

**Frequenzkonversion aufgrund
nichtlinearer akustischer Phänomene:
Grundlagen und Anwendung zur
defektselektiven zerstörungsfreien Prüfung**

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

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Klaus Pfeleiderer
aus Esslingen am Neckar

Hauptberichter: Prof. Dr. rer. nat. habil. G. Busse
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. G. Mook
Tag der mündlichen Prüfung: 05. September 2006

Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde
der Universität Stuttgart
2006

Vorwort

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

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. G. Busse, der durch seine Begeisterung für wissenschaftliche Fragestellungen für mich eine wichtige und stete Motivation zur Erstellung dieser Arbeit war.

Herrn Prof. Dr. I. Yu. Solodov von der Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Dept. of Acoustics möchte ich herzlich für die geduldige Einführung ins Thema nichtlineares Materialverhalten sowie für die vielen Anregungen zur vorliegenden Abhandlung danken.

Für das gezeigte Interesse und die freundliche Übernahme des Mitberichtes danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. G. Mook, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Meinen Kollegen in der Abteilung ZfP schulde ich Dank für den Teamgeist, der zu vielen inspirierenden Diskussionen und Ideen geführt hat und für mich eine verlässliche Motivationsquelle war. Darüber hinaus danke ich meinen Studien-, Diplomarbeitern und Hiwis, insbesondere J. Wackerl, J. Aufrecht und J. Šekelja.

Für ihre Geduld und Unterstützung bei der Erstellung dieser Abhandlung gilt mein ganz besonderer Dank meinen Eltern und Frau Elke Steinwand.

Dem DAAD danke ich für die Förderung der befruchtenden Zusammenarbeit mit der Lomonosov-Universität im Rahmen des Leonhard-Euler-Programmes.

Ein Großteil der vorgestellten Messungen erfolgte im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 381: "Charakterisierung des Schädigungsverlaufes in Faserverbundwerkstoffen mittels zerstörungsfreier Prüfung" und im Schwerpunktprogramm 1123: "Textile Verbundbauweisen und Fertigungstechnologien für Leichtbaustrukturen des Maschinen- und Fahrzeugbaus". Für diese Unterstützung gilt mein Dank der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG).

Stuttgart, im September 2006

Klaus Pfeleiderer

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen.....	7
1. Formelzeichen	7
2. Abkürzungen	9
Zusammenfassung	10
Abstract	12
1. Einleitung.....	14
1.1. Bedeutung der zerstörungsfreien Prüfung	14
1.2. Motivation / Ziele der Arbeit	15
2. Stand der Technik: Zerstörungsfreie Prüfung	18
2.1. Elektromagnetische Verfahren	18
2.2. Thermische Verfahren.....	21
2.3. Akustische Verfahren.....	22
3. Entstehungsmechanismen nichtlinearer Phänomene.....	32
3.1. Höherharmonische aufgrund nichtlinearer Rissufer-Interaktion.....	33
3.1.1. Rissufer-Klappern bei vertikaler Relativbewegung.....	33
3.1.2. Rissufer-Klappern bei tangentialer Relativbewegung.....	36
3.1.3. Rissufer-Reibung	39
3.2. Mischfrequenzen aufgrund nichtlinearer Modulation	41
3.2.1. Modulation bei einer nichtlinearen Anregungskomponente.....	41
3.2.2. Modulation bei zwei nichtlinearen Anregungskomponenten	44
3.2.3. Numerische Lösung	46
3.3. Frequenzkomponenten aufgrund nichtlinearer Resonanz.....	48
3.3.1. Nichtlineare Resonanz	48
3.3.2. Entstehung von Subharmonischen und Frequenzpaaren.....	50
3.4. Zusammenfassung: nichtlineare akustische Phänomene	53
4. Eingesetzte Anregungs- und Messtechnik	57
4.1. Anregungsmöglichkeiten.....	57
4.1.1. Mechanische Anregung.....	57
4.1.2. Laseroptische Anregung.....	61
4.1.3. Akustische Anregung.....	63
4.2. Relevante Eigenschaften elastischer Wellen	64

4.3.	Detektionsmöglichkeiten.....	65
4.3.1.	Akustische Detektion.....	65
4.3.2.	Bildgebende Laser-Doppler-Interferometrie	65
5.	Nachweis nichtlinearen Defektverhaltens	72
5.1.	Nichtresonantes Defektverhalten (Höherharmonische).....	72
5.1.1.	Spektraler Verlauf nichtlinearer Spektren	72
5.1.2.	Nichtlinearer laserangeregter Ultraschall.....	74
5.2.	Wellenmischen in Defektbereichen	74
5.2.1.	Nachweis akustischer Modulation an einer Modellprobe.....	75
5.2.2.	Senkrechte Durchschallung modulierter Bruchschäden	76
5.2.3.	Mechanisch modulierte Delaminationen.....	76
5.3.	Resonantes Defektverhalten	78
5.3.1.	Defektresonanzen	78
5.3.2.	Frequenzverschiebung der Resonanz.....	79
5.3.3.	Frequenzabhängige Defektmerkmale.....	80
5.3.4.	Abstand zwischen den Seitenbändern eines Frequenzpaares.....	82
5.3.5.	Amplitudenabhängige Defektmerkmale.....	83
5.3.6.	Chaotisches Verhalten.....	83
6.	Ausnutzung nichtlinearer Phänomene zur defektselektiven ZfP	86
6.1.	Nichtlineare nichtresonante Vibrometrie	86
6.1.1.	Höherharmonische durch Klappern und Reiben.....	86
6.1.2.	In-plane-Komponenten von Höherharmonischen.....	90
6.2.	Nichtlineare Modulationstechnik.....	92
6.2.1.	Mischfrequenzen bei externer mechanischer Anregung	93
6.2.2.	Mischfrequenzen bei interner Aktorik	98
6.2.3.	Mischfrequenzen bei kontaktfreier Ultraschallanregung.....	99
6.3.	Nichtlineare Resonanz-Technik.....	101
6.3.1.	Subharmonische und Vielfache von Subharmonischen.....	101
6.3.2.	Defektabbildung mittels Frequenzpaaren.....	105
6.4.	Zusammenfassung und Vergleich nichtlinearer Defektmerkmale	107
7.	Diskussion und Ausblick.....	110
7.1.	Diskussion.....	110
7.2.	Ausblick.....	111
	Literatur.....	113

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen

1. Formelzeichen

a	Apertur
a_N	Amplitude der harmonischen Schwingung N -ter Ordnung
A_N	Amplitude
$c_{1,2}$	Schallgeschwindigkeit [m/s]
C	elastischer Steifigkeitsmodul [N/mm ²]
C''	linearer dynamischer Steifigkeitsmodul [N/mm ²]
ΔC	Steifigkeitsänderung [N/mm ²]
$\Delta C(t)$	Steifigkeitsfunktion [N/mm ²]
E	Energie [J]
f	Frequenz [Hz]
f_f	Brennweite [m]
f_D	Dopplerfrequenz [Hz]
F	Kraft [N]
$H(\varepsilon)$	Heaviside-Funktion (Stufenfunktion)
I	Intensität
n, N	ganzzahlige Zählvariable
L	Abstand (Resonatorlänge) [m]
ΔL	Pfaddifferenz [m]
m	Masse [kg]
p	Schalldruck [Pa]
Q	Normalkoordinate
R	Reflexionskoeffizient
t	Zeit [s]
T	Periodendauer $1/f$ [s]
U	Auslenkung eines Massenpunktes, Anregungsamplitude [m]
U_{eff}	Effektivwert der elektrischen Spannung [V]
U_{SS}	doppelter Spitzenwert der elektrischen Spannung [V]
v	Geschwindigkeit, Schallschnelle [m/s]
V	Grundsignal
ΔV	maximale Signalthöhe

x, y, z	kartesische Koordinaten
Z	akustische Impedanz [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$]
α	Zählvariable für gekoppelte Oszillatoren
β_n	nichtlinearer Parameter n-ter Ordnung
$\delta(t)$	Delta-Distribution
Δ	Frequenzabstand [Hz]
$\Delta\varphi$	Phasendifferenz
ε_{kl}	Dehnungstensor
ε_0	Amplitude der Dehnung; statische Vordehnung
ε^0	Schwellwert, bei dem eine Steifigkeitsänderung auftritt
λ	Wellenlänge [m]
$\nu_{0, 1, 2}$	Anregungsfrequenzen [Hz]
Π	Einheitssprungfunktion
θ	Phasenverschiebung [$^\circ$]
ρ	Massendichte [kg/m^3]
σ_{ij}	mechanischer Spannungstensor [N/mm^2]
τ	Periodendauer $1/f$ [s], Modulationszeit [s], Pulsbreite [s]
ω	Eigenfrequenz eines Oszillators [1/s]
Ω	Frequenz eines Lasers [Hz]

2. Abkürzungen

3D	dreidimensional
A/D	Analog/Digital
CCD	Charge Coupled Device (ladungsgekoppelte Einheit)
CFK	carbonfaserverstärkter Kunststoff
CAN	Contact Acoustic Nonlinearity
DFT	diskrete Fouriertransformation
DGL	Differentialgleichung
FFT	Fouriertransformation
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
Glare®	Glasfaser-Metall-Laminat
LDA	Laser-Doppler-Anemometer
LDV	Laser-Doppler-Vibrometer
NMR	Nuclear Magnetic Resonance (Kernspinresonanz)
PS	Polystyrol
PTFE	Polytetrafluorethylen (DuPont Teflon®)
RMS	Root Mean Square (Effektivwert)
RTM	Resin Transfer Molding
C/C-SiC	Kohlenstoff-Siliziumcarbidverbundwerkstoff
Whipox™	Wound High Porous Oxide Ceramic: Keramik aus verwobenen Al ₂ O ₃ -Fasern in einer Al ₂ O ₃ -Matrix
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung

Zusammenfassung

Akustische Systeme zur zerstörungsfreien Prüfung (ZfP), wie sie heute üblicherweise zum Einsatz kommen, nutzen lineare Mechanismen beim Zusammentreffen von Welle und Defekt: Streuung und Änderungen der Objektresonanzen. Wenn ein Defekt Veränderungen der Bauteilantwort verursacht, können diese meistens nur im Vergleich mit einer intakten Probe ermittelt werden. Unter Umständen sind die defektbedingten Änderungen aber nicht auffällig genug, um sich gegen spektrale Veränderungen aufgrund von Masse- oder Geometrievariation abzuheben. Zusätzlich wird die Defekterkennung durch stehende Wellenfelder behindert, da ein Fehler in einem Schwingungsknoten keinen Einfluss auf diese Resonanzschwingung hat.

Eine Alternative hierzu bietet die nicht-klassische nichtlineare Akustik. Sie wurde hauptsächlich im letzten Jahrzehnt entwickelt und baut auf den Erfahrungen aus der klassischen nichtlinearen Akustik auf. Letztere war über 200 Jahre lang überwiegend ein rein akademisches Forschungsfeld für Physiker und Mathematiker. Bei der klassischen Nichtlinearität kommt es aufgrund des nichtlinearen Materialverhaltens mit zunehmender Laufstrecke in einem nichtlinearen Medium zu einer stetig anwachsenden Wellenverzerrung und damit zur Ausbildung von Höherharmonischen.

Im Gegensatz dazu basiert die neue nichtklassische Nichtlinearität auf akustisch angeregtem Rissufer-"Klappern". Dieses nichtlineare Verhalten von Kontaktstellen in Defekten (Ermüdungsbrüche, Delaminationen, Impacts, etc.) führt bei einer sinusförmigen Anregung des Prüfobjektes zu einer pulsartigen Veränderung der Kontaktsteifigkeit. Dadurch wird die Prüfwelle verzerrt, und es erscheinen Höherharmonische der Anregungsfrequenz an Stellen mit nichtlinearer Inhomogenität oder Materialdefekten.

Der erste Schwerpunkt dieser Abhandlung ist die Untersuchung Höherharmonischer der Anregungsfrequenz. Dazu wird detailliert auf die grundlegenden Mechanismen eingegangen: Klappern bei vertikal oder tangential zueinander bewegten Grenzflächen und Grenzflächenreibung. Die analytischen Ergebnisse und Unterscheidungsmerkmale sind in einer Übersicht zusammengestellt. Mit diesem Hilfsmittel wurden dann die experimentellen Daten, die aus Messungen mittels Laser-Doppler-Interferometer oder Luft-Ultraschall-Prüfköpfen stammen, bewertet.

Ein Verfahren zur berührungslosen Modalanalyse ist die laserangeregte Vibrometrie unter Ausnutzung thermisch induzierter Ausdehnungen. In dieser Arbeit wurde dagegen durch die Modulation eines Lasers eine monofrequente Anregung verwirklicht. Dadurch besteht die Möglichkeit zur berührungsfreien Anregung und Detektion nichtli-

nearer Defektstellen durch den lokalen Nachweis von Höherharmonischen. Außerdem erfolgte nicht nur eine Messung der out-of-plane-Komponente einer nichtlinearen Defektantwort, sondern durch den Einsatz eines 3-D-Vibrometers wurden auch die dazugehörigen in-plane-Komponenten der Bauteilantwort ausgewertet. Es stellte sich heraus, dass letztere sehr empfindlich nichtlineares Materialverhalten anzeigen und somit der nichtlinearen Prüfung neue Möglichkeiten eröffnen.

Nichtlineares Wellenmischen im Defektbereich bei multifrequenter Anregung ist der zweite Schwerpunkt dieser Arbeit. Die nichtlinearen Mischfrequenzen, die ebenfalls durch das Aufeinanderprallen von Rissufern entstehen, sind teilweise besser als Höherharmonische geeignet, um Defekte zu lokalisieren. Um die zugrunde liegenden Mechanismen zu verstehen, wurden analytische Modelle verschiedener Kombinationsmöglichkeiten entworfen und diese sodann messtechnisch anhand unterschiedlicher Beispielobjekte verifiziert. Die Gegenüberstellung der Kombinationsmöglichkeiten erschließt nichtlineares Wellenmischen für viele Anwendungen im Bereich der Material- und Strukturprüfung.

Als dritter Schwerpunkt in der Reihe nichtlinearer Phänomene konnte nachgewiesen werden, dass ein Defektbereich eine nichtlineare parametrische Resonanz aufweisen kann. Die Untersuchungen mit nichtlinearen Defektresonanzen zeigen zwei für die ZfP interessante Eigenschaften: zum einen das Schwellwertverhalten der nichtlinearen Frequenzen und zum anderen die sehr hohe Zuverlässigkeit bei der Lokalisierung des Defektbereiches aufgrund großen Signal-Rauschabstandes. Durch Frequenzkonversionen treten hier Subharmonische und Frequenzpaare auf, die nichtlineare Fehler selektiv und bildgebend darstellen können.

Die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen durch die Ausnutzung des gesamten nicht-klassischen Antwortspektrums einen neuen Ansatz zur nichtlinearen zerstörungsfreien Prüfung. Die Eignung der vorgestellten nichtlinearen Frequenzkomponenten als Defektindikatoren wurde theoretisch analysiert und anhand von Experimenten an einer Auswahl von Materialien, primär aus dem Luft- und Raumfahrtbereich, überprüft. Mit diesem neuen Ansatz können Informationen über die Eigenschaften eines nichtlinearen Defektes gesammelt werden, um die Zuverlässigkeit und Qualität der akustischen zerstörungsfreien Prüfung zu erhöhen.

Abstract

Common acoustic systems used for non-destructive evaluation (NDE) normally utilise linear mechanisms of the wave-defect interaction which result for example in additional scattering or variations of the natural frequencies of the sample. In the latter case the changes mostly require comparison of frequency responses of intact and defect samples to provide reliable results. Under special conditions the changes due to defects can not be distinguished from changes due to permitted mass and geometry variations. Additionally knots of standing wave patterns can mask defects.

An alternative approach is based on non-classical nonlinear acoustics, which was basically developed over the last decade on the background of its counterpart: the classical nonlinear acoustics. The latter has been a field of mostly academic interest for physicists and mathematicians in the last 200 years. In the case of classical nonlinearity an increasing waveform distortion takes place while the originally monochromatic wave propagates along the nonlinear material. This results in higher harmonics of the fundamental frequencies, which deliver information on material properties.

Contrary to this, the new model of non-classical nonlinearity is based on acoustically activated contact clapping in cracks. The nonlinear behaviour of contact interfaces in defects (fatigue, delaminations, impacts, etc.) is shown to be the reason for a pulse-type change in contact stiffness. Thereby, the sinusoidal driving wave will be distorted and after Fourier-transformation higher harmonics of the driving frequency appear locally at nonlinear inhomogenities and material defects.

The first main focus of this work is the analysis of higher harmonics of a driving frequency. Basic mechanisms for contact interaction are described in detail: normal clapping, shear clapping and friction. The analytical results and especially the distinctive features are presented in an overview which is then used to evaluate experimental data obtained by a laser-Doppler-interferometer or ultrasonic transducers.

In order to develop a fully non-contact method for nonlinear NDE a modulated diode laser beam was successfully used to generate elastic waves by local thermal expansion. A 3-D Doppler-laser-vibrometer was also used in experiments to show that in-plane-components are highly sensitive indicators of nonlinear vibrations of cracked defects.

The second main focus is concerned with nonlinear wave mixing by defects in multi-frequency excitation modes. The nonlinear modulation frequencies caused by clapping of the crack interfaces in some cases unveil flaws with higher contrast and more

reliably than the higher harmonics. The analytical models of mixing type spectra are developed for the most important frequency combinations and evaluated by experimental results obtained with several testing objects. The results advise nonlinear wave mixing to many applications in the field of material- and structural testing.

The third topic of this thesis is devoted to the study of nonlinear parametric resonance effects in defect areas. The nonlinear defect resonances show two features interesting for NDE: threshold behaviour of nonlinear output frequencies with substantially high amplitude and reliable on defect recognition due to high signal-to-noise ratio. The relevant frequency conversion induces sub-harmonics and frequency pairs, which selectively indicate nonlinear flaws and thus facilitate imaging.

In summary the results obtained in this thesis, represent a new approach to nonlinear NDE by using the non-classical multi-frequency spectrum. Its feasibility for defect-selective NDE was analysed theoretically and demonstrated experimentally on a number of materials, mostly used in aerospace industry. The new approach was defined to provide abundant information on properties of defects and, thus, improve reliability and quality of acoustic NDE.

1. Einleitung

1.1. Bedeutung der zerstörungsfreien Prüfung

Die gebräuchlichsten Verfahren der Werkstoffprüfung sind Härtemessung, Festigkeitsuntersuchung bei statischer und dynamischer Belastung, Zähigkeitbestimmung und Gefügeuntersuchung. Neben diesen in der Regel zerstörenden Verfahren spielt die zerstörungsfreie Material- und Strukturfehlersuche zur Ermittlung von Werkstoffeigenschaften und zur Qualitätssicherung in der Fertigung und bei der Inspektion eine immer wichtigere Rolle. Tabelle 1.1 gibt einen Überblick über die vielfältigen Fragestellungen der zerstörenden und zerstörungsfreien Werkstoffprüfung.

Fragestellung nach...	Beispiele
chemischer Zusammensetzung	Analyse der chemischen Zusammensetzung von Werkstoffen (z. B. Spektralanalyse) oder einzelner Phasen
Gefügeart und Schadstellen	Herstellung von Gefügebildern (Schliffbilder) durch Licht- oder Elektronenmikroskopie. Untersuchung von Bruchflächen (Fraktographie)
Eigenschaften	Ermittlung von Werkstoffkennwerten und -linien zur Qualitätssicherung, z. B. Zugversuch, Härteprüfung; Prüfung von Verarbeitungseigenschaften (technologische Prüfung), z. B. Härbarkeit
Material- und Strukturfehler	Aufspüren von Werkstofffehlern ohne Zerstörung des Prüflings mittels durchdringender Verfahren
Schadensentwicklung	Klärung des Schädigungsverlaufs bei Bruch, Verformung oder vorzeitigem Verschleiß mit dem Ziel, die Schadensursache zu finden und zu beseitigen

Tabelle 1.1: Schwerpunkte in der Werkstoffprüfung [1].

Eine zuverlässige zerstörungsfreie Prüfung (ZfP), die idealer Weise automatisiert abläuft, ist besonders am Produktionsstandort Deutschland gefragt, weil damit dem zunehmenden Kostendruck begegnet werden kann. Forderungen gemäß DIN ISO 9000 nach Nachweis und Dokumentation der Produktqualität lassen sich mit einer Stichprobenprü-

fung nur schwer erfüllen. Bei der Serienprüfung wiederum kommen umständliche und kostspielige Prüftechniken schnell in Konflikt mit Wirtschaftlichkeitsüberlegungen, denn eine 100%-Prüfung würde bei Anwendung zerstörender Prüfverfahren ausschließlich zu Ausschuss führen. So muss von Fall zu Fall ein optimales Verhältnis zwischen Kosten und Nutzen in Frage kommender ZfP-Methoden gefunden werden. Dies beinhaltet auch die Entwicklung bzw. Anpassung geeigneter Prüfverfahren für so unterschiedliche Werkstoffe wie Metalle, Kunststoffe, Keramiken etc.

Die Anforderungen an die ZfP lassen sich allgemein zusammenfassen:

- schnell,
- preiswert,
- aussagesicher bei der Erkennung bestimmter Defektarten und ihrer Mindestgrößen, etc., und
- unanfällig gegen wechselnde Prüfer, Bauteilgeometrie und Umgebungsstörungen.

Um im allgemeinen Wettbewerb bestehen zu können, müssen Produkte ständig optimiert werden. Dabei stehen sowohl die Herstellungskosten als auch die Kosten, die das Bauteil im Betrieb verursacht, im Vordergrund. Zu den Betriebskosten zählen u. a. Wartungskosten und Betriebsmittelkosten (Sprit). Ein Ansatz zur Reduzierung dieser Kosten ist der Einsatz neuer Leichtbaumaterialien, was wiederum eine Anpassung oder gar Neuentwicklung geeigneter Prüftechniken erforderlich macht.

ZfP-Methoden, die nach umfangreichen Prüfungen in sicherheitsrelevanten Bereichen wie der Luft- und Raumfahrt zur Anwendung kommen, werden in Normen und Sicherheitsvorschriften ausführlich und genau fixiert. Dabei wird auf die Beschaffenheit, die Kalibrierung (oder sogar Eichung) und den Gebrauch der ZfP-Methoden eingegangen. Auch im Hinblick auf nachträgliche Regressansprüche in Schadensfällen ist dies unabdingbar. Auf nationaler Ebene sind dafür in erster Linie zwei Organisationen zuständig: das Deutsche Institut für Normung e.V. (DIN), Normenausschuss Luft- und Raumfahrt (NA 131) und das Luftfahrtbundesamt. International sind die beiden bestimmenden Organisationen die European Aviation Safety Agency (EASA) und die US-amerikanische Federal Aviation Administration (FAA).

1.2. Motivation / Ziele der Arbeit

Bisher wurden zur akustischen Prüfung lineare Phänomene genutzt, die zur Entwicklung der Modal- und Resonanzanalyse ("Vibrometrie") führten. Diese lineare Vibrometrie erfasst das Resonanzspektrum, das a priori von der Bauteilgeometrie und gemittelten elas-

tischen Eigenschaften abhängt. Daher hat z. B. die Art der Halterung eines Bauteils beim Messvorgang einen Einfluss auf das Ergebnis, und eine Defektortung ist bei dieser integralen Messung schwierig. Diese Situation ist unbefriedigend.

In Defekten mit Bruchflächen tritt aber auch nichtlineares Übertragungsverhalten auf, welches ein großes Potenzial zur Defekterkennung und -charakterisierung besitzt. In diesen nichtlinearen Defektbereichen kommt es bei entsprechender Anregung zum Auftreten einer völlig neuen Gruppe nichtlinearer Phänomene. Sie zeigen ein deutlich anderes Verhalten als die Frequenzphänomene der klassischen Nichtlinearität, da ihre Entstehung auf Kontaktstellen-Nichtlinearität beruht.

Nichtlinearität als Untersuchungsparameter hat sich bereits in ersten Anwendungen etabliert. So basieren verschiedene Ansätze in den Bereichen Seismologie, medizinische Diagnostik und zerstörungsfreie Prüfung auf der Detektion und Darstellung lokaler elastischer Nichtlinearität. Bewertbar sind dabei Stellen, die ein nichtlineares akustisches Schwingungsverhaltens zeigen. Da die meisten kritischen Fehler innere Grenzflächen besitzen, ist die Nichtlinearität dieser Kontaktstellen ein geeigneter Indikator, um Defekte bildgebend darzustellen. Bei ausreichend ausgeprägter Nichtlinearität des Defektes zeigen die Ergebnisbilder ausschließlich die lokale Verteilung der nichtlinearen Signale und sind damit defektselektiv. Die daraus resultierende hohe Erkennensicherheit ist ein bedeutender Vorteil gegenüber vielen anderen ZfP-Methoden wie Ultraschall oder Röntgenprüfung. Viele internationale Konferenzen mit eigenen Nichtlinearitäts-Sitzungen unterstreichen die zunehmende Akzeptanz und Bedeutung dieses Arbeitsbereiches.

Bisher waren nur Höherharmonische als Defektindikatoren untersucht worden. Daneben gibt es aber noch weitere nichtlineare Frequenzkomponenten im Antwortspektrum defekter Prüfkörper. Das Ziel der vorliegenden Abhandlung ist es deshalb, sämtliche defektbedingte nichtlineare Phänomene zu analysieren und ihre Eignung zur zerstörungsfreien Prüfung zu bewerten.

Folgende Fragen müssen dazu beantwortet werden:

- Welche Frequenzphänomene treten im nichtlinearen Spektrum auf?
- Was sind die messtechnischen Randbedingungen für deren Erzeugung?
- Welche physikalische Erklärung gibt es für diese nichtlinearen Spektralkomponenten?
- Wie lassen sich die nichtlinearen Phänomene zur Defekterkennung einsetzen?
- Welche Aussagen über die Art des Defektes sind möglich?
- Wie könnte eine praxisrelevante ZfP-Methode auf dieser Basis verwirklicht werden?

Wenn die nichtlinearen Spektralkomponenten Eigenschaften des Defektes widerspiegeln, dann gilt es, die sich daraus ergebenden Möglichkeiten zur Defektcharakterisierung zu prüfen und das Potenzial der Methode für die zerstörungsfreie Prüfung zu erschließen.

Im Falle einer Qualifizierung der nichtlinearen Frequenzkomponenten als Defektmarker im wissenschaftlichen Laborbetrieb stellt sich automatisch die Frage nach der industriellen Anwendbarkeit der neuen Methode. Zur technisch robusten Umsetzung muss die Messsicherheit in ausreichendem Maße gewährleistet werden. Dabei stehen sowohl die Optimierung von Anregungs- und Detektionstechniken als auch die Bewertung der Bauteilantwort im Vordergrund.

2. Stand der Technik: Zerstörungsfreie Prüfung

Dem Anwender, der sein Produkt einer zerstörungsfreien Prüfung unterziehen will, um Funktionalität und Leistungsfähigkeit sicherzustellen, steht eine Vielzahl von Methoden zur Verfügung. Die Auswahl geeigneter Verfahren ergibt sich aus den Fragestellungen (z. B. Defektart), Randbedingungen (z. B. Aufhängung, Zugänglichkeit) und letztendlich aus dem Eigenschaftsprofil des Prüfobjekts (z. B. Geometrie, Material).

Neben den reinen Funktionsprüfungen, wie z. B. der Dichtheitsprüfung mit Gasen, sind dies Verfahren mit elektromagnetischen, thermischen oder elastischen Wellen. Abbildung 2.1 zeigt anhand der Frequenzen eine Übersicht der ‐ZfP-Wellen‐.

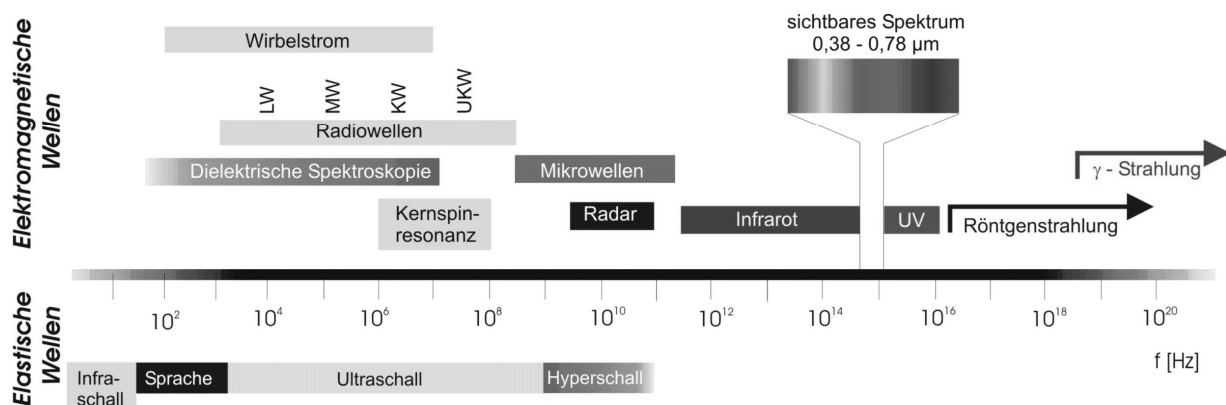


Abbildung 2.1: Elektromagnetische und elastische Wellen.

2.1. Elektromagnetische Verfahren

Elektromagnetische Wellen werden bei einer Vielzahl von Verfahren genutzt: z. B. optische Prüftechniken, Wirbelstromprüfung, Kernspin-Resonanz, Mikrowellen und Radar. Die folgende kurze Vorstellung der Verfahren erfolgt sortiert nach zunehmenden Arbeitsfrequenzen.

a) Magnetpulverprüfverfahren

Die Magnetpulverprüfung wird mit einem statischen Magnetfeld bei der Frequenz 0 Hz durchgeführt. Durch Fehler im Werkstück kommt es zu einer Änderung der magnetischen Feldlinien, die mit Hilfe der Magnetpulverprüfung detektierbar ist. Dies geschieht mit Hilfe eines magnetisierbaren Pulvers, das auf das Werkstück aufgebracht wird. Voraussetzung für diese Methode, eine der ältesten [2] und sichersten, ist die Magnetisierbarkeit des zu prüfenden Werkstoffs. Die Visualisierung des magnetischen Kraftfeldes erfolgt durch Anzeigemittel, die entweder nass oder trocken auf die Prüfstelle aufge-

bracht werden. In der Regel handelt es sich um schwarzes, rotes oder fluoreszierendes Eisenoxypulver. Die magnetischen Kraftlinien, die durch das Prüfpulver hindurchgehen, verbinden die Pulverteilchen miteinander und wirken somit als Brücke über die im Werkstoff vorhandene Fehlstelle. Diese kontrastierende Anhäufung von Prüfpulver geschieht auch bei sehr feinen, für das menschliche Auge sonst nicht mehr sichtbaren Rissen. Mit Hilfe von Mikroskopen können Haarrisse mit Breiten kleiner als $1\mu\text{m}$ gemessen werden [3].

b) Magnetinduktive Prüfung (Wirbelstromprüfung)

Bei elektrisch leitfähigen Werkstoffen kann der Nachweis von Defekten durch Leitfähigkeitsunterschiede erfolgen. Dazu wird eine Spule mit Wechselstrom (10^2 bis 10^7 Hz) beaufschlagt, welcher im Prüfkörper durch Induktion elektrische Ströme („Wirbelströme“) und somit ein magnetisches Wechselfeld erzeugt, das auf die Anregungsspule rückwirkt [4]. Damit erfasst die Spule indirekt den Magnetfluss und die elektrische Leitfähigkeit des Werkstoffs, beides wird durch Defekte wie entsprechend orientierte Risse oder Korrosion beeinflusst. Die Eindringtiefe („Skin-Effekt“) hängt dabei von der Frequenz ab, so dass bei Variation der Anregungsfrequenz sogar tiefenaufgelöste Messungen möglich sind. Durch Bestimmung des Phasenwinkels zwischen Spannung und Strom in der Spule lassen sich Gefügeänderungen, die den elektrischen Widerstand und damit die Wirbelströme beeinflussen, detektieren. Daneben sind Risse und Korrosion bei Metallen sowie Orientierungen von Carbonfasern [5] bildgebend darstellbar.

c) Kernspin-Resonanz

Bei der Kernspin-Resonanz-Analyse („Nuclear Magnetic Resonance“, NMR) richtet ein starkes homogenes Magnetfeld die Kernspins aus. Danach werden die Spins durch ein kurzes Hochfrequenzsignal zu einer Präzessionsbewegung angeregt, deren Frequenz (10^6 bis 10^8 Hz) durch das gyromagnetische Verhältnis und die Stärke des Magnetfeldes bestimmt wird [6]. Neben Anwendungen in der medizinischen Diagnostik ist die Kernspin-Resonanz-Analyse auch zur Bestimmung von Materialparametern (gyromagnetisches Verhältnis) im Einsatz. Dabei geht es um die Untersuchung der Häufigkeitsverteilung bestimmter Elemente im Prüfobjekt, aber auch um chemische Konfigurationen und Bindungstypen.

d) Mikrowellen / Radar

Mikrowellen (10^9 bis 10^{11} Hz), deren technische Entwicklung in der militärischen Radar- und Richtfunktechnik begonnen hat, eignen sich zur Prüfung schwach- oder nichtleitender Materialien. Bei metallischen Werkstoffen ist die Eindringtiefe frequenzbedingt zu gering („Skin-Effekt“), so dass sich lediglich Oberflächeneigenschaften bestimmen las-

sen. Die Wechselwirkung des Mikrowellenfeldes mit einem dielektrischen Medium wird von dessen Dielektrizitätszahl ε bestimmt. Zur Materialprüfung werden deshalb entweder der Absolutwert oder relative Unterschiede von ε ermittelt. Daraus ergeben sich vielfältige Anwendungsmöglichkeiten, z. B. Detektion von Inhomogenitäten allgemein [7], Bestimmung des Wassergehaltes, Visualisierung der Orientierung von Verstärkungsfasern in glas- oder mineralfaserverstärkten Kunststoffen [8].

e) Optische Verfahren

Die optischen Verfahren decken einen Frequenzbereich von 10^{13} bis 10^{16} Hz ab. Die älteste Variante mit der nach wie vor höchsten Verbreitung ist die Sichtprüfung. Der Grund dafür liegt auf der Hand: die niedrigen Kosten bei der eingesetzten Messtechnik und die hohe Flexibilität. Andererseits eignet sich dieses Verfahren aufgrund der hohen Personalkosten und der geringen „Messsicherheit“ nur bedingt für die Massenproduktion.

Nach wie vor eine der wichtigsten klassischen ZfP-Methoden ist das Eindringverfahren (Penetrierverfahren) zur Prüfung von Oberflächenrissen unmagnetischer und ferromagnetischer Werkstoffe. Dieses Verfahren liefert mit geringem Aufwand an Prüfmittel und Prüfgerät in kurzer Zeit ein eindeutiges Untersuchungsergebnis, wobei in der Regel kein hochqualifiziertes Prüfpersonal erforderlich ist.

Aufgrund der Kapillarwirkung können Oberflächenrisse benetzende Flüssigkeiten aufnehmen. Eine Variante des Verfahrens ist das Öleindringverfahren, bei dem heißes Öl in die Oberflächenfehler eindringt. Wird danach das Probestück kurz in eine Mischung aus Schlammkreide und Alkohol getaucht, dann verdunstet der Alkohol nach Entnahme rasch, und es bleibt eine weiße Kreideschicht zurück, auf der das austretende Öl gut zu erkennen ist [3]. Eine modernere Variante stellt die Farbeindringprüfung dar. Nach Entfernung der Farbflüssigkeit von der Oberfläche bleiben Reste im Spalt zurück, die mit einer Entwicklerflüssigkeit am Rissausgang farbige oder im UV-Licht fluoreszierende Markierungen entstehen lassen. Durch den Einsatz von Kameras und Rechnern eignet sich dieses Verfahren gut zur Automatisierung der Erkennung von Oberflächenrisen in der Massenproduktion.

Photogrammetrie und Lichtmikroskopie sind moderne Verfahren, die das sichtbare Spektrum nutzen. Letzteres bietet neben der reinen Vergrößerung auch die Möglichkeit, Spannungszustände in spannungsoptisch aktiven Medien durch polarisiertes Licht sichtbar zu machen [9], es ist aber nur auf plattenartige transparente Bauteile anwendbar.

Optisch interferometrische Verfahren wie die Holographie eignen sich, um defektbedingte Verformungen z. B. unter mechanischer oder thermischer Belastung nachzuweisen. Ein verwandtes Verfahren, das auf die aufwändige Phototechnik verzichtet, ist die Elektronische-Speckle-Pattern-Interferometrie (ESPI) [10, 11, 12]. Hierbei werden

Verformungen im Bereich der Wellenlänge des verwendeten Messlasers gemessen. Holographie und ESPI finden aufgrund ihrer Schwingungsempfindlichkeit im Laborbetrieb Anwendungen, während die Shearographie das Problem des Schwingungseinflusses dadurch umgeht, dass nur der Gradient des Verformungsfeldes, nicht aber das Verformungsfeld selbst dargestellt wird [13].

f) Röntgen-/Gamma-Strahlenprüfung

Aufgrund ihrer Erzeugung unterteilt man diese Strahlen in "künstliche" Röntgenstrahlen, die durch beschleunigte Elektronen in einer Röntgenröhre erzeugt werden, und "natürliche" Gammastrahlen, die den Kernzerfall radioaktiver Elemente begleiten. Der Frequenzbereich von Röntgen- und Gammastrahlung liegt zwischen 10^{15} und 10^{20} Hz. Gammastrahler können nicht abgeschaltet werden, deshalb ist ihre Handhabung relativ aufwändig. In industriellen Prüfungen kommen sie meistens in Kombination mit Photopapier in Durchstrahlung (Absorption) zum Einsatz.

Beim Durchgang durch Materie werden die Strahlen auf verschiedene Weise beeinflusst. Absorption von Röntgenstrahlen [14] wird bei der Radiographie ausgenutzt, dabei geht es um die Grobstruktur-Prüfung (Gefügeuntersuchung auf Fehler). Beugung [14] von Röntgenstrahlen ist die physikalische Grundlage sowohl für Weitwinkelstreuung („Wide Angle X-Ray Scattering“, WAXS), die zur Untersuchung von Kristallstrukturen dient, als auch für Kleinwinkelstreuung („Small Angle X-Ray Scattering“, SAXS). Unter Ausnutzung kollimierter monochromatischer Strahlung eignet sich dieses Verfahren beispielsweise zur Bestimmung von Kettenlängen in Polymeren. Röntgen-Fluoreszenz ist ebenfalls werkstoffspezifisch. Sie wird genutzt z. B. in der Gold- und Schmuckindustrie, um Legierungsbestandteile (Spektralanalyse) zu bestimmen.

2.2. Thermische Verfahren

a) Passive Thermografie

Aufgrund der geringen Absorption von Luft in den infraroten Wellenlängenbereichen $3\mu\text{m}$ bis $5\mu\text{m}$ (mittlerer Infrarotwellenlängenbereich) und $8\mu\text{m}$ bis $12\mu\text{m}$ (langwellig) (=atmosphärische Fenster) können Infrarotdetektoren ein Bild der Wärmestrahlung eines Körpers aufnehmen. Anwendungen finden sich vor allem in der Bauthermografie (Wärmebrücken, Wärmedämmung, elektrische Kurzschlüsse, Feuchtigkeit im Bauwerk) [15]. Die Detektoren arbeiten entweder bolometrisch oder unter Ausnutzung des Photoeffektes (Detektion von Lichtquanten).

b) Aktive Thermografie

Im Gegensatz zur passiven Thermografie wird bei der aktiven Version die thermische Antwort auf eine energiezuführende Anregung ausgewertet. Die Anregung kann dabei pulsartig oder periodisch moduliert erfolgen und ermöglicht eine Phasenauswertung (=Lockin-Thermografie) [16]. Die Temperaturnausgleichsvorgänge sind Diffusionsprozesse, deren Differentialgleichung im Falle periodischer Anregung eine wellenartige Lösung besitzt. An thermischen Grenzflächen zeigen diese "thermischen Wellen" Reflexionseigenschaften, vergleichbar mit denen elastischer Wellen, und sind mit Hilfe von Amplitude, Phase und Dämpfung beschreibbar. Die Defekterkennung erfolgt, indem Wärme moduliert eingebracht wird, die als thermische Welle an thermischen Grenzflächen (Defekt) reflektiert wird und sich schließlich mit der einlaufenden Welle überlagert. Der zeitliche Temperaturfeldverlauf auf der Probenoberfläche lässt sich als Bildstapel aufzeichnen, der schließlich zu Amplituden- und Phasenbild durch FFT verdichtet wird (Lockin-Thermografie) [17]. Das Phasenbild bietet den Vorteil, dass Unterschiede im Emissionskoeffizienten der Oberfläche oder lokale Variationen in der Anregung unberücksichtigt bleiben und dass zudem die Tiefenreichweite etwa doppelt so groß ist wie die des Amplitudenbildes [18].

Um oberflächennahe Defekte zu erfassen, eignen sich als Anregungsquelle Licht (optische Anregung) und Wirbelstrom. Sind dagegen tieferliegende Defekte mit internen Grenzflächen zu detektieren, dann bietet sich Ultraschall an, weil damit Defektbereiche aufgrund von Hystereseeffekten selbst thermisch aktiv werden [19].

2.3. Akustische Verfahren

Elastische Wellen (Körperschallwellen) bieten vielfältige Möglichkeiten, Defektinformationen zu erhalten. Entsprechend der verwendeten Wellenlängen erfolgt meistens eine Unterteilung in Ultraschall und Akustik, wobei letztere in der Regel den hörbaren Frequenzbereich (16Hz – 20kHz) bezeichnet.

Der klassische Ansatz in der akustischen ZfP ist die Auflösung der Nachklingdauer; erste Anwendungen gibt es wahrscheinlich bereits seit 8500 Jahren: die Prüfung gebrannter Keramiken [20]. Dabei bedingt beispielsweise Rissuferreibung eine Verkürzung der Nachklingdauer. Verallgemeinernd formuliert führt eine Herabsetzung der mechanischen Qualität zu einer Änderung der akustischen Eigenschaften. Dies gilt auch für die Klangprüfung, die zu Anfang als rein subjektive Beurteilung der Bauteilqualität zur Anwendung kam, bis schließlich der Einsatz von Mikrofonen und Signalverarbeitung eine Objektivierung ermöglichte.

a) Klopfest

Delaminationen, Enthaltungen oder auch Risse führen meistens dazu, dass sich das Material lokal akustisch anders verhält. In der Regel ist dann an Defektstellen eine höhere mechanische Nachgiebigkeit vorhanden, die sich durch die akustische Impedanz Z , also das Produkt aus Dichte ρ und Schallgeschwindigkeit c , beschreiben lässt. Kommerziell erhältliche rasternde Geräte detektieren, wie viel Energie an der Probenoberfläche reflektiert wird. Dazu wird der Reflexionskoeffizient erfasst, der durch die gerätespezifische Impedanz Z_1 des Impulsgebers und die Eingangsimpedanz der Probe Z_2 bestimmt wird:

$$\text{Gl. 2.1} \quad R_{1 \rightarrow 2} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}.$$

Je härter der untersuchte Materialbereich im Vergleich zum verwendeten, meistens weich gewählten Impulsgeber ist, desto höher ist der Reflexionskoeffizient.

Durch neuronale Auswertung akustischer Signale von Klopfests [21] zeichnen sich hier neue Entwicklungen ab. Die Klangprüfung ist neben der Sichtprüfung eine der ältesten ZfP-Methoden. Ein relativ "junges" Beispiel dazu stellt die Perkussion (Abklopfmethode, 1760) in die Medizin dar, die Aussagen über den inneren Zustand des Brustbereichs erlaubt. Dabei führt die unterschiedliche Lage und Größe der Organe dazu, dass das Klangvolumen der Brust völlig uneinheitlich ist und man beispielsweise Größe und Lage der Leber oder den Luftgehalt der Lunge abschätzen kann [22].

Allgemein eignet sich die Methode besonders für Materialien mit niedriger akustischer Dämpfung wie z. B. Metallussteile, für die es bereits kommerziell erhältliche Messvorrichtungen gibt [23]. Dabei werden aus den Resonanzfrequenzen, die sich durch Fehler wie Lunker und Risse verändern, werkstückspezifische akustische Gütemerkmale definiert ("finger print").

b) Schallemissionsanalyse

Bei vielen Werkstoffen treten unter Belastung Mikrorisse auf, die ein späteres Versagen ankündigen. Entstehung und Wachstum der zuerst noch unkritischen Mikrorisse ist verbunden mit lokalisierbaren Schallereignissen, die bei Verwendung mehrerer Körperschallaufnehmer (akustische Triangulation) lokalisierbar sind. Häufigkeit und räumliche Verteilung der Schallereignisse geben Hinweise auf den Schädigungszustand und den Schädigungsverlauf des Prüflings [24].

c) Ultraschall

Mit Ultraschall bezeichnet man Schall oberhalb der menschlichen Hörschwelle mit Frequenzen zwischen 20kHz und 1GHz. Besonders bei den hohen Frequenzen ergibt sich

durch die kleine Wellenlänge eine sehr gute Orts- und Tiefenauflösung. Zur Begriffsklärung sei noch angemerkt, dass man populärwissenschaftlich Töne noch höherer Frequenz als Hyperschall und Töne unterhalb des für Menschen hörbaren Bereiches als Infraschall bezeichnet.

