



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 – Strukturanregung – 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 Strukturanregung vorgestellt, der Sensordaten unmittelbar im Gerät auswertet 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 Prüfstand unmittelbar visualisieren und auswerten. Diese neuen Möglichkeiten reduzieren den zeitlichen Aufwand und vereinfachen strukturdynamische Analysen deutlich.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnete diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter 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.

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

Abkürzungsverzeichnis	VIII
Symbolverzeichnis	IX
Kurzfassung	XI
Abstract	XII
1 Motivation und Zielsetzung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Zielstellung der Arbeit	3
1.3 Aufbau der Arbeit	5
1.4 Beiträge der Arbeit	6
2 Theoretische Grundlagen und Forschungsstand	8
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
3 Vereinfachung und Beschleunigung der Messkette mit elektromechanischen Sensoren	59
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
4 Sensorgestütztes System zur impulshaften, prellfreien Anregung fester makroskopischer Strukturen	68
4.1 Mehrwert gegenüber dem aktuellen Stand der Technik	68
4.2 Instrumentierung und Sensoren	69
4.3 Steuerung und Setzen der Geräteeinstellungen	70
5 Komponenten zur Strukturkonfiguration und Echtzeit-visualisierung von Betriebsschwingformen	72
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
6 Technische Implementierung der Datenverarbeitung	88
6.1 Datenerfassung	89
6.1.1 Mobiler Messkoffer	89
6.1.2 Vereinheitlichung der Kommunikation mit DAQ-Geräten	90
6.2 Softwarebenutzeroberfläche	93
7 Empirische Validierung	95
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
8 Zusammenfassung und Ausblick	123
8.1 Zusammenfassung	123
8.2 Ausblick	124
8.2.1 Technische Weiterentwicklung	125
8.2.2 Schlussbetrachtung	125
9 Literaturverzeichnis	127

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AHRS	Attitude Heading Reference System
AR	Angereicherte Realität
AV	Angereicherte Virtualität
CAD	Computer Aided Design
CMIF-AI	Complex-Mode-Indicator-Function-Artifical-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-Artifical-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^2	Beschleunigung
F	N	Kraft
p	$\text{N}\cdot\text{s}$	Impuls
s	M	Weg
sens	mV/N	Sensitivität
v	m/s	Geschwindigkeit

Größe	Bedeutung
A	Adjazenzmatrix
B	Bildebene
B_{Marker}	Bitgröße eines ArUco-Markers
D	Diagonalmatrix
d	Dämpfung
D_{Marker}	Wörterbuch eines ArUco-Markers
E	Matrix der extrinsischen Kameraparameter
f	Bildweite bzw. Brennweite
MF	Menge von Flächen
f_S	Vektor der Schwingungsamplituden
$f()$	Funktion
$f(t)$	Strukturanregung, Einheit: Kraft
$f(x_{k-1})$	Zustandsübergangsfunktion
F_{k-1}	linearisierte Zustandsübergangsmatrix
H	Transferfunktion
H_k	linearisierte Messmatrix
$h(x_k)$	Messmodell
I	Einheitsmatrix
k	Steifigkeit
K	Kameramatrix (intrinsische Kameraparameter)
MK	Menge von Kanten
Ka	Kamerakoordinatensystem
K_k	aktuelle Kalmanverstärkung
L_{Marker}	Größe bzw. Länge eines ArUco-Markers
LI	modifizierte Laplacematrix
Ls	Laplacematrix
m	Masse
OP_{Marker}	Objektpunkte eines ArUco-Markers
P	Position eines ArUco-Markers
\dot{p}	Geschwindigkeit eines ArUco-Markers

\ddot{p}	Beschleunigung eines ArUco-Markers
$p()$	Punkt in beliebigen Raum
P	projektive Räume
P_{Kamera}	Punkt im Kamerakoordinatensystem
P_k	aktuelle Kovarianzmatrix
P_k^-	vorhergesagte Kovarianzmatrix
P_{Pixel}	Punkt in Pixelebene
P_{Welt}	Punkt aus dem Weltkoordinatensystem
q	Quaternionvektor
Q_k	Prozesskovarianzmatrix
R	Rotationsmatrix
R_k	Messkovarianzmatrix
s	Scherungsparameter
t	Translationsvektor
T	Projektionsmatrix
U_{Bild}	Ursprung Bildkoordinatensystem
U_{Kamera}	Projektionszentrum Kamera
U_{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
ψ	Gierwinkel
ϕ	Rollwinkel
θ	Nickwinkel, Eulerwinkel
σ_q^2	Prozessvarianz
σ_r^2	Messvarianz
Ω	Rotationswinkel Quaternion
Δt	Erfassungszeit
Δ	Differentialkoordinaten

X

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 Strukturanworten 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 Strukturanregung 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 Strukturanregung 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 Prüfstand 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.

1 Motivation und Zielsetzung

Strukturdynamische und akustische Systemoptimierung ist zur Entwicklung und Konstruktion leistungsfähiger, sicherer und langlebiger Maschinen, Fahrzeuge, Geräte und industrieller Anlagen von grundsätzlicher Bedeutung. Minimale Geräuschpegel und erhöhter Komfort sind weitere Resultate der Optimierung. Daher sind strukturdynamische Analysen in vielen Branchen der Wirtschaft anzutreffen: im Maschinen-, Schiffs-, Zug- und Fahrzeugbau, in der Luft- und Raumfahrttechnik, in der Wehrtechnik, aber auch in den Bereichen Haushaltsgeräte und Unterhaltungselektronik. Ein weiteres großes Anwendungsgebiet der Strukturdynamik ist das Bauwesen, da Bauwerke ständig Umgebungseinflüssen ausgesetzt sind. Diese Einflüsse regen die Bauwerke, insgesamt oder Teile davon, zu meist unerwünschten und schädlichen Schwingungen an. Strukturdynamische Analysen werden auch zur Überwachung, Optimierung bzw. Anpassung bereits existierender Strukturen verwendet. [1]

1.1 Ausgangssituation

Durch Einsatz modernster Technik und Umsetzung neuester Forschungsergebnisse ist die Qualität der Modellbildung im Bereich der Strukturdynamik mittels Mehrkörper- und Finite-Elemente-Methoden (FEM) heutzutage weit fortgeschritten. Dennoch stößt man immer wieder an Modellierungsgrenzen. Ursachen hierfür sind oft nicht nur limitierte physikalische Beschreibbarkeit bzw. Messbarkeit der Werkstoffeigenschaften, sondern z.B. auch schwer quantifizierbare Einflüsse aus Fertigung, Betrieb und Alterung mechanischer Strukturen. Lange Berechnungszeiten vieler FEM-Simulationen und der damit verbundene große Hardwareaufwand sind bei verschiedenen Problemstellungen weitere Gründe, um nicht ausschließlich FEM-Simulationen zu verwenden. Zusätzlich gibt es verbindliche Normen (DIN EN 60068-2-6, DIN EN 60068-2-64, ISO 16750-3, DIN EN 61373 u.a.) insbesondere hinsichtlich Konstruktion und Instandhaltung, die aus Sicherheitsgründen regelmäßige Messungen verlangen. Die versuchstechnische Ermittlung von Werkstoffkennwerten, Dämpfungsparametern, Randbedingungen usw. ist deshalb oft der einzige Weg, Modelle zu komplettieren oder numerische Analysen, z.B. für Zwecke der Zulassung, zu validieren. Entsprechendes gilt für die Bestimmung der modalen Parameter, wie z.B. Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen, die das dynamische Schwingungsverhalten mechanischer Strukturen beschreiben und die ebenfalls versuchstechnisch bestimmt werden.

Zur Ermittlung dieser Struktureigenschaften werden Schwingungsmessungen durchgeführt. Dafür werden Schwingungsaufnehmer bzw. -sensoren genutzt, die

Schwingungsgrößen an den Sensororten in meist elektrische Größen umwandeln. Dabei müssen Sensoren problembezogen ausgewählt werden, weil es keinen Universalsensor gibt. Grundsätzlich werden Schwingungsaufnehmer nach den von ihnen zu messenden kinematischen Größen, aber auch nach ihren Messprinzipien unterteilt. Aktuell werden in den meisten Anwendungen Sensoren genutzt, die nach dem elektromechanischen Prinzip funktionieren. Diese Sensoren bestehen in der Regel aus jeweils einem festen Sensorgehäuse und einem im Gehäuse befindlichen beweglichen mechanischen Element (z.B. Piezoelement). Ein wesentlicher Punkt bei der Plausibilitätsprüfung von Schwingungsmessungen ist die Darstellung der Betriebs- oder Eigenschwingungsformen in einem geometrischen Modell, welches die untersuchte Struktur abbildet. Eine separate Auswertung einzelner Sensorzeitreihen ohne Geometriezuordnung reicht in vielen Anwendungen nicht aus. Wie bereits der Begriff der Strukturdynamik vermuten lässt, ist zur Visualisierung des Schwingungsverhaltens einer betrachteten Struktur ein geometrisches Modell von ihr notwendig.

Bei den meisten Untersuchungen zur Bestimmung der Betriebs- und Eigenschwingungsformen eines Prüfobjekts wird dieses gezielt mit definierten Anregungssignalen zum Schwingen angeregt. Dies ist notwendig, um die Struktur des Objekts in Schwingungen zu versetzen und daraufhin Messdaten erfassen zu können. Die Anregungssignale werden in der Praxis vor allem mittels eines Modalhammers oder elektromagnetischen Schwingungserregers erzeugt. Anregung und Antwort werden in den meisten Anwendungen zusammen erfasst und später in Kombination analysiert. Zur Vereinfachung und Beschleunigung existiert aber aktuell keine Art von Anregung, die eine kurze Einrichtungsphase ohne Anbringung des Aktors am Prüfobjekt und eine komplett reproduzierbare, voll automatische Durchführung der Anregung ermöglicht. Zudem existiert aktuell noch keine Aktorik zur Anregungsdurchführung, die interne Auswertung der Sensorinformationen direkt im Gerät der Anregung erlaubt. Durch interne Sensorauswertung ist aber zeitnahe, direktes Reagieren des Aktors auf seine aktuelle Bewegung und generell auf sich verändernde Umgebungsbedingungen möglich. Die Verwendung derartiger Aktorik im Bereich der Strukturdynamik würde zur Vereinfachung und Beschleunigung der Strukturanregung führen.

Bei der Durchführung von Betriebsschwingform- oder Eigenformanalysen bzw. Modalanalysen für Konstruktion, Begutachtung oder zur dynamischen Optimierung einer Struktur oder eines Bauwerks sind nach dem gegenwärtigen Stand der Technik große zeitliche bzw. personelle Aufwände und umfangreiches Erfahrungswissen insbesondere beim Einsatz elektromechanischer Sensoren notwendig. Besonders für komplexe Strukturen und bei Einsatz vieler Sensoren muss aus geometrischer Sicht großer Zeitaufwand für die gesamte Messkette eingeplant werden und Hintergrundwissen über die korrekte Durchführung der Messungen vorliegen. Die strukturdynamische Validierung einer Messreihe, vor allem die Auswertung der Eigen- oder Betriebsschwingformen, findet derzeit nach Abschluss der Messungen statt. Somit

können Fehler innerhalb der Messkette erst festgestellt werden, wenn es eigentlich schon zu spät ist. Echtzeitvisualisierungen in Form angereicherter Realitätsdarstellungen (AR, für engl. Augmented Reality) sind im industriellen Umfeld eine wesentliche Innovation zur Verbesserung der Interaktion zwischen digitaler und analoger Welt. Sie werden dort ebenfalls als digitale Assistenz besonders für Anfänger eingesetzt. Solche Systeme dienen in den meisten Fällen alleine zur Visualisierung und nutzen ausschließlich den Kamerasensor, d.h. es findet keine Berücksichtigung anderer Sensoren bzw. keine Sensordatenfusion statt. Realistische Visualisierungen im Bereich der Strukturdynamik müssen aufwendig unter Verwendung von Expertenwissen konfiguriert werden. Diese Aufgabe wird auch Strukturkonfiguration genannt. Sie beinhaltet Erzeugung eines dreidimensionalen geometrischen Modells (oft auch 3D-Rekonstruktion genannt) und entsprechende Zuweisung von Sensoren. Daher wirkt assistierter und reduzierter Strukturkonfigurationsaufwand nicht nur effizienzsteigernd, sondern senkt auch das Erfordernis zur Bereitstellung von Expertenwissen.

1.2 Zielstellung der Arbeit

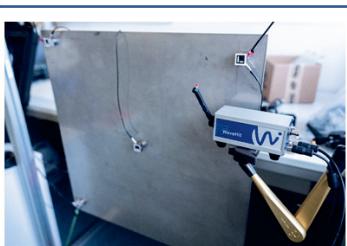
Um die Reproduzierbarkeit strukturdynamischer Prüfungen, ihre Messauflösungen und damit letztlich die Sicherheit der untersuchten Strukturen zu erhöhen, ist es das Ziel der vorliegenden Arbeit, neue bzw. verbesserte Hard- und Softwarekomponenten zur Beschleunigung und Vereinfachung der Messkette zur Schwingungsanalyse mechanischer Strukturen mittels elektromechanischer Sensoren zu entwickeln bzw. zu kombinieren.

Die in Form eines mit eigener Datenverarbeitungskapazität ausgestatteten („intelligenten“) Modalhammers vorgesehene Hardwarekomponente soll zur Beschleunigung und Vereinfachung der Strukturanregung dienen. Mittels interner Sensordatenauswertung wären durch diese Anregungsart viele Funktionalitäten umsetzbar, die nach aktuellem Stand der Technik nicht existieren, aber großen Mehrwert für Anwender darstellen. Besonders der dadurch ermöglichte, sensorgestützte Bewegungsablauf des Hammerarms würde neue Anwendungen begünstigen. Dadurch wären eine handgeführte Strukturanregung und auch eine Bewegung des Prüfobjektes während des Schlagprozesses unter Berücksichtigung eines reproduzierbaren Einzelschlags, möglich. Reproduzierbarkeit bezieht sich hierbei auf die Einhaltung vorher eingestellter Impulsparameter, wie z.B. die Aufschlagkraft. Weiterhin wäre eine vollständig automatische Konfiguration des intelligenten Modalhammers möglich, was zu deutlicher Beschleunigung und Vereinfachung der Strukturanregung beitrüge.

Weiterhin sollen zur Reduzierung der Notwendigkeit von Expertenwissen und zur Steigerung der Messeffizienz Softwarekomponenten zur Messdatenerfassung, zur

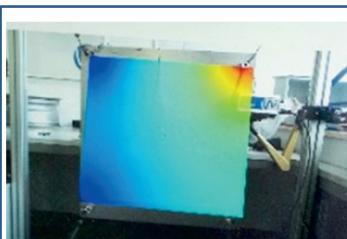
Beschleunigung der Strukturkonfiguration und zur Echtzeitvisualisierung der Betriebsschwingformen in Form einer AR-Animation entwickelt werden. Die Datenerfassungskomponente dient zur Aufnahme der Strukturanworten. Für die Echtzeitvisualisierung wird eine Stereokamera zur Aufnahme eines Videobildes, zur 3D-Rekonstruktion und zum Erkennen der Positionen und Orientierungen, d.h. der Posen, der Sensoren benötigt. Als Echtzeitvisualisierung soll dann eine in das Videobild der Struktur eingebettete Schwingungsanimation mittels farblich codierter Sensorwerte umgesetzt werden. Wesentlich ist auch die Übertragung der Ergebnisse auf bestehende Datenerfassungssysteme, um breite Anwendbarkeit zu gewährleisten. Aus dem gleichen Grund müssen die Komponenten des Gesamtsystems in einem überschaubaren Kostenrahmen liegen.

System zur Datenerfassung



Mobile
Datenerfassungskomponente für
elektromechanische Sensoren

System zur Strukturkonfiguration und
realistischen Echtzeitvisualisierung



Komponente zur 3D-
Rekonstruktion, zur Erfassung
der Sensorposen, zur Aufnahme
des Videobildes, zur Verfolgung der
Kamerabewegung



Übertragung der Messdaten
mittels WLAN

Bild 1: Übersicht über alle Softwarekomponenten zur Datenerfassung

Um die Ziele der Arbeit zu erreichen, sind folgende Aufgabenstellungen hinsichtlich Strukturkonfiguration, Datenerfassung sowie Echtzeitvisualisierung von Betriebsschwingformen zu lösen:

- Erfassung der Objektoberfläche bzw. digitale 3D-Rekonstruktion in Form eines Dreiecksnetzes der zu untersuchenden Struktur
- Kenntnis über die Lage der Sensoren auf der Oberfläche des Dreiecksnetzes und deren Posen
- Interpolation der Schwingungsmesswerte an nicht gemessenen Punkten der Oberfläche
- Bewegungsverfolgung der Kamera
- Drahtlose Übertragung der Sensordaten

Das Gesamtsystem (siehe Bild 1) soll unabhängig von der einzusetzenden Datenerfassungshardware bzw. von den einzusetzenden elektromechanischen Sensoren einsetzbar sein und sich somit mit geringen Aufwänden in bestehende Messsysteme integrieren lassen. Die Schwingungsmessdaten sollen mittels eines drahtlosen lokalen Netzes (WLAN, für engl. Wireless Local Area Network) übertragen werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Im nächsten Kapitel wird einerseits auf die Grundlagen zur Analyse strukturdynamischer Versuche und andererseits auf die Abgrenzungen der Zielstellungen vom aktuellen Stand von Technik und Forschung eingegangen. Am Anfang des Kapitels werden die Grundlagen der Strukturdynamik erläutert und danach wird mit der Beschreibung der unterschiedlichen Analyseformen der Strukturdynamik, wie Simulation, experimenteller und operationaler Modalanalyse als auch Betriebsschwingformanalyse fortgefahren. Im Anschluss wird die Software Wavemage zur Durchführung strukturdynamischer Analysen präsentiert. Zusätzlich wird die Bedeutung von Visualisierungen innerhalb strukturdynamischer Anwendungen motiviert und es werden aktuelle Strategien zur Umsetzung realistischer Darstellungen vorgestellt. Danach werden die aktuell existierenden unterschiedlichen Anregungsarten der experimentellen Modalanalyse und speziell die Impulsanregung mittels Modalhammer erläutert. Dann wird auf die Möglichkeiten zur Datenerfassung und auf die unterschiedlichen Arten der in der Strukturdynamik eingesetzten Sensoren eingegangen. Anschließend werden die Abfolge der Aufgaben innerhalb der strukturdynamischen Messkette und die in dieser Messkette anfallenden Probleme aufgeführt, die insbesondere die Zielstellungen dieser Arbeit motivieren. Alsdann wird auf die Grundlagen der Angereicherten Realität eingegangen und darauf aufbauend werden die Grundzüge der geometrischen Projektion, Kameramodelle und insbesondere die Lochkamera vorgestellt. In diesem Zusammenhang werden auch intrinsische und extrinsische Kameraparameter beschrieben. Dann werden geometrische Transformationen unter besonderer Berücksichtigung von Rotation und Translation zur Beschreibung der Bewegung starrer Körper erläutert. Die folgende Beschreibung der möglichen Bestandteile von AR-Anwendungen umfasst verschiedene Darstellungsarten, unterschiedliche Möglichkeiten zur Bewegungsverfolgung, Registrierung als auch diverse Möglichkeiten zur Interaktion in AR-Anwendungen. Weiterhin werden aktuelle Möglichkeiten zur Darstellung und zur Bewegungsverfolgung in AR-Anwendungen vorgestellt. Schließlich werden AR-Anwendungen im Bereich der Strukturdynamik präsentiert, um die Neuartigkeit der Zielstellungen dieser Arbeit aufzuzeigen. Kapitel 3 nutzt den aufgezeigten Stand der Technik, um bestehende Forschungslücken aufzuzeigen und dadurch das Entwicklungsziel bzw. die Zielstellung dieser Arbeit näher zu begründen. Basierend

darauf werden Konzepte zur Umsetzung des intelligenten Modalhammers und zur Vereinfachung und Beschleunigung der Messkette aufgezeigt.

In Kapitel 4 wird die technische Umsetzung des intelligenten Modalhammers betrachtet. Angefangen mit der Beschreibung des technischen Aufbaus wird nachfolgend seine Softwarebenutzeroberfläche präsentiert. In Kapitel 5 wird die Umsetzung der Komponenten zur Strukturkonfiguration und Echtzeitvisualisierung von Betriebsschwingformen mittels Techniken der AR im Detail aufgezeigt. Hierfür wird zunächst auf die Prinzipien der Stereoskopie eingegangen. Zur Strukturkonfiguration spielt neben der 3D-Rekonstruktion die Erkennung der zu augmentierenden elektromechanischen Sensorposen eine besondere Rolle. Zum Abschluss wird die direkte Zuordnung der Sensoren zur 3D-Rekonstruktion erläutert. Für die Entwicklung der Visualisierungsanwendung ist neben den Resultaten der Strukturkonfiguration relevant, Werte an nicht gemessenen Punkten der 3D-Rekonstruktion zu interpolieren. In Kapitel 6 wird die technische Umsetzung der Messdatenerfassung und der Komponenten zur Strukturkonfiguration und Echtzeitvisualisierung im Ganzen aufgezeigt. Angefangen mit der Beschreibung der Datenerfassung wird dann zum Abschluss die Softwarebenutzeroberfläche vorgestellt, die alle beschriebenen Bestandteile zur Datenerfassung enthält.

Das im vorherigen Kapitel beschriebene Datenerfassungssystem zur Strukturdynamik, aber auch die Einzelkomponenten des Systems und der intelligente Modalhammer werden separat in diesem Kapitel anhand der Messungen an unterschiedlichen realen Anwendungsbeispielen validiert. Die Messungen und Resultate der Validierung werden dafür ausführlich beschrieben. Im letzten Kapitel werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst. Hierfür werden auch die Stärken und Schwächen des Systems diskutiert und der wissenschaftliche Erkenntnisgewinn durch die Arbeit näher beleuchtet. Zum Abschluss der Arbeit werden mögliche Verbesserungen und Erweiterungen der Anwendung sowie weiterhin geplante Untersuchungen im Ausblick vorgeschlagen.

1.4 Beiträge der Arbeit

Diese Arbeit liefert Forschungsbeiträge zu folgenden Themen im Bereich der Strukturdynamik:

- Intelligenter Modalhammer zur Anregung
- Kabellose Sensordatenübertragung mit einem universellen Kommunikationsprotokoll
- Automatische optische Strukturkonfiguration (3D-Rekonstruktion und Zuweisung der Sensoren zur 3D-Rekonstruktion) für elektromagnetische Sensoren
- Echtzeitvisualisierung der Betriebsschwingformen in Form einer AR-Anwendung für elektromagnetische Sensoren

Mit den Ergebnissen der Arbeit wird eine wesentliche Grundlage zur Erhöhung der Reproduzierbarkeit, Auflösung und Sicherheit strukturdynamischer Messungen gelegt. Den ersten wesentlichen Forschungsbeitrag zur Vereinfachung und Beschleunigung von Strukturanregungen stellt der neuartige intelligente Modalhammer dar. Dieser ist ebenso für Anwendungen der Klangprüfung geeignet. Zweitens werden deutliche Verbesserungen in der Herangehensweise zur Datenerfassung von Strukturanworten erreicht. Zur Integration in bestehende Datenerfassungskomponenten wurde ein Protokoll mit Namen „Datenerfassung für Strukturanregungen und Strukturanworten“ (DAQIO, für engl. Data Acquisition Input / Output) entworfen. Durch die Möglichkeiten zur Integration in bestehende Datenerfassungshardware und der geringen zusätzlichen Anschaffungskosten kann der erzielte Stand direkt in Anwendungen von Forschung und Industrie genutzt werden. Dies wird durch das universelle DAQIO-Protokoll zur Steuerung und Datenübertragung von Datenerfassungshardware und ArUco-Marker zur Installation an bestehenden Sensoren erreicht. Weiterhin kann der Gesamtablauf generell als zukunftsweisendes Konzept zur Umsetzung von AR-Anwendungen im Bereich der Strukturdynamik unter Verwendung elektromechanischer Sensoren angesehen werden, alle Einzelkomponenten lassen sich aber auch separat nutzen.

2 Theoretische Grundlagen und Forschungsstand

Dieses Kapitel dient zur Einführung in die wissenschaftlichen und technischen Grundlagen und den aktuellen Stand der Technik, die dieser Arbeit zu Grunde liegen. Der Lesende soll mit den Arbeitsgebieten und deren aktuellen Umsetzungen, die diese Arbeit umfassen, vertraut werden. Es unterteilt sich grundsätzlich in die Bereiche Strukturdynamik und Angereicherte Realität.

Zu Beginn werden die Grundlagen der Strukturdynamik und die Einteilung der Schwingungen vermittelt. Anschließend werden Überblicke über die unterschiedlichen Methoden der Strukturdynamik und darauf aufbauend über aktuelle realistische Visualisierungsmöglichkeiten in der Strukturdynamik gegeben. Darüber hinaus wird auf die strukturdynamische Messkette eingegangen. Angefangen mit einem Überblick über die unterschiedlichen Aktoren und Sensoren der Strukturdynamik wird die Abfolge der Messkette bis hin zu den aktuellen Problemen dieser Messkette vorgestellt. Weitere wesentliche Inhalte des Kapitels sind die Grundlagen der Angereicherten Realität, und zwar deren Definition, Darstellungsformen, Kameramodelle und geometrische Transformationen, da diese wesentlich für die spätere Umsetzung der Zielstellung sind. Zum Abschluss wird in das Thema Angereicherte Realität im industriellen Umfeld eingeführt.

2.1 Grundlagen der Strukturdynamik

Das Gebiet Strukturdynamik untersucht die Dynamik bzw. das Schwingungsverhalten mechanischer Strukturen. Es wird zwischen Simulation und Messung unterschieden. Hier beschäftigen wir uns ausschließlich mit Schwingungsmesstechnik. Diese betrifft vor allem die Anwendungsfelder Modalanalyse, Schwingfestigkeit und Zustandsüberwachung. In jedem dieser Gebiete werden zuverlässige Messungen benötigt. Auswertung und Interpretation der Messdaten unterscheiden sich aber in den drei Anwendungsgebieten. Durch diese Anwendungsfelder wird die Forschung im Gebiet der Schwingungsmesstechnik vorangebracht.

Das Wissenschaftsgebiet der Schwingungsmesstechnik setzt sich aus einem interdisziplinären Zusammenwirken dreier Forschungsrichtungen zusammen (siehe Bild 2): Schwingungslehre, Messtechnik und Signalverarbeitung. Durch die Erkenntnisse der Schwingungslehre werden die Messaufgaben, die einzusetzende Aktorik und Sensorik, die algorithmische Auswertung der Messdaten und die damit einhergehende Interpretation der Messergebnisse beschrieben. Die Messtechnik dient zur Bereitstellung der Aufnehmer, der Aktoren zur Anregung und der Messinfrastruktur. Mittels digitaler Signalverarbeitung werden die elektrischen Größen der

Sensoren digital aufbereitet. Dafür müssen das Messprinzip und das physikalische bzw. mathematische Modell jedes Sensors bekannt sein.

2.1.1 Einteilung der Schwingungen

Als Schwingung wird grundsätzlich die Veränderung einer Zustandsgröße eines schwingungsfähigen Systems verstanden. In diesem Falle muss die Zustandsgröße zu- und abnehmende zeitliche Änderungen aufweisen. Eine konstante Funktion wird daher nicht als Schwingung wahrgenommen. Mittels Messtechnik soll dann diese Zustandsgröße erfasst werden.

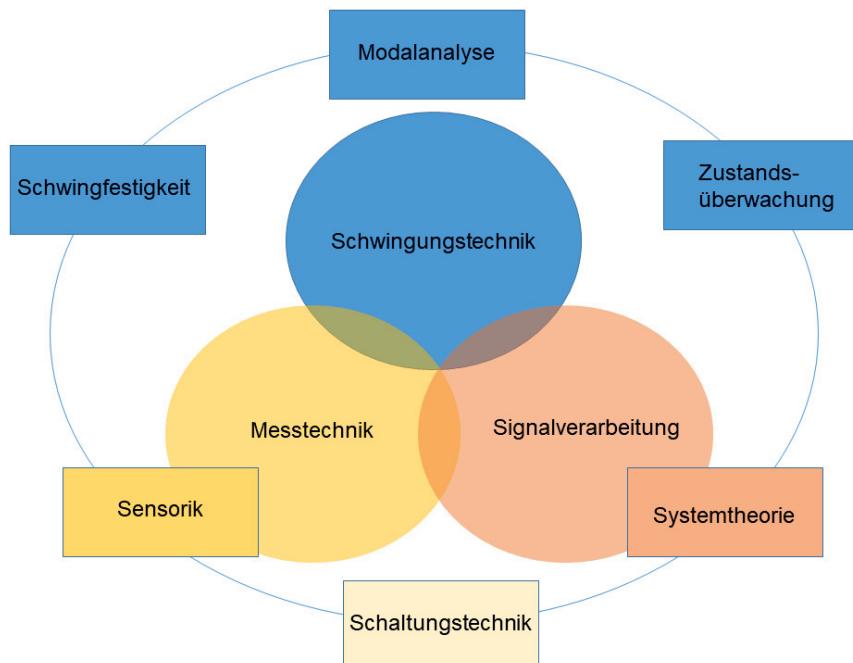


Bild 2: Übersicht über die drei an der Schwingungsmesstechnik beteiligten Wissenschaftsdisziplinen, Quelle: [2]

In der Norm DIN 1311-1 [3] werden die Schwingungen nach ihrem zeitlichen Verlauf klassifiziert. Für den Rahmen der Arbeit wird diese Unterteilung in modifizierter Form (siehe Bild 3) genutzt [4], [5]. Schwingungen lassen sich grundsätzlich in deterministische und stochastische Zeitverläufe unterteilen.

Deterministische Schwingungen

Diese Art von Schwingungen lässt sich durch mathematische Funktionen $f(t)$ beschreiben, indem für jeden Zeitpunkt ein Funktionswert bestimmt werden kann.

Periodische Schwingungen

Das wesentliche Merkmal dieser Art von Schwingungen ist, dass sich der Funktionsverlauf nach einer Periodendauer unendlich oft wiederholen kann. Die bekannteste Untergruppe der periodischen Schwingungen sind die *harmonischen Schwingungen*. Diese werden als Sinusfunktionen mit beliebigem Phasenwinkel definiert.

Modulierte Schwingungen

Diese Art von Schwingungen entsteht, wenn eine harmonische Schwingung mittels einer Modulation verändert wird. Wenn diese Modulation die Amplitude verändert, wird von amplitudenmodulierten Schwingungen gesprochen. Bei Änderung der Frequenz durch die Modulation handelt es sich um eine frequenzmodulierte Schwingung.

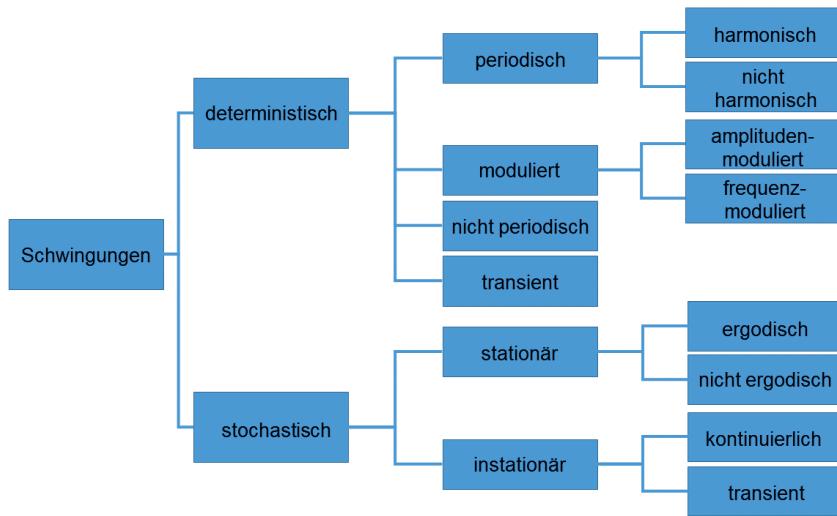


Bild 3: Unterteilung der Schwingungen mittels ihres zeitlichen Verlaufes, Quelle: [2]

Transiente Schwingungen

sind unregelmäßige Schwingungen, die einen Übergang zwischen zwei Zuständen verursachen.

Stochastische Schwingungen

können im Unterschied zu deterministischen Schwingungen nicht durch mathematische Funktionen beschrieben werden. Deswegen werden sie auch oft als Zufallsschwingungen bezeichnet.

Stationäre Schwingungen

Wenn trotz Zufallsschwingungen statistische Maße wie der Mittelwert unverändert bleiben, wird von stationären Schwingungen gesprochen.

2.1.2 Grundlagen der Modalanalyse

Ein wesentliches Anwendungsfeld der Schwingungsmesstechnik ist die Modalanalyse. Sie wird hier untersucht und verwendet Algorithmen der experimentellen (EMA, für engl. Experimental Modal Analysis), der operationalen Modalanalyse (OMA, für engl. Operational Modal Analysis) und der Betriebsschwingformanalyse (ODS, für engl. Operating Deflection Shapes). Ziel dieser Gruppe von Verfahren ist die Ermittlung der strukturspezifischen modalen Parameter Eigenfrequenz, Eigenschwingungsform (Deformation) und modale Dämpfung [6], [7]. Die sogenannten Moden beschreiben die speziellen Schwingungsformen einer Struktur. Alle Moden sind dabei voneinander entkoppelt und unabhängig. Die Orthogonalität der Moden und die damit verbundene Unabhängigkeit ist die wesentlichste Voraussetzung der Modalanalyse. Für jeweils eine Mode schwingt jeder Freiheitsgrad (DOF, für engl. Degree of Freedom) in der dazugehörigen Eigenfrequenz. Der Freiheitsgrad bezeichnet die Zahl der voneinander unabhängigen Möglichkeiten der Bewegung eines Körpers. Bei einer idealen Anregung einer Struktur gehen alle Moden anteilig in die gesamte Strukturbewegung ein. Daher lässt sich jede reale Schwingung als bewertete Summe ihrer Moden darstellen. Der Sinn der Modalanalyse ist die Zerlegung komplex gekoppelter Schwingungen in einfache Eigenschwingformen.

Bevor auf die unterschiedlichen Arten der Modalanalyse eingegangen wird, betrachten wir kurz schwingungsfähige Systeme. Diese lassen sich geeignet am Modell des Einmassenschwingers erklären, der ein Modell zur Beschreibung einer freien gedämpften Schwingung darstellt.

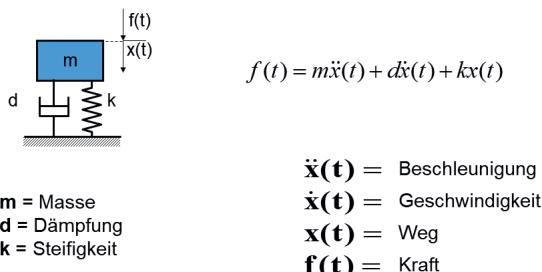


Bild 4: Modell zur Modalanalyse mit einem Freiheitsgrad

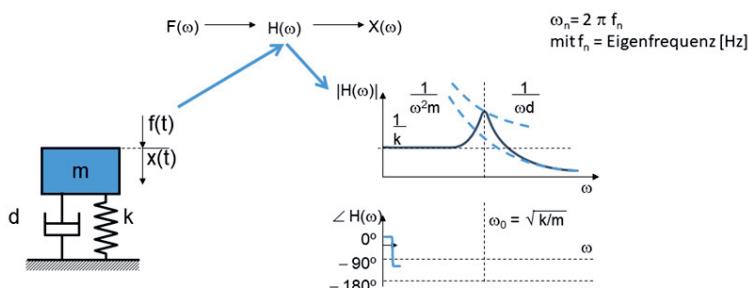
Im Allgemeinen kann jeder Freiheitsgrad eines schwingungsfähigen Systems auf dieses Modell reduziert werden. Zusätzlich hat der Einmassenschwinger ausschließlich eine Eigenfrequenz. Sie gibt die Frequenz des Einmassenschwingers an, mit der dieser ohne äußere Einwirkung nach einmaliger Auslenkung schwingen würde. In Bild 4 ist die Differentialgleichung der freien Schwingung des Einmassenschwingers und das dazugehörige Modell dargestellt.

