

VDI

**REIHE 11**  
SCHWINGUNGS-  
TECHNIK



# Fortschritt- Berichte VDI

Dipl.-Inf. Daniel Herfert,  
Berlin

**NR. 353**

## Strukturdynamische Analyse mittels elektromechanischer Schwingungssensoren

BAND  
**1 | 1**

VOLUME  
**1 | 1**



**FernUniversität in Hagen**  
**Schriften zur Informations-  
und Kommunikationstechnik**



# **Strukturdynamische Analyse mittels elektromechanischer Schwingungssensoren**

Dissertation  
zur Erlangung des akademischen Grades  
*Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)*

**der Fakultät für  
Mathematik und Informatik  
der FernUniversität  
in Hagen**

von  
Daniel Herfert  
aus Berlin

Hagen 2021

Gutachter:  
Prof. Dr. Dr. Wolfgang A. Halang, Hagen  
Prof. Dr. Peter Holstein, Ilmenau

Tag der mündlichen Prüfung: 09.09.2021





**REIHE 11**  
SCHWINGUNGS-  
TECHNIK



# Fortschritt- Berichte VDI

Dipl.-Inf. Daniel Herfert,  
Berlin

**NR. 353**

## Strukturdynamische Analyse mittels elektromechanischer Schwingungssensoren

BAND  
**1 | 1**

VOLUME  
**1 | 1**



**FernUniversität in Hagen**  
Schriften zur Informations-  
und Kommunikationstechnik

Herfert, Daniel

## **Strukturdynamische Analyse mittels elektromechanischer Schwingungssensoren**

Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 353. Düsseldorf: VDI Verlag 2021.

148 Seiten, 77 Bilder, 13 Tabellen.

ISBN 978-3-18-335311-8, ISSN 0178-9554

57,00 EUR/VDI-Mitgliederpreis: 51,30 EUR

**Für die Dokumentation:** Strukturdynamik – Modalanalyse – Betriebsschwingformanalyse – Strukturangeregung – Impulshammer – Strukturantwort – Schwingungssensor – Angereicherte Realität – 3D Rekonstruktion – Angereicherte Realität Marker

**Keywords:** Structural Dynamics – Modal Analysis – Operating Deflection Shapes – Structural Excitation – Impulse Hammer – Structural Response – Vibration Sensor – Augmented Reality – 3D Reconstruction – Augmented Reality Marker

Um die Reproduzierbarkeit erzeugter Schwingungen zu erhöhen, wird in der vorliegenden Arbeit zunächst ein Aktor zur Strukturangeregung vorgestellt, der Sensordaten unmittelbar im Gerät ausgewertet und auf Bewegungen des Hammerarms rückkoppelt. Neuartige Algorithmen werden angegeben, die deutlich Strukturkonfiguration und Messaufwände durch automatische Bestimmung der Sensorpositionen und -orientierungen vereinfachen. Sie ermöglichen, untersuchte Strukturen effizient dreidimensional in Form geometrischer Objekte rechnerunterstützt nachzubilden sowie Messdaten kabellos zu übertragen. Unter realen Anregungsbedingungen lassen sich Schwingungsmuster von Strukturen in geometrische Modelle und Videobilder von ihnen einbetten sowie in Echtzeit am Prüfort unmittelbar visualisieren und auswerten. Diese neuen Möglichkeiten reduzieren den zeitlichen Aufwand und vereinfachen strukturdynamische Analysen deutlich.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek (German National Library)**

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at [www.dnb.de](http://www.dnb.de).

Schriften zur Informations- und Kommunikationstechnik  
Herausgeber:

Wolfgang A. Halang, Lehrstuhl für Informationstechnik  
Herwig Unger, Lehrstuhl für Kommunikationstechnik  
FernUniversität in Hagen

© VDI Verlag GmbH | Düsseldorf 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten. Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISBN 978-3-18-335311-8, ISSN 0178-9554

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen und Institutionen bedanken, die mich bei der Anfertigung meiner Dissertation unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Professor Dr. Dr. Wolfgang Halang für hervorragende Unterstützung, aber auch für andauernde Motivation bei der Durchführung der Arbeit.

