfaktor berechnet sich analog zu

$$k_{ges_E} = k_{kr,E} \cdot k_{bea} \cdot k_{dyn} \cdot k_{lam} \cdot k_{pos} \cdot \quad (8.7)$$

Während die Relevanz des festigkeitsbasierten Vergleichswerts offensichtlich ist, kann der zweite Kennwert in einigen Fällen in Frage gestellt werden. Aus diesem Grund erfolgt eine Berechnung dieses Wertes nur in bestimmten Fällen, bei denen die Auswirkungen einer lokalen Steifigkeitsreduktion auf das Gesamttragverhalten der Struktur nicht klar ersichtlich ist bzw. bei Strukturen, die stabilitätskritisch sind.

Da die berechneten Vergleichswerte nur für die ersten Abschätzungen des Schädigungseinflusses vorgesehen sind und in einigen Fällen mit Hilfe von Näherungsberechnungen erstellt wurden, wird eine Unschärfe von $\pm 15\%$ bei der Vergleichsbewertung berücksichtigt. Damit ergibt sich neben *kritisch* und *unkritisch* noch eine zusätzliche Kategorie, nämlich *potenziell kritisch*. Die Abgrenzung der drei Kategorien zur Bewertung des Schädigungseinflusses wird daher wie folgt gewählt:

- **kritisch:** Diese Kategorie beschreibt einen kritischen Schaden. Die im Betrieb auftretenden Belastungen führen mit großer Wahrscheinlichkeit zu einem Versagen des Bauteils oder der Gesamtstruktur. Für den Vergleichswert k_{ges_d} gilt: $0 \leq k_{ges_d} < 0,35$.
- **potenziell kritisch:** Der Schädigungseinfluss kann nicht eindeutig definiert werden. Die Schäden können, müssen aber nicht zwangsläufig zum Versagen des Bauteils oder der Gesamtstruktur führen. Es sind weitere Detailbetrachtungen notwendig. Für den Vergleichswert k_{ges_d} gilt: $0,35 \leq k_{ges_d} < 0,65$.
- **unkritisch:** Der Schädigungseinfluss ist als gering einzustufen, wobei der Schaden im aktuellen Ausmaß im Betrieb mit großer Wahrscheinlichkeit nicht zum Bauteilversagen führt. Für den Vergleichswert k_{ges_d} gilt: $0,65 \leq k_{ges_d} < 1$.

Da die Vergleichswertberechnung die Schadensgröße nicht berücksichtigt, kann eine Schädigung trotz geringen Vergleichswertes als für die Gesamtstruktur nicht relevant eingestuft werden, falls die Schadensgröße unter einem in der Auslegung vordefinierten Wert liegt. Diese Schädigungsfläche entspricht in vielen Fällen der Schadensgröße, die mit ausreichender Wahrscheinlichkeit während der Inspektion detektiert werden kann. Fehlstellen, die kleiner sind werden als generell unkritisch bewertet, da sie schon in der Auslegung berücksichtigt werden müssen. Erst Fehlstellen, die größer als dieser vordefinierte Wert sind, werden gemäß des vorgeschlagenen Bewertungsschemas analysiert und eingeordnet.

8.2 Grafische Darstellung von identifizierten und bewerteten Schäden

Die festgesetzten drei Klassifikationen *kritisch*, *potenziell kritisch* und *unkritisch* müssen in geeigneter Weise kodiert und visualisiert werden, sodass sich der Prüfer auch bei großen Strukturen in möglichst kurzer Zeit einen Überblick über die schadhaften Stellen und die Relevanz dieser Schädigungen verschaffen kann. Aus diesem Grund

werden die aus den zerstörungsfreien Prüfungen extrahierten Fehlstellen auf zweidimensionale bzw. in einigen Fällen auch dreidimensionale Bauteilansichten an den entsprechenden Stellen und in entsprechender Größe farblich kodiert platziert. Die farbliche Kodierung erfolgt gemäß eines Dreistufensystems, genauer gesagt gemäß einer dreistufigen Ordinalskala gemäß der Norm DIN EN 614-1 [7].




Symbol	Beschreibung	Spezifische Merkmale	
		ergonomische Synonyme	Zone
	kritischer Schaden: Reparaturmaßnahme oder Austausch erforderlich	Gefahr Bedingungen, die zu einem unsicheren Betrieb führen können	3
	nicht definierter Schaden: Detailbetrachtung notwendig, um Schadensrelevanz bewerten zu können; Reparaturempfehlung	kurze Nutzung, von kurzer Dauer	2
	unkritischer Schaden: keine Reparaturmaßnahme oder Austausch erforderlich; Protokollierung der Fehlerposition und Geometrie für nächste Inspektion	sicherer Betrieb, sichere Konstruktion	1

Tabelle 8.2: 3-Zonen Bewertungssystem nach DIN EN 614-1 [7] als Visualisierungsgrundlage zur Darstellung der Defektrelevanz mit spezifischen Merkmalen in Anlehnung an [12]

Dies hat neben einer leichten Zuordnung der einzelnen Zustände auch den Vorteil einer Übertragbarkeit auf andere Bereiche der Technik. Die Zuordnung erfolgt wie in Tabelle 8.2 zu sehen, wobei neben der farblichen Zuordnung bzw. Beschreibung auch einige spezifischen Merkmale aufgeführt sind, um die Bedeutung der einzelnen Farbcodes zu veranschaulichen.

Nachdem alle Schritte zur Schadensbewertung und zur nachfolgenden Visualisierung dargelegt sind, kann in nachfolgendem Kapitel 8.3 auf die programmtechnische Umsetzung der einzelnen Maßnahmen Augenmerk gelegt werden.

Zwei Fallbeispiele, die zur Bewertung bzw. Validierung des Identifikations- und Bewertungsprozess dienen, sind schließlich in Kapitel 9 zu finden.

8.3 Praktische Umsetzung

Bei der praktischen Umsetzung soll im Besonderen auf zwei Aspekte genauer eingegangen werden, nämlich auf die Implementierung der Algorithmen mittels modularer, objektorientierter Vorgehensweise bzw. auf die Erstellung der grafischen Benutzeroberfläche (GUI), welche die Schnittstelle zum Nutzer darstellt.

8.3.1 Implementierung

Die Implementierung des Softwarepaketes der zerstörungsfreien Messung sowie der nachfolgenden Schadensbewertung erfolgt mittels der grafischen Programmiersprache LabVIEW [37]. Dabei wird auf einen modularen Aufbau Wert gelegt, welcher in folgende Einzelschritte aufgesplittet werden kann.

- Datenaufzeichnung
- Datenaufbereitung
- Schadensdetektion
- Kombination von Einzelmessungen
- Schadensbewertung

Diese Einzelschritte werden in Form eines Flussdiagramms in Abbildung 8.12 weiter detailliert, wobei nur die wichtigsten Module bzw. Komponenten erläutert werden, um einen Überblick verschaffen zu können. Ein ausführliches Flussdiagramm, wobei die einzelnen Module weiter aufgesplittet werden, ist in Anhang A.3 in Abbildung A.10 nachzulesen.

Die Funktionsweise bzw. der Ablauf der Einzelschritte wird im Folgenden beschrieben, wobei an dieser Stelle explizit darauf hingewiesen wird, dass in der Praxis nicht notwendigerweise alle Schritte nacheinander durchlaufen werden müssen. So können einzelne Module separat und in beliebiger Reihenfolge ausgeführt werden. Der nachfolgend skizzierte Weg umfasst chronologisch alle notwendigen Schritte von der Messaufzeichnung bis hin zur finalen Schadensbewertung.

Datenaufzeichnung

Die Datenaufzeichnung umfasst die Erstellung von thermischen Sequenzen für alle für die Gesamtauswertung einer Struktur erforderlichen Einzelmessungen. Die Daten werden in Form eines Projektordners abgelegt, welcher auch alle Messparameter umfasst. Diese Messparameter können im Modul *IR Parameter* aus einer Kalibrationsdatei geladen bzw. aktuelle Parameter abgespeichert werden. Verschiedene IR-Detektortypen bzw. Objektive können ebenfalls in Kalibrationsdateien hinterlegt und wieder abgerufen werden.

Das Modul *Messung* führt alle notwendigen Operationen durch, um thermische Sequenzen aus Einzelbildern unter der Berücksichtigung von Parametern wie Anregungs- und Abtastfrequenz zu generieren. Für die spätere Kombination zusammengehöriger Einzelmessungen werden die geometrischen Kamera- und Objektparameter (Kamerabraabstand, relative Kameraneigung, relative Kamerarotation, etc.) zusammen mit den Sequenzen aufgenommen.

Nach der Messung wird das Modul *Datenspeicherung*, das auch einen Algorithmus zur Datenkomprimierung umfasst, ausgeführt, um alle Sequenzen und die dazugehörigen Kamera und Objektparameter im Projektordner abzulegen.

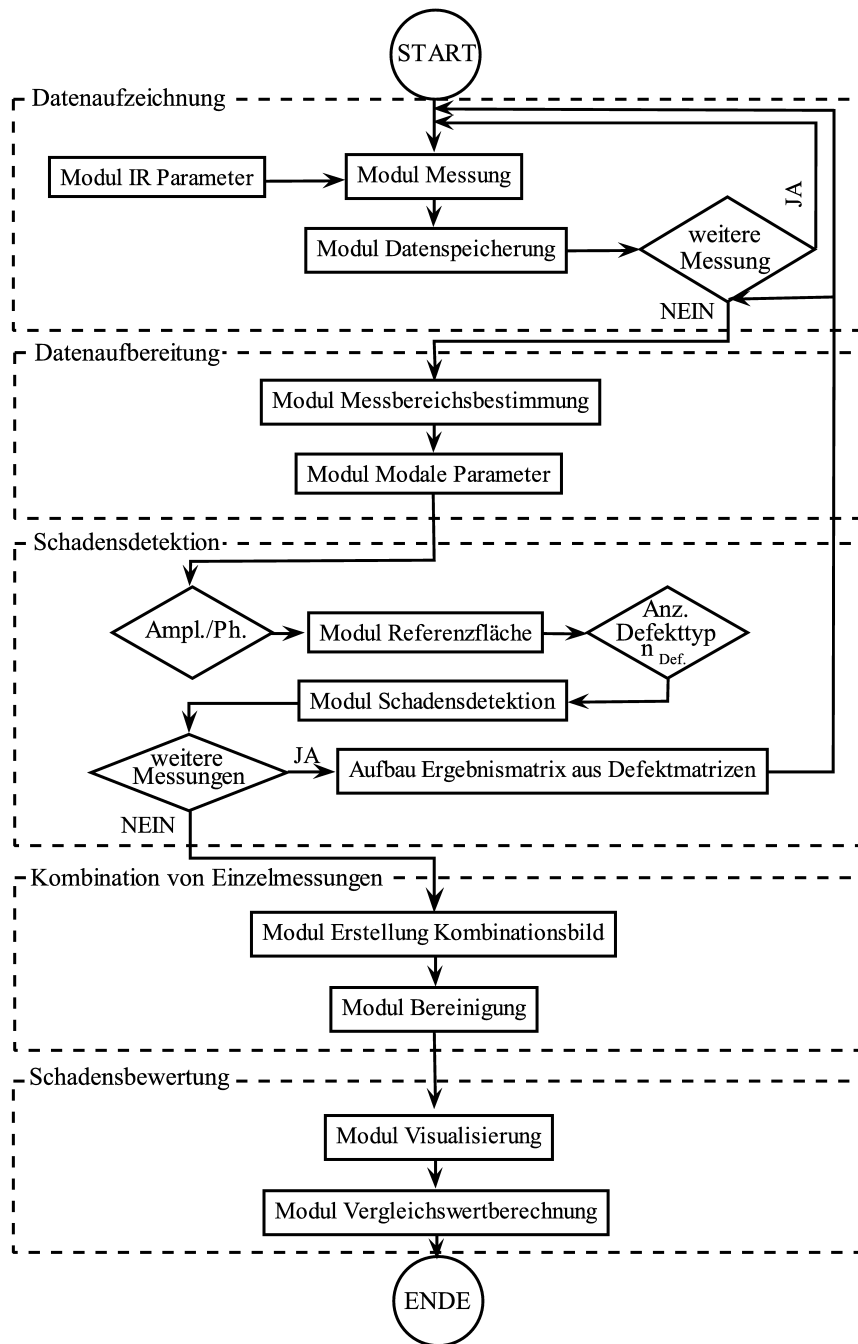


Abbildung 8.12: Flussdiagramm des Softwarepakets zur Schadstellenbewertung

Die Module *Messung* und *Datenaufzeichnung* werden dabei so oft hintereinander abgearbeitet, bis alle erforderlichen Messungen aus den unterschiedlichen Kamerapositionen durchgeführt sind.

Datenaufbereitung

Die Datenaufbereitung besteht im Wesentlichen aus zwei Modulen, welche als Ergebnis ein Amplituden- und Phasenbild relevanter Bildbereiche (AOIs) der Einzelmessungen liefern.

Das Modul *Messbereichsbestimmung* ermöglicht es dem Benutzer, interaktiv beliebige Bereiche im Bildausschnitt jeder Einzelmessung zu bestimmen, welche für die nachfolgende Auswertung und Bewertung relevant sind. Diese AOIs werden separat abgespeichert, um während des gesamten Programmablaufs eine nachträgliche Änderung dieser Bereiche gewährleisten zu können, ohne alle Auswertungsschritte erneut durchlaufen zu müssen.

Auf Basis dieser AOIs werden im Modul *Modale Parameter* mit Hilfe einer Transformation in den Frequenzbereich die modalen Parameter der thermischen Sequenz pixelweise ermittelt, um entsprechende Amplituden- und Phasenbilder zu erstellen. Dabei kann der Kontrast bzw. können die Bereichsgrenzen für die Darstellung der Auswertungsbilder beliebig, entweder automatisch oder manuell, eingestellt werden, wobei die Grenzen in Form einer Legende zusammen mit dem Auswertungsbild abgespeichert werden.

Schadensdetektion

Die gemäß der AOIs erstellten Phasen- und Amplitudenbilder bilden die Grundlage für die Schadensdetektion, deren wichtigste Bausteine die Module *Referenzfläche* und *Schadensdetektion* sind.

Das Modul *Referenzfläche* dient dabei der Festlegung des Referenzbereiches, welcher als Grundlage für die Bestimmung der Schadensflächen dient. Diese Festlegung kann entweder automatisch mit Hilfe von Histogrammen erfolgen oder manuell mit Bereichsdefinitionen durchgeführt werden. Die Eigenschaften der Referenzfläche werden danach auf das gesamte auszuwertende Bild angewendet, wobei in beiden Fällen (automatische oder manuelle Bereichsfestlegung) eine Feinjustierung der Bereichsgrenzen im Anschluss noch möglich ist, um ein optimales Ergebnis zu erzielen.

Im Modul *Schadensdetektion* wird zunächst die Anzahl der unterschiedlichen, zu identifizierenden Defektkategorien festgelegt (Entspricht der Anzahl an Funktionsdurchläufen dieses Moduls), bevor jeder Defekttyp einzeln behandelt wird. Den einzelnen Defekttypen werden charakteristische Werte (Amplituden- oder Phasenwerte im Falle der SPT) zugeordnet, wobei nach der Detektion der Fehlerbereiche die Auswahl mit Hilfe geometrischer Defektparameter (minimale bzw. maximale Defektbreite, Defekthöhe oder Defektfläche, usw.) sowie Maßnahmen zur Rauschunterdrückung und Fehlstellengruppierung verfeinert wird. Die Darstellung der detektierten Bereiche der einzelnen Fehlertypen erfolgt entsprechend benutzerdefinierter Vorgaben, wobei es auch möglich ist, verschiedene Fehlertypen zusammenzufassen und gemeinsam darzustellen. Die detektierten Bereiche der entsprechenden Typen werden dann für die weitere Auswertung vereint betrachtet.

Sind mehrere Messungen vorhanden, erfolgt der Aufbau einer Ergebnismatrix, die diese Messungen zusammenfasst. An dieser Stelle ist es möglich, eine neue Datenaufzeichnung zu starten bzw. eine bereits durchgeführte Messung zu analysieren (Modul *Datenaufbereitung*). In beiden Fällen werden die Ergebnisse in die Ergebnismatrix integriert.

Kombination von Einzelmessungen

Sind alle Einzelmessungen abgearbeitet, erfolgt für großflächige Prüfaufgaben die Kombination von zusammengehörigen Messungen und die Erstellung eines Gesamtbildes, das die Grundlage für die nachfolgende Schadensbewertung darstellt.

Das Modul *Erstellung Kombinationsbild* führt zunächst eine Gruppierung der zusammengehörigen Messungen durch, welche danach sequenziell abgearbeitet werden. Das erste Bild jeder Gruppe dient als erstes Gruppenbild, das mit Hilfe der weiteren Einzelmessungen erweitert wird. Streng genommen erstellt dieses Softwaremodul nicht ein Gruppenbild, sondern erstellt jeweilige Bausteine in den einzelnen Betrachtungsebenen, wie z.B. Gruppenamplituden- und -phasenbilder, Gruppen-AOIs oder eine Gruppenfehlermatrix.

Nach einer Zwischenspeicherung erfolgt die Datenbereinigung (Maßnahmen zur Optimierung der Übergänge der Einzelmessungen) bzw. das Ausfüllen von Pixelfehlern mit Hilfe gerichteter Grauwertinterpolation im Modul *Bereinigung Kombinationsbild*. Schließlich müssen noch angrenzende Fehlstellen zweier Einzelmessungen einander zugeordnet und miteinander vereint werden. Sind weitere Messungen vorhanden, welche einer anderen Gruppierung angehören, müssen beide Module erneut ausgeführt werden.

Schadensbewertung

Die Schadensbewertung erfolgt mit Hilfe zweier Bausteine, nämlich der *Vergleichswertberechnung* und der *Visualisierung*.

Das Modul *Vergleichswertberechnung* lädt zunächst die Ergebnisse einer FE-Simulation, welche zur Bestimmung der vorherrschenden Belastungsart an den Stellen der detektierten Defekte verwendet wird. Gemeinsam mit der Geometrie und der Positionsinformation der Fehlstellen (jeweilige Mittelpunkte der detektierten Schädigungsflächen), sowie zusätzlicher Informationen wie Laminatgüte etc. werden die Vergleichswerte k_{ges_d} und k_{ges_E} (bei Bedarf) ermittelt.