Die Ultraschallverfahren unterscheidet man nach der Anordnung der Prüfköpfe in Reflexions- und Durchschallungstechnik. Varianten sind die Ultraschall-Resonanztechnik, Ultraschallplattenwellenauswertung etc. Eine andere Einteilungsmöglichkeit ergibt sich aus der Schalleinkopplung in das Prüfmaterial: Kontakt- bzw. Tauchtechnik oder Luftultraschall. In der ZfP kommt der kontaktfreie Luftultraschall erst seit kurzem zum Einsatz, da die Technologie zur Überbrückung der großen Impedanzunterschiede beim Übergang Prüfkopf-Luft (piezokeramischer Sender: -159dB) erst entwickelt werden musste [25].

Bei Schallübertragungsstrecken über Gas und Gasgemische wie Luft müssen niederfrequente Arbeitbereiche (100kHz-500kHz) gewählt werden, weil die Dämpfung mit der Frequenz zunimmt. Durch die dann große Wellenlänge kann die Auflösung hochfrequenter Kontakt-Ultraschallsysteme nicht erreicht werden.

Meistens wird eine Pulswelle durch das Prüfmaterial geschickt, die dann an Grenzflächen reflektiert oder gestreut wird. Daneben dienen auch Laufzeiten und Phasenverläufe der Prüfwelle als Defektindikator.

Bei Durchschallung erfolgt die Bewertung eines Prüflings mit Hilfe getrennter Sende- und Empfangsköpfe. Die Tiefenlage des Defektes kann mit diesem Verfahren nicht bestimmt werden, da das Ergebnis eine Projektion ist. Bei Reflektionsanordnung wird entweder auf einen Empfänger reflektiert, der sich vom Bauteil aus betrachtet auf derselben Seite wie der Sender befindet, oder der Sender selbst wird auch als Empfänger genutzt. Die letzte Anordnung lässt dann allerdings keinen Dauerbetrieb (cw), sondern nur gepulstes Arbeiten zu, weil das piezokeramische Element zunächst ein akustisches Signal erzeugen und anschließend dessen Echo empfangen muss. Die Tiefenlage des Fehlers lässt sich über die Echolaufzeit ermitteln. Ein Vorteil des Puls-Verfahrens ist, dass nur eine Seite des Prüflings zugänglich zu sein braucht.

Die Darstellung der Ultraschallergebnisse erfolgt meistens in A-, B- und C-Scans. Ein A-Scan beinhaltet das Zeitsignal der Messung, daraus kann die Laufzeit des Echos an einem bestimmten Ort ermittelt werden. Der B-Scan enthält das Zeitsignal, aufgetragen über dem Ort der Messung, während ein C-Scan jedem Ort (xy-Koordinate) einen Amplitudenwert abhängig vom gewählten Zeitfenster zuordnet. Daneben lassen sich natürlich auch Phasenverläufe, Einschallwinkel, Dispersionskurven, etc. auftragen, die Informationen bezüglich des Prüfobjektes enthalten. Multielementarrays ("Gruppen-

strahler“) ermöglichen eine zwei- bis dreidimensionale Fokussteuerung und somit Bildaufnahmen ohne zeitaufwändige Rasterungsabläufe. Solche Geräte wurden zunächst im medizinischen Bereich eingesetzt, mittlerweile aber auch in der industriellen Qualitätssicherung.

d) Lineare Vibrometrie (Resonanztest)

Die klassische Schwingungsanalyse basiert auf der Annahme einer linearen Beziehung zwischen dem Spannungstensor σ_{ij} und dem Dehnungstensor ε_{kl} . Diese wird durch das Hooke'sche Gesetz [26] beschrieben:

$$\text{Gl. 2.2} \quad \sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}.$$

Dabei ist der vierstufige Tensor C_{ijkl} der elastische Modul. Um dynamisches Verhalten zu beschreiben, muss man eine Bewegungsgleichung formulieren. Für eindimensionale longitudinale oder transversale Wellen lautet sie:

$$\text{Gl. 2.3} \quad \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = C \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}.$$

U ist die Auslenkung eines Massenpunktes in x -Richtung, ρ die Dichte. Für diesen eindimensionalen Fall ist die dynamische Dehnung:

$$\text{Gl. 2.4} \quad \varepsilon = \frac{\partial U}{\partial x}.$$

Aus der Bewegungsgleichung lassen sich durch Berücksichtigung von Dämpfungseigenschaften und Ausbreitungsgeschwindigkeiten elastischer Wellen Eigenfrequenzen ableiten, die in der klassischen Schwingungsanalyse (= Vibrometrie = Modalanalyse) zur Charakterisierung und Bewertung des Prüfobjekts dienen. Das Auftreten stehender elastischer Wellen (Eigenmode) basiert auf Geometrie und Werkstoffeigenschaften, ist also von Defekt und Einspannbedingung abhängig.

Defekte fallen bei einer Modalanalyse durch eine Frequenzverschiebung und meistens eine Resonanzverbreiterung aufgrund der Dämpfungseigenschaft des Defektes auf. Spektrale Analysen werden bereits zur Bauteilbewertung in der Serienprüfung herangezogen, beispielsweise zur Rissprüfung [23] von Rohrgelenkwellen und Nockenwellen. Dabei ist zu beachten, dass sich Defekte (hier Risse) nur bei einzelnen Schwingungsmoden (Biegeform, Torsion, Zylinderbeulen oder Längsschwingung) durch Verschiebung oder Veränderung des Resonanzmaximums zeigen. Außerdem kann es durch

geometrische Asymmetrien zu Aufspaltungen von Eigenfrequenzen kommen, die sich ebenfalls zur Bauteilcharakterisierung nutzen lassen [27].

e) Klassische nichtlineare Vibrometrie

Die vereinfachende Annahme linearen elastischen Werkstoffverhaltens stellt einen Sonderfall dar, der aber in manchen Fällen die Werkstoffeigenschaften ausreichend genau beschreibt. In anderen Fällen, z. B. bei hinreichend großen Dehnungen und Schädigungen, muss dagegen nichtlineares Verhalten berücksichtigt werden. Wissenschaftliche Studien über das klassische nichtlineare Verhalten von Festkörpern laufen seit über 50 Jahren [28, 29, 30, 31].

In quasi-fehlerfreien Festkörpern kann man von nichtlinearen Anziehungskräften zwischen Atomen bzw. Molekülen ausgehen, denn die Wechselwirkung zwischen zwei Atomen in einem Festkörper wird allgemein durch das Lennard-Jones-Potenzial [32] beschrieben. Bei kleinen Dehnungen im Festkörper folgt der Potenzialverlauf näherungsweise (Taylorentwicklung um die Gleichgewichtslage) einer Parabel, die linearem Hooke'schem Verhalten entspricht.

Mit zunehmender Auslenkung aus der Ruhelage weicht der Verlauf des Potenzi- als immer weiter von der Hooke'schen Parabel ab und wird in Richtung größerer Ab- stände asymmetrisch. Die herrschende Kraft ist nun nicht mehr proportional zur Auslen- kung, und es folgt ein Übergang in den nichtlinearen Bereich der Deformation. Die wegwandernde Mittellinie des Potenzialtopfes entspricht dabei der thermischen Ausdeh- nung des Materials.

Für Festkörper mit nichtlinearem Verhalten lässt sich die Spannungs-Dehnungs- Beziehung formulieren, indem man $\sigma(\varepsilon)$ mit einer Taylorreihe annähert:

$$\text{Gl. 2.5} \quad \sigma(\varepsilon) = \sigma(\varepsilon_0) + \left(\frac{\partial\sigma}{\partial\varepsilon}\right)_{\varepsilon=\varepsilon_0} \varepsilon + \frac{1}{2!} \left(\frac{\partial^2\sigma}{\partial\varepsilon^2}\right)_{\varepsilon=\varepsilon_0} \varepsilon^2 + \frac{1}{3!} \left(\frac{\partial^3\sigma}{\partial\varepsilon^3}\right)_{\varepsilon=\varepsilon_0} \varepsilon^3 + \dots$$

Gl. 2.5 wird auch als verallgemeinertes Hooke'sches Gesetz bezeichnet. Dabei ist ε_0 die statische Vordehnung, und der statische Term $\sigma(\varepsilon_0)$ wird bei den folgenden Ausführun- gen zur klassischen Nichtlinearität vernachlässigt. Der dynamische Teil von Gl. 2.5 kann

durch die Einführung des linearen Steifigkeitsmoduls 2. Ordnung $C^{II} = \frac{\partial\sigma}{\partial\varepsilon}$ und der

nichtlinearen Steifigkeitsmodule n . Ordnung $C^{n+1} = \frac{\partial^n\sigma}{\partial\varepsilon^n}$ in folgenden Ausdruck um-

formuliert werden [33]:

$$\text{Gl. 2.6} \quad \sigma(\varepsilon) = C^{\text{II}} (1 - \beta_2 \varepsilon - \beta_3 \varepsilon^2 + \dots) \varepsilon .$$

Zusätzlich wurde hier der nichtlineare Parameter n . Ordnung $\beta_n = -\frac{C^{n+1}}{n!C^{\text{II}}}$ eingeführt. Aus Gl. 2.6 folgt, dass die dynamische Steifigkeit in einem nichtlinearen Medium eine Funktion der Dehnung ist. Für elastische Wellen bedeutet dies, dass die Wellengeschwindigkeit von der Dehnung abhängt. Zur Veranschaulichung wird für den eindimensionalen Fall die Bewegungsgleichung (Gl. 2.3) erweitert zu:

$$\text{Gl. 2.7} \quad \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = c_0^2 (1 - 2\beta_2 \varepsilon - 3\beta_3 \varepsilon^2 - \dots) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} ,$$

mit $c_0^2 = C^{\text{II}} / \rho$ als Wellengeschwindigkeit im ungedehnten Medium.

Damit ist die Geschwindigkeit der elastischen Welle:

$$\text{Gl. 2.8} \quad c(\varepsilon) = c_0 (1 - \beta_2 \varepsilon - \frac{3}{2} \beta_3 \varepsilon^2 - \dots) .$$

Bei einer akustischen Welle führt die lokale Geschwindigkeitsabhängigkeit zu einer Beeinflussung der Wellenform. In Abbildung 2.2 wird eine Wellenstörung gezeigt, die sich während der Ausbreitung mit zunehmender Entfernung vom Entstehungsort verstärkt. Im Ursprung (a) entspricht die Welle einem Sinus, wobei jeder Partikelpunkt in x-Richtung unterschiedliche momentane Phasengeschwindigkeiten c besitzt. Dies wird stark überhöht in Abbildung 2.2, a) für drei Punkte beispielhaft gezeigt. Nach einer bestimmten Zeit t_D und einer zurückgelegten Entfernung x_D (discontinuity distance) wird die Wellenform abhängig vom Vorzeichen entweder N-förmig ($\beta_2 < 0$, Kippen der Wellenberge nach links) oder sägezahnförmig verzerrt, wenn $\beta_2 > 0$, (Kippen nach rechts) ist (Schockwelle [34]). Die Auslenkungsgeschwindigkeit eines Massenpunktes ist dabei v_0 .

Für die meisten Festkörper ist β_2 positiv, denn Zug ($\varepsilon > 0$) verringert im Allgemeinen die Steifigkeit, während sie Druck ($\varepsilon < 0$) erhöht.

Durch die mit dem Laufweg x fortschreitende Verzerrung steigt die Amplitude der zweiten Harmonischen ($U_{2\omega}$) in der deformierten (longitudinalen) Welle mit der Entfernung:

$$\text{Gl. 2.9} \quad U_{2\omega} = \frac{\beta_2}{4} k^2 U_0^2 x .$$

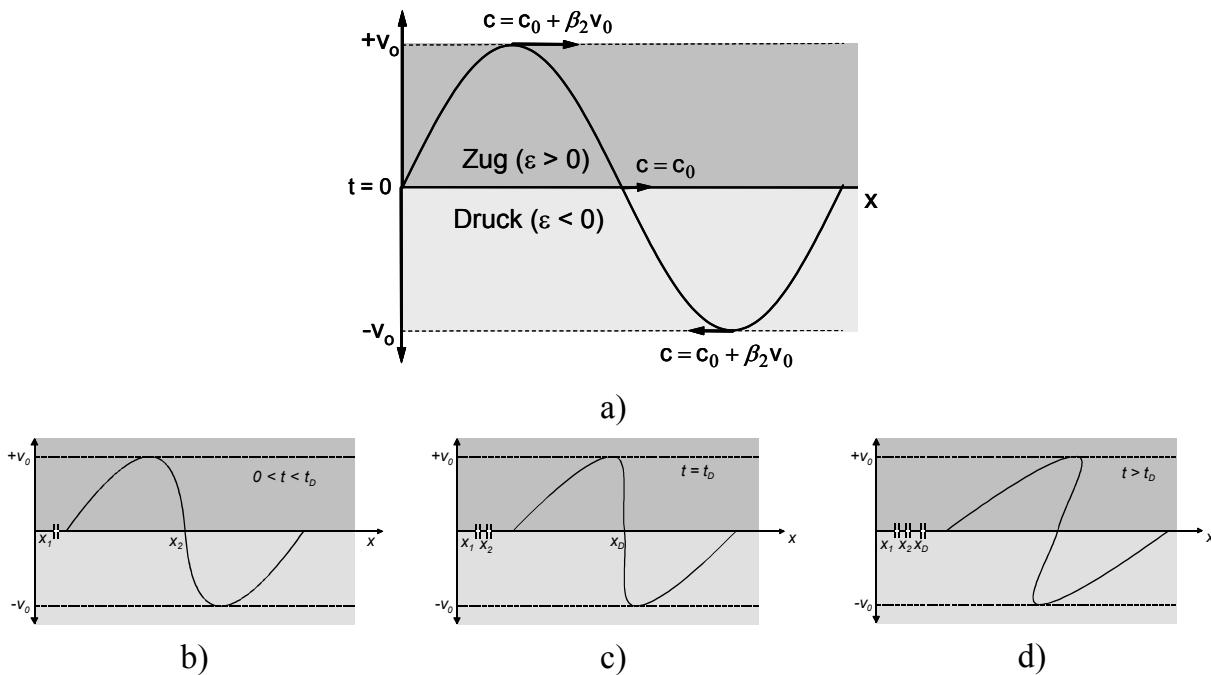


Abbildung 2.2: Verformung der sich ausbreitenden monochromatischen Welle aufgrund von nichtlinearem Verhalten des Prüfmediums; a) Anregungswelle im Ursprung ($t=0$); b) Welle bei $t > 0$; c) Welle bei x_D (Discontinuity distance) und bei $t=t_D$; d) hypothetische Wellenform bei $x > x_D$ und $t > t_D$ [35].

Diese Beziehung kann auch genutzt werden, um β_2 aus experimentellen Daten zu ermitteln (Second Harmonic Technique). Die Werte für verschiedene Materialien sind in Tabelle 2.1 aufgeführt. Für homogene Materialien (oberer Teil der Tabelle) nimmt β_2 einen Wert von 1 bis 10 an. Für steife Materialien (wie Diamant) kann man β_2 generell vernachlässigen.

Material	Nichtlinearitäts-Parameter β_2
Quarzglas	-3.9
Eisen	4.4
Kupfer	2.4
Silber	2.0
Gold	3.1

Tabelle 2.1: Nichtlinearitätsparameter für verschiedene klassische Materialien.

Bei Kristallen und homogenen isotropen Festkörpern ist $\beta_3 \approx 10\beta_2$. Der Beitrag von β_3 kann trotzdem vernachlässigt werden, weil der entsprechende Term in Gl. 2.8 für akustische Dehnungen ($\epsilon_0 \sim 10^{-5} - 10^{-4}$) aufgrund der Potenz klein wird. Deshalb be-

schäftigt sich die klassische Akustik bei der Materialcharakterisierung hauptsächlich mit der zweiten Harmonischen und den Werten von β_2 (siehe Gl. 2.9).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass es in der klassischen Nichtlinearität um Bindungskräfte zwischen Atomen und Molekülen in quasi-idealen Festkörpern geht. Dabei sind die 2. Harmonische und der Nichtlinearitätsparameter β_2 die charakterisierenden Größen der klassischen Nichtlinearität. Die ausgeprägte zweite Harmonische entsteht auch bei kleinen nichtlinearen Effekten durch Akkumulation, also der Aufsummierung des Effektes entlang der Laufstrecke einer Prüfwellen. So kann mit Hilfe der zweiten Harmonischen die druckabhängige Nichtlinearität reiner Metalle [36, 37] zur Bauteilcharakterisierung benutzt werden. Darüber hinaus ändern sich Häufigkeit, Art und Verteilung von Versetzungsstellen in Legierungen in Abhängigkeit von der Materialermüdung. Z. B. zeigt die Aluminiumlegierung 2024-T4 nach 10^4 Zyklen (0-276 MPa) ein Ansteigen von β_2 um 400% [38].

f) Nichtklassische nichtlineare Schwingungsanalyse

Klassische nichtlineare Akustik war ursprünglich eine Hilfe zur Charakterisierung idealer Kristalle oder quasi-idealer Materialien mit leichten strukturellen Fehlern (z. B. Versetzungen). Abweichungen vom klassischen Ansatz wurden in inhomogenen Materialien mit größeren Strukturrissen gefunden und tauchten zuerst in Form stark überhöhter Werte (>5) von β_2 auf (Tabelle 2.2).

Material	Nichtlinearitäts- Parameter β_2
geschäumter Kunststoff	~100
Marmor	~800
marine Ablage- rungen	~100-1000
Gesteine	~1000-10000

Tabelle 2.2: Nichtlinearitätsparameter für verschiedene nichtklassische Materialien.

Bei gummiartigen porösen Festkörpern sind die Poren weiche Bereiche. Eine akustische Welle begleiten starke Variationen im spezifischen Volumen der Poren und dadurch auch große Änderungen in der Materialsteifigkeit. Experimente mit sphärischen (20-50 μm) und zylindrischen Poren in Kunststoffen ergaben bei 3kHz Messfrequenz $\beta_2 \approx (1-7) 10^3$ (strukturelle Nichtlinearität [39]).

In Gesteinsproben sind strukturelle “Defekte“ (Kontaktverhalten an Korngrenzen) statistisch verteilt. An diesen Grenzflächen ist lokal eine große Dehnung möglich, was eine starke elastische Nichtlinearität darstellt. Bei Experimenten zur Bestimmung der zweiten Harmonischen (siehe oben) im unteren kHz-Bereich wurden bei Berea-Sandstein [40] Werte von $\beta_2 \approx 10^4$ gemessen, während alle klassischen Zusammenhänge weiterhin gültig bleiben. Experimente im Frequenzbereich bis 1 MHz zeigten eine ungewöhnlich stark angeregte dritte Harmonische und somit einen hohen Beitrag zur kubischen Nichtlinearität: Aus den experimentellen Daten wurden die Werte $\beta_3 \approx 10^8$ und $\beta_2 \approx 400$ errechnet [41].

Neben der experimentellen Bestimmung des Nichtlinearitätsparameters β_2 wurde im Bereich der zerstörungsfreien Bauteilprüfung die Auswertung nichtlinearer Antwortspektren weiterentwickelt. So kann das nichtlineare Spektrum als Ganzes nach einer Normierung zur qualitativen Bewertung beispielsweise einer Lackschicht auf Verbundmaterial verwendet werden [42]. Eine detaillierte Auswertung des nichtlinearen Spektrums ist möglich, wenn einzelne nichtlineare Frequenzkomponenten berücksichtigt werden. Dabei standen in den letzten Jahren zwei Stoßrichtungen im Vordergrund: Erstens die Defektanalyse mittels Höherharmonischen und zweitens das Verfolgen von Mischfrequenzen erster Ordnung ($\omega \pm \nu$) durch Modulation an Defekten mit internen Kontaktstellen [43].

Höherharmonische treten bei hinreichend hoher Anregungsleistung zuverlässig auf und bieten dadurch die Möglichkeit, Rissdefekte abzubilden. Besondere Beachtung muss dabei der Anregung gewidmet werden, da verschiedene Materialien auch unterschiedliche Schädigungsschwellen haben. Als physikalische Erklärung der Entstehung Höherharmonischer wurden bisher meistens die Ansätze der klassischen hysteretischen Nichtlinearität verwendet, die diese Phänomene aber nur unvollständig beschreiben. Die Möglichkeit, Höherharmonische zur defekt-selektiven Abbildung zu benutzen, wurde erstmals 1999 von Krohn als deutlicher Fortschritt auf dem Gebiet der nichtlinearen Prüftechnik bereits mit der Annahme von nichtklassischen nichtlinearen Phänomenen (Klappern) vorgestellt [44, 45]. Dabei wurde gezielt nichtresonant, d. h. abseits von Defekt- oder Strukturresonanzen angeregt, um das Auftreten von Stehwellen im Bauteil zu vermeiden. Im Extremfall kann es bei Stehwellen dazu kommen, dass ein Defekt in einer Knotenlinie nicht aktiviert und damit auch nicht abbildbar ist.

Der experimentelle Nachweis effizienten Frequenzmischens als physikalisches Phänomen erfolgte 1966 von Zarembo et al. [46] mittels elastischer Wellen in einem Aluminiumstab. Seit damals wurde die Idee vom resonanten Frequenzmischen in einer

Reihe von Untersuchungen zur Entwicklung von ZfP-Anwendungen weiterverfolgt, z. B. zur Schadenserkennung in Materialien und Komponenten aus dem Automobilbereich [47].

3. Entstehungsmechanismen nichtlinearer Phänomene

Ausgehend von der klassischen nichtlinearen Akustik, die seit den frühen 60er Jahren des letzten Jahrhunderts zum Beschreiben nichtlinearen Verhaltens inhomogener Kristallgitter entwickelt wurde, ging es im vorigen Kapitel weiter zum neuen Forschungsgebiet (seit ca. 1995): der nichtklassischen nichtlinearen Akustik von Medien mit inhomogener innerer Struktur und insbesondere von Gestein, dessen körnige Struktur offensichtlich eine Anzahl nicht ideal verbundener Grenzflächen besitzt. Deren klassisches nichtlineares Antwortverhalten kann zur Charakterisierung dienen und lässt sich durch elastisch hysteretisches Verhalten der inneren Strukturkontakte beschreiben.

Der Schwerpunkt der vorliegenden Abhandlung liegt dagegen auf der ebenfalls von der klassischen Akustik abweichenden nichtlinearen Akustik der Kontaktstellen (Abbildung 3.1). Im Gegensatz zu den in Kapitel 2.3 beschriebenen klassischen Nichtlinearitäten geht es nun um die Nichtlinearität, die durch Grenzflächenwechselwirkungen, beispielsweise in Rissen, bei akustischer Aktivierung entsteht: „Contact-Acoustic Nonlinearity“ (CAN) [48].

Im vorliegenden Kapitel wird eine umfassende neue Ordnung und mathematische Beschreibung der grundlegenden nichtklassischen nichtlinearen Mechanismen vorgestellt. Aus der ungewöhnlichen Wellendeformation resultieren Höherharmonische mit spezifischen Verläufen. Eine Unterteilung der Rissufer-Interaktion erfolgt in vertikales und tangenciales Klappern und in Reibung.

Darüber hinaus wird eine theoretische Beschreibung für die komplexen Mechanismen der Modulation bei Multifrequenzanregung und der Selbst-Modulation bei Berücksichtigung resonanter Eigenschaften des Defektbereichs entwickelt.

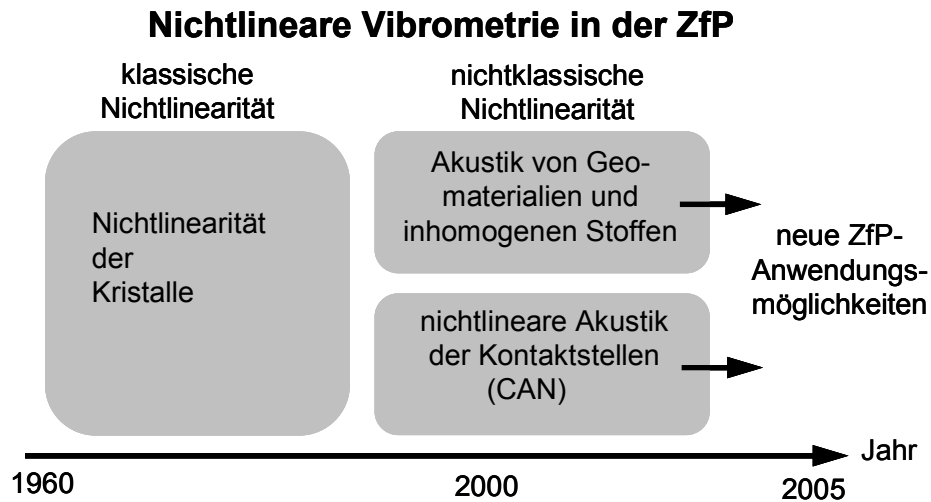


Abbildung 3.1: Schematische und chronologische Einordnung der Kontaktstellen-Nichtlinearität.

3.1. Höherharmonische aufgrund nichtlinearer Rissufer-Interaktion

3.1.1. Rissufer-Klappern bei vertikaler Relativbewegung

Bei infinitesimaler Dehnung ε vertikal zu den Rissufern (Abbildung 3.2) tritt im folgenden Beispiel um den Nullpunkt lineares Verhalten auf. Bei Überschreiten eines Schwellwertes ε^0 , z. B. dem Übergang von realer Druck- zu Zugbelastung, kommt es zu einer Änderung der Steifigkeit (Abbildung 3.2, rechts). Die Zusammenhänge zwischen Steifigkeit und den Zeitsignalen werden mit Hilfe einer gebräuchlichen Darstellung aus dem Bereich der Nachrichtentechnik schematisch aufgezeigt. Im Idealfall eines völlig geöffneten Risses ist die neue Steifigkeit Null. Ähnliches Verhalten zeigen elektrische Gleichrichter, weshalb man solch einen Defekt auch als „mechanische Diode“ bezeichnen kann [49]. Im Regelfall bleibt aber noch eine, wenn auch sehr geringe, Reststeifigkeit vorhanden, deren Auswirkung in den folgenden Prinzipbildern meistens vernachlässigt wird.

Das beschriebene bimodulare nichtlineare Verhalten lässt sich annähern durch eine abschnittsweise Spannungs-Dehnungs-Beziehung:

$$\text{Gl. 3.1} \quad \sigma(\varepsilon) = \sigma^{Lin} + \sigma^{NL} = C^II \varepsilon + H(\varepsilon) \cdot \Delta C \cdot \varepsilon .$$

Darin ist C^II der lineare Anteil der Steifigkeit, während ΔC die Steifigkeitsänderung beschreibt, die durch den nichtlinearen Verlauf bedingt ist. Die Heaviside-Funktion $H(\varepsilon)$ wird allgemein definiert als eine Stufenfunktion, die für negative ε den Wert 0 annimmt und für positive den Wert 1. Der Verlauf der Steifigkeitsfunktion (Gl. 3.1) ist in Abbildung 3.3 aufgetragen.

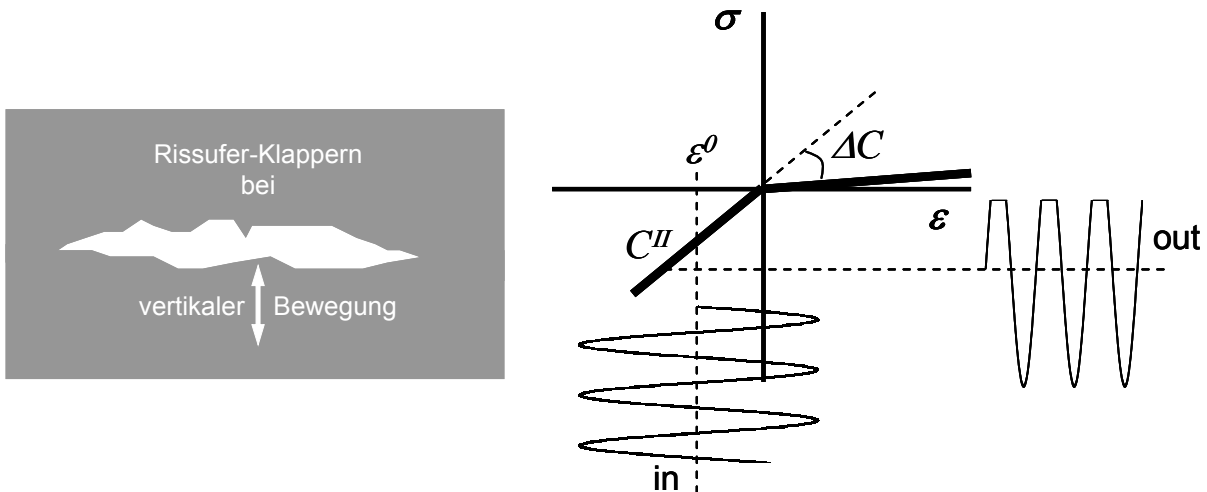


Abbildung 3.2: Links: Funktionsschaubild Rissufer-Klappern. Rechts: Spannungs-Dehnungs-Verlauf bei vertikalem Rissufer-Klappern.

Entgegen anderen Literaturstellen, die ω_0 verwenden, sei in dieser Abhandlung $\nu_0 = \frac{2\pi}{T}$ die Kreisfrequenz der Anregung und ω bezeichnet im weiteren Verlauf die Eigenfrequenzen des Systems. Für geschlossene Rissufer (linearer Bereich) ist: $\varepsilon = \varepsilon_0 \cos \nu_0 t - \varepsilon^0$ mit der maximalen Amplitude ε_0 . Damit ergibt sich für den zeitlichen Verlauf der Steifigkeitsänderung:

$$\text{Gl. 3.2} \quad \Delta C(t) = H(\varepsilon) \cdot \Delta C = H(\varepsilon_0 \cos \nu_0 t - \varepsilon^0) \cdot \Delta C.$$

Die Funktion $\varepsilon(t)$ ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

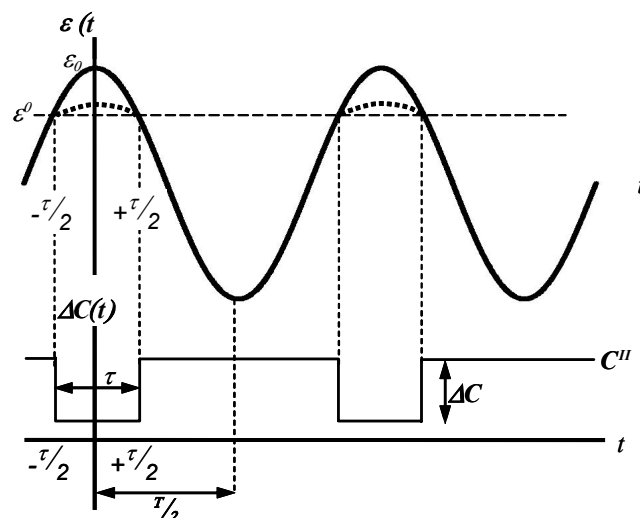


Abbildung 3.3: Zeitlicher Verlauf von Anregung und resultierender Steifigkeitsmodulation.

Die mathematische Beschreibung der Steifigkeitsfunktion kann mithilfe einer Faltung der auf die Pulslänge τ normierten Pulsfunktion

$$Gl. 3.3 \quad \Pi\left(\frac{t}{\tau}\right) = \begin{cases} 1 & |t| < \tau/2 \\ 1/2 & |t| = \tau/2 \\ 0 & |t| > \tau/2 \end{cases}$$

mit einer Delta-Distribution beschrieben werden:

$$Gl. 3.4 \quad \Delta C(t) = \Delta C \left[\Pi\left(\frac{t}{\tau}\right) * \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT) \right].$$

Auf die Ausführung der Faltung sei hier verzichtet. Stattdessen wird die entwickelte Fourierreihe aus [50] benutzt. Die Pulsdauer τ lässt sich aus Abbildung 3.3 ableiten:

$$Gl. 3.5 \quad \tau = \frac{T}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{\varepsilon^0}{\varepsilon_0} \right).$$

Die allgemeine Fourierreihendarstellung für eine beliebige Periodendauer T und Pulsbreite τ lautet dann:

$$Gl. 3.6 \quad \Delta C(t) = 2\Delta C \left(\frac{\tau}{T} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \operatorname{sinc} \left(\frac{n\tau}{T} \right) \cos n\nu_0 t.$$

Der nichtlineare Beitrag zum Spannungsverlauf beträgt somit (siehe Gl. 3.1):

$$Gl. 3.7 \quad \sigma^{NL}(t) = \Delta C(t)\varepsilon = 2\Delta C \left(\frac{\tau}{T} \right) \left(\varepsilon_0 \cos \nu_0 t - \varepsilon^0 \right) \sum_{n=1}^{\infty} \operatorname{sinc} \left(\frac{n\tau}{T} \right) \cos n\nu_0 t.$$

Unter Verwendung der trigonometrischen Beziehung:

$$Gl. 3.8 \quad \cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)]$$

folgt:

$$Gl. 3.9 \quad \begin{aligned} \sigma^{NL}(t) &= \\ & 2\Delta C \left(\frac{\tau}{T} \right) \left[\sum_{n=1}^{\infty} \operatorname{sinc} \left(\frac{\tau}{T} \right) \left[\frac{\varepsilon_0}{2} (\cos(n+1)\nu_0 t + \cos(n-1)\nu_0 t) \right] - \varepsilon^0 \cos n\nu_0 t \right] \\ & \equiv \sum_{N=1}^{\infty} A_N \cos N\nu_0 t. \end{aligned}$$

Um die Amplituden der im Antwortsignal enthaltenen Frequenzen zu bestimmen, muss Gl. 3.9 in eine Fourierreihe umgeschrieben werden. Bei der Auflistung der Argumente der Kosinusfunktionen (Frequenzen) nach der neuen Zählvariablen N sind Gesetzmäßigkeiten zu erkennen, die das Umsortieren der Terme aus Gl. 3.9 nach Frequenzen ermöglichen. Es ergeben sich folgende Fourierkoeffizienten, wobei nur der Betrag der Steifigkeitsänderung berücksichtigt wurde, um negative Amplituden zu vermeiden:

$$\text{Gl. 3.10} \quad A_N = 2|\Delta C|\left(\frac{\tau}{T}\right)\left\{-\varepsilon^0 \operatorname{sinc}\left(\frac{\pi\tau}{T}\right) + \frac{\varepsilon_0}{2}\left[\operatorname{sinc}\left(\frac{(N-1)\tau}{T}\right) + \operatorname{sinc}\frac{(N+1)\tau}{T}\right]\right\}.$$

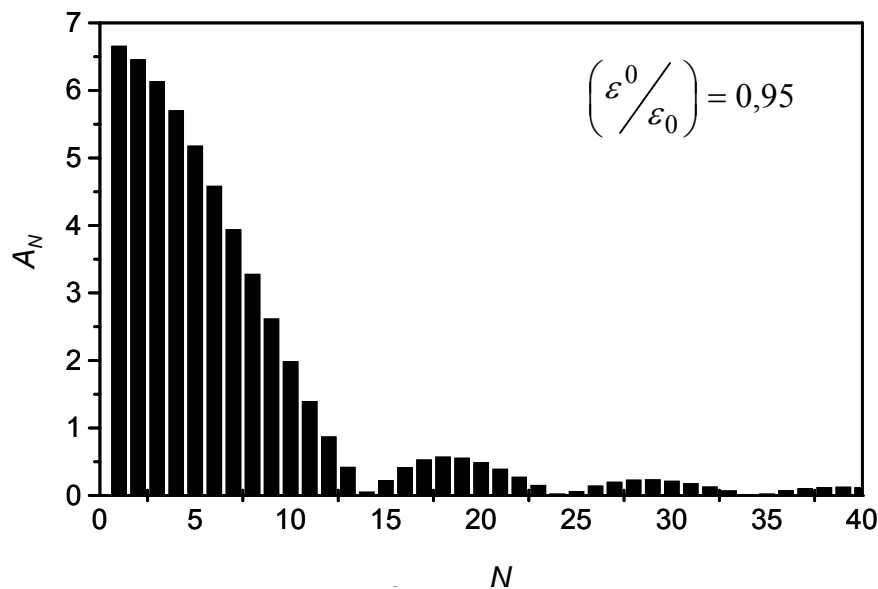


Abbildung 3.4: Antwortspektrum bei Rissufer-Klappern aufgrund vertikaler Dehnung (gerad- und ungeradzahlige Harmonische, Sinc-Verlauf der Einhüllenden).

Das Antwortspektrum in Abbildung 3.4 enthält sowohl geradzahlige als auch ungeradzahlige Harmonische. Die Einhüllende des Spektrums zeigt zudem einen Sinc-Verlauf.

3.1.2. Rissufer-Klappern bei tangentialer Relativbewegung

Bei tangentialer Bewegung der Rissufer entsprechend Abbildung 3.1 (links), also einer Schubbelastung der Rissufer, tritt bei kleinen Dehnwerten ε lineares Verhalten auf. Bei Erreichen eines bestimmten Schwellwertes ε_0 greifen die Unebenheiten dann so ineinander, dass es zu einer Behinderung der weiteren Auslenkung infolge einer signifikanten sprunghaften Erhöhung der Steifigkeit kommt. Zwischen den beiden symmetrischen Grenzwerten $+\varepsilon_0$ und $-\varepsilon_0$ kann das System der Anregung linear folgen.

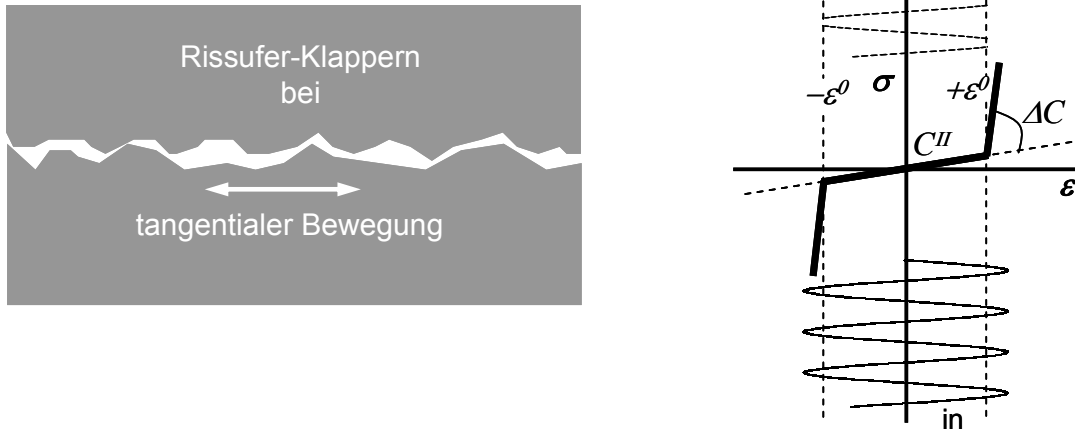


Abbildung 3.5: Rissufer-Klappern bei tangentialer Relativbewegung: Schaubild und Spannungs-Dehnungsverlauf.

Analog zum Klappern bei vertikaler Belastung (Gl. 3.1) ergibt sich für die Steifigkeitsfunktion des Systems

$$\text{Gl. 3.11} \quad C(t) = C^{\text{II}} + \Delta C \cdot H(|\varepsilon| - |\varepsilon^0|) \equiv C^{\text{II}} + \Delta C(t).$$

Dabei ist, wie im vorigen Beispiel, die Anregungsdehnung $\varepsilon = \varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cos \nu_0 t$ und die Anregungsfrequenz $\nu_0 = \frac{2\pi}{T}$. Dann ergibt sich: $\Delta C(t) = \Delta C \cdot H(|\varepsilon_0 \cos \nu_0 t| - |\varepsilon^0|)$, wobei der Bereich von $+\varepsilon^0$ bis $-\varepsilon^0$ den Abstand zwischen zwei eingreifenden ‘‘Zähnen‘‘, also einen Bereich mit reduzierter linearer Steifigkeit (C^{II}), darstellt.

Die Pulsdauer entspricht ebenfalls der senkrechten Belastung des Rissufers (siehe Gl. 3.5). Berücksichtigt man, dass sich bei der nun betrachteten tangentialen Dehnschwingung entsprechend Abbildung 3.6 pro Anregungsperiode zwei Steifigkeitspulse ereignen, dann gilt

$$\text{Gl. 3.12} \quad \Delta C(t) = \Delta C \left[\Pi\left(\frac{t}{\tau}\right) * \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta\left(t - n \frac{T}{2}\right) \right].$$

Die allgemeine Fourierreihendarstellung (Gl. 3.6) ändert sich zu

$$\text{Gl. 3.13} \quad \Delta C(t) = 4\Delta C \left(\frac{\tau}{T}\right) \sum_{n=1}^{\infty} \text{sinc}\left(\frac{2n\tau}{T}\right) \cos 2n \nu_0 t.$$

Dann ist der nichtlineare Beitrag zum Spannungsverlauf

$$\sigma^{NL}(t) = 2\Delta C \varepsilon_0 \left(\frac{\tau}{T} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \operatorname{sinc} \left(\frac{2n\tau}{T} \right) [(\cos(2n+1)\nu_0 t + \cos(2n-1)\nu_0 t)]$$

Gl. 3.14

$$\equiv \sum_{N=0}^{\infty} A_{2N+1} \cos(2N+1)\nu_0 t.$$

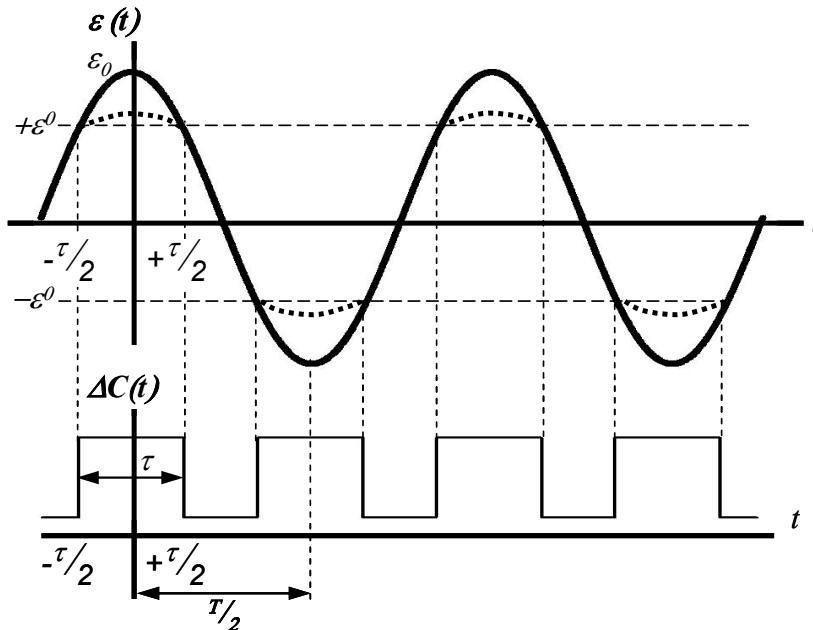


Abbildung 3.6: Zeitlicher Verlauf von Anregung und resultierender Steifigkeitsmodulation.

Das nichtlineare Antwortspektrum bei tangentialem Klappern enthält damit im Unterschied zu Gl. 3.10 nur ungerade Harmonische.

Analog zum vorherigen Fall ergeben sich die Amplituden der im Antwortsignal enthaltenen Frequenzen. Für den speziellen Fall $N=0$ gilt

$$Gl. 3.15 \quad A_1 = 2\Delta C \varepsilon_0 \left(\frac{\tau}{T} \right) \operatorname{sinc} \left(\frac{2\tau}{T} \right).$$

Für alle anderen Fälle ($N \neq 0$) lautet die allgemeine Lösung

$$Gl. 3.16 \quad A_{2N+1} = 2\Delta C \varepsilon_0 \left(\frac{\tau}{T} \right) \left\{ \operatorname{sinc} \left(\frac{2N\tau}{T} \right) + \operatorname{sinc} \frac{2(N+1)\tau}{T} \right\}.$$

Das resultierende Antwortspektrum Abbildung 3.7 ist mit einer Sinc-Funktion moduliert. Weil $C(t)$ eine $2\nu_0$ -Funktion ist, kann das Spektrum dieser Funktion nur gerade Harmonische ($2n\nu_0$) enthalten, woraus folgt, dass das Antwortspektrum nur ungerade Harmonische $(2n+1)\nu_0$ aufweist.

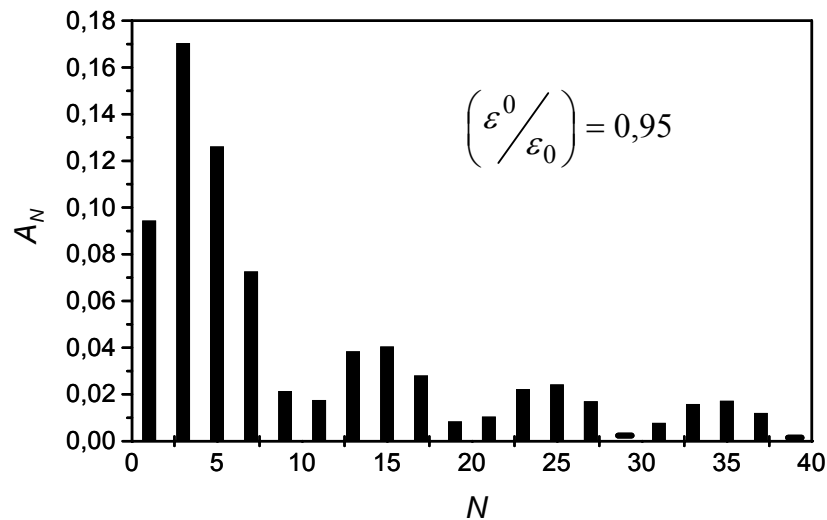


Abbildung 3.7: Signalverläufe im Antwortspektrum bei tangentialem Rissufer-Klappern (ungeradzahlige Harmonische, Sinc-Verlauf der Einhüllenden).

3.1.3. Rissufer-Reibung

Bei einer harmonischen Schwingung der Anregungsdehnung $\varepsilon(t)$ folgen Oberflächen, die durch eine Reibkopplung miteinander verbunden sind, einer hysteretischen Spannungs-Dehnungs-Beziehung. Ein Beispiel hierfür ist ein geschlossener Riss, der tangential zur Bruchfläche angeregt wird und damit einer Scherbelastung ausgesetzt ist [51].

