

Alexander Guralnik

Modalanalyse mit Tracking-Interferometern

WZL
RWTHAACHEN

 **Fraunhofer**
IPT

Modalanalyse mit Tracking-Interferometern

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Alexander Guralnik

Berichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Tag der mündlichen Prüfung: 01. Juli 2014

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Alexander Guralnik

Modalanalyse mit Tracking-Interferometern

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. F. Klocke

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. G. Schuh

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher

Prof. Dr.-Ing. R. H. Schmitt

Band 7/2015



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Alexander Guralnik:

Modalanalyse mit Tracking-Interferometern

1. Auflage, 2015

Apprimus Verlag, Aachen, 2015
Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien
an der RWTH Aachen
Steinbachstr. 25, 52074 Aachen
Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

ISBN 978-3-86359-309-4

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2014)

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule in Aachen.

Meinem Doktorvater Herrn Professor Christian Brecher danke ich ganz besonders für sein Vertrauen und für die wertvollen Diskussionen zu dieser Arbeit. Die Tätigkeit an seinem Lehrstuhl gab mir die besonderen Einblicke in die industrielle Praxis, die das Forschungsthema dieser Arbeit motivierten. Herrn Professor Michael Zäh danke ich für die Verfassung des zweiten Gutachtens und Herrn Professor Uwe Reisinger für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission.

Meinen Kollegen im Projekt DynaTrac Herrn Mark Wissmann, Etalon AG und Herrn Daniel Berk, sigma3D GmbH danke ich ganz herzlich für die fruchtbare, spannende und angenehme Zusammenarbeit. Herrn Heiko Paluszek, sigma3D GmbH und Herrn Dr. Heinrich Schwenke, Etalon AG danke ich für die Förderung und Unterstützung des Projekts in Ihren Unternehmen.

Herrn Dr. Severin Hannig, Herrn Dr. Dodwell Manoharan, Herrn Birk Brockmann und Herrn Stephan Bäumler danke ich ganz herzlich für die Diskussionen bei der Erforschung des Themas und für die Anmerkungen zu meinem Manuskript, die die vorliegende Arbeit erheblich beeinflusst und zum Erfolg meines Promotionsverfahrens maßgeblich beigetragen haben. Meinen Kolleginnen und Kollegen am WZL insbesondere meiner Gruppe danke ich für die gemeinsame Zeit am Institut, die ich nicht missen möchte. Frau Shaghayegh Khedri, Herrn Ahmed Assabiki, Herrn Ali Rajaei und Herrn Damien Rouche danke ich für die Mitwirkung an diesem Thema als studentische Hilfskräfte sowie im Rahmen ihrer Studien-, Bachelor- und Masterarbeiten. Frau Linda Härter bin ich unter Anderem für die Unterstützung am Prüfungstermin zu großem Dank verpflichtet. Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Karsten Meier und Herrn Axel Kaunzner für ihre Unterstützung bei der Entwicklung und dem Aufbau der Technik und bei der Durchführung der Versuche bedanken.

Ganz herzlich danke ich meiner Familie, insbesondere meinen Eltern und meiner Schwester Viktoria, die mir während meines gesamten Ausbildungsweges Rückhalt und Sicherheit gegeben haben. Sie haben mich unterstützt, meinen Werdegang durch klugen Rat gelenkt und sind in ihrem eigenen Tun, mit ihrem Ehrgeiz und mit ihrer Hartnäckigkeit auch heute meine Vorbilder. Für ihre selbstlose Unterstützung während meiner gesamten Promotionszeit, ihre Geduld und ihre ansteckende Lebensfreude danke ich ganz herzlich meiner lieben Verlobten Julia Hage. Unsere gemeinsame Zukunft war ein starker Ansporn für die Fertigstellung dieser Arbeit. Jetzt freue ich mich auf unsere bevorstehende Hochzeit.

Zuletzt danke ich dem interessierten Leser. Erst er verleiht diesem Werk einen Sinn!

