

Nichtlineares dynamisches Materialverhalten
zur
defektselektiven zerstörungsfreien Prüfung

Von der Fakultät Verfahrenstechnik und Technische Kybernetik
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von Dipl.-Phys.
Nils Krohn
geboren am 20.10.1970 in Lüneburg

Hauptberichter:	Prof. Dr. rer. nat. habil. G. Busse
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. H. Wüstenberg
Tag der mündlichen Prüfung:	28. August 2002

Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde
der Universität Stuttgart

2002

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde der Universität Stuttgart.

Besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. G. Busse, der diese Arbeit durch seine Begeisterung an wissenschaftlichem Fortschritt, seinen Ideenreichtum und menschliche Fairneß außergewöhnlich förderte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Wüstenberg danke ich für die Übernahme des Mitberichts dieser Dissertation und die sehr interessanten Gespräche über technische und musikalische Akustik.

Ich danke außerdem Herrn Prof. Dr. I. Yu. Solodov für die geduldige Einführung in die nichtlineare Akustik und für viele wissenschaftliche Anregungen.

Für die Unterstützung meiner Familie möchte ich mich besonders herzlich bedanken. Mein Dank gilt insbesondere meinem Vater, dessen Andenken diese Arbeit gewidmet sein soll.

Frau Edelgard Dratwa danke ich für die stete Motivation, ihre Geduld, Nachsicht und Hilfe.

Allen Kollegen der Abteilung „Zerstörungsfreie Prüfung“ des IKP danke ich sehr für eine unvergeßliche gemeinsame Zeit.

Stuttgart, im Oktober 2002

Nils Krohn

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen	7
1. Formelzeichen.....	7
2. Abkürzungen.....	9
Zusammenfassung.....	10
Abstract	12
1. Einleitung.....	14
1.1. Anforderungen an die zerstörungsfreie Werkstoff- und Bauteilprüfung..	14
1.2. Stand der Technik	15
1.2.1. Zerstörungsfreie Prüfung mit elektromagnetischen Wellen	15
1.2.2. Zerstörungsfreie Prüfung mit thermischen Wellen	19
1.2.3. Zerstörungsfreie Prüfung mit elastischen Wellen	20
1.3. Neue Möglichkeiten durch defektselektive Prüfung.....	24
1.4. Ziele dieser Arbeit	27
2. Grundlagen	29
2.1. Lineare Schwingungen.....	29
2.2. Nichtlineare Schwingungen	30
2.2.1. Höhere Harmonische	30
2.2.2. Intermodulation.....	31
2.2.3. Subharmonische.....	32
2.3. Lineare Basistransformationen – Fourieranalyse – Diskretisierung	33
2.4. Intrinsische Materialnichtlinearität	38
2.5. Grenzflächennichtlinearität.....	40
2.5.1. Klappern durch Normalbewegung.....	40
2.5.2. Hysterese durch Tangentialbewegung	44
3. Ausnutzung der nichtlinearen Bauteilantwort zur Defekterkennung.....	50
3.1. Anregungsmöglichkeiten	50
3.1.1. Schweiß-Ultraschallgeneratoren.....	52
3.1.2. Integrierte oder applizierte Aktorik	55
3.2. Einfluß der spektralen Bandbreite des Anregungssignals.....	58
3.2.1. Vergleich im nichtresonanten Zustand.....	61
3.2.2. Vergleich im resonanten Zustand	62
3.3. Methoden zur Detektion	63

3.3.1.	Integrale und lokale Detektion.....	63
3.3.2.	Akustische Detektion.....	66
3.3.3.	Laserinterferometrische Detektion.....	70
4.	Anwendungen in der Werkstoff- und Bauteilprüfung.....	78
4.1.	Faserverstärkte Kunststoffe.....	78
4.1.1.	Delaminationen.....	79
4.1.2.	Impactschäden.....	81
4.1.3.	Thermische Überbeanspruchung.....	84
4.2.	Verfolgung der Duroplastvernetzung.....	89
4.3.	Aktive Werkstoffverbunde.....	93
4.3.1.	Delaminationen.....	93
4.3.2.	Einbettungsqualität der Aktorik und Risse in Piezokeramik.....	98
4.4.	Metalle.....	101
4.4.1.	Risse.....	102
4.4.2.	Korrosion.....	106
4.4.3.	Enthaftungen an Lötverbindungen.....	109
4.5.	Faserverstärkte Mehrschichtkeramiken (C/C-SiC).....	110
4.5.1.	Delaminationen.....	112
4.5.2.	Silizierungsunterschiede.....	115
5.	Diskussion und Ausblick.....	117
6.	Literatur.....	121

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen

1. Formelzeichen

a	Auslenkung, Amplitude, Abstand
a_N	Amplitude der harmonischen Schwingung N -ter Ordnung
A	Gesamtamplitude
c_{Schall}	Schallgeschwindigkeit
c_i	Polynomialkoeffizient der Ordnung i
C	Crest-Faktor
C''	dynamische elastische Konstante
ΔC	elastische Modulation
D	Entfernung, Tiefenlage [m]
E	Energie [J]
f	Frequenz [Hz]
f_s	Abtastrate [Hz]
f_D	Dopplerfrequenz [Hz]
F	Kraft [N]
i	$\sqrt{-1}$, ganzzahlige Zählvariable
I	Intensität
K	eindimensionale elastische Konstante, Federkonstante [N/m]
l_{sc}	Abschirmlänge [m]
n	ganzzahlige Zählvariable
m	Masse [kg]
M	allgemeiner mechanischer Modul
p	Schalldruck [Pa]
q	verallgemeinerte Koordinate
r	Radius
R	Reflexionsfaktor
S	Defekt-, Membranfläche
t	Zeit [s]
T	Periodendauer $1/f$ [s]
u_a	Ausgangsfunktion

u_e	Eingangsfunktion
u_i	Polynomialkoeffizient der Ordnung i
\hat{u}	Amplitude der Funktion $u(t)$
U_{eff}	Effektivwert der elektrischen Spannung [V]
U_{SS}	doppelter Spitzenwert der elektrischen Spannung [V]
v	Geschwindigkeit, Schallschnelle [m/s]
$w(t)$	Fensterfunktion
x	Auslenkung, Position [x]
\dot{x}	dx/dt
\ddot{x}	d^2x/dt^2
Z	akustische Impedanz [$kg/(m^2s)$]
α	Winkel zur Flächennormalen [$^\circ$]
ε	Dehnung
φ	allgemeine Basisfunktion
λ	Wellenlänge [m]
ν_0	Poissonzahl
Π	Einheitssprungfunktion
θ	Phasenverschiebung [$^\circ$]
ρ	Massendichte [kg/m^3]
σ	mechanische Spannung
τ	Periodendauer $1/f$ [s], Modulationszeit [s]
ω	Kreisfrequenz [Hz]
ψ	allgemeine Basisfunktion
\mathfrak{F}	Fouriertransformation
III	Shah-Funktion

2. Abkürzungen

3D	dreidimensional
A/D	Analog/Digital
CCD	Charge Coupled Device (ladungsgekoppelte Einheit)
CFK	kohlenstoffaserverstärkter Kunststoff
D	Detektor
DFT	diskrete Fouriertransformation
DGL	Differentialgleichung
Fa.	Firma
HF	Hochfrequenz
NMR	Nuclear Magnetic Resonance (Kernspinresonanz)
PLL	Phase Locked Loop (phasenstarre Kopplung)
PTFE	Polytetraflourethylen (DuPont Teflon [®])
PVC	Polyvinylchlorid
RMS	Root Mean Square (Effektivwert)
ST	Strahlenteiler
THD+N	Total Harmonic Distortions + Noise (Klirrfaktor + Rauschen)
vgl.	vergleiche
v.l.n.r.	von links nach rechts
C/C-SiC	Kohlenstoff-Siliziumcarbidverbundwerkstoff

Zusammenfassung

Die Schwingungsanalyse ist ein bewährtes Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung. Hierbei wird der Zustand eines Prüfkörpers durch seine lineare mechanische Übertragungsfunktion entweder gehörmäßig (Klangprüfung) oder meßtechnisch (Vibrometrie) charakterisiert. Veränderungen der Resonanzen, die durch einen Defekt hervorgerufen werden, können durch den Vergleich mit denen des intakten Bauteils erkannt werden. Diese Eigenschwingungen hängen aber auch wesentlich von der Geometrie eines Bauteils ab. Eine Variation der Abmessungen ist jedoch häufig produktionstechnisch nicht vermeidbar, so daß eine unbedeutende Fertigungstoleranz und ein kritischer Schaden das gleiche Meßergebnis hervorrufen können.

Zur Vermeidung dieser Problematik wird in dieser Arbeit daher untersucht, ob sich lokal nichtlineares, also geometrieunabhängiges, Verhalten als Merkmal zur zerstörungsfreien Prüfung eignet, insbesondere für welche Defektarten und Materialien. Nichtlinearität tritt überall dort auf, wo sich berührende Grenzflächen existieren, die akustisch zu einer Relativbewegung angeregt werden können. Da die meisten in der Praxis relevanten Defekte solche zusätzlichen Grenzflächen aufweisen, läßt sich der Ort des Schadens an der lokalen Erzeugung höherer Harmonischer erkennen. Hierzu ist es notwendig, die Probe mit monofrequentem Leistungsumschall zu beaufschlagen, um dann die resultierende Schwingung an der Probenoberfläche hinsichtlich ihres Frequenzspektrums zu analysieren. Im intakten Bereich ist nur die Anregungsfrequenz nachweisbar, am Ort des Schadens allerdings entstehen zusätzlich höhere Harmonische. Verwendet man diese Harmonischen als bildgebende Größe, so liefert die defektfreie Umgebung keinen Betrag zum Meßsignal: Ein defektselektives Abbild der Probe entsteht.

Es werden zunächst die Mechanismen erläutert, die eine Anregungswelle verformen und höhere Harmonische erzeugen. Die klassische Materialnichtlinearität mit stetiger Spannungs-Dehnungsabhängigkeit kann diese Prozesse nicht mehr beschreiben, wenn es sich um eine unstetige nichtlineare Modulation handelt. Hierzu werden Ansätze einer quasi analytischen Beschreibung dargelegt.

Neben integrierten und applizierten piezokeramischen Aktoren erwiesen sich auch Schweiß-Ultraschallgeneratoren als geeignete Anregungsquellen, um Nichtlinearitäten in einem Bauteil anzuregen. Zudem wurden die Pegelabhängig-

keit und der Einfluß der Bandbreite des Anregungssignals untersucht. Die Detektion der lokalen Antwortschwingung auf der Probenoberfläche erfolgte durch ein scannendes Laser-Doppler-Vibrometer, das eine hohe laterale Ortsauflösung und kurze Meßzeiten bei hoher Genauigkeit ermöglichte. Mithilfe der Leistungultraschallanregung und interferometrischer Detektion konnten praxisrelevante Schäden (z.B. Risse und Enthaltungen) in verschiedenen Werkstoffen detektiert werden. Als Probenmaterial wurden schwerpunktmäßig neue Materialverbunde (wie faserverstärkte Keramik, Faserverbundwerkstoffe und Klebverbindungen) gewählt, da hier die etablierten Prüfmethode nur bedingt anwendbar sind. Der Einsatz dieser Werkstoffe in sicherheitsrelevanten Bereichen (z.B. Luft- und Raumfahrt sowie Automobilbau) bedingt sehr hohe Anforderungen an die Schadenserkennung. Es wird gezeigt, daß dieses neue defektselektive Verfahren zuverlässige Herstellungskontrolle und Wartung ermöglicht.

Abstract

Vibrometry is a well known method of nondestructive testing. The state of a specimen is characterized by its linear mechanical transfer function either by the human ear or with technical testing equipment (“vibrometry”). Changes in resonances caused by a defect can be determined in comparison to a reference spectrum obtained on an intact sample. These eigenvibrations depend also on the geometry of the component. As a variation in size cannot be avoided due to the production process, a change in geometry and a critical damage may result in the same spectrum.

In order to avoid such problems this thesis investigates whether local nonlinear (therefore geometry independent) material properties can be used for nondestructive testing and especially for which kinds of defects and materials such a technique is applicable. Nonlinearity is observed where boundaries are acoustically excited to move with respect to each other in contact. As most types of defects are correlated with such boundaries, they can be determined by the local generation of higher harmonics. To achieve this a sample is insonified by high power ultrasound and the resulting vibration on the surface is analysed: a defect is marked by higher harmonics, whereas the intact area only shows the excitation frequency. Using these harmonics for imaging a defect selective image of the sample is produced because the intact area does not contribute to the signal.

First the mechanisms are discussed that distort an excitation wave thereby generating higher harmonics. Classical material nonlinearity with a stress-strain dependence without discontinuities is not able to describe these processes behaving mostly like a discontinuous nonlinear modulation. A quasi analytical approach is presented.

Besides integrated and surface mounted piezoceramic actuators also ultrasound welding generators prove to be a well applicable source to excite nonlinearities in a component. Additionally, the dependence on both the power level and the bandwidth of the excitation signal have been analysed. The detection of the local acoustical response on the surface of the sample was performed with a scanning laser vibrometer, which allows fast and precise measurements with high lateral resolution. By using high power ultrasound excitation and interferometric detection

relevant damages (e.g. cracks and delaminations) could be revealed in various kinds of material. The main focus was on new material composites (e.g. fibre reinforced ceramics, polymers, and adhesive bonds) because the well established nondestructive testing methods are not so well applicable to them. However, due to the employment of these new materials in safety relevant areas (like aerospace and automotive industry) damage detection is highly important. It is shown that this new defect selective method is able to perform a reliable quality inspection in both production and maintenance.

1. Einleitung

1.1. Anforderungen an die zerstörungsfreie Werkstoff- und Bauteilprüfung

Die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung hat in den letzten Jahrzehnten stark an Bedeutung zugenommen. Die Gründe für diese Entwicklung sind vielschichtig. Vor allem im Leichtbau (Luftfahrt- und Automobilindustrie) ist die Auslegung der Konstruktionen sehr viel kritischer geworden, was an gesteigerten Anforderungen an die Leistungsfähigkeit und den Energieverbrauch der Produkte liegt. Während in früheren Zeiten stark überdimensioniert wurde, um ein Versagen auszuschließen, ist dies heute aus Gewichtsgründen nicht mehr möglich. Die Gewichtsreduktion senkt zwar die Materialkosten bei der Herstellung und die Energiekosten während des Betriebes, aber der Entwicklungsaufwand wird wesentlich erhöht. Ein Schaden wirkt sich außerdem stärker aus, je näher ein Bauteil an seiner Belastungsgrenze betrieben wird. Insbesondere die Betriebsfestigkeit über die vorgesehene Lebensdauer sowie die Schädigung durch wechselnde Belastung (z.B. Start und Landung in der Luftfahrt) sind schwer vorhersagbare Größen, die von der Auslegung und dem verwendeten Werkstoff abhängig sind. Es ist also unabdingbar, Bauteile mit kritischer Auslegung auf ihre Schadensfreiheit zu überprüfen. In sicherheitsrelevanten Bereichen wie der Luftfahrt muß dies auch während des Betriebes in regelmäßigen Abständen oder sogar online („Health Monitoring“) durchgeführt werden.

Dies stellt erhebliche Zusatzkosten dar, die neben den Prüfkosten selbst auch durch die Ausfallzeit (z.B. des Flugzeugs) verursacht werden. Ein Prüfverfahren muß also nicht nur Fehler sicher erkennen, sondern zudem eine möglichst kurze Meß- und Auswertzeit beanspruchen. Rasternde Verfahren wie wassergekoppelter Ultraschall werden deshalb vor allem bei der Herstellung von Bauteilen mit geringer Stückzahl (wie Passagierflugzeugen) eingesetzt. Im späteren Service kommt Ultraschall (oder Wirbelstrom) nur noch punktuell in Kontakttechnik zum Einsatz, so daß die geprüfte Fläche gegenüber bildgebenden Verfahren stark reduziert werden muß. Die schwierige Interpretation der Ultraschall- oder Wirbelstromergebnisse setzt allerdings erfahrenes Prüfpersonal voraus. Es wird also ein Prüfverfahren benötigt, das bildgebend, schnell und leicht zu interpretieren ist. Diese Bedingungen werden durch Prüfverfahren erfüllt, die nur den Defekt selbst an-

regen und diese Anregung sichtbar machen. Im Ergebnisbild erscheint nur noch der Schaden selbst – die intakte Struktur wird unterdrückt. Ein Beispiel hierfür sind spannungsoptische Untersuchungen zwischen gekreuzten Polarisatoren: Bei dieser Dunkelfeldmethode werden nur Bereiche mit Eigenspannungen abgebildet.

Diese Arbeit untersucht, wie gut sich die defektspezifische Wechselwirkung der mechanischen Nichtlinearität zur defektselektiven Prüfung ausnutzen läßt. Um die neuen Möglichkeiten dieses Verfahrens, aber auch seine Grenzen einzuschätzen, wird zunächst ein kurzer Überblick über bereits etablierte Methoden der zerstörungsfreien Prüfung gegeben.

1.2. Stand der Technik

1.2.1. Zerstörungsfreie Prüfung mit elektromagnetischen Wellen

Die zerstörungsfreie Prüfung mit elektromagnetischen Wellen nutzt ein extrem großes Wellenlängenspektrum von einigen hundert Kilometern (kHz) bis in den Subnanometerbereich (Synchrotronstrahlung). Für jeden Frequenzbereich existieren Verfahren, die die verschiedenen Wechselwirkungen mit der Materie verwenden, um Informationen zu gewinnen.

a) Wirbelstrom (10^2 bis 10^7 Hz)

Die nur bei leitfähigen Werkstoffen anwendbare Wirbelstromprüfung erkennt Defekte durch Leitfähigkeitsunterschiede. Bereits zu Anfang des 20. Jahrhunderts wurden Vorschläge zur Nutzung von Induktionsströmen zur Materialprüfung veröffentlicht [1][2]. Die auch heute gebräuchliche Form stellte aber erst Walter Gerlach 1934 vor [3]. Ein Spulensystem induziert hierzu im Material einen Kreisstrom, dessen Eindringtiefe von der verwendeten Frequenz abhängt (der von Nikola Tesla 1897 entdeckte „Skin-Effekt“). Ein zum magnetischen Feld paralleler Riß oder Korrosion stört den Elektronenfluß und verändert dadurch das Verhältnis zwischen elektrischem und magnetischem Feld (die elektromagnetische Impedanz) in der Spule. Durch Bestimmung des Verhältnisses von Spulenspannung und Strom (Amplitude und Phase) lassen sich somit Materialunterschiede lokalisieren; die Wahl verschiedener Anregungsfrequenzen ermöglicht sogar tiefenaufgelöste Messungen. Risse, Korrosion und Gefügeveränderungen in Metallen sind das Haupteinsatzgebiet der Wirbelstromprüfung. In den letzten Jahren wird Wirbelstrom auch bildgebend und an Faserverbundstrukturen mit Kohlefasern erfolgreich eingesetzt [4].

b) Kernspin Resonanz (10^6 bis 10^8 Hz)

Die Kernspin-Resonanz-Analyse oder auch NMR (*Nuclear Magnetic Resonance*) dient im Wesentlichen der Bestimmung von Materialparametern (Gyromagnetisches Verhältnis) sowie der Untersuchung der Häufigkeitsverteilung bestimmter Elemente in einem Prüfobjekt. Ein starkes homogenes Magnetfeld richtet zunächst die Kernspins aufgrund ihres magnetischen Momentes aus. Durch ein kurzes Hochfrequenzsignal werden die Spins zu einer Präzessionsbewegung angeregt, deren Frequenz nur vom Gyromagnetischen Verhältnis und der Stärke des statischen Magnetfeldes abhängt [5]. Durch geeignete bewegliche Spulensysteme und entsprechende Verrechnung der Daten lassen sich tomografische Bilder erzeugen, die vor allem in der medizinischen Diagnostik Anwendung finden.

c) Mikrowellen und Radar (10^9 bis 10^{11} Hz)

Angetrieben vom schnellen Fortschritt in der militärischen Radar- und Richtfunktechnologie wurden in den 60er und 70er Jahren des letzten Jahrhunderts Mikrowellen zunehmend auch für zivile Anwendungen interessant – erheblich begünstigt durch die Entwicklung von Halbleiterbauelementen zur Mikrowellenerzeugung (Gunn-Diode/-oszillator) [6]. Neben der Telekommunikation und Haushaltsgeräten zum schnellen Erhitzen von Nahrungsmitteln lassen sich Mikrowellen auch zur Materialprüfung einsetzen. Mit ihnen wird vorwiegend nur schwach- oder nichtleitendes Material untersucht, da in diesem Frequenzbereich die Eindringtiefe in metallische Werkstoffe zu klein ist, um Informationen aus ihrem Inneren zu gewinnen. Oberflächenleitfähigkeiten lassen sich jedoch präzise bestimmen. Die Wechselwirkung mit der nichtleitenden Materie erfolgt dielektrisch: Atome und Moleküle werden polarisiert und im elektrischen Feld ausgerichtet. Je nach Frequenz und Polarisation können durch Mikrowellen Materialeigenschaften wie Wassergehalt [7] oder die Orientierung eingebetteter Fasern bestimmt werden [8].

d) Optische Verfahren (10^{13} bis 10^{15} Hz)

Im infraroten Spektralbereich wird die Wärmestrahlung zur zerstörungsfreien Prüfung ausgenutzt. In den Wellenlängenbereichen von etwa 3 bis 5 μm und 8 bis 12 μm hat Luft nämlich nur eine geringe Absorption elektromagnetischer Wellen. Dieser Bereich entspricht etwa dem Wärmestrahlungsmaximum bei den auf der Erdoberfläche vorherrschenden Temperaturen. Durch Flächendetektoren, die entweder bolometrisch (Bestimmung der Eigenerwärmung) oder mit dem Photoeffekt

(direkte Detektion der Lichtquanten) arbeiten, kann ein Wärmestrahlungsbild einer Probe aufgenommen werden (photothermische Radiometrie [9]). Hierdurch lassen sich Energieverluste (mechanischer Verlustwinkel, elektrische Kurzschlüsse, schlechte Wärmedämmung etc.) sichtbar machen.

Das menschliche Auge ist im Wellenlängenbereich von etwa 300 bis 600 nm empfindlich und ermöglicht das sicherlich älteste Prüfverfahren: die Sichtprüfung. Die Photogrammetrie und die Lichtmikroskopie sind ebenfalls im sichtbaren Spektrum angesiedelt, wobei letztere neben der reinen optischen Vergrößerung sogar Spannungszustände in spannungsoptisch aktivem Material durch polarisiertes Licht sichtbar machen kann [10][11].

Defektbedingte Verformungen z.B. unter mechanischer oder thermischer Belastung lassen sich durch optisch interferometrische Verfahren bestimmen. Bei der Holographie wird hierzu das Prüfobjekt mit kohärentem Licht (Laser, vgl. Abschnitt 3.3.3) beleuchtet und das reflektierte Licht wie auch ein Referenzstrahl auf einen Fotofilm projiziert. Durch Interferenz entsteht nach der Entwicklung ein feines Linienmuster auf dem Film. Durchstrahlendes Laserlicht wird durch diese Linien so gebeugt, daß ein virtuelles dreidimensionales Abbild der Probe entsteht. Bei der interferometrischen Holographie wird das belastete Bauteil durch das Hologramm betrachtet, das am unbelasteten Bauteil aufgenommen wurde. Diese Überlagerung ähnlicher Beugungsstrukturen führt wie beim Moiré-Effekt zu Schwebungen, die als „Linien gleicher Verformung“ zwischen den beiden Lastzuständen dem Objekt überlagert erscheinen. Der Abstand der Höhenlinien gleicher Verformung entspricht der halben Wellenlänge. Ein verwandtes Verfahren, das auf den aufwendigen fotografischen Prozeß verzichtet, ist die elektronische Speckle Pattern Interferometrie (ESPI). Die relativen Phasenunterschiede des Lichtes werden hierbei durch Interferenzbilder bei verschiedenen Phasen des Referenzstrahls relativ zum Objektstrahl ermittelt. Die Aufnahme erfolgt zwar durch eine elektronische Kamera, aber die Differenz zweier Phasenbilder (vor und nach der Verformung) liefert das gleiche Ergebnis wie die Holographie. Beide Verfahren sind allerdings auf schwingungsarme und längenstabile Aufbauten angewiesen, so daß sie praktisch nur unter Laborbedingungen eingesetzt werden können. Ein weiteres interferometrisches Verfahren, die Shearographie, umgeht dieses Problem durch den Einsatz einer „Shear-Optik“, bei der das von der Probe reflektierte Laserlicht aus leicht verschobenen Positionen aufgenommen und zur Interferenz gebracht wird. Aus dem

Vergleich der zeitlich kontinuierlich aufgenommenen Bilder läßt sich die Verformung bestimmen. Im Unterschied zur ESPI-Technik stellt das Shearographie-Bild den Gradienten des Verformungsfeldes dar und nicht das Verformungsfeld selbst.

Licht des ultravioletten Frequenzbereichs benutzt man vor allem zur Anregung von Photolumineszenzeffekten. Durch das Eindringen einer fluoreszierenden Flüssigkeit lassen sich offene Risse unter UV-Bestrahlung erkennen: sie leuchten in sichtbarem Licht auf, während rißfreie Bereiche dunkel bleiben (defektselektive Markierung).

e) Röntgenstrahlen (10^{15} bis 10^{20} Hz)

Schon vor der Entdeckung der Röntgen- oder X-Strahlen durch W.C. Röntgen am 08.11.1895 [12] wurden bereits am 22.02.1890 durch A.W. Goodspeed erste Durchstrahlungsaufnahmen von metallischen Gegenständen angefertigt [13]; er erkannte jedoch die Bedeutung dieser Ergebnisse nicht. Röntgen setzte diese „neuartigen Strahlen“ erstmals zur Werkstoffprüfung ein [12].

Röntgenstrahlen lassen sich durch das Beschießen von „Target“-Elementen mit Elektronen erzeugen. Hierbei treten zwei Effekte auf: Die „Bremsstrahlung“, die durch die starke Verzögerung der Elektronen verursacht wird, hat ein kontinuierliches Spektrum mit einer maximalen Quantenenergie, die durch das Produkt aus Beschleunigungsspannung und Elementarladung gegeben ist. Außerdem werden kernnahe Elektronen aus den Orbitalen der Targetatome „herausgeschlagen“, was durch Nachrücken von Elektronen äußerer Bahnen ausgeglichen wird. Der Unterschied potentieller Energie wird durch Aussendung von Röntgenquanten bestimmter Energie (Linienspektrum) abgestrahlt.

Röntgenstrahlen durchdringen Materie nahezu geradlinig, sie werden allerdings proportional zur dritten Potenz der Ordnungszahlen der im Material enthaltenen Elemente geschwächt. Durch einen Flächendetektor (Film, CCD-Feld etc.) lassen sich daher Materialinhomogenitäten sichtbar machen, wobei die chemische Verbindung der Elemente verborgen bleibt (Durchstrahlungsprüfung).

Der Wellencharakter der Röntgenstrahlen hat aber auch zur Folge, daß an geeignet geformten Materialgrenzflächen Brechungseffekte auftreten, die denen sichtbaren Lichts an Linsen zwar ähneln, aber um viele Größenordnungen kleiner sind [14]. Die resultierende geringe Strahlablenkung kann man zur Bestimmung der Eigenschaften innerer Grenzflächen ausnutzen (Röntgenrefraktometrie) [15].

1.2.2. Zerstörungsfreie Prüfung mit thermischen Wellen

Thermische Wellen wurden schon 1863 von Ångström zur Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Metallen verwendet [16]. Er benutzte heißes und kaltes Wasser, um eine Probe periodisch in ein thermisches Ungleichgewicht zu bringen. Der Temperaturengleich erfolgt durch die statistische Bewegung der Atome bzw. Moleküle und gleicht daher einem Diffusionsprozeß. Die Differentialgleichung, die diesen Vorgang des Ausgleichs von Temperaturgradienten beschreibt, hat auch eine wellenartige Lösung. Hierdurch ist eine mathematisch elegante Beschreibung mit Hilfe von Welleneigenschaften wie Amplitude, Phase und Dämpfung möglich. Thermische Wellen zeigen auch ein mit elastischen Wellen vergleichbares Verhalten an Grenzflächen (Reflexion und Transmission), da mechanische Grenzflächen im Allgemeinen auch thermische Grenzflächen darstellen. Dies läßt sich zur Defekterkennung ausnutzen, indem man durch sinusförmig modulierte Wärmeeinbringung an der Probenoberfläche eine thermische Welle erzeugt, die sich in das Bauteilinnere ausbreitet. An einer verborgenen thermischen Grenzfläche (Defekt) wird die Welle reflektiert und mit der einlaufenden Welle überlagert. Auf der Probenoberfläche läßt sich lokal der Temperaturverlauf aufzeichnen, Amplitude- und Phase durch Fouriertransformation bestimmen [17] und sogar zur Bildgebung nutzen (LockIn-Thermografie) [18]. Das Phasenbild ist hierbei von besonderer Bedeutung: Es werden keine Absoluttemperaturen betrachtet, sondern nur noch die zeitliche Relation zwischen Anregung und thermischer Probenantwort. Inhomogenitäten der Anregung oder Unterschiede in der Emissivität der Oberfläche beeinflussen das Meßergebnis nicht [19]. Die Tiefenreichweite ist zudem etwa doppelt so groß wie die des Amplitudenbildes [17] und kann durch die Wahl der Modulationsfrequenz variiert werden [20]. Durch geeignete Verrechnung der Daten lassen sich sogar dreidimensionale Tomogramme erstellen.

Zur Anregung thermischer Wellen eignen sich verschiedene Methoden: Licht (optische LockIn-Thermografie), Wirbelstrom und Mikrowellen erzeugen oberflächliche Erwärmungen, die sich nach innen ausbreiten, reflektiert werden und daher bevorzugt auf Grenzflächen parallel zur Oberfläche ansprechen. Ultraschall hingegen erwärmt selektiv Bereiche mit geschlossenen Grenzflächen – die intakte Umgebung bleibt unbeeinflusst (ultraschallangeregte Thermografie) [21]. Diese defektselektive Methode (vgl. Abschnitt 1.3) besitzt außerdem eine vergrößerte Tiefenreichweite: Die Welle muß nicht mehr den Weg von der Oberfläche

zum Defekt und zurück laufen, sondern nur den halben Weg, da sie am Schaden selbst entsteht [22].

1.2.3. *Zerstörungsfreie Prüfung mit elastischen Wellen*

Der Mensch besitzt durch sein Gehör einen leistungsfähigen Sensor für elastische Wellen in Luft. Deshalb wurde es neben der Sichtprüfung als erstes Mittel der zerstörungsfreien Prüfung eingesetzt. Töpfer begutachten seit 8500 Jahren [23] die Qualität ihrer gebrannten Keramiken durch Anklopfen und Vergleich der Nachklingdauer mit einem intakten Bauteil: ein Riß verkürzt das Nachklingen durch seine innere Reibung stark, denn die akustische Energie wird in Wärme umgesetzt. Auch in sicherheitsrelevanten Bereichen wie dem Schiffbau wurde durch Hammerschläge festgestellt, ob die Planken fest mit dem Schiffsskelett verbunden waren. Ein erfahrener Kutscher konnte hören, wenn sich Hufeisen oder ein Radreifen gelöst hatten. Der Mensch hatte empirisch erkannt, daß sich ein Bauteil in seinen akustischen Eigenschaften ändert, wenn es beschädigt ist. Der Grund liegt in der Definition eines Schadens als Herabsetzung der Qualität der mechanischen Eigenschaften und damit zwingend auch einer Veränderung der akustischen. Die Impulsantwort (angeregt durch Hammerschlag etc.) beinhaltet die vollständige Information der linearen mechanischen Eigenschaften, also auch die Veränderungen, die mit einer Schädigung einhergehen. Diese Impulsantwort unterliegt auf der Basilarmembran in der Cochlea des menschlichen Gehörs einer Transformation in den Frequenzraum. Die Wahrnehmung der Frequenz ist jedoch nicht linear, sondern nahezu logarithmisch [24], was eine gleichbleibende Auflösung von Frequenzverhältnissen über drei Dekaden (20 Hz – 20 kHz) zur Folge hat. Relative Änderungen wie die Dämpfung ($\sim \Delta f/f$) werden deshalb über das gesamte Wahrnehmungsspektrum erkannt. Insbesondere nichtlineare Effekte, die das „Klangspektrum“ verändern, sind durch das Gehör empfindlich wahrnehmbar [25].

Für die industrielle Anwendung wurde die Klangprüfung bereits 1907 von E. Grüneisen vorgeschlagen [26], aber erst 1926 bei den Edelstahlwerken Rudolph Schmidt & Co. (Wien) eingesetzt [23]. Ideen zur kommerziellen Herstellung von Prüfmitteln entstanden in den 30er Jahren des letzten Jahrhunderts [27]. Sogar in sicherheitsrelevanten Bereichen wie dem Flugzeugbau (Fa. Heinkel, Rostock) fand die Klangprüfung an Halbzeugen bereits erfolgreich Anwendung [28]. Die zunächst rein subjektive Beurteilung der Bauteilqualität wurde allerdings erst nach dem

Zweiten Weltkrieg durch Verwendung von Mikrofonen und analoger Signalverarbeitung ergänzt, was der akustischen Prüfung objektive Meßgrößen zuordnete [29].

Im Verlauf der Entwicklung akustischer Prüfverfahren für Material und Bauteile lassen sich verschiedene, jedoch verwandte, Grundprinzipien voneinander abgrenzen: erstens die integrale Analyse, die die Veränderung von Schwingungseigenzuständen (Resonanzen) bezüglich Frequenz und Dämpfung untersucht (z.B. Nachklingen der Keramik), zweitens das Erkennen lokaler Unterschiede akustischer Impedanz (z.B. Hammertest im Schiffbau), sowie drittens das Auftreten höherer Harmonischer durch die Interaktion beweglicher Grenzflächen (z.B. defektes Hufeisen oder Radreifen).

a) Vibrometrie – Schadenserkennung durch Resonanzen

Ein Bauteil hat einen so hohen akustische Impedanzunterschied zur umgebenden Luft, daß elastische Wellen zum größten Teil an der Grenzfläche reflektiert werden (vgl. Teil b). Ist zudem die Dämpfung des Materials klein genug, so überlagern sich einlaufende und reflektierte Wellen. Entspricht die Laufweite der Welle von Grenzfläche zu Grenzfläche einem Ganzzahligen der halben Wellenlänge, so kommt es zu einer gleichphasigen Anregung – der Resonanz. Es treten „stehende Wellen“ auf, also stationäre Schwingungszustände mit räumlich festen Schwingungsknoten und Bäuchen. Jeder dieser Eigenzustände ist eindeutig (abgesehen von zufälligen Entartungen) einer Frequenz zugeordnet. Liegt an einem Ort eine strukturelle Schwächung vor, so ist hier die Schallgeschwindigkeit lokal verringert. Die „akustische Bauteillänge“ wird also vergrößert. Eine Schallwelle muß daher eine entsprechend geringere Frequenz aufweisen, um dem Resonanzkriterium zu genügen. Reibung sowie viskoelastische bzw. -plastische Verluste sorgen außerdem für eine erhöhte Dämpfung. In der mechanischen Übertragungsfunktion zeigt sich ein Defekt deshalb in einer Resonanzverschiebung und -verbreiterung. Von dieser Veränderung sind jedoch nur Eigenschwingungen betroffen, die am Defektort keinen Knoten somit eine endliche Amplitude aufweisen und deren Wellenart durch die Schwächung beeinflussbar ist. Beispielsweise sind durch Longitudinalwellen keine Risse parallel zur Ausbreitungsrichtung nachweisbar.

Für die Vibrometrie eignet sich neben der Anregung mit diskreten Frequenzen (Sweep) auch die impulshafte, breitbandige Anregung (Klangprüfung). Im ersten Fall wird der Prüfkörper nacheinander mit verschiedenen Anregungsfrequenzen beaufschlagt und die resultierende Schwingungsamplitude gemessen. Nachteilig

ist jedoch, daß bei kontaktfreier Anregung (Lautsprecher) eine Messung mit Mikrofonen sehr erschwert ist, da sich das zu messende Schallfeld immer mit dem Anregungsschallfeld überlagert. Mithilfe von Laservibrometern ist dies allerdings problemlos möglich.

Bei impulshafter Anregung (durch Hammerschlag, Gasentladung etc.) kann mit Mikrofonen gearbeitet werden, solange sich die Probe in einem freien Schallfeld befindet. In diesem Fall ist das Anregungsereignis bereits vorüber, wenn die Messung gestartet wird. Der Startpunkt der Messung einer Impulsantwort ist jedoch sehr kritisch, da sich unmittelbar nach der Anregung noch kein eingeschwungener Zustand eingestellt hat. Im Spektrum sind daher noch lineare und nichtlineare Artefakte der Anregung enthalten, die das Meßergebnis stark verändern können.

Ein prinzipieller Nachteil dieser Methode zur Schadenserkennung ist die starke Abhängigkeit der Resonanzfrequenzen von der Geometrie eines Prüfobjektes. Unterschiede in den Abmessungen, die Folge unkritischer Fertigungstoleranzen sind, können somit Fehler überdecken. Die relative Empfindlichkeit dieser Methode hängt vor allem vom Größenverhältnis zwischen Fehler und Bauteil ab.

b) Klopfest – Schadenserkennung durch lokale Impedanzunterschiede

Befindet sich unter der Oberfläche eines Bauteils eine Störstelle (offene Delamination, Riß mit Komponente parallel zur Oberfläche), so verhält sich diese akustisch anders als die Umgebung. In den meisten Fällen bedeutet dies eine größere mechanische Nachgiebigkeit. Diese Eigenschaft wird durch die akustische Impedanz beschrieben, die als Produkt der Dichte ρ und der Schallgeschwindigkeit v definiert ist. Durch eine geeignete Anregung mit fester akustischer Impedanz Z_1 läßt sich die Probe abrastern und die von der Probenoberfläche reflektierte Energie bestimmen. Der Reflexionskoeffizient $R_{1 \rightarrow 2}$ für elastische Wellen hängt nämlich nur von den Impedanzen Z_i der beiden Materialien (Indices 1 und 2) ab:

$$Gl. 1 \quad R_{1 \rightarrow 2} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1}.$$

Unter Verwendung eines elektrodynamischen Impulsgebers mit geringer akustischer Impedanz wird beispielsweise im intakten, harten Bereich der Probe mehr Energie reflektiert als am geschädigten, weichen Ort; der Impedanzunterschied ist hier lokal herabgesetzt.

Dieses Verfahren ist verwandt mit dem „Coin-Tap-Test“, bei dem die Oberfläche mit einem harten Gegenstand angeschlagen und die Impulsantwort gehörmäßig analysiert wird. Im intakten Bereich wird kaum Energie in das Bauteil eingebracht, und die Schallwellenausbreitung zu den Seiten hin ist nicht behindert. Am Ort eines Defektes hingegen – insbesondere bei Hohlräumen – verändert sich der Klang der Impulsantwort. Durch die nachgiebige Oberfläche können größere Schwingungsamplituden angeregt werden und, da die Schallwellen an den Defektändern reflektiert werden, sich sogar „Defektresonanzen“ ausbilden. Der Prüfer nimmt dies als lauterer und „hohlen“ Klang wahr. Dieses Verfahren ist durch das manuelle Abrastern mit einem hohen Zeitaufwand verbunden und durch die subjektive Beurteilung sehr prüferabhängig.

c) Ultraschall – Schadenserkenkung durch Impedanzunterschiede und Dämpfung
Die Ultraschallprüfung ist eines der leistungsfähigsten Prüfverfahren, da es durch die Verwendung hoher Frequenzen (100 kHz – 100 MHz) eine sehr gute Orts- und Tiefenauflösung bietet. Man unterscheidet hierbei Untersuchungen in Reflexion (Sender und Empfänger sind identisch) und in Transmission (die Probe befindet sich zwischen Sender und Empfänger). Der Sender erzeugt eine Pulswelle, die sich durch das zu untersuchende Material bewegt. Am Ort einer zusätzlichen Grenzfläche (potentieller Defekt) werden die Wellen teilweise reflektiert, teilweise transmittiert, da hier ein Impedanzunterschied vorliegt. Das Maß der Impedanzdifferenz kann direkt mit Gl. 1 bestimmt werden. In Reflexionsanordnung läßt sich aus der Laufzeit des Pulses zurück zum Sender t_L bei bekannter Gruppengeschwindigkeit v_G die Tiefenlage D_{Defekt} des Defektes berechnen:

$$\text{Gl. 2} \quad D_{\text{Defekt}} = \frac{1}{2} \cdot v_G t_L .$$

Neben Impedanzunterschieden können Defekte zudem noch eine höhere Dämpfung aufweisen, die das Ultraschallsignal zusätzlich zur intrinsischen Materialdämpfung schwächen.

Als bildgebende Größe wird daher die Amplitude des reflektierten (oder transmittierten) Ultraschallsignals verwendet, die gegen die beiden Längenkoordinaten farbkodiert aufgetragen wird. Das C-Bild („Contour Scan“, Abb. 1) ist die Darstellung der Amplitude eines Fehler- oder Rückwandechos in einer zeitlichen Blende. Da das Echo durch Schäden im Material geschwächt wird, zeigt auch das C-Bild der Rückwand die Projektion der Defekte.

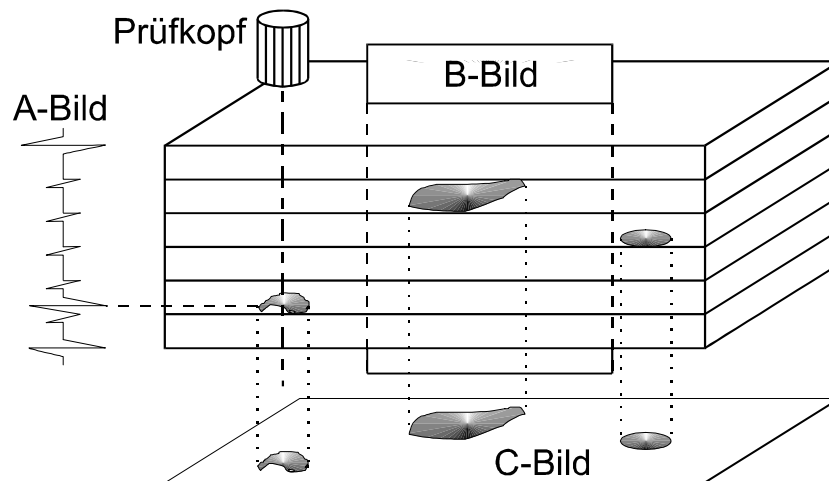


Abb. 1: *Darstellungsarten der Ultraschallprüfung [30]*

Auch der Zeitaufwand für dieses Verfahren ist hoch, da Messungen mit einer mechanischen Scaneinrichtung vorgenommen werden müssen. Um mit Frequenzen im Bereich einiger MHz arbeiten zu können, die eine hohe Auflösung ermöglichen, ist zudem ein Kopplungsmedium (z.B. Wasser) erforderlich.

d) Schallemissionsanalyse

Die Schallemissionsanalyse nutzt die Eigenschaft vieler Werkstoffe auf eine hohe Belastung mit noch unkritischem lokalisiertem Versagen z.B. durch Mikrorisse zu reagieren. Hierbei entstehen transiente Schallereignisse, die bei Verwendung mehrerer Körperschallaufnehmer geortet werden können. Die Häufigkeit und die räumliche Verteilung dieser Ereignissen geben Hinweise auf den Schädigungsstatus eines Bauteils. Dieses Verfahren ist besonders zur Verfolgung von Schädigungsverläufen geeignet.

1.3. Neue Möglichkeiten durch defektselektive Prüfung

Ein prinzipieller Nachteil von Prüfverfahren, die lineare Eigenschaften einer Probe ausnutzen, ist, daß auch von den intakten Bereichen ein Meßsignal erzeugt wird. Ein Defekt kann also, wenn überhaupt, nur durch den Unterschied zur Umgebung erkannt werden. Ist dieser Kontrast nur gering, erfordert es einen erfahrenen Prüfer, der anhand bestimmter optischer Fehlersignaturen, die vor allem empirisch ermittelt wurden, einen Fehler dennoch identifizieren kann. Es ist jedoch wünschenswert, Bauteilprüfungen auch automatisiert durchführen zu können, was in

diesen Fällen an der Komplexität bzw. Unschärfe der Entscheidungsgrenzen in einem oftmals hochdimensionalen Merkmalsraum scheitert.