Oberhalb des Schwellwertes kommt es zu einer Änderung der Reibkräfte, da dort die dynamische Reibkraft zu klein ist, um lineares Verhalten aufrecht zu erhalten. Das abrupte “Umschalten“ der Kontaktsteifigkeit $\Delta C(t)$ zwischen Haftreibung (C_s , statisch) und Gleitreibung (Null, dynamisch) findet zwei Mal während einer Periode der Dehnungsschwingung statt (Abbildung 3.8).

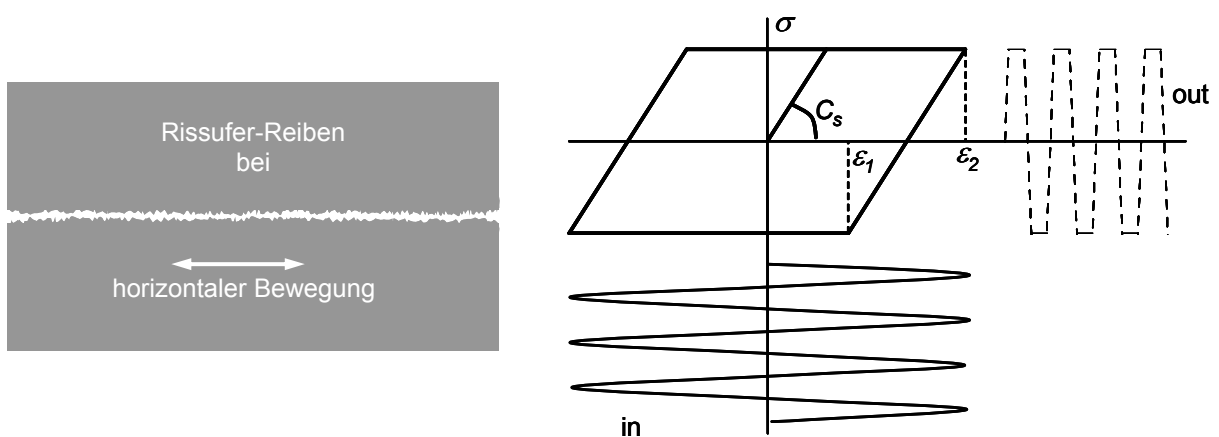


Abbildung 3.8: Reibkopplung zwischen Grenzflächen mit Spannungs-Dehnungs-Verlauf und Steifigkeitsänderung durch hysteretische Nichtlinearität [51].

Die Kontaktsteifigkeit lässt sich mit Hilfe der Vorzeichenfunktion $\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1: & x > 0 \\ 0: & x = 0 \\ -1: & x < 0 \end{cases}$

durch folgende Gleichung beschreiben [51]:

$$\text{Gl. 3.17} \quad C(t) = (C_S / 2) \{ 1 - \text{sign}(\dot{\varepsilon}) \text{sign}[\varepsilon + \text{sign}(\dot{\varepsilon})\varepsilon_1] \}.$$

Durch Integration dieser Gleichung über der Dehnung erhält man σ in Abhängigkeit von ε , wobei die Integrationskonstante die Kontinuität entsprechend Abbildung 3.8 garantiert. Die Funktion zerfällt in zwei richtungsabhängige Teilfunktionen, die sich zusammengefasst darstellen lassen:

$$\text{Gl. 3.18} \quad \sigma(t) = C(t)\varepsilon(t) + C(t)\varepsilon_1 \text{sign}(\dot{\varepsilon}) + (C_S / 2)(\varepsilon_0 - \varepsilon_1) \text{sign}(\dot{\varepsilon}).$$

Da $C(t)$ in einer Periode zwei Pulse durchläuft, enthält keiner der Terme aus Gl. 3.18 geradzahlige Höherharmonische. Die Amplituden der ungeradzahligen Höherharmonischen erhält man nach einer Fouriertransformation basierend auf Gl. 3.18 aus dem Spektrum [51]:

$$\text{Gl. 3.19} \quad B_N = C_S \varepsilon_0 \left[\begin{array}{l} \Delta\tau_f (\text{sinc}(N-1)\Delta\tau_f + \text{sinc}(N+1)\Delta\tau_f - 2\varepsilon_1 / \varepsilon_0 \text{sinc } N\Delta\tau_f) \\ -0,5(1 - \varepsilon_1 / \varepsilon_0) \text{sinc } N/2 \end{array} \right],$$

wobei $\Delta\tau_f = (1/2\pi) \cos^{-1}(\varepsilon_1 / \varepsilon_0)$ und $N = 2n + 1$ ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$).

Dieses Verhalten ist vergleichbar mit den Mechanismen bei tangential angeregtem Klappern, auch hier sind nur ungerade Harmonische der Anregung zu erwarten: $v_{out} = (2n + 1)v_{in}$. Abbildung 3.9 zeigt das berechnete Spektrum für diesen Fall.

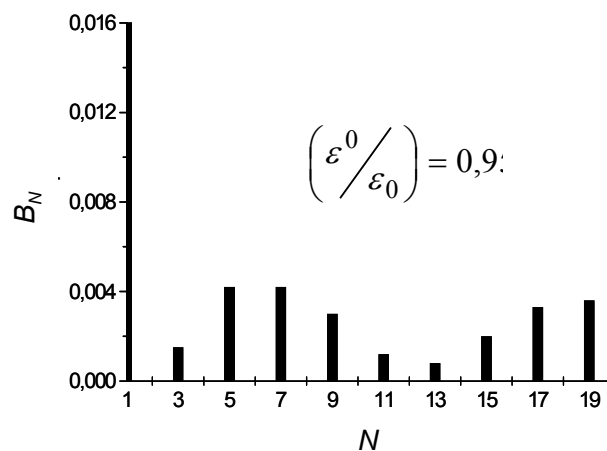


Abbildung 3.9: Antwortspektrum bei Reibkopplung (ungeradzahlige Harmonische) [51].

3.2. Mischfrequenzen aufgrund nichtlinearer Modulation

Im Abschnitt 2.4.5 wurde nichtlineare Modulation erläutert, die auf der klassischen Annahme hysteretischer nichtlinearer Bindungsmechanismen basiert. Bei zwei Anregungsfrequenzen lässt sich damit das Auftreten der Mischfrequenzen $\nu_1 + \nu_2$ und $\nu_1 - \nu_2$ erklären. Häufig beobachtet man jedoch zusätzliche Mischfrequenzen, für die im Folgenden neue Erklärungsmodelle entwickelt werden.

3.2.1. Modulation bei einer nichtlinearen Anregungskomponente

Der folgende analytische Ansatz berücksichtigt die nichtklassische (klappernde) Nichtlinearität der tieffrequenten Anregungskomponente. Die pulsartigen Steifigkeitsänderungen (Heavisidesche Sprungfunktion) führen am Ende dieses Kapitels schließlich zum Entstehen von Mischfrequenzen hoher Ordnung.

Der Einfachheit halber wird angenommen, dass die Pumpwelle ν_2 eine ausreichend hohe Amplitude ε_1 besitzt, um Klappern oder Reiben der Bruchstellen sicherzustellen. Dies geschieht, sobald ε^0 überschritten wird. Die Anregungsdehnung ε_2 der hochfrequenten Anregung ν_2 ist in diesem Beispiel wesentlich kleiner als die niederfrequente Anregung ($\varepsilon_2 \ll \varepsilon_1$). Die gesamte Anregungsdehnung setzt sich dann zusammen aus den beiden Dehnungskomponenten:

$$\text{Gl. 3.20} \quad \varepsilon(t) = \varepsilon_1 \cos \nu_1 t + \varepsilon_2 \cos \nu_2 t .$$

Abbildung 3.10 zeigt den zeitlichen Verlauf der Anregung entsprechend Gl. 3.20.

Da für die pulsartige Steifigkeitsmodulation dann nur $\varepsilon_1 \cos \nu_1 t$ verantwortlich ist, gilt:

$$\text{Gl. 3.21} \quad \Delta C_{\nu_1}(t) = \Delta C \cdot H(\varepsilon_1 \cos \nu_1 t - \varepsilon^0) .$$

Im Antwortsignal (Abbildung 3.10) erscheint der hochfrequente Schwingungsanteil aufmoduliert. Der Anteil der einzelnen Schwingungsspitzen bleibt allerdings im folgenden unberücksichtigt, da das resultierende Signal nach einer FFT im Spektrum vernachlässigbar ist.

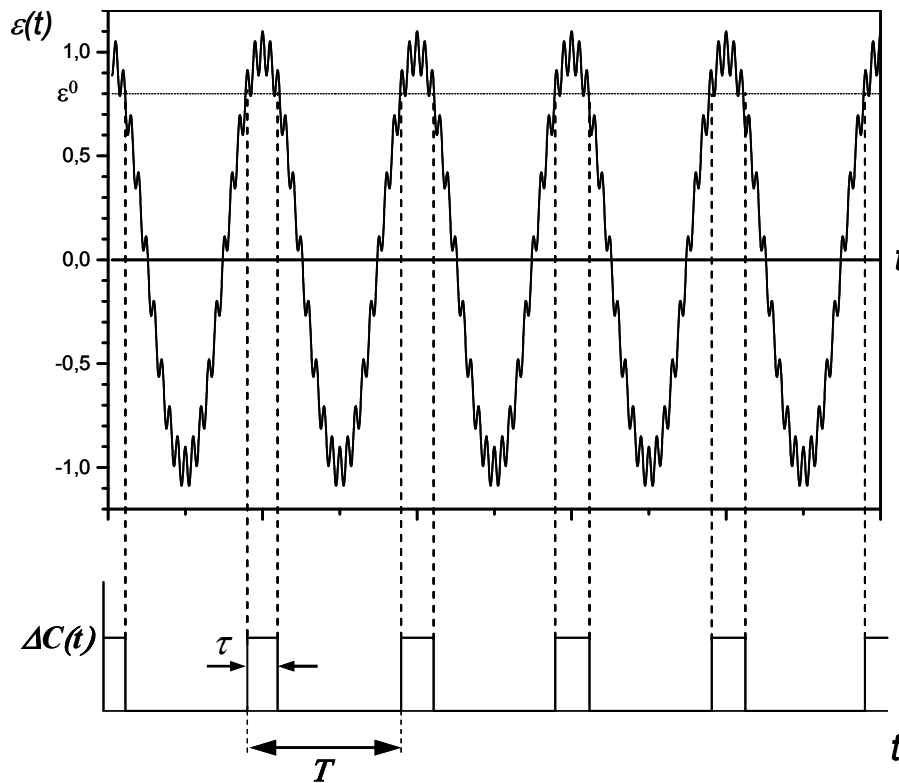


Abbildung 3.10: Zeitlicher Verlauf von Anregung und Bauteilantwort im Fall einer Doppelanregung.

Die Stufenfunktion $H(\varepsilon)$ nimmt für negative ε den Wert 0 und für positive den Wert 1 an und führt damit zu dem in Abbildung 3.10 unten dargestellten Verlauf. Der nichtlineare Beitrag zum Spannungsverlauf beträgt somit

$$\text{Gl. 3.22} \quad \sigma^{NL}(t) = \Delta C(t)\varepsilon = \Delta C_{v_1}(t) \left[\varepsilon_1 \cos v_1 t + \varepsilon_2 \cos v_2 t - \varepsilon^0 \right].$$

Setzt man Gl. 3.21 in Gl. 3.22, dann führt lediglich der mittlere Term in der eckigen Klammer zu Mischfrequenzen:

$$\text{Gl. 3.23} \quad \sigma^{MISCH}(t) = \Delta C_{v_1}(t) \cdot \varepsilon_2 \cos v_2 t.$$

Wie bei der Herleitung nichtklassischer Nichtlinearität in Kapitel 3.1 beschreibt die Heaviside-Funktion $H(\varepsilon)$ die stufenartige Modulation der Steifigkeit aufgrund der nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Beziehung. Es folgt:

$$\text{Gl. 3.24} \quad \Delta C_{v_1}(t) = \Delta C \left[\Pi \left(\frac{t}{\tau} \right) * \delta(t - nT_{v_1}) \right].$$

Dabei gilt die Beziehung:

$$\text{Gl. 3.25} \quad \frac{\tau}{T_{v_2}} = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{\varepsilon^0}{\varepsilon_1} \right).$$

Daraus ergibt sich entsprechend der vorherigen Beispiele für das Antwortspektrum:

$$\text{Gl. 3.26} \quad \Delta C(t) = \Delta C \left[\Pi\left(\frac{t}{\tau}\right) * \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT_{v_1}) \right].$$

Diese Impulsfunktion kann wie in den oberen Beispielen durch die Fourierreihe eines periodischen Rechteckimpulses ersetzt werden. Durch Multiplikation der Pulsfunktion mit dem Anregungssignal folgt die Summenreihe:

$$\text{Gl. 3.27} \quad \sigma^{\text{MISCH}}(t) = \Delta C \varepsilon_{01} \left(\frac{\tau}{T_{v_2}} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \text{sinc}\left(\frac{n\tau}{T_{v_2}}\right) [\cos(n\nu_2 + \nu_1) + \cos(n\nu_2 - \nu_1)].$$

Die Berücksichtigung der Nichtlinearität der tieffrequenten Anregung führt somit zu den in Gl. 3.27 formulierten Kombinationsfrequenzen $(n\nu_1 + \nu_2)$ und $(n\nu_1 - \nu_2)$. Beide Frequenzreihen weisen den gleichen Fourierkoeffizienten auf:

$$A_N = \sum_{n=1}^{\infty} \text{sinc}\left(\frac{n\tau}{T_{v_1}}\right),$$

daraus ergibt sich die Symmetrie des sinc-modulierten Spektrums um ν_2 . Beispielhaft wurden in Abbildung 3.11 die Mischfrequenzen im Antwortspektrum für $\nu_1 = 1\text{kHz}$ und $\nu_2 = 20\text{kHz}$ berechnet. Es ist zu beachten, dass in gemessenen Spektren zusätzlich noch die Anregungsfrequenzen und deren Höherharmonische auftauchen müssen. Die Frequenzabstände zwischen den Mischfrequenzen betragen 1kHz.

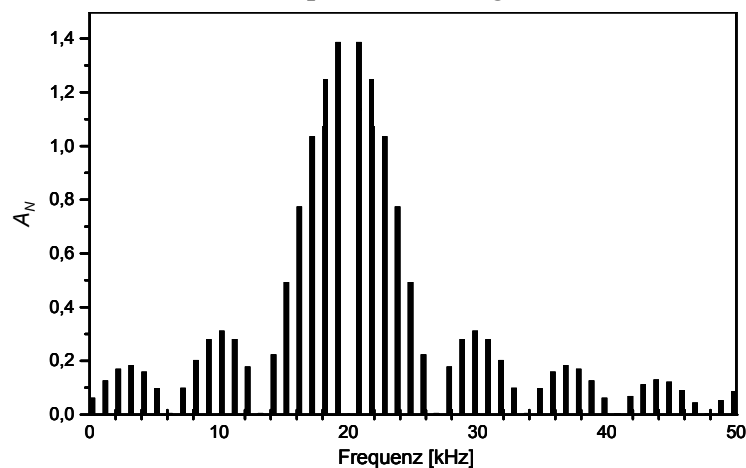


Abbildung 3.11: Mischfrequenzen im Antwortspektrum unter Berücksichtigung klassischer Modulation und des Beitrags der tieffrequenten Anregung zur Nichtlinearität des Systems. Anregungssignale und deren Höherharmonische bleiben hier unberücksichtigt.

3.2.2. Modulation bei zwei nichtlinearen Anregungskomponenten

Die Beschränkung auf nur eine nichtlinear agierende Frequenzkomponente wie im vorigen Kapitel, in dem nur ν_2 zum Überschreiten der nichtlinearen Grenze ε^0 führt, soll nun aufgehoben werden. Bei den folgenden analytischen Untersuchungen liefern beide Frequenzen einen Beitrag zum Klappern. Darüber hinaus gilt die Einschränkung, dass nur der größte Peak der hochfrequenten Schwingung nichtlineares Klappern hervorruft. Das Überschreiten des Schwellwertes ε^0 bewirkt somit nichtlineares Verhalten, dargestellt im zeitlichen Antwortverlauf (Abbildung 3.12). Die Frequenzen ν_1 und ν_2 der Anregungsamplituden ε_1 und ε_2 liegen dabei so nahe zusammen, dass es zu einer Schwebung kommt, deren Frequenz dem Mittelwert der beiden Ausgangsfrequenzen entspricht (Superpositionsprinzip). Dieser Ton ist moduliert mit der Differenz der beiden Anregungsfrequenzen.

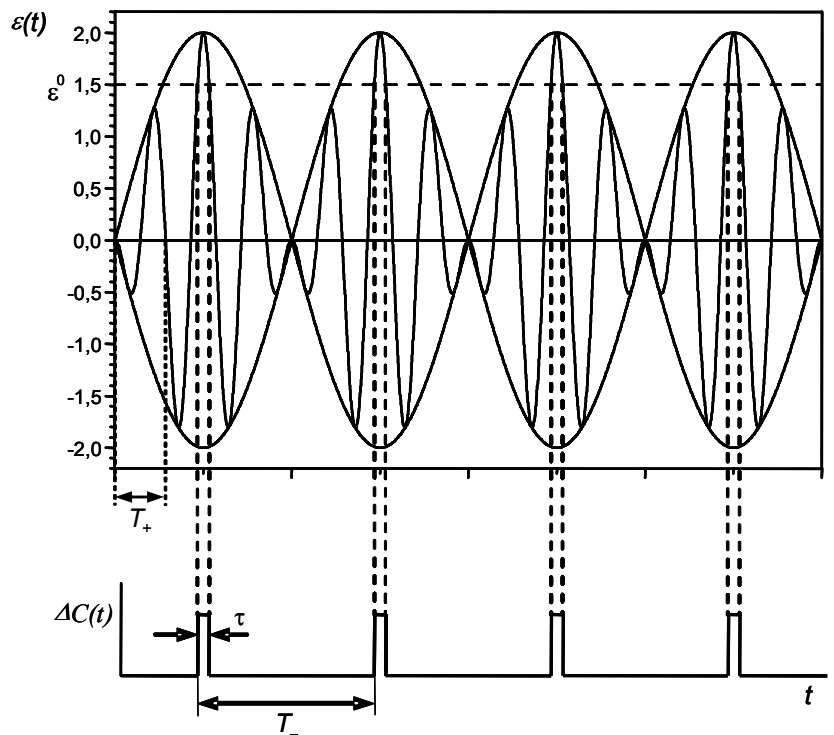


Abbildung 3.12: Nichtlineares Verhalten, verursacht durch den höchsten Peak der hochfrequenten Schwingung.

Die resultierende Schwebungsamplitude oberhalb von ε^0 bei gleichen Amplituden $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_0$ ist:

$$\text{Gl. 3.28} \quad \varepsilon(t) = \varepsilon_0 (\cos \nu_1 t + \cos \nu_2 t) = 2\varepsilon_0 \cos\left(\frac{\nu_1 + \nu_2}{2} t\right) \cos\left(\frac{\nu_1 - \nu_2}{2} t\right).$$

Die Periodendauer T_m des Steifigkeitspulses lässt sich aus Abbildung 3.12 ableiten:

$$Gl. 3.29 \quad T_- = \frac{2\pi}{\nu_1 - \nu_2} = \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2}.$$

Aus der Periodendauer der hochfrequenten Schwingung:

$$Gl. 3.30 \quad T_+ = \frac{4\pi}{\nu_1 + \nu_2}$$

lässt sich unter Berücksichtigung des nichtlinearen Schwellwertes wie in den vorangegangenen Fällen die Pulsdauer $\tau = \frac{T_-}{\pi} \cos^{-1}\left(\frac{\varepsilon^0}{\varepsilon_0}\right)$ bestimmen. Analog zu oben folgt

dann die allgemeine Fourierreihendarstellung der Steifigkeitsfunktion:

$$Gl. 3.31 \quad \Delta C(t) = 2\Delta C \left(\frac{\tau}{T_-} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \text{sinc} \left(\frac{n\tau}{T_-} \right) \cos[n(\nu_1 - \nu_2)t].$$

Die Spannungs-Dehnungs-Beziehung, die die Mischfrequenzen enthält, ist für diesen Fall:

$$Gl. 3.32 \quad \begin{aligned} \sigma^{MISCH}(t) &= \Delta C(t) \varepsilon(t) \\ &= \Delta C(t) \left[\varepsilon_0 (\cos \nu_1 t + \cos \nu_2 t) - \varepsilon^0 \right] \end{aligned}$$

Unter Anwendung eines Additionstheorems [52] und anschließendes Zusammenfassen gleicher Frequenzterme führt zu folgender reduzierter Fourierreihendarstellung:

$$Gl. 3.33 \quad \sigma^{MISCH}(t) = \Delta C \varepsilon_0 \left(\frac{\tau}{T_m} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \text{sinc} \left(\frac{n\tau}{T_-} \right) \left\{ \begin{array}{l} \cos[n(\nu_1 - \nu_2) \pm \nu_1]t \\ + \cos[n(\nu_1 - \nu_2) \pm \nu_2]t \\ - 2 \cos \left(\frac{\pi\tau}{T_-} \right) \cos[n(\nu_1 - \nu_2)]t \end{array} \right\}.$$

Die spektrale Verteilung dieser Mischfrequenzen ist in Abbildung 3.13 dargestellt, wobei die Anregungskomponenten nicht enthalten sind. Der abweichende Verlauf der ersten 5 analytischen Mischfrequenzen beruht darauf, dass bei der Ermittlung der Fourierreihe negative Frequenzkomponenten berücksichtigt werden müssten, um die komplette Komponente darzustellen.

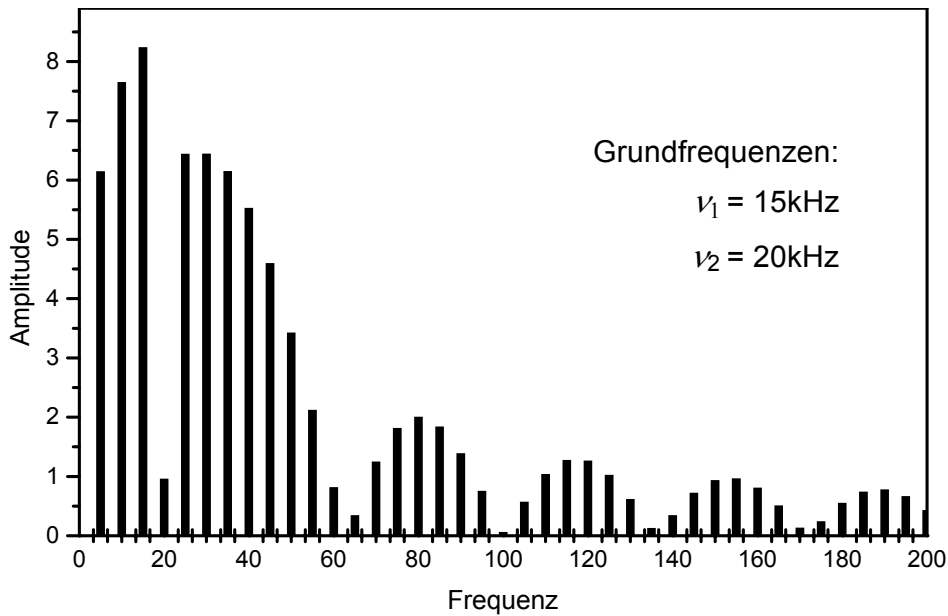


Abbildung 3.13: Verlauf der Mischfrequenzen für die Kombination 15-20kHz.

Im Vergleich zur klassischen Modulation kommt es hier wegen der nichtlinearen Pulsmodulation zu einer wesentlich größeren Anzahl von Mischfrequenzen und damit einer höheren Effektivität der Modulation. Im gezeigten Beispiel ist der Abstand der Summen- und Differenzfrequenzen 5kHz.

Der behandelte Fall gilt, wie bereits erwähnt, wenn nur der höchste Peak einer Periode zur Nichtlinearität beiträgt. Sobald mehrere bis alle Peaks die ε^0 -Grenze überschreiten, müsste man analog zu oben mit Hilfe der Heaviside-Sprungfunktion mathematisch die Zeitfunktion in einem Maße erweitern, dass Übersichtlichkeit nicht mehr vorhanden wäre. Dieser Weg wurde deshalb nicht weiter verfolgt.

3.2.3. Numerische Lösung

Die zu untersuchende Pulsfunktion kann im Rechner einfach erzeugt werden. Durch Multiplikation mit dem Anregungssignal (Frequenzmischen) lässt sich das Antwortsignal darstellen. Numerische FFT liefert das Frequenzspektrum der Antwortfunktion. Abbildung 3.17 beginnt mit dem in Kapitel 3.2.2 behandelten Fall, nämlich dem Beitrag nur eines Peaks zur Nichtlinearität. Das hier behandelte Beispiel gilt für das Verhältnis

$$\frac{\varepsilon^0}{\varepsilon_0} = \frac{19}{20} \text{ und zeigt einen sinc-Verlauf, der von der Einzelpulsanregung herrührt.}$$

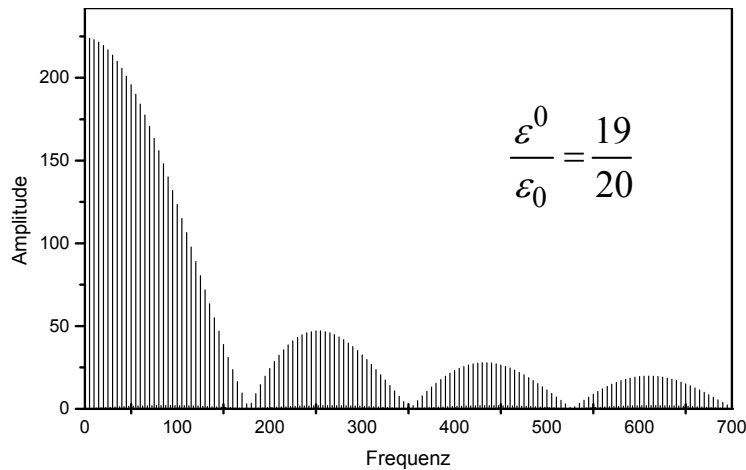


Abbildung 3.14: Numerisch ermitteltes Spektrum entsprechend dem analytischen Modell aus Kapitel 3.2.2, für den Fall, dass **nur ein** Peak von v zur Nichtlinearität beiträgt.

Abbildung 3.15 zeigt das Verhalten eines nichtlinearen Schwingers, wobei hier nur die resultierende modulierte Anregungsschwingung ε_{in} eingezeichnet ist, die sich aus zwei diskreten Frequenzen zusammensetzt. Bei Überschreiten von ε^0 kommt es zu einem ‘Klappern’, da dann jeder Peak einen Puls erzeugt. Dieses Verhalten resultiert aus der Nichtlinearität des Antwortsignals ε_{out} .

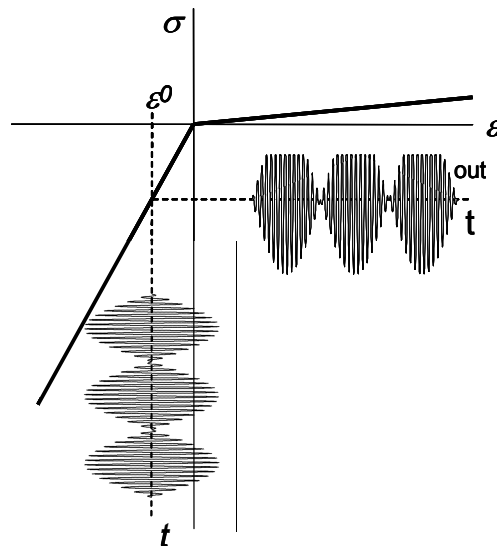


Abbildung 3.15: Spannungs-Dehnungs-Verläufe bei nichtlinearer Frequenzmodulation.

Dies führt zu den komplexen Fällen, die in Abbildung 3.16 und Abbildung 3.17 aufgeführt sind. Hier liefert die numerische Berechnung neue Spektren mit einer komplizierten Verteilung der Mischfrequenzen, die durch die Überlagerung sehr vieler Sinc-Funktionen ihre übersichtlichen Amplitudenverläufe verlieren. Zur Vereinfachung wurde bei allen Beispielspektren in diesem Kapitel der positive Bereich des Steifigkeitsmoduls mit Null angenommen.

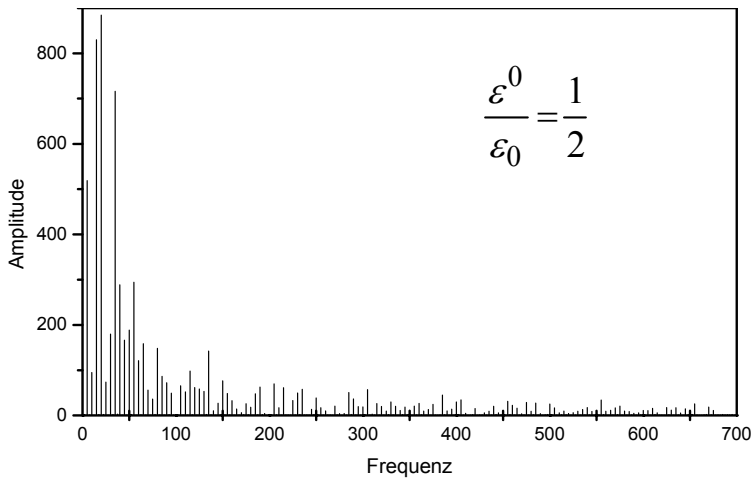


Abbildung 3.16: Numerisch ermitteltes Spektrum entsprechend dem analytischen Modell aus Kapitel 3.2.2, für den Fall, dass **die meisten** Peaks von v zur Nichtlinearität beitragen.

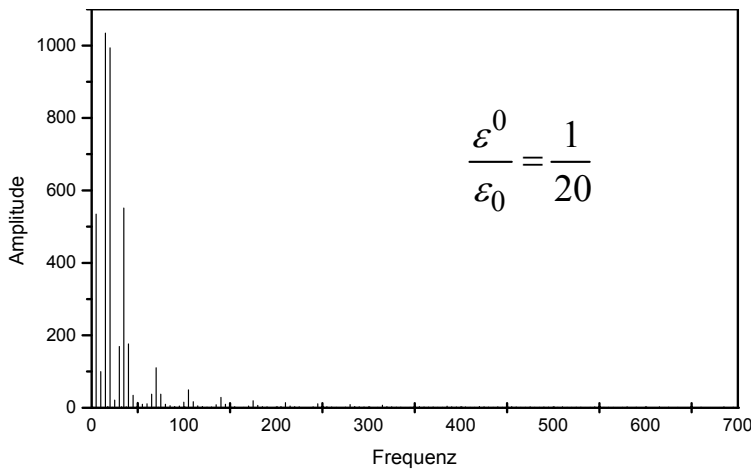


Abbildung 3.17: Numerisch ermitteltes Spektrum entsprechend dem analytischen Modell aus Kapitel 3.2.2, für den Fall, dass **alle** Peaks von v zur Nichtlinearität beitragen.

3.3. Frequenzkomponenten aufgrund nichtlinearer Resonanz

Im Gegensatz zu Kapitel 3.2 geht es nun um nichtlineare Frequenzphänomene, die bei nur einer einzigen Anregungswelle auftreten, und trotzdem nicht auf Höherharmonische der Anregungsfrequenz beschränkt bleiben. In diesem Fall ist davon auszugehen, dass der Defektbereich selbst Eigenfrequenzen aufweist und somit als diskreter Oszillator zu sehen ist. Bei bestimmten, in den folgenden Unterkapiteln beschriebenen Konstellationen kommt es bei der monofrequenten Anregung zu einer “Aktivierung” dieser Eigenfrequenzen der Defektbereiche. Infolgedessen treten Kombinationen aus Anregungs- und Defekteigenfrequenzen auf, ein Verhalten, das in mathematischen und physikalischen Grundlagenwerken [53] als “Selbst-Modulation” bezeichnet wird.

3.3.1. Nichtlineare Resonanz

Die Verbindung von nichtlinearem und resonantem Verhalten ermöglicht es, verschiedene nichtlineare Resonanzphänomene, wie Schwellwertabhängigkeit, Amplitudensprünge und das “selbst-angeregte” Auftreten von Subharmonischen und Frequenzpaaren zu erklären. Diese Phänomene lassen sich unter dem Begriff “instabiles Verhalten” zusam-

menfassen, da prinzipiell zwei Zustände denkbar sind. Welcher Zustand tatsächlich existiert, ist letztendlich von der Richtung abhängig, in der die Kurve durchfahren wird, und manifestiert sich in Hystereseschleifen (Abbildung 3.19).

Nichtlineares resonantes Defektverhalten führt zu einer amplitudenabhängigen Frequenzverschiebung der Resonanz des defekten Bauteils oder Bereiches [54], da bei einer Erhöhung der Anregungsamplitude ein Riss längere Zeit geöffnet wird. Daraus resultiert eine Reduzierung der Materialsteifigkeit (und auch des Qualitätsfaktors), was wiederum eine Absenkung der Eigenfrequenzen nach sich zieht. Das Umbiegen der Resonanzkurve zu tiefen Frequenzen ist typisch für Schädigungen, weil es dabei in der Regel zu einer Schwächung und damit Steifigkeitsreduzierung der Struktur kommt (Abbildung 3.18). Der prinzipiell vorstellbare Fall eines Umbiegens der Resonanzkurve nach rechts (Steifigkeitserhöhung) spielt dagegen in der Praxis keine Rolle und wird hier deshalb nicht berücksichtigt.

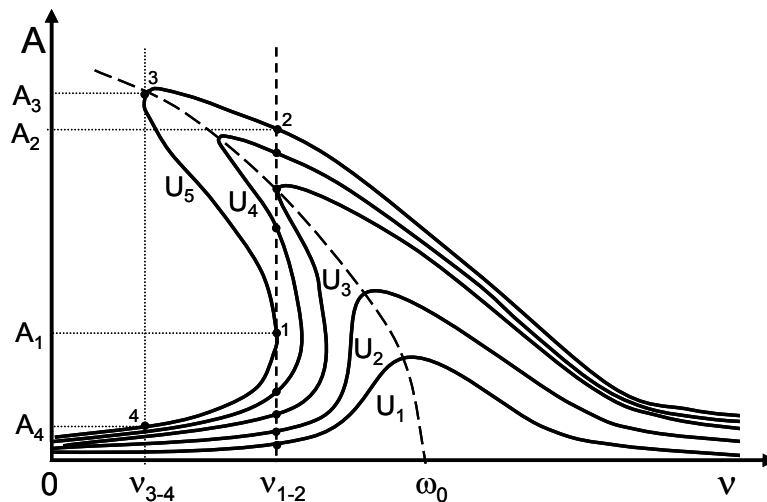


Abbildung 3.18: Typische Frequenzantwort eines „erweichenden“ nichtlinearen Schwingers (Bruchbereich) bei verschiedenen Amplituden der Anregungskräfte $U_1 < U_2 < U_3 < U_4 < U_5$ [55].

Beim Durchfahren eines Anregungsspektrums, z. B. beginnend mit niedrigen Anregungsfrequenzen, zeigt die Resonanzkurve U_5 einen Sprung bei der oberen senkrechten Tangente von 1-2. Verfolgt man die Anregung von hohen Frequenzen kommend, dann erfolgt der Sprung erst bei der tieferen Frequenz ν_{3-4} . Die Frequenz-Hysterese (vereinfacht auch in Abbildung 3.19 links) führt somit zu einer Instabilität der Systemantwort, die in bestimmten Frequenzbereichen bis zu drei mögliche Lösungen haben kann.

Nichtlineares Verhalten ist zudem von den Anregungsamplituden bzw. -kräften (U_1 bis U_5 in Abbildung 3.18) abhängig, da diese die Stärke der Nichtlinearität mitbestimmen. Amplituden-Hysterese zeigt sich bei fixer Anregungsfrequenz (z. B. ν_{1-2} in Abbildung 3.18). Bei Erhöhung der Anregungsamplitude (entlang gestrichelter Linie in

Abbildung 3.18) kommt es an Punkt 1 zu einem Sprung, da nur so eine höhere Amplitudenantwortfunktion A erreicht werden kann. Bei sinkender Anregungsamplitude von U_5 auf U_3 erfolgt der Amplitudensprung in der Antwortfunktion am Punkt 5.

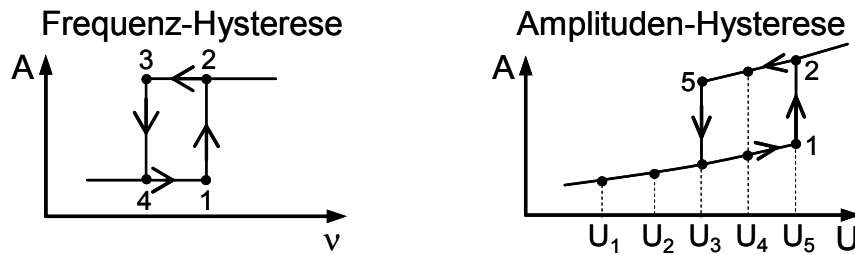


Abbildung 3.19: Hysteretisches Verhalten aufgrund von Nichtlinearität.

Ein geschädigter Bereich, der sowohl resonantes Verhalten als auch nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Verläufe zeigt, lässt sich als nichtlinearer Oszillator mit einer endlichen Zahl an Freiheitsgraden darstellen. Die Bewegungsgleichungen für diesen Oszillator, der von einem externen akustischen Signal angetrieben wird, ist mit Hilfe der Normalkoordinaten Q_α und einer quadratischen Näherung für die Nichtlinearität darstellbar [56]:

$$\text{Gl. 3.34} \quad \ddot{Q}_\alpha - \omega_\alpha^2 Q_\alpha = f_\alpha(t) + F_\alpha^{NL}.$$

Dabei ist $\alpha = 1, 2, 3, \dots$ der Zähler für die Eigenfrequenzen, beispielsweise ω_α . Auf der rechten Seite stehen neben der harmonischen Anregung $f_\alpha(t)$ auch die nichtlinearen Kräfte, die Normalgeschwindigkeiten und Beschleunigungen in quadratischer Form:

$$\text{Gl. 3.35} \quad F_\alpha^{NL} = \sum_{\beta\gamma} \chi_{\alpha\beta\gamma} (Q_\beta Q_\gamma + \dot{Q}_\beta \dot{Q}_\gamma + \ddot{Q}_\beta Q_\gamma)$$

$\chi_{\alpha\beta\gamma}$ sind die Nichtlinearitätsparameter.

3.3.2. Entstehung von Subharmonischen und Frequenzpaaren

In einer ersten Näherung $Q_\alpha = Q_\alpha^{(1)} + Q_\alpha^{(2)} + \dots$ werden die nichtlinearen Kräfte vernachlässigt: $F_\alpha^{NL} = 0$. Diese Annahme stammt aus der "Perturbation Theory" [56], die davon ausgeht, dass die nichtlinearen Kräfte wesentlich kleiner als die linearen Kräfte sind. Bei einer harmonischen Anregung $f_\alpha(t) = f_0 \cos \nu t$ folgt als Lösung von Gl. 3.34 die Schwingung in Normalkoordinaten:

$$\text{Gl. 3.36} \quad Q_\alpha^{(1)} = A_\alpha \cos \omega_\alpha t + B_\alpha \cos \nu t,$$

wobei A_α und B_α konstant sind und die Phasenfaktoren unberücksichtigt bleiben.

Die Gleichung zweiter Ordnung $\ddot{Q}_\alpha^{(2)} - \omega_\alpha^2 Q_\alpha^{(2)} = F_\alpha^{NL}(Q^{(1)})$ berücksichtigt alle selbst- und kreuzmodulierten Wechselwirkungen zwischen den Schwingungen der Eigenfrequenzen und der Anregungsfrequenz, so dass unter Verwendung von $Q_\alpha^{(1)}$ für die nichtlineare Kraft folgt:

$$\text{Gl. 3.37} \quad F_\alpha^{NL} \sim \sum_{\beta\gamma} (A_\beta \cos \omega_\beta t + B_\beta \cos \nu t)(A_\gamma \cos \omega_\gamma t + B_\gamma \cos \nu t).$$

Dadurch kommen neben den zweiten Harmonischen $2\omega_\beta$, $2\omega_\gamma$, 2ν und Gleichanteilen auch folgende Kombinationsfrequenzen vor:

$$\text{Gl. 3.38} \quad \sum_{\beta\gamma} [F_{\beta\gamma}^{(2)} \cos(\omega_\beta \pm \omega_\gamma) + F_{\nu\beta}^{(2)} \cos(\nu \pm \omega_\beta)].$$

Man sieht, dass der zweite Frequenzterm ein resonantes Ansteigen von $Q_\alpha^{(2)}$ aufgrund der äußeren Anregung bewirkt, wenn die Frequenzen der Beziehung $\nu \pm \omega_\beta \approx \omega_\alpha$ entsprechen. Das gleiche Resonanzverhalten von $Q_\beta^{(2)}$ erhält man, wenn $\nu \pm \omega_\alpha \approx \omega_\beta$, deshalb spricht man von gekoppelten Oszillatoren [56]. Dadurch bedingt die Anregungskraft ein gleichzeitiges Anwachsen der Amplituden eines resonanten Frequenzpaares, das die Bedingung erfüllt:

$$\text{Gl. 3.39} \quad \omega_\alpha + \omega_\beta \approx \nu$$

Dieser resonante Zerfall der externen akustischen Anregung in ein Paar niederfrequente Schwingungsmoden des nichtlinearen Oszillators spiegelt die bekannten [56] Eigenschaften einer nichtlinearen Resonanz wieder: Zum einen sind die exakten Werte von $\omega_{\alpha,\beta}$ Funktionen der Anregungsamplitude, so dass Gl. 3.39 eine angenäherte Gleichung ist. Zum anderen wird der Resonanzanstieg der Schwingungsmoden durch Amplituden- und Frequenzhysteresen beeinflusst.

Für den speziellen Fall von Gl. 3.39, bei dem $\omega_\alpha = \omega_\beta = \omega$ ist, also die beiden Eigenfrequenzen zusammen fallen, folgt: $\nu \approx 2\omega$. Die Gegenwart der halben Anregungsfrequenz (Subharmonische) ist ein Merkmal der nichtlinearen Resonanz. In der Praxis ist es sehr unwahrscheinlich, dass man bei der Anregung genau die doppelte Eigenfrequenz trifft. Trotzdem finden sich häufig Subharmonische. Dies lässt sich mit dem Modell der parametrischen Resonanz erklären, das bei Landau-Lifschitz [28] und Mironsky [57] theoretisch entwickelt wird. Bei einer parametrischen Resonanz kommt es

oberhalb eines bestimmten Schwellwertes zu einem sprunghaften Ansteigen der Amplituden der Subharmonischen (instabiles Verhalten). Das lawinenartige Anwachsen dieser Amplituden lässt im Antwortspektrum eine Folge ganzzahliger Vielfacher von $\nu/2$ erscheinen. Für höhere Anregungsamplituden vergrößert sich der Resonanzbereich, so dass parametrische Resonanzen in einem weiten Frequenzbereich möglich sind.

Eine weitere Annäherung an das physikalische Modell klappernder Grenzflächen (CAN) ergibt sich durch die zusätzlichen Terme höherer Ordnung in F^{NL} . Dabei können sowohl eine größere Anzahl von Moden durch die Kombination von Resonanzen eintreten als auch das nichtlineare Spektrum durch die Wechselwirkung von existierenden resonanten Anregungen $\omega_{\alpha,\beta}$ und der Anregungsfrequenz ν_0 erweitert werden (siehe Gl. 3.39). In letzterem Fall einer Nichtlinearität beliebiger Ordnung N treten im Antwortspektrum folgende Frequenzkomponenten auf:

$$\text{Gl. 3.40} \quad F^{NL} \sim \sum_{m,n,p} F_{m,n,p} \cos(n\nu + m\omega_{\alpha} + p\omega_{\beta}),$$

wobei $m + n + p = N - 1$.

Neben den Höherharmonischen $n\nu$ enthält das nichtlineare Spektrum (Gl. 3.40) Frequenzpaare mit den Komponenten $(n\nu + m\omega_{\alpha} + p\omega_{\beta})$ und $(n\nu + p\omega_{\alpha} + m\omega_{\beta})$. Sie besitzen einen Abstand von $|m - p|\Delta$, wobei $\Delta = \omega_{\beta} - \omega_{\alpha}$ ist, und sind zentriert um die Frequenz: $[n\nu + (m + p)\nu/2]$. Die Frequenzpaare lassen sich in zwei Gruppen unterteilen [58]:

- Zentriert um die Subharmonischen $(2a + 1)\nu_0/2$, wobei $a = 1, 2, 3, \dots$ die Ordnung der auf die Anregung ν_0 bezogenen Subharmonischen bestimmt. In diesem Fall ist sowohl $m + p = 2a + 1$ ungerade als auch $m - p = [2(a - p) + 1]$. Dadurch befinden sich die ersten Frequenzpaare bei $\pm\Delta/2$ um die Subharmonischen.
- Zentriert um ganzzahlige Vielfache der Anregung ν_0 . In diesem Fall sind sowohl $m + p = 2b$ als auch $m - p$ gerade. Die Frequenzpaare höherer Ordnung beginnen bei $\pm\Delta$ um die Harmonischen.

Diese beiden Gruppen von Spektrallinien im nichtlinearen resonanten Antwortspektrum sind in Abbildung 3.20 dargestellt. Das berechnete Spektrum beruht auf Gl. 3.40, wobei

für die normierte Amplitude $F_{m,n,p} = 1$ und $N=8$ angenommen wurde. Die Frequenzpaare sind dabei symmetrisch um die Höherharmonischen und die Subharmonischen verteilt.

