

# Induktions-Lockin-Thermografie - ein neues Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung

Von der Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von  
Dipl.-Ing. Gernot Riegert  
aus Nürtingen

Hauptberichter: Prof. Dr. rer. nat. habil. G. Busse  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. G. Mook  
Tag der mündlichen Prüfung: 29.03.2007

Institut für Kunststofftechnik  
der Universität Stuttgart  
2007



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde (IKP) – Abteilung Zerstörungsfreie Prüfung – der Universität Stuttgart im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projekts BU 624 / 23 „Untersuchungen zur wirbelstromangeregten Phasenwinkelthermografie“.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. G. Busse für seine freundschaftliche und konstruktive Unterstützung bei allen Problemen und für sein Vertrauen, auf das ich jederzeit zählen konnte. Seine Begeisterung und seine Ideen trugen wesentlich zum Erfolg dieser Arbeit bei.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. G. Mook der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg danke ich für die hilfreichen Diskussionen zum Thema Wirbelstrom und für die Übernahme des Mitberichtes.

Ich danke allen meinen Kollegen des IKP-ZfP deren Freundschaft und Hilfsbereitschaft eine entspannte und fruchtbare Atmosphäre erzeugte, in der das Leben und Arbeiten sehr viel Freude machte - ich werde unsere regelmäßigen Treffen auf der Galerie vermissen!

Natürlich spielten die Thermografen des IKP eine besonders wichtige Rolle für mich – ich danke ihnen und allen Diplomanden und Hiwis für die erfolgreiche Zusammenarbeit in diesem und vielen weiteren Projekten und Prüfaufträgen. Vielen Dank auch den „Althermografen“ Alexander Dillenz und Thomas Zweschper, die mich in die Geheimnisse der Lockin-Thermografie einführten und auch nach ihrer Zeit am IKP immer ein offenes Ohr für Probleme und Diskussionen hatten.

Ganz besonders danke ich meiner Frau Maria Jose Riegert-Escribano, ohne ihre Unterstützung und ihr Verständnis wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Eriskirch, im April 2007

Gernot Riegert



# Inhaltsverzeichnis

<b>Verwendete Symbole und Abkürzungen</b>	<b>V</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>IX</b>
<b>Abstract</b>	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Thermografische Prüfverfahren - Stand der Technik . . . . .	1
1.1.1 Optisch angeregte Lockin-Thermografie . . . . .	4
1.1.2 Ultraschallangeregte Lockin-Thermografie . . . . .	8
1.1.3 Thermoelastischer Effekt (SPATE) . . . . .	12
1.2 Weitere defektselektive Prüfverfahren . . . . .	13
1.2.1 Prüfmethode mit Kontrastmitteln . . . . .	13
1.2.2 Defektselektive Prüfmethode ohne zusätzliches Kontrastmittel .	14
1.3 Zielsetzung der Arbeit . . . . .	17
<b>2 Prinzip der Induktions-Lockin-Thermografie</b>	<b>19</b>
2.1 Wirbelstromangeregte Induktions-Lockin-Thermografie (ILT) . . . . .	19
2.2 Tiefenreichweiten der Lockin-Thermografie-Verfahren . . . . .	21
2.2.1 Tiefenreichweite der optisch angeregten Lockin-Thermografie . . .	23
2.2.2 Tiefenreichweite der ultraschallangeregten Lockin-Thermografie .	27
2.2.3 Tiefenreichweite der Induktions-Lockin-Thermografie . . . . .	29
<b>3 Konzept und Aufbau der ILT Anlage</b>	<b>47</b>
3.1 Messsystem: Lockin-Thermografie . . . . .	47
3.2 Anregungssystem: Induktions-Anlage . . . . .	49
3.2.1 Mittelfrequenz-Generator . . . . .	49
3.2.2 Oszillator . . . . .	50
3.2.3 Induktoren . . . . .	51
3.2.4 Kühler . . . . .	54

---

<b>4 Experimentelle Untersuchung zu Tiefenreichweite und Auflösung</b>	<b>55</b>
4.1 Einfluss elektrischer und thermischer Materialeigenschaften . . . . .	55
4.1.1 Messungen an Modellproben mit Sacklochbohrungen . . . . .	55
4.1.2 Besonderheiten bei Messungen an CFK . . . . .	61
4.2 Detektionsgrenzen der ILT . . . . .	65
4.2.1 Phasenkontrast einer Stahlprobe mit Einfräsungen . . . . .	65
4.2.2 Laterale Auflösung einer Stahlprobe mit Einfräsungen . . . . .	69
<b>5 Anwendungsbeispiele für ILT in der zerstörungsfreien Prüfung</b>	<b>71</b>
5.1 Metallische Bauteile . . . . .	71
5.1.1 Detektion oberflächennaher Risse . . . . .	71
5.1.2 Qualitätssicherung von Fügeverbindungen . . . . .	77
5.2 Kohlefaserverstärkter Kunststoff (CFK) . . . . .	82
5.2.1 Detektion von Impactschäden in CFK . . . . .	82
5.2.2 Detektion von Stringerschäden . . . . .	87
5.2.3 Inspektion adaptiver Strukturen . . . . .	89
5.3 Kohlefaserverstärkte Keramik (C/C-SiC) . . . . .	91
5.3.1 Detektion von Delaminationen in C/C-SiC . . . . .	92
5.4 Glare <sup>®</sup> . . . . .	93
5.4.1 Detektion von Delaminationen in Glare <sup>®</sup> . . . . .	94
<b>6 Diskussion und Ausblick</b>	<b>97</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>101</b>
<b>A Anhang</b>	<b>111</b>
A.1 Thermische Wellen . . . . .	111
A.2 Zur Tiefenreichweite der Optischen-Lockin-Thermografie . . . . .	112

# Verwendete Symbole und Abkürzungen

A		Amplitude
$A_s$	$[m^2]$	Spulenfläche
$\vec{B}$	$[T = V \cdot s/m^2]$	Magnetische Flussdichte
C	$[F = A \cdot s/V]$	Kapazität
$C_{ges}$	$[F = A \cdot s/V]$	Gesamtkapazität
$D_s$	$[m]$	Spulendurchmesser
$\vec{D}$	$[A \cdot s/m^2]$	Dielektrische Verschiebung
$\vec{E}$	$[V/m]$	Elektrische Feldstärke
$F_\omega$		Fouriertransformierte
$\vec{H}$	$[A/m]$	Magnetische Feldstärke
I	$[A]$	Stromstärke
$\vec{J}$	$[A/m^2]$	Elektrische Stromdichte
L	$[H = V \cdot s/A]$	Induktivität
$L_{ind}$	$[H = V \cdot s/A]$	Induktivität des Induktors
$L_{vor}$	$[H = V \cdot s/A]$	Induktivität der Vorspule
M	$[W \cdot m]$	Integrale Ausstrahlung
$M_{\lambda_s}$	$[W \cdot m]$	Wellenlängenabhängige Ausstrahlung
N		Windungszahl
$N_B$		Anzahl der aufgenommenen Bilder
$\vec{P}_J$	$[W]$	Joulesche Verluste
R		Reflexionskoeffizient
T	$[K]$	Temperatur
$T_0$	$[K]$	Oberflächentemperatur
$T_D$	$[K]$	Defekttemperatur
$W_k$	$[K \cdot m^2/W]$	Thermischer Kontaktwiderstand
Z	$[K \cdot m^2/W]$	Thermische Impedanz
c	$[J/kg \cdot K]$	Spezifische Wärmekapazität
$c_0$	$2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
d	$[m]$	Schichtdicke
f	$[Hz]$	Frequenz

$f_0$	[Hz]	Nullstelle im Frequenzspektrum
$h$	$6,626 \cdot 10^{-34} J \cdot s$	Plancksches Wirkungsquantum
$j$	[W/m <sup>2</sup> ]	Wärmestromdichte
$l$	[m]	Spulenlänge
$q$	[J]	Wärmequelle
$t$	[s]	Zeit
$z$	[m]	Defekttiefe
$\alpha$	[m <sup>2</sup> /s]	Temperaturleitfähigkeit
$\alpha_e$	[1/K]	Längenausdehnungskoeffizient
$\Delta t$	[s]	Zeitintervall
$\Delta T$	[K]	modulierte Temperaturamplitude
$\Delta \sigma_1$	[N/m <sup>2</sup> ]	Änderung einer Hauptspannung
$\delta_w$	[m]	Wirbelstromeindringtiefe
$\varepsilon$		Emissionskoeffizient
$\varepsilon_d$	[A · s/V · m]	Dielektrizitätskonstante
$\lambda$	[W/m · K]	Wärmeleitfähigkeit
$\lambda_s$	[m]	Wellenlänge der Strahlung
$\mu$	[m]	Thermische Eindringtiefe
$\mu_\beta$	[m]	Optische Eindringtiefe
$\mu_p$	[V · s/A · m]	Absolute Permeabilität
$\mu_r$	[V · s/A · m]	Relative Permeabilität
$\mu_0$	$4 \pi \cdot 10^{-7} V \cdot s/A \cdot m$	Permeabilitätskonstante
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte
$\sigma$	[m/Ω · mm <sup>2</sup> ]	Elektrische Leitfähigkeit
$\sigma_s$	[m/Ω · mm <sup>2</sup> ]	Spezifische elektr. Leitfähigkeit
$\sigma_B$	$5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m/K^4$	Stefan Boltzmann Konstante
$\tau$	[s]	Burstlänge
$\phi$	[Wb = T · m <sup>2</sup> ]	Magnetischer Fluss
$\varphi$	[rad]	Phasenwinkel
$\omega$	[Hz]	Kreisfrequenz
$\omega_w$	[Hz]	Wirbelstromkreisfrequenz

BPT Burst-Phasen-Thermografie

CCD Charge Coupled Device

C/C-SiC Kohlefaserverstärkte Siliziumkarbidkeramik

CFK Kohlefaserverstärkter Kunststoff

CFRP Carbon Fibre Reinforced Polymer



---

CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DFT	Diskrete Fourier Transformation
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DMS	Dehnmessstreifen
ESPI	Electronic Speckle Pattern Interferometry
FM	Frequenzmodulation
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
IBP	Induktions-Burst-Phasen Thermografie
IFB	Institut für Flugzeugbau
IR	Infrarot
IKP-ZfP	Institut für Kunststoffprüfung, Abt. Zerstörungsfreie Prüfung
ILT	Induktions-Lockin-Thermografie
MAG	Multiaxial Gelege
MCT	Mercury Cadmium Telluride
MW	Midwave
MWIR	Midwave Infrared
NDE	Non-destructive Evaluation
NETD	Noise Equivalent Temperature Difference
OLT	Optische-Lockin-Thermografie
POD	Probability of Defect Detection
PPT	Puls-Phasen-Thermografie
PT	Puls-Thermografie
PTFE	Polytetrafluorethylen (Teflon®)
S/N	Signal-Rausch Abstand
SPATE	Stress Pattern Analysis by Thermal Emission
SQUID	Superconducting Quantum Interference Device
UBP	Ultraschall-Burst-Phasen Thermografie
ULT	Ultraschall-Lockin-Thermografie
UD	Unidirektional
US	Ultraschall
UVA	Ultraviolett
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung



# Zusammenfassung

Die Qualitätssicherung von Bauteilen erfordert eine zuverlässige Defekterkennung (z.B. bei Inspektions- und Wartungsarbeiten), die jedoch durch die Anzeige intakter Bauteilstrukturen erschwert wird. Wenn selektiv nur Defekte auf die Anregung ansprechen, werden intakte Strukturen unterdrückt und somit die Wahrscheinlichkeit zur Defekterkennung („Probability of Defect Detection“ POD) erhöht. Die 1995 am IKP-ZfP entwickelte ultraschallangeregte Lockin-Thermografie (ULT) ist ein solches Verfahren, dessen Nachteil allerdings eine nicht kontaktfreie Anregung ist. Eine kontaktfreie und dennoch defektselektive Anregung ist die induktive Erwärmung durch Wirbelströme (Ohmsche Verluste). Die Wirbelströme erwärmen Defektstellen innerhalb der Wirbelstromeindringtiefe lokal stärker als ungeschädigte Bauteilbereiche.

Stand der bisherigen Technik ist die Transienten-Thermografie mit pulsartiger Induktionsanregung. Bei ihr wird zur Auswertung das Bild des stärksten Kontrasts aus der aufgenommenen Abkühlungssequenz untersucht. Impulsangeregte Transienten-Thermografie hat den Vorteil einer kurzen Messzeit, allerdings sind die Ergebnisbilder durch inhomogene Erwärmung, wie sie bei induktiver Erwärmung häufig auftritt, und lokale Variation des Emissionskoeffizienten stark beeinflusst.

Durch Anwendung der Lockin-Thermografie Methode auf die induktive Erwärmung werden die Nachteile der Transienten-Thermografie überwunden („Induktions-Lockin-Thermografie“ ILT). Im Gegensatz zur Transienten-Thermografie werden bei ILT die Wirbelstromamplituden (Frequenz von 30 bis 300 kHz) sinusförmig moduliert (zwischen 0,01 und 1 Hz), ähnlich der Amplitude bei ultraschallangeregter Lockin-Thermografie, während eine Infrarotkamera eine Infrarotbildsequenz über mehrere Anregungsperioden aufnimmt. Eine pixelweise Fouriertransformation der Sequenz berechnet dann ein Amplituden- und ein Phasenbild.

Die Vorteile - speziell der Phasenbilder - sind dieselben wie bei den anderen Lockin-Thermografie Methoden: im Vergleich zu einzelnen Infrarotbildern haben die ILT-Phasenbilder ein erheblich verbessertes Signal/Rausch-Verhältnis, und Temperaturgradienten werden unterdrückt. Außerdem ist die Tiefenreichweite an metallischen Werkstoffen mit ILT (begrenzt durch die thermische Eindringtiefe) im Vergleich zur konventionellen Wirbelstromprüfung, die durch den „Skin Effekt“ begrenzt ist, deutlich gesteigert.

Am IKP-ZfP wurde im Rahmen eines DFG-Projekts eine ILT-Anlage konzipiert und auf-

gebaut. Sie wurde anschließend an verschiedenen Materialien und Fehlerarten erprobt und optimiert. Nach der theoretischen Herleitung der ILT-Tiefenreichweite wurde der tatsächliche Einfluss elektrischer und thermischer Materialeigenschaften auf die Tiefenreichweite an Modellproben untersucht. Eine weitere experimentelle Fragestellung war die Auflösungsgrenze von ILT bei der Defekterkennung. Neben der Inspektion von Modellproben wurde ILT auch zur Prüfung von Praxisbauteilen herangezogen. Die Palette der detektierten Fehlerarten ging von Oberflächenrissen (z.B. Ermüdungsrisse, Haarrisse) und Fügefehlern (z.B. Klebungen, Schweißungen) metallischer Bauteile bis zu Delaminationen und Impactschädigungen kohlefaserverstärkter Lamine, wie sie zunehmend in der Luft- und Raumfahrt relevant werden (z.B. CFK, C/C-SiC).

Die ILT-Ergebnisse wurden auch mit den Ergebnissen anderer am IKP-ZfP vorhandener moderner ZfP Verfahren verglichen. Dabei zeigte sich, dass ILT bei Defekten innerhalb der Wirbelstromeindringtiefe ähnlich defektselektive Ergebnisse liefert wie andere „Dunkelfeldmethoden“ (z.B. ultraschallangeregte Thermografie und nichtlineare Vibrometrie), jedoch mit dem großen Vorteil einer berührungslosen Anregung.

# Abstract

Reliable defect detection is needed for quality assurance (e.g. in inspection and maintenance) but the superposition of intact sample features with defects makes their identification difficult. Intact structures have to be suppressed in order to improve the probability of defect detection (POD), this is possible if only defects respond to the excitation. Ultrasound activated lockin-thermography, developed at IKP-ZfP of Stuttgart University in 1995, is such a defect selective measurement technique as the injected elastic waves are converted into heat mainly in areas with enhanced mechanical losses (e.g. cracks and delaminations). A drawback of this kind of thermography is that the ultrasound excitation requires mechanical contact with the inspected sample. It can be replaced by a coil which induces eddy currents in conductive materials. In this case the material heats up due to electrical losses, which are monitored by an infrared camera. Cracks in the sample within the eddy current penetration depth heat up more than homogeneous material due to locally enhanced eddy current density and/or increased resistive losses. Thus a remote method with defect selective properties is obtained.

Until now, the state of the art is transient thermography with inductive pulse excitation where only the image of highest contrast out of the cooling sequence is analysed. Inductive transient thermography has the advantage of a short measurement duration, but it has also major drawbacks, due to the inhomogeneous heating performed by the induction coil.

The disadvantages of transient thermography can be overcome by using the phase angle for imaging instead of temperature amplitudes ("Induction-Lockin-Thermography" ILT). In ILT the eddy current amplitudes (frequency about 30 to 300 kHz) are modulated at the lockin frequency which is typically around 0.01 - 1 Hz. Fourier analysis at the low frequency compresses the information content of the whole thermographic sequence into just one amplitude and one phase image where constant temperature gradients caused by inductive heating are eliminated and the signal-to-noise ratio is improved.

If defects in metals are deeper inside the sample than the eddy current penetration depth, they can still be detected by using the lockin-technique. The heat from the near surface area propagates into the sample by diffusion (thermal waves), like in optically activated thermography. This allows for a highly improved depth range of ILT (limited by the thermal penetration depth) as compared to conventional eddy current testing

that is limited by the "Skin Effect".

An ILT-system was designed and established at IKP-ZfP within a DFG-Project. The system was tested and optimised on different materials and kinds of defects. After theoretical considerations of the ILT depth range the actual influence of electrical and thermal material properties was investigated experimentally with different model samples. Another field of investigation was the resolution limit of ILT for defect detection. ILT was not only used on models but also for the inspection of real live samples. Defects like surface cracks (e.g. fatigue) and bonding defects (e.g. gluing, welding) in metals were detected as well as delaminations and impacts in aerospace relevant carbon fibre reinforced polymers and ceramics (CFRP and C/C-SiC).

The results of ILT were also compared to those of other modern NDE methods at the IKP-ZfP. These comparisons showed that, if the defects are within the eddy current penetration depth, the results of ILT have the same defect selective properties like those of other "dark field" methods (e.g. ultrasound activated thermography and non-linear vibrometry) but with the advantage of a remote excitation.

# 1 Einleitung

Moderne Werkstoffe in der Luft- und Raumfahrttechnik erfordern neue und effiziente zerstörungsfreie Prüfmethoden, da konventionelle Prüfungen bei den neuen Werkstoffen entweder nicht anwendbar oder zu langsam sind. Um Inspektions- und Wartungszeiten kurz zu halten, müssen möglichst große Flächen auf einmal geprüft werden. Neben kurzen Prüfzeiten ist außerdem eine zuverlässige und möglichst einfache Defekterkennung wünschenswert, also Inspektionsverfahren, die Defekte selektiv sichtbar machen und ungeschädigte Struktur unterdrücken. Diese Verfahren haben neben der erhöhten Defekterkennung noch den weiteren Vorteil, dass Defekte auch von nicht speziell qualifizierten Personen erkannt oder die Defekterkennung sogar automatisiert werden kann. Ein zerstörungsfreies Prüfverfahren, das die Forderung nach schneller Prüfung großer Flächen oder defektselektiver Ergebnisdarstellung erfüllt, ist die Lockin-Thermografie. Sie wird zum Teil schon in der industriellen Serienproduktion eingesetzt, hat aber immer noch Potential zur Weiterentwicklung, wie z.B. bei der Induktions-Lockin-Thermografie als neuem, völlig berührungslosem Inspektionsverfahren mit defektselektiven Eigenschaften.

## 1.1 Thermografische Prüfverfahren - Stand der Technik

Thermografische Methoden werden in passive und aktive Thermografieverfahren unterteilt (Abb. 1.1). Passiv bzw. aktiv bezieht sich dabei auf die thermische Anregung des zu untersuchenden Gegenstands. Ein typisches Beispiel einer passiven Thermografiemethode ist die Bauthermografie, bei der mit Hilfe einer Thermografiekamera Wärmebrücken im Mauerwerk sichtbar werden. Dabei wird die Mauer oder das Gebäude nicht zusätzlich erwärmt, sondern die Abstrahlung des Objekts selbst auf dem Bildschirm einer Infrarotkamera untersucht. Die erhaltenen Temperaturbilder stellen das Ergebnis dar. Obgleich - oder gerade weil - passive Thermografie sehr einfach ist, findet sie zunehmend Anwendung in der Industrie und im täglichen Leben. Relativ günstige ungekühlte Kameras werden heute schon in Flugzeugen zur Verbesserung der Nachtsicht eingesetzt und sollen auch bald in hochwertigen Kraftfahrzeugen die Fahrsicherheit erhöhen [1].

Für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung ist passive Thermografie jedoch nur sehr beschränkt einsetzbar, da die Prüfobjekte meistens keine Temperaturdifferenz zur Umge-

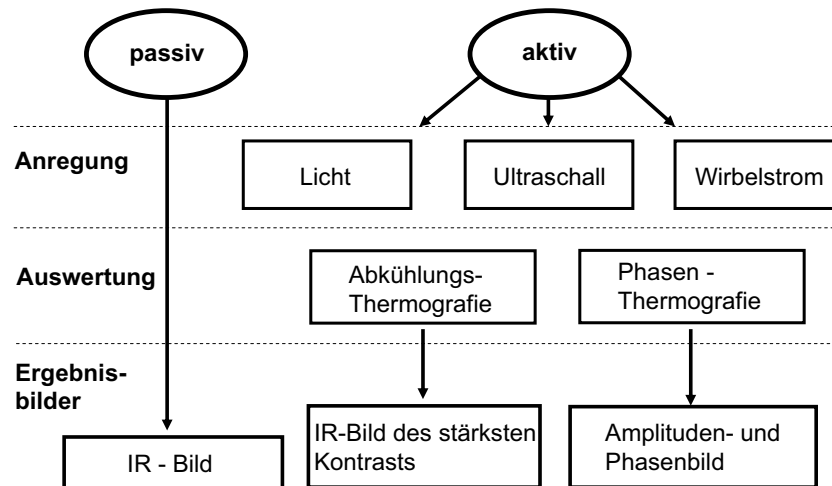


Abbildung 1.1: Einteilung der Thermografieverfahren nach Anregung und Auswertung.

nung aufweisen. Sie verhalten sich damit im Wärmebild neutral. Zur Sichtbarmachung von Fehlern, z.B. in der Wärmeleitung innerhalb einer Probe, muss erst ein Wärmefluss initiiert werden. Aktive Thermografieverfahren regen die zu untersuchenden Probekörper deshalb thermisch an und analysieren anschließend das thermische Antwortverhalten. Die Anregung kann optisch erfolgen, also mit Hilfe von Absorption optischer Energie auf der Oberfläche der Probe. Anregungsquellen hierfür sind z.B. Halogen- oder Blitzlampen. Neben der optischen Anregung ist auch eine Anregung durch elastische Wellen (Ultraschall) oder durch elektrische Verluste (Widerstandsheizung, Wirbelstrom) möglich. Neben der Anregungsart ist die Art der Datenauswertung ein weiteres Unterscheidungsmerkmal aktiver Thermografiemethoden. Bei Transienten-Thermografie (Abkühlungsthermografie) wird das Abkühlungsverhalten einer vorher erwärmten Probe analysiert [2, 3, 4]. Die Erwärmung kann über längere Zeit (z.B. in einem Ofen) oder pulsartig (z.B. mit einer Blitzlampe) erfolgen. Mit dem Wärmepuls wird zunächst eine Wärmefront erzeugt, die durch Diffusion in das Bauteil hinein läuft. Defekte behindern die Diffusion, es kommt zu einem lokalen Wärmestau, der sich auch auf die lokale Oberflächentemperatur über dem Defekt auswirkt. In Transmissionsanordnung (also die Blitzlampe auf der Rückseite und die Thermografiekamera auf der Vorderseite des Prüfobjekts) wurde von Parker et al. [5] eine Methode zur Messung der Temperaturleitfähigkeit  $\alpha$  vorgeschlagen, in der die Zeit  $t_{1/2}$  bis zum Erreichen des halben Wertes der maximalen Temperaturüberhöhung an der Bauteiloberfläche gemessen wird. Sie ist in erster Näherung vom Quadrat der Bauteildicke  $l$  abhängig [5]:

$$t_{1/2} = \frac{1,38 \cdot l^2}{\pi^2 \cdot \alpha}, \quad (1.1)$$

wobei  $\alpha$  die Temperaturleitfähigkeit des Materials ist [6]:



$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}, \quad (1.2)$$

mit der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , der Dichte  $\rho$  und der spezifischen Wärmekapazität  $c$ . Beim dynamischen Wärmetransport ist also die Temperaturleitfähigkeit der relevante Parameter, bei konstantem Wärmefluss hingegen die Wärmeleitfähigkeit, weil Speichereffekte entfallen, die durch die spezifische Wärme pro Volumen repräsentiert sind.

Eine Infrarotkamera nimmt die Abkühlungskurve an der Oberfläche der Probe nach dem Anregungspuls auf. An defekten Bauteilbereichen hat diese Abkühlungskurve Auffälligkeiten [7]. Durch geeignete Algorithmen ist das Abkühlungsverhalten ungeschädigter Strukturen mit dem über Defektbereichen vergleich- und darstellbar [8]. Eine andere Möglichkeit ist die Darstellung des Infrarotbildes des stärksten Kontrasts nach einer Elimination des Emissionskoeffizienten  $\varepsilon$  durch Hintergrundsubtraktion oder Gradientenbildung z.B. mit dem Wärmebild der Probe vor der Anregung. Die Puls- oder Transiententhermografie ist auf das Auffinden oberflächennaher Defekte beschränkt, da der Kontrast und das Signal-Rausch Verhältnis der Ergebnisbilder nur gering sind. Durch das direkte Auswerten der Infrarotbilder bei der Abkühlungsthermografie wird das Ergebnis außerdem stark von äußeren Gegebenheiten beeinflusst. Eine Infrarotkamera nimmt die integrale Abstrahlung  $M$  („Stephan-Boltzmann-Gesetz“) eines Körpers - idealerweise im ganzen Spektralbereich - auf. Sie kann über Integration des Planckschen Strahlungsgesetzes berechnet werden:

$$M = \varepsilon \int_0^{\infty} M_{\lambda_s} d\lambda_s = \varepsilon \int_0^{\infty} \frac{2\pi \cdot c_0^2 \cdot h}{\lambda_s^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c_0}{\sigma \cdot T \cdot \lambda_s}} - 1} d\lambda_s = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4. \quad (1.3)$$

(Plancksches Wirkungsquantum  $h$ , Lichtgeschwindigkeit  $c_0$  im Vakuum, Wellenlänge der Strahlung  $\lambda_s$ , Boltzmann-Konstante  $\sigma_B$ , Emissionskoeffizient  $\varepsilon$  und Temperatur  $T$ ). Nach diesem Gesetz stellen Infrarotbilder der Thermografiekamera die absolute Temperatur des Bauteils in der vierten Potenz dar, aber gewichtet mit dem lokalen Emissionskoeffizienten  $\varepsilon$ . Lokale Inhomogenitäten im Emissionskoeffizienten, wie sie in der Realität häufig vorkommen, sind also auch im Infrarotbild sichtbar und können damit die Fehlererkennung erschweren. Probleme kann auch eine inhomogene Ausleuchtung bereiten, da dies lokale Temperaturunterschiede auf der Bauteiloberfläche erzeugt.

Die Nachteile der Abkühlungsthermografie werden bei der Phasenthermografie (Lockin-Thermografie) durch Auswertung von Phasenwinkeln an Stelle der Temperaturamplituden vermieden. Die Phasen-Thermografie basiert auf der Analyse thermischer Wellen, die das Ausbreitungsverhalten periodischer Temperaturveränderungen beschreiben. Das zu inspizierende Bauteil wird mit einer der genannten Anregungsquellen (optisch, Ultraschall, Wirbelstrom) entweder moduliert oder puls-/burstförmig angeregt. Die daraus

resultierende Modulation der Infrarotemission ist berührungslos nachweisbar und wird bezüglich Amplitude und Phase analysiert.

### 1.1.1 Optisch angeregte Lockin-Thermografie

#### Optische-Lockin-Thermografie (OLT)

Ångström stellte 1863 einen Versuchsaufbau zur Messung der Temperaturleitfähigkeit von Metallen durch Phasenwinkel vor [9]: Er brachte durch heißen Dampf und kaltes Wasser einen modulierten Wärmefluss auf ein Ende des zu prüfenden Materials und bestimmte dann die Phasenverschiebung der Wärmewelle [10] mit Hilfe zweier Thermometer. Ein Nachteil dieser Methode war, dass sowohl die Anregung, als auch die Detektion berührend erfolgten. Die ersten „photothermischen Radiometrie-Messungen“, die völlig berührungslos arbeiten, wurden 1979 beschrieben (Abb. 1.2) und zur Werkstoffuntersuchung eingesetzt [11]. Die Probe wurde rasterförmig unter einem durch einen Chopper modulierten Laserstrahl verschoben, gleichzeitig scannte ein einziges Photodetektorelement die lokale thermische Abstrahlung des Anregungspunkts. Auf diese Weise waren mit Hilfe eines X/Y-Schreibers und eines Lockin-Verstärkers Amplituden- und Phasenbilder der Probe darstellbar.

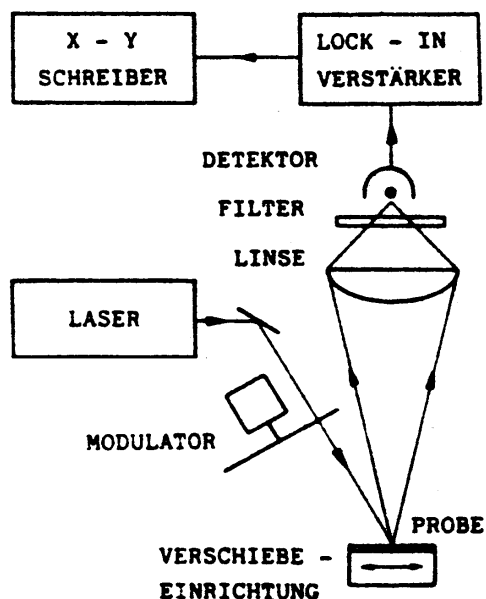


Abbildung 1.2: Aufbau der Photothermischen Radiometrie [11].

Ein Nachteil der aus nacheinander durchgeführten Punktmessungen aufgebauten Rasterbilder ist ihr hoher Zeitaufwand. Dies trifft vor allem bei den für eine hohe Tiefenreichweite (abhängig vom Material) verwendeten tiefen Modulationsfrequenzen zu. Es wurde daraufhin eine Multiplexvariante<sup>1</sup> dieser Photothermischen Radiometrie entwickelt - die

<sup>1</sup>Eine Messmethode, bei der mehrere Messpunkte gleichzeitig erfasst werden

Lockin-Thermografie [12, 13, 14, 15, 16]. Hierfür wurden anfangs Infrarot-Kameras mit einem einzelnen scannenden Infrarot-Detektor verwendet. Heutiger Stand der Technik sind Detektor Arrays (Focal Plane Array Kameras) die aus z.B.  $640 * 512$  Detektorelementen bestehen, wobei jedes Element jeweils einen Bildpunkt ergibt. Da mit diesen Kameras das langwierige Scannen der Probenoberfläche entfällt, ließ sich die Messzeit der Untersuchungen - auch bei tiefen Modulationsfrequenzen - deutlich verkürzen. Die Lockin-Auswertung erfolgte dabei nicht mehr durch spezielle Lockin-Verstärker, sondern über computergestützte Algorithmen [17] und mit Zunahme der Rechnerleistung durch eine Fouriertransformation über alle Bildpixel des Temperaturbildstapels, wobei die Lockin-Funktion an jedem Pixel simuliert wird und damit der Lockin-Thermografie den Namen gibt.

Zur Anregung des Bauteils sind an Stelle eines punktförmigen Lasers, der nur einen sehr kleinen Bereich anregt, auch intensitätsmodulierte Halogenlampen einsetzbar (Abb. 1.3).

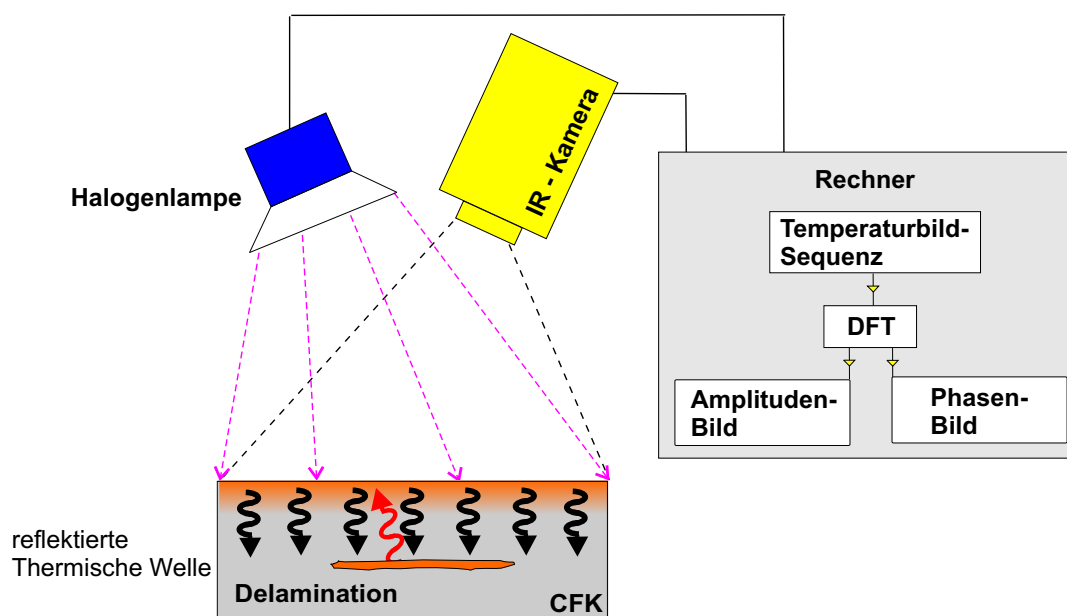


Abbildung 1.3: Schematischer Aufbau der Optischen-Lockin-Thermografie.

Damit ist es möglich, auch großflächige Bauteile in kurzer Zeit zu untersuchen. Die Modulation der Halogenlampen (Lockin-Frequenz) erzeugt mittels Absorption auf der ganzen Probenoberfläche thermische Wellen, die sich durch Wärmediffusion ins Innere ausbreiten. An thermischen Grenzflächen werden die thermischen Wellen zur Oberfläche reflektiert, wo sie sich mit der Anregung überlagern. Die gleichzeitig von einer IR-Kamera über mehrere Anregungsperioden aufgenommene Bildsequenz wird bei der Lockin-Frequenz fouriertransformiert („Diskrete Fourier Transformation“ DFT), das Ergebnis ist ein Amplituden- und ein Phasenbild.

Die im Rauschen verborgene Information wird aus der gesamten frequenzcodierten Se-

quenz durch Fourieranalyse extrahiert, nichtmodulierte Störungen (z.B. Spiegelungen) werden unterdrückt. Zudem erfolgt bei der Phasenwinkelberechnung eine interne Normierung durch Quotientenbildung von Real- und Imaginärteil (Gl. 2.6), so dass im Phasenbild, das nur die lokale normierte Verzögerung des Wärmetransports darstellt, Inhomogenitäten der Leistungszufuhr und im Emissionskoeffizienten erfolgreich unterdrückt werden. Phasenbilder sind somit prinzipiell viel homogener als Amplitudenbilder. Ein weiterer Vorteil von Phasenbildern ist ihre erhöhte Tiefenreichweite im Vergleich zu Amplitudenbildern. Bei bekannten thermischen Eigenschaften des untersuchten Materials ist auch eine Aussage über die Tiefenlage der verborgenen Grenzflächen möglich [18].

Phasenbilder der Optischen-Lockin-Thermografie zeigen die thermische Struktur eines Bauteils, da die Wärmewellen innerhalb der thermischen Eindringtiefe z.B. auch von der Probenrückseite reflektiert werden. Damit ist OLT empfindlich für Dickenänderungen. Die überlagerte Abbildung der eventuell komplizierten intakten thermischen Bauteilstruktur kann allerdings das Auffinden von Defekten erschweren.

### **Optische Puls-Phasen-Thermografie (PPT)**

Ein Nachteil der Optischen-Lockin-Thermografie ist, dass sie bei niedrigen Lockin-Frequenzen relativ zeitaufwändig ist (z.B. dauert eine Messung bei 0,01 Hz mit zwei Einschwingperioden und vier Messperioden zehn Minuten). Wenn die Probe zur Tiefenaufklärung der Schadstelle bei verschiedenen Lockin-Frequenzen gemessen werden soll, sind weitere Messungen mit den jeweiligen Einzelfrequenzen notwendig, was den Zeitaufwand zusätzlich erhöht. Da aber, z.B. in der industriellen Anwendung, die Messdauer eine entscheidende Rolle spielt, wurde neben der Lockin-Thermografie mit periodischer Anregung auch die Puls-Phasen-Thermografie [19] oder Burst-Phasen-Thermografie (BPT) [20] entwickelt. Bei letzter wird ein Rechteckburst zur Bauteilanregung verwendet und anschließend die Abkühlungssequenz bei einer Auswertefrequenz fouriertransformiert. Diese Methode ist das Bindeglied zwischen Pulsthermografie (PT), die ohne Phasenauswertung durchgeführt wird, und der oben beschriebenen Optischen-Lockin-Thermografie. Die PT verwendet meistens die Informationen aus dem Einzelbild des stärksten Kontrasts der Infrarotbildsequenz, während die PPT und BPT die Informationen aller Bilder aus dem Infrarotbildstapel ausnützt. Details, die im Einzelbild z.B. durch das Messrauschen verborgen sind, können durch die gewichtete Mittelung der Fouriertransformation über alle Bilder und den dadurch verbesserten Signal-Rausch-Abstand sichtbar gemacht werden.

Neben den Vorteilen der Phasenbilder sind weitere Vorteile von PPT und BPT eine geringe thermische Belastung des Bauteils und die Möglichkeit einer Phasenauswertung bei verschiedenen Lockin-Frequenzen, da der Rechteck-Anregungsimpuls ein Frequenzspek-

trum zur Phasenauswertung enthält. Bei PPT oder BPT ersetzt also eine einzige Mehrfrequenzmessung eine Folge von Einzelfrequenzmessungen („Thermische Tomografie“). Die Fouriertransformation eines Bursts der Länge  $\tau$  (welcher einer Rechteckfunktion entspricht) erzeugt eine Sinc-Funktion<sup>2</sup> im Frequenzspektrum (Abb. 1.4):

$$F(\omega) = \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} e^{-i\omega t} dt = \tau \operatorname{sinc}\left(\frac{\omega \tau}{2}\right), \quad (1.4)$$

wobei die Länge des Bursts  $\tau$  die Energieverteilung im Spektrum bestimmt. Bei den verwendeten niedrigen Lockin-Frequenzen geht bei Pulsanregung mit kurzer Anregungsdauer (z.B. mit Blitzlampen) der größte Teil der Anregungsenergie für die Phasenauswertung verloren, da in diesem Fall die eingebrachten Energien im Fourier-Frequenzspektrum bei höheren Frequenzen konzentriert werden. Es ist also vorteilhaft, einen in der Länge einstellbaren Burst zu haben. Ein langer Burst konzentriert die Energieverteilung auf niedrigere Frequenzen, und erhöht so die eingebrachte Energie im unteren Frequenzbereich der Lockin-Frequenzen (z.B. 0,01 bis 1 Hz) (Abb. 1.4), was sich positiv auf das Signal-Rausch Verhältnis auswirkt. Zur Beschränkung der Eindringtiefe und zur Erhöhung der Defektauflösung, wie z.B. bei der Prüfung dünner Schichten, werden dagegen höhere Lockin-Frequenzen (ca. 1 bis 10 Hz) und somit kürzere Bursts benötigt.

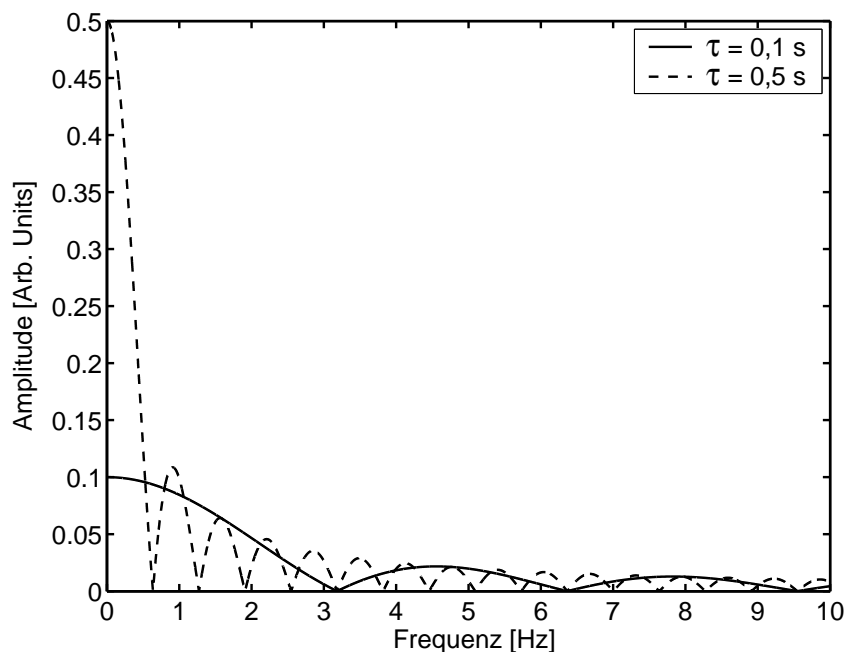


Abbildung 1.4: Frequenzspektren nach Fouriertransformationen eines kurzen Bursts mit  $\tau = 0,1$  s und eines längeren Bursts mit  $\tau = 0,5$  s.

<sup>2</sup> $\operatorname{sinc}(x) = \sin(x)/x$

Ein großer Vorteil von PPT und BPT gegenüber der Pulsthermografie ohne Phasenauswertung ist die Unempfindlichkeit der Ergebnisphasenbilder gegen Störungen (wie Reflexionen oder inhomogene Erwärmung), dies macht das Beispiel einer PPT Inspektion an einem lackierten Blech mit Korrosionsstellen deutlich (Abb. 1.5). Während optisch auf der Oberfläche der Lackschichten (Korrosionsschutz- und Klarlack) keine Auffälligkeiten erkennbar sind (z.B. Blasenbildung), zeigt die PPT unter den Lackschichten Korrosionsstellen auch schon in ihrem Frühstadium, da sie eine thermische Grenzfläche erzeugen (Abb. 1.5). Im Temperaturbild aus der Temperaturbildsequenz (Abb. 1.5, links) sind dem Ergebnis jedoch Spiegelungen überlagert (z.B. die Infrarotkamera mit ihrem gekühlten Detektor, erkennbar als schwarzer Punkt). Im Phasenbild sind diese Störungen vollständig unterdrückt (Abb. 1.5, rechts). Neben den Korrosionsstellen (helle Punkte) sind im Phasenbild außerdem auch Schichtdickenvariationen erkennbar (dunkler horizontaler Streifen). Nach Kalibrierung ist somit auch eine schnelle und berührungslose Lackdickenmessung möglich [21].

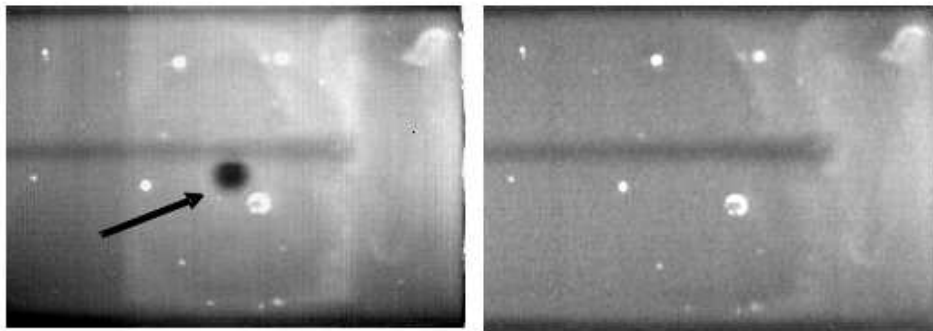


Abbildung 1.5: Thermografie an Modellprobe mit Korrosion unter Lackschichten. Links: optisches Bild. Rechts: PPT Phasenbild bei 1 Hz. [22]

### 1.1.2 Ultraschallangeregte Lockin-Thermografie

Der Nachteil optisch angeregter Lockin-Thermografie besteht darin, dass innerhalb der thermischen Eindringtiefe nicht nur Defektstellen, sondern z.B. auch die Rückseite des Bauteils die von der Bauteiloberfläche ausgesendeten thermischen Wellen reflektieren. Es werden also nicht nur die besonders interessanten geschädigten Bauteilbereiche dargestellt, sondern auch die innerhalb der Reichweite liegenden ungeschädigten Strukturen. Die Überlagerung beider erschwert die Defekterkennung. Eine Anregungsquelle, die nur die Schäden erwärmt, ist vorzuziehen. Dies lässt sich durch Ausnutzung der mechanischen Hysterese bestimmter Fehlerarten wie kraftschlüssigen Rissen oder Delaminationen erreichen. Eine Anregung mit elastischen Wellen erzeugt in solchen Fehlerbereichen eine Temperaturerhöhung z.B. aufgrund von Reibung, also der irreversiblen Umsetzung von

mechanischer Energie in Wärme (darstellbar durch die von der Hysteresekurve umschlossenen Fläche). Die dabei erzeugte Wärmemenge pro Volumen und Zeit ist zur Anzahl der pro Zeit durchlaufenen Hysteresesyklen proportional. Daher sollten pro Zeiteinheit möglichst viele Durchgänge der Hystereseschleife - also eine hohe Frequenz der mechanischen Wellen - erfolgen. Dies führte zur Idee der ultraschallangeregten Thermografie [23, 24]. Henneke et al. schlug 1979 [23] eine resonante Bauteilanregung vor, die stellenweise auch heute noch angewendet wird, um die eingebrachte Energie zu maximieren. Der Nachteil der resonanten Anregung ist aber, dass sich ein Stehwellenfeld ausbildet, das auch im Infrarotbild sichtbar ist. Defekte, die sich in Schwingungsknoten befinden, werden nicht angeregt und können deshalb nicht detektiert werden.

Bei Einkopplung mechanischer Wellen in das Bauteil kommt es neben der Hysterese auch zum „thermoelastischen Effekt“, der zur thermoelastischen Spannungsanalyse nutzbar ist („**S**tress **P**attern **A**nalysis by **T**hermal **E**mission“ SPATE) [25].

### **Ultraschall-Lockin-Thermografie (ULT)**

Ähnlich wie bei der optisch angeregten Thermografie lässt sich auch die ultraschallangeregte Thermografie über ihre Anregungs- und Auswertart unterscheiden. Bei der Ultraschall-Puls-Thermografie wird das Bauteil mit einem kurzen Ultraschallpuls beaufschlagt, anschließend mit einer Infrarotkamera eine Temperaturbildsequenz aufgenommen und das Abkühlungsverhalten analysiert [23, 24, 26]. In Analogie zur optischen Pulsthermografie ist das Bild des stärksten Kontrasts (mit weiterer Quotientenbildung oder Hintergrundsubtraktion) das primäre Ergebnisbild zur Auswertung. Diese Auswertemethode hat neben den bereits bei der optischen Abkühlungsthermografie beschriebenen Einschränkungen den zusätzlichen Nachteil, dass sich die lokal erzeugte Wärme diffusionsartig ausbreitet und damit die Ortsauflösung und Tiefeninformation weitgehend verloren gehen.

Es liegt also nahe, die Wärmeerzeugung wie bei der optischen Anregung zu modulieren, um die Vorzüge der Lockin-Technik zu nutzen. Die Amplitude des verwendeten Ultraschalls wird deshalb mit einer niedrigeren Lockin-Frequenz moduliert (Abb. 1.6). Bei dieser „ultraschallangeregten Lockin-Thermografie“ werden also die lokalen Wärmequellen periodisch an- und ausgeschaltet, sie sind somit Sender thermischer Wellen, die mit Lockin-Technik tiefenaufgelöst nachweisbar sind [27, 28].