Es ist zu sehen, dass dieses schwingungsfähige System aus einer Masse m , einer elastischen Feder mit der Steifigkeit k und einer Dämpfungsvorrichtung mit dem Reibungskoeffizient d besteht. Dieses Modell kann durch eine lineare Differentialgleichung zweiter Ordnung mit konstanten Koeffizienten beschrieben werden. Die Gleichung lässt sich auch auf Strukturen mit mehreren Freiheitsgraden erweitern. Durch den verwendeten Vektor $x(t)$ werden die zeitabhängige Auslenkung des Einmassenschwingers und mit $f(t)$ die ebenfalls zeitabhängigen externen Kräfte, die auf den Einmassenschwinger wirken, definiert. Aufgrund der exponentiell wirkenden Dämpfungseigenschaften wird dieses System nach einmaliger Auslenkung nach einem gewissen Zeitraum wieder in die Ruhelage schwingen (siehe Bild 5). Weiterhin werden durch den Vektor x ebenfalls die physikalischen Größen Beschleunigung, Geschwindigkeit und Weg definiert, die für eine spätere Schwingungsanalyse gemessen werden müssen.



Bild 5: Darstellung des Ausklingverhaltens einer freien gedämpften Schwingung

Allgemein wird zwischen freien und erzwungenen Schwingungen unterschieden. Ein frei schwingendes System wird wie bereits erwähnt einmalig zur Schwingung angeregt und dann sich selbst überlassen. Bei erzwungenen Schwingungen wird periodisch eine externe Kraft auf das System gegeben. Neben dieser Einteilung wird weiterhin



$$f(t) = m\ddot{x}(t) + d\dot{x}(t) + kx(t) \quad H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} = \frac{1}{-\omega^2 m + j\omega d + k}$$

Bild 6: Überführung des Einmassenschwingers vom Zeit- in den Frequenzbereich

zwischen gedämpften und ungedämpften Systemen unterschieden. Des Weiteren besitzt ein jedes Ein-Freiheitsgrad-System eine Transferfunktion H , die die Reziproke der Zeitfunktion nach vorheriger Fouriertransformation darstellt. In Bild 6 ist das Verhalten des Systems im Frequenzbereich und unter sinusförmiger Anregung zu sehen. Gezeigt sind sowohl die Magnitude als auch die Phase des Systems über dem gesamten Frequenzbereich. Es ist zu sehen, dass die statische Durchbiegung ausschließlich durch die Federsteifigkeit beeinflusst wird. Daher wird bei niedrigen Frequenzen die Antwort des Systems durch die Feder beeinflusst und ist somit in Phase mit der Anregung. Mit zunehmender Frequenz bekommt die Trägheitskraft der Masse größeren Einfluss. Wenn die Frequenzen größer als die Eigenfrequenzen werden, nimmt die Bedeutung der Masse immer stärker zu. Zusätzlich sind reale Strukturen deutlich komplexer als ein Ein-Freiheitsgrad-System. Dementsprechend treten dort deutlich mehr Moden auf. Das dynamische Verhalten eines linearen Systems mit n Freiheitsgraden wird in der Modalanalyse mit n Ein-Freiheitsgrad-Systemen beschrieben. Dabei gilt, dass nicht mehr Moden gefunden werden als Freiheitsgrade vorhanden sind. An jedem Messpunkt können je nach Ausprägung des Sensors (uniaxial oder triaxial) maximal drei Freiheitsgrade gemessen werden. Experimentell wird immer dann analysiert, wenn Masse, Steifigkeit und Dämpfung einer Struktur unbekannt und auch nicht oder nur erschwert messbar sind. Wenn die Massen-, Steifigkeits- und Dämpfungsmatrizen der Struktur vorliegen, können mit Hilfe der FEM ebenfalls die modalen Parameter simulativ ermittelt werden. Aktuell werden in vielen Anwendungen beide Herangehensweisen parallel genutzt, um Simulationsmodelle mittels Messdaten an die Realität anzupassen.

Neben der Orthogonalität von Moden werden bei der Modalanalyse noch weitere wesentliche Annahmen gemacht:

- Die Modalanalyse setzt zeitlich invariante Systeme voraus. Ein System muss somit zu jeder Zeit gleiches Antwortverhalten bei gleicher Anregung zeigen. Bei einigen Systemen wird daher die Analyse solange eingeschränkt, bis diese Annahme erfüllt ist. Dafür wird z.B. der Frequenzbereich der Analyse bzw. der Zeitraum der Messzeit verkürzt.
- Das Prinzip der Superposition bedeutet, dass bei gleichzeitiger Anregung an mehreren Anregungsorten die Antwort eines Systems identisch mit der Summe aller Antworten auf die einzelnen Anregungen ist.
- Gemäß dem Prinzip der Reziprozität kann der Ort einer Anregung mit dem Ort der Antwort getauscht werden.
- Das Kausalitätsprinzip legt fest, dass eine Systemantwort nur durch eine vorherige Systemanregung erzeugt werden kann.
- Von einem System wird Stabilität erwartet, d.h. es schwingt nach Beendigung einer Systemanregung aus, ist also gedämpft.

2.1.3 Experimentelle Modalanalyse

Bei der EMA wird die zu untersuchende Struktur durch definierte Eingangssignale (siehe Abschnitt 2.2.1) gleichzeitig angeregt. Es handelt sich dabei um eine erzwungene Schwingung. Im Gegensatz zur OMA führt die Anwendung der EMA in den meisten Fällen zu präziseren Resultaten, da bei der Berechnung die Anregungen des Systems bekannt sind [8]. Bei der Durchführung der EMA werden sowohl Anregung mittels Kraftsensor als auch Antwort des Systems mittels Beschleunigungs-, Geschwindigkeits- oder Wegsensors gemessen und damit anschließend die Transferfunktion für jeden Freiheitsgrad ermittelt. Wenn zusätzlich mehrere Anregungspunkte verwendet werden, wird für jede Eingangs- und Ausgangspaarung eine Transferfunktion berechnet. Eine Transferfunktion und nicht nur eine Zeitreihe von Sensordaten der Antwort zu haben, ist vorteilhaft, weil die Antwort immer proportional zur Anregung (Linearität) und die Transferfunktion unabhängig von der Art der Anregungsfunktion ist. Die Anregung kann dabei eine periodische, zufällige oder transiente Funktion oder ein Impuls sein.

Neben der Wahl der richtigen Anregungsart gibt es vier unterschiedliche Arten der Messung, die abhängig von der Anzahl der Anregungsorte und der Anzahl der Freiheitsgrade zur Antwortmessung sind:

- Ein Freiheitsgrad zur Anregung, Ein Freiheitsgrad als Antwort⁽¹⁾ (SISO, für engl. Single Input Single Output)
- Ein Freiheitsgrad zur Anregung, Mehrere Freiheitsgrade als Antwort (SIMO, für engl. Single Input Multiple Output)
- Mehrere Freiheitsgrade zur Anregung, Ein Freiheitsgrad als Antwort (MISO, für engl. Multiple Input Single Output)
- Mehrere Freiheitsgrade zur Anregung, Mehrere Freiheitsgrade als Antwort (MIMO, für engl. Multiple Input Multiple Output)

Mehrere Anregungspunkte sind vor allem bei großen und komplexen Strukturen, wie z.B. Flugzeugen, zu empfehlen, um die Anregungsenergie ausreichend über die gesamte Struktur zu verteilen. Die Erhöhung der Anzahl der Antwortfreiheitsgrade führt zu höherer Datenkonsistenz sowie zur Erhöhung der Auflösung der Eigenschwingungsformen und der modalen Parameter.

¹ Der Einmassenschwinger ist ein Vertreter dieser Messstrategie.

2.1.4 Operationale Modalanalyse

Im Gegensatz zur EMA wird bei der OMA die ambiente Anregung eines schwingungsfähigen Systems betrachtet, die z.B. durch Wind, externe Anregung durch Autos bei Brücken oder Betriebsanregungen erzeugt wird. Die modalen Größen werden bei der OMA ausschließlich durch die gemessenen Systemantworten auf Anregung durch Umgebungsbedingungen identifiziert. Das heißt, dass ausschließlich Zeitdaten der Antworten vorliegen und keine Transferfunktionen berechnet werden können. Die OMA ist bei vielen realen Anwendungen die einzige Möglichkeit zur modalen Schwingungsanalyse, da viele Umwelteinflüsse (z.B. Windströmungen, Erdbeben, Verkehrsbelastungen oder schwingungserregende Strukturen in der Nähe) nur ungenügend oder mit großem Aufwand messbar sind. Für die OMA gibt es zwei unterschiedliche Ansätze zur Messung. Der einfachere ist Einzelmessung, bei der eine gesamte Struktur mit einem Sensorsaufbau vermessen wird. Demgegenüber steht die Mehrfachmessung mit unterschiedlichen Sensorpositionen. Im Rahmen einer strukturdynamischen Messung werden die Systemantworten an unterschiedlichen Orten der Struktur aufgenommen. Dabei sind Anzahl, Position sowie Orientierung der zu messenden Freiheitsgrade festzulegen, um die Eigenschwingungsformen eindeutig unterscheidbar aufzulösen. Sind dafür mehrere Messreihen notwendig, so sind Referenzsensoren erforderlich, die ihre Position während der gesamten Untersuchung beibehalten. Die Einbeziehung unterschiedlicher Messanordnungen mit gleichbleibenden Referenzsensoren in die Berechnung der modalen Parameter wird besonders bei großen Strukturen und bei geringer Sensoranzahl genutzt.

2.1.5 Betriebsschwingformanalyse

Im Gegensatz zur Modalanalyse (OMA, EMA), bei der die Schwingformen zu den möglichen Eigenfrequenzen ermittelt werden, können mit der Betriebsschwingformanalyse [9], [10], [11] die Schwingformen aller Frequenzen einer Struktur, abhängig von der gewählten Abtastrate der Sensoren, bei Betriebserregung berechnet werden. Die Betriebsschwingformanalyse lässt sich aber nicht nur im Frequenzbereich, sondern auch im Zeitbereich betrachten. Im Zeitbereich werden ausschließlich die Zeitdaten der Schwingungsmesswerte zusammen betrachtet. Deshalb kann die in dieser Arbeit vorgeschlagene Echtzeitvisualisierung ebenfalls als Zeit-Betriebsschwingformanalyse angesehen werden. Genutzt wird die Betriebsschwingformanalyse zur Analyse der Betriebsschwingformen und als Vorabuntersuchung zur Validierung der Messdaten vor einer Modalanalyse, aber auch zur Fehlerbehebung und für Differenzmessungen, um Abnutzungerscheinungen bestimmen zu können.

2.1.6 Simulation zur Modalanalyse

Zur Verkürzung von Entwicklungszeiten nutzen viele Unternehmen bei der Produktentwicklung Simulationen, genauer gesagt die Finite-Elemente-Analyse (FEA, für engl. Finite-Element-Analysis). Diese unterteilt sich in eine Komponente zur Modalanalyse und eine zur Zeitverlaufssimulation, auch Transiente Analyse genannt. Die Komponente zur Modalanalyse dient analog wie EMA bzw. OMA zur Ermittlung der modalen Parameter und analog zur Betriebsschwingformanalyse existiert die transiente Analyse zur Bestimmung der zeitlichen Verläufe von Strukturanworten unter Einwirkung mindestens einer vorgegebenen, auch als Anregung bezeichneten Last. Zur Simulation der Betriebslasten werden die realen Lasten, z. B. durch einen Motor, separat aufgezeichnet und danach zeitversetzt in die Simulation geladen. FEA-Modelle werden verwendet, um das dynamische Verhalten von Strukturen unter verschiedenen Betriebsbedingungen mit verschiedenen Anregungsarten bzw. um zusätzliche Modifikationen an bereits existierenden realen Strukturen zu simulieren. Zur Erstellung eines FEA-Modells müssen eine Geometrie bzw. 3D-Rekonstruktion, die zugehörigen Materialparameter und die Randbedingungen einer Struktur festgelegt werden. Randbedingungen sind z. B. die Lagerung der Struktur oder einwirkende Kräfte. Da die zugehörigen Materialparameter bzw. Randbedingungen in den meisten Fällen nur geschätzt werden können, kommt es zu Abweichungen zwischen der Simulation und der realen Struktur.

2.1.7 Strukturdynamischer digitaler Zwilling

Eine Lösung zur möglichst nahen Anpassung der dynamischen Eigenschaften von Simulationsmodellen an die Realität mittels experimentell ermittelter Daten nennt sich Simulationsmodellaktualisierung (für engl. Model-Updating). Dieses Verfahren benötigt neben der Simulation die versuchstechnische Ermittlung der modalen Größen. Simulationsmodellaktualisierung ist vergleichbar mit der Erstellung eines strukturdynamischen digitalen Zwilling [12], der Simulation und Messung zusammen bringt. So können die Vorteile beider Ansätze erstmals zusammen genutzt werden. Im Rahmen der Erstellung eines strukturdynamischen digitalen Zwilling werden die Massen- bzw. Steifigkeitsmatrizen eines Strukturmodells im Sinne einer Optimierung solange verändert, bis die Differenz zwischen den simulativen und realen Moden minimal ist. Hierbei werden ebenfalls die Randbedingungen berücksichtigt. Im Ergebnis dieses Optimierungsprozesses entsteht ein strukturdynamischer digitaler Zwilling der realen Struktur, der mit der realen Struktur nahezu identische strukturdynamische Eigenschaften aufweist. Ein strukturdynamischer digitaler Zwilling dient als Grundlage zum Festhalten des aktuellen Zustandes, aber auch zur Simulation der Modifikationen oder der Antworten der Struktur auf unterschiedlichste

Anregungsarten, zur Prognose von Schädigungen oder zu Lebensdauerprognosen der simulierten Struktur. Das erspart viel Zeit und Kosten im Vergleich zur erneuten Vermessung und zum realen Umbau der Struktur. Hierfür wird u.a. die Differenz der Eigenschwingungsformen benötigt.

2.1.8 Software zur Strukturdynamik

Wavimage Modal (siehe Bild 7) ist eine Software zur Bestimmung von Schwingungseigenschaften mittels einzigartiger Verfahren der experimentellen, operationalen Modalanalyse [13], [14]. Darüber hinaus unterstützt die Software die Betriebsschwingformanalyse. Neben messdatenbasierter Modalanalyse bietet die Software eine FEA-Komponente zur Simulation von Schwingungseigenschaften anhand von Strukturgeometrie und Materialeigenschaften. Zur Anpassung von Simulationsmodellen an die messdatenbasierten Resultate von Modalanalysen (durch OMA und EMA) steht zusätzlich eine Komponente zur Simulationsmodellaktualisierung [15] zur Verfügung. Die Messdaten zur dynamischen Strukturanalyse werden mittels Beschleunigungs-, Geschwindigkeits- und Wegaufnehmern aufgenommen und dann verarbeitet. Somit können Daten aller gängigen Sensorarten zur Strukturdynamik, die im Abschnitt 2.2.4 vorgestellt werden, durch diese Software verarbeitet werden.

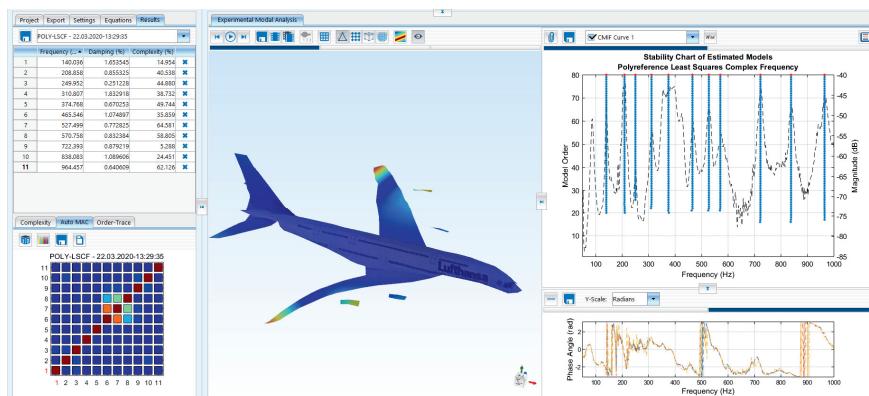


Bild 7: Komponente zur Modalanalyse der Software Wavimage Modal

Wavimage Modal wird zur Validierung der in dieser Arbeit vorgestellten technischen Umsetzung verwendet.

2.1.9 Realistische Visualisierung in der Strukturdynamik

Im Bereich der Strukturdynamik werden immer höhere Anforderungen an realistische Visualisierungen von Eigen- und Betriebsschwingformen gestellt. Solche Darstellungen sind für bestmögliche Vergleichbarkeit mit Simulationsergebnissen und noch genauere Analysen erforderlich. Die insbesondere aus Computerspielen und Filmen bekannten Visualisierungsmöglichkeiten für Animationen führen zu immer höheren Erwartungshaltungen auch an Ingenieurssoftware. Aktuell stehen angefangen mit rein am Rechner erzeugter Schwingungsdarstellung bis hin zur Schwingungsanimation in realer Umgebung ebenfalls alle Formen der Visualisierung, wie sie im Realitäts-Virtualitätskontinuum (für engl. Reality Virtuality Continuum) (siehe Abschnitt 2.3.7) definiert werden, zur Verfügung (siehe Bild 8). Im Unterschied zu Echtzeitvisualisierungen sind diese aber erst nach Abschluss von Messungen möglich. Deshalb kann der Anwender mit einer untersuchten Struktur im Betrieb nicht interagieren.

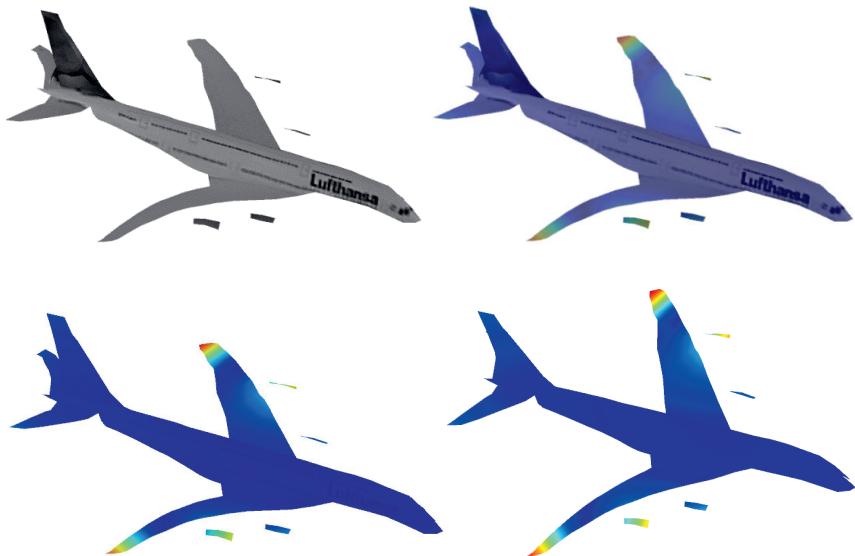


Bild 8: Übersicht über alle strukturdynamischen Darstellungsformen des Realitäts-Virtualitätskontinuums erstellt mit der Software WavImage

Um alle Darstellungsformen des Realitäts-Virtualitätskontinuums zu erreichen, sind erforderlich:

- 3D-Rekonstruktion der zu untersuchenden Struktur mit hoher Auflösung und ihre Textur

- Hohe Messauflösung, sodass im besten Falle jedem Punkt im Dreiecksnetz ein Messpunkt zugeordnet werden kann
- Texturen der realen Umgebung, um die Ergebnisse der Schwingungsanalyse auf den realen Hintergrund zu projizieren

Es gibt aktuell drei unterschiedliche Herangehensweisen, um diese Anforderungen zu erfüllen:

- Optische Messmethoden: als alleinige Variante, wie z.B. Laser-Doppler-Vibrometer und Hochgeschwindigkeitskameras mittels digitaler Bildkorrelation oder Verfahren des optischen Flusses
- Strukturdynamischer digitaler Zwilling: Kombination aus simulativ (FEA) und mit unterschiedlichsten Sensoren zur Schwingungsmessung (optisch und elektromechanisch) experimentell ermittelter Modalanalyse (EMA/OMA)
- Interpolation: Kombination aus Messung (optisch und elektromechanisch) und 3D-Rekonstruktion mit Hilfe einer Tiefenkamera und/oder rechnergestütztem Konstruieren (CAD, für engl. Computer Aided Design) und geeigneter Interpolation an Punkten, wo nicht gemessen wurde

Die kostenintensivste Methode stellt optisches Messen dar, da die Sensorik deutlich mehr kostet als elektromechanische Sensoren. Dafür nähme unter Annahme gleicher Messauflösung der Einsatz optischer Messmethoden deutlich weniger Messzeit in Anspruch. Der höchste Zeitaufwand wird für die Erstellung eines strukturdynamischen digitalen Zwillings beansprucht, da hier sowohl eine Messung als auch eine Simulation der zu untersuchenden Struktur benötigt werden. Im Unterschied zur ausschließlich optischen Messung muss an deutlich weniger Punkten gemessen werden. Die Auflösung wird hier durch die Simulation verbessert. Interpolation stellt die kostengünstigste und robusteste Methode dar, wenn elektromechanische Sensoren genutzt werden. Die Qualität der Ergebnisse ist dann stark von den Sensorpositionen und dem eingesetzten Interpolationsverfahren abhängig. Mit keiner der genannten Herangehensweisen ist jedoch aktuell eine realistische Echtzeitvisualisierung im Sinne einer AR-Anwendung möglich.

2.2 Übersicht über die strukturdynamische Messkette

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit allen wesentlichen Inhalten, die für strukturdynamische Messungen notwendig sind. Angefangen bei Strukturanregung, insbesondere Impulsanregung, über Datenerfassung, Schwingungssensoren bis hin zur Abfolge von Messungen und den damit verbundenen Problemen für Messingenieure.

2.2.1 Anregungsarten in der Modalanalyse

Im Bereich der Modalanalyse gibt es drei unterschiedliche Formen der Anregung: Rüttleranregung (für engl. Shaker), manuell geführte Hammermessung und Hammermessung mit automatischen Modalhämfern [16], [17], [18]. Die Vorteile bzw. Nachteile der einzelnen Anregungsarten sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Der gebräuchliche Name automatischer Modalhammer ist aber sehr irreführend, da viele Hammerparameter manuell bestimmt und eingestellt werden müssen. Daher müsste diese Gerätekategorie eher teilautomatisierter Modalhammer genannt werden. Innerhalb der Messungen hat die Anregungsform besondere Bedeutung. Die beiden am meisten verwendeten Methoden sind aufgrund ihrer Jahrzehntelangen Existenz die klassische, manuell geführte Modalhammermethode und die elektromagnetische Shakeranregung. Diese Techniken werden bereits seit den 1970er bzw. 1980er Jahren verwendet. Zusätzlich werden in seltenen Fällen auch Lautsprecher und Piezoaktoren zur Strukturanregung genutzt.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Anregungsarten zur Modalanalyse

	Manueller Modalhammer	Automatischer Modalhammer	Shaker
schnelle und einfache Messungen	+	+	-
Einfache Anbringung an Strukturen	+	+	-
Reproduzierbarkeit	-	+	+
Impuls	+	+	-
Ohne Zusatzhardware betreibbar	+	+	-
Kraft skalierbar	-	+	+
Handgeführte Bedienung	+	-	-
Automatische Aufschlagkraftsuche	-	-	-
Automatische Schlagpunktsuche	-	-	-
Erhaltung der Anregung auch bei Bewegung der Prüfobjekte	-	-	+

Wegen des günstigsten Preises und der Möglichkeit zur einfachen und schnellen Durchführung von Messungen ist Impulsanregung mittels handgeführtem Modalhammer aufgrund der Impulseigenschaften (siehe Abschnitt 2.2.2) die am häufigsten genutzte Anregungsart. Weiterhin ist im Unterschied zur Shakermessung keine fixierte

Anbringung des Hammers am Prüfobjekt notwendig. Zudem bieten manuell geführte Modalhämmer die Möglichkeit zur Durchführung von Messungen, bei denen die Positionen der Sensoren konstant bleiben und die Anregungsorte während der Messungen wechseln.

Durch die Annahme der Reziprozität (siehe Abschnitt 2.1.2) kann mittels dieser Messstrategie an vielen Messpunkten mit nur wenigen Sensoren gemessen werden. Zur Auswertung werden dann die Messungen der Strukturanregungen und -antworten vertauscht und die zugehörigen Transferfunktionen invertiert. Diese Messstrategie wird häufig genutzt, um Sensoren einzusparen, aber auch um das zusätzliche Sensorgewicht zu minimieren. Daher sind besonders für diese Messstrategie handgeführte Modalhämmer elementar. Aktuell werden zur Impulsanregung handgeführte oder automatische Modalhämmer verwendet (siehe Bild 9).

Ein handgeführter Modalhammer besteht ausschließlich aus dem Hammerstiel, dem Hammerkopf und einem Sensor. Den Antrieb des Hammers übernimmt der menschliche Arm. Das Sensorsignal kann vom Anwender zur qualitativen Bewertung des Schlagvorgangs genutzt werden. Beim automatischen Modalhammer handelt es sich um einen mit einer Antriebseinheit versehenen manuellen Modalhammer, der eine vom Anwender parametrierte Bewegung wiederholt ausführen kann. Auch hier wird das Sensorsignal nicht durch das System ausgewertet, sondern nur für eine externe Nutzung durch den Anwender über eine elektrische Schnittstelle bereitgestellt. Insbesondere wird es nicht zur Steuerung des Bewegungsablaufs des automatischen Modalhammers verwendet.



Bild 9: Links: Automatischer Modalhammer vom Typ WaveHit, Quelle: [18]; Rechts: unterschiedliche, handgeführte Modalhämmer der Firma PCB Synotech, Quelle: [19]

Daher muss eine manuelle Justierung zum Finden des Aufschlagpunktes durchgeführt werden. Weiterhin ist die automatische Justierung wesentlicher Parameter des prellfreien Anschlages, wie z.B. der Aufschlagkraft, ebenfalls nicht durchführbar. Somit bleibt Einrichten des Modalhammers (Aufschlagpunktsuche, Suche der Aufschlagkraft) mit dem Ziel prellfreien Anschlags eine dem Schlagbetrieb vorgelagerte, manuell durchzuführende Aufgabe [20]. Automatische Validierung des Sensorsignals zur Bestätigung der Prellfreiheit ist ebenso wie die Überwachung der

vorgegebenen Schlagparameter nicht möglich. Eine relative Lageänderung zwischen Hammer und Prüfling erfordert ebenfalls eine wiederholte Justage und ist daher insbesondere während eines laufenden Schlagbetriebs ausgeschlossen.

2.2.2 Impulsanregung mittels Modalhammer

In der Mechanik wird der Impuls mit dem Formelzeichen p [21] beschrieben. Er stellt das Integral einer Kraft F über dem Zeitintervall t , in dem die Kraft wirkt, dar. Da die Kraft eine Vektorgroße ist, ist auch der Impuls eine solche. Ein Impuls, der auf ein Objekt einwirkt, erzeugt eine äquivalente vektorielle Änderung seines linearen Impulses, ebenfalls in der gleichen Richtung. Die SI-Einheit des Impulses ist Newton-Sekunde [N·s]. Eine resultierende Kraft bewirkt eine Beschleunigung und Änderung der Geschwindigkeit eines Körpers für die Dauer ihrer Einwirkung. Eine resultierende Kraft, die über einen längeren Zeitraum einwirkt, erzeugt daher eine größere Änderung des linearen Impulses als dieselbe kurzzeitig einwirkende Kraft. Die Impulsänderung ist gleich dem Produkt aus durchschnittlicher Kraft und Dauer. Umgekehrt erzeugt eine kleine, lange einwirkende Kraft die gleiche Impulsänderung wie eine größere, kurz einwirkende Kraft.

Im Bereich der experimentellen Modal- bzw. der Impulsantwortanalyse werden Kraftstöße mittels Modalhämtern ausgeführt. Ein eingebrachtes Anregungssignal ist ein Impuls mit beschränkter Amplitude (Impulshöhe), der die in eine Struktur eingebrachte Kraft beschreibt. Weiterhin wird der Impuls durch seine Dauer (Impulsbreite) beschrieben. Im Unterschied zum idealen Dirac-Impuls, der alle Frequenzen mit gleicher Amplitude aufweist, hat ein durch einen Modalhammer real erzeugter Impuls in einem begrenzten Frequenzbereich und mit variierender Amplitude breitbandige Anregung. Höhere Frequenzbereiche werden dann so gering angeregt, dass sie im Sensorrauschen untergehen. Der Dirac-Impuls ist unendlich hoch und unendlich schmal, die Fläche darunter beträgt 1. Dieser ideale Impuls ist in der Realität nicht umsetzbar. Grundsätzlich müssen für eine korrekte Anregung folgende Impulseigenschaften gewährleistet sein:

- Anregung mit hoher Amplitude (oberhalb des Grundrauschens des Sensors) über den interessierenden Frequenzbereich
- Gleichmäßig über den zu untersuchenden Frequenzbereich verteilte Amplitude. Die Kraft darf im angeregten Frequenzbereich nicht mehr als 20 dB abfallen, um einen ausreichenden Energieeintrag zu erhalten.
- Genügend Kraft muss in die untersuchte Struktur eingeleitet werden, um alle ihre Moden anzuregen.

Die allgemeine Idee dahinter ist, dass Resonanzfrequenzen durch Anwendung desselben Kraftniveaus über den gesamten Frequenzbereich leichter identifiziert

werden können. Die Impulseigenschaften eines Modalhammers können durch dessen Instrumentierung (siehe Bild 10) variiert werden. Dafür stehen unterschiedliche Zusatzgewichte, Hammerspitzen, Kraftsensoren und Hammerausprägungen zur Verfügung. Der Eingangskraft-Frequenzbereich, aber auch die anderen Impulsparameter (Impulshöhe, Impulsbreite) können durch folgende Instrumentierungen gesteuert werden:

- Masse des Hammers: Verringerung bzw. Erhöhung der Masse bewirkt, dass der Hammer die Struktur für eine kürzere bzw. längere Zeit berührt. Durch die geringere bzw. erhöhte Masse kann der Hammer nach dem Auftreffen auf die Struktur leichter bzw. schwerer seine Richtung umkehren, wodurch sich die Kontaktzeit verkürzt bzw. verlängert.
- Steifigkeit der Hammerspitze: Erhöhung bzw. Verringerung der Steifigkeit ermöglicht eine Verkürzung bzw. Verlängerung der Dauer, während derer der Hammer mit der Struktur in Kontakt ist. Üblicherweise bestehen die Spitzen aus Metall, Gummi oder Kunststoff.
- Beschleunigung des Hammers
- Kraftsensor

Eine harte Spalte erzeugt einen kurzen Impuls und regt in einem breiten Frequenzbereich an, eine weiche Spalte hingegen einen langen Impuls und regt in einem engen Frequenzbereich an. Die vorgestellten Instrumentierungen bestimmen aber selbst noch nicht vollständig den angeregten Frequenzbereich.

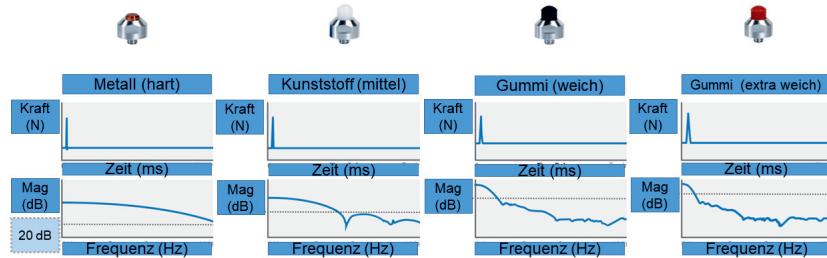


Bild 10: Übersicht über den Einfluss der Hammerspitze auf die Impulsparameter im Zeit- und Frequenzbereich

Auch die Materialzusammensetzung des Prüfobjektes muss berücksichtigt werden. Generell gilt: Je leichter der Hammer und je steifer die Spalte, desto höher der angeregte Frequenzbereich. In der Modalanalyse ist zur validen Anregung ausschließlich ein Einzelimpuls bzw. Einzelschlag auf das Prüfobjekt erforderlich. Ein Doppel- oder Mehrfachschlag liegt vor, wenn der Hammer mehrfach auf das Prüfobjekt trifft. Der zweite Schlag folgt dabei nur Millisekunden auf den ersten. In Bild 11 ist die Auswirkung eines Doppelschlag zu sehen. Weil Doppel- oder Mehrfachschläge zu invaliden Transferfunktionen bzw. Messungen führen, ist die wesentlichste Aufgabenstellung bei der Impulsanregung mittels Modalhammer, nur Einzelschläge vorzunehmen.

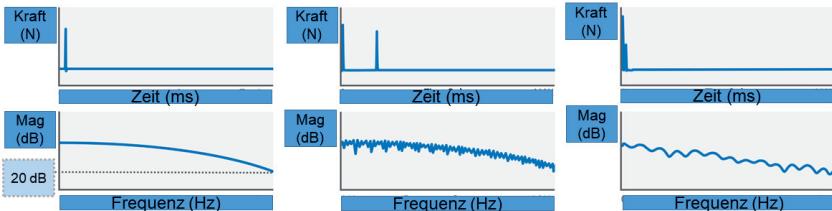


Bild 11: Vergleich der Zeitsignale vom Kraftsensor im Zeit- und Frequenzbereich zwischen Einzel- und Doppelschlag

2.2.3 Datenerfassung

Datenerfassung (DAQ, für engl. Data Acquisition) ist der Prozess der rechnerunterstützten Erfassung physikalischer oder elektrischer Größen wie bspw. Spannung, Strom, Temperatur, Druck, Vibration oder Schall mittels Sensoren. Zusammengefasst beinhaltet DAQ-Systeme Hardware für die Datenerfassung, einen Rechner mit Aufnahmesoftware und Sensoren (siehe Bild 12). Ein Sensor gewinnt allgemein aus einem physikalischen Phänomen wie Temperatur oder Vibration ein messbares elektrisches Signal wie eine Spannung oder einen Widerstand. Ein Datenerfassungsgerät (DAQ-Gerät) bildet die Schnittstelle zwischen Rechner und Sensorsignalen. Ein Datenerfassungsgerät hat folgende drei Bestandteile:

- Signalaufbereitung
- Analog-Digital-Wandlung: Die überwiegende Anzahl der Schwingungsaufnehmer gibt analoge Ausgangssignale aus. Aus diesem Grunde werden AD-Wandlungen notwendig (was bei digitalen Sensoren entfällt).
- Übertragung erfasster Daten an einen Rechner, z.B. über ein Bussystem (USB, für engl. Universal Serial Bus), lokales Netz (für engl. Ethernet) oder Kommunikationsleitung

Die Ein- und Ausgänge eines Datenerfassungsgerätes stellen sinnvolle Schnittstellen für Einspeisung und Ausleitung von Signalen dar. Die Eingänge des Datenerfassungsgerätes dienen zum Anschluss der Sensoren und die Ausgänge zum Anschluss der Aktoren. Zur Verarbeitung, Visualisierung und Speicherung der Messdaten ist ein Rechner mit DAQ-Software, auch Aufnahmesoftware genannt, erforderlich. Die Software enthält einen Hardwaretreiber zur Kommunikation mit dem DAQ-Gerät, auf den entweder über eine Entwicklungs- bzw. Programmierumgebung oder über die DAQ-Software zugegriffen werden kann.