München, im Januar 2015

Alexander Guralnik

Inhaltsverzeichnis

Content

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	5
2.1	Schwingungsmessung und Modalanalyse	5
2.1.1	Mathematische Grundlagen	5
2.1.2	Einsatzgebiete, Vorgehensweise am Beispiel von Werkzeugmaschinen.....	19
2.1.3	Messgeräte zur Schwingungsmessung.....	26
2.2	Geometriemessung mit Laser-Tracking-Interferometern.....	33
2.2.1	Tracking-Interferometer.....	33
2.2.2	Positionssensitive Diode	35
2.2.3	Grundlagen der geometrischen Messung	37
2.3	Zusammenfassung des Forschungsbedarfs	39
3	Aufgabestellung und Zielsetzung	41
4	Messmethode und Entwicklung des Messgerätes	43
4.1	Messmethode und Anforderungen an ein Messsystem	43
4.1.1	Modalanalyse im Einstrahlverfahren	43
4.1.2	Ableitung der Anforderungen an ein Messsystem.....	45
4.2	Ableitung des Hardwareaufbaus, Umsetzung	49
4.2.1	Aufbau des TI-Demonstrators, notwendige Zusatzhardware	49
4.2.2	Strahlpropagation im Reflektor und 1D-Schwingungsmessung	52
4.2.3	Koordinatentransformation der Schwingungsdaten.....	62
4.3	Ableitung des Softwareaufbaus, Implementierung	68
4.3.1	Gesamtaufbau.....	68
4.3.2	Geometrieerstellung.....	71
4.3.3	Datenstruktur.....	72
5	Untersuchung der Leistungsfähigkeit	77
5.1	Aufstellung und Bewertung der Einflussfaktoren.....	77
5.1.1	Einflüsse auf die Schwingungsmessung	78
5.1.2	Einflüsse auf die Erfassung der Geometrie und Ausrichtung	91
5.1.3	Nicht quantifizierbare Einflussfaktoren	99
5.2	Modalanalyse in Fallstudien	101
5.2.1	Grundlagen der Fallstudien	101
5.2.2	Gesamtbewertung.....	115
6	Zusammenfassung und Ausblick	101
7	Literaturverzeichnis	v

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

Formula Symbols and Abbreviations

Lateinische Großbuchstaben

Zeichen	Einheit	Benennung
A, B, C	mm	Längenangaben
A_E	V	Amplitude der elektrischen Feldstärke
B_E	V	Elektrische Feldstärke der elektromagnetischen Welle
U_C	V	Signal der Ansteuerung im Frequenzbereich
\bar{C}	Ns/m	Dämpfungsmatrix
D	-	Dämpfungsgrad
F	N	Kraft
G	$\mu\text{m/N}$ $\text{m/s}^2/\text{N}$	Nachgiebigkeitsfrequenzgang bzw. Beschleunigbarkeitsfrequenzgang
H	diverse	Übertragungsfunktion
I_E	W/m^2	Intensität des elektrischen Felds
I	A	Strom
K	$\text{N}/\mu\text{m}$	Statische Nachgiebigkeit
\bar{K}	$\text{N}/\mu\text{m}$	Statische Steifigkeitsmatrix
\bar{M}	kg	Massenmatrix
M'	kg	Effektive Masse
\bar{R}	-	Rotationsmatrix
S'	$\mu\text{m/N}$	Restnachgiebigkeit
S_i	diverse	Fouriertransformierte von i
S_i^*	diverse	Komplex-konjugierte Fouriertransformierte von i
S_{ij}	diverse	Kreuzleistungsspektrum von i und j , bzw. Autoleistungsspektrum bei $i = j$
$\overline{S_{ij}}$	diverse	Gemittelttes Leistungsspektrum
\bar{T}	-	Transformationsmatrix
T_s	s	Abtastzeit der Datenerfassung

U	V	Spannung
X	μm	Verlagerung im Frequenzbereich

Lateinische Kleinbuchstaben

Zeichen	Einheit	Benennung
a, b, c, d	mm	Längenangaben
$[b, h, v]^T$	μm	Verlagerung in Strahlrichtung, horizontaler und vertikaler Richtung (<i>beam, horizontal vertical</i>)
u_c	V	Spannung der Ansteuerung im Zeitbereich
f, f_0	Hz	Frequenz, Eigenfrequenz
k	N/ μm	Statische Steifigkeit
m	kg	Masse
n	-	Anzahl Moden
r	mm	Abstand, Strahllänge
s	s^{-1}	Laplace-Parameter
v	m/s	Geschwindigkeit
x, y, z	μm	Verlagerung in X-, Y-, Z-Richtung

Griechische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Benennung
α_k	-	Gewichtungsfaktor, Skalierungsfaktor
α, β, γ	$^\circ, \text{rad}$	Winkel bei der Drehung um die Achse X, Y, Z
δ	Ns/m	Dämpfung
γ^2	-	Kohärenz
H	μm	Störanteil im Verlagerungssignal im Frequenzbereich
η	μm	Störanteil im Verlagerungssignal im Zeitbereich
θ	$^\circ, \text{rad}$	Rechtwinkligkeitsfehler
λ	nm	Laserwellenlänge
μ_0	s^{-1}	Realteil des Eigenwerts der Bewegungsgleichung
N	N	Störanteil im Kraftsignal im Frequenzbereich

ν	N	Störanteil im Kraftsignal
ν_0	s^{-1}	Imaginärteil des Eigenwerts der Bewegungsgleichung
τ	$^\circ, \text{rad}$	Einbauwinkel der PSD
φ	$^\circ, \text{rad}$	Winkel, Azimutwinkel
$\bar{\Psi}$	-	Eigenvektormatrix
ψ	$^\circ, \text{rad}$	Zenitwinkel
$\vec{\psi}$	-	Eigenvektor
ω, ω_0	s^{-1}	Kreisfrequenz, Eigenkreisfrequenz