Da sich ausschließlich Defektbereiche erwärmen und nur diese zum Ergebnisbild beitragen, wird die Wahrscheinlichkeit der Fehlererkennung („**P**robability **O**f **D**efect **D**etection“ POD) gegenüber der OLT, stark erhöht. Ultraschall-Lockin-Thermografie ist eine defektselektive („Dunkelfeld-“) Methode, bei der auch eine automatisierte Inspektion durch Festlegung und Überwachung eines Grenzphasenwinkels möglich ist. Verglichen mit OLT hat ultraschallangeregte Thermografie außerdem eine etwa doppelt so große

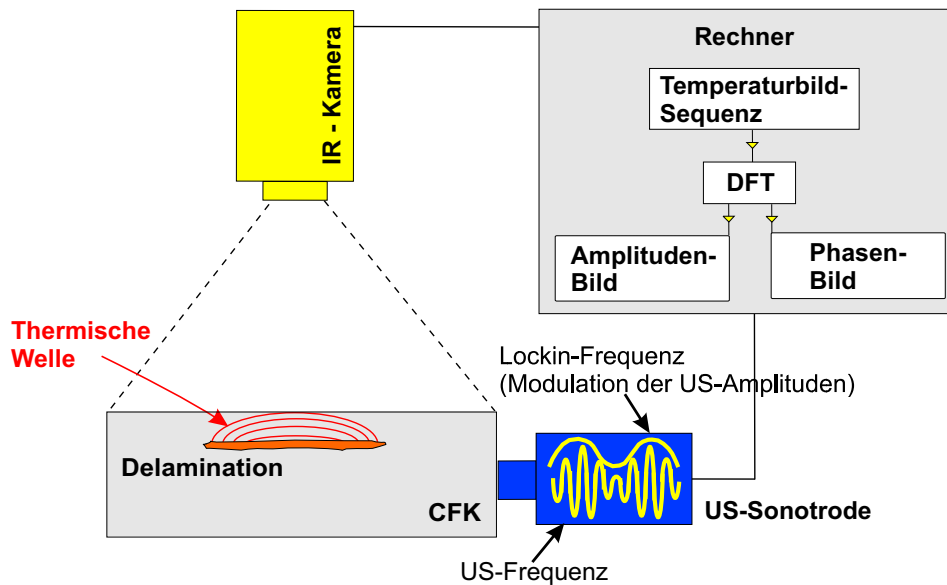


Abbildung 1.6: Schematischer Aufbau der Ultraschall-Lockin-Thermografie.

Tiefenreichweite zur Defekterkennung, da die Wärme im Bauteil am Defekt selbst entsteht und so nur den halben Weg zurück legt (Abschnitt 2.2.2).

Ein Nachteil der ultraschallangeregten Thermografie ist, dass sie nicht berührungsfrei arbeitet, da die Aktuatoren zur Anregung der elastischen Wellen fest an das Bauteil angekoppelt werden müssen.

### Ultraschallangeregte Burst-Phasen-Thermografie (UBP)

Wie bei der Optischen-Lockin-Thermografie wurde auch bei ultraschallangeregter Thermografie eine Burst-Phasen Methode entwickelt, die die Vorteile der schnellen Puls-/Burst-Messung in Kombination mit einer Phasenauswertung nutzt (Abb. 1.7) [20, 29, 30]. Bei der UBP besteht die Anregung aus einem Ultraschall Burst von einigen Hundertstelsekunden bis zu wenigen Sekunden, der in das Bauteil durch mechanisches Ankoppeln des Ultraschallgebers eingeleitet wird.

Das defektselektive Phasenbild einer Keramiktasse mit Riss (Abb. 1.7, rechts) zeigt die Vorteile der Ultraschall-Burst-Phasen Thermografie gegenüber der Ultraschall-Transienten Thermografie: Das Einzelbild, das aus der Abkühlungssequenz nach dem Ultraschall-Anregungsburst an der geprüften Keramiktasse stammt (Abb. 1.7, links), zeigt nur Spiegelungen (z.B. Kamera und Lampe), der Defekt ist nicht sichtbar. Das Phasenbild (Abb. 1.7, rechts), das durch Fouriertransformation derselben Abkühlungssequenz berechnet wurde, unterdrückt diese Störeinflüsse und zeigt nur den Riss.



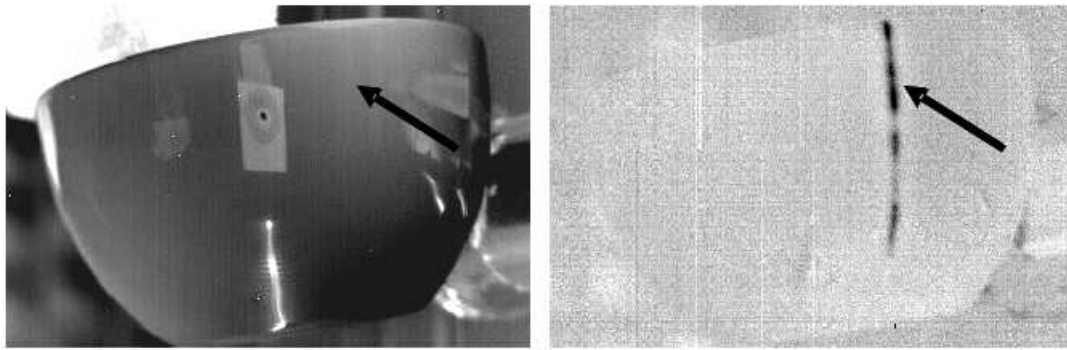


Abbildung 1.7: Keramiktasse mit Riss, angeregt durch einen Ultraschallburst.  
Links: Einzelbild aus der Abkühlungssequenz. Rechts: UBP-Phasenbild.

### Ultraschallangeregte Lockin-Thermografie mit Frequenzmodulation

Ein Problem der ultraschallangeregten Thermografie mit monofrequenter Anregung ist das stehende Wellenfeld, welches in Bauteilen aufgrund von Resonanzen auftreten kann. In Intensitätsmaxima dieser stehenden Welle besteht eine gute Detektionsempfindlichkeit, da die Anregungsamplitude hoch ist. Die Schwingungsknoten liefern dagegen kein Signal, da nur eine sehr geringe Anregungsamplitude vorhanden ist. Befindet sich ein Defekt im Bereich eines solchen Schwingungsknotens, ist er also nicht detektierbar. Ein weiteres Problem ist, dass die Schwingungsbäuche selbst ein Signal durch erhöhte hysteretische Verluste erzeugen, deren Struktur auch im Phasenbild sichtbar ist und damit die Fehlererkennung erschwert. Das Phasenbild einer mit „konventioneller“ ULT (also mit monofrequenter 20 kHz Ultraschallanregung) geprüften Landeklappe zeigt ein ausgeprägtes stehendes Wellenfeld (Abb. 1.8, oben).

Diese Probleme der monofrequenten Ultraschallanregung lassen sich durch eine Frequenzmodulation der elastischen Anregungswellen vermindern [31]. Dabei durchläuft die Anregungsfrequenz (Ultraschallfrequenz) eine bestimmte Bandbreite (z.B. 15... 25 kHz) mit einer Modulationsfrequenz von wenigen Hertz. Es bildet sich ein stehendes Wellenfeld, dem laufende Wellen überlagert werden. Damit ist das Schallfeld diffus. Die unempfindlichen Schwingungsknoten und die störenden Signale der Schwingungsbäuche werden erfolgreich reduziert. Im Phasenbild der so geprüften Landeklappe ist der Stringerbruch klar zu erkennen (Abb. 1.8, unten).

Die Frequenzmodulation der elastischen Wellen ist sowohl bei der amplitudenmodulierten Ultraschall-Lockin-Thermografie als auch bei der Ultraschall-Burst-Phasen Thermografie anwendbar.

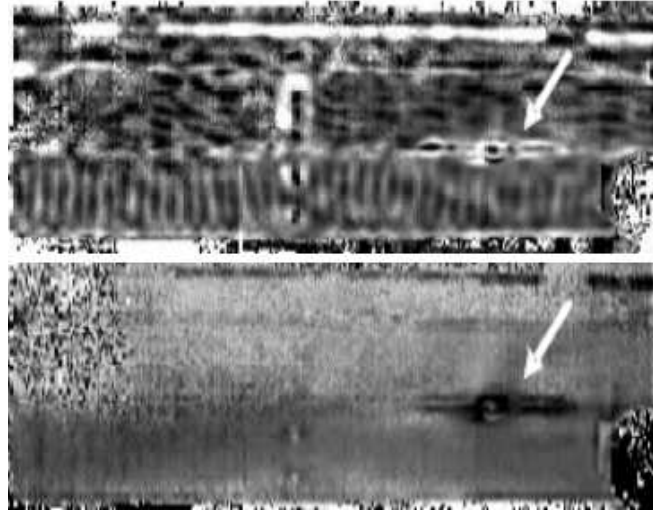


Abbildung 1.8: CFK Landeklappe mit gebrochenem Stringer. Oben: ULT-Phasenbild mit monofrequenter Ultraschall (20 kHz). Unten: ULT-Phasenbild mit frequenzmodulierter Ultraschallfrequenz (15 - 25 kHz) [31]. (Probe von Airbus-Deutschland Bremen)

### 1.1.3 Thermoelastischer Effekt (SPATE)

Bei mechanischer Belastung eines Bauteils (z.B. durch Zug und Druck, oder durch Einkoppeln von Leistungultraschall) werden neben der Temperaturänderung durch mechanische Hysterese auch Temperaturänderungen durch den thermoelastischen Effekt verursacht, beide Effekte überlagern sich [32]. Der thermoelastische Effekt wurde erstmals von Wilhelm Weber 1830 beschrieben [25]. Ihm fiel auf, dass eine Stahlsaite sich abkühlt, wenn sie gespannt wird. Es gibt also einen Zusammenhang zwischen den Spannungsänderungen in einem Bauteil (nämlich der Änderung der Summe der angelegten Hauptspannungen, also die Spur des Spannungstensors, welcher durch das Hookesche Gesetz mit dem Verformungstensor verknüpft ist) und dessen Temperaturänderung  $\Delta T$  [33]. Die Temperaturänderung ist bei Annahme eines linearen Zusammenhangs unter adiabaten Bedingungen

$$\Delta T = -\alpha_e \cdot T_0 \cdot (\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2). \quad (1.5)$$

Ein Bauteil mit der Durchschnittstemperatur  $T_0$  und einem positiven Längenausdehnungskoeffizienten  $\alpha_e$  kühlt sich bei Dehnung ab und erwärmt sich bei Kompression, es zeigt also ein thermisches Verhalten wie ein Gas.

**Dehn-Mess-Streifen (DMS)** eignen sich zur Spannungsmessung an Bauteilen. Der Nachteil dieser Methode ist jedoch, dass sie nur lokale Spannungsänderungen liefert, da die DMS auf diskrete Stellen der Bauteiloberfläche aufgeklebt werden. Durch Ausnutzen des

thermoelastischen Effekts ist dagegen die Spannungsverteilung auf der gesamten Bauteiloberfläche berührungslos messbar. Bei dieser Messmethode (SPATE) [34, 35] wird die Probe zyklisch belastet und die daraus resultierenden sehr kleinen Temperaturschwankungen mit Hilfe eines Infrarotdetektors aufgezeichnet. Bei der Auswertung wird zur Verbesserung des Signal/Rausch-Verhältnisses die Lockin-Technik angewendet. Das Ergebnisbild zeigt die farbcodierten Spannungen an der Oberfläche der Probe. Während also ultraschallangeregte Lockin-Thermografie die Temperaturerhöhung durch hysteretische Umsetzung von mechanischer Energie in Wärme zur Defekterkennung ausnutzt, verwendet die SPATE-Technik die reversiblen Temperaturschwankungen, die durch die Änderungen der Hauptspannungen in der Probe verursacht werden. Welche Temperaturerzeugung günstiger ist, hängt von der Inspektionsaufgabe ab. Die hysteretische Erwärmung zeigt selektiv Defekte wie z.B. Risse, während SPATE Spannungsfelder auf dem Bauteil misst.

## 1.2 Weitere defektselektive Prüfverfahren

### 1.2.1 Prüfmethoden mit Kontrastmitteln

Die meisten defektselektiven Prüfverfahren erfordern zusätzliche Kontrastmittel zur Hervorhebung von Defekten gegenüber ungeschädigtem Material, dies ist möglich, wenn das Kontrastmittel nur an geschädigten Bereichen haftet.

#### **Eindringprüfung (PT)**

Die Farbeindringprüfung ist eine zerstörungsfreie Prüfmethode, die besonders auf sehr feine Risse (z.B. in Schweißnähten) anspricht. Sie wird häufig in der industriellen Prüfung eingesetzt, da sie relativ einfach in der Anwendung ist, wenig Materialkosten verursacht und selektiv die Defekte sichtbar macht, da das Kontrastmittel in Risse eindringt und diese damit visuell hervorhebt.

Die Anwendung der Eindringprüfung ist zwar einfach, erfordert jedoch einen gewissen Zeit- und Arbeitsaufwand, da mehrere Arbeitsschritte nötig sind: Das zu prüfende Bauteil wird zuerst gereinigt, dann entfettet und anschließend der Farbeindringstoff auf die Bauteiloberfläche aufgebracht. Als Eindringmittel werden Farbstoffe oder, zur Steigerung der Prüfempfindlichkeit, fluoreszierende Chemikalien verwendet. Nach Aufbringen des Eindringmittels wird die Oberfläche gereinigt, um so die ungeschädigten Bauteilbereiche vom Kontrastmittel zu befreien. Die anschließende Sichtprüfung, bei der das fluoreszierende Eindringmittel unter UVA-Beleuchtung aufleuchtet und die Risse hervorhebt, ist durch eine CCD-Kamera und entsprechender Software auch automatisierbar [36].

Der Nachteil des Verfahrens ist, neben den vielen Arbeitsschritten, dass es auf geöffnete

Risse beschränkt ist, die auf der Probenoberfläche liegen. Verdeckte oder „zugeschmierte“ Risse sind mit der Eindringprüfung nicht detektierbar. Ein weiteres Problem sind Fehlanzeigen durch Poren an der Oberfläche, da diese sich ebenfalls mit dem Kontrastmittel füllen können.

### **Radioaktive Marker**

Auch im medizinischen Bereich können Kontrastmittel z.B. Organe und Organsysteme hervorheben. Ein Beispiel hierfür ist die Anwendung radioaktiver Marker bei der Szintigraphie. Bei dieser Art der Untersuchung werden Radionuklide gespritzt (z.B.  $^{99m}\text{Tc}$ -Pertechnetat), die sich im zu untersuchenden Organ anreichern. Die Aktivitätsverteilung, also die räumliche Verteilungsdichte der aus dem Körper austretenden Gamma-Strahlung, kann als Bild im Szintigramm dargestellt werden [37]. Sie wird mit Hilfe eines Scanners oder einer Gamma-Kamera detektiert. Bereiche mit erhöhtem Stoffwechsel (z.B. „heiße“ Knoten in der Schilddrüse) werden aufgrund der dadurch erhöhten Marker-Anreicherung im Szintigramm hervorgehoben.

### **Röntgen mit Kontrastmittel**

Beim Röntgen von Blutgefäßen und inneren Organen, z.B. des Herzens und des Magen-Darm-Traktes, ermöglichen Kontrastmittel eine bessere Abgrenzung zwischen Geweben ähnlicher Dichte. Die Kontrasterhöhung kann dabei durch Substanzen sehr geringer (negative Kontrastmittel, z.B. Luft) oder sehr hoher Absorption (positive Kontrastmittel, z.B. Jod:  $Z = 53$ , Bariumsulfat:  $Z = 56$ ) erfolgen.

## **1.2.2 Defektselektive Prüfmethoden ohne zusätzliches Kontrastmittel**

Wie an der Eindringprüfung deutlich wird, sind defektselektive Methoden mit Kontrastmittel mit einem hohen Arbeitsaufwand verbunden. Ein weiteres Problem ist die durch die Kontrastmittel verursachte Umweltbelastung. Es sollten also defektselektive Methoden, die ohne zusätzlich aufzubringender Substanzen auskommen, genutzt werden. Möglich ist dies, wenn Defekte gezielt angeregt werden und ungeschädigte Bereiche nicht.

Eine solche selektive Defektanregung ist z.B. durch Ultraschall möglich, wie dies bereits in der ultraschallangeregten Thermografie vorgestellt wurde.

Eine Folge der Defekterwärmung mit Ultraschall ist eine lokale Wärmeausdehnung der Fehlstellen, die sich bis auf die Bauteiloberfläche fortpflanzt und dort mit interferometrischen Verfahren (z.B. „Electronic-Speckle-Pattern-Interferometrie“ ESPI) nachweisbar ist [38].

Wird ein Bauteil mit monofrequentem Ultraschall angeregt, erzeugen Defekte, wie z.B. Delaminationen, durch das Aufeinanderschlagen der Grenzflächen höhere Harmonische zur Anregungsfrequenz. Mit Hilfe eines berührungslos messenden Laservibrometers wird das Frequenzspektrum an diskreten Punkten auf der Oberfläche der Probe aufgenommen. Die lokal bei Defekten auftretenden höheren Harmonischen werden dann mit einem Videobild der Oberfläche überlagert dargestellt (nichtlineare Vibrometrie) [39, 40].

Beide Verfahren werden nun kurz vorgestellt.

### **Ultraschall - ESPI**

ESPI (Abb. 1.9) ist ein optisches Verfahren, das Oberflächenverformungen im Nanometer-Bereich durch Interferenz misst [41, 42]. Hierzu ist das zu prüfende Bauteil mechanisch (Über- / Unterdruck) oder thermisch anzuregen.

Eine CCD-Kamera nimmt vor der Anregung die Oberfläche einer diffus reflektierenden (z.B. mit Kreidestaub besprühten) und mit einem aufgeweiteten Laserstrahl beleuchteten Probe als Referenzbild auf. Nach der Anregung wird ein weiteres Bild aufgenommen. Durch die Beleuchtung mit dem Laserstrahl erscheinen die Bilder der Objektoberfläche körnig („Speckle“). Durch Verformung der Oberfläche wird auch das Speckle-Muster leicht geändert. Die Überlagerung des Referenzbilds mit dem Bild nach der Verformung erzeugt ein Streifenmuster aufgrund des Moiré-Effekts, es stellt Linien gleicher Verformung dar, ähnlich den Höhenlinien in einer Wanderkarte. Der Abstand zweier benachbarter Streifen beträgt die halbe Wellenlänge des Lasers (z.B. 400 nm bei einem 800 nm Laser). Fehler im Bauteil wie Delaminationen, Inhomogenitäten oder Risse vermindern die lokale Steifigkeit und beeinflussen damit auch die Verformung der Probe, es entsteht eine kleine Beule über der Fehlstelle, die die ESPI-Anlage detektiert.

Bei der optisch angeregten ESPI wird die gesamte Oberfläche der Probe erwärmt und damit auch das gesamte Bauteil thermisch verformt. Defektbereiche haben lokal eine andere thermische Ausdehnung als ungeschädigte Bereiche, was sich im resultierenden ESPI-Streifenmuster bemerkbar macht. Es ist also eine kleine lokale Verformung auf der großflächig verformten Oberfläche der Probe zu detektieren. Dies erschwert die Fehlererkennung erheblich und kann im ungünstigsten Fall dazu führen, dass kleinere Defekte nicht mehr auflösbar sind.

Wird anstelle der optischen Anregung eine Ultraschallanregung verwendet, dann erwärmen sich, wie bei der ultraschallangeregten Thermografie bereits dargelegt, nur Bereiche mit erhöhtem mechanischem Verlustwinkel, also z.B. Risse oder Delaminationen [38]. Aufgrund der defektselektiven Erwärmung entstehen lokal begrenzte thermische Ausdehnungen über den Fehlstellen, die sicherer nachweisbar sind [43].

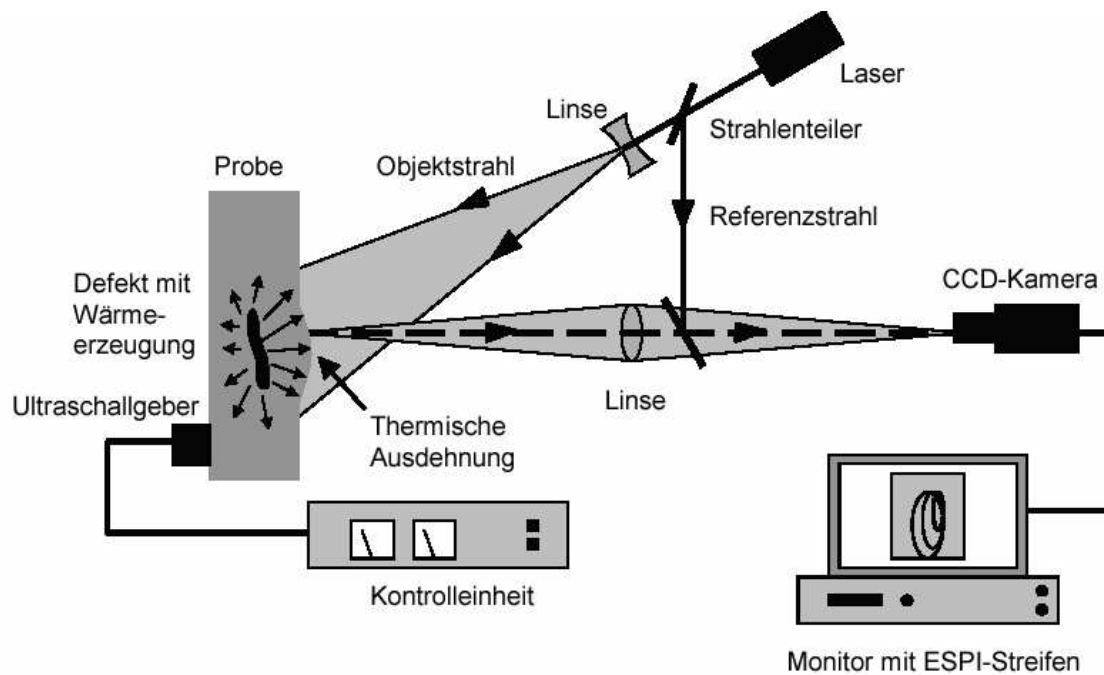


Abbildung 1.9: Schematischer Aufbau einer ESPI-Anlage mit US-Anregung [38].

### Nichtlineare Vibrometrie

Im Gegensatz zur klassischen Vibrometrie, die bereits seit vielen Jahren in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung eingesetzt wird, benötigt die nichtlineare Vibrometrie kein Referenzspektrum einer geometrisch gleichen, aber ungeschädigten Probe. Ein weiterer Vorteil der nichtlinearen Vibrometrie ist, dass sie die Fehlstellen defektselektiv anzeigt, während bei der klassischen Vibrometrie nur eine Aussage „fehlerfrei“ oder „defekt“ ohne Lokalisierung der Defektstellen möglich ist.

Wie die ultraschallangeregte Thermografie und die Ultraschall-ESPI verwendet auch die nichtlineare Vibrometrie nichtresonanten Ultraschall zur Bauteilanregung (Abb. 1.10). Nichtlineare Vibrometrie nutzt zur Defekterkennung die Tatsache, dass sich die meisten Defektarten unter mechanischer Last nichtlinear verhalten [44]. Bei tangentialer Last kommt es in kraftschlüssigen Defekten zur Rissuferreibung mit den damit verbundenen zum Teil nichtlinearen hysteretischen Verlusten. Bei einer Lasteinwirkung senkrecht zu den Grenzflächen ist das resultierende Spannungs-Dehnungs-Diagramm nicht mehr symmetrisch, da sich die Verbindung aufgrund der geringeren Steifigkeit unter Zug öffnet und unter Druck wie massives Material mit hoher Steifigkeit geschlossen bleibt. Ein solcher Defekt wirkt damit unter schwingender Belastung wie ein mechanischer Gleichrichter, der die sinusförmige Welle der monofrequenten Anregung lokal verzerrt. In Defektbereichen entstehen höhere Harmonische der Anregungsfrequenz und Mischfrequenzen [45], ungeschädigte Bereiche schwingen dagegen nur mit der Grundfrequenz. Durch Abscannen der Bauteiloberfläche mit einem Laservibrometer werden die Bereiche mit höheren

Harmonischen - und damit die Defekte - selektiv sichtbar gemacht.

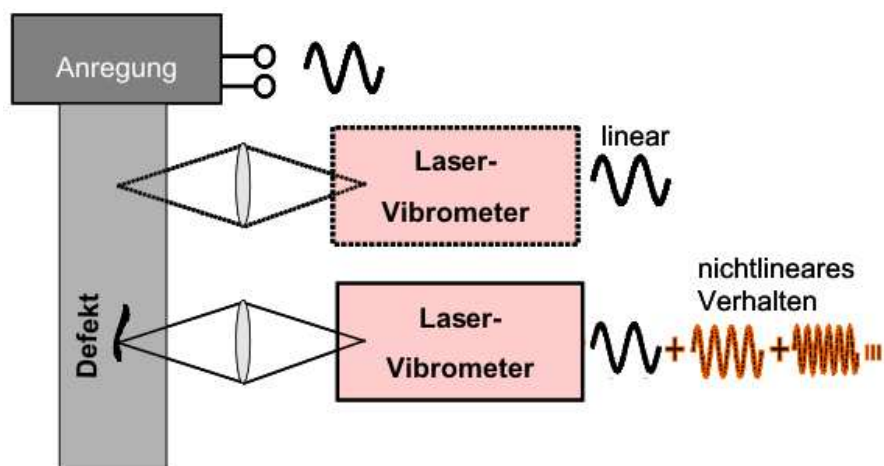


Abbildung 1.10: Schematischer Aufbau der nichtlinearen Vibrometrie [44].

### 1.3 Zielsetzung der Arbeit

Im vorangegangenen Kapitel wurden Verfahren vorgestellt, die Defekte selektiv sichtbar machen und damit die zuverlässige Erkennung von Fehlern deutlich erhöhen. Diese defektselektiven Eigenschaften von Prüfverfahren sind zwar durch Kontrastmittel möglich, letztere haben allerdings den Nachteil, dass sie erst aufwändig aufgebracht und später wieder entfernt werden müssen.

Das selektive Anregen von Fehlstellen ist eine andere Möglichkeit einer solchen „Dunkelfeldmethode“, bei der nur die Defekte sichtbar gemacht werden. Es reagieren nur Defekte auf die Anregung, das ungeschädigte Material verhält sich neutral. In den vorgestellten Beispielen wurde Leistungsschall als defektselektive Anregung verwendet. Mit dieser Methode können auch verdeckte Risse und Delaminationen detektiert werden. Die Detektion der Fehlstellen erfolgt in allen schallangeregten Verfahren kontaktfrei, die Anregungsquelle selbst muss aber zur effektiven Einkopplung des Leistungsschalls an einer Stelle mechanisch fest an das Bauteil angepresst werden und verbleibt während der Messung an diesem Ort, wird also nicht mitbewegt (im Unterschied zu Schallverfahren). Der Vorteil der berührungslosen Detektion wird also durch eine berührende Anregung wieder relativiert.

Die Ankopplung des Schallsenders ist problematisch, wenn das zu prüfende Bauteil nur einseitig zugänglich ist, da dann der nötige Anpressdruck nur mit erheblichem Aufwand aufbringbar ist. Eine weitere Gefahr besteht für thermisch empfindliche Oberflächen, da die Erwärmung an der Einkoppelstelle aufgrund der Reibung des Schallsenders an der Bauteiloberfläche sehr hoch werden kann. Eine Lösung dieses Problems ist

das Anbringen einer Array von Ultraschallsendern, z.B. durch kleinere Piezo-Aktuatoren [46], die allerdings auf die Oberfläche des Bauteils aufgeklebt werden müssen. Bei kratzempfindlichen Bauteiloberflächen, die z.B. poliert wurden, ist die berührende Ultraschallanregung ungeeignet, da sie in diesem Fall nicht mehr zerstörungsfrei ist.

Das Ziel dieser Arbeit liegt deswegen darin, ein Verfahren zu entwickeln, das den praxisrelevanten Vorteil der selektiven Defekterkennung ausnutzt, dabei aber berührungslos detektiert und auch berührungslos anregt. Diese berührungslose Anregung ist möglich, wenn statt über den mechanischen Verlustwinkel, den die ultraschallangeregte Thermografie ausnutzt, die Erwärmung durch den elektrischen Verlustwinkel erfolgt, also über induktive Einkopplung von Wirbelströmen (Induktionsspule) in elektrisch leitfähigen Bauteilen. Die Detektion erfolgt wieder berührungsfrei mit einer Infrarotkamera. Durch tieffrequente Modulation der Wirbelstromamplituden lässt sich auch bei dieser induktiv angeregten Thermografie die Lockin-Technik anwenden. Daraus ergeben sich als Teilziele:

1. ein induktiv angeregtes Lockin-Thermografie System zu konzipieren, aufzubauen und in anwendungsrelevanten Untersuchungen an verschiedenen Materialien und Fehlstellen sowie Praxisbauteilen (z.B. CFK aus dem Luftfahrtbereich) zu klären, welche Vor- und Nachteile diese neue Art der Phasenwinkelthermografie gegenüber den anderen Thermografieverfahren wie optisch- und ultraschall-angeregter Lockin-Thermografie bietet,
2. die Möglichkeiten und Grenzen des neuen Verfahrens bezüglich der detektierbaren Fehlerarten, der Tiefenreichweite in Abhängigkeit verschiedener Systemparameter und der Detektierbarkeit von Fehlern in Abhängigkeit von deren Tiefenlage (Defektmindestgröße) zu ermitteln und
3. die Prüfergebnisse der Induktions-Lockin-Thermografie auch mit den Ergebnissen anderer ebenfalls innerhalb des IKP-ZfP entwickelter defektselektiver ZfP Verfahren (z.B. Oberton-Vibrometrie oder ultraschallangeregte ESPI) zu vergleichen.



# 2 Prinzip der Induktions-Lockin-Thermografie

## 2.1 Wirbelstromangeregte Induktions-Lockin-Thermografie (ILT)

Friedrich Förster entdeckt 1937 bei der Untersuchung magnetischer Eigenschaften von Metallen den Einfluss des Erdmagnetfeldes auf die Prüfspule der Testanordnung. Er begann daraufhin mit der Entwicklung empfindlicher Messgeräte für magnetische Felder (Förster-Sonde). Mit diesen Sonden ist es z.B. möglich, die durch ferromagnetische Objekte im magnetischen Erdfeld erzeugten Feldgradienten zu erfassen [47].

Die heute gebräuchliche Wirbelstromprüfung wurde bereits 1934 von Walter Gerlach vorgestellt [48]. Die Prüfung erfolgt, indem ein Spulensystem Wirbelströme in elektrisch leitfähigen Materialien induziert. Diese Wirbelströme erzeugen ein Antwortmagnetfeld, das ein Sensor (z.B. eine Spule, Hallsonde, SQUID) detektiert. Schäden im Bauteil (z.B. Risse, Korrosion) beeinflussen die elektromagnetische Impedanz der Spule. Das Messsignal wird bezüglich Spulenspannung und Strom analysiert und ausgewertet.

Im Gegensatz hierzu verwendet die wirbelstromangeregte Thermografie die Wirbelströme nur zur Erwärmung des zu untersuchenden Bauteils durch dessen elektrische Verluste, zur Auswertung wird mit einer Infrarotkamera die thermische Antwort untersucht. Induktionsheizung ist somit eine Alternative z.B. zur berührungslosen optischen Heizung (Optische-Lockin-Thermografie), bei der das einfallende Licht an der Bauteiloberfläche absorbiert wird. Zur Erhöhung des Energieeintrags ist bei OLT eine Oberfläche mit möglichst hohem Absorptionskoeffizient vorteilhaft, eine Schwärzung der Oberfläche kann nötig werden. Die Energieeinbringung bei ILT ist dagegen aufgrund der induktiven Erwärmung unabhängig vom optischen Absorptionskoeffizienten.

Die induktive Erwärmung ist auch eine Alternative zur internen Heizung durch mechanische Verluste (ultraschallangeregte Thermografie): Da die Wirbelströme nicht nur die Oberfläche, sondern innerhalb der Wirbelstrom Eindringtiefe ein Bauteilvolumen erwärmen, ist die induktive Erwärmung mit der Volumenheizung durch Ultraschall vergleichbar.

Bei der Transienten-Thermografie mit pulsartiger Induktionsanregung wird zur Auswer-

tung das Bild des stärksten Kontrasts aus der Abkühlungssequenz untersucht. Beispiele für den Einsatz dieser Methode in der Industrie sind die Detektion von Rissen in Turbinenschaufeln [49, 50] oder von Oberflächenrissen an Stahlstäben nach dem Walzen [51]. Impulsangeregte Transienten-Thermografie hat den Vorteil einer kurzen Messzeit, allerdings sind die Temperatur-Ergebnisbilder durch inhomogene Erwärmung, wie sie bei induktiver Erwärmung häufig auftritt, und lokale Variation des Emissionskoeffizienten stark beeinflusst. Solche Artefakte können den eigentlichen Fehler verdecken, wie unten gezeigt wird.

Durch Anwendung der Lockin-Thermografie Methode auf die Induktionserwärmung werden die Nachteile der Transienten-Thermografie überwunden, wie bereits 1992 in einem Patent des IKP der Universität Stuttgart dargelegt ist [16]. In einer Konkretisierung dieser Idee wurde eine induktive Wärmeaufbringung durch modulierte Abstandsänderung der Induktionsspule zum Bauteil vorgeschlagen [17]. Im Jahr 2004 wurde schließlich eine Induktions-Lockin-Thermografie Anlage aufgebaut, bei der die Anregung über die Modulation der Wirbelstromamplituden erfolgt, der Abstand zwischen Induktionsspule und Prüfobjekt kann damit konstant bleiben [52].

Die Induktionsfrequenz (ca. 30 bis 300 kHz) wird, ähnlich wie bei der Ultraschall-Lockin-Thermografie, mit der Lockin-Frequenz (ca. 0,01 bis 1 Hz) moduliert (Abb. 2.1). Eine Infrarotkamera nimmt eine Temperaturbildsequenz über mehrere Anregungsperioden auf, die Fouriertransformation an jedem einzelnen Bildelement entlang der Zeitachse der Temperaturbildsequenz berechnet anschließend ein Amplituden- und ein Phasenbild. Die Vorteile - speziell des Phasenbildes - sind dieselben wie bei den anderen Lockin-Thermografie Methoden: Im Vergleich zu einzelnen Temperaturbildern haben die ILT-Phasenbilder ein erheblich verbessertes Signal/Rausch-Verhältnis, und die Temperaturgradienten, wie sie durch die induktive Erwärmung auftreten, werden unterdrückt.

Neben der Induktions-Lockin-Thermografie ist auch eine Induktions-Burst Anregung mit anschließender Phasenauswertung der Temperaturbildsequenz möglich. Diese Induktions-Burst-Phasen Thermografie (IBP) entspricht der bereits vorgestellten Puls-Phasen-Thermografie (Abschnitt 1.1.1 und Abschnitt 1.1.2), nun aber mit einem Induktionsburst als Anregung [53, 54].

Defekte innerhalb des durch die Wirbelströme erwärmten Volumens stellen ein Hindernis dar. Es kommt somit zu einer lokalen Ausdünnung der Wirbelströme vor den Defekten und, aufgrund der Kontinuitätsgleichung, zu einer erhöhten Wirbelstromdichte an deren Rändern. Durch diese lokal erhöhte Leistungsdichte werden die Defektränder stärker erwärmt als ungeschädigte Bauteilbereiche, dies ermöglicht eine defektselektive Fehlererkennung. Bei elektrisch leitfähigen Defekten (z.B. geschlossene Risse) ist der elektrische Widerstand meistens deutlich größer als in ungeschädigten Bauteilbereichen. Diese Defektart wird durch die Wirbelstromheizung also direkt erwärmt, wobei allerdings die

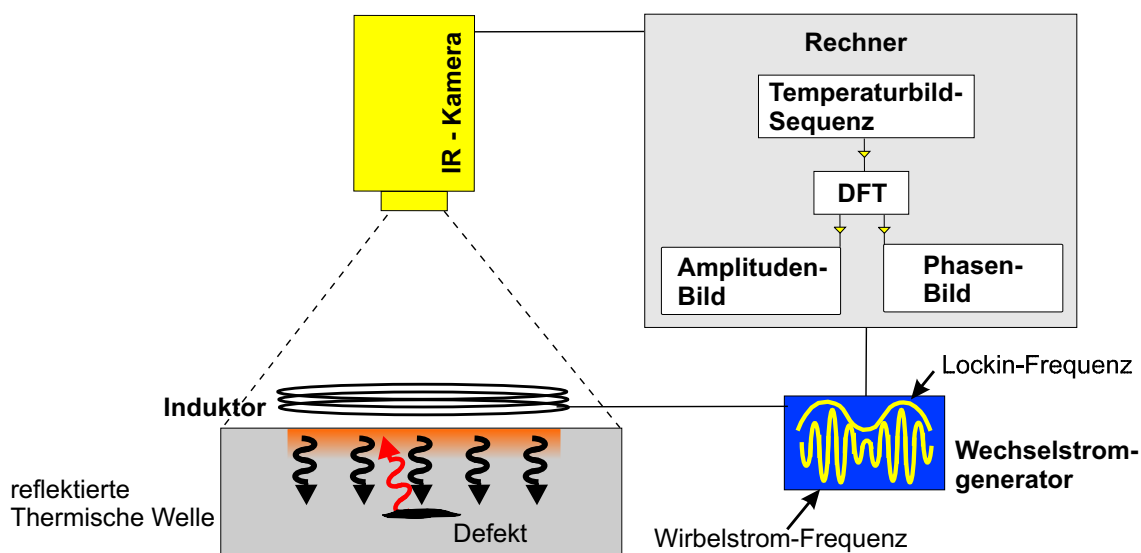


Abbildung 2.1: Prinzip der Induktions-Lockin-Thermografie (ILT).

Orientierung relativ zum Magnetfeld eine Rolle spielt.

Wirbelströme können nur in elektrisch leitfähigen Materialien erzeugt werden, es braucht sich dabei aber nicht um Metalle zu handeln. In kohlefaserverstärkten Materialien wie kohlefaserverstärkter Siliziumkarbidkeramik (C/C-SiC) oder kohlefaserverstärkten Polymeren (CFK) ist die elektrische Leitfähigkeit ausreichend, um das Material mit Hilfe von in den Kohlefasern induzierten Wirbelströmen zu erwärmen [52]. Auch konventionelle Wirbelstromprüfung wurde schon erfolgreich an CFK-Bauteilen durchgeführt [55, 56].

## 2.2 Tiefenreichweiten der Lockin-Thermografie-Verfahren

Der Lockin-Thermografie liegt die Wärmediffusion im Bauteil zugrunde, sie kann mit der Wärmediffusionsgleichung beschrieben werden unter der Vereinfachung eines zur Richtung des maximalen Temperaturgefälles parallelen Wärmestroms im eindimensionalen Fall und einer konstanten Wärmeleitfähigkeit in der Probe [57]:

$$\frac{\partial^2 T(z, t)}{\partial z^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = 0, \quad (2.1)$$

in Tiefenrichtung  $z$  und mit der Temperaturleitfähigkeit  $\alpha$  (Gl. 1.2).

Das durch die modulierte Bauteilanregung periodisch pulsierende Temperaturfeld auf der Bauteiloberfläche diffundiert in das Werkstoffinnere. Die Temperatur hat damit im stationären Fall ein örtliches und zeitliches Verhalten wie eine stark gedämpfte Welle [9, 10]. Die Gleichung für diese „thermische Welle“ ist die stationäre Lösung der homogenen Wärmediffusionsgleichung (Gl. 2.1, Abschnitt A.1), es wird also sinusförmige

periodische Anregung, eindimensionale Wärmeleitung in z-Richtung und zeitlich konstante Amplitude und Phase vorausgesetzt [6]:

$$T(z, t) = T_0 \cdot e^{-\frac{z}{\mu}} \cdot e^{i\left(\omega t - \frac{z}{\mu}\right)}, \quad (2.2)$$

hierbei sind  $t$  die Zeit,  $\omega$  die Kreisfrequenz der Anregung (Lockin-Frequenz) und  $\mu$  die thermische Eindringtiefe [58]:

$$\mu = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha}{\omega}}. \quad (2.3)$$

In der Tiefe  $z = \mu$ , bzw. auf der Strecke  $\Delta z = \mu$ , ist also die Amplitude der eindimensionalen thermischen Welle auf  $e^{-1}$  abgefallen und die Phase um  $1 \text{ rad} \approx 57^\circ$  verschoben. Nach Gl. 2.3 ist die thermische Eindringtiefe sowohl von Materialparametern (Temperaturleitfähigkeit  $\alpha$ ) als auch von der Lockin-Frequenz  $\omega$  abhängig.

Eine Infrarotkamera nimmt den zeitlichen Verlauf des Temperaturfeldes an der Bauteiloberfläche über mehrere Modulationsperioden auf und speichert diesen auf einem Rechner. Da es sich bei dem Messsignal um einen idealen Sinus handelt, benötigt die Fourieranalyse nur drei Messwerte pro Periode für die Bestimmung von Phase und Amplitude, vier Punkte ermöglichen jedoch eine schnellere und einfachere Berechnung dieser Größen (Vierpunktalgorithmus) [17]. Durch Mittelung kann das Signal/Rausch Verhältnis proportional zu  $\sqrt{N_B}$  verbessert werden, wobei  $N_B$  der Anzahl der aufgenommenen Bilder entspricht. Bei einer höheren Bildwiederholrate erfasst eine Infrarotkamera z.B. mehrere hundert Bilder pro Messperiode. Eine Fouriertransformation über alle aufgenommenen Bilder der Periode verbessert das Signal/Rausch Verhältnis der Ergebnisbilder, die Anzahl der Perioden kann dadurch verringert werden. Dies verkürzt die Messzeit, besonders bei niederen Lockin-Frequenzen, erheblich.

Der thermische Impedanzunterschied von Grenzflächen wie Rissen oder Delaminationen behindert den Wärmeabfluss, die in die Probe eindringende thermische Welle wird an solchen Diskontinuitäten aufgrund des Reflexionskoeffizienten  $R$  reflektiert (Abschnitt 2.2.1) und verändert durch Superposition den Phasenwinkel des Temperaturfeldes an der Oberfläche. Die Phasenauswertung erfolgt durch Fouriertransformation bei der Lockin-Frequenz  $\omega$ , wobei eine diskrete Fouriertransformation über alle Pixel des Temperaturbildstapels über die Messzeit  $T$  mit der Abtastzeit (Kehrwert der Bildwiederholrate)  $\Delta t$  durchgeführt wird:

$$\begin{aligned}
F_\omega &= \int_0^T f(t) e^{-i\omega t} dt \\
&\approx \sum_{\kappa=0}^{T/\Delta t} f(\kappa\Delta t) e^{-i\omega\kappa\Delta t} = \sum_{\kappa=0}^{T/\Delta t} f(\kappa\Delta t) (\cos(\omega\kappa\Delta t) - i \sin(\omega\kappa\Delta t)) \quad (2.4) \\
&= \operatorname{Re}(F_\omega) + i \operatorname{Im}(F_\omega) .
\end{aligned}$$

Damit errechnen sich Amplituden- und Phasenbild gemäß:

$$A_\omega = \sqrt{\operatorname{Re}(F_\omega)^2 + \operatorname{Im}(F_\omega)^2} , \quad (2.5)$$

$$\varphi_\omega = \arctan\left(\frac{\operatorname{Im}(F_\omega)}{\operatorname{Re}(F_\omega)}\right) . \quad (2.6)$$

### 2.2.1 Tiefenreichweite der optisch angeregten Lockin-Thermografie

Bei der optisch angeregten Lockin-Thermografie wird das anregende Licht an der Bauteiloberfläche absorbiert und breitet sich in das Bauteil in Form einer Thermischen Welle (Gl. 2.2) aus. An thermischen Grenzflächen wie Rissen oder Delaminationen wird die Thermische Welle auf Grund der thermischen Impedanz  $Z$  reflektiert,

$$Z = \frac{T}{j} . \quad (2.7)$$

Die thermische Impedanz beschreibt also das Verhältnis von aufgeprägter Temperaturamplitude  $T$  zur erzeugten Amplitude der Wärmestromdichte  $j$ ,

$$j = -\lambda \cdot \operatorname{grad} T(z, t) . \quad (2.8)$$

Nach Einsetzen der thermischen Wellengleichung (Gl. 2.2) in Gl. 2.8 folgt für die thermische Impedanz  $Z$  (Gl. 2.7) in Abhängigkeit der thermischen Eindringtiefe  $\mu$  und der thermischen Leitfähigkeit  $\lambda$

$$Z = \frac{\mu}{\lambda} \frac{1}{(1+i)} . \quad (2.9)$$

Der Reflexionskoeffizient  $R_{12}$  für die thermische Welle an der Grenzfläche zwischen zwei Medien kann nun durch die thermische Impedanzen beschrieben werden [58, 59]:

$$R_{12} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\mu_2 \cdot \lambda_1 - \mu_1 \cdot \lambda_2}{\mu_2 \cdot \lambda_1 + \mu_1 \cdot \lambda_2} . \quad (2.10)$$

Neben der Reflexion aufgrund thermischer Impedanzunterschiede beeinflusst auch der thermische Kontaktwiderstand von Defekten  $W_k$  den Wärmefluss [17, 60]:

$$R_{12} = \frac{Z_2 - Z_1 + W_k}{Z_2 + Z_1 + W_k}. \quad (2.11)$$

Der Reflexionskoeffizient wird nun komplex und frequenzabhängig, dadurch beeinflusst der Kontaktwiderstand auch den Phasenwinkel in Abhängigkeit der Frequenz [17, 21, 60]. Bei sehr großem Kontaktwiderstand kommt es zur vollständigen Reflexion. In den folgenden Berechnungen wurde der Reflexionskoeffizient vorgegeben und der Kontaktwiderstand nicht weiter spezifiziert.

Als Beispiel soll hier ein halbumendlicher Körper mit einer Schicht der Dicke  $d$  (z.B. Lack) angenommen werden. An der thermischen Grenzfläche zwischen Schicht und Körper  $R_{23}$  werden die thermischen Wellen reflektiert und überlagern sich an der Bauteiloberfläche (bei  $z = 0$ ) mit dem Anregungstemperaturfeld, außerdem werden sie auch an dieser Grenzfläche wieder mit  $R_{21}$  in die Schicht reflektiert (Abb. 2.2).

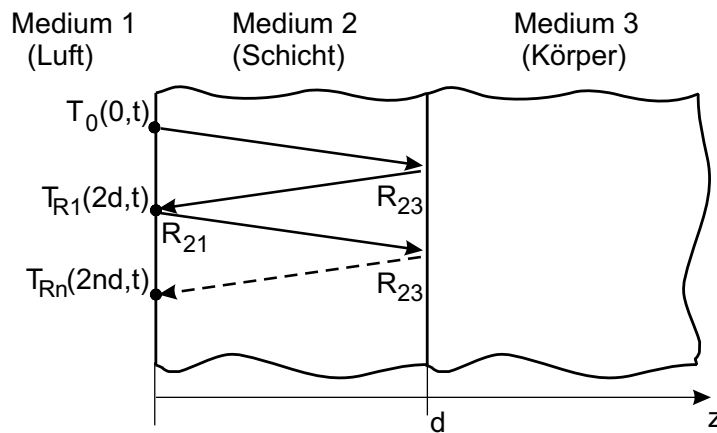


Abbildung 2.2: Reflexion von thermischen Wellen an der Grenzfläche zwischen einer Schicht der Dicke  $d$  (Medium 2) und einem halbumendlichen Körper (Medium 3) [61].