Es ist daher sinnvoll, eine defektspezifische Wechselwirkung als Merkmal zur Schadenserkenkung auszunutzen. Verwendet man dieses Merkmal als bildgebende Größe, so zeigen sich selektiv defekte Bereiche, denn die intakte Umgebung liefert keinen Beitrag zum Meßsignal [31]. Die meisten Defekte, die in realen Bauteilen die Qualität herabsetzen, enthalten zusätzliche Grenzflächen. Sie entstehen bereits bei der Herstellung oder später während des Betriebes z.B. durch Überlastung. Bei metallischen Werkstoffen sind es vor allem Risse, die bei den komplexen Umformprozessen entstehen und aufgrund ihrer geringen Größe nur schwer auszumachen sind. Welche Eigenschaft zusätzlicher Grenzflächen schwächt aber ein Bauteil? Es ist der lokale Steifigkeitsverlust, der als Schaden angesehen wird. An den Defekträndern liegen häufig Spannungsspitzen vor, die den Schaden unter Last vergrößern. Diese Möglichkeit eines Schädigungswachstums macht es dringend erforderlich, auch zunächst unerhebliche Defekte früh genug zu erkennen.

Die erste Eigenschaft grenzflächenverursachter Defekte ist eine meistens mikroskopische Klaffung. Dies macht sich die wohl älteste defektselektive Methode, die Rißeindringprüfung, zunutze, indem auf die Oberfläche der Probe eine fluoreszierende oder auch Röntgenstrahlen absorbierende Flüssigkeit aufgetragen wird. Durch Kapillareffekte wird diese Flüssigkeit in die Klaffung hineingezogen und verbleibt dort auch nach einer Reinigung der Probe, wobei selbstverständlich Grenzflächen ohne Öffnung nach außen nicht markiert werden können. Unter ultraviolettem Licht bzw. bei der Röntgendurchstrahlung erscheinen selektiv die Bereiche mit unerwünschten Grenzflächen. Über die mechanischen Eigenschaften kann allerdings keine Aussage gemacht werden.

Die Klaffung ist bei harten Werkstoffen (Keramik etc.) meistens so gering, daß sich die Rißflächen im Rahmen ihrer Oberflächenrauigkeit berühren. Bei weicherem, duktilerem Material (wie Metall) gilt dies zumindest für die Randbereiche („Rißspitzen“). Unter Last erfolgt eine Relativbewegung dieser Flächen, die den Einfluß des Defektes definiert. Neben der Verringerung der mechanischen Impedanz tritt Reibung auf. Diese Reibung markiert den Schaden selektiv, da sie in der intakten Umgebung nicht auftritt. Ein defektselektives Verfahren zur Erkennung von Schäden unabhängig von Orientierung oder Oberflächenöffnung sollte also das Merkmal „Reibung“ lokalisieren können. Versteht man Reibung als dissi-

pativen, also hysteretischen Prozeß, so ist davon auszugehen, daß mechanische Energie in thermische umgewandelt wird. Dieser lokal stark erhöhte „Verlustwinkel“ (in linearer Näherung) kann also durch ein Wärmebild der Probe sichtbar gemacht werden [21][32]. Hohe Frequenzen (viele Hysteresedurchläufe pro Zeiteinheit), große Amplituden (große Hystereseffläche) und vor allem eine geeignete Modulation der Anregung ermöglichen mithilfe moderner Infrarotkameras eine empfindliche Schadenserkennung (Ultraschall-LockIn-Thermografie) [33][34].

Selbst bei der Beschreibung von Reibungsvorgängen mit sehr einfachen Modellen wie der Coulomb-Reibung (siehe Abschnitt 2.5) wird deutlich, daß es sich hierbei um einen nichtlinearen Vorgang handelt. Die Charakterisierung durch einen Verlustwinkel, wie beispielsweise beim viskoelastischen Verhalten, ist hier nicht mehr ausreichend. Auch diese Nichtlinearität läßt sich zur defektselektiven Abbildung ausnutzen, da die intrinsische Nichtlinearität des intakten Materials, die durch die Bindungspotentiale der Moleküle hervorgerufen wird, um Größenordnungen kleiner ist als diese Grenzflächeneffekte [35]. Durch die Anregung mit elastischen Wellen geeigneter Wellenlängen werden auch hier die Kontaktflächen relativ zueinander bewegt. Neben Reibung (transversale Bewegung) verzerrt außerdem noch „Klappern“ (normale Bewegung) die sinusförmige Anregungsschwingung, was zur Entstehung höherer Harmonischer im Spektrum führt. Zur defektselektiven Abbildung ist es daher notwendig, an möglichst vielen Orten auf der Probenoberfläche das Schwingungsspektrum zu ermitteln und eine aus den Amplituden der höheren Harmonischen gewonnene Größe zur Bildgebung zu verwenden.

Dieses Vorgehen liefert ein einfacher zu interpretierendes Abbild der Probe, da lediglich der Defekt ein Signal liefert und die intakte Struktur unterdrückt wird. Zudem haben die geometrischen Eigenschaften der Probe praktisch keinen Einfluß auf das Ergebnis. Die Thermographie und die nichtlineare Schwingungsanalyse ergänzen sich also ideal, da erstere die Fläche der Hysterese der Tangentialbewegung bestimmt, und letztere neben der Abweichung von der linearen, elliptischen Hysterese vor allem eine nichtlineare Normalbewegung abbildet. Es können also mit diesen beiden Verfahren unterschiedliche Freiheitsgrade der Grenzflächenbewegung erkannt werden.

1.4. Ziele dieser Arbeit

Die im vorigen Kapitel beschriebenen Vorteile defektselektiver Prüfung haben sich in der Praxis bereits bewährt, wie die Ergebnisse der ultraschallangeregten Thermografie zeigen. Daß diese hysteretischen Effekte auch elastische Wellen beeinflussen müssen, liegt nahe, da es sich um nichtlineare Prozesse wie Reibung handelt. Die reine Normalbewegung zweier Grenzflächen ist ebenfalls ein stark nichtlinearer Vorgang, der allerdings keine Energie dissipiert. Hier läge sogar ein Vorteil bzw. eine Ergänzung gegenüber der Thermografie, die lediglich die in Wärme umgesetzte Energie detektiert. Es besteht zudem die Möglichkeit integraler Messungen, die nur noch die Anwesenheit einer Nichtlinearität zeigen, aber nicht ihren Ort. Damit kann eine schnelle gut/schlecht-Entscheidung getroffen werden. Dies stellt ein großes Automatisierungspotential dar, was für die Integration in industrielle Produktionsprozesse von Bedeutung ist.

Nichtlineare Effekte wurden bisher vorwiegend mit Ultraschall und nicht bildgebend beobachtet [35]. Diese Messungen bezogen sich neben der reinen Materialparameterbestimmung auf Schadenserkenkung an sehr kleinen Proben mit nahezu idealen Defekten (Durchschallung polierter zusammengepreßter Grenzflächen etc.). An Realbauteilen mit makroskopischen Schädigungen, wie etwa Rissen in plastischem Material, reichen jedoch die mit Ultraschall im MHz-Bereich erreichbaren Amplituden nicht mehr aus, um ein nichtlineares Verhalten zu initiieren. Der Schritt zu niedrigeren Frequenzen ist also erforderlich. Um die nichtlineare Schwingungsanalyse zu einem praxisgerechten Prüfverfahren zu entwickeln, müssen die folgenden Problemstellungen bearbeitet werden:

Anregungsquellen müssen gefunden und optimiert werden, die elastische Wellen in einen Prüfkörper einbringen können, um nichtlineares Verhalten an Grenzflächen hervorzurufen. Die Verbindung zwischen Schallquelle und Probe muß jedoch so gestaltet sein, daß die Erzeugung höherer Harmonischer an dieser Kontaktfläche weitestgehend vermieden wird. Anderenfalls würden diese Harmonischen der Anregung das defektselektive Bild störend überlagern. Ein Problem stellt hierbei die erforderliche Schalleistung dar, die in ein Bauteil eingebracht werden muß. Die Wahl der Anregungsfrequenz sollte hierbei so erfolgen, daß keine Eigenschwingungen auftreten. Die Amplitudenverteilung auf der Probe wäre nicht mehr homogen.

Außerdem müssen die durch die Defektnichtlinearität verursachten höheren Harmonischen schnell und mit gutem Signal/Rauschabstand detektiert werden. Eine kontaktfreie Methode ist hierbei wünschenswert, da auch rasternde Messungen zur Bildgebung möglich sein sollten. In dieser Arbeit wird hierfür die scannende Laservibrometrie verwendet, da sie alle oben genannten Anforderungen erfüllt.

Um die Möglichkeiten und Grenzen dieses Verfahrens auszuloten, werden Proben aus verschiedenen Materialien mit typischen Schädigungsformen untersucht. Hierdurch sind materialspezifische Meßparameter und mögliche Anwendungsbereiche bestimmbar.

2. Grundlagen

2.1. Lineare Schwingungen

Schwingungen sind ein Fundamentalprinzip der Natur. Auch jeder Körper läßt sich zu Schwingungen anregen, da jede Materie zumindest teilweise elastisches Verhalten aufweist. Dies ermöglicht z.B. die Schallausbreitung in Medien. Elastizität bedeutet, daß mechanische Energie in potentielle und umgekehrt umgewandelt werden kann. Eine Schwingung stellt also ein System aus zwei Energieformen dar, zwischen denen ein dynamischer Ausgleich stattfindet. Um allerdings zu einer periodischen, nicht kritisch bedämpften Schwingung zu kommen, ist außerdem noch eine zeitlich retardierende Rückwirkung zwischen diesen beiden Zuständen (z.B. Trägheit) notwendig. Ein Beispiel hierfür ist eine eindimensionale Federschwingung, bei der die potentielle Energie der Federspannung in kinetische und zurück umgewandelt wird. Eine lineare Kopplung zwischen der Federkraft F_{Feder} und der Auslenkung x ist nach Hooke durch die Federkonstante K definiert [36]:

$$\text{Gl. 3} \quad F_{\text{Feder}} = K \cdot x.$$

Diese Kraft steht zur Verfügung, um eine an der Feder befestigte Masse m zu beschleunigen [37]:

$$\text{Gl. 4} \quad F_{\text{Beschleunigung}} = m \cdot \ddot{x}.$$

Diese Kräfte müssen gleich sein, solange sich das System in einem stationären, „eingeschwungenem“ Zustand befindet [37]. Die Äquivalenz der Kräfte führt damit zur Bewegungsgleichung in Newtonscher Formulierung:

$$\text{Gl. 5} \quad m\ddot{x} + Kx = 0 \quad \vee \quad \ddot{x} + \frac{K}{m}x = 0.$$

Die stationäre Lösung dieser linearen homogenen Differentialgleichung (DGL) zweiter Ordnung ist:

$$\text{Gl. 6} \quad x(t) = x_{\text{max}} e^{-i\left(\sqrt{K/m} \cdot t - \varphi\right)}.$$

φ beschreibt die Phasenlage zum Zeitnullpunkt; die Konstanten m und K definieren die charakteristische Schwingungsfrequenz des Systems:

$$\text{Gl. 7} \quad f = \sqrt{\frac{K}{m}} / 2\pi.$$

Die Lösung $x(t)$ der Bewegungsgleichung und die Eigenfrequenz f stellen Eigenfunktion und Eigenwert des Oszillators dar und charakterisieren ihn eindeutig.

Die Annahmen, die zur Gl. 5 geführt haben, sind allerdings idealisiert, da z.B. Federn im Allgemeinen eine nichtlinear ortsabhängige Federkonstante $K(x)$ besitzen. Es treten meist auch Dämpfungsterme auf, die ein nichtlinear hysteretisches Verhalten verursachen.

2.2. Nichtlineare Schwingungen

Tatsächlich ist in realen schwingenden Systemen die Annahme eines linearen Zusammenhangs bzw. linearer Übertragungsfunktion zwischen anregender Größe (Spannung, Kraft) und transformierter Größe (Dehnung, Auslenkung, Strom) nur eine Näherung. Die Gründe sind wie oben erwähnt nichtlineare Verluste, aber auch Nichtlinearitäten der Übertragungsfunktion selbst. Ein Beispiel hierfür ist die Schallausbreitung in Medien durch Longitudinalwellen oder symmetrische Lambwellen, bei der in der Kompressionsphase die Schallgeschwindigkeit aufgrund der größeren Dichte erhöht und in der Expansionsphase erniedrigt wird. Das Resultat ist eine Verzerrung des ursprünglichen akustischen Signals. Das Medium weist also eine prinzipiell nichtlineare Übertragungsfunktion für diese Wellen auf.

Es existieren allerdings auch Systeme, die bis zu einer bestimmten Amplitude ein lineares Verhalten aufweisen, oberhalb dieses Schwellwertes jedoch stark nichtlinear werden. So kann beispielsweise ein elektronischer Verstärker keine Ausgangsspannung oberhalb seiner Betriebsspannung erzeugen; ein Eingangssignal, das multipliziert mit dem Verstärkungsfaktor des Systems in die Nähe der Betriebsspannung kommt, wird also begrenzt und führt zu einer Verzerrung des Ausgangssignals.

2.2.1. Höhere Harmonische

Ein sinusförmiges Eingangssignal würde also deformiert, was nicht mehr durch nur eine komplexwertige Dimension (Betrag und Phase bei der Anregungsfrequenz) beschrieben werden kann. Es müssen weitere Sinusfunktionen mit ganzzahligen Vielfachen der Frequenz hinzugezogen werden. Dieser Zusammenhang läßt sich mathematisch durch die Betrachtung eines nichtlinearen Zusammenhangs zwischen

Eingangsgröße u_a und transformierter Größe u_e nachvollziehen. Diese Kennlinie läßt sich durch ein Polynom n -ten Grades mit dem Koeffizientenvektor c_i approximieren [38]:

$$\text{Gl. 8} \quad u_a = c_0 + c_1 u_e^1 + c_2 u_e^2 + c_3 u_e^3 + \dots + c_n u_e^n \quad \text{mit } n \in \mathbb{N}.$$

Verwendet man ein Anregungssignal der Form

$$\text{Gl. 9} \quad u_e = \hat{u}_e \sin(\omega t),$$

so lassen sich unter Verwendung der Sätze

$$\text{Gl. 10} \quad 2 \sin^2(x) = 1 - \cos(2x), \quad 4 \sin^3(x) = 3 \sin(x) - \sin(3x), \dots$$

die in Gl. 8 enthaltenen trigonometrischen Funktionen linearisieren. Dies führt nach dem Zusammenfassen der Terme gleicher Frequenz und Substitution der Koeffizienten durch $u_i(c_i)$ zu einem Ausgangssignal der Form:

$$\text{Gl. 11} \quad u_a(t) = u_0 + \hat{u}_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \hat{u}_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots$$

Die Phasenwinkel φ_i dienen hierbei einer Formulierung nur mit Sinus-Gliedern. Die nichtlineare Schwingung wird also durch eine Summe sinusförmiger Signale mit ganzzahligen Vielfachen der Anregungsfrequenz beschrieben, die in den weiteren Darlegungen dieser Arbeit als (höhere) „Harmonische“, „Ober-“ oder „Partialtöne“ bezeichnet werden. Ein $u_a(t)$ kann eine beliebige Form haben, die Reihe der Form wie Gl. 11 ist aber nur dann endlich, wenn $u_a(t)$ periodisch ist.

Um aus einem gemessenen Ausgangssignal $u_a(t)$ die Koeffizienten c_i des Übertragungsfunktions-Polynoms (Gl. 8) bestimmen zu können, müssen zunächst die Amplituden \hat{u}_i der harmonischen Funktionen ermittelt werden. Diese \hat{u}_i stellen also die eigentliche Ausgangsgröße dar, aus der die systemspezifischen c_i bestimmbar sind. Gesucht ist daher eine Funktion $U_a(\omega/2\pi)$, die dem harmonischen Spektrum von $u_a(t)$ entspricht. Diese Funktion läßt sich mathematisch durch eine Basis-Transformation ermitteln (Abschnitt 2.3).

Die durch die Nichtlinearität von Defekten erzeugten höheren Harmonische werden in allen experimentellen Beispielen dieser Arbeit als Abbildungsmerkmal genutzt.

2.2.2. Intermodulation

Besteht die Eingangsfunktion $u_e(t)$ bereits aus mehreren Frequenzen, so können sie bei einer nichtlinearen Übertragungsfunktion nicht mehr unabhängig voneinander

betrachtet werden: Die lineare Superposition ist nicht mehr gültig. Beispielsweise wird die Eingangsfunktion

$$\text{Gl. 12} \quad u_e = \hat{u}_{e1} \cos(\omega_1 t) + \hat{u}_{e2} \cos(\omega_2 t)$$

durch die Übertragungsfunktion zweiter Ordnung

$$\text{Gl. 13} \quad u_a = c_0 + c_1 u_e^1 + c_2 u_e^2$$

zur Ausgangsfunktion

$$\begin{aligned} \text{Gl. 14} \quad u_a &= c_0 + c_1 [\hat{u}_{e1} \cos(\omega_1 t) + \hat{u}_{e2} \cos(\omega_2 t)]^1 \\ &\quad + c_2 [\hat{u}_{e1} \cos(\omega_1 t) + \hat{u}_{e2} \cos(\omega_2 t)]^2 \\ &= c_0 + c_1 [\hat{u}_{e1} \cos(\omega_1 t) + \hat{u}_{e2} \cos(\omega_2 t)]^1 \\ &\quad + c_2 [\hat{u}_{e1}^2 \cos^2(\omega_1 t) + \hat{u}_{e2}^2 \cos^2(\omega_2 t) + 2\hat{u}_{e1}\hat{u}_{e2} \cos(\omega_1 t)\cos(\omega_2 t)]. \end{aligned}$$

Mithilfe der Sätze [39]

$$\text{Gl. 15} \quad \cos^2 x = \frac{1}{2}(1 + \cos(2x)) \quad \text{und} \quad \cos(x)\cos(y) = \frac{1}{2}(\cos(x-y) + \cos(x+y))$$

wird u_a zu

$$\begin{aligned} \text{Gl. 16} \quad u_a &= c_0 + c_1 \hat{u}_{e1} \cos(\omega_1 t) + c_1 \hat{u}_{e2} \cos(\omega_2 t) \\ &\quad + \frac{1}{2} c_2 \hat{u}_{e1} (1 + \cos(2\omega_1 t)) + \frac{1}{2} c_2 \hat{u}_{e2} (1 + \cos(2\omega_2 t)) \\ &\quad + c_2 \hat{u}_{e1} \hat{u}_{e2} \cos(\omega_1 t - \omega_2 t) + c_2 \hat{u}_{e1} \hat{u}_{e2} \cos(\omega_1 t + \omega_2 t). \end{aligned}$$

Es entstehen also zusätzliche Frequenzkomponenten mit $2\omega_1$, $2\omega_2$, $(\omega_1 - \omega_2)$ und $(\omega_1 + \omega_2)$. Dieses Auftreten von Summen- und Differenzfrequenzen wird im Folgenden als „Intermodulation“ bezeichnet. Bei komplexerer Nichtlinearität (Gl. 8) treten auch Summen und Differenzen höherer Harmonischer auf ($2\omega_1 \pm \omega_2$, $3\omega_1 \pm \omega_2$, $4\omega_1 \pm \omega_2$ etc.) auf.

2.2.3. Subharmonische

In nichtlinearen Systemen können neben ganzzahligen Vielfachen auch Brüche der Anregungsfrequenz auftreten [40]. Ein System mit der DGL

$$\text{Gl. 17} \quad \ddot{x} + \omega_0^2 x - bx^3 = \hat{u}_e \cos(\Omega t)$$

kann beispielsweise unter bestimmten Bedingungen harmonisch mit der Frequenz $\Omega/3$ schwingen [41]. Der Ansatz

$$\text{Gl. 18} \quad x(t) = \hat{u}_{\text{sub}} \cos\left(\frac{\Omega}{3}t\right)$$

führt eingesetzt in Gl. 18 mit Gl. 10 zu

$$\text{Gl. 19} \quad \left(-\frac{\Omega^2}{9} + \omega_0^2 - \frac{3}{4}b u_{\text{sub}}^2\right) u_{\text{sub}} \cos\left(\frac{\Omega}{3}t\right) - \frac{1}{4}b u_{\text{sub}}^3 \cos(\Omega t) = \hat{u}_e \cos(\Omega t).$$

Gl. 19 wird nur erfüllt für

$$\text{Gl. 20a, b} \quad u_{\text{sub}} = -\left(\frac{4u_e}{b}\right)^{1/3} \quad \text{und} \quad \frac{\Omega}{3} = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{3}{4} \frac{b u_{\text{sub}}^2}{\omega_0^2}}.$$

Die subharmonische Schwingung (Gl. 18) entsteht dadurch, daß die durch den nichtlinearen Term in Gl. 17 erzeugte dritte Harmonische gerade durch die äußere Kraft kompensiert wird. Dies ist nur für die Amplitude in Gl. 20a möglich. Für den allgemeinen Fall der Nichtlinearität verschiedener Ordnung treten auch $\Omega/2$, $\Omega/4$, $\Omega/5$ etc. sowie ganzzahlige Vielfache der Subharmonischen auf. Auch subharmonische Schwingungen können zur Defekterkennung genutzt werden (Abschnitt 4.1.1, Abb. 37).

2.3. Lineare Basistransformationen – Fourieranalyse – Diskretisierung

Um aus der Messung des zeitlichen Verlaufs einer Schwingung nichtlineares Verhalten ableiten zu können, ist es sinnvoll das Meßsignal in der Frequenzdomäne zu betrachten, da hier in diesem Fall höhere Harmonische auftreten, die als bildgebende Größe verwendet werden sollen. Die Berechnung des Spektrums einer Zeitfunktion geschieht durch eine Basistransformation, die im Folgenden erläutert wird.

Der Zustand eines System kann immer durch einen Vektor $[q_b, \dots, q_R]$ im sogenannten Zustands- oder Phasenraum beschrieben werden, dessen Dimensionalität mindestens der Anzahl der Freiheitsgrade, also der unabhängigen Koordinaten q_i der Systemveränderung entspricht. Die charakteristische Gleichung eines Systems (Bewegungsgleichung, Wellenfunktion, Übertragungsfunktion etc.) entspricht dann einer Trajektorie im Phasenraum, da sie die Koordinaten q_i miteinander verknüpft.

Diese charakteristische Funktion läßt sich wiederum als Linearkombination von Basisfunktionen darstellen, die allerdings die mathematischen Bedingungen der Orthogonalität und der Linearität erfüllen müssen [42]:

Orthogonalität: Definiert man ein Skalarprodukt der Form

$$Gl. 21 \quad \langle \varphi, \psi \rangle = \int \varphi^*(q_1, \dots, q_R) \psi(q_1, \dots, q_R) d\tau$$

mit den Basisfunktionen φ, ψ (φ^* ist konjugiert komplexe Funktion von φ) und dem Volumenelement $d\tau = (dq_1 dq_2 \dots dq_R)$, dann muß dieses Skalarprodukt für alle orthogonalen Basisfunktionen null sein.

Linearität: Linearität ist gegeben, wenn auch alle Linearkombinationen der Funktionen φ, ψ jeweils orthogonal zueinander sind.

Ein Punkt im durch die Menge der Basisfunktionen (Basis) aufgespannten Raum entspricht der charakteristischen Funktion eines Systems, beschrieben durch eine Linearkombination der Basisfunktionen. Die Wahl der Basis ist zwar beliebig, es sollte aber eine Basis verwendet werden, deren Linearkombination möglichst schnell gegen die Ausgangsfunktion konvergiert.

Für periodische Funktionen sind Sinus- bzw. Kosinus-Reihen am besten geeignet, da sie ebenfalls periodisch sind. Diese Basistransformation („Fouriertransformation“) läßt sich mathematisch beschreiben durch:

$$Gl. 22 \quad \mathfrak{T}\{u(t)\} = U(f) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) e^{-i2\pi ft} dt.$$

Hierdurch wird eine reelle Zeitfunktion $u(t)$ in eine komplexe Funktion $U(f)$ der Frequenz überführt. Diese mathematische Transformation läßt sich jedoch nicht auf gemessene Funktionsverläufe anwenden, da keine Integration über alle Zeiten t von $-\infty$ bis ∞ möglich ist. Zum einen muß die Messung zu einem festen Zeitpunkt t_{Start} in der Vergangenheit gestartet worden sein und zum anderen an einem Zeitpunkt t_{Stop} , der maximal der Gegenwart entspricht, beendet werden. Dies läßt sich durch das Produkt der Zeitfunktion $f(t)$ mit einer Fensterfunktion $w(t)$ der Form

$$Gl. 23 \quad w(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } t < t_{Start} \wedge t > t_{Stop} \\ 1 & \text{für } t \geq t_{Start} \wedge t \leq t_{Stop} \end{cases}$$

darstellen, über das integriert werden muß.

Eine weitere experimentelle Einschränkung liegt in der zeitlichen Diskretisierung der ursprünglich zeitkontinuierlichen Funktion, die durch eine Abtastung

(Sampling) des analogen Meßsignals in einem Analog-Digital-Wandler (ADC) erfolgt, um sie in einem Digitalrechner weiterzuverarbeiten. Zur Vermeidung von Artefakten im Spektrum muß die Bandbreite des Eingangssignals vor der Abtastung durch Tiefpaßfilterung begrenzt werden, wobei die Grenzfrequenz f_G des Filters durch die halbe Abtastfrequenz f_s bestimmt ist [43].

Die zeitkontinuierliche Funktion $u(t)$ wird deshalb durch den Vektor bzw. die Wertemenge $u_D(n)$ der Dimension N ersetzt. Die Fensterfunktion $w(t)$ nimmt die Form $w(n)$ an und muß die beiden Bedingungen

$$\text{Gl. 24} \quad w(n) = w((N-1) - n)$$

und

$$\text{Gl. 25} \quad w(n) = 0 \quad \text{für } n < 0 \wedge n \leq N$$

erfüllen. Faßt man das Integral in Gl. 22 als endliche Reihe von 0 bis $(N-1)$ auf und setzt die diskretisierten Funktionen $u_D(n)$ und $w(n)$ ein, so ergibt sich nach längerer Umformung [44]:

$$\text{Gl. 26} \quad U_D(f') = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} u_D(j) e^{i2\pi f' j}.$$

Diese Diskrete Fourier-Transformation (DFT) liefert allerdings zu N Zeitwerten auch nur genau N Frequenzen, so daß ein Linienspektrum entsteht. Demnach sind auch nur Frequenzen f' bestimmbar, die der Bedingung

$$\text{Gl. 27} \quad f' = m \frac{f_s}{2N} \quad \text{mit } m = 0, 1, 2, \dots, (N-1)$$

genügen.

Zur Detektion nichtlinearen Verhaltens ist die Diskretisierung des Spektrums jedoch kein Nachteil, sondern sie kann gezielt zur Verringerung des Auswertaufwandes ausgenutzt werden. Bei einer Anregungsfrequenz f_A sind nämlich nur ganzzahlige Vielfache von f_A zu erwarten (siehe Abschnitt 2.2). Man kann also die Anzahl der benötigten Frequenzlinien durch

$$\text{Gl. 28} \quad f'_B = N f'_A$$

aus der Bandbreite f_B des Meßsystems bestimmen. Es brauchen daher nur N Frequenzlinien für N Harmonische bestimmt zu werden.

Die Tatsache, daß nicht mehr über alle Zeiten integriert werden kann, sondern nur noch über ein Zeitfenster, hat jedoch auch zur Folge, daß das Spektrum unschärfer wird. Eine Schwingung mit der Frequenz f_0 wird nicht mehr durch eine Deltafunktion im Spektrum beschrieben, sondern sie weist eine für die verwendete Fensterfunktion charakteristische spektrale Signatur auf.

Die spektrale Breite dieser Signatur kann durch Faltung der Fourier-Transformierten $W_D(f')$ der Fensterfunktion $w(n)$

$$\text{Gl. 29} \quad W_D(f') = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} w(n) e^{i2\pi f' n}$$

mit dem Spektrum der Sinusfolge (Basisfunktionen)

$$\text{Gl. 30} \quad F(f') = \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-i2\pi(f'-f_0')n}$$

berechnet werden:

$$\text{Gl. 31} \quad F_D(f') = F(f') * W_D(f').$$

Mit einer Rechteckfensterfunktion ergibt sich somit das Spektrum [44]

$$\text{Gl. 32} \quad F_D(f') = \frac{1}{N} \frac{\sin(\pi(f'-f_0')N)}{\sin(\pi(f'-f_0'))} e^{-i\pi(f'-f_0')(N-1)}.$$

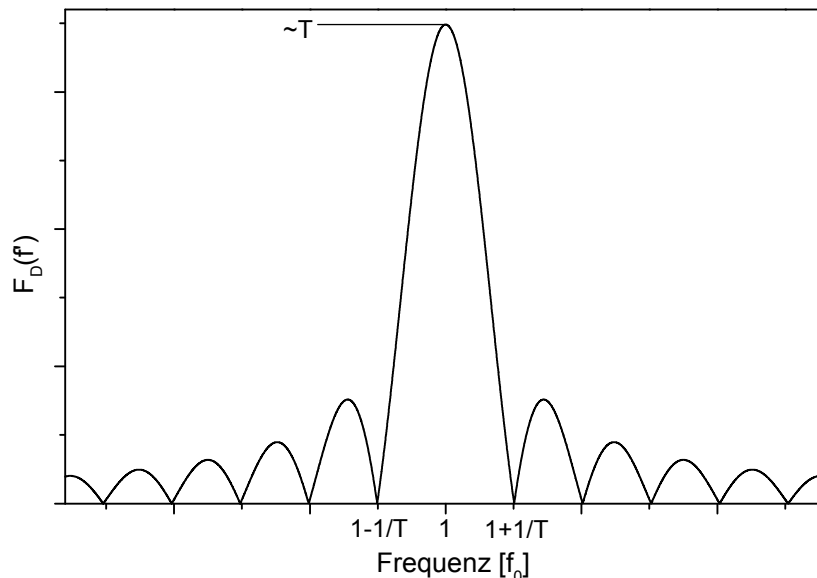


Abb. 2: Spektraler Leckeffekt des Rechteckfensters der Breite $T=N/f_s$

In Abb. 2 ist zu erkennen, daß neben dem Hauptmaximum Nebenmaxima auftreten, wie es für eine Spaltfunktion zu erwarten ist. Dieser „spektrale Leckeffekt“

(spectral leakage) [45] ist abhängig von der Fensterfunktion $w(n)$ und kann durch geeignete Wahl des Fensters verringert werden. Hierdurch werden die Nebenmaxima unterdrückt und die Welligkeit verringert. In der Literatur findet man folgende Fenster, die auch in der Software des im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Laser vibrometers (Polytec PSV200) Anwendung finden [46] [47]:

Mit der Fensterlänge $T=N/f_s$	Größtes Nebenmaximum [dB]	-3 dB Bandbreite des Hauptmaximums [1/T]	Seitenbandabfall [dB/Oktave]	Erster Nulldurchgang
Rechteck	-13,3	0,88	6	1/T
Bartlett	-26,5	1,25	12	2/T
Hanning	-31,5	1,4	18	2/T
Hamming	-42,6	1,3	6	3/T

Tabelle 1: *Eigenschaften häufig benutzter Zeitfenster [46][47]*

Bei der Anwendung dieser Fensterfunktionen zur Analyse von Funktionen mit nahezu kontinuierlichem Spektrum wird die Verbreiterung des Hauptmaximums („Verschmierung“, „smearing“) normalerweise als Nachteil aufgefaßt, da sie das spektrale Auflösungsvermögen verringert.

Bei der Untersuchung von Linienspektren kann diese Verbreiterung jedoch auch einen positiven Einfluß auf das Meßergebnis haben. Verwendet man nämlich zur Anregung eines Bauteils einen Schweiß-Ultraschallgenerator, so muß man mit leichten Frequenzvariationen rechnen, welche die Detektionsempfindlichkeit stark herabsetzen, weil die Schwingungsfrequenz leicht von den Frequenzlinien der Diskreten Fouriertransformation abweicht. Für diesen Fall ist eine verbreiterte Linie der DFT notwendig, um die Amplitude der entsprechenden Harmonischen berechnen zu können. Auch wenn hierbei unter Umständen die Absolutamplituden der Harmonischen durch die endliche Flankensteilheit des Hauptmaximums verändert werden, so bleiben doch die relativen Amplitudenverhältnisse erhalten, da es sich um eine lineare Verschiebung des Spektrums handelt.

2.4. Intrinsische Materialnichtlinearität

Das nichtlineare Übertragungsverhalten elastischer Wellen ist ein wohlbekanntes Phänomen. Insbesondere das Auftreten der zweiten Harmonischen wurde häufig als Kennzeichen für das inelastische Verhalten eines realen Mediums beobachtet [48]. Man nutzte außerdem Ultraschall-Modulationseffekte, um die nichtlinearen Eigenschaften gebundener Grenzflächen zu untersuchen [49]. Zur Beschreibung wurden makroskopische Modelle wie ein erweitertes Hooke-Gesetz [50] oder ein System nichtlinearer Federn [51] verwendet.

Die Schallenergie in einem Material läßt sich als molekulare oder atomare Auslenkung aus der Ruhelage interpretieren, die dem energetischen Minimum der Bindungspotentiale entspricht. Das Bestreben, wieder in den energetischen Grundzustand zurückzugelangen, wird durch eine auslenkungsabhängige Rückstellkraft beschrieben. Für die metallische Bindung, die hier exemplarisch verwendet werden soll, gilt für die Rückstellkraft $F(a)$ in die Ruhelage a_0 bei der Auslenkung a [52][53]:

$$\text{Gl. 33} \quad F(a) = 2E_{ad} \frac{a - a_0}{l_{sc}^2} e^{-\frac{(a - a_0)}{l_{sc}}},$$

mit der Oberflächenenergie E_{ad} und der Abschirmlänge l_{sc} , die die Reichweite der Bindung charakterisiert. Diese Abhängigkeit der Rückstellkraft von der Auslenkung ist in Abb. 3 dargestellt.

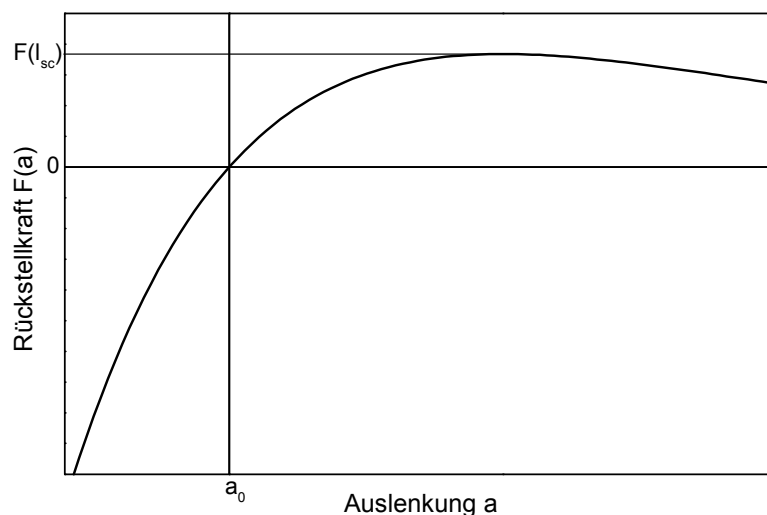


Abb. 3:

Verlauf der Rückstellkraft der metallischen Bindung

Zur Bestimmung des Spektrums der Harmonischen von F setzt man

$$\text{Gl. 34} \quad a(t) = A \sin(\omega t).$$

Die analytische Lösung des Fourier-Integrals zur resultierenden Funktion ist leider nicht bekannt [54], das Spektrum läßt sich jedoch durch eine Reihenentwicklung oder numerisch durch eine DFT (siehe Abschnitt 2.3 oben) näherungsweise bestimmen. Zur Einschätzung der Effizienz der Erzeugung höherer Harmonischer ist es sinnvoll, die Amplitudenabhängigkeit zu untersuchen. In Abb. 4 ist der numerisch ermittelte Pegel der 2. und 3. Harmonischen normiert auf die 1. Harmonische (Grundschiwingung) gegen die Amplitude der Schwingung im Verhältnis zur Abschirmlänge dargestellt. Es ist auffällig, daß bis etwa 90% der Abschirmlänge die Verzerrungen relativ konstant bleiben und erst kurz vor dem Erreichen der Abschirmlänge stark zunehmen. Durch die bezüglich a_0 asymmetrische Nichtlinearität ist die Entstehung geradzahligter Harmonischer gegenüber ungeradzahligem deutlich bevorzugt. In Abb. 4 zeigt sich dies durch einen um etwa zwei Größenordnungen höheren Pegel der zweiten Harmonischen im Verhältnis zur dritten. Die Ultraschallamplituden liegen jedoch bei gewöhnliche Anwendungen etwa im Bereich einiger \AA , wie durch Schallfeldberechnungen abgeschätzt wurde [55], was nur wenigen Prozent der Abschirmlänge entspricht. Für den Fall der metallischen Bindung kann also von Gesamtverzerrungsamplituden (Klirrfaktoren) von weniger als einem Prozent ausgegangen werden, da man weit von der Amplitude l_{sc} entfernt bleibt, die zu einer Dissoziation der Atome bzw. Moleküle führen würde.

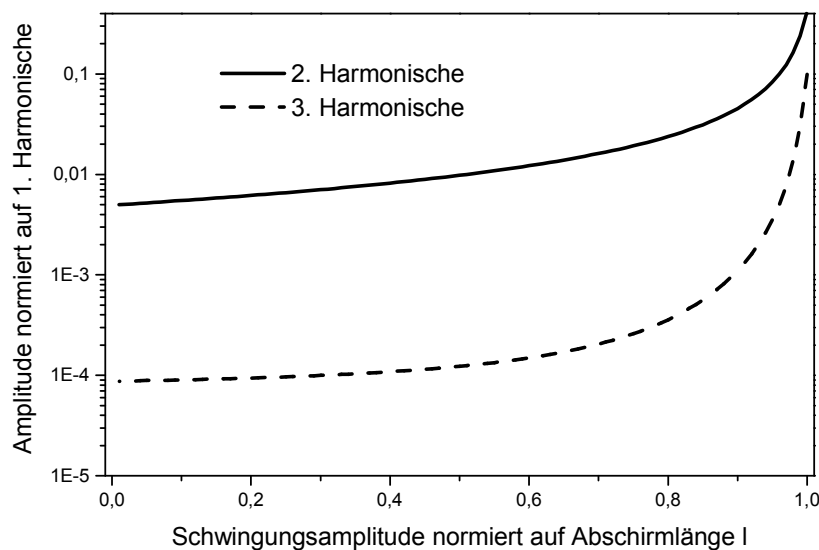


Abb. 4: Höhere Harmonische durch nichtlineare Potentiale metallischer Bindung (Abb. 3)

2.5. Grenzflächennichtlinearität

Im Gegensatz zur gut verstandenen „klassischen“ intrinsischen Nichtlinearität der Elastizität [56][57] (siehe vorhergehender Abschnitt), die immer stetige Verläufe der Spannungs-Dehnungs-Kennlinie voraussetzt, weisen Grenzflächenbewegungen meist unstetige Anteile auf. Durch Potenzreihen (vgl. Abschnitt 2.2) können diese Unstetigkeiten nur unzureichend angenähert werden: Es sind sehr hohe Potenzordnungen erforderlich, und der richtungsabhängige Verlauf von Hysteresen ist nicht beschreibbar, wohingegen im klassischen Fall endliche Potenzreihen eine exakte physikalische Lösung darstellen können.

Es ist statt dessen sinnvoller, die Verzerrung der harmonischen Anregung als Modulation zu beschreiben. Hierzu wird das Anregungssignal (linearer Anteil) mit dem Modulationssignal (nichtlinearer Anteil) gefaltet. Es entsteht das resultierende Ausgangssignal. Im Folgenden sollen für die zwei bedeutendsten Mechanismen ein Modulationssignal entwickelt und daraus das Spektrum der Harmonischen ermittelt werden.

2.5.1. Klappern durch Normalbewegung

Durchläuft eine longitudinale elastische Welle die Grenzfläche zwischen zwei ungebundenen Oberflächen, so können Druckspannungen sehr viel besser als Zugspannungen übertragen werden. Für den Fall einer lokalen Enthftung, deren Umgebung jedoch intakt ist, sind daher die elastischen Konstanten für Zug und Druck verschieden. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 5 schematisch dargestellt.

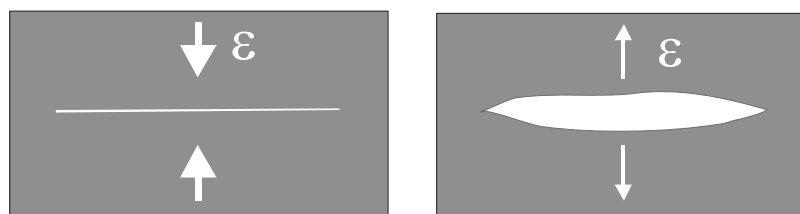


Abb. 5: Schematische Darstellung einer Enthftung unter Druck- (links) und Zuglast (rechts)

Unter Druck bleibt die Enthftung geschlossen, und es können hohe Druckspannungen übertragen werden. Bei einer größeren Zuglast als die Resthaftung bzw. Kompressionskraft öffnet sich die Enthftung. Im Dehnungsfall sind gegenüber dem Schubfall geringere Spannungen für betragsmäßig gleiche Dehnungen erforderlich. Die resultierende elastische Konstante C_{gesamt} ist also vom Vorzeichen der

Spannung bzw. von der Auslenkung abhängig. Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm für dieses Verhalten zeigt Abb. 6.

