Interferometrische Bauteilprüfung, Schadenserkennung und Ermittlung der modalen Parameter mittels dynamischer Belastung

Dissertation

zur Erlangung des Grades

des Doktors der Ingenieurwissenschaften

der Naturwissenschaftlich - Technischen Fakultät

der Universität des Saarlandes

von

Wassili Buerakov

Saarbrücken

2016

Tag des Kolloquiums:	07. Juni 2017
Dekan:	Prof. Dr. Guido Kickelbick
Berichterstatter:	Priv.-Doz. Dr. Martin Spies
	Prof. Dr.-Ing. Michael Schuth
Vorsitz:	Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre
Akad. Mitarbeiter	Dr.-Ing. Frank Aubertin

Berichte aus der Werkstofftechnik

Wassili Buerakov

Interferometrische Bauteilprüfung, Schadenserkennung und Ermittlung der modalen Parameter mittels dynamischer Belastung

Shaker Verlag
Aachen 2017

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zugl.: Saarbrücken, Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5379-1
ISSN 0945-1056

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Für die Anregung zu der Thematik und die herausragende persönliche Betreuung der vorliegenden Arbeit bedanke ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Schuth. Er gab mir wertvolle Vorschläge und unterstützte mich während der ganzen Promotionszeit.

Mein besonderer Dank gilt Priv.-Doz. Dr. rer. nat. habil. Martin Spies für die Motivation, fachliche Unterstützung und für die Übernahme des Hauptberichts. Das entgegen-gebrachte Vertrauen ermöglichte ein selbständiges Arbeiten. Ohne seine kontinuierliche Unterstützung, wertvollen Vorschläge wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Gleichfalls möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. S. Diebels, der als wissenschaftlicher Begleiter für die Arbeit zur Verfügung stand, für das entgegengebrachte Interesse und Hilfsbereitschaft ganz herzlich bedanken.

Außerdem bedanke ich mich bei Prof. Dr. L. Yang für die herausragende Unterstützung während des Forschungsaufenthalts an der Oakland University.

Außerdem möchte ich mich noch bei meinen Eltern und meinen Geschwistern bedanken, die mir immer zur Seite standen.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 1