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
PSD	Positionssensitive Diode
ADM	Absolutdistanzmesseinheit
ADC	Analog-Digitalwandler (<i>analog digital converter</i>)
CAD	Computer aided design
DAC	Digital-Analogwandler (<i>digital analog converter</i>)
DAQ	Data acquisition device
FEM	Finite Elemente Methode
FFT	Fast fourier transformation
FRAC	Frequency response assurance criterion
KS	Koordinatensystem
LDV	Laserdopplervibrometer
F	Forderung
MAC	Modal assurance criteria
SMR	Spherical mounted reflector
TI	Tracking-Interferometer
W	Wunsch
Wst	Werkstück
WZM	Werkzeugmaschine
Wzg	Werkzeug

1 Einleitung

Das Thema dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Messmethode und eines Messgeräts als Alternative zu den konventionellen Systemen für die Durchführung der experimentellen Modalanalyse. Als Demonstrator wird in dieser Forschungsarbeit das in der geometrischen Präzisionsmessung in großen Raumvolumina etablierte Messgerät Laser-Tracking-Interferometer weiterentwickelt.

Die experimentelle Modalanalyse ist ein Verfahren der messtechnischen Untersuchung der strukturdynamischen Eigenschaften von Objekten. Modalanalysen werden an Fahrzeugen, Flugzeugen, Produktionsmitteln, Brücken und Gebäuden, Musikinstrumenten, Sportgeräten und an vielen anderen Strukturen durchgeführt. Sie spielt heute in zahlreichen Branchen eine essentielle Rolle bei der Entwicklung von Produkten, der Identifikation von dynamischen Schwachstellen und Schäden, der Beurteilung der Sicherheit und der Bewertung der Qualität. In einigen Branchen, wie der Bau- und der Produktionsmittelindustrie, haben sich Dienstleistungsmärkte für die experimentelle Modalanalyse etabliert.

Die rasante Zunahme des Simulationseinsatzes in der Strukturdynamik, mit der die Modalanalyse am virtuellen Prototyp vor der Herstellung des Produkts durchgeführt werden kann, scheint den Bedarf an experimentellen Modalanalysen zusätzlich zu erhöhen. Die hohe Unsicherheit bei der Modellierung der Koppelstellen zwischen Komponenten und insbesondere die Unkenntnis der Dämpfung machen einen Abgleich der Simulation mit dem Experiment heute unumgänglich. In manchen Branchen werden so Prozesse der iterativen Optimierung mit virtuellen Prototypen und realen Produkten etabliert.

Bei Werkzeugmaschinen können ungünstige dynamische Eigenschaften zu Schwingungen im Bearbeitungsprozess führen, die die nutzbare Leistung und damit die Produktivität erheblich reduzieren, den Werkzeugverschleiß und die Wartungsintensität der Maschine erhöhen. Dies senkt die Produktqualität und führt zu einer erheblichen Steigerung des Rüstaufwands. In der Produktionsmittelbranche dient die experimentelle Modalanalyse zur Beurteilung von Maschinen, Identifikation dynamischer Schwachstellen, Ableitung von Optimierungsmaßnahmen und zur Steigerung der Qualität der virtuellen Prototypen.

Mit dem vermehrten Einsatz der Modalanalyse wachsen die Anforderungen an ein schnelles, effizientes und vielseitiges Untersuchungsverfahren. Als Kriterien seien in diesem Zusammenhang die Automatisierung, die je nach Verfahren sehr zeitaufwendige Geometrieaufnahme des Untersuchungsobjektes und die Eignung zur Untersuchung von teilumhausten und verdeckten Strukturen genannt.

Zwei Messprinzipien mit den zugehörigen Messgeräten haben sich bei der experimentellen Modalanalyse durchgesetzt: die Erfassung der Strukturschwingungen mit dem Laserdopplervibrometer (LDV) und mit Beschleunigungsaufnehmern. Andere Verfahren spielen nur eine untergeordnete Rolle.

3D-scanning-LDV werden vorwiegend bei offenen Oberflächen und dünnen Strukturen in der Automobil- sowie der Luft- und Raumfahrtindustrie eingesetzt. Die Messung erfolgt berührungslos, zügig über große Flächen und beinhaltet die Geometrieaufnahme. Nachteilig ist der erforderliche sehr breite Sichtkorridor auf das Messobjekt und die hieraus folgende schlechte Eignung für die Untersuchung von umhausten Strukturen.