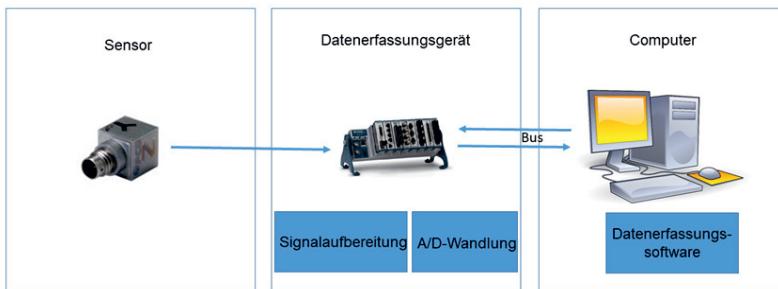


Bild 12: Übersicht über alle Bestandteile zur messtechnischen Erfassung

2.2.4 Sensorarten zur Schwingungsmessung

Zur Schwingungsmessung eingesetzte Sensoren werden oft synonym auch als Schwingungsaufnehmer bezeichnet, die ihre Eingangsschwingungsgrößen in den meisten Fällen in elektrische Ausgangsgrößen umsetzen. Sensoren müssen problemabhängig ausgewählt werden, weil es keinen „Universalsensor“ gibt. Die folgenden sieben Kriterien sind bei der Sensorauswahl zu berücksichtigen:

- Dynamikmessbereich
- Frequenzbereich
- Größe und Gewicht
- Anbringung
- Linearität
- Abhängigkeit von Umwelteinflüssen
- Energieversorgung

Im Bereich der Schwingungsanalyse [22], [23] werden in den meisten Fällen zwei Arten unterschiedlicher Sensoren mit jeweils unterschiedlichen Wirkprinzipien zur Schwingungsmessung [24] eingesetzt:

Elektromechanische Sensoren

- Piezoelektrisches Prinzip
- Piezoresistives und resistives Prinzip
- Kapazitives Prinzip
- Induktives Prinzip

Optische Sensoren

- Laser-Doppler-Prinzip
- Optische Glasfasersensoren
- Hochgeschwindigkeitskameras

Neben der Einteilung von Sensoren nach ihrem Messprinzip gibt es noch weitere nach ihren kinematischen Messgrößen (siehe Tabelle 2) sowie in Relativ- und Absolutaufnehmer. Ein Relativaufnehmer erfasst eine Eingangsgröße gegenüber einem festen, beliebigen äußeren Bezugssystem und misst daher relativ zu diesem Bezugssystem. Er misst den Differenzweg zwischen dem Aufnehmer und der Messgröße. Der Aufnehmer darf sich nicht bewegen, sodass der gemessene Differenzweg der Auslenkung der Messgröße entspricht. Ein Absolutaufnehmer wird als autonomes schwingungsfähiges System mit einer Masse und Feder verstanden und ermittelt seine Messgröße anhand eines ruhenden Bezugssystems, welches durch die Wirkungsweise des Aufnehmers begründet wird. Er nutzt innerhalb des Sensors eine seismische Masse, um die Bewegung der Ankopplungsstelle zur Masse zu bestimmen. Wenn diese Kombination in Schwingung versetzt wird, wirkt über die träge Masse eine Kraft auf das System ein.

Tabelle 2: Einteilung der Schwingungssensoren nach ihren kinematischen Messgrößen, Quelle: [2]

Kinematische Messgröße	Relativaufnehmer	Absolutaufnehmer
Weg	Kapazitiv, Resistiv, Induktiv, Potenziometrisch, Glasfasersensoren, Hochgeschwindigkeitskameras	
Geschwindigkeit	Laser-Doppler-Prinzip	Induktiv
Beschleunigung		Piezoelektrisch, Piezoresistiv, Kapazitiv

Anhand der bekannten Kraft und Masse kann dann auf die Messgröße geschlossen werden. Außer bei optischen Messungen, ist für beide Messarten die Form der Anbringung des Sensors am Prüfobjekt wesentlich. Dabei darf die Gesamtmasse aller Sensoren nicht höher als ein Zehntel vom Gesamtgewicht des Prüfobjektes sein. Die bekanntesten und meist eingesetzten Vertreter elektromechanischer Sensoren sind Beschleunigungsaufnehmer (piezoelektrisches, piezoresistives oder kapazitives Prinzip), Dehnungsmessstreifen (resistives Prinzip) und Geophone bzw. Seismophone (induktives Prinzip). Letztere werden vor allem zum Messen von Bodenschwingungen und -erschütterungen sowie zur Strukturanalyse von Bauwerken eingesetzt. Sie dienen zum Messen von Geschwindigkeiten. Dehnungsmessstreifen werden vor allem an Bauwerken, Werkstoffen und Maschinen zur Messung von Verformungen bzw. Dehnungen eingesetzt. Die am häufigsten für die Modalanalyse eingesetzten elektromechanischen Sensoren sind analoge Beschleunigungsaufnehmer (siehe Bild 13), da sie sowohl zur Analyse von Bauwerken als auch anderer mechanischer Strukturen anwendbar sind und einen breitbandigen linearen Frequenzbereich bis 25 kHz [25] aufweisen. Zur Schwingungsmessung in einer bzw. in drei Dimensionen sind sowohl uniaxiale bzw. triaxiale Beschleunigungsaufnehmer erhältlich.



Bild 13: Triaxialer Beschleunigungssensor der Firma PCB vom Typ 356A44, Quelle: [25]

Durch ihr Gewicht, ihre Größe und ihre Verkabelung können zusätzlich angebrachte, berührende Sensoren die zu analysierenden Schwingungseigenschaften insbesondere kleinerer Strukturen beeinflussen. Die Auflösung der Messpunkte wird durch die Anzahl der Beschleunigungssensoren bestimmt. Im Bereich der optischen Sensoren erreichen Vibrometer (Laser-Doppler-Prinzip) zur Quantifizierung mechanischer Schwingungen immer größere Anwendungsgebiete. Im Gegensatz zu allen bisher vorgestellten Sensoren arbeiten Vibrometer (siehe Bild 14) wie alle optischen Sensoren berührungslos. Ferner bieten Vibrometer eine hohe Messauflösung (512x512) und können pro Messpunkt in drei Dimensionen gleichzeitig messen. Darüber hinaus sind Strukturanalysen im Frequenzbereich bis 25 MHz möglich [26]. Einschränkungen bei der Anwendung gibt es bei mechanischen Strukturen, zu denen kein Sichtkontakt besteht, oder bei Strukturen mit stark reflektierenden Oberflächen.



Bild 14: Polytec 3D Scanning Vibrometer PSV-3D, Quelle: [26]

Zudem weisen Vibrometer eingeschränkte Sichtbereiche auf, was bei großen Strukturen (z.B. Bauwerke, Schiffe, Flugzeuge) zu großem Messaufwand führt, da viele Einzelmessungen zur Analyse gesamter Strukturen benötigt werden. Während mit den anderen Sensorarten gleichzeitige Echtzeitmessung an verschiedenen Stellen eines Prüfobjektes möglich ist, vermessen Vibrometer die einzelnen Messpunkte nacheinander. Deshalb dauert ein Messvorgang mit einem Vibrometer bei voller

Auflösung lange und erfordert eine reproduzierbare Anregung während des gesamten Messprozesses. Ein weiterer großer Nachteil gegenüber den anderen Sensorarten sind die deutlich höheren Anschaffungskosten. Durch diese Einschränkungen haben Vibrometer einen deutlich geringeren Anwendungsbereich als elektromechanische Sensoren. Eine weitere Möglichkeit, Schwingungen optisch zu erfassen, stellt Schwingungsmessung mittels Hochgeschwindigkeitskameras (siehe Bild 15) dar. Diesbezüglich gibt es zwei Algorithmenklassen zur Extraktion von Verformungen aus Videodaten. Zuerst ist hier die digitale Bildkorrelation zu nennen, neuerdings kommen auf der Analyse des optischen Flusses basierende Verfahren hinzu.



Bild 15: GOM ARAMIS SRX Stereosystem: schneller, hochauflösender Bewegungs- und Verformungssensor zur digitalen Bildkorrelation, Quelle: [27]

Je nachdem, ob zwei- oder dreidimensional gemessen werden soll, müssen eine, zwei oder noch mehr Hochgeschwindigkeitskameras eingesetzt werden. Neben der Ermittlung von Deformationen sind mittels dieser Sensorik auch 3D-Rekonstruktionen und statische Verformungsanalysen durchführbar. Zur digitalen Bildkorrelation wird die zu untersuchende Struktur mit einem Sprengelmuster (eng. speckle pattern) besprüht und dann die Bewegung der einzelnen Sprengelpunkte berechnet. Wenn Algorithmen aus dem Bereich des optischen Flusses verwendet werden, ist Aufsprühen eines Sprengelmusters nicht notwendig. Bei beiden algorithmischen Ansätzen werden verformte und verschobene Muster im Kamerabild detektiert. Daraufhin werden Deformationen und statische Verformungen anhand der Bewegung dieser Muster und deren Pixelkoordinaten über mehrere aufeinander folgende Bilder ermittelt. Dieser Ansatz bietet eine vergleichsweise hohe Messauflösung, die durch die Anzahl der Sprengelpunkte oder die Kameraauflösung bestimmt wird, die bis zu ca. 4 Millionen Messpunkte umfassen kann. Der messbare Frequenzbereich hängt von der Kamerabildrate ab und kann bis zu 50 kHz betragen. In Tabelle 3 werden die Vor- bzw. Nachteile zwischen den optischen Sensoren detailliert aufgezeigt.

Tabelle 3: Vor- und Nachteile des Einsatzes von Hochgeschwindigkeitskameras gegenüber dem von Laser-Doppler-Vibrometern

Vorteile	Nachteile
Deutlich schnellere Messzeiten	Hoher Aufwand für Beleuchtung
Schnellere Einrichtungszeit	Abstand zum Prüfobjekt beeinflusst Genauigkeit
Messung transienter Vorgänge mit mehr als 48 Messpunkten [28]	Auftragen eines Sprengelmusters nur bei digitaler Bildkorrelation notwendig
Realistische Visualisierung, da Hintergrundbilder gleiche Abtastrate wie Messung haben ⁽²⁾	Niedrigere Abtastraten
Flächige Messung	Für Laser-Doppler-Vibrometer sind Schwinggeschwindigkeiten im Bereich $\mu\text{m/s}$ möglich, für Kameras hängen sie von Auflösung und Objektgröße ab

Hier konzentrieren wir uns auf elektromechanische Sensoren, weil sie den größten Anwendungsbereich innerhalb der Strukturdynamik abdecken. Zum Abschluss dieses Abschnitts stellen wir die Vor- und Nachteile der optischen und der elektromechanischen Sensoren (siehe Tabelle 4) im Bereich der Modalanalyse gegenüber.

Tabelle 4: Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile optischer und elektromechanischer bzw. berührender Messverfahren im Bereich der Modalanalyse, Quelle: [8]

Kriterium	Optische Verfahren	Berührende Verfahren
Kosten	-	+
Untersuchung kleiner und leichter Strukturen	+	-
Untersuchung großer Strukturen	-	+
Keine zusätzliche Masse	+	-
Messgenauigkeit	+	+
Geringer Konfigurationsaufwand	+	-
Messung über Fläche möglich	+	-

Die berührenden elektromechanischen Sensoren werden aufgrund ihrer deutlich geringeren Kosten und aufgrund ihrer universellen Anwendbarkeit auch bei industriellen Umweltbedingungen⁽³⁾ deutlich öfter eingesetzt als optische. Für die Vermessung mittelgroßer und großer Strukturen, wie z.B. Schiffe und Bauwerke, sind sie besser geeignet. Zudem sind viele Strukturen im Betrieb nicht dauerhaft optisch

² Beim Vibrometer existiert ausschließlich ein Standbild, das zum Anfang der Messung aufgenommen wird.

³ U.a. Bei niedrigen und hohen Temperaturen, in dunklen Umgebungen, Kontakt mit Flüssigkeiten und Ölen möglich, im Betrieb der Maschinen und Anlagen.

zugänglich und Echtzeitvisualisierungen in Form von AR-Anwendungen mit optischen Sensoren nicht möglich. Wegen ihres Umfangs lassen sich von Hochgeschwindigkeitskameras aufgenommene Videodaten nicht in Echtzeit über lokale Netze übertragen. Bei Mehrpunkt-Vibrometern sind Visualisierungen bzw. Messdatenanalysen auch erst nach Abschluss der Messungen möglich. Die größten Nachteile der berührenden Sensoren liegen im deutlich höheren Konfigurationsaufwand (siehe Abschnitt 2.2.6) und in erschwerter flächenhafter Messung. Daher ist ein wesentliches Ziel dieser Arbeit, diese Nachteile gegenüber den optischen Sensoren zu minimieren.

2.2.5 Abfolge von Messungen mit elektromechanischen Sensoren

Bevor auf die einzelnen Probleme in der Messkette mit elektromechanischen Sensoren eingegangen wird, beschreiben wir die nach aktuellem Stand der Technik grundsätzlichen Arbeitsschritte zur Durchführung strukturdynamischer Versuche. Die Arbeitsschritte werden dabei in drei Phasen unterteilt: Konfiguration der Datenerfassung, Strukturkonfiguration und Durchführung der Messung bzw. Visualisierungsphase.

2.2.5.1 Konfiguration der Datenerfassung

In dieser Phase wird die Datenerfassung konfiguriert (siehe Bild 16). Im ersten Schritt wird dazu der generelle Versuchsaufbau festgelegt (S0.1). Dafür muss die Lagerung des Prüfobjektes, die Anregungsart sowie der Sensortyp evaluiert werden. Bei der Anregung wird zwischen ambienter (siehe Abschnitt 2.1.4) und künstlicher Anregung (siehe Abschnitt 2.1.3) unterschieden. Bei künstlicher Anregung wird dann in diesem Schritt der Shaker, der automatische, der manuelle oder der neuartige intelligente Modalhammer (siehe Kapitel 4) angebracht und konfiguriert. Zusätzlich muss die Art der Messauslösung und die Aufnahmezeit festgelegt werden.

Dabei gibt es zwei unterschiedliche Arten, die Messung auszulösen bzw. zu starten:

- Manueller Start und Stopp der Messung
- Sensorschwellwertbasierter Start und Stopp der Messung, wenn das Sensorsignal einen definierten Schwellwert über- bzw. unterschreitet

Weiterhin wird die Messstrategie (siehe Abschnitt 2.1) festgelegt. Die Messstrategien unterscheiden sich wie bereits erwähnt in der experimentellen, operationalen Modalanalyse oder in der Betriebsschwingformanalyse.

S0 Konfiguration der Datenerfassung
S0.1 Festlegung des Versuchsaufbau: Lagerung, Anregungsart, Sensorart, Messstrategie
S0.2 Bestimmung der Sensoranzahl, -positionierungen und -orientierungen
S0.3 Sensoranbringung am Prüfobjekt
S0.4 Anschluss der Sensoren an das Datenerfassungsgerät
S0.5 Anschluss des Datenerfassungsgerätes und Start der Aufnahmesoftware
S0.6 Festlegen der Datenerfassungseinstellungen

Bild 16: Ablauf der Einrichtungsphase zur Datenerfassung

Im nächsten Arbeitsschritt werden Anzahl, Position und Schwingungsrichtung der Sensoren evaluiert (S0.2). Dies geschieht in den meisten Fällen anhand von Simulationsergebnissen oder Expertenwissen. Danach werden die Sensoren am Prüfobjekt montiert (S0.3). Hierbei gibt es unterschiedliche Möglichkeiten der Anbringung wie z.B. mittels Magneten, Heißwachs, Kleber oder Anschrauben. Die unterschiedlichen Anbringungsarten sind anwendungsbezogen auszuwählen und ermöglichen unterschiedliche Frequenzbereiche zur Messung. Dann werden die kabelgebundenen Sensoren am Datenerfassungsgerät angesteckt (S0.4), das Datenerfassungsgerät an einen Rechner angeschlossen und die Aufnahmesoftware gestartet (S0.5). Zum Abschluss wird die Datenerfassung konfiguriert (S0.6). Einstellungen des Datenerfassungsgerätes sind u.a. Abtastrate der Messung, Festlegung der zu messenden Einheit und sensorspezifische Übertragungsfaktoren zur Umrechnung des Spannungssignals in die jeweilige physikalische Einheit.

2.2.5.2 Strukturkonfiguration

In dieser Phase werden das Prüfobjekt geometrisch erfasst und ihm die Sensoren (siehe Bild 17) zugewiesen. Ohne diese Phase wäre es nicht möglich, die Eigenschwingungs- und Betriebsschwingformen zu visualisieren. Um die berechneten Eigenschwingungs- bzw. Betriebsschwingformen visualisieren zu können, wird ein geometrisches Modell des Prüfobjektes benötigt, das aktuell meistens manuell mit einem CAD-Programm erstellt wird (S1.2). Wenn die Abmessungen des Prüfobjektes nicht vorliegen, muss es zusätzlich noch vermessen werden (S1.1). Als Geometrie werden vor allem Dreiecksnetze oder vereinfachte Liniensmodelle genutzt. Zur korrekten Animation müssen die Sensoren dem geometrischen Modell des Prüfobjektes präzise zugeordnet werden, da bei ungenauer Zuordnung die Eigenschwingungsformen an falschen Orten bzw. in falsche Richtungen der Struktur dargestellt werden würden. Somit ist einerseits eine genaue Vermessung der

Sensorpositionen bzw. eine präzise einheitliche Feststellung der Sensorposen in Relation zur untersuchten Struktur notwendig (S1.3). Andererseits müssen diese an der zu untersuchenden Struktur festgestellten Sensorposen dann manuell in das virtuelle Geometriemodell eingetragen werden (S1.4).

S1 Strukturkonfiguration

S1.1 Manuelle Vermessung des Prüfobjektes

S1.2 Manuelle 3D-Rekonstruktion des Prüfobjektes

S1.3 Manuelle Bestimmung der Sensorposen

S1.4 Manuelle Zuweisung der Sensorposen zum geometrischen Modell

Bild 17: Ablauf der Strukturkonfigurationsphase

Dieser Schritt erfordert in den meisten Anwendungen den größten Zeitaufwand und wird von vielen Ingenieuren aktuell noch mit Stift, Papier und vielen Fotografien des Messaufbaus durchgeführt. Somit entstehen bei Messungen mit vielen Messpunkten schnell umfangreiche Dokumentationen.

2.2.5.3 Visualisierung, Validierung und Durchführung der Messung

Nachdem die Konfigurationen der Datenerfassung und der Struktur abgeschlossen sind, erfolgt die Visualisierung und die parallele Speicherung der Sensorwerte (siehe Bild 18). Bevor mit der Aufnahme begonnen werden kann, wird im ersten Schritt der Messaufbau visuell mit Testmessungen validiert. Dabei wird festgestellt, ob alle Sensoren korrekt installiert sind und entsprechende Signale liefern. Dafür werden die Sensorantworten im Zeit- und Frequenzbereich bei Anwendungen mit ambienter Anregung validiert. Im Falle künstlicher Anregung wird auch noch das Anregungssignal im Zeit- und Frequenzbereich validiert. Zusätzlich werden die Transferfunktion und die Kohärenz zwischen dem Anregungssignal und ausgewählten Sensorantworten zur Validierung herangezogen. Die Kohärenz drückt die lineare Abhängigkeit zwischen zwei Eingabesignalen über dem gesamten Frequenzbereich aus: 1 bedeutet hohe und 0 niedrige lineare Abhängigkeit. Bei Vorhandensein vieler Sensoren ist diese Art der Validierung deutlich erschwert, da alle Sensoren einzeln ausgewertet werden müssen. Dabei ist auch nicht ersichtlich, ob die richtigen Sensorposen und die richtige Sensoranzahl bestimmt wurden. Dafür wäre eine Visualisierung direkt am Prüfobjekt mittels einer Betriebsschwingformanalyse notwendig. Somit könnten alle Sensoren auf einen Blick validiert werden und es wäre unmittelbar ersichtlich, ob die Sensoren die gesamte Dynamik des Prüfobjektes wiedergeben.

S2 Visualisierung und Durchführung der Messung

S2.1 Synchronisierter Empfang der Sensorwerte

S2.2 Visualisierung der Sensorwerte

S2.3 Speichern der Sensorwerte

Bild 18: Ablauf der Phase zur Visualisierung und Durchführung der Messung

War die Validierung des Messaufbaus erfolgreich, so wird die Messung gestartet. Dabei wird die vorher festgelegte Messstrategie abgearbeitet. Auch während der Messung werden parallel die Messdaten visuell validiert. Dafür werden die gleichen Visualisierungen, wie bei der Validierung des Messaufbaus genutzt. Nach erfolgreicher Durchführung werden die Messdaten für die spätere Analyse gespeichert und exportiert.

2.2.6 Probleme in der Messkette mit elektromechanischen Sensoren

Korrekt durchgeführte Messungen sind wesentlich für die spätere Durchführung der Schwingungsanalyse. Denn bei ungenügend vorgenommenen Messungen kann es zu starken Abweichungen von der Realität kommen, die auch nicht durch die besten Algorithmen zur Modalanalyse korrigiert werden können. Um eine Messung zur Modalanalyse vorzunehmen, werden derzeit immer noch komplexe Kenntnisse bzw. großes Erfahrungswissen vom Anwender erwartet. Für eine Schwingungsanalyse zur Konstruktion, Begutachtung oder zur dynamischen Optimierung einer Struktur oder eines Bauwerkes sind beim gegenwärtigen Stand der Technik bedingt durch die Einrichtung der Messhardware, die Durchführung der Strukturkonfiguration und durch die Validierung der Messung große zeitliche bzw. personelle Aufwände notwendig. Besonders bei der Schwingungsanalyse großer Bauwerke bzw. anderer komplexer Strukturen muss großer Zeit- und Kostenaufwand für die gesamte Messkette eingeplant werden. In Form einer Betriebsschwingformanalyse werden Messungen aufgrund der aufwendigen Strukturkonfiguration meistens erst nachträglich validiert. Somit können Fehler innerhalb der Messkette erst im Anschluss festgestellt werden. Dadurch kann es sein, dass komplette Messungen wiederholt werden müssen. Aktuell werden Eigenschwingungsformen häufig mit manuell erstellten geometrischen Modellen dargestellt. Zur Erstellung von 3D-Rekonstruktionen werden CAD-Programme genutzt. Bei aufwendigen Strukturen verursacht diese Herangehensweise einen immensen Zeitaufwand, sodass in den meisten Fällen nur einfache und somit unrealistische Modelle angefertigt werden. Dieser Zeitaufwand wird durch die zusätzliche Zeit zur manuellen Vermessung einer Originalstruktur durch den Ingenieur

drastisch erhöht. Für eine korrekte Animation ist die präzise Zuordnung der Sensoren zur 3D-Rekonstruktion wesentlich, da durch ungenaue Zuordnung die Eigenschwingungsformen an falschen Orten bzw. in falsche Richtungen der Struktur dargestellt werden würden. Somit ist eine präzise Vermessung der Sensorposen in Relation zum Prüfobjekt notwendig. Andererseits müssen die an der zu untersuchenden Struktur festgestellten Sensorposen dann manuell in die 3D-Rekonstruktion eingetragen werden. Analog zur Erstellung der 3D-Rekonstruktion steigt der zeitliche Aufwand besonders bei großen CAD-Modellen und vielen Sensoren.

2.3 Grundlagen der Angereicherten Realität

In diesem Abschnitt werden der Begriff Angereicherte Realität und theoretische Grundlagen dazu sowie daran anschließend die wesentlichen Bestandteile von AR-Anwendungen beschrieben.

2.3.1 Kameramodell

Ein Modell einer Kamera dient zur exakten mathematischen Beschreibung der projektiven Abbildung der Kamera und ist notwendig, um die geometrische Projektion eines dreidimensionalen Objektes auf einen zweidimensionalen Bildschirm berechnen zu können.

2.3.2 Grundzüge geometrischer Projektion

In diesem Abschnitt werden die mathematischen Grundlagen der Computergraphik zur Darstellung räumlicher Strukturen aufgezeigt. Die Darstellung orientiert sich hauptsächlich an [29] und [30]. Geometrische Projektion dreidimensionaler Objekte der Welt auf eine Bildebene ist eine grundlegende Aufgabenstellung der Computergraphik bzw. der darstellenden Kunst im Allgemeinen. Die mathematische Auseinandersetzung mit geometrischer Projektion hat ihren Ursprung in der italienischen Malerei der Renaissance [31]. In dieser Epoche wurde der projektive Raum P^n mathematisch formalisiert. Er ist eine Erweiterung des euklidischen Raumes R^n um im Unendlichen liegende ideale Punkte, Geraden und Ebenen. Somit konnten erstmals projektive Effekte im Unendlichen dargestellt werden. Die Punkte des projektiven Raumes werden durch $(n+1)$ -dimensionale Vektoren charakterisiert. Die Idee des projektiven Raumes kann analog zur Projektion einer dreidimensionalen Szene auf ein zweidimensionales Abbild durch das menschliche Auge auf eine Kamera übertragen werden. Dabei stellt die Kamera bspw. den Ursprung des

zugrunde liegenden dreidimensionalen Vektorraums dar und der projektive Raum entspricht den Bildpunkten.



Bild 19: Beispiel einer Zentralprojektion. Hierbei scheinen sich die parallel verlaufenden Schienen am Horizont zu schneiden, Quelle: [32]

Zur Beschreibung des projektiven Raumes P^n werden homogene Koordinaten verwendet. Eine ihrer wesentlichen Eigenschaft ist Invarianz gegenüber Skalierungen. Die Bildpunkte bzw. projektiven Punkte werden dabei als Strahlen definiert, die vom Ursprung ausgehend bis ins Unendliche verlaufen (siehe Bild 19). Alle Punkte des dreidimensionalen Raumes, die auf einem dieser Strahlen liegen, sind mittels eines Skalierungsfaktors ineinander überführbar. Damit gelten alle Punkte auf einem Strahl in diesem Modell als äquivalent. Die homogenen Koordinaten fügen im Vergleich zu den Punkten im reellen Raum eine Dimension hinzu, sodass zur Beschreibung dreidimensionaler Objekte vier Dimensionen benötigt werden. Durch die Skalierungsinvarianz der homogenen Koordinaten kann der folgende Sonderfall erzeugt werden: Wenn die Strahlen des P^2 von einer Ebene geschnitten werden, können die Schnittpunkte zwischen Strahlen und Ebene als Repräsentanten der Ebene verwendet werden. Wenn eine parallel zur xy-Ebene gelegte Ebene E existiert und die dritte Vektorkomponente z dieser Ebene auf 1 skaliert wird, so lässt sich diese Ebene als Einbettung des Raumes R^2 in P^2 verstehen mit dem Zusatz, dass zusätzliche Punkte in P^2 existieren, die keine Schnittpunkte mit der Ebene darstellen. Diese Punkte werden als ideale Punkte bezeichnet und liegen im Unendlichen. Sie sind parallel zur Ebene E gelegen und weisen in z eine 1 auf. Somit kann jedem Punkt $p'(x, y)^T \in R^2$ ein nicht idealer homogener Punkt $P(x, y, 1)^T \in P^2$ zugeordnet werden:

$$f_{RP}: p'(x, y)^T \rightarrow p(x, y, 1)^T \quad (1)$$

Umgekehrt kann folgendermaßen für jeden nicht idealen Punkt $p(x, y, w)^T \in P^2$ ein Repräsentant durch $p'(x/w, y/w)^T \in R^2$ ermittelt werden:

$$f_{PR}: p(x, y, w)^T \rightarrow p'(x/w, y/w)^T \quad (2)$$

Zusammengefasst bedeutet dies, dass im homogenen Koordinatensystem jeder Punkt, der auf der Geraden liegt, die durch den Ursprung und den Punkt $p(x/w, y/w, 1)^T$ definiert wird, denselben Punkt im kartesischen Koordinatensystem repräsentiert. Außer zur Formalisierung projektiver Effekte werden homogene Koordinaten in der Computergraphik vor allem bei affinen Abbildungen und diesbezüglichen Koordinatentransformationen herangezogen.

2.3.3 Lochkamera

Wenn dreidimensionale Objekte auf einen zweidimensionalen Bildschirm bzw. auf eine Bildebene projiziert werden sollen, wird auch die projektive Geometrie eingesetzt. Dafür werden in der Computergraphik verschiedene Kameramodelle verwendet. In den meisten Fällen sind diese Modelle idealisiert und simulieren deshalb nur näherungsweise die realen Kameraeigenschaften bzw. das menschliche Auge. Diese Modelle lassen sich dabei in perspektivische Projektion und Parallelprojektion unterteilen. In vielen Anwendungen der Computergraphik ist ausschließlich die perspektivische Transformation von Interesse, da auch das menschliche Auge eine identische Transformation vornimmt. Ein großer Unterschied zwischen perspektivischer und Paralleltransformation besteht darin, dass bei ersterer Objekte mit größerem Abstand zur Kamera kleiner werden.

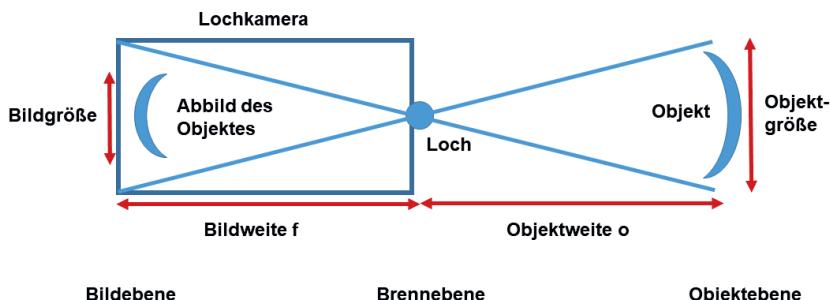


Bild 20: Schematische Darstellung einer Lochkamera, bestehend aus einem Kameragehäuse und einem kleinen Loch, durch das Licht eindringen kann

Das einfachste Modell zur Abbildung mittels perspektivischer Projektion ist die Lochkamera (siehe Bild 20). Im Gegensatz zu einer normalen Kameralinse, durch die mehr Licht in eine Kamera eindringen kann und damit kürzere Belichtungszeiten erlaubt, überlagern sich die Projektionen bei der Lochkamera nicht, womit die Bilder immer scharf bleiben. Deswegen wird in vielen Anwendungen ein idealisiertes Lochkameramodell mit einem „unendlich“ kleinen Loch verwendet. Dadurch ist die Abbildung einer Tiefenunschärfe nicht möglich. Somit werden alle Objekte im Kamerabild scharf abgebildet. Weiterhin wird die Bildebene im Abstand der Bildweite

vor das Loch verschoben, da es mathematisch irrelevant ist, ob sich die Bildebene vor oder hinter dem Loch befindet. Somit steht das Bild dann auch nicht mehr auf dem Kopf.

2.3.4 Intrinsische Kameraparameter

Kameraparameter existieren bei projektiven Kameramodellen, können sich aber in diesen unterscheiden. Die intrinsischen Kameraparameter (siehe Bild 21) umfassen die innere Geometrie einer Kamera und unterscheiden sich bei jeder Kamera. Deswegen ist eine Kalibrierung zur Bestimmung der intrinsischen Parameter erforderlich. Das Loch einer Kamera wird im Weiteren als Projektionszentrum bzw. optisches Zentrum U_{Kamera} der Kamera verwendet und liegt im Ursprung des Kamerakoordinatensystems. Weiterhin fällt die optische Achse der Lochkamera mit der z-Achse des Kamerakoordinatensystems zusammen. Im Abstand der Bildweite bzw. Brennweite f vom Projektionszentrum befindet sich die Bildebene B und das optische Zentrum des Bildes (p_x, p_y) in Bildkoordinaten. Auf dieser Bildebene bildet die Kamera die dreidimensionale Welt zweidimensional ab. Die Bildebene ist dabei stets parallel zur xy-Ebene des Kamerakoordinatensystems ausgerichtet. Das zweidimensionale Koordinatensystem der Bildebene hat in den meisten Anwendungen der Computergraphik seinen Ursprung U_{Bild} in der linken oberen Ecke der Ebene. Die Positionen der Punkte auf der Bildebene werden in homogenen Koordinaten angegeben und mittels der Formel (1) ermittelt. Der Schnittpunkt, an dem die optische Achse (Z_{Kamera}) und die Bildebene zusammentreffen, liegt an der Stelle $(p_x, p_y, 1)^T$ und wird auch Bildhauptpunkt H genannt. Im Bildkoordinatensystem wird die Einheit Pixel verwendet. Bei realen Kameras wird das Bild in horizontaler und vertikaler Richtung in den meisten Fällen unterschiedlich skaliert. Daher gelten unterschiedliche Skalierungsfaktoren m_x, m_y für die x- und y-Richtung der Bildebene. Gleiches gilt somit auch für die Parameter (a_x, a_y) , die gemäß:

$$a_x = f * m_x, a_y = f * m_y \quad (3)$$

durch Multiplikation mit der Brennweite f und den Skalierungsfaktoren, und für die Parameter (x_0, y_0) , die durch:

$$x_0 = p_x * m_x, y_0 = p_y * m_y \quad (4)$$

bestimmt werden. Zusätzlich wird oft ein Scherungsparameter s angegeben, wenn die optische Achse nicht senkrecht auf dem Bildsensor steht, denn dann würde eine Scherung auftreten. Die Projektion eines beliebigen dreidimensionalen Punktes

P_{Kamera} des Kamerakoordinatensystems auf die Bildebene wird in diesem Modell durch den Schnittpunkt des Richtungsstrahls vom optischen Zentrum U_{Kamera} zum Punkt P_{Kamera} mit der Bildebene bestimmt.

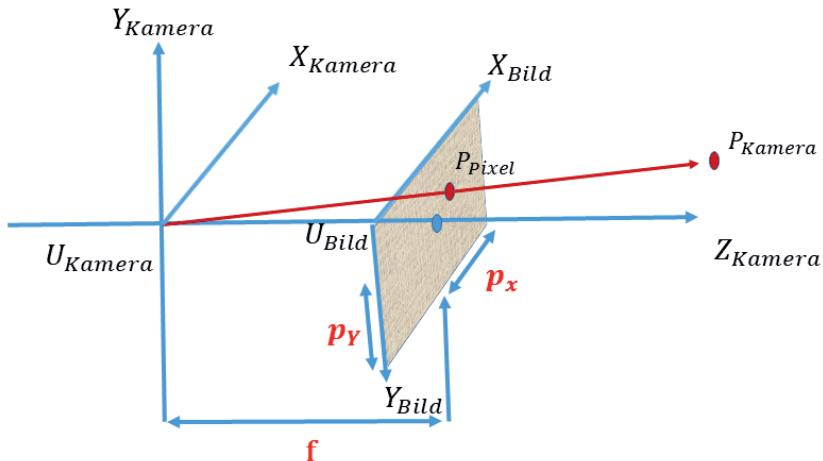


Bild 21: Schema der intrinsischen Kameraparameter

Somit ergibt sich der Zusammenhang zwischen der Kamerakoordinate P_{Kamera} und dem Bildpunkt in der Pixelebene P_{Pixel} folgendermaßen [29]:

$$P_{Pixel} = K \begin{bmatrix} I & | & 0 \end{bmatrix} * P_{Kamera} \text{ mit Kameramatrix } K = \begin{pmatrix} a_x & s & x_0 \\ 0 & a_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

Einheitsmatrix $I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ und Nullvektor $0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ (5)

In vielen Veröffentlichungen werden die fünf intrinsischen Elemente der Kameramatrix K , und zwar x_0 , y_0 , a_x , a_y und s , auch interne bzw. intrinsische Kameraparameter genannt.

2.3.5 Extrinsische Kameraparameter

Durch diese Kameraparameter wird die Pose des Ursprungs des betrachteten Kamerakoordinatensystems in einem Referenzkoordinatensystem bestimmt. Als solches wird ein Koordinatensystem der Welt W eingeführt, mit dem die globale Position der Kamera in der Szene bzw. die Bewegung der Kamera in der Welt erfasst wird. Das Welt- oder Referenzkoordinatensystem dient als fester Bezugsrahmen vor allem, wenn mehrere Kameras eingesetzt werden. Der Zusammenhang zwischen Kamera- und Weltkoordinatensystem wird durch eine euklidische Transformation

definiert. Die Parameter dieser Transformation werden oft als externe bzw. extrinsische Kameraparameter bezeichnet (siehe Bild 22). Sei P_{Welt} ein Punkt im Weltkoordinatensystem, dann wird der entsprechende Punkt P_{Kamera} folgendermaßen bestimmt:

$$P_{Kamera} = \begin{pmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{pmatrix} * P_{Welt} \text{ mit Rotationsmatrix } R \text{ und Translationsvektor } t \quad (6)$$

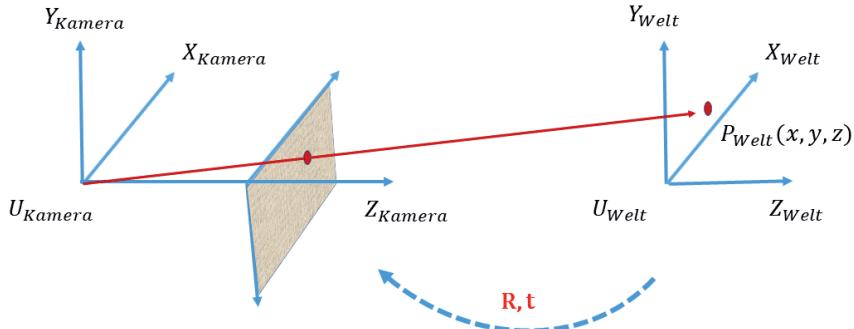


Bild 22: Schematische Darstellung der extrinsischen Kameraparameter

Die 3×3 -dimensionale Rotationsmatrix R beschreibt dabei die Drehwinkel um drei Koordinatenachsen und der dreidimensionale Translationsvektor die Verschiebung. Somit werden zur Beschreibung der externen Kameraparameter sechs Freiheitsgrade benötigt⁽⁴⁾, die sich in drei Freiheitsgrade der Translation und drei der Rotation unterteilen.