Die grafische Darstellung dieser Vergleichswerte erfolgt gemäß Kapitel 8.2 im Modul *Visualisierung*, wobei ein Fehlstellenbild generiert wird, das über eine Repräsentation der Bauteilgeometrie (z.B.: CAD-Daten, etc.) gelegt wird. Die beiden Module werden solange ausgeführt, bis alle Fehlstellen bewertet sind, wobei alle Fehlstellen gemeinsam visualisiert bzw. nach Fehlertyp gesondert dargestellt werden können.

8.3.2 Grafische Benutzeroberfläche (GUI)

Um eine benutzerfreundliche Bedienung des Softwarepaketes zu gewährleisten, ist es erforderlich, eine einheitliche und intuitiv bedienbare Benutzerschnittstelle (GUI) zu schaffen, welche alle erforderlichen Schritte von der Datenaufzeichnung über die Datenbearbeitung, die Datenanalyse bis hin zur Fehlstellendetektion und deren Bewertung umfasst.

Damit soll die Effizienz und Güte bei der zerstörungsfreien Bauteilbewertung erhöht und durch automatisierte Routinen mit definierten Eingabeparametern zugleich die Datenanalyse und Fehlstellenidentifikation für den Benutzer erleichtert werden.

Die Benutzeroberfläche sollte des Weiteren so gestaltet sein, dass sie den Benutzer durch die erforderlichen Schritte führt und an den notwendigen Stellen die Benutzereingaben durch geeignete Standardwerte unterstützt.

Aufgrund der vielen Einzelschritte von der zerstörungsfreien Messung bis hin zur Schadensbewertung, kann an dieser Stelle nicht auf alle Einzelheiten detailliert eingegangen werden. Der Ansatz bzw. das Vorgehen zur Erstellung dieser Oberfläche soll an zwei Beispielen beschrieben werden. Abbildung 8.13 zeigt einen Bildschirmausschnitt der grafischen Benutzeroberfläche zur Erstellung von Amplituden- und Phasenbildern, während Abbildung 8.14 einen Teil der Schadensdetektion, nämlich die Festlegung der Referenzfläche und der einzelnen Fehlertypen, zeigt.

Abbildung 8.13 zeigt die Erstellung des Phasen- und Amplitudenbildes eines Ausschnittes der CFK Referenzplatte (Bereich 5). Der Arbeitsfluss erfolgt wie auch bei allen weiteren Schritten bis hin zur Schadensbewertung von links oben nach rechts unten, wobei die jeweiligen Einzelmodule durch entsprechende Boxen zusammengefasst sind. Die Eingabefelder werden zusätzlich mit Standardwerten belegt, welche dem Benutzer einen ersten Anhaltspunkt für die zu treffenden Eingaben geben.

Links oben befindet sich der Bereich, welcher die Grundeinstellung für die Erstellung des Phasenbildes ermöglicht. Neben einer Anzeige des Dateipfades der aktuell geladenen, ins *avi*-Format überführten und gemäß des AIOs reduzierten Thermalsequenz, können hier Eingaben wie die Lock-In- bzw. Anregungsfrequenz und die Aufzeichnungsrate getroffen werden. Durch Betätigen der Schaltfläche „calculate ampl./ph.“ werden alle notwendigen Schritte ausgeführt, um die Amplituden und Phasenbilder zu erstellen. Die Anzeige erfolgt in den entsprechenden Bereichen im rechten Bereich des GUI. Ein Statusbalken informiert dabei über den aktuellen Berechnungsstand.

Nachdem die Rohbilder erstellt wurden, kann der Anzeigebereich weiter verfeinert werden. Dies geschieht mittels der links angeordneten Schieberegler, wobei die Skalierung zunächst automatisch über den gesamten betrachteten Bereich vorgenommen wird. Durch das Deaktivieren der „Auto“ Schaltfläche werden die entsprechenden Schieberegler aktiviert. Die getroffenen Änderungen werden dabei gleichzeitig im Amplituden- bzw. Phasenbild angezeigt. Als Hilfestellung für diese Feinjustierung befindet sich ein Abbild des Grundbildes der thermischen Untersuchung über den Kon-

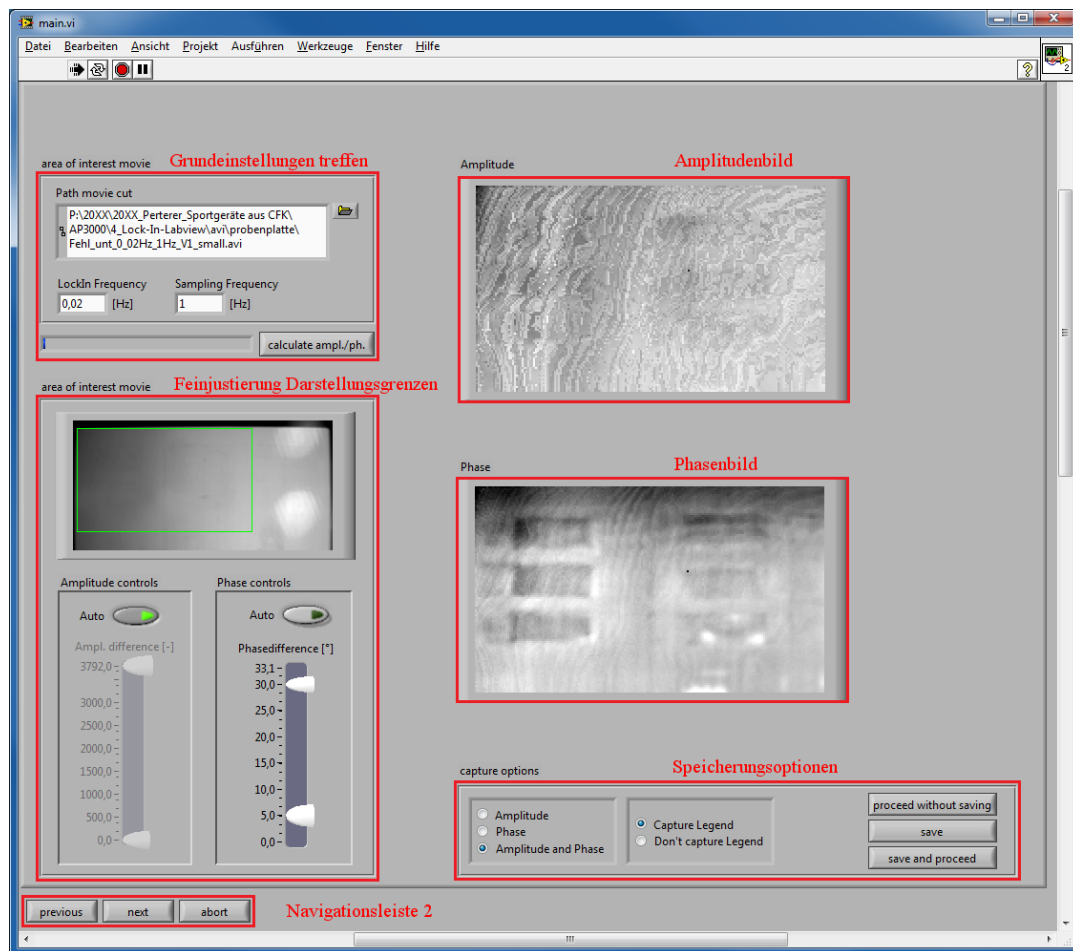


Abbildung 8.13: Ausschnitt des GUI: Erstellung Amplituden- und Phasenbild am Beispiel eines Ausschnitts aus Bereich 5 der Referenzplatte

trollen, wobei der AOI-Bereich im vorliegenden Fall mittels eines Rechteckes markiert ist.

Im rechten unteren Bereich befinden sich die Darstellungs- und Speicheroptionen, wobei die Amplituden- und Phasenbilder einzeln oder in Kombination mit oder ohne Legende gespeichert werden können. Es besteht auch die Möglichkeit, ohne Speicherung fortzufahren.

Es ist auch möglich, zum nächsten bzw. vorigen Bildschirm zu wechseln, und somit die logische, chronologische Abfolge der Einzelschritte zu verlassen. Durch das Betätigen der Schaltflächen „previous“ bzw. „next“ im linken unteren Rand kann dies bewerkstelligt werden. Zusätzlich dazu ist diese Navigationsleiste mit der Schaltfläche „abort“ ausgestattet, um einen sofortigen Programmabbruch zu erzwingen. Dabei gehen alle nicht gespeicherten Daten verloren.

Die Benutzeroberfläche zur Schadensdetektion in Abbildung 8.14 ist, was die Bedienlogik betrifft, analog zur zuvor beschriebenen Benutzeroberfläche aufgebaut. Im obersten linken Bereich (1) kann wie in Kapitel 8.3.1 beschrieben, die Referenzfläche ein-

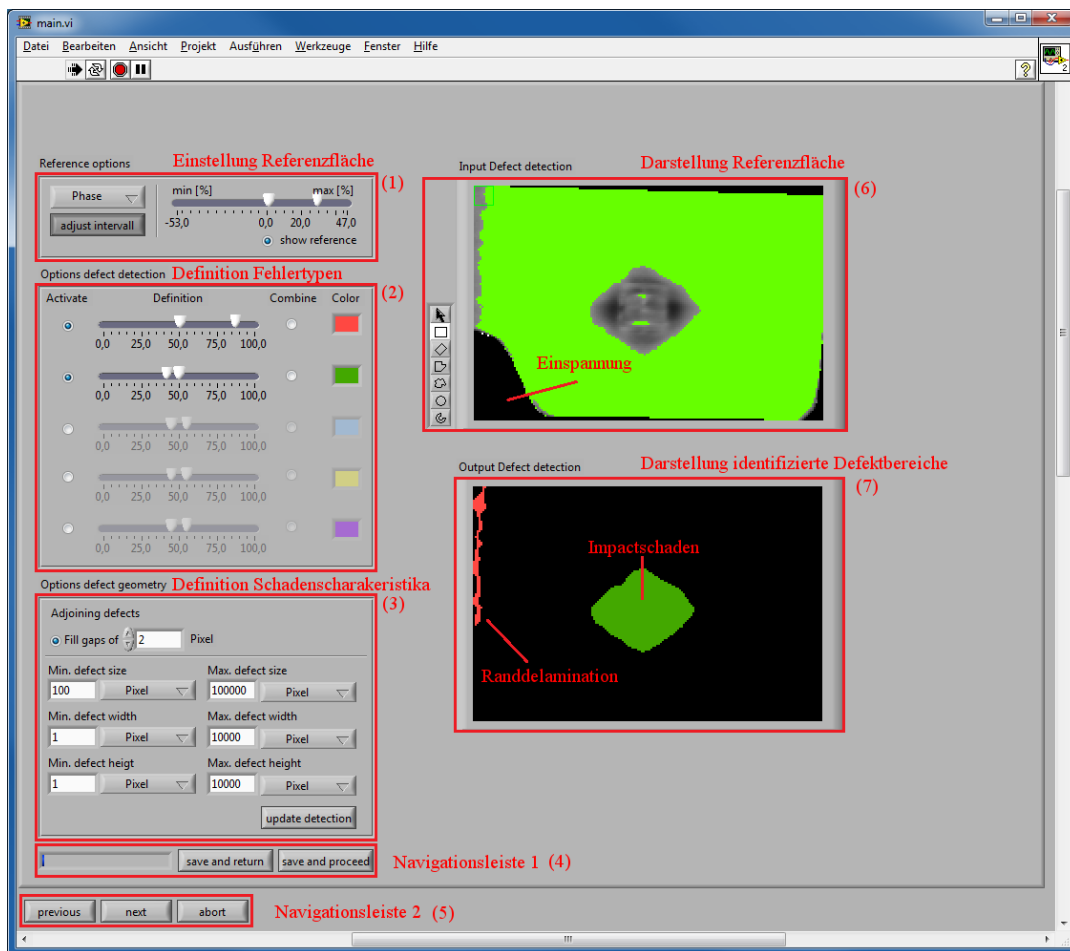


Abbildung 8.14: Ausschnitt des GUI: Definition der Referenzfläche und Bestimmung der Fehlertypen: CAI Probenkörper nach Impact mit Randdelamination

gestellt werden, wobei man zunächst durch Anwahl im Aufklappenmenü das Phasen- oder das Amplitudenbild auswählen muss. Die Bestimmung der Referenzfläche kann entweder automatisch mit Hilfe einer hinterlegten Routine, basierend auf einer Histogrammauswertung, vorgenommen werden, wobei der gesamte Bildbereich gewählt wird. Alternativ kann der Bereich auch mit Hilfe der Werkzeugleiste links neben der Darstellung des Auswertungsbildes (6) erfolgen. Bei einer Aktivierung der Schaltfläche „adjust intervall“ kann der Bereich direkt über den Schieberegler eingestellt werden. Ist die Option „show reference“ aktiviert, wird der gewählte Bereich hellgrün dargestellt.

Im nächsten Schritt können die zu detektierenden Fehlertypen genauer spezifiziert werden (2). Dabei können bis zu fünf unterschiedliche Fehlertypen identifiziert und, falls erforderlich, miteinander kombiniert werden. Die Darstellung der detektierten Bereiche erfolgt im rechten unteren Darstellungsfenster (7), wobei die Bereiche, welche zur Referenzfläche analoge Eigenschaften aufweisen, geschwärzt sind. Bereiche, welche den jeweiligen Fehlertypen entsprechende Eigenschaften aufweisen, sind farblich markiert, wobei die Darstellungsfarbe vom Benutzer individuell gewählt werden kann.

Im entsprechenden Darstellungsfenster in Abbildung 8.14 ist dieser Zwischenschritt nicht dargestellt. Hier ist das Ergebnis des abschließenden Schrittes zu sehen, wobei die als Fehlstellen detektierten Bereiche weiter eingegrenzt wurden. Dies erfolgt durch eine Definition der Schadenscharakteristika (3), welche neben geometrischen Größen (minimale und maximale Defektgeometrien) auch Glättungs- und Verbesserungsalgorithmen umfassen. Nach entsprechenden Eingaben im linken unteren Bereich der Benutzeroberfläche werden diese Methoden durch das Drücken der Schaltfläche „update detection“ auf das Auswertungsbild angewendet und es entsteht das im unteren Darstellungsfenster zu sehende Bild.

Im vorliegenden Fall handelt es sich dabei um eine CAI-Probe mit zentraler Impactschädigung und Randdelamination. Beide Fehlertypen konnten eindeutig voneinander getrennt und identifiziert werden.

Abschließend können die erhaltenen Ergebnisse gespeichert werden. Dies geschieht in der Navigationsleiste 1 (4), wobei hier die Möglichkeit besteht, direkt eine nächste Messung zu analysieren (Schaltfläche „save and return“) bzw. zum nächsten Schritt überzugehen (Schaltfläche „save and proceed“).

Somit sind alle Hauptschritte der vorgestellten Methode zur Schadensdetektion und Schadensbewertung sowohl theoretisch als auch die praktische Umsetzung beschrieben. Im folgenden Kapitel wird diese Vorgehensweise auf typische Prüfaufgaben angewendet, wobei sowohl ein Probenkörper aus der Luft- und Raumfahrt, als auch ein Prüfling aus einem anderen Industriezweig, der Sportgeräteindustrie, exemplarisch untersucht werden.

9 Validierung des Identifikations- und Bewertungsprozesses anhand repräsentativer Anwendungsbeispiele

In diesem Kapitel werden die zuvor beschriebenen Erkenntnisse und die im Zuge dessen entwickelten Methoden anhand praktischer Fallbeispiele angewendet. Die zwei unterschiedlichen Beispiele dienen der Validierung der gezeigten Methoden zur Identifikation und Bewertung von Schäden.

Der Schwerpunkt des ersten Fallbeispiels liegt auf der Bewertung von Impactschäden an einer stark gekrümmten Struktur unter zyklischer Last. Als Vertreter für diese Bauteilgattung wird ein Hochleistungsfahrradrahmen aus CFK verwendet, welcher an einer im Betrieb typischen Stelle (am Unterrohr) durch einen eingebrachten Impact vorgeschädigt wird. Der Schadenseinfluss wird nach der Schadenseinbringung durch experimentelle Ermüdungsuntersuchungen ermittelt und mit den Ergebnissen des vorgestellten Identifikations- und Bewertungsprozesses verglichen.

Der Schwerpunkt des zweiten Fallbeispiels liegt auf der Validierung des Kombinationsprozesses zur Auswertung großflächiger Strukturen mit Hilfe verschiedener Einzelmessungen. Im Zuge dessen werden die Maßnahmen zur Schadstellenkombination, -bewertung und -statistik ebenfalls validiert. Als Referenzbeispiel dient ein gekrümmtes, stringerverstärktes CFK Panel in Integralbauweise, das Schlagschäden unterschiedlicher Größe und Position aufweist.

9.1 Schadensbewertung an stark gekrümmten Strukturen am Beispiel eines Hochleistungsfahrradrahmens

Bei der zu bewertenden Struktur handelt es sich um einen Hochleistungsrennradrahmen aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff der Firma CUBE Pending Systems mit der Modellbezeichnung Agree GTC.

Die Bauweise des Rahmens beruht auf einer Tube-to-Tube Technologie, wobei die Rohrstrukturen zunächst einzeln gefertigt und danach mittels entsprechend geformter CFK-Patches gefügt und an den Knotenstellen verbunden werden. Die Außengeometrie des Fahrradrahmens ist in Abbildung 9.1 links zu sehen.

Zur Validierung des vorgestellten zerstörungsfreien Prüf- und Bewertungssystems wird in das Unterrohr lokal eine Schädigung eingebracht. Die Schädigung liegt dabei in 150 mm Abstand zum Schnittpunkt des Unter- und des Steuerrohres.

Diese Schädigung gilt es demzufolge zunächst zerstörungsfrei zu detektieren, zu quantifizieren und zu bewerten, bevor eine zyklische Belastung aufgebracht wird, welche die reale Grenzdauerbelastung nachbilden soll. Diese Belastung soll Aufschluss darüber geben, ob der eingebrachte Schaden das strukturelle Verhalten des Bauteils beeinflusst, wobei im schlimmsten Fall vorzeitiges Versagen eintritt. Die Ergebnisse der mechanischen Untersuchung werden im letzten Schritt mit den Ergebnissen des Identifikations- und Bewertungsprozesses in Beziehung gesetzt und verglichen.

9.1.1 Simulationsmodell

Um eine Bewertung gemäß Kapitel 8.1 durchzuführen, ist es nötig, den an der Schadensstelle auftretenden lokalen Belastungszustand zu bestimmen. Dazu wird ein dreidimensionales Modell des Prüflings erstellt (Abbildung 9.1 links), welches die Basis für ein daraus abgeleitetes Simulationsmodell bildet.