Außerdem danke ich Professor Dr. Peter Holstein für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Für finanzielle und fachliche Unterstützung muss ich der GFal e.V., meinem Arbeitgeber während der Anfertigung der Arbeit, meinen Dank ausdrücken. Zudem wurden einige wesentliche Erkenntnisse der Arbeit im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projekt waveAR (INNO-KOM MF150074) erarbeitet.

Bei dieser Gelegenheit möchte ich zudem Maik Gollnick für seine Mitwirkung an der Software Wavelmage danken und für die Anregungen, die Grundlage für die Zielstellung der Arbeit waren. Außerdem möchte ich mich recht herzlich bei meinem Kollegen Kai Henning bedanken, der mich auf meinem Weg mit Anregungen und programmiertechnischen Umsetzungen begleitet hat. Von ihm stammen die Ideen zur Interpolation und die Bestandteile der OpenGL-Visualisierung. Bei Yaron Brauner möchte ich mich ebenfalls für die Unterstützung bei der Umsetzung des DAQIO-Protokolls bedanken.

Ebenfalls herzlich bedanken möchte ich mich bei Andreas Lemke für seine Arbeiten, Ideen und Umsetzungen am intelligenten Modalhammer. Zusätzlich bedanken möchte ich mich bei meinen Kollegen Matthias Urban für die programmiertechnische Umsetzung der Bediensoftware des Hammers und Paul Hennig für die Konstruktion des Hammerarms. Bei Dr. Frank Weckend möchte ich mich ebenfalls für die Unterstützung bei der Umsetzung des intelligenten Modalhammers bedanken.

Besonders danken möchte ich meiner Frau Jennifer und meinen Kindern Emilia und Jonas für ihre Geduld und Motivation. Ich bin sehr dankbar, dass es euch gibt. Ein weiterer besonderer Dank gilt meinen Eltern Monika und Matthias, die mich auf meinem Weg durch das Studium und durch das Leben begleitet und unterstützt haben.





# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>VIII</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>XI</b>
<b>Abstract</b>	<b>XII</b>
<b>1 Motivation und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Zielstellung der Arbeit	3
1.3 Aufbau der Arbeit	5
1.4 Beiträge der Arbeit	6
<b>2 Theoretische Grundlagen und Forschungsstand</b>	<b>8</b>
2.1 Grundlagen der Strukturdynamik	8
2.1.1 Einteilung der Schwingungen	9
2.1.2 Grundlagen der Modalanalyse	11
2.1.3 Experimentelle Modalanalyse	14
2.1.4 Operationale Modalanalyse	15
2.1.5 Betriebsschwingformanalyse	15
2.1.6 Simulation zur Modalanalyse	16
2.1.7 Strukturdynamischer digitaler Zwilling	16
2.1.8 Software zur Strukturdynamik	17
2.1.9 Realistische Visualisierung in der Strukturdynamik	18
2.2 Übersicht über die strukturdynamische Messkette	19
2.2.1 Anregungsarten in der Modalanalyse	20
2.2.2 Impulsanregung mittels Modalhammer	22
2.2.3 Datenerfassung	24
2.2.4 Sensorarten zur Schwingungsmessung	25
2.2.5 Abfolge von Messungen mit elektromechanischen Sensoren	30
2.2.6 Probleme in der Messkette mit elektromechanischen Sensoren	33