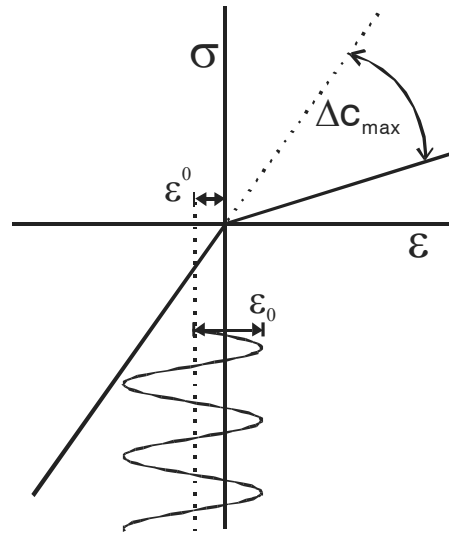


Abb. 6: Verzerrung eines harmonischen Signals durch wegabhängige elastische Konstante

Eine Welle der Amplitude ϵ_0 mit der Vordehnung ϵ^0 durchdringt einen mechanischen Kontakt der resultierenden elastischen Konstanten $C_{\text{gesamt}} = C^{II} + \Delta C(t)$, wobei der Anteil ΔC für Amplituden $\epsilon_0 \leq \epsilon^0$ zu null wird (Hookesches Verhalten mit der materialspezifischen dynamischen Konstanten C^{II}). In ihm sind alle nichtlinearen Beiträge zusammengefaßt. Es ergibt sich also zwischen Spannung und Dehnung der Zusammenhang

$$\text{Gl. 35} \quad \sigma = \sigma_{\text{linear}} + \sigma_{\text{nichtlinear}} = C^{II} \epsilon + \Delta C \epsilon,$$

aus dem im Folgenden das Spektrum $\mathfrak{S}\{\sigma_{\text{nichtlinear}}\} = \mathfrak{S}\{\Delta C \epsilon_0 \cos(\omega t)\}$ der Harmonischen ermittelt wird [58]. Für $\Delta C(t)$ gilt dann:

$$\text{Gl. 36} \quad \Delta C(t) = \Delta C_{\text{max}} \Pi(t/\tau) * \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT_0),$$

mit der Einheitsstufenfunktion $\Pi(t/\tau)$, die durch die Summe der δ -Funktionen zeitperiodisch mit $T_0 = 2\pi/\omega$ gemacht wird (Abb. 8).

$$\text{Gl. 37} \quad \Pi(t/\tau) = \begin{cases} 1 & \text{für } |t| < \tau/2 \\ 1/2 & \text{für } |t| = \tau/2 \\ 0 & \text{für } |t| > \tau/2 \end{cases}$$

und der Zeit τ , für die $\epsilon_0 > \epsilon^0$ ist (Abb. 7) und für die gilt

$$\text{Gl. 38} \quad \tau = T_0 / \pi \arccos \left(\frac{\varepsilon^0}{\varepsilon_0} \right).$$

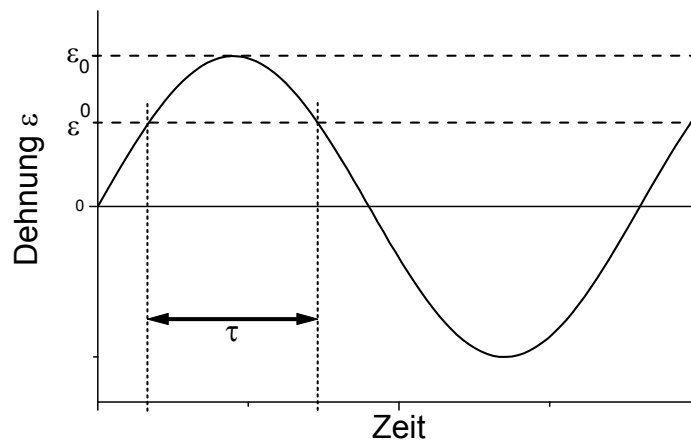


Abb. 7: Definition der Modulationszeit τ

Mit der „Shah-Funktion“ $\text{III}(t/T)$ für beliebige Perioden T

$$\text{Gl. 39} \quad \text{III}(t/T) = T \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT)$$

läßt sich Gl. 36 formulieren als

$$\text{Gl. 40} \quad \Delta C(t) = \frac{\Delta C_{\max}}{T_0} \Pi(t/\tau) * \text{III}(t/T).$$

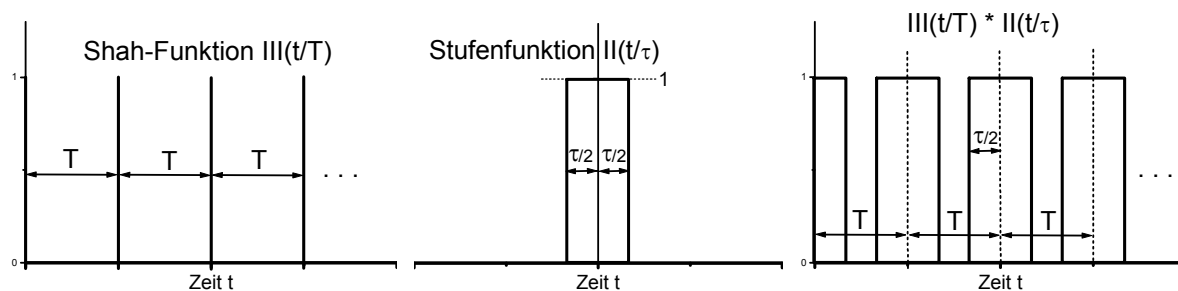


Abb. 8: Erzeugung einer periodischen Stufenfunktion durch Faltung von $\Pi(t/\tau)$ mit $\text{III}(t/T)$

Die Fouriertransformierten der beiden Faltungsterme lassen sich unabhängig voneinander bestimmen, da gilt:

$$\text{Gl. 41} \quad \mathfrak{F}\{f * g\} = F \cdot G, \quad \text{mit } \mathfrak{F}\{f\} = F \text{ und } \mathfrak{F}\{g\} = G.$$

Für die Stufenfunktion $\Pi(t/\tau)$ ergibt sich als Transformierte

$$\text{Gl. 42} \quad \mathfrak{T}\{\Pi\} = \tau \frac{\sin(\pi f \tau)}{\pi f \tau} \equiv \tau \operatorname{sinc}(f \tau)$$

und für die Shah-Funktion

$$\text{Gl. 43} \quad \mathfrak{T}\{\text{III}\} = T_0 \text{III}(f T_0) \equiv \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta\left(f - \frac{n}{T_0}\right).$$

⇓

$$\text{Gl. 44} \quad \mathfrak{T}\{\Delta C(t)\} = \Delta C_{\max} \frac{\tau}{T_0} \operatorname{sinc}(f \tau) \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta\left(f - \frac{n}{T_0}\right) \equiv$$

$$\text{Gl. 45} \quad \equiv \Delta C_{\max} \frac{\tau}{T_0} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \operatorname{sinc}\left(\frac{n \tau}{T_0}\right) \cdot \delta\left(f - \frac{n}{T_0}\right)$$

Um hieraus das Gesamtspektrum

$$\text{Gl. 46} \quad \mathfrak{T}\{\sigma_{\text{nichtlinear}}\} = \mathfrak{T}\{\Delta C(t) \varepsilon_0 \cos(\omega t)\}$$

zu bestimmen, kann man sich das Modulationstheorem

$$\text{Gl. 47} \quad \mathfrak{T}\{v(t) \cdot \cos(\omega t)\} = \frac{1}{2} \left[V\left(f - \frac{\omega_0}{2\pi}\right) + V\left(f + \frac{\omega_0}{2\pi}\right) \right], \quad \text{mit } V(f) = \mathfrak{T}\{v(t)\}$$

zunutze machen:

$$\text{Gl. 48} \quad \mathfrak{T}\{\sigma_{\text{nichtlinear}}(t)\} = \frac{\Delta C_{\max} \varepsilon_0 \tau}{2T_0} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \operatorname{sinc}\left(\frac{n \tau}{T_0}\right) \left[\delta\left(f - \frac{n+1}{T_0}\right) + \delta\left(f - \frac{n-1}{T_0}\right) \right].$$

Dieser Ausdruck entspricht der Summe der höheren Harmonischen der Amplituden a_N

$$\text{Gl. 49} \quad \mathfrak{T}\{\sigma_{\text{nichtlinear}}(t)\} \equiv \sum_{N=-\infty}^{+\infty} a_N e^{i 2\pi N f t}.$$

Da jedoch nur Frequenzen mit $f=f_0 N$ eine endliche Amplitude besitzen, folgt für n

$$\text{Gl. 50 a,b} \quad N = \begin{Bmatrix} n-1 \\ n+1 \end{Bmatrix} \Rightarrow n = \begin{Bmatrix} N+1 \\ N-1 \end{Bmatrix}.$$

Die Summation über alle n kann also fallengelassen werden, um nur noch die Terme mit $n=N\pm 1$ zu berücksichtigen. Die Amplituden a_N der höheren Harmonischen ergeben sich dann zu

$$Gl. 51 \quad a_N = \frac{\Delta C_{\max} \varepsilon_0 \tau}{2T_0} \left[\operatorname{sinc} \left(\frac{(N+1)\tau}{T_0} \right) + \operatorname{sinc} \left(\frac{(N-1)\tau}{T_0} \right) \right].$$

Abb. 9 zeigt exemplarisch die Beträge der Harmonischen für ein $\varepsilon^0/\varepsilon_0$ -Verhältnis von 0,9.

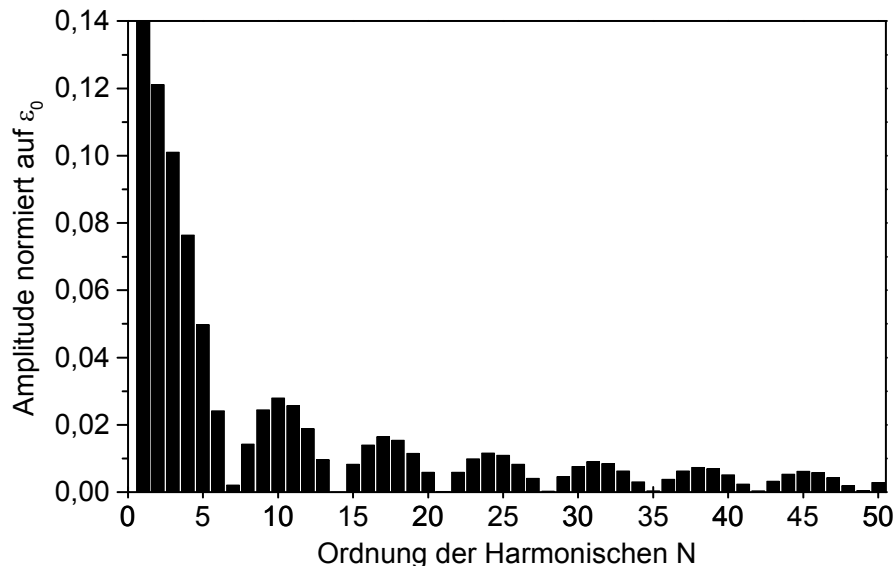


Abb. 9: Amplitudenspektrum der Harmonischen für $\varepsilon^0/\varepsilon_0=0,9$

Das Spektrum weist den nichtmonotonen Verlauf der sinc-Funktion auf, wie er auch in Messungen nachvollzogen werden konnte (siehe Abb. 27).

2.5.2. Hysterese durch Tangentialbewegung

Bewegen sich zwei Grenzflächen, die durch eine Normalkraft zusammengepreßt werden, tangential zueinander, kommt es zu Energieverlusten durch Reibung. Diese Reibung führt zu einer Kraft, die der Antriebskraft der Bewegung entgegengesetzt und in erster Näherung proportional zur Relativgeschwindigkeit der Grenzflächen ist (viskose oder Stokesche Reibung). Hierfür und auch für viskoelastische Verformungen ergibt sich daher für eine periodische Kraft bzw. Spannung eine elliptische, lineare Hysterese. Diese lineare Beschreibung ist jedoch nur eine Vereinfachung und Verallgemeinerung realer Phänomene. Der Übergang zur oder von der Coulombschen Haftreibung stellt beispielsweise einen komplexen nichtlinearen Vorgang dar, so daß es in realen Systemen immer zu Abweichungen von der linearen, viskoelastischen Hysterese kommt. Obwohl mesoskopisches nichtlineares Materialverhalten durch Hysterese noch nicht gut verstanden ist [59-63], hat sich in der

Literatur eine phänomenologische Beschreibung einer nichtlinearen Hysterese etabliert [63][64], die in Abb. 10 skizziert ist.

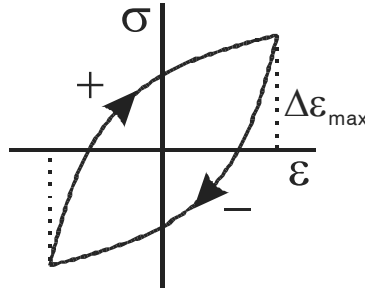


Abb. 10: Skizze der phänomenologischen Hysteresebeschreibung

Für die effektive dynamische elastische Kontante C_{gesamt} gilt

$$\text{Gl. 52} \quad C_{\text{gesamt}} = C^{\text{II}} - C_{\text{Hysterese}} [\Delta \varepsilon_{\text{max}} \pm \varepsilon].$$

Aus dieser Beschreibung läßt sich das harmonische Spektrum für eine monofrequente Anregung wie im Folgenden beschrieben bestimmen [58].

Mit der Anregungsfunktion $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t)$ ergibt sich für C_{gesamt}

$$\begin{aligned} \text{Gl. 53} \quad C_{\text{gesamt}} &= C^{\text{II}} - C_{\text{Hysterese}} \varepsilon_0 [1 \pm \sin(\omega t)] \equiv \\ &\equiv C^{\text{II}} - C_{\text{Hysterese}} \varepsilon_0 [1 + \text{sgn}(\dot{\varepsilon}) \sin(\omega t)] \equiv \\ &\equiv C^{\text{II}} - \underbrace{C_{\text{Hysterese}} \varepsilon_0 [1 + \text{sgn}(\cos(\omega t)) \sin(\omega t)]}_{\Delta C_{\text{Hysterese}}(t)}. \end{aligned}$$

Der hysteretische Anteil $\sigma_{\text{Hysterese}}$ der Spannung ergibt sich also zu

$$\begin{aligned} \text{Gl. 54} \quad \sigma_{\text{Hysterese}}(t) &= \Delta C_{\text{Hysterese}}(t) \cdot \varepsilon \equiv \\ &\equiv -C_{\text{Hysterese}} \varepsilon^2 \sin(\omega t) \cdot \underbrace{[1 + \text{sgn}(\cos(\omega t)) \sin(\omega t)]}_{\Delta_{\text{Hysterese}}} \equiv \\ &\equiv \underbrace{-C_{\text{Hysterese}} \varepsilon^2 \sin(\omega t)}_{\text{linearer Beitrag}} - \underbrace{C_{\text{Hysterese}} \varepsilon^2 \sin(\omega t) \cdot \Delta_{\text{Hysterese}}}_{\text{nichtlinearer Beitrag} \equiv \sigma_{\text{nichtlinear}}}. \end{aligned}$$

Nur der nichtlineare Anteil $\sigma_{\text{nichtlinear}}$ bestimmt das Spektrum der höheren Harmonischen, dessen Fouriertransformierte hierzu ermittelt werden muß. Zunächst ist die transzendente Signumfunktion $\text{sgn}(x)$ zu ersetzen: Mit dem Argument $\cos(\omega t)$ liefert diese Funktion eine Rechteckschwingung mit gleicher Periodizität ($\omega = 2\pi/T_0$), Amplitude und Phase. Diese läßt sich durch Faltung der Einheitsstufenfunktion

$\Pi(t/\tau)$ (Gl. 37) mit der periodischen Shah-Funktion $\text{III}(t/T)$ (Gl. 39) konstruieren, deren Fourierspektren bereits bekannt sind (Gl. 42 und Gl. 43). Hierzu multipliziert man zunächst $\Pi(t/\tau)$ mit 2 und ersetzt τ durch $T_0/2$:

$$\text{Gl. 55} \quad \mathfrak{F}\{2\Pi(t/(T_0/2))\} = T_0 \operatorname{sinc}\left(\frac{T_0 f}{2}\right).$$

Die Faltung nimmt daher diese Form an:

$$\text{Gl. 56} \quad 2\Pi(t/(T_0/2)) * \sum_{-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT_0) \equiv 2\Pi(t/(T_0/2)) * \frac{1}{T_0} \text{III}(t/T_0),$$

woraus mit Gl. 55, Gl. 43 und Gl. 41 folgt

$$\text{Gl. 57} \quad \frac{T_0}{T_0} \frac{\sin(\pi T_0 f / 2)}{\pi T_0 f / 2} \sum_{-\infty}^{+\infty} \delta(f - n/T_0) \equiv \sum_{-\infty}^{+\infty} \operatorname{sinc}(n/2) \delta(f - n/T_0).$$

Um mit der positiven Funktion $2\Pi(t/(T_0/2))$ (Wertebereich 0 bis 2) die Signumfunktion nachzubilden, muß sie durch die Subtraktion von 1 symmetrisch zur Nulllinie gemacht werden. Das Ergebnis der Faltung wird daher zu

$$\text{Gl. 58} \quad \sum_{-\infty}^{+\infty} \operatorname{sinc}(n/2) \delta(f - n/T_0) - \delta(f).$$

Das Spektrum der gesamten Funktion $\Delta_{\text{Hysterese}}$ (Gl. 54) enthält jedoch noch den harmonischen Anteil $\sin(\omega t)$, der auch berücksichtigt werden muß. Dies läßt sich durch Anwendung des Modulationstheorems der Form

$$\text{Gl. 59} \quad \mathfrak{F}\{v(t) \cdot \sin(\omega t)\} = \frac{1}{2i} \left[V\left(f + \frac{\omega_0}{2\pi}\right) - V\left(f - \frac{\omega_0}{2\pi}\right) \right], \quad \text{mit } V(t) = \mathfrak{F}\{v(t)\}$$

erreichen. Für die Fouriertransformierte von $\Delta_{\text{Hysterese}}$ (Gl. 54) ergibt sich hiermit

$$\text{Gl. 60} \quad \mathfrak{F}\{\Delta_{\text{Hysterese}}\} = \begin{cases} \frac{1}{2i} \sum_{-\infty}^{+\infty} \operatorname{sinc}\left(\frac{n}{2}\right) \delta\left(f - \frac{n-1}{T_0}\right) - \delta\left(f + \frac{1}{T_0}\right) \\ - \sum_{-\infty}^{+\infty} \operatorname{sinc}\left(\frac{n}{2}\right) \delta\left(f - \frac{n+1}{T_0}\right) - \delta\left(f - \frac{1}{T_0}\right) \end{cases}.$$

Die erneute Anwendung des Modulationstheorems liefert das gesuchte harmonische Spektrum der gesamten Funktion $\sigma_{\text{nichtlinear}}$ (Gl. 54):

$$Gl. 61 \quad \mathfrak{I} \left\{ \frac{\sigma_{\text{nichtlinear}}}{C_{\text{Hysterese}} \varepsilon_0} \right\} = \frac{1}{2i} \left[\mathfrak{I} \left\{ \Delta_{\text{Hysterese}} \left(f + \frac{\omega_0}{2\pi} \right) \right\} - \mathfrak{I} \left\{ \Delta_{\text{Hysterese}} \left(f - \frac{\omega_0}{2\pi} \right) \right\} \right] \equiv$$

$$Gl. 62 \quad \equiv -\frac{1}{4} \left[\begin{aligned} & \sum_{-\infty}^{+\infty} \text{sinc} \left(\frac{n}{2} \right) \delta \left(f - \frac{n-2}{T_0} \right) - \delta \left(f + \frac{2}{T_0} \right) - \sum_{-\infty}^{+\infty} \text{sinc} \left(\frac{n}{2} \right) \delta \left(f - \frac{n}{T_0} \right) + \delta(f) \\ & - \sum_{-\infty}^{+\infty} \text{sinc} \left(\frac{n}{2} \right) \delta \left(f - \frac{n}{T_0} \right) + \delta(f) + \underbrace{\sum_{-\infty}^{+\infty} \text{sinc} \left(\frac{n}{2} \right) \delta \left(f - \frac{n+2}{T_0} \right) - \delta \left(f - \frac{2}{T_0} \right)}_{=0 \text{ für } n=0} \end{aligned} \right].$$

Für positive $n = +a$ werden die Terme innerhalb der Summation zu

$$Gl. 63 \quad \begin{aligned} & \text{sinc} \left(\frac{a}{2} \right) \delta \left(f - \frac{a-2}{T_0} \right) - \text{sinc} \left(\frac{a}{2} \right) \delta \left(f - \frac{a}{T_0} \right) - \\ & \text{sinc} \left(\frac{a}{2} \right) \delta \left(f - \frac{a}{T_0} \right) + \text{sinc} \left(\frac{a}{2} \right) \delta \left(f - \frac{a+2}{T_0} \right) \end{aligned}$$

und für negative $n = -a$

$$Gl. 64 \quad \begin{aligned} & \text{sinc} \left(\frac{a}{2} \right) \delta \left(- \left(f + \frac{a+2}{T_0} \right) \right) - \text{sinc} \left(\frac{a}{2} \right) \delta \left(f + \frac{a}{T_0} \right) - \\ & \text{sinc} \left(\frac{a}{2} \right) \delta \left(f + \frac{a}{T_0} \right) + \text{sinc} \left(\frac{a}{2} \right) \delta \left(f + \frac{a-2}{T_0} \right) \end{aligned}$$

Die Summe von Gl. 63 und Gl. 64 ergibt:

$$Gl. 65 \quad \begin{aligned} & \text{sinc} \left(\frac{a}{2} \right) \left[\delta \left(f - \frac{a-2}{T_0} \right) + \delta \left(f + \frac{a-2}{T_0} \right) \right] + \left[\delta \left(f - \frac{a+2}{T_0} \right) + \delta \left(f + \frac{a+2}{T_0} \right) \right] \\ & - 2 \left[\delta \left(f - \frac{a}{T_0} \right) + \delta \left(f + \frac{a}{T_0} \right) \right] \end{aligned}$$

woraus mit $\delta(f + f_0) + \delta(f - f_0) = 2 \mathfrak{I} \{ \cos(2\pi f_0 t) \}$ folgt:

$$Gl. 66 \quad 2 \text{sinc} \left(\frac{a}{2} \right) \mathfrak{I} \left\{ \cos \left(\frac{2\pi(a-2)t}{T_0} \right) + \cos \left(\frac{2\pi(a+2)t}{T_0} \right) - 2 \cos \left(\frac{2\pi a t}{T_0} \right) \right\}.$$

Hiermit wird Gl. 62 zu

$$Gl. 67 \quad \mathfrak{I} \left\{ \frac{\sigma_{\text{nichtlinear}}}{C_{\text{Hysterese}} \varepsilon_0} \right\} = \left[\begin{aligned} & \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \text{sinc} \left(\frac{n}{2} \right) \mathfrak{I} \{ \cos(2\pi f_0 (n-2)t) + \\ & \cos(2\pi f_0 (n+2)t) - 2 \cos(2\pi f_0 n t) \} \end{aligned} \right].$$

Da die $\text{sinc}(n/2)$ nur für ungeradzahlige n Werte ungleich null liefert, können die Terme mit geradzahligem n unberücksichtigt bleiben. Dies geschieht durch Einführung eines neuen Summationsindex L mit $n=2L+1$:

$$\text{Gl. 68} \quad \mathfrak{I} \left\{ \frac{\sigma_{\text{nichtlinear}}}{C_{\text{Hysterese}} \varepsilon_0} \right\} = \left[\frac{1}{2} \sum_{L=0}^{\infty} \text{sinc} \left(\frac{2L+1}{2} \right) \mathfrak{I} \{ \cos(2\pi f_0(2L-1)t) + \right. \\ \left. \cos(2\pi f_0(2L+3)t) - 2 \cos(2\pi f_0(2L+1)t) \} \right].$$

Es ist erkennen, daß sich die Argumente der drei Kosinus-Funktionen nur durch verschiedene Werte von L unterscheiden. Sie lassen sich also zusammenfassen, wenn entsprechende Koeffizienten für drei gleiche Kosinus-Argumente gefunden werden können. Hierzu sind die Indices der beiden ersten Terme durch $2L-1=2m+1$ und $2L+3=2k+1$ zu ersetzen. Die Summe in Gl. 68 wird hiermit zu

$$\text{Gl. 69} \quad \left[\sum_{m=-1}^{\infty} \text{sinc} \left(\frac{2m+3}{2} \right) \mathfrak{I} \{ \cos(2\pi f_0(2m+1)t) \} \right] + \\ \left[\sum_{k=1}^{\infty} \text{sinc} \left(\frac{2k-1}{2} \right) \mathfrak{I} \{ \cos(2\pi f_0(2k+1)t) \} \right] + \\ \left[\sum_{L=0}^{\infty} \text{sinc} \left(\frac{2L+1}{2} \right) \mathfrak{I} \{ -2 \cos(2\pi f_0(2L+1)t) \} \right].$$

Faßt man alle Summationsindices m, k, L zu N zusammen, so ergibt sich für die zeitabhängige Spannung $\sigma_{\text{nichtlinear}}$

$$\text{Gl. 70} \quad \sigma_{\text{nichtlinear}}(t) = \sum_{N=0}^{\infty} a_N \cos(2\pi f_0(2N+1)t)$$

mit

$$\text{Gl. 71} \quad a_N = \frac{C_{\text{Hysterese}} \varepsilon_0^2}{2} \cdot \left[\text{sinc} \left(\frac{2N+3}{2} \right) - 2 \text{sinc} \left(\frac{2N+1}{2} \right) + \text{sinc} \left(\frac{2N-1}{2} \right) \right].$$

Das Spektrum der Funktion $\sigma_{\text{nichtlinear}}$ besteht also aus einer Summe harmonischer Funktionen (Gl. 70) deren Amplituden a_N durch Gl. 71 gegeben sind.

Ein Beispielspektrum der Harmonischen für $C_{\text{Hysterese}}/\varepsilon_0=0,1$ ist in Abb. 11 dargestellt.

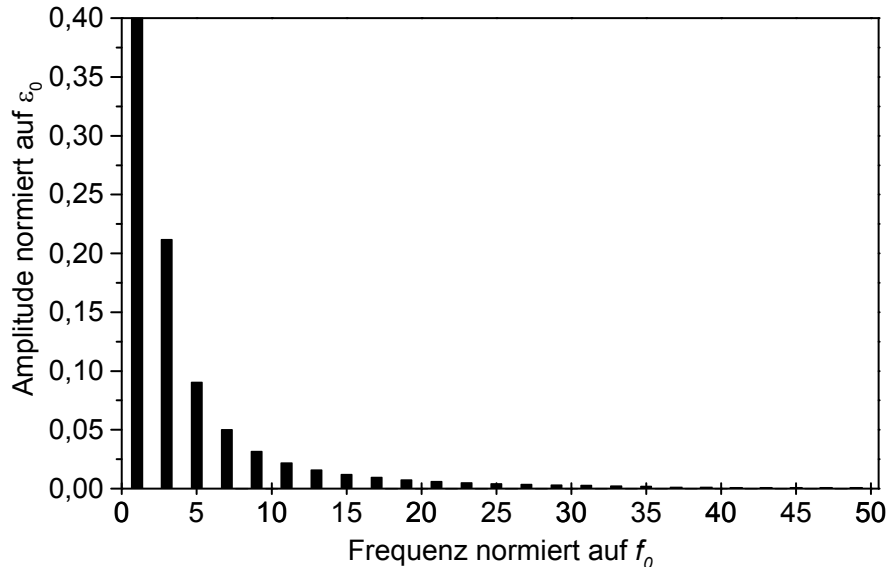


Abb. 11: Amplitudenspektrum der Harmonischen für $C_{\text{Hysterese}}/\varepsilon_0=0,1$

Das Spektrum besitzt einen nahezu monotonen Abfall zu hohen Frequenzen, und es treten nur Harmonische ungeradzahligter Ordnung auf, wie es für die Verzerrung durch eine symmetrische Hysterese zu erwarten ist.

Ein endlich ausgedehnter hysteretischer Bereich erzeugt aber durch Intermodulation (siehe Abschnitt 2.2) auch geradzahlig Partialtöne, was in dieser Betrachtung unberücksichtigt bleibt.

3. Ausnutzung der nichtlinearen Bauteilantwort zur Defekterkennung

3.1. Anregungsmöglichkeiten

Wenn eine elastische Welle genügend hoher Intensität in das Bauteil eingekoppelt wird, reagieren potentielle Defekte durch nichtlineares Verhalten. Hierbei muß berücksichtigt werden, daß sich die akustische Impedanz technischer Werkstoffe wie Metalle, Faserverbundwerkstoffe oder Keramik von Luft um einige Größenordnungen (ca. Faktor 10^4 bis 10^5) unterscheidet [65]. Eine Anregung durch Luftschall ist somit sehr ineffizient, da der größte Teil der Schallenergie an der Bauteiloberfläche reflektiert wird. Erfolgversprechender ist es, eine Kontaktankopplung zur direkten Schalleinleitung zu verwenden.

Ein anderer wichtiger Aspekt ist die Wahl der Anregungsfrequenz. Herkömmliche Ultraschallsender für Wasser- oder Kontaktankopplung arbeiten im Frequenzbereich von etwa 0,5 bis 20 MHz. In den meisten Materialien ist bei diesen Frequenzen bereits ein erheblicher Einfluß der Dämpfung zu erwarten. Da man aber eine möglichst gleichmäßig über das Bauteil verteilte Schallenergie erzielen möchte, ist Dämpfung ein Nachteil: Die Detektionsempfindlichkeit nähme mit wachsendem Abstand zur Schallquelle ab. Die Nichtlinearität der Dämpfungsmechanismen (Hysterese) führt außerdem zu einem störenden Hintergrundsignal.

Die Effizienz der Erzeugung höherer Harmonischer hängt stark von der Amplitude der Anregung ab. Um bei gegebener Energie E oder Schallschnelle v eine möglichst hohe Amplitude \hat{y} zu erzielen, muß wegen

$$\text{Gl. 72} \quad E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m(\hat{y}f)^2 \Rightarrow \hat{y} \sim \sqrt{E}/f$$

die Frequenz f reduziert werden.

Für Transversalwellen, die aufgrund ihres geringeren Wellenwiderstandes durch die größeren Amplituden besser zur Anregung geeignet sind, muß die Wellenlänge etwa in der gleichen Größenordnung wie der Schaden selbst sein. Eine zu große Wellenlänge würde nämlich kaum noch eine Relativbewegung der beiden Defektgrenzflächen verursachen, weil die Spannungsgradienten zu klein wären sie

zu öffnen oder gegeneinander reiben; für den gleichen Anteil an Harmonischen müßte die Anregung erheblich größere Amplituden aufweisen,. Dieser Zusammenhang ist vereinfacht in Abb. 12 dargestellt: im linken Bildteil entspricht die Ablösung etwa der halben Wellenlänge und wird durch die Biegung angeregt bzw. geöffnet; für die doppelte Wellenlänge (rechter Bildteil) ist die Defektanregung deutlich geringer.

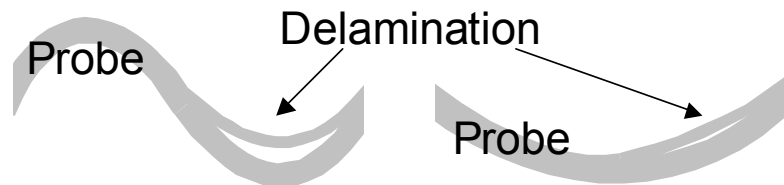


Abb. 12: Vereinfachte Darstellung der Defektanregung bei verschiedenen Wellenlängen

Für Longitudinalwellen, die senkrecht auf die Grenzflächen auftreffen, gilt diese Einschränkung allerdings nicht; sogar ein quasistatischer Nachweis ist möglich, da z.B. eine Enthaftung durch ihre geringere Zugfestigkeit in Normalrichtung auch statisch nachweisbar ist. Abb. 13 zeigt die Defektwechselwirkung mit einer ebenen Welle für verschiedene Relationen zwischen Defektgröße und Wellenlänge. Der Pfeil markiert die Ausbreitungsrichtung.

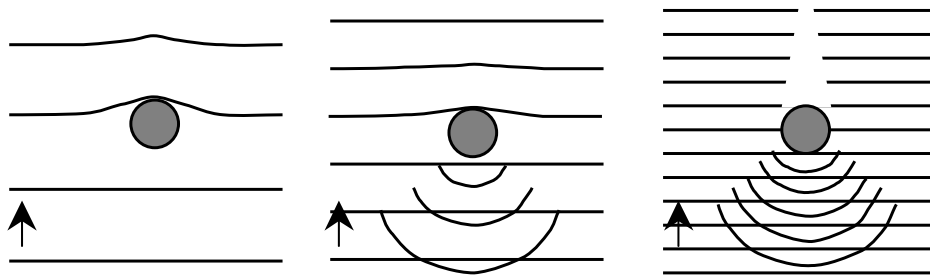


Abb. 13: Lineare Wechselwirkungen für verschiedene Defekt-Wellenlängenverhältnisse

Für sehr große Wellenlängen bezogen auf die Defektmaße (Abb. 13 links) sind vorwiegend Beugungseffekte zu beobachten: Der Defekt beeinflusst das Schallfeld kaum. Ist die Diskontinuität in der selben Größenordnung wie die Wellenlänge, so kommt es zusätzlich zu Reflexionen an der Grenzfläche (Abb. 13 Mitte). Erst bei sehr kleinen Wellenlängen wird der Schall hinter der Störung abgeschattet, da die Beugungseffekte zu gering sind, um den Schall um das Objekt „herumzuführen“ (Abb. 13 rechts).

Bei der Beschallung eines Bauteils sind stehende Wellen problematisch. Dieser stationäre Schwingungszustand (freie Randbedingungen) legt nämlich ein Intensitätsprofil $I(x)$ der Form

Gl. 73
$$I(x) \sim \cos^2(n \cdot \pi x / L) \text{ mit } n \in N$$

über die Probe der Länge L . In den Intensitätsmaxima besteht eine gute Detektionsempfindlichkeit, während die Nullstellen (Schwingungsknoten) kein Signal liefern können.

Deshalb sollten keine Eigenzustände angeregt werden und das Schallfeld möglichst diffus sein, also an jedem Ort der Probe Schall mit der gleichen Intensität und ohne Vorzugsrichtung vorliegen. Eine häufige Konversion der Wellenmoden ist daher erwünscht und kann durch geeignete Anregung begünstigt werden. Der hohe Grenzflächenanteil von Faserverbundwerkstoffen ist unter diesem Aspekt besonders vorteilhaft.

Im Folgenden sollen zwei Anregungsverfahren beschrieben werden, die zur Anregung defektinduzierter Nichtlinearitäten geeignet sind.

3.1.1. Schweiß-Ultraschallgeneratoren

In der Kunststoffverbindungstechnik hat sich seit langem das „Ultraschallschweißen“ als schnelles und zuverlässiges Mittel etabliert. Hierzu wird in die zu verbindenden Komponenten Ultraschall hoher Leistung eingebracht, während die Teile aneinandergedrückt werden. Durch die Grenzflächenreibung, die durch die elastischen Wellen hoher Energie hervorgerufen wird, erhitzt sich die Kontaktfläche so stark, daß die beiden thermoplastischen Teile miteinander verschmelzen.

Zur Schallerzeugung wird bei diesen Geräten ein piezokeramischer Stapelaktor (Konverter) verwendet, der zusammen mit dem sogenannten „Horn“ bzw. „Sonotrode“ (Abb. 14) die Resonanzfrequenz des gesamten Schwingers bestimmt. Abb. 15 rechts zeigt den in dieser Arbeit verwendeten Konverter mit Stufenhorn. Das Horn (Akustik-Transformator) dient hierbei der Impedanzwandlung, um die sehr hohe akustische Impedanz der Piezokeramik der des Bauteils anzupassen bzw. die Amplitude zu erhöhen. Aus Energieerhaltungsgründen entspricht die Amplitudenzunahme dem umgekehrten Flächenverhältnis der beiden Hornenden. Er besteht deshalb aus einem sich nach vorn verjüngenden Titanzylinder (Abb. 14 [66]), wobei die Form das innere Reflektionsverhalten und damit die Rückwirkung auf den Piezostack bestimmt. Dies äußert sich durch verschiedene Übertragungsfunktionen, da das resonante System verändert wird. Die Horngeometrie sollte also nach der jeweiligen Anwendung gewählt werden, wobei die exponentielle Verjüngung die häufigste Bauform („Exponentialhorn“) darstellt.

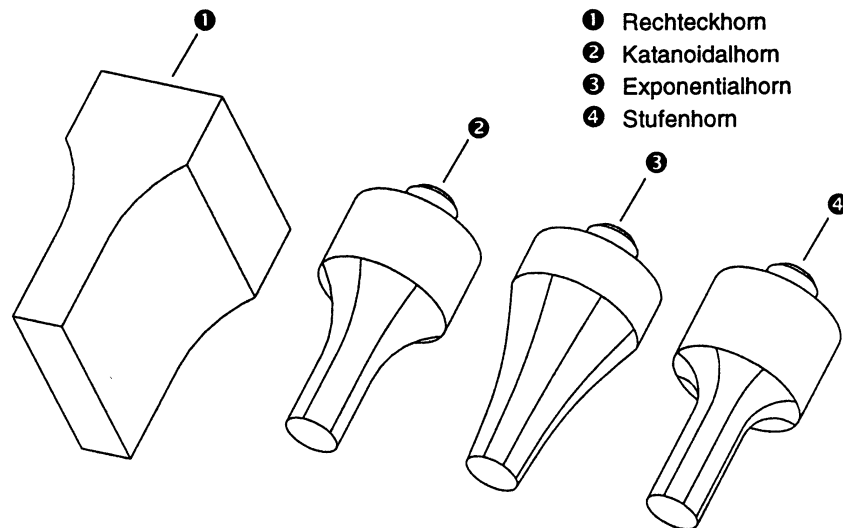


Abb. 14: Technisch gebräuchliche Hornarten zur Impedanzanpassung

Piezokeramiken stellen jedoch aufgrund ihres hohen Imaginärteils der Impedanz eine problematische Last für herkömmliche gegengekoppelte Transistorverstärker dar. Die starke Phasendrehung der Last kann nämlich aus der verstärkungs- und verzerrungsverringernenden Gegenkopplung eine Mitkopplung machen, die die Verstärkung drastisch erhöht und damit den Verstärker destabilisiert bzw. überlastet. Ein weiteres Problem ist der große Unterschied zwischen der elektrischen Impedanz der hochohmigen Keramik und dem niederohmigen Verstärkerausgang, die insbesondere bei hohen Frequenzen zu sehr hohen reflektierten Energien führt, welche im Extremfall die Ausgangstransistoren zerstören können. Daher werden in vielen heute kommerziell erhältlichen Piezoverstärkern/Generatoren keine analogen Verstärker mehr eingesetzt. Statt dessen kommen sogenannte „Class-D, oder -H“ Endverstärker zum Einsatz, welche eher als „digitale Verstärker“ bezeichnet werden können. Das analoge Ausgangssignal wird hierbei durch einen Pulsweiten- oder Pulsdichtemodulator erzeugt, dessen Signal zur Wellenformrekonstruktion tiefpaßgefiltert wird. Ist das „Oversamplingverhältnis“ zwischen der Signalfrequenz f_{Signal} und der Abtastrate f_S groß genug, so kann auf eine Gegenkopplung verzichtet werden, um einen hinreichend großen Störsignalabstand (THD+N) zu erzielen. Diese Eigenschaft verhindert Instabilitäten auch bei großen Phasenunterschieden zwischen Strom und Spannung.



Abb. 15: *Prinzipbild (links) und Foto (rechts) eines Ultraschallkonverters*

Bei magnetostriktiven Wandlern wären zwar die akustischen und auch die elektrischen Impedanzen deutlich niedriger, es treten jedoch mit steigender Frequenz hohe elektrische Verluste auf, die durch die mit Piezokeramiken verglichen große Hysterese verursacht werden [67].

Um trotz variierender Einkopplungsparameter ein konstant gutes Verschweißungsergebnis zu erzielen, sind die Ultraschallschweißgeräte amplitudenstabilisiert. Dies wird durch eine Frequenzregelung (Phase Locked Loop) erreicht, die trotz differierenden Anpreßdruckes für einen resonanten Betrieb des Konverters sorgt. Eine stabile Anregungsfrequenz ist jedoch Voraussetzung für die Detektion defektinduzierter Nichtlinearitäten. Der Frequenzregelkreis eines Generators muß also entweder deaktiviert oder der Regelbereich soweit eingeschränkt werden, daß der spektrale Leckeffekt der Diskreten Fourier-Transformation ausreicht, um dieses Frequenzband mit einer Linie abzudecken. Der spektrale Leckeffekt hängt hierbei im Wesentlichen von der Wahl des Zeitfensters ab (vgl. Abschnitt 2.3, Seite 33).

Abb. 16 zeigt den an die Probe angepreßten Ultraschallkonverter und das Prinzipbild des Aufbaus mit der erwarteten Schallausbreitung. Für die in dieser Arbeit vorgestellten experimentellen Ergebnisse wurde im nichtresonanten Zustand der Probe eine sehr geringe Amplitudeninhomogenität festgestellt (vgl. Abb. 39 und Abb. 43 links), was auf ein diffuses Wellenfeld ohne Vorzugsrichtung schließen läßt. Für die feste Anregungsfrequenz von 20 kHz lagen die gemessenen Wellenlängen in den Proben bei wenigen Zentimetern.

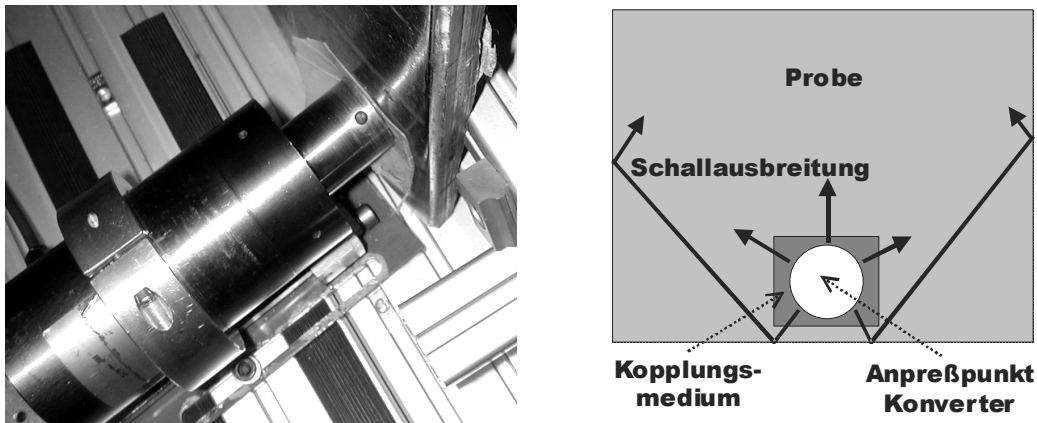


Abb. 16: Foto des Versuchsaufbaus (links), Prinzipskizze der Schalleinleitung (rechts)

Ein weiteres Problem ergibt sich aus dem Anpressen des Konverters (mit oder ohne Sonotrode bzw. Booster) an das Bauteil. Bei geringen Anpreßdrücken verhält sich auch diese akustische Verbindung wie ein mechanischer Gleichrichter: Zugkräfte werden nur bis zur Anpreßkraft übertragen, aber Schubkräfte unbegrenzt. Die Anpreßkraft ist jedoch durch die Bauteileigenschaften eingeschränkt, da die Oberfläche der Probe bei einem zu hohen Druck beschädigt werden könnte.

Ein Ausweg ist die Verwendung eines weichen Koppelmediums, das sich der Oberflächenrauigkeit und -kontur des Bauteils anpaßt und dadurch Druckspitzen vermeidet. In vielen Fällen hat es sich zudem als günstig erwiesen, das Koppelmedium adhäsiv zu befestigen, was das Übertragungsverhalten von Zugkräften nochmals verbessert. Robuste handelsübliche PVC-Klebebänder sind hierzu verwendbar und lassen sich sogar rückstandsfrei wieder entfernen. Folie aus Silikongummi, die sich in verschiedenen Dicken problemlos selber herstellen läßt, ist ebenfalls gut geeignet. Da dieses Material für orthopädische Anwendungen nahezu keine Trennmittel enthält, wird es wegen der optimalen Oberflächenanpassung durch Adhäsion und den Luftdruck festgehalten und benötigt daher keine weiteren Klebstoffe.

3.1.2. Integrierte oder applizierte Aktorik

Im Unterschied zu den angepreßten Schweiß-Ultraschallgeneratoren ist es auch möglich, eine piezokeramische Aktorik fest mit dem Bauteil zu verbinden. Es entsteht ein „Aktives Werkstoffsystem“ [68] (siehe Abschnitt 4.3). Dies hat den Vorteil einer sehr effizienten Einkopplung elastischer Wellen in das Bauteil. Durch eine feste Verklebung werden auch Zugkräfte mit hoher Amplitude übertragen, was eine hohe Linearität dieser mechanischen Verbindung gewährleistet. Bei oberflächlich

applizierten und auch bei den integrierten Aktoren werden sehr dünne (50-500 μm) Plättchen aus piezokeramischen Material verwendet, um bei fester angelegter Spannung eine möglichst hohe elektrische Feldstärke im Material zu erzeugen. Im Gegensatz zu den Stapelaktoren des vorhergehenden Abschnitts nutzt man jedoch nicht die Deformation in Richtung des elektrischen Feldes (Dickenänderung), sondern die in der senkrecht zum E-Feld liegende Ebene (Flächendehnung). Bei einer oberflächlichen Positionierung des Aktors wird somit im Bauteil eine Verbiegung initiiert, die bei harmonischer Anregung eine asymmetrische Lambwelle erzeugt (Abb. 17).