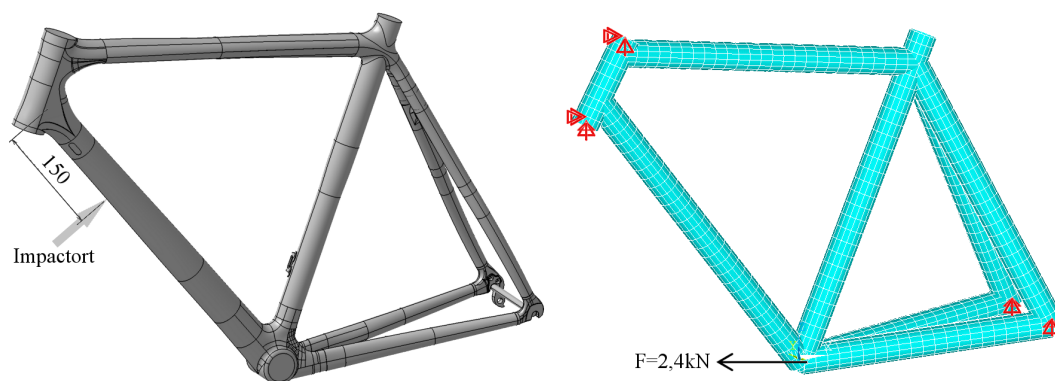


Abbildung 9.1: Dreidimensionales Modell des Hochleistungsrahmens mit Definition des Impactortes (links), abgeleitetes FE-Modell (rechts)

Abbildung 9.1 rechts zeigt ein FE-Modell der Struktur. Da im vorliegenden Fall lediglich die Belastung am Impactort (Unterrohr) berechnet werden muss, ist es ausreichend, die Struktur mit Balkenelementen aufzubauen, welchen unterschiedliche Querschnitte zugewiesen werden können. Im vorliegenden Fall werden Balkenelemente des Typs BEAM188 [11] verwendet. Die Darstellung der Umfangssegmente erfolgt mit Hilfe von 10 Segmenten. Folgende Vereinfachungen werden getroffen:

- *kreisförmige Rohrquerschnitte*: Die Geometrie der Rohre wird als konstant angenommen, wobei der Querschnitt dem eines Rohres mit gleichbleibender Wandstärke entspricht. Diese Vereinfachung ist zulässig, da die Rohre eine weitgehend gleichförmige Wandstärke aufweisen. Lediglich in den Knotenbereichen wächst die Wandstärke signifikant an.
- *Vernachlässigung der Inserts und Anbauteile*: Der Hochleistungsrahmen verfügt über einige Gewindeinserts zur Befestigung von Anbauteilen. Da diese Zusatzelemente die Struktur nur lokal beeinflussen und im Bereich der eingebrachten Schädigung nicht vorhanden sind, ist diese Vereinfachung zur Bestimmung des Belastungszustandes am Schadensort (Impactort) zulässig.
- *Vereinfachte Knotengeometrien*: Die fließenden Übergänge zwischen den einzelnen Rohrstrukturen werden nicht modelliert. Die Kreuzungspunkte werden mit festen Knotenpunkten modelliert.

Die Lagerung der Struktur erfolgt in Anlehnung an den Versuchsaufbau für Ermüdungsuntersuchungen, welcher in Abbildung 9.4 dargestellt und in Kapitel 9.1.3 detailliert beschrieben wird. Zwei Lagerpunkte befindet sich an den Enden des Steuerrohres. Es werden alle translatorischen Freiheitsgrade unten bzw. die translatorischen Freiheitsgrade in Rahmenlängsrichtung und quer zur Rahmenlängsrichtung oben gesperrt. Die übrigen Lagerpunkte befinden sich an den hinteren Ausfallenden. Dort erfolgt eine Sperrung der vertikalen translatorischen Freiheitsgrade und eine Sperrung der translatorischen Freiheitsgrade quer zur Rahmenlängsrichtung.

Die Belastung erfolgt im Tretlager in Rahmenlängsrichtung gemäß Abbildung 9.4. Die Kraft beträgt $2,4 \text{ kN}$, was einem realen Auslegungslastfall (Fahrt mit niedriger Geschwindigkeit gegen ein Hindernis) entspricht. Die Kraft ist dabei deutlich höher als in der entsprechenden Norm (DIN EN 14781 [6]) angegeben, entspricht aber einem Wert, der bei vielen Fahrradherstellern für mechanische Tests verwendet wird. Analog zur Norm gilt der Test als bestanden, falls 10^5 Lastwechsel ohne erkennbare Schäden ertragen werden.

9.1.2 Bestimmung des lokalen Beanspruchungszustandes

Die Bestimmung des lokalen Beanspruchungszustandes erfolgt in Anlehnung an Kapitel 8.1.2.2. Die Berechnung des Anstrengungsfaktors (in Abbildung 9.2 ist der Anstrengungsfaktor auf Zug/ Druck dargestellt) basiert auf einem vereinfachten Versagenskriterium der maximalen Hauptspannungen nach [67].

Die zu Grunde liegenden Versagensbedingungen für Zug, Druck bzw. Schub sind in Gleichungen 8.1, 8.2 und 8.3 beschrieben.

Bei der vorliegenden Belastung ist im Vergleich zu den übrigen Beanspruchungsarten die Druckbeanspruchung am Impactort dimensionierend. Der sich daraus ergebende Zug- bzw. Druckanstrengungsfaktor ist in Abbildung 9.2 farblich visualisiert. Hierbei

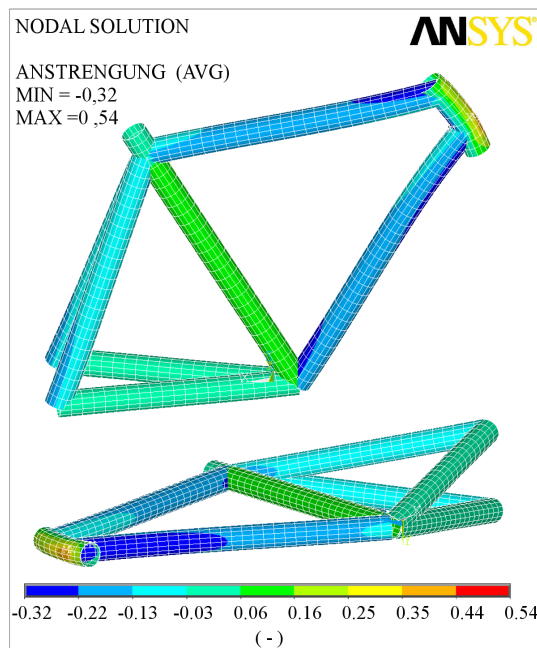


Abbildung 9.2: Anstrengungsfaktor bezüglich Zug und Druck basierend auf dem Versagenskriterium der maximalen Hauptspannungen [67]

ist der Anstrengungsfaktor für Drucklasten negativ (blaue und türkise Bereiche) und der für Zuglasten positiv (orange und rote Bereiche) dargestellt. Werte mit einem Betrag größer eins bedeuten ein Bauteilversagen.

An der Impactstelle ist ein Wert von ca. $0,3$ ($| - 0,3 | = 0,3$) zu finden. Dieser ist größer als der minimale definierte Wert für eine relevante Belastungshöhe (vgl. Kapitel 8.1.2.2), der $0,25$ beträgt. Aus diesem Grund kann der Abminderungsbeiwert für den Belastungszustand von $k_{bea} = 0,6$ gemäß Gleichung 8.4 für die Impactschädigung herangezogen werden.

9.1.3 Versuchsaufbau zur Einbringung des Schlagschadens

Die Schadenseinbringung in das Unterrohr erfolgt mit Hilfe eines Prüfstandes, der in Abbildung 9.3 zu sehen ist [73]. Der Impactort ist mittels eines roten Pfeils markiert und der Drehpunkt mit einem gelben Rotationspfeil angedeutet.

Die Hinterachse wird dabei so gelagert, dass sie bezüglich der Radachse frei drehbar ist. Über eine biegesteife Befestigungsvorrichtung (im Bild links) ist ein Impactkörper aus Stahl mit einer halbkugelförmigen Kopfgeometrie mit 15 mm Durchmesser so angebracht, dass er an dem in Abbildung 9.1 links definierten Impactort bei waagrechter Kettenstrebe das Unterrohr in einem 90° Winkel berührt. Um den Impact durchzuführen, wird der Rahmen um 45° ausgelenkt und mit entsprechenden Gewichten am Tretlager versehen, um die gewünschte Impactenergie von 15 J erreichen zu können.



Abbildung 9.3: Versuchsaufbau für Impacteinbringung [73]

Um einen Mehrfachimpact zu vermeiden wird eine entsprechende Bremsvorrichtung verwendet, welche aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt ist.

Nach der Impacteinbringung erfolgt die zerstörungsfreie Prüfung mit der SPT Methode, wobei der eingebrachte Schaden äußerlich kaum sichtbar ist (Charakterisierung als *barely visible impact*). Da der Versuchsaufbau nicht wesentlich von den zuvor beschriebenen Messungen abweicht, wird dieser hier nicht mehr gesondert behandelt.

9.1.4 Prüfstand für Ermüdungsuntersuchungen

Der nachfolgende Ermüdungsversuch erfolgt auf einem Rahmenprüfstand, welcher in Abbildung 9.4 zu sehen ist. Ein pneumatischer, horizontal angeordneter und auf einem Prüffeld befestigter Zylinder wird zur Krafteinleitung in den Tretlagerbereich verwendet.

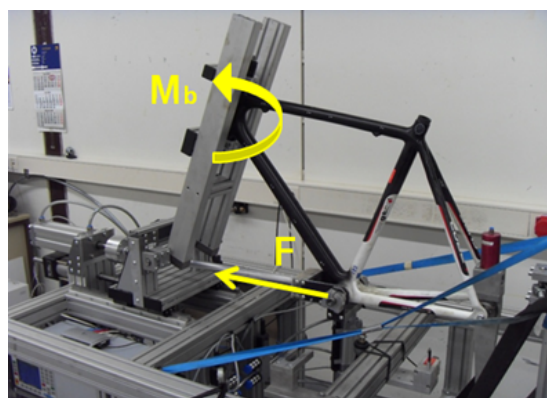


Abbildung 9.4: Prüfstand für Gesamtstrukturdauerersuche [73]

Die Lagerung des Steuerrohres erfolgt mit Hilfe eines Innenstückes, das über einen biegesteifen Ausleger mit dem Prüffeld verbunden und im Gabelaufstandspunkt gelenkig gelagert ist. Die Einspannung der hinteren Ausfallenden erfolgt mit Hilfe einer

Schnellspanvorrichtung. Die Druckschwelllast zwischen 0 N und $2,4\text{ kN}$ wird sinusförmig auf das Tretlager aufgebracht, wobei der Verformungsweg überwacht und der Versuch bei einem deutlichen Anstieg dieser Größe abgebrochen wird.

Der gewählte Versuchsaufbau weicht somit von dem in der Norm DIN EN 14781 vorgeschlagenen Prüfstand ab, ruft allerdings einen analogen Spannungszustand hervor, womit die Ergebnisse vergleichbar sind. In der Literatur wird in vielen Fällen als Last ein Biegemoment im Steuerrohr als Vergleichswert vorgegeben, was in Abbildung 9.4 mit M_b bezeichnet ist. Über den entsprechenden Hebelarm kann die eingeleitete Kraft F in dieses Biegemoment überführt werden, womit auch in diesem Fall die Ergebnisse vergleichbar sind.

9.1.5 Ergebnisse der Identifikations- und Bewertungsmethode

Der geschädigte Probekörper wird mit einer Anregungsfrequenz von $0,1\text{ Hz}$ aus verschiedenen Perspektiven untersucht, um den künstlich eingebrachten Schlagschaden zu detektieren, und um weitere Schädigungen ausschließen zu können. Bis auf den Impactschaden zeigen die Ergebnisse wie zu erwarten keine Auffälligkeiten. Der eingebrachte Impactschaden (15 J) am Unterrohr ist eindeutig zu erkennen. Abbildung 9.5 zeigt eine Unteransicht des Probenkörpers, wobei die Schadensfläche an entsprechender Stelle zu sehen ist.

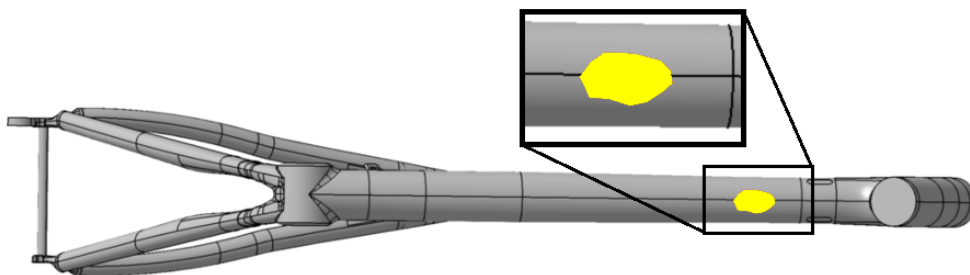


Abbildung 9.5: Ansicht auf das Unterrohr des Versuchsobjektes: Überlagerung der perspektivischen Ansicht mit Ergebnissen aus SPT-Untersuchungen gemäß des in Kapitel 8.2 definierten Bewertungsschemas

Wie aus Abbildung 9.5 entnommen werden kann, ist die Schadensfläche gelb markiert, was einen möglicherweise kritischen Schaden bedeutet. Somit ist ein Vergleichswert k_{ges_d} von $0,35 \leq k_{ges_d} < 0,65$ für den vorliegenden Schaden zu verzeichnen. Spaltet man diesen Vergleichswert in die einzelnen Faktoren auf so kann für die Einzelfaktoren geschrieben werden:

- $k_{r_d} = 0,8$: Der Rohraußendurchmesser des Unterrohres beträgt $\varnothing 46\text{ mm}$. Durch Interpolation können die entsprechenden Werte aus Abbildung 8.7 rechts gewonnen werden. Mit einer Schadensfläche von 8 cm^2 ergibt sich ein Wert von $0,8$. Dabei ist die Schadensfläche deutlich geringer als bei den Rohrprobenkörpern.

Dies ist damit zu erklären, dass die Gesamtrahmenstruktur eine geringere strukturelle Steifigkeit als die untersuchten Rohrprobenkörper aufweist, was sich in einer deutlichen, elastischen Verformung widerspiegelt. Durch die Lagerung der Rohrprobenkörper mit Hilfe einer stumpfwinkligen keilförmigen Vertiefung wird eine Rohrdurchbiegung verhindert. Da der Abminderungsfaktor sich auf die Schadensfläche bezieht, kann der Zusammenhang aus Abbildung 8.7 rechts allerdings ohne Einschränkung verwendet werden.

- $k_{bea} = 0,6$: Aus Simulationsrechnung (siehe dazu Kapitel 9.1.1).
- $k_{dym} = 1$: Laut Definition aus Kapitel 8.1.2.2.
- $k_{lam} = 0,9$: Die Laminatgüte kann als gut bezeichnet werden, allerdings ist eine deutliche Welligkeit zu verzeichnen.
- $k_{pos} = 1$: Der Schaden befindet sich nicht in unmittelbarer Nähe (Entfernung: 2,5-fache des Schadensdurchmessers) des Bauteilrandes bzw. eines Knotenpunktes.

Daraus ergibt sich ein effektiver Vergleichswert k_{ges_d} von $k_{ges_d} = 0,43$. Dieser Wert ist relativ gering und nur um 0,08 von der Untergrenze der mittleren Bewertungsskala entfernt. Somit ist ein kritischer Einfluss dieses Schadens zu vermuten. Die nachfolgende mechanische Prüfung soll mehr Aufschluss über die Schadensauswirkung geben.

9.1.6 Validierung der Ergebnisse mit Ermüdungsuntersuchung

Um die Frage nach dem Schadenseinfluss der eingebrachten Impactschädigung zu klären, werden neben dem geschädigten Hochleistungsrahmen auch ungeschädigte Rahmen dynamisch belastet [73]. Die Schadensbilder, welche in Abbildung 9.6 dargestellt sind, zeigen einen deutlichen Einfluss der vorliegenden Schädigung auf das Versagen der Gesamtstruktur.

Während die ungeschädigten Rahmenproben durchweg an oder in unmittelbarer Nähe von Knotenpunkten – vorwiegend am Übergang Unterrohr und Steuerrohr (vgl. Abbildung 9.6 a) – versagen, tritt das Versagen bei der mit 15 J vorgeschädigten Struktur am Impactort ein. Abbildung 9.6 b zeigt den Ort des Versagens. In Abbildung 9.6 c ist eine Detailansicht des Versagensortes zu sehen ist, welcher kongruent mit der Impactstelle ist.

Auch die ertragbare Lastwechselanzahl bis zum Versagen unterscheidet sich deutlich bei ungeschädigten und vorgeschädigten Probenkörpern. Während ungeschädigte Strukturen im Schnitt $6 \cdot 10^5$ LW ($n_{stat} = 4$) ertragen, tritt beim Probenkörper mit 15 J Impactschaden das Versagen schon nach ca. $1,2 \cdot 10^4$ LW auf. Dies bedeutet bei dem gewählten Lastniveau eine Reduktion der Lebenszeit um mehr als eine Größenordnung.

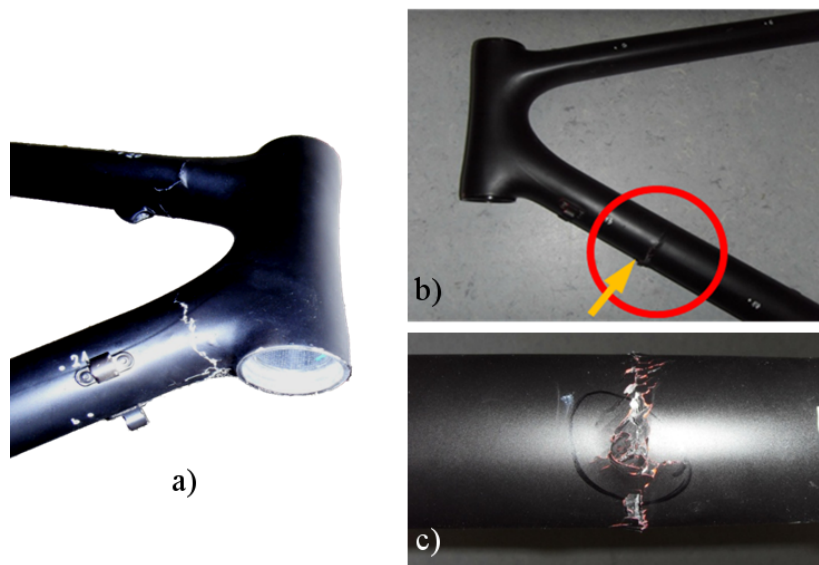


Abbildung 9.6: Dauerversuche an Hochleistungsfahrradrahmen [73]: a) Bruchbild eines ungeschädigten Hochleistungsfahrradrahmens, b) Bruchort eines durch Impact vorgeschädigten (mittels SPT als kritisch eingestuft) Hochleistungsrahmens und c) Detailansicht der Bruchstelle des vorgeschädigten Rahmens

Somit kann bestätigt werden, dass die Schadensbewertung bzw. die Schadenseinstufung mittels der SPT-Methode möglich ist. Der relativ niedrige Vergleichswert von $k_{gesd} = 0,43$ deutet auf einen möglicherweise kritischen Schaden hin und initiiert weitere Maßnahmen, um einen Austausch bzw. eine Reparatur einzuleiten.