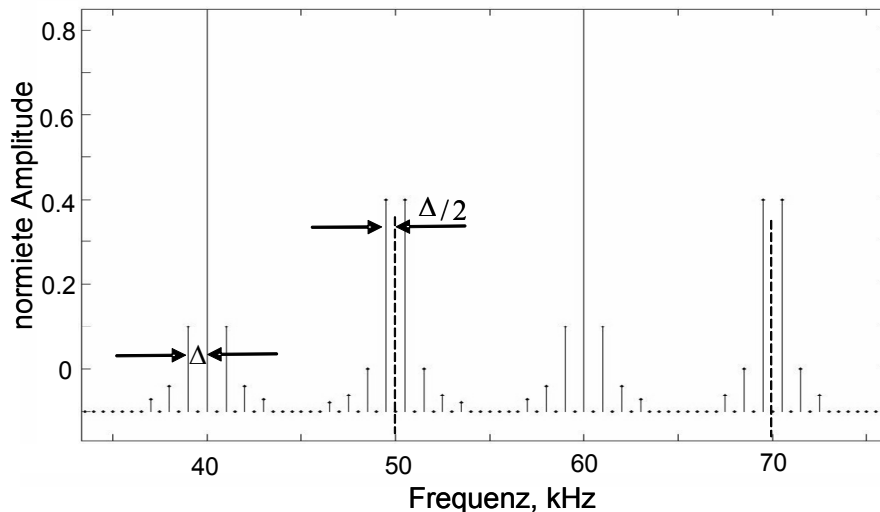


Abbildung 3.20: Ausschnitt aus dem berechneten Antwortspektrum, das Frequenzpaare und Sub- und Höherharmonische entsprechend Gl. 3.40 enthält. ($\nu_0 = 20\text{kHz}$; $\omega_1 = 9\text{kHz}$; $\omega_2 = 11\text{kHz}$; $N=8$).

Nimmt die Nichtlinearität weiter zu, dann erreicht man schließlich chaotisches Verhalten im Zeitsignal, das sich im Frequenzbereich ähnlich wie Rauschen verhält. Da dieses Verhalten messtechnisch nur schwer zu erfassen ist und außerdem zerstörende Schädigungen des Prüfkörpers bei den nötigen hohen Amplituden zu befürchten sind, wird es nicht weiter berücksichtigt.

3.4. Zusammenfassung: nichtlineare akustische Phänomene

Im Folgenden wird eine übersichtliche Zusammenstellung über die beschriebenen nichtlinearen akustischen Phänomene und deren Auswirkungen auf die Antwortspektren gegeben. Zum einen soll anhand dieser Kurzbeschreibung (Tabelle 3.1) grundsätzlich nichtlineares Verhalten nachgewiesen werden (Kapitel 5), und zum anderen soll die Übersicht helfen, nichtlineare Frequenzkonversion als Defektindikator zur zerstörungsfreien Prüfung einzusetzen (Kapitel 6).

Nichtlineares Verhalten, das durch Rissuferinteraktion (siehe Kapitel 3.1) hervorgerufen wird, äußert sich primär durch Höherharmonische der Anregungsfrequenzen im Antwortspektrum. Bei niedrigen Amplituden und monofrequenter Anregung treten somit Höherharmonische der Anregungsfrequenz (Kapitel 3.1) auf. Sind mehrere Anregungsfrequenzen vorhanden, werden außerdem Mischfrequenzen erzeugt (Kapitel 3.2).

Erst wenn die Anregungsamplitude einen Schwellwert überschreitet, können Subharmonische auftreten (Abbildung 3.21). Voraussetzung dafür ist, dass sich der Defektbereich wie ein separater Oszillator mit den Eigenfrequenzen ω_n verhält und die Anregungsfrequenz die Bedingung $\nu_0 \approx 2\omega_n$ erfüllt. Der Frequenzbereich, in dem Subharmonische angeregt werden können, verbreitert sich mit zunehmender Amplitude [57]. Prinzipiell sind auch Subharmonische höherer Ordnung, die einen größeren Teiler besitzen, anregbar. Allerdings ist der Schwellwert, oberhalb dessen diese Subharmonischen erscheinen, so hoch, dass in dieser Abhandlung nur Subharmonische erster Ordnung berücksichtigt werden.

Ein weiteres Ansteigen der Anregungsamplitude kann zum Auftreten von Frequenzpaaren führen, die zwei Eigenmoden des Defektbereichs kombinieren. Ein direkter Übergang von Höherharmonischen zu Frequenzpaaren ist möglich, wenn $\nu_0 \approx \omega_1 + \omega_2$. Weiteres Ansteigen der Amplituden führt schließlich zu chaotischem Klappern der Rissufer und dadurch bedingtem Rauschen im Antwortspektrum.

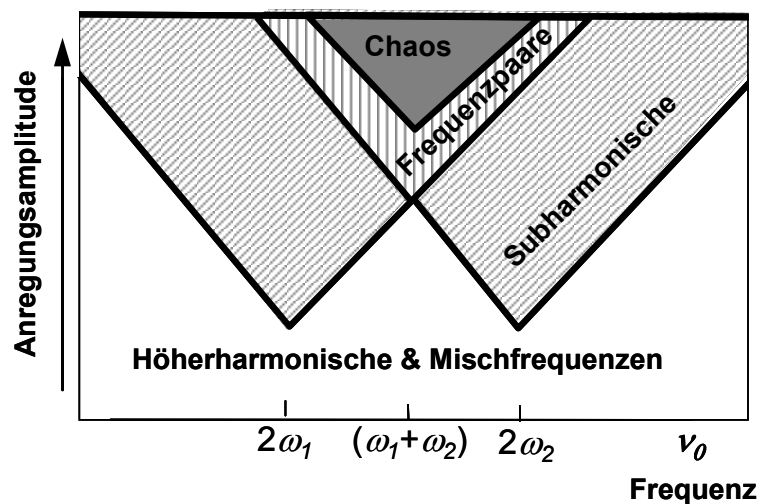


Abbildung 3.21: Nichtlineares Antwortspektrum in Abhängigkeit von der Anregungsamplitude. Der Defektbereich zeigt bei Rissuferinteraktion nichtlineares resonantes Verhalten, das zur Entstehung von Subharmonischen und Frequenzpaaren führen kann.

Tabelle 3.1 zeigt beispielhafte Antwortsignale und daraus ableitbare Spektren, die auf den beschriebenen nichtlinearen akustischen Phänomenen beruhen. Daneben sind noch einmal die wichtigsten Charakteristika der Antwortspektren aufgelistet, die eine Zuordnung der Frequenzkonversionen ermöglichen und auf diese Weise helfen, den Defekt näher zu beschreiben.

Rissufer-Klappern bei vertikaler Relativbewegung führt zu geraden und ungeraden Höherharmonischen im Antwortspektrum. Der Verlauf der Höherharmonischen folgt einer Sinc-Funktion. Bei Rissufer-Klappern aufgrund horizontaler Relativbewegung und

bei Reibung treten dagegen nur ungerade Höherharmonische auf. Das Antwortspektrum ermöglicht somit eine Unterscheidung der zugrunde liegenden Mechanismen.

Wenn zwei elastische Wellen zur Anregung genutzt werden, dann kommt es an Defektstellen durch Rissufer-Klappern zu Mischfrequenzen von Höherharmonischen der Anregungen. In Kapitel 3.2 wurden zwei repräsentative Fälle untersucht:

- Eine sehr tieffrequente Pumpwelle mit relativ großer Amplitude kombiniert mit einer hochfrequent aufmodulierten Prüfwelle.
- Zwei Anregungswellen mit gleich hohen Amplituden.

In den Antwortspektren treten jeweils Mischfrequenzen auf, die sich aus Kombinationen der Anregungswellen und deren Höherharmonischen ergeben, wodurch auch die Frequenzabstände bestimmt werden. Zudem zeigen die Spektren eine Sinc-modulierte Einhüllende. Die Stärke der Modulation wird durch die Anzahl der Schwingungen bestimmt, deren Amplitude den Grenzwert zu nichtlinearem Verhalten überschreitet. Wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben, werden bei zunehmender Modulationsstärke die Frequenzabstände kleiner und der Verlauf der Einhüllenden zunehmend komplexer, so dass hier nur der einfache Fall geringer Modulationsstärke angeführt ist.

Der dargestellte Defektbereich in Tabelle 3.1 zeigt resonante Eigenschaften durch die Annahme zweier gekoppelter Eigenfrequenzen ω_1 und ω_2 . Die abgebildeten Zeitsignale berücksichtigen nur die beiden ersten Harmonischen und Subharmonischen bzw. Frequenzpaare, da der Einfluss der abnehmenden höherfrequenten Amplituden kaum noch Auswirkungen auf das Zeitsignal hat.

Chaotisches Verhalten tritt bei nichtlinearer Resonanz und bei zunehmender Amplitude im Anschluss an Subharmonische und Frequenzpaare auf. Da es sich aber für messtechnische Anwendungen, die im Vordergrund dieser Abhandlung stehen, nur bedingt eignet, findet es in Tabelle 3.1 keine Berücksichtigung.

Sowohl der Nachweis (Kapitel 5) als auch der Einsatz nichtlinearer Frequenzen als Defektindikator (Kapitel 6) orientieren sich jeweils an der Reihenfolge aus Kapitel 3: Höherharmonische, Mischfrequenzen, Subharmonische und Frequenzpaare.

Frequenzkonversion aufgrund nichtlinearer Defekte

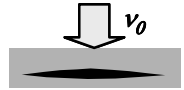
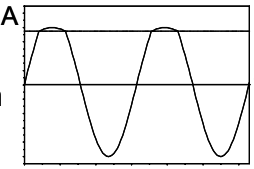
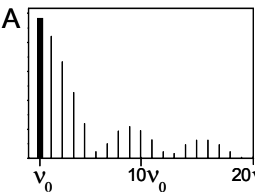

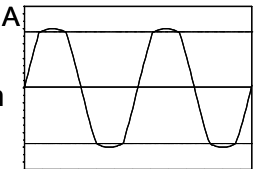
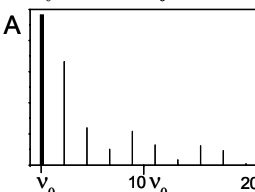
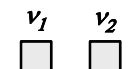
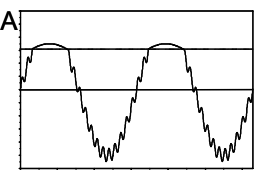
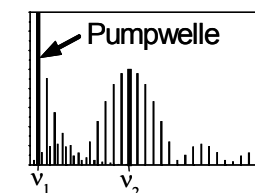
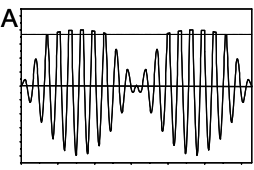
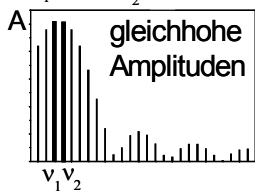

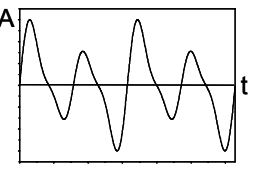
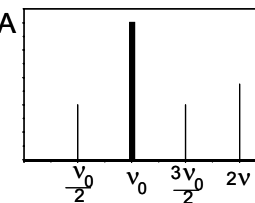

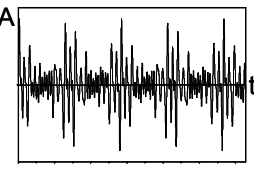
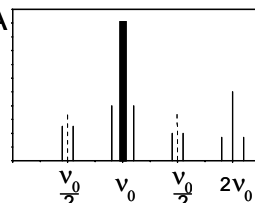
Nichtlineares Phänomen	Defektantwort im Zeitbereich	Spektrale Antwort	Eigenschaften des Spektrums
Grundlage:			
Rissufer-Interaktion			
 <p>Rissufer-Klappern durch vertikale Relativbewegung</p>			<ul style="list-style-type: none"> • gerade und ungerade Harmonische $n\nu_0$ • sinc-modulierte Einhüllende
 <p>Rissufer-Klappern und Reibung durch horizontale Relativbewegung</p>			<ul style="list-style-type: none"> • nur ungerade Harmonische $(2n+1)\nu_0$ • sinc-modulierte Einhüllende
Wellenmischen			
			<ul style="list-style-type: none"> • Kombinationen zwischen Höherharmonischen der Anregungsfrequenzen $m\nu_1 \pm p\nu_2$ • sinc-modulierte Einhüllende
			
Nichtlineare Resonanz			
			<ul style="list-style-type: none"> • Sub-Harmonische $\nu_0/2$ und ganzzahlige Vielfache • Höherharmonische $(n\nu_0)$
			<ul style="list-style-type: none"> • Seitenbänder um Höherharmonische und Sub-Harmonische $(n\nu_0 + m\omega_1 + p\omega_2)$

Tabelle 3.1: Nichtlineare akustische Phänomene bewirken spezifische Frequenzkonversionen

4. Eingesetzte Anregungs- und Messtechnik

4.1. Anregungsmöglichkeiten

Bei der nichtlinearen Vibrometrie muss eine akustische Prüfwellen durch das Testobjekt geschickt werden. Erzeugen kann man sie im Bauteil selbst (Adaptive Strukturen und Laseranregung) oder durch Ankoppeln einer externen Schwingungsquelle (Lautsprecher und mechanisch gekoppelte Schwinger).

4.1.1. Mechanische Anregung

Ultraschallwellen können durch magnetostruktive oder piezoelektrische Effekte erzeugt werden. Bei ersteren wird ein ferromagnetisches Material, vorzugsweise der Prüfkörper selbst, dem Wechselfeld eines Magneten ausgesetzt, wobei er dem Feld folgend Volumenänderungen erfährt, die etwa in der Größenordnung von 10^{-9} m liegen. Solche Systeme haben einen Frequenzbereich von 20 bis 200kHz.

Im Vergleich mit den magnetostruktiven Schwinggebern bieten piezoelektrische Modelle die Vorteile höherer Leistungsfähigkeit und hoher Bandbreite. Der piezoelektrische Effekt beruht auf der Eigenschaft einiger Kristalle (z. B. Quarz, Lithiumsulfat, Turmalin, Zinkblende oder Bariumtitanat), auf Zug- und Druckbelastung mit der Trennung elektrischer Ladungen zu reagieren. Bei der Belastung verschieben sich die Ladungsschwerpunkte von Anionen und Kationen gegeneinander, so dass es kein gemeinsames Symmetriezentrum des Kristalls mehr gibt, er ist nach außen hin geladen (Abbildung 4.1). Das Aufbringen elektrischer Ladungen im Kristall führt im Gegenschluss zu Volumenänderungen (“inverser piezoelektrischer Effekt“). Stapelt man Piezoaktoren

übereinander, so addieren sich die Stellwege, und es entstehen Stapelaktoren (Standardelemente bis zu $300\mu\text{m}$ Stellweg). Diese Elemente halten einer mittleren Druckbelastung bis 15kN stand, wobei die maximale Zugbelastung ca. 10 bis 100 mal kleiner sein kann.

Die Herstellung von Einzelementen erfolgt in der Regel durch planparalleles Herausschneiden aus einer orientierten Kristallplatte. Die Elemente, die wegen seines sehr starken piezoelektrischen Verhaltens meistens aus Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) hergestellt werden, sind brüchig, und größere Elemente sind nur sehr schwer herstellbar. Aufgrund der hohen akustischen Impedanz sind zudem Dämpfungsglieder zur Anpassung vorzusehen, wenn auch breitbandige Signalformen zugelassen werden sollen.

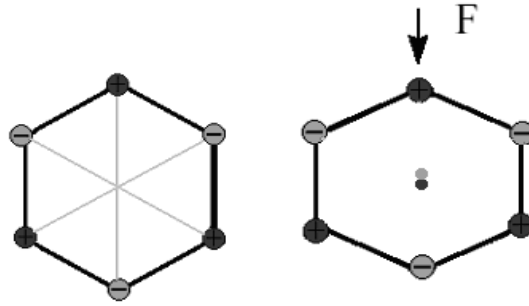


Abbildung 4.1: Verschiebung der Ladungsschwerpunkte von Anionen und Kationen durch eine äußere Kraft F , der Kristall ist nach außen hin geladen.

Eine Alternative bilden hier piezoelektrische Keramikschichten (meistens auch PZT), die mittels Laserablation und Stöchiometrieübertrag vom Target auf das zu beschichtende Material aufgetragen werden. Anwendungsgebiete sind die Sensorik (passive Vibrations- und Schalldämpfung), Aktorik (z. B. Piezoventile) und Kombinationen (z. B. intelligente aktive Vibrationskontrolle). Durch geeignete Dotierung der Ausgangsmaterialien kann die Keramikschicht optisch transparent gehalten werden, wodurch sich neue Anwendungsmöglichkeiten ergeben.

Daneben kommen immer mehr piezoelektrische Polymere zur Anwendung, weil sie flexibel und in verschiedenen Größen herstellbar sind. Die wichtigste Entwicklung ist in Folien aus PVDF zu sehen, die durch ein elektrisches Feld senkrecht zur Folienoberfläche ausgelenkt (Dickenänderung) werden und sich deshalb als Ultraschallgeber [59] eignen. Das gleiche Einsatzgebiet ist auch für piezoelektrische Polymerschäume interessant, erste Bestrebungen zu zellularem Polypropylen und porösem Polytetrafluorethylen sind in der Literatur [60] zu finden.

Die einfachste Art, eine mechanische Prüfwelle in das zu untersuchende Bauteil zu übertragen, ist der Einsatz integrierter Aktorik z. B. aus den besprochenen Piezoelementen, die von außen elektrisch gesteuert werden. Die Längenänderung der Piezoelemente kann je nach geometrischer Anordnung im Bauteil zu verschiedenen Wellenarten führen. Derartige in ihrer Form steuerbare Strukturen bezeichnet man als adaptive Strukturen (engl. Smart Structures). Man kann sie auch als Sensoren für Verformungen bzw. Schwingungen nutzen. Abbildung 4.2 zeigt den Aufbau einer solchen adaptiven Struktur, bestehend aus Piezokeramik als Aktor und glasfaserverstärktem Epoxydharz als Strukturwerkstoff. Andere Konzepte für adaptive Strukturen sind Formgedächtnislegierungen, elektro- und magnetostruktive Werkstoffe, elektro- und magnetorheologische Flüssigkeiten, stimulierbare Polymergele als Stellelemente und optische Braggzellen als Sensoren. Piezokeramiken verbinden beide Funktionen [61]. Die vielfältigen Möglichkeiten adaptiver Strukturen, eine dauerhafte oder intervallartige Überprüfung der Funktionsfähigkeit

während der Betriebszeit durchzuführen, werden unter den Begriffen „Health Monitoring“ bzw. „Health Checking“ zusammengefasst [62] und sind Leitthemen etablierter wissenschaftlicher Kongresse (z. B. SPIE Annual Symposium Smart Structures and Materials, seit 1993; International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, USA, jährlich seit 2000; European Workshop Structural Health Monitoring alle zwei Jahre seit 2002).

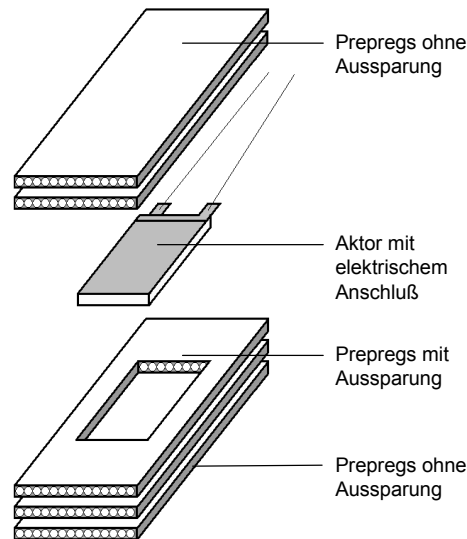


Abbildung 4.2: Schematischer Aufbau einer Faserverbund-Probe mit Aktor [63].

Da aus konstruktiven und wirtschaftlichen Gründen nicht alle zu prüfenden Strukturen mit Aktoriken ausgestattet werden können, bleibt die mechanische Kopplung zur Schwingungsanregung ein wichtiges Thema. Um die Messfeldgröße sinnvoll zu gestalten, ist entsprechend viel Leistung einzukoppeln, auch um die hohen Übertragungsverluste zu kompensieren.

Hier bieten sich Ultraschallgeber an, die zum Schweißen thermoplastischer Kunststoffe konzipiert wurden. Hierbei werden hochfrequente Schwingungen über eine Sonotrode unter einem bestimmten Fügedruck auf die zu verbindenden Teile übertragen. Durch Reibung in der Fügezone entsteht Wärme und dadurch wiederum ein Schmelzefluss zwischen den zu verbindenden Teilen, der sich beim Abkühlen zu einer homogenen Verbindung verfestigt. In Abbildung 4.3 wird ein Aufbau zum Ultraschallschweißen vorgestellt. Dabei erzeugt ein Generator eine Ultraschallfrequenz von 20kHz und betreibt damit den Konverter, der aus einem Stapel von piezoelektrischen Schwingern besteht und elektrische in mechanische Schwingungen wandelt. Am Konverter ist ein Booster (mechanischer Transformator) angekoppelt, der die Größe der Schwingungsamplitude bestimmt. Die abschließende Sonotrode (Schweißwerkzeug) konzentriert und verstärkt die in Längsrichtung verlaufenden mechanischen Schwingungen und leitet sie in die zu plastifizierende Fügezone ein.

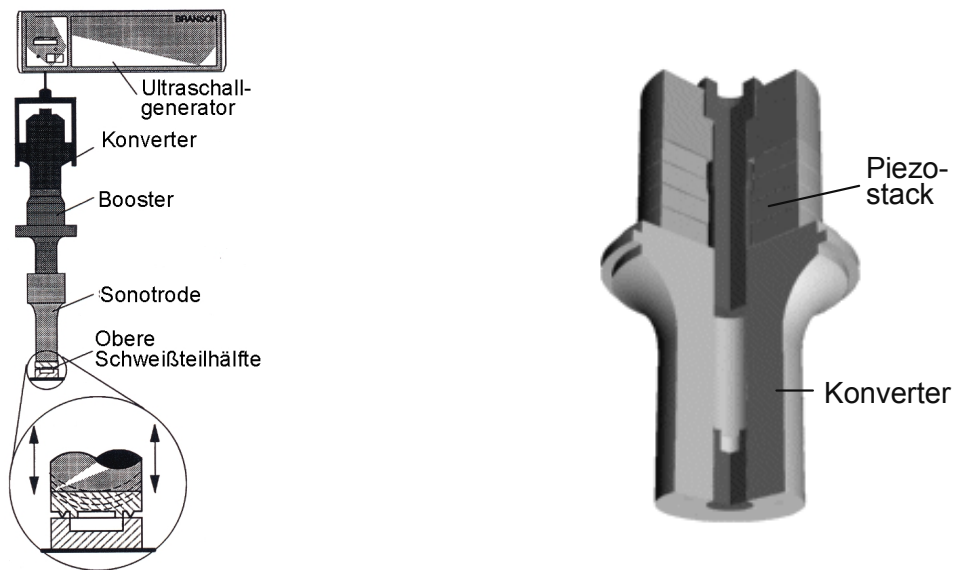


Abbildung 4.3: Funktionsprinzip Ultraschallschweißen (links) mit Konverterinnenansicht (rechts) [64].

Für die hier vorgestellten Messungen wurde nur der Konverter benutzt und somit ohne Amplitudenverstärkung gearbeitet. Es handelt sich dabei um ein modifiziertes Generator-Wandler-System PGB 220 Advanced der Firma Branson, das in einem Frequenzbereich zwischen 15kHz und 25kHz arbeitet. Die maximale Ultraschall-Amplitude von $\pm 10\mu\text{m}$ bei 20kHz steht dabei direkt am Konverter zur Verfügung, wobei auf Booster und Sonotrode verzichtet wurde, um bei durchschnittlichen $0,5\text{-}2\mu\text{m}$ Amplitude eine zerstörungsfreie Anregung zu gewährleisten.

Das vorgestellte Hochleistungs-Anregungssystem besitzt einen engen resonanten Arbeitsfrequenzbereich. Möchte man bei anderen Frequenzen arbeiten, dann eignet sich ein Piezostack, der für Ultraschallreinigungsbäder konzipiert wurde und mit einer Anregungsspannung von knapp 2kV betrieben wird (Abbildung 4.4).

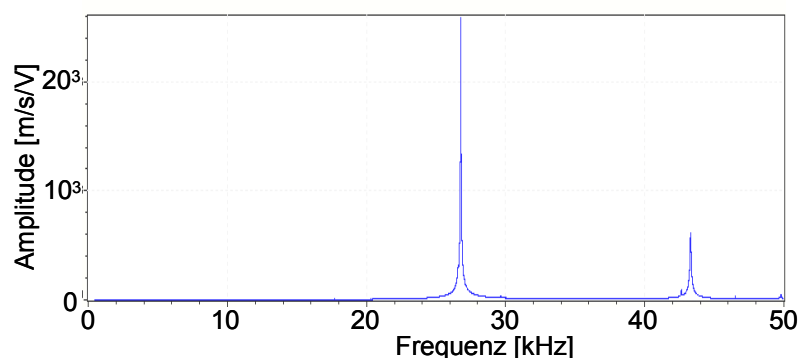


Abbildung 4.4: Wandler-System Piezostack mit Eigenfrequenzspektrum.

Zur Ermittlung des Eigenfrequenzspektrums wurde von einem digitalen Funktionsgenerator (HP33120A) ein periodisches Chirp-Signal erzeugt und in einem Leistungsverstär-

ker (Bucher Model 120 CV-50) transformiert. Die Anregungsspannung von $20V_{pp}$ ist als Referenzsignal für die Vibrometermessungen verwendbar. Zur Erfassung der Spektren diente ein Messfeld mit 1520 Messpunkten auf der Koppelfläche, abgescannt mit 3facher Amplitudenmittelung. Die Übertragungsfunktion bestehen aus je 6400 FFT-Linien, dies entspricht einer Frequenzauflösung von 7,8125Hz bei einer Bandbreite von 50kHz (Abbildung 4.4, rechts).

Bei niedrigen Frequenzen bis max. 25kHz bietet sich die Verwendung eines Rüttlers (Shaker) an. Zur Verfügung stand am IKP ein Rüttler (Brüel & Kjaer, Vibration Exciter Type 4809) mit einem Arbeitsbereich von 10Hz bis 20kHz und einer maximalen Auslenkung von 8mm, gewährleistet durch eine interne mechanische Sicherung. Ungekühlt kann der Rüttler, der wie ein Lautsprecher mittels Elektromagnet betrieben wird, 75g bewegen (Abbildung 4.5).

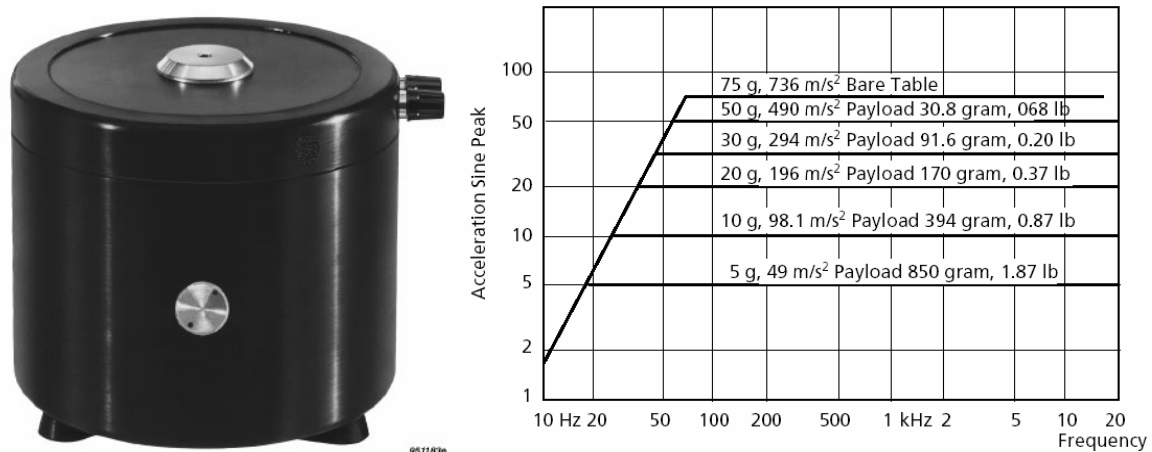


Abbildung 4.5: Shaker für mechanische Ankopplung mit Kennlinie [65].

Bei mechanisch gekoppelten Schwingern unter Realbedingungen sind die Einkoppelbedingungen besonders wichtig. Die Dynamik an den Einkoppelstellen wird dabei durch die Linearität der Bewegungen bestimmt.

4.1.2. Laseroptische Anregung

Der Begriff Laser ist eine Abkürzung für „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ [66]. Das physikalische Grundprinzip eines Lasers ist die induzierte Emission von Photonen im Laserresonator, die dieselbe Phase und Richtung haben, so dass kohärentes Licht eines sehr engen (abhängig von der Kohärenzlänge des Lasers) Wellenlängenbereiches emittiert wird.

Ein Laser besteht aus einem optischen Resonator mit Spiegeln an den Enden. Durch Reflektion an den Spiegeln wird das Licht im laseraktiven Material des Resonators verstärkt (stehende Welle). Da einer der beiden Spiegel teildurchlässig ist, wird dort

ein kleiner Teil des Laserlichtes ausgekoppelt. Daher ist eine ständige Energiezufuhr zur Anregung der Atome im laseraktiven Medium nötig.

Stehende Wellen im Resonator können sich nur ausbilden, wenn ganzzahlige Vielfache der halben Wellenlänge λ zwischen die beiden Spiegel (Abstand L) passen:

$$\text{Gl. 4.1} \quad L = n \frac{\lambda}{2} .$$

Die Frequenz Ω des Lasers ist dann gegeben durch:

$$\text{Gl. 4.2} \quad \Omega = \frac{nc}{2L} ,$$

wobei c die Lichtgeschwindigkeit im Resonator ist. Allerdings werden nicht alle Moden im laseraktiven Medium verstärkt, sondern nur die, die im materialabhängigen Verstärkungsband liegen (Abbildung 4.6). Der Abstand der Moden ist $\frac{c}{2L}$.

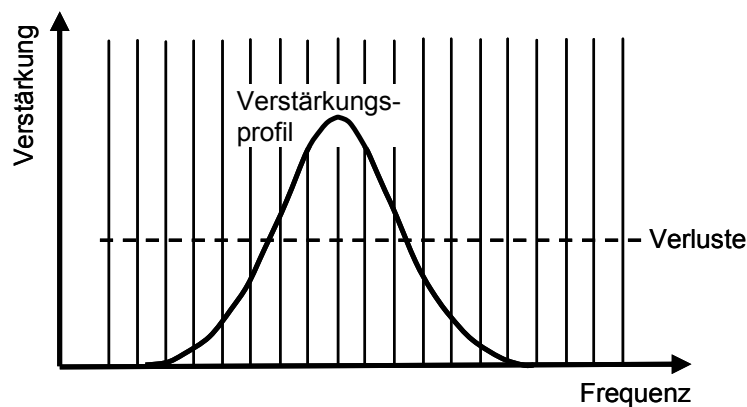


Abbildung 4.6: Verstärkungsbereich eines Lasers [67].

Große räumliche bzw. transversale Kohärenz wird in Resonatoren erzeugt, wodurch sich Laserlicht besonders gut zu einem gebündelten Laserstrahl fokussieren oder auch zu einem parallelen Strahl kollimieren lässt. Aufgrund schmalbandiger stimulierter Emission und Selektion einzelner Resonatormoden lassen sich extrem schmalbandige Linien hoher Intensität aussenden, was einem fast monochromatischem (einfarbigem) Licht und auch einer sehr großen zeitlichen Kohärenz entspricht.

Eine Einteilung der Laser kann durch die verschiedenen aktiven Medien erfolgen. Der erste Laser war ein optisch gepumpter Festkörperlaser (Rubinlaser) [68]. Später folgten Gaslaser, Halbleiterlaser und Mitte der 90er-Jahre des letzten Jahrhunderts Scheiben- und Faserlaser. Bei dem Halbleiterlaser werden Übergänge im Halbleiter zur Besetzungsinversion verwendet. Laserdioden sind direkt elektrisch gepumpte Laser.

Die Laseranregung bietet sich als Alternative [69] zu den beschriebenen mechanischen Anregungsprinzipien an, wenn beispielsweise aus verfahrens- oder materialtechnischen Gründen berührungslos einzukoppeln ist. Die absorptionsbedingte lokale Wärmeentwicklung im Fokus des Lasers führt zu Mikroverformungen, und durch Modulation der Laserleistung erzeugt man eine Schwingungsquelle [70]. Generell ist diese Methodik gerätetechnisch aufwändig und aufgrund der geringen Amplituden der Höherharmonischen ist zu erwarten, dass die laterale Messfeldausdehnung sehr begrenzt ist, wenn man zerstörungsfrei prüfen will.

Zur Anregung von akustischen Wellen durch Wärmeausdehnung stand ein fasergekoppelter Diodenlaser der Firma Jenoptik mit Wasserkühlung (JO LD 10 FHA), Wellenlänge 806,4nm und 10W Leistung bei 25,4A zur Verfügung.

4.1.3. Akustische Anregung

Für die Demonstration nichtlinearer Modulation wird im Folgenden Luftultraschall verwendet. Dazu kamen Teile des kommerziell erhältlichen Ultraschallsystems AirTech 4000 der Firma Hillger [71] zum Einsatz. Es besteht aus angepassten Prüfköpfen (Sender und Empfänger) und der Steuer- und Auswerteeinheit. Fokussierter Luft-Ultraschall ist in der Prüftechnik relativ neu. Die Absorptionsverluste durch die Luftübertragungsstrecke liegen zwischen 10 und 100dB/m im Frequenzbereich 100kHz bis 1MHz. Dazu kommen die Absorptionsverluste in der Probe, die materialabhängig sind. Luftultraschall als Prüftechnik ist somit möglich, wenn man die Impedanzunterschiede zwischen Prüfkopf und Luft reduziert und damit die Leistungsfähigkeit des Systems erhöht.

Derzeit sind zwei Prüfkopfkonzepte kommerziell erhältlich. Dies sind zum einen elektrostatische (kapazitive) Luftschallwandler, die aus einer dünnen Kunststoffmembran bestehen, überzogen mit einer dünnen Metallschicht. Hinterlegt wird diese Membran mit einer Grundplatte, ebenfalls metallbeschichtet, wobei beide Metallschichten die Kondensatorplatten bilden [72, 73].

Der zweite Prüfkopftyp wird aus Piezo-Kompositen gefertigt und stand für die folgenden Untersuchungen zur Verfügung. Dabei sind piezoelektrische Stäbchen entsprechend Abbildung 4.7 in eine passive Kunststoffphase eingegossen, um die Impedanzanpassung durch eine Reduktion der Dichte und der Schallgeschwindigkeit zu verbessern (siehe auch Gl. 2.1). Der Mittenabstand zwischen zwei Stäbchen muss kleiner als die halbe Wellenlänge einer Scherwelle in dem Kunststoff sein, damit der gesamte Verbund schwingt.

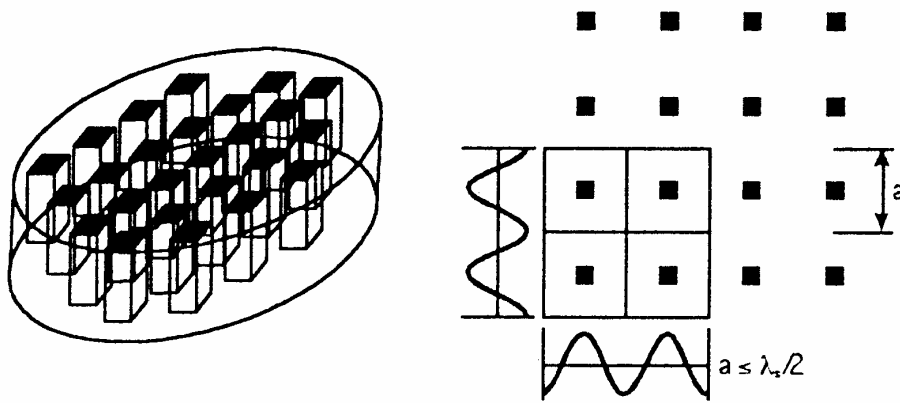


Abbildung 4.7: Aufbau eines 1-3 Piezo-Komposit-Werkstoffes [74].

Die Fokussierung der Prüfköpfe erfolgt durch die sphärische Außenform des Verbundes. Erreicht wird eine Brennweite von 40mm (Abbildung 4.8, a), wobei die Entfernung, bei der die Amplitude um $1/e$ abfällt, weit größer ist.

Mit der Schallgeschwindigkeit $c = 330\text{m/s}$, der Sendefrequenz $\nu_0 = 450\text{kHz}$, der Brennweite $f_f = 0,04\text{m}$ und der Apertur $a = 0,0095\text{m}$ ergibt sich der Fokusradius $\approx 3\text{mm}$.

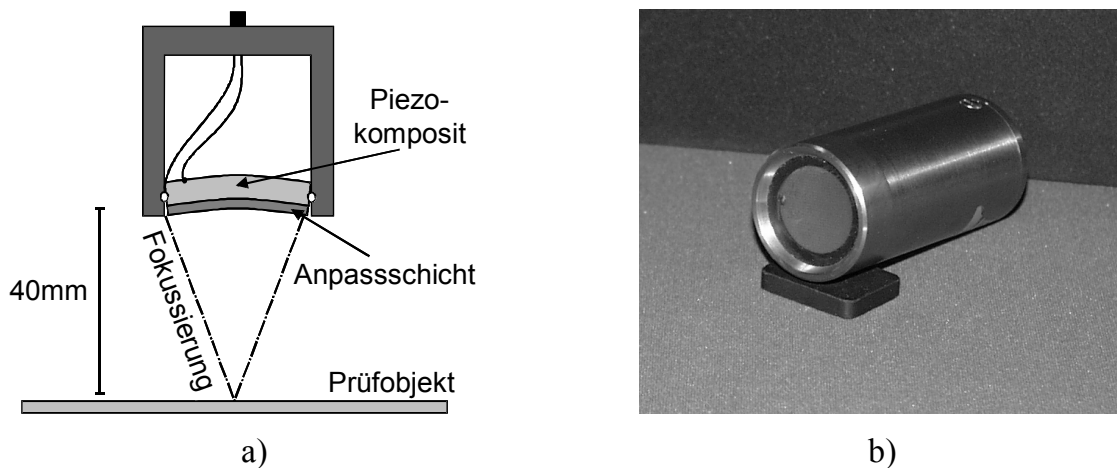


Abbildung 4.8: Innerer Aufbau (a) eines Luft-Ultraschallprüfkopfes (b).

4.2. Relevante Eigenschaften elastischer Wellen

Elastische Wellen sind mechanische Dehnungsvorgänge, die sich räumlich und zeitlich periodisch in elastischen Medien wie Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern ausbreiten. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit wird in erster Linie von Dichte und Elastizitätsmodul bestimmt. In Gasen und Flüssigkeiten treten ausschließlich Kompressionswellen (= Longitudinalwellen = p-Wellen) auf, in Festkörpern können auch Schubspannungen und damit Schubdeformationen (Transversalwellen = s-Wellen) übertragen werden (Abbildung 4.9).

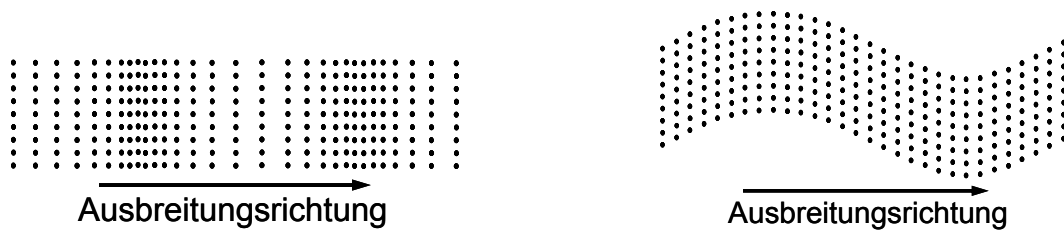


Abbildung 4.9: Grundwellentypen: Longitudinalwelle (links) und Transversalwelle (rechts)

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist bei Longitudinalwellen höher als bei Transversalwellen. Die Wellenbewegungen in elastischen Körpern lassen sich als Summe von reinen Longitudinalwellen und reinen Transversalwellen beschreiben. Daraus ergeben sich Kombinationstypen, wie Torsionswellen, die eine Drehschwingung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung ausführen, oder Rayleighwellen, einer Oberflächenwelle, deren Amplitude von der Oberfläche gegen das Innere des Körpers exponentiell abnimmt.

Bei den im Folgenden beschriebenen Messungen nichtlinearer Effekte im unteren Ultraschallbereich ist die Wellenlänge immer wesentlich größer als die Bauteildicke. Somit sind nur Oberflächen oder Plattenwellen zu erwarten. Weil die Einleitung der Bauteilschwingung aus technischen Gründen meist in der Dickenrichtung erfolgt, werden primär antisymmetrische Moden (a_0) angeregt. Es zeigte sich meistens ein diffuses Wellenfeld, bedingt durch Modenkonversion und Streuung an den verschiedensten Grenzflächen. Dies ist von Vorteil, weil so durch die Defektselektivität des Verfahrens Stehwelleneffekte vermieden werden. Beispielsweise wäre ein Defekt in einer Knotenlinie der Anregungsschwingung nicht zu erkennen, da die Amplitude dort Null ist. Eine genauere Beschäftigung mit den Wellenarten ist in diesem Fall aber nicht weiterführend.

4.3. Detektionsmöglichkeiten

Nach der Erläuterung der akustischen Anregungsmöglichkeiten und der zu erwartenden Bauteilschwingungen müssen nun die Detektionsmöglichkeiten abgewogen werden. Zur richtigen Interpretation der Messergebnisse ist zu beachten, welche Schwingungskomponenten das jeweilige Detektionsverfahren erfassen kann.

4.3.1. Akustische Detektion

Zur Detektion von Luft-Ultraschall im Frequenzbereich um 440kHz werden Prüfköpfe verwendet, die baugleich mit den in Kap. 4.1.3 beschriebenen Sendeköpfen sind.

4.3.2. Bildgebende Laser-Doppler-Interferometrie

Zur Bestimmung von Bauteilschwingungen und zur Modalanalyse sind Laservibrometer bereits seit den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts im Einsatz [75, 76]. Laser-Doppler-Vibrometer (LDV) können Bauteilschwingungen berührungslos, schnell und mit einer

sehr hohen lateralen Ortsauflösung ermitteln, die durch die Laserfokusgröße bestimmt ist. Diese Eigenschaften machen die Laservibrometrie zum idealen Verfahren, um das lokale Schwingungsspektrum einer Probe direkt an ihrer Oberfläche zu bestimmen, also auch zur Detektion lokaler Nichtlinearitäten [77].

Im Kapitel 4.1.2 wurden bereits die Eigenschaften von Laserlicht und die Erzeugungsvarianten diskutiert. Für messtechnische Zwecke spielt die Leistungsstärke allerdings keine Rolle; Leistungen von 1mW sind völlig ausreichend, um eine auswertbare Reflektion des Messstrahls auf den meisten Oberflächen zu erhalten. Wichtig ist hier die hohe Kohärenzlänge, die sich aus der Monochromasie eines Lasers ergibt. Damit ist die Strecke gemeint, die eine mit konstanter Lichtgeschwindigkeit fortschreitende elektromagnetische Welle mit stetiger Phasendifferenz zurücklegt. Im Vibrometer wird deshalb ein Helium-Neon-Laser verwendet, der sehr rauscharmes sichtbares rotes Licht ($\lambda = 0,6328\mu\text{m}$) emittiert. Ein solcher Gaslaser kann so stabilisiert werden, dass nur eine einzige longitudinale Mode anschwingt (Abbildung 4.6). Dann ist die Bandbreite nur einige MHz und lässt Kohärenzlängen zwischen 200m und 300m zu.

Interferenz beruht auf der Überlagerung kohärenter Lichtstrahlen, die zur Koinzidenz gebracht werden. Das Prinzip der Interferometrie wiederum [78] wurde bereits lange vor der Herstellung des ersten Lasers beschrieben. Dabei hängt die resultierende Intensität beispielsweise an einem Photoempfänger von der Phasendifferenz $\Delta\varphi$ zwischen beiden Strahlen ab:

$$\text{Gl. 4.3} \quad I(\Delta\varphi) = \frac{I_{\max}}{2}(1 + \cos \Delta\varphi) .$$

Die Phasendifferenz $\Delta\varphi$ wird durch die Pfaddifferenz ΔL zwischen beiden Strahlen bestimmt:

$$\text{Gl. 4.4} \quad \Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta L}{\lambda} .$$

λ ist die Laserwellenlänge. Wenn einer der beiden Strahlen (Messstrahl) von einem bewegten Objekt zurückgestreut wird, dann ist die Pfaddifferenz eine Funktion der Zeit. Die Interferenzstreifen wandern am Photoempfänger und die Lageänderung des Messobjektes auf der Strahlachse kann durch ein vorzeichengenaues Zählen der Streifendurchgänge ermittelt werden. Entsprechende Interferometer wurden von E. Mach und L. Zehnder 1891/92 [80] unabhängig von einander entwickelt, wobei die Kohärenzlänge des Lasers mindestens dem gesamten optischen Weg entsprechen muss.