2.3 Grundlagen der Angereicherten Realität	34
2.3.1 Kameramodell	34
2.3.2 Grundzüge geometrischer Projektion	34
2.3.3 Lochkamera	36
2.3.4 Intrinsische Kameraparameter	37
2.3.5 Extrinsische Kameraparameter	38
2.3.6 Geometrische Transformationen	40
2.3.7 Definition des Begriffs AR	43
2.3.8 Darstellung	45
2.3.9 Bewegungsverfolgung	45
2.3.10 Registrierung	46
2.3.11 Interaktion	47
2.4 Angereicherte Realität im industriellen Umfeld	47
2.4.1 Darstellungsmöglichkeiten	48
2.4.2 Bewegungsverfolgung in AR-Anwendungen	50
2.4.3 AR-Anwendungen in der Strukturdynamik	56
<b>3 Vereinfachung und Beschleunigung der Messkette mit elektromechanischen Sensoren</b>	<b>59</b>
3.1 Forschungslücke	59
3.2 Entwicklungsziele	60
3.3 Konzept eines intelligenten Modalhammers	61
3.4 Gesamtablauf der Messkette	63
3.4.1 Konfiguration der Datenerfassung	64
3.4.2 Strukturkonfiguration	65
3.4.3 Visualisierung, Validierung und Durchführung der Messung	66
<b>4 Sensorgestütztes System zur impulshaften, prellfreien Anregung fester makroskopischer Strukturen</b>	<b>68</b>
4.1 Mehrwert gegenüber dem aktuellen Stand der Technik	68
4.2 Instrumentierung und Sensoren	69
4.3 Steuerung und Setzen der Geräteeinstellungen	70
<b>5 Komponenten zur Strukturkonfiguration und Echtzeit-visualisierung von Betriebsschwingformen</b>	<b>72</b>
5.1 Stereoskopie-Kameras	72
5.1.1 Tiefenkamera zur 3D-Rekonstruktion	73
5.1.2 Tiefenkamera zur Bewegungsverfolgung	74
5.1.3 Gemeinsame Nutzung zweier Tiefenkameras	75

5.2	3D-Rekonstruktion	75
5.3	Bewegungsverfolgung der Kamera	77
5.4	Optische Erkennung der Schwingungssensorposen	78
5.4.1	Funktionsweise der ArUco-Marker	79
5.4.2	Bestimmung der intrinsischen Kameraparameter und Verzerrungskoeffizienten	81
5.4.3	Berechnung der Posen von ArUco-Markern	82
5.4.4	Verbesserte Schätzung von ArUco-Markerposen mit erweitertem Kalmanfilter	83
5.5	Interpolation an Punkten der 3D-Rekonstruktion ohne Sensorwerte	86
<b>6</b>	<b>Technische Implementierung der Datenverarbeitung</b>	<b>88</b>
6.1	Datenerfassung	89
6.1.1	Mobiler Messkoffer	89
6.1.2	Vereinheitlichung der Kommunikation mit DAQ-Geräten	90
6.2	Softwarebenutzeroberfläche	93
<b>7</b>	<b>Empirische Validierung</b>	<b>95</b>
7.1	Validierung der Strukturkonfigurationsphase	95
7.1.1	Validierung von 3D-Rekonstruktionen	95
7.1.2	Validierung von ArUco-Marker-Detektionen	98
7.2	Validierung der Visualisierungsphase	105
7.2.1	Validierung der Bewegungsverfolgung der Kamera	105
7.2.2	Validierung der kabellosen Datenübertragung	106
7.2.3	Validierung der Interpolation anhand von Eigenschwingungsformen	107
7.3	Validierung von Instrumentierung und Aufschlagkraftsuche des intelligenten Modalhammers	111
7.4	Validierung des Gesamtsystems	113
7.4.1	Experimentelle Modalanalyse einer Fahrzeugfelge	113
7.4.2	Experimentelle Modalanalyse einer Stahlplatte	118
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>123</b>
8.1	Zusammenfassung	123
8.2	Ausblick	124
8.2.1	Technische Weiterentwicklung	125
8.2.2	Schlussbetrachtung	125
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>127</b>

# Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AHRS	Attitude Heading Reference System
AR	Angereicherte Realität
AV	Angereicherte Virtualität
CAD	Computer Aided Design
CMIF-AI	Complex-Mode-Indicator-Function-Artificial-Intelligence
DAQ	Data Acquisition
DAQIO	Data Acquisition Input / Output
DGPS	Differential Global Positioning System
DOF	Degree of Freedom
DOM	Document Object Model
EMA	Experimentelle Modalanalyse
FEA	Finite-Elemente-Analyse
FEM	Finite-Elemente-Methode
GPS	Global Positioning System
HMD	Head Mounted Display
http	Hyper Text Transfer Protocol
ICP	Iterative Closest Point
IMU	Inertial Measurement Unit
IPPE	Infinitesimal-Plane-based-Pose-Estimation
JSON	Java Script Object Notation
MAC	Modal Assurance Criteria
MIMO	Multiple Input, Multiple Output
MISO	Multiple Input, Single Output
MR	Mixed Reality
ODS	Operating Deflection Shapes
OMA	Operationale Modalanalyse
POLY-LSCF-AI	Poly-Least-Squares-Complex-Frequency-Artificial-Intelligence
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
RANSAC	Random Sample Consensus
RE	Realität
REST	Representational State Transfer
SAX	Simple API for XML
SBAS	Satellite Based Augmentation System
SDK	Software Development Kit
SIFT	Scale Invariant Feature Transform
SIMO	Single Input, Multiple Output
SISO	Single Input, Single Output
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
SURF	Speeded Up Robust Features
TCP / IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
TSDF	Truncated Signed Distance Function
VPU	Visual Processing Unit
VR	Virtuelle Realität
WLAN	Wireless Local Area Network
XML	Extensible Markup Language