9.2 Kombination von Einzelmessungen und Schädigungsstatistik am Beispiel eines integralen CFK Panels

Als zweites Fallbeispiel dient ein CFK Panel in Integralbauweise, welches in Abbildung 9.7 links abgebildet ist. Dieses soll vor allem die Kombination von verschiedenen Einzelmessungen beim Vorhandensein mehrerer Fehlstellen verdeutlichen. Dieses unsymmetrische Panel weist sieben rückseitig angeordnete Versteifungselemente auf, welche mit der rückseitigen Panelfläche fließend verbunden sind.

Die CFK Schale selbst weist Zonen unterschiedlicher Dicke auf, wobei der Dickenunterschied durch das Auslaufen einer bzw. mehrerer Lagen bewerkstelligt wird. Die Hauptkrümmung der Schale verläuft quer zu den angebrachten Stringern in Panellängsrichtung. Die Krümmung in Panellängsrichtung ist deutlich geringer, wobei auch eine Verjüngung der Panelbreite zu verzeichnen ist. Die Stringerwandstärke variiert ebenfalls über die Panellängsrichtung. Zusätzlich dazu ist wie in Abbildung 9.7 links zu sehen, eine Stufung an den Längsseiten der versteiften Schale zu erkennen. Der La-

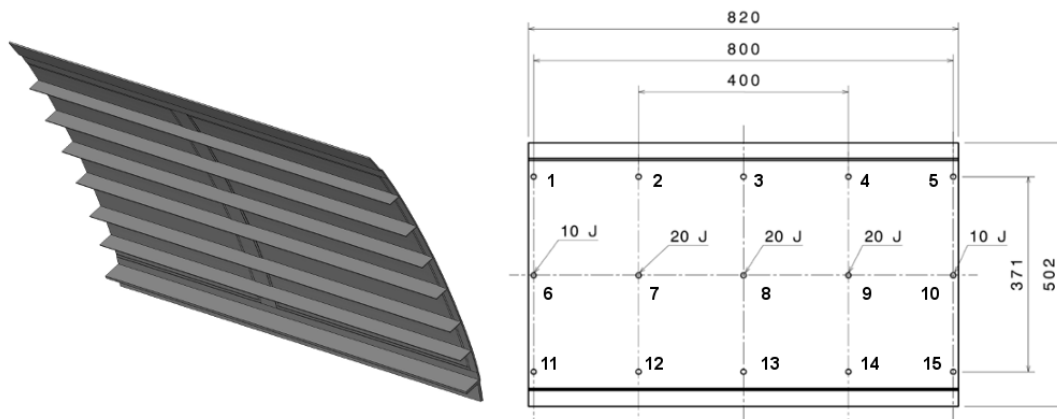


Abbildung 9.7: Rückansicht des CAD Modells des CFK Panels (links) und Skizze der gewählten Impactorte an der Panelvorderseite: fünf vertikale Reihen mit spaltenweise gleichen Impactenergien (rechts)

genaufbau variiert aufgrund der unterschiedlichen Wandstärken. Als Werkstoff wurde eine T700 Faser mit Epoxidmatrix verwendet.

9.2.1 Versuchsaufbau zur Einbringung von Schlagschäden

Als Schadensfall dienen auch bei dieser Struktur Impactschädigungen, welche auf die Panelvorderseite eingebracht werden. Abbildung 9.7 rechts zeigt schematisch die gewählten Impactorte sowie die Hauptabmessungen der Schale. Insgesamt werden 15 Impactorte ausgewählt, welche in drei horizontalen Reihen und 5 vertikalen Spalten angeordnet sind. Die Impactenergie beträgt bei den äußerst rechten und linken Spalten jeweils 10 J , während die übrigen Schädigungen mittels eines 20 J Impacts hervorgerufen werden.

Die Ausrichtung des Impactkörpers relativ zur Plattenoberseite erfolgt in allen Fällen senkrecht, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse garantieren zu können. Aus diesem Grund muss eine spezielle Vorrichtung konzipiert werden, um dies bei allen 15 Impactpositionen zu gewährleisten.

In Abbildung 9.8 ist der Versuchsaufbau zur Einbringung der Impactschädigungen zu sehen. Dieser besteht aus einer Grund- oder Bodenplatte und zwei Lagerböcken, welche eine Nut aufweisen, um die äußersten zwei Stringer über ihre gesamte Länge zu unterstützen. Die Höhe der Lager kann dabei so eingestellt werden, dass der Aufprallwinkel des Stoßkörpers an allen 15 Impactorten senkrecht zur Oberfläche ist. Um das Panel während des Impactvorganges örtlich zu fixieren, werden zwei Spanngurte verwendet, welche zwischen der äußersten und der zweitäußersten Impactreihe des CFK Panels angebracht sind.

Durch die Panelgeometrie und die Lagerung können unterschiedliche Steifigkeiten an den einzelnen Impactorten realisiert werden. So ändert sich die Stringergeome-

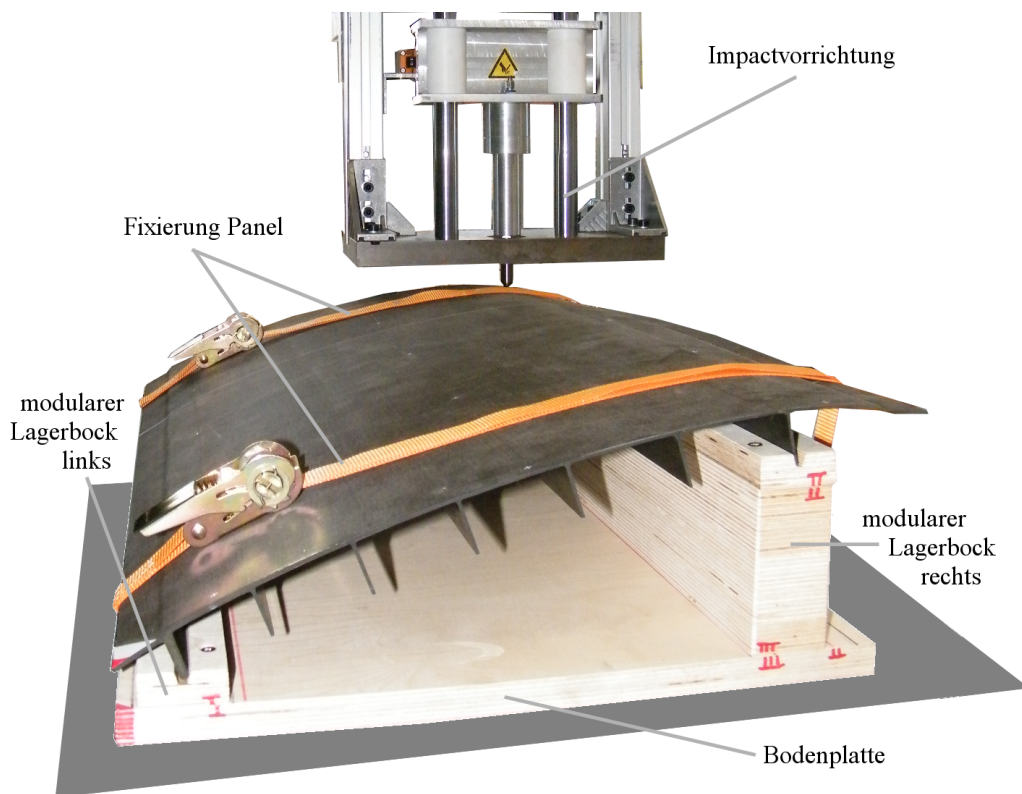


Abbildung 9.8: Versuchsaufbau zur Einbringung von Impactschäden in ein CFK Panel

trie und auch die Wandstärke des äußerst linken Stringer in Abbildung 9.8. Darüber hinaus weist das Panel unterschiedliche Wandstärken auf. Ein deutlicher Anstieg der Wandstärke ist im linken Bereich des Panels zu erkennen.

Bereiche, welche eine hohe Steifigkeit aufweisen sind deutlich sensibler gegenüber Impactschäden als Zonen mit geringer Steifigkeit, da sich durch eine elastische Durchbiegung die Maximalkontaklast bei der Schlagschädigung reduziert. Somit sind unterschiedliche Schadensbilder zu erwarten. Die geringsten Schäden treten voraussichtlich bei der mittleren Impactreihe (Impactnummern sechs bis zehn), die größten Schädigungen bei der in Abbildung 9.7 untersten bzw. in Abbildung 9.8 äußerst linken Impactreihe (Impactnummern 11 bis 15) auf.

9.2.2 Simulationsmodell

Die zuvor beschriebene versteifte Schale soll so mechanisch belastet werden, dass unterschiedliche Beanspruchungszustände an den einzelnen Impactorten gewährleistet werden können. Als Lastfall wird eine verteilte Biegelast vom $10 \times 0,25 \text{ kN}$ (in Summe $2,5 \text{ kN}$) gewählt, welche gemäß Abbildung 9.9 oben links angreift. Die Lagerung erfolgt einseitig an der Panelstirnseite.

Die Geometrie und die gewählte Diskretisierung des aufgebauten Simulationsmodells

ist in Abbildung 9.9 oben links zu sehen. Die unterschiedlichen Elementtypen sind farblich markiert.

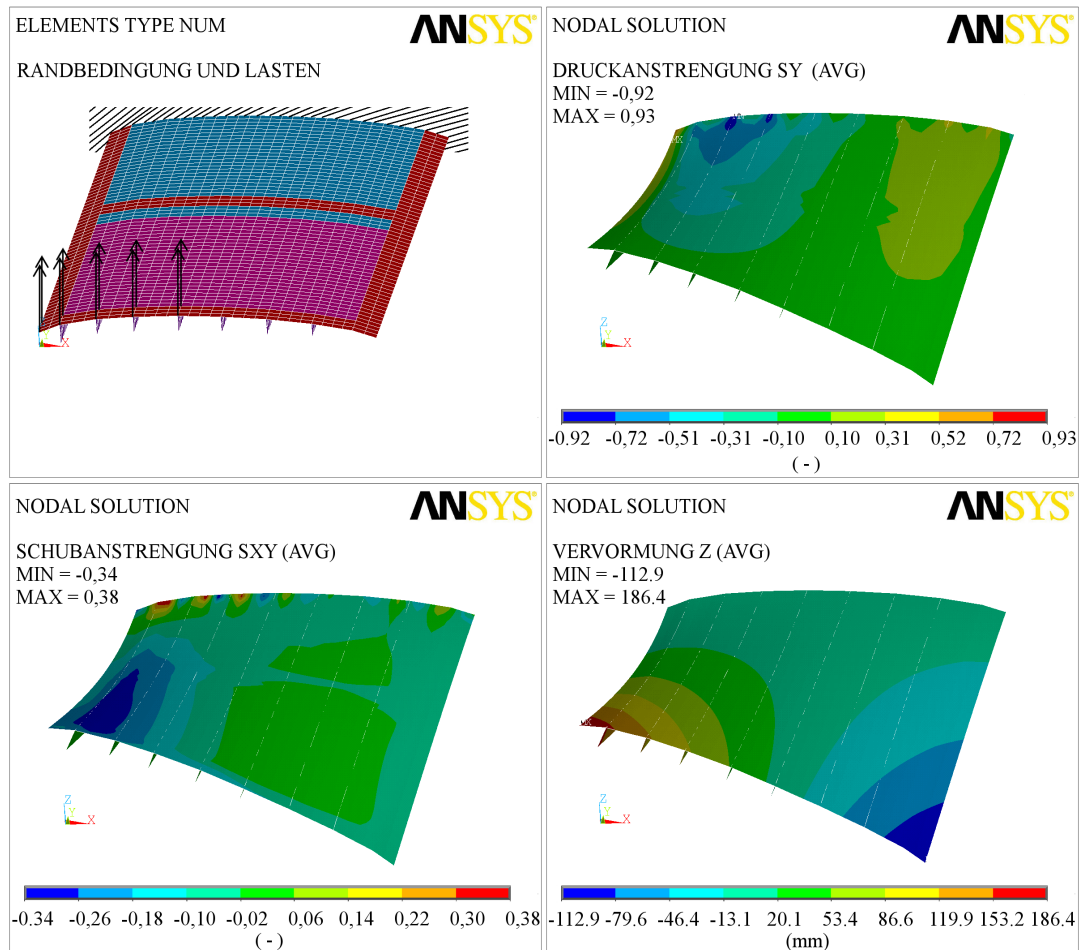


Abbildung 9.9: FEM Simulation des CFK Panels: Diskretisierung für vereinfachtes FEM Modell oben links: Darstellung der unterschiedlichen Elementtypen, der Kräfte und Randbedingungen; Druckanstrengung in Panellängsrichtung (Y-Richtung) oben rechts; Schubanstrengung in Panelebene (XY-Richtung) unten links; vertikale Verformung (Z-Richtung) unten rechts

Die Modellierung erfolgt mit ANSYS, wobei in diesem Fall sowohl für die Schale als auch für die Stringer Elemente des Typs SHELL181 [11] verwendet werden. Dieser Elementtyp erlaubt eine $2 \frac{1}{2}$ -D Modellierung des Lagenaufbaus der Schale, welche für die Bestimmung des Spannungszustandes ausreichend ist. Neben dieser Vereinfachung werden folgende weitere Annahmen getroffen:

- *Krümmung*: Da die Krümmung in Panellängsrichtung im Vergleich zur Krümmung senkrecht dazu sehr gering ist, wird lediglich dieser Anteil modelliert.
- *Vernachlässigung der Plattenverjüngung*: Die Verjüngung der Schale wird aufgrund der geringen Ausprägung ($< 1\%$ der Schalenbreite) vernachlässigt.

- *Stufung in Plattenlängsrichtung*: Die Stufung in Plattenlängsrichtung im Außenbereich der Schale wird nicht betrachtet, da alle Schädigungen innerhalb dieses Bereiches eingebracht werden und diese Stufe die Spannung an den Impactorten nicht wesentlich beeinflusst. Es wird ein gemittelter Wert verwendet.
- *Wandstärke der Versteifungselemente*: Die Variation der Wandstärke der Steifen wird nicht betrachtet. Zur Modellierung wird anstelle einer variierenden Wandstärke eine über die Gesamtstringerlänge konstante, mittlere Dicke modelliert.
- *Übergang der Versteifungen zur Schale*: Der Faserverlauf der äußeren Lagen der Versteifungselemente geht direkt in die Schale in einem definierten Radius über. Für die Simulation wird dieser Radius nicht betrachtet.

9.2.3 Bestimmung des lokalen Beanspruchungszustands

Die Bestimmung des lokalen Beanspruchungszustandes erfolgt in Anlehnung an Kapitel 8.1.2.2 und Kapitel 9.1.2. Die Berechnung der jeweiligen Anstrengungsfaktoren basiert auf einem vereinfachten Versagenskriterium der maximalen Hauptspannungen nach [67].

In Abbildung 9.9 rechts oben bzw. links unten sind die Anstrengungsfaktoren auf Druck und Schub an der Paneloberseite zu sehen. Unten rechts ist die Verschiebung in vertikaler Richtung farblich dargestellt.

Durch die stirnseitige Einspannung zusammen mit der unsymmetrischen Krafterleitung wird die versteifte Platte einerseits nach oben gebogen, andererseits in gewissem Maße tordiert. Die Maxima der Druck- und Schubbeanspruchung bilden sich somit auf der linken Seite des Panels aus. In der Plattenmitte, also am Ort der zweiten Impactreihe sind die Spannungen am kleinsten. Auf der rechten Seite kommen vorwiegend Zug-, aber auch Scherspannungen vor.

Da eine Bestimmung der relevanten Beanspruchung an den Impactorten grafisch nur schwer möglich ist, fasst Tabelle 9.1 die entsprechenden Informationen noch einmal zusammen.

Neben der Bezeichnung des Impactes und der verwendeten Impactenergie sind die Anstrengungsfaktoren auf Druck und Scherung zu sehen. Wie in Kapitel 8.1.2.2 beschrieben, müssen Schädigungen ab einem Anstrengungsfaktor von 0,25 berücksichtigt werden. Wie aus der Tabelle zu entnehmen, weisen lediglich die ersten fünf Schlagschäden Werte größer 0,25 auf (rot gekennzeichnet). Alle übrigen Schäden zeigen geringere Vergleichswerte und werden daher nicht als kritisch angesehen.

Der maßgebliche Lastfall der ersten fünf Schäden wird jeweils durch den höheren Anstrengungsfaktor festgelegt und ist bis auf den dritten Schaden vergleichsweise eindeutig. Der Schaden Nummer drei weist annähernd gleiche Werte auf Druck und Scherung auf, wobei der Vergleichswert auf Druck etwas höher ist ($-0,34$ für den Anstren-

Nummer	Impactenergie	Anstrengungsfaktoren		maßgeblicher Lastfall
		Druck	Zug	
[–]	[J]	[–]	[–]	[–]
1	10	0,00	–0,25	Schubspannung
2	20	–0,12	–0,32	Schubspannung
3	20	–0,31	–0,29	Druckspannung
4	20	–0,41	–0,18	Druckspannung
5	10	–0,15	0,34	Schubspannung
6	10	0,00	0,17	–
7	20	–0,05	0,15	–
8	20	–0,10	0,13	–
9	20	–0,11	0,09	–
10	10	0,05	–0,05	–
11	10	0,00	0,07	–
12	20	0,04	0,08	–
13	20	0,09	0,07	–
14	20	0,10	0,07	–
15	10	0,10	0,17	–

Tabelle 9.1: Maßgebliche Belastungen und Anstrengungsfaktoren an den eingebrachten Schadensorten des CFK Panels

gungsfaktor auf Druck bzw. –0,29 für den Anstrengungsfaktor auf Schub) und somit als maßgeblicher Lastfall definiert wird.