1.1 Stand der Technik 4

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit 8

2. Grundlagen der Strukturdynamik 13

2.1 Mechanische Schwingungen 14

2.1.1 Bestimmen der Eigenfrequenzen eines Systems ohne Dämpfung 15

2.1.2 Bestimmen der Eigenfrequenzen eines Systems mit Dämpfung 17

2.2 Dynamische Antwort eines Systems 19

2.3 Zustandsraumdarstellung 22

2.4 Experimentelle Modalanalyse 25

2.4.1 Identifikationsverfahren 26

2.4.1.1 Verfahren der Modalanalyse - Zeitbereich 27

2.4.1.2 Verfahren der Modalanalyse - Frequenzbereich 28

3. Grundlagen der interferometrischen Messtechnik 29

3.1 Interferenz 30

3.1.1 Interferometrische Überlagerung von Licht 32

3.1.2 Speckle-Effekt 33

3.2 Interferometrische Speckle-Messverfahren 36

3.2.1 Sensoraufbau der ESPI 39

3.2.2 Sensoraufbau der ESPSI 42

3.2.3 Mechanische Grundlagen der Shearografie 46

3.2.4 Mechanische Grundlagen der Holografie (ESPI) 50

3.2.5 Messung von In-Plane-Anteilen mittels der ESPI und der ESPSI 51

3.3 Signalverarbeitung 56

3.3.1 Live-Subtraktion 56

3.3.2 Phasenschiebe-Verfahren 59

3.3.2.1 Zeitliche Phasenschiebe-Verfahren 61

3.3.2.2 Räumliche Phasenschiebe-Verfahren 65

3.3.2.3 Vergleich der zeitlichen und der räumlichen Phasenschiebung 95

3.3.3 Filterung der Messdaten 99

3.3.3.1 Mittelwert-Filter 101

3.3.3.2 Median-Filter 101

3.3.3.3 Filterung bei der räumlichen Phasenschiebung 105

3.3.4 Demodulierung von Interferogrammen 108

3.3.4.1 1D-Demodulierung 109

3.3.4.2 2D-Demodulierung 111

3.3.4.3 3D-Demodulierung 114

3.3.4.4 Nullpunktbestimmung 115

3.3.5 Verformungsmessung mittels der Shearografie 117

4. Detektion von Fehlstellen mittels der Shearografie und der Holografie 121

4.1 Anregungsarten 123
4.1.1 Statische Anregung 124
4.1.2 Induktive Anregung 125
4.1.3 Optische Anregung 126
4.1.3.1 Ausbreitung und Interferenz von thermischen Wellen 128
4.1.3.2 Optische Laser-Anregung 130
4.1.3.3 Optische Puls-Anregung 131
4.1.3.4 Optisch transiente Anregung 133
4.1.3.5 Optische Dual-Burst-Anregung 135
4.1.3.6 Optische Lockin-Anregung 136
4.1.4 Ultraschall-Anregung 138
4.1.4.1 Ultraschall-Anregung zwecks Defektuferreibung 139
4.1.4.2 Ultraschall-Anregung zwecks Erzeugung von Lamb-Wellen 140
4.1.5 Dynamische Anregung 151
4.1.6 Hydrostatische Anregung 154
4.2 Ergebnisse der Untersuchungen bei Fehlstellendetektion 156
4.2.1 Detektion von Fehlstellen an schwer zugänglichen Stellen 156
4.2.2 Untersuchung von Mikroproben 162
4.2.2.1 Laserangeregte Untersuchung von Mikromembranen 165
4.2.3 Fehlstellendetektion mittels thermischer Anregung 167
4.2.4 Fehlstellendetektion mittels dynamischer Anregung 172
4.2.5 Fehlstellendetektion mittels hydrostatischer Anregung 173
4.2.6 Fehlstellendetektion mittels Lamb-Wellen 176
4.2.6.1 Zusammenfassung der Untersuchungen mittels Lamb-Wellen 179
4.3 Vergleich der Anregungsarten 180
5. Interferometrische Modalanalyse 185
5.1 Verfahren der interferometrischen Modalanalyse 187
5.1.1 Doppelbelichtungsverfahren 187
5.1.2 Shearografische Modalanalyse mittels der Zeitmittelungs-Methode 189
5.1.3 Stroboskopische Verfahren der interferometrischen Modalanalyse 191
5.1.3.1 Einsatz gepulster Laserdioden 192
5.1.3.2 Einsatz eines akustooptischen Modulators (AOM) 194
5.2 Kombiniertes neuartiges Verfahren 196
5.2.1 Versuchsaufbau zur Erfassung der Impulsantwort 196
5.2.2 Bestimmung der Eigenfrequenzen mittels Impulsantwort 198
5.3 Qualitative Schwingungsanalyse 201
5.4 Quantitative Schwingungsanalyse 203
5.4.1 Experimentelle Modalanalyse einer Scheibenbremse 203
5.4.2 Experimentelle Modalanalyse einer Aluminiumplatte 210
6. Diskussion und Ausblick 213
6.1 Schlussfolgerung 213
6.2 Ausblick 218
7. Literaturverzeichnis 221

Abkürzungen

AOM	Akustooptischer Modulator
AR	Autoregressives Modell
ARMA	Autoregressive moving average
ARX	Autoregressive with exogenous input
CCD	Charge Coupled Device
CE	Complex-Exponential
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
ERA	Eigensystem-Realisierungs-Algorithmus
ESPI	Elektronische Speckle-Pattern-Interferometrie
ESPSI	Elektronische Speckle-Pattern-Shearing-Interferometrie
FEM	Finite Elemente Methode
FFT	Fast Fourier Transform
FRF	Frequency Response Funktion
ITD	Ibrahim Time Domain Method
IRF	Impulse Response Funktion
LPM	Linear Prediction Method
LSCE	Least Square Complex-Exponential
MDOF	Multiple Degree of Freedom
MIMO	Multiple Input - Multiple Output
Nd:YAG	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser
PZT	Keramikmaterialien auf der Basis von Blei-Zirkonat-Titanat
RFP	Polyreference Frequency Domain Method
SDOF	Single Degree of Freedom
SIMO	Single Input - Multiple Output
SISO	Single Input - Single Output
TTL	Transistor-Transistor-Logik
ZfP	Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung

Formelzeichen

A	-	Komplexe Amplitude
$\underline{\underline{A}}_S$	-	Systemmatrix
A_F	W/m^2	Hintergrundintensität im Frequenzbereich
$A_{1...n}$	-	Integrationskonstanten
A_T	K	Temperaturamplitude
A_0	-	Antisymmetrische Schwingungsform einer Lamb-Welle
$\underline{a}$	m/s^2	Beschleunigung
a_F	W/m^2	Hintergrundintensität
a_n	-	Amplitude von Lichtwellen (hier dimensionslos)
$\underline{\underline{B}}$	-	Eingangsmatrix
$B_{1...n}$	-	Integrationskonstanten
b	W/m^2	Gemessene Lichtintensität
$\underline{\underline{C}}$	N/m	Steifigkeitsmatrix
$\underline{\underline{C}}_A$	-	Ausgangsmatrix
c	N/m	Federsteifigkeit
c_L	m/s	Lichtgeschwindigkeit
$\underline{c}_S$	m/s	Geschwindigkeit der Scher- oder Sekundärwelle
$\underline{c}_P$	m/s	Geschwindigkeit der Druckwelle
$\{\underline{c}\}$	-	Ausgangsvektor des Zustandraummodells
D	m	Durchmesser der Raumblende
D_A	-	Antisymmetrische Lamb-Welle
$\underline{\underline{D}}_D$	-	Durchgangsmatrix
D_n	%	Modale Dämpfung
D_V	-	Dämpfungsverhältnis
D_S	-	Symmetrische Lamb-Welle
$\underline{d}_V$	m	Verschiebungsvektor
d	m	Durchmesser der Speckles
d_{Pl}	m	Dicke einer Platte
E	N/m^2	Elastizitätsmodul

$\{\underline{e}\}$	-	Einheitsvektoren
$\underline{F}$	N	Kraft
F_{Zahl}	-	Fresnel-Zahl
F_{ω}	-	Fourier-Transformierte einer Funktion
$\underline{f}$	N	Kraftvektor
f_{Abtast}	$1/s$	Abtastfrequenz
f_E	$1/s$	Eigenfrequenz
f_G	$1/m$	Grundfrequenz (räumliches Phasenschieben)
f_L	$1/s$	Anregungsfrequenz (Thermische Lockin-Anregung)
f_0	$1/m$	Trägerfrequenz
$\overline{g}$	-	Mittlerer Grauwert
g_{Pixel}	-	Grauwert eines Pixels
H	m/N	Übertragungsfunktion im Frequenzbereich
$\underline{\underline{H}}_V$	$\mu m/m$	Matrix der Verformungsgradienten
h	m/N	Übertragungsfunktion im Zeitbereich
I	W/m^2	Intensität der Lichtstrahlung
I_0	W/m^2	Hintergrundintensität
$\underline{\underline{I}}_E$	-	Einheitsmatrix
I_H	W/m^2	Verdoppelte Hintergrundintensität ($2 \cdot I_0$)
I_m	W/m^2	Intensitätsmodulation
I_{Mittel}	W/m^2	Mittlere Intensität
$\underline{i}_E$	-	Einheitsvektor bei Demodulierung in x-Richtung
J	-	J-Integral
J_0	-	Besselsche Funktion erster Art nullter Ordnung
$\underline{j}$	W/m^2	Wärmestromdichte
$\underline{j}_E$	-	Einheitsvektor bei Demodulierung in y-Richtung
$\underline{\underline{K}}$	kg/s	Dämpfungsmatrix
K_F	W/m^2	Lichtintensität mit Phaseninformation im Frequenzbereich
$\underline{\underline{K}}_{Filter}$	-	Filterkern
k	-	Reibbeiwert