# Symbolverzeichnis

Größe	SI-Einheit	Bedeutung
a	m/s <sup>2</sup>	Beschleunigung
F	N	Kraft
p	N*s	Impuls
s	M	Weg
sens	mV/N	Sensitivität
v	m/s	Geschwindigkeit

Größe	Bedeutung
A	Adjazenzmatrix
B	Bildebene
B <sub>Marker</sub>	Bitgröße eines ArUco-Markers
D	Diagonalmatrix
d	Dämpfung
D <sub>Marker</sub>	Wörterbuch eines ArUco-Markers
E	Matrix der extrinsischen Kameraparameter
f	Bildweite bzw. Brennweite
MF	Menge von Flächen
fS	Vektor der Schwingungsamplituden
f()	Funktion
f(t)	Strukturanregung, Einheit: Kraft
f(x <sub>k-1</sub> )	Zustandsübergangsfunktion
F <sub>k-1</sub>	linearisierte Zustandsübergangsmatrix
H	Transferfunktion
H <sub>k</sub>	linearisierte Messmatrix
h(x <sub>k</sub> )	Messmodell
I	Einheitsmatrix
k	Steifigkeit
K	Kameramatrix (intrinsische Kameraparameter)
MK	Menge von Kanten
Ka	Kamerakoordinatensystem
K <sub>k</sub>	aktuelle Kalmanverstärkung
L <sub>Marker</sub>	Größe bzw. Länge eines ArUco-Markers
LI	modifizierte Laplacematrix
Ls	Laplacematrix
m	Masse
OP <sub>Marker</sub>	Objektpunkte eines ArUco-Markers
P	Position eines ArUco-Markers
p	Geschwindigkeit eines ArUco-Markers

$\ddot{p}$	Beschleunigung eines ArUco-Markers
$p()$	Punkt in beliebigen Raum
$P$	projektive Räume
$P_{\text{Kamera}}$	Punkt im Kamerakoordinatensystem
$P_k$	aktuelle Kovarianzmatrix
$P_k^-$	vorhergesagte Kovarianzmatrix
$P_{\text{Pixel}}$	Punkt in Pixelebene
$P_{\text{Welt}}$	Punkt aus dem Weltkoordinatensystem
$q$	Quaternionvektor
$Q_k$	Prozesskovarianzmatrix
$R$	Rotationsmatrix
$R_k$	Messkovarianzmatrix
$s$	Scherungsparameter
$t$	Translationsvektor
$T$	Projektionsmatrix
$U_{\text{Bild}}$	Ursprung Bildkoordinatensystem
$U_{\text{Kamera}}$	Projektionszentrum Kamera
$U_{\text{Welt}}$	Ursprung Weltkoordinatensystem
$MV$	Menge von Punkten
$v_k$	Messrauschen
$w$	Rotationsgeschwindigkeit
$W$	Weltkoordinatensystem
$w_h$	homogene Koordinate
$\dot{w}$	Rotationsbeschleunigung
$w_k$	Prozessrauschen
$x(t)$	Strukturantwort, Einheit: Weg
$\dot{x}(t)$	Strukturantwort, Einheit: Geschwindigkeit
$\ddot{x}(t)$	Strukturantwort, Einheit: Beschleunigung
$x_k$	Zustandsvektor ( $x$ )
$\hat{x}_k$	aktuelle Zustandsschätzung
$\hat{x}_k^-$	Vorhersage des aktuellen Zustandes
$z_k$	Messvektor
$\psi$	Gierwinkel
$\phi$	Rollwinkel
$\theta$	Nickwinkel, Eulerwinkel
$\sigma_q^2$	Prozessvarianz
$\sigma_F^2$	Messvarianz
$\Omega$	Rotationswinkel Quaternion
$\Delta t$	Erfassungszeit
$\Delta$	Differentialkoordinaten