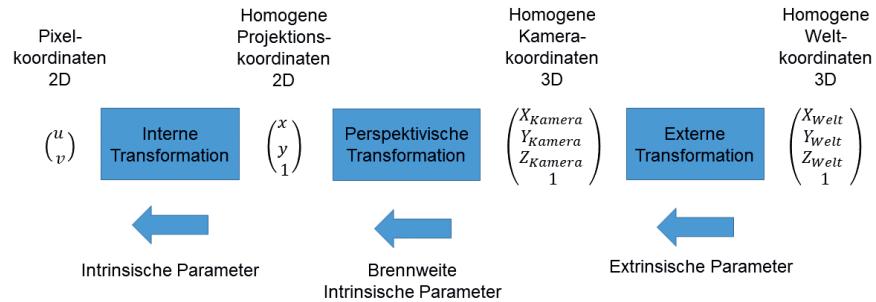


Bild 23: Überblick über die Transformation von Weltkoordinaten zu Pixelbildkoordinaten

Für das Modell einer projektiven Kamera lässt sich dann unter Berücksichtigung der internen und externen Kameraparameter die folgende Projektionsmatrix T aufstellen, die alle Kameraparameter berücksichtigt:

⁴ Analog zur Beschreibung der Bewegung eines starren Körpers siehe Abschnitt 2.3.6.

$$T = K[I|0]^* \begin{pmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Die Projektionsmatrix T dient zur Übertragung der Punkte im Weltkoordinatensystem W in das Bildkoordinatensystem B (siehe Bild 23). Somit wird die Projektion eines Punktes P_{Welt} in den Punkt P_{Pixel} in der Pixelebene folgendermaßen berechnet:

$$P_{\text{Pixel}} = T * P_{\text{Welt}} \quad (8)$$

2.3.6 Geometrische Transformationen

In diesem Abschnitt sollen die mathematischen Grundlagen der Darstellung von Rotation und Translation zur Beschreibung der Bewegung eines starren Körpers detailliert erläutert werden. Unter Rotation wird hier eine lineare Abbildung im dreidimensionalen reellen Raum verstanden, die einem Punkt $p \in R^3$ neue Koordinaten $p_{\text{neu}} \in R^3$ zuweist. Hierfür werden alle Punkte um einen konstanten Winkel und ein Drehzentrum rotiert. Zusätzlich gelten folgende Festlegungen:

- Der Abstand zweier Punkte bleibt vor und nach der Rotation gleich.
- Der Winkel zwischen drei Punkten bleibt vor und nach der Rotation gleich.

In AR-Anwendungen werden zur Darstellung der Rotation meist Eulerwinkel, Quaternionen oder eine Rotationsmatrix eingesetzt. Die Rotationsmatrix R wird dabei als 3×3 -Orthonormalmatrix festgelegt und es gelten die folgenden Eigenschaften:

$$RR^T = 1 \text{ und } \text{determinante}(R) = 1 \text{ und } p_{\text{neu}} = Rp. \quad (9)$$

Unter Translation wird ebenfalls eine lineare Abbildung im dreidimensionalen reellen Raum verstanden, die einem Punkt $p \in R^3$ neue Koordinaten $p_{\text{neu}} \in R^3$ zuweist. Zusätzlich gelten folgende Festlegungen:

- Alle Punkte werden in eine identische Richtung mit konstantem Betrag verschoben.
- Winkel und Abstände zwischen den Punkten bleiben vor und nach der Translation gleich.

Die Translation t wird im Gegensatz zur Rotation als Vektor $t \in R^3$ dargestellt und es gelte: $p_{\text{neu}} = p + t.$ (10)

Die Rotationsmatrix R kann auch mit drei Eulerwinkeln $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ dargestellt werden.

Mit diesen werden die Rotationen um die x-, y- und z-Achse beschrieben. Die Rotationsmatrix ist daher das Produkt der Einzelrotationsmatrizen bzgl. der jeweiligen Achsen: $R = R_x R_y R_z.$ Diese Art der Darstellung hängt stark von der Reihenfolge der Multiplikation ab bzw. um welchen Eulerwinkel zuerst gedreht wird und muss daher

vor Anwendung beachtet werden. Dies hängt damit zusammen, dass die Matrizenmultiplikation im Allgemeinen nicht kommutativ ist. Die Eulerwinkel beziehen sich immer auf das Koordinatensystem des Objektes, welches gedreht werden soll, und nicht auf ein festes, gleichbleibendes Koordinatensystem des Raumes. In der Literatur gibt es unterschiedliche Drehfolgekombinationen. Hier werden die Eulerwinkel mit Gier- (für engl. yaw), Nick- (für engl. pitch) und Rollwinkel (für engl. roll) bezeichnet und für Gierwinkel das Formelzeichen ψ , für Nickwinkel θ und für Rollwinkel ϕ verwendet. Diese Bezeichnungen werden meist zur Beschreibung der Orientierung bei Fahrzeugen und Luftfahrzeugen, aber auch im Rahmen von VR- und AR-Anwendungen genutzt. Die sequentielle Abfolge der Drehbewegungen, angefangen beim Gierwinkel über die Drehung mit dem Nickwinkel bis hin zur Drehung um den Rollwinkel, entspricht der Konvention $R_z R_y R_x$. Die Einzelrotationsmatrizen R_R , R_N , R_G werden wie folgt berechnet [33]:

$$R_R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$R_N = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$R_G = \begin{pmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

Daraus folgt für die Rotationsmatrix R [33]:

$$R_{GNR} = \begin{pmatrix} \cos\theta\cos\psi & \cos\theta\sin\psi & -\sin\theta \\ \sin\phi\sin\theta\cos\psi - \cos\phi\sin\psi & \sin\phi\sin\theta\sin\psi + \cos\phi\cos\psi & \sin\phi\cos\theta \\ \cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi & \cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi & \cos\phi\cos\theta \end{pmatrix} \quad (14)$$

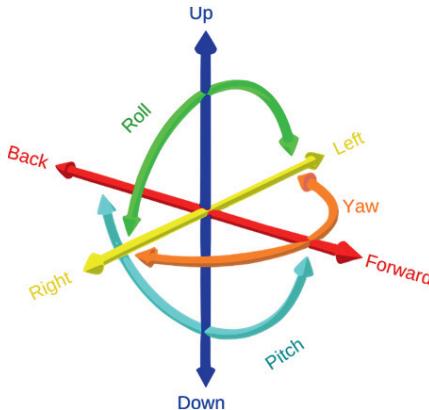


Bild 24: Darstellung der sechs Grade der Bewegungsfreiheit eines Körpers, Quelle: [34]

Die Definition der Translation und Rotation mit Eulerwinkeln dient zur mathematischen Formulierung der Bewegungsfreiheit eines starren Körpers mit sechs Freiheitsgraden zur genauen Präzisierung der Pose (siehe Bild 24). Die sechs Freiheitsgrade unterteilen sich in drei Freiheitsgrade zur Beschreibung der Translation und drei für die Rotation. Die drei Dimensionen der Translation stehen für vor (für engl. forward) und zurück (für engl. back) auf der Längsachse, hoch (für engl. up) und niedrig (für engl. down) auf der Vertikalachse sowie rechts (für engl. right) und links (für engl. left) auf der Querachse. Die restlichen Dimensionen zur Festlegung der Rotation stehen wie bereits erläutert für Rollen (Rotation um die Längsachse) θ_x , Gieren (Rotation um die Vertikalachse) θ_y und Nicken (Rotation um die Querachse) θ_z . Es sei darauf hingewiesen, dass bei Verwendung von Eulerwinkeln zwei Probleme entstehen können:

- Kardanische Blockade (für engl. Gimbal Lock): In diesem Zustand liegen zwei der drei Drehachsen parallel zueinander und damit entfällt ein Freiheitsgrad des Systems. Bei der ZYX-Konvention wird die kardanische Blockade erreicht, wenn der Nickwinkel 90° beträgt. In diesem Falle würden Rollen als auch Gieren die gleiche Bewegung vollziehen.
- Mehrdeutigkeit der Rotation: Wegen der Mehrdeutigkeit der Eulerrotationen kann die gleiche Endposition mittels mehrerer Rotationskombinationen erreicht werden.

Diese Probleme lassen sich durch Verwendung von Quaternionen umgehen. Darstellungen mittels Quaternionen sind besonders in der Bildverarbeitung und der Robotik weit verbreitet. Allgemein stellen Quaternionen eine Erweiterung der reellen Zahlen mit vier Dimensionen dar. Ähnlich den komplexen Zahlen, die aber nur zwei Dimensionen besitzen und Summen aus Real- und Imaginärteil sind, wird eine Quaternion als Linearkombination aus drei Imaginärteilen und einem Realteil definiert [35]:

$$Q = iq_x + jq_y + kq_z + q_w = [(q_x, q_y, q_z), q_w] \quad (15)$$

wobei i, j, k folgende Eigenschaften aufweisen:

$$\begin{aligned} i^2 &= -1, j^2 = -1, k^2 = -1, \\ ij &= k, ji = -k, jk = i, kj = -i, ki = j, ik = -j \end{aligned} \quad (16)$$

Hier wird ausschließlich auf die Eigenschaften der Quaternionen zur Beschreibung von Rotationen im Raum eingegangen. Eine detaillierte Auseinandersetzung mit allen Eigenschaften der Quaternionen ist in [36] zu finden.

Rotation mit Quaternion

Um Quaternionen rotieren zu können, müssen sie normalisiert werden: $q'_x{}^2 + q'_y{}^2 + q'_z{}^2 + q'_w{}^2 = 1$. Hierfür muss durch die Originallänge der Quaternion geteilt werden und das Resultat ist dann die Einheitsquaternion:

$$\begin{aligned} |Q| &= \sqrt{q_x^2 + q_y^2 + q_z^2 + q_w^2} \text{ und} \\ q'_x &= \frac{q_x}{q}, q'_y = \frac{q_y}{q}, q'_z = \frac{q_z}{q}, q'_w = \frac{q_w}{q} \end{aligned} \quad (17)$$

Mit dem Vektor (q'_x, q'_y, q'_z) wird die Rotationsachse und mit $\varOmega = 2\arccos(q'_w)$ der Drehwinkel beschrieben. Das heißt, es wird mit dem realen Anteil gedreht. Die drei Vektorkoordinaten der Rotationsachse werden mit den imaginären Anteilen und dem Drehwinkel folgendermaßen bestimmt:

$$q_R = \begin{bmatrix} q'_x \\ \frac{q'_w}{\sin(\frac{\varOmega}{2})} \\ q'_y \\ \frac{q'_w}{\sin(\frac{\varOmega}{2})} \\ q'_z \\ \frac{q'_w}{\sin(\frac{\varOmega}{2})} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Rotationsmatrix aus Einheitsquaternion berechnen

Mittels der Einheitsquaternion kann dann auch die Rotationsmatrix R folgendermaßen bestimmt werden:

$$R = \begin{pmatrix} (q'^2_w + q'^2_x - q'^2_y - q'^2_z) & 2(q'_x q'_y + q'_z q'_w) & 2(q'_x q'_z + q'_y q'_w) \\ 2(q'_x q'_y + q'_z q'_w) & (q'^2_w - q'^2_x + q'^2_y - q'^2_z) & 2(q'_y q'_z + q'_x q'_w) \\ 2(q'_x q'_z + q'_y q'_w) & 2(q'_y q'_z + q'_x q'_w) & (q'^2_w - q'^2_x - q'^2_y + q'^2_z) \end{pmatrix} \quad (19)$$

Natürlich können auch die Eulerwinkel aus den entsprechenden Quaternionen berechnet werden.

2.3.7 Definition des Begriffs AR

Durch die immer größere Verbreitung mobiler Endgeräte, wie Smartphones und Tablet-PCs, wird die Vision des allgegenwärtigen Rechnens (für engl. Ubiquitous Computing) von Mark Weiser [37] immer realer. Unter diesem Begriff wird die Ablösung des Rechners als sichtbares Gerät verstanden. Das Ziel ist, dass die Technik in den Hintergrund gerät und sich vollständig in den Alltag des Anwenders integriert. Hierdurch soll eine Verschmelzung zwischen realer und rechnererzeugter Welt ermöglicht werden, sodass die Technik dem Benutzer in seinen Alltagsarbeiten und Anwendungen unsichtbar assistiert. Im Zusammenhang mit dem allgegenwärtigen Rechnen wird häufig auch vom „Internet der Dinge“, als auch von AR gesprochen, sodass alle als wesentliche Kerntechnologien verstanden werden können. Der Begriff AR wird in der deutschen Sprache mit Augmentierter Realität, teilweise aber auch als Erweiterte oder Angereicherte Realität übersetzt. Hier wird der Begriff Angereicherte Realität verwendet. Es gibt zahlreiche unterschiedliche und auch widersprüchliche

Definitionen des Begriffes AR. Rein aus dem Wortsinn ableitend wäre die Wahrnehmung rechnererzeugter Objekte in der realen Welt eine intuitive Definition. Sie umfasst aber nicht die gesamte Komplexität des Begriffs. Obwohl die erste AR-Umsetzung durch Ivan Sutherland schon auf die späten 1960er Jahre zurückgeht, stammt die am häufigsten zitierte Definition des Begriffs von Ronald T. Azuma. Sie wurde 1997 in der Studie „A Survey of Augmented Reality“ [38] veröffentlicht. Gemäß dieser Definition stellt AR eine Überlagerung von Realität und Virtualität bzw. eine Erweiterung der Realität um rechnererzeugte Zusatzinformationen dar. Zusätzlich muss eine solche Anwendung interaktiv sein (Interaktivität), die Darstellung muss dabei in Echtzeit (Echtzeitfähigkeit) erfolgen und die rechnererzeugten Objekte müssen registriert sein. In [39] wird AR als eine neuartige Form der Mensch-Technik-Interaktion definiert, durch die die unmittelbare Realität des Anwenders mit zusätzlichen verschiedenenartigen Informationen erweitert wird. Die Erweiterungen betreffen alle Sinnesorgane des Benutzers wie Sehen, Hören, Riechen, Schmecken und Tasten. Hier wird ausschließlich auf die visuelle Erweiterung der Realität eingegangen. AR-Anwendungen lassen sich als Teilmenge in den Bereich der Anwendungen Vermischter Realität (MR, für engl. Mixed Reality) einordnen. Mit dem Begriff Vermischte Realität werden Systeme bzw. Umgebungen bezeichnet, die die natürliche Welt mit der durch Rechner erzeugten Welt vermischen.

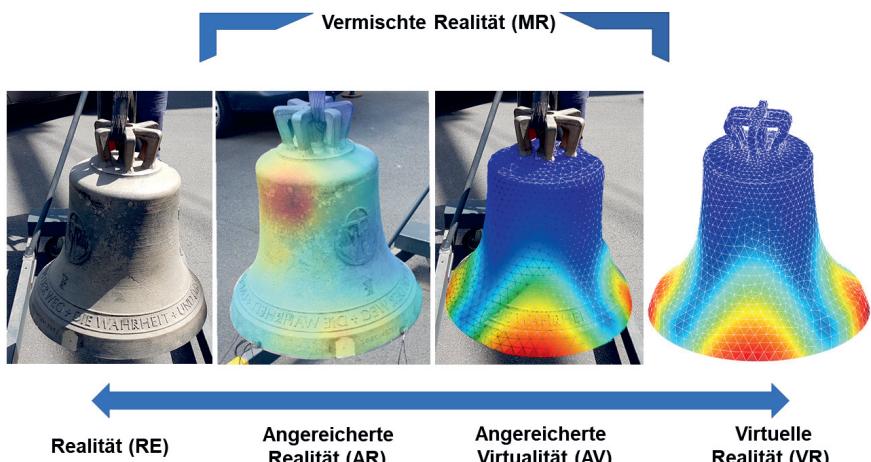


Bild 25: Realitäts-Virtualitätskontinuum [40] am Beispiel einer strukturdynamischen Vermessung

Das Realitäts-Virtualitätskontinuum (siehe Bild 25) beschreibt die Formen der optischen Darstellung angefangen mit der Realität (RE, für engl. Real Environment), die den Anwender umgibt, bis hin zur virtuellen Realität (VR, für engl. Virtual Reality), die vollständig durch Rechner erzeugt wird, und füllt das gesamte Spektrum der optischen, rechnergesteuerten Wiedergabe. Zwischen den beiden Extremen RE und

VR liegen die sogenannten Techniken der Vermischten Realität. Sie unterteilen sich wiederum in AR und in die sogenannte Angereicherte Virtualität (AV, für engl. Augmented Virtuality). Der Unterschied zwischen diesen beiden Gruppen besteht im Anteil rechnererzeugter Elemente innerhalb einer Darstellung. Bei AR-Anwendungen liegt der Fokus auf der Darstellung der Realität, die daher nur mit wenigen rechnererzeugten Objekten angereichert wird. Im Unterschied dazu werden in AV-Anwendungen deutlich mehr rechnererzeugte Elemente zur Darstellung genutzt und die Anzahl realer Elemente deutlich reduziert. Eine Beispielanwendung für diese Art der Darstellung ist ein Nachrichtensprecher in einer komplett rechnererzeugten Umgebung. Der Anteil der rechnererzeugten Elemente ist daher wesentlich für die Position im Realitäts-Virtualitätskontinuum. Da die Echtzeitvisualisierung zur Betriebsschwingformanalyse in Form einer AR-Anwendung realisiert werden soll, wird im Folgenden ausschließlich diese Art der Visualisierung näher betrachtet. AR-Systeme lassen sich vereinfacht in vier Bestandteile aufteilen: Darstellung, Bewegungsverfolgung, Registrierung und Interaktion, die in den nachfolgenden Abschnitten ausführlich beschrieben werden.

2.3.8 Darstellung

Ausgabe bzw. Darstellung augmentierter Videobilder über einen Bildschirm, an welchem auch die aufnehmende Kamera angebracht ist, ist ein elementarer Bestandteil jeder AR-Anwendung. Hierfür werden aktuell sowohl mobile Endgeräte, Datenbrillen als auch Projektoren genutzt. Diese unterschiedlichen Arten der optischen Darstellung werden in den Abschnitten 2.4.1.1 bis 2.4.1.4 näher erläutert. Neben den Möglichkeiten zur optischen Darstellung gibt es auch noch andere Darstellungsarten, die andere Sinne des Menschen ansprechen. Detaillierte Informationen zu technischen Ausprägungen dieser Darstellungsarten werden in [41] präsentiert.

2.3.9 Bewegungsverfolgung

Bewegungsverfolgung (für engl. tracking) dient zur Berechnung bzw. Schätzung der aktuellen Posen des Blickpunktes des Benutzers und anderer wichtiger Objekte, an denen Informationen projiziert werden sollen. Die Verfolgung der Kamerabewegung ist für eine realistische AR-Anwendung wesentlich, da Blickpunkt, Blickrichtung und Blickwinkel des Benutzers mit der Ausgabe übereinstimmen müssen. Wenn von der Realität ausschließlich ein Videobild vorhanden ist, wird die Pose der Videokamera optisch berechnet bzw. geschätzt. Bewegungsverfolgung ermöglicht, die Transformation zwischen dem Kamerakoordinatensystem, den Koordinatensystemen der einzelnen Objekte in der Umgebung bzw. im Rahmen der Arbeit der einzelnen

Sensoren und dem Weltkoordinatensystem zu berechnen. Für die Bewegungsverfolgung gibt es zwei unterschiedliche Prinzipien, und zwar „Von innen nach außen“ (für engl. Inside Out) und „Von außen nach innen“ (für engl. Outside In). Ein gemäß „Von innen nach außen“ arbeitendes System ermittelt seine Pose selbst und wird daher als aktiv bezeichnet. Aktive Systeme verwenden Laufzeiten, Inertialsensoren oder Kameras zur eigenen Posenbestimmung. Im Gegensatz dazu haben „Von außen nach innen“ arbeitende Systeme keine Kenntnis über ihre Posen und werden daher als passiv bezeichnet. Die Posen passiver Systeme werden durch aktive Systeme in der Umgebung bestimmt. Als Beispiel sei ein Marker-verfolgungssystem genannt, dessen Pose durch Kameras im umgebenden Raum bestimmt wird. Auf die verschiedenen Arten der Bewegungsverfolgung wird in den Abschnitten 2.4.2.1 bis 2.4.2.4 näher eingegangen.

2.3.10 Registrierung

Registrierung dient dazu, die rechnererzeugten Objekte an die reale Umgebung bzgl. ihrer Perspektive, Größenverhältnisse und Abstände zueinander anzupassen. Genauer gesagt versteht man darunter das Einpassen der rechnererzeugten Objekte in die Realität. Grundlage dafür ist die Positions- und Lageschätzung des Betrachterblickpunktes bzw. der Kameraposition durch die Bewegungsverfolgung. Dadurch werden die Koordinatensysteme der einzelnen rechnererzeugten Objekte mit dem Weltkoordinatensystem in Relation gesetzt, sodass die rechnererzeugten Objekte fest verortet (registriert) im Videobild erscheinen. Somit kann ein im Rechner erzeugtes, nicht bewegliches künstliches Objekt auch in der realen Welt einen festen Platz erhalten, auch wenn der Betrachter sich im Raum bewegt. Beim Einsatz mehrerer „Von innen nach außen“-Systeme liegen mehrere voneinander unabhängige Koordinatensysteme vor. Diese müssen ebenfalls im Rahmen der Registrierung aufeinander abgebildet werden, um die unterschiedlichen rechnererzeugten Objekte korrekt zu überlagern. Im Rahmen der Registrierung werden die Posendaten der einzelnen Bewegungsverfolgungssysteme, die relativ zum Ursprung des Verfolgungs-koordinatensystems ermittelt werden, in das Weltkoordinatensystem umgerechnet.

Registrierung wird in geometrische und photometrische Registrierung unterteilt. Mittels geometrischer Registrierung wird die Perspektive eines rechnererzeugten Objektes bei geänderter Kameraperspektive oder bei Bewegung des Objektes neu berechnet. Aufgrund der korrekten Perspektive ist das Objekt vom aktuellen Blickpunkt und der aktuellen Blickrichtung der Kamera bzw. des Betrachters aus dann in der Realität geometrisch korrekt registriert. Photometrische Registrierung dient zur Anpassung der Inhalte an die Beleuchtungssituation der Realität, bspw. um die Darstellung von Schatten umzusetzen. Diese Form der Registrierung ist aufgrund der unbekannten Topologie der Realität nur vereinzelt in AR-Anwendungen anzutreffen. Ein korrekter

Schattenwurf erfordert grundlegende Informationen über die Oberflächen bzw. Normalen der realen und der vom Rechner erzeugten Objekte. Dieses Wissen ist in den meisten Anwendungen aber nicht gegeben. Mit Hilfe von Tiefenkamerabildern ließen sich diese Topologien aber bestimmen, sodass photometrisch registriert werden könnte.

2.3.11 Interaktion

Im Unterschied zu Anwendungen virtueller Realität liegt das Hauptaugenmerk bei vielen AR-Anwendungen vornehmlich auf Visualisierung; Interaktion mit dem Nutzer wird meist nur rudimentär umgesetzt. Die herkömmliche Verwendung von Tastatur und Maus zur Eingabe ist für den mobilen AR-Einsatz ungenügend und daher nur selten anzutreffen. Im Nachfolgenden werden einige Möglichkeiten zur Interaktion aufgezeigt. Für detailliertere Informationen sei auf [41], [42] verwiesen. Die bekanntesten Eingabemöglichkeiten für AR-Anwendungen unterteilen sich in markerbasierte Eingaben, anfassbare Benutzerschnittstellen, Bewegungsverfolgungssysteme, Selektion durch Blickrichtung und Spracheingabe [43].

2.4 Angereicherte Realität im industriellen Umfeld

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit den wesentlichen Bestandteilen von AR-Anwendungen, wie sie zur Umsetzung der Zielstellung der Arbeit benötigt werden. Weiterhin werden aktuelle AR-Anwendungen im industriellen Umfeld insbesondere im Bereich der Strukturdynamik aufgezeigt. Anwendungen in Form einer Angereicherten Realitätsdarstellung werden industriell bereits häufig genutzt und zwar vor allem für Instandhaltungsaufgaben, als digitale Handbücher in Service und Wartung, in der Anlagen- und Produktionsplanung, in der Aus- und Weiterbildung und im Marketing sowie auf Messen. Diese Systeme dienen in den meisten Fällen als reine Visualisierung, sie berücksichtigen weder andere Sensoren noch fusionieren sie Sensordaten. Verwendung von AR-Systemen in Kombination mit anderen Sensoren erlaubt jedoch noch realistischere Interaktionen zwischen Anwender und digitaler Anwendung. Direkte Darstellung der wesentlichen Sensorinformationen am Ort des Geschehens und immer in Bezug auf die zu untersuchenden Strukturen sind entscheidende Vorteile kombinierter Systeme.

2.4.1 Darstellungsmöglichkeiten

AR kennt hauptsächlich vier unterschiedliche Arten der Darstellung, die im Folgenden näher erläutert werden.

2.4.1.1 Datenbrille zur Anzeige von Videobildern

Im Unterschied zur VR sieht der Anwender durch eine Datenbrille (HMD, für engl. Head Mounted Displays) ein aktuelles Videobild der Realität. Es entsteht der Eindruck, dass der Benutzer die Umgebung durch die Brille hindurch direkt betrachten kann. Dafür sind an der Brille ein oder zwei Videokameras für jedes Auge angebracht, die die Umgebung aufnehmen (siehe Bild 26). Aber auch tragbare Bildschirme (siehe Abschnitt 2.4.1.4) verwenden die gleiche Vorgehensweise zur Darstellung. Das Videobild wird bei beiden Darstellungsarten perspektivisch korrekt als Hintergrundbild einer Szene gesetzt. Im Vordergrund der Szene werden zusätzlich die rechnererzeugten Objekte wiedergegeben.



Bild 26: Datenbrille zur Anzeige von Videobildern - Kombination aus Kameraeinheit ZED Mini und VR-Brille Oculus Rift, Quelle: [44]

Der Vorteil des Einsatzes von Bildschirmen liegt in der Möglichkeit zeitversetzter Darstellung: Zur Verhinderung sogenannter Schwimmeffekte wird die Anzeige des Kamerabildes solange verzögert, wie Posenbestimmung und Berechnung der in das Bild einzublendenden Informationen dauert. Mit dieser Technik können der reale Hintergrund und die erzeugten Informationen in identischer Helligkeit und Qualität und können Informationen an beliebigen Positionen im Raum mit gleicher Qualität und unterschiedlicher Hintergrundbeleuchtung dargestellt werden. Ein Nachteil dieser Datenbrillen liegt in ihren begrenzten Auflösungen. Im Unterschied zu Datenbrillen aus dem Bereich der VR besitzen diese noch zusätzlich ein oder zwei Kameras.

2.4.1.2 Datenbrille mit transparenter Projektionsfläche

Diese Art der Darstellung (siehe Bild 27) ermöglicht dem Anwender wie mit einer Lesebrille die direkte Sicht auf die Realität. Die Zusatzinformationen werden zeitversetzt auf zwei halbdurchlässige Spiegel projiziert, die das Rechnerbild zum Auge reflektieren. Im Unterschied zu den anderen Anzeigarten kann die Realität dauerhaft durch die Brille wahrgenommen werden, auch wenn die Projektion ausgeschaltet ist. Diese Darstellungsform stellt die natürlichste Form von AR dar, da die gesamte Realität wahrgenommen werden kann und mit Zusatzinformationen angereichert wird. Durch die Berechnungszeit zur Posenerkennung und Gewinnung der Zusatzinformationen kann es insbesondere dann, wenn der Anwender seinen Kopf bzw. Körper bewegt, zu Schwimmeffekten der rechnererzeugten Objekte kommen. Zudem erscheinen die rechnererzeugten Objekte immer teiltransparent, da sie rein optisch dem Umgebungslicht überlagert werden. Allgemein hängt die Darstellungsqualität von der Umgebungsbeleuchtung ab und zeichnet sich im Vergleich mit Datenbrillen zur Anzeige von Videobildern durch deutlich geringere Helligkeit aus. Die exakte Positionierung der Informationen ist aus technischer Sicht auf einem Kamerabild viel einfacher, als diese Informationen in das unbekannte reale Sichtfeld des Anwenders zu bringen. Ungenau platzierte oder verzerrte Informationen können das AR-Erlebnis deutlich verschlechtern.



Bild 27: Datenbrille mit transparenter Projektionsfläche - Google Glass Enterprise Edition, Quelle: Google [45]

2.4.1.3 Raum- und umgebungsfixierte Bildschirme

Bei den weiteren Darstellungsarten der AR entfällt das Tragen einer Brille. Die eingesetzten AR-Bildschirme werden an einen Raum bzw. eine Umgebung angepasst.

Projektionsbildschirm

Mittels dieser Technik werden Informationen in die reale Umgebung projiziert. Direkte Interaktion mit dem Anwender ist somit nicht möglich. Des Weiteren hängt die Darstellungsqualität stark von der Umgebungsbeleuchtung bzw. vom Projektor ab.

Kopf-oben-Anzeige (HUD, für engl. Head Up Display)

In einigen Fahrzeugen werden Informationen wie Geschwindigkeit, Kilometerstand oder Navigationsinformationen auf die Frontscheibe projiziert. Somit ist auch hier direkte Interaktion nicht möglich.

2.4.1.4 Tragbarer Bildschirm

Diese Art der Darstellung entspricht ebenfalls der Vorgehensweise bei Datenbrillen zur Anzeige von Videobildern. Daher treffen alle o.g. Vor- bzw. Nachteile auch hier zu. In AR-Anwendungen werden zur Darstellung mittels dieser Bildschirmklasse vor allem mobile Endgeräte genutzt, die vom Anwender mobil mit der Hand geführt werden können. Zur Posenbestimmung enthalten sie einerseits meist geeignete 3-DOF-Sensoren bestehend aus Inertial- und Gyrosensoren sowie Magnetometern und andererseits jeweils eine Mono- bzw. Stereokamera, mit der zusätzlich Bewegungen optisch verfolgt werden können. Zudem werden die Kameras auch zur Videoaufnahme genutzt. Damit enthalten diese Endgeräte alle für AR-Anwendungen notwendigen Sensoren. Im Unterschied zu Datenbrillen können mehrere Anwender gleichzeitig dieselbe AR-Anwendung sehen. Schließlich erlaubt diese Art von Bildschirmen die kostengünstigste Möglichkeit zur AR-Umsetzung.

2.4.2 Bewegungsverfolgung in AR-Anwendungen

Im Folgenden werden die bekanntesten Arten der Bewegungsverfolgung in AR-Anwendungen aufgezeigt und erläutert.

2.4.2.1 Laufzeitbasierte Bewegungsverfolgung

Auf laufzeitbasierter Bewegungsverfolgung basierende Systeme bestimmen mittels Messung der Signallaufzeit zwischen einem oder mehreren Sendern und einem Empfänger dessen Position. Der Empfänger ist dabei Bestandteil des Systems. Der bekannteste Vertreter laufzeitbasierter Bewegungsverfolgung nutzt das globale Satellitennavigationssystem GPS (für engl. Global Positioning System), das ständig die aktuellen Positionen seiner Satelliten und eine hochgenaue Uhrzeit sendet. Aus 50

den Signallaufzeiten zwischen mehreren Satelliten und einem GPS-Empfänger kann dann die aktuelle Position und die Geschwindigkeit des GPS-Empfängers bestimmt werden. Hierfür werden mindestens drei, in der Regel aber vier Satelliten benutzt. Diese Art der Bewegungsverfolgung wird vor allem für AR-Anwendungen im Außenbereich eingesetzt, da ausreichender GPS-Empfang in Gebäuden meist nicht vorhanden ist. Aber auch im Außenbereich, z.B. in Wäldern, Tälern, nahe hohen Häusern oder in engen Gassen, kann der GPS-Empfang eingeschränkt sein, da in diesen Fällen die Sicht auf die Satelliten stark behindert ist. Selbst bei freier Sicht zu den Satelliten können Ungenauigkeiten der Positionsbestimmung um bis zu 10 m auftreten, die aufgrund der Schwankungen in den Satellitenlaufbahnen bzw. durch atmosphärisch bedingte Schwankungen zustande kommen. Dies ist für die meisten AR-Anwendungen zu ungenau und deswegen wird „normales“ GPS meist nur zur Initialisierung der Bewegungsverfolgung oder zur Schätzung einer ungefähren Position eingesetzt.

Zur Verbesserung der GPS-Genauigkeit gibt es zwei Ansätze, die mittels Differenzverfahren arbeiten. Zunächst wäre das satellitenbasierte Ergänzungssystem SBAS (für engl. Satellite Based Augmentation System) zu nennen und dann das differentielle globale Positionierungssystem DGPS (für engl. Differential GPS). Das DGPS ermittelt mit Hilfe eines stationären bodengebundenen Empfängers, dessen Position dem System bekannt ist, ein Korrektursignal. Durch den bekannten Standort kann die Station die eigentliche Laufzeit vom Satelliten bis zum stationären Empfänger und damit einen Differenzwert zur wirklich benötigten Zeit ermitteln. Dieser Wert wird dann meist über Funk an den lokalen GPS-Empfänger übermittelt und mit dem lokal empfangenen GPS-Signal verrechnet. Somit können Genauigkeiten in der Größenordnung weniger Zentimeter erreicht werden. Das SBAS verwendet mehrere stationäre und bodengebundene Messstationen, deren Positionen wiederum bekannt sind. Die Stationen empfangen das normale GPS-Signal und ermitteln die Differenzen zwischen ihren tatsächlichen und der mittels GPS berechneten Positionen. Diese Korrekturwerte werden an geostationäre Satelliten verteilt. Zur genauen Positionsbestimmung werden dann ausschließlich die Signallaufzeiten zwischen den geostationären Satelliten und dem GPS-Empfänger genutzt. Mit diesem System können Genauigkeiten von etwa einem m erreicht werden. Mobile Endgeräte setzen häufig zur Positionsbestimmung insbesondere im Innenbereich WLAN-Ortung und assistiertes GPS ein, das die Position der aktuellen Mobilfunkzelle bzw. die Signallaufzeiten zwischen mehreren benachbarten Mobilfunkmasten verwendet. Das gleiche Prinzip wird bei der WLAN-Ortung angewendet, bei der die Signallaufzeiten zwischen mehreren WLAN-Routern zur Positionsbestimmung genutzt werden. Weiterhin gibt es erste Versuche zur Bluetooth-Ortung. Die Genauigkeiten aller dieser Verfahren sind jedoch für die meisten AR-Anwendungen nicht ausreichend.

Neben diesen gibt es noch andere laufzeitbasierte Systeme, die aktuell aber in AR-Anwendungen nur selten genutzt werden. Dabei handelt es sich um akustische und

optische Systeme. Zur Laufzeitbasierten akustischen Ortung werden akustische Signale ausgesendet und mittels eines Mikrofons aufgenommen. Anhand der Phasenverschiebungen der Signale oder aus unterschiedlichen Signalen wird dann mittels Triangulation die Position des Mikrofons bestimmt. Zur optischen Ortung werden meist Laser oder gepulste Lichtquellen benutzt. Der Abstand zwischen Lichtquelle und Zielpunkt wird mittels der Laufzeit oder der Phasenverschiebung reflektierter Lichts bestimmt. Durch Triangulation kann dann wiederum die Position der Zielquelle berechnet werden.