Daher ergeben sich laut Kapitel 8.1.2.2 Abminderungskennwerte k_{bea} von $k_{bea} = 0,6$ für den dritten und vierten Schaden bzw. $k_{bea} = 0,75$ für den ersten, zweiten und fünften Schaden. Alle übrigen Schäden weisen keine Abminderung infolge des Belastungszustandes auf. Somit wird bei den übrigen Schäden der Abminderungsfaktor k_{bea} zu $k_{bea} = 1$ gesetzt.

9.2.4 Ergebnisse der visuellen Inspektion

Im Zuge der visuellen Inspektion werden zwei Parameter bestimmt, um die vorhandenen Schädigungen zu beschreiben. In Anlehnung an die Norm DIN EN 6038 [2] wird die Eindringtiefe am Impactort und die visuelle Sichtbarkeit einer Schadensfläche auf der Bauteilrückseite bewertet.

Wie in Kapitel 9.2.1 angedeutet, weist die mittlere Impactreihe die geringsten Schädigungen auf. Die Impacts mit den Nummern 6 bis 10 weisen keine messbare Eindringtiefe und auch keine rückseitig sichtbare Schädigung auf. Ebenso verhält es sich bei den 10 *J* Impacts (Nummern: eins, fünf, 11, 15)

Die 20 *J* Impacts der obersten Reihe (Impact Nummer zwei bis vier) weisen deutliche Eindrücke auf der Vorderseite auf, welche alle über dem Sichtbarkeitslimit von 0,3 mm liegen (Impact 2: 1,96 mm, Impact 3: 0,95 mm und Impact 4: 0,42 mm). Auf der Rückseite des Panels sind Schädigungen erkennbar, wobei eine deutliche Ablösung der letzten Lage in Verbindung mit Faserbrüchen zu verzeichnen ist.

Im Sinne der zerstörungsfreien Prüfung interessanter sind aber die Impacts Nummer 12 bis 14. Diese Schädigungen weisen Eindringtiefen von 0,16 mm, 0,18 mm und 0,06 mm (in ansteigender Reihenfolge) auf. Somit liegen diese Schädigungen unterhalb der definierten Sichtbarkeitsgrenze von 0,3 mm. Der auf der Panelrückseite erkennbare Schaden ist dabei deutlich geringer als bei den zuvor beschriebenen Schädigungen.

Die Herausforderung bzw. die Aufgabe der zerstörungsfreien Prüfung und der Schadensbewertung ist nun speziell das teilautomatische Auffinden und Bewerten dieser optisch schwer sichtbaren Fehlstellen.

9.2.5 Ergebnisse des Kombinations- und Identifikationsprozesses

Bevor auf die Ergebnisse der SPT Untersuchung eingegangen wird, soll die Kombination der Einzelmessungen zur Erstellung eines Gesamtauswertungsbildes genauer beschrieben werden. Im vorliegenden Fall werden vier Messungen benötigt, um mit ausreichender geometrischen Auflösung (ca. 2 mm) die CFK Panelstruktur bewerten zu können. Abbildung 9.10 links zeigt entsprechende Amplitudenbilder der Messungen zum Messbeginn.

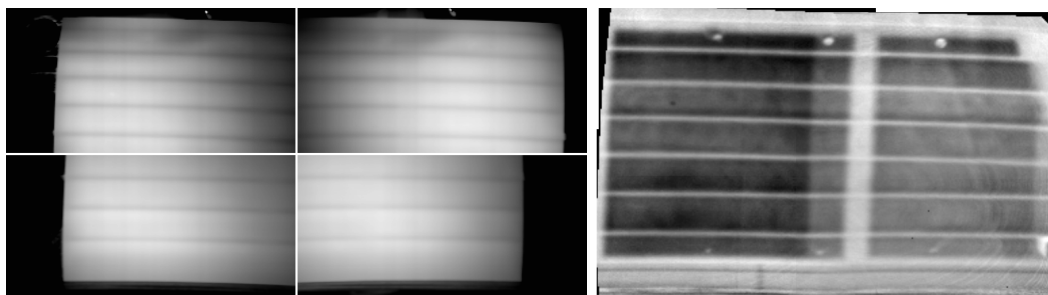


Abbildung 9.10: SPT Untersuchung CFK Panel: Durchgeführte Einzelmessungen: thermische Amplitude am Messbeginn (links) bzw. thermisches Phasenbild bei einer Anregungsfrequenz von 0,05 Hz mit linearem Übergang der Einzelmessungen

Die Kamerapositionen sind so gewählt, dass es zu Überschneidungen bzw. zu Überlappungsbereichen kommt, um mögliche Randeffekte des Infrarotmesssystems ausgleichen zu können.

Beispielhaft ist in Abbildung 9.10 rechts das Ergebnis einer Überlagerung der Einzelbilder anhand eines Phasenbildes bei einer Anregungsfrequenz von $0,05 \text{ Hz}$ dargestellt. Die Übergänge der Einzelmessungen sind kaum zu erkennen, wobei durch eine geeignete Wahl der einzelnen AOIs auch die Bereiche der Messung eliminiert wurden, welche nicht das Prüfobjekt darstellen (vergleiche schwarze Bereiche in Abbildung 9.10 links).

Betrachtet man das Phasenbild genauer, so erkennt man eine deutliche Abbildung der Stringer auf der Bauteilrückseite (horizontale, helle, linienförmige Bereiche) bzw. auch der unterschiedlichen Wandstärken des Panels selbst. Die unterschiedlichen Wandstärken werden dabei durch verschiedene Grauwerte bzw. die assoziierten, repräsentativen Phasenverschiebungen dargestellt. Bei einer Erhöhung der Anregungsfrequenz würden diese strukturimmanenten Artefakte sich deutlich reduzieren, wobei allerdings Schadstellen, welche sich in der Nähe der Panelrückseite befinden, nur noch schlecht angeregt und bewertet werden können.

Von eigentlichem Interesse sind aber nicht diese Artefakte, sondern die Sichtbarkeit der eingebrachten Fehlstellen und deren Detektion im Phasenbild. Auf dem Phasenbild sind alle zuvor beschriebenen Schädigungen sichtbar, wobei die Schädigungen, welche über der optischen Sichtbarkeitsgrenze liegen, deutlicher in Form einer größeren Phasenverschiebung zu identifizieren sind (obere erkennbare Impactreihe). Die Impactschäden, welche unter dieser Grenze liegen, weisen eine geringere aber dennoch signifikante Phasenverschiebung auf (untere Impactreihe).

Zusätzlich dazu ist im rechten unteren Bereich eine deutliche, großflächige Schädigung zu erkennen, welche sich bis zum Plattenrand erstreckt. Dabei handelt es sich um eine Delamination, die durch den Impact Nummer 15 hervorgerufen wurde, wobei das Schadensbild sich deutlich von dem eines typischen Impacts unterscheidet. Eine Erklärung dafür könnte die Positionierung des Impacts sein. Die Nähe zum Bauteilrand begünstigt in diesem Fall das Entstehen von Delaminationen und führt zu diesem Schadensbild.

Bei mikroskopischer Betrachtung ist am Bauteilrand ein entsprechender Riss parallel zu den Einzellagen erkennbar.

In Abbildung 9.11 sind die Ergebnisse einer teilautomatisierten Schadensdetektion zu sehen, wobei die identifizierten Schädigungen rot markiert sind und direkt auf das Phasenbild geplottet werden. Teilautomatisch bedeutet in diesem Fall, dass die Detektion selbst zwar automatisch stattfindet, allerdings einige Benutzereingaben benötigt werden, um die Schadstellen von den Artefakten abgrenzen zu können.

Vergleicht man die detektierten Schadensbereiche mit den optisch im Phasenbild erkennbaren Schäden, so ist eine gute Übereinstimmung zu erkennen, wobei lediglich die Schadensfläche des obersten linken Defekts zu klein eingeschätzt wird. Da die-

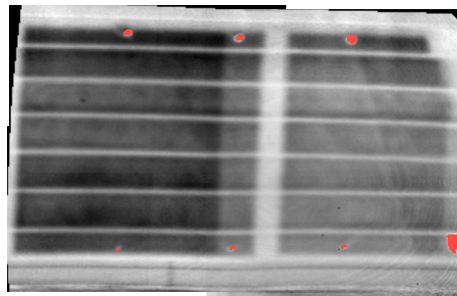


Abbildung 9.11: Schadensdetektion CFK Panel: thermisches Phasenbild bei einer Anregungsfrequenz von $0,05 \text{ Hz}$ mit detektierten Schadstellen (rot dargestellt)

ser Schaden die größte Eindringtiefe ($1,96 \text{ mm}$) aufweist, und als fast Durchschlag gewertet werden muss, kommt es zu einem Phasensprung innerhalb der Schadensfläche, wobei Teilbereiche dieser Schädigung dadurch ähnliche Phasenwinkel wie das ungeschädigte Laminat aufweisen. Da diese Schädigung von außen deutlich sichtbar ist, fällt diese Abweichung für die Prüfung an sich nicht ins Gewicht.

Betrachtet man die sieben Schadensflächen genauer und analysiert die Schadensflächen gemäß Kapitel 7.4, so gelangt man zu Tabelle 9.3.

Nummer	Impactenergie	geometrische Abmessungen		
		Breite	Höhe	Fläche
[–]	[J]	[mm]	[mm]	[mm ²]
2	20	17	10	122
3	20	17	10	134
4	20	17	17	227
12	20	7	8	35
13	20	12	7	58
14	20	12	7	58
15	10	31	29	558
∅		16	13	170
Maximum		31	29	558
Minimum		7	7	35

Tabelle 9.2: Schadensstatistik der mittels SPT detektierten Schäden des CFK Panels

Bemerkenswert ist dabei, dass bei gleicher Impactenergie die unterschiedlichen Impactpositionen deutlich unterschiedliche Schadensflächen hervorrufen, wobei analog zu der optischen Inspektion die Schäden der Impacts Nummer 12 bis 14 deutlich größer ausfallen (Schadensflächen deutlich über 100 mm^2). Die Schadensflächen der optisch

unter der Sichtbarkeitsgrenze liegenden Schäden betragen dabei in allen Fällen weniger als 60 mm^2 .

Zusätzlich sind noch die durchschnittlichen Defektabmessungen sowie die Minimal- und Maximalwerte zu sehen, wobei durch das Vorhandensein der großflächigen Delamination am Ort der Impactschädigung Nummer 15 die Mittelwerte deutlich beeinflusst werden.

9.2.5.1 Ergebnisse des Bewertungsprozesses

Nach der statistischen Analyse erfolgt die Schadensbewertung gemäß der vorgeschlagenen Vergleichswertmethode. Dazu werden die einzelnen Einflussfaktoren gemäß Gleichung 8.6 ermittelt, der resultierende Vergleichswert daraus abgeleitet und in Tabelle 9.3 zusammengefasst.

Nummer	Einflussparameter					Vergleichswert
	k_{rd}	k_{bea}	k_{dyn}	k_{lam}	k_{pos}	
2	0,98	0,75	1	0,9	0,5	0,33
3	0,98	0,6	1	0,9	0,5	0,26
4	0,98	0,6	1	0,9	0,5	0,26
12	0,98	1	1	0,9	1	0,88
13	0,98	1	1	0,9	1	0,88
14	0,98	1	1	0,9	1	0,88
15	0,98	1	1	0,9	0,5	0,44

Tabelle 9.3: Schadensbewertung der mittels SPT detektierten Schäden des CFK Panels

Der Einflussfaktor für die Bauteilkrümmung k_{rd} wird für alle Impacts zu 0,98 gesetzt, da an allen Impactorten die vorherrschende Krümmung ähnlich ist. Im Vergleich zu den geprüften, stark gekrümmten Strukturen mit Krümmungsradien γ_k kleiner 25 mm ist die hier vorliegende Bauteilkrümmung mit $\gamma_k \approx 1225 \text{ mm}$ vergleichsweise groß. Durch eine Extrapolation der Kurven in Abbildung 8.7 rechts gelangt man zu diesem Wert.

Der schadensspezifische Einflussparameter infolge des Belastungszustandes wurde bereits in Kapitel 9.2.2 hergeleitet. Der Einflussfaktor k_{dyn} wird in Anlehnung an Kapitel 8.1.2.2 für alle Schädigungen zu eins gesetzt.

Das Laminat des CFK Panels ist von guter Fertigungsqualität, wobei nur geringe Fertigungsabweichungen in Form von Ablageungenauigkeiten und Welligkeit zu verzeichnen sind. Aus diesem Grund wird der Wert k_{lam} zu $k_{lam} = 0,9$ gesetzt.

Der Einflussfaktor bezüglich der Schädigungslage der sieben detektierten Fehlstellen relativ zu Randstellen und Steifigkeitssprüngen unterscheidet sich in Abhängigkeit von

der Schadensgröße. Während die Impacts Nummer zwei bis vier die in Kapitel 8.1.2.4 definierte Grenze infolge der größeren Schadensfläche unterschreiten, ist dies bei den Impacts Nummer 12 bis 14 nicht der Fall. Somit wird der Einflussfaktor für die Impacts Nummer zwei bis vier zu $k_{pos} = 0,5$ gesetzt. Die Schädigung Nummer 15 reicht bis in den Randbereich der Platte und führt ebenfalls zu einem Abminderungswert von 0,5.

Durch einer Multiplikation gemäß Gleichung 8.6 wird der Vergleichswert für jede Einzelschädigung berechnet, wie in der äußerst rechten Spalte von Tabelle 9.3 zu sehen. Die Schäden Nummer zwei bis vier weisen einen Vergleichswert kleiner 0,35 auf und müssen gemäß der Definition aus Kapitel 8.1.3 als kritisch angesehen werden. Die Schäden Nummer 12 bis 14 weisen einen Vergleichswert deutlich über 0,65 auf und sind somit nicht als relevant anzusehen. Die Schädigung Nummer 15 liegt genau dazwischen, wobei der Wert 0,39 relativ nahe zur kritischen Grenze von 0,35 ist.

Stellt man die Ergebnisse grafisch dar und überlagert sie mit einem dreidimensionalen Modell der Struktur, so gelangt man zu Abbildung 9.12, was auch das Endresultat der SPT Bewertung darstellt.

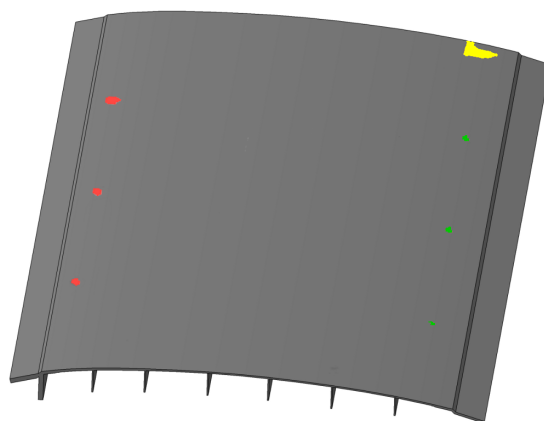


Abbildung 9.12: Schadensbewertung CFK Panel: Darstellung der Schädigungen bzw. ihrer Relevanz am 3D-CAD Modell

Unter Berücksichtigung der vorherrschenden Belastung erscheint die Kategorisierung der Einzelschäden sinnvoll, da vor allem die als kritisch angesehenen Schädigungen in hochbeanspruchten Zonen liegen. Auch die Definition des Schadens Nummer 15 als möglicherweise kritisch erscheint plausibel, da dieser Schaden sich zwar nicht in einem hochbeanspruchten Bereich befindet, aber dennoch im Bereich der Einspannung liegt und zum Probenrand hin offen ist. Die Gesamtbewertung dieses Schadens erfordert weitere Maßnahmen und Detailbetrachtungen.

Fasst man die Ergebnisse abschließend zusammen, so zeigt auch dieses Fallbeispiel eine gute Eignung des vorgeschlagenen SPT Bewertungssystems für die zerstörungsfreie Identifizierung und Bewertung von großflächigen, komplexen Faserverbundstrukturen beim Vorhandensein mehrerer Fehlstellen.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Der steigende Einsatz von Faserverbundwerkstoffen erfordert ein gleichzeitiges Anwachsen geeigneter Prüfmethoden, um die Betriebssicherheit der Komponenten und Strukturen zu gewährleisten. Im Besonderen handelt es sich dabei um zerstörungsfreie Prüfmethoden, welche innere Fehlstellen in Faserverbundbauteilen auffinden können. Die Auswertung und Interpretation dieser Prüfergebnisse kann im Regelfall nur von einem Spezialisten erfolgen und auch die Systemkosten sensibler Prüfsysteme sind vergleichsweise hoch. Sie übersteigen in der Regel das Budget kleiner und mittelständiger Unternehmen, wobei auch große Firmen Bedarf nach einer kostengünstigen ZfP-Lösung aufweisen. Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit versucht, ein einfaches und dennoch effizientes ZfP-Verfahren zu entwickeln. Dabei wurde speziell auf die Interpretation und Schadensbewertung Augenmerk gelegt.

Aus diesem Grunde wurde im ersten Schritt eine vergleichende Untersuchung der am Markt befindlichen Systeme durchgeführt, um ein Prüfsystem zu identifizieren, welches das größte Potential hinsichtlich der Prüfbarkeit von großflächigen und gekrümmten Strukturen aufweist. Die optisch angeregte Thermographie wurde als vielversprechendstes Verfahren ausgewählt, wobei Maßnahmen identifiziert wurden, um die Systemkosten zu reduzieren und die Ergebnisinterpretation zu vereinfachen. Die Trennung des Anregungs- und Aufzeichnungsmoduls zusammen mit dem Einsatz von kosteneffizienten Standardkomponenten, welche teilweise aus anderen Industriezweigen stammen, stellten die Hauptschritte zur Entwicklung eines Sequentiellen Phasenmodulierten Thermographiesystems (SPT) dar.

Die experimentellen Ergebnisse dieser Methode wurden mit Resultaten des konventionellen Lock-In-Verfahrens verglichen, wobei eine ähnliche Schadenssensitivität zu beobachten war. Als Referenzplatte wurde ein CFK-Schichtlaminat verwendet, welches eine Vielzahl unterschiedlicher, für Faserverbundwerkstoffe typischer, künstlich eingebrachter Fehlstellen aufwies.