## Kurzfassung

Im Zuge der Konstruktion und technischen Überwachung mechanischer Strukturen wie Maschinen, Fahrzeuge, Geräte, industrielle Anlagen oder Bauwerke sowie zur Gewährleistung ihrer Sicherheit und Langlebigkeit muss ihr Schwingungsverhalten sorgfältig untersucht werden. Eigenschaften der Strukturdynamik werden vor allem durch Eigenform- und Betriebsschwingformanalysen ermittelt. Dazu werden Strukturen zum Schwingen angeregt und die resultierenden Strukturantworten gemessen. Durchführung und nachträgliche Auswertung solcher strukturdynamischer Messketten sind sehr zeitaufwendig und erfordern insbesondere bei Einsatz elektromechanischer Sensoren umfangreiches Erfahrungswissen.

Um die Reproduzierbarkeit erzeugter Schwingungen zu erhöhen, wird in der vorliegenden Arbeit zunächst ein Aktor zur Struktur Anregung vorgestellt, der Sensordaten unmittelbar im Gerät auswertet und auf Bewegungen des Hammerarms rückkoppelt sowie interne Schlagvalidierung ermöglicht. Damit wird erstmals ein Modalhammer mit stativ-, aber auch handgeführter Struktur Anregung auf der Grundlage vollständig automatischer und reproduzierbarer Impulsanregung mit einstellbaren Impulsparametern realisiert. Neuartige Algorithmen werden angegeben, die deutlich Strukturkonfiguration und Messaufwände durch automatische Bestimmung der Sensorpositionen und -orientierungen vereinfachen. Sie ermöglichen, untersuchte Strukturen effizient dreidimensional in Form geometrischer Objekte rechnerunterstützt nachzubilden sowie Messdaten kabellos zu übertragen. Unter realen Anregungsbedingungen lassen sich Schwingungsmuster von Strukturen in geometrische Modelle und Videobilder von ihnen einbetten sowie in Echtzeit am Prüfort unmittelbar visualisieren und auswerten. Diese neuen Möglichkeiten reduzieren den zeitlichen Aufwand strukturdynamischer Analysen. Sie verbessern die Sicherheit untersuchter Strukturen und die Reproduzierbarkeit der Prüfungen, indem sie erhöhte Messauflösungen und verkürzte schwingungstechnische Prüfzyklen erlauben. Die Neuheit der so umrissenen technischen Lehre wurde durch Erteilung des deutschen Patents DE102018103333 bestätigt.

## Abstract

In the course of designing and technically monitoring mechanical structures such as machines, vehicles, equipment, industrial plants or buildings, their vibrational behaviour must carefully be investigated to ensure their safety and long-term durability. Properties of structural dynamics are primarily determined by eigenmode and operating deflection shape analyses. For this purpose, structures are excited to vibrate and the resulting structural responses are measured. Execution and later evaluation of such structural-dynamics measurement chains are very time-consuming and require substantial empirical knowledge particularly when employing electromechanical sensors.

In order to increase the reproducibility of the vibrations generated, the present work introduces an actuator for structural excitation that evaluates sensor data directly in the device and feeds them back to movements of the hammer arm, and which enables internal impact validation. Thus, for the first time, a modal hammer with both stand- and hand-guided structural excitation based on fully automatic and reproducible pulse excitation with adjustable pulse parameters is realised. Novel algorithms are devised, which significantly simplify structure configuration and measurement efforts by automatically determining sensor positions and orientations. They enable, with computer support, to efficiently pattern three-dimensional geometrical objects of investigated structures, as well as wireless transmission of measurement data. Under real excitation conditions, vibration patterns of structures can be embedded into geometric models and video images of them, as well as directly be visualised and evaluated in real time at the test location. These new capabilities reduce the time required for structural-dynamics analyses. They improve the safety of examined structures and the reproducibility of tests by allowing for increased measurement resolutions and shorter vibration test cycles. The novelty of this technical approach was confirmed by granting the German patent DE102018103333.