2.4.2.2 Bewegungsverfolgung mittels Inertialsensoren

Schätzung der Lage mittels Sensoren ist für mobile Endgeräte etabliert. In den meisten Anwendungen wird dafür eine Kombination aus drei verschiedenen Sensorarten genutzt und zur Schätzung bzw. Berechnung der Posen werden die Sensordaten fusioniert. Bei den Sensoren handelt es sich um Inertialsensoren wie Beschleunigungs- und Neigungsmesser sowie Magnetometer. Im Unterschied zu den anderen in diesem Abschnitt vorgestellten Verfahren zur Posenbestimmung liefert diese Sensorart zur Bewegungsverfolgung ausschließlich Posen relativ zu einem Startpunkt und nicht in Bezug zu einem Ursprung wie z.B. zum Kameraursprung. Beschleunigungsmesser bestimmen die Trägheitskraft auf eine Masse. Beschleunigungen können dann in Translationen umgerechnet werden. Neigungsmesser messen Winkelbeschleunigungen, mit denen die Winkel bestimmt werden, um die ein Sensor gekippt wurde. In AR-Anwendungen werden miniaturisierte Drehbeschleunigungsmesser als Neigungsmesser eingesetzt. Zur Schätzung von Posen werden in den meisten Anwendungen von jedem Sensortyp je drei orthogonal zueinander platzierte Sensoren genutzt. Daher werden solche Systeme auch 9-DOF-Systeme genannt. Diese inertialen Trägheitsmesseinheiten (IMU, für engl. Inertial Measurement Unit) werden außer in AR-Anwendungen und mobilen Endgeräten vor allem im Bereich der Flugnavigation und zur Flugstabilisierung für Flugzeuge, Drohnen, Raketen und unbemannte Luftfahrzeuge (UAV, für engl. Unmanned Aerial Vehicle), aber auch in der Robotik und der Bildverarbeitung zur Bewegungsdetektion bzw. Bildstabilisierung eingesetzt. Zudem werden sie in Motorrädern und PKWs zur Interpretation der Fahrdynamik genutzt. Neben IMU-Systemen, die ausschließlich ihre Sensordaten übertragen, werden in vielen kommerziellen Produkten sogenannte Positions- und Kursreferenzsysteme (AHRS, für engl. Attitude Heading Reference System) eingesetzt, die ihre Sensorwerte schon meist mittels Kalmanfilter vorverarbeiten. Weiterhin existieren Magnet-, Winkelgeschwindigkeits- und Schwerkraftsysteme (MARG, für engl. Magnetic, Angular Rate and Gravity), die anstatt reiner Sensorwerte Posen bzw. gesamte Kursverläufe zurückgeben. Diese Systeme verwenden die gleichen Sensoren wie die Trägheitsmesseinheiten mit neun Freiheitsgraden.

2.4.2.3 Kamerabasierte Bewegungsverfolgung mit Markern

Für die optische Bewegungsverfolgung mit Hilfe von Markern werden vorher definierte Marker an die zu verfolgenden Objekte angebracht. Die Marker werden dann später mittels Bilderkennung im Videobild gefunden und dienen zur Berechnung der Pose eines zu verfolgenden Objektes. Im Bereich der AR sind einerseits reflektierende Marker und andererseits Marker mit Mustern gebräuchlich.

Reflektierende Marker

Diese Art von Markern besteht meist aus retroreflektiven Materialien, die das Licht in die Richtung reflektieren, aus der es kam. Die gleichen Materialien werden auch für Nummernschilder eingesetzt, damit diese auf Bildern zur Geschwindigkeitsmessung gut zu erkennen sind. Wegen der Retroreflektivität genügt es, Blitzlichtquellen direkt neben den Kameras zu platzieren. In vielen Anwendungen werden Marker in Kugelform verwendet. Zur Bestimmung der Position einer einzelnen Kugel werden mindestens zwei Kameras benötigt, deren Abstand voneinander bekannt sein muss. Wenn mehrere dieser Marker eingesetzt werden, können alle sechs möglichen Freiheitsgrade einer jeden Kugel bestimmt werden. Hierfür müssen die Distanzen zwischen den Kugeln bekannt sein. Nähere Informationen zu dieser Markerart sind unter [41], [46], [47] ausführlich beschrieben.

Marker mit Mustern

Eine deutlich kostengünstigere Alternative zu reflektierenden Markern stellen die sogenannten 2D-Marker mit Mustern bzw. Flachmarker dar. Sie werden seit Beginn der 1990er Jahre und aktuell in vielen AR-Anwendungen genutzt. Es gibt viele unterschiedliche Marker, die zumeist aus Schwarz-Weiß-Mustern bestehen. Diese binären Farbmuster sind aufgrund des maximalen Farbkontrastes auch unter schlechten Beleuchtungsbedingungen automatisiert besser als farbige Marker zu erkennen. Die meisten Marker sind quadratisch oder rund und durch einen komplett weißen bzw. schwarzen Rand begrenzt.

Ein Vergleich zwischen den bekanntesten markerbasierten Ansätzen ist in [48] beschrieben. Auch wenn AR-Marker (siehe Bild 28) Ähnlichkeiten mit Bar- oder QR-Codes aufweisen, sollten sie nicht miteinander verwechselt werden. Das Erscheinungsbild der AR-Marker ist für schnelle Decodierung ausgelegt, während Barcodes zum Codieren langer Zeichenketten geeignet sind und ihre Decodierung daher länger dauert. Die Vorteile markerbasierter Bewegungsverfolgung liegen in kostengünstiger und schneller Produktion und Anbringung an den jeweiligen Objekten, sofern letzteres möglich ist. Bei mehreren gleichaussehenden Objekten (die nahezu identische Bildmerkmale aufweisen) kann im Marker eine eindeutige Zuordnungsnummer codiert werden. Weiterhin gibt es einige Einschränkungen der Bildverarbeitung im Zuge der Bewegungsverfolgung mit Markern. Die Qualität der

Bewegungsverfolgung hängt stark von der Umgebungsbeleuchtung ab. Der Abstand zwischen Kamera und Marker bzw. die Größe eines AR-Markers hat ebenfalls großen Einfluss auf die Lesbarkeit, da der Marker nicht mehr auswertbar ist, wenn er im Kamerabild zu klein wird oder wenn er nicht mehr im Ganzen zu sehen ist. Neben der Distanz spielt auch der Winkel zwischen Kamera und AR-Marker eine Rolle. Denn wenn der Winkel zu flach wird, geht die Qualität der Bewegungsverfolgung ebenfalls zurück. Ferner darf ein AR-Marker nicht durch andere Gegenstände verdeckt werden. Neben diesen Einflussfaktoren gibt es weitere wie z.B. die Auflösung der Kamera als auch deren Kalibrierung, die bei der Verwendung von Markern betrachtet werden müssen.

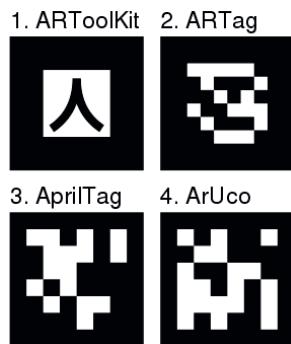


Bild 28: Typische Marker für optische Bewegungsverfolgung in AR-Anwendungen, Quelle: [49]

Ein weiteres Problem beim Einsatz von Markern ist Überdeckung zu augmentierender Objekte, die im Nachhinein mittels Bildverarbeitung korrigiert werden muss.

2.4.2.4 Kamerabasierte Bewegungsverfolgung mit Bildmerkmalen

Um die optischen und installationstechnischen Nachteile kamerabasierter Bewegungsverfolgung mit Markern auszuschließen, werden kamerabasierte Verfahren eingesetzt, mit denen Merkmale in Kamerabildern erkannt und in Datenbasen bereits bekannter Modelle zugeordnet werden. Damit stellt diese Herangehensweise eine Verallgemeinerung des markerbasierten Ansatzes dar, da sich Marker auch als Merkmale im Kamerabild erfassen lassen. Anstatt an einem zu verfolgenden Gegenstand angebrachte Marker werden natürliche optische Merkmale zur Bewegungsverfolgung des Gegenstandes verwendet. Für die merkmalsbasierte Bewegungsverfolgung werden in der Literatur unterschiedlichste Formen genannt. So nutzt die geometriebasierende Bewegungsverfolgung die Bewegung von Kanten und Ecken in aufeinanderfolgenden Kamerabildern zur Bestimmung der Kamerapose. Dieses Verfahren liefert in vielen Fällen nicht eindeutige Merkmale und daher werden

meist andere Merkmalsdetektoren verwendet. Die entsprechenden Merkmale sind in den meisten Fällen vom Anwender nicht direkt zu erkennen, lassen aber schnelle und robuste automatische Erkennung zu. Während des Verfolgungsprozesses werden erkannte optische Merkmale mit sogenannten Deskriptoren verglichen. Diese enthalten die optischen Merkmale der zu verfolgenden Objekte und werden zur Initialisierung einer Anwendung „eingelernt“. Ausreißer in gefundenen Bildmerkmalen werden zumeist mit dem „Übereinstimmung mit einer zufälligen Stichprobe“ - Algorithmus (RANSAC, für engl. Random Sample Consensus) [50] entfernt. Anhand der Zuordnung zwischen erkannten Merkmalen und den entsprechenden Deskriptoren kann dann die Pose der Kamera berechnet werden. In der Literatur finden sich viele verschiedene Merkmalsdetektoren, die sich deutlich hinsichtlich ihrer Geschwindigkeit und Zuverlässigkeit unterscheiden. Die beiden bekanntesten Verfahren zur merkmalbasierten Bewegungsverfolgung in AR-Anwendungen sind die „skalen-invariante Merkmalstransformation“ (SIFT, für engl. Scale Invariant Feature Transform) [51], [52] und der „beschleunigte, robuste Merkmale“ -Detektor (SURF, für engl. Speeded Up Robust Features) [53]. Diese Algorithmen dienen zur Detektion lokaler Bildmerkmale und sind invariant gegenüber Koordinatentransformationen wie Rotation, Translation und Skalierung, was einen großen Vorteil innerhalb von AR-Anwendungen bietet, da sonst Deskriptoren aus unterschiedlichen Winkeln bzw. in unterschiedlichen Auflösungen verwendet werden müssten. Außerdem sind beide Algorithmen robust gegen Beleuchtungsvariationen, Bildrauschen und geringe geometrische Transformationen. Der SURF-Detektor stellt eine schnellere Weiterentwicklung des SIFT-Detektors dar. Aufgrund der vielen verwendeten Bildmerkmale sind diese Detektoren gegenüber Störeinflüssen wie Verdeckungen robuster als die markerbasierten Ansätze [54], [55], [56].

Ein weiteres merkmalbasiertes Verfahren zur Bewegungsverfolgung stammt ursprünglich aus dem Bereich der Robotik, ist unter dem Namen „Simultane Positionsbestimmung und Kartierung“ (SLAM, für engl. Simultaneous Localization and Mapping) [57] weit verbreitet und liegt in unterschiedlichen Umsetzungen vor. Mittels des Verfahrens kann ein mobiler Roboter gleichzeitig seine Welt erstellen und seine Pose innerhalb dieser Welt schätzen. In AR-Anwendungen kommen in Abhängigkeit vom eingesetzten Kameratyp⁽⁵⁾ unterschiedliche Umsetzungen des SLAM-Verfahrens vor. Zur Verbesserung der Ergebnisse der Bewegungsverfolgung werden in einigen AR-Anwendungen neben Bilddaten z.B. auch Messdaten von Inertialsensoren berücksichtigt. Aus Sicht der Bildverarbeitung stellt merkmalbasierte Bewegungsverfolgung eine deutlich größere Herausforderung als markerbasierte dar. Die Qualität der Bewegungsverfolgung hängt im Vergleich zum Einsatz von Schwarz-Weiß-Markern aufgrund der Auswertung von Farbbildern hier noch stärker vom Umgebungslicht ab. Des Weiteren müssen alle zu verfolgenden Gegenstände auch eindeutige optische Merkmale aufweisen. In einer weißen Umgebung ohne Texturen

⁵ Mono- bzw. Stereokamera.

ist diese Art der Bewegungsverfolgung nicht anwendbar. Ein weiteres Problem der Bewegungsverfolgung liegt in der Deformation bzw. allgemein in der Veränderung der Form zu verfolgender Objekte vor, da dadurch viele Merkmalspunkte entfallen. Weiterhin ist merkmalbasierte Bewegungsverfolgung nicht anwendbar, wenn mehrere zu verfolgende Objekte die gleichen optischen Merkmale aufweisen. In vielen AR-Anwendungen werden zur Bewegungsverfolgung häufig Kombinationen der in diesem Kapitel vorgestellten Techniken verwendet, um die spezifischen Vor- bzw. Nachteile der einzelnen Techniken zu nutzen bzw. zu reduzieren, denn je nach Situation liefern die einzelnen Techniken unterschiedliche Ergebnisse und es kann vorkommen, dass bestimmte Techniken zur Bewegungsverfolgung in bestimmten Situationen gar keine oder nur ungenügende Ergebnisse liefern, wie z.B. Bewegungsverfolgung von Markern bei einem verdeckten Marker.

2.4.3 AR-Anwendungen in der Strukturdynamik

Im Bereich ingenieur- und informationstechnischer Forschung und Entwicklung werden AR-Anwendungen in den letzten Jahren immer stärker eingesetzt. Die AR-Technologie stellt dem Anwender intuitive, rechnergenerierte Inhalte in der realen Umgebung zur Verfügung. Besonders für technische Analysen und Simulationen werden vermehrt AR-Anwendungen eingesetzt. Dadurch konnten Effizienz und Produktivität in diesen Bereichen drastisch erhöht werden. Vor allem die Integration numerischer Simulationen, z.B. mit der Finite-Elemente-Methode, in AR-Anwendungen bietet eine kognitive und wissenschaftliche Möglichkeit, praktische Probleme direkt an der Struktur zu simulieren. Somit können technische Analysen und Simulationsergebnisse direkt in der Realität dargestellt werden. Durch diese Möglichkeit zur Ansicht können Fehlinterpretationen in räumlichen und logischen Aspekten deutlich besser erkannt werden, als würden Ergebnisse von einer herkömmlichen FE-Software auf einem Rechnerbildschirm angezeigt.

In [58] wird ein Überblick über den Stand der Technik von AR-Anwendungen im Bereich der technischen Analyse bzw. Simulation gegeben. Darunter befinden sich auch Anwendungen aus der Strukturdynamik. Ebenfalls wird in [59] eine AR-Anwendung zur Ausbildung von Studenten in Strukturdynamik detailliert beschrieben. Alle diese AR-Anwendungen verwenden Simulationen zur Berechnung bzw. Darstellung der Schwingungen untersuchter Strukturen, aber keine realen Sensordaten. Es konnte keine AR-Anwendung gefunden werden, die eine AR-Visualisierung auf Basis von Sensordaten in Echtzeit ermöglicht. Erste Ansätze für AR-Anwendungen zur Strukturdynamik, die Sensordaten in die Visualisierung integrieren, wurden in den folgenden Patenten gefunden.

Das Patent [60] offenbart ein System zum Erfassen der Vibrationen einer Maschine, welches beliebig viele Vibrationssensoren und eine Datenbrille umfasst. Die Vibrationssensoren und die Datenbrille weisen Schnittstellen auf, über die eine drahtlose Datenübertragungsverbindung zwischen den Vibrationssensoren und der Datenbrille herstellbar ist. Zur Positionierung der Vibrationssensoren werden diese zunächst an Positionen an der Maschine angebracht, welche mittels der Datenbrille ermittelt und angezeigt werden. Im Betrieb des Systems generieren die Vibrationssensoren Messdaten, welche die erfassten Vibrationen repräsentieren. Die Messdaten werden während oder nach Beendigung eines Betriebs der Maschine über die Datenübertragungsverbindung an die Datenbrille übertragen. Die Datenbrille verarbeitet die Messdaten, wobei bspw. ermittelt wird, ob und zu welchen Zeiten erfasste Vibrationen einen oder mehrere Schwellenwerte überschritten haben. Ferner können die Messdaten mit dem Ziel einer graphischen Visualisierung der erfassten Vibrationen verarbeitet und angezeigt werden. So kann eine Zeitabhängigkeit der Amplituden oder Frequenzen der erfassten Vibrationen in entsprechenden Diagrammen angezeigt werden. Im Gegensatz zur Zielstellung der vorliegenden Arbeit werden ausschließlich die Sensorzeitsignale an bestimmten Punkten der Maschine dargestellt. Die Eigenschwingungs- bzw. Betriebsschwingformen werden nicht visualisiert. Daher dient dieses System zur reinen Überprüfung bestimmter Punkte an der Maschine und zur Überprüfung, ob Sensorschwellwerte an diesen Punkten unter- bzw. überschritten wurden. Zudem ist die Verwendung einer Datenbrille fest vorgegeben. Die Bewegungsverfolgung der Datenbrille wird nicht ausführlich beschrieben, weshalb über die Qualität der Bewegungsverfolgung keine Aussage getroffen werden kann. Darüber hinaus konnte keine praktische Umsetzung des Patentes gefunden werden.

Das Patent [61] beschreibt ein System und ein Verfahren zur Erfassung und Auswertung mechanischer Schwingungssignale, welches berührungslose Erfassung mittels eines Messlasers und automatische Auswertung der mechanischen Schwingungssignale ermöglicht. Eine Kamera eines AR-Systems erfasst die im Sichtfeld des Anwenders liegenden Objekte. Das AR-System ist in der Lage, dem Anwender Informationen zu den Messstellen, die in seinem Sichtfeld liegen, einzublenden. Derartige Informationen sind z.B. Messstellenmarkierungen, Messanweisungen, Messkurven oder Ergebnisse zur Bewertung der Schwingungssignale. Die Darstellung der Informationen kann mit realen Objekten im Sichtfeld des Anwenders derart verknüpft werden, dass ihre räumliche Anordnung innerhalb des Sichtfelds bezüglich der realen Objekte fixiert ist. Dies geschieht unabhängig von den Bewegungen der Datenbrille bzw. des Anwenders. Im Unterschied zur vorliegenden Arbeit wird in dieser Anwendung ein optischer Sensor anstatt eines Beschleunigungssensors zur Schwingungsmessung verwendet. Weiterhin wird an den Messpunkten nacheinander und nicht gleichzeitig gemessen, sodass Schwingungen einer gesamten Struktur erst nach Beendigung aller Messungen visualisiert werden können. Zudem muss die Struktur gleichbleibend angeregt werden, um in dieser Art

zu messen. Das heißt, dass dieses System ausschließlich für stationäre Vorgänge einsetzbar und Visualisierung der Eigenschwingungs- und Betriebsschwingformen nicht möglich ist. Auch dieses Patent besitzt keine praktische Umsetzung.

Die aufgezeigten Vorteile von AR-Anwendungen sind auch für die Betriebsschwingformanalyse nützlich und würden direkte Interaktion mit untersuchten Strukturen ermöglichen, wurden aber nach aktuellem Forschungsstand noch nicht umgesetzt. Durch rechnergestützte Erweiterung der Realitätswahrnehmung in Form einer AR-Anwendung wäre die sonst modellhafte Abbildung der Schwingungsformen direkt in der Realität möglich (siehe Bild 29). Somit könnten schwingungstechnische Auswirkungen bei Änderungen an realen Strukturen direkt im Betrieb visualisiert werden. Besonders für Anfänger wäre diese neuartige Art der assistierten Interaktion hilfreich, um ohne Vorwissen gute strukturdynamische Messungen durchführen zu können. Eine solche Anwendung würde Echtzeitvisualisierung im operativen Betrieb erlauben. Operativer Betrieb bedeutet in diesem Zusammenhang die Verwendung von Strukturen unter realen Bedingungen. Dadurch wäre der Anwender in der Lage, sich Messergebnisse aus unterschiedlichen Perspektiven anzuschauen, indem er sich mit der Kamera um das zu untersuchende Objekt bewegt.



Bild 29: Echtzeitschwingungsbild einer Kirchenglocke mit Sensordatenfusion - AR-Visualisierung der Betriebsschwingform mit farbcodierten Sensorwerten, aufgenommen mit elektromechanischen Sensoren und den Verfahren dieser Arbeit

3 Vereinfachung und Beschleunigung der Messkette mit elektromechanischen Sensoren

Im vorherigen Kapitel wurde eine Übersicht über die strukturdynamische Messkette nach dem Stand der Technik gegeben. Basierend darauf sollen nun die Forschungslücken aufgezeigt und dadurch die Entwicklungsziele motiviert und festgelegt werden. Danach werden das Konzept zur Umsetzung des intelligenten Modalhammers und der konzeptionelle Gesamtablauf der Messkette zur Erfüllung aller Entwicklungsziele dargestellt.

3.1 Forschungslücke

Der Forschungsstand zeigt deutlich, dass zur Durchführung der strukturdynamischen Messkette Expertenwissen notwendig ist. Besonders bei Messungen mit elektromechanischen Sensoren zur Realisierung von Betriebsschwingform- oder Modalanalysen wird großer Erfahrungsschatz benötigt. In vielen Einrichtungen, die strukturdynamische Messungen durchführen, fehlen aber entsprechend qualifizierte Fachkräfte. Deshalb müssen Mitarbeiter erst geschult oder es muss auf externe Dienstleister zurückgegriffen werden. Aber auch für erfahrene Anwender bringen strukturdynamische Messungen einen großen Zeit- und Kostenaufwand mit sich.

Elektromechanische Sensoren gehören zu den am häufigsten eingesetzten Sensoren in der Strukturdynamik. Dies liegt vor allem am Preis, ihrer universellen Anwendbarkeit und an der Robustheit der Sensoren. Sie besitzen aber auch Vorteile gegenüber optischen Sensoren bei der Vermessung mittelgroßer und großer Strukturen, wie bspw. Schiffen oder Bauwerken. Zudem müssen sie während der Messungen nicht dauerhaft optisch zugänglich sein. Demgegenüber liegen die Nachteile elektromechanischer Sensoren im Vergleich zu optischen im deutlich höheren Konfigurationsaufwand und in erschwerter flächenhafter Messung.

Im Bereich der Strukturdynamik steigen die Anforderungen an realistische Darstellungen von Eigen- und Betriebsschwingformen ständig. Realistische Visualisierung verbessert die Vergleichbarkeit mit Simulationsergebnissen und die Präzision von Schwingungsanalysen. Die verbesserten Visualisierungsmöglichkeiten für Animationen, wie sie von Computerspielen und Filmen her bekannt sind, führen zu einer immer höheren Erwartungshaltung auch an Ingenieurssoftware.

Innerhalb der Strukturdynamik sind insbesondere für die Modalanalyse Strukturanregung und -antworterfassung wesentlich. Die Form einer Strukturanregung ist unabhängig vom gewählten Schwingungsaufnehmer und wird sowohl für

elektromechanische als auch optische Sensoren verwendet. Aktuell werden unterschiedliche Anregungsformen genutzt. Wie für Schwingungsaufnehmer gibt es auch keine universelle Strukturanregungsform. Die mit Abstand am häufigsten eingesetzten Formen sind Impulsanregung mittels Modalhammer gefolgt von Shaker- und ambienter Anregung. Für valide Messungen wird verlangt, dass Modalhämmer Einzelschläge ausführen und dass deren Kräfte reproduzierbar in die untersuchten Strukturen eingeführt werden. Zudem wird reproduzierbare Krafteinbringung in die Strukturen vorausgesetzt. Diese Anforderungen können nach dem Stand der Technik nicht vollständig automatisch mittels Modalhämfern für alle Messstrategien der Modalanalyse erfüllt werden. Darüber hinaus muss aktuell jeder Impuls zur Strukturanregung durch den Anwender validiert werden. Grundsätzlich ist ein Hammerschlag ein hochdynamischer Prozess, der mindestens eine sensorische Rückkopplung benötigt, um die Umkehrbewegung zu ermöglichen. In Analogie zum manuell durchgeführten Hammerschlag kennt die Strukturdynamik aber noch keinen Aktor zur Strukturanregung, der die Sensordaten intern auswertet und daraufhin sein Handeln steuert. Beim handgeführten Modalhammer ist der Sensor das menschliche Auge, Informationen werden im Gehirn verarbeitet und die Arm-Hand-Kombination ist für die Bewegung des Hammers zuständig.

3.2 Entwicklungsziele

Der Stand der Forschung offenbart Mängel in der Messkette zur Durchführung von Betriebsschwingform- oder Modalanalysen mit elektromechanischen Sensoren. Dementsprechend beabsichtigt die vorliegende Arbeit, folgende Mängel des Forschungsstandes zu beheben:

- Momentan ist keine „intelligente“ und vollständig automatische Impulsstrukturanregung möglich.
- Es wird großes Expertenwissen von Messingenieuren erwartet.
- Aktuell besteht hoher Konfigurationsaufwand, besonders bei der Strukturkonfiguration, die aus 3D-Rekonstruktion, Bestimmung der Sensorposen und Zuweisung der Sensorposen zur 3D-Rekonstruktion besteht.
- Durch das zusätzliche Gewicht der Sensoren sind flächenhafte Messungen oder Messungen mit hoher Messauflösung im Vergleich zu optischen Sensoren seltener möglich.
- Es gibt keine assistierenden AR-Anwendungen zur Durchführung strukturdynamischer Messungen.
- Realistische Visualisierung von Betriebs- und Eigenschwingformen zur Validierung von Messaufbauten und Datenerfassung in Form von AR-Anwendungen existiert derzeitig nicht.

Das übergeordnete Ziel dabei ist, Hardware- und Softwarekomponenten zur Vereinfachung und Beschleunigung der Messkette mit elektromechanischen Sensoren

zu entwickeln. Diese sollen das Erfordernis zur Bereitstellung von Expertenwissen minimieren und zur Steigerung der Messeffizienz dienen. Insgesamt werden zur Erreichung dieser Zielstellung und zum Assistieren der Anwender bei ihren Messungen im Folgenden Komponenten zur Messdatenerfassung, zur Beschleunigung des Strukturkonfigurationsaufwandes und zur Echtzeitvisualisierung der Betriebsschwingformen in Form einer AR-Animation entwickelt. Im Einzelnen sind dies folgende Bestandteile:

- 3D-Rekonstruktion vom Prüfobjekt
- Optische Erkennung der Schwingungsaufnehmerposen
- Interpolation an nicht gemessenen Punkten der 3D-Rekonstruktion
- Bewegungsverfolgung der Kamera
- Drahtlose Übertragung der Sensordaten

Neben Vereinfachung und Beschleunigung der Datenerfassung mit elektromechanischen Sensoren wird zusätzlich ein intelligenter Modalhammer eingeführt, der eine interne Sensorauswertung beinhaltet und somit sensor-datengestützte Bewegungsabläufe des Hammerarms ermöglicht. Dadurch werden adaptive und autonome Strukturanregungen ohne Einsatz weiterer Rechner erzielt.

3.3 Konzept eines intelligenten Modalhammers

Dem Konzept [62] liegt die Einsicht zu Grunde, dass es sich bei manuellem Schlagen mittels Hammer auf eine feste Struktur (bspw. Einschlagen eines Nagels) um einen hochgradig dynamischen Prozess mit mindestens einer sensorischen Rückkopplung zwischen dem Werkzeug (Hammer) und einer den Schlag ausführenden Person handelt. Insbesondere wird die muskelgetriebene Bewegung des Hammers maßgeblich durch eine kinästhetische⁽⁶⁾ und visuelle Rückmeldung über die relative Position zwischen Hammer und Zielstruktur beeinflusst. Dadurch ist die Änderung der Bewegungsrichtung des Hammers nach dem Aufschlag auf das Zielobjekt eine Kombination des Zurückprellens in Folge eines teilelastischen Stoßes sowie einer intendierten inversen Beschleunigung des Hammers durch den Bewegungsapparat (Arm-Hand-Kombination) des Schlagenden (siehe Bild 30). Das passive Zurückprellen allein entspricht der Funktion eines magnetisch angetriebenen, elektromechanischen Unterbrechers, der bspw. in Türklingeln genutzt wird. Dies wird mit aktiver Beschleunigung weg vom Prüfkörper kombiniert, um einen zweiten Anschlag am Prüfobjekt zu verhindern. Dem liegt insbesondere die Erkenntnis zu Grunde, dass bei manuellem Schlagen der Startpunkt der Bewegungskurve (Bahnkurve) in Relation zum intendierten Aufschlagpunkt maßgeblich durch die Rahmenbedingungen des Schlages, wie bspw. der gewünschten Aufschlagkraft, Masse des Hammers und Prüfobjektes bestimmt wird. Als wesentliche Kenngröße dient die visuell erfasste

⁶ Wissenschaft der Bewegungswahrnehmung.

Szenerie der Schlaganordnung. Das Konzept bildet diesen dynamischen Prozess im Kontext der gewählten Anordnung nach, indem es vorsieht, mittels Sensor die relative Lage des Aufschlagpunktes vor der Schlagausführung zu detektieren. Danach wird der eingeschlossene Winkel (Vorhaltewinkel) entlang der Bahnkurve so gewählt, dass dieser unter Berücksichtigung der vom Anwender gemachten Schlagparameter, wie der Aufschlagkraft, der Masse des Hammers und des Prüfobjektes geeignet ist, den notwendigen vektoriellen Impuls p zum Zeitpunkt des Aufschlags zu erzeugen.

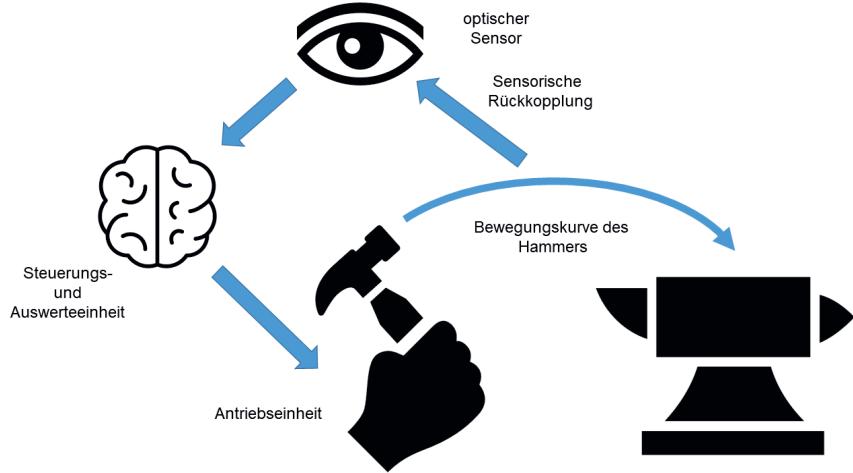


Bild 30: Schematische Darstellung eines manuellen Hammerschlags. Es sind die Bewegung des Hammers und die visuelle Rückkopplung und Verarbeitung der Sensorinformationen durch den Menschen skizziert.

Weiterhin wird durch Verwendung eines Sensors und Einbeziehung des Sensorsignals in die Bewegungssteuerung ein geschlossener Regelkreis aufgebaut, der ermöglicht, den Bewegungsablauf während des Schlagbetriebs reaktiv zu beeinflussen. Insbesondere ist es dann nicht mehr erforderlich, vorab mittels eines manuell-iterativen Prozesses eine statische Konfiguration zu finden, die den Anforderungen des jeweils gewählten Prüfaufbaus genügt und prellfreie Einzelschläge gewährleistet. Am Hammerkopf wird ein Kraftsensor montiert und die Hammerkopfeinheit wird ihrerseits am freien Ende des Hammerarms befestigt. Das gegenüberliegende Ende des Hammerarms wird mit der Antriebswelle der Antriebseinheit verbunden und bildet den Drehpunkt. Weiterhin werden die Antriebseinheit und der Sensor mit der Steuerungs- und Auswerteeinheit verbunden. Als Antriebseinheit wird ein Schrittmotor gewählt (siehe Bild 31). Durch definierten Geschwindigkeitsverlauf der Antriebswelle in Verbindung mit kontinuierlicher Auswertung des Sensorsignals wird reproduzierbarer, prellfreier Anschlag des Prüflings gemäß den vorgegebenen Schlagparametern erreicht. Der definierte Geschwindigkeitsverlauf ist abhängig von den gewählten Schlagparametern, wie bspw. der Schlagkraft- und Impulsbreite. Insbesondere ist der

zeitliche Verlauf der Winkelgeschwindigkeit des Motors nicht statisch, sondern wird zur Bewegungszeit des Hammerarms durch die Auswerte- und Steuerungseinheit unter Verwendung parametrierbarer Bewegungsprofile auf Basis der vom Sensor gelieferten Messdaten generiert.

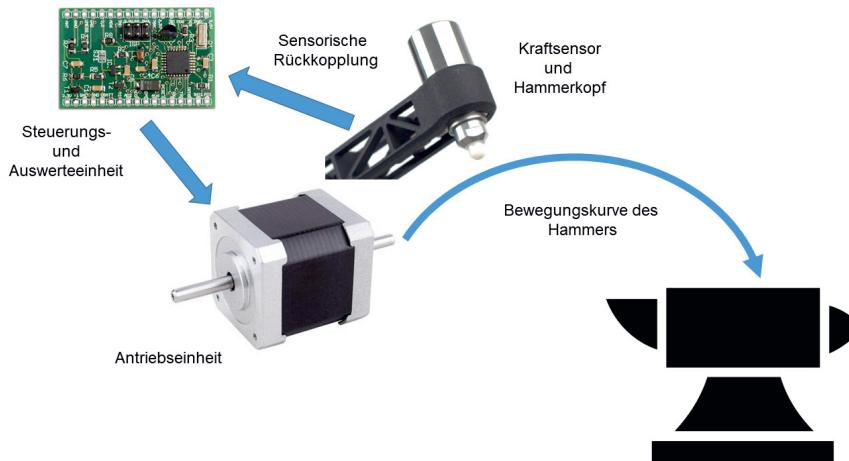


Bild 31: Schematischer Aufbau des intelligenten Modalhammers. Es sind die Bewegung des Modalhammers, die sensorische Rückkopplung des Kraftsensors und die Verarbeitung der Sensorinformationen durch einen Mikrokontroller skizziert.

Durch die sensorgestützte Steuerung des Bewegungsablaufs gewährleistet das Konzept, dass prellfreier Anschlag unter Einhaltung vorgegebener Schlagparameter ohne Rückgriff auf material- und konstruktionsspezifische Kennwerte der kraftschlüssigen Komponenten wie Elastizitätsmodule in der Antrieb-Welle-Hammerarm-Anordnung erzeugt werden kann. Darüber hinaus ermöglicht das Konzept, begrenzte Änderungen der relativen Lage des Hammers zum Prüfobjekt zu kompensieren, ohne erneute manuelle Justagen der Anordnung zu erfordern. Schließlich erlaubt das Konzept, daraus resultierende Verkürzungen oder Verlängerungen der Bahnkurve derart zu kompensieren, dass prellfreier Anschlag gewährleistet bleibt und ebenso die vom Anwender gewählten Schlagparameter im Rahmen spezifizierter Toleranzen eingehalten werden.

3.4 Gesamtablauf der Messkette

Der Ablauf von Messungen wird analog zu der im Abschnitt 2.2.5 festgelegten Messabfolge in drei Phasen unterteilt.

3.4.1 Konfiguration der Datenerfassung

Begonnen wird mit der Konfigurationsphase zur Datenerfassung (siehe Bild 32). In dieser wird zu Anfang der Versuchsaufbau festgelegt (S0.1), der Auswahl der Messstrategie und der Sensorart zur Messung der Strukturantwort sowie Festlegung der Geräte zur Strukturanregung (z.B. intelligenter Modalhammer, siehe Kapitel 4) und Art der Lagerung des Prüfobjektes umfasst. Die Auswahl ist abhängig vom Prüfobjekt und erfordert Expertenwissen. Danach wird der Versuchsaufbau erstellt (S0.2). Im nächsten Schritt werden die benötigte Sensoranzahl, -positionierungen und -orientierungen festgelegt (S0.3). Diese Informationen werden anhand vorheriger Simulationsergebnisse oder durch Experten- bzw. Vorwissen über ähnlich schwingende Strukturen bestimmt.