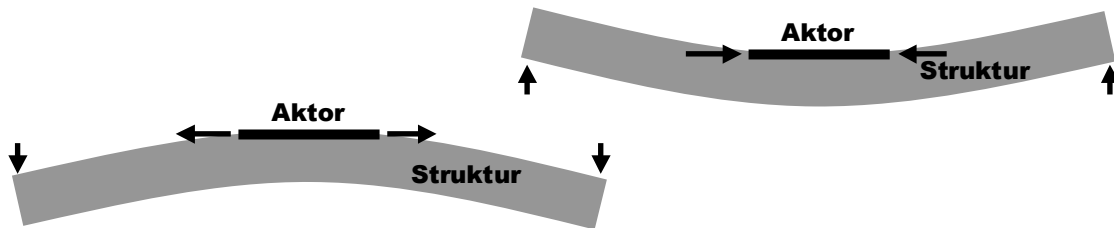


Abb. 17: Strukturverformung durch oberflächlich applizierte Aktorik. Schub links, Zug rechts

Diese Wellenart ist aufgrund der großen Amplituden besonders gut zur Anregung lokaler Defektnichtlinearität geeignet. Für die Phasengeschwindigkeit gilt näherungsweise für dünne Platten und niedrige Frequenzen:

$$\text{Gl. 74} \quad v_{Lamb} \approx \sqrt{2\omega d} \sqrt[4]{\frac{E}{3\rho(1-\nu_0^2)}}$$

mit dem Elastizitätsmodul E , der Massendichte ρ , der Probendicke d sowie der Poissonzahl ν_0 , die durch das Verhältnis der transversalen Schallgeschwindigkeit (v_t) zur longitudinalen (v_l) definiert werden kann:

$$\text{Gl. 75} \quad v_t/v_l = \sqrt{(1-2\nu_0)/(2-2\nu_0)}.$$

Die Phasengeschwindigkeit der asymmetrischen Lambwellen ist also für dünne Platten und niedrige Frequenzen kleiner als bei reinen Longitudinalwellen, deren Phasengeschwindigkeit v_l durch

$$\text{Gl. 76} \quad v_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

gegeben ist. Die bei Biegewellen entsprechend niedrigere Impedanz erhöht bei gleicher Anregungsenergie die Schwingungsamplituden und verringert die Wellenlänge, was defektbedingte Grenzflächen effektiver zu einer nichtlinearen Interakti-

on anregt, da die auf die Defektgrenzflächen wirkenden Kräfte vergrößert werden (vgl. Abb. 12). Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit, den Schwellwert nichtlinearen Verhaltens für möglichst viele bewegliche Grenzflächen zu überschreiten

Ein weiterer Vorteil der Verwendung von Aktoren unter Ausnutzung der Flächendehnung statt der Dickenänderung ist die einfache Möglichkeit einer Pseudo-Impedanzanpassung durch die Wahl der Dicke des Piezoplättchens, da bei gleicher Anregungsspannung ein dünner Aktor zwar eine (wegen der erhöhten Feldstärke) größere Amplitude, jedoch auch eine verringerte Aktorsperrkraft aufweist. Für vorgegebene Betriebszustände kann also der mechanische Impedanzunterschied zwischen Aktor und Substrat minimiert und damit der Energietransfer maximiert werden. Durch die gute mechanische Verbindung werden zudem die Resonanzen der Aktorik selbst stark unterdrückt und treten gegenüber den Eigenzuständen der Gesamtstruktur in den Hintergrund. Im Gegensatz zu den stark resonanten Piezostacks der Schweiß-Ultraschallkonverter, die einen effizienten Betrieb bei nur diesen Frequenzen zulassen, kann eine integrierte oder flach applizierte Aktorik über ein breites Frequenzband betrieben werden.

Die Verklebung muß auf das Material von Aktor und Struktur abgestimmt werden. Für Faserverbundwerkstoffe mit duromerischer Epoxydharzmatrix ist es beispielsweise günstig, ebenfalls Epoxydharz als Klebstoff zu verwenden, um die Anzahl der Impedanzsprünge zu reduzieren und eine optimale Adhäsion zu gewährleisten. Der Nachteil ist, daß eine solche Klebeverbindung praktisch nicht mehr zerstörungsfrei zu entfernen ist. Klebeverbindungen mit thermoplastischen Materialien (wie handelsüblichem Heißkleber) sind jedoch aufgrund des deutlich verschlechterten akustischen Übertragungsverhaltens keine Alternative. Hartwachs aus der Umform- oder Dentaltechnik können aber in manchen Anwendungen sinnvoll sein [69].

Die Integration von Aktoren in den Werkstoff selbst ist praktisch nur bei Kunststoffen bzw. Faserverbundstrukturen sinnvoll, da die Verarbeitungstemperaturen noch unter der Curietemperatur der Piezokeramiken liegen. Für nichtmetallische Werkstoffe kann zudem die Polarisierung der Kristallstruktur auch nach dem Einbetten durch Erwärmung über die Curietemperatur in einem starken elektrischen Feld vorgenommen werden.

3.2. Einfluß der spektralen Bandbreite des Anregungssignals

Die Anregung für nichtlineares Materialverhalten muß folgende Bedingungen erfüllen: Eine bestimmte Schwellwertamplitude ist zu überschreiten, damit zwei Grenzflächen miteinander interagieren können. Die in die Probe eingebrachte Energie sollte aber trotzdem möglichst gering bleiben, damit keine zusätzliche Schädigung durch die Prüfung selbst verursacht wird. Es ist also wichtig, ein Signal mit hohen Amplituden zu wählen, dessen Effektivwert U_{eff} (RMS) dabei trotzdem so gering wie möglich ist. Beschrieben wird diese Eigenschaft durch den sogenannten „Crest-Faktor“ C , der definiert ist durch

$$Gl. 77 \quad C = \frac{U_{SS}}{2U_{eff}}.$$

Der Crest-Faktor sollte also maximiert werden, um bei gegebener Anregungsleistung eine möglichst hohe Amplitude zu erzielen. Dieses Prinzip wird auch bei der gepulsten Übertragung von Mikrowellen in der Mobilkommunikation angewandt, um trotz geringer mittlerer Leistung (ca. 2 W) durch hohe Impulsleistung große Reichweiten zu erzielen.

Ein Signal muß allerdings eine Bandbegrenzung aufweisen, da sich sonst die Spektren der einzelnen Harmonischen überlagern würden und keine getrennte Bestimmung der Amplituden mehr möglich wäre. Die Bandbreite darf also die Frequenzdifferenz zweier Partialtöne nicht überschreiten.

Ein weiterer Vorteil der Anregung mit einem Frequenzband statt einer Einzelfrequenz liegt im Verhalten bei Resonanzen: Regt man monofrequent bei einer Eigenfrequenz an, so bildet sich ein Feld stehender Wellen aus, das ein Empfindlichkeitsraster auf die Probe projiziert (siehe Gl. 73). Eine Resonanz hat zwar den Vorteil großer Anregungsamplituden, ist aber durch die lokal stark herabgesetzte Empfindlichkeit nicht für Messungen verwendbar. Regt man allerdings in einem Frequenzband um die Eigenfrequenz herum an, so wird dem stehenden Wellenfeld ein laufendes überlagert, und auch an Knotenlinien ist eine Defektanregung gewährleistet. Die Verwendung statistischer Signale (z.B. schmalbandiges Rauschen) kann nützlich sein, da durch die geringe Kohärenz (Autokorrelation geht mit wachsender Bandbreite gegen 0) die Anregung harmonischer Schwingungen konstanter Phase stark unterdrückt wird.

Im Folgenden werden drei verschiedene digital generierte Signalarten auf ihre Eignung für die Anregung von Nichtlinearitäten untersucht:

- sinusartige, monofrequente Anregung ($C = \sqrt{2}$, $5 V_{\text{eff}}$),
- frequenzmodulierte Anregung (Modulationstiefe 20 %, $C = \sqrt{2}$, $5 V_{\text{eff}}$),
- Terzbandrauschen ($C = 5$, $5 V_{\text{eff}}$).

Abb. 18 zeigt jeweils einen Ausschnitt des zeitlichen Verlaufs der drei Anregungssignale, wobei der Effektivwert durch eine horizontale Linie gekennzeichnet ist. Zu beachten ist, daß das Rauschsignal deutliche Spitzen oberhalb des Effektivwertes und höhere Amplituden als die der Sinussignale aufweist.

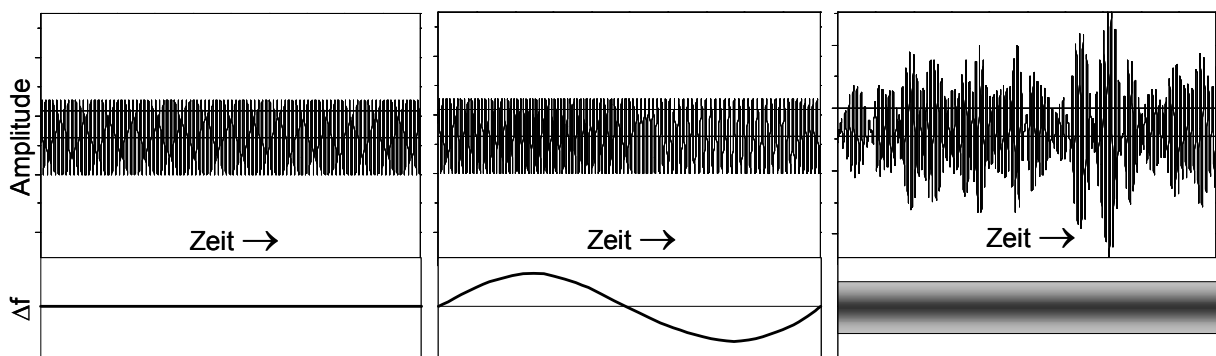


Abb. 18: Signalformen Sinus (links), frequenzmoduliert (Mitte), Rauschen (rechts)

Die korrespondierenden Spektren machen ebenfalls deutliche Unterschiede der Signale sichtbar. Das sinusförmige Signal zeigt erwartungsgemäß nur eine Linie im Spektrum und besitzt daher auch die höchste spektrale Energiedichte. Bei den breitbandigen Signalen ist die Energie auf ein Spektrum von etwa 40 % (20 % frequenzmoduliertes Signal) und auf ca. 24 % (\approx große Terz) für das Terzbandrauschen verteilt. Um in der Wahl der Anregungsfrequenz möglichst flexibel zu sein, fiel die Wahl auf eine Probe mit integrierter Aktorik, die eine Delamination als Schaden aufweist (Beschreibung siehe Abschnitt 4.3.1). Für die folgenden Untersuchungen wurde eine Resonanz der Delamination bei ca. 50 kHz ausgenutzt (Abb. 21). Abb. 19 zeigt den schematischen Versuchsaufbau.

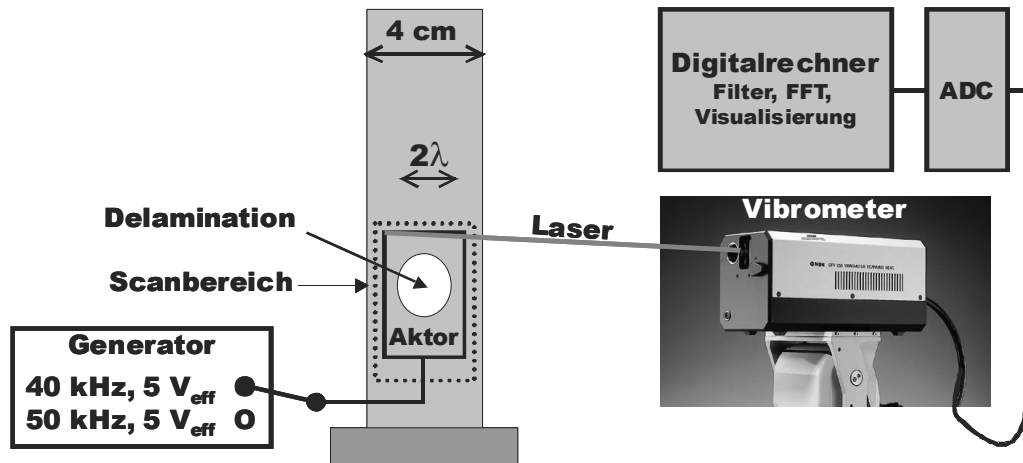


Abb. 19: Versuchsaufbau zum Vergleich verschiedener Anregungssignale

Die Anregungsleistung war so gering, daß bei monofrequenter Anregung lediglich Teile der Delamination dieser Probe nichtlinear interagierten, damit man anhand der Größe des nichtlinearen Bereichs die Effizienz der verschiedenen Anregungsformen vergleichen kann. Eine gleichmäßige Verteilung höherer Harmonischer über die Gesamtfläche des Schadens entspräche dem Idealerweise.

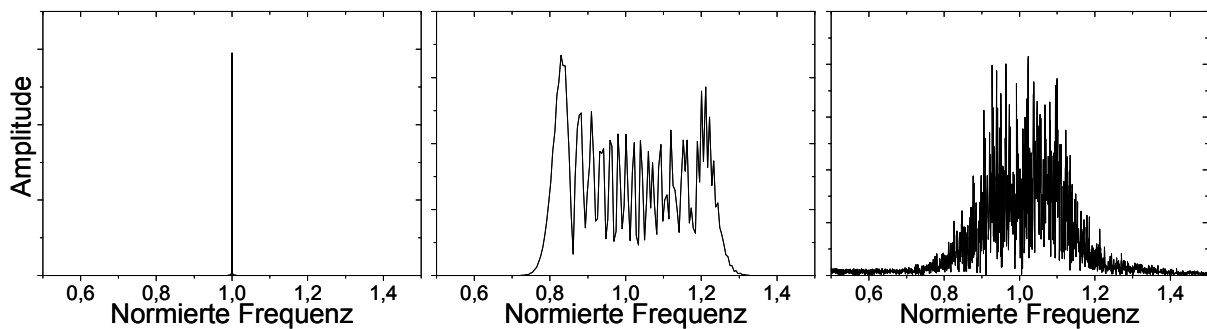


Abb. 20: Anregungsspektren Sinus (links), frequenzmoduliert (Mitte), Rauschen (rechts)

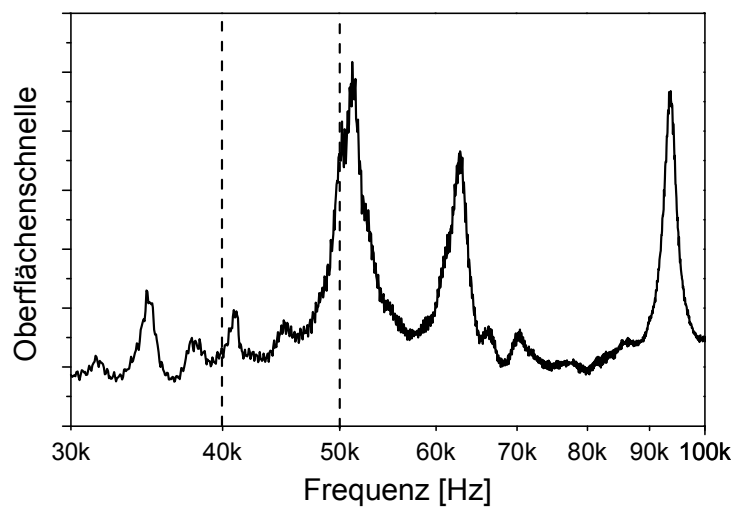


Abb. 21: Schnellespektrum auf Aktoroberfläche

3.2.1. Vergleich im nichtresonanten Zustand

Um die Ergebnisse der verschiedenen Anregungsarten im nichtresonanten Zustand miteinander zu vergleichen, wurde eine Anregungsfrequenz von 40 kHz gewählt, die nach Abb. 21 keinem Eigenzustand entspricht.

In den folgenden Abbildungen ist der Effektivwert der Oberflächenschnelle über die Bandbreite jeweils einer Harmonischen dargestellt. Die Graustufenkodierung ist zur besseren Vergleichbarkeit innerhalb einer Abbildung identisch.

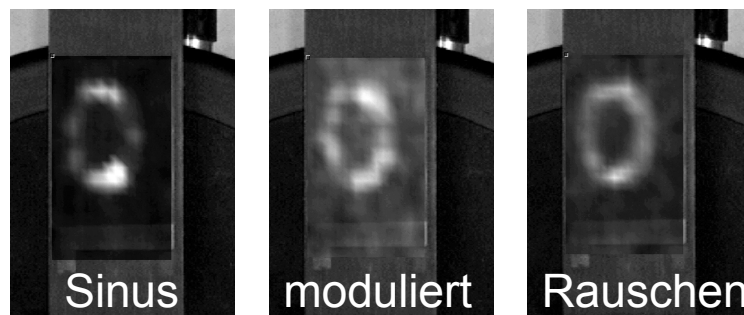


Abb. 22: Amplitudenbilder der 2. Harmonischen (80 kHz) (Skizze des Meßaufbaus in Abb. 19)

Die Effektivwerte der zweiten Harmonischen sind in Abb. 22 gegenübergestellt. Von der Delamination ist allerdings nur der Rand sichtbar, da die Anregungsamplitude nicht ausreichte, um die gesamte Fläche in Kontakt zu bringen. Die sinusförmige Anregung bietet zwar das beste Signal/Rausch-Verhältnis, es können aber nicht über den gesamten Defektrand höhere Harmonische angeregt werden, da die Amplitude zu gering ist. Die modulierte Anregung weist hier einen größeren nicht-linearen Bereich bei der Defektabbildung auf, jedoch mit stark erhöhtem Hintergrundsignal. Das beste Ergebnis bei kaum reduziertem Signal/Rauschabstand zeigt die mit Terzbandrauschen ermittelte zweite Harmonische: Der gesamte Defektrand ist sichtbar.

Bei der dritten Harmonischen ermöglicht nur die Rauschanregung aufgrund ihrer hohen Amplitudenspitzen (hoher Crestfaktor) die Detektion der Delamination. Die beiden anderen Anregungssignale sind nahezu nicht in der Lage, nichtlineares Verhalten zu initiieren (Abb. 23).

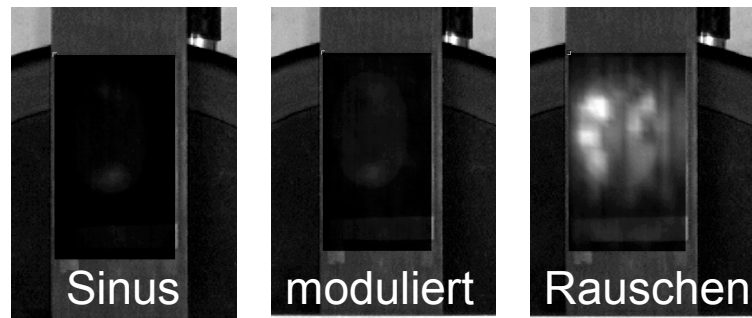


Abb. 23: *Amplitudenbilder der 3. Harmonischen (120 kHz)*

3.2.2. Vergleich im resonanten Zustand

Die großen Amplituden einer Resonanz wären zur Anregung von Nichtlinearitäten nützlich, die stationären Minima (Schwingungsknoten) verhindern jedoch ihre Anwendung.

Erwartungsgemäß zeigt das Bild der zweiten Harmonischen (100 kHz, Abb. 24) für die Sinusanregung Minima und Maxima, die ringförmig aufgereiht sind. Diese Struktur ist bei den breitbandigen Signalen unterdrückt, wobei das modulierte Signal nur einen schwachen Kontrast aufweist. Durch die geringere spektrale Energiedichte dieses Signals liegt ein offenbar zu großer Teil der Leistung außerhalb der Linienbreite der Resonanz. Die Rauschanregung zeigt ein seitlich inhomogenes Bild bei sehr gutem Kontrast. Durch die höhere Anregungsamplitude ist der Bereich nichtlinearen Verhaltens ausgedehnter, also der Ring der Delamination nach innen verbreitert.

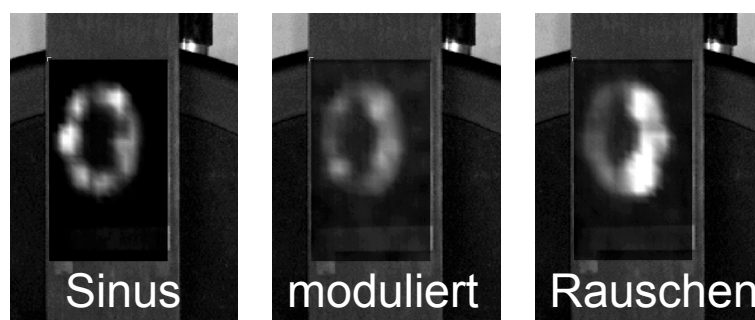


Abb. 24: *Amplitudenbilder der 2. Harmonischen (100 kHz)*

Im Amplitudenbild der dritten Harmonischen (Abb. 25) zeigt das Sinussignal im Gegensatz zur breitbandigen Anregung ebenfalls eine modale Struktur. Die Frequenzmodulation hat auch hier den geringsten Kontrast. Die flächenmäßig beste Detektion liefert die Rauschanregung, trotz des reduzierten Kontrastes bei noch gutem Signal/Rauschabstand.

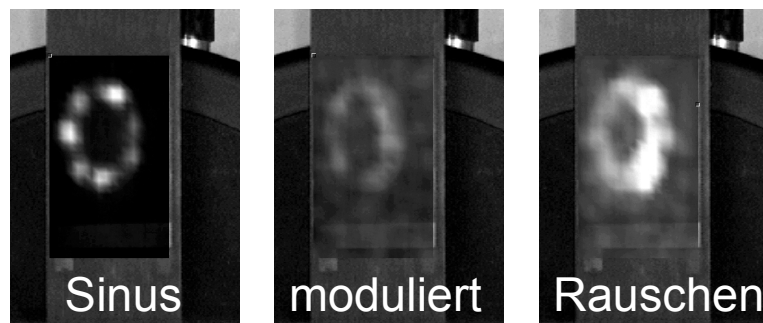


Abb. 25: *Amplitudenbilder der 3. Harmonischen (150 kHz)*

Die Verwendung breitbandiger Signale ist für die Anregung nichtlinearen Verhaltens gut und in einigen Fällen sogar besser geeignet als eine sinusförmige. Die Unterschiede zwischen Maxima und Minima der Moden werden verringert, was zu einer homogenen Abbildung führt. Der Nachteil eines geringeren Kontrastes kann durch einen höheren Crest-Faktor nahezu ausgeglichen werden.

Da der in den Beispielen aus Abschnitt 4 verwendete Schweiß-Ultraschallgenerator nicht die erforderliche Bandbreite zur Modulation bot, mußte hier eine monofrequente Anregung (20 kHz) benutzt werden, die aber in keinem Fall einer Probeneigenfrequenz entsprach.

3.3. Methoden zur Detektion

Die breitbandige Detektion des Schwingungsspektrums ist Voraussetzung für die Nutzung nichtlinearen Materialverhaltens zur Schadenserkennung. Die Vibration der Probenoberfläche sollte kontaktfrei analysiert werden, um Beeinflussungen durch die Messung auszuschließen. Möglich ist dies entweder direkt durch ein Laser-Doppler-Vibrometer oder auch indirekt durch Bestimmung des Schalldrucks, der durch die Oberflächenbewegung hervorgerufen wird.

3.3.1. *Integrale und lokale Detektion*

Die Erkennung nichtlinearen Verhaltens kann sowohl ortsunabhängig (integral) als auch lokal (zur Bildgebung) geschehen. Die integrale Methode hat den Vorteil, daß ein zeitaufwendiges Abrastern der Probe vermieden wird und dadurch schnelle Produktionsabläufe nicht gestört werden. Erst wenn die Lage, die Größe oder die Art des Defektes eine Rolle spielen, ist eine ortsaufgelöste Messung erforderlich.

Die integrale, also über die Probe mittelnde Messung ist jedoch in vielen Fällen durch Mechanismen erschwert, die die Ausbreitung höher Harmonischer in

die gesamte Probe behindern, welche aber andererseits eine abbildende Darstellung von Nichtlinearitäten erst ermöglichen.

Da dieses Verhalten von den Defekt- und Materialeigenschaften abhängt, ist hierfür keine generelle Aussage möglich. Dies ist zum einen die Materialdämpfung, die zusammen mit der geometrischen Amplitudenverringern einen Abfall der Schalleistungsdichte von mehr als $\sim 1/r$ für den zweidimensionalen bzw. $\sim 1/r^2$ für den dreidimensionalen Fall (hierbei ist r der Abstand von der Quelle der Harmonischen) verursacht. Materialinhomogenitäten sorgen zudem für eine streuungsbedingte Frequenzabhängigkeit der Dämpfung und haben eine weitere Behinderung der Wellenausbreitung zur Folge.

Oberflächennahe Defekte verursachen durch ihre Grenzflächen eine Strukturschwächung, die auch die lokale akustische Impedanz verringert. Die abgelöste Schicht schwingt daher wie eine am Rand eingespannte Membran. Der Impedanzunterschied am Rand sorgt dafür, daß nur ein kleiner Anteil der Energie in die Umgebung übertragen wird (vgl. Abschnitt 1.2.3., Gl. 1).

Die Geometrie des Defektes spielt aber auch bei der Form des erzeugten Schallfeldes der höheren Harmonischen eine wichtige Rolle. Schon die anregende Welle der Grundschiwingung hat, um ein nichtlineares Verhalten induzieren zu können, die gleiche Größenordnung wie der Schaden selbst. Die höheren Harmonischen besitzen demnach entsprechend ihrer Ordnung um so kleinere Wellenlängen, was bei der Schallabstrahlung über die Defektoberfläche zu Interferenzeffekten führt. Das Schallfeld ergibt sich unter der Annahme unendlich vieler Schallquellen der Fläche dS mit der komplexen Schnelleamplitude \hat{v} , die über die Defektfläche S verteilt sind, zu

$$\text{Gl. 78} \quad \hat{p} = \frac{i\omega\rho}{2\pi} \int_S \hat{v} \frac{e^{-ikr}}{r} dS.$$

Dieser Ausdruck gilt für beliebige Formen der Fläche S und Phasenunterschiede der Elementarschallquellen. Für den Spezialfall einer gleichphasigen Schwingung aller Punktstrahler liefert diese nach Lord Rayleigh benannte Gleichung [70] Schallfelder, deren Intensitätsverteilung im Fernfeld für rechteckige Strahler durch sinc-Funktionen und für kreisförmige („Kreiskolbenmembranen“) durch Besselfunktionen beschrieben werden (optisches Analogon: Beugung am Spalt bzw. an Lochblenden [10]). Senkrecht zur Ebene der schwingenden Fläche befindet sich

also ein Maximum, das für eine gerichtete Abstrahlung des Schalls sorgt. Die Schallbündelung wird um so stärker, je größer die Fläche im Vergleich zur Wellenlänge wird. Je höher also die Ordnung einer Harmonischen, desto gerichteter ist auch die Schallabstrahlung. Da die meisten Defekte sich in erster Näherung als zweidimensionale Objekte beschreiben lassen, ist dieses akustische Verhalten als sehr wahrscheinlich anzunehmen.

Um trotz dieser ungleichmäßigen Detektierbarkeit der Schallquellen integrale Messungen durchführen zu können, müssen Anregungsfrequenzen gewählt werden, die deutlich kleiner sind als die für bildgebende Messungen. In diesem Fall lassen sich sowohl Dämpfungs- als auch Streuungseffekte verringern, aber auch eine gerichtete Schallabstrahlung der Schadensfläche vermeiden.

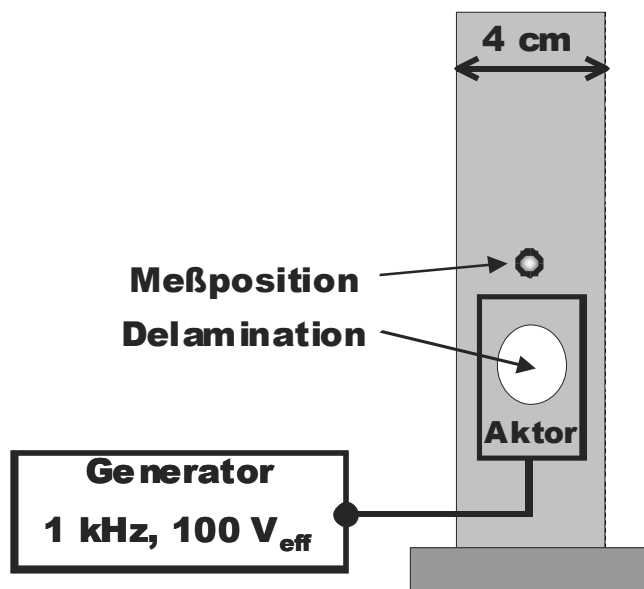


Abb. 26: Versuchsaufbau der integralen Laservibrometrie

integrierter Aktorik und einer oberflächennahen Delamination. Die Detektion erfolgte einige Zentimeter vom Schaden entfernt.

Durch die größeren Wellenlängen sind allerdings die Kräftegradienten, die auf die Grenzflächen des Defektes wirken, stark reduziert, so daß in diesem Fall mit erheblich größeren Amplituden gearbeitet werden muß, um nichtlineares Verhalten zu erreichen.

Abb. 27 zeigt das Ergebnis einer integralen Laservibrometermessung (Versuchsaufbau in Abb. 26) an der im Abschnitt 4.3.1 vorgestellten Probe mit

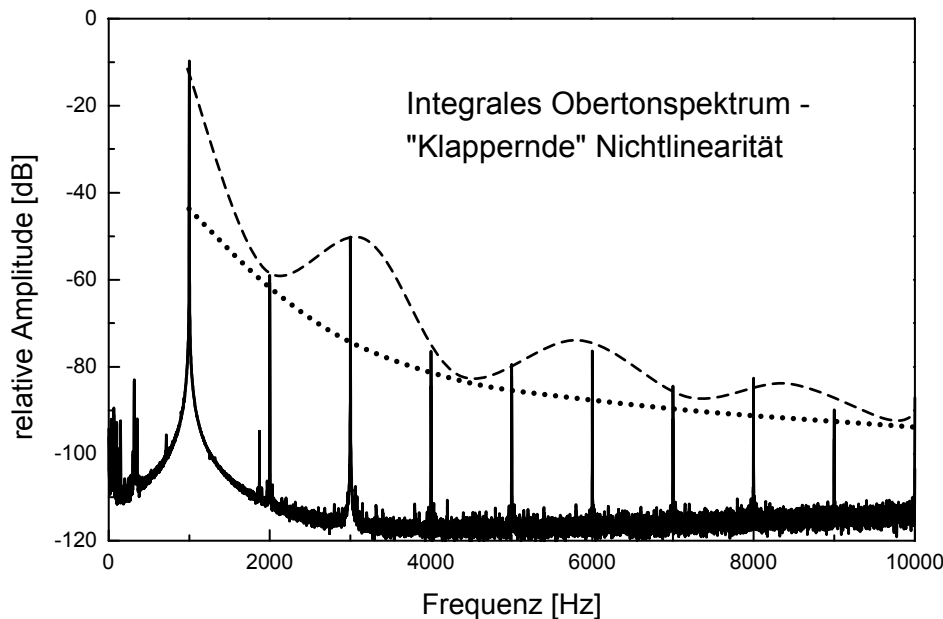


Abb. 27: Integrale Detektion einer Delamination (Probe aus Abschnitt 4.3.1, Aufbau in Abb. 26)

Die Anregung erfolgte durch den integrierten Aktor bei einer Frequenz von 1 kHz und einer Amplitude von ca. $100 V_{\text{eff}}$. Im Spektrum der Harmonischen ist der $\sin(x)/x$ -artige Verlauf einer klappernden Nichtlinearität als Hüllkurve (gestrichelt) wiederzuerkennen, obwohl er auch durch hysteretische Effekte überlagert zu sein scheint (gepunktete Linie), da keine Nullstellen auftreten.

3.3.2. Akustische Detektion

Schwingungen der Probenoberfläche erzeugen in der umgebenden Luft Druckschwankungen, die sich von der Probe weg ausbreiten. Die Wellenform dieser Schwingung bleibt dabei nahezu erhalten, da sich Luft bei Schalldrücken im gehörmäßig noch erträglichen Bereich bis etwa 130 dB ($0 \text{ dB} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$) und Frequenzen bis 100 kHz näherungsweise linear verhält.

Durch Abrastern einer Probe mit einem Mikrofon im akustischen Nahfeld (Abb. 28) kann die Oberflächenschwingung über ihr Schallfeld bestimmt werden (Inversion). An jedem Meßpunkt wird der Schalldruckverlauf (wie bei einem Ultraschall D-Scan) für eine bestimmte Zeit aufgezeichnet und kann anschließend durch eine FFT ausgewertet werden. Das Nahfeld bietet hierbei den Vorteil einer gegenüber der Triangulation (siehe unten) verbesserten lateralen Auflösung, wobei außerdem weniger unerwünschter Schall aus der Umgebung des momentanen Meßpunktes aufgenommen wird. Der seitlich einfallende Schall darf jedoch nicht völlig vernachlässigt werden, da er die Ortsauflösung insbesondere bei konkav geformten

Oberflächen verringert. Prinzipiell sollten Mikrofonmessungen, die der Schallquellenortung dienen, in reflexionsarmen („schalltoten“) Räumen durchgeführt werden, um die Beeinflussung durch Wandreflexionen und externe Quellen ausschließen zu können. Dieser Einfluß kann durch die Wahl der akustischen Eigenschaften des Mikrofons reduziert werden.

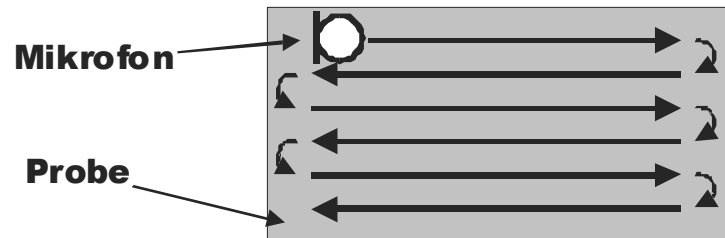


Abb. 28: *Prinzipskizze zur Probenabrasterung mittels Mikrofon*

Für den einfachen Fall des Druckempfängers, bei dem der Schalldruck p die Membranfläche S nur von einer Seite erreichen kann, gilt für die Auslenkungskraft F :

$$\text{Gl. 79} \quad F = S p.$$

Die Meßgröße F ist also unabhängig von der Einfallsrichtung des Schalls (Richtcharakteristik „kugelförmig“). Macht man auch die Rückseite der Membran für den Schall zugänglich, so werden die elastischen Wellen um die Membran herum gebeugt und interferieren mit dem Direktschall. Dies führt zu einer Auslöschung seitlich eintreffender Schallenergie, was zu einer ausgeprägten Richtcharakteristik mit der Form einer „Acht“ führt. Für die Auslenkungskraft dieses Druckgradientenempfängers gilt daher allgemein [70]:

$$\text{Gl. 80} \quad F = S \frac{\partial p}{\partial x} \Delta x.$$

Der Druck p wurde also durch die örtliche Druckdifferenz $(\partial p / \partial x) \Delta x$ ersetzt.

Um die Ortsauflösung im Nahfeld der Probe zu erhöhen, sollte also ein Druckgradientenempfänger eingesetzt werden, der den nicht vom momentanen Meßpunkt stammenden Seitenschall ausblendet.

Das akustische Fernfeld eignet sich besonders gut zur integralen Messung nichtlinearer Schwingungsvorgänge. Abb. 29 zeigt die Spektren der Luftschallschnelle einer aktiven Struktur mit Delamination (Abb. 29 links, vgl. Abschnitte 3.3.1 und 4.3.1) sowie einer intakten Probe mit ähnlichem Aufbau (rechts). Die Anregung erfolgte bei einer Frequenz von 50 kHz mit 20 V_{eff}, und die Schallschnelle

wurde durch ein Hochfrequenz-Kondensatormikrofon (Sennheiser MKH 20, freifeldentzerrter Druckempfänger) aufgenommen, das sich durch einen guten Ersatzgeräuschpegel (20 dB nach CCIR 468-3) und aufgrund eines symmetrischen Wandleraufbaus durch eine hohe Linearität auszeichnet. Die Meßdauer betrug in beiden Fällen ca. drei Sekunden bei einem Abstand von einem Meter zwischen Mikrofon und Probe. Die Messung erfolgte nicht unter Freifeldbedingungen, der geschätzte Hallradius ($p_{\text{Schall diffus}} = p_{\text{Schall direkt}}$) war jedoch sehr viel größer als der Meßabstand.

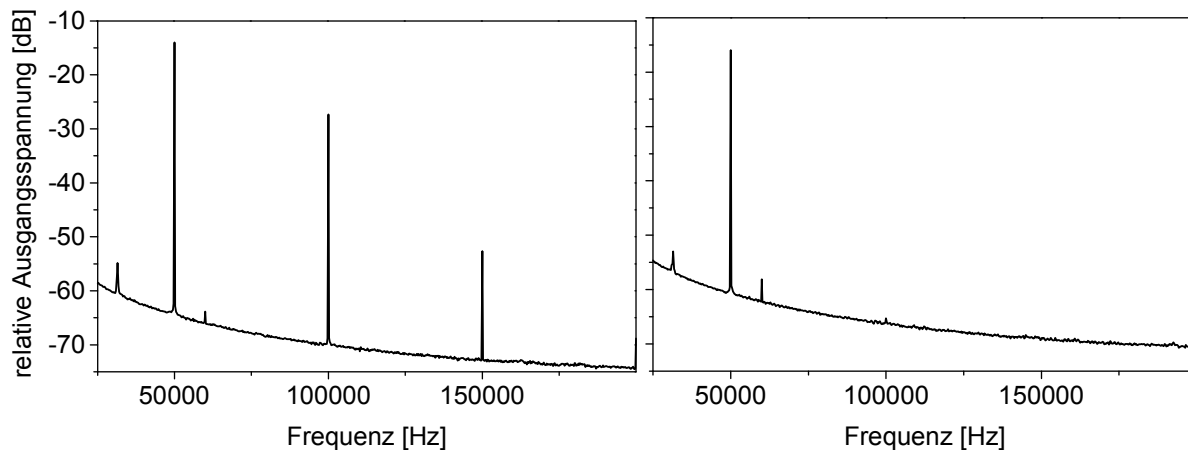


Abb. 29: Integrale akustische Messung von Defektnichtlinearitäten (links: Probe mit Delamination, rechts: ungeschädigte Probe)

Im Gegensatz zur ungeschädigten Probe weist das Spektrum der delaminierten Struktur deutliche höherharmonische Komponenten auf, die mit sehr gutem Signal-/Rauschabstand nachweisbar sind.

Es sind jedoch auch ortsauflösende Messungen im akustischen Fernfeld der Probe möglich, indem man Verfahren der akustischen Triangulation [71] bzw. Interferometrie [72][73] anwendet. Wegen der isotropen Schallgeschwindigkeit in Luft, läßt sich der Ort einer Schallquelle im Raum durch die Laufzeit- bzw. Phasenunterschiede zu mindestens drei Schallaufnehmern ermitteln. Die Positionen dieser Sensoren müssen hierbei so gewählt sein, daß sie eine Ebene im Raum aufspannen (also nicht in einer Linie angeordnet sind). Aus der Laufzeitdifferenz Δt und dem Abstand zweier Sensoren \vec{a} ergibt sich der Winkel α zur Normalen \vec{n} (mit $\vec{a} \cdot \vec{n} = 0$) durch

$$Gl. 81 \quad \alpha = \arcsin \left(\frac{c_{\text{Schall}} \cdot \Delta t}{|\vec{a}|} \right).$$

Aus diesen drei Winkeln, die aus den Laufzeitunterschieden bestimmt wurden, läßt sich der Ort der Schallquelle im Raum bestimmen. Der vereinfachte zweidimensionale Fall ist in Abb. 30 dargestellt.

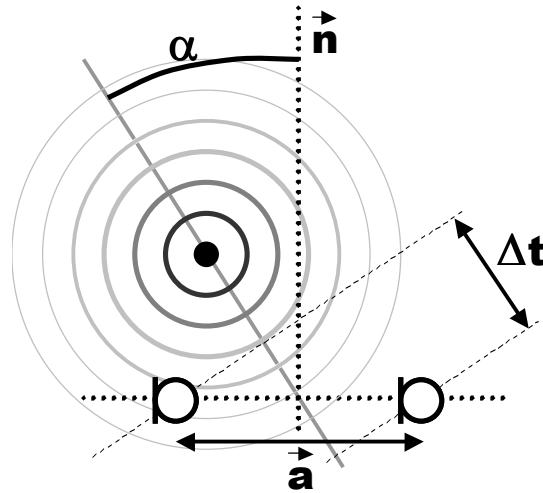


Abb. 30: Zweidimensionale Triangulation einer Schallquelle

Durch die zeitliche Diskretisierung bei der Analog-Digital-Wandlung, die zur numerischen Positionsbestimmung erforderlich ist, ergibt sich jedoch eine zeitliche Unschärfe. Die korrespondierende Ortsunschärfe für jede Raumdimension kann aus Gl. 81 bestimmt werden, indem man Δt mit $1/f_s$ gleichsetzt. Zudem sollte die Latenzzeit aller drei Wandler gleich sowie der Abtasttakt synchronisiert sein.

Um die akustische Triangulation mit hoher Genauigkeit durchführen zu können, müssen Druckempfänger eingesetzt werden, da nur sie einen zumindest theoretisch linearen Phasengang besitzen. Druckgradientenempfänger und entsprechend auch alle Mischformen (Richtcharakteristika „Niere“, „Hyperniere“ etc.) haben durch die Ausnutzung von Interferenzeffekten sowohl frequenz- als auch winkelabhängige Phasengänge [74], was sie für die oben beschriebene Anwendung ungeeignet macht.

Diese akustischen Verfahren haben den Vorteil eines hohen Signal/Rauschabstandes, da die Summe der Harmonischen und des Rauschens über den gesamten Signalweg (Mikrofon – Verstärker – A/D-Wandler) einer Ersatzschallquelle von ca. 25 dB entspricht [75]. Dennoch ist trotz moderner hochempfindlicher Mikrofone bei der bildgebenden akustischen Vibrometrie mit einigen Nachteilen zu rechnen. Die Rückrechnung des Schallfeldes in Schwingungsamplituden kann bei komplexer

Geometrie des Strahlers beliebig kompliziert sein, und das Verfahren reagiert empfindlich auf Umgebungsgeräusche.

Besser geeignet ist daher eine direkte Bestimmung der Oberflächenbewegung. Beschleunigungssensoren sind allerdings umständlich in der Handhabung und erlauben keine abbildenden Messungen. Die optische Interferometrie weist diese Nachteile nicht auf und arbeitet zudem berührungslos.

3.3.3. *Laserinterferometrische Detektion*

Laservibrometer werden bereits seit den siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts erfolgreich zu Schwingungsmessungen bzw. Modalanalysen eingesetzt [76][77] und einige Jahre später auch kommerziell hergestellt [78]. Die entscheidenden Vorteile dieses interferometrischen Verfahrens liegen in der Genauigkeit, Schnelligkeit und Berührungslosigkeit auch über große Distanzen. Laservibrometer besitzen eine große Bandbreite (40 MHz) und eine extrem hohe dynamische Wegauflösung im Subnanometerbereich (z.B. 30 pm bei 10 kHz, siehe Tabelle 3). Im Gegensatz zu akustischen Techniken lassen sich zudem Schwingungsamplituden auch mit einer sehr hohen lateralen Ortsauflösung – der Laserfokusgröße – bestimmen. Diese Eigenschaften machen die Laservibrometrie zum idealen Verfahren, das lokale Schwingungsspektrum einer Probe direkt an ihrer Oberfläche zu bestimmen, also auch zur Detektion lokaler Nichtlinearitäten.

Lange vor der Idee [79][80] und der Herstellung des ersten Lasers (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) [81] wurden bereits Interferometer beschrieben [82]. Durch die Monochromasie besitzt das Licht eines Lasers eine hohe Kohärenz. Dies bedeutet, daß die Phase der elektromagnetischen Welle über einen bestimmten Zeitraum stetig verläuft. Aufgrund der in allen Inertialsystemen konstanten Lichtgeschwindigkeit wird diese für die Laserqualität wichtige Zeit als räumliche Länge („Kohärenzlänge“) angegeben. Kohärentes Licht kann mit sich selbst zur Interferenz gebracht werden, da hier die Gesetze linearer Superposition gelten. Bei einem Phasenunterschied von $n\lambda$ kommt es zu konstruktiver Interferenz und bei $n\lambda + \lambda/2$ zu destruktiver. Aufgrund der sinusförmigen Modulation der Intensität bei kontinuierlicher Veränderung des Wegunterschiedes zweier kohärenter Wellen lassen sich auch Distanzen bestimmen, die sehr viel kleiner als die Wellenlänge sind. Technisch kann dies in einem Interferometer umgesetzt werden, wobei die Kohärenzlänge des Lasers mindestens dem gesamten optischen Weg

entsprechen muß. Die folgende Abbildung zeigt eine Anordnung, die von E. Mach und L. Zehnder 1891/92 [83] unabhängig voneinander entwickelt wurde.