Da vor allem in der Luft- und Raumfahrtindustrie, aber auch in anderen Industriezweigen das Ultraschallverfahren am häufigsten für die Prüfung von Faserverbundbauteilen angewendet wird und in vielen Fällen als Referenz dient, wurde auch in dieser Arbeit ein Vergleich mit einem wassergekoppelten Impuls-Echo-Verfahren durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten vergleichbare Resultate, wobei vor allem bei sich überlappenden Fehlstellen die thermische Methode Vorteile hinsichtlich der Unterscheidbarkeit der Einzeldefekte zeigte. Mit steigender Probenkörperdicke und beim Vorhandensein stark reflektierender thermischer sowie akustischer Schichten kommt es bei beiden Verfah-

ren zu einer deutlichen Reduktion der Detektionsfähigkeit. Um diese Strukturen dennoch bewerten zu können, müssen beispielsweise Durchschallungs- oder Durchstrahlungsverfahren benutzt werden.

Ein weiterer Hauptpunkt der vorliegenden Arbeit war die Schadensbewertung. Da in den meisten Fällen die zerstörungsfreie Prüfung mit der Detektion der Schädigung und deren geometrischen Vermessung endet, ist es erforderlich, Aussagen über die Schadensrelevanz bzw. den Schädigungseinfluss zu treffen. Aus diesem Grund wurde ein vereinfachter Ansatz verfolgt, um die SPT-Methode um ein Modul zur Schadensbewertung zu erweitern. Zu diesem Zweck wurden zentrale Einflussfaktoren definiert und deren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften unterschiedlich geschädigter Strukturen experimentell und anhand vergleichender Untersuchungen ermittelt.

Diese Einflussfaktoren wurden schließlich zu einem Vergleichswert zusammengeführt und ein geeignetes Bewertungsschema definiert, um möglichst rasch erste Aussagen über die Schadensrelevanz treffen zu können.

Um die einfache Bedienbarkeit dieses zerstörungsfreien Prüf- und Bewertungssystems zu gewährleisten, wurde eine geeignete Benutzeroberfläche (GUI) erstellt, welche als Bewertungsergebnis ein entsprechend der Schadensrelevanz farbig codiertes Auswertungsbild zeigt.

Die Anwendbarkeit dieser Methode wurde schließlich erfolgreich an zwei Fallbeispielen gezeigt, welche sich sowohl geometrisch als auch von ihrem Einsatzgebiet stark unterscheiden, aber zugleich typische Einsatzgebiete für diese Methode darstellen.

Der vorgeschlagene Bewertungsprozess kann durch verschiedene Maßnahmen weiter verbessert werden. So ist beispielsweise der Einsatz von alternativen Versagenskriterien zu nennen, welche die Präzision der Bewertung weiter verbessern können.

Auch die vorgeschlagene und beschriebene Benutzeroberfläche kann in einigen Punkten noch erweitert bzw. ergänzt werden. Darüber hinaus verfügt die beschriebene GUI bis dato noch nicht über industrielle Reife bzw. die geforderte Robustheit. Die Überführung der vorgestellten Implementierung in ein industrietaugliches System wäre somit der nächste Schritt. Dies wurde bewusst in dieser Arbeit nicht verfolgt, da damit kein Mehrwert im Sinne einer Weiterentwicklung der Methode geschaffen werden kann.

Weitere zukünftige Forschungsschwerpunkte könnten in der Optimierung des Gesamtsystems liegen. Obwohl in dieser Arbeit bereits unterschiedliche Schädigungen in verschiedenen flachen aber auch (teilweise stark-) gekrümmten Strukturen untersucht wurden, sollte dieses an weiteren Fallbeispielen angewendet werden, um speziell die Mess- und Auswertungsparameter weiter optimieren zu können.

Mit dieser Arbeit konnte das prinzipielle Vorgehen von der Schadensdetektion bis hin zur Schadenscharakterisierung und zur Bewertung des Schädigungseinflusses gezeigt und anhand von typischen Fehlstellen in Faserverbundstrukturen validiert werden. Sie bildet die Grundlage für darauf aufbauende Forschungsarbeiten, welche den weiteren Einsatz von Faserverbundwerkstoffen durch effiziente zerstörungsfreie Bewertung

unterstützen und somit einen wichtigen Beitrag zur Gewichtsreduktion von Hochleistungsstrukturen, aber auch zur Gewährleistung ihrer Betriebssicherheit liefern.

Literaturverzeichnis

- [1] DIN 65561: Faserverstärkte Kunststoffe - Prüfung von Multidirektionalen Laminaten - Bestimmung der Druckfestigkeit nach Schlagbeanspruchung, Mai 1991.
- [2] DIN EN 6038: Faserverstärkte Kunststoffe - Prüfverfahren - Bestimmung der Restdruckfestigkeit nach Schlagbeanspruchung, April 1996.
- [3] DIN EN 571-1: Zerstörungsfreie Prüfung - Eindringprüfung - Teil1: Allgemeine Grundlagen, März 1997.
- [4] DIN EN 2823: Faserverstärkte Kunststoffe - Ermittlung des Einflusses der Auslagerung in feuchtem Klima auf die mechanischen und physikalischen Eigenschaften, April 1999.
- [5] DIN EN 13018: Zerstörungsfreie Prüfung - Sichtprüfung - Allgemeine Grundlagen, Juli 2001.
- [6] DIN EN 14781: Rennräder - Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfverfahren, März 2006.
- [7] DIN EN 614-1: Sicherheit von maschinen - Ergonomische Gestaltungsgrundsätze - Teil 1: Begriffe und allgemeine Leitsätze, Juni 2009.
- [8] DIN EN ISO 6946: Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren, April 2009.
- [9] DIN 31051: Grundlagen der Instandhaltung, Dezember 2011.
- [10] DIN 50035: Begriffe auf dem Gebiet der Alterung von Materialien - Polymere Werkstoffe, Februar 2011.
- [11] ANSYS, Inc. *Element Reference*. SAS IP, Inc, 2009.
- [12] C. Backhaus. *Usability-Engineering in der Medizintechnik: Grundlagen - Methoden - Beispiele*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2010.
- [13] H. D. Baehr und K. Stephan. *Wärme- und Stoffübertragung*. Springer Verlag, Berlin, 2008.
- [14] M. Beheshty und B. Harris. A constant-life model of fatigue behavior for carbon-fibre composites: The effect of impact damage. *Composites Science and Technology*, 58:9–18, 1998.

- [15] W. Beitz und K.-H. Grote. *Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1997.
- [16] U. Berger. *Bauteilüberwachung durch Analyse von Schwingungen und Festkörperwellen*. Dissertation, Shaker Verlag, Aachen, 2007.
- [17] L. Bühling, W. Hillger und D. Ilse. Modulare Ultraschallprüfsysteme für Forschung, Entwicklung und Qualitätssicherung. In *Proceedings DGZfP-Jahrestagung*. Rostock, 2005.
- [18] R. Böhm, W. Hufenbach, A. Langkamp und H. Richter. Ultrasonic Determination of Anisotropic Damage In Fibre and Textile Reinforced Composite Materials. In *CDCM - Conference on Damage in Composite Materials*. Stuttgart, 2006.
- [19] L. Boltzmann. Ableitung des Stefan'schen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der electromagnetischen Lichttheorie. *Annalen der Physik*, 258 Issue 6:291–294, 1884.
- [20] F. Bosnjakovic und K. F. Knoche. *Technische Thermodynamik: Teil II*. Dietrich Steinkopff Verlag, 1997.
- [21] O. Breitenstein und M. Langenkamp. *Lock-in Thermography: Basics and Applications to Functional Diagnostics of Electronic Components*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2003.
- [22] A. Bulavinov, M. Kröning, R. Pinchuk und K. M. Reddy. Echtzeit-3D-Bildgebung mittels der getakteten Gruppenstrahlertechnik für Ultraschallprüfanwendungen. In *Proceedings Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung*. Münster, 2009.
- [23] O. Bullinger und G. Busse. Röntgen-Refraktions-Topografie - Ein zerstörungsfreies Werkzeug zur Charakterisierung von Schädigungen in Kunststoffen. In *Proceedings DACH - Jahrestagung*. Salzburg, 2004.
- [24] U. Burger. *Impactverhalten von hybriden Verbundwerkstoffen mit metallischem Ringgeflecht*. Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme der Technischen Universität Berlin, 2009.
- [25] G. Busse. Kunststoffe zerstörungsfrei prüfen: Rechtzeitige Erkennung von Schäden in Bauteilen. *Kunststoffe*, 10:S. 212–222, 2000.
- [26] G. Busse, B.-H. Kröplin und Falk K. Wittel (Eds.). *Damage and its evolution in Fibre-Composite Materials*. ISD Verlag, 2006.
- [27] G. Busse, B.-H. Kröplin und Falk K. Wittel (Eds.). *Damage and its Evolution in Fibre-Composite Materials*, chapter 1.3.1 Thermography Methods for Non-Destructive Evaluation (NDE), pages 109–123. Gernot Riegert and Klaus Eberle, 2006.

- [28] H. S. Carslaw und J. C. Jaeger. *Conduction of Heat in Solids*. Oxford University Press, 1959.
- [29] A. Dillenz, T. Zweschper und G. Busse. Burst phase-angle thermography with elastic waves. *Proceedings SPIE*, 4710:572–577, 2002.
- [30] D. Döring, I. Solodov und G. Busse. Air-coupled surface acoustic waves: opportunities and limitations for NDT-applications. IVth NDT in Progress, Prague, 2007.
- [31] D. Döring, I. Solodov und G. Busse. Werkstoffcharakterisierung und Prozessverfolgung mit luftgekoppelten Platten- und Oberflächenwellen. 21. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, 2009.
- [32] D. Ekenhorst. Bestimmung von Alterungsschäden in CFK. *Materialprüfung*, 39:175–179, 1997.
- [33] A. Fink. Lokale Metall-Hybridisierung zur Effizienzsteigerung von Hochlastfügestellen in Faserverbundstrukturen, Forschungsbericht 2010-14. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, 2010.
- [34] M. Flemming, G. Ziegmann und S. Roth. *Faserverbundbauweisen: Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix*. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1999.
- [35] N. A. Fouad und T. Richter. *Leitfaden Thermografie im Bauwesen: Theorie, Anwendungsgebiete, praktische Umsetzung*. Fraunhofer Irb Verlag, 2008.
- [36] G. Frei und E. Lehmann. Neue Erkenntnisse bei der Nutzung von Neutronenstrahlen für die Untersuchung industrierelevanter Komponenten. In *DACH-Jahrestagung*. St. Gallen, 2008.
- [37] W. Georgi und E. Metin. *Einführung in LabVIEW*. Carl Hanser Verlag München, 2009.
- [38] H. Gerhard. *Entwicklung und Erprobung neuer dynamischer Speckle-Verfahren für die zerstörungsfreie Werkstoff- und Bauteilprüfung*. Universität Stuttgart, 2007.
- [39] A. Gleiter, C. Spießberger und G. Busse. Tiefenaufgelöste Defekterkennung mit optisch angeregter Lockin-Thermografie. In *Proceedings Thermografie-Kolloquium*, 2007.
- [40] W. Grellmann und S. Seidler. *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*. Springer Verlag, Berlin, 1986.
- [41] W. Grellmann und S. Seidler. *Kunststoffprüfung*. Carl Hanser Verlag München Wien, 2005.

- [42] R. Grimberg. Electromagnetic Nondestructive Evaluation: Present and Future. *The 10th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing: Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering*, 267–284, 2009.
- [43] K.-W. Harbich, M. Hentschel und A. Lange. Quantitative Röntgen-Refraktions-Topografie von keramischen Werkstoffen. *Materialprüfung*, 38:181–186, 1996.
- [44] K.-W. Harbich, M. Hentschel und J. Schors. X-ray refraction characterization of non-metallic materials. *NDT&E International*, 34:297–302, 2001.
- [45] P. Hariharan. *Optical Interferometry*. Academic Press, San Diego, USA, 2003.
- [46] F. J. Harris. On the use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform. *IEEE*, 66(1):51–83, January 1978.
- [47] T. Hasiotis, E. Badogiannis und N. Tsouvalis. Application of Ultrasonic C-Scan Techniques for Tracing Defects in Laminated Composite Materials. In *Proceedings 4th International Conference on NDT*. Chania, 2007.
- [48] F. Höchtl, M. Perterer und A. Kiefmann. Jahresbericht März 2010 bis Februar 2011 zum Förderprojekt Betriebssicherheit von Sportgeräten aus CFK. Bayerischen Forschungsförderung, 2011 (*).
- [49] F. Höchtl, M. Perterer, A. Kiefmann, V. Senner und H. Baier. Influence of Curvature on Impact Damage of Strongly Curved CFRP-Structures. In *SAMPE TECH 2011*. Fort Worth, TX, 2011 (*).
- [50] J. He und Z.-F. Fu. *Modal Analysis*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2001.
- [51] C. J. Hellier. *Handbook of Nondestructive Evaluation*. McGraw-Hill, 2001.
- [52] M. P. Hentschel und A. Kupsch. Das Anwendungspotential der Röntgen-Topografie vom Mikroriss bis zur Gepäckprüfung. In *Proceedings DGZfP-Jahrestagung*, Vortrag 52. Fürth, 2007.
- [53] W. Hillger und A. Szewieczek. Interaktionen von Ultraschall-Longitudinal- und von Lamb-Wellen an Fehlstellen in CFK-Bauteilen. In *Proceedings DGZfP-Jahrestagung*. Münster, 2009.
- [54] E. Hornbogen und H. Warlimont. *Metalle: Struktur und Eigenschaften der metalle und Legierungen*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2006.
- [55] B. Hosten, C. Biateau, M. Castaings und D. Roziere. Etude et caractérisation de transducteurs a couplage par air pour l'évaluation et le controle non destructifs des matériaux. *Instrumentation Mesure Métrologie*, 1:169–189, 2001.
- [56] M. Hugenschmidt. *Lasermesstechnik, Diagnostik der Kurzzeitphysik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.

- [57] K. Imielinska. Air-coupled ultrasonic C-scan technique in impact response testing of carbon fibre and hybrid. *Materials Processing Technology*, 157:513–522, 2004.
- [58] R. M. Jones. *Mechanics of Composite Materials*. Taylor and Francies, 1999.
- [59] W. J. Staszewski, C. Boller und G. R. Tomlinson. *Health Monitoring of Aerospace Structures*. John Wiley & Sons, Ltd., 2003.
- [60] J. Krautkrämer und H. Krautkrämer. *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*. Springer-Verlag, 1986.
- [61] R. Krawietz und W. Heimke. *Physik im Bauwesen - Grundwissen und Bauphysik*. Carl Hanser Verlag München Wien, 2008.
- [62] T. Kreis. *Handbook of Holographic Interferometrie*. Wiley-VCH, Weinheim, 2005.
- [63] K.-J. Langenberg, R. Marklein und K. Mayer. *Theoretische Grundlagen der zerstörungsfreien Prüfung mit Ultraschall*. Oldenbourg Verlag München, 2009.
- [64] S. Liu. On Fourier's law of heat conduction. *Continuum mechanics and Thermodynamics*, 2:301–305, 1990.
- [65] X. P. V. Maldague. *Infrared Methodology and Technology*. Gordon and Breach Science Publishers, 1994.
- [66] X. P. V. Maldague. *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*. John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [67] K. Moser. *Faser-Kunststoff-Verbund – Entwurfs- und Berechnungsgrundlagen*. VDI Verlag, Düsseldorf, 1992.
- [68] S. Neuhäusler, G. Zenzinger, T. Krell und V. Carl. Optimierung der Impuls-Thermografie-Prüftechnik durch Laserscans und Blitzsequenzen. In *DGZfP-Berichtsband 86-CD*, 23–32. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., September 2003.
- [69] M. Omar, M. Hassan und K. Saito. Optimizing thermography depth probing with dynamic thermal point spread function. *Infrared Physics & Technology*, 46(6):506–514, August 2005.
- [70] W. Oppermann. *Untersuchungen zum Einfluss der Impulsparameter auf den Fehlernachweis bei der Ultraschallprüfung schallstreuender Werkstoffe*. Dissertation, Universität Dortmund (Maschinenbau), 1982.
- [71] M. A. Perez, L. Gil und S. Oller. Non-Destructive Testing Evaluation of Low Velocity Impact Damage in Carbon Fiber-Reinforced Laminated Composites. In *CompNDT*, 2011.

- [72] M. Perterer, H. Baier und F. Höchtl. Cost-Effective, Phase-Based Thermography Method for Ultrasonic Investigation of defects in CFRP Structures. *SAMPE Journal*, 47(6):46–52, 2011 (*).
- [73] M. Perterer, F. Höchtl, M. Blümel, A. Kiefmann, H. Baier und V. Senner. Einsatzmöglichkeiten von kosteneffizienten Zerstörungsfreien Prüfmethode(n) (ZfP) am Beispiel CFK-Fahrradrahmen. In *DVM Workshop - Prüfverfahren und Qualitätssicherungsmethoden unter Berücksichtigung von CFK-Werkstoffen*, Berlin, 2009 (*).
- [74] M. Perterer, F. Höchtl, A. Kiefmann, H. Baier und V. Senner. Ultrasonic And Thermographic Monitoring of Impact induced Damage of CFRP Structures. In *SAMPE 2010 Spring Conference*. Seattle, 2010 (*).
- [75] M. Perterer, F. Höchtl, A. Kiefmann, V. Senner und H. Baier. Cost-Effective Phase-Modulated Thermography for Damage Inspection of Flat and Strongly Curved CFRP Structures. In *2nd Innovative International Composites Summit (I.I.C.S)*. Paris, 2011 (*).
- [76] M. Perterer, F. Höchtl, A. Kiefmann, V. Senner und H. Baier. Kosteneffiziente phasenmodulierte Thermographie zur Schadensdetektion an flachen und stark gekrümmten Bauteilen aus CFK. In *DGZfP Jahrestagung*. Bremen, 2011 (*).
- [77] M. Perterer, T. Kuhn und H. Baier. *Verbundprojekt: ProKnoS - Ganzheitliche Prozessgestaltung für werkstoffhybride Knotenstrukturen - Schlussbericht zum BMWF Förderkennzeichen 20W0602B*. Technische Informationsbibliothek Hannover - Deutsche Forschungsberichte, München, 2009 (*).
- [78] M. Perterer, M. Wedekind und H. Baier. Imperfektionsbewertung von faserverbund-Metallstrukturen mit zerstörungsfreien Prüfverfahren. In *DGLR Luft- und Raumfahrtkongress*. Bremen, 2011 (*).
- [79] W. Polifke und J. Kopitz. *Wärmeübertragung: Grundlagen, analytische und numerische Methoden*. Pearson Education Deutschland GmbH, 2005.
- [80] A. Puck. *Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten: Modelle für die Praxis*. Carl Hanser Verlag München Wien, 1996.
- [81] P. K. Rastogi, M. Lehmann, J. Huntley, A. Moore, J. D. C. Jones, J. D. R. Valera, M. Syödahl, G. Pedrini und H. J. Tiziani. *Digital Speckle Pattern Interferometry and related techniques*. John Wiley & Sons, Ltd., 2001.
- [82] W. Reimers, A. R. Pyzalla, A. K. Schreyer und H. Clemens. *Neutrons and Synchrotron Radiation in Engineering Materials Science*. Wiley-Vch, 2008.
- [83] G. Riegert. *Induktions-Lockin-Thermografie : Ein neues Verfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung*. Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Kunststofftechnik, 2007.