$\underline{k}_S$	$1/m$	Empfindlichkeitsvektor
k_1	$1/m$	Faktor der Wellenzahl für Scher- bzw. Sekunderwellen
k_2	$1/m$	Faktor der Wellenzahl für Druckwellen
l	m	Verschiebungsweg eines Piezospiegels
$\underline{\underline{M}}$	kg	Massenmatrix
m	kg	Masse
N	-	Streifenordnung
n	-	Zählvariable
$p(I)$	-	Wahrscheinlichkeitsdichte der Intensität
q	-	Generalisierte Verschiebungen
P	-	Messobjektpunkt
R	m/Ns	Residuum
R^*	m/Ns	Residuum konjugiert komplex
R	-	Reflexionskoeffizient
$\underline{\underline{r}}_{i,j}$	-	Residuenfeld (Demodulierung)
S_G	-	Summe der Gewichtungsfaktoren
S_0	-	Symmetrische Schwingungsform einer Lamb-Welle
s	-	Komplexer Frequenzparameter der Laplace-Transformation
$\Delta\underline{s}$	m	Verschiebung eines Messobjektpunktes, Verformung
T	K	Temperatur
T_K	-	Transmissionskoeffizient
T_S	s	Schwingdauer
t	s	Zeit
t_M	s	Untersuchungszeit
u	m	In-Plane-Verformung, Verschiebung
$\{\underline{u}\}$	-	Eingangsvektor des Zustandraummodells
V	m^3	Volumen eines Körpers
$\underline{v}$	m/s	Geschwindigkeit
W	m	Faktor zum Bestimmen von Abständen
W_D	$K \cdot m^2/W$	Thermischer Kontaktwiderstand verursacht (innere Defekte)

w	m	Verformung (out-of-plane)
w_S	m	Verformung resultierend aus Randbedingungen
X	m	Komplexe Verschiebung
$\underline{x}$	m	Verschiebung/Auslenkung
$\underline{\dot{x}}$	m/s	Geschwindigkeit
$\underline{\ddot{x}}$	m/s^2	Beschleunigung
$\underline{y}$	-	Ausgangsgröße des Zustandraummodells
Z	$K \cdot m^2/W$	Thermische Impedanz
z	m	Abstand vom Messobjekt bis zur Brennebene
z_B	m	Brennweite des Objektivs
$z_{B,K}$	m	Abstand von der Kamera bis zur Raumblende
$\{\underline{z}\}$	-	Zustandsvektor

Griechische Symbole

α	rad	Beleuchtungswinkel
α_L	m^2/s	Temperaturleitfähigkeit
α_T	$1/K$	Wärmeausdehnungskoeffizient
β	rad	Zusätzliche Phasenschiebung
γ	-	Modulation des Interferenzterms
δ	m	Shearbetrag
δ_Δ	rad	Phasenänderung
δ_W	rad	Shearwinkel
ε	$\mu m/m$	Dehnung (Lamb-Wellen)
λ	m	Lichtwellenlänge
λ_D	$1/s^2$	Eigenwert eines Systems mit Dämpfung
λ_E	$1/s^2$	Eigenwert eines Systems ohne Dämpfung
$\lambda_{F,r}$	$1/s^2$	Eigenwerte (Index r ist eine Zählvariable)
λ_L	N/m^2	Erste Lamé-Konstante