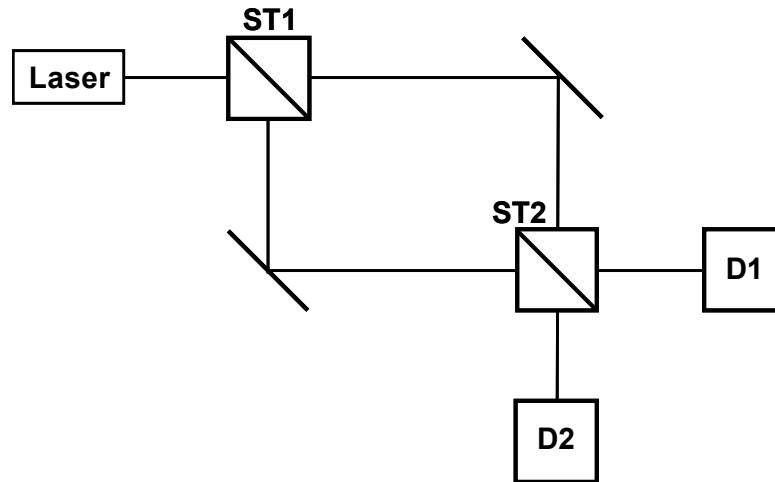


Abb. 31: Interferometer nach Mach und Zehnder

Das Laserlicht der Amplitude A wird zunächst durch den Strahlenteiler ST1 in zwei Strahlen mit gleicher Intensität aufgeteilt. Die Wellen laufen über zwei verschiedene Wege zum Strahlenteiler ST2, wo sie miteinander interferieren können. Die eine Hälfte der Intensität wird auf den Detektor D1 und die andere auf den Detektor D2 gelenkt. Die Strecken z_1 und z_2 , die die Wellen zurücklegen müssen, führen zu den Phasenverschiebungen θ_1 und θ_2 mit

$$\text{Gl. 82} \quad \theta_i = \frac{2\pi z_i}{\lambda} \quad (i=1, 2).$$

Für die Amplituden $a_1(t)$ und $a_2(t)$ der beiden Wellen, die am Detektor D2 miteinander interferieren, gilt

$$\text{Gl. 83} \quad a_i(t) = \frac{1}{2} A e^{i(\omega t - \theta_i)} \quad .$$

Es ergibt sich also am Detektor D2 die E-Feld-Amplitude $a_{\Sigma, D2} = a_1 + a_2$. Die eigentliche Meßgröße der meisten Photodetektoren ist jedoch die Intensität des Lichts, die dem Betrag der komplexen Amplitude a entspricht

$$\text{Gl. 84} \quad I_{D2} = a_{\Sigma, D2} \cdot a_{\Sigma, D2}^* = \frac{1}{2} A^2 [1 + \cos(\theta_2 - \theta_1)] \quad .$$

Aus Energieerhaltungsgründen ($I_{D1} + I_{D2} = A^2$) folgt für die Intensität am Detektor D1

$$\text{Gl. 85} \quad I_{D1} = \frac{1}{2} A^2 [1 - \cos(\theta_2 - \theta_1)] \quad .$$

Mithilfe von Gl. 82 läßt sich die Phasendifferenz $\theta_2 - \theta_1$ substituieren durch

$$\text{Gl. 86} \quad \Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 = \frac{2\pi(z_2 - z_1)}{\lambda} = \frac{2\pi\Delta z}{\lambda} \quad ,$$

wodurch ein direkter Zusammenhang zwischen den gemessenen Intensitäten I_i an den Detektoren und der Wegdifferenz Δz entsteht.

Die Distanzmessung zu Objekten außerhalb der Interferometers erfordert eine Erweiterung des in Abb. 31 dargestellten Systems um eine Reflexionsstrecke (Abb. 32). Einer der Umlenkspiegel wird durch einen polarisierenden Strahlenteiler ST2 und ein $\lambda/4$ -Plättchen ersetzt. Diese erfüllen die Funktion einer richtungsabhängigen Strahlumlenkung: Das von ST1 kommende Licht fällt geradlinig auf die Probe, und das rückgestreute Licht wird auf ST3 umgelenkt.

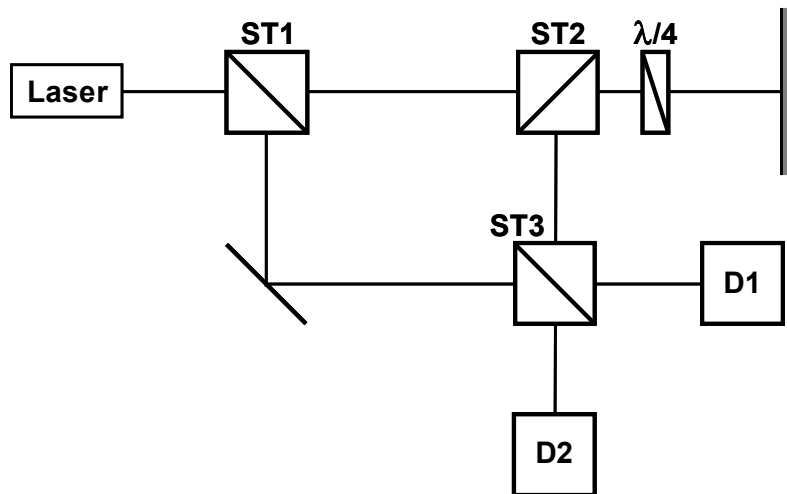


Abb. 32: Modifiziertes Mach-Zehnder-Interferometer zur externen Wegmessung

Diese Anordnung läßt sich zur Bestimmung statischer Auslenkungen nutzen. Ist jedoch die zu messende Oberfläche relativ zum Interferometer in Bewegung, so ist auch der Dopplereffekt des Lichts zu berücksichtigen. Obwohl sich dieser relativistische Effekt von seinem akustischen Pendant (Wellen mit Ausbreitungsmedium) prinzipiell unterscheidet, wird er bei Objektgeschwindigkeiten, die klein gegen die Lichtgeschwindigkeit sind, näherungsweise durch identische Gleichungen beschrieben [83].

Bewegt sich das Meßobjekt mit der Geschwindigkeit v auf das Interferometer zu, so ist die zeitabhängige Phasendifferenz

$$\text{Gl. 87} \quad \Delta\theta(t) = \frac{2\pi 2v}{\lambda t} = 2\pi f_D t,$$

mit der Dopplerfrequenz f_D . Eingesetzt in Gl. 84 und Gl. 85 ergibt sich für die Intensitäten an den Detektoren

$$\text{Gl. 88} \quad I_{D1} = \frac{1}{2} A^2 [1 - \cos(2\pi f_D t)],$$

$$\text{Gl. 89} \quad I_{D2} = \frac{1}{2} A^2 [1 + \cos(2\pi f_D t)].$$

Aufgrund der Symmetrieeigenschaften der Kosinusfunktion ist allerdings das Vorzeichen der Dopplerfrequenz nicht aus der Intensität bestimmbar; die Richtung der Bewegung ist unbekannt. Dieses Problem kann durch eine zusätzliche Frequenzmodulation des Lichts im Referenzzweig des Interferometers umgangen werden. Als optischer Modulator wird hierzu eine „Bragg-Zelle“ verwendet, die die Frequenz des Referenzstrahls um den Wert f_B verändert. Die Intensitäten entsprechen daher

$$\text{Gl. 90} \quad I_{D1} = \frac{1}{2} A^2 [1 - \cos(2\pi(f_D + f_B)t)],$$

$$\text{Gl. 91} \quad I_{D2} = \frac{1}{2} A^2 [1 + \cos(2\pi(f_D + f_B)t)].$$

Die Modulationsfrequenz f_B verschiebt den Nullpunkt der Dopplermodulation in einen Wertebereich des Kosinus, der nicht mehr symmetrisch zum Vorzeichen von f_D ist, so daß auch die Richtung der Objektbewegung aus der Intensität abgeleitet werden kann. Ein Interferometer mit Zusatzmodulation zur Richtungsdetektion wird als „Heterodyn“-Interferometer bezeichnet. Der prinzipielle Aufbau ist in Abb. 33 dargestellt [84].

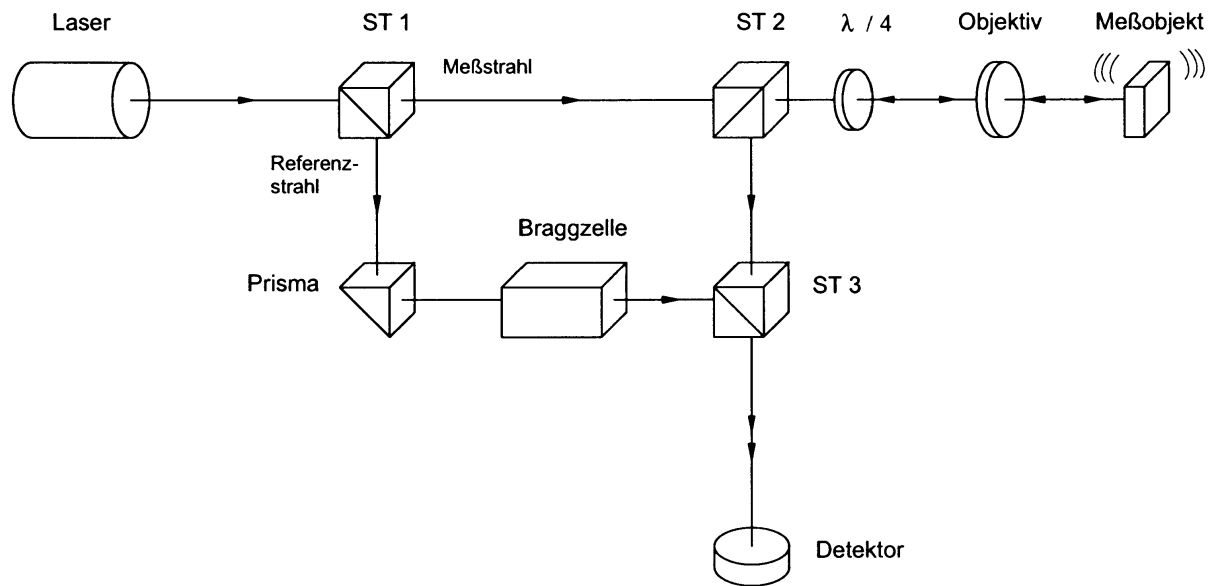


Abb. 33: Prinzipbild eines Heterodyn-Interferometers (Polytec OFV 303)

Für alle in dieser Arbeit vorgestellten Meßergebnisse wurde ein scannendes Laser-vibrometer (Polytec PSV 200) verwendet, das ein Interferometer und einen Demodulator beinhaltet. Das optische System (OFV-055) besteht aus einem Heterodyn-Interferometer OFV-303 (Abb. 33), das mit einem Zwei-Achsen-Ablenkspiegelsystem und einer Optik zur Fokussierung des Laserstrahls kombiniert worden ist. Die Daten des verwendeten Interferometers sind in Tabelle 2 zusammengefaßt.

Lasertyp	Helium-Neon
Wellenlänge	633 nm
Resonatorlänge	205 mm
Laserleistung	1 mW
Ausgangsmittenfrequenz f_B	40 MHz
Brennweite	100 mm
Minimaler Arbeitsabstand	450 mm
Maximaler Arbeitsabstand	< 250 m (abhängig von den Reflexionseigenschaften der Probenoberfläche)
Austrittsstrahldurchmesser ($1/e^2$)	12 mm
Strahldurchmesser bei 1 m (typ.)	42 μm

Tabelle 2: Kenndaten des Lasers (oben) und der Optik (unten) des verwendeten Interferometers (Polytec OFV-303)

Außerdem ist in das System noch eine Videokamera integriert, deren Bild mit den Rastermessungen des Vibrometers überlagert wird, damit das Rastermusterscanmuster relativ zum Objekt dargestellt und gespeichert werden kann.

Das Interferometer liefert ein Hochfrequenzsignal, in dessen Frequenzmodulation die Information der Oberflächenschnelle und in dessen Phasenmodulation die Weginformation enthalten ist. Im Controller OFV 3001 SF des PSV 200 wird lediglich eine Frequenzdemodulation durchgeführt, da es für die Aufnahme von Schwingungen konzipiert ist. Die Bestimmung statischer Verformungen ist daher nicht erforderlich, und die dynamischen Wegamplituden a können durch

$$\text{Gl. 92} \quad a(f) = v/f$$

aus der Schnelle v bestimmt werden. Der Signalverlauf im Controller ist in Abb. 34 dargestellt [84].

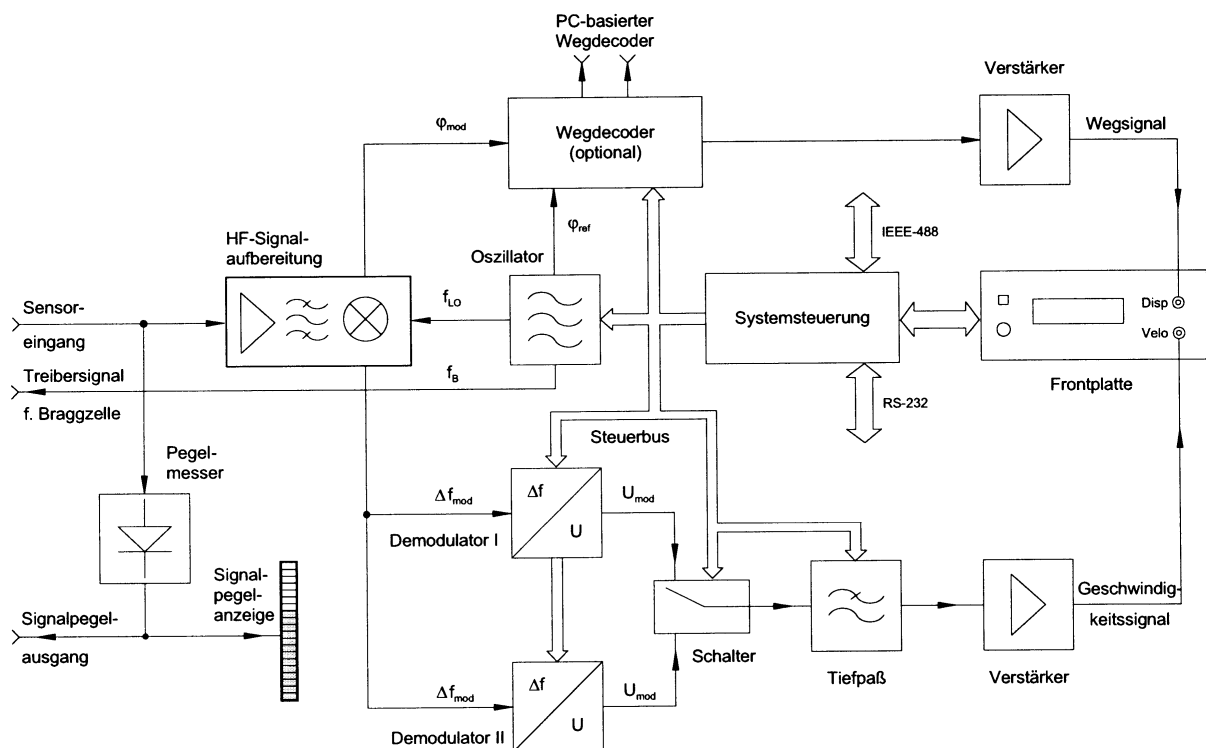


Abb. 34: Blockdiagramm des Polytec OFV 3001 S Controllers / Demodulators

Nach einer Vorverstärkung wird das HF-Signal mithilfe des Referenzoszillators auf die eigentliche Dopplerfrequenz heruntergemischt. Durch eine Frequenz/Spannungs Konvertierung (Hochpaß mit Gleichrichtung) kann eine zur Oberflächengeschwindigkeit proportionale Spannung abgegriffen werden. Ein Butterworth-Tief-

paß achter Ordnung beseitigt vor der Verstärkung und A/D-Konvertierung noch verbliebene HF-Komponenten, die das digitale Signal stören würden. Die wichtigsten Daten des Demodulators sind in Tabelle 3 dargestellt.

Besonders wichtig bei der Verwendung eines Laservibrometers zur Detektion nichtlinear Effekte ist ein niedriger Klirrfaktor des Systems. Der Klirrfaktor ist definiert als Betragssumme aller höheren Harmonischen und liegt auch bei -3 dB unter Vollaussteuerung noch deutlich unter dem der Defektnichtlinearitäten.

Die Digitalisierung der Daten des Vibrometers sowie des Anregungssignals erfolgt durch zwei 14 bit A/D-Konverter mit einer Abtastrate von bis zu 1 MHz. Durch bis zu 2,5-fache Überabtastung, die zur zusätzlichen digitalen Tiefpaßfilterung erforderlich ist, ergibt sich eine Systembandbreite von 200 kHz, die im Digitalrechner zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung steht.

Maximaler Linearitätsfehler (Großsignal)	Innerhalb eines Geschwindigkeitsbereichs: 1 %, Insgesamt: 2,5 %					
Ausgangsspannung	± 10 V					
Ausgangsimpedanz	50 Ω					
Meßbereiche	1, 5, 10, 25, 125, 1000 mm/s/V					
Bereich [mm/s/V]	1	5	10	25	125	1000
Auflösung	0,3 μ m/s	0,3 μ m/s	0,5 μ m/s	2 μ m/s	5 μ m/s	10 μ m/s
Bandbreite	10 kHz	10 kHz	250 kHz	250 kHz	250 kHz	250 kHz
Klirrfaktor (@ -3 dB _{fs})	< 0,2 % < -54 dB	< 0,2 % < -54 dB	< 0,2 % < -54 dB	< 0,2 % < -54 dB	< 0,3 % < -50 dB	< 0,3 % < -50 dB

Tabelle 3: Technische Daten des Polytec OFV 3001 S Controllers / Demodulators

Bereits während der Messung wird für jeden Meßpunkt eine Echtzeit-FFT durchgeführt, deren Spektren (Betrag und Phase) gespeichert werden. Hierzu sind abhängig von der gewünschten spektralen Auflösung bzw. Bandbreite ca. 0,1 bis 1 Sekunde pro Meßpunkt erforderlich.

In den Meßergebnissen des folgenden Abschnittes sind die Amplituden der angegebenen Frequenz bzw. die Effektivwerte eines Frequenzbandes graustufenko-

diert dem optischen Bild überlagert, so daß ein klarer Bezug zum jeweiligen Meßpunkt gegeben ist. Der meistens rechteckige Meßbereich ist kleiner als die gesamte Probe, so daß er sich vom Hintergrund abhebt. Um einen breiten Überblick über die Einsatzmöglichkeiten der „nichtlinearen Laservibrometrie“ zu gewinnen, wurden verschiedene Werkstoffe mit ihren charakteristischen Schädigungen ausgewählt.

4. Anwendungen in der Werkstoff- und Bauteilprüfung

4.1. Faserverstärkte Kunststoffe

Faserverbundwerkstoffe haben dem Leichtbau in den letzten Jahrzehnten neue Möglichkeiten eröffnet. Die entscheidenden Vorteile liegen in der breiten Anpassungsfähigkeit an verschiedene Anforderungsprofile. Dies kann durch die Wahl der Matrix, des Materials der Fasern, der Faserorientierung und ihrer Länge geschehen. Die mechanischen Eigenschaften lassen sich auf diese Weise über einen großen Bereich bei der Herstellung variieren, so daß beispielsweise eine auf das Gewicht bezogene höhere Festigkeit erreicht werden kann als bei Metallen. Diese Vorteile sind so erheblich, daß ihre Verwendung auch in sicherheitsrelevanten Bereichen wie der Luftfahrt oder dem Automobilbau sinnvoll ist.

Probleme ergeben sich allerdings bei den Anforderungen der Qualitätssicherung. Die Gründe hierfür sind zum einen die fehlende Langzeiterfahrung über das Ermüdungsverhalten dieser Materialien, und zum anderen sind die bisher bei Strukturwerkstoffen wie Metallen verwendeten Prüfverfahren nicht oder nur bedingt anwendbar. Auch das Versagensverhalten ist in vielen Fällen sehr viel kritischer als bei duktilen Metallen. Die Ursache liegt in der Struktur des Materials selbst: Während bei Metallen Störungen im Kristallgitter für ein duktileres Verhalten sorgen (indem z.B. Versetzungen wandern) sind die Molekülketten in Kunststoffen fest miteinander vernetzt. Eingebettete Fasern können das Versagensverhalten zwar günstig beeinflussen, da sie ebenfalls einen großen Teil der Last aufnehmen, aber das genaue Zusammenwirken zwischen Faser und Matrix ist sehr komplex und deshalb immer noch Gegenstand aktueller Forschung [85]. Das Versagensverhalten faserverstärkter Kunststoffe ist so vielgestaltig wie das Material selbst und somit schwer vorhersagbar. Prüfverfahren, die Schäden in diesen Strukturen frühzeitig detektieren können, sind daher notwendig, um ein Versagen im Betrieb soweit wie möglich ausschließen zu können.

Eine sehr verbreitete Herstellungsmethode von Faserverbundstrukturen ist die Verwendung von „Prepreg“-Halbzeug. Hierbei handelt es sich um vorgefertigte Matten aus unausgehärteter Matrix, in die bereits Fasern eingebettet sind. Diese werden in den gewünschten Faserorientierungen übereinandergelegt und in der

vorgesehenen Form in einem Autoklaven ausgehärtet. Durch diese Art der Herstellung entsteht wie auch beim Wickeln von Faser-Rovings eine Schichtstruktur, die nicht von Fasern überbrückt wird, so daß sie die Ursache der folgenden häufig auftretenden Schädigungsarten ist.

4.1.1. Delaminationen

Neben Delaminationen, die erst im Betrieb entstehen, kann es bereits bei der Herstellung von Verbundstrukturen zwischen den einzelnen Lagen zu unerwünschten Trennungen kommen, die die strukturelle Integrität merklich oder sogar kritisch schwächen können. Gründe hierfür sind Kontaminationen mit Trennmitteln, die bei der Umformung Verwendung finden, oder auch Lufteinschlüsse. Unter Last wachsen diese Schäden oft erheblich, so daß eine frühzeitige Erkennung von Delaminationen und eventuell eine Schadensverfolgung Prüfverfahren erfordern, die empfindlich auf diese Grenzflächen ansprechen.

Abb. 35 zeigt die Schädigungskarte einer ca. 5 mm dicken CFK-Platte (ähnlich der Probe im vorhergehenden Abschnitt), die mithilfe von Ultraschalldurchschallungsdaten erstellt wurde. Sie weist einen Impactschaden in der Mitte und Delaminationen im Randbereich auf. Der Impact hat eine nahezu kreisförmige Delamination verursacht, während die Enthaltungen am Rand halbkreisförmig sind. Sie wurden durch seitliches Aufspalten mit einem meißelförmigen Gegenstand verursacht. Die Tiefenlagen sind jeweils in Abb. 35 vermerkt.

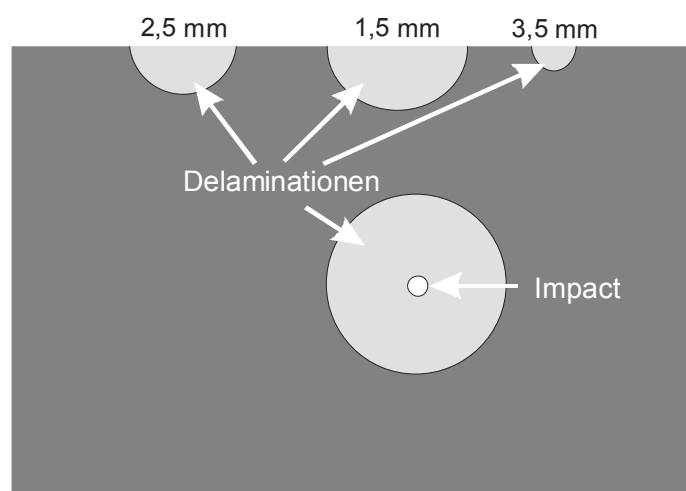


Abb. 35: Schematischer Schädigungsplan einer CFK-Probe mit Impact und Delaminationen

Um eine Relativbewegung dieser Grenzflächen zu erzeugen, wurde ein an die Probe geklemmter Ultraschallkonverter (20 kHz) mit einer elektrischen Leistung von

600 Watt betrieben. Die Wellenlänge der vom Vibrometer detektierten Schwingung betrug etwa 4 cm (20 kHz). Als Kopplungsmedium diente hier, wie auch im folgenden Beispiel, ein Kunststoffklebeband. Als bildgebende Größe der folgenden Abbildung wurde die Betragssumme der höheren Harmonischen bis einschließlich 200 kHz (obere Grenzfrequenz des verwendeten Polytec PSV 200 Laservibrometers) verwendet (Abb. 36). Es ergibt sich also ein „Klirrfaktorbild“, das gegenüber einer Einzelpartialtondarstellung den Vorteil eines erhöhten Defektkontrastes hat.

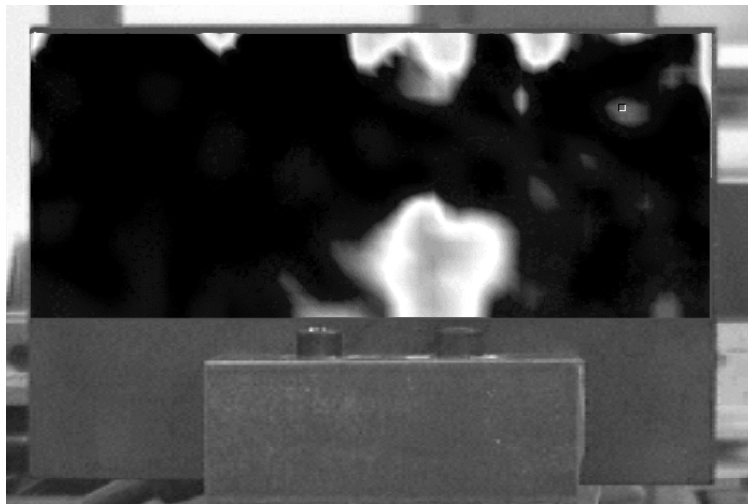


Abb. 36: Detektion des Impacts und der Delaminationen durch nichtlineares Verhalten („Klirrfaktorbild“ der Probe in Abb. 35)

Wie auch im Ultraschallbild fällt hier insbesondere die großflächige Delamination in der Mitte auf. Auch die beiden Delaminationen am oberen rechten Rand der Probe zeigen einen Bereich nichtlinearen Verhaltens, der ebenfalls gut mit den Durchschallungsergebnissen übereinstimmt. Lediglich der linke obere Schaden wird nicht in seinem vollem Ausmaß erkannt, was möglicherweise mit einer sehr schwachen Aufklaffung in diesem Bereich zu erklären ist, wobei die Kräftegradienten nicht groß genug sind, um die Grenzflächen gegeneinander zu bewegen. Nur der Einschlagpunkt, an dem die Laminatschichten getrennt wurden, weist ein nichtlineares Verhalten auf, da hier ein Ort massiver Schädigung vorliegt.

Delaminationen treten allerdings nicht nur im Laminat selbst auf, sondern auch an großflächigen Fügstellen. Diese Fügstellen sind jedoch erforderlich, da Bauteile komplexer Geometrie oder mit großen Ausmaßen nicht monolithisch herzustellen sind. Die im Flugzeugbau übliche Versteifung durch Stringer und Spanten wird aus Kostengründen ebenfalls durch eine Verklebung hergestellt. Abb. 37 zeigt ein Versuchspanel bauähnlich den Strukturen einer Do 328, das freundlicherweise

von Fairchild-Dornier zur Verfügung gestellt wurde. Durch Belastung über die Versagensgrenze hinaus wurden einige der auf der Rückseite applizierten Stringer gelöst.

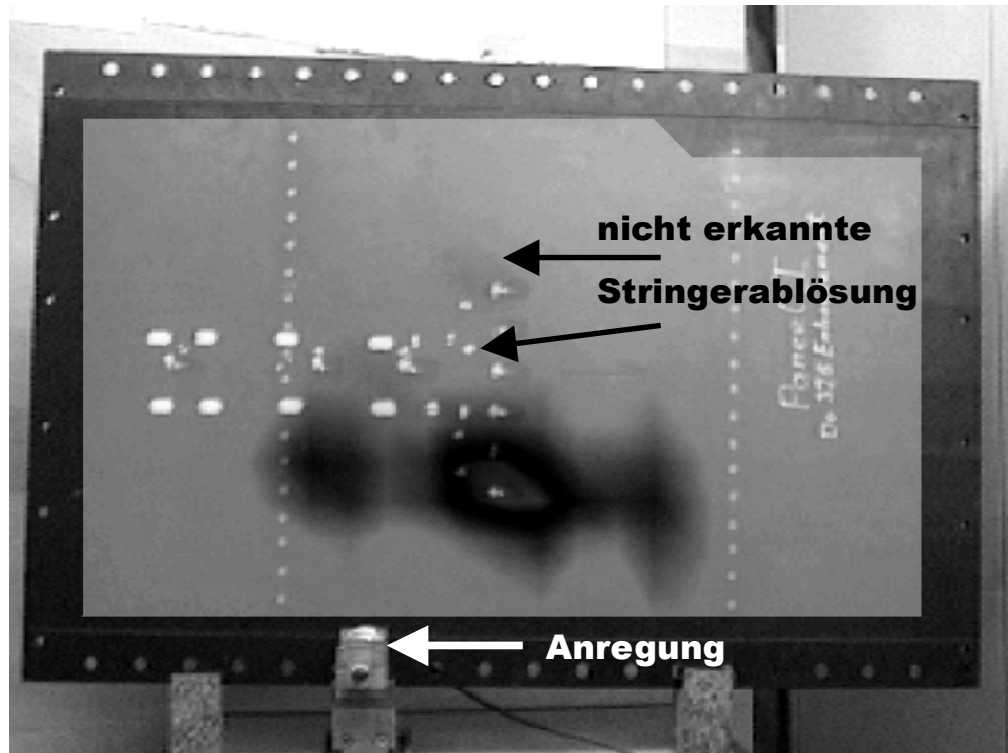


Abb. 37: Amplitudenbild der 1. Subharmonischen eines CFK-Panels mit Stringerablösung

Bei einer Ultraschallanregung mit 20 kHz und einer elektrischen Leistung von 1 kW konnte der abgelöste Bereich eines Stringers durch die erste Subharmonische der Anregung erkannt werden. Das an dieser Position offenbar günstige Verhältnis aus Grenzflächenabstand, Anregungsamplitude und Rückstellkräften sorgt für die Erzeugung einer subharmonischen Schwingung (vgl. Abschnitt 2.2.3). Die im Bild weiter oben liegenden Delaminationen konnten jedoch nicht erkannt werden; die höheren Harmonischen zeigen keine gute Korrelation mit den Defektpositionen. Möglicherweise ist die erreichbare Leistungsdichte durch eine punktuelle Anregung für ein Bauteil dieser Größenordnung nicht ausreichend bzw. werden Nichtlinearitäten nicht effizient genug angeregt, da zu wenig Modenkonzersionen auftreten.

4.1.2. Impactschäden

Ein „Impact“ (Schlagschaden) in Faserverbundstrukturen ist besonders kritisch, da er von einem Sichtprüfer auf der Einschlagseite nicht oder nur schwer wahrgenommen werden kann: Lediglich ein kleiner Eindruck ist sichtbar, wodurch der

Schaden meist unterschätzt wird. Die eigentliche strukturelle Schädigung liegt jedoch in der Tiefe. Trifft ein stumpfer Gegenstand die Oberfläche einer Schichtstruktur, so breitet sich die Stoßwelle kegelförmig im Material aus (Abb. 38).

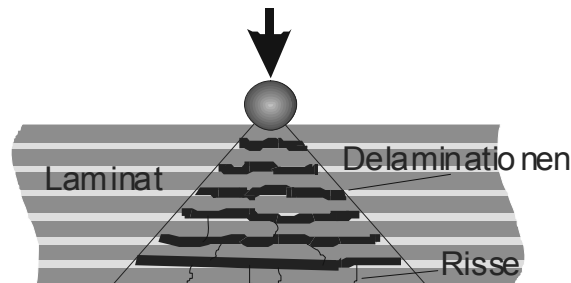


Abb. 38: Skizze eines Schlagschadens mit Enthaltungen und Rissen

Die oberste Schicht kann nahezu elastisch reagieren, während die tieferliegenden Schichten die Stoßenergie durch Matrix- oder Faserbruch absorbieren müssen. Die Defektgröße nimmt also mit der Tiefe zu. Der Impact-Schaden muß aber auch von der Einschlagseite aus erkennbar sein.

Bei der Probe in Abb. 39 handelt es sich um ein ca. 2 mm dickes quasiisotropes Kohlefaserlaminat (CFK), in das sieben Impactschäden eingebracht wurden. Diese Probe wurde freundlicherweise von Herrn R. Aoki (DLR Stuttgart) zur Verfügung gestellt. Der Schaden ist von beiden Seiten mit bloßem Auge erkennbar und weist eine Linienform mit etwa 45° Neigung auf. Dies entspricht der Orientierung der obersten Laminatschicht. Die Anregung erfolgte durch einen Ultraschallkonverter, der bei 20 kHz und einer elektrischen Leistung von 400 W betrieben wurde.

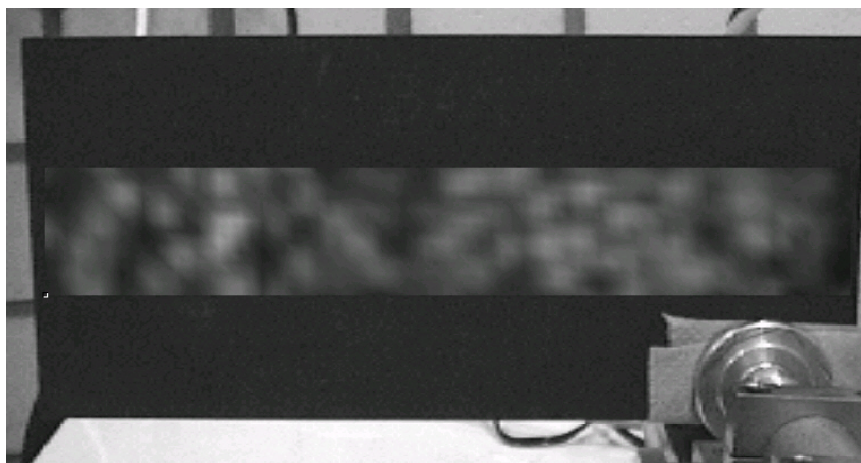


Abb. 39: CFK Probe mit 7 Impactschäden, Anregungsfrequenz 20 kHz

In Abb. 39 ist die Amplitudenverteilung der Oberflächenschnelle für die Anregungsschwingung (20 kHz) graustufenskaliert dargestellt (Wellenlänge ca. 2 cm). Sie zeigt eine Momentaufnahme des instationären Wellenfeldes, das eine gute Homogenität über die Probenoberfläche aufweist, obwohl nur am rechten unteren Probenrand Schall in die Probe eingeleitet wurde. Schäden sind aber bei der Anregungsfrequenz nicht zu erkennen.

Die fünfte Harmonische zeigt hingegen ein völlig anderes Bild der Probe (Abb. 40). Außerhalb der Defekte ist keine Amplitude detektierbar (schwarz), während an den Impactschäden ein Signal vorhanden ist.

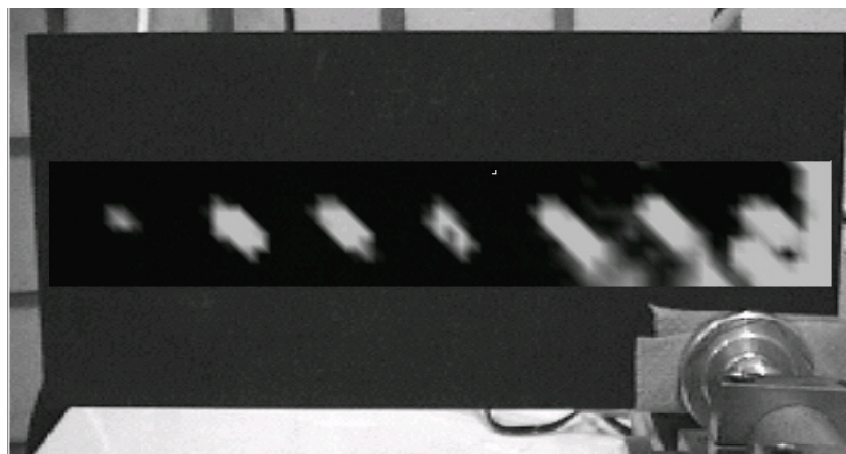


Abb. 40: CFK Probe mit 7 Impacts, 5. Harmonische (100 kHz)[31]

Lediglich in der Umgebung der Einkoppelstelle der Anregung sind höhere Harmonische auch im intakten Bereich der Probe zu erkennen, was seine Ursache in einem nicht optimalen Kopplungsmedium hat (hier: Papier). Die Größe der Defekte im Bild der fünften Harmonischen korreliert gut mit der sichtbaren Schadensgröße; lediglich der im Bild ganz linke Schaden ist hier leicht unterrepräsentiert.

Es müssen auch Schlagschäden detektiert werden, die von der Impactseite aus durch Sichtprüfung nicht erkennbar sind. Ein Beispiel hierfür ist in der Abb. 41 dargestellt: Es handelt sich um eine etwa 5 mm dicke CFK-Platte, die mit einer Kugel beschossen wurde. Von der Vorderseite ist lediglich ein kleiner Eindruck an der Oberfläche am Ort des Impacts (Pfeil) erkennbar, der nicht auf einen schwerwiegenden Schaden hindeutet. Die Rückseite zeigt allerdings erhebliche Delaminationen und Faserrisse.

Durch Anregung mit Ultraschall (20 kHz, 100 W elektrische Leistung) ist auch von der Vorderseite ein deutlicher Schaden zu erkennen, was in Abb. 41 am

Beispiel der siebten Harmonischen dargestellt ist. Hohe Amplituden sind hierbei dunkel, niedrige hell dargestellt. Am eigentlichen Einschlagpunkt (Pfeil) wird nahezu kein nichtlineares Verhalten festgestellt; hier trat lediglich eine Kompression des Materials auf, die offenbar keine zusätzlichen Grenzflächen erzeugt hat. Erst in der Umgebung, in der auch Scherkräfte auftraten, ist eine strukturelle Schädigung erzeugt worden.

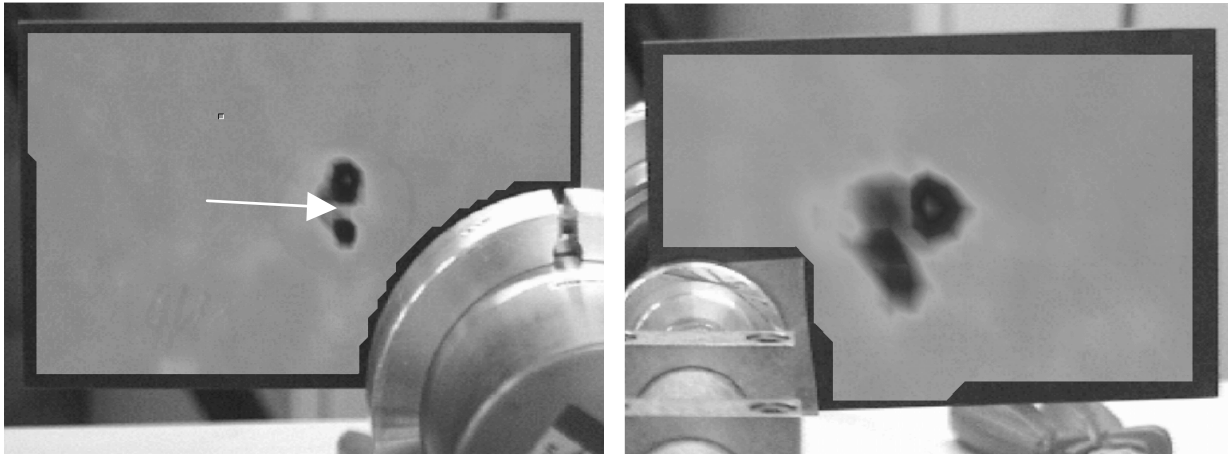


Abb. 41: CFK Probe mit Impact (7. Harmonische), links: Impactseite, rechts: Rückseite [86]

Auf der Rückseite ist der Schaden deutlich schwerwiegender. Es sind zwei deutlich hervortretende Bereiche erkennbar, die optisch leicht als Delaminationen zu identifizieren waren. Der Bereich nichtlinearen Verhaltens, in dem Grenzflächen nichtlinear interagieren können, ist jedoch größer als der optisch wahrnehmbare Schaden.

4.1.3. Thermische Überbeanspruchung

Ein entscheidender Unterschied zwischen Metallen und Faserverbundstrukturen liegt in der Toleranz hoher Temperaturen. Während Metalle und insbesondere spezielle Hochtemperaturlegierungen, wie sie im Triebwerksbau Verwendung finden, noch bei Temperaturen um 1000 K eingesetzt werden können, zeigen organische Werkstoffe bereits bei geringeren Temperaturen erhebliche Festigkeitsverluste oder sogar chemische Veränderungen: Es kommt zu einem Aufbrechen der langen Polymerketten und damit ebenfalls zu einem strukturellen Versagen der Matrix.

In vielen technischen Bereichen sind jedoch hohe Temperaturen prozeßbedingt unvermeidbar. Im Automobilbau betrifft dies den Bereich der Verbrennungsmaschine, wo eine Verringerung der sich bewegenden Massen wünschenswert ist, um Treibstoffverbrauch, Schadstoffausstoß und nicht zuletzt die Betriebsvibrationen zu reduzieren. Dies gilt analog auch in der Luftfahrt für den Triebwerksbau. Im

„kalten Bereich“ der Triebwerke werden bereits Verdichterschaufeln aus CFK eingesetzt [87]; es bleibt jedoch das Problem der Prüfung auf mechanische und thermische Schädigungen.

Aber auch bei der Verwendung von CFK in Primär- und Sekundärstrukturen kann es zu Schädigungen durch thermische Überbeanspruchung kommen, die durch einen Blitzschlag verursacht werden. Es gibt hierbei besondere Risikobereiche (z.B. das Leitwerk [88]). Durch die um etwa Faktor tausend geringere Leitfähigkeit von CFK gegenüber Aluminium sind die Stromwege eines Blitzes verbreitert; das elektromagnetische Feld kann sogar in das innere des Luftfahrzeugs eindringen und elektronische Systeme zerstören [89]. Zur Vorbeugung werden in das Laminat oberflächlich Netze oder Streifen aus Kupfer eingebracht, die die Ströme aufnehmen und das elektromagnetische Feld mit typischen Frequenzen zwischen 10 kHz und 10 MHz abschirmen sollen [90]. Sie müssen im Fall eines Blitzschlag Strömen von etwa 400 A für ca. 1-50 ms widerstehen, wobei auch im umgebenden organischen Material sehr hohe Temperaturen entstehen [91].

a) Irreversible thermische Schädigung in CFK

Zur Simulation einer starken thermischen Belastung wurde eine CFK-Platte mit einer Dicke von ca. 2 mm ausgewählt, die mit einem Infrarot-Diodenlaser auf der Oberfläche geschädigt wurde. Die optische Leistung betrug 10 W bei einer Bestrahlungsdauer von etwa 10 s. Der Lichtleiter des Lasers wurde direkt auf die Probe gerichtet, so daß sich eine bestrahlte Fläche mit einem Durchmesser von ca. 2 cm ergab. Auf der bestrahlten Seite war lediglich eine leichte Verfärbung der Oberfläche erkennbar, während die Rückseite erhebliche Delaminationen aufwies, was mit Ergebnissen der Literatur übereinstimmt [91].