Die resultierende Oberflächentemperatur für das dargestellte Beispiel setzt sich aus der aufgeprägten thermischen Welle der Anregung an der Oberfläche und den stark gedämpften und phasenverschobenen reflektierten thermischen Wellen zusammen. Die erste reflektierte thermische Welle ( $T_{R1}$ ) läuft zwei Mal durch die Schicht der Dicke  $d$ :

$$T_{R1} = R_{23} \cdot T_0 \cdot e^{-\frac{2d}{\mu}} \cdot e^{i\left(\omega t - \frac{2d}{\mu}\right)}. \quad (2.12)$$

Die zweite Reflexion ( $T_{R2}$ ) läuft vier Mal durch die Beschichtung und wird einmal an der Grenzfläche Medium 2 zu Medium 1 und zwei mal an der Grenzfläche Medium 2 zu Medium 3 reflektiert:

$$T_{R2} = R_{21} \cdot R_{23}^2 \cdot T_0 \cdot e^{-\frac{4d}{\mu}} \cdot e^{i\left(\omega t - \frac{4d}{\mu}\right)}. \quad (2.13)$$

Da es sich bei dem Medium 1 um Luft mit einer sehr geringen Wärmeleitfähigkeit handelt ( $\lambda_1 = 0,0025 \frac{W}{K \cdot m}$ ), ist der Reflexionskoeffizient  $R_{21}$  für die meisten Materialien ungefähr 1 [21]. Zur Vereinfachung wird die Abkürzung  $R_{23} = R$  eingeführt. Die Gesamttemperatur an der Bauteiloberfläche  $T_{ob}$  ergibt sich aus Addition der aufgeprägten thermischen Welle ( $n=0$ ) mit allen reflektierten thermischen Wellen:

$$T_{ob} = T_0 \cdot e^{i\omega t} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} R^n \cdot e^{-2n\frac{d}{\mu}} \cdot e^{-i2n\frac{d}{\mu}}. \quad (2.14)$$

Man sieht nun die Struktur einer geometrischen Reihe, deren Grenzwert gegeben ist durch

$$\sum_{n=0}^{\infty} q^n = \frac{1}{1-q}. \quad (2.15)$$

Damit berechnet sich der Grenzwert der Gesamttemperatur zu

$$T_{ob} = T_0 \cdot e^{i\omega t} \cdot \frac{1}{1 - R \cdot e^{-\frac{2d}{\mu}} \cdot (1+i)}. \quad (2.16)$$

Nach Trennung von Real- und Imaginärteil (Abschnitt A.2) folgen Amplitude und Phase (Gl. 2.5 bzw. Gl. 2.6), wobei zu beachten ist, dass aufgrund der komplexen thermischen Impedanz der thermischen Welle mit gleichem Real- und Imaginärteil (Gl. 2.7) eine Phasenverschiebung um  $\pi/4$  zwischen Temperaturamplitude und Wärmefluss besteht [17]:

$$A = \frac{1}{\frac{e^D}{R} - 2 \cos(D) + R \cdot e^{-D}} \sqrt{\left[\frac{e^D}{R} - \cos(D)\right]^2 + \sin^2(D)}, \quad (2.17)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{-\sin(D)}{\frac{e^D}{R} - \cos(D)}\right) + \frac{\pi}{4}. \quad (2.18)$$

Mit der Abkürzung

$$D = 2 \frac{d}{\mu}.$$

Mit Gl. 2.18 kann der Phasenwinkelverlauf  $\varphi(d/\mu)$  auf der Oberfläche der Probe bei zunehmender normierter Defekttiefe (Schichtdicke)  $d/\mu$ , in Abhängigkeit des Reflexionskoeffizienten  $R$  dargestellt werden (Abb. 2.3).

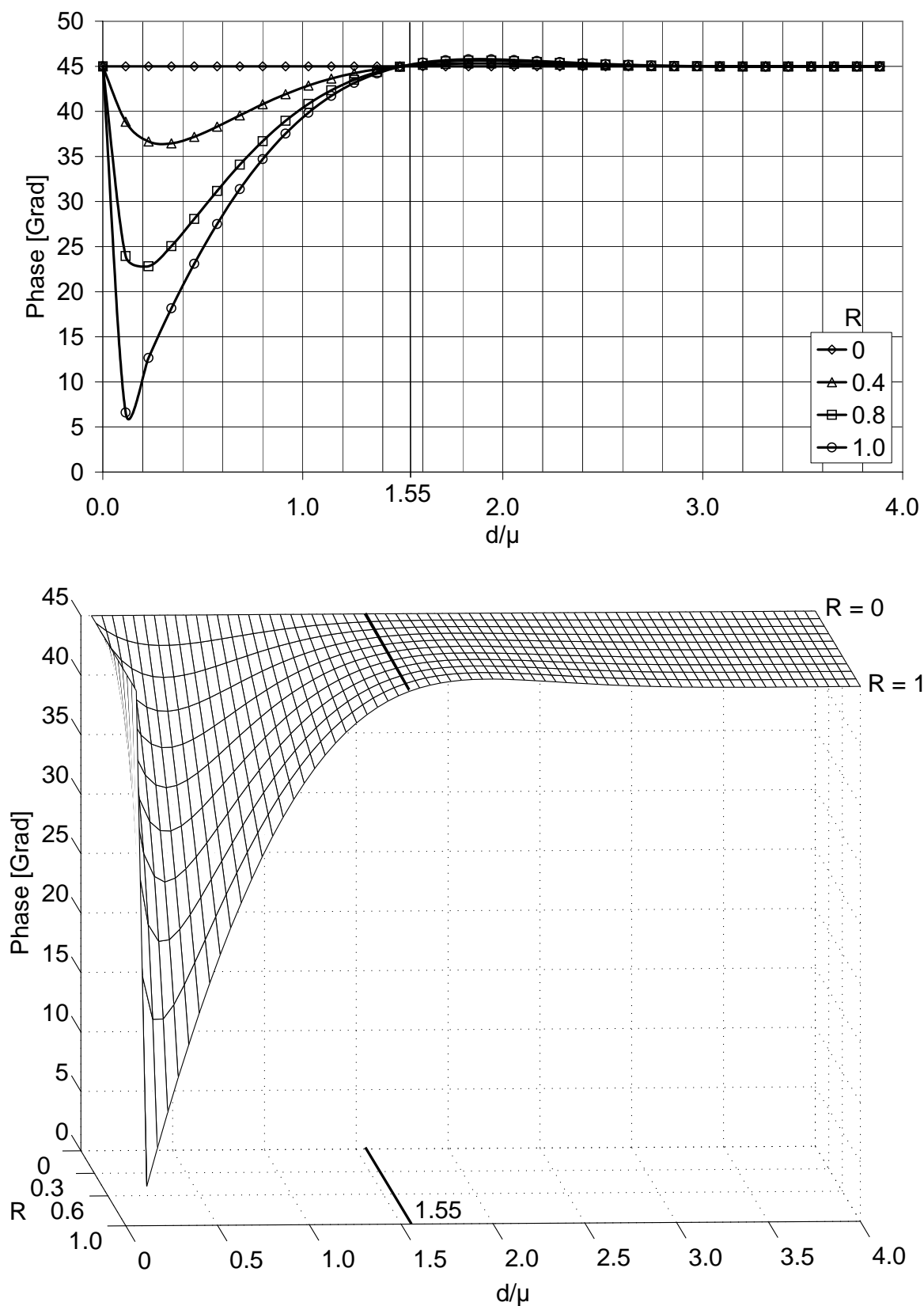


Abbildung 2.3: Phasenwinkelverlauf an der Oberfläche eines beschichteten halbbunendlichen Körpers (Abb. 2.2) bei zunehmender normierter Defekttiefe  $d/\mu$ , in Abhängigkeit des Reflexionskoeffizienten  $R$ . Oben: 2-D Darstellung. Unten: 3-D Darstellung.



Der Phasenverlauf zeigt ein Minimum aufgrund von Interferenz thermischer Wellen auf der Bauteiloberfläche [59]. Die Interferenz ist abhängig vom Reflexionskoeffizienten  $R$  zwischen Schicht und halbunendlichem Körper. Bei hohem  $R$  ist die Interferenz stark bemerkbar, während bei niederem  $R$  die Überlagerung auf der Oberfläche kleiner ist. Bei  $R = 0$  werden keine Wellen zurück reflektiert und der Phasenwinkel ist konstant.

Bei zunehmender Tiefenlage des Defekts ändert sich der Phasenwinkel nicht mehr und nähert sich dem Phasenunterschied von 45 Grad an. Die Tiefenreichweite zur Defekterkennung wird als letzter eindeutiger Phasenwinkel, also der Schnittpunkt der Phasenkurve mit dem Wert 45 Grad für den Phasenwinkel, definiert. Die zugehörige Lockin-Frequenz wird auch „Blind Frequency“ genannt, da sich diese Frequenz nicht zur Detektion von Defekten eignet. Aus dem 2-D Diagramm (Abb. 2.3, oben) kann ein  $d/\mu$  von etwa 1,55 für diesen Punkt herausgelesen werden, was im Bereich der bekannten Literaturwerte (etwa  $1,5 \mu$  [62] bis  $1,8 \mu$  [18]) liegt. Das Diagramm zeigt auch, dass der Schnittpunkt, und damit die Tiefenreichweite, nicht vom Reflexionskoeffizienten abhängt. Die Tiefenreichweite des Amplitudenbildes beträgt im Gegensatz zum Phasenbild nur eine thermische Eindringtiefe. Da die thermische Eindringtiefe sowohl von Materialparametern als auch von der Lockin-Frequenz abhängt (Gl. 2.3), ist es möglich, die Tiefenreichweite mit der Anregungsfrequenz einzustellen. Lockin-Thermografie erlaubt somit tiefenaufgelöste Messungen im Sinne einer thermischen Tomografie [15].

### 2.2.2 Tiefenreichweite der ultraschallangeregten Lockin-Thermografie

Im Gegensatz zur optisch angeregten Thermografie entsteht bei der ultraschallangeregten Thermografie die Wärme direkt in den Defekten. Damit kommt es an der Oberfläche nicht zur Interferenz von aufgeprägter und reflektierter thermischer Welle, sondern es handelt sich um eine Transmissionsanordnung, bei der die thermische Welle vom Defekt selbst ausgeht und die Probe bis zur Oberfläche durchquert. Damit hat ULT im Vergleich zur OLT eine größere Tiefenreichweite. Die im Defekt erzeugte Temperaturamplitude  $T(z)$  nimmt bei der Diffusion durch das Bauteil, wie durch die periodische Lösung der Wärmeleitungsgleichung (Gl. 2.2) beschrieben, logarithmisch ab:

$$T(z) = T_0 \cdot e^{-\frac{z}{\mu}} \quad (2.19)$$

Die logarithmierte Temperaturamplitude  $T(z)$  über eine zunehmende Tiefenlage des Defektes  $z$  aufgetragen, ergibt eine Gerade, die die Dämpfung der ursprünglichen Defekttemperatur ( $T_0$  : Ausgangspunkt der Geraden) bei Diffusion durch das Bauteil wiedergibt (Abb. 2.4).

Die Empfindlichkeit eines IR-Detektors wird mit der kleinsten noch auflösbaren Tempe-

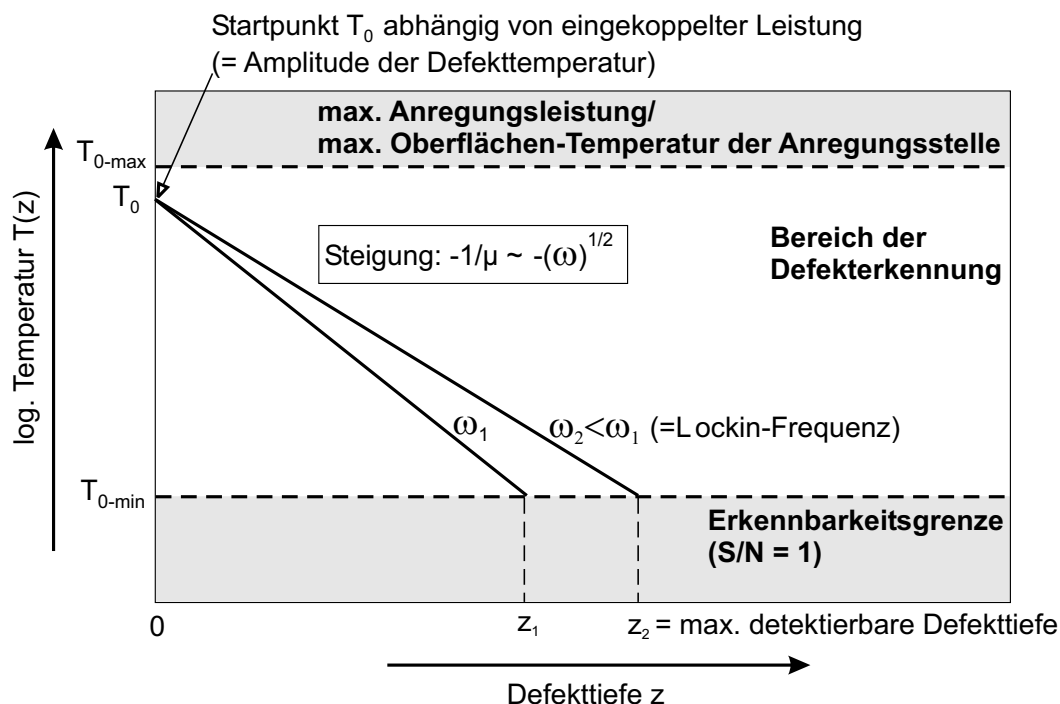


Abbildung 2.4: Begrenzende Faktoren der Tiefenreichweite bei ultraschallangeregter Lockin-Thermografie am Beispiel der Temperaturamplituden.

raturdifferenz NETD im Einzelbild angegeben. Da die Fouriertransformation der Lockin-Thermografie eine gewichtete Mittelung über mehrere Bilder  $N_B$  darstellt und dadurch das S/N-Verhältnis verbessert wird, ist die minimale von der IR-Kamera in Kombination mit der Fouriertransformation detektierbare Temperaturamplitude der vom Defekt ausgehenden thermischen Welle etwa  $T_{0-min} \approx \frac{NETD}{\sqrt{N_B}}$ . Der Schnittpunkt dieser unteren Grenze mit der abfallenden Geraden ergibt somit die maximale Tiefenreichweite, bei der ein Signal an der Erkennbarkeitsgrenze, also bei  $S/N = 1$ , wahrgenommen wird (z.B.  $z_1$  und  $z_2$  in Abb. 2.4). Empfindlichere Detektoren oder eine größere Anzahl von Bildern (z.B. durch Erhöhung der Messperiodenanzahl oder durch Erhöhung der Bildwiederholrate der Kamera) senken die untere Grenze im Diagramm zu kleineren  $T_{0-min}$  ab und vergrößern so die Tiefenreichweite. Dabei ist der Einfluss des Emissionskoeffizienten auf der Bauteiloberfläche zu beachten, da bei niedrigerem Emissionskoeffizienten auch die detektierte Oberflächentemperatur scheinbar niedriger ist (Gl. 1.3). Durch Erhöhung des Emissionskoeffizienten, z.B. durch Schwärzung der Oberfläche, kann also eingekoppelte Leistung eingespart oder bei gleicher Leistung das S/N-Verhältnis - und damit die Tiefenreichweite - erhöht werden. Der Einfluss lokaler Änderungen des Emissionskoeffizienten wird durch Verwenden von Phasenbildern anstelle der Amplitudenbilder verringert.

Eine andere Möglichkeit die Reichweite zur Defekterkennung zu vergrößern ist das Steigern der Anregungsleistung mit der damit verbundenen Erhöhung der Defekttemperatur  $T_0$ . Die Gerade im Reichweitendiagramm verschiebt sich dadurch nach oben, während

deren Steigung dieselbe bleibt. Die obere Temperaturgrenze  $T_{0-max}$  ist entweder durch die maximale Leistung des Ultraschallkonverters oder durch die Belastbarkeit des Bauteils, bei der die Prüfung noch zerstörungsfrei bleibt, gegeben. Die Steigung der Geraden im Diagramm ist  $-\frac{1}{\mu}$  (Gl. 2.19). Da die thermische Eindringtiefe  $\mu$  von der Lockin-Frequenz  $\omega$  abhängt (Gl. 2.3), ist auch die Steigung der Geraden von  $\omega$  abhängig. Tiefere Lockin-Frequenzen erlauben höhere Tiefenreichweiten, da die Steigung flacher wird (z.B. Geraden  $\omega_1$  und  $\omega_2$  mit  $\omega_1 > \omega_2$  in Abb. 2.4).

Der Phasenwinkelverlauf ist entsprechend Abb. 2.4, nur mit linearer Auftragung des Phasenwinkels auf der Ordinaten (Gl. 2.2).

## 2.2.3 Tiefenreichweite der Induktions-Lockin-Thermografie

### Grundlagen der Wirbelstromprüfung

Faraday entdeckte 1831, dass in einem geschlossenen Leiterkreis ein Strom fließt, sobald ein Magnet dem Leiterkreis genähert wird. Die Änderung des magnetischen Flusses, der die Leiterschleife durchsetzt, induziert eine elektrische Spannung. Der Zusammenhang von magnetischen- und elektrischen Feldern wird durch die Maxwell-Gleichungen beschrieben:

- Durchflutungssatz (erste Maxwellsche Gleichung):

$$\operatorname{rot} \bar{H}(x, t) = \bar{J}(x, t) + \frac{\partial}{\partial t} \bar{D}(x, t) , \quad (2.20)$$

mit der magnetischen Feldstärke  $\bar{H}$ , der elektrischen Stromdichte  $\bar{J}$  und der Dielektrischen Verschiebung  $\bar{D}$ . Der Durchflutungssatz zeigt, dass elektrische Ströme und die Änderungen der dielektrischen Verschiebung ein magnetisches Wirbelfeld erzeugen.

- Induktionsgesetz (zweite Maxwellsche Gleichung):

$$\operatorname{rot} \bar{E}(x, t) = -\frac{\partial}{\partial t} \bar{B}(x, t) , \quad (2.21)$$

mit der elektrischen Feldstärke  $\bar{E}$  und der magnetischen Flussdichte  $\bar{B}$ . Eine Änderung des magnetischen Flusses, z.B. durch ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld, induziert in leitfähigen Materialien elektrische Wirbelströme.

Bei homogenen Materialien sind die Dielektrische Verschiebung  $\bar{D}$  mit der elektrischen Feldstärke  $\bar{E}$  und die magnetische Flussdichte  $\bar{B}$  mit der magnetischen Feldstärke  $\bar{H}$  über Materialgleichungen miteinander gekoppelt:

$$\bar{D} = \varepsilon_d \bar{E} \quad (2.22)$$

und

$$\bar{B} = \mu_p \bar{H} , \quad (2.23)$$

mit der Dielektrizitätskonstante  $\varepsilon_d$  und Permeabilität  $\mu_p$ .

Der Durchflutungssatz (Gl. 2.20) lässt sich mit der Materialgleichung (Gl. 2.22) umformulieren:

$$\text{rot } \bar{H} = \sigma \bar{E} + \varepsilon_d \frac{\partial}{\partial t} \bar{E} . \quad (2.24)$$

Für metallische Werkstoffe mit einer elektrischen Leitfähigkeit  $\sigma$  ist die induzierte Leitungsstromdichte ( $\sigma \bar{E}$ ) wesentlich größer als die Dichte der Verschiebestrome ( $\frac{\partial}{\partial t} \bar{E}$ ), so dass dieser Term vernachlässigt werden kann [55]. Bei Prüfung von gering leitfähigen anisotropen Kohlefaserverbundwerkstoffen kommt es bei hohen Prüffrequenzen oberhalb ca. 500 kHz zu kapazitiven Kopplungen zwischen den Fasern [56].

### Induktive Erwärmung

Die induktive Erwärmung nutzt elektrische Verluste innerhalb des Bauteils zur Erwärmung. Eine Induktionsspule erzeugt elektrische Ströme in leitfähigen Materialien (Gl. 2.21). Der elektrische Widerstand innerhalb des Bauteils bewirkt dann eine Erwärmung aufgrund Joulescher Verluste  $\bar{P}_J$ :

$$\bar{P}_J = \int_F \bar{J} \cdot \bar{E} \, df . \quad (2.25)$$

Bei der Einbringung von Wirbelströmen in ferromagnetische Stoffe kommt es zusätzlich zur Erwärmung aufgrund von Hystereseverlusten, die jedoch deutlich schwächer als die Joulesche Erwärmung sind [63].

### Tiefenreichweite der Wirbelstromprüfung und der induktiven Lockin-Thermografie

Trifft das durch die Induktionsspule erzeugte magnetische Feld auf ein Bauteil, so erzeugt es Wirbelströme auf dessen Oberfläche. Diese Wirbelstromschicht schirmt so weit ab, dass im darunterliegenden Material deutlich weniger Wirbelströme induziert werden können. Bei metallischen Werkstoffen mit guter elektrischer Leitfähigkeit wird also aufgrund der kleinen Wirbelstromeindringtiefe nur eine sehr dünne Randschicht erwärmt, dies wird Skin-Effekt genannt.

Bei der konventionellen Wirbelstromprüfung ist die maximale Tiefenreichweite zur Defekterkennung durch die Wirbelstromeindringtiefe („Skin Tiefe“)  $\delta_w$  gegeben, da nur

Defekte innerhalb dieser Tiefe das Antwortmagnetfeld beeinflussen können. Die Wirbelstromeindringtiefe ist abhängig von der verwendeten Wirbelstromfrequenz  $\omega_w$  und den elektrischen und magnetischen Materialeigenschaften des geprüften Bauteils (elektrische Leitfähigkeit  $\sigma$  und Permeabilität  $\mu_p$ ). Die Permeabilität setzt sich aus der relativen Permeabilität  $\mu_r$  des Materials und der Permeabilitätskonstanten  $\mu_0$  zusammen:

$$\mu_w = \sqrt{\frac{2}{\omega_w \cdot \mu_p \cdot \sigma}} = \sqrt{\frac{2}{\omega_w \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \sigma}}. \quad (2.26)$$

Eine niedrigere Wirbelstromfrequenz erhöht also die Wirbelstromeindringtiefe, wodurch sich allerdings die Empfindlichkeit des Spulensystems verringert. Dies kann durch Vergrößerung der Spulen kompensiert werden, führt dann aber zu einer Verringerung der Ortsauflösung, die eine Anhebung der detektierbaren Defektmindestgrößen bewirkt.

Im Gegensatz zur konventionellen Wirbelstromprüfung nutzt die wirbelstromangeregte Thermografie die induzierten Wirbelströme lediglich zur Erwärmung des Bauteils. Bei einer modulierten Oberflächenheizung (z.B. optisch angeregter Lockin-Thermografie) entsteht durch Aufbringung von Wärme auf die Oberfläche eine thermische Welle, die sich in das Bauteil durch Diffusion fortpflanzt. Die Tiefenreichweite dieser Anregungsart ist von der thermischen Eindringtiefe begrenzt (abhängig von Materialparametern und der Lockin-Frequenz, Gl. 2.3). Bei der Induktions-Lockin-Thermografie gibt es aufgrund der modulierten Anregung neben der frequenzabhängigen Wirbelstromreichweite der konventionellen Wirbelstromprüfung auch noch die thermische Tiefenreichweite als weiteren Parameter für die Defekterkennung. In einer Tabelle sind die elektrischen Eigenschaften verschiedener Materialien und deren Wirbelstromeindringtiefen bei 50 kHz Wirbelstromfrequenz aufgeführt (Tab. 2.1). Außerdem zeigt die Tabelle auch die thermischen Eindringtiefen derselben Materialien für 1 Hz Lockin-Frequenz.

Werkstoff	Spez. elektr. Leitfähigkeit $\sigma_s$ [m/Ω·mm <sup>2</sup> ]	rel. Permeabilität $\mu_r$	$\mu_w$ (50kHz) [mm]	$\mu$ (1Hz) [mm]
Stahl	8	1400	0,02	2,5
Aluminium	37,6	1	0,37	5,6
Titan	2,3	1	1,48	1,7
Kohlenstoff	0,02	1	15,92	5,45

Tabelle 2.1: Elektrische Eigenschaften verschiedener Materialien und die zugehörigen Wirbelstromeindringtiefen  $\mu_w$  bei 50 kHz Wirbelstromfrequenz und thermische Eindringtiefen  $\mu$  bei 1 Hz Lockin-Frequenz.

Durch Variation der Verfahrensparameter wie Lockin-Frequenz und Induktions-Frequenz

ist es nicht nur möglich, die Tiefenreichweite zur Defekterkennung zu beeinflussen, sondern auch die Art der Heizung. Ein Übergang von der Oberflächenheizung optisch angeregter Lockin-Thermografie bis zur Volumenheizung der ultraschallangeregten Lockin-Thermografie ist möglich. Diese Grenzfälle werden im Folgenden diskutiert.

### **ILT an elektrisch teiltransparenten Materialien**

Die Unterteilung der Anwendung von ILT an elektrisch gering leitfähigen (elektrisch transparenten) und elektrisch opake/teiltransparente Materialien erfolgt in Analogie zu den möglichen Fällen der Photoakustik. In der Photoakustik werden die zu prüfenden Bauteile in Gaszellen eingebracht. Ein modulierter Laserstrahl erwärmt die Oberfläche des Bauteils, die ihrerseits das Gas in der Zelle erwärmt und damit den Druck in der Gaszelle ändert. Ein Empfänger (z.B. Mikrofon) detektiert diese Druckschwankung als akustisches Signal. Die Signalstärke des empfangenen akustischen Signals hängt sowohl von den thermischen Eigenschaften (thermische Eindringtiefe  $\mu$ ) als auch von den optischen Eigenschaften (optische Eindringtiefe  $\mu_\beta$ ) des Bauteils ab.

Diese Zusammenhänge beschreibt die Rosencwaig-Gersho Theorie [58], die zwei Grenzfälle unterscheidet: optisch transparente Proben ( $\mu_\beta > d$ ) und optisch opake Proben ( $\mu_\beta < d$ ). Als Untergruppe dieser beiden Fälle müssen jeweils drei weitere Fälle beachtet werden, die die thermische Eindringtiefe berücksichtigen. Für optisch transparente Proben sind dies: thermisch dünne ( $\mu \gg d; \mu > \mu_\beta$ ), thermisch teiltransparente ( $\mu > d; \mu < \mu_\beta$ ) und thermisch dicke Medien ( $\mu < d; \mu \ll \mu_\beta$ ). Die Theorie ist im Ansatz auch auf die wirbelstromangeregte Thermografie anwendbar, wenn die optische Eindringtiefe durch die Wirbelstromeindringtiefe ( $\mu_w$ ) ersetzt wird. Es wird dabei angenommen, dass die Infrarot-Eindringtiefe ungefähr Null ist, dies ist aufgrund der metallischen Eigenschaften der Modellproben gegeben. Dem Fall der optisch opaken und thermisch teiltransparenten Probe der Rosencwaig-Gersho Theorie entspricht dabei z.B. die ILT-Prüfung an Materialien mit hoher elektrischer Leitfähigkeit (elektrisch opak, thermisch teiltransparent). Die Tiefenreichweite der ILT in Abhängigkeit der „elektrischen Skintiefe“ (elektrisch opak und elektrisch teiltransparent) wird in diesem Abschnitt untersucht. Es werden dabei nur die vom erwärmten Volumen ausgehenden thermischen Wellen berücksichtigt, da sich die Defekte (simuliert durch die Grenzfläche Schicht/Substrat) außerhalb der Wirbelstromeindringtiefe befinden, sie sind also elektrisch inaktiv (Abb. 2.5). Der Einfluss einer zusätzlichen Wärmequelle eines direkt erwärmten Defekts innerhalb der Wirbelstromeindringtiefe (elektrisch transparent) wird im nächsten Abschnitt behandelt.

Die tiefenabhängige Erwärmung eines Materials mit optischem Absorptionsvermögen wurde mit einem Ansatz nach dem Lambert-Beer Gesetz beschrieben [21, 64]. Der Kehrwert des darin verwendeten Absorptionskoeffizienten ist die optische Eindringtiefe. In

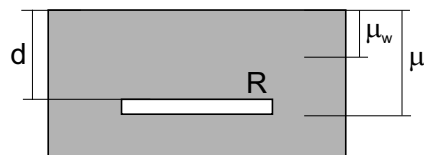


Abbildung 2.5: Elektrisch teiltransparenter Fall: Der Defekt liegt innerhalb der thermischen Eindringtiefe  $\mu$ , jedoch nicht innerhalb der Wirbelstromeindringtiefe  $\mu_w$ , der Defekt ist also elektrisch inaktiv.

Analogie zu den optisch teiltransparenten Proben wird für den Fall der Induktionserwärmung das Lambert-Beer Gesetz mit der Wirbelstromeindringtiefe  $\mu_w$  umgeschrieben:

$$T_0(z) = T_0 e^{-\frac{z}{\mu_w}} . \quad (2.27)$$

Dies ermöglicht die modellhafte Untersuchung eines beschichteten halbunendlichen Körpers mit einem durch Wirbelströme erwärmten Volumen und einer nach dem Lambert-Beer Gesetz abfallenden Temperaturverteilung (Abb. 2.6).

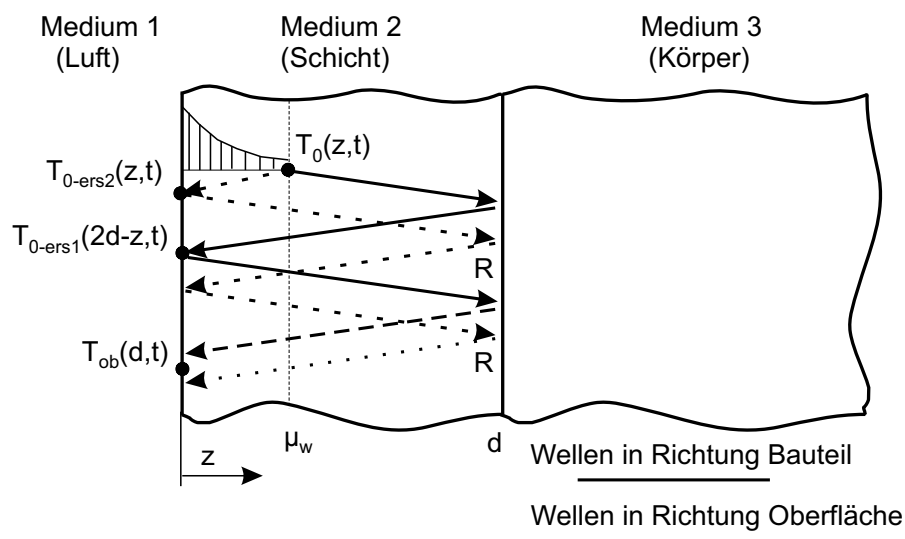


Abbildung 2.6: Das erwärmte Bauteilvolumen (innerhalb  $\mu_w$ ) erzeugt thermische Wellen, die in Richtung Oberfläche und in Richtung Grenzfläche laufen. Die Reflexion der thermischen Wellen an der Oberfläche und der Grenzfläche und deren Überlagerung erzeugt eine resultierende Oberflächentemperatur  $T_{ob}$ .

Im gesamten erwärmten Volumen werden thermische Wellen erzeugt, die sich in Richtung Oberfläche und in das Bauteil ausbreiten, sie werden an der Oberfläche bzw. an der Grenzfläche von Beschichtung zu Substrat reflektiert und überlagern sich gegenseitig (Abb. 2.6). Um auf die bereits für Oberflächenheizung hergeleitete Lösung (Abschnitt

2.2.1) aufbauen zu können, werden Ersatztemperaturen an der Oberfläche für beide Fälle berechnet. Die Ersatztemperatur der reflektierten thermischen Wellen ist vom Reflexionskoeffizienten  $R$  an der Grenzfläche abhängig, außerdem werden die thermischen Wellen auf der Länge  $(2d - z)$  phasenverschoben und gedämpft ( $z$  ist der Ursprungsort der Welle im Bauteil) :

$$T_{0-ers1} = R \cdot T_0 \cdot e^{i\omega t} e^{-\frac{z}{\mu_w}} e^{-\frac{2d-z}{\mu}} (1+i) . \quad (2.28)$$

Da alle Wellen aus dem Volumen berücksichtigt werden müssen, wird die Temperatur in den Grenzen der Schichtdicke integriert:

$$\begin{aligned} T_{0-ers1} &= R \cdot T_0 \cdot e^{i\omega t} \cdot e^{-\frac{2d}{\mu}} (1+i) \int_0^d e^z \left( -\frac{1}{\mu_w} + \frac{1}{\mu} (1+i) \right) dz \\ &= R \cdot T_0 \cdot e^{i\omega t} \frac{e^{-\frac{2d}{\mu}} (1+i)}{\left( -\frac{1}{\mu_w} + \frac{1}{\mu} (1+i) \right)} \left( e^{\left( -\frac{d}{\mu_w} + \frac{d}{\mu} (1+i) \right)} - 1 \right) . \end{aligned} \quad (2.29)$$

Die aus dem erwärmten Volumen direkt zur Oberfläche laufenden thermischen Wellen ergeben eine Ersatztemperatur, die nicht vom Reflexionskoeffizienten der Grenzschicht abhängt. Die thermischen Wellen legen den Weg  $z$  durch das Bauteil zurück:

$$T_{0-ers2} = T_0 \cdot e^{i\omega t} e^{-\frac{z}{\mu_w}} e^{-\frac{z}{\mu}} (1+i) . \quad (2.30)$$

Zu beachten ist, dass die Phasenverschiebung in diesem Fall negativ ist, da sich die Wellen entgegengesetzt zu den bisher betrachteten thermischen Wellen bewegen. Integration innerhalb der Schichtdicke ergibt:

$$\begin{aligned} T_{0-ers2} &= T_0 \cdot e^{i\omega t} \cdot \int_0^d e^z \left( -\frac{1}{\mu_w} - \frac{1}{\mu} (1+i) \right) dz \\ &= T_0 \cdot e^{i\omega t} \frac{1}{\left( -\frac{1}{\mu_w} - \frac{1}{\mu} (1+i) \right)} \left( e^{\left( -\frac{d}{\mu_w} - \frac{d}{\mu} (1+i) \right)} - 1 \right) . \end{aligned} \quad (2.31)$$

In der Lösung für optisch angeregte Lockin-Thermografie (Gl. 2.16) wird anstelle der Oberflächenanregung ( $T_0 \cdot e^{i\omega t}$ ) die Summe der Ersatztemperaturen (Gl. 2.29 und Gl. 2.31) eingesetzt, dies ergibt die Gesamttemperatur an der Oberfläche elektrisch teiltransparenter Medien:

$$T_{ob} = \frac{T_{0-ers1} + T_{0-ers2}}{1 - R \cdot e^{-\frac{2d}{\mu}} (1+i)} . \quad (2.32)$$



Nach Real- und Imaginärteiltrennung kann mit Gl. 2.6 der Phasenwinkelverlauf  $\varphi(d/\mu)$  auf der Oberfläche der Probe bei zunehmender Defekttiefe  $d/\mu$ , in Abhängigkeit des Reflexionskoeffizienten  $R$  für verschiedene Materialien dargestellt werden. Der Phasenwinkel  $\varphi$  hat aufgrund der komplexen thermischen Impedanz einen Phasenoffset von 45 Grad [17].

Bei elektrisch gut leitfähigen Materialien, wie z.B. Stahl, ist die Wirbelstromeindringtiefe aufgrund des Skin-Effekts klein im Vergleich zur thermischen Eindringtiefe (Materialwerte in Tab. 2.1). Dieser Fall entspricht einem elektrisch opaken Medium, in Analogie zu optisch opaken Medien [58]. Die Induktionserwärmung ist hier vergleichbar mit der Oberflächenerwärmung der optisch angeregten Thermografie. Der Phasenwinkelverlauf für ILT an Stahl ist in einem 2-D Diagramm (Auswahl von Kurven) und in einem 3-D Diagramm dargestellt (Abb. 2.7, oben bzw. unten).

Wie erwartet ähnelt der Phasenwinkelverlauf dem der Optischen-Lockin-Thermografie (Abb. 2.3), jedoch mit dem Unterschied, dass bei  $R = 0$  im oberflächennahen Bereich eine Phasenänderung auftritt. Diese wird von den thermischen Wellen verursacht, die sich direkt vom erwärmten Volumen zur Oberfläche ausbreiten (Abb. 2.6), sie sind somit unabhängig vom Reflexionskoeffizienten. Der exponentielle Abfall der Phase nahe der Oberfläche ist durch die Temperaturverteilung nach dem Lambert-Beerschen Gesetz begründet (Gl. 2.27). Bei größeren Dicken  $d/\mu$  nähert sich der Phasenwinkel einem konstanten Wert von ca. 44,5 Grad (Abb. 2.7, unten).

Die Wirbelstromeindringtiefe bei Titan ist deutlich größer als bei Stahl, sie entspricht fast der thermischen Eindringtiefe (Materialwerte in Tab. 2.1). Titan ist somit nahezu elektrisch transparent. Auch für dieses Material wurde der ILT-Phasenwinkelverlauf in Abhängigkeit des Reflexionskoeffizienten in 2-D und 3-D Diagrammen bestimmt (Abb. 2.8, oben bzw. unten). Die Abhängigkeit des Phasenwinkels vom Reflexionskoeffizienten und der normierten Dicke kann auch in einem 2-D Diagramm dargestellt werden (Abb. 2.9 für Stahl und Titan).

Aufgrund der großen Wirbelstromeindringtiefe ist der Einfluss auf den Phasenwinkelverlauf deutlich stärker als z.B. bei der Stahlprobe und wirkt sich auch bei einem Reflexionskoeffizienten  $R = 0$  stark aus (Abb. 2.8, unten). Der durch das moduliert erwärmte Volumen verursachte Phasenwert beträgt ca. 25 Grad. Neben dieser Phasenverschiebung fällt auch eine Verschiebung der letzten eindeutigen Frequenz zu größeren  $d/\mu$  auf, dies bedeutet eine größere Tiefenreichweite bei der Defekterkennung. Bei einem Reflexionskoeffizienten von  $R = 1$  tritt dieser Phasenwinkel bei ca.  $2,15 d/\mu$  auf (Abb. 2.8, oben). Die Wirbelstromeindringtiefe der Induktionserwärmung erhöht also die Tiefenreichweite zur Defekterkennung beim elektrisch teiltransparenten Titan um bis zu ca.  $0,6 \mu$  im Vergleich zur berechneten Tiefenreichweite in Phasenbildern der optisch angeregten Lockin-Thermografie (etwa  $1,55 \mu$ ).

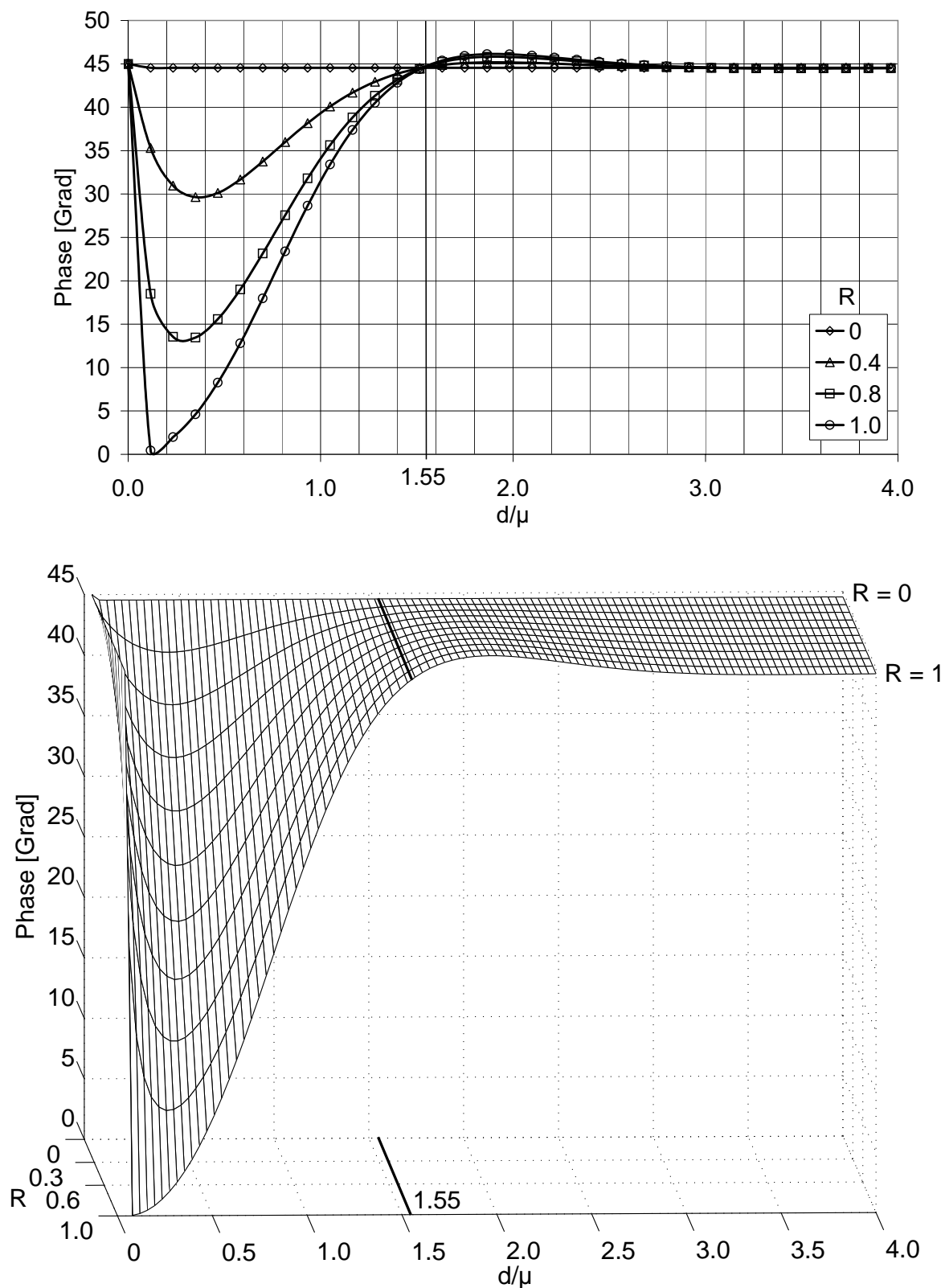


Abbildung 2.7: Phasenwinkelverlauf  $\varphi$  einer Stahlprobe bei 50 kHz Wirbelstromfrequenz, in Abhängigkeit des Reflexionskoeffizienten  $R$  und der normierten Defekttiefe  $d/\mu$ . Oben: 2-D Darstellung. Unten: 3-D Darstellung.

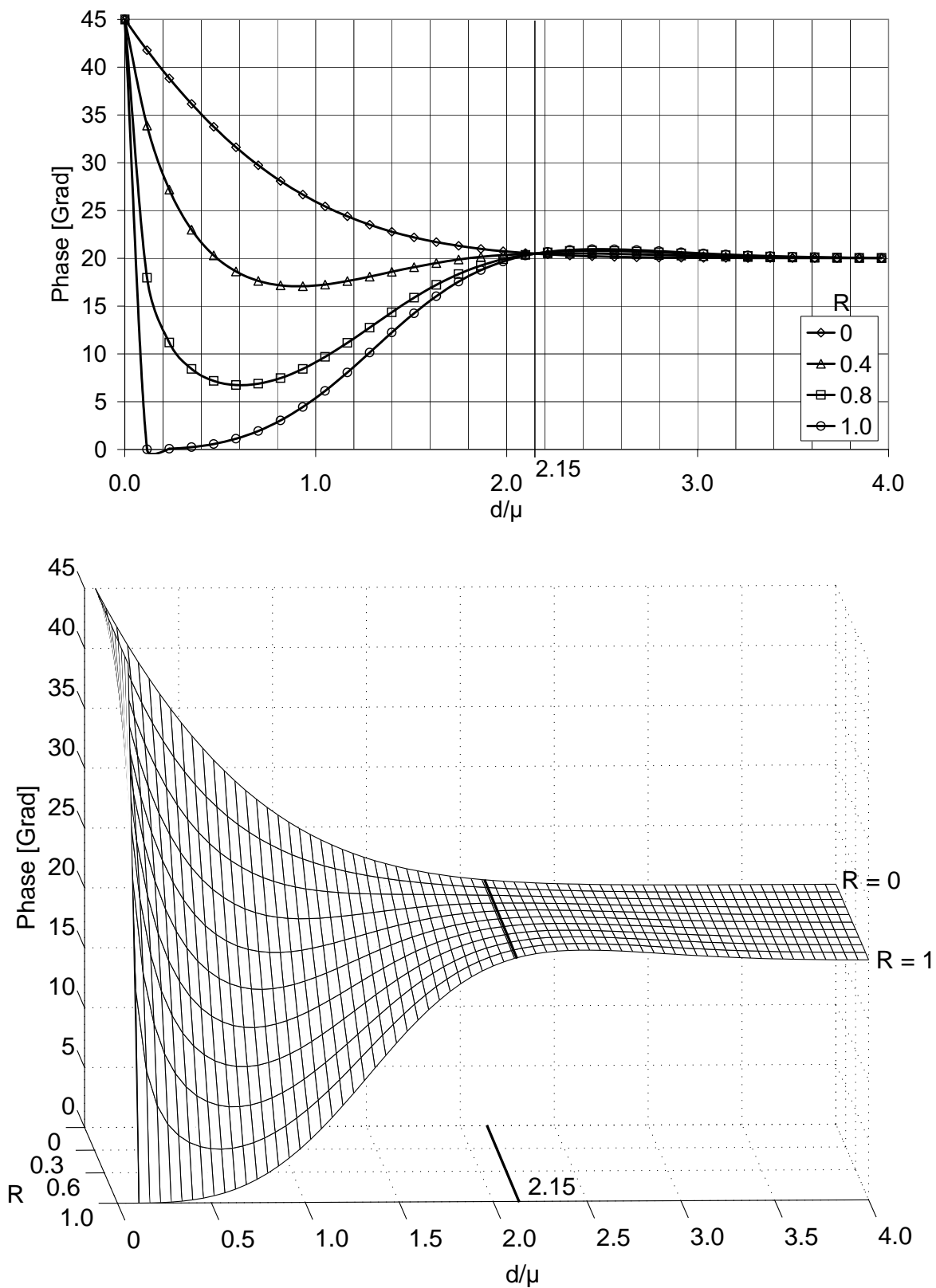


Abbildung 2.8: Phasenwinkelverlauf  $\varphi$  einer Titanprobe bei 50 kHz Wirbelstromfrequenz, in Abhängigkeit des Reflexionskoeffizienten  $R$  und der normierten Defekttiefe  $d/\mu$ . Oben: 2-D Darstellung. Unten: 3-D Darstellung.

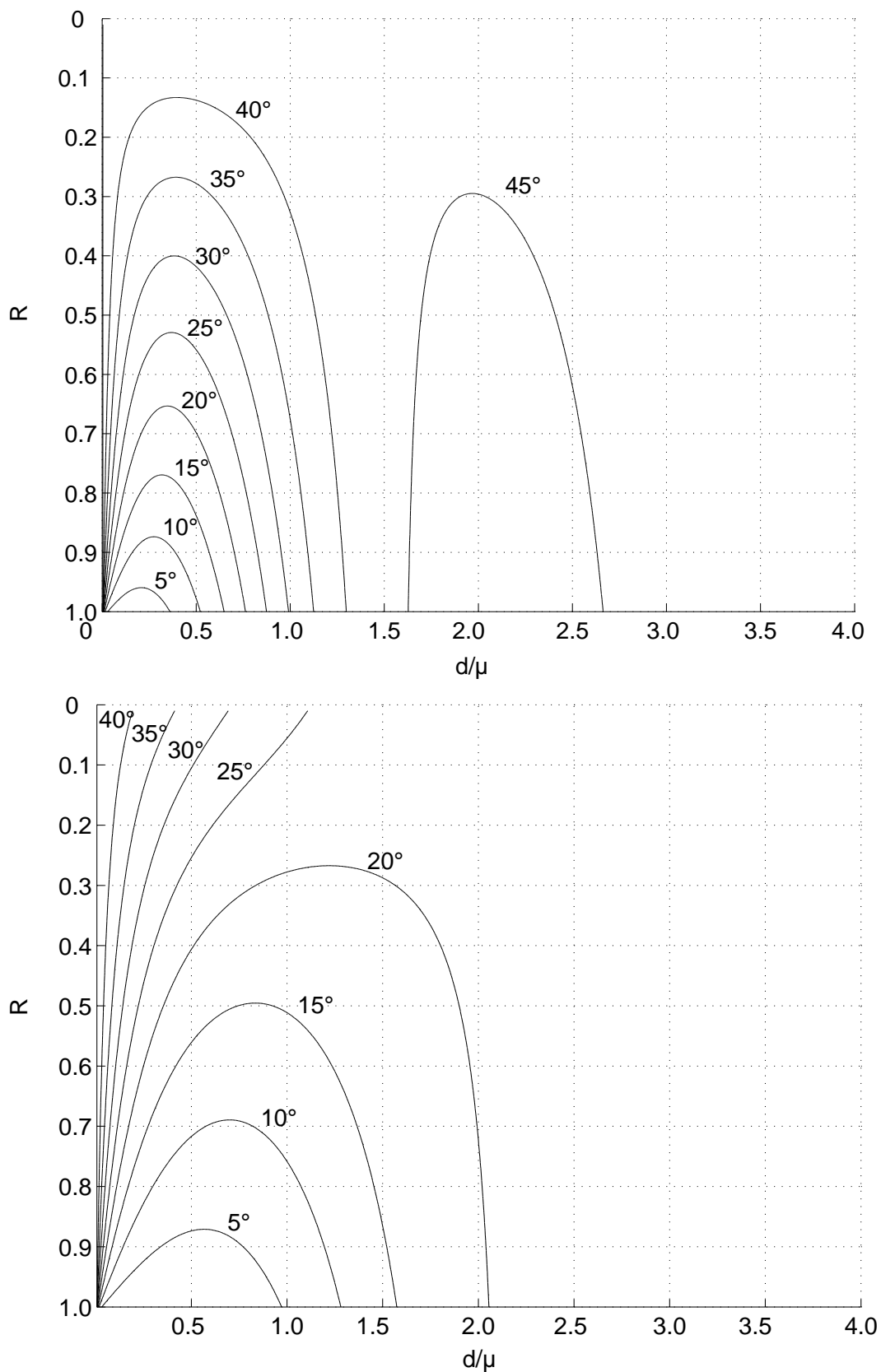


Abbildung 2.9: Linien gleichen Phasenwinkels  $\varphi$  bei 50 kHz Wirbelstromfrequenz, aufgetragen in Abhängigkeit vom Reflexionskoeffizienten  $R$  und der normierten Defekttiefe  $d/\mu$ . Oben: Stahl. Unten: Titan.