Das Laser-Doppler-Vibrometer ist eine spezielle Ausführung des Laser-Doppler-Anemometers (LDA), welches zur berührungslosen Messung von Strömungsgeschwin-

digkeiten in Gasen und Flüssigkeiten entwickelt wurde [79]. Dabei wird der Effekt ausgenutzt, dass kleinste Partikel, die in Strömungen mitgeführt werden, bei Beleuchtung durch Laserlicht Streulicht abgeben, welches als Folge ihrer Bewegung eine Frequenzverschiebung (Dopplereffekt) erfährt. Auch das LDV detektiert die Oberflächengeschwindigkeit in Strahlachse. Beschleunigung und Weg (Abstandsänderung) können mathematisch daraus bestimmt werden.

Im akustischen Bereich ist der Doppler-Effekt bekannt. Trotz prinzipieller Unterschiede wird der relativistische Dopplereffekt des Lichtes bei Objektgeschwindigkeiten, die klein gegen die Lichtgeschwindigkeit sind, näherungsweise durch identische Gleichungen beschrieben [80].

Bei einer Streuung am bewegten Messobjekt erfährt der Messstrahl eine kleine Frequenzänderung, welche als Dopplerfrequenz f_D bezeichnet wird und eine Funktion der Geschwindigkeitskomponente v in Richtung des Messstrahls ist:

$$\text{Gl. 4.5} \quad f_D = 2 \frac{v}{\lambda} .$$

λ ist die Wellenlänge der ursprünglichen Welle.

Messtechnisch ausgewertet wird die niederfrequente Schwebungsfrequenz, die bei Überlagerung der wenig verschiedenen Frequenzen des Messstrahls und des Referenzstrahls entsteht [81]. Sie entspricht der Dopplerfrequenz. Die Richtung der Bewegung bleibt vorerst unbestimmt.

Dieses Problem löst man durch Einführen einer zusätzlichen, festen Frequenzverschiebung $f_B = 40\text{MHz}$ in das Interferometer, zu der die Dopplerfrequenz vorzeichen-genau addiert wird. Dies erfolgt mit Hilfe des optischen Elements "Braggzelle", dargestellt in Abbildung 4.10. Für die resultierende Frequenz am Detektor erhält man damit

$$\text{Gl. 4.6} \quad f_{\text{mod}} = f_B + 2 \frac{v}{\lambda} .$$

Derartige richtungssensitive Interferometer werden als heterodyn bezeichnet.

Alle im Folgenden vorgestellten Messergebnisse wurden mit einem bzw. drei (3-D-Messung) scannenden Laservibrometer (Polytec PSV 400) erstellt. Das optische System (OFV-055) erfasst die Bewegungen, die parallel zur Strahlrichtung verlaufen ("out-of-plane"). Es besteht aus einem Heterodyn-Interferometer OFV-303, das mit einem Zwei-Achsen-Ablenkspiegelsystem und einer Optik zur Fokussierung des Laserstrahls kombiniert worden ist (siehe Daten in Tabelle 4.1).

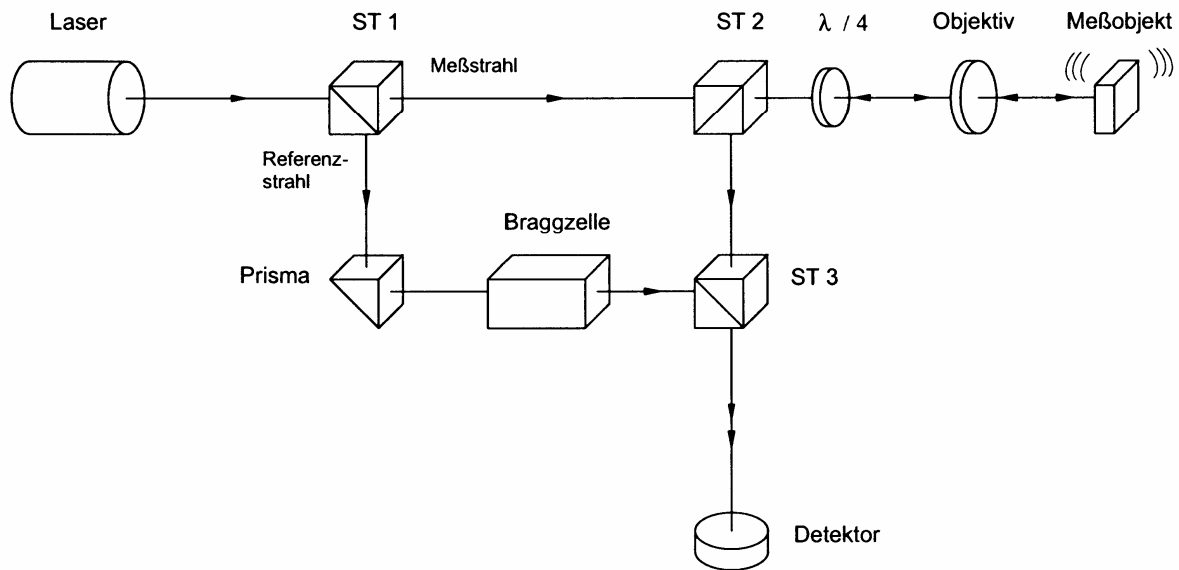


Abbildung 4.10: Prinzipbild eines Heterodyn-Interferometers (Polytec OFV 303) [81].

Minimaler Messabstand	zw. 65mm und 450mm (*)
Maximaler Messabstand	250m (mit Oberflächennachbehandlung)
Tiefenschärfe bei 10m Abstand	± 2m, abhängig von der Oberfläche
Minimaler Durchmesser des Messpunktes	10µm bei 175mm stand-off (*)
Brennweite	100mm
Austrittsstrahldurchmesser ($1/e^2$)	12mm
Punktabstand	50µm
Strahldurchmesser bei 1m (typ.)	42µm
Wellenlänge des Messlasers	633nm (sichtbares Licht)
Laserleistung	Laser der Klasse II, HeNe-Laser (1mW)
Resonatorlänge	205mm
Ausgangsmittenfrequenz f_B	40MHz

(*) Abhängig von den Spezifikationen der Optik

Tabelle 4.1: Auszug aus dem Datenblatt zu OFV-303 High Sensitivity Vibrometer Head [81].

Wie oben beschrieben, enthält das Interferometersignal aufgrund des Dopplereffektes eine Frequenzmodulation, aus der sich die Oberflächenschnelle des Messobjektes ableiten lässt. Dazu führt der Controller OFV 4001 SF des PSV 400 eine Frequenzdemodulation durch. Die dynamischen Wegamplituden a können durch

$$\text{Gl. 4.7} \quad a(f) = \frac{v}{f}$$

aus der Schnelle v bestimmt werden. Die rauschentsprechende Mindestamplitude wurde in einer früheren Dissertation [82] bei 10kHz zu 30pm bestimmt, was etwa einem Drittel

eines Atombeschleunigers entspricht. Diese Empfindlichkeit des Vibrometers ist die Basis für die Durchführbarkeit der unten beschriebenen Messungen.

Der Signalverlauf im Controller ist in Abbildung 4.11 dargestellt [81]. Zuerst wird das vorverstärkte Hochfrequenzsignal mit Hilfe des Referenzoszillators auf die eigentliche Dopplerfrequenz heruntergemischt. Die darauf folgende Frequenz-Spannungs-Konvertierung (Hochpass mit Gleichrichtung) führt zu einer Spannung, die proportional zur Oberflächengeschwindigkeit ist. Zur Eliminierung noch vorhandener Hochfrequenz-Komponenten, die das digitale Signal stören würden, wird vor der Verstärkung und A/D-Konvertierung zusätzlich noch ein Butterworth-Tiefpass achter Ordnung eingesetzt. Die wichtigsten Daten des Demodulators sind in Tabelle 4.2 dargestellt.

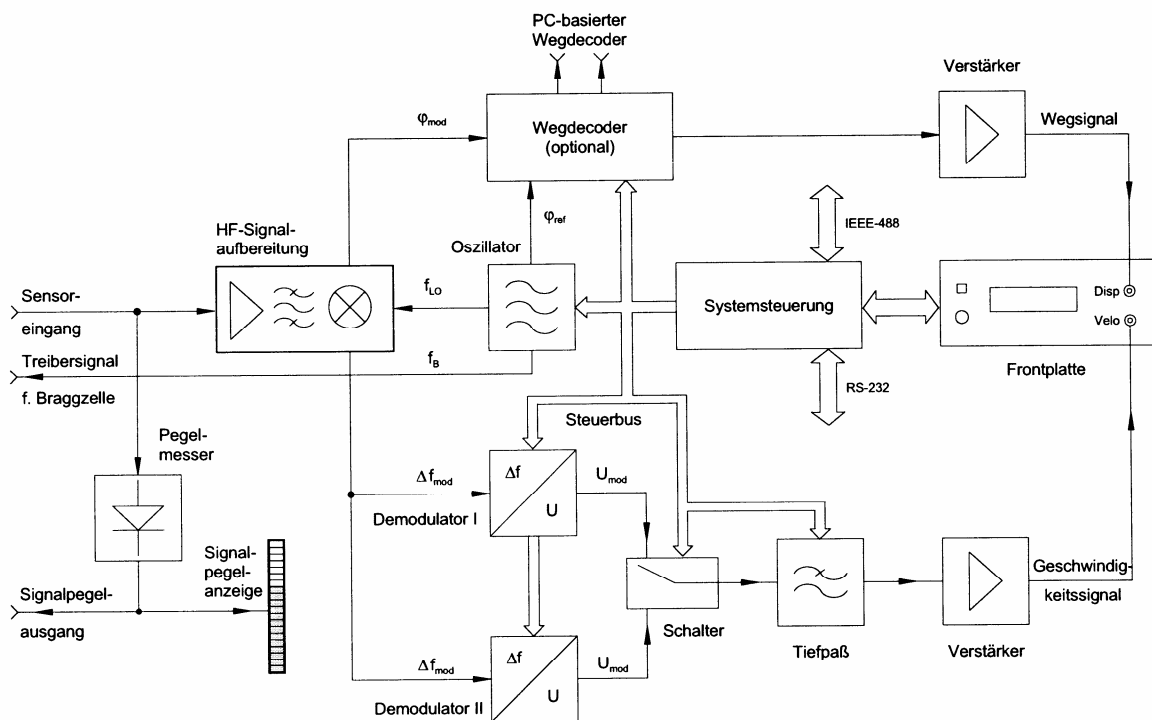


Abbildung 4.11: Blockdiagramm des Polytec OFV 3001 S Controllers / Demodulators.

Eine wichtige Kenngröße des Laservibrometers bei der Detektion von Nichtlinearitäten ist der Klirrfaktor des Systems, der als Betragssumme aller höheren Harmonischen definiert ist. Mit -3 dB unter Vollaussteuerung liegt der Systemklirrfaktor deutlich unter dem Klirrfaktor der Defektnichtlinearitäten.

Ein 14bit A/D-Konverter mit einer Abtastrate von bis zu 1 MHz (2,56 MSamples/s) überträgt die Vibrometer-Messwerte sowie des Anregungssignal. Durch Überabtastrung (bis zu 2,5-fach), um eine zusätzliche digitale Tiefpassfilterung zu ermöglichen, 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	± 10V					
Ausgangsimpedanz	50Ω					
Messbereiche	1, 5, 10, 25, 125, 1000mm/s/V					
Bereich [mm/s/V]	1	5	10	25	125	1000
Auflösung	0,3μm/s	0,3μm/s	0,5μm/s	2μm/s	5μm/s	10μm/s
Bandbreite	10kHz	10kHz	250kHz	250kHz	250kHz	250kHz
Klirrfaktor (@ -3 dB _{fs})	< 0,2% < -54 dB	< 0,2% < -54dB	< 0,2% < -54dB	< 0,2% < -54dB	< 0,3% < -50dB	< 0,3% < -50dB

Tabelle 4.2: Technische Daten des Polytec OFV 3001 S Controllers / Demodulators.

Das gemessene Zeitsignal kann online dargestellt und für jeden Messpunkt abgespeichert werden. Dieser Modus ist hilfreich, da der Deformationsgrad der Welle wertvolle Informationen zum Verständnis und zur Interpretation der Nichtlinearitäten eines Defektes liefern kann.

Eine weitere Möglichkeit Messdaten zu dokumentieren besteht in der Durchführung einer Echtzeit-FFT, wobei für jeden Messpunkt Betrag und Phase spektral gespeichert werden. Abhängig von der gewünschten spektralen Auflösung bzw. Bandbreite ist dabei ca. 0,1 bis 1s Messzeit pro Punkt erforderlich.

Die Scanfunktion des verwendeten Laser-Vibrometers (PSV-400-System) bildet die Voraussetzung für die bildgebende Darstellung der Messergebnisse. Der verwendete Scan-Kopf mit der Typenbezeichnung OFV-055 verfügt in xy -Richtung über verstellbare Spiegel zur Strahlführung, eine Farbkamera zur Live-Übertragung eines Videobildes und als Sende- und Empfangseinheit den Sensor OFV-303 LDV. Bei dem Sensor handelt es sich um eine separate Einheit zur Ein-Punkt-Messung. Durch Verkippen der steuerbaren Führungsspiegel innerhalb eines möglichen Öffnungswinkels von $40^\circ \times 40^\circ$ wird der Laserstrahl frei auf der Oberfläche des Prüfobjektes positioniert. Um die gewählte Fläche schnell abzuscannen, bewegen sich die Spiegel innerhalb von weniger als 10ms von einer Messposition in die nächste. Die Winkelverstellung erfolgt mit einer Genauigkeit von $0,002^\circ$. Die Live-Bild-Videokamera liefert ein Bild des Prüfobjektes und des Messpunktes. So kann der Anwender ein Gitter mit den gewünschten Messpunkten über das Live-Bild legen. Diesen Gitterpunkten lassen sich die graustufenkodierte Amplituden der angegebenen Frequenz bzw. die Effektivwerte eines Frequenzbandes zuordnen, so

dass ein klarer Bezug zum jeweiligen Messpunkt gegeben ist. Der eingebaute Zoom ermöglicht es, auch sehr kleine Strukturen zu erfassen (Faktor 72, 18 x optische, 4 x digitale Vergrößerung).

Das PSV-400-System von Polytec besteht aus zwei Hauptkomponenten: dem Scan-Kopf (technische Details siehe oben) und der Steuereinheit.

Die Steuereinheit setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- OFV-3001-S LDV-Controller, der proportional zur Oberflächenschwingung eine analoge Spannung produziert.
- PSV-Z-040 Verbindungseinheit, die ein zentrales Interface zwischen Scan-Kopf, LDV-Controller und DMS (siehe unten) darstellt.
- Data Management System (DMS), das die Übertragung, Speicherung, Analyse und Auswertung der Daten steuert.

Zur Schwingungsaufnahme in alle drei Raumrichtungen kam das Polytec PSV-400-3D zum Einsatz. Es basiert auf der Technologie des 1D-PSV und verwendet drei unabhängige Scanning-Messköpfe und -Controller. Damit werden Schwinggeschwindigkeitsmessungen aus drei unterschiedlichen Richtungen gleichzeitig für den jeweiligen Messpunkt vorgenommen. Die Steuerung aller drei Sensoren erfolgt zentral über die PSV-Mess- und Steuerungssoftware. Besonders umfangreich ist bei den 3-D-Messungen das Einlernen des Koordinatensystems, wobei der Laserstrahl des Messkopfes, der eine zusätzliche Geometrie-Scaneinheit besitzt, nacheinander auf 3 bekannte Punkte des Prüfobjektes gerichtet werden muss. Damit sind Position und Orientierung des sogenannten TOP-Messkopfes im Koordinatensystem des Messobjektes bekannt. Anschließend werden die Koordinaten von 4-7 Punkten des Messobjektes mit der Geometrie-Scaneinheit bestimmt und dann die beiden anderen Messköpfe (links und rechts) nacheinander auf diese Punkte ausgerichtet. Bei allen Messköpfen darf ein maximaler Scanwinkel von $\pm 20^\circ$ nicht überschritten werden.

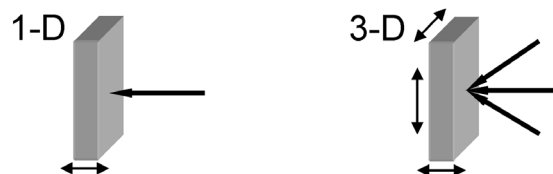


Abbildung 4.12: 1-D-Vibrometrie zur Messung der out-of-plane-Schwingung und 3-D-Vibrometrie zur Schwingungsmessung in drei Raumrichtungen an einem Punkt.

Die Darstellung der Messdaten erfolgt farbkodiert entsprechend der Amplitudenhöhe wie bei den 1-D-Daten.

5. Nachweis nichtlinearen Defektverhaltens

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, nichtlineares Defektverhalten zu analysieren und die resultierenden neuen Möglichkeiten zur Bauteilbewertung aufzuzeigen. Nach der theoretischen Erläuterung nichtlinearen Verhaltens (Kapitel 3) und der Einführung relevanter Messtechnik (Kapitel 4) erfolgt nun der messtechnische Nachweis nichtlinearen Defektverhaltens. Dazu wird eine Einteilung der nichtlinearen Phänomene in nicht-resonant, moduliert und resonant (selbst-moduliert) vorgenommen.

5.1. Nichtresonantes Defektverhalten (Höherharmonische)

Krohn [77] hat in seiner Dissertation die Entstehung von Höherharmonischen bereits auf die grundlegenden Mechanismen Klappern und Reiben zurückgeführt. Dieser Ansatz wurde in Kapitel 3.1 auf tangentiales und vertikales Klappern erweitert und die Antwortspektren der einzelnen Mechanismen neu entwickelt.

Die Antwortspektren der Höherharmonischen zeigen kein Schwellwertverhalten im Anfangsbereich, sondern eine proportional mit der Anregung steigende Antwortamplitude.

5.1.1. Spektraler Verlauf nichtlinearer Spektren

Bei realen Rissdefekten kann in der Regel eine Überlagerung verschiedener Grundmechanismen beobachtet werden. Aus dem dominierenden Spektralverlauf lassen sich trotzdem die ausschlaggebenden Entstehungsmechanismen dieser Frequenzgänge ableiten.

Abbildung 5.1 zeigt das Schwingungsspektrum einer homogenen Weichholzplatte bei einer Anregungsfrequenz von 20kHz. Die ungeradzahigen Harmonischen (60kHz, 100kHz, 140kHz, 180kHz) dominieren klar, von den geradzahigen sind lediglich die 2. und 4. Harmonische (40kHz und 80kHz) zu sehen, letztere nur noch schwach. Diese Dominanz der ungeradzahigen Harmonischen weist auf hysteretische Mechanismen hin (siehe Kapitel 3.1.3).

Im Gegensatz dazu enthält das Antwortspektrum im Bereich eines geschädigten Ast-Auges (Abbildung 5.2) sowohl gerade als auch ungerade Harmonische. Deshalb ist hier von Rissuferklappern mit vertikaler Bewegung der Rissufer auszugehen (siehe theoretische Ausführungen in Kapitel 3.1.1).

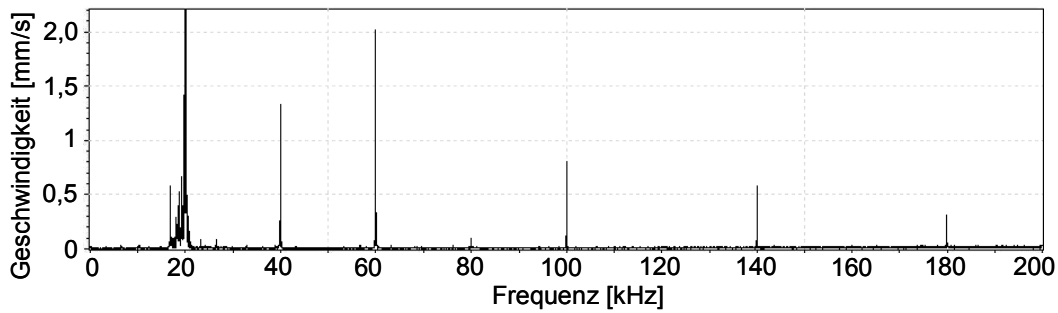


Abbildung 5.1: Typisches Schwingungsspektrum einer homogenen Weichholzplatte mit Dominanz ungerader Harmonischer der Anregungsfrequenz 20kHz [83].

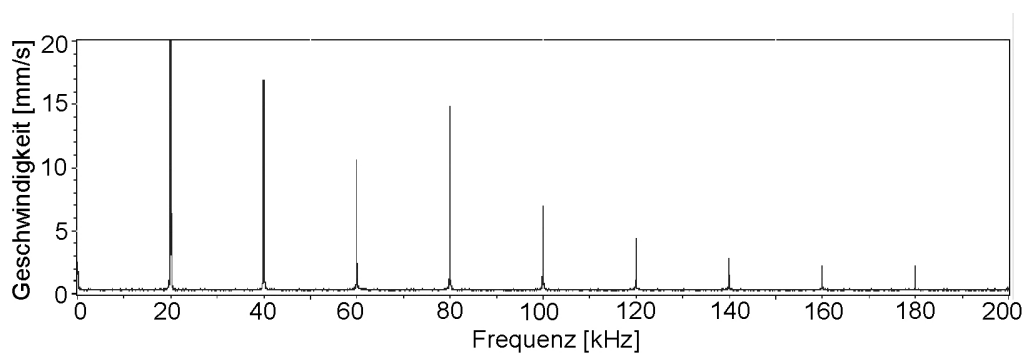


Abbildung 5.2: Typisches Schwingungsspektrum im Schädigungsbereich einer Holzplatte mit geraden und ungeraden Harmonischen der Anregungsfrequenz 20kHz [83].

Ein zentrales Kennzeichen von Nichtlinearität durch Rissuferinteraktion ist der Sinc-Verlauf der Einhüllenden des Spektrums. Abbildung 5.3 zeigt links ein typisches Spektrum mit Höherharmonischen im Bereich einer Delamination. Dabei handelt es sich um einen glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) mit integriertem Aktor, der mit 50kHz beaufschlagt wurde und deutlich den erläuterten Sinc-Verlauf der Einhüllenden zeigt.

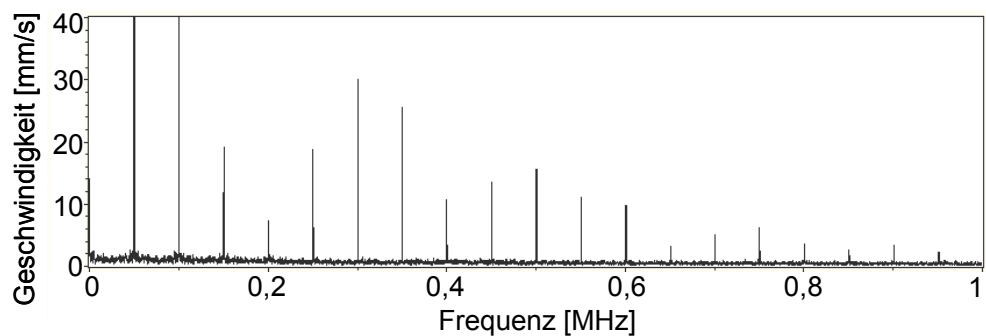


Abbildung 5.3: Gemessenes Spektrum in glasfaserverstärktem Kunststoff mit Delamination im Bereich eines eingebetteten Schwingungsgebers. Die Einhüllende der Harmonischen zeigt den erwarteten Sinc-Verlauf.

Entsprechend Kapitel 3.1 ist der Verlauf des Antwortspektrums hier so zu interpretieren, dass der zugrunde liegende Mechanismus Rissufer-Klappern bei vertikaler Relativbewegung ist.

5.1.2. Nichtlinearer laserangeregter Ultraschall

Bei verschiedenen Anwendungen, z. B. bei nassen oder klebrigen Prüfobjekten, ist eine berührungsfreie Anregung gefordert, die durch laserinduzierten Ultraschall verwirklicht werden kann [84]. Dabei kommt es durch modulierte Bestrahlung des Prüfobjekts und die absorptionsbedingte thermische Ausdehnung zu einer lokalen modulierten Volumenänderung, also der Aussendung einer elastischen Welle.

Auch mit dieser Anregungsart erzeugte akustische Wellen können an Defekten nichtlinear übertragen werden, so dass Höherharmonische im Antwortspektrum erscheinen. In Abbildung 5.4 werden ein defektnahes und ein defektfernes Antwortspektrum, aufgenommen mit einem Laser-Doppler-Interferometer, vorgestellt, wobei die zweite Harmonische der Anregungsfrequenz (7,9kHz) eine Lagenablösung in einer carbonfaser-verstärkten Kunststoffplatte (CFK) markiert.

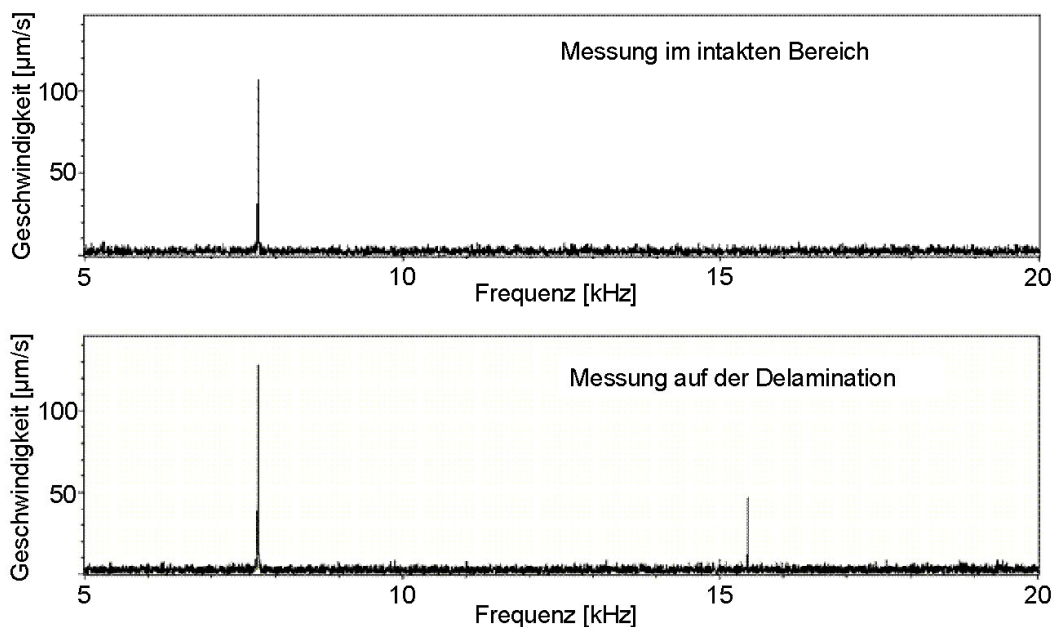


Abbildung 5.4: Zweite Höherharmonische im Defektbereich bei laserinduziertem Ultraschall [85].

5.2. Wellenmischen in Defektbereichen

Wie in Kapitel 3.2 theoretisch erläutert, kommt es an einer geschwächten Kontaktstelle (Defekt) bei Beaufschlagung mit zwei akustischen Wellen zu einem Mischen der Anregungsfrequenzen. Da die Mischfrequenzen durch die Nichtlinearität des Defektes entstehen, sind sie potentiell als Indikatoren und somit zur qualitativen zerstörungsfreien Bewertung von Bruchfehlern in Prüfkörpern geeignet.

5.2.1. Nachweis akustischer Modulation an einer Modellprobe

Im folgenden Versuch geht es um den Nachweis akustischer Modulation am Beispiel einer dünnen ($d \approx 1,15\text{mm}$) Platte aus Polystyrol (PS) mit zwei Löchern als definiertem Schaden. Die Anregung erfolgte zum einen mit Hilfe eines fokussieren Luftultraschall-senders und zum anderen mit einem mechanisch angekoppelten Schwingungsgeber (Shaker). Luftultraschallempfänger, die baugleich mit dem Sender sind, wurden auch zur Detektion eingesetzt. Sie erlauben dem Anwender aufgrund der Kontaktfreiheit eine große Flexibilität.

Als Beispiel für Modulationsfrequenzen ist in Abbildung 5.5 die Amplitude bei der Differenzfrequenz aus den beiden Anregungsfrequenzen $\nu_1 = 20\text{kHz}$ und $\nu_2 = 462\text{kHz}$ aufgetragen [86]. Die Differenzfrequenz ist im Spektrum enthalten, das man durch eine FFT des Zeitsignals erhält. Dem rechten Loch ($\varnothing 2\text{mm}$) ist ein dreimal höherer Amplitudenwert der Differenzfrequenz zugeordnet als dem linken Loch ($\varnothing 1\text{mm}$), weil rechts die Defektgröße dem Durchmesser des fokussierten Ultraschallstrahls (ca. 2mm) entspricht. Bei einer Verschiebung des Prüfkörpers wandert das rechte Loch sofort aus dem Ultraschallstrahl, während das kleinere Loch links erst später den Strahl verlässt.

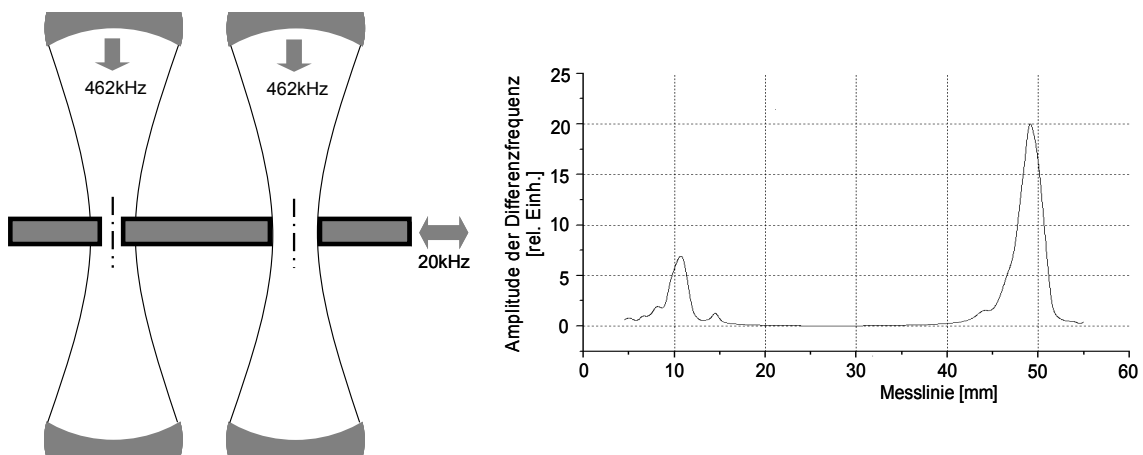


Abbildung 5.5: Verteilung einer Differenzfrequenz, die durch zwei Löcher erzeugt wird (Durchmesser links 1mm , rechts 2mm).

Das Beispiel mit zwei durchstrahlten und lateral schwingenden unterschiedlich großen Löchern zeigt anschaulich die Funktionsweise akustischer Modulation, die zum Auftreten von Summen- und Differenzfrequenzen führt. Die Modulationsstärke (verdeutlicht durch die Amplitude der Differenzfrequenz) hängt in diesem Fall von der Defektgröße (Loch) ab.

5.2.2. Senkrechte Durchschallung modulierter Bruchschäden

Als praxisrelevanter realistischer Schaden wurde in die PS-Probe, neben den Löchern, zusätzlich ein Impactschaden eingebracht. Die Anregungsfrequenzen bleiben 20kHz und 462kHz. Der Impact zeigt bei konfokaler, koaxialer Durchschallung zunächst lineares Verhalten (Abbildung 5.6). Steigt die niederfrequente Amplitude an, dann kommt es im zeitlichen Verlauf zu einer ausgeprägten Modulation. Bei weiterem Ansteigen der niederfrequenten Amplitude erreichen die Modulationsamplituden bis zu 100% der sinusförmigen Anregungsamplitude und führen zu einer pulsartigen Modulation (siehe Kapitel 3.2), die sich im Spektrum durch Mischfrequenzen zeigt.

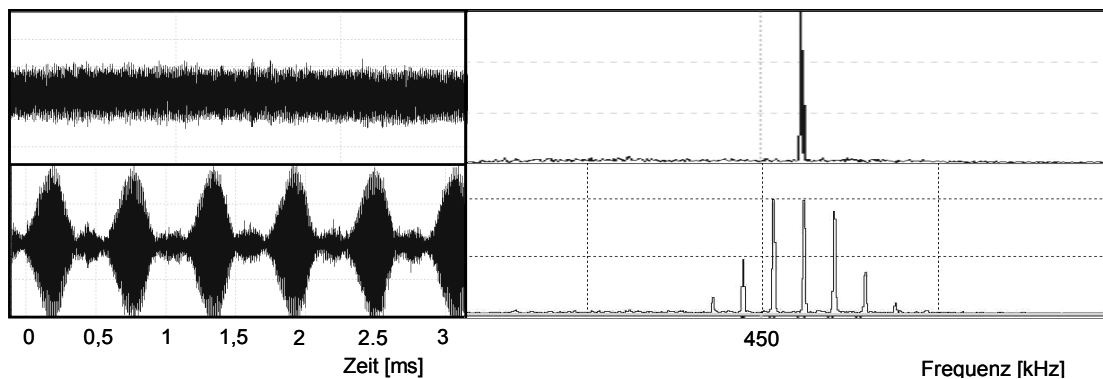


Abbildung 5.6: Näherungsweise lineares Zeitsignal (oben links) und dazugehöriges Spektrum (oben rechts) im Vergleich mit nichtlinear modulierter „klappernder“ Bruchstelle (unten) einer PS-Platte.

Die Form der Pulsmodulation ist unabhängig von Änderungen der hochfrequenten Anregungswelle. Dies ist eine weitere Bestätigung, dass die niederfrequenten Schwingungen bei dieser nichtlinearen Modulation eine dominierende Rolle spielen. Bei größeren niederfrequenten Amplituden zeigen die Spektren der übertragenen Schwingungen durch die Entstehung von immer mehr Seitenbändern einen bedeutenden Anstieg der nichtlinearen Modulationsstärke (Abbildung 5.6, rechter Teil).

5.2.3. Mechanisch modulierte Delaminationen

Durch die sehr effiziente mechanische Einkopplung von zwei Anregungswellen können nichtlineare Modulationseffekte beobachtet werden. Das Beispiel in Abbildung 5.7 zeigt das Antwortspektrum der adaptiven Struktur aus Abbildung 5.3, hier allerdings mit zwei Frequenzen beaufschlagt. Dazu wurde der interne Aktor mit $\nu_2 = 388\text{kHz}$ betrieben und ein externer Hochleistungs-Piezostack (siehe Kapitel 4.1.1) mit $\nu_1 = 15\text{kHz}$ appliziert. Entsprechend Kapitel 3.2.1 liegen die Anregungsfrequenzen sehr weit auseinander, und die tieffrequente Pumpwelle weist eine vielfach höhere Amplitude auf. Um die hochfrequente Anregungskomponente (ν_2) bildet sich im Abstand der Pumpfrequenz (ν_1) und Vielfacher ein Modulationsspektrum aus, das einen Sinc-Verlauf der Einhüllenden zeigt.

Zusätzlich sind Höherharmonische der nichtlinear agierenden Pumpfrequenz enthalten, die sich bei ca. 300kHz mit den Mischfrequenzen „treffen“.

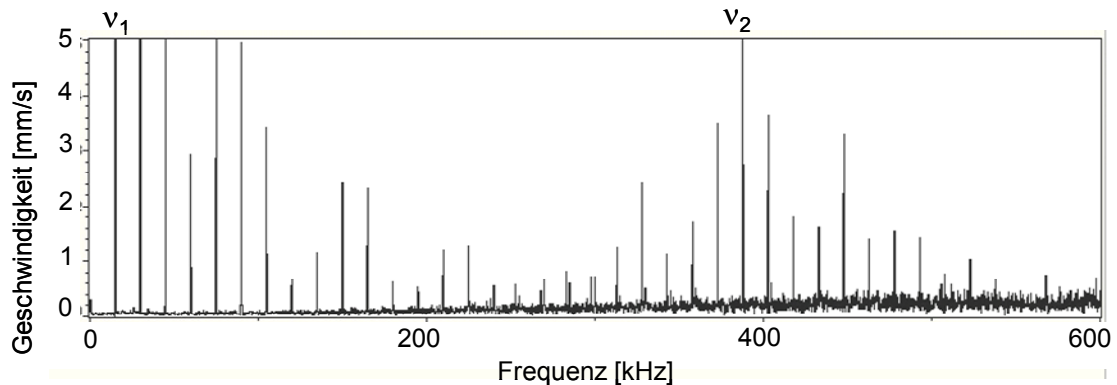


Abbildung 5.7: Nichtlineare Modulation der Anregungsfrequenzen $v_1=15\text{kHz}$ und $v_2=388\text{kHz}$ an einer adaptiven Struktur mit Delamination im Aktorbereich.

Wie in Kapitel 3.2.2 erläutert, zeigt die nichtlineare Modulation bei entsprechender Anregungsintensität und eng beieinander liegenden Anregungsfrequenzen eine zunehmende Anzahl nichtlinearer Kombinationsmöglichkeiten. Dies wurde an einem Motorengehäuse mit inneren Haftungsschäden von Legierungsschichten nachgewiesen (Abbildung 5.8). Das partielle Abschneiden der Amplitude, wie im Zeitsignal zu sehen, ist für eine „klappernde“ Nichtlinearität typisch und erzeugt die Kombinationsfrequenzen höherer Ordnung (siehe auch Höherharmonische).

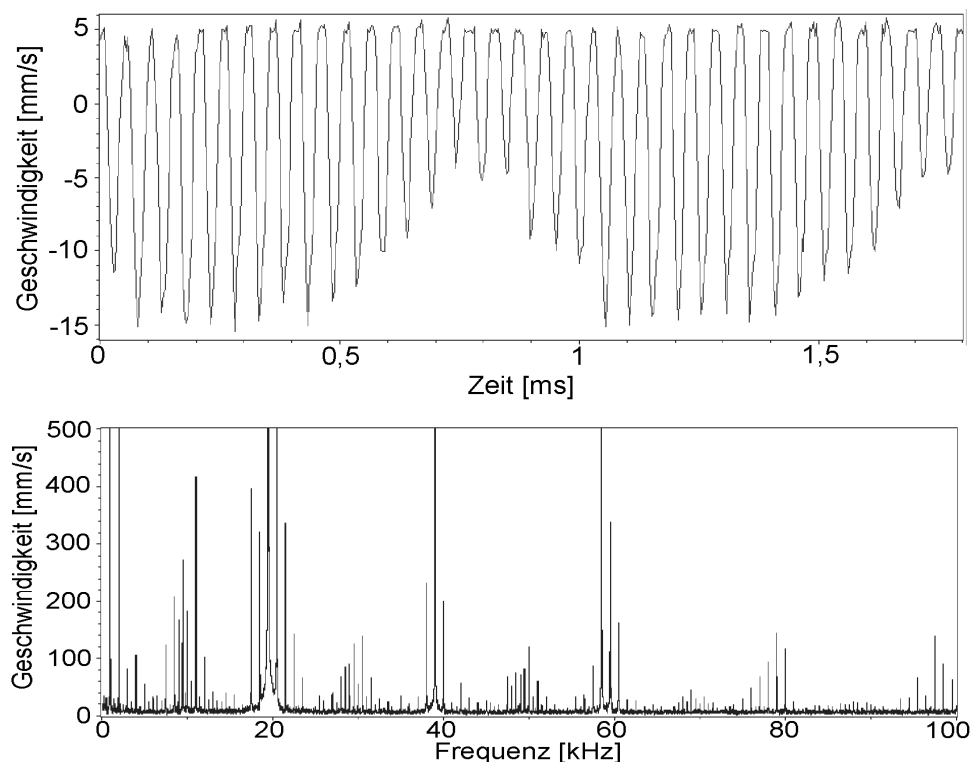


Abbildung 5.8: Nichtlineare Modulation an einem Motorengehäuse mit Haftungsschäden (Anregungsfrequenzen $v_1=19,5\text{kHz}$ und $v_2=20,5\text{kHz}$).

Die Stärke der nichtlinearen Modulation entwickelt sich in Abhängigkeit von der Anregungsleistung. Um dies zu belegen wurde eine textile Faserverbundwerkstoffplatte, die interne Delaminationsschäden aufweist, mit zwei Piezoschwingungsgebern (15kHz und 20kHz) beaufschlagt. Die im Defektbereich gemessenen Modulationsspektren mit den zugrunde liegenden Zeitsignalverläufen sind in Abbildung 5.9 aufgetragen. Bei Erhöhung der Anregungsleistung zeigt sich eine Halbierung der Abstände der Mischfrequenzen zueinander. Diese zunehmende nichtlineare Modulationsstärke entspricht den theoretischen Erwartungen (siehe Kapitel 3.2). Die angegebenen Anregungsamplituden wurden jeweils bei beiden Schallwandlern eingestellt.

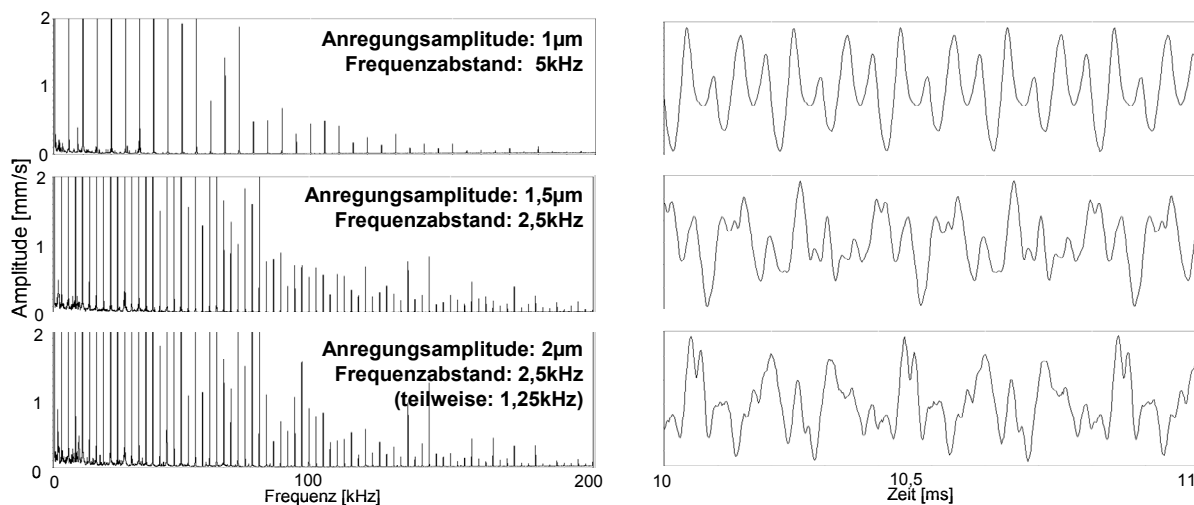


Abbildung 5.9: Zeitsignal (links) und Frequenzverlauf (rechts) bei Anregung von textilen Kunststoffplatten mit simulierten internen Delaminationsschäden.

Das Beispiel zeigt die charakteristische Amplitudenabhängigkeit der Mischfrequenzen. Des Weiteren besitzen die Mischfrequenzen selten Einfluss auf andere nichtlineare Effekte wie Subharmonische. Wie sich während der Untersuchungen für die vorliegende Abhandlung herausstellte, sind Seitenbänder neben Höherharmonischen das am häufigsten anzutreffende nichtlineare Phänomen.

5.3. Resonantes Defektverhalten

5.3.1. Defektresonanzen

Zum Nachweis nichtlinearer Resonanz wurden Frequenzscans einer faserverstärkten Keramikplatte (WhipoxTM [87]) erstellt, die einen Bereich mit Mikroschädigung enthält. Um diesen Schaden zu erzeugen, wurden in das Bauteil vier Löcher eingestanz. Eine Bauteilresonanz in Form einer Biegeschwingung konnte bei 1,35kHz detektiert werden, während der Schädigungsbereich eine unabhängige Resonanz bei 81kHz aufweist (siehe

Abbildung 5.10). Somit ist der Unterschied zwischen Bauteil- und Defektresonanz messtechnisch nachweisbar.

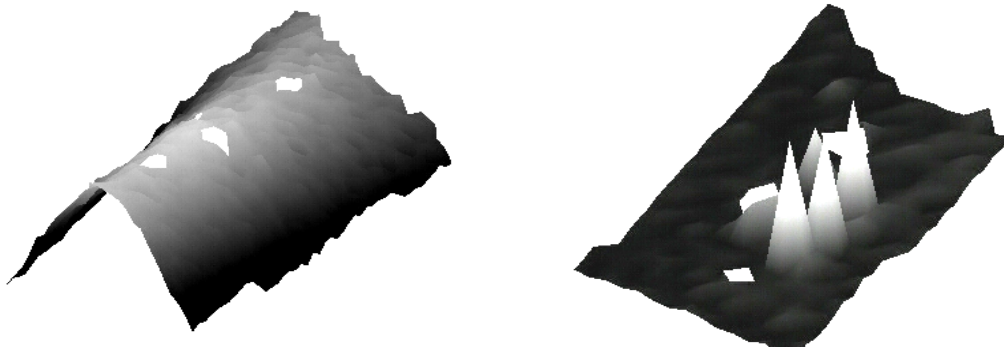


Abbildung 5.10: Schwingungsamplituden einer faserverstärkten Keramikplatte. Links: Bauteilresonanz bei 1,35kHz. Rechts: Defektresonanz [81kHz] im Bereich mit Strukturbrüchen.

5.3.2. Frequenzverschiebung der Resonanz

In Kapitel 3.3 wurde nichtlineares resonantes Defektverhalten theoretisch erläutert und dabei eine amplitudenabhängige Frequenzverschiebung der Resonanz eines defekten Bauteils vorhergesagt. Bei Rissen muss es durch eine Reduzierung der Materialsteifigkeit zu einer Absenkung der Resonanz kommen.