S0 Konfiguration der Datenerfassung	
S0.1 Festlegung des Versuchsaufbau: Strukturlagerung, Anregungsform, Sensorart, Messstrategie	
S0.2 Versuchsaufbau	
S0.3 Bestimmung der Sensoranzahl, -positionierungen und -orientierungen	
S0.4 Sensorenanbringung mit ArUco-Markern am Prüfobjekt	
S0.5 Anschluss der Sensoren an das Datenerfassungsgerät	
S0.6 Zuordnung Marker-ID zu entsprechendem Kanal am Datenerfassungsgerät	
S0.7 Aufbau der Netzwerkkommunikation	
S0.8 Festlegen der Datenerfassungseinstellungen	
S0.9 Anschluss und Einstellung der Tiefenkameras	

Bild 32: Ablauf der Konfigurationsphase zur Datenerfassung

Danach werden Schwingungssensoren mit optischen Markern am Prüfobjekt befestigt (S0.4) und am entsprechenden Datenerfassungsgerät angeschlossen (S0.5). Jeder Marker enthält eine einzigartige Identifikationsnummer, die hier als Marker-ID bezeichnet wird. Daraufhin werden die Marker-IDs den Kanälen des Datenerfassungsgerätes, an denen die entsprechenden Sensoren angeschlossen sind, zugeordnet (S0.6). Zum kabellosen Senden und Empfangen der Sensordaten als auch zum Steuern des Datenerfassungsgerätes wird ein Rechnernetz und eine entsprechende Netzkomunikation eingerichtet. Dafür wird ein Client-Server-Modell (siehe Abschnitt 6.1.2) ausgewählt: das Client-Programm (Dienstnutzer) auf der Anwendersseite fordert vom Server-Programm (Bereitsteller) des Datenerfassungsgerätes Dienste zu dessen Steuerung und zur Datenübertragung an und nimmt die Antworten der Dienste entgegen. Derart werden Client der Echtzeitvisualisierungskomponente und Server der Datenerfassungsseite miteinander verbunden (S0.7). Zur Datenübertragung und Steuerung des Datenerfassungsgerätes muss jeweils eine separate Netzverbindung aufgebaut werden. Über den Dienst zur

Steuerung kann die Datenübertragung jederzeit gestartet und gestoppt werden, da die Verbindung permanent geöffnet bleibt. Die Dienste zur Steuerung und Datenübertragung können wie bei Netzanwendungen üblich sowohl lokal auf einem gemeinsamen Rechner als auch verteilt auf zwei eigenständigen Rechnern ausgeführt werden. Zum Abschluss werden Einstellungen am Datenerfassungsgerät vorgenommen (S0.8), eine Tiefenkamera angeschlossen (S0.9) sowie ggf. Kalibrierungen durchgeführt (siehe Abschnitt 5.1.3).

3.4.2 Strukturkonfiguration

Zu Anfang der zweiten, der Strukturkonfigurationsphase (siehe Bild 33) wird durch einen ArUco-Marker ein globaler Referenzpunkt definiert (S1.1). Der Punkt ist wesentlich, um die Kameraposition relativ zum Oberflächenmodell bzw. Dreiecksnetz zu bestimmen. Dies ist einerseits zum Reinitialisieren notwendig, wenn die Bewegungsverfolgung der Kamera während der Strukturkonfigurationsphase fehlschlägt, aber auch, um den Ursprung des Oberflächenmodells festzulegen. So wird die Berechnung einer Transformation zwischen dem Koordinatensystem des Oberflächenmodells und dem Kamerakoordinatensystem möglich, was es erlaubt, Messungen zu unterbrechen und zeitversetzt fortzusetzen. Dafür ist jedoch erforderlich, dass sich Referenzmarker und Oberflächenmodell nicht voneinander weg bewegen. Zusätzlich wird der Marker genutzt, um einen Rahmen zu positionieren, in dem die spätere 3D-Rekonstruktion stattfindet. Durch den Rahmen wird ausschließlich die Struktur erfasst und keine zusätzlichen Gegenstände, die sich in der Nähe der Struktur befinden. Dadurch ist keine Nachbearbeitung der 3D-Rekonstruktion notwendig. Länge, Breite und Tiefe des Rahmens können individuell festgelegt werden und orientieren sich an der Größe des Prüfobjekts. Mittels dieses sogenannten Rekonstruktionswürfels bzw. -volumens kann der Rekonstruktionsprozess deutlich beschleunigt und vereinfacht werden. Die Markerpose legt den Ursprung des Rekonstruktionsvolumens für die spätere 3D-Rekonstruktion fest. Im nächsten Schritt wird ein Oberflächenmodell der zu untersuchenden Struktur für die anschließende Betriebsschwingformanalyse erzeugt (S1.2). Dies ist durch räumliche Rekonstruktion (siehe Abschnitt 5.2) mittels Tiefenkamera möglich und dient zur Erzeugung eines Dreiecksnetzes der zu untersuchenden Struktur. Nach der 3D-Rekonstruktion werden die Sensorposen über das Videobild der Stereotiefenkamera (S1.3) erfasst, um die Strukturkonfigurationsphase zu beschleunigen. Dazu werden spezielle ArUco-Marker (siehe Abschnitt 5.4) eingesetzt. Für die Posenerfassung muss jeder Sensor mindestens einmal durch seinen Marker im Kamerabild identifizierbar sein. Wurde eine Sensorpose sicher detektiert, so kann sie durch den Anwender bestätigt werden. Wenn alle Sensoren erfasst sind, werden von jedem Sensor aus alle euklidischen Distanzen zwischen der Sensorposition und allen Punkten im Dreiecksnetz ermittelt (S1.4) und der Sensor dem nächstgelegenen Punkt zugeordnet.

S1 Strukturkonfiguration

S1.1 Festlegen eines globalen Referenzpunktes mittels ArUco-Marker

S1.2 3D-Rekonstruktion mittels Stereo-Tiefenkamera

S1.3 Optische Bestimmung der Sensorposen mittels ArUco-Markern

S1.4 Automatische Zuweisung der Sensorposen zur 3D-Rekonstruktion

S1.5 Vorberechnung der Laplacematrix für anschließende Interpolation

Bild 33: Ablauf der Strukturkonfigurationsphase

Wurden zwei oder mehr Sensoren demselben Punkt zugewiesen, so werden die weiter entfernten Sensoren den nächst entfernten Punkten zugeordnet. Dies wird solange wiederholt, bis jeder Sensor genau einem Punkt zugewiesen worden ist. Mittels dieser Zuordnung kann die Laplacematrix der Interpolation (siehe Abschnitt 5.5) vorberechnet werden (S1.5). Nachdem diese Schritte durchgeführt wurden, beginnt die Visualisierungsphase bzw. die strukturdynamische Messung.

3.4.3 Visualisierung, Validierung und Durchführung der Messung

Die Visualisierungsphase (siehe Bild 34) dient zur Anreicherung des Videobildes der untersuchten Struktur mit farblich codierten Sensorwerten zum Zwecke einer Betriebsschwingformanalyse. Dafür sind mehrere Schritte notwendig. Wenn zwischen Strukturkonfigurations- und Visualisierungsphase die Anwendung beendet wurde, wird zusätzlich der Schritt (S2.0) benötigt, um den Ursprung des Oberflächenmodells zu bestimmen. Zunächst werden dann die Sensordaten auf dem Rechner, der die Darstellung übernimmt, synchronisiert über die Netzverbindung empfangen (S2.1). Sollten Datenpakete verloren gegangen sein, müssen Messdaten nachträglich interpoliert werden. Aufgrund der höheren Abtastrate der Sensoren SPS_A (Samples pro Sekunde) gegenüber der Abtast- bzw. Bildrate der Kamera SPS_B ist in diesem Schritt eine Synchronisierung bzw. Abwärtsabtastung der Sensordaten zur Abtastrate SPS_B notwendig. Dafür werden die Sensordaten den entsprechenden Bildern zugeordnet. Als repräsentativer Sensorwert pro Bild wird der Median aller Messwerte genommen, die im Zeitintervall der Erfassung des aktuell dargestellten Bildes erfasst wurden (S2.2). Zusätzlich gilt, dass die Abtastrate aller eingesetzten Sensoren identisch sein muss. Als Nächstes werden die Interpolationen berechnet (S2.3) (siehe Abschnitt 5.5). Ansonsten könnten ausschließlich Punkte, wo sich Sensoren befinden, und nicht das gesamte Oberflächenmodell mit Deformationswerten angereichert werden. Mittels Interpolation können an Zonen der Struktur, die keinen Sensor aufweisen, Annahmen über Deformationen angezeigt werden. Die Punkte denen Sensoren zugewiesen sind, stellen dabei Stützpunkte dar und die Werte an den restlichen Punkten werden anhand von Interpolationen zwischen diesen Stützpunkten

angenähert. Somit kann nach diesem Schritt allen Punkten im Oberflächenmodell der Umgebung ein Wert zugeordnet werden. Parallel dazu wird mittels Tiefenkamera ein Videobild aufgezeichnet (S2.4).

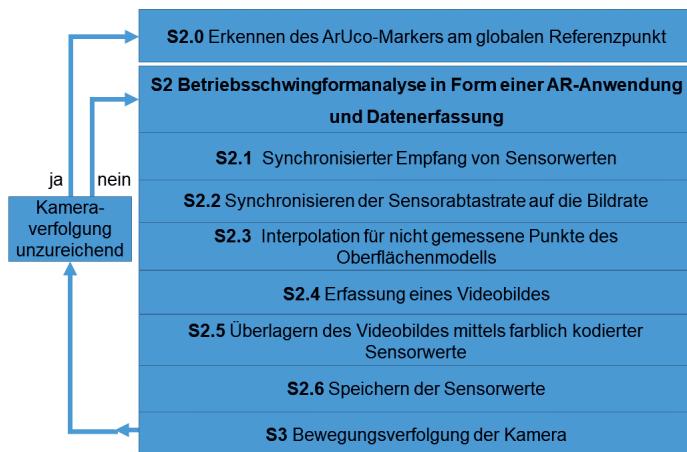


Bild 34: Ablauf der Visualisierungs- und Messphase mittels AR

Danach überlagert die AR-Anwendung das Videobild mit einer Farbcodierung der Sensorwerte (S2.5). Zum Abschluss der Phase werden die Messwerte zur späteren Verarbeitung gespeichert (2.6). Parallel zur Visualisierungsphase werden ständig die Bewegungen der Tiefenkamera verfolgt (S3) (siehe Abschnitt 5.3) und damit verbunden die Kamerapose aktualisiert. Sollte die Bewegungsverfolgung der Kamera nicht mehr möglich sein, kann die Visualisierungsphase neu gestartet und wieder bei Schritt S2.0 begonnen werden.

4 Sensorgestütztes System zur impulshaften, prellfreien Anregung fester makroskopischer Strukturen

Eine konsequente Weiterentwicklung des automatisierten Modalhammers (siehe Abschnitt 2.2.1) ist der hier vorgestellte erste intelligente Modalhammer (siehe Bild 35) [63]. Seine technische Realisierung basierend auf dem Konzept aus Abschnitt 3.3 wird im Folgenden erläutert. Zunächst wird der gegenüber dem aktuellen Stand der Technik erzielte Mehrwert aufgezeigt. Danach wird auf die Instrumentierung zur Veränderung der Impulseigenschaften und schließlich auf die Steuerung des intelligenten Modalhammers eingegangen. Letztere ist sowohl autonom am Gerät, aber auch mittels eines zusätzlichen Rechners und entsprechender Software durchführbar. Der Hammer wird dann mit dem Rechner verbunden.



Bild 35: Intelligenter Modalhammer auf einem Stativ, [64]

4.1 Mehrwert gegenüber dem aktuellen Stand der Technik

Der intelligente Modalhammer garantiert vollautomatische, reproduzierbare und hochpräzise prellfreie mechanische Anregung von Prüflingen und eignet sich daher sowohl für Modalanalyse als auch zur Klangprüfung. Dabei sind wesentliche Parameter wie Aufschlagkraft und Impulsbreite in weiten Grenzen einstellbar. Durch binäre Suche in einer Liste möglicher Bewegungsprofile mit unterschiedlichen Motoreinstellungen wird das zum Erreichen einer gewählten Aufschlagkraft optimale Profil bestimmt. Dafür wird eine Schlag-für-Schlag-Prozedur solange verwendet, bis der Sollwert mit höchstens zehnprozentiger Abweichung erreicht ist. Um die Anzahl der dabei durchgeführten Schläge zu reduzieren, wurden empirische Daten für jede Instrumentierungskombination (siehe Abschnitt 4.2) und unterschiedliche Materialien (Stahl, Holz, Plastik, Aluminium, Gummi) über den gesamten Aufschlagkraftbereich ermittelt. Dieses Vorwissen wird bei der Suche verwendet und reduziert den Suchraum nach dem ersten Schlag. Mithin benötigt die Suche für alle untersuchten, aber auch

für unbekannte Materialien über den gesamten, messbaren und zulässigen Schlagkraftbereich nur noch zwischen zwei und fünf Iterationen zum Erreichen einer gewünschten Aufschlagkraft. Diese Vorgehensweise kann auch auf die Suche der Impulsbreite übertragen werden. Durch Auswertung des Kraftsensorsignals direkt im Hammer und Etablierung eines geschlossenen Regelkreises werden erstmalig folgende Funktionalitäten umgesetzt:

- vollautomatischer prellfreier Anschlag: Vorgabe und automatische Suche der Schlagparameter (bspw. Aufschlagkraft) inklusive des Anschlagpunktes; keine manuelle Justage durch den Anwender mehr notwendig
- handgeführt oder am Stativ nutzbar
- breite Anwendung durch variable Instrumentierung
- interne Validierung der Schläge zur Qualitätssicherung
- automatische Kompensation von Lageveränderungen des Prüfobjektes

Zur schnellen und effizienten Durchführung von Messungen kann der Hammer mittels eines Stativs neben dem Prüfobjekt platziert werden. Zudem ist handgeführte Strukturanregung möglich, bei der jedoch automatisiert geschlagen wird. Da der Hammer in alle Raumrichtungen schlagen kann, ist er variabel einsetzbar. Es sind auch Serienuntersuchungen zur Klangprüfung an Förderbändern möglich, weil der Hammer Lageveränderungen der Prüfobjekte kompensieren und dennoch reproduzierbare prellfreie Anschläge erzeugen kann.

4.2 Instrumentierung und Sensoren

Um breite Anwendbarkeit zur Modalanalyse zu ermöglichen, kann der intelligente Modalhammer mit zwei unterschiedlichen Kraftsensoren (siehe Tabelle 5) ausgestattet und mit vier Hammerspitzen und zwei Zusatzgewichten modifiziert werden (siehe Bild 36). Somit lassen sich für jeden Einsatz optimale Impulseigenschaften annähern.

Tabelle 5: Gegenüberstellung der Eigenschaften der verwendeten Kraftsensoren

Typ des Kraftsensors	PCB Model 208C02 [65]	PCB Model 208C03 [66]
Aufschlagkraft [N]	20 - 444	100 - 2224
Sensitivität [mV/N]	11.2	2.25
Impulsbreite des Aufschlags [ms]	0.4 - 4	0.4 - 1.2
Zeitintervall zwischen Schlägen [s]	0.6 - 9.99	0.6 - 9.99

Die Bereiche der Aufschlagsimpulsbreite und -kraft hängen stark von der Instrumentierung und den physikalischen Eigenschaften (bspw. Materialeigenschaften und Geometrie) des Prüfobjektes ab. Daher stellen die diesbezüglichen Angaben in Tabelle 5 ausschließlich eine empirisch ermittelte Teilmenge der Realität dar, weil die Werte nur anhand von vier Prüfobjekten gemessen wurden. Durch die zwei

verwendeten Sensoren können sowohl geringe als auch stärkere Anregungskräfte gemessen werden. Dies ist aktuell mit handgeführten oder automatischen Modalhämmern nicht möglich. Dafür müssten mindestens zwei verschiedene Größen von Modalhämmern verwendet werden, denn für kleine und mittelgroße Strukturen wird jeweils ein eigenständiger Modalhammer von den Herstellern empfohlen. Die verwendeten Hammerspitzen sind aus Stahl, Kunststoff und zwei Gummi-Abstufungen gefertigt und werden ebenfalls für manuelle Modalhämmer empfohlen. Die Zusatzgewichte wiegen 12g und 60g. Die Instrumentierungen und Sensoren lassen sich einfach und schnell durch An- und Abschrauben montieren.

Typ der Instrumentierung	Ausprägung							
Kraftsensor		444 N		2224 N				
Zusatzgewichte		12 gr		60 gr				
Hammerspitzen		Metall		Kunststoff		Gummi		Gummi ex. weich

Bild 36: Übersicht über die Instrumentierung des intelligenten Modalhammers

4.3 Steuerung und Setzen der Geräteeinstellungen

Der intelligente Modalhammer kann vollständig autonom direkt am Hammer, aber auch über einen Rechner mit entsprechender Hammersoftware (siehe Bild 37) eingestellt werden. Geräteeinstellungen können direkt am Gerät mittels vierer Tasten und eines geräteintegrierten Bildschirms oder über die Rechnersoftware des Hammers vorgenommen werden. Durch Betätigung der Tasten kann der Einstellungsbaum durchlaufen und die jeweilige Einstellung verändert werden. Insgesamt stehen dem Anwender mehrere Einstellungsmöglichkeiten zum Betrieb des Hammers zur Verfügung:

- Einstellung der Instrumentierung: Sensortyp, Typ des Zusatzgewichtes, Auswahl der Hammerspitze
- Aufschlagkraft
- Anzahl der Schlagwiederholungen im Serienbetrieb
- Zeitraum zwischen den Schlägen

Die Steuerungsfunktionen werden aber nicht über den Bildschirm ausgelöst, sondern ausschließlich über einen externen kabelgebundenen Taster oder über die Rechnersoftware des Hammers. Zusätzlich stehen dem Anwender folgende Funktionalitäten zur Steuerung des intelligenten Modalhammers zur Auswahl:

- automatische Aufschlagpunktsuche
- automatische Aufschlagkraftsuche
- Entriegeln des Hammerarms zu dessen manueller Bewegung
- Verriegelung des Hammerarms für den Schlagbetrieb
- Starten und Stoppen einer Schlagserie

Nach jedem Schlag wird die Aufschlagkraft auf dem Bildschirm angezeigt. Zum Analysieren der Resultate werden die ermittelten Impulspanparameter (Höhe, Breite, maximal anzuregender Frequenzbereich: jede Frequenzamplitude weist maximal 20 Dezibel Unterschied zur maximalen Amplitude des Frequenzbereiches auf) und die Angabe, ob ein Einzelschlag erzielt wurde, auf einem mobilen Datenträger zur späteren Qualitätssicherung gespeichert. Mit der Rechnersoftware des Hammers können zusätzlich die Sensordaten im Zeit- bzw. Frequenzbereich und die Parameter zur Qualitätssicherung angezeigt werden.

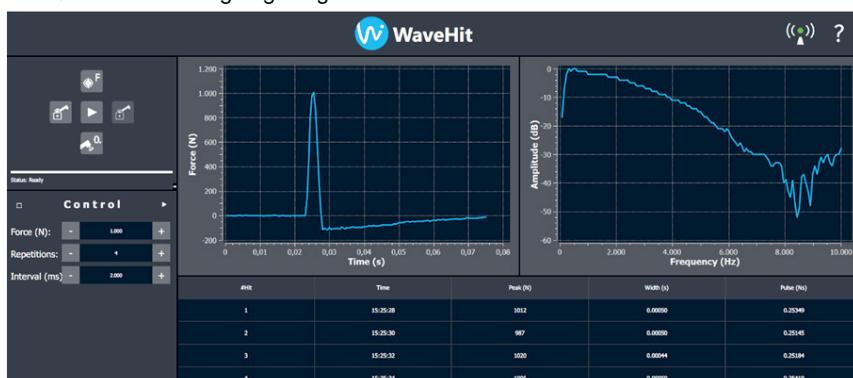


Bild 37: Darstellung eines Einzelschlages

5 Komponenten zur Strukturkonfiguration und Echtzeit-visualisierung von Betriebsschwingformen

In diesem Kapitel werden Komponenten zur Strukturkonfiguration und Visualisierung zum Zwecke von Betriebsschwingformanalysen vorgestellt. Sie sind wesentlich für den in Abschnitt 3.3 festgelegten Gesamtablauf zur neuartigen strukturdynamischen Datenerfassung. Begonnen wird mit den Prinzipien der Stereoskopie (siehe Abschnitt 5.1). Zur Erstellung von Dreiecknetzen zu untersuchender Strukturen werden Oberflächenrekonstruktionen benötigt (siehe Abschnitt 5.2). Zur Bewegungsverfolgung der Kamera wird (siehe Abschnitt 5.3) eine Fusion aus optischer und inertialer Bewegungsverfolgung verwendet. Für die Erkennung von Schwingungssensorposen (siehe Abschnitt 5.4) wird optische Bewegungsverfolgung mit ArUco-Markern genutzt. Neben Sensorwerten, -posen und Oberflächenrekonstruktion ist zur Durchführung einer Betriebsschwingformanalyse zusätzlich eine geeignete Interpolation der Deformationswerte an nicht gemessenen Punkten der Oberfläche (siehe Abschnitt 5.5) notwendig.

5.1 Stereoskopie-Kameras

Die Kameraauswahl ist für die Umsetzung eines AR-Systems von elementarer Bedeutung. Die Kamera dient einerseits zur Aufnahme der Realität und andererseits zur Verfolgung der Bewegung der Blickrichtung und des Blickwinkels des Anwenders. Um zusätzlich den dreidimensionalen Bezug zwischen rechnererzeugten und realen Objekten zu berücksichtigen, werden in vielen AR-Anwendungen Tiefenkameras zur Stereoskopie eingesetzt. Darunter wird die Fähigkeit zur dreidimensionalen Vermessung bzw. zum räumlichen Sehen verstanden. Stereoskopie basiert auf Triangulation zur Tiefenberechnung. Dafür muss das zu vermessende Objekt aus mehreren Positionen aufgenommen werden. Aus technischer Sicht werden aktive und passive Verfahren unterschieden. Letztere nutzen Kamerabilder ausschließlich zur Tiefenberechnung. Zur Rekonstruktion des Raumes werden Korrespondenzen in verschiedenen zusammengehörenden Bildern gesucht. Unter Korrespondenzen werden gleiche Orte auf dem Objekt verstanden, die aus verschiedenen Perspektiven aufgenommen wurden. Im Gegensatz dazu verwenden die aktiven Verfahren zusätzlich strukturierte Lichtquellen. Die bekannten Muster der Lichtquellen werden ebenfalls als Korrespondenzen angesehen.

5.1.1 Tiefenkamera zur 3D-Rekonstruktion

Zur Rekonstruktion von Strukturen wurde eine Tiefenkamera gesucht, die folgende wesentlichen Anforderungen erfüllt: Sie soll bei kleinen und großen Strukturen mit geringen Kontrasten sowohl im Freien, als auch im Inneren von Gebäuden einsetzbar und bestmöglich zur 3D-Rekonstruktion metallischer Gegenstände geeignet sein. Auf Erfüllung dieser Anforderungen hin wurden die in Bild 38 aufgezeigten Stereokameras analysiert, die in der Literatur als geeignet für den Innen- [67] und den Außenbereich [68] genannt wurden.

- ① RealSense D415
- ② RealSense D435
- ③ RealSense D455
- ④ RealSense L515
- ⑤ ZED 2 Stereo Camera
- ⑥ ZED Mini
- ⑦ Orbbee Astra Embedded S
- ⑧ LIPSEdge DL

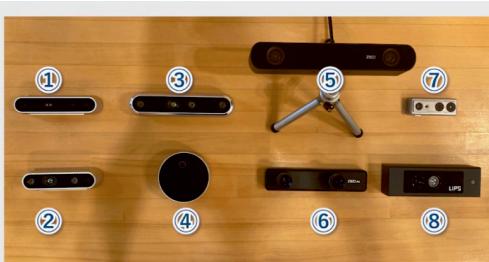


Bild 38: Gegenüberstellung von Tiefenkameras, Quelle: [67]

Eine Gegenüberstellung dieser Kameras ergab starke Abhängigkeiten zwischen der Qualität der Tiefenbilder und unterschiedlichen Umgebungsbedingungen sowie von den Anwendungsgebieten. Als Ergebnis von Literaturstudie und eigener experimenteller Kameravalidierung wurde die Kamera Intel Real Sense D455 [69] (siehe Bild 39) für die Rekonstruktion ausgewählt, da sie alle wesentlichen Anforderungen erfüllt.



Bild 39: Intel Real Sense D455, Quelle: [69]

Weiterhin erreicht diese Kamera unter den Umgebungsbedingungen, die üblicherweise bei strukturdynamischen Messungen vorliegen, in Echtzeit die besten und realistischsten Tiefenbilder im Vergleich zu den anderen Tiefenkameras im Niedrigpreissegment. Zur Verbesserung der Tiefendaten mittels konstanter Lichtmuster dient der integrierte Projektor. Die Kamera verwendet ein aktives IR-Stereoprinzip zur Erfassung der Tiefenbilder und besitzt zwei Tiefensensoren, einen RGB-Sensor und einen Infrarotprojektor. Die Stereotiefensensoren der D455 sind 95mm voneinander entfernt. Dadurch beträgt der Tiefenfehler unter 2% in 4m Abstand.

Die Kamera besitzt die in Tabelle 6 aufgezeigten Spezifikationen und ist sowohl für den Einsatz im Innen- als auch im Außenbereich geeignet.

Tabelle 6: Auflistung der wesentlichen Spezifikationen der Tiefenkamera Intel Real Sense D455

Tiefenbereich	0,4 - 6 m
Integrierte Bewegungssensoren	Beschleunigung, Gyroskop
Sichtbereich	86° (H) x 57° (V)
Auflösung bei 30 Bildern / Sekunde	1280 x 720

Die Tiefenkamera D455 ist mit einer seriellen Busschnittstelle von Typ USB 3.0 zum Anschluss an Rechner ausgestattet. In Form eines plattformunabhängigen Softwareentwicklungskits (SDK, für engl. Software Development Kit) [70] steht für sie eine offene Programmierschnittstelle zur Verfügung, die in C++ geschriebenen objektorientierten Anwendungen erlaubt, alle Kamerafunktionen zu verwenden.

5.1.2 Tiefenkamera zur Bewegungsverfolgung

Für die Bewegungsverfolgung der Tiefenkamera wird eine weitere, spezialisierte Kamera, die Intel Real Sense T265 (siehe Bild 40), verwendet. Sie besitzt zwei Fischaugenobjektive, mit denen ein kreisförmiges Sichtfeld von etwa 165 Grad Weite von einem monochromen Kamerasensor mit einem Durchmesser von etwa 800 Pixeln erfasst werden kann.



Bild 40: Produktbild der Intel Real Sense T265, Quelle: [71]

Außerdem sind das gerätetechnisch synchronisierte Gyroskop Bosch BMI055 mit 200 Hz und ein Beschleunigungsmesser mit 62,5 Hz Abtastrate integriert. Es handelt sich bei der T265 um eine passiv arbeitende Stereokamera, die mit einer Latenzzeit von unter 6 ms zwischen Bewegung und Übertragung arbeitet und ausreichend für AR- und VR-Anwendungen ist. Daneben wird sie hauptsächlich in der Robotik und zur Drohnensteuerung eingesetzt. Die Kamera kann sowohl im Innen- als auch im Außenbereich und in Umgebungen mit geringer Beleuchtung eingesetzt werden. Da sie Berechnungen intern durchführt, werden keine besonderen Anforderungen an weitere Hardware gestellt. Die Kamera wird wie die eingesetzte Tiefenkamera via USB

angeschlossen und mit Strom versorgt. Zur Verfolgung der Kamerabewegung der T265 wird das bereits für die D455 verwendete SDK benutzt (siehe Abschnitt 5.3), da dieses perfekt auf die vorliegende Hardware abgestimmt ist. Obwohl diese Kamera in vielen Anwendungen einzeln zur Bewegungsverfolgung genutzt wird, kann sie auch mit anderen Intel Real Sense-Tiefenkameras [72] kombiniert werden. Die Kamera verfügt über einen Infrarotsperrfilter über den Linsen, der die projizierten Muster der zusätzlichen Tiefenkamera ignoriert.

5.1.3 Gemeinsame Nutzung zweier Tiefenkameras

Die gemeinsame Nutzung der T265-Bewegungsverfolgungs- und der D455-Tiefenkamera ist problemlos möglich. Dafür werden beide Kameras zusammen montiert, fixiert und Kalibrierungen durchgeführt, um extrinsische Kameraparameter bzw. Transformationsmatrizen zwischen den Kameras zu bestimmen. Zur Mehrkamerakalibrierung wird ein Schachbrettmuster ausgewählt, bei dem beide Kameras auf das gleiche ausgedruckte Bild ausgerichtet sind. Danach werden die Ecken im Schachbrett sowohl von den Farbobjektiven der D455 als auch von den Fischaugenobjektiven der T265 aufgenommen. Anhand dieser gemeinsamen Merkmale kann die Transformationsmatrix zwischen den beiden Kameras bestimmt werden. Die resultierende homogene 4-mal-4-Transformationsmatrix gibt den Rotations- und Translationsvektor zwischen den Posen der Tiefenkamera und der Kamera zur Bewegungsverfolgung an. Dadurch können Veränderungen der Kamera-pose zur Bewegungsverfolgung auf die Pose der Tiefenkamera übertragen werden. Diese Transformationsbestimmung ist nur einmalig notwendig, wenn die Kameras zueinander fixiert sind und somit sich ihre Pose zueinander nicht mehr verändert.

5.2 3D-Rekonstruktion

Dreidimensionale Rekonstruktion ist die Fähigkeit zur Erfassung von Formen bzw. Erscheinungsbildern realer Objekte in Form von Dreiecksnetzen oder Punkt wolken. Sie ermöglicht AR-Anwendungen, reale Welten zu modellieren und in ihnen zu interagieren. Dreidimensionale Erfassung ist wesentlich zur Vermischung realer mit rechnererzeugter Welt und wird genutzt, um Prüfobjekte zu vermessen und digital zu erstellen. Dafür wird um ein betrachtetes Objekt ein Rekonstruktionswürfel bzw. -volumen festgelegt, dessen Ursprung durch einen ArUco-Marker bestimmt wird und dessen Höhe, Breite und Tiefe vom Anwender angegeben werden kann. Die eingesetzte Tiefenkamera analysiert für die Rekonstruktion innerhalb des Rekonstruktionswürfels kontinuierlich das Objekt und erstellt Dreiecksnetze von dem, was sie sieht. Das jeweilige Dreiecksnetz wird aktualisiert, wenn die Kamera bewegt wird und/oder neue Elemente in der Szene erfasst werden. Softwaretechnisch wurde

die 3D-Rekonstruktion mit dem RecFusion SDK [73] realisiert, das mit unterschiedlichsten Tiefenkameras genutzt werden kann. Dem SDK werden ausschließlich Tiefen- und Farbbilder und die intrinsischen Kameraparameter übergeben und der Kinect-Fusion-Algorithmus wird zur Bewegungsverfolgung der Kamera und zur 3D-Rekonstruktion [74] verwendet. Kinect-Fusion wurde ursprünglich für den Microsoft Kinect-Sensor entwickelt. Der Algorithmus ermöglicht die 3D-Rekonstruktion von Szenen durch Bewegen von Tiefenkameras in Echtzeit unter Verwendung handelsüblicher Grafikhardware. Dafür werden Tiefenbilder unter der Annahme, dass sich die relative Lage des Sensors zum Objekt in der Zeit nur geringfügig verändert, in eine volumetrische Datenstruktur überführt. Der Algorithmus ist für zwei Arten von Rekonstruktionen anwendbar: handgeführt, indem der Anwender um die Struktur herumläuft, oder indem sich das Objekt mittels eines Drehtellers um die Tiefenkamera herumbewegt. Für die Zielstellung der Arbeit ist ausschließlich handgeführte Rekonstruktion von Bedeutung.

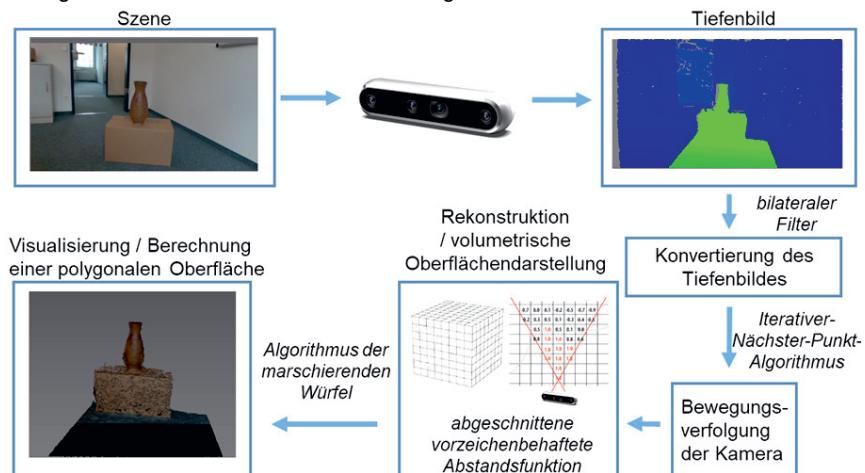


Bild 41: Überblick über die Phasen des Kinect Fusion-Algorithmus

Der Algorithmus besteht i.W. aus folgenden vier Schritten (siehe Bild 41):

- Oberflächenmessung: Diese Phase dient zur Überführung der aktuellen Bildkoordinaten des Tiefenbildes in Vertizes⁽⁷⁾ und zugehörige Normalen⁽⁸⁾ im Kamerakoordinatensystem. Das Tiefenbild beinhaltet für jeden Pixel dessen Distanz zur nächsten Oberfläche. Die Vertizes und Normalen werden aus dem Tiefenbild und intrinsischen Kameraparametern bestimmt. Bevor die Vertizes und Normalen berechnet werden, wird ein bilateraler Filter angewendet, um das

⁷ Singular: Vertex, Lat.: vertere, dies bedeutet drehen oder wenden; wird als Wendepunkt, ebenso als Knoten einer Stelle, an der sich Richtungen treffen, definiert.

⁸ Die Normale verläuft orthogonal zur Tangente des Vertex.

Rauschen des Tiefenbildes zu reduzieren. Dieser Filter versucht, die Tiefenkanten so weit wie möglich unscharf zu halten.

- Bewegungsverfolgung der Kamera: In der Phase der Bewegungsverfolgung wird eine starre 6-DOF-Transformation der Kamerabewegung berechnet. Diese wird durch Bewegungsverfolgung des Tiefenbildes relativ zum globalen Modell mithilfe des „iterativen nächsten Punkt“-Algorithmus (ICP, für engl. Iterative Closest Point) ermittelt, der alle verfügbaren beobachteten Tiefendaten verwendet.
- Rekonstruktion: Anstatt Punktwolken zu verschmelzen oder ein Dreiecksnetz zu erstellen, wird eine volumetrische Oberflächendarstellung mit Namen „abgeschnittene vorzeichenbehaftete Abstandsfunktion“ (TSDF, für engl. Truncated Signed Distance Function) ausgewählt. Ausgehend von der globalen Kameraposition werden die orientierten Vertizes der Oberflächenmessung in globale Koordinaten umgewandelt und einem Feld des Voxel⁽⁹⁾-Gitters zugeordnet. Jedes Voxel speichert einen lokalen Mittelwert zur angenommenen Distanz des Voxels zur Oberfläche. Dieser Wert wird zwischen -1 und 1 normalisiert. Die Auflösung der Rekonstruktion wird durch die Struktur des Voxelgitters bestimmt.
- Visualisierung: Zur Visualisierung des Oberflächenmodells wird eine polygonale Oberfläche aus dem Voxelgitter berechnet. Dabei wird die Oberfläche mit Dreiecken nachgebildet. Der dafür genutzte Algorithmus der „marschierenden Würfel“ (für engl. Marching Cubes) [75] überführt das Voxel-Volumenmodell in ein polygonales Oberflächenmodell, das sich dann deutlich effizienter als das Volumenmodell visualisieren lässt.

Der Speicherbedarf des eingesetzten Rekonstruktionsalgorithmus ist groß und wird durch die Größe des verwendeten Voxelgitters und die Voxelauflösung innerhalb des Rekonstruktionswürfels bestimmt. Daher werden für große Voxelgitter Grafikkarten mit viel Speicher benötigt und setzt der Algorithmus eine während des Rekonstruktionsprozesses sich nicht deformierende Struktur voraus. Wenn diese Voraussetzungen erfüllt sind, ist der Algorithmus zur Rekonstruktion im Rahmen strukturdynamischer Messungen geeignet.