- [84] C. Sauerwein, M. Simon, I. Pfeifer-Schäller, S. Tomaschko und F. Klein. Anwendungen der 3D-Computertomographie in Entwicklung und Forschung. In *Proceedings DGZfP-Jahrestagung*. Weimar, 2002.
- [85] H. Schmiedel. *Handbuch der Kunststoffprüfung*. Carl Hanser Verlag München Wien, 1992.
- [86] C. E. Shannon. Communication in the Presence of Noise. In *Proceedings of the IRE*, 37:10–21, 1949.
- [87] M. Sinapius und D. Holzhüter. Infusion Technology for Bonded CFRP Repairs. In *11. DECHEMA Kolloquium - Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik*, Frankfurt, 2011.
- [88] I. Solodov. Nonlinear Acoustic NDT: Approaches, Methods and Applications. In *Proceedings NDT in Progress, 5th International Workshop of NDT Experts*. Prague, 2009.
- [89] I. Solodov, D. Döring und G. Busse. Air-coupled Lamb- and Rayleigh waves for remote NDE of defects and material elastic properties. *The 10th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing*, 37–45, 2009.
- [90] M. Stefan. Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur. *Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften LXXIX*, II. Abteilung:391 – 428, 1879.
- [91] W. Steinchen und L. Yang. *Digital Shearographie: Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometrie*. Spie Press, Bellingham Washington, 2001.
- [92] Z. Su. *Elastic Wave-based Damage Detection Using Active Sensor Network*. VDM Verlag Dr. Müller, 2009.
- [93] Z. Su und L. Yee. *Identification of Damage Using Lamb Waves: From Fundamentals to Applications*. Springer-Verlag Berlin, 2009.
- [94] I. A. Viktorov. *Rayleigh and Lamb Waves*. Plenum Press, New York, 1967.
- [95] D. Wu. *Lockin-Thermografie für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung und Werkstoffcharakterisierung*. Dissertation, Fakultät Verfahrenstechnik der Universität Stuttgart, 1996.
- [96] D. Wu, A. Salerno, U. Malter, R. Aoki, R. Kochendörfer, P. K. Kächele, K. Woithe, K. Pfister und G. Busse. Inspection of aircraft structural components using lockin-thermography. *Quantitative infrared thermography, QUIRT 96, Eurotherm Series 50*, Edizione ETS:251–256, Pisa 1997.

- [97] J. Zhang, B. W. Drinkwater und P. D. Wilcox. Characterization of small defects using ultrasonic arrays: a scattering coefficient matrix approach. In *17th World Conference on Nondestructive Testing*. Shanghai, China, Oktober 2008.
- [98] E. Zukauskas und R. Kazys. Investigation of the delamination type defects parameters in multilayered GLARE3-3/2 composite material using air - coupled ultrasonics technique. *ULTRAGARSAS Journal*, 62(3):44–48, 2007.

Alle mit (*) gekennzeichneten Quellen sind eigene Veröffentlichungen des Autors.

Appendix

A.1 Approximationsparameter: Einfluss der Bauteilkrümmung

Approximation $0 \leq E_{imp} \leq 15J$	\varnothing [mm]	P_1 [-]	P_2 [J^{-1}]	P_3 [J^{-2}]	P_4 [J^{-3}]
	15	0,99	-0,12	0,008	$-1,94e^{-4}$
Zusammenhang: Restfestigkeit - Impactenergie	35	0,992	-0,16	0,012	$-3,20e^{-4}$
$\sigma_{r,rel} = P_1 + P_2 \cdot E_{imp} + P_3 \cdot E_{imp}^2 + P_4 \cdot E_{imp}^3$	50	0,997	-0,079	0,006	$-1,33e^{-4}$
	∞	0,997	-0,010	-0,002	$1,01e^{-4}$

Tabelle A.1: Approximationsparameter zur Messwertapproximation für die Restfestigkeitsanalyse von flachen und gekrümmten Bauteilen aus CFK

Approximation $0 \leq E_{imp} \leq 15J$	\varnothing [mm]	P_1 [J]	P_2 [-]	P_3 [J^{-1}]
	15	0,996	-0,010	$-6,53e^{-4}$
Zusammenhang: Steifigkeitsdegradation - Impactenergie	35	0,994	0,013	-0,001
$E_{rel} = P_1 + P_2 \cdot E_{imp} + P_3 \cdot E_{imp}^2$	50	0,995	-0,013	$6,63e^{-4}$
	∞	0,999	0,010	$-5,27e^{-4}$

Tabelle A.2: Approximationsparameter zur Messwertapproximation für die Steifigkeitsdegradation von flachen und gekrümmten Bauteilen aus CFK

Approximation $0 \leq E_{imp} \leq 15J$	\varnothing [mm]	P_1 [cm ²]	P_2 [cm ² J ⁻¹]	P_3 [cm ² J ⁻²]
	15	0,047	0,720	-0,009
Zusammenhang: Schadensfläche - Impactenergie	35	-0,375	2,136	-0,050
$A = P_1 + P_2 \cdot E_{imp} + P_3 \cdot E_{imp}^2$ bzw. $A = P_1 + P_2 \cdot E_{imp}$	50	-0,090	1,7767	-0,013
	∞^*	0,167	0,012	0,034
	∞^{**}	0	1,733	

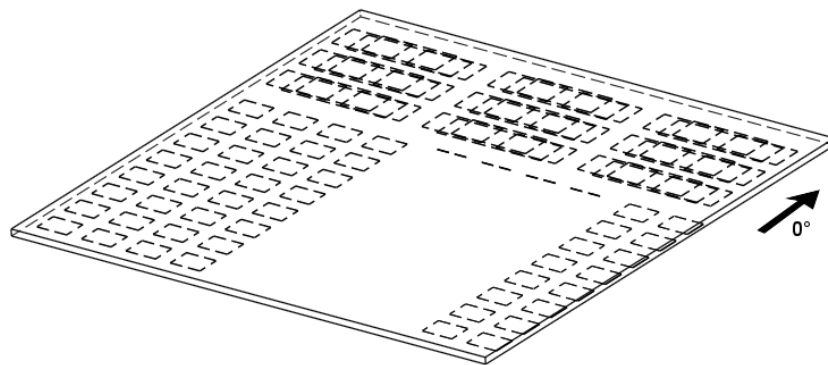
* Lagerung und Abmessungen gemäß CAI Norm [1]

**Theoretische Näherung ebener Probenkörper mit zur Rohrprüfung analoger Lagerung

Tabelle A.3: Approximationsparameter zur Messwertapproximation für die Bestimmung der Schadensfläche infolge von Impactschädigung