Die Auftragung des Phasenwinkels in Abhängigkeit des Reflexionskoeffizienten und der normierten Dicke (Abb. 2.9) ergibt Linien gleicher Phase wie Höhenlinien in einer Landkarte. Die Diagramme zeigen, dass der Phasenwinkel nicht eindeutig ist, da verschiedene Kombinationen aus Reflexionskoeffizient und normierter Dicke denselben Winkel ergeben. Dies kann bei quantitativen Messungen (nach Kalibrierung) zu Problemen führen, wenn z.B. eine Schicht teilweise abgelöst ist und sich dadurch der Reflexionskoeffizient geändert hat.

### ILT an elektrisch transparenten Materialien

Bei Materialien mit geringer elektrischer Leitfähigkeit ist die Wirbelstromeindringtiefe groß im Vergleich zur thermischen Eindringtiefe (Abb. 2.10), Defekte innerhalb der Wirbelstromzone sind elektrisch aktiv, sie erwärmen sich also selektiv stärker als das umgebende Material. Es handelt sich um den elektrisch transparenten ( $\mu_w > d$ ) und thermisch teiltransparenten ( $\mu \leq d$ ) Fall in Analogie zur Rosencwaig-Gersho Theorie [58].

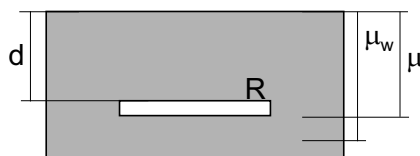


Abbildung 2.10: Elektrisch transparenter Fall: Der Defekt liegt innerhalb der thermischen Eindringtiefe  $\mu$  und innerhalb der Wirbelstromeindringtiefe  $\mu_w$ , der Defekt wird also durch die Wirbelströme direkt erwärmt.

Defekte werden durch ihren erhöhten elektrischen Widerstand oder durch lokale Konzentration der Wirbelströme direkt erwärmt, also stärker als ungeschädigtes Material. Die völlig berührungslose ILT hat also defektselektive Eigenschaften.

Defekte innerhalb der Wirbelstromeindringtiefe entsprechen lokalen Wärmequellen, zusätzlich zur durch den Lambert-Beer Ansatz beschriebenen Temperaturverteilung. Zur Berechnung der Phasenwinkelverteilung für elektrisch transparente Materialien wurde wieder ein beschichteter halbumendlicher Modellkörper verwendet. Da die Grenzfläche zwischen Beschichtung und Substrat den Defekt simuliert, wurde an dieser Grenzfläche eine Punktquelle (nach Lambert-Beer) eingefügt (Abb. 2.6).

Wie bei der Phasenwinkelberechnung für elektrisch teiltransparentes Material lassen sich auch bei elektrisch transparenten Medien Ersatztemperaturen auf der Oberfläche berechnen. Die Ersatztemperatur der direkten Einstrahlung aus dem erwärmten Volumen  $T_{0-ers2}$ , kann ohne Änderung aus dem teiltransparenten Fall übernommen werden (Gl. 2.31), bei der Ersatztemperatur der reflektierten thermischen Wellen (Gl. 2.29) ist noch die Amplitude der zusätzlichen Defekttemperaturmodulation  $T_D$  zu addieren:

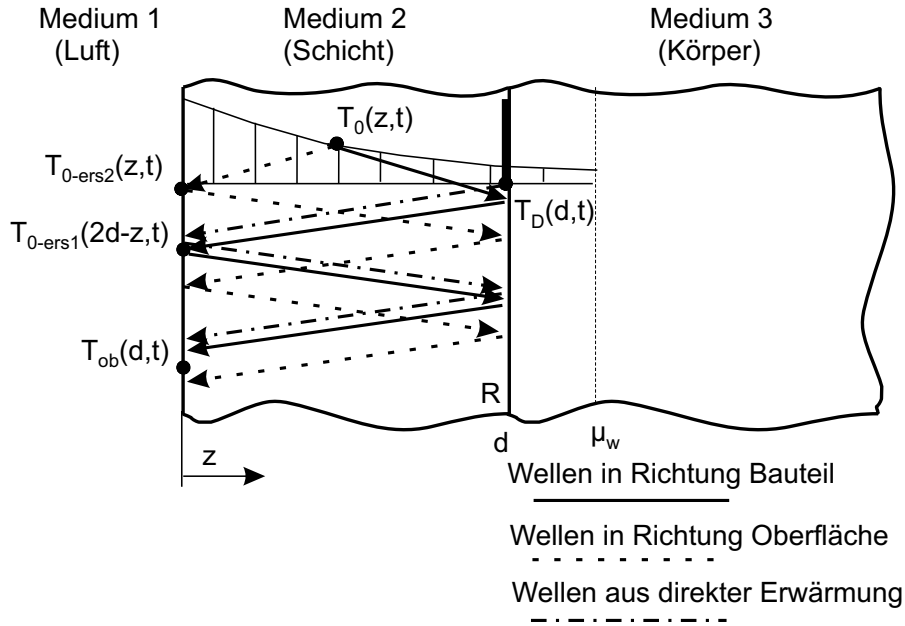


Abbildung 2.11: Modellprobe eines elektrisch transparenten Materials. Die Überlagerung der vom erwärmten Volumen und dem Defekt ausgestrahlten thermischen Wellen und von deren Reflexionen erzeugt eine Oberflächentemperatur, die mit der Infrarotkamera erfasst wird.

$$T_{0-ers1tr} = R \cdot T_0 \cdot e^{i\omega t} \frac{e^{-\frac{2d}{\mu}(1+i)}}{\left(-\frac{1}{\mu_w} + \frac{1}{\mu}(1+i)\right)} \left( e^{\left(-\frac{d}{\mu_w} + \frac{d}{\mu}(1+i)\right)} - 1 \right) + T_D e^{-\frac{d}{\mu_w}}. \quad (2.33)$$

Für die zusätzliche Wärmequelle wird z.B.  $T_D = 2 \cdot T_0 e^{i\omega t}$  angenommen, der Defekt würde sich also 2 mal stärker erwärmen als die Oberfläche des Körpers. Die komplexe Gesamttemperaturamplitude an der Oberfläche für elektrisch transparente Medien ergibt sich aus der Addition beider Ersatztemperaturen (Gl. 2.33 und Gl. 2.31):

$$T_{ob} = \frac{T_{0-ers1tr} + T_{0-ers2}}{1 - R \cdot e^{-\frac{2d}{\mu}(1+i)}}. \quad (2.34)$$

Nun kann z.B. der Phasenwinkelverlauf einer Kohlenstoffprobe (Werte in Tab. 2.1) bei zunehmender Defekttiefe in Abhängigkeit von  $R$  mit  $T_D = 2 T_0$  (Abb. 2.12) oder in Abhängigkeit der Defekttemperaturamplitude mit  $R = 1$  (Abb. 2.13) aufgetragen werden. In Kohlenstoff ist die Wirbelstrom Eindringtiefe deutlich größer als die thermische Eindringtiefe, deshalb sind die Interferenzerscheinungen der thermischen Wellen an der Oberfläche der Probe nicht so stark ausgeprägt wie z.B. bei Stahlproben. Der Einfluss des erwärmten Volumens und des Defekts auf den Phasenwinkelverlauf ist auch bei

$R > 0$  sehr groß (Abb. 2.12). Bei  $R = 0$  ist nur der Phasenanteil des erwärmten Volumens und des Defekts im Phasenwinkelverlauf enthalten. In dieser Kurve ist ein Abfall des Phasenwinkels bei zunehmender Defekttiefe (Schichtdicke) erkennbar, den die thermische Welle des Defekts verursacht (Abb. 2.12, mit  $R = 0$ ).

Da der Defekt direkt erwärmt wird, gelangt die von ihm ausgehende thermische Welle in einer Transmissionsanordnung an die Bauteiloberfläche, sie überlagert sich an der Bauteiloberfläche mit den reflektierten thermischen Wellen aus dem Volumen (Abb. 2.11). Eine thermische Welle in Transmission hat eine lineare Phasenverschiebung (Gl. 2.2), dieser lineare Anteil der Gesamtinterferenz an der Oberfläche wird um so stärker, je stärker der Defekt aufgeheizt wird, da somit auch die Defekttemperaturamplitude größer wird. Dies ist im Phasenwinkelverlauf in Abhängigkeit der Defekttemperaturamplitude zu sehen (Abb. 2.13 mit  $T_D = 10 T_0$ ).

Da es sich bei  $T_D = 0$  um den bereits behandelten Fall der ILT an elektrisch teiltransparenten Materialien handelt, also um eine Erwärmung ohne Einfluss des Defekts, ähnelt der Phasenwinkelverlauf der Kohlenstoff-Modellprobe (Abb. 2.13 mit  $T_D = 0$ ) erwartungsgemäß dem des nahezu transparenten Titan (Abb. 2.8 mit  $R = 1$ ). Die Phasenwerte sind allerdings von denen des Titans verschieden, da die Wirbelstrom Eindringtiefe in Kohlenstoff deutlich größer ist.

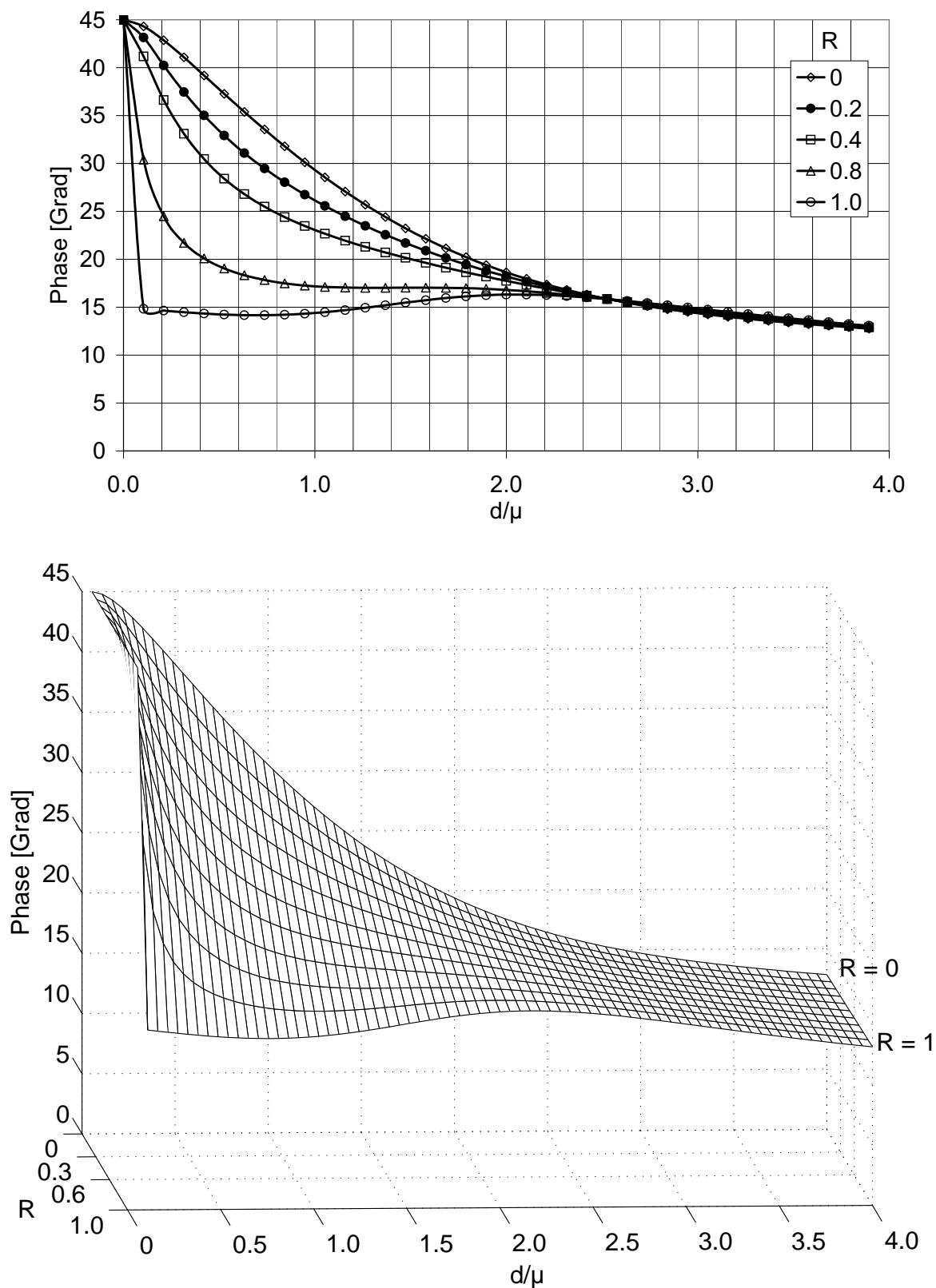


Abbildung 2.12: Phasenwinkelverlauf  $\varphi$  einer Probe aus Kohlenstoff bei 50 kHz Wirbelstromfrequenz und einer Defekttemperaturamplitude von  $T_D = 2 T_0$ . Variation der normierten Defekttiefe  $d/\mu$  und des Reflexionskoeffizienten  $R$ . Oben: 2-D Darstellung. Unten: 3-D Darstellung.



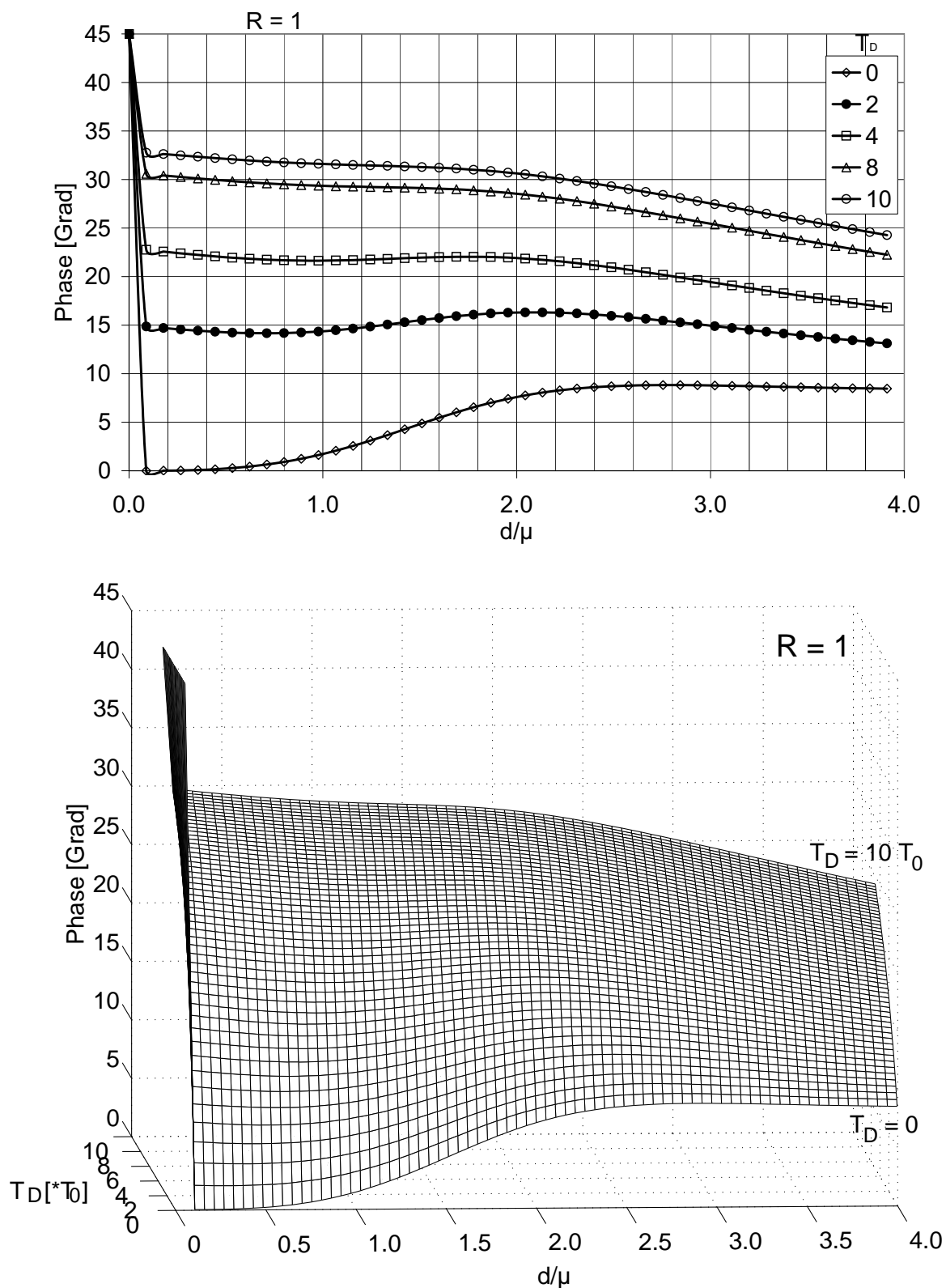


Abbildung 2.13: Phasenwinkelverlauf  $\varphi$  einer Probe aus Kohlenstoff bei 50 kHz Wirbelstromfrequenz und einem Reflexionskoeffizienten von  $R = 1$ . Variation der normierten Defekttiefe  $d/\mu$  und der Defekttemperaturamplitude in Abhängigkeit von  $T_0$ . Oben: 2-D Darstellung. Unten: 3-D Darstellung.

### ILT an elektrisch nicht leitfähigem Material mit elektrisch leitfähigem Einschluss

Dieser Sonderfall der ILT (thermisch opak  $\mu \ll d$ , elektrisch transparent  $\mu_w > d$ ) entspricht der selektiven Defektheizung durch Ultraschallanregung. Die elektrisch nicht leitfähige Probe selbst bleibt kalt (Abb. 2.14), eine thermische Welle entsteht nur im Defekt, der aus elektrisch leitfähigem Material besteht (z.B. Metallspäne in Polymeren).

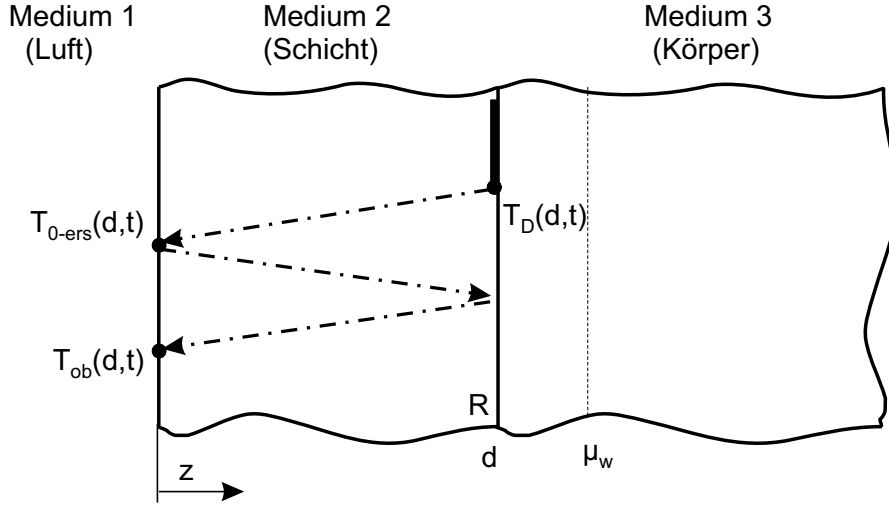


Abbildung 2.14: ILT an einer elektrisch nicht leitfähigen Probe mit elektrisch leitfähigem Einschluss (Defekt) innerhalb der Wirbelstromeindringtiefe.

Die Ersatztemperatur  $T_{0-ers}$  an der Oberfläche entspricht der bereits hergeleiteten Ersatztemperatur elektrisch teiltransparenter Materialien (Gl. 2.30). In diesem Fall muss sie jedoch nicht integriert werden, da der elektrisch leitfähige Einschluss eine Punktquelle in der Tiefe  $d$  darstellt und somit nur lokal eine thermische Welle erzeugt. Die Wirbelstromeindringtiefe ist für elektrisch nicht leitfähige Materialien irrelevant, es wird jedoch eine zur Erwärmung des Defekts ausreichend große Wirbelstromeindringtiefe angenommen und stattdessen, wie für den transparenten Fall, die Defekttemperaturmodulation vorgegeben (z.B.  $T_D = m \cdot T_0$ ):

$$T_{0-ers} = m \cdot T_0 \cdot e^{i\omega t} e^{-\frac{d}{\mu}} (1 + i) . \quad (2.35)$$

Einsetzen der Ersatztemperatur in die Lösung für Oberflächenerwärmung (Gl. 2.16) ergibt die Temperaturmodulation an der Oberfläche:

$$T_{ob} = m \cdot T_0 \cdot e^{i\omega t} \frac{e^{-\frac{d}{\mu}} (1 + i)}{1 - R \cdot e^{-\frac{2d}{\mu}} (1 + i)} . \quad (2.36)$$

Damit kann der Phasenwinkelverlauf für zunehmende Defekttiefe in Abhängigkeit der Defekttemperaturamplitude dargestellt werden (Abb. 2.15).

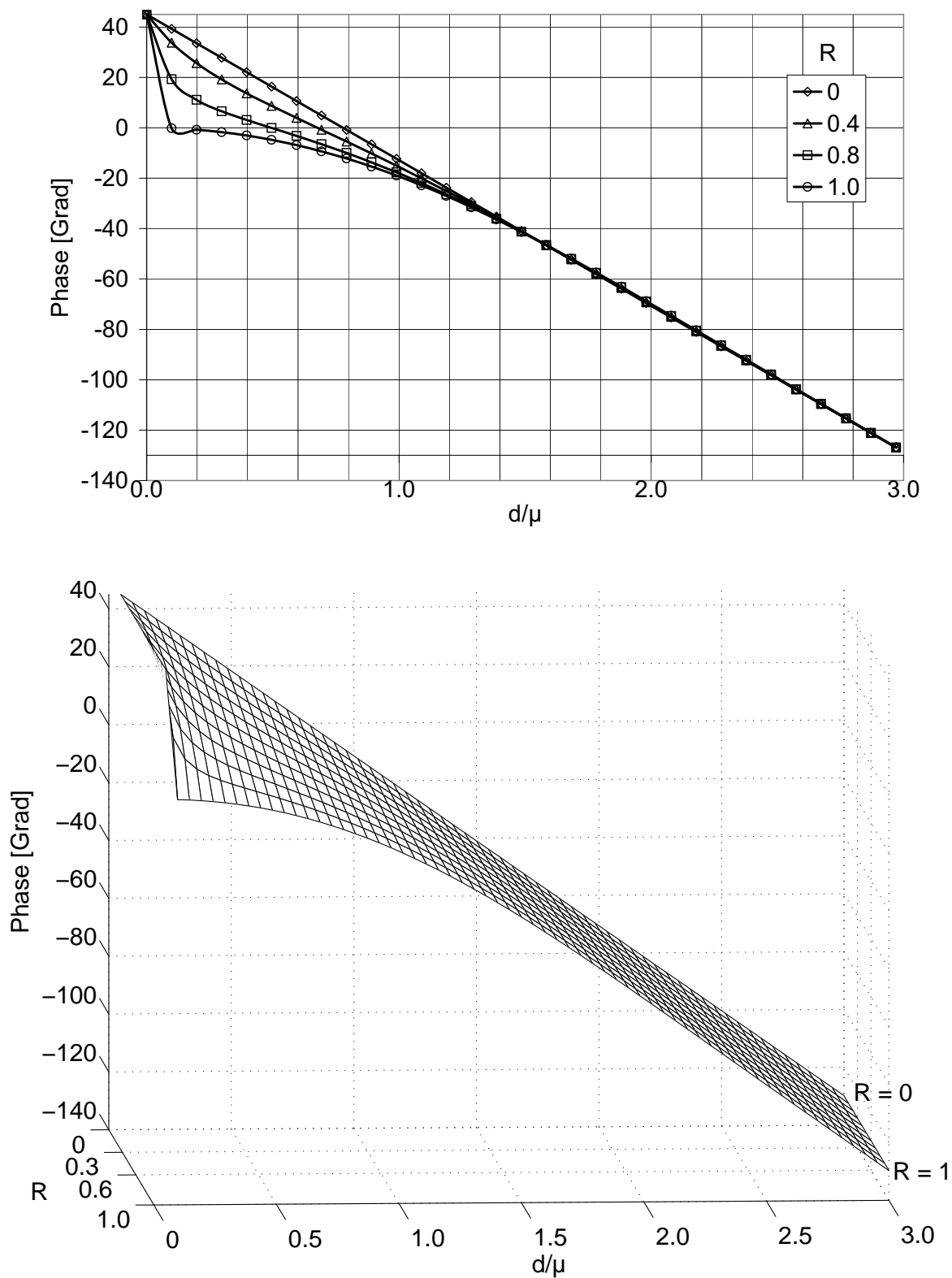


Abbildung 2.15: Phasenwinkelverlauf  $\varphi$  einer Probe aus elektrisch nichtleitendem Material mit einem elektrisch leitfähigen Defekt. Variation der normierten Defekttiefe  $d/\mu$  und des Reflexionskoeffizienten  $R$ . Oben: 2-D Darstellung. Unten: 3-D Darstellung.

Die Kurven sind ein Spezialfall des vorher behandelten Materials mit geringer elektrischer Leitfähigkeit (Abb. 2.13), da hier die Erwärmung aus dem Volumen entfällt und so nur die Transmissionsanordnung der vom Defekt erzeugten thermischen Welle übrig bleibt. Als Konsequenz ergibt die Phasenkurve bei einem Reflexionskoeffizienten  $R = 0$  eine Gerade (Abb. 2.15 mit  $R = 0$ ).

Bei größeren Reflexionskoeffizienten diffundiert die thermische Welle durch Reflexion an der Bauteiloberfläche und an der Grenzfläche (mit  $R$ ) wieder an die Oberfläche zurück und erzeugt dort die bekannten Interferenzen (Abb. 2.15 mit  $R > 0$ ). Da die Amplitude der thermischen Welle auf dem langen Weg durch das Bauteil stark gedämpft wird, fallen die Interferenzerscheinungen jedoch sehr klein aus.

Die Begrenzung der Tiefenreichweite für diesen Sonderfall der lokalen internen Erwärmung ist durch die gleichen Parameter gegeben wie bei der ultraschallangeregten Thermografie (Abschnitt 2.2.2).

# 3 Konzept und Aufbau der ILT Anlage

Induktions-Lockin-Thermografie nutzt eine Infrarotkamera zur zeitlichen und örtlichen Verfolgung von Temperaturfeldern auf der Probenoberfläche. Die Kamera ist in einem Messsystem integriert, das Lockin-Messungen ermöglicht. Eine Induktionsspule regt berührungslos Wirbelströme in elektrisch leitfähigen Materialien an. Sie ist Teil der Induktionserwärmungsanlage, die mit dem Messsystem zur synchronisierten Anregung gekoppelt ist. Die ILT-Anlage setzt sich also aus dem Messsystem (Lockin-Thermografie) und dem Anregungssystem (Induktions-Anlage) zusammen (Abb. 3.1).

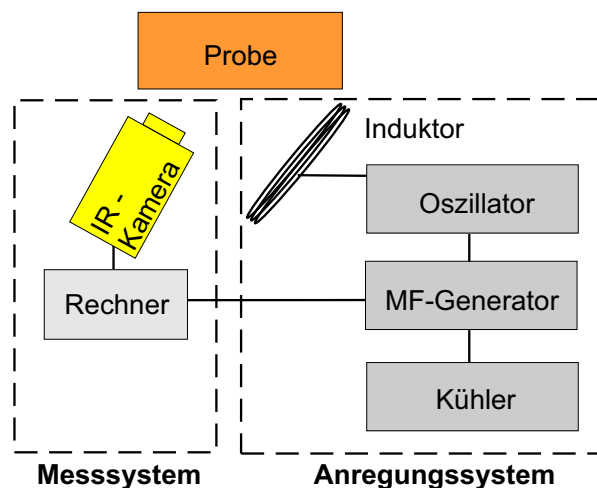


Abbildung 3.1: Schematischer Aufbau der ILT-Anlage.

Messsystem und Anregungssystem werden von der Anregungs- und Auswertesoftware des Messrechners gesteuert. Messungen sind sowohl in Transmissions- als auch in Reflexionsanordnung (Mess- und Anregungssystem auf derselben Probenseite) durchführbar.

## 3.1 Messsystem: Lockin-Thermografie

Die für die Messungen verwendete Infrarotkamera (CEDIP Infrared Systems: Emerald MWIR) hat einen Focal-Plane-Array Detektor mit 640\*512 Pixel, der durch seine große Anzahl von Bildpunkten eine hohe Auflösung erreicht. Das verwendete Objektiv hat eine Brennweite von 25 mm.

Der Quecksilber-Cadmium-Tellurid (MCT) Detektor wird mit 14 bit ausgelesen (bis zu  $2^{14} = 16384$  digitale Levels). Durch Zuordnung von Farb- oder Grauwerten sind die Wärmebilder kodiert darstellbar. Die digitalen Levels können nach einer Kalibrierung auch als Temperaturwerte angezeigt werden. Der MCT-Detektor ist im mittleren Infrarotwellenlängenbereich, also von  $3,7 - 4,8 \mu\text{m}$ , empfindlich. Der Vorteil dieses „mittleren“ Infrarotwellenlängenbereichs (MW) ist, dass Störstrahlungen von Körpern mit Raumtemperatur keinen großen Einfluss auf das von der Kamera aufgenommene Wärmebild haben, da nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz ein Körper mit  $20^\circ\text{C}$  seine maximale Abstrahlung bei  $9,9 \mu\text{m}$ , also im langwelligen Infrarotbereich hat.

Der Detektor ist durch einen Stirlingmotor gekühlt, da es sonst zu thermisch aktivierten Übergängen zwischen Valenz- und Leitungsband im Detektor kommt, die bei der Signalerzeugung mit der Photoleitung konkurrieren und Rauschen verursachen. Die kleinste auflösbare Temperaturdifferenz der verwendeten Kamera beträgt  $15 \text{ mK}$ . Ein empfindlicher Detektor ist vorteilhaft, um die Temperaturamplitude der Lockin-Messung und somit auch die im Bauteil induzierte Wirbelstromleistung kleinzuhalten.

Die maximale Bildwiederholrate für Lockin-Messungen im Vollbildmodus beträgt  $80 \text{ Hz}$ , durch Verkleinern der Bildgröße wird sie entsprechend erhöht (z.B.  $160 \text{ Hz}$  im Halbbildmodus). Besonders bei Burst-Phasen Messungen ist eine hohe Bildwiederholrate wichtig, um bei der Fouriertransformation über möglichst viele Bilder zu mitteln.

Das Auslesen der Kamera erfolgt synchronisiert mit der Bauteilanregung durch einen Computer (Motherboard: P4/800) und eine Messsoftware (DisplayIMG der Firma Edevis GmbH). Die Synchronisation erzeugt reproduzierbare Phasenwinkel im Ergebnisphasenbild. Somit sind Absolutphasenmessungen möglich, wie sie z.B. für Lackdickenmessung benötigt werden. Die Anregungs- und Auswertesoftware gibt gleichzeitig zum Start der Infrarotbildaufnahmen ein sinusförmig moduliertes Signal von  $0$  bis  $10 \text{ V}$  auf den Ausgang der Digital/Analogkarte zur Steuerung des Anregungssystems. Dabei entspricht  $0 \text{ V}$  einer Leistung von  $0 \%$  und  $10 \text{ V}$  einer Leistung von  $100 \%$  (also  $1,5 \text{ kW}$  elektrische Leistung am Generator). Wenn weniger Leistung benötigt wird, kann auch mit einer reduzierten Ausgangsspannung, z.B. von  $0$  bis  $5 \text{ V}$  (entsprechend  $0$  bis  $50 \%$ ), moduliert werden.

Die Phasenauswertung erfolgt parallel zur Messwerterfassung (Abb. 3.2). Der Computer berechnet dazu Fouriertransformationen über alle Pixel des aufgenommenen IR-Bilderstapels. Zum Beispiel werden bei einer Lockin-Messung mit  $0,1 \text{ Hz}$  von der Infrarotkamera (bei  $50 \text{ Hz}$  Bildwiederholrate)  $500$  Bilder pro Messperiode aufgenommen, also  $2000$  Bilder bei vier Messperioden. Jedes einzelne Bild besteht aus  $640 \times 512$  Pixel, es wird also über  $640 \times 512$  „Pixelsäulen“ mit je  $2000$  Pixel fouriertransformiert (in diesem Beispiel insgesamt  $6,5536 \times 10^8$  Bildpunkte). Als Ergebnis gibt das Messsystem ein Amplituden- und ein Phasenbild aus.

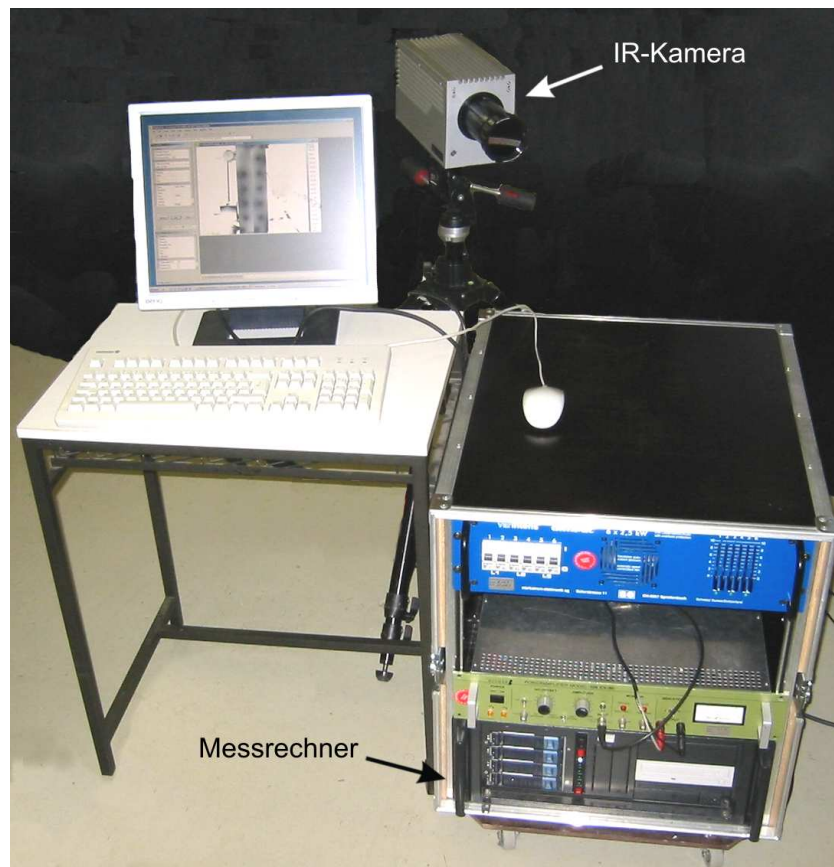


Abbildung 3.2: Photo des Messsystems.

## 3.2 Anregungssystem: Induktions-Anlage

Es wurde eine kommerziell erhältliche Induktions-Erwärmungs-Anlage (MF-Generator TIG 1,5/300) der Firma Hüttinger Elektronik GmbH + Co. KG zur Bauteilanregung verwendet, die sich aus einem Mittel-Frequenz-Generator (Netzteil) und einem Oszillator zusammen setzt. Das Netzteil ist luftgekühlt, der Schwingkreis im Oszillator hingegen wassergekühlt (Abb. 3.3).

### 3.2.1 Mittelfrequenz-Generator

Der MF-Generator benötigt Drehstrom. Die Netzspannung wird potentialfrei über einen Transformator und einen Brückengleichrichter dem Schaltregler zugeführt, der mit 20 kHz getaktet wird. Er erzeugt eine LC-gefilterte Gleichspannung (Zwischenkreisspannung) [65], die über einen Sollwert im Bereich 0 bis 100 % stufenlos extern über eine Anlogschnittstelle mit einem 0 bis 10 VDC Signal einstellbar ist. Dies ermöglicht die Modulation der Wirbelstromamplituden, wie sie für die Lockin-Messung mit Phasenauswertung benötigt wird.

Die Zwischenkreisspannung bestimmt die Ausgangsleistung von bis zu 1,5 kW (100 %).

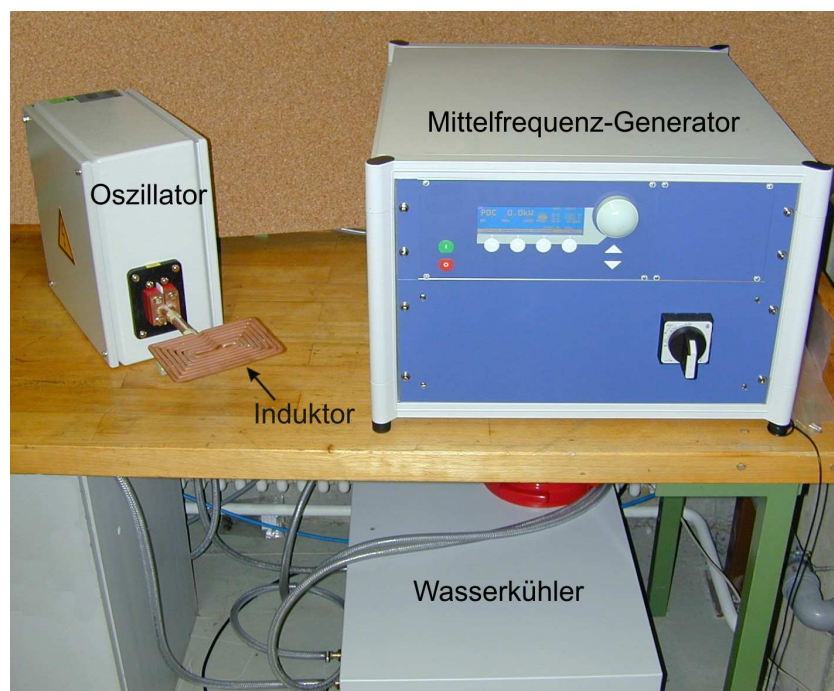


Abbildung 3.3: Photo der Induktionsanlage.

Da die verwendete IR-Kamera eine NETD von ca. 15 mK hat und bei der Auswertung Phasenbilder verwendet werden, ist normalerweise nur eine kleine Temperaturamplitude für die modulierte Anregung nötig. Die Leistung der Induktionserwärmungsanlagen (ausgelegt für Metallbearbeitung wie z.B. Anlassen oder Randschichthärten) ist für die meisten Anwendungsfälle ausreichend.

Die Tiefenreichweite zur Defekterkennung bei ILT ist eine Kombination aus thermischer Eindringtiefe und Wirbelstromeindringtiefe, die wiederum sowohl von den elektrischen Eigenschaften des untersuchten Materials, als auch von der Wirbelstromfrequenz abhängt (Gl. 2.26 in Abschnitt 2.2.3). Der MF-Generator hat einen Wirbelstromfrequenzbereich von 30 bis 300 kHz, der über den Oszillator (Kondensatoren, Vorspule und Induktor) eingestellt wird.

### 3.2.2 Oszillator

Der Oszillator erzeugt aus der Gleichspannung des Zwischenkreises (Abschnitt 3.2.1) eine sinusförmige Wechselspannung. Er beinhaltet Überwachungselektronik, einen MF-Verstärker und einen Schwingkreis, der die Ausgangsfrequenz bestimmt. Letzterer besteht aus einem oder mehreren Plattenkondensatoren  $C_1$  bis  $C_4$ , einer Vorspule  $L_{vor}$  und einem Induktor  $L_{ind}$ , mit dem die Mittelfrequenzleistung auf die Probe übertragen wird (Abb. 3.4) [65].

Die Induktivität der Vorspule ist über vier Spulenanschlüsse von 0 (Überbrückung der Vorspule:  $0 \mu\text{H}$ ) bis 3 (maximale Vorspulenwindungszahl:  $0,9 \mu\text{H}$ ) einstellbar. Die Gesam-



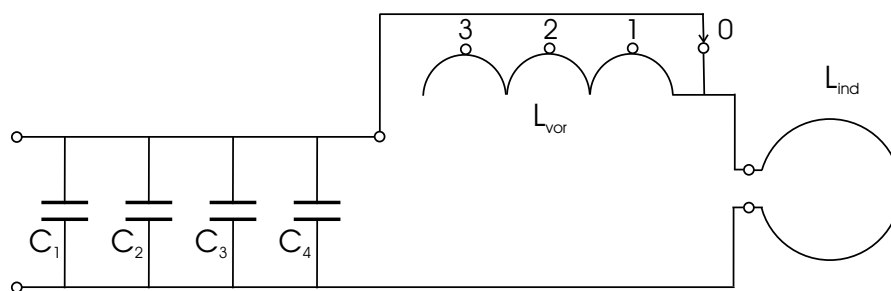


Abbildung 3.4: Parallelschwingkreis des Oszillators mit Induktor  $L_{ind}$ , Vorspule  $L_{vor}$  und Kondensatoren  $C_1$  bis  $C_4$  [65].

Induktivität  $L_{ges}$  des Schwingkreises ergibt sich aus  $L_{vor}$  und der geometrieabhängigen Induktivität der Arbeitsspule (Induktor)  $L_{ind}$  (Abschnitt 3.2.3):

$$L_{ges} = L_{ind} + L_{vor}. \quad (3.1)$$

Die Gesamtkapazität  $C_{ges}$  des Schwingkreises addiert sich aus den Einzelkapazitäten  $C_1$  bis  $C_4$ :

$$C_{ges} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4. \quad (3.2)$$

Die Ausgangsfrequenz des Oszillators berechnet sich damit aus:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{ges} \cdot C_{ges}}}. \quad (3.3)$$

Damit die MF-Nennleistung auf die zu untersuchende Probe übertragen werden kann, muss durch Veränderung der Kapazität bzw. der Induktivität des Schwingkreises dessen Impedanz an die Impedanz des Induktors angepasst werden. Wenn z.B. die Impedanz des Schwingkreises zu groß und somit der Ausgangsstrom zu klein wird, kann nicht mehr die volle Leistung übertragen werden, die Impedanz muss verringert werden, indem die Induktivität verringert und gleichzeitig die Kapazität vergrößert wird [65].

Der Oszillator arbeitet in einer Gegentaktschaltung. Er erhält seine Rückkopplung leistungslos aus dem Schwingkreis. Der Stromverbrauch des MF-Generators ist durch die Verluste im Schwingkreis und in der Last bestimmt [65].

### 3.2.3 Induktoren

Wie bereits im vorangegangenen Kapitel des Oszillators (Abschnitt 3.2.2) erläutert, setzt sich die Gesamtinduktivität des Schwingkreises aus der vierstufig einstellbaren Induktivität der Vorspule  $L_{vor}$  und der Induktivität der Anregungsspule  $L_{ind}$  zusammen (Gl.

3.1), die durch gezieltes Auslegen einstellbar ist. Die Induktivität langer Zylinderspulen ohne Kern (Luftspulen) ist durch geometrische Parameter (Windungszahl  $N$ ), dem magnetischen Fluss  $\phi$  und der anliegenden Stromstärke  $I$  gegeben:

$$L_{ind} = N \frac{\phi}{I} . \quad (3.4)$$

Der magnetische Induktionsfluss ist wiederum abhängig von der magnetischen Flussdichte  $B$  und der Fläche der Spule  $A_s$ :

$$\phi = B \cdot A_s = B \cdot \frac{\pi}{4} D_s^2, \quad (3.5)$$

mit dem Spulendurchmesser  $D_s$  bei runden Zylinderspulen. Die Magnetische Flussdichte wird durch die magnetische Feldstärke  $H$  und die absolute Permeabilität  $\mu_p$  bestimmt, die sich aus der relativen Permeabilität (materialabhängig)  $\mu_r$  und der Permeabilität im Vakuum  $\mu_0$  zusammensetzt:

$$B = \mu_p \cdot H = \mu_p \cdot N \cdot \frac{I}{l} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N \cdot \frac{I}{l} . \quad (3.6)$$

Diese Gleichung zeigt, dass auch die Länge  $l$  der Spule die Induktivität beeinflusst. Die Induktivität einer langen Zylinderspule kann nun in Abhängigkeit der geometrischen Parameter ausgedrückt werden:

$$L_{ind} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N^2 \frac{\pi}{4} D_s^2}{l} . \quad (3.7)$$

Nach Einsetzen dieser Gleichung in die Formel für die Gesamtinduktivität (Gl. 3.1) lässt sich die resultierende Frequenz des Oszillators (in Abhängigkeit der Gesamtkapazität und der Gesamtinduktivität aus  $L_{ind}$  und  $L_{vor}$ ) berechnen (Gl. 3.3).

Über die Geometrie des Induktors ist die Wirbelstromfrequenz einstellbar. Dazu geht man von der benötigten Gesamtinduktivität aus (aus Gl. 3.3) und berechnet daraus die Induktivität der Anregungsspule (Gl. 3.1). Mit diesem Wert lassen sich die geometrischen Parameter für das Spulendesign variieren, bis die benötigte Spuleninduktivität erreicht ist (Gl. 3.7). Die folgende Tabelle zeigt den Einfluss der geometrischen Parameter auf die resultierende Wirbelstromfrequenz in Beispielrechnungen (Tab. 3.1). Für den Abstand von Windung zu Windung wurde in dem Rechenbeispiel 10 mm gewählt, da bei der wassergekühlten Induktionsanlage Kupferrohr (Durchmesser 4 mm) als Spulenmaterial verwendet werden muss. Die Gesamtkapazität beträgt in dem Berechnungsbeispiel 1,32  $\mu\text{F}$ , die Vorspule wurde überbrückt (0  $\mu\text{H}$ ).

Die berechneten Werte der resultierenden Induktionsfrequenz zeigen die starke Abhängigkeit von Windungszahl und Außendurchmesser der Spule (Tab. 3.1). Mit den gewählten Durchmessern von 50 mm und 150 mm ist bereits der gesamte durch den Generator begrenzte Frequenzbereich von 30 bis 300 kHz abgedeckt.

N	l [mm]	$D_{s1}$ [mm]	$L_{ind}$ [ $\mu$ H]	$f_{ind}$ [kHz]	$D_{s2}$ [mm]	$L_{ind}$ [ $\mu$ H]	$f_{ind}$ [kHz]
1	10	50	0,2	278,9	150	2,2	93,0
2	20	50	0,5	197,2	150	4,4	65,7
3	30	50	0,7	161,0	150	6,7	53,7
4	40	50	1,0	139,4	150	8,9	46,5
5	50	50	1,2	124,7	150	11,1	41,6
6	60	50	1,5	113,9	150	13,3	38,0
7	70	50	1,7	105,4	150	15,5	35,1
8	80	50	2,0	98,6	150	17,8	32,9
9	90	50	2,2	93,0	150	20,0	31,0
10	100	50	2,5	88,2	150	22,2	29,4

Tabelle 3.1: Auslegung einer langen Zylinderspule ohne Kern. Auswirkung geometrischer Parameter (Windungszahl N, Länge l und zwei verschiedene Außendurchmesser  $D_{s1}$  und  $D_{s2}$ ) auf die Induktivität und die resultierende Wirbelstromfrequenz.

Aufgrund der Feldinhomogenität des vorhandenen Induktors wurde ein zylindrischer Induktor mit 7,6 cm Außendurchmesser und 13 cm Länge entworfen [66] (Abb. 3.5).

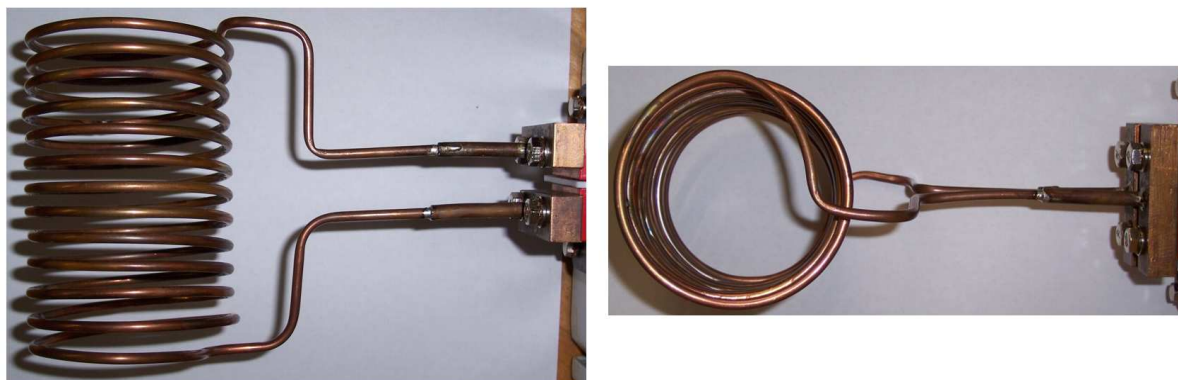


Abbildung 3.5: Lange Zylinderspule mit resultierender Wirbelstromfrequenz von ca. 51 kHz. Es wird das homogene äußere Feld zur Erwärmung verwendet.