5.3 Bewegungsverfolgung der Kamera

Grundsätzlich werden zur fusionierten, inertialen und visuellen Bewegungsverfolgung die im Intel Real Sense SDK bereitgestellten Methoden und die Intel Real Sense Kamera T265 (siehe Abschnitt 5.1.2) verwendet. Die visuellen und inertialen Bewegungsverfolgungen werden separat bestimmt und dann im Anschluss fusioniert

⁹ Ein Voxel bezeichnet einen Punkt in einem 3D-Gitter. Es entspricht einem Pixel in einem 2D-Bild und wird implizit ausschließlich aus der Position zu anderen Voxeln hergeleitet.

[76]. Aufgrund der Kombination aus visuellen Informationen und inertialen Sensordaten wird eine höhere Genauigkeit bei der Bewegungsverfolgung erreicht, als es mit nur einem Sensortyp möglich wäre. Die visuelle Bewegungsverfolgung schätzt die Kamerabewegung anhand der Bewegung sogenannter relevanter Bildmerkmale ab. Diese basieren auf Informationen, die von den beiden Fischaugenkameras gesammelt werden. Durch das große Sichtfeld der Kameratasensoren bleiben Referenzpunkte relativ lange sichtbar, auch wenn sich das System schnell durch den Raum bewegt. Die Bildmerkmale werden auf Grundlage der Bildbereiche mit hohen Intensitätsgradienten errechnet. Anhand der ermittelten Bildmerkmale lassen sich Übereinstimmungen zwischen aufeinander folgenden Bildern finden und die Bahn der Kamerabewegung berechnen. Zur Erhöhung der Robustheit des Verfahrens werden die Übereinstimmungen der Bildmerkmale über mehrere vorherige Kamerabilder berechnet. Durch Auswertung zusätzlicher IMU-Informationen, die mittels Gyroskop und Beschleunigungsmesser bestimmt wurden, können eine verbesserte Schätzung der Bewegung und höhere Abtaffrequenzen (bis zu 62,5 Hz) im Vergleich zur Kamera erreicht werden.

5.4 Optische Erkennung der Schwingungssensorposen

Zur Erkennung der Schwingungssensorposen werden diese mit Markern versehen. Um das Koordinatensystem eines Sensors mit dem seines Markers zu vereinigen, wird der Marker so am Sensor angebracht, dass er senkrecht auf der z-Achse des Sensors positioniert wird und die x- und y-Koordinatenachsen von Sensor und Marker zusammenfallen. Somit kann die Erkennung der Markerposen direkt auf den Sensor übertragen werden. Zusätzlich kann in jedem Marker eine Marker-ID codiert werden, sodass eine eindeutige Zuordnung von Sensor zu Marker möglich ist. Diese Beziehung ist wesentlich, um die Messdaten der zugehörigen Markerpose zuordnen zu können. Zur optischen Erkennung müssen alle Marker mindestens einmal durch die Kamera detektiert werden. Ab diesem Zeitpunkt ist die Relation zwischen dem Kamerakoordinatensystem und den Koordinatensystemen der Sensoren bzw. Marker gegeben. Die Marker brauchen danach nicht mehr im Bild ausgewertet zu werden, da ausschließlich nicht-bewegliche Prüfobjekte während der Messung analysiert werden sollen. Danach wird dann nur noch die Kamerapose benötigt, um die einzelnen Sensorposen in Relation zur Kamerabewegung zu aktualisieren. Optische merkmalbasierte Erkennung ist in dieser AR-Anwendung nicht zielführend, da die verschiedenen Sensoren alle gleich aussehen und damit keine eindeutigen Bildmerkmale pro Sensor vorliegen.

5.4.1 Funktionsweise der ArUco-Marker

ArUco⁽¹⁰⁾-Marker [77] (siehe Bild 42) werden verwendet, da sie schnelle und robuste Decodierungen ermöglichen. Die kompakten, quadratischen ArUco-Marker bestehen jeweils aus einem breiten schwarzen Rand und einer inneren binären Matrix, die den Identifikator des Markers codiert. Der schwarze Rand erleichtert schnelle Erkennung im Bild und die innere binäre Codierung ermöglicht Identifizierung und Anwendung von Fehlererkennungs- und Korrekturtechniken. Die Markergröße bestimmt die Größe der internen Matrix, bspw. 4-mal-4 für 16 Bits. Diese Marker können mit geringer Informationsdichte codiert werden und sind somit kompakt druckbar und direkt auf Schwingungssensoren installierbar. Weiterhin enthalten sie für jeden Sensor eine eindeutige Identifikationsnummer. Zu Beginn der Codierung der Marker müssen drei Merkmale durch den Anwender definiert werden:

- Größe des Wörterbuches D_{Marker}
- Bitgröße des Markers B_{Marker}
- Bildgröße des Markers in Pixeln L_{Marker}

Die Größe des Wörterbuchs und die Bitgröße des Markers bestimmen die Ähnlichkeit zwischen den Markern, was direkte Auswirkungen auf Fehlererkennung bzw. -korrektur hat. Im Allgemeinen erhöhen niedrigere Wörterverzeichnisgrößen und höhere Markerbitgrößen den Abstand zwischen den einzelnen Markern eines Wörterbuches D_{Marker} und umgekehrt. Dadurch können Marker besser getrennt und mehr Fehler korrigiert werden. Mit höheren Bitgrößen ist Markererkennung aufgrund der höheren Bitanzahl, die aus Bildern extrahiert werden muss, komplexer und zeitintensiver.

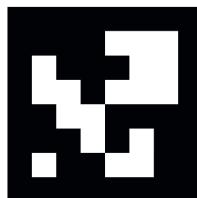


Bild 42: Beispiel eines ArUco-Markers der Größe 6-mal-6 Bits

Die Erkennung eines ArUco-Markers umfasst folgende Schritte (siehe Bild 43):

- Aufnahme eines Videobildes
- Kantendetektion: Umwandlung des Videobildes in ein Grauwertbild, in dem die Kanten unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Beleuchtungen im Bild extrahiert werden. Aus Laufzeitgründen wird ein adaptives lokales Schwellwertverfahren genutzt.
- Erkennung der Konturen auf dem Schwellenwertbild mittels des Suzuki- und Abe-Algorithmus [78] und Filterung.

¹⁰ C++ Softwarebibliothek basierend auf OpenCV für AR-Anwendungen (OpenCV, 2018).

- Polygonale Approximation und Entfernung irrelevanter Konturen: Basierend auf den gefundenen Konturen werden mittels des Douglas-Peucker-Algorithmus [79] die Konturen geglättet⁽¹¹⁾. Dann werden alle Konturen entfernt, die keinen zusammenhängenden rechteckigen Kantenzug darstellen. Alle anderen Konturen werden ab jetzt als Marker angesehen.
- Anwendung der perspektivischen Transformation auf Marker: Das Innere des gefundenen Markers wird untersucht, um den internen Code zu extrahieren. Dafür wird die perspektivische Projektion des Markers durch Berechnung der Homographie⁽¹²⁾ entfernt. Das resultierende Bild wird im Bildbereich des einzelnen Markers mittels der Otsu-Methode [80] binarisiert.
- Bitzuweisung für jede Zelle des Markers: Ein regelmäßiges, äquidistantes Gitter wird über den Markerbildbereich gelegt und ein Wert von 0 für weiße oder 1 für schwarze Gitterelemente bestimmt. Die Größe des Gitters ist dabei durch das Wörterbuch D_{Marker} vorgegeben, welches sich aus der Bitgröße und Bildgröße des Markers berechnet. Diese Werte müssen bei der Generierung des Markers durch den Anwender angegeben werden. Zur Festlegung des globalen Farb- bzw. Bitwertes für jedes Gitterelement wird die Mehrheit der Farbwerte aller Binärpixel in diesem bestimmt. Daraufhin finden Filterungen dieser Kontur statt; denn nur wenn alle begrenzenden Gitterelemente dieses Markers als globalen Farbwert eine 0 aufweisen, handelt es sich um einen regulären Marker. Nur dann wird er für den weiteren Verarbeitungsprozess ausgewählt.
- Identifikation des Markers und Fehlerkorrektur: Es wird überprüft, ob der gefundene Marker zum Wörterbuch D_{Marker} gehört. Um Rotationen bei der Identifikation zu berücksichtigen, werden alle vier möglichen Rotationen des gefundenen Markers im Wörterbuch gesucht. Wird eine dieser vier Optionen im Wörterbuch gefunden wird, so wird der Marker als gültig angesehen. Um die Suche im Wörterbuch zu beschleunigen, werden die Einträge in D_{Marker} als balancierter Binärbaum sortiert. Im Baum wird jeder Wörterbucheintrag von einem Einzelwert repräsentiert und stellt die Konkatenation aller Bits des Markers dar. Aufgrund der vier möglichen Rotationen ergibt sich somit eine Komplexität der Suche von $O(4 * \log_2(|D_{\text{Marker}}|))$.

¹¹ Polygonale Approximation.

¹² Homographie bezeichnet eine lineare Transformation in homogene Koordinaten.

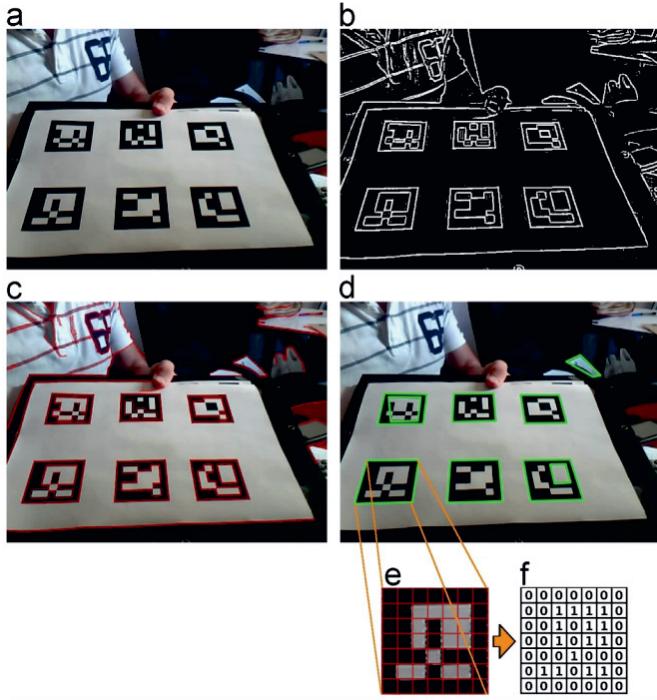


Bild 43: Prozess zur ArUco-Markererkennung. (a) Aufnahme eines Bildes, (b) Kantendetektion mittels adaptiven lokalen Schwellenwertverfahrens, (c) Erkennung der Konturen und Filterung, (d) polygonale Approximation und Entfernung der irrelevanten Konturen, (e) Anwendung der perspektivischen Transformation, (f) Bitzuweisung für jede Zelle des Markers, Quelle: [77]

5.4.2 Bestimmung der intrinsischen Kameraparameter und Verzerrungskoeffizienten

Um korrekte extrinsische Kameraparameter wie Position und Orientierung eines ArUco-Markers gewinnen zu können, müssen zunächst die intrinsischen bestimmt werden. Die Beziehung zwischen den Bildpixeln und den Weltkoordinaten wird mit Hilfe des Lochkameramodells hergestellt (siehe Abschnitt 2.3.4). Durch eine Kalibrierung werden dann die Kameramatrix bzw. die intrinsischen Parameter bestimmt. Ebenso muss die radiale Bildverzerrung entfernt werden. Zusätzlich zur radialem kann tangentiale Verzerrung auftreten, wenn das Kameraobjektiv nicht perfekt

parallel zur Bildsensorebene ausgerichtet ist. Es ist jedoch allgemein üblich, diese zu ignorieren und anzunehmen, dass das Objektiv mehr oder weniger parallel zum Bildsensor steht. Eine Kamerakalibrierung ist beim Einsatz der Intel Real Sense-Kameras nicht notwendig, da diese vom Produzenten schon kalibriert wurden. Die ermittelten Parameter werden direkt in der Kamera gespeichert und können durch das zugehörige SDK ausgelesen werden.

5.4.3 Berechnung der Posen von ArUco-Markern

Grundlegend für die Berechnung einer Markerpose sind die in Abschnitt 5.4.1 beschriebene grundsätzliche Erkennung des Markers und seiner Ecken als auch die in Abschnitt 5.4.2 erläuterte Kamerakalibrierung. Die Pose gibt die Rotations- und Translationsvektoren an, die einen Punkt aus dem Marker- bzw. Welt- in das Kamerakoordinatensystem transformieren. Zur Berechnung der Transformation wird der Algorithmus zur „Posenschätzung auf Basis der Infinitesimal-Ebene“ (IPPE, für engl. Infinitesimal Plane based Pose Estimation) [81] genutzt.

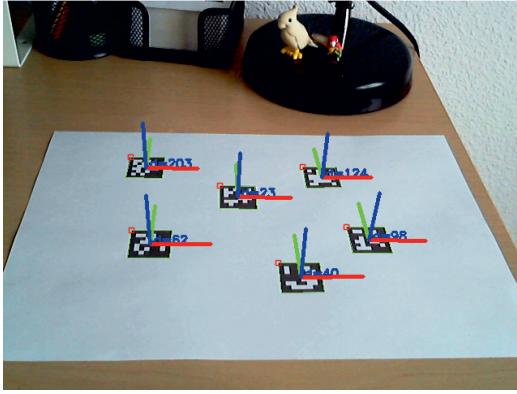


Bild 44: Bestimmung mehrerer Markerposen. Ausgabe der codierten Marker-ID und Visualisierung zugehöriger Transformationsmatrizen. Das Marker-Koordinatensystem wird in der Mitte des Markers platziert, wobei die z-Achse (blau) nach außen zeigt. Die x-Achse (rot) und die y-Achse (grün) liegen auf der Markerebene, Quelle: [82]

Er findet eine Objektpose aus 3D-2D-Punktkorrespondenzen. Ein Spezialfall des generischen IPPE-Algorithmus, der sich für die Schätzung von Markerpositionen eignet, ist der angepasste IPPE-Rechteck-Algorithmus. Die Anzahl seiner Eingabepunkte muss vier betragen und repräsentiert die Eckpunkte des Markers. Die Größe bzw. Länge des Markers wird mit L_{Marker} und die vier Objektpunkte $OP_{\text{Marker},e}$ mit den Indizes der Eckpunkte e von 0 bis 3 werden in der folgenden Reihenfolge definiert: $OP_{\text{Marker},0}: [-L_{\text{Marker}} / 2, L_{\text{Marker}} / 2, 0]$, $OP_{\text{Marker},1}: [L_{\text{Marker}} / 2, L_{\text{Marker}} / 2, 0]$, $OP_{\text{Marker},2}: [L_{\text{Marker}} / 2, -L_{\text{Marker}} / 2, 0]$, $OP_{\text{Marker},3}: [-L_{\text{Marker}} / 2, -L_{\text{Marker}} / 2, 0]$.

$[L_{\text{Marker}} / 2, -L_{\text{Marker}} / 2, 0]$, $OP_{\text{Marker},3} : [-L_{\text{Marker}} / 2, -L_{\text{Marker}} / 2, 0]$. Der Algorithmus schätzt die Objektpose (siehe Bild 44) anhand der vier Objektpunkte OP_{Marker} , der entsprechenden Bildprojektionen⁽¹³⁾ sowie der Kameramatrix und Verzerrungskoeffizienten ab.

5.4.4 Erweiterter Quaternion-Kalmanfilter zu verbesserter Posenerkennung

Belichtungseinflüsse, Bewegungsunschärfe der Kamera und Kamerarauschen bedingen Ungenauigkeiten in der Erkennung von ArUco-Markerposen. Falsche Posenerkennung tritt schon auf, wenn die Kamera konstant auf einen Marker ausgerichtet wird. Dieser Effekt ist für die Strukturdynamik, die zeitlich stabile Erkennungen von Sensorposen erfordert, nicht akzeptabel. Zur Stabilisierung der Posenerkennung wird deshalb ein erweiterter Quaternion-Kalmanfilter verwendet.

5.4.4.1 Kalmanfilter und erweiterte Kalmanfilter

Bei der Auswertung von Sensordaten treten häufig Fehleranfälligkeiten auf, die bspw. durch Messungenauigkeiten, äußere Einflüsse wie Temperaturunterschiede, unterschiedliche Beleuchtung, Bewegung der zu messenden Struktur, Störungen des Sensorsignals oder durch das Messprinzip des Sensors zustande kommen. Um solche Ungenauigkeiten und Fehler algorithmisch zu korrigieren, werden des Öfteren Kalman- bzw. erweiterte Kalmanfilter eingesetzt. Vor allem bei der Verfolgung der Bewegung von Objekten mit optischen, laufzeitbasierten als auch Inertialsensoren stabilisiert diese Algorithmenart die Ergebnisse. Die Kalmanfiltern zugrunde liegende Idee ist Schätzung des Zustandes eines dynamischen Systems mittels eines auf vorherigen Messungen beruhenden Zustandsmodells des Systems. Filterung umfasst dabei zwei Schritte, die sich in ihrer Abfolge ständig wiederholen. Anhand des Systemmodells wird zunächst das Verhalten im nächsten Schritt geschätzt. Daraufhin wird diese Vorhersage mittels der Messung im nächsten Schritt korrigiert. Dadurch lässt sich der Zustand stabiler schätzen, als dies mit reiner Messung möglich wäre, da der Messfehler meistens höher als der Schätzfehler des Filters ist. Kalmanfilter sind überall dort einsetzbar, wo gemessene Systeme bzw. deren Zustände modelliert werden können. Dies trifft im Falle der Posenschätzung von ArUco-Markern zu. Der klassische Kalmanfilter setzt lineare Systemmodelle zur Schätzung voraus. Für nichtlineare Systeme wurde der erweiterte Kalmanfilter entwickelt, der vor jeder Schätzung und

¹³ Entspricht den zweidimensionalen Bildpunkten, die die vier Ecken des entsprechenden Markers beschreiben.

Korrektur die Zustandsübergangsfunktionen in der Umgebung des letzten Schätzwerts linearisiert. Die übrigen Funktionen des Kalmanfilters bleiben erhalten. Linearisiert wird mit partiellen Ableitungen in Form von Jacobi-Matrizen.

5.4.4.2 Verbesserte Schätzung von ArUco-Markerposen mit erweitertem Kalmanfilter

Das Orientierungsproblem wird mit Hilfe von Quaternionen beschrieben. Daher wird ein erweiterter quaternionsbasierter Kalmanfilter zur Schätzung der Position und Orientierung eines ArUco-Markers verwendet [83]. Der Zustandsvektor des kombinierten Positions- und Orientierungsschätzungsproblems ist:

$$x = \begin{bmatrix} p \\ \dot{p} \\ \ddot{p} \\ q \\ \dot{r}_0 \\ \ddot{r}_0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

wobei p, \dot{p}, \ddot{p} Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung eines ArUco-Markers, q der Quaternionenvektor zur Orientierung und r_0, \dot{r}_0 die Rotationsgeschwindigkeiten und -beschleunigungen im Koordinatensystem des ArUco-Markers sind. Zusätzlich wird verlangt, dass sowohl die gemessene als auch die geschätzte Quaternion stets normalisiert verwendet werden.

Prozess- und Messmodell

Seien x_k der aktuelle Zustand, $f(x_k)$ die nichtlineare Zustandsübergangsfunktion (siehe Formel 22), w_{k-1} das vorherige Prozessrauschen, z_k der aktuelle Messvektor, $h(x_k)$ die aktuelle Messfunktion (siehe Formel 24) und v_k das aktuelle Messrauschen. Die diskreten Zeitpunkte bzw. aufeinanderfolgenden Zustände werden mit dem Zeitindex k notiert und die Zustände sind durch feste Zeitintervalle Δt voneinander getrennt. Das Zustandsübergangs- und Beobachtungsmodell wird folgendermaßen angeben:

$$\begin{aligned} x_k &= f(x_{k-1}) + w_{k-1} \\ z_k &= h(x_k) + v_k \end{aligned} \quad (21)$$

Die nichtlineare Zustandsübergangsfunktion wird durch folgende Gleichung definiert:

$$f(x) = \begin{bmatrix} p + \dot{p}\Delta t + \frac{1}{2}\ddot{p}\Delta t^2 \\ \dot{p} + \ddot{p}\Delta t \\ \ddot{p} \\ q + \dot{q}\Delta t \\ r_0 + \dot{r}_0\Delta t \\ \dot{r}_0 \end{bmatrix} + r_0 \quad (22)$$

mit \dot{q} der folgendermaßen definierten zeitdifferenzierten Quaternion:

$$\dot{q} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{r_{ro} + r_{ro}\Delta t} \end{bmatrix} \otimes q \quad (23)$$

wobei q_{ro} den Rotationsgeschwindigkeitsvektor und \otimes das Quaternionenprodukt repräsentiert. Die Messfunktion $h(x)$ wird durch das Messrauschen v , die Position p als auch durch den Quaternionenvektor zur Orientierung q direkt aus der Pose des ArUco-Markers bestimmt:

$$h(x) = \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} + v \quad (24)$$

Zustandsschätzung und Aktualisierung der Gleichungen

Seien F_{k-1} die linearisierte Zustandsübergangsmatrix, die die vorherige Zustandsschätzung \hat{x}_{k-1} berücksichtigt, und H_k die linearisierte Messmatrix, die den aktuell vorhergesagten Zustand \hat{x}_k^- berücksichtigt. Das zeitdiskrete Modell des Prozesses \hat{x}_k und der Messung z_k wird dann definiert als:

$$\begin{aligned} \hat{x}_k &= F_{k-1} \hat{x}_{k-1} + w_{k-1} \\ z_k &= H_k \hat{x}_k^- + v_k \end{aligned} \quad (25)$$

Mit den vom Anwender manuell bestimmten Prozess- und Messvarianzen σ_q^2 bzw. σ_r^2 sowie der Einheitsmatrix I werden die zugehörigen Rausch-Kovarianzmatrizen Q_k und R_k folgendermaßen festgelegt:

$$\begin{aligned} Q_k &= \sigma_q^2 I \\ R_k &= \sigma_r^2 I \end{aligned} \quad (26)$$

Die Kovarianz ist ein Maß zur Beschreibung der Abhängigkeit zwischen zwei Zufallsvariablen. Sowohl für die Zufallsvariablen des Prozess- als auch des Messrauschens wird angenommen, dass deren Kovarianzen Q_k und R_k den Erwartungswert 0 aufweisen. Angesichts dieser Gleichungen ist es möglich, die Zustandsabschätzung durchzuführen und zu korrigieren. Sei P_k^- die vorhergesagte Kovarianz, dann werden die Vorhersagegleichungen folgendermaßen definiert:

$$\begin{aligned} \hat{x}_k^- &= F_{k-1} \hat{x}_{k-1} \\ P_k^- &= F_{k-1} P_{k-1} F_{k-1}^T + Q_{k-1} \end{aligned} \quad (27)$$

Auf der Grundlage der Vorhersage kann das Modell korrigiert werden, wenn die Messung z_k auftritt. Sei K_k die aktuelle Kalmanverstärkung. Dann sind die Korrekturgleichungen für die Messung:

$$\begin{aligned} K_k &= P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k + R_k)^{-1} \\ \hat{x}_k &= \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H_k \hat{x}_k^-) \\ P_k &= (I - K_k H_k) P_k^- \end{aligned} \quad (28)$$

5.5 Interpolation an Punkten der 3D-Rekonstruktion ohne Sensorwerte

Interpolation ist zur realistischen Darstellung von Schwingungen wesentlich, um Deformationswerte an Punkten der 3D-Rekonstruktion einer Struktur die keinen Sensor aufweisen, abschätzen zu können. Die Punkte denen Sensoren zugeordnet sind, stellen dabei Stützpunkte dar und die Werte an anderen Punkten werden anhand von Interpolationen zwischen diesen Stützpunkten berechnet. Es gibt fünf wesentliche Anforderungen an einen geeigneten Interpolationsalgorithmus:

- hochauflösende Oberflächenrekonstruktion (mehr als 100.000 Punkte) mit Lücken in den Oberflächen
- wenige Messpunkte
- Beachtung von Konnektivität und Krümmung der Oberflächenrekonstruktionen
- Echtzeitfähigkeit mit bis zu 60 Interpolationen pro Sekunde
- Berücksichtigung zusätzlicher, in der Simulation üblicher strukturdynamischer Randbedingungen von Strukturen⁽¹⁴⁾

Zur Erfüllung dieser Anforderungen wurde ein Algorithmus aus der diskreten Differentialgeometrie [84] gewählt, der Oberflächenrekonstruktion und Messdaten in einem linearen Gleichungssystem berücksichtigt, das in Echtzeit gelöst werden kann [85]. Sei $M = (MV, ME, MF)$ ein Dreiecksnetz, wobei MV die Menge der Punkte, ME die Menge der Kanten und MF die Menge der Flächen bezeichne. Sei $N(i) = \{j | (i, j) \in ME\}$ die Menge der unmittelbaren Nachbarn von Punkt i , $d_i = |N(i)|$ ihre Anzahl und gelte [86]:

$$(Ls)_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{d_i} & i = j \\ -1 & (i, j) \in ME \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (29)$$

Die Matrix Ls wird auch Laplacematrix genannt [87]. Sie bezeichnet in der Graphentheorie eine Matrix, die die Beziehungen der Punkte und Kanten eines Dreiecksnetzes bzw. Graphen formuliert. Laplacematrizen wurden in der Algebra und Graphentheorie [88] ausgiebig studiert, vor allem, weil ihre algebraischen mit den kombinatorischen Eigenschaften der von ihnen repräsentierten Graphen zusammenhängen. Jeder Punkt des Dreiecksnetzes wird in der Matrix Ls berücksichtigt. Für Punkte, die einen Sensor besitzen, oder für Punkte mit Randbedingungen muss die Formulierung der Matrix Ls erweitert werden. In diesem Falle erhält der Matrixwert der Diagonale aller Punkte, denen ein Sensor zugeordnet ist oder die eine Randbedingung aufweisen, eine 1. Alle anderen Spalten- und Zeilenwerte dieser Punkte erhalten eine 0 (siehe Bild 45, v_4 , v_5 sind Punkte im

¹⁴ bspw. die Fixierung der Struktur an bestimmten Punkten des Dreiecksnetzes, an diesen Punkten kann die Struktur nicht schwingen.

Dreiecksnetz, denen ein Sensor zugeordnet ist). Sei MS die Menge aller Punkte, die einen Sensor zugeordnet haben oder Randbedingungen besitzen. MS stellt dadurch eine echte Teilmenge von MV dar. Die Erweiterung der Matrix Ls wird folgendermaßen definiert:

$$(Ls)_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{d_i} & i = j, i \notin MS \\ 1 & i = j, i \in MS \\ -1 & (i, j) \in ME \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (30)$$

Zum besseren Verständnis siehe Bild 45, das beispielhaft an einem Dreiecksnetz mit 10 Punkten den Aufbau der Matrix LI zeigt. Da innerhalb der Strukturkonfigurationsphase die Oberflächenrekonstruktion bereits vollständig ermittelt wird, kann die Matrix LI schon in der Strukturkonfigurationsphase erstellt und muss somit in der Visualisierungsphase nicht mehr neu berechnet werden. Innerhalb der Visualisierungsphase wird zur Abschätzung von Werten an Punkten des Dreiecksnetzes, wo nicht gemessen wurde folgendermaßen vorgegangen: Sei fS der Vektor, der für alle Punkte $\in MV$ entweder bei Zuordnung eines Sensors den Schwingungsmesswert oder sonst 0 enthält.

$\frac{1}{4}$	-1	-1	0	0	-1	0	0	0	0
-1	$\frac{1}{3}$	-1	0	0	0	0	0	0	0
-1	-1	$\frac{1}{5}$	0	0	-1	-1	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
-1	0	-1	0	0	$\frac{1}{5}$	-1	-1	0	0
0	0	-1	0	0	-1	$\frac{1}{6}$	-1	-1	-1
0	0	0	0	0	-1	-1	$\frac{1}{5}$	-1	-1
0	0	0	0	0	0	-1	-1	$\frac{1}{3}$	-1
0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	$\frac{1}{4}$

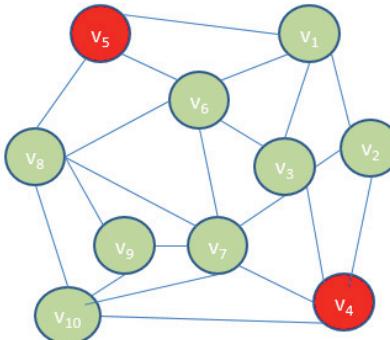


Bild 45: Beispiel eines Dreiecksnetzes und der dazugehörigen topologischen Laplacematrix LI . $V5$ und $V4$ entsprechen Punkten, denen ein Sensor zugeordnet ist.

Der Vektor fS wird im Gegensatz zur Matrix LI in der Visualisierungsphase ständig mit Sensordaten aktualisiert. Daraufhin wird das lineare Gleichungssystem $L^T L u = L^T fS$ in Form einer Normalgleichung mittels der Cholesky-Zerlegung gelöst [89], [90]. Die Lösung von Gleichungssystemen mittels dieser Methode ist effizient möglich, sodass die Interpolation auch in Echtzeit mit bis zu 60 Berechnungen pro Sekunde berechnet werden kann. Die Interpolation wird für alle drei Sensormessrichtungen im dreidimensionalen Raum separat voneinander berechnet.

6 Technische Implementierung der Datenverarbeitung

In diesem Kapitel wird die technische Implementierung des gesamten Datenerfassungs- und Strukturvisualisierungssystems (siehe Bild 46) vorgestellt. Es setzt den im Abschnitt 3.3 festgelegten Ablauf technisch um und benötigt ebenfalls die in Kapitel 5 beschriebenen Strukturkonfigurations- und Echtzeitvisualisierungskomponenten. Durch diese Kombination können aktuelle Schwingungssensorwerte in Echtzeit realistisch und in hoher Messauflösung zum Zwecke von Betriebsschwingformanalysen dargestellt werden. Im Abschnitt 6.1 wird auf die Datenerfassungskomponente eingegangen und zur Bedienung der gesamten Anwendung wird abschließend in Abschnitt 6.2 eine Softwarebenutzeroberfläche präsentiert.

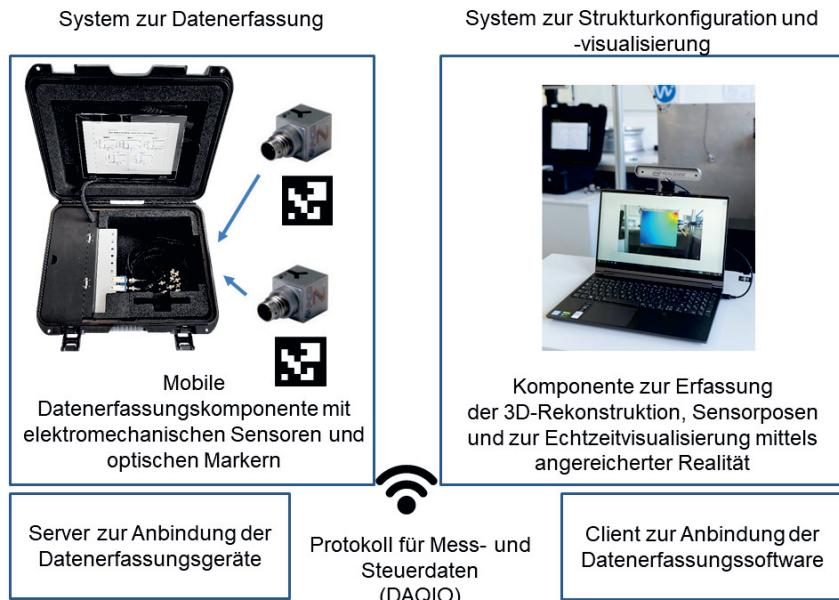


Bild 46: Überblick über alle bei der Umsetzung des Datenverarbeitungssystems zur Messung der Strukturanwort, zur Strukturkonfiguration und zur realistischen Echtzeitvisualisierung verwendeten Software- und Hardwarekomponenten

Das Datenverarbeitungssystem besteht aus den drei autonomen Bestandteilen: universelle, mobile Datenerfassungsschnittstelle zur Aufnahme und kabellosen Übertragung der Schwingungssensordaten an die AR-Visualisierungskomponente sowie der Strukturkonfigurationskomponente. Letztere kann separat von den anderen Komponenten verwendet werden, dient aber als Grundlage für die Echtzeitvisualisierung. Die Datenerfassung benötigt einen eigenen Rechner mit

WLAN-Schnittstelle und Betriebssystem und wurde im Rahmen der Arbeit als mobiler Messkoffer (siehe Abschnitt 6.1.1) umgesetzt. Die Strukturkonfigurations- und AR-Visualisierungskomponente laufen auf einem separaten handelsüblichen, tragbaren Rechner mit einer Mittelklasse- bzw. Hochleistungsgrafikeinheit und Windows-Betriebssystem. Zur Umsetzung einer AR-Anwendung müssen, wie bereits in Abschnitt 2.3 aufgeführt, die Bestandteile Darstellung und Interaktion festgelegt werden. Zur Darstellung wurden tragbare Bildschirme gewählt. Als Betriebssystem wurde Windows genommen, da es den Betrieb von Hochleistungsgrafikeinheiten unterstützt. Bei der Umsetzung der Darstellung wurde darauf geachtet, alle Softwarekomponenten modular zu gestalten, um die erzielten Ergebnisse zukünftig auch auf Datenbrillen übertragen zu können. Die Softwarebenutzeroberfläche wird mittels Berührungsanzeige bedient; vollständige Bedienbarkeit der Software per Maus und Tastatur ist aber auch möglich. Zur 3D-Rekonstruktion wurde die Intel Real Sense D455 Stereo- und zur Bewegungsverfolgung die Intel Real Sense Tiefenkamera T265 verwendet, die mit Adapters am Rechner befestigt sind. Die Kameras sind an den Rechner mittels USB 3.1-Schnittstellen angeschlossen, über die sowohl Steuer- und Bilddaten als auch Strom übertragen werden.

6.1 Datenerfassung

In diesem Abschnitt wird die Datenerfassung mittels eines mobilen Messkoffers (siehe Abschnitt 6.1.1) erläutert, der strukturdynamische Messungen auch im Freien ohne Netzanschluss ermöglicht. Der Koffer integriert ein Datenerfassungsgerät mit bis zu 32 Kanälen und Abtastraten pro Kanal von 50 kHz, ein mobiles Endgerät zur Steuerung der Messungen und Messaufnahmen sowie eine Hochleistungsbatterie zur Stromversorgung. Dadurch sind Messungen von mindestens 48 Stunden Dauer möglich. Die Messdaten werden mittels WLAN von der Aufnahmeeinheit zur Visualisierungsanwendung übertragen (siehe Abschnitt 6.1.2). Um Steuerung und Datenübertragung im Anwendungsbereich der Strukturdynamik eingesetzter DAQ-Geräte zu vereinheitlichen, wurde ein Protokoll mit Namen DAQIO erstellt. Dadurch können in Zukunft alle im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Komponenten auch mit anderer DAQ-Hardware genutzt werden.

6.1.1 Mobiler Messkoffer

Der mobile Messkoffer (siehe Bild 47) ist überall einsetzbar. Zum Messen im Außenbereich hat er einen geschützten Kabeleinlass und funktioniert auch mit geschlossenem Deckel. Dadurch ist sein Inhalt staub- und wassergeschützt. Der Messkoffer besteht aus drei separaten Bestandteilen. Die erste Komponente ist ein CompactDAQ-Gehäuse der Firma National Instruments [91], in das acht Messkarten

integriert werden können. Es gibt verschiedene Messkarten für diverse Sensorarten mit der jeweiligen Datenerfassungssoftware. Dementsprechend wurde die Datenerfassung modular entworfen, sodass dieses Konzept auf andersgeartete Sensordaten übertragbar und somit auch in anderen Anwendungsbereichen einsetzbar ist. Als zweite Komponente dient ein handelsübliches mobiles Endgerät (Tablet-PC) mit den Serverfunktionalitäten Steuerung des Datenerfassungsgerätes, synchronisierte Datenaufnahme sowie lokale Speicherung, Vorverarbeitung und Weiterleitung der Messdaten. Die dritte Komponente ist eine Hochleistungsbatterie, die Messzeiten von minimal 48 Stunden ermöglicht, sowohl das Datenerfassungs- als auch das mobile Endgerät versorgt und leicht auswechselbar ist. Zusätzlich bietet der Messkoffer Stauraum für die Sensoren und deren Kabel sowie für eine Bluetooth-Tastatur mit Maus zur leichteren Bedienung des Tablets.