Vor und während der Schädigung wurde die Probe mit Ultraschall (20 kHz, 200 W elektrische Leistung) angeregt und die lokalen Schwingungsspektren bestimmt. Die Wellenlänge der Anregung betrug 2,2 cm und die Amplitude war hierbei im zeitlichen Mittel homogen über die Probe verteilt (Abb. 42). Vor der Schädigung wies auch die zweite Harmonische keine auffälligen Maxima auf, die auf einen Defekt hinweisen würden (Abb. 43 links) [92]. Nach der Bestrahlung konnte der stark erhitzte und strukturell geschädigte Bereich durch eine erhöhte zweite Harmonische eindeutig nachgewiesen werden (heller Bereich in Abb. 43 rechts). Zur besseren Vergleichbarkeit wurde in beiden Darstellungen rechts und links die gleiche Absolutskalierung der Graustufen in Abb. 43 gewählt. Die freien Grenzflächen

der Delaminationen führen durch ihre Relativbewegung zu einem nichtlinearen Materialverhalten. Wie bei Impactschäden lassen sich Schädigungen auch von der gegenüberliegenden Seite nachweisen.

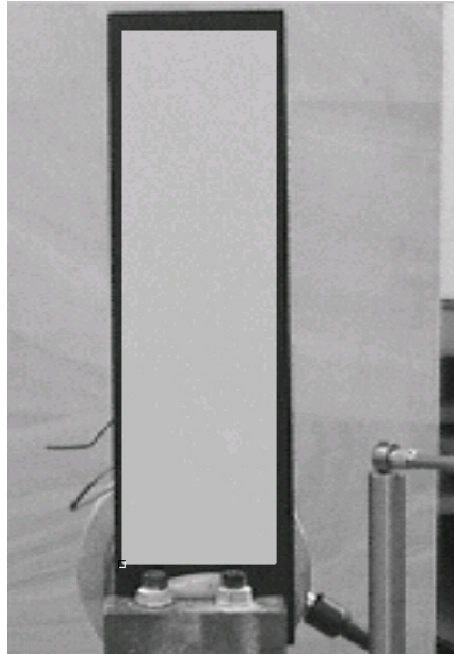


Abb. 42: Amplitudenverteilung bei der Anregungsfrequenz 20 kHz

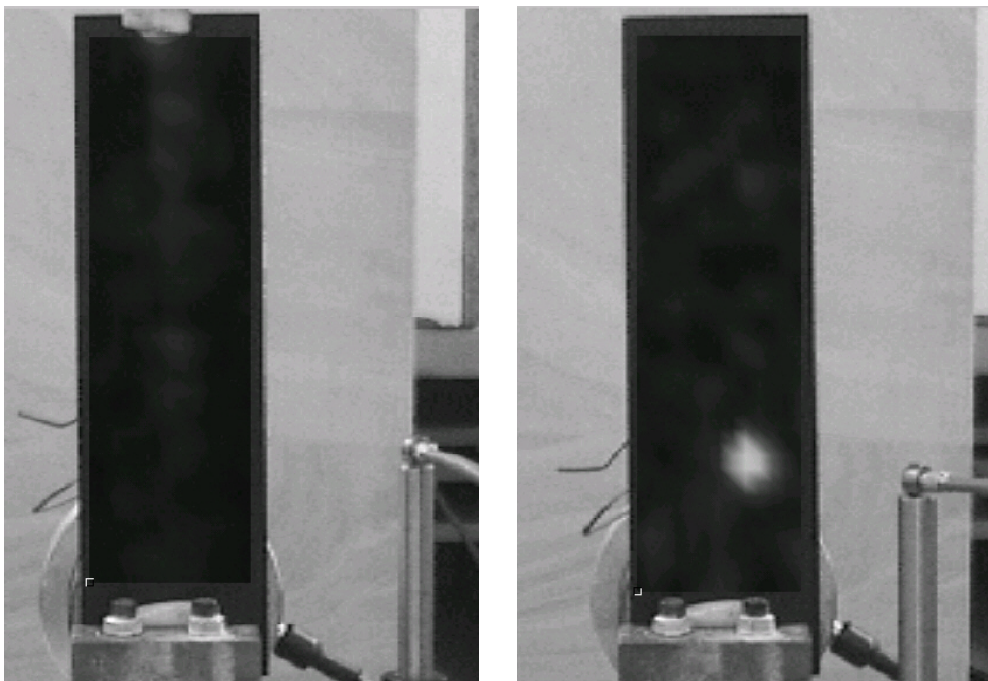


Abb. 43: Amplitudenbilder der 2. Harmonischen vor (links) und nach (rechts) der Schädigung

Aufgrund der duromerischen Matrix (Epoxydharz) führten die hohen Temperaturen zu einer irreversiblen Schädigung, da das Material chemisch verändert wurde. Delaminationen waren die Folge. Besteht allerdings die Matrix aus einem Thermoplast, so müßte eine begrenzte thermische Überlastung ein reversibles Verhalten aufweisen.

b) Reversible thermische Schädigung in PVC

Als thermoplastische Probe wurde eine etwa 4 mm dicke Platte aus Polyvinylchlorid (PVC) gewählt. Die elektrische Anregungsleistung des Ultraschallgenerators betrug 400 W. Zunächst wurde eine Messung der lokalen Spektren während der Bestrahlung mit dem oben erwähnten Diodenlaser durchgeführt (Abb. 44 links). Der erwärmte Bereich weist einen erhöhten Pegel der zweiten Harmonischen auf. Vorsichtiges manuelles Ertasten ergab eine Aufweichung an dieser Position, ohne jedoch ein Fließen zur Folge zu haben. Diese Aufweichung des Materials verursacht statt des linearen, elastischen Verhaltens ein nichtlineares, viskoplastisches. Die Schallwellen werden hier also in ihrer Form verzerrt, und es entstehen Partialtöne höherer Frequenz.

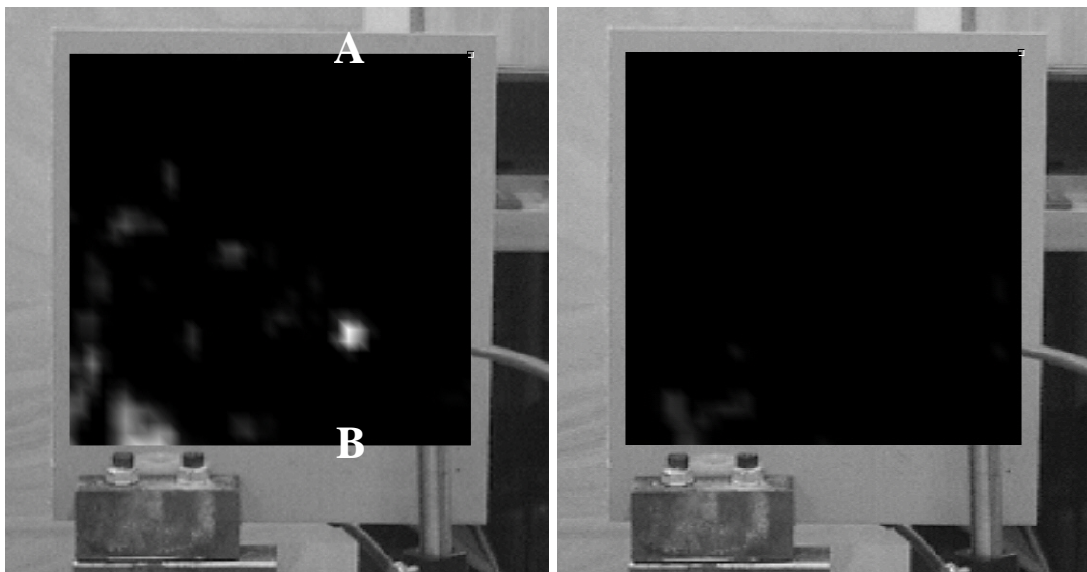


Abb. 44: Amplitudenbilder der 2. Harmonischen (40 kHz) während (links) und nach (rechts) der Aufschmelzung durch einen IR-Laser [92]

Nach dem Abkühlen der Probe auf Raumtemperatur wurde die Messung wiederholt, und das Gebiet nichtlinearen Verhaltens war erwartungsgemäß verschwunden. Es ist außerdem bemerkenswert, daß im Bild nur während der Laserbestrahlung Nichtlinearitäten der Konverterankopplung zu erkennen sind (Abb. 44 links, links

unten). In der Annahme, bei einem weichen Material wie PVC auf ein Kopplungsmedium verzichten zu können, wurde eine direkte Ankopplung gewählt. Dies führte zunächst zu einer Erzeugung höherer Harmonischer. Nach einer gewissen Betriebszeit trat offenbar eine Anpassung der Probenoberfläche an die des Konverters auf, die vermutlich durch eine Erwärmung der Kontaktfläche hervorgerufen wurde. Nach dem Ausspannen der Probe waren Spuren der Ankopplung am Kunststoff sichtbar.

Um den Signal/Rauschabstand und die Ausdehnung der höheren Harmonischen besser einschätzen zu können, wurde ein senkrechter Schnitt über den Meßbereich gelegt, der den erwärmten Bereich schneidet (Abb. 45).

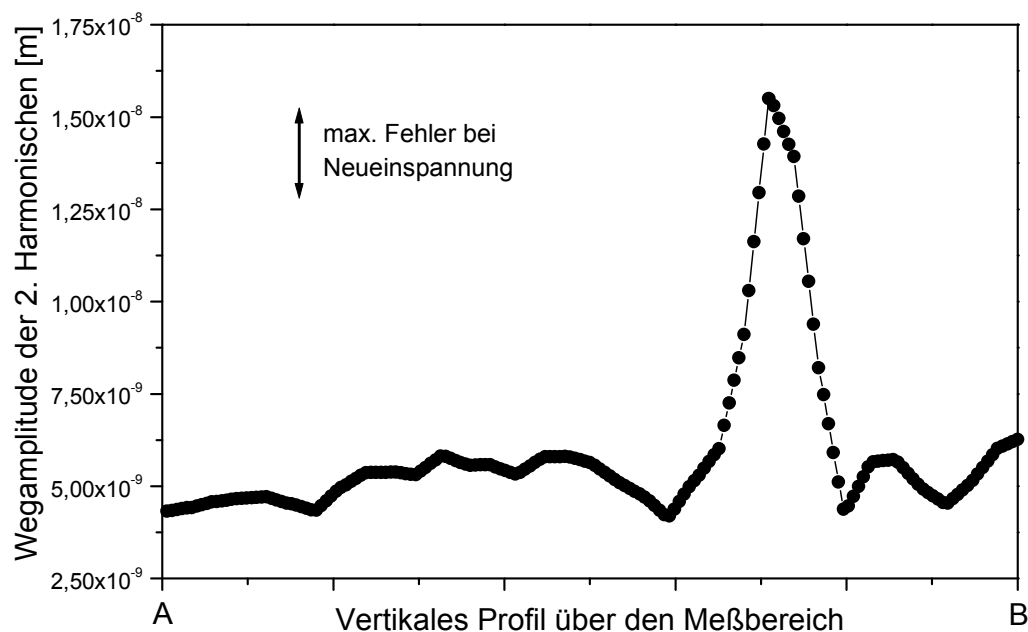


Abb. 45: Amplitudenprofil von A nach B (siehe Abb. 44) über den Aufschmelzungspunkt

Auch im Profil der zweiten Harmonischen ist ein deutliches Maximum erkennbar. Der Signalpegel liegt ca. 10 dB über dem Hintergrund. Man kann außerdem ein leichtes Ansteigen des Hintergrundpegels von oben nach unten (von 0 % nach 100 % erkennen. Ursache hierfür könnten die durch die Ultraschalleinkopplung verursachten höheren Harmonischen sein.

Aufgrund der Symmetrie der Hysterese ist lediglich das Auftreten ungeradzahliger Harmonischer zu erwarten. Die zweite Harmonische entsteht allerdings durch Intermodulation der Anregung mit der dritten Harmonischen (erste Differenzfrequenz) [63] sowie als Differenz zwischen allen anderen ungeradzahligen

Harmonischen (vgl. Abschnitt 2.2.2). Diese mehrfache Modulation ist möglich, da dieser Schaden eine räumliche Ausdehnung besitzt, die die Welle durchlaufen muß.

4.2. Verfolgung der Duroplastvernetzung

Die Möglichkeit des Nachweises viskoplastischen Verhaltens ermöglicht auch die Verfolgung der Aushärtung duroplastischer Kunststoffe, denn es handelt sich um eine zunehmende Verkettung und Vernetzung der Moleküle. Hierbei durchläuft das Material verschiedene Stufen viskoelastischen und -plastischen Verhaltens. Dieser Übergang zum festen Zustand ist charakteristisch für eine Verklebung, und Abweichungen können als Hinweis auf eine reduzierte Qualität angesehen werden [93].

Die Qualitätsüberwachung von Verklebungen hat in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen, da das Kleben die klassischen Fügetechniken zunehmend verdrängt. Neben dem Übergang von metallischen Werkstoffen zu Kunststoffen in vielen technischen Strukturen des Leichtbaus, für die Klebungen bessere Eigenschaften besitzen, haben Klebungen auch allgemeine Vorteile: Die Oberfläche und die Gefügestruktur werden nicht verändert, da keine hohe thermische Belastung wie beim Schweißen auftritt. Die Spannungsverteilung ist konstant über die Klebefläche, so daß Spannungsüberhöhungen vermieden werden. Klebungen sind zudem leichter und im Gegensatz zu z.B. Nietungen dichtend. Bei der Verbindung von verschiedenen Metallen bieten sie den entscheidenden Vorteil, daß sich durch die isolierende Wirkung der Klebschicht keine Kontaktpotentiale aufbauen können; Korrosion wird wirkungsvoll vermieden. Die wesentlichen Unterschiede der verschiedenen Fügetechniken sind in Tabelle 4 [94] zusammengefaßt.

<i>Fügeverfahren</i>		<i>Fügetemperatur</i>	<i>Vorteile</i>	<i>Nachteile</i>
<i>Schweißen</i>		1.000 °C bis 2.000 °C	hohe Festigkeit; Gestaltungsvielfalt der Verbindungsstellen	Vielfalt der zu fügenden metallischen Werkstoffe und deren Kombinationen; Schweißverzug bzw. Versprödung im Schweißnahtbereich infolge hoher Wärmezufuhr; Korrosion
<i>Löten</i>	- <i>Weichlöten</i>	etwa 250 °C	für viele Metalle und Metallkombinationen mit Aktivlöten möglich	Festigkeit gering
	- <i>Hartlöten</i>	etwa 1.000 °C	Dichtheit	hohe Wärmezufuhr

<i>Nieten</i>	-	für viele Metalle und Metallkombinationen; hohe Warmfestigkeit	Spaltkorrosion möglich; eingeschränkte Dichtheit; ungleichmäßige Spannungsverteilung; Gefahr bei Schwingungsbelastung
<i>Schrauben</i>	-	Lösbarkeit und damit hervorragende Reparaturfähigkeit	Gefahr bei Schwingungsbelastung; ungleichmäßige Spannungsverteilung; eingeschränkte Dichtheit
<i>Kleben</i>	Raumtemperatur bis etwa 200 °C	keine bis geringe Wärmebelastung; für fast alle Werkstoffe und Werkstoffkombinationen; Dichtheit; keine Spaltkorrosion; Schalldämmung; Automatisierbarkeit	geringe Belastbarkeit durch Schälbeanspruchung; niedrige Warmfestigkeit; eingeschränkte Prüfmöglichkeiten

Tabelle 4: *Eigenschaften technisch gebräuchlicher Fügetechniken*

Die gute industrielle Integrierbarkeit und die günstigen Eigenschaften führten in den letzten Jahren zu einer Vervielfachung des Einsatzes von Verklebungen im kostenkritischen Automobilbau. Da es sich auch um sicherheitsrelevante Bereiche handelt, sind zuverlässige Prüfmethoden unerlässlich. Aus produktionsökonomischer Sicht ist es ideal, die Qualität einer Verklebung schon während der Herstellung erkennen zu können. Ein zusätzlicher Prüfschritt würde entfallen. Hierzu gibt es bereits eine Vielzahl verschiedener Ansätze [95]. Auch mithilfe nichtlinearen Übertragungsverhaltens von Ultraschallwellen an Fügenschichten konnte die Festigkeit von Verklebungen bereits erfolgreich abgeschätzt [54] bzw. der Aushärtungsgrad bestimmt werden [96].

Zur Untersuchung, ob auch nichtlineare Beeinflussung elastischer Wellen im kHz-Bereich zur Vernetzungsverfolgung geeignet sind, wurde ein piezokeramischer Schwinger mit schnellhärtendem Epoxydharz (UHU plus schnellfest) auf einen CFK-Streifen geklebt (Abb. 46). Die Anregung erfolgte somit direkt mit der Piezokeramik, was einem einfachen Modell einer aktiven Struktur entspricht, für die die Ankopplung der Aktorik von besonderer Bedeutung ist (Siehe Abschnitt 4.3).

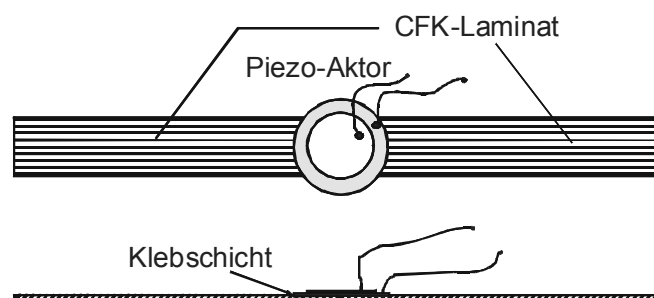


Abb. 46:

Modellprobe zur Vernetzungsverfolgung

Während der Aushärtung wurde der Aktor mit einer Spannung von $10 V_{SS}$ bei einer Frequenz von 1 kHz beaufschlagt und mit dem Laservibrometer in regelmäßigen Zeitintervallen das resultierende Schwingungsspektrum des Aktors gemessen. Die Aushärtungsdauer wurde vom Hersteller mit 20 Minuten angegeben. Aufgrund der niedrigen Anregungsfrequenz (Meßfrequenz zu Bestimmung von Klirrfaktoren nach DIN EN 61305) handelt es sich um eine integrale Messung, die ein nichtlineares Verhalten über die gesamte Probe erfaßt (vgl. Abschnitt 3.3.1). Auswertbare Amplituden konnten nur bei der zweiten, dritten und fünften Harmonischen festgestellt werden, deren zeitlicher Verlauf in Abb. 46 dargestellt ist.

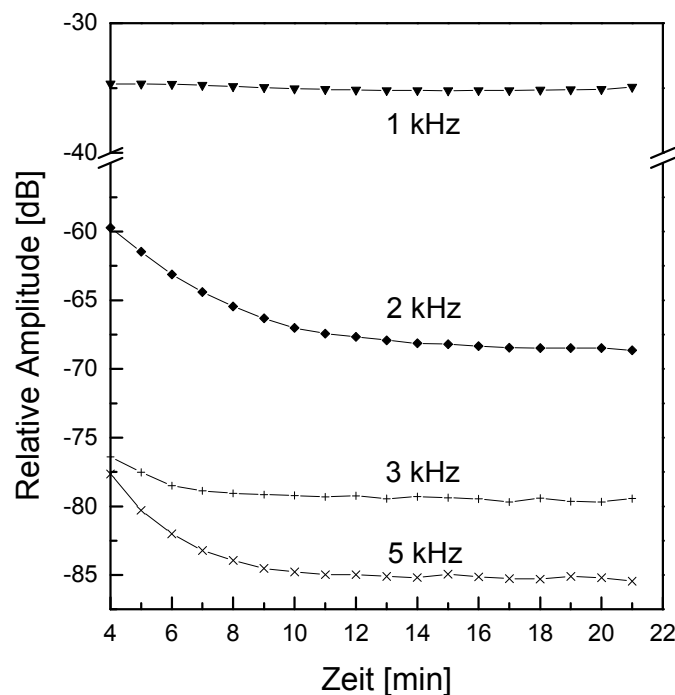


Abb. 47: Pegelverlauf einiger Harmonischer über die Vernetzungszeit von Exoxydharz (integrale Messung)

Mit der Aushärtezeit laufen alle Partialtöne auf ein Plateau, jedoch mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Die zweite Harmonische erreicht diesen Zustand erst deutlich später als die dritte, aber auch etwas später als die fünfte. Bei der Ursache dieses Plateaus kommen verschiedene Ursachen in Betracht: Die zweite Harmonische zeigt hier am wahrscheinlichsten den Grad der Vernetzung, wohingegen das Plateau der beiden höheren Harmonischen vermutlich durch die Nichtlinearität des Meßsystems selbst bestimmt ist (vgl. Tabelle 3 auf Seite 76). Es ist jedoch erkennbar, daß sich die Verfestigung des Epoxydharzes im Grad der Nichtlinearität widerspiegelt, da der Anteil nichtlinearer Viskoelastizität bzw. -plastizität gegen-

über dem linear elastischen abnimmt. Dieses Ergebnis zeigt eine qualitative Übereinstimmung mit [96], wo ebenfalls eine Abhängigkeit der zweiten Harmonischen von der Vernetzung beobachtet wurde.

Im Verlauf der höheren Harmonischen bei der Vernetzung ist insbesondere die Höhe des Plateaus ein wichtiges Kriterium für die Qualität der Verklebung. Bleibt der nichtlineare Anteil auf einem höheren Niveau als bei intakten Vergleichsproben, so deutet dies auf eine unvollständige Vernetzung oder auf eine Delamination hin. Eine Delamination würde vermutlich außerdem das Pegelverhältnis der Harmonischen verändern, da zu der hysteretischen Nichtlinearität noch eine klappernde hinzukommen würde (vgl. Kapitel 2.5).

Liegt ein solcher Befund einer integralen Messung vor, läßt sich die Probe anschließend laservibrometrisch abrastern und ein Abbild der Nichtlinearität erstellen. Die Verklebung des Aktors, dessen Klirrfaktor in Abb. 48 abgebildet ist, wurde halbseitig durch Aufbringung von Öl als Trennmittel gestört. Dieser delaminierte Bereich ist deutlich durch seine erhöhte Nichtlinearität zu erkennen (dunkler Bereich auf Aktor). In der Praxis ließe sich also zunächst die Verklebung in situ verfolgen, um im Fehlerfall eine zeitaufwendigere bildgebende Analyse durchzuführen.



Abb. 48: Klirrfaktorbild eines fehlerhaft verklebten Aktors auf CFK-Struktur

Trotz der Bedeutung der Verklebung von Aktor und Struktur weisen aktive Strukturen noch andere Schädigungsformen auf, die ebenfalls durch ihr nichtlineares Verhalten erkannt werden können.

4.3. Aktive Werkstoffverbunde

Neben ihrer sehr breiten Anwendbarkeit in vielen Bereichen des Leichtbaus besitzen Faserverbundwerkstoffe mit einer Matrix aus Kunststoff einen weiteren wichtigen Vorteil: Bei der Formgebung werden keine großen Kräfte oder hohe Temperaturen benötigt. Dies ermöglicht das Einbringen aktiver Bauteile für sensorische oder aktorische Aufgaben. Im Wesentlichen handelt es sich um elektromechanische Wandler wie Piezoelektrika, Magnetostriktiva oder elektrodynamische Systeme. Das konstruktive Zusammenführen der ursprünglich passiven Faserverbundstruktur mit einer Aktorik/Sensorik, die allein keine mechanischen Lasten aufnehmen könnten, führt zu einem aktiven Werkstoffverbund. Zusammen mit einer Regelung, die die sensorischen und aktorischen Fähigkeiten miteinander verknüpft, entsteht eine „adaptive Struktur“, die sich Lastsituationen oder anderen Anforderungen selbstständig anpaßt [97].

Neben den schwer zu realisierenden statischen oder quasistatischen Anwendungen mit großen Regelwegamplituden ist vor allem ein Einsatz in der Vibroakustik sinnvoll. Im Maschinenbau stellen betriebsbedingte Vibrationen einen erheblichen Teil der Belastung von Maschinenelementen dar. Dies gilt umso mehr, wenn sie noch von aqua- oder aerodynamischen Prozessen verstärkt werden. Auch die akustische Belästigung ist ein wichtiger Faktor. Spätestens in den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts wurden daher aktive Antriebsaufhängungen in U-Booten verschiedener Nationen zur Schwingungsdämpfung experimentell eingesetzt [98]. Auch in der Luftfahrt sind Vibrationen ein ernstzunehmendes Problem, was beispielsweise am Leitwerk der Northrop Grumman F/A 18 durch turbulente aerodynamische Lasten („buffeting“) zu deutlich verfrühten Materialermüdungen führte [99]. Studien an diesem Flugzeugmuster zeigten, daß sich mit adaptiven Strukturen ein erheblich verbessertes Vibrationsverhalten erreichen läßt, das die Belastbarkeit der Struktur und damit neben der Leistungsfähigkeit auch die Lebensdauer erhöht [100].

4.3.1. Delaminationen

Um den zug- und biegeempfindlichen piezokeramischen Aktor zu schützen, ist die Integration in Faserverbundstrukturen sinnvoll (siehe oben). Da an der Grenzfläche des passiven Teils zum Aktor erhebliche Lasten übertragen werden müssen,

kommt es häufig zu Enthaltungen. Die glatte bzw. metallisierte Oberfläche der Keramik ist außerdem nur schlecht verklebbar.

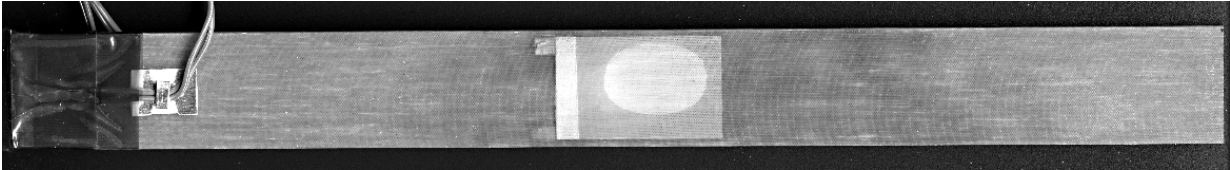


Abb. 49: Unidirektionales GFK-Laminat mit integrierter delaminierter Aktorik

Abb. 49 zeigt eine aktive Struktur aus einem unidirektionalen Laminat (Epoxydharz mit Glasfaserverstärkung, Dicke 2,5 cm), in das ca. 0,4 mm (zwei Prepreglagen) unter der Oberfläche auf beiden Seiten ein piezokeramischer Aktor eingebettet wurde. Nach einer Belastung von $100 V_{\text{eff}}$ mit einer Frequenz von 1 kHz über einige Minuten entstand oberhalb eines Aktors eine ellipsenförmige Delamination, die auch im optischen Bild erkennbar ist. Diese Probe wurde freundlicherweise von Herrn Dipl.-Ing. M. Flock (Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart) zu Verfügung gestellt.

Die integrierte Aktorik eignet sich gut zur Anregung einer aktiven Struktur (vgl. Abschnitt 3.1.2), was für das Ergebnis in Abb. 50 ausgenutzt wurde [101].

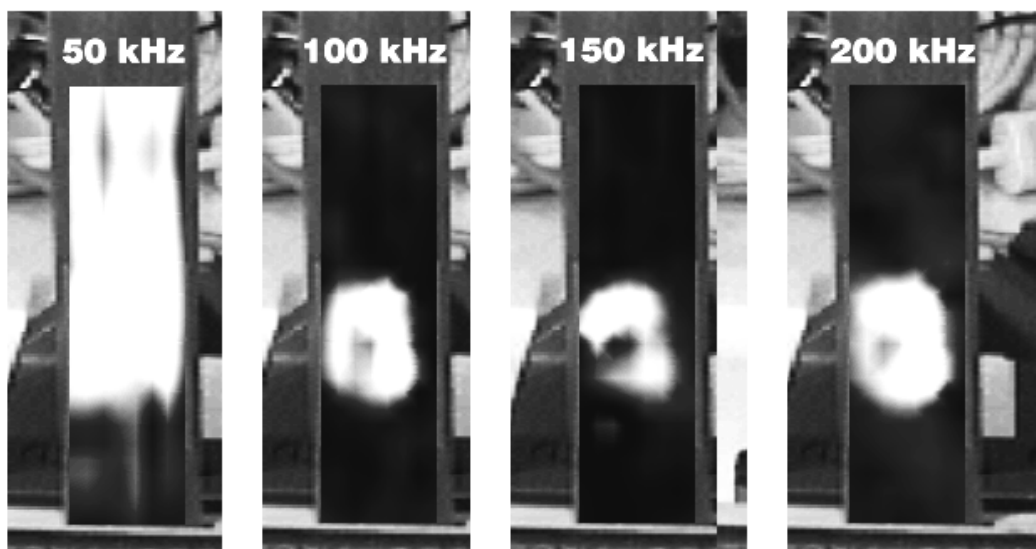


Abb. 50: Amplitudenbilder der ersten vier Harmonischen (Anregung bei 50 kHz)

Die Delamination besitzt bei etwa 50 kHz (Wellenlänge ca. 1 cm) eine strukturu-nabhängige Resonanz (vgl. Abschnitt 3.2.2), bei der besonders viel Leistung in den Defekt eingebracht werden kann. Eine Eingangsspannung von $16 V_{\text{eff}}$ reichte bereits aus, um die enthafte Fläche vollständig durch ihr nichtlineares Verhalten

sichtbar zu machen. Bei der Anregungsfrequenz selbst ist der Defekt nicht erkennbar, sondern lediglich der aus der einseitigen Einspannung resultierende Amplitudengradient am unteren Rand der Probe.

Das Vorhandensein einer reinen Resonanz des Defektes deutet auf einen großen akustischen Impedanzunterschied zwischen enthafteeter Deckhaut und umgebender Struktur hin, der zu einem membranartigen Verhalten führt. Erwartungsgemäß zeigt sich dies auch in der starken Lokalisation der höheren Harmonischen, die ihren Entstehungsort nicht verlassen können, weil sie an der Impedanzbarriere reflektiert werden. Die Amplitudenspektren auf und neben der Delamination (Abb. 51), die mit einem Abstand von ca. 1 cm aufgenommen wurden, weisen daher deutliche Unterschiede auf.

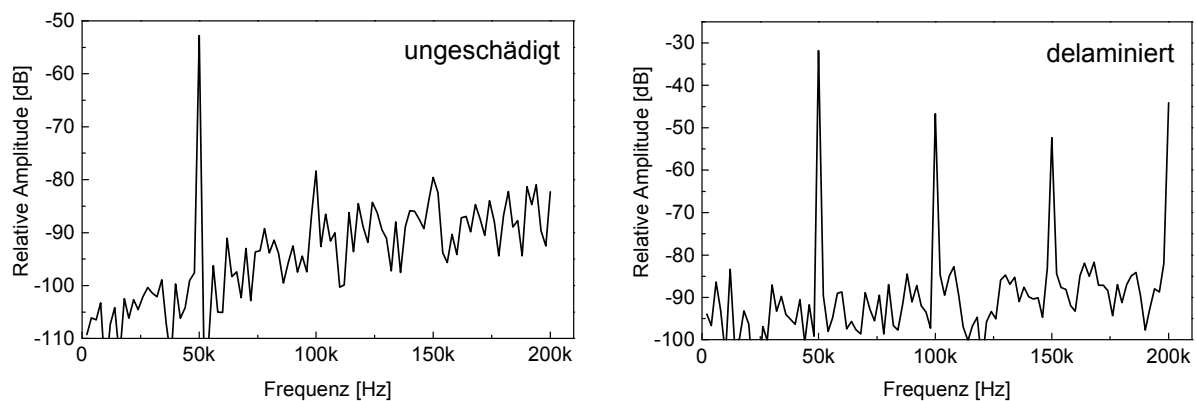


Abb. 51: Lokale Amplitudenspektren neben (links) und auf der Enthaftung (rechts)

Im ungeschädigten Bereich besitzt z.B. die zweite Harmonische einen um 26 dB niedrigeren Pegel als die Anregung, während sie auf dem Defekt nur noch 14 dB unterhalb des Anregungspegels liegt. Dieser am geringen räumlichen Abstand gemessene große relative Pegelunterschied von etwa Faktor vier ermöglicht eine scharfe Abbildung des Defektumrisses durch die höheren Harmonischen. Eine Enthaftung des Aktors selbst stellt eine besonders günstige Konstellation dar, weil die Grenzflächen hier unmittelbar zur Relativbewegung gebracht werden. Abb. 52 zeigt die Effizienz der Nichtlinearität am Beispiel der zweiten und dritten Harmonischen.

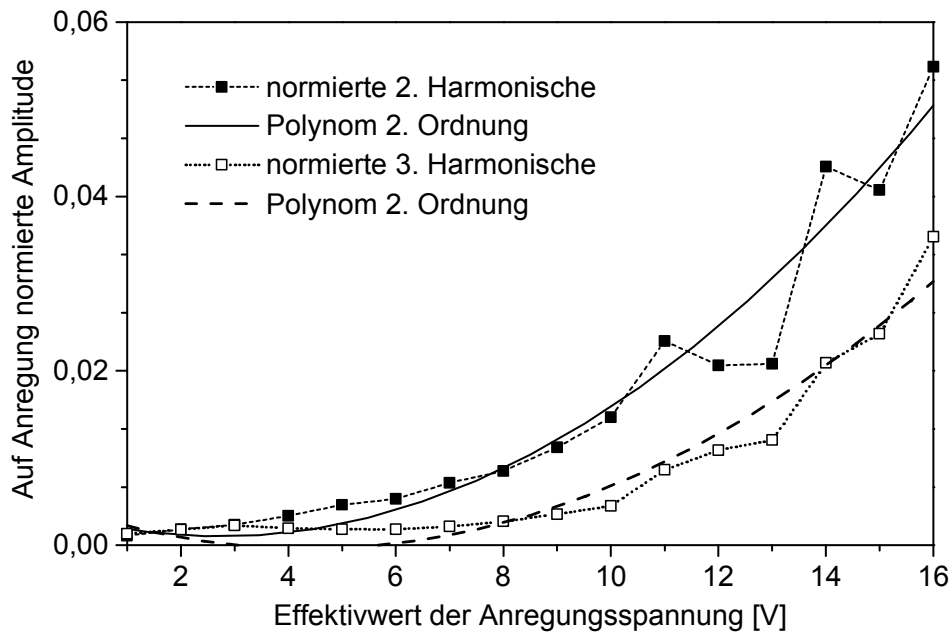


Abb. 52: Lokale Pegelabhängigkeit der 2. und 3. Harmonischen

Die Pegelabhängigkeit läßt sich gut durch Polynome 2. Ordnung beschreiben, da vermutlich sowohl hysteretische (quadratische Abhängigkeit, siehe Gl. 71) als auch klappernde Nichtlinearität beteiligt sind (lineare Abhängigkeit für kleines $\varepsilon^0/\varepsilon_0$, s. Gl. 51).

Es können jedoch auch Enthaltungen im passiven Teil der Struktur nachgewiesen werden, wobei ebenfalls die integrierte Aktorik zur Anregung benutzt wird. Die in Abb. 53 dargestellte aktive Struktur ist mit vier zweilagigen Aktorelementen (ACX QP 20N, siehe Anschlüsse A bis D) versehen, die oberflächennah in das quasiisotrope Kohlefaser-Epoxydharz-Laminat eingebettet sind. Diese Probe wurde freundlicherweise von Herrn Dipl.-Ing. J. Dürr (Fa. DaimlerChrysler Aerospace Dornier GmbH) zu Verfügung gestellt. Zwischen jeweils zwei Prepreglagen wurden außerdem an zwei Positionen kreisförmige PTFE-Folien eingebracht, die lokal zu einer Enthaltung führen sollen. Ultraschall und thermografische Voruntersuchungen zeigten dort jedoch keine ausgeprägten Grenzflächen. Erst eine mechanische Belastung im Drei-Punkt-Biegeversuch trennte die PTFE-Folie vom umgebenden Epoxydharz. Der künstliche Defekt auf dem rechten oberen Aktor B wurde jedoch unbehandelt gelassen, um die Piezokeramik nicht zu beschädigen. [102]

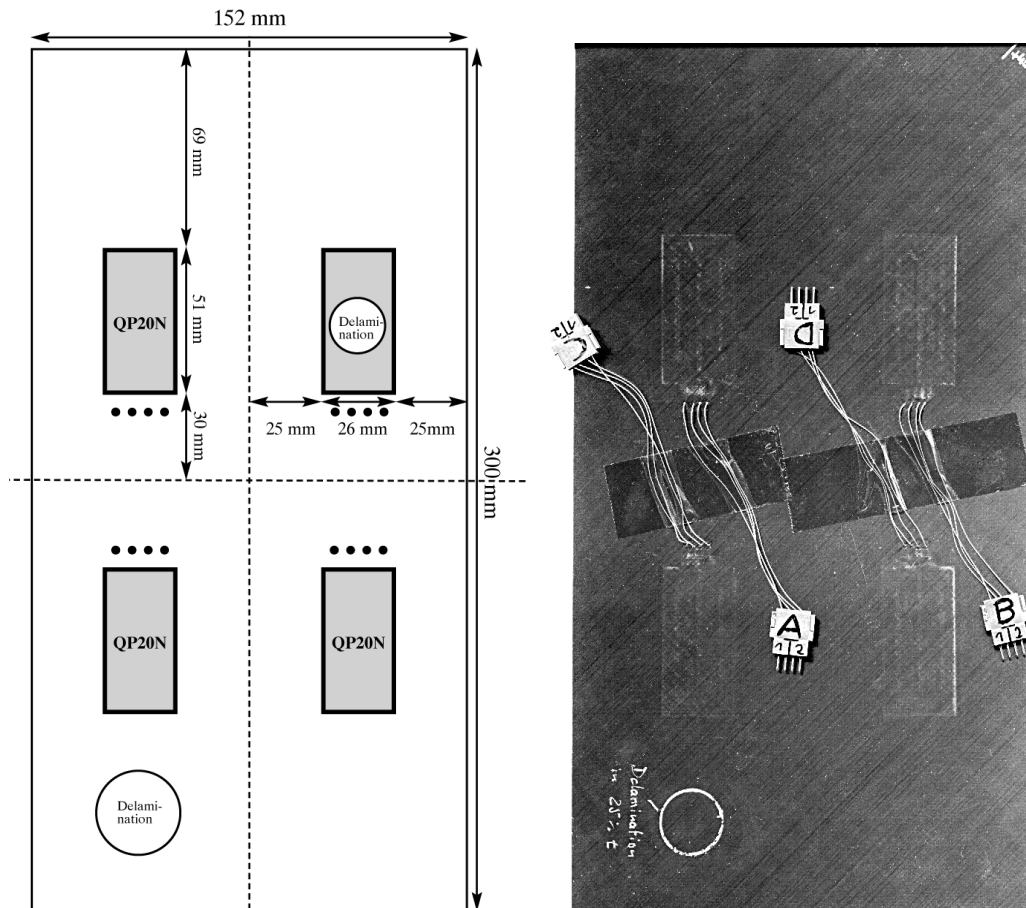


Abb. 53: Aktive CFK-Struktur; Skizze des Aufbaus (links), optisches Bild (rechts)

Die Anregung für die bildgebende nichtlineare Schwingungsanalyse wurde durch den Aktor C durchgeführt, der der unteren Delamination am nächsten liegt. Eine Anregungsfrequenz von 40 kHz erwies sich als günstig, um eine möglichst gute Abbildung bei $16 V_{\text{eff}}$ zu erreichen (Wellenlänge etwa 1,5 cm).

Abb. 54 zeigt die Amplitudenbilder der ersten drei Harmonischen. Bei der Anregungsfrequenz ist lediglich die Momentaufnahme des instationären Wellenfeldes ohne die symmetrische Struktur einer Eigenschwingung zu erkennen. Die zweite und dritte Harmonische (80 und 120 kHz) markieren die künstliche Delamination allerdings durch einen erhöhten Pegel

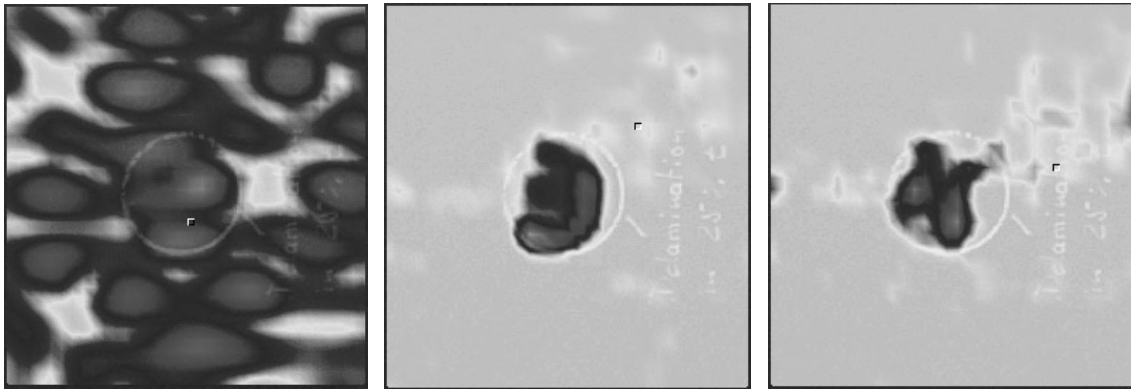


Abb. 54: Amplitudenbilder der Anregungsschwingung (40 kHz, links), der 2. Harmonischen (80 kHz, Mitte) und der 3. Harmonischen (120 kHz, rechts)

Die gut konturierte Abbildung des enthaf teten Bereichs deutet auch hier auf einen nicht vernachlässigbaren Impedanzunterschied zu den Defekträndern hin. Die Spektren auf und neben der künstlichen Delamination weisen ebenfalls deutliche Pegelunterschiede der höheren Partialtöne auf.

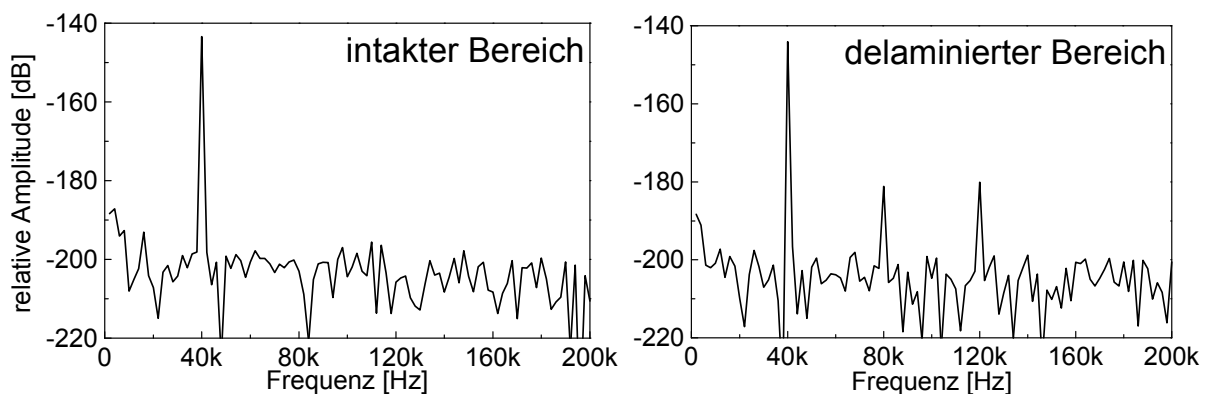


Abb. 55: Amplitudenspektren neben (links) und auf der künstlichen Delamination (rechts)

Im intakten Bereich ist keinerlei nichtlineares Verhalten erkennbar, während die Schädigung Harmonische mit einem Pegel von -36 dB relativ zur Anregung verursacht.

4.3.2. Einbettungsqualität der Aktorik und Risse in Piezokeramik

Die Integration piezokeramischer Aktoren in einen Faserverbundwerkstoff ist mit vielen Schwierigkeiten verbunden, die Folge des Härtevorgangs des Harzes sind. Um einen möglichst hohen Faseranteil mit geringem aber homogenen Harzgehalt zu erzielen, wird das Bauteil im Autoklaven unter hohem Druck ausgehärtet, wobei das noch flüssige Harz herausgepreßt wird. Der Aktor stellt hierbei eine Störung im Laminat dar, an der erhebliche Spannungskonzentrationen auftreten können. Die fragile Piezokeramik bricht deshalb während der Herstellung leicht. Brüche verrin-

gern zwar die aktorische Leistungsfähigkeit nicht unmittelbar, oft wird jedoch die elektrische Kontaktierung getrennt, so daß nur noch ein Teil der Keramik ansteuerbar ist. Neben der Metallisierung verwendet man deshalb noch zusätzlich Kupfernetze zur Kontaktierung, die auch nach einem Bruch noch eine vollständige Kontaktierung sicherstellen.