Die lange Zylinderspule besteht aus 4 mm dickem Kupferrohr mit 13 Windungen und ergibt (mit einer Gesamtkapazität von  $1,32 \mu\text{F}$  und überbrückter Vorspule) eine Wirbelstromfrequenz von ca. 51 kHz. Das homogenere äußere Feld der Zylinderspule ist relativ schwach im Vergleich zum starken inneren Feld. Die Induktionsleistung ist jedoch aufgrund der hohen elektrischen Leistung des Generators (1,5 kW elektrische Leistung) und der Empfindlichkeit der Infrarotkamera (15 mK Temperaturauflösung) ausreichend. Des

weiteren werden bei ILT meistens Phasenbilder zur Auswertung verwendet, die Temperaturamplituden spielen darin nur eine untergeordnete Rolle (z.B. im S/N-Abstand).

### **3.2.4 Kühler**

Durch einen Wasserkreislauf werden der Induktor, die Vorspule und die Kondensatoren des Oszillators gekühlt. Die Durchflussmenge des Oszillators bei 4 bar beträgt etwa 6 l/min bei einer maximalen Kühlwassertemperatur von 30 °C [65].

# 4 Experimentelle Untersuchung zu Tiefenreichweite und Auflösung

## 4.1 Einfluss elektrischer und thermischer Materialeigenschaften

Kapitel 2 behandelte Einflussfaktoren auf den Phasenwinkelverlauf bei Induktions-Lockin-Thermografie an einem Modellkörper. Es zeigte sich, dass dieser Phasenwinkelverlauf, und damit auch die Tiefenreichweite zur Defekterkennung, von der thermischen und der elektrischen Eindringtiefe abhängt.

Im folgenden Kapitel wird dieser Einfluss bei Messungen an Modellproben untersucht.

### 4.1.1 Messungen an Modellproben mit Sacklochbohrungen

Die Modellproben aus verschiedenen Materialien (Stahl, Aluminium und CFK) haben auf der Rückseite Flachbodenlöcher mit verschiedenen großen Durchmesser und definierter Restwandstärke zur Probenoberfläche. Geprüft wird von der Oberfläche aus, also unter Ausnutzung der Reflexion thermischer Wellen.

#### Ergebnisse an Stahl-Sacklochprobe

Untersucht wurde eine Sacklochprobe aus Stahl (100 \* 100 mm). Die Löcher haben einen Durchmesser von 4 bis 7 mm bei einer jeweiligen Restwandstärke zur Oberfläche von 2 bis 6 mm (Abb. 4.1).

Das ILT-Ergebnis an der Stahlprobe wurde mit dem Phasenbild der optisch angeregten Lockin-Thermografie verglichen (Abb. 4.2), da die Wirbelstromeindringtiefe in Stahlproben durch den „Skin Effekt“ begrenzt ist (Gl. 2.26, Tab. 2.1) und somit die Wirbelstromheizung der Oberflächenheizung optisch angeregter Thermografie entspricht. Die Oberfläche wurde zur Steigerung des Absorptionskoeffizienten (Erhöhung der absorbierten Wärme bei OLT) geschwärzt.

Das ILT-Phasenbild zeigt die untersten drei Reihen der simulierten Fehlstellen (Abb. 4.2, rechts). Dies bestätigt die Überlegung, dass die Tiefenreichweite zur Defekterkennung bei ILT an Stahlproben nicht von der Wirbelstromeindringtiefe (ca. 0,02 mm), sondern von

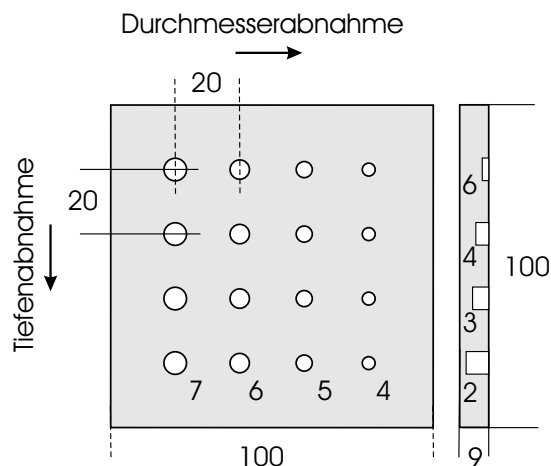


Abbildung 4.1: Skizze der Stahlprobe mit Sacklochbohrungen.

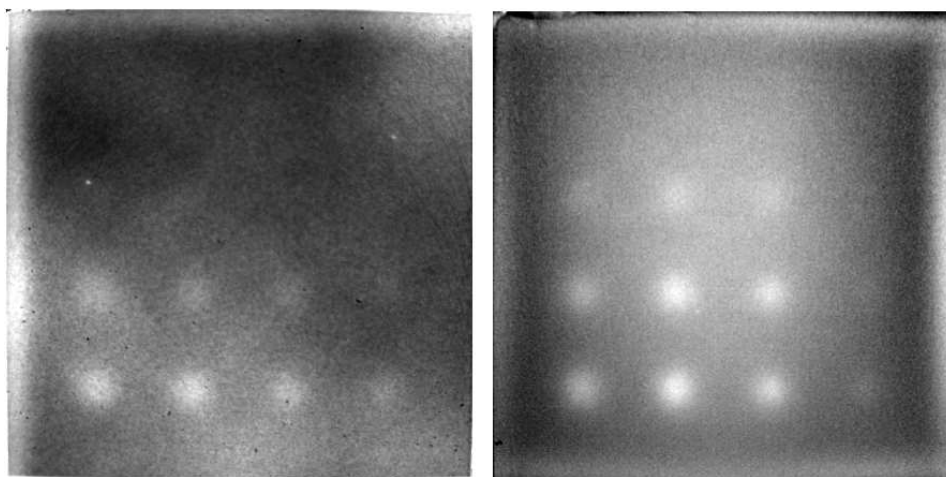


Abbildung 4.2: Stahlprobe mit Sacklochbohrungen. Links: OLT Phasenbild bei 0,5 Hz.  
Rechts: ILT Phasenbild bei 0,5 Hz (nachträglich entzerrt) [54]

der thermischen Eindringtiefe abhängt. Die Tiefenreichweite konnte also mit wirbelstromangeregter Lockin-Thermografie im Vergleich zur konventionellen Wirbelstromprüfung deutlich gesteigert werden.

Die thermische Eindringtiefe von Stahl bei einer Lockin-Frequenz von 0,5 Hz liegt bei ungefähr 3,5 mm. Da Phasenbilder eine Tiefenreichweite von bis zu etwa  $1,8 \mu$  haben [18, 62] müssten sowohl im OLT- (Abb. 4.2, links) als auch im ILT-Phasenbild (Abb. 4.2, rechts) alle simulierten Fehlstellen sichtbar sein. Da dies offensichtlich nicht der Fall ist, wird die Tiefenreichweite wahrscheinlich vom Signal/Rausch-Verhältnis (S/N) begrenzt. Im OLT-Phasenbild sind Defekte bis zu einer Tiefe von 3 mm sichtbar, während das ILT-Phasenbild noch die Bohrlochreihe mit einer Restwandstärke von 4 mm zeigt. Zur Untersuchung dieses Sachverhalts wurde der Phasenwinkelverlauf entlang der untersten Bohrlochreihe dargestellt (Abb. 4.3).

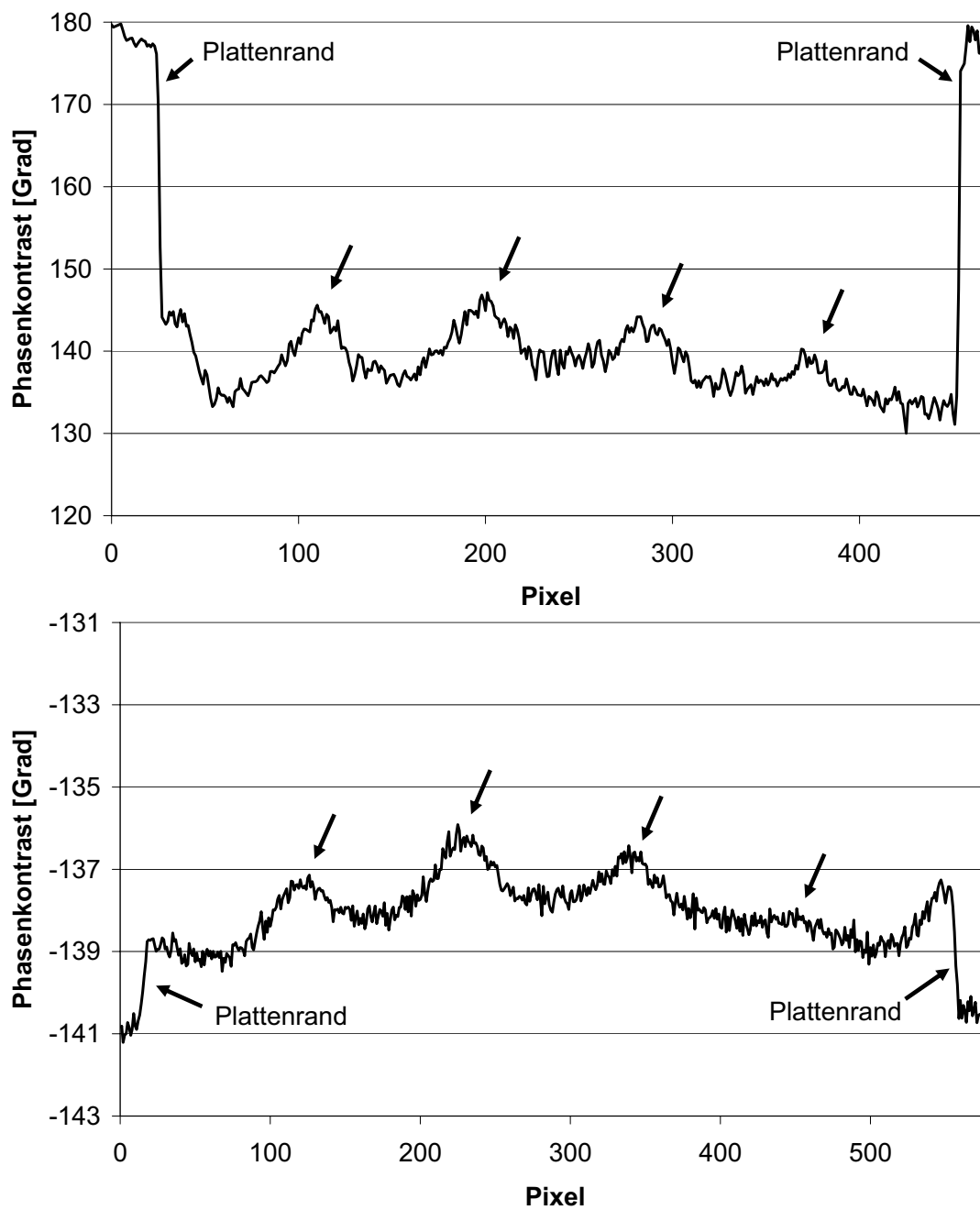


Abbildung 4.3: Phasenverläufe entlang der untersten Bohrlochreihe. Die Signale der Bohrlöcher sind durch Pfeile gekennzeichnet. Oben: OLT. Unten: ILT.

Die Phasenwinkelverläufe zeigen, dass zwar die Signalamplituden der Bohrungen (durch Pfeile gekennzeichnet) bei OLT im Vergleich zu denen von ILT größer sind (Abb. 4.3), allerdings ist das OLT-Signal auch deutlich stärker verrauscht. Bei OLT erzeugt z.B. das zweite Bohrloch von links ein Signal von ca.  $7^\circ$ , das Rauschen beträgt etwa  $1^\circ$ . Das S/N-Verhältnis bei OLT ist in diesem Fall also ca. 7. Im Vergleich dazu ist das Signal desselben Bohrlochs bei ILT nur etwa  $1,5^\circ$ , jedoch ist auch das Rauschen nur ca.  $0,2^\circ$ , damit ergibt sich ein S/N von ca. 7,5. Somit ist trotz größerer Signalamplitude bei OLT das Signal/Rausch-Verhältnis bei ILT geringfügig größer. Der Grund hierfür liegt wahrscheinlich in einer größeren Anregungsamplitude. Bei OLT muss das Licht der Halogenlampen (4 kW elektrische Leistung) auf der Oberfläche absorbiert werden, während ILT die Wärme durch ohmsche Verluste der induzierten Wirbelströme (elektrische Leistung 0,225 kW) direkt im Bauteil erzeugt. Die induktive Erwärmung ist also effektiver als die optische Heizung und erzeugt ein besseres S/N-Verhältnis und damit, in diesem Messbeispiel, eine etwas größere Tiefenreichweite.

Der Grund für das um den Faktor 4,7 kleinere Signal der ILT im Vergleich zu OLT an derselben Fehlstelle mit derselben Lockin-Frequenz ist allerdings unklar. Die theoretischen Überlegungen an elektrisch teiltransparenten Proben (Abschnitt 2.2.3) haben zwar gezeigt, dass der Phasenwinkel durch die Wirbelstromeindringtiefe beeinflusst wird, für den Fall der Oberflächenheizung lag dieser Einfluss jedoch nur im Bereich von ca.  $0,5$  Grad (Abb. 2.7). Diese Messungen zeigen aber, dass die Änderung des Absolutphasenwinkels durch die induktive Heizung im „realen“ 3-D Fall doch deutlich stärker ausfallen kann, als aufgrund der 1-D Rechnungen erwartet.

### Ergebnisse an Aluminium-Sacklochprobe

Die Stahlprobe des vorangegangenen Abschnitts ist gut wärmeleitend und ferromagnetisch. Die in diesem Abschnitt durchgeführte ILT Prüfung an einer paramagnetischen Aluminium-Sacklochprobe mit sehr hoher Wärmeleitung untersucht den Materialeinfluss auf die ILT-Ergebnisse (Abb. 4.4).

Auch bei diesem Material ist die Wirbelstromeindringtiefe sehr viel kleiner als die thermische Eindringtiefe (Tab. 2.1). Die Modellprobe wurde zum Vergleich auch mit OLT bei einer Lockin-Frequenz von 1 Hz geprüft (Abb. 4.5). Beide Untersuchungen erfolgten von der Vorderseite in Reflexionsmode.

Das Phasenbild der ILT erscheint weniger verrauscht als das OLT-Phasenbild, allerdings sind im ILT-Phasenbild keine simulierten Defekte zu erkennen (Abb. 4.5). Das OLT-Phasenbild zeigt stark verrauscht die unterste Sacklochreihe mit einer Restwandstärke von 5 mm und einem Durchmesser von 11 bis 7 mm. Bei der hohen thermischen Eindringtiefe von ca. 5,6 mm sollten auch die anderen Löcher zu sehen sein. Problematisch ist, dass aufgrund der sehr hohen Wärmeleitung im Aluminium und des damit verbundenen



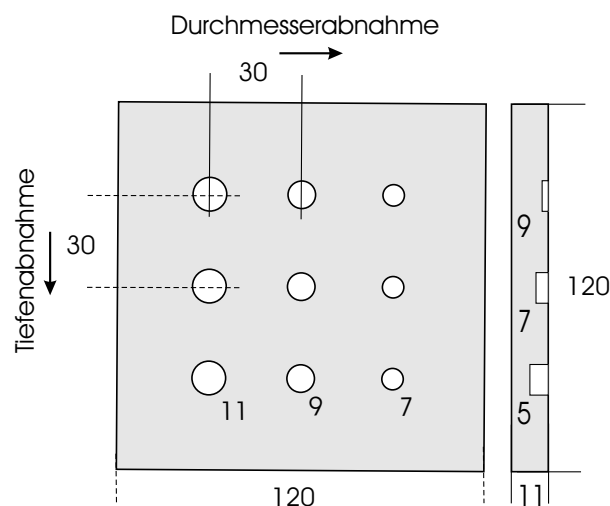


Abbildung 4.4: Skizze der Aluminiumprobe mit Sacklochbohrungen.

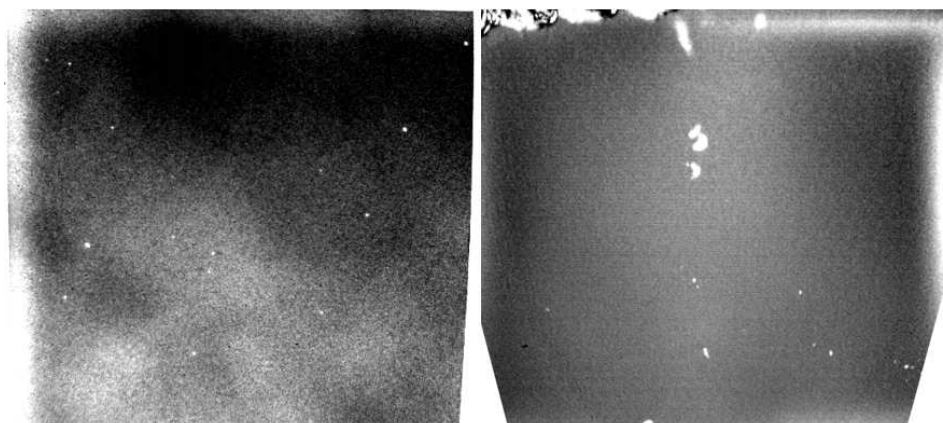


Abbildung 4.5: Aluminiumprobe mit Sacklochbohrungen. Links: OLT Phasenbild bei 1 Hz. Rechts: ILT Phasenbild bei 1 Hz (nachträglich entzerrt)

lateralen Wärmeflusses die thermische Welle zerfließt und so die Umrisse der simulierten Defekte verwischt. Die Auswertung geht von einem eindimensionalen Wärmefluss aus (Abschnitt 2) und kann deshalb den lateralen Wärmefluss nicht berücksichtigen. Wahrscheinlich wäre zur Detektion der untersten Sacklochreihe (Restwandstärke 5 mm) eine deutlich höhere Lockin-Frequenz (z.B. 3,5 Hz mit einer thermischen Eindringtiefe von ca. 3 mm) besser geeignet, um so die Auflösung zu erhöhen und den lateralen Wärmefluss zu verringern. Mit den verwendeten Halogenlampen der OLT und der Induktionserwärmungsanlage von ILT sind so hohe Frequenzen allerdings nicht möglich.

### Ergebnisse an CFK-Sacklochprobe

Wie bereits oben behandelt, sind mit ILT nicht nur metallische Bauteile prüfbar, sondern z.B. auch kohlefaserverstärkte Kunststoffe (CFK). Wenn eine isotrope Gesamtleit-

fähigkeit des Laminats mit der im Vergleich zu metallischen Werkstoffen um mehrere Zehnerpotenzen geringeren elektrischen Leitfähigkeit der Kohlefasern (z.B. spezifische elektrische Leitfähigkeit von UD-Laminat:  $\sigma = 0,2 \cdot 10^{-4} \frac{m}{mm^2}$  [55] im Vergleich zu Stahl mit  $\sigma = 8 \frac{m}{mm^2}$  [67]) angenommen wird, ist eine hohe Wirbelstromeindringtiefe bis zur Volumenheizung zu erwarten. Bei einer Wirbelstromfrequenz von 50 kHz würde die Wirbelstromeindringtiefe etwa 50 cm betragen (Gl. 2.26) und wäre somit deutlich größer als die thermische Eindringtiefe (z.B. ca. 1,1 mm bei einer Lockin-Frequenz von 0,1 Hz und  $\alpha = 0,4 \frac{mm^2}{s}$  [17]). In diesem Fall erwärmen die Wirbelströme die Defekte direkt, für sie gilt dann die Transmissionsanordnung, bei der die thermische Eindringtiefe  $\mu$  den Abfall der Amplitude beeinflusst (Abb. 2.4). Um dies zu überprüfen, wurde eine CFK-Modellprobe mit Multiaxiallege (MAG) untersucht (Abb. 4.6).

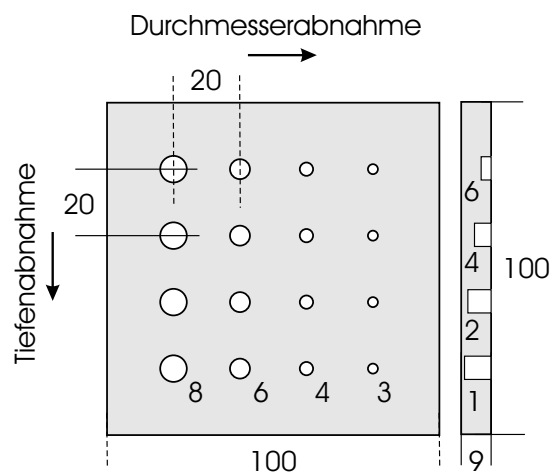


Abbildung 4.6: Skizze der CFK-Probe mit Sacklochbohrungen.

MAG sind textile Flächengebilde, die aus einzelnen Faserbündeln (Rovings) bestehen, welche in einer Ebene parallel zueinander und in Schichten unterschiedlicher Faserorientierung übereinander angeordnet sind und durch ein Maschensystem der Kett-Nähfäden zusammengehalten werden [68]. Die Platte wurde im Autoklaven des Instituts für Flugzeugbau (IFB) der Universität Stuttgart mit dem luftfahrtzugelassenen Harz RTM6 (Hexcell) gefertigt (Probe freundlicherweise überlassen von Dipl.-Ing. Heike Wagner, IFB). Das 9 mm dicke Laminat hat einen quasi-isotropen Aufbau. Nach Herstellung der Platte wurden Sacklöcher verschiedener Durchmesser (3 bis 8 mm) eingefräst. Die Restwandstärken zur Bauteiloberfläche betragen 1 bis 6 mm.

Das auf der glatten Frontseite erhaltene ILT-Phasenbild der CFK-Sacklochprobe wurde mit dem OLT-Phasenbild, das durch die thermische Eindringtiefe begrenzt ist, verglichen (Abb. 4.7).

Im OLT-Phasenbild ist gerade noch die zweite Sacklochreihe mit einer Restwandstärke von 2 mm zu erkennen (Abb. 4.7, links). Dies entspricht der erwarteten Tiefenreichweite von etwa  $1,8 \mu$  für das Phasenbild bei 0,1 Hz. Im ILT-Phasenbild sind keine simulierten

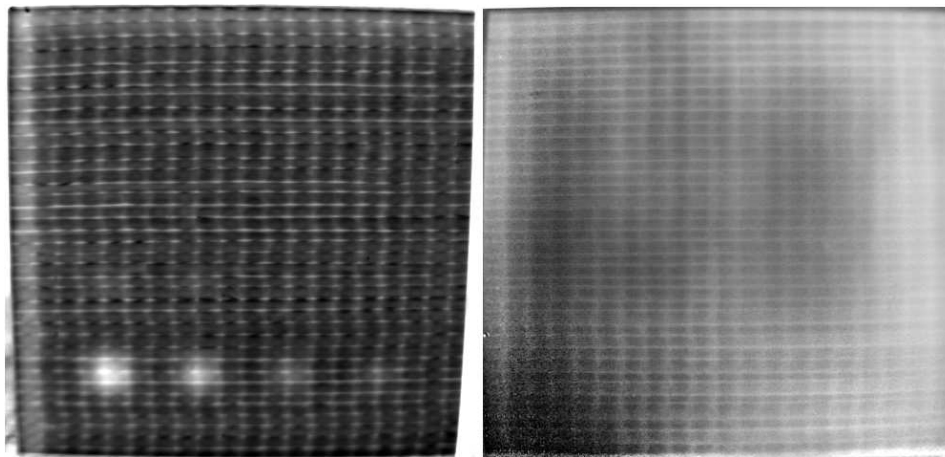


Abbildung 4.7: CFK-Probe mit Sacklochbohrungen. Links: OLT Phasenbild bei 0,1 Hz.  
Rechts: ILT Phasenbild bei 0,1 Hz (nachträglich entzerrt)

Fehlstellen erkennbar (Abb. 4.7, rechts), die Annahme der Volumenheizung ist in diesem Fall also nicht zutreffend. Eine Schwierigkeit der Wirbelstromanregung an CFK ist, dass die elektrischen Eigenschaften entgegen der Annahme, aufgrund der Kohlefaserlagen nicht homogen und auch nicht isotrop sind. Die im CFK induzierten Ringspannungen erzeugen Leitungs- und Verschiebestrome (Gl. 2.24). Die Leitungsströme sind weitgehend an die elektrisch leitfähigen Kohlefasern und die ohmschen Kontakte zwischen den Fasern gebunden, während die Verschiebestromdichte von den dielektrischen Eigenschaften der Matrix, dem Faseranteil und den lokalen geometrischen Verhältnissen (Faserdurchmesser, Faserabstand, etc.) abhängt [55]. Wahrscheinlich können sich lediglich in den ersten Lagen des CFK-Laminats Wirbelströme ausbilden, da der ohmsche Kontakt zwischen den Kohlefaserlagen fehlt und eine induktive Kopplung von einer Kohlefaser zur nächsten bei einer Wirbelstromfrequenz von 50 kHz noch zu schwach ausgeprägt ist [56]. Die anisotrope elektrische Leitfähigkeit des CFK hat wahrscheinlich auch eine inhomogene Wärmeenergieerzeugung innerhalb des Laminats zur Folge. Erschwerend kommt neben der elektrischen Anisotropie des CFK auch eine thermische Anisotropie dazu, da die Wärmeleitfähigkeit in Faserrichtung ( $\lambda_{\parallel} \approx 0,04 \frac{W}{cm \cdot K}$ ) deutlich größer ist als senkrecht dazu ( $\lambda_{\perp} \approx 0,006 \frac{W}{cm \cdot K}$ ) [17]. Damit sind laterale thermische Kurzschlüsse gegeben, die die Wärmeausbreitung in Richtung der Bauteiloberfläche behindern.

#### 4.1.2 Besonderheiten bei Messungen an CFK

Die vorangegangenen Messungen an der CFK-Sacklochplatte haben gezeigt, dass ILT-Messungen an CFK sehr viel komplexer sind als z.B. Messungen an metallischen Bauteilen. Der folgende Abschnitt behandelt die Besonderheiten, die bei ILT-Inspektionen an CFK zu beachten sind.

### CFK-Platte mit Impactschaden, geprüft in verschiedenen Orientierungsrichtungen

Durch gezielte Faserorientierung der einzelnen CFK-Lagen werden die mechanischen Eigenschaften des CFK auf den jeweiligen Anwendungsfall angepasst. Diese Faserorientierung erzeugt auch eine elektrische Anisotropie, da in CFK nur die in der Polymermatrix eingebetteten Kohlefasern elektrisch leitfähig sind.

Die Inspektion einer 4,3 mm dicken MAG-CFK Platte (Probe freundlicherweise überlassen vom IFB der Universität Stuttgart) zeigt, wie die Faserorientierung der äußeren Lage relativ zur Magnetfeldrichtung das ILT-Ergebnis beeinflusst. Die symmetrisch aufgebaute Platte  $[2(\pm 45^\circ, 0^\circ/90^\circ)]_S$  hat in der Mitte eine 25 J Impactschädigung. Die Inspektionen mit OLT und ILT erfolgten auf der dem Impact abgewandten Rückseite der Platte (Abb. 4.8).

Das Drehen der Probe nach jeder ILT-Inspektion verändert die Faserorientierung der äußeren Lage (angezeigt durch schwarze Pfeile) relativ zu den magnetischen Feldlinien (angezeigt durch hellgraue waagerechte Pfeile, parallel zur Achse der Zylinderspule). Am oberen Rand der ILT-Phasenbilder ist die Induktionsspule mit ihrer thermischen Abschirmung sichtbar (Abb. 4.8, rechts oben und unten). Die Probe wurde dabei so gedreht, dass sich der Impactschaden immer an derselben Stelle relativ zur Spule befindet.

Die OLT-Inspektion wurde bei derselben Lockin-Frequenz durchgeführt wie die ILT-Messungen. Da OLT auf thermische Grenzflächen anspricht, zeigt das OLT-Phasenbild die bei Impactschäden charakteristischen großflächigen Delaminationen (Abb. 4.8, links oben). Die durch den Impact verursachte Absplitterung der ersten Lage (der Rückseite) und die Faserbrüche der folgenden CFK-Lagen verändern die lokale elektrische Leitfähigkeit der Probe und führen so bei induktiver Anregung zu einer lokalen Erwärmung dieser Defektstellen. Eine Voraussetzung für diese induktive Erwärmung ist allerdings ein erfolgreiches Generieren von Wirbelströmen in den geschädigten Kohlefasern. Da dies aber von der Faserorientierung zum Magnetfeld abhängt, zeigen die Phasenbilder bei verschiedenen Orientierungsrichtungen unterschiedliche Ergebnisse und Defekte. In der vorgestellten Messreihe scheint eine  $0^\circ$  Faserorientierung der äußeren Lage besonders vorteilhaft zur effektiven Anregung der Faserbrüche der zweiten Lage (Orientierung  $90^\circ$  zum Magnetfeld) zu sein (Abb. 4.8, rechts unten). Bei den Faserorientierungen  $45^\circ$  und  $90^\circ$  relativ zur Richtung des Magnetfeldes ist dagegen nur die Absplitterung der ersten Lage zu sehen, die bereits optisch erkennbar ist (Abb. 4.8, rechts oben und links unten). Der Kontrast der Absplitterung ist bei einer Orientierung  $90^\circ$  zum Magnetfeld am größten (Abb. 4.8, links unten).

Wirbelströme können demnach am effektivsten in Kohlefasern mit einer Orientierung  $90^\circ$  zum Magnetfeld induziert werden.

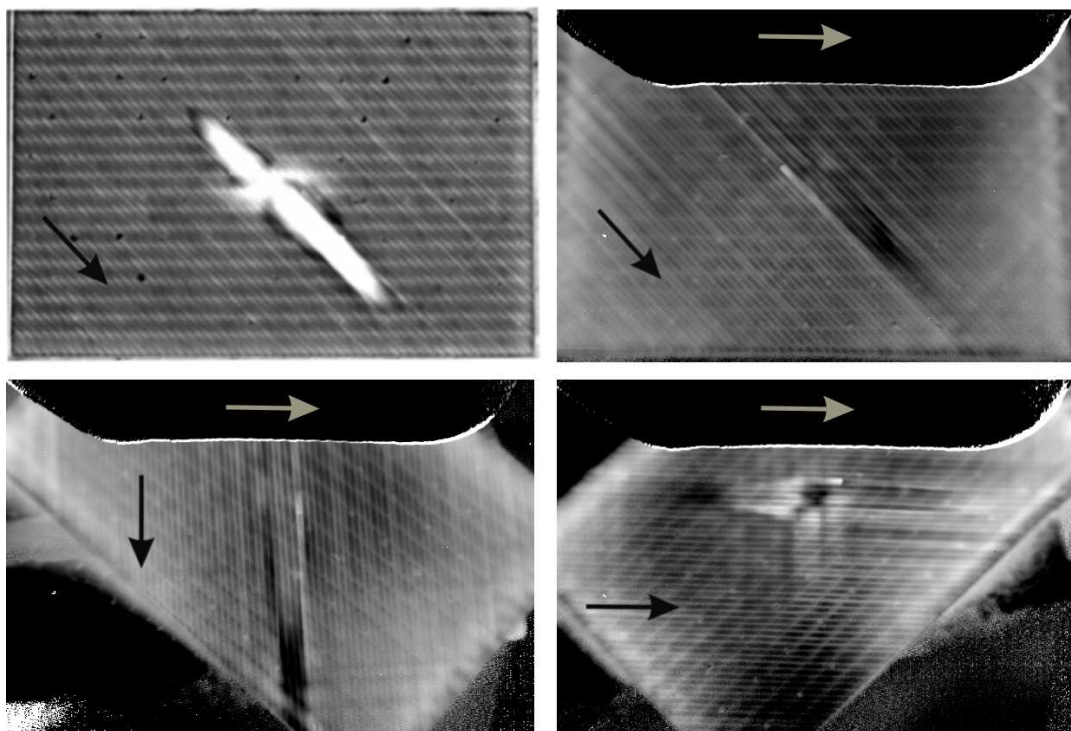


Abbildung 4.8: CFK-Platte mit Impactschaden. Links oben: OLT Phasenbild der Rückseite bei 0,1 Hz. Rechts oben und unten: ILT Phasenbilder der Rückseite bei 0,1 Hz und drei verschiedenen Faserorientierungen der äußeren Lage (schwarze Pfeile) relativ zur Richtung der magnetischen Feldlinien der Spule (graue Pfeile) [69].

### UD-CFK-Platte mit unterschiedlich orientierten Elementen

Die an der CFK-Impactprobe beobachtete Richtungsabhängigkeit der Induzierbarkeit von Wirbelströmen in Kohlefasern wurde an einer weiteren Probe untersucht. Es handelt sich dabei um eine  $30 \times 30 \text{ cm}^2$  große und ca. 2,5 mm dicke Platte mit unidirektionalem Gelege (UD). Bei der Herstellung wurden kreisrunde Elemente aus den CFK-Lagen ausgestanzt und anschließend in unterschiedlichen Tiefen und um bestimmte Winkel verdreht wieder eingebaut (Probe freundlicherweise überlassen vom DLR - Stuttgart). Es entsteht so eine UD-Platte mit Einzelsegmenten anderer Orientierung in unterschiedlicher Tiefenlage (Abb. 4.9).

Die UD-Platte wurde mit OLT und mit ILT bei verschiedenen Orientierungsrichtungen untersucht (Abb. 4.10). Bei einer ILT-Messung waren die UD-Fasern der Platte (angezeigt durch waagerechten schwarzen Pfeil) parallel zur Richtung der magnetischen Feldlinien (weißer Pfeil), bei einer weiteren Prüfung waren die UD-Lagen senkrecht zum magnetischen Feld. Der Induktor wurde um die Probe bewegt, damit Probe und Kamera unverändert bleiben konnten.

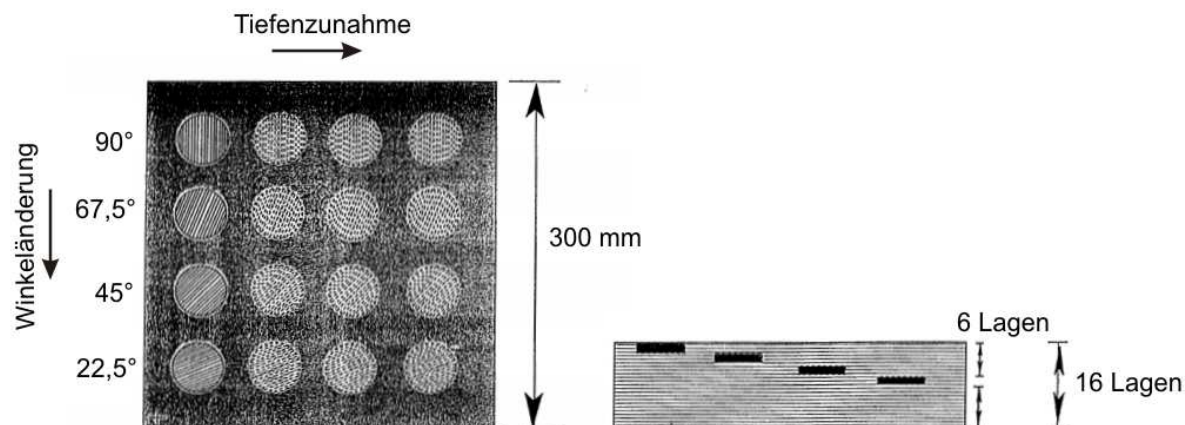


Abbildung 4.9: UD-CFK-Platte mit kreisförmigen Bereichen, die in unterschiedlichen Tiefen verdreht und an derselben Stelle wieder eingebaut wurden. In der einen Richtung ändert sich der Winkel, in der anderen die Tiefe.

Wie bei den vorhergehenden Messungen an den Impactproben bereits festgestellt, werden die senkrecht zum magnetischen Feld liegenden Kohlefasern am stärksten erwärmt. Dies ist besonders deutlich am ILT-Phasenbild der UD-Platte mit Faserorientierung parallel zum Induktor sichtbar (Abb. 4.10, links unten). Die Platte selbst erwärmt sich nur sehr gering, während die kreisförmigen Elemente mit einer Ausrichtung senkrecht zum magnetischen Feld im Phasenbild deutlich sichtbar sind.

Diese Messung entspricht dem bereits theoretisch behandelten Fall einer leitfähigen Schicht innerhalb eines nicht leitfähigen Materials (Abschnitt 2.2.3). Die kreisrunden Elemente werden in der Tiefe des Materials erwärmt, die Wärme gelangt somit in einer Transmissionsanordnung an die Bauteiloberfläche. Die Phasenbilder der ILT bestätigen diese Überlegungen, da sie eine höhere Tiefenreichweite im Vergleich zu den OLT-Phasenbildern (Abb. 4.10, links oben) zeigen.

Bei der Plattenanordnung mit den UD-Lagen senkrecht zur Magnetfeldrichtung werden in den Kohlefasern Wirbelströme induziert, die entlang der Fasern laufen und so die gesamte Platte erwärmen, es sind damit auch Elemente an der linken Kante zu erkennen (Abb. 4.10, rechts unten). Es ist also möglich, den Kontrast der Kreisscheiben über die Richtung des Magnetfeldes zu schalten und so entweder die Kreisscheiben selektiv anzuregen oder die UD-Fasern der Platte zu erwärmen.

In beiden Orientierungsrichtungen sind alle Elemente der obersten Reihe (Orientierung 90° zur UD-Faserrichtung) detektierbar. Das tiefste Element ist dabei in ca. 1 mm Tiefe. Dies zeigt, dass im Fall der UD-Platte nicht nur in den obersten Lagen Wirbelströme induziert werden.

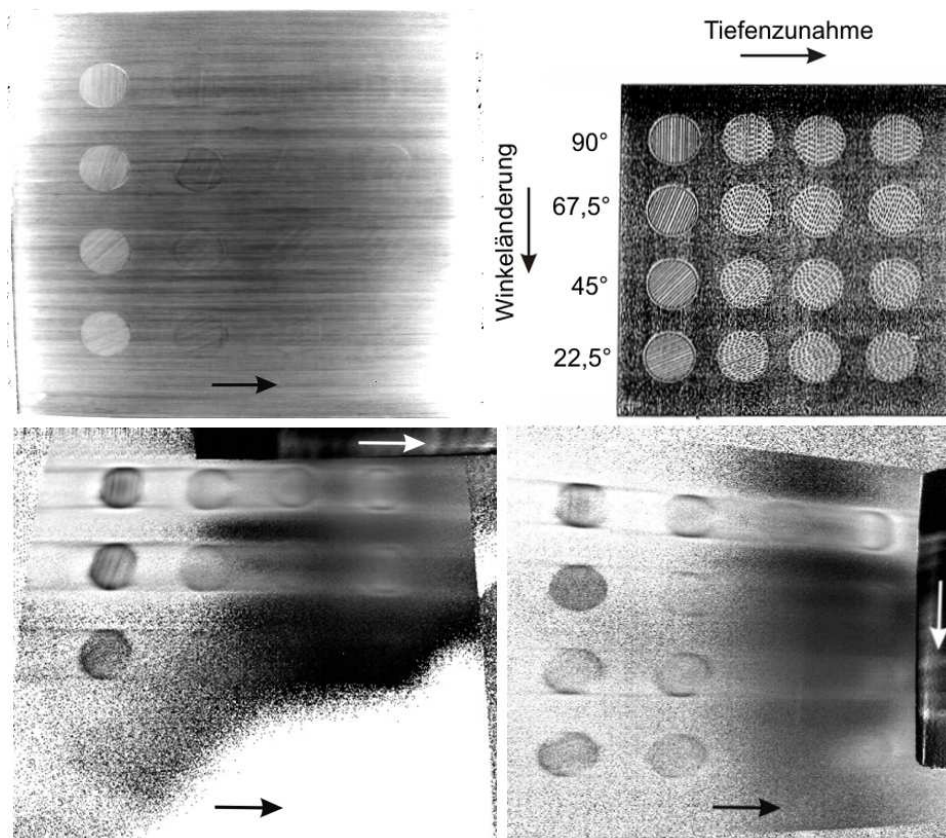


Abbildung 4.10: UD-CFK-Platte mit unterschiedlich orientierten Kreisscheiben. Links  
 Oben: OLT Phasenbild bei 0,1 Hz. Rechts Oben: Skizze der Probe.  
 Unten: ILT-Phasenbilder bei 0,1 Hz. Links unten: UD-Faserorientierung  
 (schwarzer Pfeil) parallel zum Magnetfeld (weißer Pfeil). Rechts unten:  
 UD-Faserorientierung senkrecht zum Magnetfeld.

## 4.2 Detektionsgrenzen der ILT

Die Detektion von Defekten in Bauteilen ist durch den Defektkontrast und die Defektauflösung begrenzt, da diese Größen wesentlich die Tiefenreichweite beeinflussen. Im folgenden Abschnitt werden Phasenkontrast und laterale Auflösungsgrenzen der ILT am Beispiel einer Stahlprobe untersucht.

### 4.2.1 Phasenkontrast einer Stahlprobe mit Einfräsungen

An einer Stahl-Modellprobe mit keilförmigen Einfräsungen (Abb. 4.11) wurde der Phasenkontrast der Ergebnisbilder von induktiver Transienten-Thermografie und von Induktions-Lockin-Thermografie untersucht.

In die 6 mm dicke Stahlprobe wurden zwei verkippte Einfräsungen mit einer Länge von 50 mm, einer Breite von 1,5 mm und einem Abstand von 1,6 mm zueinander eingefräst.

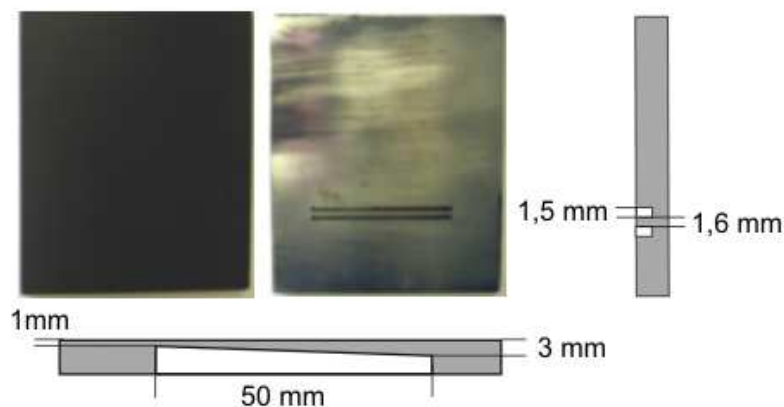


Abbildung 4.11: Modellprobe aus Stahl mit zwei Einfräsungen zunehmender Tiefenlage. Links: Vorderseite, Mitte: Rückseite, Rechts und unten: Schnittbilder.

Die resultierende Restwandstärke zur Oberfläche beträgt 1 bis 3 mm (Abb. 4.11, unten). Die Probe wurde zuerst mit Transienten-Thermografie untersucht, angeregt mit einem Induktions-Burst von 1,5 kW elektrischer Leistung und 500 ms Dauer. Während und nach der Anregung nahm eine Infrarotkamera eine Temperaturbildsequenz über mehrere Sekunden auf. Die Einfräsungen erwärmen sich während der Anregung stark, jedoch verschwimmen die Umrisse aufgrund des lateralen Wärmeflusses sehr schnell nach Abschalten der Anregung, die Wärme „fließt breit“. Es wurde daher bereits 40 ms nach dem Anregungsburst das Bild des stärksten Fehlerkontrasts aus der Sequenz ausgewählt. Der Kontrast wurde durch Hintergrundsubtraktion mit dem Bild vor der Anregung erhöht, da so nur die thermischen Änderungen nach der Anregung gezeigt werden (Abb. 4.12, links). Zum Vergleich wurde auch das IBP-Phasenbild bei 0,5 Hz durch Fouriertransformation derselben Temperaturbildsequenz berechnet (Abb. 4.12, rechts).

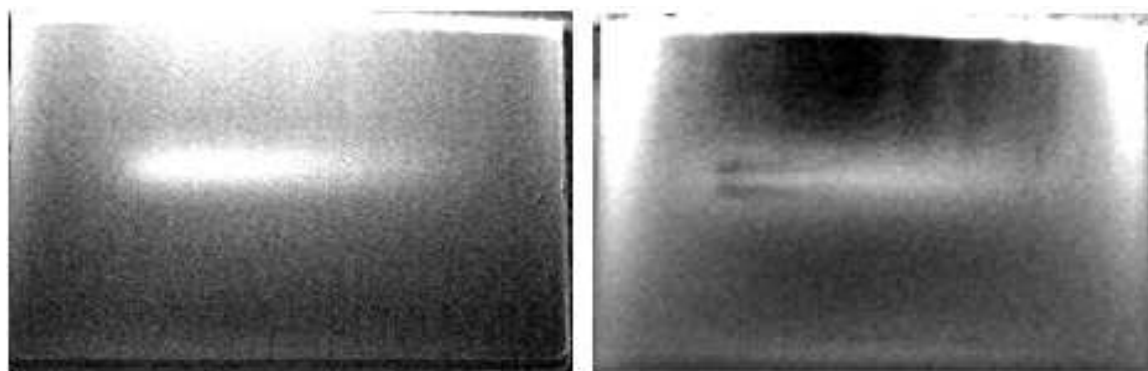


Abbildung 4.12: Stahlprobe mit Einfräsungen auf der Rückseite. Links: Transienten-Thermografie, Bild des stärksten Kontrasts 40 ms nach Burst mit Abzug des Bildes vor der Anregung. Rechts: Induktive Burst-Phasen-Thermografie (IBP), Phasenbild bei 0,5 Hz [53]



Das Bild des stärksten Kontrasts (Abb. 4.12, links) gibt die Fräsungen unter der Oberfläche sehr verschwommen wieder, sie können nicht aufgelöst werden. Das Phasenbild nach Fouriertransformation der Thermografiebildsequenz hat dagegen einen deutlich höheren Fehlerkontrast (Abb. 4.12, rechts), es löst die Fräsungen im oberen Teil auf. Der Grund hierfür liegt in der gewichteten Mittelung der Fouriertransformation, durch die das Signal-Rausch Verhältnis erhöht wird. Das Phasenbild ist etwas homogener als das Bild des stärksten Kontrasts, allerdings zeigt es direkt unter der Erwärmungsspule (im oberen Probenbereich) Inhomogenitäten des Phasenwinkels, wahrscheinlich aufgrund von direkter Spiegelung des Induktors auf der Oberfläche. Dieselbe Probe wurde auch mit ILT bei einer Lockin-Frequenz von 0,5 Hz untersucht (Abb. 4.13).



Abbildung 4.13: Stahlprobe mit Einfräsungen auf der Rückseite. Links: ILT Phasenbild bei 0,5 Hz. Rechts: Messprofil für Diagramm.

Das ILT-Phasenbild (Abb. 4.13, links) zeigt die Einfräsungen weniger verrauscht als das IBP-Phasenbild (Abb. 4.12, rechts), da über eine größere Bildanzahl fouriertransformiert wird (25 Messperioden bei 50 Hz Bildwiederholrate ergibt 2500 Bilder gegenüber 42 Bildern bei der IBP Messung). Außerdem ist der Energieeintrag bei ILT größer, da nur bei einer bestimmten Frequenz angeregt wird, während sich bei IBP die Energie eines kurzen Bursts auf ein ganzes Frequenzspektrum verteilt. Dieser Unterschied lässt sich durch Normierung mit der eingebrachten Energiemenge berücksichtigen, wenn diese bekannt ist. An der Induktionsanlage wird die maximale elektrische Anregungsleistung eingestellt, diese stimmt allerdings nicht mit der tatsächlich in das Bauteil induzierten Leistung überein. Eine entsprechende Normierung wurde deshalb in diesem Fall nicht durchgeführt.

Die Messung der Phasenwinkel an Pixeln entlang einer Linie im Bereich der unteren Fräsung (Abb. 4.13, rechts) und entlang einer entsprechenden Linie im darunter anschließenden ungeschädigten Bereich erlaubt nach Subtraktion der Werte die Berechnung des Fehlerkontrasts. Dieser wird als Kontrastkurve über die Ortskoordinate (Pixelweise) aufgetragen (Abb. 4.14).