Der Nachweis einer nichtlinearen Resonanz erfolgte anhand von baugleichen Proben aus CFK, wobei eine durch einen frontseitigen Impact eine ausgeprägte Schadenstelle auf der Rückseite besitzt, an der Delaminationen, Faserbrüche und Risse auftreten. Abbildung 5.11 (links) zeigt den linearen Fall einer intakten Probe, bei dem keine Resonanzverschiebung auftritt. Die Amplitudenantwort ist farbig markiert und in Abhängigkeit von Anregungsspannung und Frequenz aufgetragen, wobei die Resonanz 15,15kHz ist. Die gezeigte Frequenzverschiebung der geschädigten Probe (Abbildung 5.11, rechts) um 700Hz entspricht 2-3% Änderung der Frequenz und wurde mit einer Auflösung von 10Hz bei Erhöhung der Anregungsamplitude von 5 auf 50V ermittelt. Normiert man die gemessene Schnelle auf die Anregungsspannung, um Überhöhungen der Bauteilantwort bei hohen Anregungsspannungen auszugleichen, so erhält man als Übertragungsfunktion die Schnellerate. Die Frequenzverschiebung lässt sich auf eine geringere durchschnittliche Steifigkeit durch die Schädigung der Probe zurückführen.

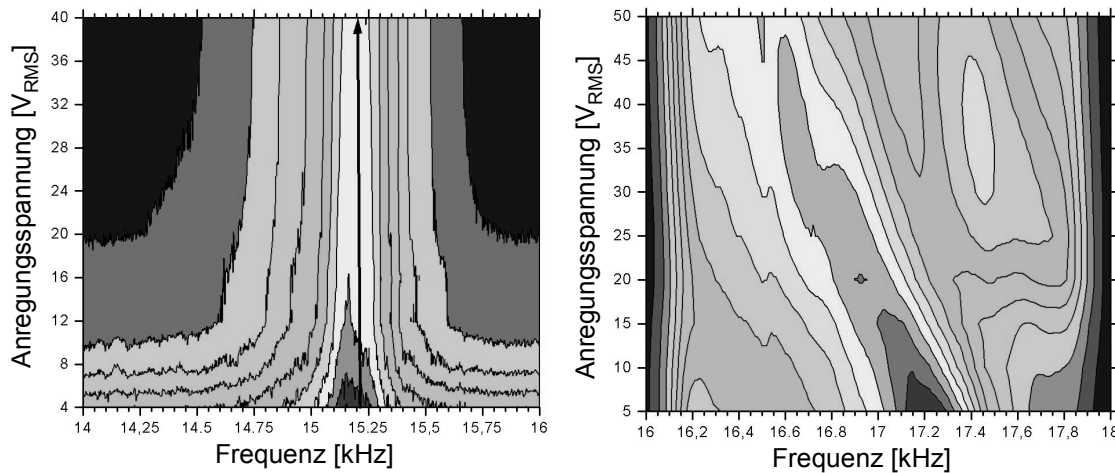


Abbildung 5.11: Resonanzverschiebung beim Frequenzsweep einer CFK-Probe mit Schädigung, farbodierte Darstellung der Schnellerate (Amplitude) über Frequenz und Anregungsspannung; Links: Intakte Probe. Rechts: Geschädigt.

Die Verschiebung der Resonanzfrequenz ist ein Indikator dafür, dass die Anregungsamplitude groß genug ist, um instabiles Verhalten zu verursachen (entsprechend Abbildung 3.18). In diesem Bereich der Anregungsamplitude ist das Auftreten der Subharmonischen schwellwertabhängig.

5.3.3. Frequenzabhängige Defektmerkmale

Nimmt man wie in Kapitel 3.3 dargestellt an, dass der Defektbereich in mehreren Resonanzmoden schwingen kann (z. B. Eigenfrequenzen $n\omega_1$ und $m\omega_2$), dann ist ein frequenzabhängiges Auftreten und Verschwinden nichtlinearer Resonanzphänomene zu erwarten.

In Abbildung 5.12 ist die typische Frequenzantwort eines Prüflings mit einem nichtlinearen Kontaktfehler dargestellt, der in einem Leistungsbereich oberhalb des Schwellwertes zur Entstehung von Subharmonischen angeregt wird. Dabei handelt es sich um eine ca. 1mm dicke Polystyrolplatte (CD-Hülle) mit einem Riss. Bei sinkender Anregungsfrequenz ν_0 erscheinen im gemessenen Spektrum zwei Mal Subharmonische der Anregung. Entsprechend den theoretischen Ausführungen sind dabei die Subharmonischen identisch mit den Eigenschwingungen des Defektbereichs ($\nu_0 = 2 \omega$). Die Eigenfrequenzen sind hier $\omega_1 \approx 1,1kHz$ und $\omega_2 \approx 0,9kHz$.

Wenn die Anregung ca. 2kHz ist, werden beide Resonanzmoden angeregt. Dadurch entstehen dann Frequenzpaare, die das Antwortspektrum dominieren (Abbildung 5.12 b).

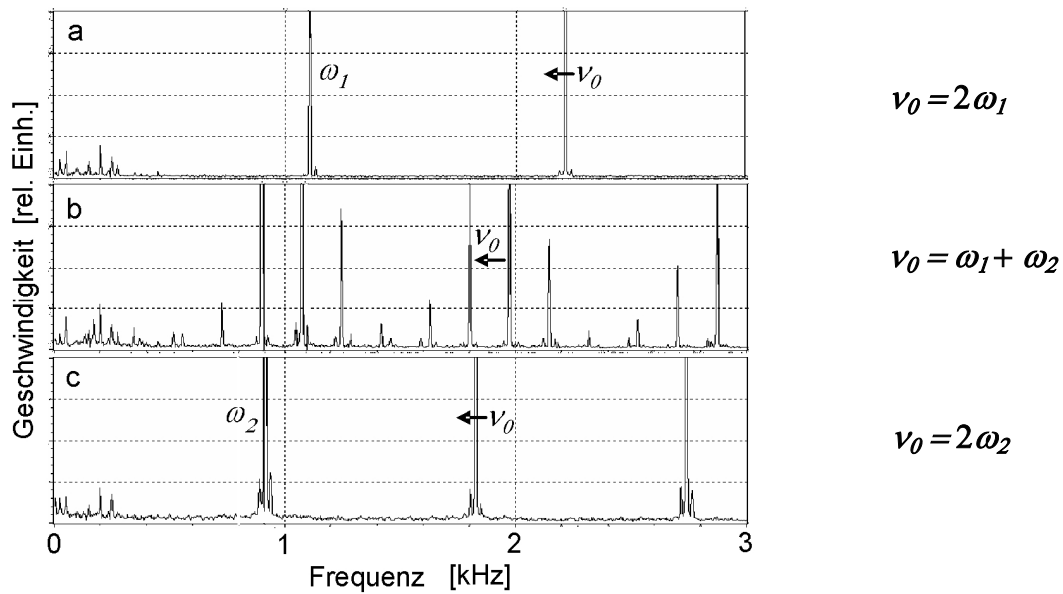


Abbildung 5.12: Frequenzabhängigkeit beim Übergang Subharmonische - Frequenzpaar - Subharmonische [58].

Abbildung 5.13 zeigt die Frequenzpaare im Spektrum nichtlinearer Schwingungen bei einem Glasfaser-Laminat (14 Lagen) auf Epoxydharz-Basis mit Impactschaden (9,5J). Mechanisches Impacten eines mehrlagigen Verbundwerkstoffes verursacht einen Schaden, der eine Mischung aus Faser-Matrix-Enthftung, Brüchen und Delaminationen darstellt. Durch dieses Zustandsprofil wird deutlich, dass die Bauteilantwort im Defektbereich stark nichtlinear sein muss und alle nichtlinearen Moden zur ZfP nutzbar sein müssten.

Vergleichbar mit dem vorigen Experiment ersetzt bei ausreichender akustischer Anregungsleistung das Frequenzpaar die Subharmonischen nahezu vollständig. Der Frequenzabstand einer Frequenzpaarkomponente zur Höherharmonischen beträgt $\Delta = 1,2 \text{ kHz}$. Entsprechend den theoretischen Erläuterungen (siehe Kapitel 3.3.2) findet sich dieser Abstand auch bei den Frequenzpaarkomponenten um die Subharmonischen wieder, wie erwartet allerdings als absoluter Abstand der Komponenten (Abbildung 5.13).

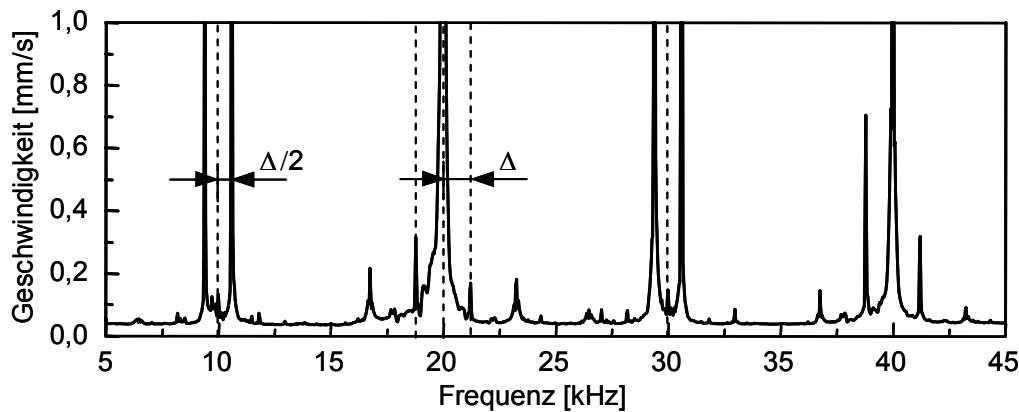


Abbildung 5.13: Spektrum der Selbst-Modulation bei einem Prüfobjekt aus glasfaserverstärktem Laminat (Epoxydharzmatrix) mit Impact-Schaden. Anregungsfrequenz 20 kHz.

5.3.4. Abstand zwischen den Seitenbändern eines Frequenzpaares

Das Auftreten von Frequenzpaaren wurde durch die Annahme erklärt, dass der Defektbereich sich wie ein nichtlinearer Oszillator verhält (Kapitel 3.3.2). Entsprechend Abbildung 3.18 hängt die Resonanzfrequenz unter der Annahme nichtlinearer Oszillatoren von der Anregungsamplitude ab. Damit muss sich auch der Abstand zwischen den Komponenten eines Frequenzpaares, beispielsweise 2Δ um Höherharmonische, mit der Anregungsamplitude ändern.

Dieses Verhalten ist in Abbildung 5.14 am Beispiel einer Faserkaramik (C/C-SiC) mit Delaminationsschaden dargestellt, wobei der Frequenzabstand 2Δ über der akustischen Leistung aufgetragen wurde. Es tritt Hysterese auf, die auf bistabiles Verhalten der „Selbst-Modulationsfrequenz“ 2Δ zurückzuführen sind. Dies ist eine charakteristische Eigenschaft nichtlinearer Resonanzphänomene [57].

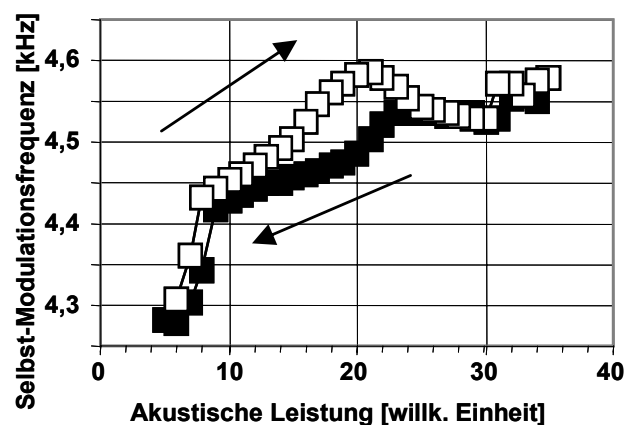


Abbildung 5.14: Frequenz der Selbstmodulation (2Δ) als Funktion der eingekoppelten akustischen Leistung. Die Pfeile zeigen die Richtung der Leistungsvariation.

5.3.5. Amplitudenabhängige Defektmerkmale

Das Auftreten nichtlinearer resonanter Frequenzphänomene ist durch Schwellwerte bestimmt. Dabei kommt es nicht nur zu einer Frequenzabhängigkeit (siehe Kapitel 5.3.3), sondern auch die Anregungsamplitude und damit die Anregungsleistung bestimmen das Schwingungsverhalten.

Die dynamischen Eigenschaften des klappernden nichtlinearen Oszillators (delaminierter Bereich in einer C/C-SiC-Platte) zeigen das schwellwertabhängige Entstehen der nichtlinearen Phänomene (Abbildung 5.15 a-c). So geht eine resonante Subharmonische (a) bei Erreichen des ersten Amplitudenschwellwertes in ein Frequenzpaar (b) über ($\Delta \approx 4,2\text{kHz}$). Ein weiteres Erhöhen der Anregungsamplitude initiiert ein Anschwellen des Hintergrundrauschens in Form rauschartiger Frequenzbänder, die ebenfalls symmetrisch zur ursprünglichen Subharmonischen liegen (c).

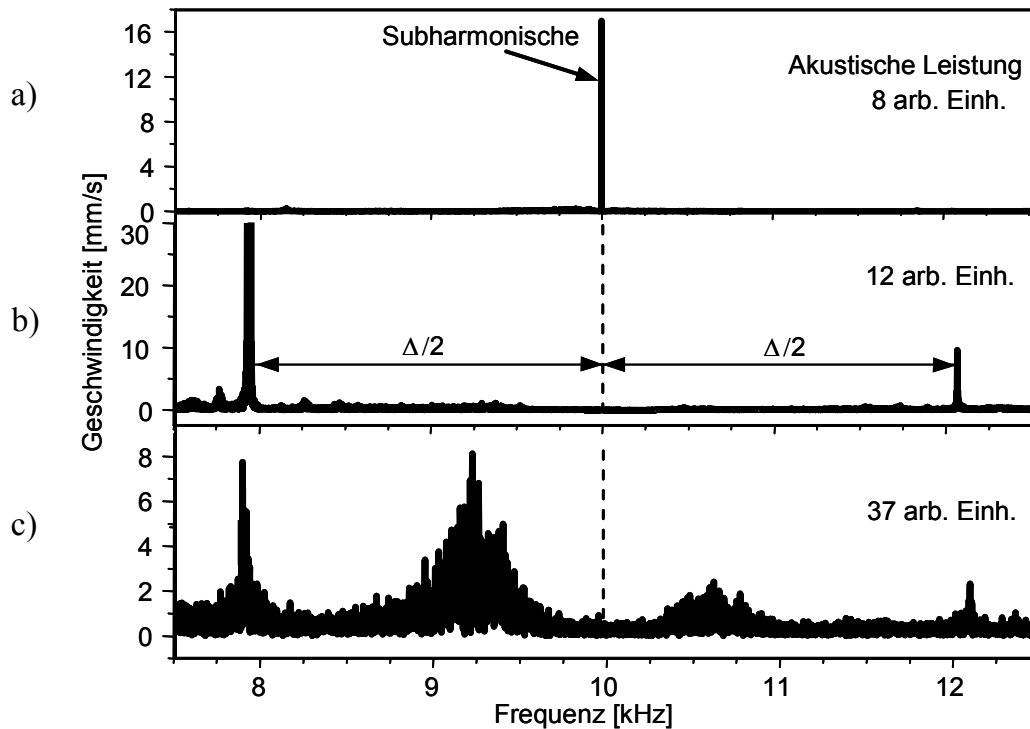


Abbildung 5.15: Entwicklung des Auftretens Subharmonischer über Frequenzpaare bis hin zu chaotischen Amplitudenverteilungen im delaminierten Bereich einer C/C-SiC-Keramikprobe. Anregungsfrequenz 20kHz.

Die Entwicklung von Subharmonischen über Frequenzpaare (Selbst-Modulation) zu dynamischem Chaos (Rauschen ähnliche Frequenzbänder) lässt sich mit dem parametrischen Ansatz für nichtlineare Resonanzen (siehe Kapitel 3.3.2) erklären.

5.3.6. Chaotisches Verhalten

Unter chaotischem Verhalten ist hier eine dem Rauschen ähnliche Frequenzantwort zu verstehen, die für hohe Anregungsleistung bei nichtlinearer Resonanz zu erwarten ist

(siehe Kapitel 3.3). Dabei nimmt mit steigender Anregung die Anzahl möglicher Lösungen exponentiell zu, und die Anregungsenergie wird auf immer mehr Frequenzen verteilt.

Das Erfassen der Spektren bereitet mehrere Probleme. Um überhaupt chaotisches Verhalten zu beobachten, muss eine lokal sehr hohe Anregung vorhanden sein. Dies kann beispielsweise durch Stehwellen geschehen. Somit wäre eine resonante Anregung des Bauteils von Vorteil. Von Nachteil ist, dass durch diese Anregung schnell der Bereich der Zerstörung oder fortschreitender Schädigung erreicht werden kann.

Auch die Detektion chaotischen Verhaltens bereitet Schwierigkeiten, weil bei diesem Verhalten wiederholte Messungen nie übereinstimmende Ergebnisse liefern. Das Durchführen von Mittelungen bei der Laser-Interferometrie ist hier nicht zielführend. Durch die spektrale Verteilung der Schwingungsenergie kommt es außerdem zu relativ niedrigen Amplituden. Bei lokal chaotischem Verhalten ist die Energie der Schwingung auf viele Frequenzbänder verteilt, so dass die Amplituden der einzelnen Frequenzbänder sehr niedrig sind. Eine Erkennung nichtlinearer Quellen mit derart niedrigen Amplituden aus tieferen Schichten ist wegen der Dämpfungseigenschaften der Prüfmaterialien in der Regel nicht möglich.

Vollständig chaotisches Verhalten einer Probe konnte nicht beobachtet werden, lediglich der Übergang dazu. Dabei bildeten sich um die Frequenzpaare bzw. Subharmonischen, deren Amplitude dabei stark abnahm, "Hügel" aus. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass die entstehenden Frequenzen der noch nicht chaotisch schwingenden Umgebung die Frequenzbereiche des chaotischen Verhaltens prägen.

Als Beispiel wird eine Ein-Punkt-Messung an einer C/C-SiC-Probe mit einer großflächigen Delamination aufgeführt (Abbildung 5.16). Die bei abnehmender Anregung aufgenommenen Spektren zeigen das Verschwinden der sich chaotisch verhaltenden Frequenzbereiche ab $3,4\mu\text{m}$ Anregungsamplitude (Frequenz 20kHz) bei gleichzeitig sprunghaftem Erscheinen des Frequenzpaares 7,9kHz und 12,1kHz. Bei $3,3\mu\text{m}$ Anregung sind zusätzliche Frequenzpaare ($\Delta = 392\text{Hz}$) vorhanden.

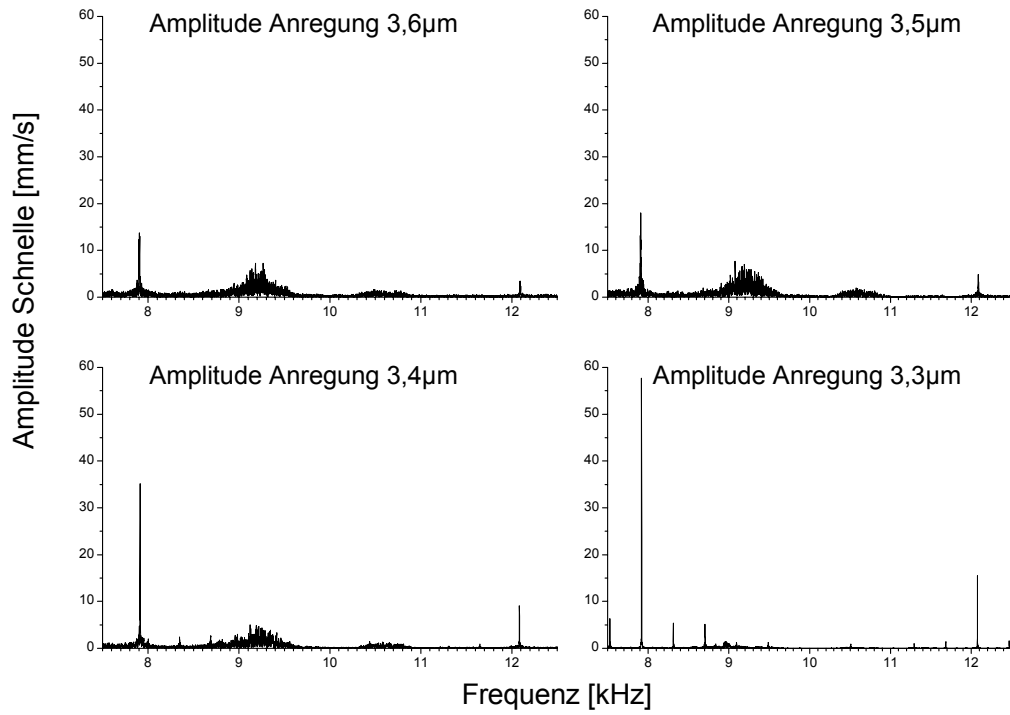


Abbildung 5.16: Chaotisches Verhalten am Beispiel einer Delamination in einer C/C-SiC-Platte.

6. Ausnutzung nichtlinearer Phänomene zur defektselektiven ZfP

Wie in Kapitel 3 erläutert, sind neben den Höherharmonischen weitere nichtlineare Frequenzphänomene potenziell als Defektindikatoren geeignet. Es erfolgte eine Einteilung in nicht-resonante Defektphänomene, die im Spektrum durch die Frequenzkonversionen zu Höherharmonischen und Mischfrequenzen auffallen, und resonante Defektphänomene als Ursache für Subharmonische, instabiles Verhalten, Frequenzpaare, etc.. Auf Grundlage dieser Ordnungsstruktur werden nun anhand verschiedener Anwendungsbeispiele die nichtlinearen Frequenzkonversionen als Defektindikatoren untersucht, besonders im Hinblick auf die bildgebende ZfP.

Eine Übersicht der untersuchten Defektindikatoren gibt Abbildung 6.1.

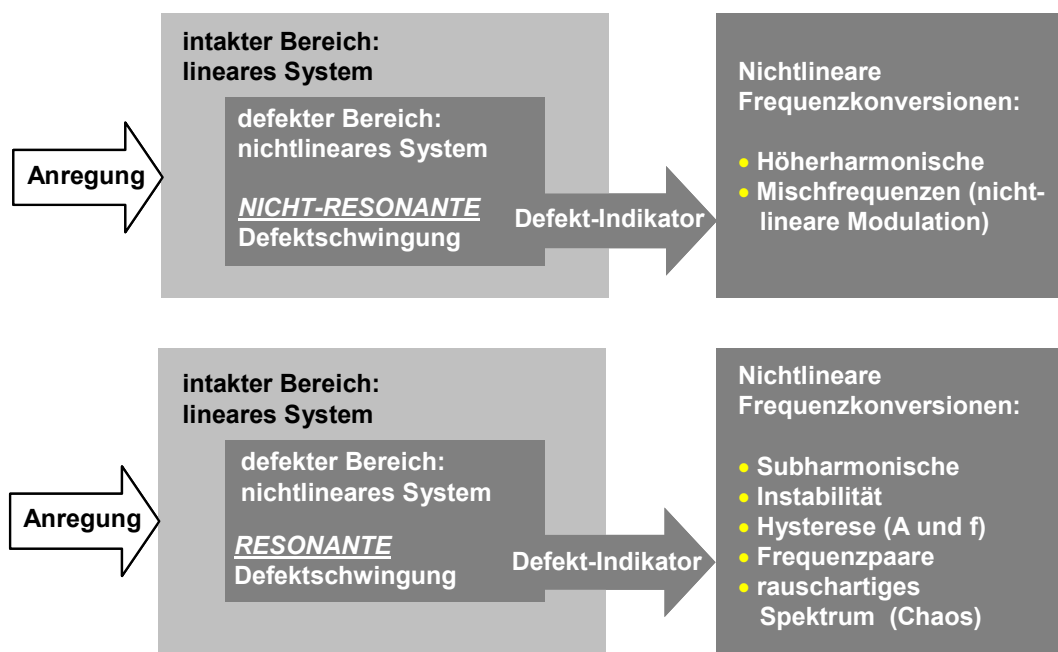


Abbildung 6.1: Zusammenstellung der Defektindikatoren (Frequenzkonversionen), die auf nicht-klassischen nichtlinearen Frequenzphänomenen basieren.

6.1. Nichtlineare nichtresonante Vibrometrie

6.1.1. Höherharmonische durch Klappern und Reiben

Die folgenden Beispiele verdeutlichen die Anwendungsmöglichkeiten des Defektmerkmals Höherharmonische zur Bewertung verschiedener Materialien. Nichtlineares Schwingungsverhalten kann mit Hilfe der in Kapitel 4.3.2 beschriebenen laseroptischen Messinstrumente aufgezeichnet werden. Die Scaneinrichtung hilft, die gesamte „out-of-plane“-Komponente der Bauteilschwingung zu erfassen (Abbildung 6.2).

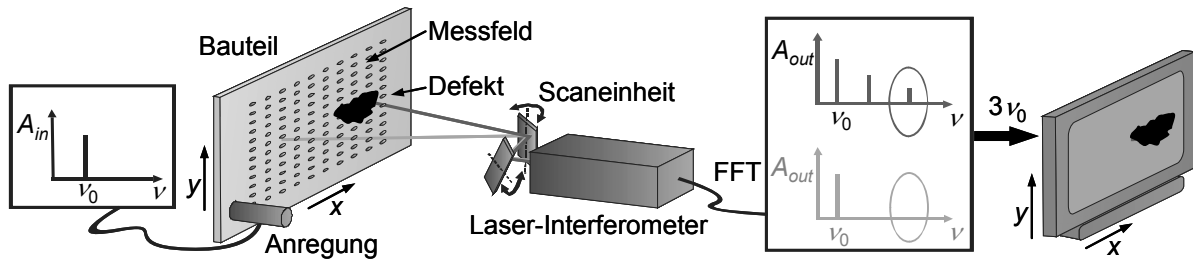
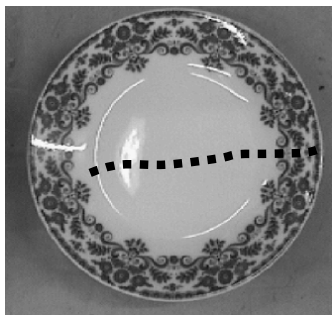


Abbildung 6.2: Prinzipschaubild für die Obertonvibrometrie (Höherharmonische, hier $3v_0$, als Defektmerkmal zur Detektion lokaler nichtlinearer Defekte).

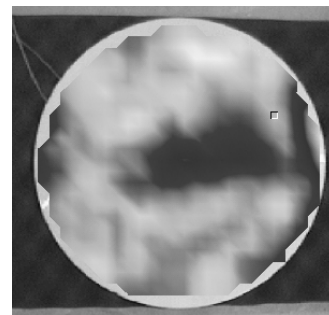
Prüfobjekt Porzellanteller mit Anriss

Keramische Werkstoffe finden im technischen Bereich viele Anwendungen, dabei ist die Erkennung von Rissen wichtig. Als Modellfall dient hier ein Anriss in einem Porzellanteller. Porzellan besteht aus den drei Bestandteilen Kaolin, Feldspat und Quarz, und es wird bei hoher Temperatur und reduzierter Atmosphäre gebrannt. Eigenschaften von Porzellan sind große Härte, Säure- und Laugenbeständigkeit (Ausnahme Flusssäure), durchscheinend, elektrisch isolierend, außerdem ist es ein schlechter Wärmeleiter.

Durch den Anriss im Keramikteller ist die Amplitudenantwort des Tellers stark gedämpft. Außerdem treten durch den Anriss Höherharmonische der nichtresonanten Anregung auf, die die Lage des Bruches verraten (Abbildung 6.3). Die Anregung erfolgte in diesem Beispiel mit aufgeklebten Piezoaktoren bei einer Frequenz von 1kHz.



Markierter Anriss auf Porzellanteller



2. Harmonische (2kHz)

Abbildung 6.3: Detektion eines Porzellanrisses, Anregung durch aufgeklebte Piezoelemente auf der Tellerunterseite (1kHz).

Prüfobjekt carbonfaserverstärkter Kunststoff mit Impactschaden

Als Konstruktionswerkstoff für den Luft- und Raumfahrtbereich ist carbonfaserverstärkter Kunststoff (CFK) heute nicht mehr wegzudenken. Als Matrix zwischen den Fasern kommen in der Regel Polyester- oder Epoxydharze zum Einsatz. Im Vergleich zu glasfaserverstärkten Kunststoffen besitzt das teurere CFK eine höhere Zugfestigkeit. Gegenüber Aluminium, dem klassischen Leichtbauwerkstoff, führen die geringe Dichte (CFK:

11kg/cm²) und die hohe Festigkeit von CFK zu einer Gewichtsersparnis von bis zu 30% bei vergleichbarer Festigkeit. Daher planen die Flugzeughersteller Boeing und Airbus, den CFK-Anteil in ihren Flugzeugen von derzeit ca. 20% auf 50% zu steigern, ein Ziel, das die neue Boeing 787 bereits erreicht [88]. Impact-Schäden sind bei diesem Material ein ernstes Problem, da der plastische Verformungsbereich im Gegensatz zu Metallen sehr gering ist und damit die Klassifizierung eines potenziellen Schadens schwierig wird. Abbildung 6.4 zeigt einen solchen Impact-Schaden, der in den Höherharmonischen deutlich kontrastiert, während bei der Anregungsfrequenz (20kHz) Stehwelleneffekte und eine Flutung der gesamten Struktur sichtbar ist. Die teiltransparenten Darstellungen zeigen ein Messfeld von der Größe 35 x 90mm auf dem 2,5mm dicken Probekörper.

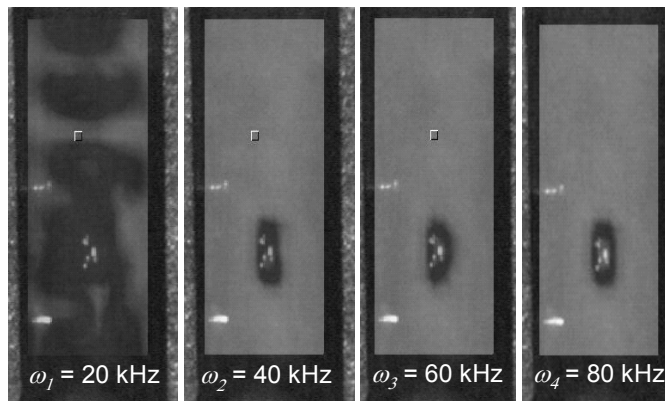


Abbildung 6.4: Impactschaden in einem dünnen (2,5mm) CFK-Streifen.

Langfaserverstärkte Kunststoffe besitzen einen mehrschichtigen Lagenaufbau („Laminat“). Bei einem Impact ist meistens der Schaden auf der Einschlagseite kaum zu detektieren, er setzt sich allerdings konusförmig in die Tiefe fort, wobei der Schädigungsgrad durch Schubversagen mit der Tiefe deutlich zunimmt (Abbildung 6.5).

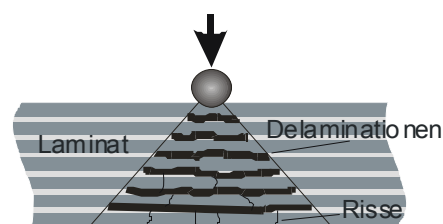


Abbildung 6.5: Typischer Aufbau eines Impactschadens in Laminaten [77].

Die Stärke der Schädigung ist von entscheidender Bedeutung, da von ihr die weitere Verwendbarkeit des Bauteils abhängt. In Abbildung 6.6 ist die Geschwindigkeitsverteilung der 2. Harmonischen sowohl auf der Einschlagseite (links) als auch auf der Rückseite (rechts) dargestellt. Bei 4J Impactenergie zeigt der Prüfkörper nur ein Rauschen mit geringer Amplitude, wobei die Struktur schwacher Stehwellen erkennbar ist. Ab 16J Impactenergie ist der Defekt von beiden Seiten detektierbar. Dabei zeigt die wesentlich

stärker geschädigte Rückseite auch die Orientierung der Enthftung, erwartungsgemäß entlang der Faserrichtung, in der unteren Lage ist dies 45° .

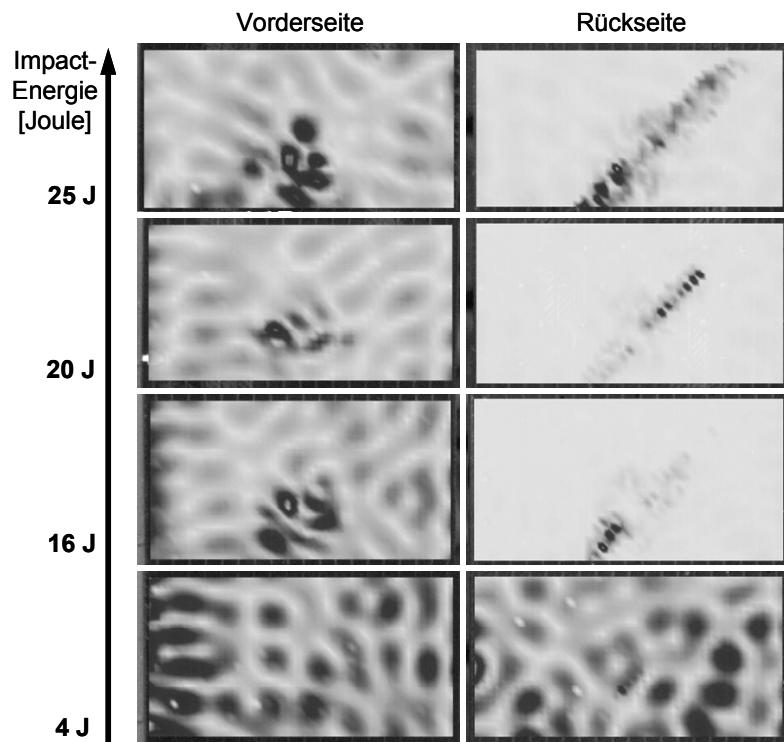


Abbildung 6.6: Darstellung verschiedener Impactstärken in CFK von Einschlagseite (links) und Rückseite (rechts). Bildgebende Größe ist die Geschwindigkeit der 2. Höherharmonischen.

Prüfobjekt vierlagige CFK-Platte: Tatsächliche und scheinbare Defektgröße

Ein weiteres Beispiel dafür, wie Höherharmonische Defekte markieren, wird in Abbildung 6.7 an einer 4-lagigen CFK-Struktur (150x200x2mm) gezeigt, die Impact-Schäden in der Bildmitte und zusätzlich einige Randdelaminationen aufweist. Die Amplitudenverteilung der 10. Harmonischen zeigt alle Defekte, allerdings nehmen Kontraststärke und scheinbare Größe der Defekte mit der Anregungsamplitude zu.

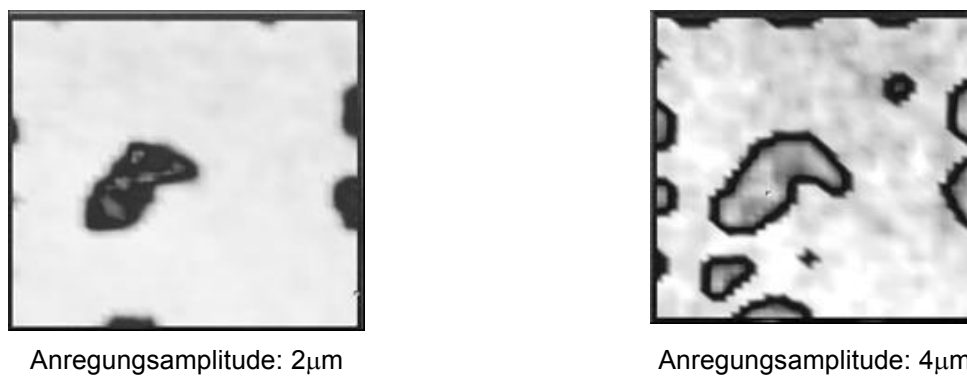


Abbildung 6.7: Zentraler Impact und Randdelaminationen in einer CFK-Struktur. Amplituden der Geschwindigkeit bei der 10. Harmonischen der Anregungsfrequenz ($v_0=20\text{kHz}$) bei zwei Anregungsamplituden (links $2\mu\text{m}$, rechts $4\mu\text{m}$).

Prüfobjekt Faserwerkstoff Holz mit inhomogener Elastizität

Im typischen Spektrum der Bauteilantwort einer ast- und rissfreien Weichholzprobe (Fichte, Abbildung 5.1), einem Werkstoff, der bis zur Entwicklung verstärkter Kunststoffe z. B. im Segelflugzeugbau seinen Einsatz fand, konnte aufgrund der klaren Dominanz der ungeraden Harmonischen Reibung als dominierender nichtlinearer Mechanismus nachgewiesen werden [83] (Kapitel 5.1.1). Durch den inhomogenen Jahresringaufbau des Holzes gibt es einen detektierbaren Unterschied in der lateralen Verteilung der Nichtlinearität. Das Maximum der Nichtlinearität erscheint im “weichsten“ Bereich eines Jahresringes. Abbildung 6.8 zeigt die dritte Harmonische (LR-Ebene: L längs des Jahresringes, R senkrecht zum Jahresring [89]) am Beispiel einer Fichtenholzplatte. Man sieht die wellenartige Verteilung der Nichtlinearität in radialer Richtung mit Maxima im frühen Holz, direkt an Übergängen zum späten Holz. Die lokale nichtlineare Materialantwort zeigt somit den kritischen Jahresringteil, der mit seinen dünnwandigen Zellwänden im Frühjahr wächst.



Abbildung 6.8: Scanfeldposition auf dem Fichtenstammquerschnitt (links) und dreidimensionale Darstellung der dritten Harmonischen in der LR-Ebene (rechts) [83].

6.1.2. In-plane-Komponenten von Höherharmonischen

Ein scannendes 1-D Laser-Doppler-Vibrometer, wie bei den Messungen oben verwendet, erfasst nur die Schwingungskomponente in Laserstrahlrichtung (“out-of-plane“-Komponente der Bauteilantwort). Modenkonzersionen im komplexen Wellenfeld führen aber zu einer mehrdimensionalen Antwortschwingung, die nicht auf die out-of-plane-Komponente beschränkt bleibt.

Wie nichtlinear die Prüfwelle übertragen wird, muss zudem von der Orientierung der Rissufer und von der Einkoppelungsrichtung der elastischen Prüfwelle abhängen. Zur Überprüfung dieser Überlegungen kam mit freundlicher Unterstützung der Firma Polytec ein 3-D-Vibrometer zum Einsatz, das mit drei synchronisierten Scanköpfen arbeitet (siehe Kapitel 4.3.2).

Prüfobjekt Impactprobe aus CFK

Um eine eindeutige Zuordnung der Amplitudenverteilungen in den drei Raumrichtungen zu erhalten, wurde vor der Messung die sichtbare Richtung beider Risse als x -Achse definiert. Die Risse sind durch zwei Impactschäden an einer Mehrlagen-CFK-Struktur entstanden und folgen der Hauptrichtung der Carbonfasern in der unteren Lage. Die out-of-plane-Komponente ist die z -Achse, damit ergibt sich die Verkippung der Amplitudenbilder in Abbildung 6.9.

Die Amplituden der Lateralkomponenten (x - und y -Richtung) in den nichtlinearen Frequenzbändern zeigen eine deutlich stärkere Nichtlinearität als die z -Komponente (Anregungsrichtung). Besonders deutlich ist das Klappern der Nichtlinearität im unteren Defekt in y -Richtung der dargestellten 4. Harmonischen (80kHz), da hier die Grenzflächen des Risses direkt aufeinander schlagen (Abbildung 6.9, Mitte).

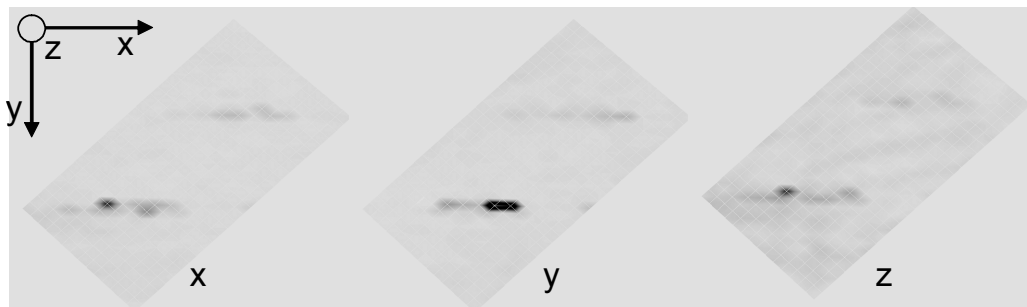


Abbildung 6.9: CFK-Struktur mit zwei Impactschäden. Anregung mit 20kHz. Amplitudenverteilung der in-plane-Komponenten (x und y) und out-of-plane-Komponente (z) bei der 4. Harmonischen.

Prüfobjekt Smart Structure mit Delaminationsfläche parallel zur Oberfläche

Smart Structures besitzen integrierte Aktoren, die gesteuerte Verformungen des Bauteils möglich machen. Diese Aktoren, die hier aus Piezokeramiken bestehen, können natürlich auch, wie in diesem Beispiel, zur Schwingungsanregung genutzt werden. Durch starke Belastung kann es zu verschiedenen Beschädigungen kommen [90], wie hier zu einer ovalen Delamination direkt auf dem Piezoaktor. Zieht dieser sich bei Anlegen einer elektrischen Spannung zusammen, dann wölbt sich die GFK-Struktur darüber auf. Dabei muss es zu Relativbewegungen sowohl in z -Richtung (out-of-plane-Komponente) als auch parallel zur Oberfläche (in-plane) kommen.

Tatsächlich sind die in-plane-Komponenten der Höherharmonischen (x : 580 μ m/s und y : 840 μ m/s) um den Faktor 2-4 höher als die out-of-plane-Komponente (z : 220 μ m/s). Die Werte wurden bei einer Anregungsgeschwindigkeit von 16,8mm/s für die 12. Harmonische (Grundfrequenz 50kHz) ermittelt.

Es ist festzuhalten, dass die in-plane-Komponente nichtlinearer Frequenzbänder zumindest in den untersuchten Fällen eine höhere Nichtlinearität besitzt als die in bisherigen Arbeiten untersuchte out-of-plane-Komponente (Abbildung 6.10). Den höchsten Fehlerkontrast ergibt die Summierung aller drei Amplitudenkomponenten (x , y und z).

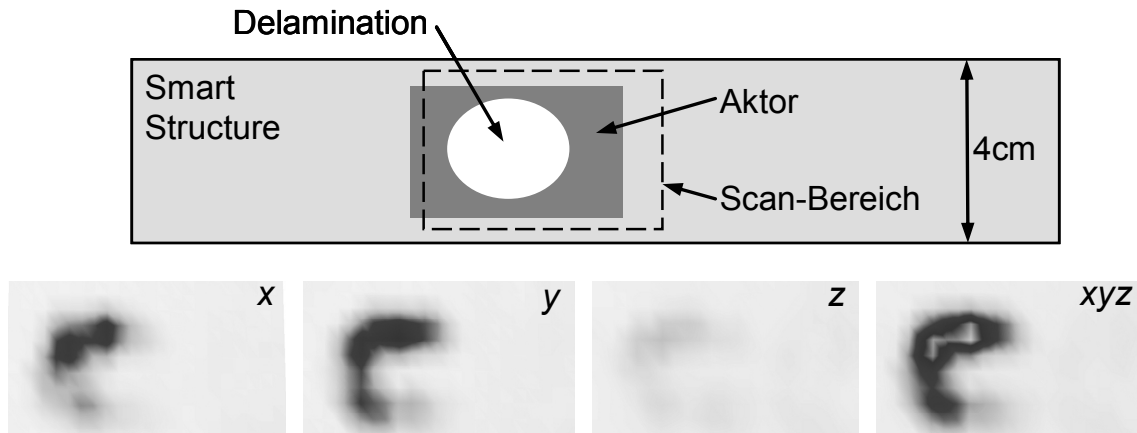


Abbildung 6.10: Smart Structure mit Delamination im Aktorbereich. Oben: Skizze des Aufbaus. Unten: In-plane-Komponenten (x , y), out-of-plane-Komponente (z) und überlagerte Darstellung aller Amplitudenkomponenten der Bauteilschwingung (xyz) bei der 12. Harmonischen.

6.2. Nichtlineare Modulationstechnik

Bei der Entstehung Höherharmonischer kommt es zu einem Klappern der Rissflächen und dadurch zu einer Steifigkeitsmodulation. Durch eine zusätzlich zur Ultraschallanregung eingeleitete zweite elastische Welle wird der angeregte klappernde Bereich noch einer weiteren Steifigkeitsmodulation unterzogen. Diese Modulationstechnik kam bereits in ersten ZfP-Anwendungen bei der Rissprüfung von Beton [91], Stahl [92], Kunststoffteilen aus dem Automobilbereich sowie bei der Verfolgung des Schadens-Fortschritts in Kunststoffen aufgrund mechanischer Belastung [93] zum Einsatz. Die Arbeiten beinhalteten allerdings bisher nur integrale Messungen der Nichtlinearität.

Die Erweiterung der Methodik durch die lokale Messung von überhöhten Amplituden der Mischfrequenzen wird in diesem Kapitel behandelt, nachdem deren Nachweis in Kapitel 5.2 erfolgte. Durch die höhere Empfindlichkeit der ortsauflösenden Methode sollen Defekte in ihrem Ursprung und in einem wesentlich früheren Stadium der Entwicklung nachgewiesen werden.