An solchen Störungen entstehen außerdem erhöhte Harzkonzentrationen („Harztaschen“), die nach dem Aushärten die mechanische Leistungsfähigkeit herabsetzen. Fehler im Autoklavprozeß führen zudem zu einer unvollständigen Aushärtung des Harzes im Inneren des Laminats. Von beiden beschriebenen Schädigungen, Brüchen und schlechter Vernetzung, ist nichtlineares Verhalten zu erwarten.

Zur Untersuchung des Einflusses der Einbettung auf die Leistungsfähigkeit einer aktiven Struktur wurde eine GFK-Struktur hergestellt, deren Aktor von einer Thermoplastschicht umgeben ist (Abb. 56 rechts). Die Festigkeit dieser Schicht kann durch einen zusätzlich integrierten Heizdraht gesteuert werden. Der Heizdraht führte aber bei der Aushärtung zu Brüchen in der Piezokeramik, die einen Teil des Aktors inaktiv machte (Abb. 56 links, heller Bereich).

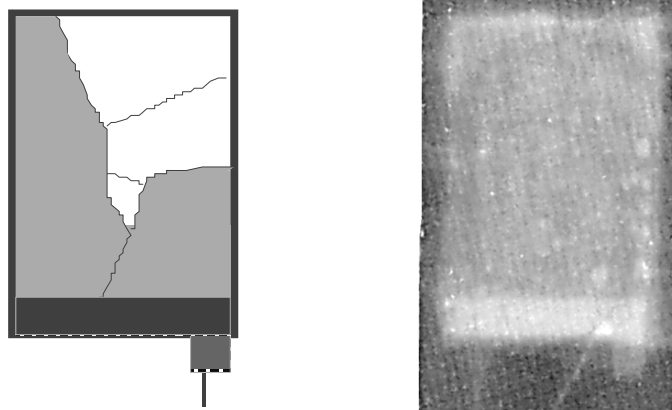


Abb. 56: Integrierte Piezokeramik mit Riß; Skizze (links), optisches Bild (rechts)

Im beheizten Zustand treten hier also zwei Quellen der Nichtlinearität auf, die sich gegenseitig überlagern. Eine Temperaturabhängigkeit ist auch bei der Bruchnichtlinearität zu erwarten, da eine Relativbewegung der Grenzflächen im erstarrten Zustand des Thermoplastes verhindert wird. Durch die unterschiedlichen Prozesse, Hysterese und Klappern, liegen verschiedene spektrale Verteilungen vor. Im beheizten Zustand sind daher auf und neben dem Riß der beschriebenen Probe ver-

schiedene Partialtonspektren bei einer Anregung mit 20 kHz nachweisbar (Abb. 57, [103]).

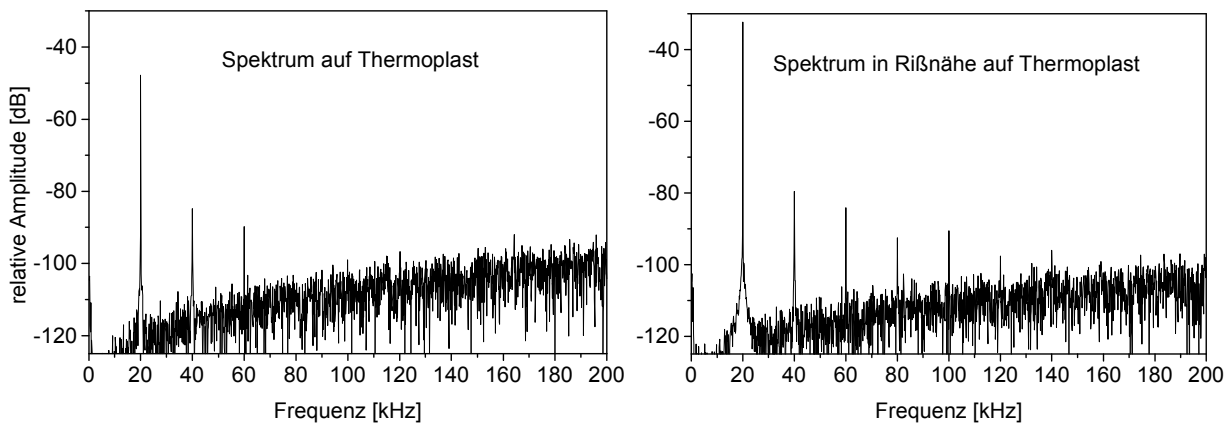


Abb. 57: Amplitudenspektren auf (links) und neben dem Riß (rechts)

Auf dem weichen Thermoplast sind lediglich die zweite und dritte Harmonische eindeutig meßbar, was auf eine quadratische bzw. kubische Nichtlinearität hindeutet. Dies deckt sich mit den Beobachtungen aus den Abschnitten 4.1.3 und 4.2. In der Umgebung der Rißlinien treten allerdings zusätzlich noch Partialschwingungen höherer Ordnungen auf, die sich aufgrund der hohen akustischen Dämpfung kaum ausbreiten. Abb. 58 [103] zeigt die Amplitudenverteilungen der zweiten Harmonischen auf dem Aktor bei verschiedenen Heizströmen bzw. Temperaturen. Die Anregung erfolgte ebenfalls mit einer Frequenz von 20 kHz bei $16 V_{\text{eff}}$.

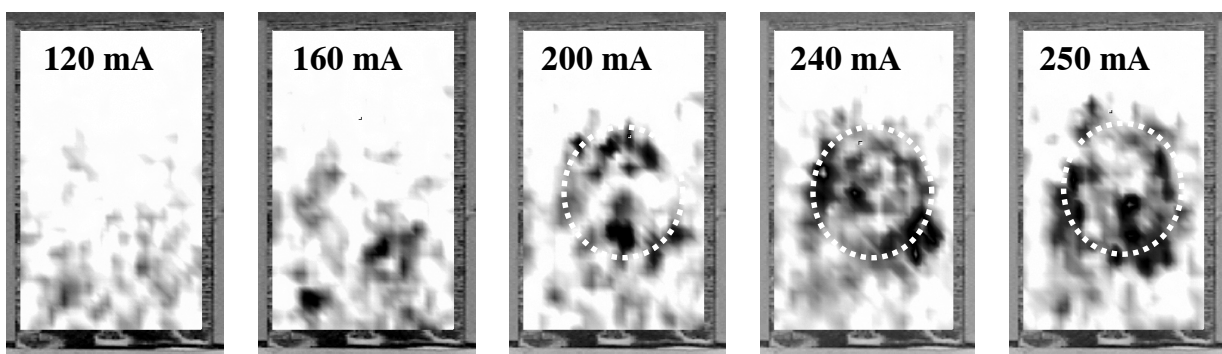


Abb. 58: Amplitudenbilder der 2. Harmonischen (40 kHz) bei verschiedenen Heizströmen

Mit steigender Temperatur nimmt das nichtlineare Verhalten in einem Bereich auf dem Aktor zu, der ungefähr der Lage des in mehreren Schleifen ausgelegten Heizdrahtes entspricht (weißer gepunkteter Kreis). Eine deutliche Korrelation mit dem Rißverlauf ist nicht erkennbar. Verwendet man jedoch die vierte Harmonische zur

Bildgebung, so betrachtet man weniger die hysteretische Nichtlinearität als die der Bruchflächen (Abb. 59, [103])

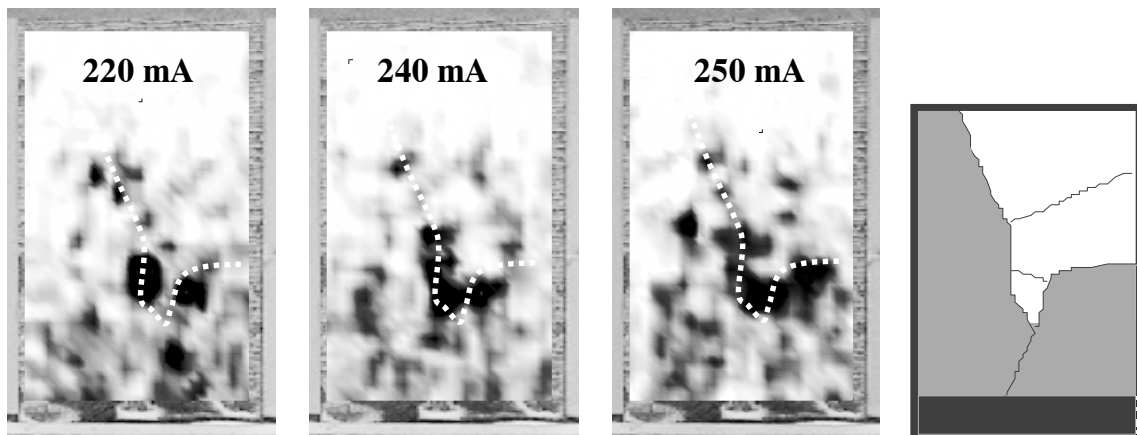


Abb. 59: Amplitudenbilder der 4. Harmonischen (80 kHz) bei verschiedenen Heizströmen

Der Rißverlauf an der Grenze zwischen aktivem und passivem Teil der Keramik (weiße gepunktete Linie) ist trotz des hohen Hintergrundsignals durch die Nichtlinearität des Thermoplastes nachweisbar, allerdings nur der Bereich mit senkrechter Ausrichtung zur Längsrichtung des Aktors. In dieser Richtung hat der Aktor seine größte Dehnungsamplitude, so daß hier vermutlich auch die Grenzflchenbewegung maximal ist.

Unter Bedingungen wie bei der oben beschriebenen Probe können also Partialtnen verschiedener Ordnung Merkmale zugeordnet werden, die auf die Art der beteiligten Nichtlinearität und damit auf die Defektmechanik hinweisen.

4.4. Metalle

Metalle sind den Menschen seit etwa 10000 Jahre bekannt [104] und zählen seit ungefähr 6000 Jahren zu den technischen Werkstoffen [105]. Die Bandbreite ihrer mechanischen Eigenschaften ist groß und läßt sich durch Legieren optimieren. Durch ihre freien Elektronen besitzen sie eine hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit. Störstellen im Kristallgitter wie Einschlüsse und Versetzungen sorgen durch Umsetzung von Energie trotz der kristallinen Struktur für ein duktiles, plastisches Deformationsverhalten, das man durch gezielte Schädigung (Einfügen künstlicher Störstellen) beeinflussen kann. Ein Beispiel hierfür ist das Schmieden, das durch mechanische Deformation ein Werkstück formt und zugleich hrtert, weil die starke Erhöhung der Versetzungsdichte und zusätzlicher Kohlenstoff im Gitter die Versetzungswanderung behindern. Diese älteste Form der Metallbearbeitung wurde

aber schon bald durch die heute wichtigste Form der Verarbeitung ergänzt: die thermische Umformung [106]. Das Metall wird über seinen Schmelzpunkt hinaus erwärmt, um schließlich in der Zielform zu erstarren.

4.4.1. Risse

Durch den Metallguß lassen sich zwar komplexe Bauteilgeometrien realisieren, die thermisch bedingten mechanischen Spannungen können jedoch beim Abkühlen zu Rissen führen.

Diese Risse treten bevorzugt an den Stellen auf, die auch im Betrieb des Bauteils belastet werden, so daß mit einem schnellen Rißwachstum zu rechnen ist: Ein kleiner Riß, der das Material zunächst kaum schwächt, wächst an den Rißspitzen, da hier die höchsten lokalen Spannungen auftreten. Die Plastizität des Metalls sorgt zudem dafür, daß Risse aufklaffen. Defektselektive Prüfverfahren, die auf Grenzflächeneffekten ansprechen, können hier also nur die Rißspitzen detektieren. Für die Einschätzung der Rißlänge, die als Schädigungsmaß gebräuchlich ist, ist dies allerdings auch ausreichend. Die besondere Eignung dieser Verfahren in der Rißerkennung hat zwei Gründe: Es können Defekte erkannt werden, die kleiner sind als die Rasterweite der Abtastung (scannende Laservibrometrie) bzw. der äquivalenten Pixelgröße (Thermographie) auf der Oberfläche, weil sich das Defektmerkmal (höhere Harmonische, thermische Wellen) auch in die Defektumgebung ausbreiten.

Außerdem kann eine Anregung verwendet werden, die die Bauteilbelastung im Betrieb nachahmt. Dies ist nützlich, da vor allem Risse in stark belasteten Bereichen angeregt werden. Deshalb wird schon durch das Prüfverfahren selbst eine Gewichtung nach der Relevanz eines Schadens vorgenommen.

Abb. 60 ist die Skizze einer etwa 4 mm dicken, 400 mm langen und 80 mm breiten Stahlprobe, die durch Zugbelastung mit einem Riß geschädigt wurde. Ausgehend von einer Initialbohrung dehnt sich der Riß senkrecht zur Zugrichtung in beide Richtungen ca. 1,5 cm aus.

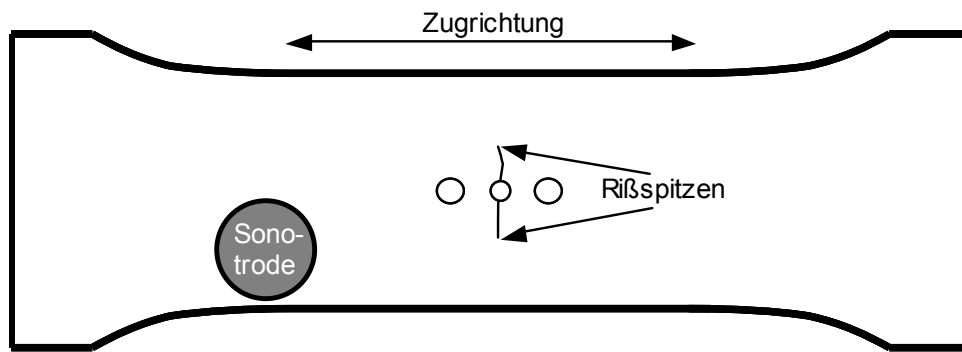


Abb. 60: Skizze der Stahlzugprobe mit Riß (nicht maßstabsgetreu)

Die Anregung erfolgte mithilfe eines Schweiß-Ultraschallkonverters, angepreßt an die Stahlplatte mit Papier als Kopplungsmedium. Der Generator wurde mit einer elektrischen Ausgangsleistung von 400 W betrieben.

Im Amplitudenbild der fünften Harmonischen (Abb. 61) sind erwartungsgemäß hauptsächlich die Rißspitzen durch nichtlineares Verhalten nachweisbar [107]. Desweiteren zeigt sich auch ein kleiner Bereich des Risses und die Umgebung der Initialbohrung. Die Ursache könnte die für Risse durch Zuglast typische Relaxation sein, die zu einem teilweisen Schließen der Grenzflächen bei Entlastung führt. An der Probenoberfläche war zum Zeitpunkt der Messung außerdem bereits Korrosion sowie Bohrungsgrat sichtbar, die ebenfalls nichtlineares Verhalten verursachen können (s. folgender Abschnitt).

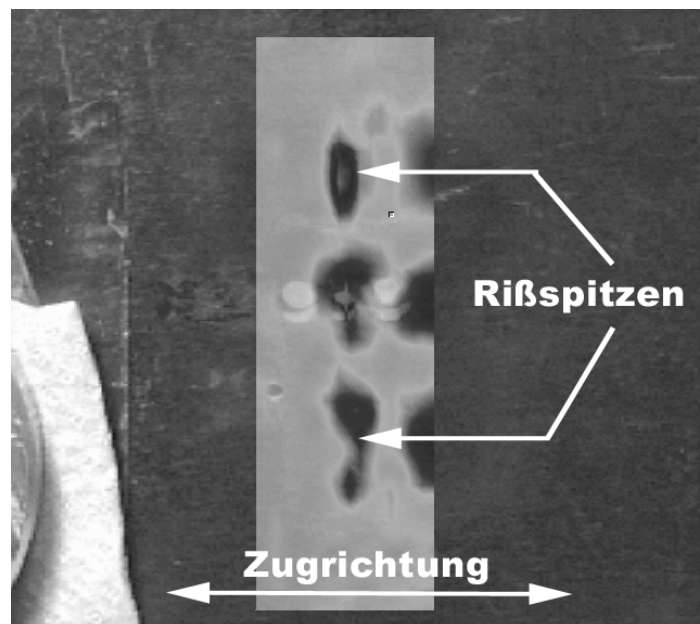


Abb. 61: Stahlprobe mit Riß (s. Abb. 60), Amplitudenbild der 5. Harmonischen (100 kHz)

Die Rißspitzen sowie das Bohrloch zeigen sich ebenfalls in den Ergebnissen der ultraschallangeregten Lockin-Thermografie [108]. Die nichtlinearen Bereiche weisen also auch hysteretische Verluste auf.

Im Flugzeugbau wird vor allem Aluminium in Primärstrukturen verbaut, da es ein günstigeres Dichte/Festigkeitsverhältnis als Stahl besitzen. Aluminium neigt jedoch zu Ermüdungsrissen, da hier größere Verformungsamplituden während des Betriebs (z.B. Start und Landung) gegenüber Stahl hingenommen werden müssen. Dieses Problem wird durch die Vernietung der Strukturen noch verstärkt, die wie Initialbohrungen wirken. Das Schweißen von Aluminium ist jedoch keine Alternative, da es unverhältnismäßig aufwendiger ist als die Vernietung.

Die Rißbildung erfolgt häufig häufig zwischen zwei Nietlöchern, so daß Nietreihen besonders betroffen sind. Hier kann es zu einem kritischen Versagen führen, indem sich der Riß sukzessive von einem Niet zum nächsten ausbreitet, bis es schließlich zur vollständigen Strukturtrennung kommt [109].

Die in Abb. 62 dargestellte Probe mit einer Nietreihe wurde freundlicherweise von der Luftwaffenwerft 13 (Erding) zur Verfügung gestellt. Zwischen dem siebten und achten Niet (v.l.n.r.) befindet sich ein mit bloßem Auge nicht sichtbarer Riß, der mit Wirbelstrom nachweisbar ist [92].

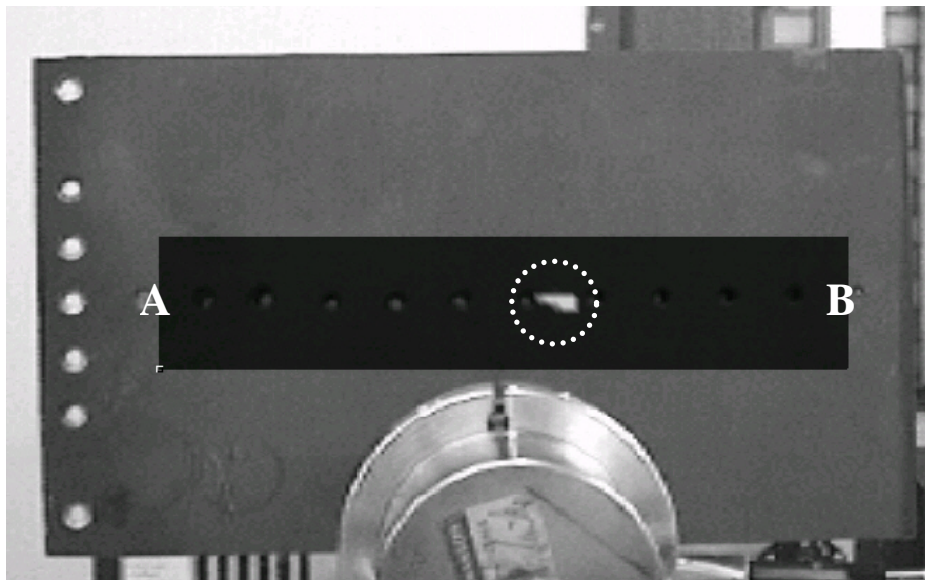


Abb. 62: Al-Probe mit Riß, Amplitudenbild der 4. Harmonischen (80 kHz)

Die Amplitude der vierten Harmonischen zeigt an der Position des Risses eine deutliche Erhöhung (umkreist). Es sind jedoch nicht nur die Rißspitzen erkennbar, sondern die gesamte Länge. Ursache sind vermutlich die Bohrlöcher der Niete, die

für einen konstanten Grenzflächenabstand über die Rißlänge sorgen. Es existieren keine ausgeprägten Rißspitzen mehr. Erreicht die Anregungsamplitude diesen Abstand der Rißflächen, so wird die gesamte Rißlänge zu nichtlinearer Interaktion angeregt. Die Anregungswellenlänge betrug hier etwa 2,5 cm (20 kHz).

Legt man eine Profillinie der Amplitude des vierten Partialtons über die Nietreihe (Abb. 63), ist auch hier nur ein Maximum erkennbar, daß den Riß markiert. Dieses Maximum liegt ca. um den Faktor 7 (~ 17 dB) über dem Pegel der Umgebung, was angesichts der geringen Materialdämpfung für Wellen des benutzten Frequenzbereichs als ein günstiger Wert anzusehen ist. Im Hintergrundsignal sind neben denen des Defektes allerdings auch Harmonische der Anregung selbst enthalten. Die Welligkeit des Untergrundsignals korrespondiert grob mit den benachbarten Nietbohrungen und ist reproduzierbar; bei erneuter Einspannung an gleicher Position ist von einem Fehler $< 10\%$ auszugehen.

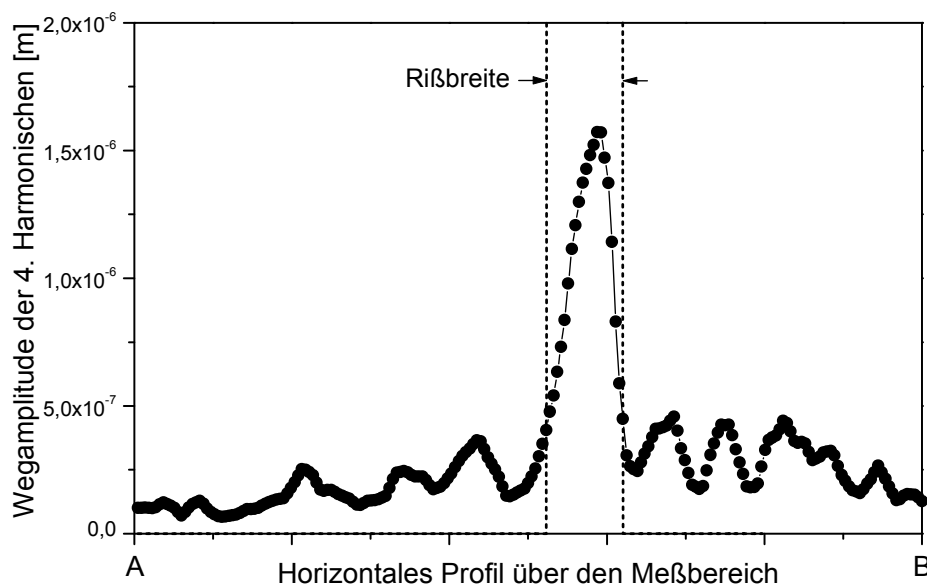


Abb. 63: Amplitudenprofil zwischen den Punkten A und B in Abb. 62

Es ist überraschend, daß ein Riß in einem Material mit geringer akustischer Dämpfung dennoch gut lokalisiert werden kann. Für einen idealen Riß, der Harmonische aus einem diffusen Anregungsschallfeld erzeugt, ist eine dipolartige Winkelabhängigkeit der Amplitude zu erwarten. Zur Überprüfung dieser Annahme wurde aus den Amplituden auf dem in Abb. 62 dargestellten Kreis ein Polardiagramm erstellt (Abb. 64).

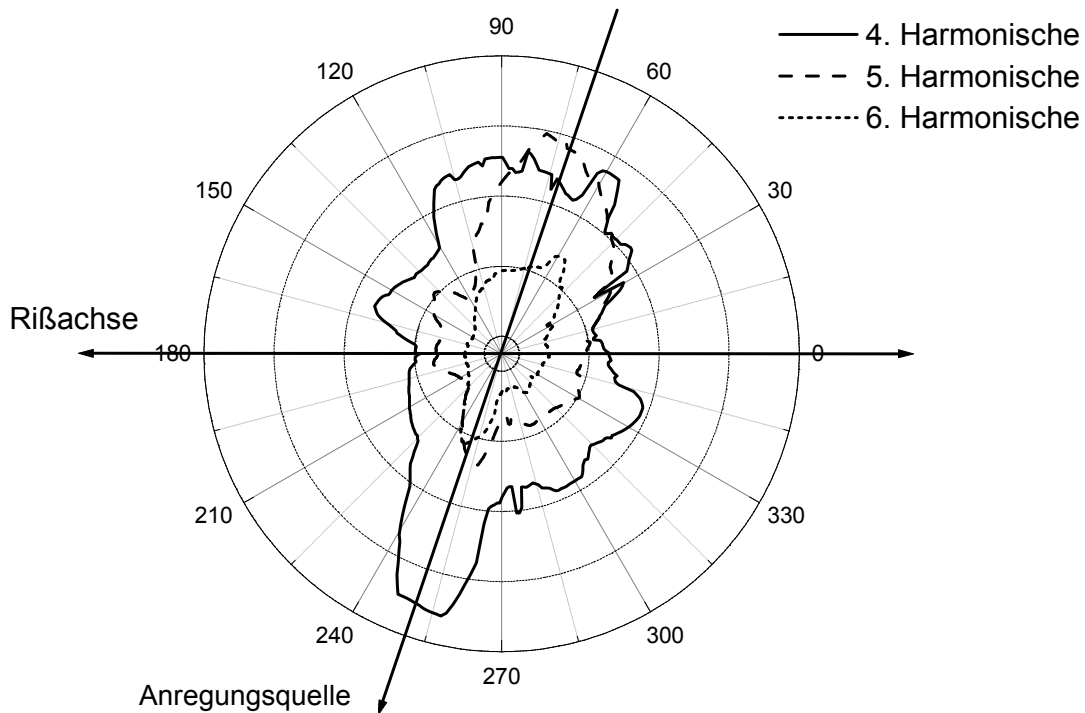


Abb. 64: Polardiagramm harmonischer Amplituden in Rißumgebung (Kreis in Abb. 62)

Es ist eine ausgeprägte Richtcharakteristik des Defektschallfeldes erkennbar, die jedoch nicht wie erwartet senkrecht zum Riß steht. Da hier für die Anregung aufgrund der Bauteilgröße und der geringen Dämpfung von einem diffusen Anregungsschallfeld auszugehen ist, kann die Drehung der Maxima nur durch die höheren Harmonischen der Anregung erklärt werden. Diese nehmen geometrisch mit dem Abstand zur Quelle ab und werden den Defektharmonischen überlagert. Dies verursacht die Drehung der Maxima sowie die Asymmetrie in Richtung der Schallquelle.

4.4.2. Korrosion

Abgesehen von den „weichen“ Edelmetallen der ersten Hauptgruppe des Periodensystems der Elemente (Kupfer, Silber und Gold), neigen alle strukturell genutzten Metalle zu einer chemischen Reaktion mit Sauerstoff. Freie Protonen in Wasser begünstigen diese Oxidation. Ein Materialverlust ist die Folge, da die Metalloxidmoleküle nicht mehr im Kristallgitter eingebunden sind. Die Festigkeit nimmt deshalb durch die Korrosion ab. Dies verändert auch in starkem Maße die akustische Impedanz, so daß dieser Materialabtrag durch Ultraschallaufzeitmessungen ermittelt werden kann [110].

Die freien Elektronen der Metalls sind im Oxid gebunden, was die elektrische und thermische Leitfähigkeit sowie die vorher gute Reflektivität für elektromagnetische Wellen stark herabsetzt: die spiegelnde Oberfläche wird diffus reflektierend bzw. spektral gewichtet. Befindet sich die Korrosion auf der Prüfseite einer Probe, so kann sie sowohl optisch als auch durch Wirbelstromuntersuchungen nachgewiesen werden. Es lassen sich auch die geänderten mechanischen Eigenschaften der Korrosion direkt nutzen. Da Korrosion neben der reinen Flächenkorrosion bevorzugt an Korngrenzen und Spalten in das Material eindringt [111], entstehen oft schuppenartige Partikel verschiedenster Größe. Diese besitzen noch einen Kern aus Metall, der mit der Oberfläche verbunden ist. Ultraschall wird häufig zur Entfernung derartiger korrosiver Schichten benutzt, da die hierbei auftretenden hohen Beschleunigungen ausreichend sind, die Partikel von der Oberfläche zu trennen [112]. Geringere Amplituden regen hingegen lediglich eine Relativbewegung der Metalloxidpartikel gegenüber der Metalloberfläche an. Es kann hierbei sowohl zur tangentialen Bewegung (Reibung) als auch zu normaler (Klappern) kommen, was sich thermisch und durch nichtlineares Verhalten äußern muß.

In Abb. 65 ist ein beidseitig korrodiertes Aluminium Höhenruderlager eines Reiseflugzeuges (Piper PA 28) dargestellt. In der achten Harmonischen zeigt sich in der oberen linken Ecke ein stark korrodierter Bereich (dunkel), der auch optisch gut erkennbar ist. Die Schalleinleitung erfolgte am gegenüberliegenden Ende der Probe (siehe Abb. 65 unten) mit einer elektrischen Leistung von 300 W.

Ein Blick auf die Rückseite zeigt an dieser Position ebenfalls Korrosion. Mit unveränderter Anregungsposition und 200 W Leistung ergibt sich für die dritte Harmonische Abb. 66. Die Schädigung bzw. Bereich hoher Nichtlinearität, der auch mit bloßem Auge erkennbar ist, deckt sich mit dem von der Vorderseite. Die Oberfläche zeigt auf beiden Seiten kleine zusätzliche Maxima der Harmonischen. Dort ist aber keine Korrosion erkennbar. Hierbei könnte es sich um verdeckte Schädigungen (Risse etc.) oder Artefakte der Anregung handeln.

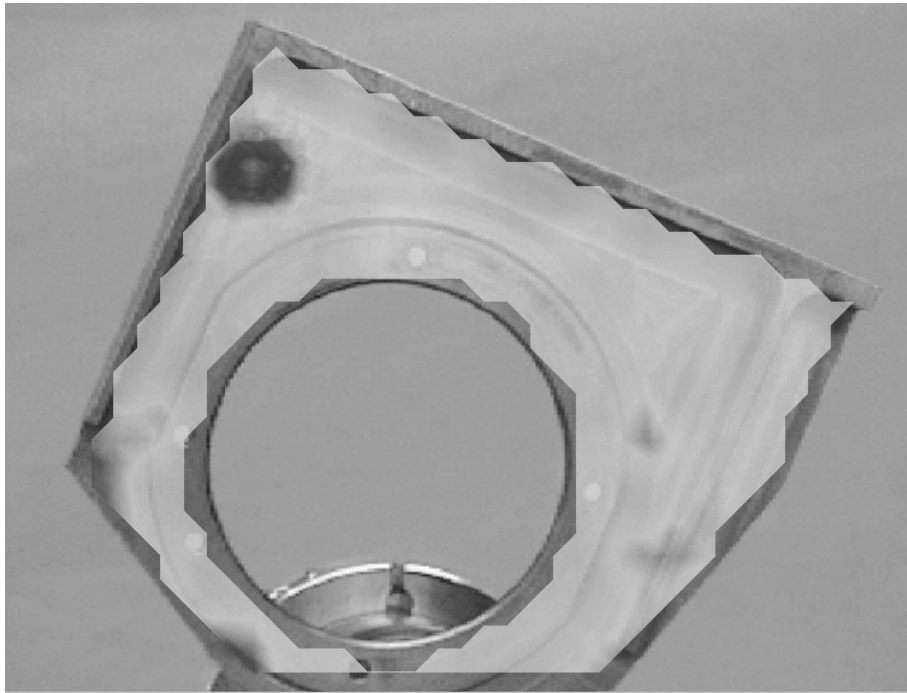


Abb. 65: Korrodiertes Al-Lager, Amplitude der 8. Harmonischen (160 kHz), Vorderseite

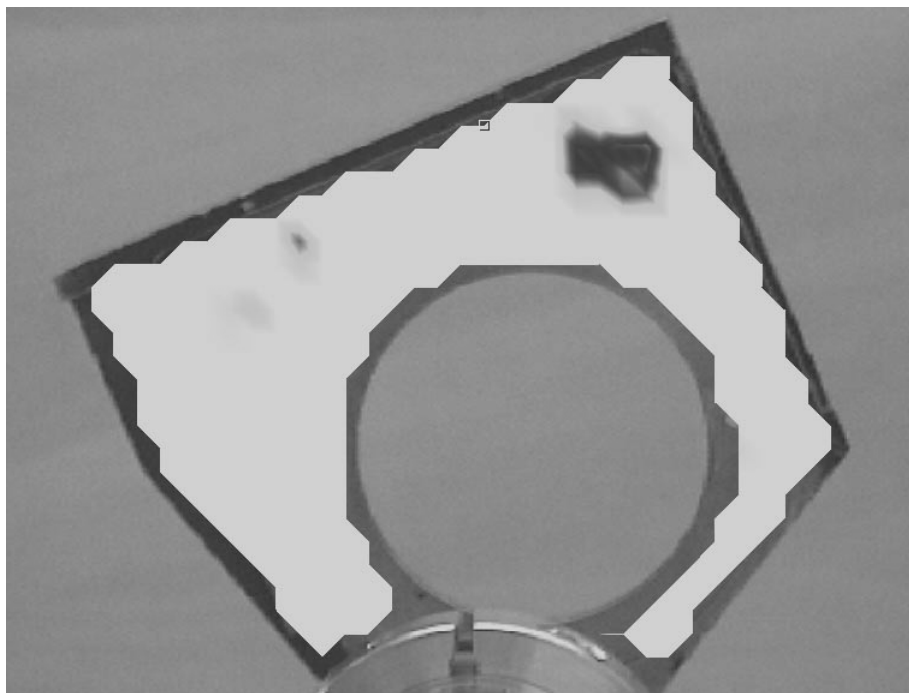


Abb. 66: Korrodiertes Al-Lager, Amplitude der 3. Harmonischen (60 kHz), Rückseite

Zumindest für dünne Proben (hier ca. 4 mm) läßt sich nichtlineares Verhalten ausnutzen, um auch auf der gegenüberliegenden Seite Korrosion zu erkennen. Die durch die Anregung auf das Metalloxid wirkenden Kräfte müssen allerdings groß genug sein, um die Grenzflächen in Kontakt und Relativbewegung zu bringen, was

bei kleinen Partikeln sehr hohe Beschleunigungen erfordert. Dies wird durch die geringe akustische Dämpfung des Metalls begünstigt. Der direkte Nachweis des Materialverlustes oder sehr dünner Oxidschichten ist hiermit allerdings nicht möglich.

4.4.3. *Enthaftungen an Lötverbindungen*

Neben dem Schweißen ist Löten die gebräuchlichste Art, Metalle thermisch zu verbinden. Löten kommt meistens dann zum Einsatz, wenn keine hohen Kräfte auf der Verbundstelle zu erwarten sind und wenn hohe Präzision gefordert wird. Dies gilt vor allem bei der Herstellung elektrischer Kontakte, die geringe Übergangswiderstände benötigen. Die Verbindung selbst wird durch eine Legierung (Lot) hergestellt, die bei der Verarbeitung verflüssigt wird und sich mit den ebenfalls erhitzten Grenzflächen verbindet. Je nach verwendetem Lot bzw. der entsprechenden Verarbeitungstemperatur spricht man von Hart- oder Weichlöten.

Bei Lötvorgängen müssen alle Bereiche, die vom Lot benetzt werden sollen, zum Zeitpunkt der Lotaufbringung eine genügend hohe Temperatur besitzen. Ist dies nicht der Fall, so erstarrt das Lot beim Kontakt mit dieser Grenzfläche, und es kommt lediglich zu einer sehr schwachen, mechanisch nicht belastbaren Verbindung. Diese „kalte Lötstelle“ stellt in der Elektronik ein erhebliches Problem dar, da sie im unbelasteten Zustand elektrisch leitfähig ist, sich jedoch unter thermischer oder mechanischer Last öffnet. Die Eigenschaften einer fehlerhaften Lötung sind zumindest theoretisch ideale Voraussetzungen für die nichtlineare Vibrometrie; die Grenzflächen berühren sich und werden nur mit geringen Kräften zusammengehalten. Eine nahezu vollständige mechanische Gleichrichtung ist die Folge, da nur Druck- aber keine Zugspannungen übertragen werden können.

Abb. 67 zeigt den Klauenpol-Anker eines Elektromotors/-generators, dessen Klauen durch Hartlöten an der Basisstruktur, dem eigentlichen Spulenträger, befestigt sind. Wegen der auf die Klauen wirkenden zentrifugalen Kräfte muß die Verbindung flächig und mit hoher Leitfähigkeit erfolgen. Ein vielleicht sogar geschwindigkeitsabhängiger Spalt würde neben der mechanischen Schwächung die Form des elektromagnetischen Feldes beeinflussen, was zu einem ineffizienteren Betrieb bzw. zu einem unrunder Lauf führen würde. Diese Probe wurde freundlicherweise von Herrn Dr. E. Zabler (Robert Bosch GmbH) zur Verfügung gestellt.

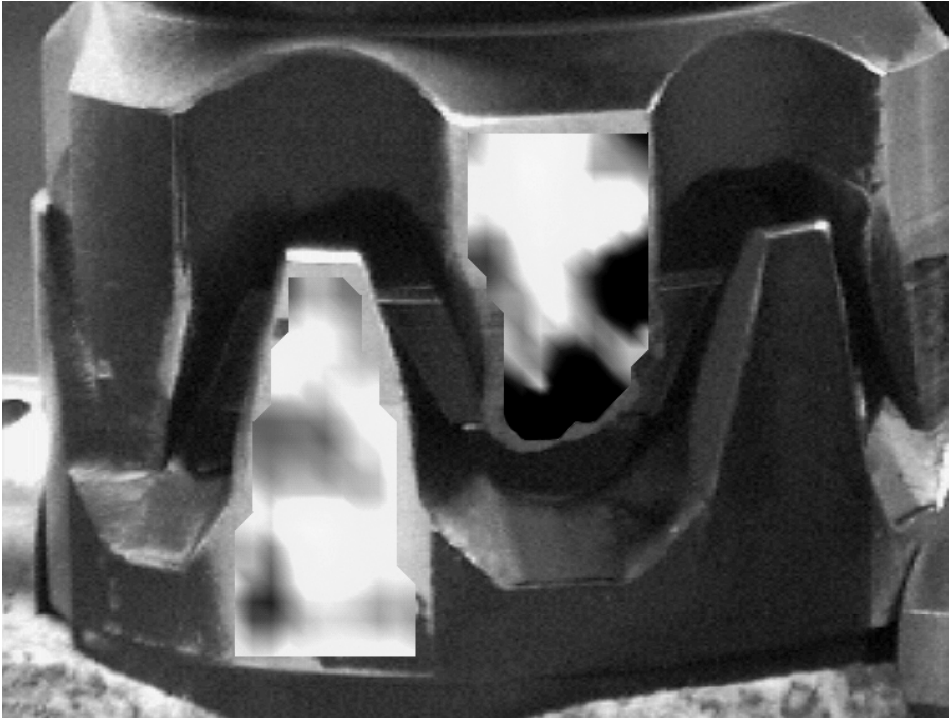


Abb. 67: Klauenpol-Anker mit Lötfehler, Amplitudenbild der 4. Harmonischen

Zur Untersuchung dieses Bauteils wurde der 20 kHz Schweiß-Ultraschallkonverter mit einer elektrischen Leistung von 600 Watt betrieben. Im Amplitudenbild der vierten Harmonischen (80 kHz, Abb. 67) ist an der Spitze und am Rand der rechten gemessenen Klaue eine deutliche Erhöhung des Pegels auszumachen (schwarzer Bereich), was sich auch mit der optisch erkennbaren Spaltbildung deckt. Die zum Vergleich vermessene linke Klaue zeigt keine Anomalie.

Massive metallische Verbundstrukturen sind aufgrund ihrer Stabilität und der geringen Dämpfung mit nahezu beliebigen Leistungen anregbar. Lötverbindungen der Elektronik sind allerdings sehr viel anfälliger gegenüber großen Schwingungsamplituden. Hier wären Frequenzen der Größenordnung einiger hundert kHz erfolgversprechender.

4.5. Faserverstärkte Mehrschichtkeramiken (C/C-SiC)

Keramiken werden seit mehr als 8000 Jahren [113] in Hochtemperaturanwendungen eingesetzt. Neben der einfachen Herstellung war auch die hohe Verfügbarkeit der Rohstoffe verantwortlich für die große Verbreitung dieser Materialklasse. Keramiken sind teilkristallin und werden durch einen thermischen Prozeß (Sintern, Brennen) in ihre endgültige chemische Struktur gebracht. Aufgrund der hohen Bindungsenergien besitzen Keramiken auch bei Schmelztemperaturen der meisten

Metalle noch eine hohe Festigkeit. Zunächst waren es hauptsächlich Kochwerkzeuge, die den Temperaturen der Kochstelle zu widerstehen hatten. Die Anwendung thermischer Metallumformung und der Verhüttung von Erzen eröffneten der Keramik einige tausend Jahre später neue Anwendungsgebiete [104]. Im letzten Jahrhundert wurden zudem keramische Werkzeuge zur kalten (Hart-) Metallbearbeitung entwickelt, die teure Diamantwerkzeuge in vielen Bereichen ersetzen können.

Neben diesen mechanischen Anwendungen entdeckte im 19. Jahrhundert auch die Elektroindustrie Keramiken als Isolatormaterial. Hoher Durchgangswiderstand, Durchschlagfestigkeit, Witterungsbeständigkeit und nicht zuletzt die günstigen Herstellungspreise machen sie zum idealen Material in Hochspannungs- und Hochstromanwendungen.

Mit extrem hohen Temperaturen wurde man auch bei der Entwicklung der ersten Wiedereintritts-Raumfahrzeuge konfrontiert. Beim „Apollo“-Programm der NASA [114] verwendete man abrasive und daher nicht wiederverwendbare Hitzeschilde aus mit Phenolharz getränktem Leinen. Diese erwiesen sich außerdem als empfindlich gegenüber den großen Temperaturschwankungen während einer Mission und waren daher ein zusätzlicher Unsicherheitsfaktor. Die Verbrennungsprodukte sind zudem stark gesundheitsgefährdend und trugen wesentlich zum tragischen Ende der Apollo 1 Mission bei [115]. Für die ersten Mehrfachwiedereintritts-Raumfahrzeuge „Space Shuttle“ (USA) und „Buran“ (UdSSR) verwendete man deshalb keramische Kacheln aus Siliziumnitrid (Si_3N_4). Um die Elastizität der Shuttelhülle zu erhalten, wurden kleine Kacheln gewählt, die über Nylongewebe („Strain Isolation Pads“) auf dem Aluminium befestigt waren. Diese Kacheln sollten den hohen Reibungstemperaturen beim Wiedereintritt standhalten. In der ursprünglichen Konstruktion von 1979 konnten zwar die Kacheln selbst den großen Temperaturunterschieden und -gradienten widerstehen, die Verbindung mit der Struktur jedoch nicht: Es gingen ca. 5000 von 28000 Elementen verloren [116].

Dieses Problem konnte zwar durch Modifikation der Kachelbefestigung gelöst werden, dennoch ist es bei neuartigen Raumfahrzeugen wünschenswert, zumindest einen Teil der primären Struktur bzw. großflächige Hitzeschilde aus Keramik zu konstruieren. Bedingt durch den Herstellungsprozeß ist jedoch eine Keramik nie frei von Fehlern, deren Wahrscheinlichkeit abhängig vom Volumen ist. Die extreme Härte erweist sich hier als Nachteil, da sie zu einem sehr kritischen Schadensverhalten führt: Die Struktur neigt zum Totalversagen ohne vorherige Hinweise

auf einen Schaden, denn es gibt kaum Versetzungen, die durch Wanderung ein duktileres Verhalten erzeugen könnten. Ein Ausweg kann sein, die Struktur aus kleinen keramischen Teilen zusammenzufügen, so daß das Versagen einer Komponente nicht zu einem Totalausfall führt. Die Fügestellen wirken hierbei jedoch wie zusätzliche Defekte und setzen die Gesamtfestigkeit des Bauteils stark herab.