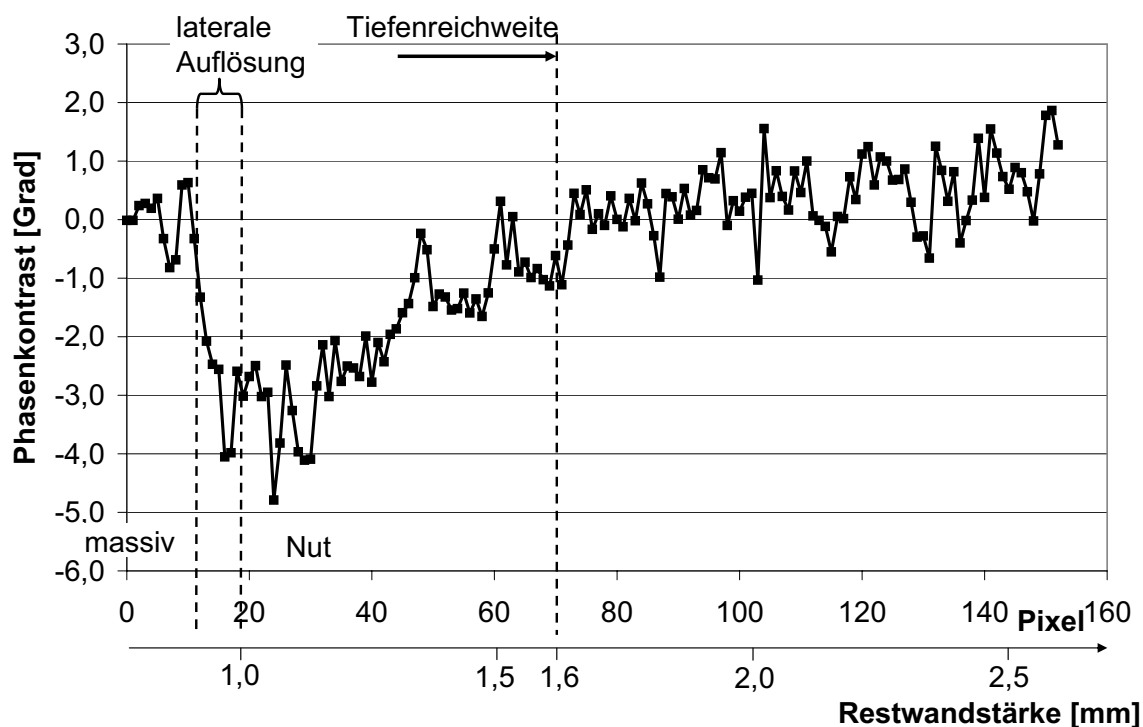


Abbildung 4.14: Phasenkontrast (Differenz der Phase des ungeschädigten von der des geschädigten Bereichs) entlang der Messlinien in Abb. 4.13, rechts.

Die 81,5 mm breite Platte wird mit 274 Pixeln abgebildet, damit ergibt sich eine Pixelbreite von 0,3 mm.

Die Kontrastkurve des Phasenwinkels zeigt, bis in welche Tiefe die untere Einfräsung noch erkennbar ist (Abb. 4.14). Die ersten Messpunkte liegen noch im massiven Materialbereich vor der Nut und haben daher einen Phasenkontrast von 0. Bei diesen Messpunkten ist auch die Rauschbreite von ca. 1,7 Grad erkennbar. Der Phasenwinkelverlauf zeigt im Bereich des senkrechten Übergangs vom massivem Bauteil zur Nut eine scheinbare Breite von ca. 7 Pixel (etwa 2 cm), dies entspricht der lateralen Auflösung. Die Nut beginnt somit etwa bei Pixel 18 und verursacht eine Kontraständerung bis ca. Pixel 70. Es werden also ca. 52 Pixel (16 mm) der Nut aufgelöst. Da die Nut von 1 mm auf 3 mm auf einer Länge von 50 mm abtaucht, bedeutet dies eine Kontraständerung bis zu einer Restwanddicke von ca. 1,6 mm (markiert als Tiefenreichweite).

Die Wirbelstromeindringtiefe beträgt für Stahl nur etwa 0,02 mm (Tab. 2.1), also sind die Defekte aufgrund der thermischen Eindringtiefe zu sehen, die bei 0,5 Hz allerdings ausreichen sollte, die gesamte Länge der Einfräsungen im Phasenbild zu zeigen (die thermische Eindringtiefe von Stahl beträgt bei einer Lockin-Frequenz von 0,5 Hz etwa 3,5 mm). Da dies aber offensichtlich nicht der Fall ist und die Tiefenreichweite etwa der Breite der Einfräsungen (1,5 mm) entspricht, ist bei dieser Messung die Reichweite durch den lateralen Wärmefluss begrenzt. Damit entspricht die Kontrastgrenze von ILT an

Stahl etwa dem Erfahrungswert der optisch angeregten Lockin-Thermografie Verfahren [70, 71].

### 4.2.2 Laterale Auflösung einer Stahlprobe mit Einfräsungen

Auch die laterale Auflösung begrenzt die Tiefenreichweite zur Defekterkennung, sie beschreibt die Unterscheidbarkeit zweier benachbarter Defekte und ist von den Prüfparametern abhängig. Zur Untersuchung dieser Auflösungsgrenze wurde die gefräste Stahlprobe (Abb. 4.11) mit ILT bei 0,5 Hz und bei 0,1 Hz Lockin-Frequenz geprüft. Aus den Phasenbildern wurden Phasenprofile senkrecht zu den Einfräsungen bei verschiedenen Restwandstärken extrahiert (Abb. 4.15). Die Phasenkurven wurden zur besseren Übersicht um 2 Grad zueinander verschoben.

Die Phasenverläufe bei 0,5 Hz Lockin-Frequenz zeigen die Tiefenabhängigkeit der lateralen Auflösung (Abb. 4.15, oben). Bei einer Restwandstärke von 1 mm sind deutlich beide Einfräsungen in Form von Dellen im Phasenwinkelverlauf zu erkennen (Abb. 4.15, oben: gestrichelte Linie). Bei größeren Restwandstärken werden diese Dellen flacher und aufgrund des lateralen Wärmeflusses auch breiter. Bei einer Restwandstärke von 1,6 mm (Abb. 4.15, oben: strichpunktierte Linie) sind die Fräsungen im Phasenverlauf nicht mehr erkennbar. Diese maximale detektierbare Defekttiefe bestätigt also die an dieser Probe bereits mit den Kontrastkurven bestimmte Tiefenreichweite.

Die laterale Auflösung ist neben der Defekttiefe auch von der Lockin-Frequenz abhängig. Tiefere Frequenzen erhöhen die Tiefenreichweite, verschlechtern aber die Auflösung. Als Beispiel werden die Phasenprofile bei 0,1 Hz und unterschiedlichen Restwandstärken gezeigt (Abb. 4.15, unten). Auch in diesem Diagramm wurden die Phasenkurven zur besseren Übersichtlichkeit um 2 Grad zueinander verschoben.

Im Vergleich zu den Messungen bei 0,5 Hz (Abb. 4.15, oben) ist eine deutliche Verminderung der Defektauflösung zu erkennen. Bei einer Restwandstärke von 1,1 mm sind gerade noch beide Fräsungen unterscheidbar (Abb. 4.15, unten: gestrichelte Kurve), aber bereits bei einer Restwandstärke von 1,2 mm ist diese Auflösung nicht mehr möglich (Abb. 4.15, unten: durchgezogene Kurve).

Die Messbeispiele und Phasenkurven haben gezeigt, dass die laterale Auflösung der ILT an Stahlproben von der Tiefenlage und von der Lockin-Frequenz abhängt, dies ist für die optisch angeregte Lockin-Thermografie bereits bekannt [17, 57]. Aufgrund des Skin-Effekts der geprüften Stahlprobe ist der Einfluss der Wirbelstromeindringtiefe auf die Auflösung in diesem Beispiel nur sehr gering. Für den elektrisch teiltransparenten Fall ist aber eine positive Beeinflussung der Defektauflösung durch die Wirbelstromeindringtiefe zu erwarten, da die Wärme in größerer Tiefe entsteht und so die scheinbare Defekttiefe im Vergleich zu optisch angeregter Thermografie kleiner ist.

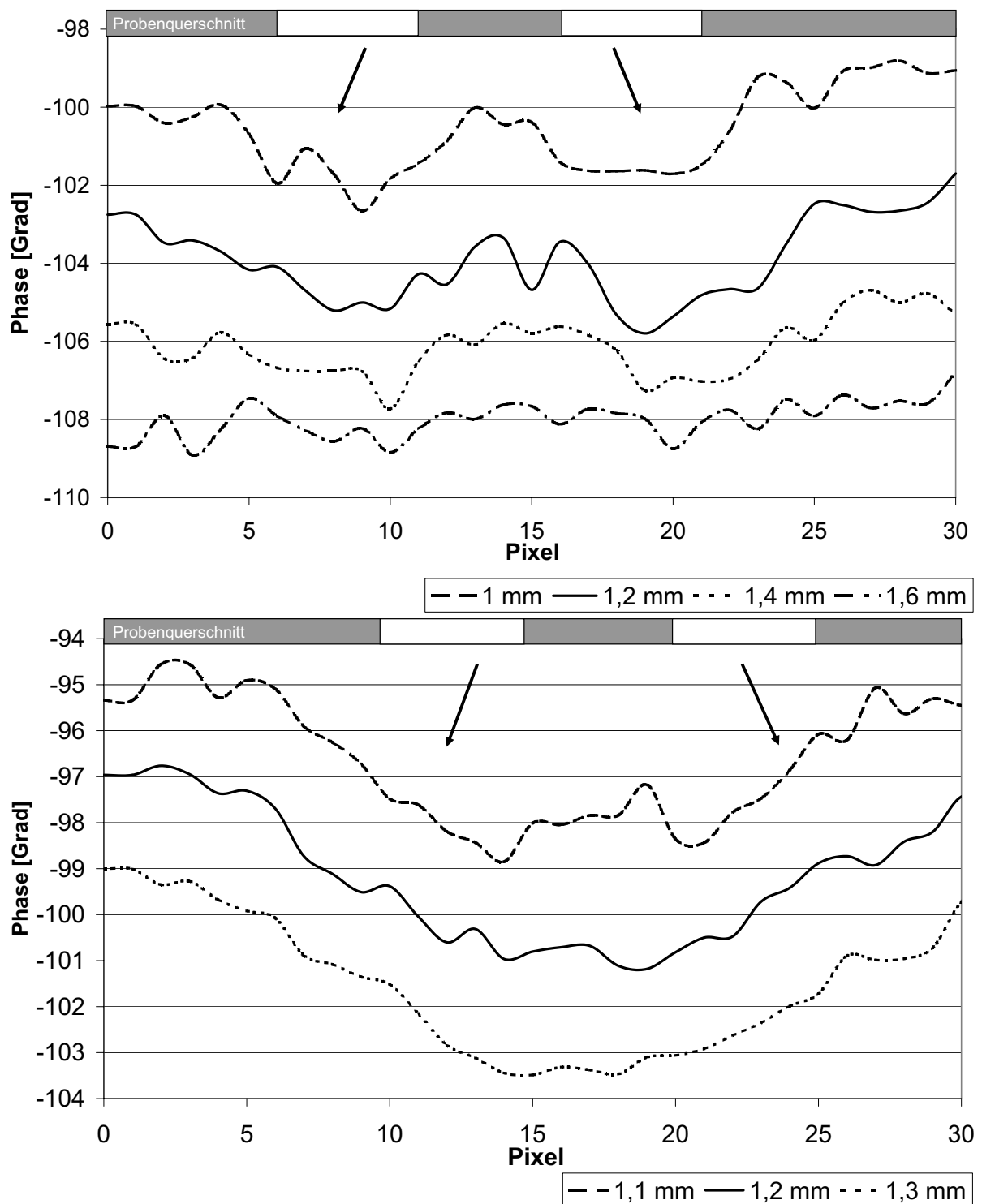


Abbildung 4.15: Stahlprobe mit Einfräsungen auf der Rückseite. Phasenprofile senkrecht zu den Fräsungen bei verschiedenen Restwandstärken  $d$ . Oben: Phasenprofile bei 0,5 Hz. Unten: Phasenprofile bei 0,1 Hz.

# 5 Anwendungsbeispiele für ILT in der zerstörungsfreien Prüfung

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Eigenschaften der Induktions-Lockin-Thermografie theoretisch und anhand von Modellproben untersucht. Im folgenden Kapitel wird die ILT an Praxisbauteilen verschiedener Materialien mit Defekten, wie sie in der täglichen Prüfpraxis vorkommen, angewendet. Es gibt somit einen Überblick über die Leistungsfähigkeit von ILT in der industriellen Anwendung.

Da jedes neue Verfahren mit bereits etablierten Methoden in Konkurrenz tritt, werden die ILT-Ergebnisse mit denen anderer ZfP-Verfahren verglichen.

Zuerst wird die Detektion von Defekten (z.B. oberflächennahe Risse) in klassischen metallischen Werkstoffen (Stahl und Aluminium) gezeigt und des weiteren auch die Prüfung von Fügeverbindungen wie Kleben und Schweißen behandelt. Praxisrelevant ist ebenfalls die Prüfung des im Leichtbau immer häufiger eingesetzten kohlefaserverstärkten Kunststoffes (CFK), bei dem Delaminationen, Stringerschäden oder Schlagschäden (Impacts) auftreten können. Mit CFK werden auch adaptive Strukturen realisiert mit anderen potentiellen Fehlern wie z.B. Aktuatorbrüche. Alle diese Fehlerarten werden mit ILT und weiteren ZfP-Verfahren zuverlässig detektiert, wie dieses Kapitel zeigt. Das Kapitel endet mit ILT-Inspektionen von Materialien, die in der Industrie zum Teil schon eingesetzt werden (z.B. in der Luft- und Raumfahrt), jedoch noch keine weit verbreitete Anwendung haben. Dies sind z.B. kohlefaserverstärkte Keramiken (C/C-SiC) oder GFK-Aluminium Lamine (Glare®).

## 5.1 Metallische Bauteile

### 5.1.1 Detektion oberflächennaher Risse

#### **Risse in Stahlzugprobe, Vergleich der ILT-Ergebnisse mit ULT und Vibrometrie**

Das Erkennen oberflächennaher Risse in Metallen ist das Hauptanwendungsgebiet konventioneller Wirbelstromprüfung. Da diese Prüfung aber rasternd durchgeführt wird, ist sie sehr zeitintensiv. Die bildgebende Induktions-Lockin-Thermografie detektiert solche Defekte in einer deutlich kürzeren Messzeit, da sie große Flächen auf einmal prüft. Als

Beispiel wurde eine Messung an einer Stahlzugprobe (5 mm dick) mit einem von einer Bohrung ausgehenden Riss untersucht (Bild 5.1). Die Wirbelstromfrequenz betrug 102 kHz, die Lockin-Frequenz 1 Hz. Die Inspektion wurde in Reflexionsanordnung durchgeführt, also mit Induktionsspule und Infrarotkamera auf derselben Seite der Probe, die Gesamtmessdauer betrug 20 Sekunden.

Dargestellt sind das Amplituden- und das Phasenbild der ILT (Bild 5.1, links und Mitte) und zum Vergleich auch das Phasenbild der Ultraschall-Lockin-Thermografie an derselben Probe (Bild 5.1, rechts).

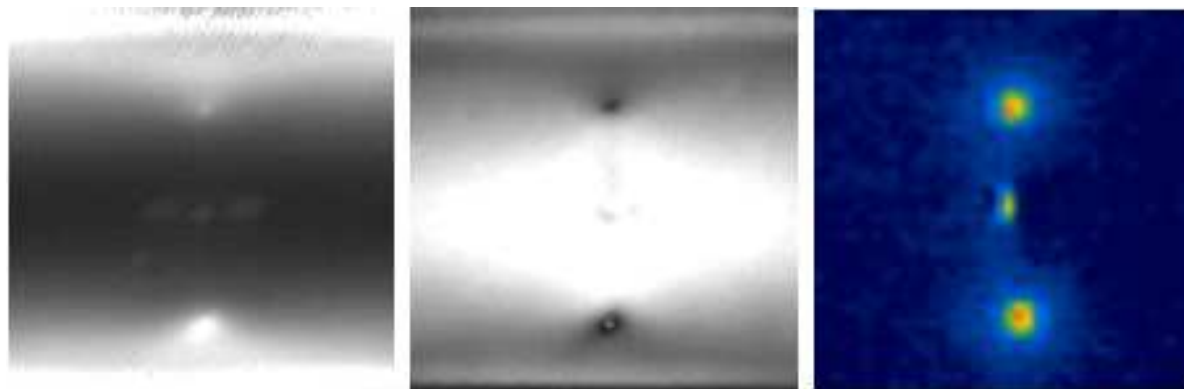


Abbildung 5.1: Zugprobe mit Riss, Lockin-Frequenz 1,0 Hz (Messbereich ca. 80\*80 mm<sup>2</sup>). Links: ILT-Amplitudenbild. Mitte: ILT-Phasenbild. Rechts: ULT-Phasenbild [52].

Der Oberflächenriss der Zugprobe liegt innerhalb der Wirbelstromeindringtiefe. Für die Wirbelströme ist dieser Riss ein Hindernis, das sie nicht passieren können, die Wirbelstromdichte am Riss ist dementsprechend gering, es kommt aber dafür zu einer erhöhten Dichte an den Rissspitzen. Der Riss selbst bleibt also kalt, während sich dessen Spitzen lokal erwärmen. Das Amplitudenbild zeigt daher die Rissspitzen als helle Punkte, während der Riss selbst dunkel bleibt (Bild 5.1, links).

ILT ist somit für Defekte innerhalb der Wirbelstromeindringtiefe ein selektives Verfahren ähnlich der ultraschallangeregten Thermografie. Im ILT-Phasenbild (Bild 5.1, Mitte) werden die Rissspitzen deutlich durch schwarze Punkte markiert, die im Amplitudenbild sichtbare inhomogene Erwärmung der Probenränder wird weitgehend unterdrückt. Die im Phasenbild sichtbare starke Inhomogenität im Bereich des Risses wird wahrscheinlich vom lateralen Wärmefluss aufgrund des starken Temperaturgradienten erzeugt. Das ILT-Phasenbild wurde auch mit dem ULT-Phasenbild verglichen (Bild 5.1, rechts), es zeigt sehr ähnliche Ergebnisse: Auch mit Ultraschallanregung erwärmen sich die Rissspitzen besonders stark, sie erzeugen damit ein Signal im Phasenbild. Der Mechanismus dieser Erwärmung (hauptsächlich Hysterese oder Reibung) ist allerdings ein völlig anderer als bei ILT.

Dieselbe Probe wurde zum Vergleich auch mit nichtlinearer Vibrometrie untersucht (Abb. 5.2). Verwendet wurde derselbe US-Konverter wie bei der ultraschallangeregten Thermografie (mit 20 kHz). Ein Laservibrometer rastert die Oberfläche der Zugprobe ab und nimmt an jedem Punkt ein Frequenzspektrum auf (Verfahrensbeschreibung in Abschnitt 1.2.2).

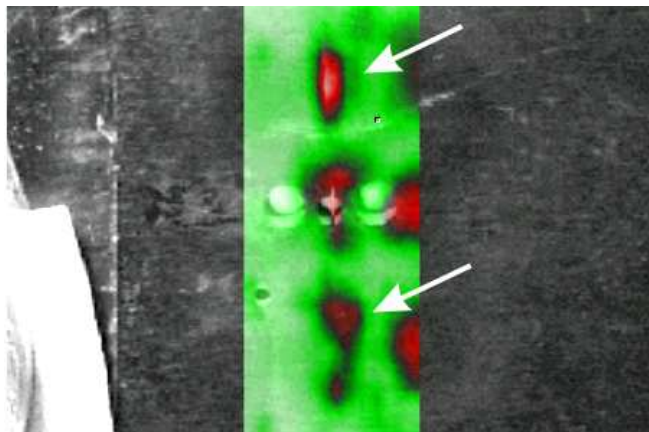


Abbildung 5.2: Zugprobe mit Riss, Anregung bei 20 kHz, 400 W (Messbereich ca. 50\*120 mm<sup>2</sup>). Amplitudenbild der fünften Harmonischen [40].

Bei der untersuchten Zugprobe erzeugen die Reißspitzen ein besonders hohes Signal bei der fünften Harmonischen der Anregungsfrequenz, also bei 100 kHz (Bild 5.1). Auch die nichtlineare Vibrometrie ist ein defektselektives Verfahren, sie verwendet jedoch dieselbe berührende Anregung wie die ultraschallangeregte Thermografie (US-Konverter ist links in Abb. 5.2 sichtbar).

ILT verbindet die Vorteile der defektselektiven Fehlerdarstellung mit einer berührungslosen Anregung. Dass die Ergebnisse der ILT an der Zugprobe denen der ULT und der nichtlinearen Vibrometrie sehr ähnlich sind, ist jedoch ein Zufall. Da die drei Verfahren auf völlig unterschiedliche Mechanismen zur Fehlerdetektion ansprechen, zeigen sie normalerweise verschiedene Informationen und damit auch verschiedene Defektbilder desselben Defektes.

### Risse in Stahl-Zahnrad

Die Detektion oberflächennaher Risse in plattenartigen Bauteilen ist mit ILT, wie auch mit der konventionellen Wirbelstromprüfung, problemlos möglich. Bei komplexeren Geometrien ist die induktive Anregung problematischer, da sich auch jede Bauteilkante aufgrund der Aufstauung von Wirbelstromlinien stärker erwärmt als freie Bauteilbereiche. Ein Ansatz zur Lösung dieses Problems ist eine spezifische Optimierung des Spulendesigns auf die Geometrie des zu prüfenden Bauteils. Da aber meistens viele unterschiedliche Bauteile untersucht werden sollen, ist dieser Ansatz nicht sehr praktisch.

Das folgende Beispiel zeigt, dass durch das Ausnutzen von Phasenwinkeln bei ILT auch bei komplexen realen Bauteilen (z.B. Zahnrädern) Risse mit einer konventionellen und universell einsetzbaren Induktionsspule nachweisbar und in einem Phasenbild darstellbar sind (Abb. 5.3). Das untersuchte Zahnrad mit einem Durchmesser von 125 mm hat in einzelnen Zähnen optisch nicht erkennbare feine Risse. Die Anregungsspule befand sich bei der Inspektion vor den Zähnen (die Anregungsebene steht also senkrecht auf der Inspektionsebene), es wurden die Zahnspitzen im untersuchten Bereich erwärmt. Die Amplitude des Wirbelstroms von 101 kHz wurde mit einer Lockin-Frequenz von 1 Hz moduliert. Die Messdauer betrug 60 Sekunden.

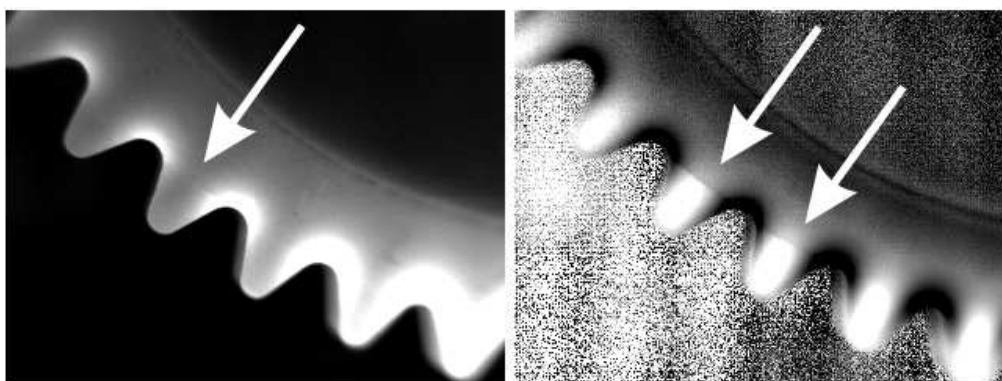


Abbildung 5.3: ILT an einem Zahnrad mit Rissen (Messbereich ca.  $40 \times 35 \text{ mm}^2$ ) [72].  
Links: Amplitudenbild bei 1 Hz. Rechts: Phasenbild bei 1 Hz.

Das Amplitudenbild zeigt eine deutliche Erwärmung der Bereiche zwischen den Zähnen, während die Induktionsspule die Zahnspitzen nur schwach erwärmt. Der linke Riss erwärmt sich nur gering, er ist im Amplitudenbild schwach zu erkennen (markiert durch den Pfeil), der rechte Riss ist unauffällig (Abb. 5.3, links). Im Phasenbild sind beide Risse in den Zahnflanken sichtbar. Die in den Zahnspitzen erzeugte Wärme kann über die Risse nicht in das Zahnrad abfließen, der dadurch entstandene Temperaturgradient (warm auf der einen Seite des Risses, kalt auf der anderen) erzeugt, zusätzlich zur eigentlichen Risserwärmung, ein deutliches Signal im Phasenbild (Bild 5.3, rechts). Ungeschädigte Zähne haben im Vergleich zu den geschädigten Zähnen einen homogenen Phasenverlauf am Zahnfuß.

### Risse in Aluminium-Flugzeugbauteil

Im Flugzeugbau wird Aluminium wegen seiner relativ hohen Festigkeit bei geringer Dichte bevorzugt eingesetzt. Ein Nachteil dieses Werkstoffs ist allerdings, dass er zu Ermüdungsrissen neigt, da größere Verformungsamplituden während des Betriebs (z.B. Start und Landung) im Vergleich zu z.B. Stahl, mit seiner höheren Festigkeit, auftreten. Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse von ILT und nichtlinearer Vibrometrie an



einem Aluminium-Flugzeugbauteil (Probe freundlicherweise überlassen von der Luftwaffenwerft 13 - Erding) gezeigt (Abb. 5.4).



Abbildung 5.4: Ausschnitt aus Aluminium-Flugzeugbauteil mit Ermüdungsrisse zwischen Nietlochbohrungen (im Bereich der weißen Ellipse).

Das Bauteil enthält eine Nietreihe, mit der die Beplankung auf einer Rippe befestigt war. In dieser Nietreihe kam es zu Ermüdungsrisse zwischen den Nietlochbohrungen. Im Rahmen einer früheren Untersuchung wurden die Nieten entfernt. Die ILT-Messung wurde in Reflexionsanordnung durchgeführt (Abb. 5.5). Die Probe wurde auch 90 Grad gedreht inspiziert, um den Einfluss der Rissorientierung auf das Ergebnis zu untersuchen (Abb. 5.5, unten).

Die ILT Phasenbilder bei 1 Hz (Abb. 5.5, links) zeigen selektiv nur die Risse. Die ungeschädigten Bauteilbereiche erwärmen sich bei der Wirbelstromanregung nur so schwach, dass sie im Phasenbild kein Signal erzeugen (Rauschen), während sich die Risse stark erwärmen und klar erkennbar sind. Dies bestätigen auch die Amplitudenbilder (Abb. 5.5, rechts). Die direkte Erwärmung der Risse widerspricht den Erfahrungen aus der Inspektion der Stahlzugprobe, bei der sich nur die Risspitzen stark erwärmt hatten, während der Riss selbst kalt blieb (Bild 5.1, links).

Eine Erklärung hierfür liegt in der Rissgeometrie. Die Inspektionsergebnisse der Stahlzugprobe mit ULT und Vibrometrie deuten darauf hin, dass der Riss klafft, die Rissufer also keinen mechanischen und somit auch keinen elektrischen Kontakt haben. Die Vermutung liegt also nahe, dass die Rissufer in diesem Bauteil noch in Kontakt sind, so dass eine elektrische Leitung über den Riss mit einem lokal stark erhöhten elektrischen Widerstand möglich ist. Dies würde die selektive Erwärmung der Ermüdungsrisse durch die Wirbelströme erklären. Durch das Schadensbild der ILT kann also zwischen klaffenden Rissen, bei denen kein elektrischer Kontakt zwischen den Rissufern besteht, und Rissen mit Wandkontakt unterschieden werden.

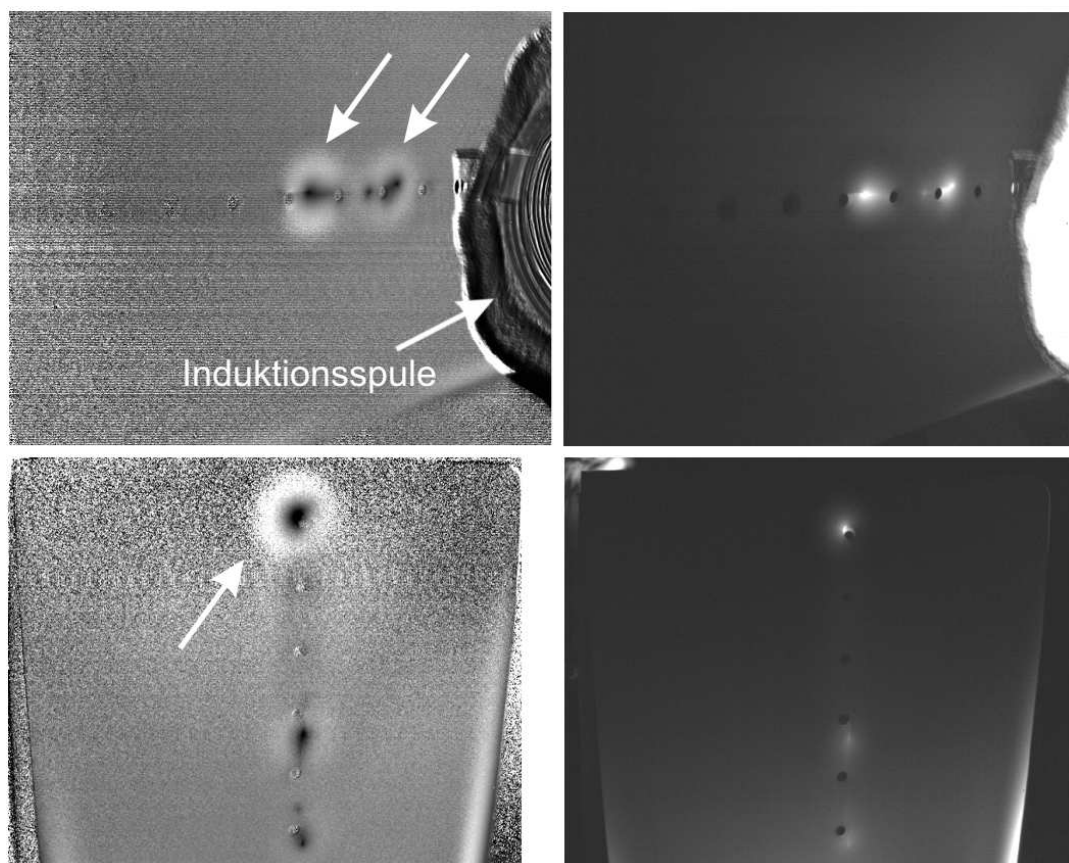


Abbildung 5.5: ILT-Inspektion eines Aluminium-Flugzeugbauteils mit Ermüdungsriss in Nietlochreihe (Messbereich ca.  $180 \times 170 \text{ mm}^2$  oben bzw. ca.  $170 \times 180 \text{ mm}^2$  unten). Links: ILT-Phasenbilder bei 1 Hz. Rechts: ILT-Amplitudenbilder bei 1 Hz. Untere Reihe: Untersuchungsergebnis derselben Probe wie in der oberen Reihe, aber um 90 Grad gedreht.

Bei der Rissdetektion ist die Orientierung des Risses in Bezug auf das anregende Magnetfeld wichtig. Risse parallel zu den Wirbelströmen können nur schwach angeregt werden, da sie für die Wirbelströme ein kleineres Hindernis darstellen. Das Bauteil wurde relativ zur Induktionsspule um 90 Grad gedreht und erneut geprüft. Das Amplitudenbild dieser Inspektion (Abb. 5.5, unten rechts) hat dieselbe Skalierung wie das Amplitudenbild der vorherigen Messung (Abb. 5.5, oben rechts) und ist damit direkt vergleichbar. Es zeigt eine deutlich schwächere Erwärmung der Risse aufgrund der ungünstigen Orientierung. Der Unterschied ist in den Phasenbildern nicht so ausgeprägt, da in ihnen inhomogene Erwärmung größtenteils unterdrückt wird und das S/N-Verhältnis der Defekte auch in der um 90 Grad verdrehten Inspektion groß genug ist (Abb. 5.5, unten links). Die Inspektion mit 90 Grad verdrehter Probe zeigt jedoch neben den bisher gefundenen Defekten noch eine weitere Auffälligkeit, die in der vorherigen Messung kein Signal geliefert hat. Es handelt sich um den Bereich, bei dem die Deckhaut wieder die Rippe berührt

(Abb. 5.5, unten links: weißer Pfeil). Dieses Beispiel zeigt, wie wichtig eine Inspektion von Bauteilen mit unterschiedlicher Orientierung zum Magnetfeld der Spule ist, da sonst einzelne Defekte eventuell nicht erkannt werden.

Das Flugzeugbauteil wurde zum Vergleich auch mit nichtlinearer Vibrometrie untersucht. Das Amplitudenbild der vierten Harmonischen (80 kHz) wurde zur Auswertung verwendet (Abb. 5.6).

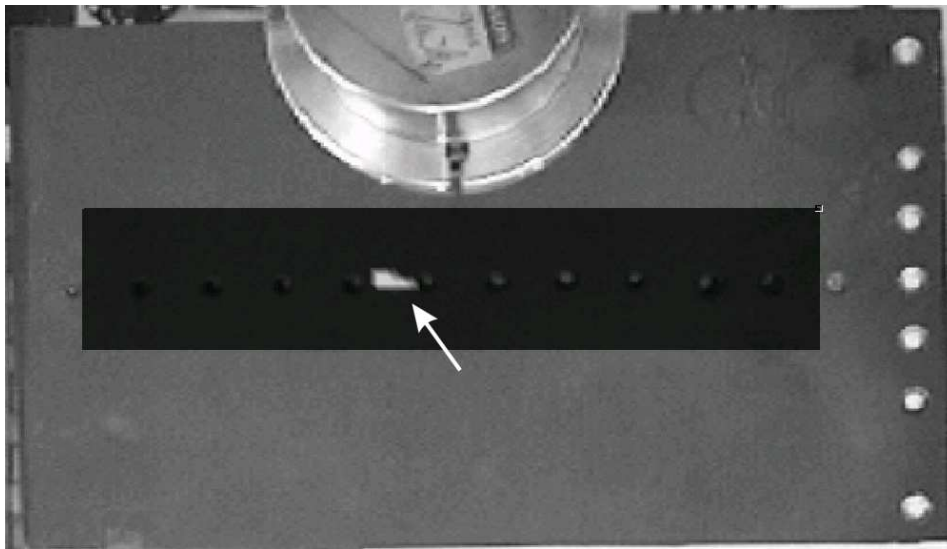


Abbildung 5.6: Nichtlineare Vibrometrie an einem Aluminium-Flugzeugbauteil mit Ermüdungsriss (Messbereich ca.  $230 \times 41 \text{ mm}^2$ ). Amplitudenbild der vierten Harmonischen (80 kHz) [40].

Die vierte Harmonische (Abb. 5.6) zeigt an der Position des Risses zwischen der fünften und sechsten Nietlochbohrung (von der Stirnseite her gezählt) eine deutliche Erhöhung (weißer Pfeil). Die im ILT-Bild deutlicher sichtbaren Risse zwischen dem vierten und fünften und nach dem sechsten Nietloch sind hier jedoch unauffällig. Entweder erzeugen diese Defekte nichtlineare Frequenzanteile außerhalb der vierten Harmonischen, oder der Kontakt zwischen den Rissufern ist so gut, dass sie nicht klappern, was mit der Vermutung über die Rissgeometrie und die Begründung für die starke Erwärmung der Risse mit ILT konsistent ist.

## 5.1.2 Qualitätssicherung von Fügeverbindungen

### Inspektion von Klebungen

Traditionelle Fügeverbindungen wie Schweißungen und Nietungen werden im Flugzeug- und Automobilbau zunehmend durch Klebungen ersetzt, da sie in der industriellen Produktion nur einen geringen Aufwand erfordern. Ein zusätzlicher Vorteil dieser Verbindungsart ist die homogenere Lastverteilung im Vergleich zu z.B. Nietungen. Ein Problem

bei der Herstellung von Klebeverbindungen ist jedoch die anschließende Qualitätssicherung, da sie möglichst zerstörungsfrei ablaufen sollte. Vielversprechende Ansätze hierfür zeigt z.B. die ultraschallangeregte Lockin-Thermografie [73]. Auch ILT wurde auf seine Anwendbarkeit bei der Inspektion von Klebungen hin untersucht. Hierzu wurde eine vier Millimeter dicke Aluminium-Modellprobe mit aufgeklebten Dopplern hergestellt (Probe freundlicherweise überlassen von Pilatus Aircraft). An der Probe wurde nach Aufkleben der Doppler ein Zugversuch durchgeführt, bis sich die Doppler aufgrund der Schubbelastung zum Teil ablösten.

Nach der Schubbelastung wurde die Probe mit ILT in Transmissionsanordnung untersucht, also mit der Anregungsspule auf der Rückseite der Probe und der IR-Kamera auf der Vorderseite. Die Inspektionszeit betrug etwa eine Minute. Neben dem Phasenbild bei 1,0 Hz (Abb. 5.7, oben) ist auch der Phasenwinkelverlauf entlang des eingezeichneten Rechtecks (Mittelung über vertikale Punkte) dargestellt (Abb. 5.7, unten).

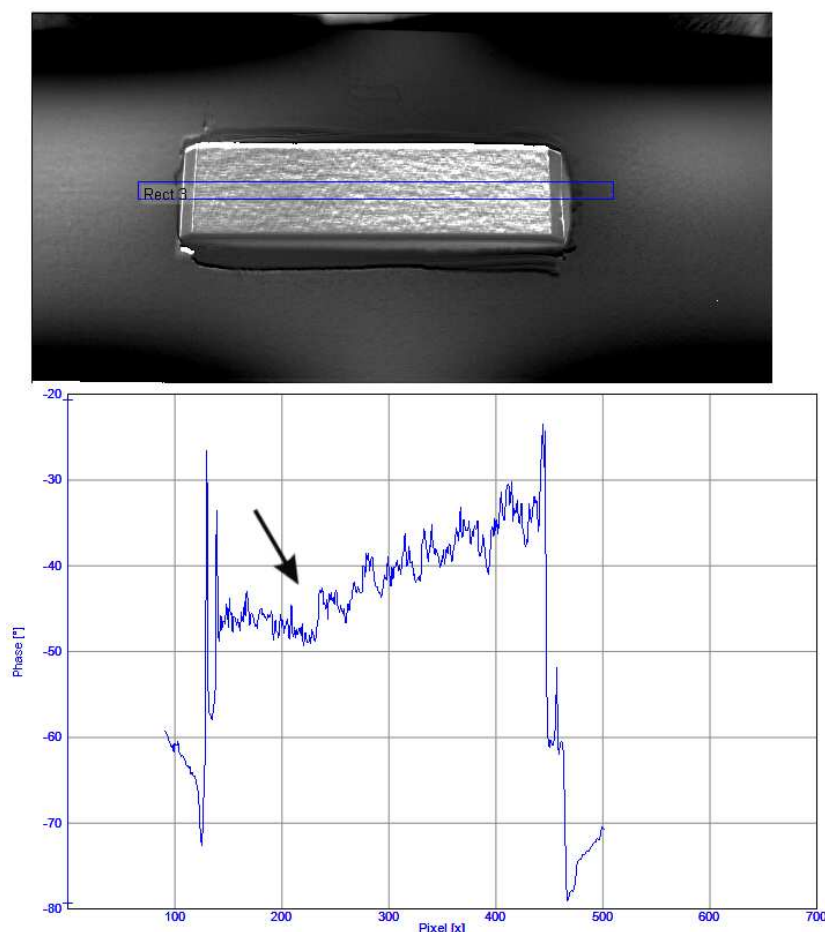


Abbildung 5.7: ILT-Inspektion an einer Modellprobe mit teilweise abgelöster Klebung (Messbereich ca.  $170 \times 80 \text{ mm}^2$ ). Oben: Phasenbild der ILT in Transmissionsanordnung bei 1 Hz. Unten: Phasenverlauf entlang des im Phasenbild eingezeichneten Rechtecks (gemittelt über die vertikalen Punkte) [74].

Aufgrund der Transmissionsanordnung erfährt die von der Rückseite ausgehende thermische Welle auf dem Weg zur Oberfläche eine lineare Phasenverschiebung (Gl. 2.2). Die Phasenverschiebung ist im Bereich der guten Klebung konstant, wie dies auch im linken Teil des Phasenwinkelverlaufs erkennbar ist (Abb. 5.7, unten). Im abgelösten Bereich wird die thermische Welle an der Rückseite der entstandenen thermischen Grenzfläche reflektiert, sie gelangt also nicht an die Oberfläche der Probe. Lateraler Wärmefluss aus dem homogenen Bereich erwärmt allerdings trotzdem auch den delaminierten Teil des Dopplers. Dieser laterale Wärmefluss führt zu einer linearen Zunahme des Phasenwinkels entlang des abgelösten Bereichs. Der Übergang von geklebtem zu delaminiertem Bereich ist deutlich durch die plötzliche Zunahme des Phasenwinkels markiert (Abb. 5.7, unten). ILT kann also schnell und berührungslos eine vollständige Ablösung detektieren, bei dieser Transmissionsanordnung ist allerdings ein zweiseitiger Zugang zum Prüfobjekt nötig.

### **Inspektion von Laserschweißnähten**

Auch andere Verbindungstechniken wie z.B. Laserschweißen gewinnen in der Anwendung zunehmend an Bedeutung. Laserschweißungen ersetzen Nietungen (z.B. im Flugzeugbau) und helfen so bei der Gewichtsreduktion. Außerdem ist Laserschweißen für die Herstellung von Präzisionsbauteilen geeignet, da die hohe Energie nur auf kleinsten Raum eingebracht wird und so Spannungen und Verzug im geschweißten Bauteil niedrig sind.

Auch bei ständig überwachten Prozessparametern können Fehler wie Risse, Spalten und unzulängliche Schweißtiefen im Bereich der Naht auftreten. Neben der Überwachung dieser Parameter sind also auch zerstörungsfreie Prüfmethoden zur Qualitätssicherung der Schweißung notwendig. Zu den bereits eingesetzten zerstörungsfreien Prüftechniken zählen die online Überwachung des Schweißprozesses mit CMOS Kameras und die Prüfung des Schweißergebnisses mit Wirbelstrom- und CCD-Kameratechniken.

Das folgende Beispiel zeigt die Inspektion einer Laserschweiß-Modellprobe mit wirbelstromangeregter Lockin-Thermografie und Induktions-Burst-Phasen Thermografie (Abb. 5.8). Die Probe besteht aus zwei Stahlblechstreifen, die durch Laserschweißen miteinander verbunden wurden. Variation der Schweißparameter erzeugte in der halben Naht eine gute Schweißung, während die zweite Hälfte nicht verschweißt wurde.

Die Modulationsfrequenz der Wirbelströme für ILT betrug 0,1 Hz (Abb. 5.8, oben). Zum Vergleich ist dem ILT-Phasenbild das Phasenbild der IBP-Inspektion an derselben Probe gegenübergestellt (Abb. 5.8, unten). Hierzu wurde ein Wirbelstrom-Burst mit 2 Sekunden Länge in das untere Blech induziert und anschließend über 3 Sekunden eine Temperaturbildsequenz aufgenommen. Die Fouriertransformation bei 0,1 Hz über alle Bildpixel entlang des Temperaturbildstapels liefert so das IBP-Phasenbild.

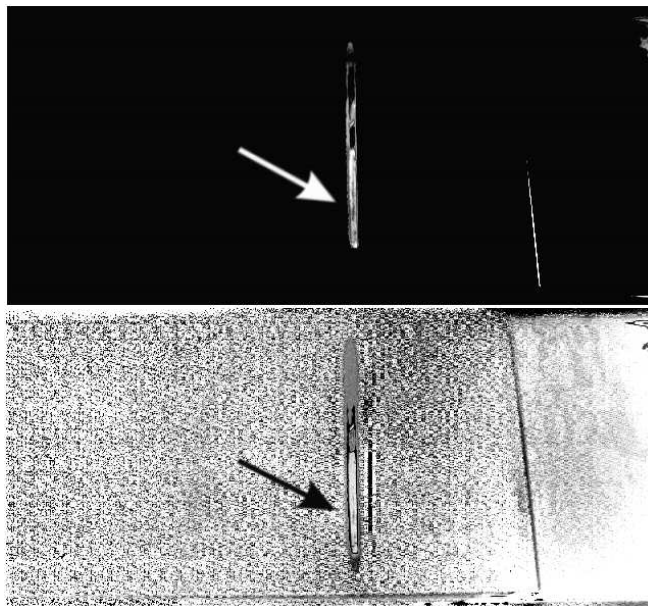


Abbildung 5.8: ILT- und IBP-Inspektion einer Laserschweiß-Modellprobe mit zur Hälfte nicht verschweißtem Bereich (Messbereich ca. 110\*50 mm<sup>2</sup>). Oben: ILT-Phasenbild bei 0,1 Hz. Unten: IBP-Phasenbild bei 0,1 Hz [54].

Die in das untere Blech eingekoppelten Wirbelströme erwärmen dieses stark, während das obere Blech kalt bleibt. Die thermische Verbindung des warmen unteren mit dem kalten oberen Blech ist die Schweißnaht. An Stellen guter Verschweißung ist die Wärmeleitung gut, es entsteht ein deutliches Signal. Bei nicht vorhandener Verschweißung wird der betreffende Schweißnahtbereich nicht erwärmt, es entsteht kein Signal. In beiden Phasenbildern ist auf diese Art der gut durchgeschweißte Bereich deutlich zu erkennen (markiert mit Pfeilen), während die nicht verschweißten Bereiche im Phasenbild veräuscht dargestellt werden (Abb. 5.8).

Der Vorteil von IBP gegenüber ILT ist eine deutlich kürzere Messzeit. Bei IBP liegt das Ergebnis nach ca. 10 Sekunden vor, während die ILT-Inspektion ca. 60 Sekunden dauert. Für dieses schnellere Ergebnis der IBP muss allerdings auch ein schlechteres S/N-Verhältnis im Vergleich zum ILT-Phasenbild in Kauf genommen werden.

### Inspektion von Stahlblech-GFK-Schweißungen

Innerhalb des Schwerpunktprogramms 1123 „Textile Verbundbauweisen und Fertigungstechnologien für Leichtbaustrukturen des Maschinen- und Fahrzeugbaus“ [75] wurden Modellproben hergestellt, bei denen durch Ultraschallschweißen Metalle mit Glasfaserverbundwerkstoffen verbunden wurden [76]. Ziel der Arbeit war es, die Kräfte direkt vom Metall in die lasttragenden Glasfasern zu übertragen.

Bei den untersuchten Modellproben wurden die Schweißparameter gezielt variiert, um

die Schweißqualität zu beeinflussen. So entstanden drei Modellproben mit unterschiedlich guter Verschweißung von Stahlblech und GFK, die mit ILT und zum Vergleich der Ergebnisse auch mit OLT untersucht wurden (Abb. 5.9).

Die ILT- und OLT-Inspektion wurden in Reflexionsanordnung durchgeführt. Alle drei Proben wurden gleichzeitig geprüft, um so eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zueinander zu ermöglichen.

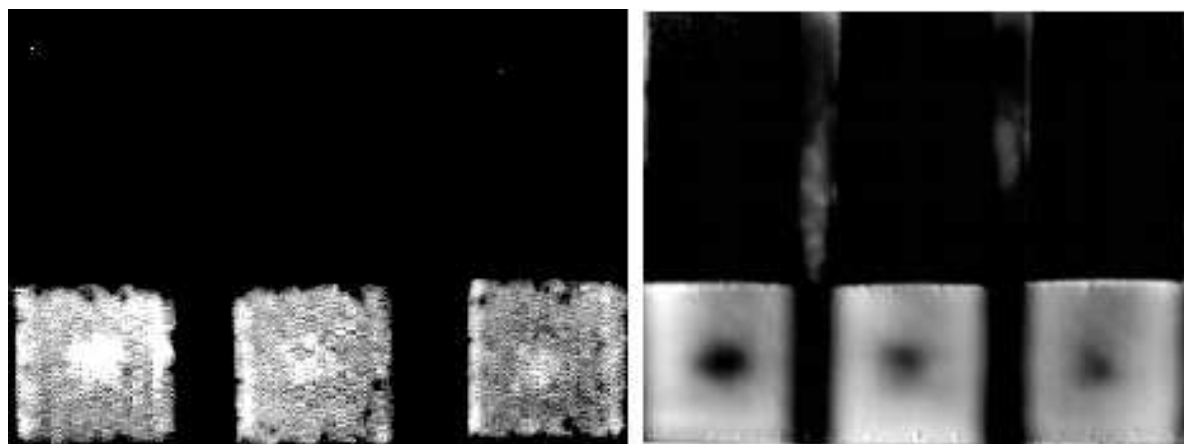


Abbildung 5.9: Modellproben mit unterschiedlich starken Punktschweißungen von GFK auf Stahlblech (Messbereiche jeweils ca.  $25 \times 70 \text{ mm}^2$ ). Links: OLT - Phasenbilder bei 0,1 Hz. Rechts: ILT-Phasenbilder bei 0,1 Hz.