μ	m	Thermische Diffusionslänge
μ_L	N/m^2	Zweite Lamé-Konstante
υ	-	Poissonzahl
ξ	$1/m$	Wellenzahl (Lamb-Wellen)
ρ	kg/m^3	Dichte
ϕ	rad	Phase einer Lichtwelle
φ	rad	Relative Phasenlage
φ_L	rad	Relative Phasenlage (Lockin-Anregung)
$\underline{\varphi}_x^w$	-	Gradient der gefalteten Phase eines Punktes
σ	$1/m$	Komplexe Wellenzahl
τ	N/m^2	Mechanische Spannungen
Φ_{El}	Nm	Das elastische Potential der transversalen Schallwelle
$\underline{\psi}$	m	Eigenvektor
$\underline{\underline{\Psi}}$	m	Matrix der Eigenvektoren
Ψ_{El}	Nm	Das elastische Potential der longitudinalen Schallwelle
$\underline{\psi}_E$	-	Gradient der entfalteten Phase
ψ_P	rad	Phase eines Punktes
ω	$1/s$	Eigenkreisfrequenz
ω_D	$1/s$	Eigenkreisfrequenz der gedämpften Schwingung
ω_L	$1/s$	Lockin-Kreisfrequenz
ω_0	$1/s$	Anregungskreisfrequenz
ω_E	$1/s$	Eigenkreisfrequenz eines Systems ohne Dämpfung
Δ	rad	Relative Phasenänderung
Δ'	rad	Entfaltete relative Phasenänderung
$\underline{\nabla}$	-	Gradientenoperator

Zusammenfassung

Hauptgegenstand dieser Arbeit ist die Weiterentwicklung der interferometrischen Verfahren ESPSI (Shearografie) und ESPI (Holografie) für den Einsatz in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. Außerdem ist die noch existierende Einsatzgrenze der Speckle-Messverfahren in der experimentellen Modalanalyse erweitert worden. Es sind neben der weiterentwickelten, räumlichen Phasenschiebung, die anhand von lediglich 2 Aufnahmen die relative Phase ermittelt, zwei neuartige Messgeräte zur Untersuchung von Mikrostrukturen (Mikroferoskop) und für Messungen an schwer zugänglichen Stellen (Interferoskop) optimiert und erprobt worden. Zur Detektion von Fehlstellen kommen nicht nur bereits etablierte Anregungs-Verfahren zum Einsatz, sondern die noch wenig bis gar nicht erforschten Methoden. Dazu zählen die Fehlstellendetektion mittels elastischer Wellen (Lamb-Wellen), oder laserangeregte Untersuchungen von Mikroproben. Die Lamb-Wellen interagieren bei der Ausbreitung mit der Fehlstelle und verraten somit die Position und die Form eines Defektes. Die Visualisierung der Lamb-Wellen erfolgt mittels der Shearografie jedoch mit räumlicher Phasenschiebung. Zur Bestimmung von Eigenschwingungen kommt ein neues Verfahren zum Einsatz, welches eine Kombination aus impulsangeregter Modalanalyse mit Hilfe von Beschleunigungssensoren und der Speckle-Messtechnik darstellt. Der Vorteil besteht in der schnelleren Detektion und der effizienten Visualisierung von Resonanz-Schwingungen.

Abstract

The primary objective of this dissertation is the further development of the interferometric techniques ESPSI (Shearography) and ESPI (Holography) used in non-destructive testing of materials. Moreover it aims at reducing the limitations of use which still exist when employing speckle related measuring procedures in experimental modal analysis. In addition to advanced spatial phase shifting which uses only two images to determine a relative phase, two new measuring devices for examining microstructures (microferoscope) and for examining hard to reach areas (interferoscope) will be presented. To detect defects not only are already established excitation methods used, but also methods that have been relatively less explored or even not yet researched are employed. For example, the use of elastic waves (Lamb waves) in detecting defects or the use of laser excited examination of micro samples. The Lamb wave interacts with the defect during its propagation thereby revealing the position and shape of the defect. The Lamb waves are measured using shearography with spatial phase shift. A new method is used to determine the values of natural frequencies. This method combines the classic impulse excited modal analysis using an accelerometer with shearography or holography. The big advantage of this is the quick detection and the possibility of efficient visualization of resonance vibrations.