Eine andere Möglichkeit, Keramiken schadenstoleranter zu machen, ist die Faserverstärkung, die bereits seit 1986 bei der NASA untersucht wird [117]. Der herkömmliche Herstellungsweg einer Keramik ist hierzu allerdings nicht geeignet. Statt dessen wird als Ausgangsmaterial ein kohlefaserverstärkter Duroplast mit der gewünschten Form der Struktur verwendet. In Schutzgasatmosphäre wird dieses Material bei Temperaturen um 900 °C pyrolysiert, bis nur noch Kohlefasern umgeben von einer hochporösen Kohlenstoffmatrix zurückbleiben. Das bei Temperaturen von etwa 1600 °C eingebrachte Silizium dringt durch Kapillarkräfte in die Kohlenstoffstruktur ein und verbindet sich teilweise mit ihr zu Siliziumcarbid (SiC), wodurch ein Werkstoff aus ca. 65 % Kohlenstoff und 35 % aus SiC entsteht. Dieses Material behält seine Festigkeit bis etwa 1600 °C und kann sehr hohe thermische Gradienten ohne Schaden überstehen.

4.5.1. *Delaminationen*

Komplexe Strukturen müssen häufig in mehreren Einzelteilen hergestellt werden, die dann durch das Silizieren miteinander zu verbinden sind. Insbesondere bei größeren Flächen ist es schwierig, das Silizium gleichmäßig zwischen die Grenzflächen einzubringen, während im Material Kapillareffekte für ein Eindringen des Siliziums sorgen. Ein weiterer Grund für die Entstehung liegt im Rohmaterial, dem pyrolysierten CFK. Durch die fehlende feste Matrix ist das Material sehr instabil und kann daher seine Form leicht verändern. Hierdurch können beim Zusammenfügen große Paßform-Ungenauigkeiten entstehen, die durch das Silizium nicht oder nur teilweise aufgefüllt werden.

Diese Enthaltungen schwächen die strukturelle Festigkeit, und es entstehen noch andere Gefahrenquellen: Es können andere Substanzen in die Struktur eindringen, die bei hohen Temperaturen zu inneren Spannungen und sogar zum Versagen des Bauteils führen.

Abb. 68 zeigt das Amplitudenbild der vierten Harmonischen einer etwa 8 mm dicken C/C-SiC Mehrschichtkeramik, die eine Delamination aufweist. Die Anregung erfolgte bei 20 kHz und 200 W. Der dunkle Bereich mit erhöhtem Pegel

markiert die Orte der Ablösung. Bei dieser Probe ist die Enthaftung nahezu geschlossen, so daß sie bis zum Probenrand detektierbar ist.



Abb. 68: *Delaminierte Mehrschicht C/C-SiC-Keramik, 4. Harmonische (80 kHz)*

Bei weiter aufklaffenden Enthaftungen läßt sich nicht immer der gesamte geschädigte Bereich erkennen, da die Anregungsamplitude zu klein ist, um die Grenzflächen miteinander in Kontakt zu bringen. Ein Beispiel hierfür ist in Abb. 69 dargestellt.

Es handelt sich hierbei um eine ca. 4 cm dicke Mehrschichtkeramik mit einer großflächigen Enthaftung in einer Tiefe von etwa 6 mm in der linken oberen Ecke. Die Klaffung ist am Probenrand auch optisch sichtbar. In Abb. 69 ist zu erkennen, daß nur Teile der Delamination zu nichtlinearem Verhalten angeregt werden können (Anregung 20 kHz, Wellenlänge ca. 12 cm). Es lassen sich Bereiche auf dem Defekt voneinander trennen: In den nichtlinearen Zonen ist die Anregungsamplitude größer als der Grenzflächenabstand und in den linearen kleiner. Der Grund für dieses Verhalten ist die grobe Rauigkeit dieses Materials, was durch den Herstellungsprozeß bedingt ist. Grenzflächenbereiche mit hohem Siliziumanteil haben vermutlich einen geringeren Abstand zueinander als die Umgebung. Bei niedrigen Amplituden werden also höhere Harmonische nur punktuell generiert, was in Abb. 69 gut zu erkennen ist. Die Struktur auf der Oberfläche stellt hier keine Momentaufnahme eines Wellenfeldes dar, sondern eine Abbildung der in der Delamination vorliegenden Grenzflächenabstände. Diese Struktur ist gut reproduzierbar, da die Standardabweichung bei gleicher Einspannung $< 3\%$, mit Neueinspannung $< 10\%$ beträgt (ermittelt aus jeweils neun Einzelmessungen). Bei 100 W kann die Delamination noch kaum ausgemacht werden, aber mit steigender Amplitude ist erwartungsgemäß ein Zusammenwachsen der nichtlinearen Gebiete zu beobachten.

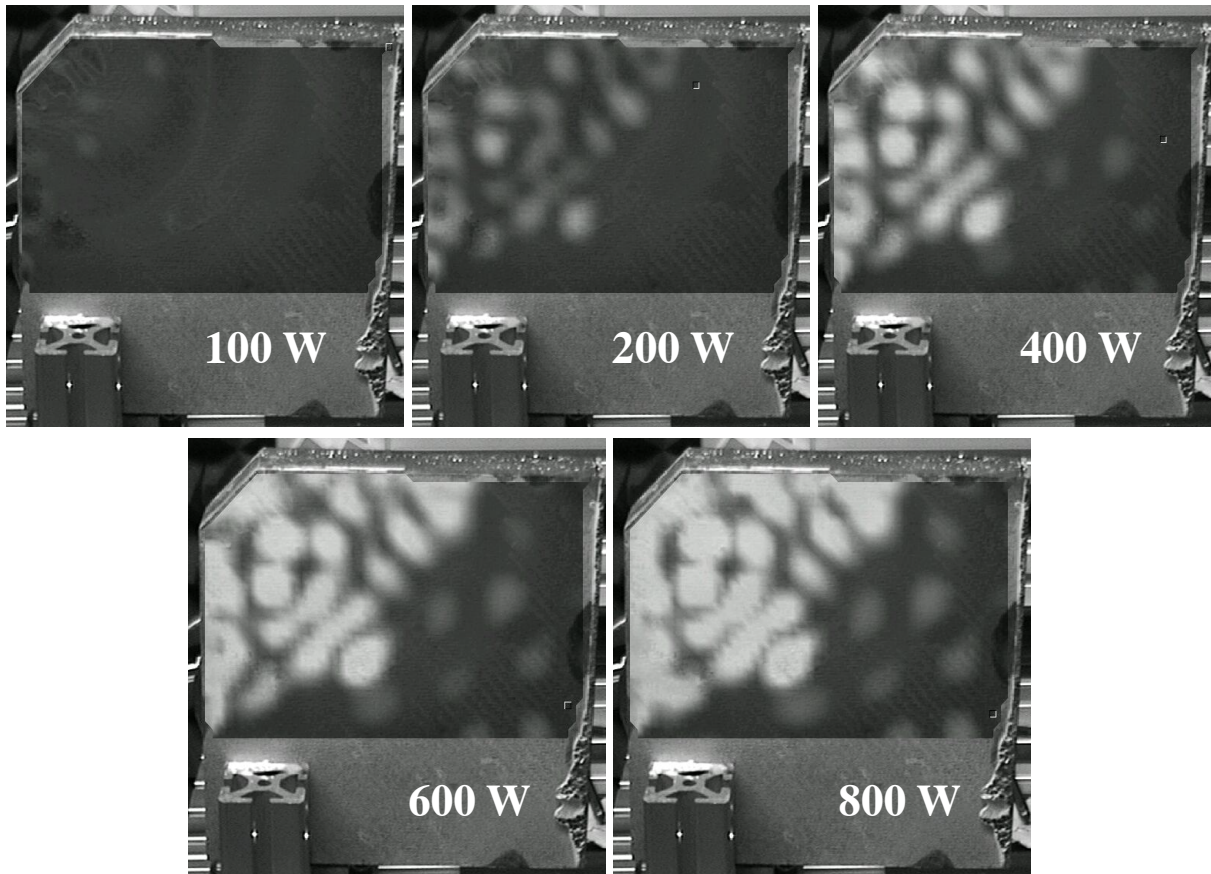


Abb. 69: Delaminierte Mehrschicht C/C-SiC-Keramik, Amplitudenbild der 2. Harmonischen (40 kHz, oben) bei verschiedenen Anregungsleistungen

Bei der Auftragung der auf die Anregung normierten Amplitude der zweiten Harmonischen (Summe über alle Meßpunkte) ist eine Abnahme der Steigung zu erkennen (Abb. 70). Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten könnte der mit steigender Amplitude geringer werdende Zuwachs an nichtlinear interagierender Fläche sein: Zunächst berühren sich nur die größten Spitzen der rauhen Oberflächen. Mit wachsender Amplitude wird die Gesamtkontaktfläche größer, da auch kleinere Aufwölbungen mit der Gegenfläche in Berührung kommen. Je mehr Bereiche jedoch die Gegenseite berühren, desto größer wird auch die Kraft, die aufgewendet werden muß, um die Grenzflächen weiter anzunähern. Ein weiteres Wachstum der nichtlinearen Bereiche wird also zunehmend erschwert.

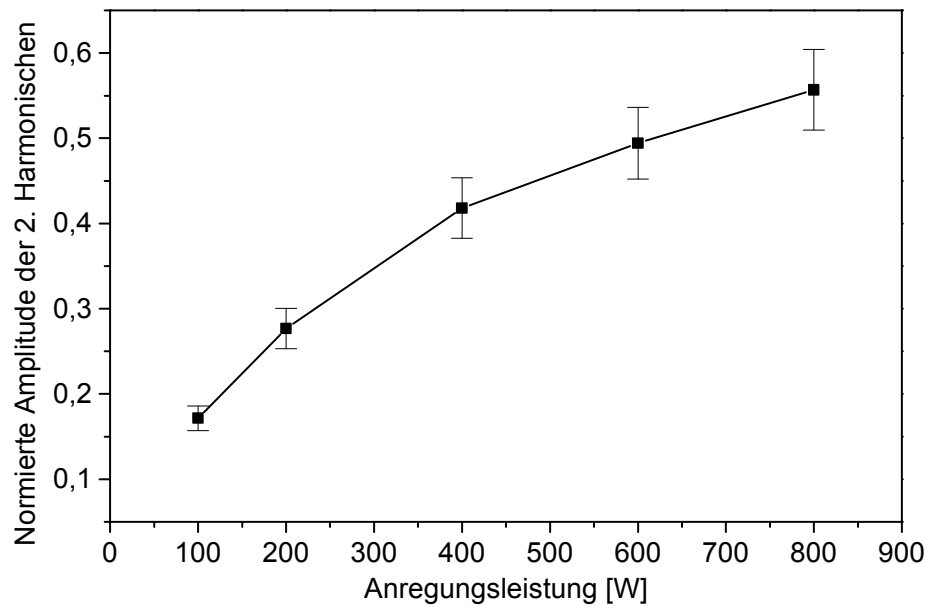


Abb. 70: Über die Meßfläche gemittelte Amplitude der 2. Harmonischen (40 kHz)

4.5.2. Silizierungsunterschiede

Neben Delaminationen kann ein ungleichmäßiges Eindringen des Siliziums auch zu einer inhomogenen Festigkeit führen. Untersilizierte Bereiche weisen nämlich eine erhöhte Porosität durch einen geringeren SiC-Anteil auf. Diese untersilizierten Teile befinden sich meistens im Inneren einer Struktur, da das Silizium von außen her hineindiffundiert.

Abb. 71 zeigt eine C/C-SiC-Keramik mit einer oberflächlich erhöhten Siliziumkonzentration, die auch optisch gut erkennbar ist. Im Bild der sechsten Harmonischen, angeregt bei 20 kHz (200 W), tritt dieser Bereich, sowie schwach zwei senkrechte Risse im oberen Ende der Probe hervor. Es ist überraschend, daß nicht die poröse Umgebung des Siliziums durch nichtlineares Verhalten sichtbar wird, sondern die Ansammlung. Möglicherweise ist das Silizium hier allerdings nicht sehr tief in das Material eingedrungen und bildet eine SiC/Si Oberfläche auf dem untersilizierten Kohlenstoffuntergrund. Durch die vom Ultraschall angeregte Bewegung auf dem porösen Untergrund könnte nichtlineares Verhalten hervorgerufen werden.

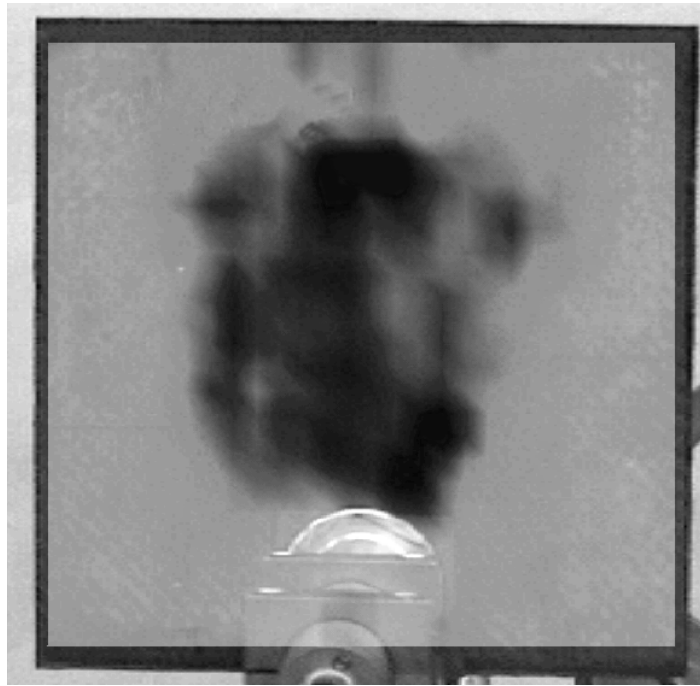


Abb. 71: C/C-SiC-Keramik mit Silizierungsfehlern, 6. Harmonische (120 kHz)

Alle Proben dieses Abschnitts wurden freundlicherweise von Herrn Dipl.-Ing. B. Benitsch (Deutsches Zentrum f. Luft- und Raumfahrt e.V., Stuttgart) zur Verfügung gestellt.

5. Diskussion und Ausblick

Ist nichtlineares mechanisches Verhalten ein geeignetes Merkmal zur selektiven Defekterkennung? Die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen an typischen Schädigungsformen verschiedener technischer Materialien zeigen ein großes Potential, bereits etablierte Prüfverfahren sinnvoll zu ergänzen bzw. in Einzelfällen sogar zu ersetzen. Es sind insbesondere Defekte mit Kontaktgrenzflächen (wie Rissen oder Delaminationen) bzw. hysteretischer Nichtlinearität (wie Plastizität oder Reibung) nachweisbar. Eine Bewertung der vorgestellten Ergebnisse im Vergleich zu anderen Prüfverfahren ist in Tabelle 5 zusammengefaßt.

	Ultraschall	Optische LockIn Thermografie	Ultraschall LockIn Thermografie	nichtlineare Akustik
Faserverstärkte Kunststoffe				
Offene Delaminationen	++	++	+	+
Geschlossene Delamin.	o	o	+	+
Impactschäden	+	+	++	++
Thermische Überbeanspruchung	+	+	++	++
Verfolgung der Duroplastvernetzung	++	o	o	+
Aktive Werkstoffverbunde				
Einbettungsqualität der Aktorik	+	+	++	++
Risse in Piezokeramik	-/o ¹	-/o ¹	+	+
Metalle				
Risse	-/o ¹	-/o ¹	++	+
Korrosion	+	+	++	++
Enthaftungen an Löt-/Schweißverbindungen	+ ¹	+ ¹	++	++
Faserverstärkte Mehrschichtkeramiken (C/C-SiC)				
Delaminationen	+	++	++	++
Silizierungsunterschiede	+	++	o	o

- nicht möglich, o anwendbar, + gut geeignet, ++ sehr gut geeignet,

¹ abhängig von Defektorientierung

Tabelle 5: Ergebnisbewertung der nichtlinearen Akustik und Vergleich mit anderen Verfahren

Es wird deutlich, daß defektselektive Verfahren wie die Ultraschall-Thermografie und die Ausnutzung nichtlinearer Effekte bei der Erkennung von Rissen und Korrosion besonders günstige Eigenschaften besitzen. Da defektspezifische Merkmale ausgenutzt werden, wirkt der Schaden selbst als Sender des Meßsignals, so daß auch kleine Risse unabhängig von der Orientierung nachgewiesen werden können. Erst bei verglichen mit der Wellenlänge sehr großen Defekten tritt eine richtungsabhängige Abstrahlung der Harmonischen auf (vgl. Abschnitt 4.4.1).

Die Verwendung spezifischer Defektmerkmale zur zerstörungsfreien Prüfung liegt zudem in der eindeutigen Interpretierbarkeit der Ergebnisse. In der Praxis muß diese ideale Eigenschaft jedoch relativiert werden: Nicht nur der gesuchte Defekt weist nichtlineares Verhalten auf, sondern auch die Anregung liefert ungewollt einen Beitrag zur Gesamtnichtlinearität, was vor allem die integrale Detektion erschwert. Durch die Verwendung von Ultraschall-Schweißgeneratoren steht allerdings genügend akustische Leistung zur Verfügung, um Kopplungsmedien einzusetzen, die die akustische Verbindung zwischen Probe und Anregung linearisieren. Diese Anregungsmethode stellt für kleinere Bauteile eine praktikable Lösung dar, sie ist jedoch durch die hohe am Kopplungsmedium reflektierte akustische Leistung ineffizient. Wandler mit geringerer akustischer Impedanz (magnetostriktive oder elektrodynamische Wandler) wären technisch sinnvoller, sie sind aber für diese Anwendung noch nicht kommerziell verfügbar.

Obwohl alle in dieser Arbeit vorgestellten experimentellen Ergebnisse mit ähnlichen Anregungsparametern ermittelt wurden, ist eine Abstimmung auf die Probeneigenschaften vorteilhaft. Für den konkreten Anwendungsfall sollten also der akustische Wandler, das Kopplungsmedium und die Anregungsleistung bzw. Frequenz angepaßt werden, um ein optimales Ergebnis zu erzielen. Insbesondere die Anregungsleistung stellt eine kritische Größe dar, da hier verschiedene Einflüsse eine Rolle spielen: Zunächst muß eine defektspezifische Amplitude überschritten werden, damit überhaupt Grenzflächen nichtlinear miteinander interagieren können. Die Ausdehnung des nichtlinearen Bereiches, also die Abbildungsgröße, ist daher pegelabhängig, weil die Grenzflächenabstände häufig über den Defekt variieren. Mit steigender Anregungsleistung wird die Probe erheblich thermisch und mechanisch belastet. Bei Metallen ist dies zwar unproblematisch, Kunststoffe könnten aber bereits geschädigt werden. Erste Ergebnisse an CFK zeigen zwar eine geringere Materialbeeinflussung als erwartet [118], umfassendere systematische Untersu-

chungen stehen allerdings noch aus, wobei insbesondere der Einkopplungspunkt wichtig ist. Problematisch ist hierbei auch die Vorspannung, mit der der Ultraschallkonverter an die Probe angepreßt wird. Diese muß mindestens der maximalen Spannung in der Zugphase der Anregungsschwingung entsprechen, um lineares Übertragungsverhalten zu ermöglichen. Diese Tatsache begrenzt also den linearen Bereich der Anregungsleistung. Ein Ausweg liegt in der simultanen Verwendung mehrerer Ultraschallgeber. Die lokale Probenbelastung am Einkopplungspunkt wird reduziert und der Bereich linearer Anregungsleistung vergrößert. Vor allem bei größeren Bauteilen würde dies zudem die Homogenität des Schallfeldes verbessern.

Neben der Schalleistung hängt die Effizienz der Defektanregung auch von der gewählten Frequenz ab. Einzubeziehen sind hierbei die Defektproportionen in Relation zur Wellenlänge der Anregung. Letztere hängt vom Material des Prüfobjekts ab, so daß hier eine Anpassung erforderlich ist. Diese Anpassung kann über die gewünschte Mindestdefektgröße, die noch erkannt werden soll, geschehen: Eine große Wellenlänge mit geringen Zuggradienten und großen Amplituden begünstigt die Erkennung großer Defekte bei kleiner Leistung, eine kürzere Wellenlänge ermöglicht hingegen die Detektion auch kleinerer Schäden, aber es ist eine höhere Leistung erforderlich, um die gleichen Amplituden zu erzielen.

Die Einhüllende des resultierenden Spektrums höherer Harmonischer hängt in ihrem Verlauf von der vorliegenden Defektmechanik ab. Es lassen sich daher Prozesse klappernder bzw. hysteretischer Nichtlinearität voneinander unterscheiden. Beide Mechanismen treten jedoch meist gemeinsam auf, so daß eine klare Trennung erschwert ist. Dies könnte durch eine punktweise Kreuzkorrelation der Meß- mit Referenzspektren für die verschiedenen Mechanismen erreicht werden. Der Korrelationskoeffizient liefert einen Wahrscheinlichkeitswert für einen bestimmten Mechanismus, der dann genutzt werden kann, um ein Bild defektartspezifisch einzufärben.

Bei der Verwendung mehrerer Anregungsquellen können diese auch mit verschiedenen Frequenzen arbeiten. Nichtlinearität äußert sich zusätzlich durch die lokale Bildung von Kombinationsfrequenzen (Summen und Differenzen), die durch nichtlineare Superposition der Anregungswellen (Intermodulation) entstehen. Möglicherweise lassen sich bei nicht ganzzahligen Frequenzverhältnissen (damit

Kombinationsfrequenzen nicht mit höheren Harmonischen zusammenfallen) Anregungsnichtlinearitäten von denen des Schadens besser trennen.

Die Ausnutzung nichtlinearen Verhaltens bietet viele neue Möglichkeiten der Defekterkennung und -charakterisierung, nicht nur mit elastischen Wellen. Es sind allerdings weitere umfassende Forschungsarbeiten notwendig, um dieses Potential auszuschöpfen und die verwendeten Methoden zu vertiefen sowie hinsichtlich ihrer technischen Anwendung zu optimieren.

6. Literatur

- [1] Geitler, J.R. v.: Ueber die Absorption und das Strahlungsverhalten der Metalle für Hertzsche Wellen. *Annalen der Physik* 22 (1907), S. 246 - 264
- [2] Drude, P.: Zur Construction von Teslatransformatoren. Schwingungsdauer und Selbstinduction von Drahtspulen. *Annalen der Physik* 9 (1902), S. 293 – 339 und 591 - 610
- [3] Gerlach, W.: Magnetische Verfahren zur Werkstoffprüfung. *Z. techn. Physik* 15 (1934), S. 467-469
- [4] Mook, G.; Heyse, H.; Simonin, J.; Tchernov, A.; Berger, J.; Lange, R.: Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung mit Wirbelströmen – Aspekte der Bildinterpretation. DGZfP-Jahrestagung, Lindau 13.-15.05.1996
- [5] Haken, H.; Wolf, H. C.: *Atom- und Quantenphysik*. 4. Auflage (1990), Springer-Verlag Berlin, ISBN 3-540-52198-4
- [6] Gunn, J.B.: *IBM Journal of Research & Development* 8 (1964), S. 141
- [7] Kalinski, J.: Einige Probleme der industriellen Feuchtigkeitsmessung mit Mikrowellen. *Mikrowellen Magazin* 6 (1978), S. 441-452
- [8] Diener, L.: Microwave near-field imaging with open-ended waveguide – comparison with other techniques of nondestructive testing. *Research in Nondestructive Evaluation* 7 2/3 (1995), S. 137-152
- [9] Nordal, P.-E.; Kanstad, S.O.: Photothermal radiometry. *Physica Scripta* 20 (1979)
- [10] Hecht, E.; Zajac, A.: *Optics*. Addison-Wesley (1974)
- [11] Wolf, H.: *Spannungsoptik Band 1*. Berlin, Springer-Verlag (1976)
- [12] Röntgen, W.C.: Über eine neue Art von Strahlen. 1. Mitteilung, Dezember 1895 (Sitzungsbericht der Würzburger Physikalisch-Medizinischen Gesellschaft 1895). *Annalen der Physik* 64 (1898), S. 1-37
- [13] Eisenberg, R.L.: *Radiology: An illustrated history*. St. Louis: Mosby Year Book (1991)
- [14] Hentschel, M. P.; Harbich, K. W.: Einzelfaserhaftung in Kompositen. *Materialprüfung* 35, Carl Hanser Verlag, München (1993), S. 63-67

-
- [15] Ekenhorst, Lange, Hentschel: Röntgen-Refraktion – Bestimmung von Alterungsschäden in CFK. *Materialprüfung* 39, Carl Hanser Verlag, München (1997), S. 175-179
- [16] Ångström M.A.J.: New method of determining the thermal conductivity of bodies. *Phil. Mag.* 25 (1863), S. 130-142
- [17] Busse G.: Optoacoustic phase angle measurement for probing a metal. *Applied Phys. Lett.* 35 (1979), S. 759-760
- [18] Busse G.; Wu D.; Karpen W.: Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography. *J. Appl. Phys.* 71 (1992), S. 3962-3965
- [19] Rosencwaig, A.; Busse, G.: High resolution thermal-wave microscopy. *Appl. Phys. Lett.* 36 (1980), S. 725-727
- [20] Rosencwaig A.: Photoacoustic microscopy. *Am. Lab.* 11 (1976), S. 39-49
- [21] Mignogna R. B.; Green R. E.; Duke J.; Henneke E. G.; Reifsnider K. L.: Thermographic investigations of high-power ultrasonic heating in materials. *Ultrasonics* 7 (1981), S. 159-163
- [22] Dillenz, A.; Zweschper, T.; Busse, G.: Burst phase angle thermography with elastic waves. *Thermosense 2001*, Orlando, Florida, USA
- [23] Richter, H.-U.: *Chronik der Zerstörungsfreien Materialprüfung*. 1. Auflage (1999), DVS-Verlag Berlin, ISBN 3-87155-942-3
- [24] Helmholtz, H. v.: *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*. 1. Aufl. Vieweg (1863), 6. Aufl. (Nachdruck) Olms, Hildesheim (1968)
- [25] Mathews, M.V.; Pierce, J.R.: Harmony and nonharmonic partials. *J. Acoust. Soc. Am.* 68 (1980), S. 1252-1257
- [26] Grüneisen, E.: Die elastischen Konstanten der Metalle bei kleinen Deformationen. *Annalen der Physik* 22 (1907), S. 801-851
- [27] Förster, F.: Der Klang als Forschungsmittel. *Umschau* 45 (1938), S. 1025
- [28] Matthaes, K.: Anwendung der Prüfverfahren im Flugzeugbau. *Metallkunde* 30 (1938), S. 99-113
- [29] Matthaes, K.: *Die Prüfung metallischer Werkstücke*. Metall-Verlag, Berlin (1952)

-
- [30] Hillger, W.; Wachter, F. K.: Ultraschallprüfung an Faserverbundwerkstoffen: Grundlagen, Methoden der bildhaften Darstellung und Ergebnisse. *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* 22 (1991), S. 217-224
- [31] Stöbel, R.; Dillenz, A.; Krohn, N.; Busse, G.: Zerstörungsfreie Prüfung mit defektselektiven Verfahren. *Materialprüfung* 42 (2000), S. 38-44
- [32] Stärk, K.F.: Temperaturmessungen an schwingend beanspruchten Werkstoffen. *Werkstofftech.* 13 (1982), S. 333-338
- [33] Busse, G.; Wu, D.; Karpen, W.: Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography. In: *J. Appl. Phys.* 71 (1992) S. 3962-3965
- [34] Salerno, A.; Dillenz, A.; Wu, D.; Rantala, J.; Busse G.: Progress in ultrasound lockin thermography. In: *Quantitative infrared thermography, QIRT 98, Eurotherm Series 60*, D. Balageas, G. Busse, and G. M. Carlomagno (Eds.) (1998), S. 154-160
- [35] Zheng, Y.; Maev, R.; Solodov, I.Yu.: Nonlinear acoustic applications for material characterization: A review. *Can. J. of Physics*, Vol. 77, Nr. 12 (1999), S. 927-967
- [36] Hooke, R.: *Lectiones Cutlerianae*. Royal Society (1679)
- [37] Newton, I: *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Royal Society (1687)
- [38] Meyer, E.; Guicking, D.: *Schwingungslehre*. Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig (1974), ISBN 3-528-08254-2
- [39] Bronstein, I.N.; Semendjajew, K.A.: *Taschenbuch der Mathematik*. Teubner Verlag, Stuttgart, 25. Auflage (1991), ISBN 3-87144-492-8
- [40] Magnus, K.; Popp, K.: *Schwingungen: Eine Einführung in physikalische Grundlagen und die theoretische Behandlung von Schwingungsproblemen*. Teubner Verlag, Stuttgart, 5. Auflage (1997), ISBN 3-519-323028-20, S. 236
- [41] Kuypers, F.: *Klassische Mechanik*. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 3. Auflage (1990), ISBN 3-527-28184-3
- [42] Messiah, A.: *Quantenmechanik (Band 1)*. de Gruiter, Berlin, 2. Auflage (1991), ISBN 3-110-11452-6
- [43] Oppenheimer, A.V.; Schafer, R.W.: *Digital signal processing*. Prentice Hall (1975)

-
- [44] Gerdson, P.; Kröger, P.: Digitale Signalverarbeitung in der Nachrichtenübertragung. Springer-Verlag Berlin (1993), ISBN 3-540-55520-X
- [45] Hesselmann, N.: Digitale Signalverarbeitung. Vogel-Verlag (1983)
- [46] Polytec GmbH: Users manual Polytec scanning laser vibrometer PSV 200 (1998)
- [47] Hammond, J.K.: Fundamentals of signal processing. In: Fundamentals of Noise and Vibration, Fahy, F.; Walker, J.G. (Eds.), E&FN Spon London (1998), ISBN 0-419-22700-8, S. 311-372
- [48] Braezeale, M.A.; Philip, J.: Physical acoustics XVII, Eds. W.P. Mason, R.N. Thurston, XVII; 1 (1984)
- [49] Pangraz, S.; Arnold, W.: Quantitative determination of nonlinear binding forces by ultrasonic technique. Review of Progress in QNDE 13B, Eds. D.O. Thompson, D.E. Chimenti, Plenum Press N.Y. (1994) S. 1995 - 2001
- [50] Adler, L.; Nagy, P.B.: Review of Progress in QNDE 10B, Eds. D.O. Thompson, D.E. Chimenti, Plenum Press N.Y. (1991) S. 1813
- [51] Solodov, I. Yu.; Asainov, A.F.; Len, K.S.: Nonlinear SAW reflection: experimental evidence and NDE applications. Ultrasonics 31 N2 (1993), S. 91 - 96
- [52] Rose, J.H.; Smith, J.R.; Guinea, F.; Ferrante, J.: Universal features of the equation of state of metals. Phys. Rev. B 29 (1984), S. 2963 - 2969
- [53] Ferrante, J.; Smith, J.R.: Theory of bimetallic interface. Phys. Rev. B 31 (1985), S. 3427
- [54] Fassbender, S.U.; Arnold, W.: Measurement of adhesion strength of bonds using nonlinear ultrasound. Review of Progress in QNDE 15B, Eds. D.O. Thompson, D.E. Chimenti, Plenum Press N.Y. (1996), S. 1321-1328
- [55] Krautkrämer, J.; Krautkrämer, H.: Ultrasonic testing of materials. 3rd edition, Springer Verlag N.Y., (1983) S. 62
- [56] Landau, L.D.; Lifshitz, E.M.: Theory of elasticity. Pergamon Press, Terrytown, New York (1959)
- [57] Hamilton, M.F.: Nonlinear wave propagation in mechanics. AMD-77. The American Society of Mechanical Engineers, New York (1986)
- [58] Solodov, I.Y.: persönliche Mitteilung (2001)

-
- [59] Nazarov, V.E.; Ostrovsky, L.A.; Soustova, I.A.; Sutin, A.M.: Nonlinear acoustics of micro-inhomogeneous media. *Phys. Earth Planet Interiors* 50 (1988), S. 65-70
- [60] McCall, K.R.; Guyer, R.A.: Equation of state and wave propagation in hysteretic nonlinear elastic materials. *J. Geophys. Research* 99: 23 (1994), S. 887-897
- [61] Guyer, R.A.; McCall, K.R.; Boitnot, G.N.: Hysteresis, discrete memory and nonlinear wave propagation in rock: a new paradigm. *Phys. Rev. Lett.* 74 (1994), S. 3491-3494
- [62] Nazarov, V.E.: Propagation of a unipolar impulse in a medium with hysteretic nonlinearity. *Acoust. Phys.* 43 (1997), S. 192-195
- [63] Van Den Abeele, K.; Sutin, A.; Carmeliet, J.; Johnson, P.A.: Micro-damage diagnostics using nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS). *NDT&E Int.* 34 (2001), S. 239-248
- [64] Van Den Abeele, K.; Johnson, P.A.; Guyer, R.A.; McCall, K.R.: On the quasi-analytic treatment of hysteretic nonlinear response in elastic wave propagation. *J. Acoust. Soc. Am.* 101 (4) (1997) S. 1885-98
- [65] Hillger, W.; Gebhardt, W.; Dietz, M.; May, B.: Ultraschallprüfungen berührungslos mit Ankopplung über Luft – Illusion oder schon bald Realität? Jahrestagung der DGZfP 1998 in Bamberg, *Berichtsband 63.1*, S. 241-249
- [66] Fa. Branson Ultraschall: *Handbuch Branson EQS* (1996)
- [67] Abramov, O.V.: persönliche Mitteilung (2002)
- [68] Barrett, R.: Active plate and missile wing development using EDAP elements. *Journal of Smart Materials and Structures*, Institute of Physics Publishing, Ltd., Techno House, Bristol, UK, Vol. 1, ISBN 0-964-1726 (1992), S. 214-226
- [69] Pfaff, H.: Nichtlinearer Ultraschall zur Charakterisierung von Schädigungsverläufen in faserverstärkten Polymeren. Diplomarbeit am IKP-ZfP, Fakultät 13, Universität Stuttgart (2002)
- [70] Cremer, L.; Hubert, M.: *Vorlesungen über Technische Akustik*. Springer-Verlag Berlin, 4. Auflage (1990), ISBN 3-540-52480-0
- [71] Zahn, W.; Püllmanns, H.: *Neue Erfahrungen, Ergebnisse und Erläuterungen zu laufzeitstereofonen Aufnahmetechniken unter Verwendung von Druck-*

- empfängern. In: Bericht zur 13. Tonmeistertagung 1984, Bildungswerk des VDT, S. 186-196
- [72] Heinz, G.; Döbler, D.; Nguyen, T.: Acoustic photo- and cinematography basing on the H-interference transformation (HIT). ASA'99: 137. Konferenz der Acoustical Society of America, 2. Konferenz der European Acoustics Ass. und 25. DAGA Tagung TU Berlin 14 – 19 März (1999)
- [73] Heinz, G.: Wave interference technology - Übergänge zwischen Raum und Zeit. 43rd Int. Scien. Coll., TU Ilmenau, 21. – 24. September (1998), S. 645 - 651
- [74] Hugonnet, Ch.; Jouhaneau, J.: Comparative spatial transfer function of six different stereophonic systems, AES preprint 2465 (H-5), (1987)
- [75] Wuttke, W.: Mikrofonaufsätze, Dr-Ing Schoeps GmbH (Herausgeber im Eigenverlag zum 50-jährigen Firmenjubiläum), (1998)
- [76] Kulczyk, W.K.; Davis, Q.V.: Vibration measurements by laser techniques. Proc. Inst. Electr. Eng., London, 120 9 (1973), S.1017
- [77] Monchalin, J.P.; Héon, R.: Laser ultrasonic generation and optical detection with a confocal Fabry-Pérot interferometer. Materials Evaluation, Band 44 (1986)
- [78] Heuer, S., Fa. Polytec GmbH, persönliche Mitteilung (2002)
- [79] Schawlow, A.L.; Townes, C.H.: Infrared and optical masers. Phys. Rev. 112 (6) (1958), S. 1940-1949
- [80] Prokhorov, A.M.: Molecular amplifier and generator for sub-millimeter waves. Sov. Phys. JETP, Band 7 (1958), S. 1140 - 1141. JETP (USSR), Band 34 (1958), S. 1658 - 1659
- [81] Maiman, T.H.: Stimulated optical radiation in ruby. Nature, 187 (1960), S. 493
- [82] Michelson, A. A.: Light waves and their uses. Chicago, IL, University of Chicago Press (1961)
- [83] Halliday, D.; Resnick, R.: Fundamentals of physics. 3. Ausgabe (1988), J. Wiley & Sons, New York, ISBN 0-471-63735-1
- [84] Polytec GmbH: Laser Doppler Vibrometer (Handbuch), (2001)
- [85] Schmauder, S.; Dong, M; Leßle, P.: Verbundwerkstoffe mikromechanisch simuliert. Metall 7/8 (1997), S. 404 - 410

-
- [86] Krohn, N.; Busse, G.: Nonlinear Vibrometry for damage detection. 7th International congress on sound and vibration, 4 - 7 Juli Garmisch-Patenkirchen (2000), Tagungsband II, S. 589 - 596
- [87] Steffens, K.; Wilhelm, H.: Werkstoffe, Oberflächentechnik, Fertigungsverfahren für die nächste Flugtriebwerksgeneration, Bericht der Fa. MTU Aero Engines, München (2001)
- [88] Drumm, F.: Neue Zoneneinteilung an Luftfahrzeugen. Elektromagnetische Verträglichkeit EMV 97, Wehrtechnisches Symposium, Bundesakademie für Wehrverwaltung und Wehrtechnik, Mannheim, 12. - 14.05.97.
- [89] Fuchs, F.; Landers, E.-U.; Schmid, R.; Wiesinger, J.: Lightning current and magnetic field parameters caused by lightning strikes to tall structures relating to interference of electronic systems. IEEE Trans. on electromagnetic compatibility, Vol. 40, Nr. 4, November 1998, S. 444 - 451
- [90] Landers, E.-U.; Lang, U.: Shielding effectiveness of screened windows and enclosures against LEMP. 25th International conference on lightning protection ICLP 2000, Rhodes, Greece, Sept. 2000, paper 7.6, Conference proceedings Volume B, S. 685 - 690
- [91] Drumm, F.; Bäuml, G.; Zischank, W.; Brocke, R.; Schönau, J.: Temperature rise on the rear side of CFC panels due to lightning continuing currents. Proceedings of the 1999 international conference on lightning and static electricity (ICOLSE), Toulouse, 22. - 24.06.1999, paper 1999-01-2321, S. 55 - 58.
- [92] Krohn, N.; Stoessel, R.; Busse, G.: Acoustic nonlinearity for defect selective imaging. Akzeptiert bei „Ultrasonics“ (2001)
- [93] Krohn, N.; Geiße, D.; Nixdorf, K.: Charakterisierung der Vernetzung polymerer Harze durch Resonanzmethoden. Fritz, G.; Eisenbach, C. D. (Hrsg): 16. Stuttgarter Kunststoff-Kolloquium. Sprint-Druck GmbH, Stuttgart (1999), 4.2. ISBN 3-00-003720-9
- [94] <http://www.industrieklebstoffe.de>; Webseite der Fa. Henkel Deutschland AG
- [95] Geisse, D.; Nixdorf, K.; Busse, G.: Cure monitoring of thin adhesive layers. 5th International Congress on Sound and Vibration. University of Adelaide, 15. - 18.12.1997, CD ROM

-
- [96] Liu, G.; Qu, J.; Jacobs, L.J.; Li, J.: Characterizing the curing of adhesive joints by a nonlinear ultrasonic technique. *Review of Progress in QNDE 18*, Eds. D.O. Thompson, D.E. Chimenti, Plenum Press N.Y. (1999), S. 2191 - 2199
- [97] Hanselka, H.: Die Adaptronik als Schlüsseltechnologie für den intelligenten Leichtbau. In: *Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde*, K. Schulte u. K.U. Kainer (Hrsg.), Wiley-VCH (1999), S. 557-569, ISBN 3 527 29967
- [98] Krause, G.: *U-Boot und U-Jagd*. Militärverl. d. DDR, Berlin, 3. Auflage (1989), ISBN 3-327-00082-4
- [99] Scanlon, R.W.: F/A-18 Vertical Tail/LEX Fence Dynamic Response Wind Tunnel Test Program. Boeing Co. Report MDC B1393, 31 January 1989.
- [100] Moses, R.W.: Vertical tail buffeting alleviation using piezoelectric actuators - some results of the actively controlled response of buffet-affected tails (ACROBAT) program. SPIE's 4th Annual Symposium on Smart Structures and Materials, Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies Conference, San Diego, CA, 4 - 6 Mar 97.
- [101] Krohn, N.; Dürr, J.; Dillenz, A.; Döttinger, C.; Lütze, S.; Nixdorf, K.; Herold-Schmidt, U.; Busse, G.: NDT of smart structures. In: "Emerging technologies in NDT" 2nd international conference, Athen 24 - 26 Mai 1999, Balkema, Rotterdam, S.187 - 191. ISBN 90 5809 127 9
- [102] Krohn, N.; Dillenz, A.; Nixdorf, K.; Voit-Nitschmann, R.; Busse, G.: NDT of shape adaptive structures. *NDT&E international* 34 (2001), S. 269 - 276
- [103] Pfleiderer, K.: *Zerstörungsfreie Prüfung adaptiver Strukturen mit variabler Aktor - Faserverbundwerkstoff – Kopplung*. Diplomarbeit am IKP-ZfP, Fakultät 13, Universität Stuttgart (2000)
- [104] Sherratt, A.G.: Resources, Technology and Trade: An essay in early european metallurgy. In: Sieveking, G.; Longworth, I. and Wilson, K. (eds.): *Problems in economic and social archaeology*, London (1976)
- [105] Renfrew, A.C.: The autonomy of the south-east european copper age. *Proceedings of the Prehistoric Society*, 35 (1969)
- [106] Coles, J.M.; Harding, A.: *The bronze age in europe*. London (1979)
- [107] Krohn, N.; Stoessel, R.; Busse, G.: Nonlinear vibrometry for quality assurance. In: Thompson D.O.; Chimenti D.E. (ed.): *27th Annual: Review of*

- Progress in Quantitative NDE Vol. 20. QNDE 2000, 16.-21.Juli, American Institute of Physics, CD-Rom (2001), S.1666-1672, ISBN 1-5666 396-989-0
- [108] Salerno, A.; Dillenz, A.; Wu, D.; Rantala, J.; Busse; G.: Progress in ultrasonic lockin thermography. Quantitative infrared thermography, QIRT 98, Lodz, Polen, Sept. 7 - 10, 1998, Akademickie Centrum Graficzno-Marketingowe Lodart S.A., Lodz.(1999), ISBN 83-87202-88-6, S. 154 - 160
- [109] W.R. Hendricks: The aloha airlines accident - a new era for aging aircraft. In: Structural integrity of aging aircraft, Springer-Verlag (1991), S. 153 - 165
- [110] Matthies, K.: Dickenmessung mit Ultraschall. DGZfP, DVS-Verlag, Berlin, 2. Auflage (1998), ISBN 3-87155-940-7
- [111] Schatt, W. (Hrsg): Einführung in die Werkstoffwissenschaft. Dr. Alfred Hüthig Verlag, Heidelberg, 6. Auflage (1987), ISBN 3-7785-1414-8
- [112] Fuchs, F.J.: Ultrasonic Cleaning. In: Metal Finishing Guidebook and Directory. Elsevier Science (1992), S. 134 - 139
- [113] Wechler, K.-P.: Mesolithikum Bandkeramik Trichterbecherkultur. Zur Neolithisierung Mittel- und Ostdeutschlands aufgrund vergleichender Untersuchungen zum Siliexinventar. Beiträge zur Ur- und Frühgeschichte Mecklenburg-Vorpommerns 27, Lübstorf (1993)
- [114] <http://www.collectspace.com/collection/hardware-apollo-a7shield.html>
- [115] Apollo accident, report of accident to administrator of the National Aeronautics and Space Administration, Government Printing Office, Washington D.C. (1967)
- [116] <http://www.washington.edu/research/pathbreakers/1979b.html>
- [117] <http://www.washington.edu/research/pathbreakers/1963b.html>
- [118] Zweschper, T.: Persönliche Mitteilung (2002)