Sowohl im OLT- als auch im ILT-Phasenbild sind deutlich unterschiedliche Durchmesser der Punktschweißungen, abhängig von den Schweißparametern, zu erkennen (Abb. 5.9). Da der Schweißdurchmesser ein wichtiges Kriterium für die Qualität der Schweißung darstellt, ermöglichen beide Methoden eine Aussage über die Schweißqualität.

Das Ergebnis der OLT ist stärker verrauscht als das Phasenbild der ILT. Die Problematik der OLT-Messung ist, dass die Wärme bei OLT an der Oberfläche durch Absorption eingebracht wird. Sie diffundiert dann durch das GFK-Bauteil, wird an der Grenzfläche GFK-Stahl reflektiert und läuft wieder zurück zur Bauteiloberfläche. Da Wärmediffusion aber ein stark verlustbehafteter Vorgang ist, wird die Wärmewelle stark gedämpft, die Signalamplitude an der Oberfläche ist also relativ klein und das S/N-Verhältnis damit entsprechend niedrig (Abb. 5.9, links). Bei ILT entsteht die Wärme im Blech hinter der GFK-Schicht, da GFK selbst nicht elektrisch leitfähig ist. Die Wärmewelle braucht also im Fall von ILT nur den einfachen Weg von der Grenzschicht GFK-Stahl zur Bauteiloberfläche zurückzulegen. Es handelt sich um eine Transmissionsmessung, obwohl Anregung und Detektion an derselben Bauteilseite erfolgen. Bei ILT entstehen so deutlich größere Signalamplituden als bei OLT, die sich positiv auf das S/N-Verhältnis auswirken.

## 5.2 Kohlefaserverstärkter Kunststoff (CFK)

Faserverbundwerkstoffe und speziell kohlefaserverstärkter Kunststoff (CFK) sind bereits in Luft- und Raumfahrt sowie Automobilbau etabliert. Der Grund hierfür liegt in der hohen spezifischen Festigkeit von CFK, welche neue Möglichkeiten im Leichtbau eröffnet. Außerdem kann das eingesetzte Material speziell auf die benötigte Anwendung ausgelegt und optimiert werden (z.B. durch Faserorientierung oder Auswahl der Matrix).

Problematisch ist bei diesem relativ neuen Material allerdings, dass wenig Erfahrungswerte vorhanden sind, wie z.B. bei der CFK-gerechten Konstruktion, Inspektion und Reparatur. Außerdem ist das Defekt- und Versagensverhalten von CFK sehr verschieden von dem klassischer Konstruktionsmaterialien wie Aluminium oder Stahl.

Im folgenden werden die Ergebnisse von ILT und anderen ZfP-Verfahren an CFK-Bauteilen mit typischen Defekten vorgestellt.

### 5.2.1 Detektion von Impactschäden in CFK

Impactschäden in einer CFK-Struktur sind besonders kritisch, da sie auf der Einschlagseite meistens kaum sichtbar sind. Sie entstehen z.B. durch „tool drop“ (also fallen gelassenes Werkzeug), Vogelschlag, Hagel, etc.. Trotz des unauffälligen Schadensbilds auf der Impactseite können innerhalb des Materials und auf dessen Rückseite schwere Schäden wie Faserbrüche und Delaminationen auftreten, da sich der Defekt kegelförmig in die Tiefe ausbreitet. Da aber im Regelfall nur ein einseitiger Zugang zum Prüfobjekt möglich ist (z.B. die Struktur eines Flugzeugs) müssen zerstörungsfreie Prüfmethode in der Lage sein, die kritischen Impactschäden auf der zugänglichen Impactseite zu detektieren. Im Folgenden sind einige Beispiele für die Detektion von Impactschäden in CFK mit ILT und anderen Verfahren aufgeführt.

#### Impactschäden in CFK-Rohr

Das folgende Beispiel zeigt die Überlegenheit der Phasen-Thermografie gegenüber der Transienten-Thermografie. Hierzu sind die Ergebnisse der induktiven Transienten-Thermografie, also das Bild des stärksten Kontrasts aus der Abkühlungssequenz, dem Phasenbild der Induktions-Burst-Phasen-Thermografie bei Inspektion eines CFK-Rohrs (50 mm Durchmesser, 5 mm Wanddicke) mit einem Impactschaden von 50 J (Probe freundlicherweise überlassen von Eurocopter - Ottobrunn) gegenübergestellt (Bild 5.10). Das Bild des stärksten Kontrasts (Bild 5.10, oben) zeigt nur einen starken Temperaturgradienten aufgrund der inhomogenen Erwärmung, die Defekte auf der Oberfläche des Rohres sind nur sehr schwach erkennbar. Die gewichtete Mittelung der Fouriertransformation bei Induktions-Burst-Phasen Thermografie steigert dagegen den Signal-Rausch Abstand im Vergleich zu Einzelbildern der IR-Bildsequenz deutlich. Im IBP-Phasenbild



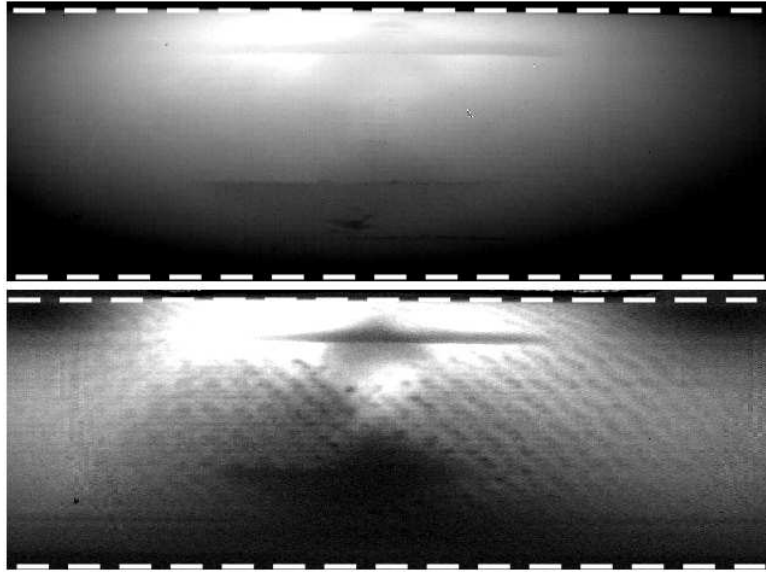


Abbildung 5.10: CFK-Rohr mit 50 J Impactschaden (Messbereich ca.  $140 \times 50 \text{ mm}^2$ ).  
Oben: Transienten-Thermografie, Bild des stärksten Kontrasts 0,65 s nach der Burstanregung. Unten: Induktive Burst-Phasen-Thermografie, Phasenbild bei 0,1 Hz [53].

(Bild 5.10, unten) sind die Delaminationen um die Einschlagstelle und zusätzlich die Faserorientierungen der elektrisch leitfähigen Kohlefasern sichtbar.

Aufgrund der niedrigen elektrischen Leitfähigkeit von CFK sollte die Wirbelstromeindringtiefe groß und so die Tiefenreichweite zur Defekterkennung mit ILT größer sein als die mit OLT (Abschnitt 2.2.3). Um dies zu überprüfen, wurde das CFK-Rohr mit beiden Methoden untersucht (Bild 5.11). Das Rohr und die Kamera wurden zwischen den beiden Messungen nicht bewegt, um denselben Bereich abzubilden.

Das Phasenbild der OLT (Bild 5.11, oben) zeigt die delaminierten Bereiche um den Einschlagpunkt und zusätzlich die thermische Struktur des CFK-Rohrs innerhalb der thermischen Eindringtiefe. Die Defektbereiche im ILT Phasenbild (Bild 5.11, unten) erscheinen im Vergleich zu denen im OLT-Ergebnis größer. Die Einschlagstelle ist besonders gut aufgelöst, da die Wirbelströme die vom Impact verursachten Faserbrüche hervorheben. Bei ILT werden also die thermischen Informationen (innerhalb der thermischen Eindringtiefe) mit den elektrischen Verlusten (innerhalb der Wirbelstromeindringtiefe) überlagert.

Die im OLT-Phasenbild andeutungsweise sichtbaren Delaminationsbereiche sind im ILT-Phasenbild nicht erkennbar. Der Grund hierfür ist wahrscheinlich, dass das relativ schwache Signal der stark gedämpften reflektierten thermischen Wellen vom stärkeren Signal der elektrischen Verluste an der Oberfläche der Probe (Faserorientierung) überdeckt wird. Außerdem ist die relativ niedrige Wirbelstromfrequenz von 48 kHz wahrscheinlich

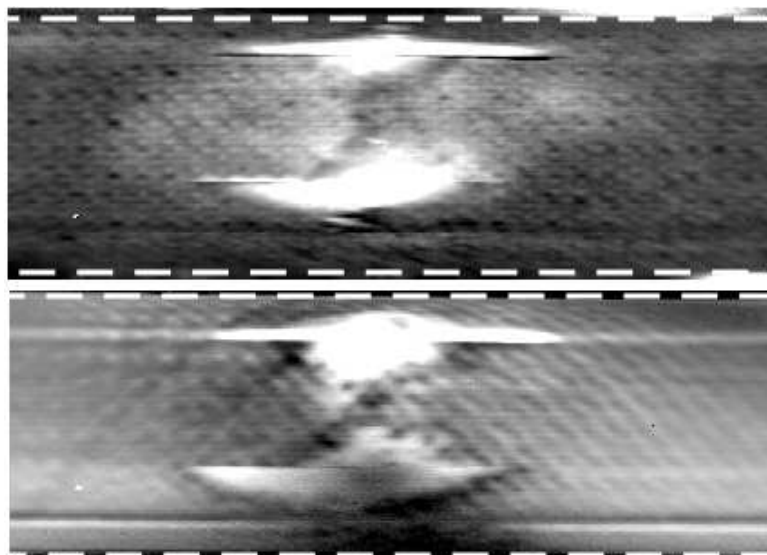


Abbildung 5.11: CFK-Rohr mit 50 J Impactschaden (Messbereich ca.  $140 \times 50 \text{ mm}^2$ ). Phasenbilder bei 0,1 Hz: Oben: OLT. Unten: ILT [53].

nicht ausreichend, um induktive Kopplungen zwischen den Kohlefasern zu erzeugen und auf diese Art die beabsichtigte Volumenheizung zu erreichen [56].

### **Vergleich von Ergebnissen der ILT, ULT und nichtlinearen Vibrometrie an einer CFK-Platte mit Impactschäden**

Das folgende Beispiel zeigt verschiedene Inspektionsergebnisse an einer 1 mm dicken quasiisotropen CFK-Platte mit mehreren Impactschäden (freundlicherweise überlassen von Dipl.-Ing. R. Aoki, DLR Stuttgart). Zuerst werden die Ergebnis-Phasenbilder von ILT und ULT miteinander verglichen (Abb. 5.12). Mit beiden Verfahren wurde die Vorderseite (=Impactseite) der CFK-Platte in Reflexionsanordnung geprüft.

Die Phasenbilder der ULT und der ILT unterscheiden sich stark hinsichtlich der scheinbaren Defektgröße (die ILT-Bilder wurden nachträglich entzerrt). Im ILT-Phasenbild (Abb. 5.12, links unten) sind die Impactschäden durch drei kleine längliche kontrastreiche Streifen markiert, außerdem ist die Laminatstruktur (45/-45) zu erkennen. Die zwei dunklen Kreise im Phasenbild wurden durch Piezo-Aktuatoren verursacht, die für andere Untersuchungen (im SFB 409) auf der Rückseite der Probe aufgeklebt waren. Das ULT-Phasenbild (Abb. 5.12, rechts) zeigt Bereiche mit erhöhtem mechanischem Verlustwinkel, also vor allem die tieferliegenden, stärker ausgedehnten Reibungsbereiche der im Tiefenprofil konusartigen Impactschäden. Man erkennt 4 Impactschäden, also einen mehr als im ILT-Phasenbild. Das ILT-Amplitudenbild (Abb. 5.12, links oben) zeigt, dass dieser Bereich um den vierten Impactschaden aufgrund der stark inhomogenen Erwärmung durch die Induktionsspule kalt geblieben ist. Das ILT-Phasenbild, das nur die lokale

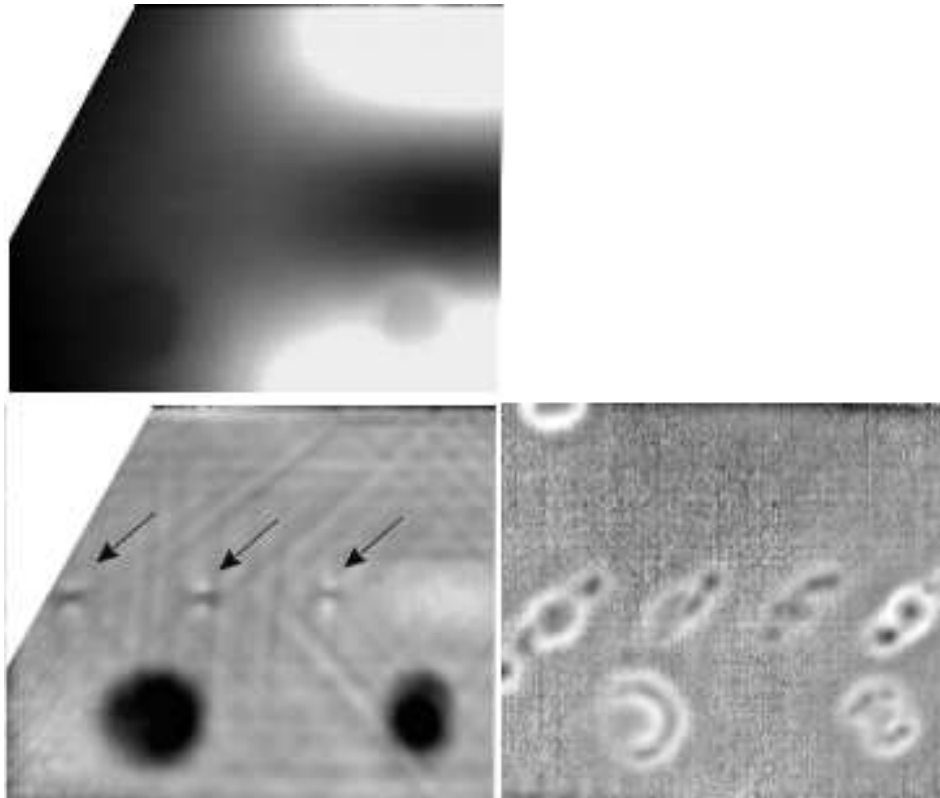


Abbildung 5.12: CFK-Probe mit Impactschäden (Messbereich ca.  $160 \times 130 \text{ mm}^2$ ). Links oben: ILT-Amplitudenbild. Links unten: ILT-Phasenbild, Pfeile Markieren die Impactschäden. Rechts: ULT-Phasenbild. Jeweils 0,1 Hz Lockin-Frequenz, geprüft von der Vorderseite [77].

Verzögerung des Wärmetransport darstellt, unterdrückt zwar die Inhomogenitäten der Leistungszufuhr, in Bereichen mit schwacher Temperaturmodulation (schwarze Bereiche im Amplitudenbild), sinkt im Phasenbild jedoch das Signal/Rausch-Verhältnis (Abb. 5.12 unten, im Bereich des vierten Impactschadens). Im Amplitudenbild sind keine Impactschäden sichtbar, es ist somit sehr viel aussageschwächer als das Phasenbild. Durch die völlig unterschiedlichen Erwärmungsmechanismen bei ULT und ILT erscheinen die Impactschäden in den Phasenbildern sehr verschieden. ILT spricht hauptsächlich auf Faserbrüche an [78], diese treten im Spitzenbereich des Konus auf, während es in dessen unterem Bereich zu Schubversagen und Delamination kommt, auf die ULT reagiert. Beide Verfahren ergänzen also einander zur Defektcharakterisierung, ihre Kombination könnte sich für eine automatische Defektidentifizierung eignen.

Dieselbe Probe wurde auch mit Induktions-Burst-Phasen Thermografie untersucht und das Ergebnisphasenbild mit dem Bild des stärksten Kontrasts konventioneller Transiententhermografie verglichen (Abb. 5.13). Dabei kam ein verbesserter Induktor mit einer homogenen Erwärmung zum Einsatz (Abb. 3.5).

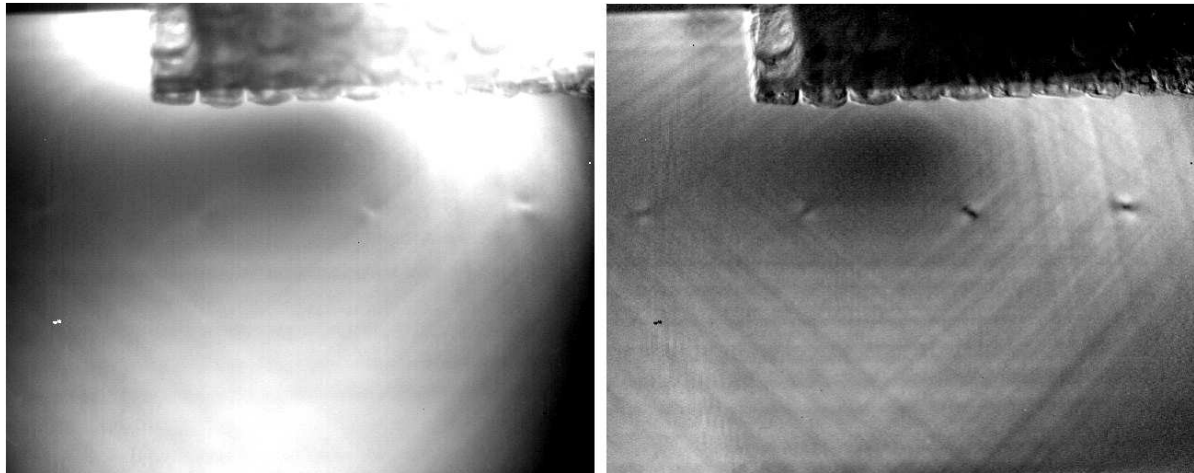


Abbildung 5.13: CFK-Probe mit Impactschäden, geprüft von der Vorderseite (Messbereich ca.  $160 \times 130 \text{ mm}^2$ ). Links: Bild des stärksten Kontrasts 500 ms nach dem Anregungsburst. Rechts: IBP-Phasenbild bei 0,5 Hz [54].

Das Bild des stärksten Kontrasts aus der Abkühlungssequenz zeigt besonders in der Nähe des Induktors starke Temperaturgradienten (Abb. 5.13, links). Es sind nicht alle Impactschäden im IR-Bild erkennbar. Die Fouriertransformation der Abkühlungssequenz bei IBP liefert ein im Vergleich zum Einzelbild homogeneres Phasenbild. Aufgrund des höheren S/N-Abstands des Phasenbilds sind auch Impactschäden sichtbar, die im Einzelbild nicht erkennbar waren (Abb. 5.13, rechts). Es zeigt außerdem die Faserorientierung der äußeren Lagen und die durch die Impactschäden verursachten Faserbrüche. Phasenbilder der IBP haben also deutliche Vorteile gegenüber Einzelbildern der Abkühlungssequenz (Transiententhermografie).

Dieselbe Probe wurde auf ihrer Vorder- und Rückseite auch mit nichtlinearer Vibrometrie untersucht (Abb. 5.14). Die Anregung erfolgte durch einen Ultraschallkonverter mit 20 kHz und einer Anregungsamplitude von ca.  $1 \mu\text{m}$ .

Die Impactschäden ergeben ein klares Signal bei der vierten Harmonischen (Abb. 5.14), während außerhalb der Defekte keine Amplitude detektierbar ist. Aufgrund der geringen Anregungsamplitude von nur  $1 \mu\text{m}$  sind keine großen Tiefenreichweiten zur Defekterkennung möglich. Als Konsequenz zeigt das Amplitudenbild der vierten Harmonischen auf der Impactseite nur die charakteristischen kleinen Defektstellen (Abb. 5.14, oben). Das Ergebnis ähnelt dem ILT-Phasenbild, das die oberflächennahen Faserbrüche zeigt (Abb. 5.12, links unten). Da sich der Impactschaden kegelförmig im Laminat ausbreitet, detektiert die Inspektion der Rückseite große Delaminationen (Abb. 5.14, unten). Dieses Ergebnis gleicht dem ULT-Phasenbild (Abb. 5.12, rechts unten), wobei mit ULT von der Impactseite geprüft wurde, weshalb die Defektorientierung gespiegelt erscheint.

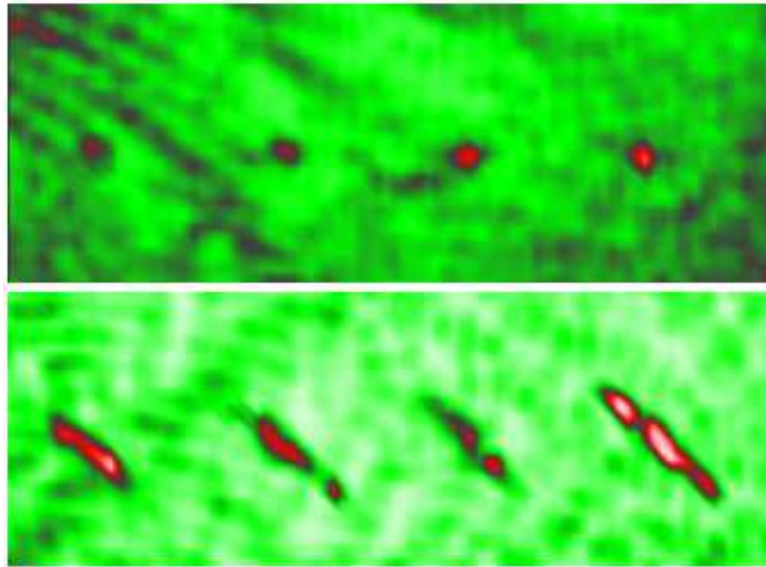


Abbildung 5.14: CFK-Probe mit Impactschäden, geprüft mit nichtlinearer Vibrometrie (Messbereich ca.  $170 \times 60 \text{ mm}^2$ ). Amplitudenbilder der vierten Harmonischen [79]. Oben: Impactseite. Unten: Rückseite.

### 5.2.2 Detektion von Stringerschäden

Die vorangegangenen Beispiele haben die Detektion von Fehlstellen an plattenartigen CFK-Bauteilen gezeigt. In der ZfP-Praxis sind jedoch meistens komplexere Geometrien zu prüfen, was beim ILT-Verfahren Probleme bereiten kann, da auch jede Bauteilkante den Wirbelstromfluss beeinflusst und somit einen Randeffect verursacht. Im Folgenden wird eine ILT-Inspektion an einer CFK-Landeklappe (Probe freundlicherweise überlassen von Airbus Bremen) gezeigt (Abb. 5.15). Die Klappe hat zur Versteifung Stringer auf der Rückseite, wobei ein Stringer gebrochen ist. Da in der Messpraxis die beidseitige Zugänglichkeit oft nicht gegeben ist, sind einseitige Messmethoden vorzuziehen. Daher wurde auch die ILT-Messung in dieser Reflexionsanordnung auf der glatten Außenseite der Landeklappe durchgeführt.

Im ILT-Phasenbild (Abb. 5.15, unten) ist der Stringerbruch auf der rechten Seite als Unregelmäßigkeit entlang der durch den Stringer erkennbaren Aufdickung zu sehen. Die Deckschicht der Landeklappe hat eine Dicke von 3 mm. Das Phasenbild zeigt auch die Laminatstruktur der oberen Lagen (+45/-45). Dieses Praxisbeispiel demonstriert, dass mit ILT auch bei komplexeren CFK-Strukturen Defekte nachweisbar sind und die Tiefenreichweite von ILT an CFK deutlich über die ersten Laminatschichten hinaus gehen kann.

Die Landeklappe wurde zum Vergleich auch mit nichtlinearer Vibrometrie untersucht (Abb. 5.16). Die Anregung erfolgte dabei mit einer 20 kHz Sonotrode und einem zusätzlichen Piezoaktuator mit 3,25 kHz. Aufgrund des nichtlinearen Verhaltens der Schadstelle

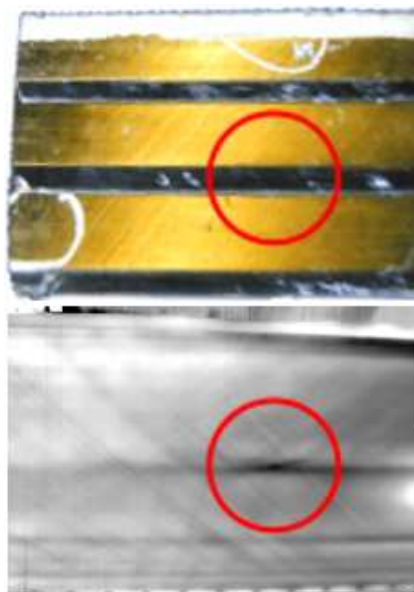


Abbildung 5.15: ILT-Inspektion einer CFK Landeklappe mit Stringerbruch (Messbereich ca.  $330 \times 240 \text{ mm}^2$ ). Oben: Foto der Landeklappenrückseite. Unten: ILT Phasenbild bei 0,1 Hz [80], aufgenommen an der glatten Vorderseite.

wird eine Mischfrequenz von 23,25 kHz lokal erzeugt. Das Amplitudenbild bei dieser Frequenz zeigt also selektiv den Bereich des Stringerschadens, nicht geschädigte Struktur wird unterdrückt. Die Amplituden der Mischfrequenz (durch Pfeil markiert) wurden zur leichteren Fehlerortung mit einem Foto der Bauteiloberfläche überlagert (Abb. 5.16).

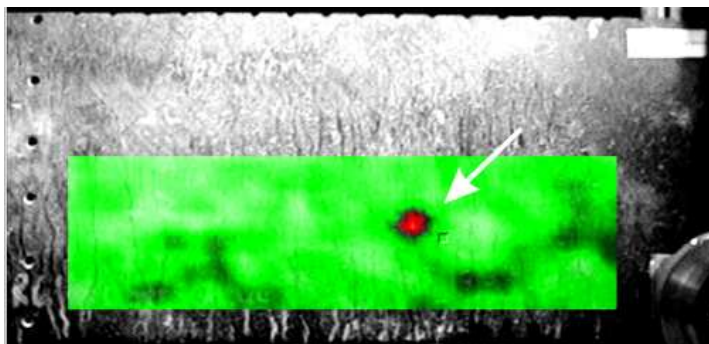


Abbildung 5.16: Ergebnis der nichtlinearen Vibrometrie an einer CFK Landeklappe mit Stringerbruch (Messbereich ca.  $410 \times 115 \text{ mm}^2$ ). Amplitudenbild der Mischfrequenz bei 23,25 kHz [81].

Eine weitere defektselektive Prüfmethode ist die ultraschallangeregte ESPI (Abschnitt 1.2). Bei ihr wird anstelle optischer Quellen eine Ultraschallsonotrode zur Anregung verwendet. Bereiche mit erhöhtem mechanischem Verlustwinkel (z.B. Risse, Delaminationen) erwärmen sich lokal stärker und verursachen so eine lokale Ausdehnung, die

mit ESPI nachgewiesen werden kann. Die Landeklappe wurde auch mit dieser Methode untersucht (Abb. 5.17).

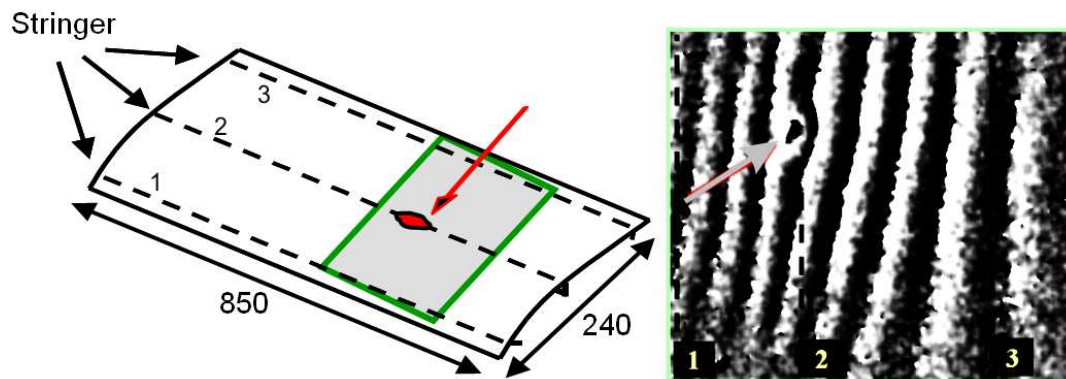


Abbildung 5.17: Ultraschall-ESPI Untersuchung an CFK-Landeklappe mit Stringerbruch (Messbereich ca. 290\*240 mm<sup>2</sup>). Links: Schematische Darstellung. Rechts: Ergebnisbilder der Ultraschall-ESPI [38].

Im Idealfall eines völlig steif eingespannten Bauteils entsteht nur über dem Defektbereich ein Streifenmuster. In der gezeigten Messung hat sich die Landeklappe aber bei der Ultraschallankopplung leicht verkippt, wodurch ein regelmäßiges Streifenmuster auch im ungeschädigten Bereich entstand. Der Defekt selbst ist erkennbar und lässt sich eindeutig lokalisieren (Abb. 5.17, rechts).

Der gebrochene Stringer der Landeklappe wurde mit allen drei defektselektiven Verfahren (ILT, nichtlineare Vibrometrie und Ultraschall-ESPI) nachgewiesen.

### 5.2.3 Inspektion adaptiver Strukturen

Durch Einbetten von Piezokeramiken in CFK werden formadaptive Strukturen („smart structures“) erzeugt. Diese eingebauten Keramiken können entweder als Sensoren z.B. zur Detektion und Bewertung von Impactschäden [82] verwendet werden („structural health monitoring“<sup>1</sup>) oder als Aktuatoren Kräfte in eine CFK Struktur einleiten, um so z.B. Vibrationen zu dämpfen oder die aerodynamische Form von Flügeln und Rotoren der aktuellen Flugmission anzupassen.

Bei der Herstellung adaptiver Strukturen kann es aufgrund hohen Drucks und Temperaturgradienten zum Aktuatorbruch oder auch zu mangelnder Kraftschlüssigkeit kommen. Hierdurch wird die Funktionsfähigkeit adaptiver Strukturen gefährdet. Es werden also zerstörungsfreie Prüfverfahren benötigt, die auf solche Fehler ansprechen. Die Prüfverfahren können dabei direkt die elektromechanischen Eigenschaften der Wandler ausnutzen. Beispiele hierfür sind ultraschallangeregte Lockin-Thermografie und nichtlineare

<sup>1</sup>Strukturelle Zustandsüberwachung

Vibrometrie, die als Sender elastischer Wellen die eingebauten Piezoaktuatoren verwenden [83, 84]. Auch Wirbelstromprüfung wurde bereits erfolgreich zur Prüfung adaptiver Strukturen eingesetzt [85, 86, 87]. Im folgenden Beispiel wird die wirbelstromangeregte Lockin-Thermografie zur Inspektion eines eingebetteten Piezoaktuators verwendet.

In einer Modellprobe aus quasiisotropem Kohlefaser-Epoxidharz-Laminat (Probe freundlicherweise überlassen von Dr. J. Dürr - Fa. DaimlerChrysler Aerospace Dornier GmbH) wurden vier zweilagige Aktorelemente (ACX QP 20N) oberflächennah eingebettet (Abb. 5.18).

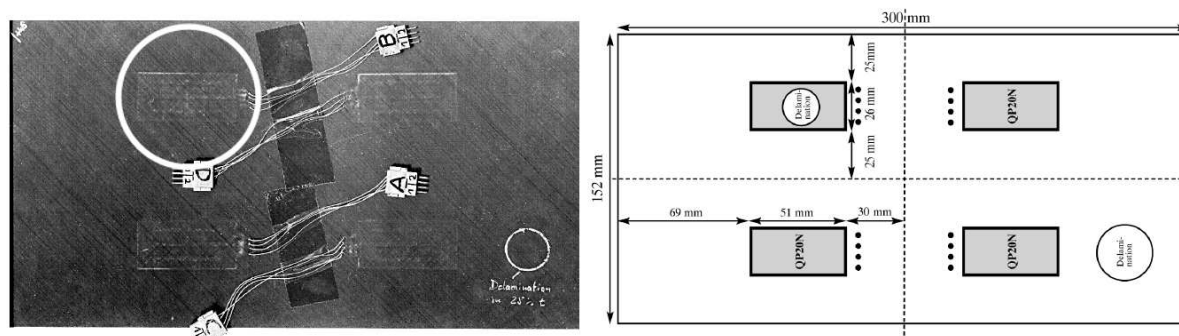


Abbildung 5.18: Adaptive Struktur mit künstlich eingebrachten Delaminationen. Links: Foto der Probe (weißer Kreis markiert geprüften Bereich). Rechts: Schematischer Aufbau [40].

An zwei Positionen (direkt auf einem Aktuator und im CFK) wurden kreisförmige PTFE-Folien eingebracht, die lokal zu einer Enthftung führten [40]. Der Aktuator mit der simulierten Delamination wurde mittels Induktions-Lockin-Thermografie (50 kHz Wirbelstromfrequenz) bei zwei Lockin-Frequenzen (1,5 und 0,5 Hz) untersucht (Abb. 5.19). Das Phasenbild bei 1,5 Hz zeigt gut aufgelöst die Struktur des oberflächennah eingebetteten Aktuators, es sind darin keine Defekte sichtbar (Abb. 5.19, links). Das Phasenbild desselben Aktuators bei 0,5 Hz zeigt hingegen die simulierte Delamination als schwarzen Kreis, die Struktur des Aktuators ist in diesem Phasenbild nur schwach erkennbar (Abb. 5.19, rechts).

Tiefere Lockin-Frequenzen erhöhen die Tiefenreichweite zur Defekterkennung, da allerdings in diesem Messbeispiel die simulierte Delamination auf dem Aktuator (also oberflächennah) angebracht ist, erklärt diese Gesetzmäßigkeit nicht die unterschiedlichen Informationen bei den zwei Lockin-Frequenzen. Die Erklärung ist viel mehr eine Phasenumkehr [18], die zufällig mit der Anzeige von Struktur und Delamination übereinstimmt. Bei 1,5 Hz hat die Delamination ihre „Blind Frequency“ (Abschnitt 2.2.1), also die Frequenz, bei der die Phasenkurve eine Kontrastumkehr hat und somit keine Information liefert. Bei 0,5 Hz ist dagegen die Struktur des Piezos zufällig nahe dieser „Blind Frequency“ und ist daher im Phasenbild nur schwächer sichtbar.



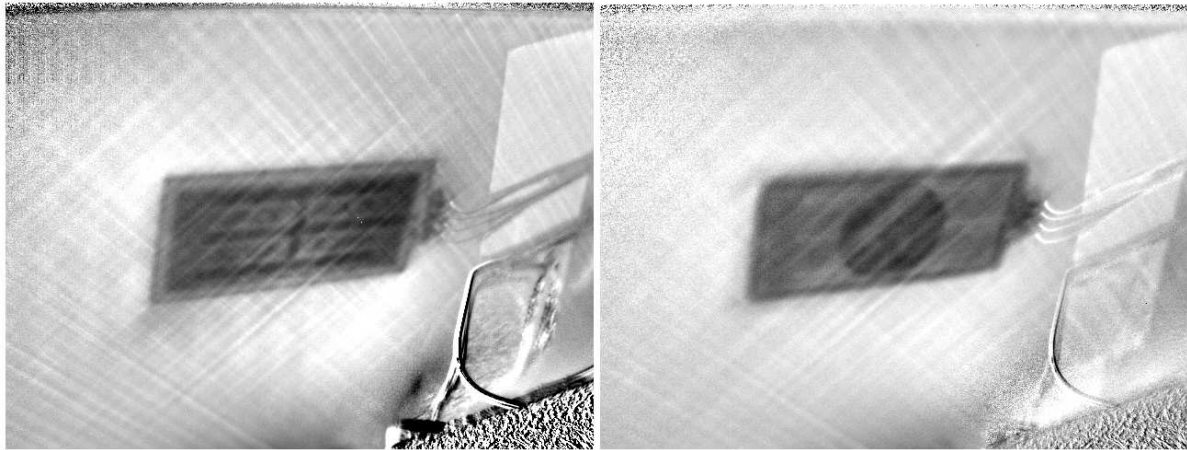


Abbildung 5.19: ILT-Phasenbilder des Aktuators mit simulierter Delamination (Messbereich ca.  $110 \times 75 \text{ mm}^2$ ). Links: Lockin-Frequenz 1,5 Hz. Rechts: Lockin-Frequenz 0,5 Hz [74].

Dieses Inspektionsbeispiel zeigt, dass unterschiedliche Lockin-Frequenzen neben der Tiefeninformation unter Umständen auch weitere Informationen über das geprüfte Bauteil liefern. Die „Blind Frequency“ könnte nach Kalibrierung mit einem bekannten Probekörper z.B. zur Schichtdickenmessung genutzt werden.

### 5.3 Kohlefaserverstärkte Keramik (C/C-SiC)

Kohlefaserverstärkte Siliziumkarbidkeramik (C/C-SiC) ist ein keramischer Verbundwerkstoff, in dem Kohlefasern in eine Siliziumkarbidmatrix eingebettet sind. Die Vorteile dieses Materials sind die Kombination von niedrigem Gewicht mit hoher Festigkeit und Härte, es wird deshalb z.B. für Bremscheiben verwendet, die über die gesamte Lebensdauer des Autos praktisch keinen Verschleiß zeigen. Außerdem ist C/C-SiC hoch hitzebeständig, weshalb es für den Hitzeschutz in Raumtransportfahrzeugen, wie z.B. der Nasenkappe der „X-38“, geeignet ist.

Die Produktion von C/C-SiC erfolgt in einem 3-stufigen Prozess. Zuerst wird das Bauteil in CFK hergestellt, dann oberhalb von  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  pyrolysiert. Der dadurch entstandene kohlenstofffaserverstärkte Kohlenstoff (C/C) ist mit einem kapillaren Risskanalnetz durchzogen, das mit flüssigem Silizium oberhalb von  $1420 \text{ }^\circ\text{C}$  infiltriert wird. Der hauptsächlich aus der ehemaligen CFK-Matrix bestehende Kohlenstoff verbindet sich mit dem infiltrierten Silizium zu Siliziumkarbid (SiC), es entsteht so die kohlenstofffaserverstärkte Keramik C/C-SiC [88].

### 5.3.1 Detektion von Delaminationen in C/C-SiC

Potentielle Fehler dieses Werkstoffs sind Risse und Delaminationen innerhalb des Bauteils oder inhomogene Infiltrierung des Siliziums. Zur Prüfung von C/C-SiC werden bereits zerstörungsfreie Prüfverfahren wie luftgekoppelter Ultraschall [89] und optisch [88] und ultraschallangeregte Lockin-Thermographie [90] eingesetzt. Da die Kohlefasern elektrisch leitfähig sind, können auch Wirbelstromverfahren für die Qualitätssicherung genutzt werden. Konventionelle Wirbelstromprüfung wies Oberflächenkerben, Risse und Inhomogenitäten direkt unter der Werkstoffoberfläche nach [91]. Auch Induktions-Lockin-Thermografie kann zur Fehlerdetektion verwendet werden [52], ein Beispiel hierfür ist die Inspektion einer 32 mm dicken C/C-SiC-Modellplatte mit einer großflächigen Enthaftung in einer Tiefe von etwa 6 mm in der linken oberen Ecke (Abb. 5.20). Die Delamination ist am Probenrand auch optisch sichtbar.

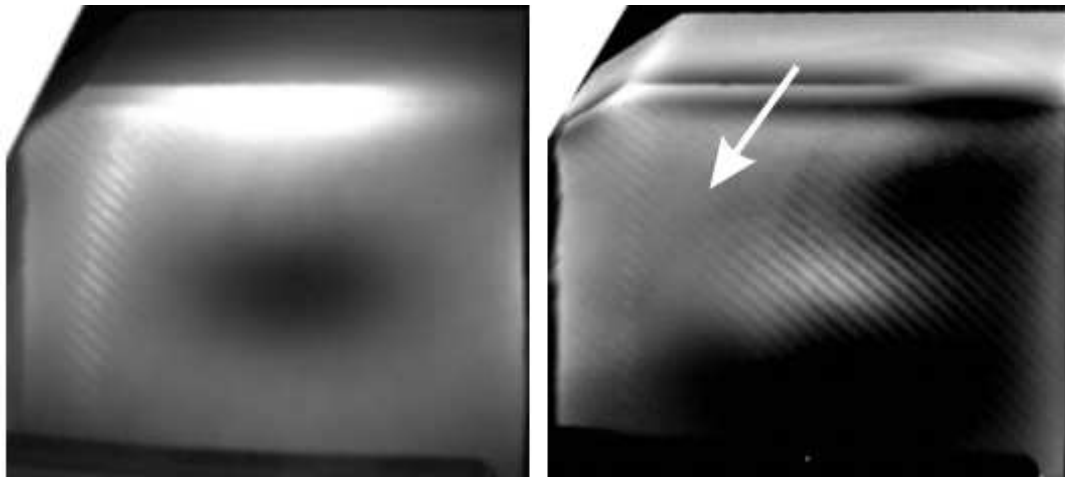


Abbildung 5.20: C/C-SiC Platte mit Delamination (Messbereich 185\*150\*32 mm<sup>3</sup>). Links: Amplitudenbild (0,1 Hz). Rechts: Phasenbild (0,1 Hz) [52].

Das Amplitudenbild bei 0,1 Hz Lockin-Frequenz (Abb. 5.20, links) zeigt die inhomogene Erwärmung durch den Induktor. Die Randbereiche werden stark erwärmt, während in der Mitte der Probe ein schwarzer Fleck sichtbar ist, der einen aufgrund der Spulengeometrie (Abschnitt 3.2.3) nicht erwärmten Bereich zeigt. Der Delaminationsbereich ist auf der oberen Stirnseite der Probe erkennbar. Die Delamination erzeugt eine zusätzliche Grenzschicht, die den Wärmeabtransport behindert, es kommt zu einem lokalen Wärmestau. Das Phasenbild bei 0,1 Hz (Abb. 5.20, rechts) zeigt die bereits im Amplitudenbild sichtbare Begrenzung der Delamination auf der Stirnseite der Probe. Zusätzlich ist aber auf der Vorderseite der Platte links oben auch die flächenhafte Ausdehnung des 6 mm unter der Oberfläche liegenden Delaminationsschadens erkennbar (hell dargestellt und mit weißem Pfeil markiert).

Die Probe wurde auch mit nichtlinearer Vibrometrie untersucht. Der 20 kHz US-Konverter

wurde mit einer Leistung von 500 W betrieben. Dargestellt sind sowohl das Amplitudenbild der zweiten Harmonischen (also die Amplitude bei 40 kHz) als auch der Amplitudenverlauf entlang der eingezeichneten Linie (Abb. 5.21). Im delaminierten Bereich treten hohe Amplituden der zweiten Harmonischen auf, die zum ungeschädigten Bereich hin stark abfallen. Dies verdeutlicht auch das Profil entlang der eingezeichneten Linie (Abb. 5.21, unten).

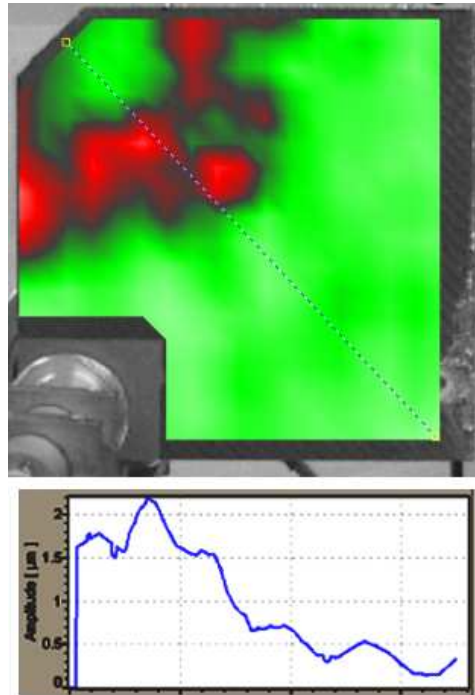


Abbildung 5.21: C/C-SiC Platte mit Delamination (Messbereich  $185 \times 150 \text{ mm}^2$ ). Anregung bei 20 kHz mit 500 W elektrischer Leistung. Amplitudenbild der zweiten Harmonischen (40 kHz) [40].

Das Ergebnis der Obertonvibrometrie ist trotz der völlig unterschiedlichen Mechanismen zur Defektmarkierung dem der ILT sehr ähnlich. Der relativ große und tief liegende Defekt kann mit beiden Verfahren zuverlässig nachgewiesen werden.

## 5.4 Glare®

Aluminium wird im Flugzeugbau als Konstruktionswerkstoff aufgrund seines geringen Gewichts eingesetzt. Die Außenhaut der meisten derzeit fliegenden Flugzeuge bestehen aus ca. 1 mm dickem Aluminiumblech. Der Nachteil von Aluminium ist allerdings, dass es nicht ermüdungsfest ist. Dies wird durch eine Auslegung der Struktur ausgeglichen, bei der die auftretenden Ermüdungsrisse so langsam wachsen, dass sie unkritisch bleiben und bei der nächsten Inspektion gefunden werden. Die geringen Risswachstumsraten be-

dingen allerdings relativ kleine zulässige Spannungen in der Struktur. Um die Vorteile von Aluminium mit einer großen Festigkeit und einer hohen Schadenstoleranz und damit höheren Betriebslasten zu kombinieren, wurde an der Fakultät für Luft- und Raumfahrt-technik der Technischen Universität Delft das Material Glare<sup>®</sup> entwickelt [92].

Glare<sup>®</sup> ist ein faserverstärktes Laminat aus alternierenden Schichten von Aluminiumblechen und glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK). Das Material verbindet die plastische Verformbarkeit von Aluminium mit der großen Festigkeit der Verstärkungsfasern. Der große Vorteil von Glare ist dabei sein tolerantes Schadensverhalten, da die Auswirkungen von Ermüdungsrissen stark reduziert und somit höhere Spannungen in der Struktur möglich werden. Bei Auftreten eines Risses in einem Aluminiumblech bleiben die Fasern des GFK intakt und verhindern so ein Öffnen des Risses, außerdem wird ein Teil der Belastung über die Fasern abgeführt [92]. Ein weiterer Vorteil von Glare ist seine hohe Korrosionsbeständigkeit, da die GFK-Lagen die Aluminiumbleche vor Feuchtigkeit schützen. Aufgrund dieser vorteilhaften Eigenschaften wird Glare bereits in modernen Verkehrsflugzeugen wie z.B. der A380 eingesetzt. Die bis zu zehn Meter breiten und dreieinhalb Meter hohen Glare-Rumpfschalen der A380 weisen eine um rund zehn Prozent niedrigere Dichte gegenüber reinen Aluminiumschalen auf. Damit verringert sich das Gewicht jeder A380 allein durch den Einsatz von Glare um ca. 800 Kilogramm [93].

#### 5.4.1 Detektion von Delaminationen in Glare<sup>®</sup>

Eine Aufgabenstellung bei der Inspektion dieses Werkstoffs ist die Detektion von Delaminationen zwischen den Aluminiumblechen und GFK-Lagen. Mit Ultraschallprüfung wurden bereits Risse in genieteten Glare<sup>®</sup> Verbindungsbereichen detektiert [94]. Durch PTFE-Folien simulierte Delaminationen wurden mit ultraschallangeregter Thermografie erfolgreich nachgewiesen [95], der Nachteil dieses Verfahrens ist allerdings die nicht berührungsfreie Anregung. Glare<sup>®</sup> wurde auch mit ILT untersucht, da sich Aluminium bei induktiver Heizung sehr gut erwärmt. Die ILT Messung an einer Modellprobe (362\*362 mm<sup>2</sup>) mit durch PTFE-Folie simulierter Delamination (Probe freundlicherweise zur Verfügung gestellt von Airbus Deutschland Bremen) erfolgte in Transmissionsanordnung (Abb. 5.22). Den Einfluss der Anregungsspulenposition auf das Ergebnis wurde durch Anregung an zwei verschiedenen Positionen untersucht. Gezeigt sind die beiden Amplituden- (Abb. 5.22, links) und Phasenbilder (Abb. 5.22, rechts).