Triaxiale Beschleunigungsaufnehmer werden in allen aufgelisteten Branchen eingesetzt, insbesondere wenn 3D-scanning-LDV aus technischen Gründen aufgrund der Sichtproblematik oder aus wirtschaftlichen Gründen nicht verwendet werden können. Beschleunigungsaufnehmer können an verdeckten Oberflächen der Messobjekte positioniert werden und sind kostengünstiger. Nachteilig ist die erforderliche separate Geometrieaufnahme des Untersuchungsobjektes und die Angabe der Sensororientierung an jedem Messpunkt. Weiterhin kann die Masse des Sensors die Eigenschwingungsformen von besonders leichten Strukturen beeinflussen.

Tracking-Interferometer sind laserbasierte, mobile Kugelkoordinatenmessgeräte. Sie haben sich als Messsysteme für die Justage von Vorrichtungen, in der Präzisionsmontage von Großbauteilen, in der geometrischen Ausrichtprüfung von Anlagen, in der Hallenlayoutplanung, in der Kalibrierung von Robotern und teilweise im Reverse Engineering (z. B. für die messtechnische Digitalisierung von Oberflächenformen) etabliert. Mit einem einzigen Laserstrahl sind ihre Anforderungen an den Sichtkorridor wesentlich geringer als die der 3D-scanning-LDV, die mit drei Laserstrahlen messen. Mit seinen flexiblen Mess- und Steuerungsmöglichkeiten ist das Gerät wesentlich vielseitiger als Beschleunigungsaufnehmer und bietet darüberhinaus Ansätze zur Automatisierung. Der hardwaretechnische Aufbau der heutigen Tracking-Interferometer erlaubt keine hochdynamischen Messungen von kleinsten Bewegungen, wie sie bei der Modalanalyse stattfinden.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung des Einstrahlverfahrens und einer Methode zur Durchführung der experimentellen Modalanalyse mit diesem Verfahren. Das Einstrahlverfahren ist die simultane 3D-Schwingungsmessung mit einem Laserstrahl. Die Untersuchungsmethode beinhaltet alle notwendigen Schritte zur Erstellung einer Modalanalyse: Berechnungsverfahren, Automatisierungslösungen und verfahrensspezifischen Besonderheiten der Datenhaltung. Als Demonstrator-Messgerät wird ein konventionelles Tracking-Interferometer hard- und softwaretechnisch so modifiziert, dass es die entwickelte Untersuchungsmethode zu einem ganzheitlichen Messsystem ergänzt. Das Messsystem soll die Durchführung aller messtechnischen und mathematischen Schritte der experimentellen Modalanalyse ermöglichen. Es soll eine Alternative zu den konventionellen Verfahren darstellen und durch Automatisierung und Reduktion von Bedienerfehlermöglichkeiten einen Zeit- und Qualitätsvorteil gegenüber diesen bieten. Zwar stammen alle in der Arbeit betrachteten Anwendungsfälle aus dem Werkzeugmaschinenbau. Die Einsatzmöglichkeiten des Systems sind jedoch keineswegs hierauf beschränkt.

Introduction

This research work deals with the development of a measurement principle and a measurement device for experimental analysis as an alternative to classical systems today. The demonstrator for the developed method is a redesigned laser tracking interferometer, a measurement device originally used for high precision geometric measurements of large spaces.

The experimental modal analysis is an investigation technique of structural dynamic properties of objects. Modal analyses are applied for automobiles, aircrafts, production facilities, bridges and buildings, musical instruments, sports equipment and structures from many other domains. Today this investigation technique plays an essential role in the development of products, detection of dynamic weak points and damage detection, in safety evaluation, and the validation of quality. In some industrial branches, such as civil engineering and production equipment, service markets for the experimental modal analysis have been established.

The rapid growth in the use and capabilities of simulation programs for structural dynamics – simulative modal analyses can be conducted on virtual prototypes prior to the manufacturing of the actual product – paradoxically seems to fuel the expanding need for experimental investigation. The high uncertainty in interface modeling of components and particularly the lack of knowledge of damping properties result in the inevitable need for verification of simulation results with experimental data. Some industries develop processes of iterative optimization for virtual prototypes and actual physical products.

Poorly balanced dynamic properties of machine tools may lead to chatter vibration that considerably reduce productivity, increase tool wear and shorten necessary service intervals of equipment. Thus, there is a significant reduction of product quality and increase of set-up expenses. In production equipment industry, the experimental modal analysis serves to evaluate machines, identify dynamic weak points, deduce possibilities for optimization and improve quality of virtual prototypes.

With growing application of experimental modal analysis one experiences a growth in requirements on a rapid, efficient and versatile investigation method. Main assessment criteria associated with these points are automation, time expenditure for geometry modeling and the suitability for investigation of partially housed structures. Two measurement principles with their respective measurement devices dominate the field of experimental modal analysis today: vibration measurement using accelerometers and using laser Doppler velocimeters (LDV). Further techniques are of secondary importance.