A.2 CFK Referenzplatte

Ablageplan



Isometrische Ansicht
Maßstab: 1:2

Abbildung A.1: Ablageplan CFK Probenplatte: 3D-Ansicht

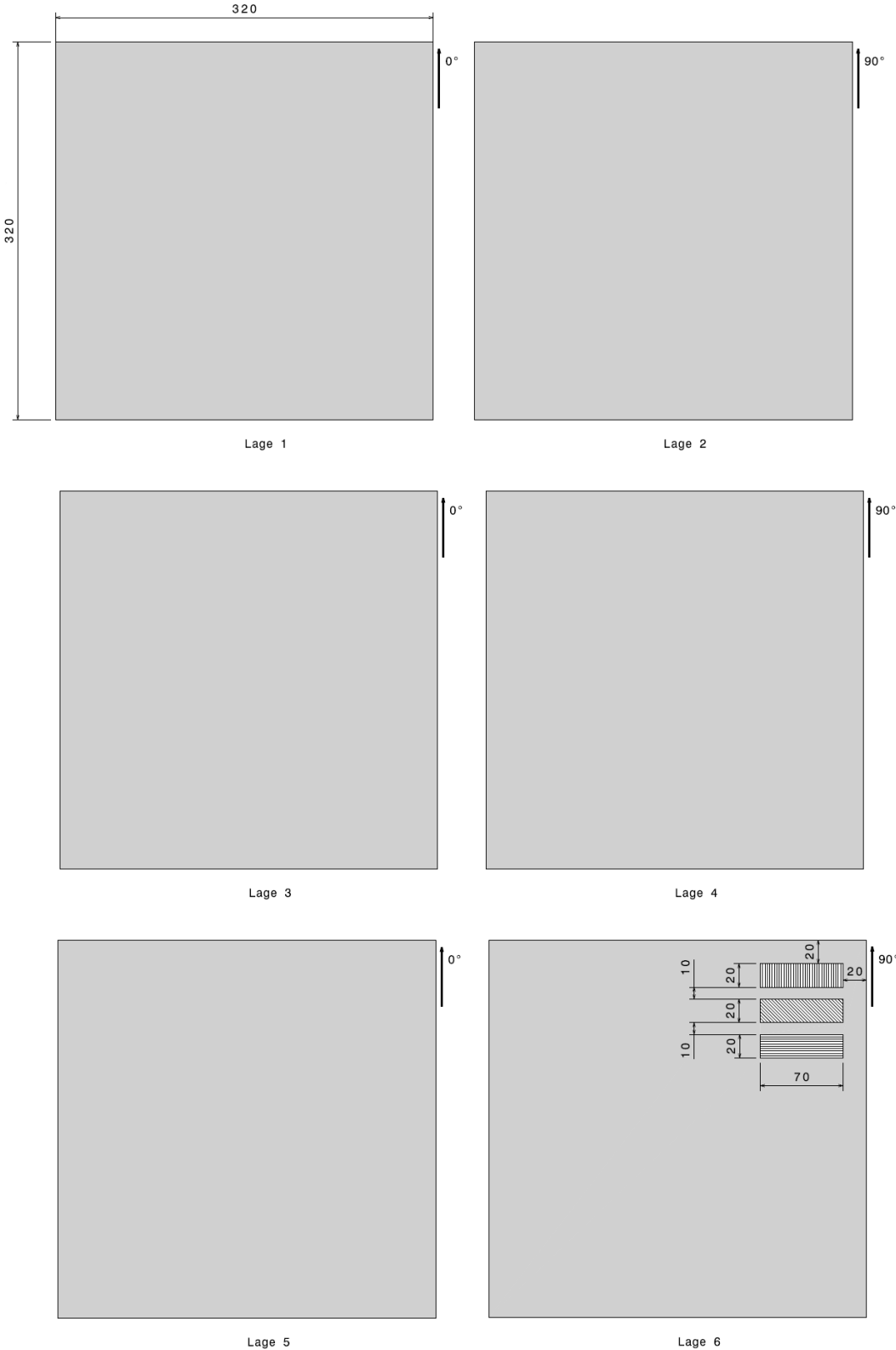


Abbildung A.2: Ablageplan CFK Probenplatte: Lage 1 bis Zwischenlage 6

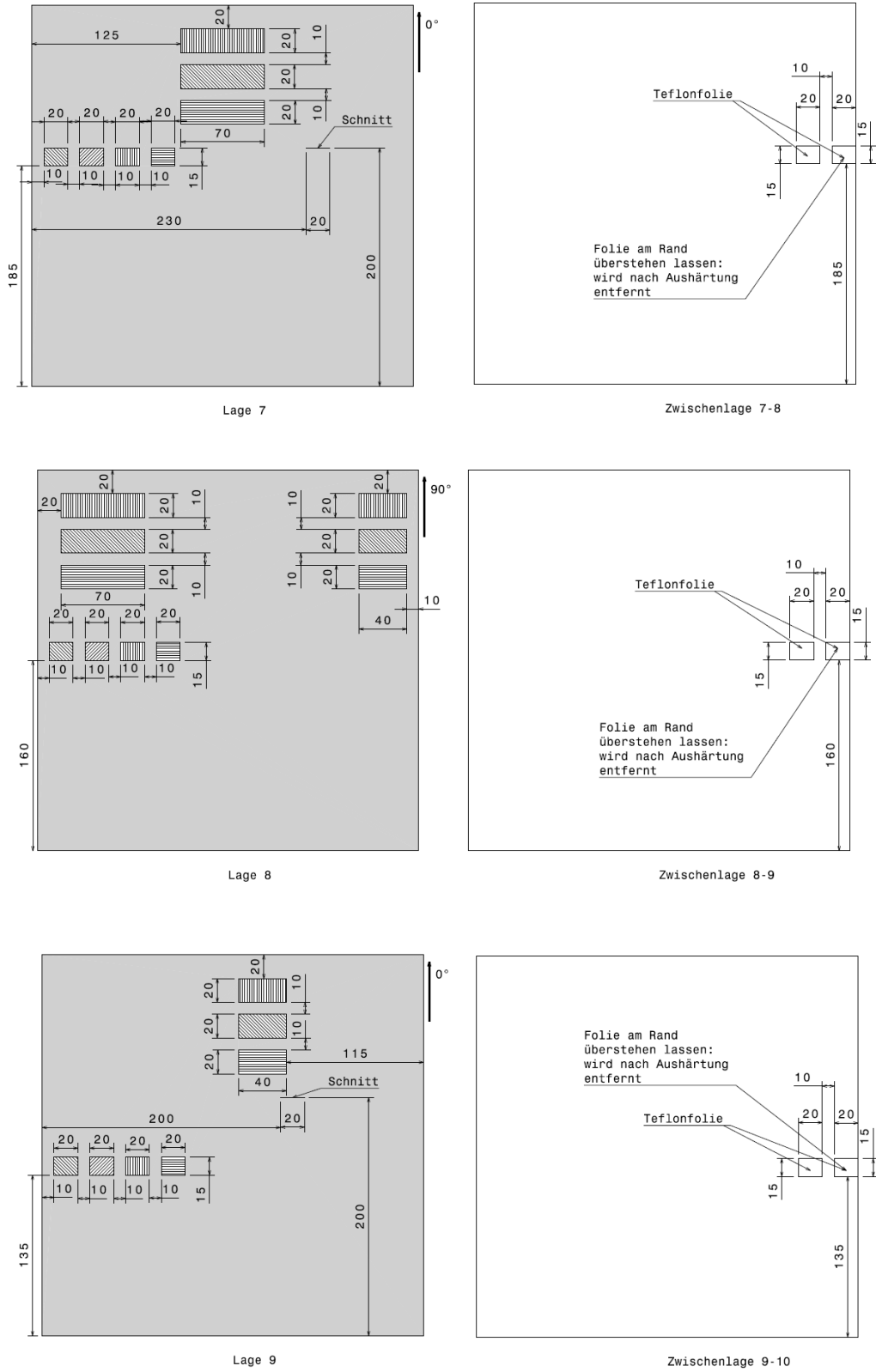


Abbildung A.3: Ablageplan CFK Probenplatte: Lage 7 bis Zwischenlage 9-10

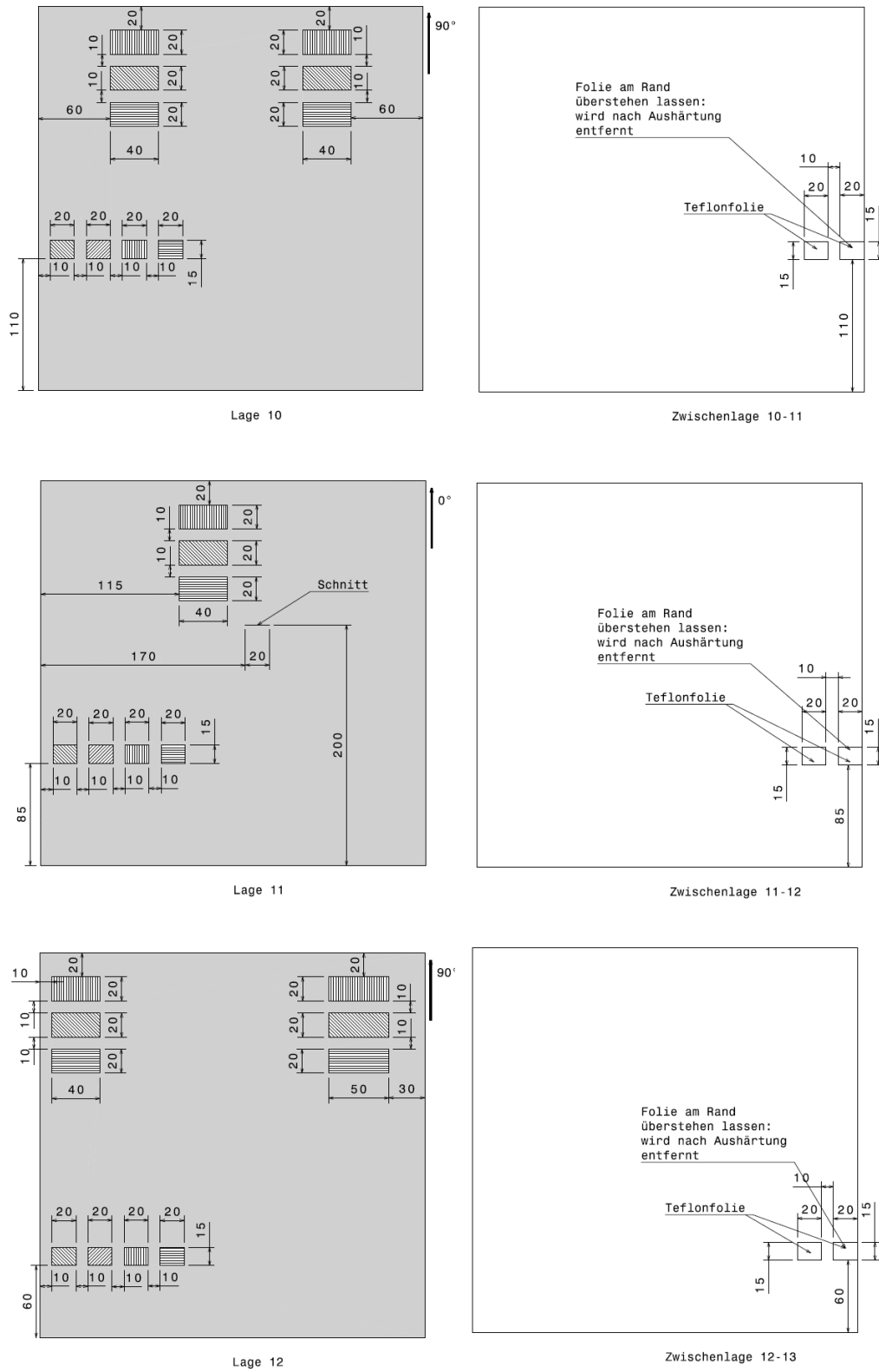


Abbildung A.4: Ablageplan CFK Probenplatte: Lage 10 bis Zwischenlage 12-13

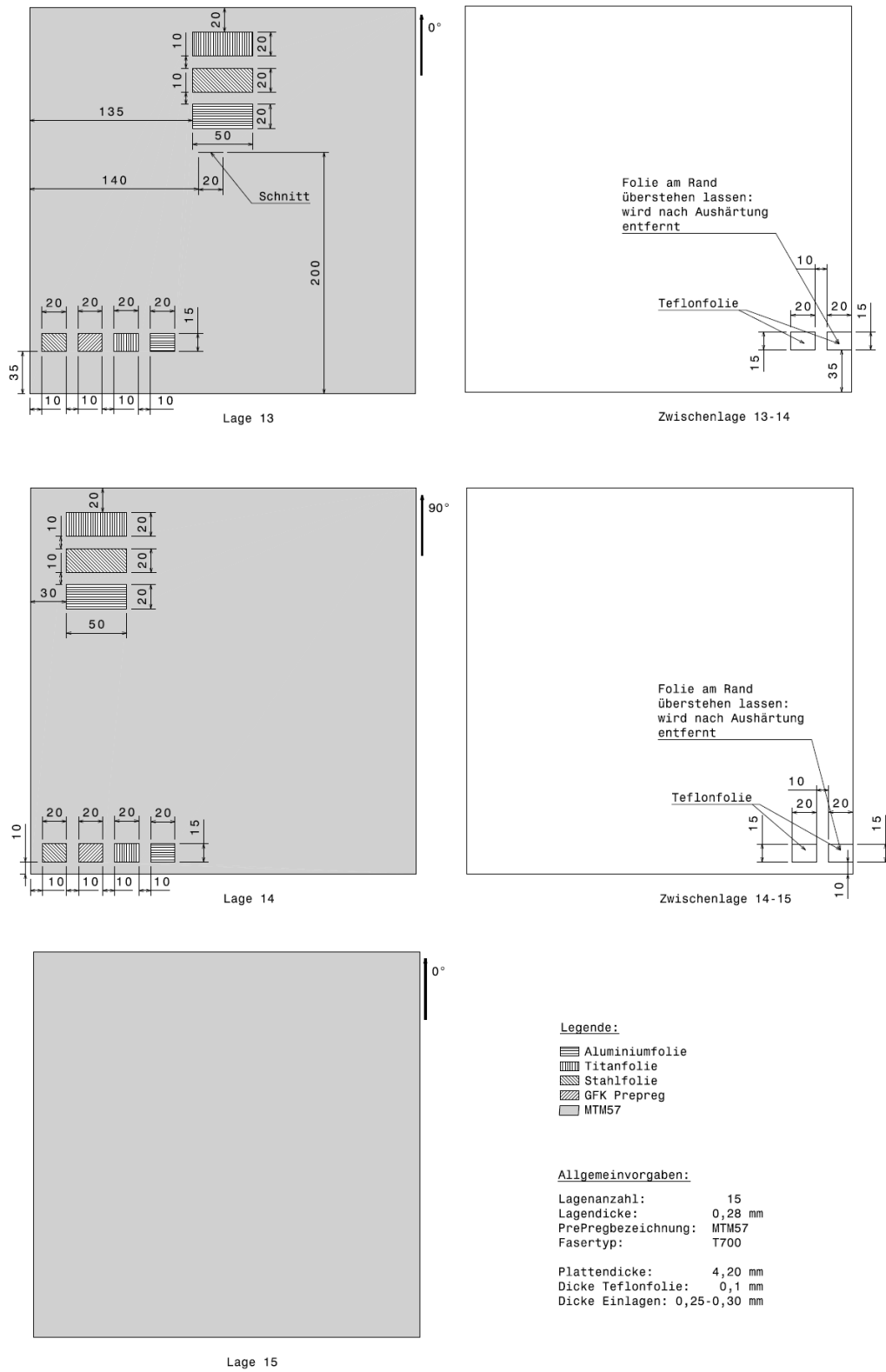
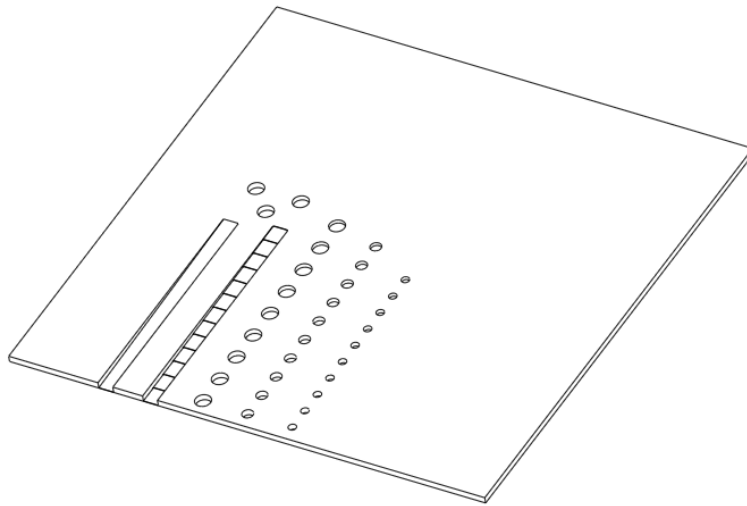


Abbildung A.5: Ablageplan CFK Probenplatte: Lage 13 bis Lage 15 mit Legende

Mechanische Bearbeitung



Isometrische Ansicht

Abbildung A.6: Mechanische Bearbeitung: 3D-Ansicht

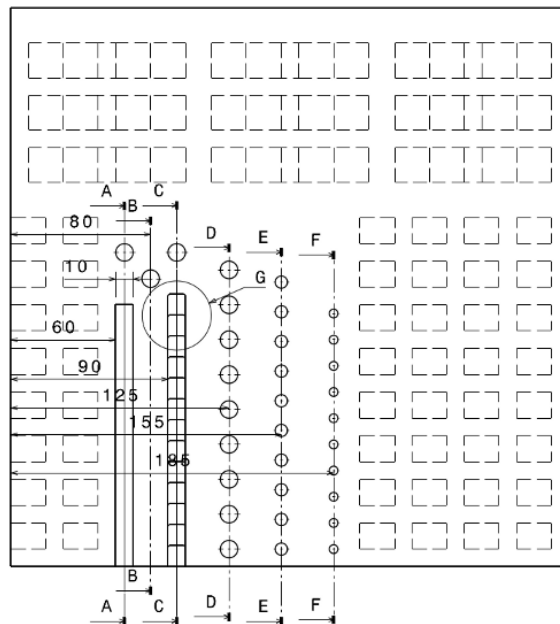


Abbildung A.7: Mechanische Bearbeitung: Positionierung Schnittebenen

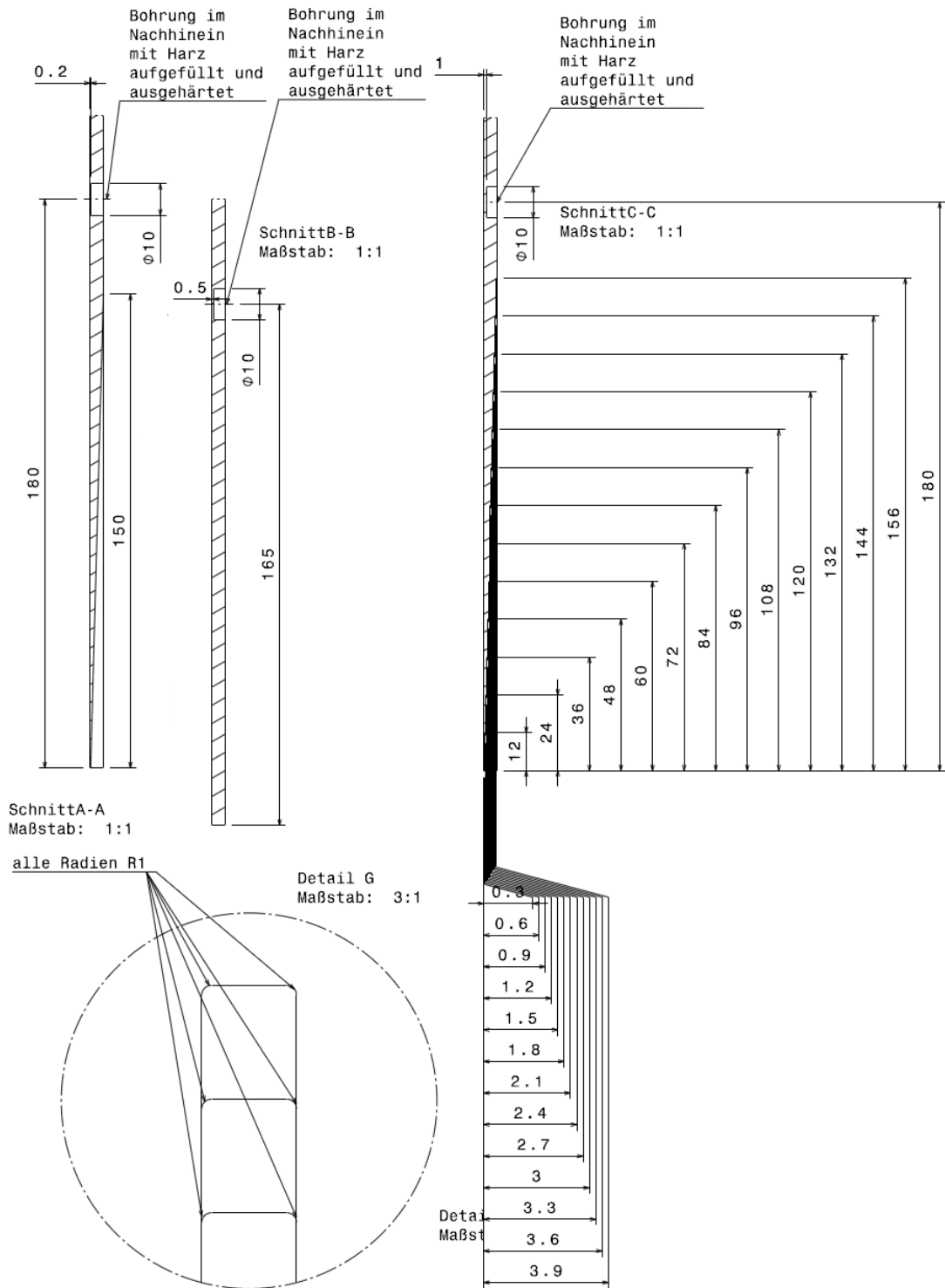


Abbildung A.8: Mechanische Bearbeitung: Schnitte I

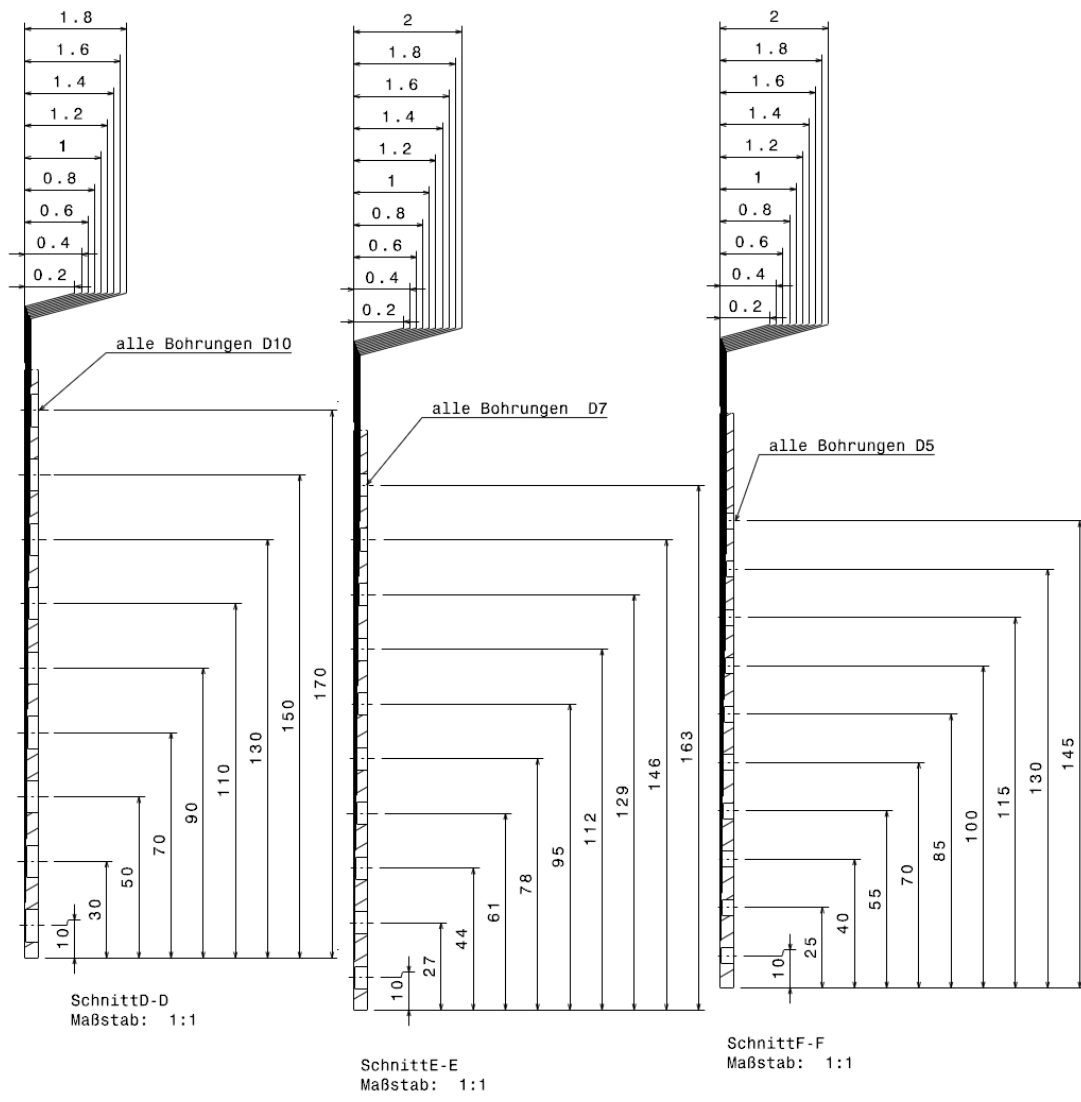


Abbildung A.9: Mechanische Bearbeitung: Schnitte II

A.3 Flussdiagramm zur Schadstellenbewertung

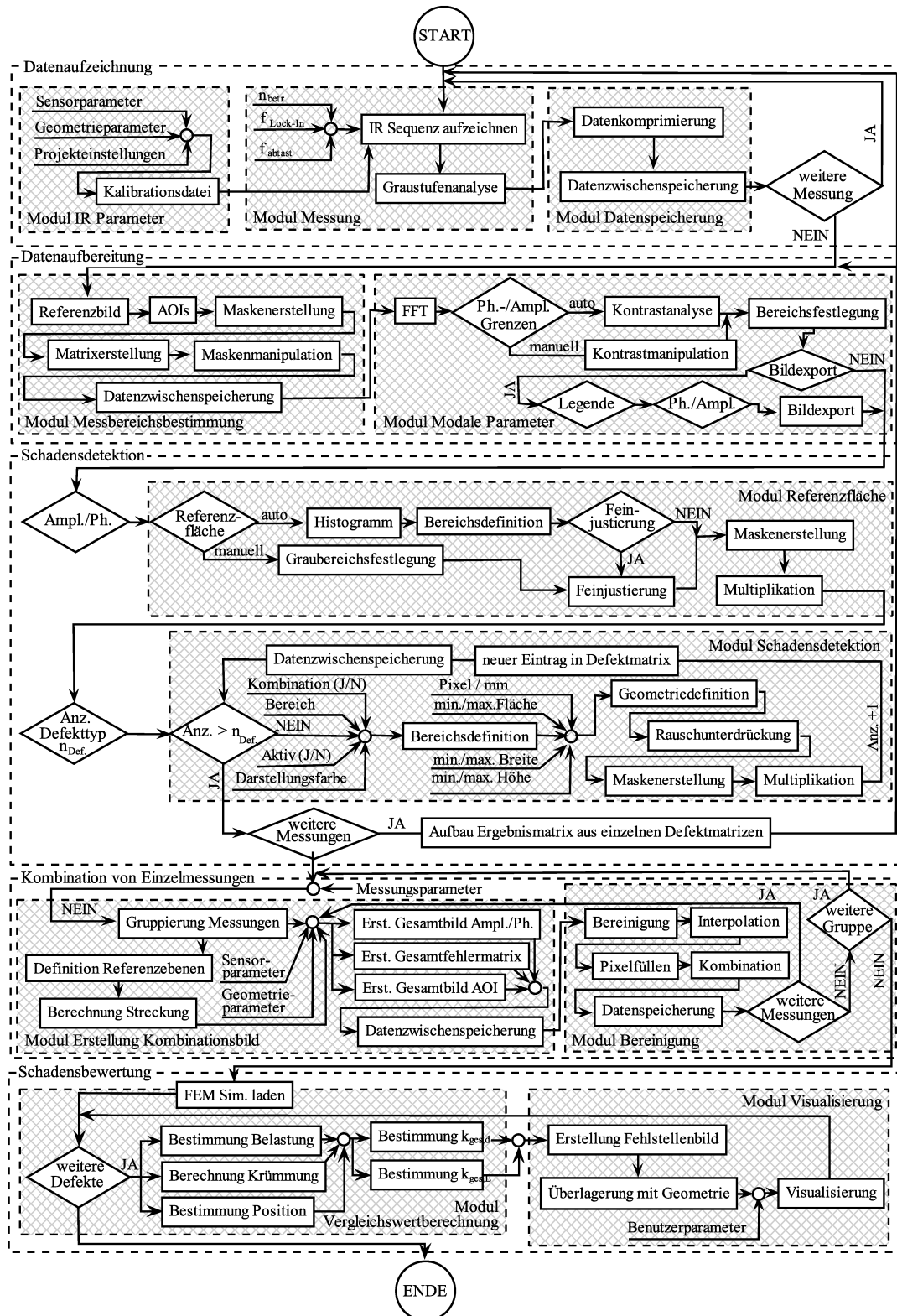


Abbildung A.10: Ausführliches Flussdiagramm des Softwarepakets zur Schadstellenbewertung