Die Amplitudenbilder sind sehr inhomogen, die Zentren der erwärmten Bereiche sind schwarz dargestellt (Abb. 5.22, links). Da sich bei der Messung mit nach rechts verschobenem Induktor das Muster mitbewegt (Abb. 5.22, links unten) handelt es sich bei dem schwarzen Fleck nicht um einen Hinweis auf einen Defekt in der Probe, sondern lediglich um ein Messartefakt, verursacht durch die stark inhomogene Erwärmung der Induktionsspule (die Messungen wurden noch mit der „alten“ inhomogenen Induktions-

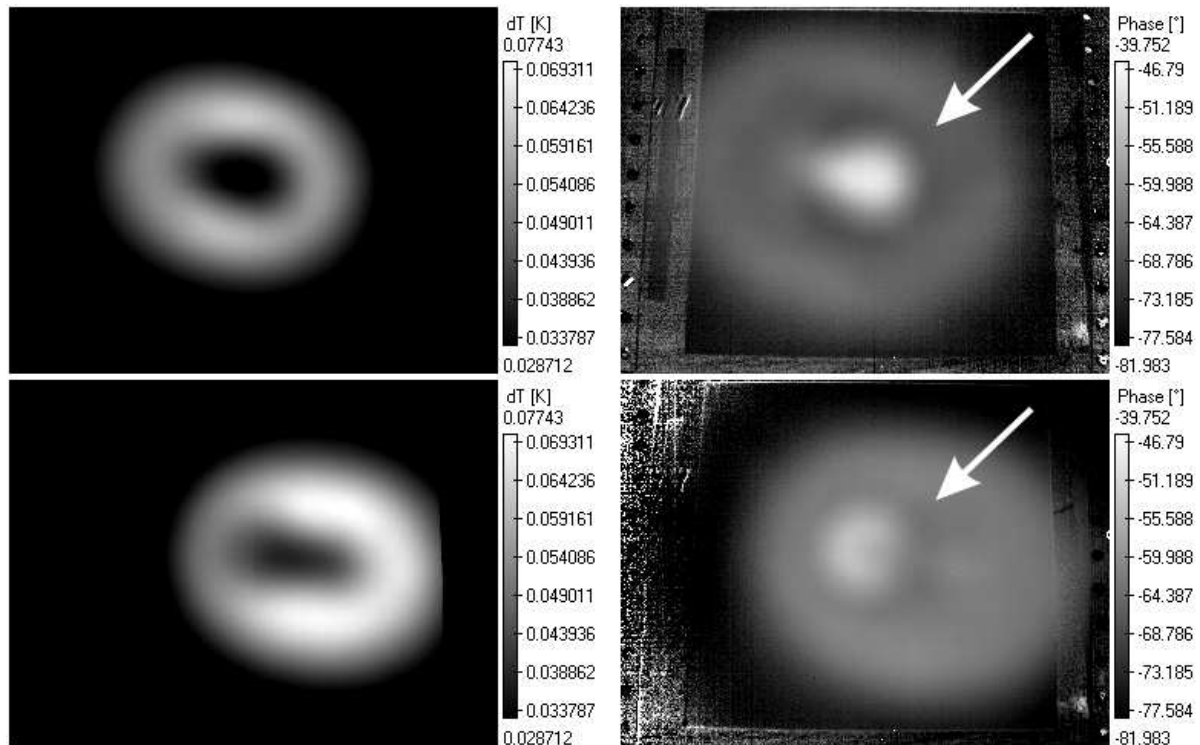


Abbildung 5.22: Glare® Modell-Probe mit simulierter Delamination (Messbereich ca.  $362 \times 362 \text{ mm}^2$ ). Links: Amplitudenbilder bei 0,1 Hz. Rechts: Phasenbilder bei 0,1 Hz. Untere Reihe: Messung mit verschobener Induktionsspule.

spule durchgeführt, die Probe stand nach Fertigstellung der neuen in Abschnitt 3.2.3 beschriebenen Zylinderspule nicht mehr für Vergleichsmessungen zur Verfügung).

Auch die Phasenbilder zeigen deutlich den erwärmten Bereich, da nur innerhalb der modulierten Erwärmungszone ein Signal entstehen kann (Abb. 5.22, rechts). Die in den Amplitudenbildern auffälligen schwarzen Flecken der erwärmten Bereiche haben jedoch offensichtlich keine Auswirkungen auf die Homogenität der Phasenbilder, was ja auch ein wesentlicher Vorteil der Phasendarstellung ist. In den Phasenbildern ist eine kreisrunde Struktur auffällig, die sich nicht mit der Spulenposition mitbewegt (Abb. 5.22, rechts) und in beiden Messungen gleich groß ist (markiert durch Pfeile). Hierbei handelt es sich um das Signal der simulierten Delamination. Die Phasenbilder zeigen also die simulierte Delamination in Glare®, die in den Amplitudenbildern nicht sichtbar ist.

Die Probe wurde zum Vergleich auch mit ultraschallangeregter Thermografie und nicht-linearer Vibrometrie untersucht (Abb. 5.23). Beide Verfahren verwenden zur Anregung eine Ultraschallsonotrode (20 kHz), die fest an das Bauteil angekoppelt wird. Sie ist auch in den Ergebnisbildern sichtbar.

Das Phasenbild der ultraschallangeregten Thermografie zeigt defektselektiv die simulier-

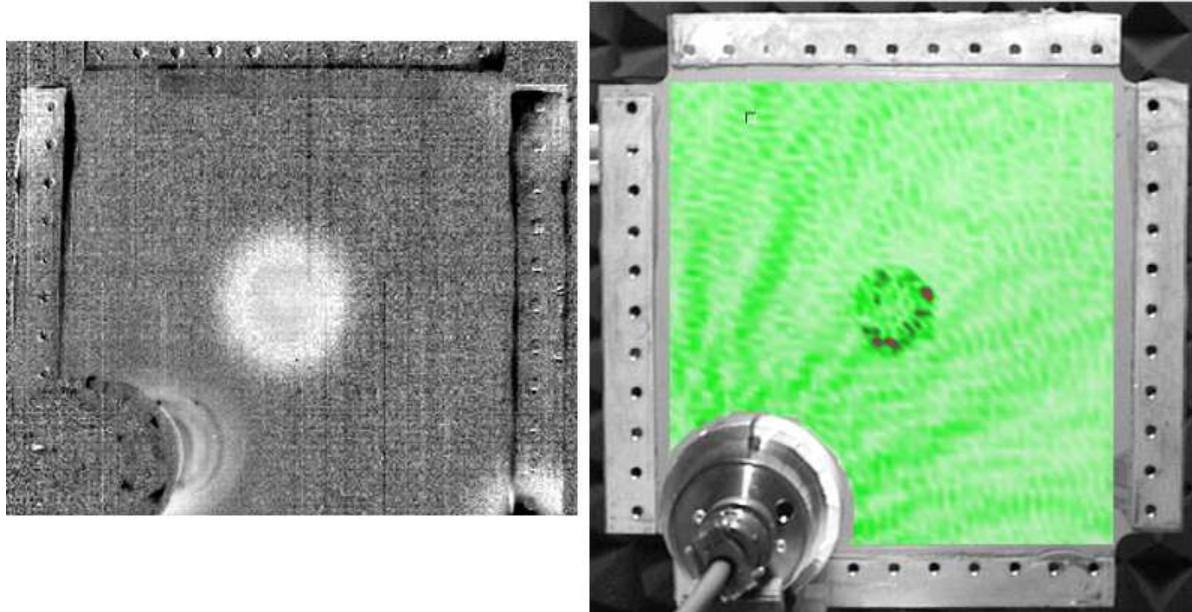


Abbildung 5.23: Glare<sup>®</sup> Modell-Probe mit Delamination (Messbereich ca. 362\*362 mm<sup>2</sup>). Links: ULT-Phasenbild bei 0,1 Hz. Rechts: Nichtlineare Vibrometrie, Amplitudenbild der vierten Harmonischen (80 kHz).

te Delamination aufgrund des erhöhten mechanischen Verlustwinkels in diesem Bereich (Abb. 5.23, links). Das Amplitudenbild der vierten Harmonischen der nichtlinearen Vibrometrie zeigt klar begrenzt den Bereich der künstlichen Delamination aufgrund dessen Nichtlinearität (Abb. 5.23, rechts). Diese Ergebnisse bestätigen die mit ILT detektierte Delamination in Position und ungefähre Größe.

## 6 Diskussion und Ausblick

Im folgenden werden die Vor- und Nachteile der Induktions-Lockin-Thermografie diskutiert, die aus den theoretischen Überlegungen und den praktischen Erfahrungen resultieren. Es wird dabei auf mögliche industrielle Anwendungsgebiete, aber auch auf Grenzen der ILT-Prüfung eingegangen.

Induktions-Lockin-Thermografie verwendet eine Spule zur Induktion von Wirbelströmen in elektrisch leitfähigen Materialien. Diese erwärmen sich aufgrund elektrischer Verluste. Durch nicht optimales Spulendesign oder bei komplizierten Probengeometrien kann diese induktive Erwärmung allerdings sehr inhomogen sein. Eine Lösung hierfür ist die Anpassung der Spule auf die jeweilige Bauteilgeometrie, was für ein universell einsetzbares ZfP-Verfahren mit einer Vielzahl von zu untersuchenden Geometrien jedoch nicht praktikabel ist. In dieser Arbeit wurde die Problematik durch die Verwendung robuster Phasenbilder gelöst, da sie gegen unterschiedliche Temperaturamplituden unempfindlich sind und homogenere Bilder als einzelne Thermogramme liefern. Phasenbilder kommen allerdings auch an ihre Grenzen, wenn die Erwärmung so inhomogen ist, dass einzelne Bauteilbereiche keine Temperaturmodulation erfahren. In diesem Fall ist im Phasenbild an den entsprechenden Stellen nur Rauschen sichtbar. Ein Induktor muss also in allen relevanten Bauteilbereichen eine Mindesttemperaturamplitude erzeugen.

Bei der verwendeten Induktionsanlage ist problematisch, dass der Induktor wassergekühlt ist, da die Anlage zur Wärmebehandlung z.B. von Stahl ausgelegt wurde, bei der auch der Induktor hohen Temperaturen ausgesetzt ist. Für die ILT bedeutet dies eine Einschränkung, da die Induktoren aus Kupferrohr hergestellt werden müssen und so nur einfache Spulengeometrien realisierbar sind. Die Größe des Induktors bestimmt maßgeblich die mit ILT prüfbare Fläche. Da seiner Größe jedoch Grenzen gesetzt sind, ist auch der prüfbare Bereich (oder die Probengröße) eingeschränkt. Dies kann nicht durch eine größere Entfernung des Induktors ausgeglichen werden, da das magnetische Feld mit dem Abstand zur Induktionsspule stark abfällt. Die Spule muss daher immer relativ nah an der Probenoberfläche positioniert werden. Neben der Begrenzung des Messbereichs hat der geringe Spulenabstand den weiteren Nachteil, dass der direkt erwärmte Bereich wegen der Abdeckung durch die Spule meistens nur perspektivisch verzerrt dargestellt werden kann. Dieses Problem behebt allerdings eine nachträgliche Bildbearbeitung.

Die Tiefenreichweite der ILT zur Defekterkennung ist von den elektrischen und den ther-

mischen Materialeigenschaften abhängig, wie theoretisch an verschiedenen Materialarten gezeigt wurde. Bei Proben mit hoher elektrischer Leitfähigkeit (z.B. Metalle) entspricht die Wirbelstromerwärmung aufgrund des „Skin Effekts“ einer Oberflächenheizung. Die Tiefenreichweite zur Defekterkennung ist deshalb aber nicht auf die geringe Wirbelstromeindringtiefe begrenzt, wie dies bei der konventionellen Wirbelstromprüfung der Fall ist. Defekte mit thermischen Grenzflächen (z.B. Poren oder Einschlüsse), die tiefer als die Wirbelstromeindringtiefe liegen, werden, abhängig von der thermischen Eindringtiefe, über die Reflexionen thermischer Wellen detektiert. Die detektierbaren Fehlerarten entsprechen denen der optisch angeregten Lockin-Thermografie (OLT). Der Vorteil von ILT gegenüber OLT ist eine größere Effektivität der Heizung, es kann so unter Umständen eine Schwärzung der Oberfläche entfallen. Bei Inspektion großer Flächen ist allerdings aufgrund des begrenzten Messbereichs die OLT vorzuziehen.

ILT detektiert zuverlässig oberflächennahe Risse in metallischen Werkstoffen und erlaubt sogar deren Klassifizierung zwischen klaffenden und geschlossenen Rissen. Klaffende Risse sind ein Hindernis für Wirbelströme, es kommt somit zu einer lokalen Ausdünnung der Wirbelströme vor den Defekten und zu einer erhöhten Wirbelstromdichte an den Rissspitzen. Diese lokal erhöhte Leistungsdichte erwärmt die Rissspitzen selektiv, während der Riss selbst kälter ist als das ungeschädigte Material und so einen hohen Fehlerkontrast erzeugt. Bei geschlossenen Rissen ist im Gegensatz zu klaffenden Rissen meistens eine Restleitfähigkeit über den Riss hinweg gegeben. Der elektrische Widerstand ist örtlich durch den Riss so hoch, dass in diesem Fall die Defekte selbst stark erwärmt werden, während das ungeschädigte Material relativ kalt bleibt.

Für elektrisch nahezu transparente Proben (Material mit einer Wirbelstromeindringtiefe, die etwa der Probendicke entspricht) konnte für die Phase eine Tiefenreichweite von etwa  $2,15 \mu$  berechnet werden. Die Wirbelstromeindringtiefe der Induktionserwärmung erhöht also die Tiefenreichweite der ILT bei elektrisch teiltransparenten Materialien um bis zu ca.  $0,6 \mu$  im Vergleich zur berechneten Tiefenreichweite in OLT-Phasenbildern (etwa  $1,55 \mu$ ). Aus Mangel an geeigneten Proben konnten diese Überlegungen nur theoretisch behandelt werden, eine Bestätigung durch Messungen wäre nötig.

Da Wirbelströme nur in elektrisch leitfähigem Material induziert werden können, sind z.B. die klassischen Kunststoffe mit ILT nicht prüfbar. Wie gezeigt wurde, sind aber die elektrisch leitfähigen Kohlefasern z.B. in CFK ausreichend, um die Probe zu erwärmen. Mit ILT werden dabei sowohl die thermischen als auch die elektrischen Eigenschaften sichtbar gemacht.

Die ILT Messungen an CFK haben allerdings auch die Grenzen der Prüfung dieses Materials aufgezeigt. So ist z.B. die Wirbelstromeindringtiefe im elektrisch anisotropen CFK nicht nur von der Leitfähigkeit einzelner Kohlefasern abhängig. Damit sich Wirbelströme bis über die gesamte Dicke des Materials ausbreiten können, muss zwischen den Kohlefa-



serlagen elektrischer Kontakt bestehen, oder die Wirbelstromfrequenz muss groß genug sein, damit Kopplungen zwischen den Kohlefasern möglich werden, wie dies bei konventioneller Wirbelstromprüfung an CFK schon genutzt wird [56]. Der Frequenzbereich der Induktionserwärmungsanlage (zwischen 30 und 300 kHz) ist hierfür allerdings nicht ausreichend, die Tiefenreichweite bei CFK-Proben ist also meistens auf die ersten Lagen beschränkt.

Weitere Untersuchungen an unidirektionalen CFK-Proben zeigten eine starke Abhängigkeit der ILT Ergebnisse von der Faserorientierung in Bezug auf die Richtung des magnetischen Felds. Eine Faserorientierung von 90 Grad zu den Magnetfeldlinien scheint am vorteilhaftesten zu sein, da in diesem Fall Wirbelströme in den Fasern induziert werden können. Die Abhängigkeit des ILT-Ergebnisses von der Faserrichtung birgt die Gefahr, dass Defekte nicht erkannt werden, sie kann aber auch genutzt werden, wie z.B. zur Orientierungsmessung von Kohlefaserlagen.

Eine weitere experimentelle Fragestellung war die Untersuchung der Auflösungsgrenze zur Defekterkennung bei ILT. An einer Stahlplatte mit einer in die Tiefe wegtauchenden Einfräsung wurde gezeigt, dass die Auflösungsgrenze etwa der Grenze optisch angeregter Lockin-Thermografie Verfahren entspricht. Sie wird durch Wärmediffusionsvorgänge, und vor allem durch lateralen Wärmefluss, verursacht. Der kleinste auflösbare Defekt hat eine laterale Ausdehnung, die etwa dessen Tiefenlage entspricht.

Die vorgestellte Induktions-Lockin-Thermografie stellt eine deutliche Verbesserung zum bisherigen Stand der Technik (induktive Transiententhermografie) dar. Wie bereits erwähnt, sind Phasenbilder homogener als IR-Einzelbilder und haben eine größere Tiefenreichweite. Die gewichtete Mittelung der Fouriertransformation über viele Bilder erhöht außerdem das Signal/Rausch Verhältnis und erlaubt so, Informationen herauszuholen, die in Einzelbildern nicht erkennbar sind.

Ein Schwerpunkt der Arbeit lag im Vergleich der ILT-Ergebnisse mit den Ergebnissen anderer am IKP-ZfP vorhandener moderner ZfP Verfahren wie ultraschallangeregter Thermografie, nichtlinearer Vibrometrie und ESPI. Es wurden daher Praxisbauteile auch mit diesen Verfahren untersucht. Es zeigte sich, dass vor allem oberflächennahe Risse in metallischen Bauteilen mit ILT sehr gut und defektselektiv nachgewiesen werden können. Die Ergebnisse sind denen der ULT und nichtlinearer Vibrometrie ähnlich, jedoch mit dem großen Vorteil, dass ILT völlig berührungsfrei arbeitet. Induktions-Lockin-Thermografie verbindet also die Vorteile der optisch angeregten Thermografie (berührungslose Anregung) mit denen der ultraschallangeregten Thermografie (defektselektiv, wenn die Defekte innerhalb der Wirbelstromeindringtiefe liegen). ILT ist dabei so universell einsetzbar, dass unterschiedlichste Defekte wie z.B. Risse, fehlerhafte Fügeverbindungen oder Delaminationen in Smart Structures detektiert werden. Im Gegensatz zu scannenden Verfahren, wie z.B. der nichtlinearen Vibrometrie, liegen die Ergebnisse

sehr schnell vor. Eine weitere Verkürzung der Prüfzeit ist durch IBP möglich, die anstelle der modulierten Anregung eine Induktions-Burst Anregung verwendet.

Die bisherige Arbeit zeigt das große Potential der Induktions-Lockin-Thermografie an verschiedenen Materialien und Fehlerarten. Als nächster Schritt sollten besonders anwendungsrelevante Bereiche genauer untersucht werden. Es ist z.B. noch nicht völlig klar, welche Faktoren die Tiefenreichweite bei der Inspektion von CFK-Strukturen beeinflussen. Gerade bei diesem Material, das z.B. im modernen Flugzeugbau verwendet wird, wäre eine genaue Kenntnis der Einflussfaktoren für die Praxis von großer Bedeutung.

Ein weiterer Schwerpunkt zukünftiger Forschungsaktivitäten könnte in der Untersuchung von Fügeverbindungen liegen. Dabei geht es sowohl um die Qualität klassischer Nietungen und Punktschweißungen, wie sie im Automobil- und Flugzeugbau vorkommen, als auch um neue Fügeverbindungen, wie z.B. die Qualität von Laserschweißnähten und Klebungen, für die es noch keine etablierten ZfP-Methoden gibt.

# Literaturverzeichnis

- [1] SCHLEMMER, H.: Bild- und Informationsgewinnung in infraroten Wellenlängenbereichen. In: *Thermographische Bildaufnahme und Bildanalyse*, 27. Heidelberger Bildverarbeitungsforum, 2005, BVF27
- [2] CIELO, P. ; MALDAGUE, X. ; ROUSSET, G. ; JEN, C. K.: Thermoelastic inspection of layered materials: dynamic analysis. In: *Materials Evaluation* 43[9] (1985), S. 1111–1116
- [3] PUTTICK, K. E.: Thermal NDT methods. In: SUMMERSCALES, J. (Hrsg.): *Non-destructive testing of fibre-reinforced plastics composites* Bd. 1, Elsevier Applied Science, 1987, S. 65–103
- [4] MALDAGUE, X. ; SHIRYAEV, V. V. ; BOISVERT, É. ; VAVILOV, V.: Transient thermal nondestructive testing (NDT) of defects in aluminum panels. In: SEMANOVICH, S. A. (Hrsg.): *Proc. SPIE Thermosense XVII, Vol. 2473*, SPIE, 1995, S. 233–243
- [5] PARKER, W. J. ; JENKINS, R. J. ; BUTLER, C. P. ; ABBOTT, G. L.: Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity. In: *Journal of Applied Physics* 32, Number 9 (1961), S. 1679–1684
- [6] CARSLAW, H. S. ; JAEGER, J. C.: *Conduction of heat in solids*. Amen House, London E.C.4 : Oxford University Press, 1959
- [7] VAVILOV, V.: Infrared non-destructive testing of bonded structures: aspects of theory and practice. In: *British J. NDT* July (1980), S. 175–183
- [8] SHEPARD, S.M.: Advances in pulsed thermography. In: ROZLOSNIK, A. E. (Hrsg.) ; DINWIDDIE, R. B. (Hrsg.): *Proc. SPIE Thermosense XXIII, Vol. 4360*, SPIE, 2001, S. 511–515
- [9] ANGSTRÖM, M. A. J.: New method of determining the thermal conductivity of bodies. In: *Phil. Mag.* 25 (1863), S. 130–142
- [10] FOURIER, J.: Théorie du mouvement de la chaleur dans les corps solides - 1ère Parie. In: *Mémoires de l'Academie des Sciences* 4 (1824), S. 185–555

- [11] NORDAL, P. E. ; KANSTAD, S. O.: Photothermal radiometry. In: *Physica Scripta* 20 (1979), S. 659–662
- [12] CARLOMAGNO, G. M. ; BERARDI, P. G.: Unsteady thermography in nondestructive testing. In: *Proceedings of the 3rd Biannual Information Exchange*. St. Louis/USA, 1976, S. 33–39
- [13] BEAUDOIN, J. L. ; MARIENNE, E. ; DANJOUX, R. ; EGEE, M.: Numerical system for infrared scanners and application to the subsurface control of materials by photothermal radiometry. In: *Infrared technology and applications* SPIE Vol. 590 (1985), S. 287
- [14] KUO, P. K. ; FENG, Z. J. ; AHMED, T. ; FAVRO, L. D. ; THOMAS, R. L. ; HARTIKAINEN, J.: Parallel thermal wave imaging using a vector lockin video technique. In: HESS, P. (Hrsg.) ; PELZL, J. (Hrsg.): *Photoacoustic and Photothermal Phenomena*. Heidelberg : Springer-Verlag, 1988, S. 415–418
- [15] BUSSE, G. ; WU, D. ; KARPEN, W.: Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography. In: *J. Appl. Phys.* 71 8 (1992), S. 3962–3965
- [16] *Patent DE 4203272 C2*. 1992
- [17] WU, D.: *Lockin-Thermographie für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung und Werkstoffcharakterisierung*, Fakultät für Verfahrenstechnik der Universität Stuttgart, Diss., 1996
- [18] BUSSE, G.: Optoacoustic phase angle measurement for probing a metal. In: *Appl. Phys. Lett.* Vol. 35 (1979), S. 759–760
- [19] MALDAGUE, X. ; MARINETTI, S.: Pulse phase infrared thermography. In: *J. Appl. Phys.* 79 [5] (1996), S. 2694–2698
- [20] DILLENZ, A.: Ultraschall Burst-Phasen-Thermografie. In: *MP Materialprüfung* Jahrgang 43 1-2 (2001), S. 30–34
- [21] KARPEN, W.: *Berührungslose und zerstörungsfreie Prüfung von Kunststofflackierungen mit Thermischen Wellen*, Fakultät für Verfahrenstechnik der Universität Stuttgart, Diss., 1993
- [22] RIEGERT, G. ; KUNZ, G. ; NOTHELPER-RICHTER, R. ; BUSSE, G.: Früherkennung von Korrosionsschäden unter Lackschichten mit zerstörungsfreien lockin-thermografischen Methoden. In: *Neue Entwicklungen bei Fügeverfahren und Oberflächenschutz*. Frankfurt : Dechema, 2004, S. 129–136

- [23] HENNEKE, E.G. ; REIFSNIDER, K. L. ; STINCHCOMB, W. W.: Thermography. An NDI method for damage detection. In: *J. of Metals* 31 (1979), S. 11–15
- [24] MIGNOGNA, R. B. ; GREEN, R. E. J. ; HENNEKE, E. G. ; REIFSNIDER, K. L.: Thermographic investigations of high-power ultrasonic heating in materials. In: *Ultrasonics* 7 (1981), S. 159–163
- [25] WEBER, W.: Über die spezifische Wärme fester Körper insbesondere der Metalle. In: *Annalen der Physik und Chemie* 96 (1830), S. 177–213
- [26] FAVRO, L. D. ; HAN, Xiaoyan ; OUYANG, Zhong ; SUN, Gang ; SUI, Hua ; THOMAS, R. L.: Infrared imaging of defects heated by a sonic pulse. In: *Rev. Sci. Instr.* Volume 71, Issue 6 (2000), S. 2418–2421
- [27] RANTALA, J. ; WU, D. ; BUSSE, G.: Amplitude modulated lock-in vibrothermography for NDE of polymers and composites. In: *Research in Nondestructive Evaluation* 7 (1996), S. 215–228
- [28] DILLENZ, A. ; BUSSE, G. ; WU, D.: Ultrasound lockin thermography: Feasibilities and limitations. In: *Diagnostic Imaging Technologies and Industrial Applications*, SPIE Vol. 3827, 1999, S. 10–15
- [29] *Patent DE 10059854 A1*. 2000
- [30] DILLENZ, A. ; ZWESCHPER, Th. ; BUSSE, G.: Elastic wave burst thermography for NDE of subsurface features. In: *Insight* 42 Nr. 12 (2000), S. 815–817
- [31] ZWESCHPER, Th. ; DILLENZ, A. ; RIEGERT, G. ; SCHERLING, D. ; BUSSE, G.: Ultrasound excited thermography using frequency modulated elastic waves. In: *Insight* 45 Nr. 3 (2003), S. 178–182
- [32] BUSSE, G. ; BAUER, M. ; RIPPEL, W. ; WU, D.: Lockin vibrothermal inspection of polymer composites. In: BALAGEAS, D. (Hrsg.) ; BUSSE, G. (Hrsg.) ; CARLOMAGNO, G.M. (Hrsg.): *Quantitative infrared thermography, QIRT 92*. 141-144 Adv. Composite Materials, Paris : Editions Européennes Thermique et Industrie, 1992, S. 154–159
- [33] FICKER, E.: Thermische Emissionsanalyse als Messmethode in der Festkörpermechanik. In: *Österreich. Ing. und Arch. Zeitschr.* 196 (7/8) (1991), S. 355–359
- [34] MOUNTAIN, D. S. ; WEBBER, J. M. B.: Stress pattern analysis by thermal emission (SPATE). In: *SPIE Proceedings, Vol. 176*, SPIE, 1978, S. 189–196
- [35] *Patent DE 2952809 C2*. 1990

- [36] ADAIR, T. L. ; WEHENER, D. H.: Automated fluorescent penetrant inspection (FPI) system. In: *Proc. 8th European Conference on Non-Destructive Testing*. Barcelona, 2002, 7 Seiten
- [37] KIRCHGEORG, M. ; LARISCH, K.: Szintigraphie. In: <http://www.netdoctor.de> (2003)
- [38] GERHARD, H. ; BUSSE, G.: Ultraschallangeregte Verformungsmessung mittels Speckle Interferometrie. In: *6. Kolloquium: Qualitätssicherung durch Werkstoffprüfung*, DGZfP Berichtsband BB79-CD, 2001, V11
- [39] KROHN, N. ; BUSSE, G.: Non-linear vibrometry for damage detection. In: *Proceedings 7th International Congress on Sound and Vibration*. Garmisch-Partenkirchen, 2000, II, S. 589–596
- [40] KROHN, N.: *Nichtlineares dynamisches Materialverhalten zur defektselektiven zerstörungsfreien Prüfung*, Fakultät für Verfahrenstechnik und Technische Kybernetik der Universität Stuttgart, Diss., 2002
- [41] AMERI, S. ; ASH, E.A. ; NEUMAN, V. ; PETTS, C.R.: Photodisplacement imaging. In: *Electronic Lett.* 17 (1981), S. 337–338
- [42] RITTER, S. ; BUSSE, G.: 3D Electronic-Speckle-Pattern-Interferometry (ESPI) in der zerstörungsfreien Werkstoff- und Bauteilprüfung. In: *Proc. DGZfP Jahrestagung*. Berlin : DGZfP, 1993, S. 491–498
- [43] SALERNO, A. ; DANESI, S. ; WU, D. ; RITTER, S. ; BUSSE, G.: Ultrasonic loss angle imaging with speckle interferometry. In: *5th International Congress on Sound and Vibration*. Adelaide, Australia : University of Adelaide, 1997
- [44] KROHN, N. ; BUSSE, G.: Nichtlineare Vibrometrie zur Schadenscharakterisierung. In: *DGZfP Jahrestagung*. Berlin : DGZfP Berichtsband 75-CD, 2001, V26
- [45] PFLEIDERER, K.: *Frequenzkonversion aufgrund nichtlinearer akustischer Phänomene: Grundlagen und Anwendung zur defektselektiven zerstörungsfreien Prüfung*, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie der Universität Stuttgart, Diss., 2006
- [46] ZWESCHPER, Th. ; DILLENZ, A. ; RIEGERT, G. ; BUSSE, G.: Thermography with excitation by elastic waves: comparison of techniques (pulse, burst, lockin). In: BALAGEAS, D. (Hrsg.) ; BEAUDOIN, J.-L. (Hrsg.) ; BUSSE, G. (Hrsg.) ; CARLOMAGNO, G. M. (Hrsg.): *Quantitative InfraRed Thermography*. Marketingowe : Lodart S.A.: Akademickie Centrum Graficzno, 2002, S. 47–52

- [47] FA. FOERSTER, Reutlingen: Zerstörungsfreie elektromagnetische Prüfverfahren. In: *Informationsbroschüre* (11/2005)
- [48] GERLACH, W.: Magnetische Verfahren zur Werkstoffprüfung. In: *Z. techn. Physik* 15 (1934), S. 467 – 469
- [49] BAMBERG, J. ; ERBECK, G. ; ZENZINGER, G.: EddyTherm: Ein Verfahren zur bildgebenden Rißprüfung metallischer Bauteile. In: *ZfP-Zeitung* 68 (1999), S. 60 – 62
- [50] ZENZINGER, G. ; BAMBERG, J. ; DUMM, M.: EddyTherm - ein Rissprüfverfahren vor der Serienreife. In: *ZfP-Zeitung* 91 (2004), S. 39–42
- [51] OSWALD-TRANTA, B.: Thermoinductive investigations of magnetic materials for surface cracks. In: *QIRT Journal* Volume I - n° 1/2004 (2004), S. 33 – 46
- [52] RIEGERT, G. ; BUSSE, G.: Induktions-Lockin-Thermografie (ILT). In: *MP Materialprüfung* Jahrg. 46 1-2 (2004), S. 33–35
- [53] RIEGERT, G. ; GLEITER, A. ; BUSSE, G.: Möglichkeiten und Grenzen der wirbelstromangeregten Lockin-Thermografie. In: *DGZfP - Berichtsband BB 98-CD*. Berlin : DGZfP, 2005, V4
- [54] RIEGERT, G. ; BUSSE, G.: Induction-Lockin-Thermography and Induction-Burst-Phase Thermography for NDE applications. In: BALAGEAS, D. (Hrsg.) ; BEAUDOIN, J.-L. (Hrsg.) ; BUSSE, G. (Hrsg.) ; CARLOMAGNO, G. M. (Hrsg.): *CD-ROM: Proceedings QIRT 2006*. Padua, Italien, 2006
- [55] LANGE, R.: *Zur Wirbelstromprüfung von kohlefaserverstärkten Kunststoffen*, Fakultät für Maschinenbau der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Diss., 1997
- [56] MOOK, G.: Zerstörungsfreie Charakterisierung von carbonfaserverstärkten Kompositen mit Hilfe des Wirbelstromverfahrens. In: *ZfP in Anwendung, Entwicklung und Forschung. Berichtsband 75-CD*. Berlin : DGZfP, 2001
- [57] BUSSE, G.: *Rasterbildverfahren mit optisch erzeugten Wärmewellen in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung*, Universität Stuttgart, Habilitationsschrift, 1984
- [58] ROSENCWAIG, A. ; GERSHO, A.: Theory of the photoacoustic effect with solids. In: *Journal of Applied Physics* 47 (1976), S. 64–69
- [59] BENNETT, C. A. J. ; PATTY, R. R.: Thermal wave interferometry: a potential application of the photoacoustic effect. In: *Applied Optics* 21 (1982), S. 49–54

- [60] JAARINEN, J.: Nondestructive evaluation of coatings by low-frequency thermal waves. In: *Acta Polytechnica Scandinavica* 162 (1988)
- [61] TWARDON, F. F. A.: *Konzentrationswellenmesstechnik - Eine Methode zur Untersuchung von Stofftransportphänomenen an Kunststoffen*, Fakultät für Verfahrenstechnik der Universität Stuttgart, Diss., 1991
- [62] THOMAS, R. L. ; POUCH, J. J. ; WONG, Y. H. ; FAVRO, L. D. ; KUO, P. K. ; ROSENCWAIG, A.: Subsurface flaw detection in metals by photoacoustic microscopy. In: *Journal of Applied Physics* 51 (1980), S. 1152 – 1156
- [63] BREUER, J.: *Schnelle Randelementmethoden zur Simulation von elektrischen Wirbelstromfeldern sowie ihrer Wärmeproduktion und Kühlung*, Fakultät für Mathematik und Physik der Universität Stuttgart, Diss., 2005
- [64] WALTHER, H. G. ; SEIDEL, U. ; KARPEN, W. ; BUSSE, G.: Application of modulated photothermal radiometry to infrared transparent samples. In: *Rev. Sci. Instrum.* 63 (1992), S. 5479–5480
- [65] FA. HÜTTINGER, Freiburg: *Betriebsanleitung TIG 1,5...5 MF-Generatoren*, 2003
- [66] GIMENEZ MURCIA, J. A.: *Inductor design for eddy current activated lockin-thermography*, Universität Stuttgart und Universität Cartagena, Spanien, Diplomarbeit, 2005
- [67] KUCHLING, H.: *Taschenbuch der Physik*. München : Fachbuchverlag Leipzig, 2004
- [68] RIEGERT, G. ; KEILIG, Th. ; AOKI, R. ; DRECHSLER, K. ; BUSSE, G.: Schädigungscharakterisierung an NCF-Laminaten mittels Lockin-Thermographie und Bestimmung der CAI-Restfestigkeiten. In: FRITZ, H. G. (Hrsg.) ; EISENBACH, C. D. (Hrsg.): *Beiträge zum 19. Stuttgarter Kunststoff-Kolloquium 2005*. Stuttgart : Sprint Druck, 2005, 8 Seiten
- [69] RIEGERT, G. ; ZWESCHPER, Th. ; BUSSE, G.: Induction-Lockin-Thermography: application and potential of an emerging NDE method. In: *Proc. Condition Monitoring Cambridge*. Chipping Norton, UK : Coxmoor Publishing Company, 2005, S. 433–439
- [70] KRAPEZ, J.-C. ; BOSCHER, D. ; DESPECH, Ph. ; DEOM, A. ; GARDETTE, G. ; BALAGEAS, D.: Time-resolved pulsed stimulated infrared thermography applied to carbon-epoxy non destructive evaluation. In: BALAGEAS, D. (Hrsg.) ; BUSSE, G. (Hrsg.) ; CARLOMAGNO, G.M. (Hrsg.): *Quantitative infrared thermography, QIRT 92*. 141-144 Adv. Composite Materials, Paris : Editions Européennes Thermique et Industrie, 1992



- [71] VAVILOV, V.: Transient thermal NDT: conception in formulae. In: BALAGEAS, D. (Hrsg.) ; BUSSE, G. (Hrsg.) ; CARLOMAGNO, G.M. (Hrsg.): *Quantitative infrared thermography, QIRT 92*. 141-144 Adv. Composite Materials, Paris : Editions Européennes Thermique et Industrie, 1992
- [72] RIEGERT, G. ; ZWESCHPER, Th. ; BUSSE, G.: Lockin thermography with eddy current excitation. In: *QIRT Journal I* [1] (2004), S. 21 – 31
- [73] HASENBERG, D.: Zerstörungsfreie Prüfung von Klebverbindungen mittels der ultraschallangeregten Thermografie / AiF. 2004 ( 13.249 N). Forschungsbericht
- [74] RIEGERT, G. ; GLEITER, A. ; BUSSE, G.: Potential and restrictions of eddy current lockin-thermography. In: MILES, J. J. (Hrsg.) ; PEACOCK, G. R. (Hrsg.) ; KNETTEL, K. M. (Hrsg.): *Proceedings Thermosense XXVIII, Volume 6205*. Bellingham, USA : SPIE, 2006, 8 Seiten
- [75] PFLEIDERER, K.: Textile Verbundbauweisen und Fertigungstechnologien für Leichtbaustrukturen des Maschinen- und Fahrzeugbaus / DFG. 2005 ( Schwerpunktprogramm 1123). Forschungsbericht
- [76] KRÜGER, S.: *Ultraschallschweißen von Glasfasertextilien und Glasfaserverbundwerkstoffen mit Blechen*, Technische Universität Kaiserslautern, Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Diss., 2005
- [77] RIEGERT, G. ; ZWESCHPER, Th. ; DILLENZ, A. ; BUSSE, G.: Wirbelstromangeregte Lockin-Thermografie - Prinzip und Anwendungen. In: *Berichtsband 89-CD*. Berlin : DGZfP, 2004, V90
- [78] LEMISTRE, M. B. ; BALAGEAS, D. L.: A hybrid electromagnetic acousto-ultrasonic method for SHM of carbon/epoxy structures. In: *SHM 2,2* (2003), S. 153–160
- [79] SOLODOV, I. ; PFLEIDERER, K. ; BUSSE, G.: Nonlinear acoustic NDE using complete non-classical spectrum. In: ATCHLEY, A. A. (Hrsg.) ; SPAROW, V. W. (Hrsg.) ; KEOLIAN, R. M. (Hrsg.): *Proc. of 17th ISNA*. USA : State College, 2006, S. 35 –42
- [80] RIEGERT, G. ; ZWESCHPER, Th. ; BUSSE, G.: Eddy-Current Lockin-Thermography: Method and its potential. In: *Journal de Physique IV France* 125 (2005), S. 587–591
- [81] KROHN, N. ; PFLEIDERER, K. ; STÖSSEL, R. ; SOLODOV, I. Y. ; BUSSE, G.: Nonlinear acoustic imaging: fundamentals, methodology and NDE-applications. In: ARNOLD, W. (Hrsg.) ; HIRSEKORN, S. (Hrsg.): *Acoustical Imaging, Vol. 27*. Dordrecht and New York : Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2004, S. 91–98

- [82] NIXDORF, K.: *Korrelation elektrischer und mechanischer Eigenschaften zur Charakterisierung der Aushärtung und der Schädigung von Polymerwerkstoffen und adaptiven Strukturen*, Fakultät für Verfahrenstechnik, Universität Stuttgart, Diss., 2002
- [83] STÖSSEL, R. ; DILLENZ, A. ; KROHN, N. ; BUSSE, G.: Zerstörungsfreie Prüfung mit defektselektiven Verfahren. In: *Materialprüfung* 42 (2000), S. 38–44
- [84] ZWESCHPER, Th. ; DILLENZ, A. ; RIEGERT, G. ; BUSSE, G.: Lockin Thermography methods for the NDT of aircraft components. In: *Proc. Non-destructive evaluation of high valued engineering systems - an international NDE/T workshop*, Department of mechanical engineering, University of Cape Town, 2002
- [85] MOOK, G. ; POHL, J. ; MICHEL, F. ; BENZIGER, Th.: From non-destructive inspection to health monitoring of smart CFRP-components. In: *Proc. 8th European Conference on Non-Destructive Testing*. Barcelona, 2002
- [86] MOOK, G. ; POHL, J. ; MICHEL, F.: Adaptive Werkstoffsysteme und ihre zerstörungsfreie Charakterisierung. In: *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* 33 (2002), S. 591–598
- [87] MOOK, G. ; POHL, J. ; MICHEL, F.: Non-destructive characterization of smart CFRP structures. In: *Smart Mater. Struct.* 12 (2003), S. 997–1004
- [88] KRENKEL, W. ; HAUSHERR, J. M. ; REIMER, T. ; FRIESS, M.: Design, manufacture and quality assurance of C/C-SiC composites for space transportation systems. In: LARA-CURZIO, Edgar (Hrsg.): *Proc. 28th Intern. Cocoa Beach Conference on Advanced Ceramics and Composites*, 2004, S. 49–58
- [89] STÖSSEL, R.: *Air-coupled ultrasound inspection as a new non-destructive testing tool for quality assurance*, Fakultät für Maschinenbau der Universität Stuttgart, Diss., 2004
- [90] ZWESCHPER, Th. ; DILLENZ, A. ; BUSSE, G.: Ultrasound Lockin Thermography - a defect selective NDT method for the inspection of aerospace components. In: *Insight* 43 (2001), S. 173–179
- [91] SRIVASTAVA, V. K. ; UDOH, A. ; MAIER, H.-P. ; KNOCH, P. ; MAILE, K.: Eddy current nondestructive mapping of C/C-SiC composites. In: *Forschung im Ingenieurwesen* 68 (2004), S. 169–172
- [92] BEUMLER, Th.: *Flying GLARE®. A contribution to aircraft certification issues on strength properties in non-damaged and fatigue damaged GLARE® structures.*, Technical University Delft, Faculty of Aerospace Engineering, Diss., 2004

- 
- [93] PLATH, D.: Teil 3: Neue Technologien und Werkstoffe beim Airbus A380. In: *Aero International*
- [94] HÜBSCHEN, G. ; SALZBURGER, H.-J. ; MEIER, Th. ; BISLE, W.: Trockene Ultraschallprüfung zum Rissnachweis an Lap Joints von Flugzeugkomponenten. Erste Erfahrungen zur Anwendung geführter SH-Wellen und EMUS-Prüfköpfen an GLARE®-Komponenten. In: *Berichtsband 89-CD*, DGZfP, 2004
- [95] ZWESCHPER, Th. ; RIEGERT, G. ; DILLENZ, A. ; BUSSE, G.: Ultraschallangeregte Thermografie mittels frequenzmodulierter elastischer Wellen. In: *DGZfP Berichtsband 86-CD*, 2003, S. 45–52



# A Anhang

## A.1 Thermische Wellen

Der Lockin-Thermografie liegt die periodische Wärmediffusion im Bauteil zugrunde, die mit der allgemeinen Wärmediffusionsgleichung beschrieben wird:

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

mit der Temperaturleitfähigkeit  $\alpha$ . Unter der vereinfachenden Annahme eines zur Richtung des maximalen Temperaturgefälles parallelen Wärmestroms im eindimensionalen Fall entlang der  $z$ -Achse und einer konstanten Wärmeleitfähigkeit in der Probe wird folgender Ansatz gemacht:

$$\begin{aligned} T(z, t) &= T(z) \cdot e^{i\omega t} & \text{mit} & & T(z) &= T_0 \cdot e^{-ikz} \\ \text{also } T(z, t) &= T_0 \cdot e^{i(\omega t - kz)}. \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

Der Ansatz wird zweimal partiell nach  $z$  und einmal partiell nach  $t$  abgeleitet:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = (ik)^2 \cdot T_0 \cdot e^{i(\omega t - kz)} \quad \text{und} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = i \cdot \omega \cdot T_0 \cdot e^{i(\omega t - kz)}, \quad (\text{A.3})$$

und in die Wärmediffusionsgleichung Gl. A.1 eingesetzt:

$$(ik)^2 \cdot T_0 \cdot e^{i(\omega t - kz)} - \frac{1}{\alpha} \cdot i \cdot \omega \cdot T_0 \cdot e^{i(\omega t - kz)} = 0. \quad (\text{A.4})$$

Dies lässt sich stark vereinfachen und ergibt schließlich die Wellenzahl  $k$ :

$$k = -i \cdot \sqrt{i} \cdot \sqrt{\frac{\omega}{\alpha}} = -i \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (1 + i) \cdot \sqrt{\frac{\omega}{\alpha}} = (1 - i) \cdot \frac{1}{\mu}, \quad (\text{A.5})$$

mit der thermischen Eindringtiefe  $\mu$  (Gl. 2.3).

Einsetzen der Wellenzahl in den Ansatz Gl. A.2 ergibt die Gleichung der thermischen Welle:

$$T(z, t) = T_0 \cdot e^{i\left(\omega t - (1 - i) \frac{z}{\mu}\right)} = T_0 \cdot e^{-\frac{z}{\mu}} \cdot e^{i\left(\omega t - \frac{z}{\mu}\right)}. \quad (\text{A.6})$$

## A.2 Zur Tiefenreichweite der Optischen-Lockin-Thermografie

Die Addition der aufgeprägten thermischen Welle mit allen reflektierten thermischen Wellen ergibt den Grenzwert der Gesamttemperaturmodulation an der Bauteiloberfläche Gl. 2.16:

$$\begin{aligned} T_{ob} &= T_0 \cdot e^{i\omega t} \cdot \frac{1}{1 - R \cdot e^{-2\frac{d}{\mu}} \cdot e^{-i2\frac{d}{\mu}}} \\ &= T_0 \cdot e^{i\omega t} \cdot \frac{1}{1 - R \cdot e^{-2\frac{d}{\mu}} \cdot \left( \cos(2\frac{d}{\mu}) - i \sin(2\frac{d}{\mu}) \right)}. \end{aligned}$$

Mit Annahme eines Reflexionskoeffizienten  $R_{21} = 1$  und den Abkürzungen  $R_{23} = R$ ,  $D = 2\frac{d}{\mu}$  und  $u = R \cdot e^{-D}$  wird der Nenner zur Real- und Imaginärteiltrennung erweitert:

$$1 - u \cdot \cos(D) + i \cdot u \cdot \sin(D) = 1 - 2 \cdot u \cdot \cos(D) + u^2. \quad (\text{A.7})$$

Damit ergibt sich für die Oberflächentemperatur nach Erweiterung des Zählers:

$$\begin{aligned} T_{ob} &= T_0 \cdot e^{i\omega t} \cdot \frac{1 - R \cdot e^{-D} \cdot \cos(D) - i \cdot R \cdot e^{-D} \cdot \sin(D)}{1 - 2 \cdot R \cdot e^{-D} \cos(D) + R^2 \cdot e^{-2D}} \\ &= T_0 \cdot e^{i\omega t} \frac{\frac{e^D}{R} - \cos(D) - i \sin(D)}{\frac{e^D}{R} - 2 \cos(D) + R \cdot e^{-D}}. \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

Ohne den modulierten Anteil der Anregung ergeben sich der Realteil der Oberflächentemperatur:

$$\text{Re } T_{ob} = \frac{\frac{e^D}{R} - \cos(D)}{\frac{e^D}{R} - 2 \cos(D) + R \cdot e^{-D}}, \quad (\text{A.9})$$

und der Imaginärteil:

$$\text{Im } T_{ob} = \frac{-\sin(D)}{\frac{e^D}{R} - 2 \cos(D) + R \cdot e^{-D}}. \quad (\text{A.10})$$

## Lebenslauf

Name: Gernot Riegert

Geburtstag/-Ort: 12.02.1974 in Nürtingen

## Schulischer und beruflicher Werdegang

1980 - 1984 Grundschule in Unterensingen

1984 - 1990 Realschule in Wendlingen

1990 - 1993 Technisches Gymnasium in Kirchheim unter Teck

Mai 1993 Allgemeine Hochschulreife

07.1993 - 06.1994 Grundwehrdienst

WS 94/95 - SS 96 Grundstudium der Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität Stuttgart

September 1996 Vordiplom

WS 96/97 - SS 01 Hauptstudium der Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität Stuttgart

WS 96/97 Fachpraktikum bei Daimler-Benz Aerospace Airbus, Hamburg

05.1997 - 12.1997 Hilfwissenschaftler am Institut für Aero- und Gasdynamik

WS 98/99 - SS 99 Department of Aerospace Engineering at Kansas University, Lawrence, Kansas, USA

05.2000 - 10.2000 Studienarbeit am Institut für Aero- und Gasdynamik

12.2000 - 04.2001 Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, Spanien

12.2000 - 05.2001 Diplomarbeit an der Universität Cartagena und dem Institut für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile der Universität Stuttgart

Juli 2001 Hauptdiplom

08.2001 - 11.2006 Wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde der Universität Stuttgart

seit 12.2006 ZF-Friedrichshafen AG, Friedrichshafen, Zentrale Forschung und Entwicklung, Entwicklung Hydraulikkomponenten