Entsprechend den Ausführungen in Kap. 3.2 entstehen durch Modulation in nichtlinearen Bauteil- oder Materialbereichen zusätzlich zur Anregung (ν) Frequenzkomponenten mit $(\nu_1 - \nu_2)$ und $(\nu_1 + \nu_2)$. Bei komplexerer Nichtlinearität treten Summen und Differenzen höherer Harmonischer auf ($2\nu_1 \pm \nu_2$, $3\nu_1 \pm \nu_2$, $4\nu_1 \pm \nu_2$ etc.) sowie Viel-

fache der Summen und Differenzen (z. B. $n(\nu_1 - \nu_2)$) auf. Diese Modulationsfrequenzen werden im Folgenden experimentell auf ihre Eignung zur Defektmarkierung untersucht.

6.2.1. Mischfrequenzen bei externer mechanischer Anregung

Eine externe mechanische Anregung kann entweder mit nur einer Anregungsquelle (sofern diese zwei Frequenzen übertragen kann) oder mit zwei baulich getrennten Wandlern erfolgen.

Prüfobjekt Flugzeug-Landeklappen mit Stringerbruch

Das folgende Bauteil ist Teil einer Flugzeug-Landeklappen (Airbus A-330) aus CFK. Auf der nicht sichtbaren Rückseite befindet sich eine Beschädigung (Delamination und Bruch) im verstärkenden Stringer.

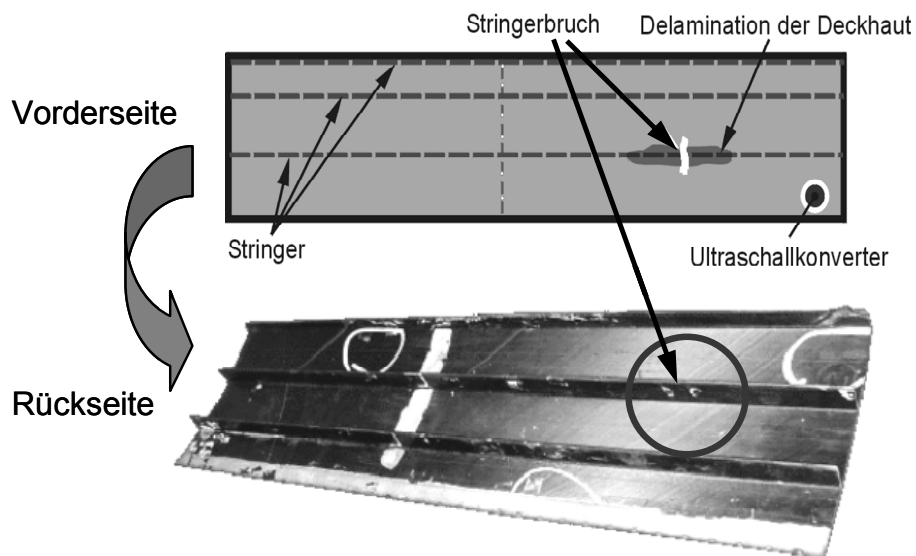


Abbildung 6.11: Aufbau des Prüfobjektes: Flugzeug-Landeklappen (A-330) aus carbonfaserverstärktem Kunststoff.

Der in Kapitel 4.1.1 beschriebene Hochleistungsschwingkopf soll in seinem Leistungsbereich mit $\nu_1 \approx 20\text{kHz}$ betrieben werden. Beim verwendeten Ultraschallkonverter trat allerdings, vermutlich durch häufigen und experimentellen Laborbetrieb verursacht, eine zusätzliche Anregungsfrequenz ($\nu_2 = 3,26\text{kHz}$) auf. Obwohl die Amplitude dieser zweiten Anregungsfrequenz deutlich geringer als die der einstellbaren Hauptamplitude (ν_1) ist, verwandelt sie doch den Konverter in eine mehrfrequente Anregungsquelle. Der Messaufbau ist in Abbildung 6.12 dargestellt. Auf dem Monitor rechts wird die Amplitude des gewählten Frequenzbandes, hier als Beispiel ($\nu_1 - \nu_2$), als Grauwert über den Bauteilkoordinaten ausgegeben.

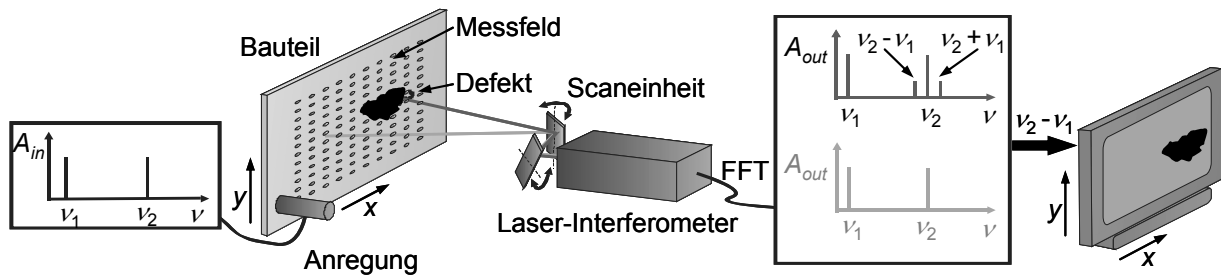


Abbildung 6.12: Prinzip zur bildgebenden nichtlinearen Vibrometrie mit dem Defektindikator Mischfrequenzen.

Das Antwortspektrum (Abbildung 6.13) der Landeklappe enthält neben der Hauptanregungsfrequenz ($\nu_2 = 20\text{kHz}$) auch noch Mischfrequenzen mit dem Abstand $\pm 3.26\text{kHz}$ um die Hauptanregung herum. Die kleine Amplitude der zusätzlichen Anregungsfrequenz ($\nu_1 = 3,26\text{kHz}$) ist im Spektrum nur schwer zu sehen, sie lässt sich bei offen betriebenem Konverter allerdings einfach nachweisen. Offenbar überträgt das Prüfobjekt diese niederfrequente Schwingung nur sehr schlecht, während die Mischfrequenzen sogar an Höherharmonischen der amplitudenstarken Hauptanregung nachgewiesen werden konnten.

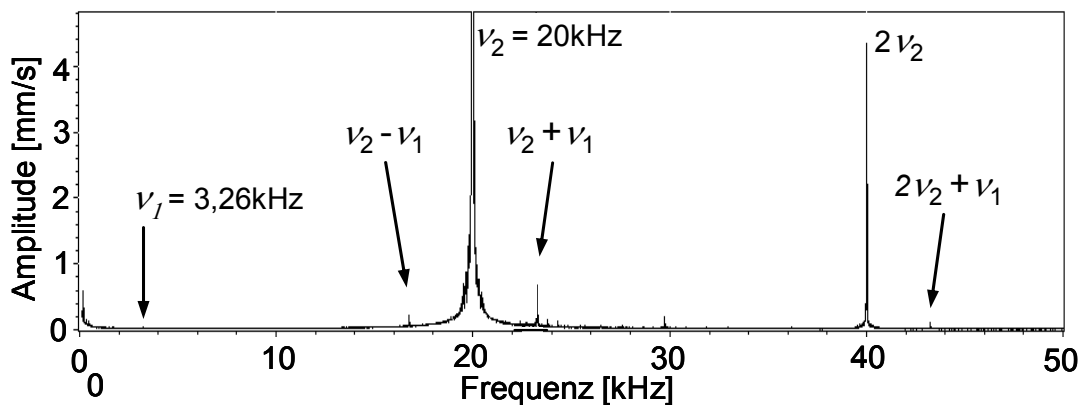


Abbildung 6.13: Antwortspektrum (Mittelwert) einer CFK-Landeklappe mit Delamination im Stringer-Bereich mit Hauptfrequenz 20 kHz und der zweiten Anregungsfrequenz 3,26 kHz.

Bewertet man die Mischfrequenzen hinsichtlich ihrer Defektrelevanz, so ist insbesondere ($\nu_1 + \nu_2$) von großer Aussagekraft. In Abbildung 6.14 ist sie im Vergleich mit der 2. Harmonischen der Hauptanregung dargestellt, sie markiert eindeutig den Stringerbruch.

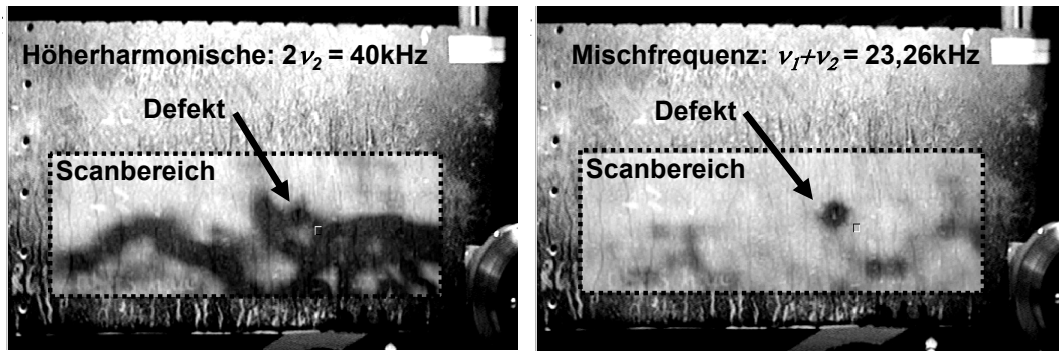


Abbildung 6.14: Teil einer Flugzeuglandeklappe mit Delamination in rückseitiger Verstärkungsrippe, Mischfrequenz ($\nu_1 + \nu_2 = 23,26\text{kHz}$) als Defektindikator.

Prüfobjekt Aluminium-Nietverbindung mit loser Niet

Nietverbindungen sind die häufigste Verbindungsart im konventionellen Metallflugzeugbau. Im Folgenden soll eine solche Nietverbindung (Bolzeninnendurchmesser 4mm) untersucht werden. Abbildung 6.16 zeigt eine Aluminium-Überlapp-Nietverbindung, die mit zwei Piezoaktoren bei 20 und 27kHz senkrecht zur Bauteiloberfläche angeregt wurden. Durch die Verwendung getrennter monofrequenter Anregungsquellen erreicht man eine höhere Flexibilität, weil dadurch entsprechend den Erfordernissen des Prüfobjekts, und natürlich in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Tools, beliebige Frequenzen kombiniert werden können (Abbildung 6.15).

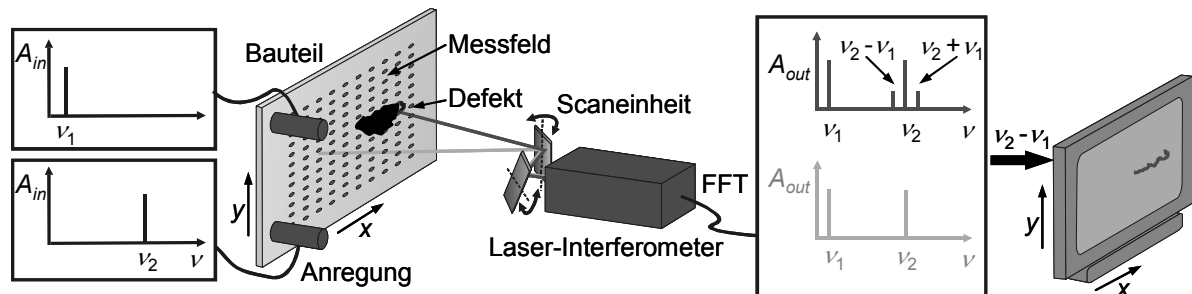


Abbildung 6.15: Prinzip zur bildgebenden nichtlinearen Vibrometrie mit dem Defektindikator Mischfrequenzen.

Aufgrund der Wellenmischung (Modulation) an der Defektstelle wird der fehlerhafte Niet unten links im gescannten Bild markiert, wobei die Strukturinformation durch die überlagerte transparente Darstellung der örtlichen Geschwindigkeitsverteilung erhalten bleibt.

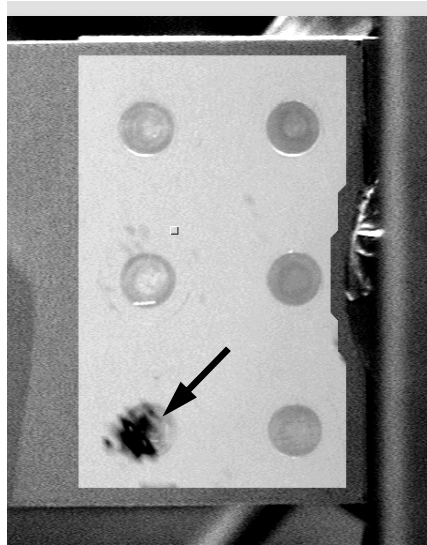


Abbildung 6.16: Genietete Aluminium-Struktur einer beschädigten Niet. Transparent gehaltene Amplitude der Geschwindigkeit einer Mischfrequenz zur Identifizierung der beschädigten Niet (dunkel, siehe Pfeil) bei unterlegtem Videobild [94].

Prüfobjekt belastete zellulosevertärkte Gipsprobe

Ein weiteres Anwendungsbeispiel für die Detektion von Schädigungen stellt Abbildung 6.17 vor. Dabei handelt es sich um das mit Cellulosefasern verstärkte Konstruktionsmaterial Gips. Dieser Faserverbundwerkstoff wird zurzeit im Sonderforschungsbereich 381 näher mit zerstörungsfreien Prüfmethoden untersucht. Das vorgestellte Prüfobjekt wurde zum Zwecke der Schadensfrüherkennung mit $1,2 \times 10^4$ Lastzyklen mit einer maximalen Zugbelastung von 0,5MPa beaufschlagt (Abmaße: 100x30mm).

Abbildung 6.17 zeigt, dass die Schwingungen sowohl im Bereich der Spannungskonzentration um die Initialbohrung in der Mitte des Bildes als auch um die Bohrungen zur Einleitung der Belastungsspannungen (rechts und links in der Abbildung) maximal werden. Dies wird durch die dunkle Farbkodierung dargestellt.

Somit werden durch Modulation aufgrund nichtlinearen Materialverhaltens Schäden, hier Mikrorisse, frühzeitig erkannt und die Stellen eingegrenzt, an denen man den Bruch des Bauteils erwarten kann.

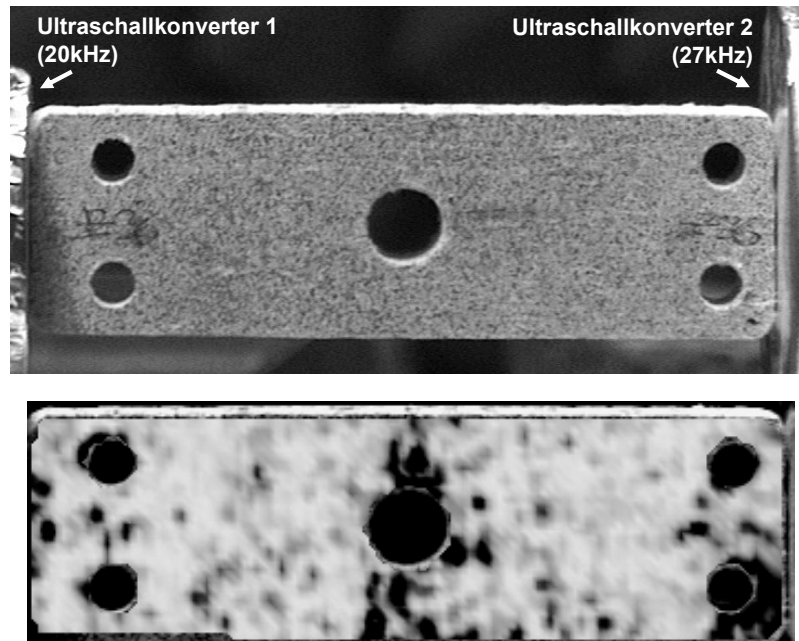


Abbildung 6.17: Oben: Zelluloseverstärkte Gipsprobe (Baumaterial), Anregungsfrequenzen $v_1=20\text{kHz}$ und $v_2=27\text{kHz}$; Unten: Amplitude einer Mischfrequenz ($v_1+v_2=47\text{kHz}$), hohe Amplitude (dunkel) kennzeichnet geschädigte Bereiche.

Prüfobjekt Textilprobe (CFK) mit verschiedenen Modelldefekten

Um Delaminationen in Faserverbundstrukturen zu simulieren, werden üblicherweise Teflonfolien verschiedenen Zuschnitts in das Prüfmaterial eingebettet. Wie Abbildung 6.18 zeigt, sind diese akustisch aktivierbar. Sie zeigen sich in verschiedenen Mischfrequenzen wie hier bei $v_1+2v_2 = 55\text{kHz}$. Die Anregung erfolgte wiederum mechanisch bei $v_1=15\text{kHz}$ und $v_2=20\text{kHz}$.

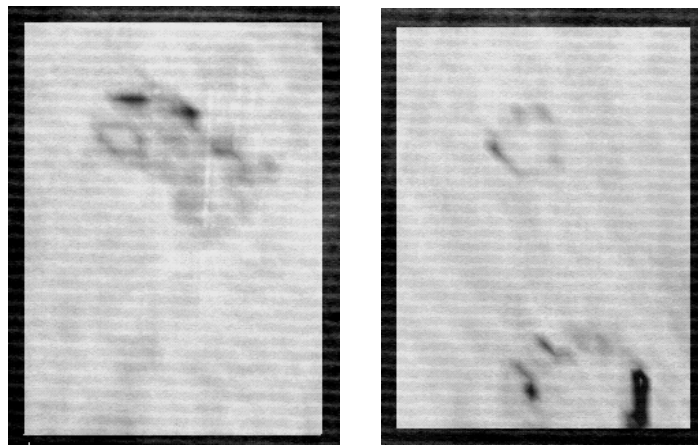


Abbildung 6.18: Textile Verbundplatte mit eingebetteten Teflonfolien zur Simulation von Enthaltungen. Anregung bei $v_1=15\text{kHz}$ und $v_2=20\text{kHz}$; Die Mischfrequenz 55kHz zeigt links eine rechteckige diagonal eingelegte Struktur und rechts zwei Kreisstrukturen (äußere Radien 10mm und 30mm) [95].

6.2.2. Mischfrequenzen bei interner Aktorik

Prüfobjekt aktive Strukturen mit Enthaltungen

Die in Abbildung 6.19 dargestellte aktive Struktur enthält vier zweilagige piezoelektrische Aktorelemente (ACX QP 20N, siehe Anschlüsse A bis D) versehen, die oberflächennah in das quasiisotrope Carbonfaser-Epoxydharz-Laminat eingebettet sind. Diese Probe wurde von Dipl.-Ing. J. Dürr (Fa. DaimlerChrysler Aerospace Dornier GmbH) zur Verfügung gestellt. Zwischen jeweils zwei Prepreglagen wurden außerdem an zwei Positionen kreisförmige PTFE-Folien eingebracht, die lokal zu einer Enthftung führen sollten. 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 [96].

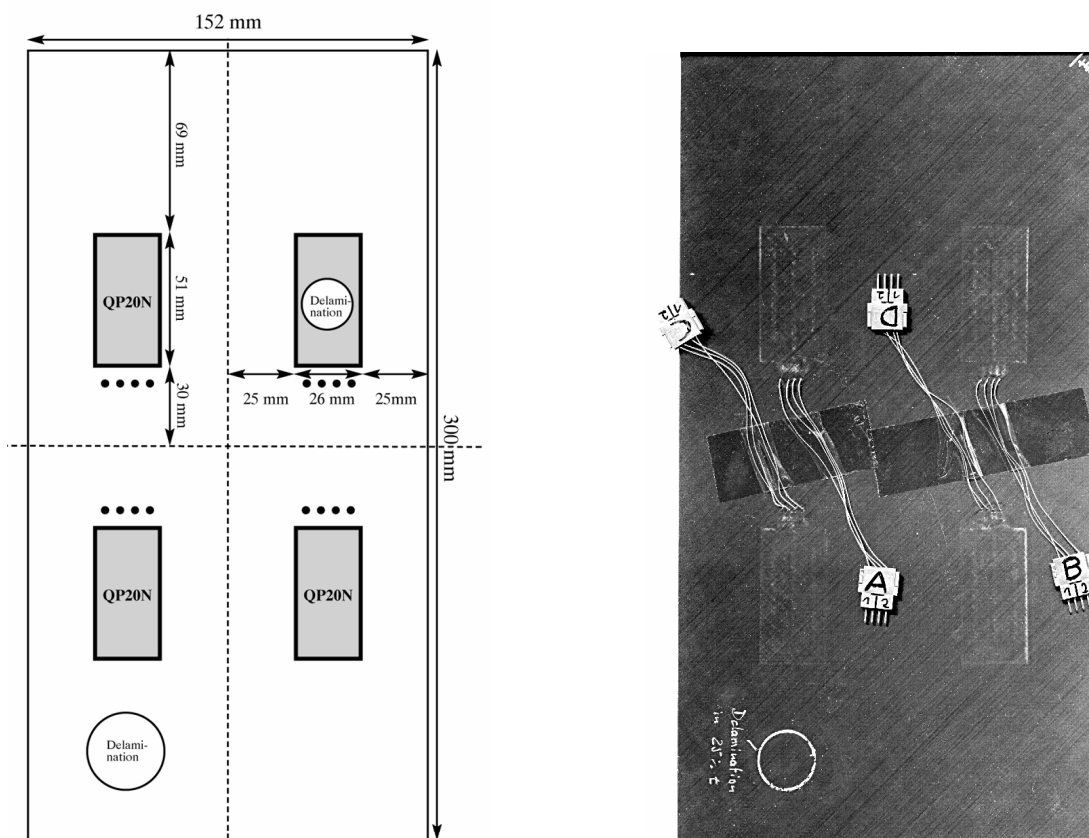


Abbildung 6.19: Aktive CFK-Struktur. Skizze des Aufbaus (links) mit kreisförmiger PTFE-Folie, die den Defekt simuliert. Optisches Bild (rechts).

Die Anregung für die bildgebende nichtlineare Schwingungsanalyse wurde durch die Aktoren C und D durchgeführt, die der unteren Delamination am nächsten liegen.

Bei den Anregungsfrequenzen blieb der Defektbereich noch weitgehend unauffällig (Abbildung 6.20), obwohl bei dieser Frequenz natürlich die höchsten Amplitudenwerte auftreten, wobei die elektrischen Anregungsschwingungen $\nu_1 = 16\text{kHz}$ und $\nu_2 = 42\text{kHz}$ vergleichbare Amplituden generierten. Als Amplitude im Spektrum scheinbar

unbedeutend klein sind dagegen die Mischfrequenzen und deren Harmonische (Faktor 100), die sich aber trotzdem mit deutlichem Abstand vom Grundrauschen abheben. Die künstliche Enthaftung ist aufgrund ihrer lateralen Verteilung in den meisten Mischfrequenzen (Beispiel in Abbildung 6.20) mit Hilfe der farbkodierten Darstellung der Oberflächengeschwindigkeit klar in ihren Ausmaßen zu erkennen. Die Position der eingebrachten Teflonfolie ist mit einem Pfeil markiert.

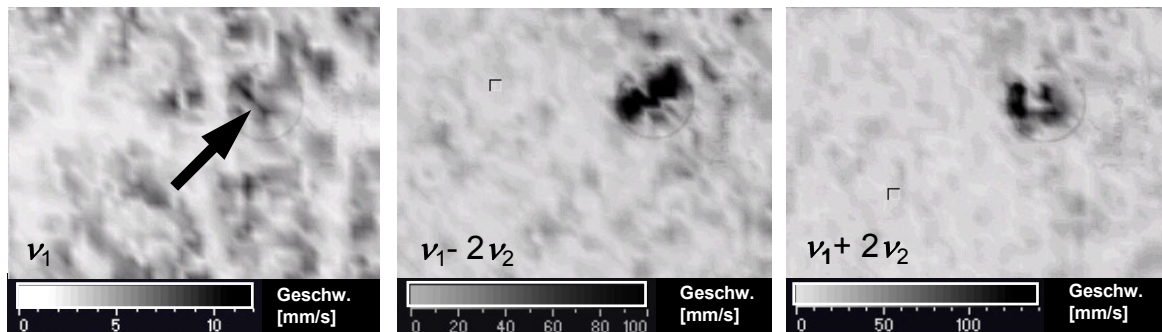


Abbildung 6.20: Erkennung einer simulierten Delamination mittels Mischfrequenzen (siehe Abbildung 6.19 links unten).

Ein weiteres Beispiel ist die bereits erwähnte Smart Structure (Abbildung 5.7 und Abbildung 6.10) mit der Delamination auf dem Piezoaktor (Abbildung 6.21). Bei der Anregung einer linearen Resonanz bei $\nu_2 = 50\text{kHz}$ kommt es zu einem stehenden Wellenfeld im Messbereich ($\lambda \approx 1\text{cm}$). Mischt man dazu eine niederfrequente Schwingung ($\nu_1 = 1\text{kHz}$), dann tritt der Defekt in der ersten Mischfrequenz deutlich und weitgehend unbeeinflusst von Stehwelleneffekten hervor (Abbildung 6.21).

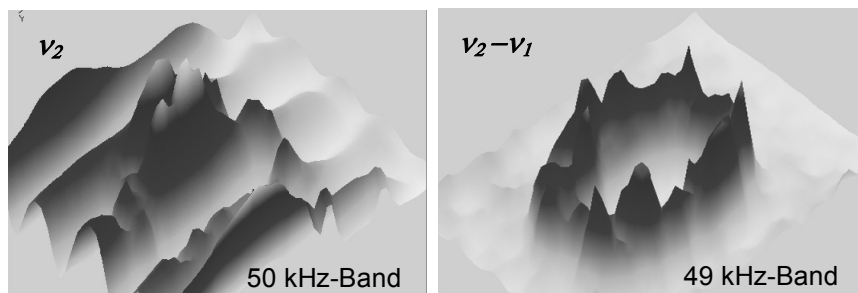


Abbildung 6.21: Modulation zur Unterdrückung von Stehwelleneffekten.

6.2.3. Mischfrequenzen bei kontaktfreier Ultraschallanregung

Oft dürfen Bauteile nur berührungslos gemessen werden, da applizierte Anregungsquellen das Bauteil beeinträchtigen würden. In Kapitel 4.1.3 wurden die nötigen Anregungstools vorgestellt: Luftultraschallköpfe. Nach dem prinzipiellen Nachweis von Mischfrequenzen, die sich durch nichtlineares Verhalten erklären lassen, soll nun die Eignung der luftgekoppelt angeregten Mischfrequenzen zur Lokalisierung und Darstellung von Defekten untersucht werden.

Prüfobjekt unverstärkte Polystyrol-Platte mit Riss

Wie die Ergebnisse in Abbildung 6.22 und Abbildung 6.23 bestätigen [86], können die luftgekoppelten Mischfrequenzen zur bildgebenden Defektdarstellung genutzt werden. Abbildung 6.22 zeigt einen Linienscan über einen Impactschaden in 1,15mm dicken Polystyrol-Platten (CD-Hülle) bei senkrechter Durchschallung. Die tieffrequente Schwingung wurde hier mittels Shaker (Abbildung 4.5) eingekoppelt ($\nu_1 = 1,7\text{kHz}$). Sowohl durch die erhöhte Antwortamplitude bei der Ultraschall-Prüffrequenz $\nu_2 = 451,4\text{kHz}$ (linearer spektraler Übertragungsanteil), als auch durch die im Defekt anwachsenden Amplituden der Mischfrequenzen (nichtlinearer Übertragungsanteil) lässt sich der Impact auf dem Linienscan lokalisieren. Der Kontrast (maximaler Unterschied ΔV bezogen auf das gemessene Grundsignal V) war jedoch sehr unterschiedlich: $\Delta V/V \approx 5$ im linearen Fall (bei der Anregungsfrequenz von $\nu_2 = 451,4\text{kHz}$) und $\Delta V/V \approx 80$ bei der Differenzfrequenz ($\nu_2 - \nu_1 = 449,7\text{kHz}$). Die Mischfrequenzen zeigen den Defekt somit wesentlich deutlicher als die durch den Defektbereich übertragene Prüffrequenz ν_1 .

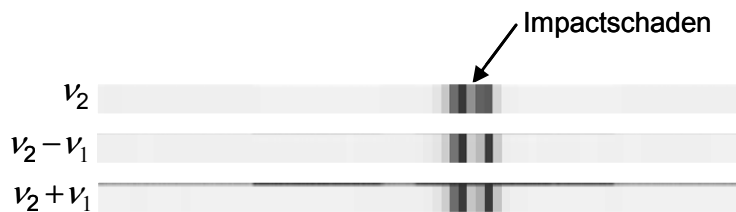


Abbildung 6.22: Abbildung eines Bruchs im Frequenzband einer Anregungsfrequenz ($\nu_2 = 451,4\text{kHz}$), Differenz-Mischfrequenz ($\nu_2 - \nu_1 = 449,7\text{kHz}$) und Summenfrequenz ($\nu_2 + \nu_1 = 453,1\text{kHz}$).

Eine technische Möglichkeit selektiv Defekte nachzuweisen ist in Abbildung 6.23 vorgestellt, wobei lineare (Wassertropfen) und nichtlineare (Bruch) Fehler untersucht wurden. Im Gegensatz zum vorigen Beispiel wurden nun durch schräge Einschallung im Bauteil Biegewellen angeregt, die unter dem selben Winkel auf der Rückseite wieder detektiert wurden. In diesem Fall zeigt die Amplitude der linearen Prüffrequenz durch Streuung und Dämpfung sowohl beim Wassertropfen als auch beim Impactschaden eine Reduktion mit vergleichbarem Kontrast ($\Delta V/V \approx -0,6$). Im Gegensatz dazu steigt die Amplitude der Mischfrequenzen im Impactbereich deutlich an ($\Delta V/V \approx 20$). Die Mischfrequenzen werden durch das nichtlineare Verhalten des Impacts produziert und eignen sich somit zur Unterscheidung von Defektypen.



Abbildung 6.23: Farbkodierte Linienscans über eine PS-Probe. Abbildung mit Amplitude der Prüffrequenz (ν_2) und ersten Mischfrequenzen. Unterscheidung von Defekttypen: Linearer Defekt Wassertropfen (links) im Vergleich zu einem Bruchschaden (rechts) auf der Oberfläche.

6.3. Nichtlineare Resonanz-Technik

Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, sind die Bruchbereiche nichtlineare Einschlüsse in intaktem, linearem Material. Somit können die lokalisierten nichtlinearen Phänomene zur bildgebenden Defekt-Darstellung verwendet werden.

Nimmt man an, dass Bruchbereiche außerdem nichtlineare Resonanzeigenschaften besitzen, lässt sich damit das Auftreten einer neuen Gruppe nichtlinearer Phänomene erklären: Subharmonische, instabile Schwingungszustände, Hysterese, Selbstmodulation und dynamisches Chaos (siehe Kapitel 3). Im Folgenden wird das Auftreten dieser neuen Gruppe nichtlinearer Phänomene experimentell nachgewiesen und deren Potenzial zur bildgebenden Darstellung von nichtlinearen Defekten in Realbauteilen untersucht.

6.3.1. Subharmonische und Vielfache von Subharmonischen

Voraussetzung für das Auftreten von Subharmonischen ist, dass das akustische Anregungssignal einen bestimmten Schwellwert erreicht. Dieses Verhalten wurde hauptsächlich bei geöffneten Brüchen und Enthaltungen beobachtet (akustische Leistung zwischen 20W und 40W). Einige Beispiele hierfür sollen im Folgenden für verschiedene Materialien vorgestellt werden.

Prüfobjekt carbonfaserverstärkte Keramik

Um Subharmonische anzuregen, muss man die Anregungsfrequenz so auswählen, dass man eine parametrische Resonanz (siehe Kapitel 3.3.2) des Defektbereichs trifft. Als Prüfobjekt dient eine Platte aus C/C-SiC, wobei C/C für karbongewebefaserverstärktes Carbon und SiC für Siliciumcarbid steht (Dichte: $3,217\text{kg/m}^3$; Härte: 9,6 (Mohs); 2600 (Vickers, Knoop)). Die Herstellung von C/SiC erfolgt durch Pyrolyse der CFK-Polymermatrix und anschließendes Silizieren des Kohlenstoffgerüsts bei hoher Temperatur, wobei flüssiges Silizium eindringt und an den Grenzflächen zu SiC reagiert. Siliciumcarbid ist auch bei hohen Temperaturen gegen Sauerstoff relativ oxidationsbe-

ständig. Es zeigt eine hohe Härte, gutes Wärmeleitvermögen (reines SiC ca. 350W/mK, technisches SiC ca. 100-140W/mK, je nach Herstellungsverfahren) und halbleitende Eigenschaften. Die Hauptanwendungsgebiete in der Luftfahrt sind thermisch höchst beanspruchte Bauteile wie die in Abbildung 6.24 dargestellte Einlauframpe eines Hyperschalltriebwerks oder Bremsanlagen. Die hohe Härte sowie die thermische Belastbarkeit bis zu 1400°C sind Vorteile von C/C-SiC. Weiterhin zeichnet sich der Werkstoff durch Korrosionsfreiheit sowie Verschleißarmut (bei Reibung) aus.

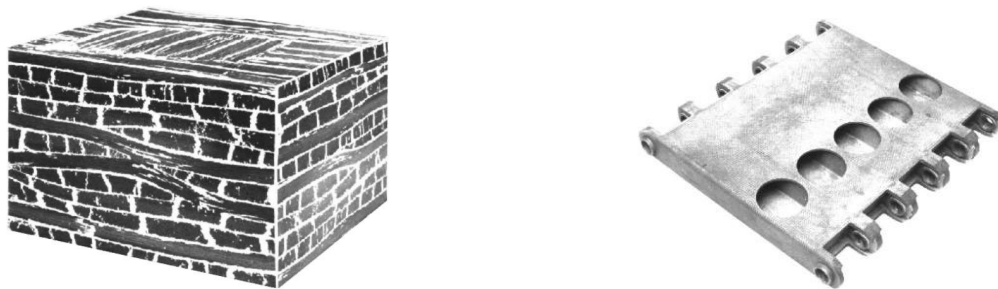


Abbildung 6.24: (links): Quadausschnitt eines C/C-SiC Verbundes: schwarz: C/C = carbongewebefaserverstärktes Carbon; hell: Siliciumcarbid; (rechts): Einlauframpe eines Hyperschalltriebwerks [97].

Zur Anregung einer linearen Resonanzfrequenz eines Defektbereiches benötigt man nur wenig Anregungsleistung, somit ist auch die Belastung des Prüfkörpers gering. Als Beispiel wurde eine faserverstärkten Keramik so angeregt, dass Subharmonische auftraten (Abbildung 6.25). Das Prüfobjekt besitzt die Abmessungen 180x190x32mm und wurde in der linken unteren Ecke mit einem Ultraschallgeber mechanisch angeregt ($\nu_{\bar{f}} = 20\text{kHz}$). Abbildung 6.25 zeigt die Amplitude der dritten Harmonischen der ersten Subharmonischen, also die örtliche Amplitudenverteilung im 30kHz-Frequenzband. Im oberen rechten Eck der Platte befindet sich eine Delaminationszone, die sich in einer Tiefe von 3-4mm über fast $\frac{1}{4}$ der Plattenfläche erstreckt. Die Subharmonische zeigt diesen Defekt besonders deutlich am Rand der Delaminationszone, wo die Rissufer aufgrund des offensichtlich idealen Abstandes aufeinanderschlagen.

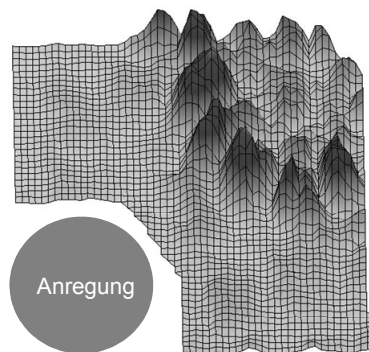


Abbildung 6.25: Abbildung der 3. ganzzahligen Vielfachen der 1. Subharmonischen. Erhöhte Amplitudenwerte im Bereich der Delamination in C/C-SiC-Keramik. Anregungsfrequenz 20 kHz [98].

Prüfobjekt carbonfaserverstärkter Kunststoff mit Delamination

Beim Wasserstrahlschneiden einer textilen CFK-Struktur des von der DFG geförderten Schwerpunktprogramms 1123: “Textile Verbundwerkstoffe“ kam es zu einer Delamination. Die 1,6mm dicke Mehrlagenstruktur wurde dem IKP vom ITA Braunschweig zur Charakterisierung überlassen. Die Enthftung erfolgte entlang der Fasern, also der Orientierung der Struktur ($[+45^\circ, 0^\circ, 90^\circ]$ sym.). In Abbildung 6.26 ist zur Defektabbildung die Amplitudenverteilung einer Subharmonischen dargestellt, die sich im Delaminationsbereich verdoppelt.

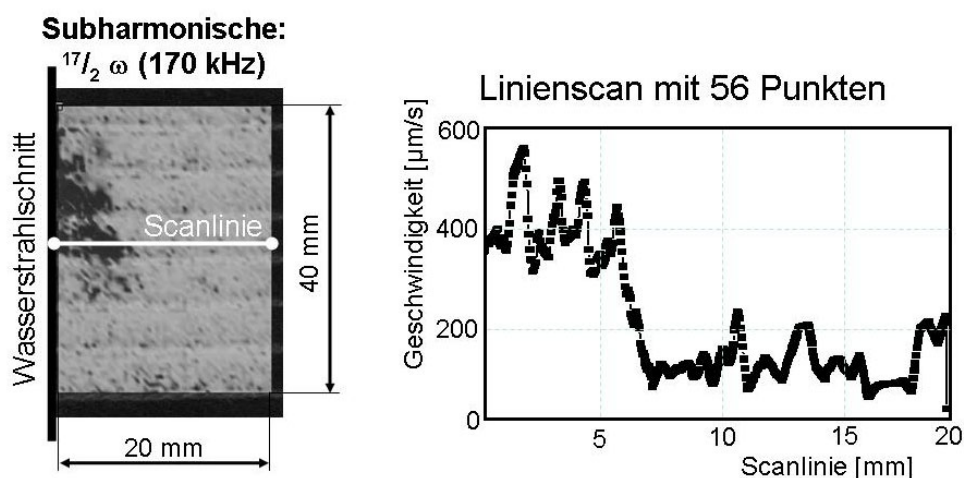


Abbildung 6.26: Lokale Amplitudenverteilung einer Subharmonischen und deren Höhe auf einer Scanlinie, die delaminierten und intakten Bereich enthält.

Prüfobjekt Faser-Metall-Laminat mit simulierten Delaminationen

Ein weiteres Beispiel für lokales Auftreten von Subharmonischen wird in Abbildung 6.28 vorgestellt. Dabei handelt es sich um den Werkstoff Glare®, ein Laminat aus alternierenden Aluminium- und Glasfaserschichten (Abbildung 6.27). Glare wurde 1987 von Akzo Nobel patentiert und von der Delft University of Technology weiterentwickelt. Die erste Anwendung von Glare® waren die Frachttüren des C-17 Transporters im Jahr 1990 (Boeing Globemaster III). Beim Airbus A380 werden große Teile der oberen Außenhülle aus Glare® gefertigt und sollen dadurch das Gewicht des Flugzeugs um 8t senken [88]. Im Vergleich mit reinen Aluminiumstrukturen besitzen Metall-Faserverbund-Materialien eine höhere Toleranz gegen Impact-Schäden, höhere Korrosionsbeständigkeit, sind thermisch belastbarer und haben ein niedrigeres spezifisches Gewicht. Der deutlich höhere Preis gegenüber Aluminium ist momentan wohl das Haupthindernis für die stärkere Verbreitung dieses Werkstoffs. Auch prüftechnisch stellt es noch eine Herausforderung dar, da es wegen der geringen plastischen Deformierbarkeit des Materials zu Delamina-

tionen während des Herstellungsprozesses kommen kann. Generell ist ZfP sowohl bei der Herstellung als auch in der Wartung notwendig.

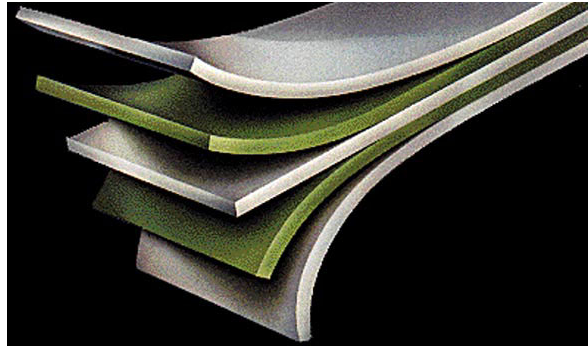


Abbildung 6.27: Glare® ist aus dünnen Schichten von Aluminium und Glasfasern aufgebaut [94].

Abbildung 6.28 zeigt Subharmonische (farbkodiert dargestellt) bei Glare®-Platten mit zwei eingebrachten runden Teflonfolien, die eine lokale Fehlerstelle simulieren sollen (Anregungsfrequenz $\nu_0 = 20\text{kHz}$). Die untersuchte Platte war aus 10 Metalllagen aufgebaut, wobei in Abbildung 6.28 die obere Folie von der Detektionsseite aus betrachtet unter der zweiten und die untere unter der dritten Metalllage eingelegt wurde.

Die Abbildungsschärfe steigt mit der Ordnung der ganzzahligen Vielfachen der ersten Subharmonischen. Dies hängt wahrscheinlich mit der höheren Umwandlung akustischer Energie in Wärme (Dissipation) außerhalb des delaminierten Bereichs im hochfrequenten Bereich zusammen.

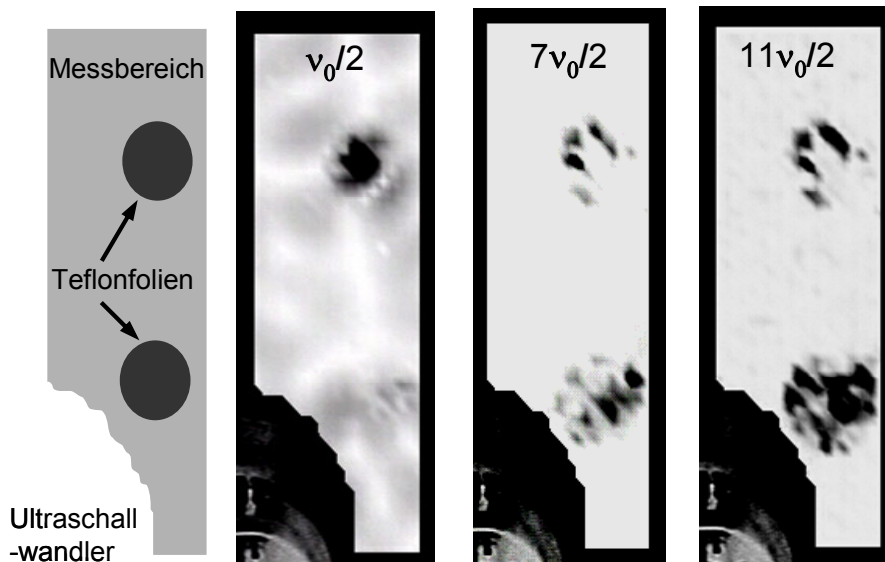


Abbildung 6.28: Subharmonische als Defektindikatoren bei einer Delamination, die durch runde eingebettete Teflonfolien in Glare®-Proben simuliert werden [94].

Prüfobjekt Metall-Legierung mit Ermüdungsbruch

Bei Ermüdung von Metallen (Rotoren, Turbinen, usw.) kommt es zu Mikrorissen, die sich schrittweise zu größeren Brüchen erweitern und schließlich ein abruptes Materialversagen verursachen können. Mit linearem Ultraschall sind Ermüdungsbrüche im frühen Stadium ihrer Entwicklung kaum detektierbar. Mit Hilfe der nichtlinearen ZfP konnte dagegen ein Ermüdungsbruch (Abbildung 6.29) in einer Superlegierung auf Nickelbasis nachgewiesen werden.

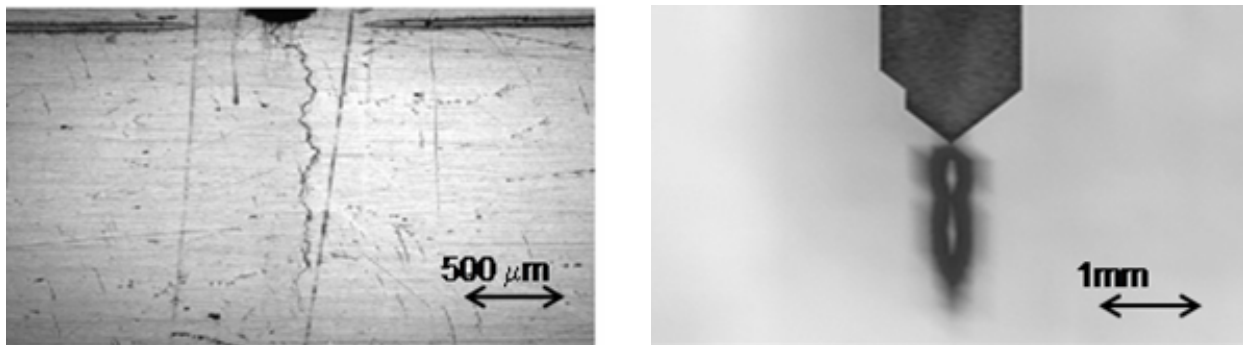


Abbildung 6.29: Optisches LSM-Bild (links) und 12. Subharmonische des Ermüdungsbruches (rechts) [94].

Der Bruch (Abbildung 6.29, links) ist ca. 2.5mm lang mit einem durchschnittlichen Abstand zwischen den Bruchflächen von ca. 5μm. Abbildung 6.29 (rechts) zeigt eine zuverlässige Detektierbarkeit dieses Ermüdungsbruches mit Hilfe Subharmonischer.

6.3.2. Defektabbildung mittels Frequenzpaaren

Entsprechend dem vorangehenden Beispiel zeigen Frequenzpaare ein Schwellwertverhalten sowohl in Abhängigkeit von der Anregungsamplitude als auch von der Frequenz. Dabei entstehen eine Anzahl neuer Frequenzlinien sowohl um Subharmonische als auch um Höherharmonische, die man zur bildgebenden Defektdarstellung verwenden kann.

Prüfobjekt Carbonfaserkeramik mit Lagenablösung

In Abbildung 6.30 sind die Komponenten eines Frequenzpaares im Bereich der nichtlinearen Quelle lokalisiert und ermöglichen es dadurch, den enthafteten Bereich in der angefasten Ecke oben rechts als Defekt abzubilden [99].

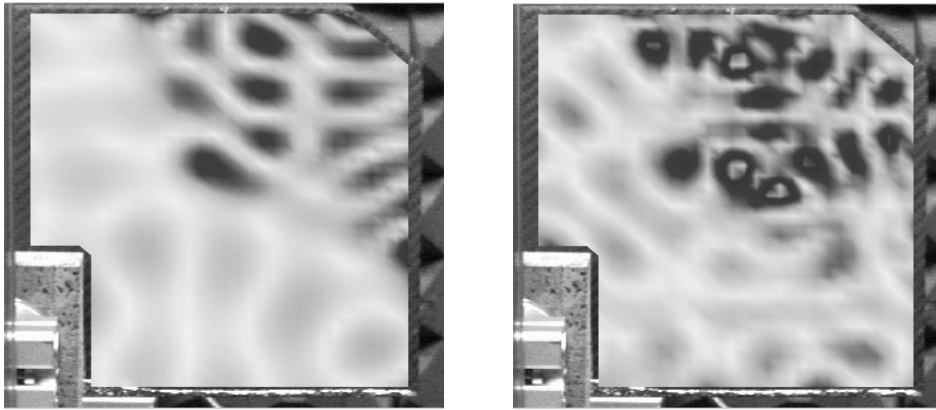


Abbildung 6.30: C/C-SiC-Probe mit großer Delamination oben rechts, Anregung bei 20kHz, Amplitudenverteilung der Geschwindigkeit des Frequenzpaares bei 32,25kHz (links) und bei 47,75kHz (rechts). Probe wie in Abb. 5.14- 5.16 und Abb. 6.25.

Der Kontrast bei der bildgebenden Darstellung von Nichtlinearitäten hängt von der Stärke der nichtlinearen Quelle ab, kann aber auch von Schwingungsbäuchen und -Knoten stehender Wellen sowie von der akustischen Dämpfung außerhalb des Defektes beeinflusst werden.

Prüfobjekt glasfaserverstärkter Kunststoff mit Impactschaden

Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) ist ein Verbundwerkstoff, bestehend aus Glasfasern und einer Matrix aus Polyester- oder Epoxydharz. Bei den Fasern unterscheidet man zwischen Kurzfasern und Lang- bzw. Endlosfasern. Die im Vergleich zu anderen Faserwerkstoffen relativ günstigen Glasfasern haben im Luftfahrtbereich ein breites Anwendungsfeld gefunden, so werden beispielsweise Segelflugzeuge nahezu komplett aus GFK gefertigt, ebenso wie Rotorblätter für Windenergieanlagen. Der Vorteil gegenüber der bereits angesprochenen Carbonfaser ist die deutlich höhere Bruchdehnung [100]. Weitere Eigenschaften von GFK sind: geringe Dichte, hohe Festigkeit, hohe Steifigkeit, geringe Wärmeausdehnung und hohe Lastwechselfestigkeit.

Untersucht wurde eine Platte aus glasfaserverstärktem Kunststoff (Fasern: R-Glas uniweave; Matrix: RTM6) mit 14 Lagen ([+45 0 0 0 90 0 0]s). Die Schädigung erfolgte bei den 2,54mm dicken Platten mit einem Impactor ($m=0,186\text{kg}$) mit der kinetischen Energie $E_{kin}=9,5\text{Joule}$ und wurden dem IKP-ZfP vom Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK), Universität Dresden für Messungen im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 1123 überlassen.

Während die Anregungsschwingung (Abbildung 6.31, links) ein Stehwellenfeld ohne Defektinformation zeigt, zeichnet sich in der Darstellung der Höherharmonischen 4. Ordnung im mittleren Probenbereich bereits der Impact-Schaden ab. Viel kontraststär-

ker erscheint der Defekt dagegen in einer Frequenzpaarkomponente (198.8kHz) im Bereich der 10. Harmonischen der Anregungsfrequenz.

Der Signal-Rausch-Abstand des Maximums in Abbildung 6.31 (rechts) erreicht 20dB. Schwingungsanalytische Messungen der absoluten Geschwindigkeitswerte machen es möglich, die Effizienz der Selbstmodulation abzuschätzen: Die Schwingungsamplitude der 10. Harmonischen ist $750\mu\text{m/s}$, die Frequenzpaarkomponente wies im Defektbereich eine Amplitude von $600\mu\text{m/s}$ auf. Dies zeigt, dass die Effektivität der Frequenzpaargenerierung vergleichbar mit der Entstehung von Höherharmonischen ist und das Frequenzpaar darüber hinaus hier den Defekt deutlich stärker kontrastiert.

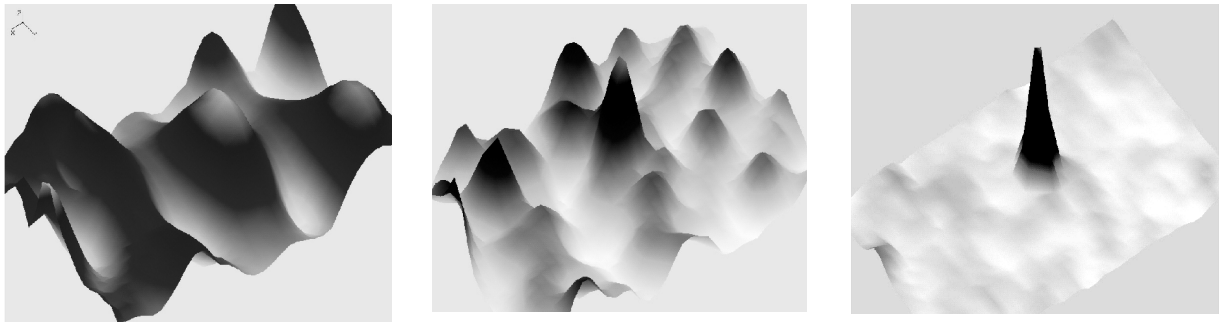


Abbildung 6.31: Bildgebende Darstellung der Amplitude der Geschwindigkeit diskreter Frequenzbänder anhand eines Impact-Schadens in GFK-Laminat. Links: Anregungsfrequenzband (20kHz); Mitte: 4. Harmonische (80 kHz); Rechts: Frequenzpaarkomponente (198,8 kHz).

6.4. Zusammenfassung und Vergleich nichtlinearer Defektmerkmale

Im letzten Beispiel ist eine deutliche Erhöhung der Defektabbildungsschärfe bei Verwendung von Seitenbändern im Vergleich zu Höherharmonischen zu beobachten. Da für die Entstehung der nichtlinearen Phänomene unterschiedliche Mechanismen verantwortlich sind, lässt sich nicht als Regel ableiten, dass Seitenbänder grundsätzlich einen Defekt besser abbilden, sondern diese nichtlinearen Frequenzphänomene beleuchten nur unterschiedliche Aspekte eines Defekts.

Prüfobjekt CFK mit Schaumkern: thermischer und mechanischer Schaden

Im Vergleich von Subharmonischen und Höherharmonischen an zwei separaten Defekten in einem CFK-Laminat mit Schaumkern (Abbildung 6.32) sollen die Unterschiede erläutert werden. Die Schäden in der oberen CFK-Lage (Dicke dieser Lage: 2,5mm) sind zum einen eine Enthftung (rechts) und zum anderen ein thermischer Schaden (links). Die Höherharmonischen, die sich nach dem Erreichen eines Sättigungsgrades (siehe Kapitel 3.1) unabhängig von der Anregung konstant verhalten, zeigen beide Schäden an. Dagegen sprechen die Subharmonischen, die den komplexeren Abhängigkeiten nichtlinearer

resonanter Defekt-Wellen-Wechselwirkungen folgen, auf den thermischen Schaden nicht an.

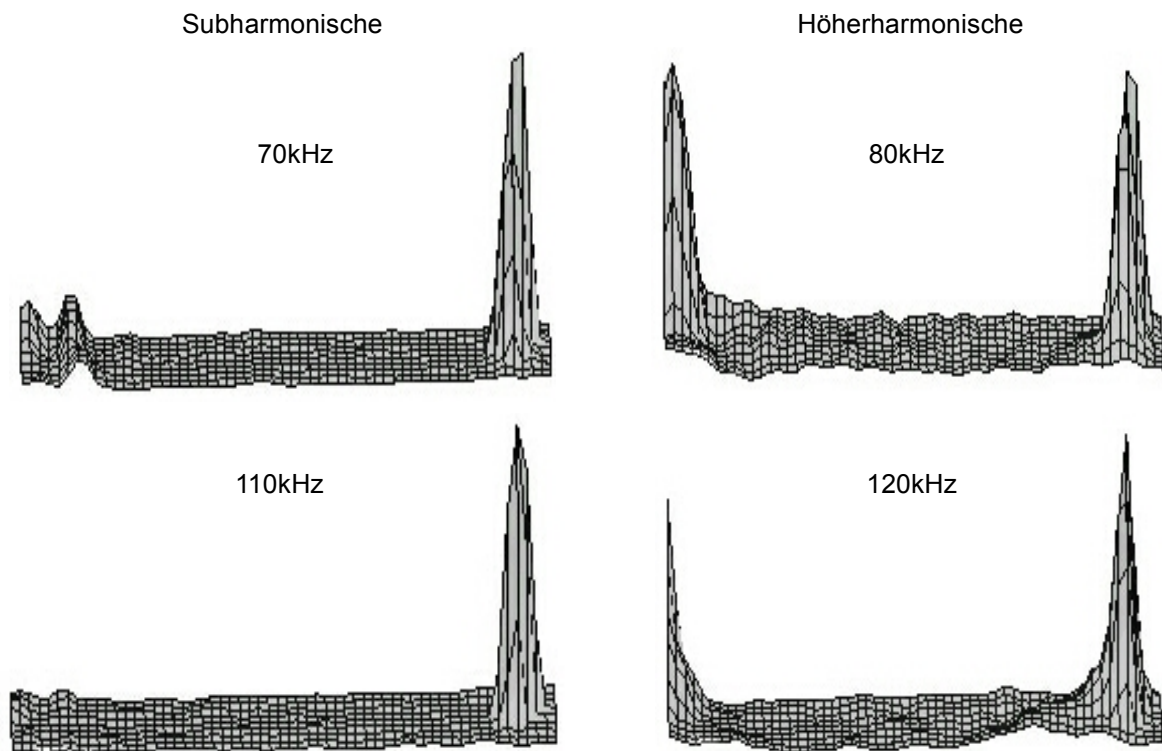


Abbildung 6.32: Vergleich der Defektindikatoren Subharmonische und Höherharmonische an den Beispielen thermischer Schädigung (jeweils links) und Delamination (jeweils rechts).

Prüfobjekt Holz mit Astansatz

Die Anwendbarkeit von linearen akustischen Verfahren ist bei einer Vielzahl von Materialien, z. B. Kunststoffen mit Faserverstärkung, wegen der hohen akustischen Dämpfung stark eingeschränkt. Die Varianten der nichtlinearen Vibrometrie bieten hier eine interessante Alternative, da sie das lokale akustische Antwortverhalten auswerten und somit die Schalllaufstrecken verkürzt werden.

Ein Beispiel für ein Material, dessen Faserstruktur lineare Ultraschallmessungen stark einschränkt, ist Holz, bzw. Holzverbundwerkstoff. Abbildung 6.33 zeigt einen Vergleich zwischen der bildgebenden Darstellung linearer höherer Harmonischer und Subharmonischer, die bei akustischer Anregung im Bereich eines gebrochenen Astauges einer Holzlatte auftreten. Diese Bereiche sind die "schwächsten" Stellen in Holzprodukten. Alle Subharmonischen zeigen den Fehlerbereich klar auf, während ein eindeutiges Bild der Höherharmonischen nur bei der 7. Harmonischen auftritt.

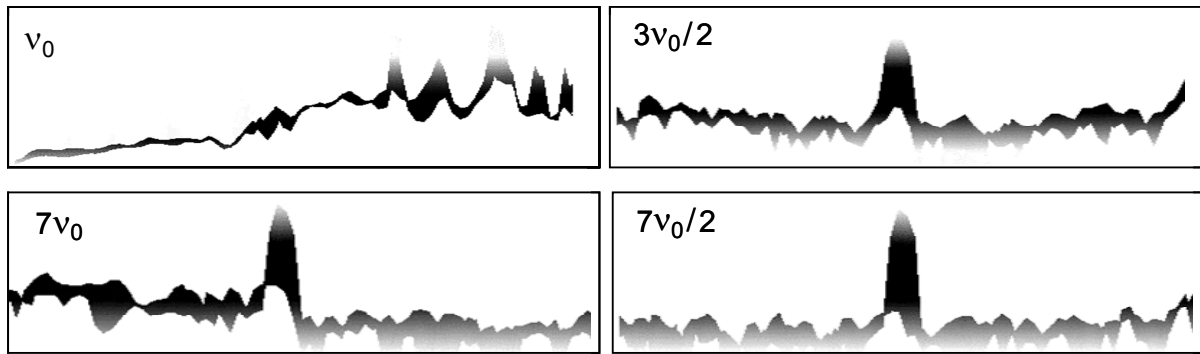


Abbildung 6.33: Vergleich der Abbildungen Höherharmonischer und Subharmonischer (B-Scans) eines Astansatzes in der Mitte eines 50cm langen Fichtenholzstabes. Die Anregungsschwingungen wurden auf der linken Bildseite in das Prüfobjekt eingekoppelt.

Prüfobjekt Smart Structure mit ovaler Delamination

Im Folgenden soll die Defektrelevanz von Höherharmonischen und Mischfrequenzen am Beispiel einer Smart Structure mit einem ovalen Kontaktfehler auf der Oberfläche des in GFK-Grundmaterial eingebetteten Piezoaktors (Abbildung 6.10) näher untersucht werden.

Als Anregung für den Piezoaktor wurden simultan zwei Frequenzen elektrisch vorgegeben: 50kHz und 1kHz. Die nichtlinearen Abbildungen (Abbildung 6.34) zeigen kontrastreich den Außenbereich der Enthftung, in dem aufgrund der Klaffung Klappern und Reiben zu erwarten ist. Der Unterschied zwischen Mischfrequenzen und Höherharmonischen liegt in der Betonung unterschiedlicher Bereiche. Die Höherharmonischen zeigen in erster Linie den rechten Bereich der Enthftung, während die Mischfrequenzen den oberen und unteren Bereich betonen.

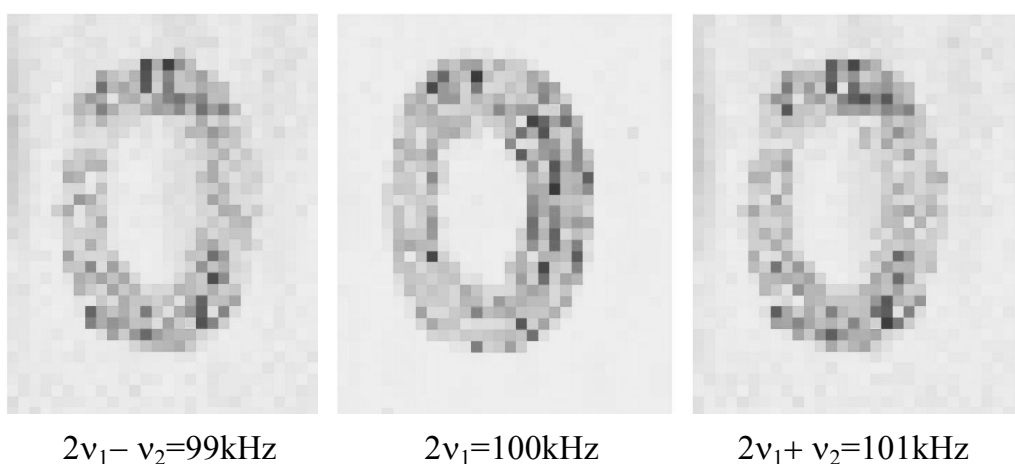


Abbildung 6.34: Vergleich zwischen Höherharmonischen und Mischfrequenzen am Beispiel einer ovalen Delamination auf einer Smart Structure.

7. Diskussion und Ausblick

7.1. Diskussion

Basierend auf den ersten Untersuchungen von Krohn [77] zu Höherharmonischen und den theoretischen Ansätzen und Vorhersagen aus der Mathematik und Physik [55, 56, 57] über zusätzliche nichtlineare Frequenzkonversionen wurde die nichtlineare Vibrometrie als ZfP-Methode weiterentwickelt. Es konnte anhand verschiedenster Messbeispiele nachgewiesen werden, dass sich neben Höherharmonischen der Anregungsfrequenzen auch Mischfrequenzen, Subharmonische und Frequenzpaare als Fehlerindikatoren eignen, da sie lokal im Defektbereich auftreten.

Mit dem Modell der klappernden Rissufer wurden unterschiedliche nichtlineare Mechanismen erklärt. Dabei dienen Sprungfunktionen dazu, die pulsartigen Steifigkeitsänderungen abzubilden, die an dynamisch belasteten Rissufern auftreten. Die theoretischen Ausführungen über die Entstehungsmechanismen nichtlinearer Phänome und daraus resultierender Frequenzkonversionen führten erstmals zu einem Überblick (Tabelle 3.1) über dieses komplexe Gebiet. Mit der Übersichtstabelle kann nun der Prüfer seine nichtlinearen Schwingungsexperimente interpretieren und den zugrunde liegenden Typ nichtlinearen Verhaltens erkennen.

Ein wichtiger Beitrag zum Verständnis nichtlinearen Verhaltens war die Untersuchung des Antwortspektrums in Abhängigkeit von der Anregungsamplitude (Abbildung 3.21). Damit können Übergänge zwischen nichtlinearen Phänomenen interpretiert werden, die in Messungen auftreten.

Mit den Beispielen zur Laseranregung und zur Luft-Ultraschallanregung wurden Verfahrensvarianten entwickelt und vorgestellt, die der defektselektiven nichtlinearen Vibrometrie einen weiteren Vorteil gegenüber anderen gängigen ZfP-Methoden verschafft: die Berührungslosigkeit. Damit wird das Verfahren zunehmend unanfälliger gegenüber Randbedingungen wie Lagerungs-, Masse- und Krafteinleitungseinflüssen. Hier besteht allerdings noch Entwicklungsbedarf bei der technischen Umsetzung scannender Systeme auf der Basis dieser neuen Varianten.

Bei der Detektion wurde mit Hilfe eines 3-D-Vibrometers (auf Einladung der Firma Polytec) ermittelt, dass die Stärke des nichtlinearen Verhaltens (Amplitude der Harmonischen) sowohl von der Orientierung der Einkopplung als auch von der Orientierung der Rissufer abhängt. Die In-plane-Komponenten der Bauteilschwingung lassen bei zukünftigen ausführlichen Messungen einen großen Erkenntnisgewinn über das nichtli-

neare Schwingungsverhalten erwarten. Dem stehen bisher noch die relativ hohen Investitionskosten gegenüber.

Anhand ausgewählter Messbeispiele unterschiedlichster Materialien (Metall-, Kunststoff-, Keramik- und Naturmaterialien) und Strukturen (Leichtbaustrukturen aus dem Luft- und Raumfahrtbereich, etc.) konnte nichtlineares Defektverhalten anhand von Höherharmonischen der Anregung, Mischfrequenzen, Subharmonischen und Frequenzpaaren nachgewiesen werden. Die nichtlineare Vibrometrie ist somit eine brauchbare und konkurrenzfähige Methode zur selektiven Defektabbildung. Da die auftretenden Defektindikatoren (Frequenzen) von den Defektparametern abhängen, die bei jedem Prüfobjekt variieren, ist eine Vorhersage, welche Frequenzkonversionen stattfinden werden, nicht möglich. Der umgekehrte Fall, nämlich die Zuweisung einer Spektralkomponente aus dem Antwortspektrum zu einem Defektphänomen, kann nun anhand der entwickelten Übersicht erfolgen.

7.2. Ausblick

In dieser Abhandlung wurde ein erster Überblick über die vielfältigen nichtlinearen akustischen Phänomene gegeben, die messtechnisch erfassbar und lokalen Defekten zugeordnet sind. Die Untersuchung der einzelnen Frequenzkonversionen bietet weiteres Forschungspotenzial: Beispielsweise wird resonantes nichtlineares Verhalten in theoretischen Werken als eine Vorstufe zu chaotischem Verhalten behandelt. Wenn es gelingt, lokales rauschartiges chaotisches Verhalten zerstörungsfrei zu generieren, dann sind daraus neue Möglichkeiten und Anwendungen zur Defektcharakterisierung zu erwarten.

Eine allgemeine Forderung aus der praktischen Anwendung lautet, dass ein Verfahren möglichst kontaktfrei durchgeführt werden soll. Mit der Luft-Ultraschallanregung und der Einkopplung durch einen modulierten Leistungs-Laser wurden hier erste viel versprechende Schritte unternommen, um nicht nur die Detektion, sondern auch die Anregung kontaktfrei zu verwirklichen. Möglicherweise bietet der Einsatz von Ultraschallkanonen dabei neue Entwicklungschancen.

In der neuesten Version der Bedienungssoftware für das PSV-400 kann zur Definition des Koordinatensystems die im Universal-File-Format gespeicherte Geometrie des Prüfobjektes beispielsweise aus CAD-Programmen importiert werden. Die genauen geometrischen Verhältnissen und die jeweiligen Materialeigenschaften sind auch die Basis für eine Simulation lokalen nichtlinearen Defektverhaltens. Diese Simulation kann zu einem besseren Verständnis der inneren Vorgänge in Defekten beitragen. Hier bietet sich für zukünftige Untersuchungen eine wertvolle Schnittstelle zwischen Simulation und Experiment, die neue Erkenntnisse und Einsichten verspricht.

In dieser Arbeit wurden die Frequenzkonversionen in der nichtlinearen Vibrometrie vorgestellt, die dem erfahrenen Anwender als Grundlage dienen, um relevante Frequenzbänder auszuwählen. Zukünftig sollte die Umsetzung des Verfahrens in eine industrielle Umgebung im Vordergrund stehen. Dazu können entweder, wie in Kapitel 6 beschrieben, einzelne Frequenzkonversionen, die sich in industrieller Umgebung robust reproduzieren lassen, zur Bauteilprüfung verwendet werden, oder man berücksichtigt alle nichtlinearen Frequenzkonversionen. Letztere setzt voraus, dass die Defektdarstellung umso vollständiger wird, je mehr Defektindikatoren (nichtlineare Frequenzbänder) man in die Analyse mit einbezieht. Dies lässt sich mit Hilfe von Bildverarbeitungstools erreichen, wie erste viel versprechende Untersuchungen ergaben [101]. Ziel der Bemühungen ist es dabei, die Auswertung zu automatisieren, die Defektinformationen zu sammeln und letztendlich auf nur ein Bild zu komprimieren.

Die vorliegende Arbeit belegt, dass die nichtlineare Vibrometrie unter Einbeziehung aller relevanten Frequenzkonversionen ein weites Feld an Detektions- und Beurteilungsmöglichkeiten von Defekten mit akustisch aktivierbaren Rissufern bietet. Um dieses Potenzial voll auszuschöpfen und eine robuste industrielle Anwendung zu ermöglichen, müssen in erster Linie zwei Ziele verfolgt werden: weitere Optimierung der technischen Umsetzung und Entwicklung von Automatisierungstechniken zur Erkennung und Interpretation relevanter Spektralkomponenten der Defekte.

Literatur

- [1] WEIßBACH, W.: *Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung*. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2000, S. 326-328
- [2] CABEO, N.: *Philosophia magnetica*. Ferrara, 1629
- [3] WUICH, W.: *Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung*. Bad Wörishofen : Geyer, 1973
- [4] GERLACH, W.: Magnetische Verfahren zur Werkstoffprüfung. In: *Z. techn. Physik* 15 (1934), S. 467-469
- [5] MOOK, G.; LANGE, R.: Wirbelstromprüfung von Kohlenstofffaser-Kompositen. In: *Materialprüfung* 36 (1994), S. 345-349
- [6] HAKEN, H.; WOLF, H. C.: *Atom- und Quantenphysik*. Berlin: Springer, 4. Auflage, 1990
- [7] WITTIG, G.: Untersuchungen zur zerstörungsfreien Prüfung von Kunststoff-Erzeugnissen mit Mikrowellen. In: *Kunststoffe* 67 (1977) S. 429-432
- [8] DIENER, L.; BUSSE, G.: *Abbildung von Orientierungen in Polymerwerkstoffen mit Mikrowellen*. In: Proc. of Jubiläumstagung 60 Jahre DGZfP, Garmisch-Partenkirchen: DGZfP, 1993, S. 539-546.
- [9] HECHT, E.; ZAJAC, A.: *Optics*. Addison-Wesley, 1974
- [10] JONES, R.; WYKES, C.: *Holographic and Speckle Interferometry. A discussion of the theory, practice and application of the techniques*. Cambridge: Cambridge University Press, 1983
- [11] RITTER, S.; BUSSE, G.: *3D Electronic-Speckle-Pattern-Interferometrie (ESPI) in der zerstörungsfreien Werkstoff- und Bauteilprüfung*. In: Proc. of Jubiläumstagung 60 Jahre DGZfP, Garmisch-Partenkirchen : DGZfP, 1993, S. 491-498
- [12] GERHARD, H.; BUSSE, G.: *Use of ultrasound excitation and optical-lockin method for speckle interferometry displacement imaging*. In: Green, R. E. Jr.; Djordjevic, B. B.; Hentschel, M. P. (Hrsg.): *Nondestructive Characterisation of Materials XI*. Berlin: Springer, 2003, S. 525-534
- [13] LEENDERTZ, J.A.; BUTTERS, J.N.: An image-shearing speckle-pattern interferometer for measuring bending moments. In: *Journal of Physics E: Scientific Instrument* 6 (1973), S. 1107-1110
- [14] GLOCKER, R.: *Materialprüfung mit Röntgenstrahlen*. Berlin: Springer, 5. Auflage, 1971

- [15] DITTIÉ, G.: *Untersuchung von Feuchteschäden im Bauwesen mittels Thermografie*. In: DGZfP-Berichtsband 98-CD, Vortrag 7 22, Thermographie-Kolloquium, 2005
- [16] CARLOMAGNO G. M.; BERARDI P. G.: *Unsteady thermotopography in non-destructive testing*. In: Proc. 3rd Biannual Exchange, St. Louis/USA, 1976, S. 33-39
- [17] BUSSE, G.; WU D., KARPEN, W.: Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography. In: *J. Appl. Phys.* 71 (1992), S. 3962-3965
- [18] BUSSE, G.: Optoacoustic phase angle measurement for probing a metal. In: *Appl. Phys. Lett.* Vol. 35 (1979), S. 759-760
- [19] RANTALA J.; WU D.; BUSSE G. Amplitude Modulated Lock-In Vibrothermography for NDE of Polymers and Composites. In: *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 7 (1996), S. 215-218
- [20] RICHTER, H.-U.: *Chronik der Zerstörungsfreien Materialprüfung*. Berlin: DVS-Verlag, 1. Auflage, 1999
- [21] FALK, J. P.; STECK, J. E.; SMITH, B. L.: A non-destructive testing technique for composite panels using tap test acoustic signals and artificial neuronal networks. In: *Industrial Journal of Smart Engineering System Design* 5 (2003) 4, S. 491-506
- [22] VON AUENBRUGGER, J. L.: *Inventum novum ex percussione thoracis humani ut signo abstrusos interni pectoris morbos detegendi*. Graz, 1761
- [23] HERTLIN, I; HELDMANN, K.: Akustische Resonanzanalyse in der Fertigung. In: *NDT.net*, Vol. 5, No. 1 (2000)
- [24] GROBE, C.: *Akustische Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von Baustoffen und Bauteilen*. Habilitations-Schrift der Fakultät 2. Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Universität Stuttgart, 2004
- [25] GEBHARDT, W.: *Airborne Ultrasonic Probes: Design, Fabrication, Application*. In: Proc. 7th ECNDT, Vol. 3, Broendby, 1998, S. 3098-3105
- [26] HOOKE, R.: *Lectiones Cutlerianae*. Royal Society, 1679
- [27] DÖTTINGER, C.: *Zerstörungsfreie Prüfung von Keramikbauteilen mittels Schwingungsanalyse*. Dissertationsschrift der Fakultät Verfahrenstechnik und technische Kybernetik der Universität Stuttgart, 2001
- [28] LANDAU, L. D.; LIFSHITZ, E. M.: *Theory of elasticity*. Terry-town: Pergamon Press, 1959

-
- [29] HAMILTON, M. F.: *Nonlinear wave propagation in mechanics*. In: AMD-77, The American Society of Mechanical Engineers, New York, 1986
- [30] SOLODOV, I. Yu.; ASAINOV, A. F.; LEN, K. S.: Nonlinear SAW reflection: experimental evidence and NDE applications. In: *Ultrasonics*, 31, N2 (1993), S. 91-96
- [31] BJØRNØ, L.: *Forty years of non-linear ultrasound*. In: Ultrasonics International UI01, July 3-5, Delft, Ultrasonics, Vol. 40, No. 1-8, 2001, S. 11-17
- [32] KITTEL, C.: *Einführung in die Festkörperphysik*. München, Wien, Oldenbourg, 13. korr. Aufl., 2002
- [33] BREAZEALE, M. A.; PHILIP, J.: Determination of third-order elastic constants from higher harmonic generation. In: *Physical Acoustics*, Mason, W. P. (Hrsg.), New York: Academic Press, Vol. XVII (1965)
- [34] BACON, D. R.: Finite amplitude distortion of the pulsed fields used in diagnostic ultrasound. In: *Ultrasound in Med & Bio*, 10 (1984), S. 189-195
- [35] STÖBEL, R.: *Air-Coupled Ultrasound Inspection as a New Non-Destructive Testing Tool for Quality Assurance*. Dissertationsschrift der Fakultät Verfahrenstechnik und technische Kybernetik der Universität Stuttgart, 2003
- [36] GEDROITZ, A. A.; KRASILNIKOV, V. A.: Elastic waves of finite amplitude and deviations from Hooke's law. In: *Sov. Phys. JETP*, v. 16 (1963), S. 1122-1131
- [37] HIKATA, A.; CHICK, B.; ELBAUM, C.: Effect of dislocations on finite amplitude ultrasonic waves in aluminium. In: *Applied Physics Letters*, 3. Auflage (1963), S. 195-197
- [38] CANTRELL, J. H.; YOST, W. T.: Acoustic harmonic generation from fatigue-induced dislocation dipoles. In: *Phil. Mag.*, A69 (1994), S. 315-326
- [39] OSTROVSKY, L.A.: Wave processes in media with strong acoustic nonlinearity. In: *J. Acoust. Soc. Am.* 90 (1991), S. 3332-3337
- [40] MEEGAN, G. D.; JOHNSON Jr., P. A.; GUYER, R. A.; McCALL, K. R.: Observations of nonlinear elastic wave behavior in sandstone. In: *J. Acoust. Soc. Am.* 94 (1993), S. 3387-3391
- [41] TENCATE, J. A.; VAN DEN ABEELE, K. E. A.; SHANKLAND, T. J.; JOHNSON, P. A.: Laboratory study of linear and nonlinear elastic pulse propagation in sandstone. In: *J. Acoust. Soc. Am.* 100 (1996), S. 1383-1391
- [42] HIRSEKORN, S.; KOKA, A.; WEGNER, A.; ARNOLD, W.: *Quality assessment of bond interfaces by nonlinear ultrasonic transmission*. In: Review of Quantita-

- tive Nondestructive Evaluation, Vol. 19, Hrsg. Thompson, D. O.; Chimenti, D. E., 2000, S. 1367-1374
- [43] ZAGRAI, A.; DONSKOY, D. und LOTTIAUX, J.-L.: *N-Scan: New Vibro-Modulation System for Crack Detection, Monitoring and Characterization*. In: Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 23, Hrsg. Thompson, D. O.; Chimenti, D. E., 2004
- [44] KROHN, N.; DÜRR, J.; FLOCK, M.; DILLENZ, A.; DÖTTINGER, C.; LÜTZE, S.; NIXDORF, K.; HEROLD-SCHMIDT, U.; VOIT-NITSCHMANN, R.; BUSSE, G.: *NDT of Smart Structures*. In: Proceedings Emerging Technologies in NDT, Athen. Balkema: Rotterdam, 1999, S. 187-191
- [45] KROHN, N.; STÖBEL, R.; BUSSE, G.: *Nonlinear Vibrometry for Quality Assurance*. In: 27th Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE). Ames, Iowa, 2000
- [46] ZAREMBO, L. K.; KRASIL'NIKOV, V. A.: Nonlinear phenomena in the propagation of elastic waves in solids. In: *Sov. Phys. Usp.*; Engl. Übersetzung, 13 (1971), S. 778-797
- [47] VAN DEN ABELE, K. E.-A.; JOHNSON, P. A.; SUTIN, A.: Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage. Part I: Nonlinear wave modulation spectroscopy (NWMS). In: *Res. Nondestr. Eval.* 12 (2000), S. 17
- [48] SOLODOV, I. Yu.: Ultrasonics of nonlinear contacts: propagation, reflection, and applications. In: *Ultrasonics*, v. 36, (1998), S. 383
- [49] KROHN, N.; PFLEIDERER, K.; SOLODOV, I. Yu.; BUSSE, G.: *Nonlinear vibro-acoustic imaging for non-destructive flaw detection*. In: Proc. 16th ISNA, Moscow, v. 2. 2002, S. 779-786
- [50] BRONSTEIN, I. N.; SEMENDJAJEW, K. A.: *Taschenbuch der Mathematik*. Stuttgart: Teubner, 25. Auflage, 1991
- [51] BALLAD, E. M.; KORSHAK, B. A.; SOLODOV, I. Yu.; KROHN, N.; BUSSE, G.: *Local Nonlinear and Parametric Effects for Non-Bonded Contacts in Solids*. In: Rudenko O.V.; Sapozhnikov O.A.: Nonlinear Acoustics at the Beginning of the 21st Century. Faculty of Physics, MSU, Vol. 2, Moskau, 2002, S. 727-734
- [52] BRONSTEIN, I. N.; SEMENDJAJEW, K. A.: *Taschenbuch der Mathematik*. Stuttgart: Teubner, 9. Auflage, 1968, S. 157

-
- [53] RABINOVICH, M. I.; TRUBETSKOV, D. I.: *Oscillations and waves in linear and nonlinear systems*. Volume 50. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1989
- [54] VAN DEN ABEELE, K.; DE VISSCHER, J.: *Damage assessment in Reinforced concrete using nonlinear vibration technique*. In: Lauternborn, W.; Kurz, T. (Hrsg.): Proc. 15th ISNA, Am. Institute of Physics, 341, 2000
- [55] KNEUBUEHL, F. K.: *Oscillations and Waves*. Berlin: Springer, 1997
- [56] LANDAU, L. D.; LIFSHITZ, E. M.: *Mechanics*. Oxford: Pergamon, 1960
- [57] MINORSKY, N.: *Nonlinear oscillations*. Princeton: Norstrand, 1962. S. 488-509
- [58] SOLODOV, I. Yu.; WACKERL, J.; PFLEIDERER, K.; BUSSE, G.: Nonlinear acoustic self-modulation and subharmonic imaging for damage detection and location. In: *Appl. Phys. Lett.*, 84, N26, (2004), S. 5386-5388
- [59] BAR-COHEN, J.; XUE, T.; LIH, S.-S.: Polymer Piezoelectric Transducers for Ultrasonic NDE. In: *NDTnet*, Vol. 1, No. 09 (1996)
- [60] WEGENER, M.; BAUER, S.: Mikrostorms in cellular polymers: a route to soft piezoelectric transducer materials with engineered macroscopic dipoles. In: *Chem. Phys. Chem.* 6, Weinheim: Wiley-VCH (2005), S. 1014-1025
- [61] POHL, J.; MOOK, G.; MICHEL, F.: Adaptive Werkstoffsysteme: Der Werkstoff sendet ZfP-Signale. In: *Materialprüfung* 41 (1999) 10, S. 424-428
- [62] MOOK, G.: *Zerstörungsfreie Strukturcharakterisierung adaptiver Werkstoffe*. In: SFB409 – ADAMES Workshop, Book of Abstracts, 1999, S. 24
- [63] SFB 409-C8: *Adaptive Strukturen im Flugzeugbau und Leichtbau*. Ergebnisbericht Teilprojekt C8: Integration piezokeramischer Elemente in Faserverbundwerkstoffe. (1998-1999-2000)
- [64] BRANSON: *Ultraschall-Generator 2000* (Betriebsanleitung). Emerson Technologies GmbH & Co. (Hrsg.), Dietzenbach, circa 2002 - Firmenschrift
- [65] BRÜL & KJÆR (Hrsg.): *Produkt Datenblatt für Vibration Exciter*. Type 4809. DK-2850 Nærum, Dänemark, 2001 - Firmenschrift
- [66] SCHAWLOW, A. L.; TOWNES, C. H.: Infrared and optical masers. In: *Phys. Rev.* 112 (6), (1958), S. 1940-1949
- [67] WEBER H.: *Laser: eine revolutionäre Erfindung und ihre Anwendungen*. München: C. H. Beck Wissen, Orig.-Ausg., 1998
- [68] MAIMAN, T. H.: Stimulated optical radiation in ruby. In: *Nature*, 187 (1960), S. 493.

- [69] MONCHALIN, J. P.: *Non contact generation and detection of ultrasound with lasers*. In: WCNDT, Proc. Of 16th World Conf. on Nondestructive Testing, Montréal, Canada, 2004, S. 1-9 (CD-Rom)
- [70] LYAMSHEV, M. L.; STANULLO, J.; BUSSE, G.: Thermo acoustic vibrometry. Remote "in situ" monitoring of ceramic sintering. In: *Materialprüfung* 37, 1-2 (1995), S. 22-24
- [71] N. N.: *AirTech 4000 – Non-Contact Ultrasonic Imaging Technique*. Ing. Büro Dr. W. Hillger, 38110 Braunschweig, (nicht datiert) - Broschüre
- [72] HUTCHINS, D. A., SCHINDEL, D. W.: *Advances in non-contact and air-coupled transducers*. In: Ultrasonic Symposium, 1994, S. 1245-1254
- [73] HALLER, M. I., KHURI-YAKUB, B. T.: *A Surface Micromachined Electrostatic Ultrasonic Air Transducer*. In: Ultrasonic Symposium, 1994, S. 1241-1244
- [74] GEBHARDT, W.: *Airborne Ultrasonic Probes: Design, Fabrication, Application*. In: Proc. 7th ECNDT, Vol. 3, Broendby, 1998, S. 3098-3105
- [75] KULCZYK, W. K.; DAVIS, Q. V.: *Vibration measurements by laser techniques*. In: Proc. Inst. Electr. Eng., London, 120 9, 1973, S.1017
- [76] MONCHALIN, J. P.; HÉON, R.: Laser ultrasonic generation and optical detection with a confocal Fabry-Pérot interferometer. In: *Materials Evaluation*, Band 44 (1986)
- [77] KROHN, N.: *Nichtlineares dynamisches Materialverhalten zur defektselektiven zerstörungsfreien Prüfung*. Dissertationsschrift der Fakultät Verfahrenstechnik und technische Kybernetik der Universität Stuttgart, 2002, S.67-74
- [78] MICHELSON, A. A.: *Light waves and their uses*. Chicago, IL: University of Chicago Press, 1961
- [79] SCHLEDDE, R.: Schwingungsmessung mit dem Laser Doppler Vibrometer. In: *Laser*. Essen: Vulkan (1988), S. 116-120
- [80] HALLIDAY, D., RESNICK, R.: *Fundamentals of physics*. New York: J. Wiley & Sons, 3. Auflage, 1988
- [81] POLYTEC GmbH (Hrsg.): *Laser Doppler Vibrometer. 2001 - Firmenschrift*
- [82] KROHN, N.: *Nichtlineares dynamisches Materialverhalten zur defektselektiven zerstörungsfreien Prüfung*. Dissertationsschrift der Fakultät Verfahrenstechnik und technische Kybernetik der Universität Stuttgart, 2002. S. 67
- [83] SOLODOV, I.; PFLEIDERER, K.; BUSSE, G.: Nondestructive characterization of wood by monitoring of local elastic anisotropy and dynamic nonlinearity. In: *Holzforschung*, 58 (2004), S. 504-510

-
- [84] MONCHALIN, J.-P.; NERON, C.: *Laser-Ultrasonics for Inspection and Characterization of Aeronautic Materials*. In: 7th ECNDT „NDT at Work“, Proceedings Vol 1, 1998, S. 19-26
- [85] PFLEIDERER, K.; SOLODOV, I.; BUSSE, G.: *Advanced Nonlinear Ultrasonic Imaging of Cracked Defects*. In: Proc. of World Conference of Ultrasound/Ultrasonics International (WCU/UI 2005), Beijing, China, (im Druck)
- [86] BALLAD, E. M.; VEZIROV, S. Yu.; PFLEIDERER, K.; SOLODOV, I. Yu.; BUSSE, G.: Nonlinear modulation technique for NDE with air-coupled ultrasound. In: *Ultrasonics* Volume 42, Issues 1-9, (2004), S. 1031-1036
- [87] SCHNEIDER, H (Hrsg.): *WHIPOX™, ein innovativer oxidkeramischer Faser-verbundwerkstoff für Hochtemperatur-Anwendungen*. DLR-Institut für Werkstoffforschung, URL <http://www.whipox.de/>. Aktualisierungsdatum: 2005, mailto: hartmut.schneider@dlr.de. – DLR Köln
- [88] MOCK, W.: Paris Air Show: Aus für den Wunderstoff Glare? In: *VDI-Nachrichten* (2005-06-17), Nr. 24, S. 4
- [89] BUCUR, V.: *Nondestructive Characterization and Imaging of Wood*. Berlin: Springer, 2003
- [90] PFLEIDERER, K.; BUSSE, G.: *Non-destructive testing for health monitoring of adaptive structures*. In: Van Hemelrijck, D.; Anastasopoulos, A. and Melanitis, N. E. (Hrsg.): *Emerging Technologies in Non Destructive Testing*, Balkema, Rotterdam, 2004, S. 261-264
- [91] VAN DEN ABEELE, K.; DE VISSCHER, J.: *Damage assessment in Reinforced concrete using nonlinear vibration technique*. In: Proc. 15th ISNA, hrsg. von W. Lauterborn; T. Kurz, Am. Institute of Physics, 2000, S. 341.
- [92] KOROTKOV; A. S.; SUTIN, A. M.: Modulation of ultrasound by vibrations in metal constructions with cracks. In: *Acoustics Letters*, V. 18 (1994) S. 59
- [93] JOHNSON, P. A.: The new wave in acoustic testing. In: *Materials world* (1999), S. 544
- [94] SOLODOV, I.; PFLEIDERER, K.; BUSSE, G.: *Acoustic Waves in Non-Destructive Testing: From Linear to Non-Linear*. In: Proc. of 18th Int. Conf. on Acoustics, Kyoto, Japan, 2004, Vol. III, S. 2103-2166
- [95] PFLEIDERER, K.; WAGNER, H.; DRECHSLER, K; BUSSE, G.: *Application and potential of emerging NDE-methods for carbon fibre reinforced composites*. In: Drechsler K. (Hrsg.): Proc. 27th SAMPE Europe Conference 2006., (im Druck)

- [96] KROHN, N.; DILLENZ, A.; NIXDORF, K.; VOIT-NITSCHMANN, R.; BUSSE, G.: NDT of shape adaptive structures. In: *NDT&E international* 34 (2001), S. 269 - 276
- [97] HEIDENREICH, B.: *Faserverstärkte Keramiken*. DLR-Institut für Bauweisen- und Konstruktionsforschung (IBK), Prof. Voggenreiter (Hrsg.). URL <http://www.st.dlr.de/BK/ibk-index.html>. – Aktualisierungsdatum: 28.11.2005. mailto: Bernhard.Heidenreich@dlr.de. – Univ. Stuttgart
- [98] PFLEIDERER, K.; AUFRECHT, J.; SOLODOV, I. Yu.; BUSSE, G.: *Multi-frequency ultrasonic NDE for early defect recognition and imaging*. In Proc. IEEE Int. Ultrasonics, (Montréal 2004), S. 693-696
- [99] SOLODOV, I. Yu.; PFLEIDERER, K.; WACKERL, J.; BUSSE, G.: *New modes of Nonlinear Ultra-sonic Resonance Spectroscopy (NURS) for early defect recognition and imaging*. In: CFA/DAGA 2004, Strasbourg, S. 717-718
- [100] GUPTA, V. B.; KOTHARI, V. K.: *Manufactured Fibre Technology*. London: Chapman and Hall, 1997
- [101] PFLEIDERER, K.; SOLODOV, I.; BUSSE, G.: Nichtlineare Spektralanalyse zur bildgebenden Defektfrüherkennung. In: *DGZIP Berichtsband 94, V46*, Jahrestagung Rostock, 2005, 6 Seiten (CD-ROM)

Lebenslauf

seit 01/01	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde (IKP), Universität Stuttgart.
	Auszeichnungen
2001	Lewa-Preis der Fakultät für Verfahrenstechnik der Universität Stuttgart für die Diplomarbeit.
1995	2. Platz Konstruktionswettbewerb Feinwerktechnik.
10/93–11/00	Diplom-Studium des Allgemeinen Maschinenbaus, Universität Stuttgart
07/92–07/93	Wehrdienst: Ausbildung zum Kraftfahrer (Lkw) und Leiter Gerätegruppe.
08/89–07/92	Technisches Gymnasium, Backnang, Abitur.
08/79 – 07/89	Besuch von Grund- und Realschule in Backnang.