Bild 47: Mobiler Messkoffer für strukturdynamische Analysen

6.1.2 Vereinheitlichung der Kommunikation mit DAQ-Geräten

Um die Ergebnisse dieser Arbeit in bestehende Datenerfassungssysteme integrieren zu können, wurde ein offenes, universelles Kommunikationsprotokoll mit Namen DAQIO entwickelt, das mit beliebigen Datenerfassungsgeräten kommunizieren kann. Dadurch soll die Kommunikation für DAQ-Geräte vereinheitlicht werden. Unter Kommunikation wird die Übertragung von Mess- und Steuerdaten verstanden. Somit sind DAQ-Hardware und -Software von unterschiedlichen Anbietern zueinander kompatibel, ohne softwaretechnisch die andere Seite zu kennen. Die Anforderungen an das Kommunikationsprotokoll sind bezüglich Steuerung und Datenübertragung

vollständig anders. Daher wurden zwei unterschiedliche TCP/IP-Anwendungsschichten ausgewählt (siehe Bild 48). Zur schnelleren Integration des DAQIO-Protokolls in bestehende Datenerfassungssysteme wurde ein SDK entwickelt, das eine Server-Softwareschnittstelle zum Datenerfassungsgerät und eine Client-Softwareschnittstelle zur Datenerfassungssoftware bereitstellt. Um das SDK zu validieren, wurde das National Instruments [91] DAQmx SDK [92] an die Server-Softwareschnittstelle des DAQIO-SDK angepasst. Das NI DAQmx SDK dient zur Integration der Datenerfassungshardware des Herstellers National Instruments in externe Softwareprojekte.

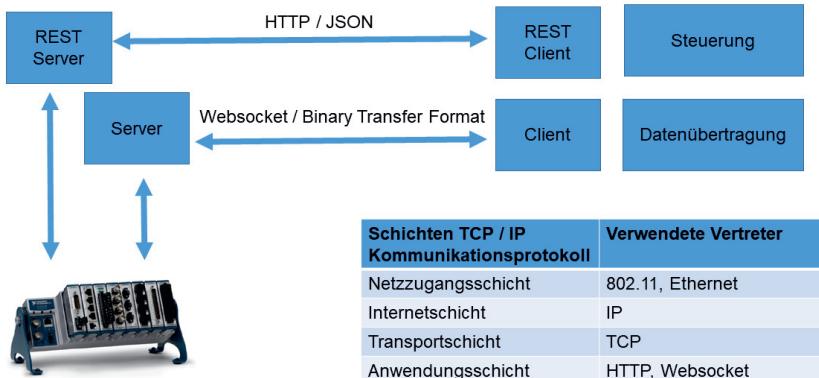


Bild 48: Aufbau des DAQIO-Protokolls

6.1.2.1 REST-Protokoll zur Umsetzung der Steuerung

Zur Steuerung von DAQ-Hardware wurde das Programmierparadigma „repräsentative Zustandsübertragung“ (REST, für engl. Representational State Transfer) [93] genutzt. Ein entsprechender Dienst ist durch fünf Eigenschaften gekennzeichnet:

- Client-Server-Architektur
- Verwendung eines zustandslosen Protokolls
- Nutzung der HTTP-Zwischenspeicherung
- Sicherstellung einer einheitlichen Schnittstelle
- mehrschichtiger Aufbau der Schnittstelle

Wegen der Zustandslosigkeit werden keine Zustandsinformationen von Nachrichten gespeichert. Deshalb sind alle von Server und Client benötigten Informationen direkt in den Nachrichten codiert. Indem sie alle Informationen über den aktuellen Anwendungszustand enthält, ist jede Anfrage vollständig geschlossen. In der TCP/IP-Anwendungsschicht werden hauptsächlich das „Hypertext-Übertragungsprotokoll“ (HTTP, für engl. HyperText Transfer Protocol) und das „sichere Hypertext-

Übertragungsprotokoll“ (HTTPS, für engl. HyperText Transfer Protocol Secure) eingesetzt. Mittels HTTP können mehrere Operationen bzw. Dienste genutzt werden, um Ressourcen von Servern anzufordern oder zu verändern. Jeder Dienst hat dabei einen eindeutigen „Ressourcen-Zeiger“ (URL, für engl. Uniform Resource Locator). Zur Repräsentierung von Diensten werden in den meisten Fällen die „Hypertext-Auszeichnungssprache“ (HTML, für engl. Hypertext Markup Language), die „Javaskript-Objekt-Notation“ (JSON, für engl. Javascript Object Notation) oder die „erweiterte Auszeichnungssprache“ (XML, für engl. Extensible Markup Language) genutzt. Im Rahmen der Arbeit werden HTTP als Übertragungsprotokoll und JSON zur Dienstrepräsentation für das REST-Protokoll verwendet.

6.1.2.2 [Websocket-Protokoll zur Datenübertragung](#)

Dieses Protokoll ermöglicht bidirektionale Kommunikation zwischen Client und Server. Es basiert ebenfalls wie REST auf TCP, im Unterschied zu HTTP öffnet der Client jedoch eine dauerhafte Verbindung zum Server. Zudem kann der Server diese Verbindung zur Übertragung nutzen, ohne auf eine vorherige Anfrage des Clients zu warten. Bei HTTP bzw. REST muss der Client erst eine Anfrage an den Server stellen, um eine Antwort von ihm zu erhalten. Dies stellt das klassische Anforderungs- und Antwortmuster von HTTP dar. Mit dem Websocket-Protokoll wird im Vergleich zu HTTP eine deutlich performantere Datenübertragung ermöglicht. Der Einsatz von Websockets wird daher empfohlen, wenn kurze Übertragungszeiten und geringe Latenzen erreicht werden sollen. Websockets wurden vor allem im Zusammenhang von HTML5-Anwendungen populär.

6.1.2.3 [Server-Softwareschnittstelle zum Datenerfassungsgerät](#)

Für die Serverseite des DAQIO-Protokolls wurde ein Dienstprogramm in C++ erstellt, das einen REST-Server und einen Websocket-Server bereitstellt. Der REST-Server wurde mit der hoch performanten C++-Bibliothek Served [94] entwickelt. Diese Bibliothek erweitert die Möglichkeiten der Bibliothek Boost.ASIO [95] im Hinblick auf HTTP-Dienste, wie z.B. das REST-Protokoll. Für die Umsetzung des Websocket-Servers wurden direkt Funktionen aus der Boost.BEAST-Bibliothek verwendet. Zur Auswertung der JSON-Notation [96] wurde die Softwarebibliothek RapidJSON [97] genutzt, die einen JSON-Parser als auch einen JSON-Generator mit einer „einfachen XML-Schnittstelle“ (SAX, für engl. Simple API for XML) oder einem „Dokumenten-Objektmodell“ (DOM, für engl. Document Object Model) zur Verfügung stellt. Die gesamte Funktionalität kann durch Integration einer Softwarebibliothek und Einbindung einer Headerdatei, die die Softwareschnittstelle der Bibliothek enthält, in externen Projekten mittels DAQIO-SDK bereitgestellt werden.

6.1.2.4 Client-Softwareschnittstelle zur Datenerfassungssoftware

Die Clientseite des DAQIO-Protokolls wurde in C++ entwickelt und in die Visualisierungssoftware integriert (siehe Abschnitt 6.2). Für die Umsetzung des WebSocket- und REST-Client wurde Boost.BEAST bzw. Boost.ASIO und zur Auswertung der JSON-Notation die RapidJSON-Softwarebibliothek genutzt. Zur Integration des DAQIO-Protokolls in externe Datenerfassungssoftware wird eine weitere Programmierschnittstelle im DAQIO-SDK bereitgestellt. Die entsprechende C++-Softwareschnittstelle hat den gleichen Aufbau wie das Interface aus Abschnitt 6.1.2.3.

6.2 Softwarebenutzeroberfläche

Zur Durchführung der gesamten Datenerfassung wurde eine auf Windows-Systemen ausführbare Software in Qt (Framework zur plattformübergreifenden Entwicklung von grafischen Benutzeroberflächen) [98] und C++ geschrieben. Die Visualisierung wurde mit der OpenGL Shading Language GLSL [99] der „offenen Graphikbibliothek“ (OpenGL, für engl. Open Graphics Library) [100] entwickelt, die plattformunabhängige und programmiersprachenübergreifende Programmierung von Rechnergrafikanwendungen ermöglicht. Mittels GLSL lassen sich auf Grafikkarten eigene Programme, sogenannte „Schattierer“ (für engl. Shader, Software- und Hardwaremodule zur Darstellung von Computergraphik), ausführen. GLSL stellt eine Hochsprache dar, die auf ANSI-C basiert und mit speziellen Vektor- und Matrixtypen sowie einigen C++-Funktionalitäten erweitert wurde. Die „Schattierer“ können sowohl auf Punkte (ab OpenGL 2.0), Fragmente (ab OpenGL) und ab OpenGL 4.0 auch auf komplette Geometrien angewendet werden. Mit GLSL ergeben sich erhebliche Geschwindigkeitsvorteile bei der Darstellung von AR-Anwendungen gegenüber reiner CPU-Programmierung.

Tabelle 7: Übersicht über die Funktionalitäten der Software zur Strukturkonfiguration und -visualisierung

Starte Strukturkonfigurationsphase	Startet die Strukturkonfigurationsphase. Legt die Messauflösung und die Abmessungen des Rekonstruktionswürfels fest.
Starte die Visualisierungs- und Messphase	Startet die Visualisierungsphase. Diese reichert das aktuelle Videobild mittels der Messwerte an.
Exportiere Ergebnisse der 3D-Rekonstruktion, Sensorzuordnung und Messdaten	Speichert die aktuelle Aufnahme als Messdatei zur weiteren Verarbeitung mit der Software Wavemage.

Diese Software realisiert alle Ziele der vorliegenden Arbeit bis auf den DAQ-Server und die Steuerung des intelligenten Modalhammers. Für den Export der Resultate in das Programm WavelImage zur späteren Analyse wurde das Dateiformat von WavelImage mit Namen „vib“ in die Software integriert. Das vib-Dateiformat dient zum Speichern von Messdaten, Dreiecksnetzen inklusive der zugehörigen Texturen, Sensorposen mit entsprechenden Zuordnungen und zusätzlichen Messinformationen.

7 Empirische Validierung

Dieses Kapitel beschreibt die Validierung der einzelnen Komponenten zur Strukturkonfiguration und Betriebsschwingformanalyse als auch den intelligenten Modalhammer an unterschiedlichen realen Anwendungsbeispielen. Zum Abschluss wird die gesamte Messkette zum Zwecke einer Modalanalyse mit Hilfe der Software Wavelmage validiert.

7.1 Validierung der Strukturkonfigurationsphase

Die Strukturkonfigurationsphase des Datenerfassungssystems erfüllt drei wesentliche Aufgaben (siehe Abschnitt 5.1).

- Erstellung eines Oberflächenmodells durch 3D-Rekonstruktion
- Erkennung der Sensorposen mittels ArUco-Markern und erweitertem Kalmanfilter
- Zuordnung der Sensorposen zum Oberflächenmodell.

In diesem Abschnitt werden die Anwendung der 3D-Rekonstruktion und die Erkennung der Sensorposen an realen Problemstellungen dargestellt.

7.1.1 Validierung von 3D-Rekonstruktionen

3D-Rekonstruktionen wurden mit der Tiefenkamera Intel Real Sense D455 durchgeführt. Dafür wurden dem Anwender jeweils drei unterschiedliche Ansichten (siehe Bild 49) zur Verfügung gestellt.

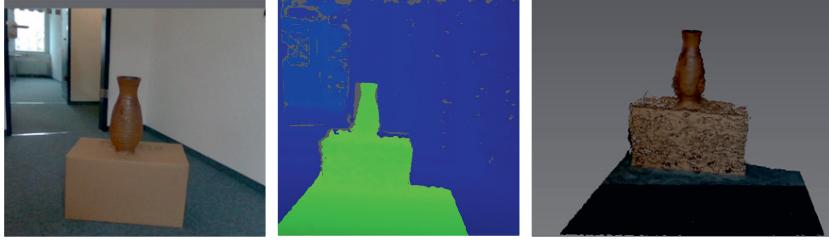


Bild 49: Ansichten zur Interpretation der Rekonstruktion. Links: Kamerabild; Mitte: Tiefenbild; Rechts: Rekonstruktionsergebnis

An den Rekonstruktionsergebnissen wurde keine Nachbearbeitung vorgenommen, sodass rein optisch noch weitere Verbesserungsmöglichkeiten möglich wären. Rekonstruktionen wurden an unterschiedlichen Objekten, wie einem

Maschinenrahmen (siehe Bild 50), einer Vase (siehe Bild 51) und einer Fahrzeugfelge (siehe Bild 52), durchgeführt, da diese Strukturen unterschiedliche Anforderungen an den Rekonstruktionsprozess stellen. Bei den Messungen stellte sich heraus, dass unterschiedliche Ausprägungen von ArUco-Markern zur Festlegung des Ursprungs für den Rekonstruktionswürfel und zur Bestimmung der Sensorposen wesentlich sind, da es ansonsten zu fehlerhaften Marker-Decodierungen kommt. Um möglichst große Unterschiede in der Codierung zu erreichen, wurden unterschiedliche Marker-IDs und zwei unterschiedliche Wörterbücher für den Marker des Rekonstruktionswürfels und die Marker zur Erkennung der Sensorposen zur Codierung gewählt. Dadurch konnte die Erkennung erheblich verbessert werden.

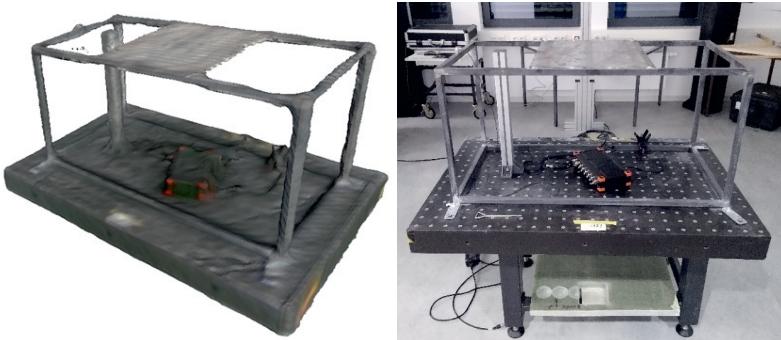


Bild 50: Links: 3D-Rekonstruktion (109087 Dreiecke) eines Maschinenrahmens mit der Intel Real Sense D455 Tiefenkamera und dem Kinect Fusion-Algorithmus; Rechts: Bild der Struktur

Die Verwendung des Rekonstruktionswürfels ermöglicht optimale Rekonstruktionen ohne nachträgliches Entfernen von Punkten, die nicht zur Struktur gehören. Durch die Einstellung der Höhe, Breite und Tiefe des Rekonstruktionswürfels und der Messauflösung kann die Rekonstruktion schnell an die jeweilige Struktur angepasst werden. Während der Rekonstruktion wird eine langsame manuelle und geschmeidige Führung der Kamera empfohlen, denn bei zu ruckartigen Bewegungen kann es dazu kommen, dass die Bewegungsverfolgung der Kamera kurzzeitig aussetzt. Wenn hinreichend viele charakteristische Muster im Bild erkannt wurden, konnte nach kurzen Aussetzern die Bewegungsverfolgung selbsttätig fortfahren, während andernfalls die Rekonstruktion neu gestartet werden musste. Die Resultate der Bewegungsverfolgung erfüllten insgesamt ausreichend die Anforderungen der Strukturkonfiguration. Die besten Rekonstruktionsergebnisse konnten in einem Abstand von 2 bis 6 m zwischen Kamera und Struktur erreicht werden. Die Qualität der 3D-Rekonstruktion, aber auch die Bewegungsverfolgung der Kamera ist stark von den Umgebungsbedingungen abhängig. Strukturen mit geringer Textur oder mit weißen Hintergründen erschweren den Rekonstruktionsprozess deutlich. Zudem wiesen starke Reflexionen hervorrufende Strukturen ebenfalls schwächere Resultate auf. Bei Strukturen aus Glas konnten keine ausreichenden Resultate erzielt werden. Wenn diese Strukturen

dennoch vermessen werden sollen, wird empfohlen, sie mit einem abwaschbaren Spray schwarz zu färben. Ebenso war der Rekonstruktionsaufwand besonders bei metallischen Gegenständen erhöht.



Bild 51: Links: 3D-Rekonstruktion (269699 Dreiecke) einer Vase mit der Intel Real Sense D455 Tiefenkamera und dem Kinect Fusion-Algorithmus; Rechts: Bild der Struktur

Der Rekonstruktionsprozess von Strukturen mit schmalen Bauteilen oder solchen mit Löchern oder Verschmutzungen war ebenfalls problematisch. Weiterhin hat die Beleuchtung großen Einfluss auf die Ergebnisse.



Bild 52: Links: 3D-Rekonstruktion (106020 Dreiecke) einer Autofelge mit der Intel Real Sense D455 Tiefenkamera und dem Kinect Fusion-Algorithmus; Rechts: Bild der Struktur

Unter geringem Umgebungslicht wurden die Resultate deutlich schlechter und bei Unterschreitung bestimmter Lichtstärken war dann auch gar kein Rekonstruktionsergebnis mehr erzielbar. Für optimale Resultate, wurde zusätzliche und gleichmäßige

Beleuchtung eingesetzt, da Schatten auch Fehler in der Rekonstruktion hervorrufen können.

Insgesamt waren die Rekonstruktionsergebnisse jedoch sehr zufriedenstellend und lassen breite Anwendung zu, da bei messdatenbasierter Analyse nicht die üblichen Genauigkeitsanforderungen gelten, wie sie bspw. bei Simulation oder Fertigung gestellt werden. Daher sind geringe Abweichungen im Millimeterbereich in den Abmessungen zwischen Struktur und Rekonstruktion tolerierbar, weil dies für die Analyse von Eigen- bzw. Betriebsschwingformen vollkommen ausreichend ist.

7.1.2 Validierung von ArUco-Marker-Detektionen

In diesem Abschnitt wird die Detektion von ArUco-Markern analysiert. Angefangen mit der Validierung der verbesserten Posenerkennung durch einen erweiterten Kalmanfilter werden daran anschließend die Abstände zwischen Kamera und Marker abhängig von der Markers Seitenlänge untersucht. Zur Generierung der unterschiedlichen Konfigurationen wurde ein ArUco-Generator in C++ programmiert. Bei der Generierung von ArUco-Markern können ihre Seitenlänge, Identifikationsnummern und das Wörterbuch zur Codierung festgelegt werden. In der Validierungsphase wurden nicht existente ArUco-Marker erkannt und somit zusätzliche Sensoren vermutet. Andererseits konnten aber in allen Anwendungen, in denen ArUco-Marker innerhalb einer entsprechenden Distanz erreichbar waren (siehe Abschnitt 7.1.2.2), alle Marker mit deren Posen detektiert werden. Die Erkennung nicht existenter Marker trat besonders bei reflektierenden Oberflächen auf, in denen ArUco-Marker auch im Spiegelbild zu sehen waren. Aber es führten auch Gegenstände in der Nähe der untersuchten Struktur zu zusätzlichen Detektionen. Die Anzahl solcher Fehldetektionen konnte durch unterschiedliche Codierungen des Wörterbuchs minimiert werden. Es gab jedoch keine Codierung, die in allen Anwendungen Fehler völlig verhinderte. Daher wird empfohlen, bei Fehldetektionen ein anderes Wörterbuch zu wählen. Eine weitere wesentliche Maßnahme zur drastischen Unterdrückung von Fehldetektionen war die Veränderung des Intervalls, in dem alle Identifikationsnummern liegen. Insbesondere verbessern höhere Identifikationsnummern die Erkennungsgüte, da der Kontrast von ArUco-Markern durch diese Codierung in den meisten Fällen erhöht wird.

7.1.2.1 Validierung des erweiterten Kalmanfilters zur Posenerkennung

Zur Erkennung von Sensorposen werden ArUco-Marker (siehe Abschnitt 5.4) verwendet. Bedingt durch Belichtungseinflüsse, Bewegungsunschärfe und Rauschen des Kamerabildes kommt es zu Ungenauigkeiten in der Erkennung von ArUco-Markerposen. Abweichende Posenerkennungen oder Nichterkennen von Posen treten sogar dann schon auf, wenn die Kamera konstant auf Marker ausgerichtet ist. Fehlerhafte Posenerkennungen führen dazu, dass Messdaten mit falscher Pose der betrachteten Struktur zugeordnet werden. Daher sind zeitlich invariante, stabile Posenerkennungen erforderlich, um hohe Genauigkeiten zu erreichen. Um die Wichtigkeit des zur Reduzierung der Fehler in der Posenerkennung durch ArUco-Marker verwendeten Filters aufzuzeigen, wurde die Posenerkennung mit der ohne erweiterten Kalmanfilter gegenübergestellt.

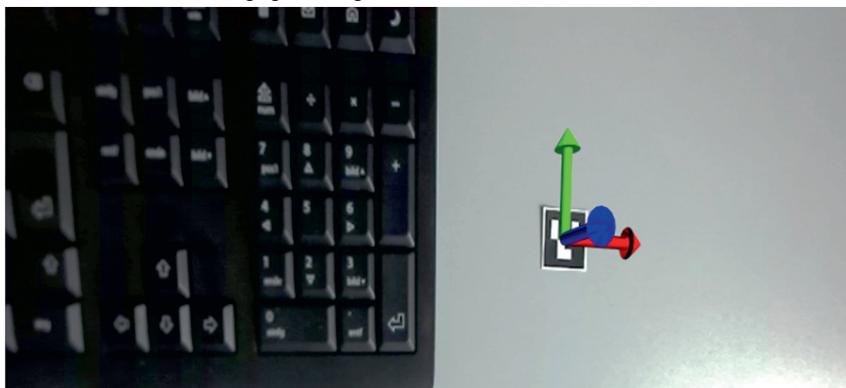


Bild 53: Testaufbau zur Bestimmung des Sensorrauschen bei der Erkennung der Posen; Links: Tastatur; Rechts: ArUco-Marker mit verfolgter Pose

Der Testaufbau wurde einfach gewählt, indem ausschließlich einzelne ArUco-Marker geprüft wurden (siehe Bild 53). Während des Prüfzeitraumes lag ein Marker unbeweglich auf dem Schreibtisch, die Kamera wurde manuell senkrecht über dem Marker gehalten und die gleichzeitige Aufnahme der Tastatur diente zur Erschwerung der Decodierung durch weitere charakteristische Bildmerkmale im Kamerabild. Zur Validierung wurden einzelne Elemente der Pose, wie die drei Positionen des Translations- und die drei Winkel (Gier, Nick, Roll) des Rotationsvektors separat voneinander untersucht. Bei der Auswertung der einzelnen Komponenten des Translations- und Rotationsvektors traten Gemeinsamkeiten in der Posendektion auf, weswegen hier ausschließlich die drei Komponenten Gier- und Nickwinkel sowie der z-Positionsparameter näher betrachtet werden, da die anderen drei keine neuen Erkenntnisse lieferten.

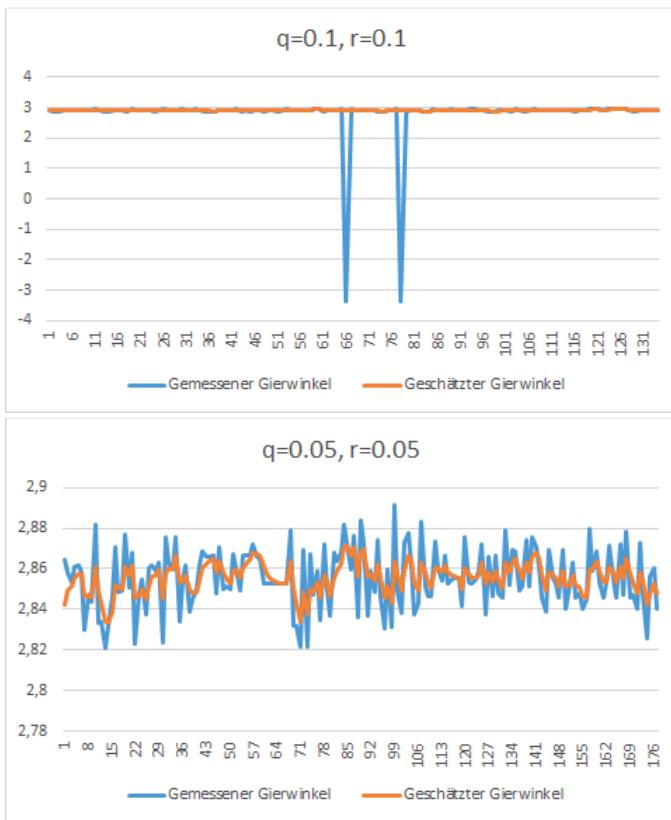


Bild 54: Gegenüberstellung der Zeitverläufe des gemessenen und geschätzten Gierwinkels für unterschiedliche Einstellungen des erweiterten Kalmanfilters

Um den Einfluss der Parameter q und r des Kalmanfilters aufzuzeigen, werden die Effekte zweier unterschiedlicher Ausprägungen der Parameter gegenübergestellt. Der Parameter q beschreibt die Prozessvarianz σ_q^2 des Algorithmus und der Parameter r die Messvarianz σ_r^2 des Algorithmus. Den Parametern q und r wurden jeweils die gleichen Werte zugewiesen. Die Messungen wurden zeitversetzt nacheinander durchgeführt, sodass sich die Zeitverläufe der untersuchten Komponenten unterscheiden. Zur Auswertung wurden jeweils ausschließlich das Sensorsignal und das durch den erweiterten Kalmanfilter geschätzte Signal miteinander verglichen. In Bild 54 und 55 fällt ein wesentlicher Effekt auf, weshalb der Einsatz erweiterter Kalmanfilter für diese Art der Anwendung unbedingt erforderlich ist.

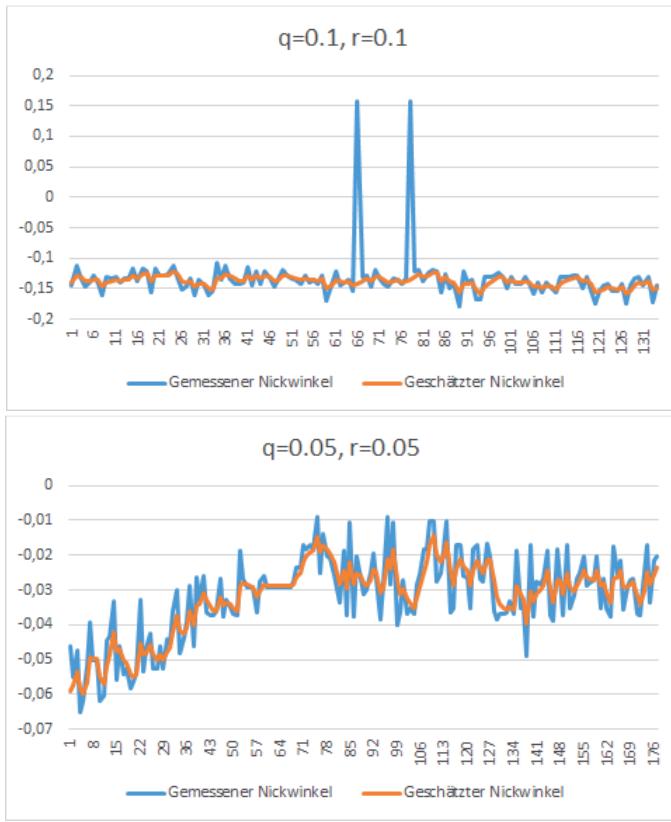


Bild 55: Gegenüberstellung der Zeitverläufe des gemessenen und geschätzten Nickwinkels für unterschiedliche Einstellungen des erweiterten Kalmanfilters

Bei diesem Effekt handelt es sich um ein extremes Springen des Gier- und Nickwinkels der Pose bei ungefiltertem Sensorsignal, was völlig unrealistisch ist. Er wird durch die manuelle Kamerabewegung, Beleuchtungseffekte und Sensorrauschen verursacht. Da die Sensorpose ständig aktualisiert wird, wenn der entsprechende ArUco-Marker erkannt wird, könnte das Springen der Pose zu fatalen Ungenauigkeiten führen, sofern direkt danach die Erkennungsphase beendet würde. Dies würde zu komplett falschen Messergebnissen führen und muss deshalb für die praktische Anwendung unbedingt unterbunden werden. Der glättende Effekt des erweiterten Kalmanfilters ist besonders in der z-Position des Translationsvektors (siehe Bild 56) zu erkennen. Je größer Prozess- und Messvarianz gewählt werden, umso glättender wirkt der Filter. Deutlich über 0.25 liegende Werte werden für beide Varianzen nicht empfohlen. Der optimale Bereich liegt für beide Varianzparameter zwischen 0.1 und 0.05. Insgesamt ist die Kombination aus ArUco-Markern und nachgeschaltetem erweiterten Kalmanfilter geeignet zur stabilen Bestimmung von Sensorposen und erreicht genauere

Ergebnisse als manuelle Posenbestimmung. Zudem ist sie auch ohne Expertenwissen schnell durchführbar.



Bild 56: Gegenüberstellung der Zeitverläufe gemessener und geschätzter z-Position für unterschiedliche Einstellungen des erweiterten Kalmanfilters

7.1.2.2 Validierung der Abstände zwischen Kamera und ArUco-Markern

In diesem Abschnitt wird der maximale Abstand zwischen ArUco-Markern und Kamera untersucht, in dem Marker und deren Posen detektierbar sind. Die Detektierbarkeit hängt von Kameraauflösung und Markerlänge ab. Störungen durch Umwelteinflüsse wie ungenügende Beleuchtung oder Verschmutzungen bzw. Überdeckungen von Markern werden nicht betrachtet. Zur Abstandsmessung wurden unterschiedliche Wände mit ArUco-Markern unterschiedlicher Parameter in einem 3-mal-3-Gitter bestückt (siehe Bild 57). Die Markerwände wurden senkrecht angebracht und der

Abstand zur Kamera wurde mit einem Messband gemessen. Der Abstand bezieht sich auf den Mittelpunkt einer Markerwand und nicht auf einzelne Marker. Daher weisen besonders die in den Ecken der Markerwände positionierten Marker die größten Abstände zur Kamera auf. Diese wurden aber zum Teil früher erkannt als Marker mit geringerem Abstand zur Kamera. Daher war dieser Aufbau zur Abstandsmessung ausreichend. Die Messungen wurden begonnen mit 1,5 m Abstand und in Schritten zu 10 cm wurde dann der Abstand solange verringert, bis alle neun ArUco-Marker detektiert wurden.

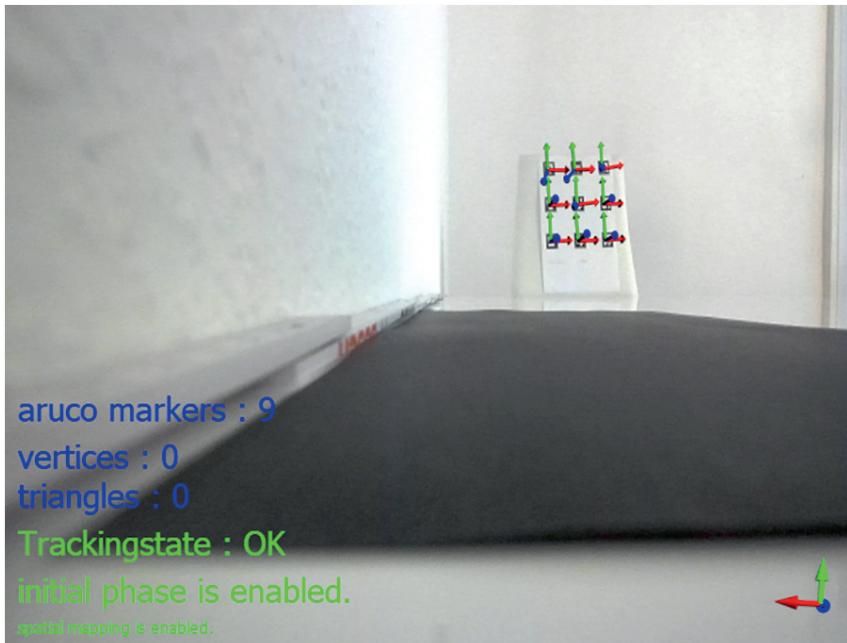


Bild 57: Abstandsmessung zwischen der Kamera und einer 3-mal-3-ArUco-Markerwand, in der alle Marker detektierbar sind. Die Markerlänge beträgt 7 cm.

Tabelle 8: Übersicht über die maximalen Abstände, in der alle 4-mal-4-ArUco-Marker und deren Posen bei Verwendung eines Wörterbuchs mit 50 Einträgen erkannt werden konnten.

Markerlänge [cm]	Maximaler Abstand [m]
10	1,5
7	1,4
2,25	0,7
1,5	0,6
1	0,35

Die ArUco-Marker wiesen durch unterschiedliche Anordnungen auf den Wänden unterschiedliche Winkel zur Kamera auf. Dies hatte aber keinen großen Einfluss auf die Erkennung. Auch die Veränderung des Wörterbuches hatte keinen signifikanten Effekt auf die Abstandsmessung, sodass die in Tabelle 8 beispielhaft ermittelten Abstände analog auf andere Wörterbücher übertragen werden können. Somit ist insgesamt der maximal benötigte Abstand ausschließlich durch Markerlänge und Kameraauflösung steuerbar.

7.1.2.3 Validierung der Sensorzuordnung zum Dreiecksnetz der Struktur

Weil ArUco-Marker direkt an Sensoren angebracht werden sollen, muss sich die Markergröße an der Größe des jeweiligen Sensors orientieren. Die kürzeste Seitenlänge der Schwingungsaufnehmer variiert nach Herstellern. Hier wurden triaxiale Beschleunigungsaufnehmer mit Kennung KS943B.100 der Firma Metra [101] verwendet (siehe Bild 58). Diese weisen eine Seitenlänge von 2,25 cm auf.

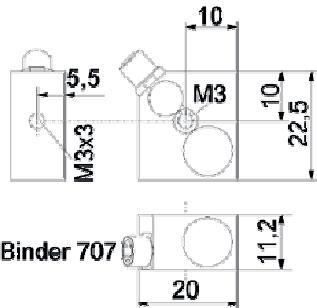


Bild 58: Abmessungen [cm] des triaxialen Beschleunigungssensors vom Typ KS943B100 der Firma Metra, Quelle: [101]

Daher wurden entsprechend große ArUco-Marker generiert und auf die Sensoren geklebt. Bei dieser Markergröße muss unter Umständen eine optische Zugänglichkeit von unter 0,6 m zwischen Kamera und Sensor ermöglicht werden, um seine Pose zu erkennen. Für Anwendungen, bei denen ein solcher Abstand nicht zugänglich ist, müssen die Markerseitenlängen vergrößert werden. Obwohl die optimale Rekonstruktionsdistanz der eingesetzten Tiefenkamera Intel Real Sense D455 zwischen zwei bis sechs m liegt, müssen Sensorabstände auch unter 1m zur Posenbestimmung möglich sein. Da erst die 3D-Rekonstruktion durchgeführt und dann die Sensorposen bestimmt werden, können sich die Abstände zu den Messobjekten in diesen beiden Arbeitsschritten unterscheiden. Dies ist aber nur unter der Annahme möglich, dass sich die Sensoren nach Erkennung nicht mehr bewegen dürfen und das Messobjekt auch nicht. Sensorposen werden den nach der euklidischen Distanz nächsten Dreieckspunkten zugeordnet. Wenn die 3D-Rekonstruktion an Punkten

fehlschlägt, wo Sensoren angebracht sind, werden den betreffenden Sensoren Punkten im Dreiecksnetz zugewiesen, an denen sie an der Realität jedoch nicht angebracht sind. In diesem Fall muss der Anwender die maximale Distanz zwischen Sensor und Punkt im Dreiecksnetz der untersuchten Struktur manuell festlegen. Insgesamt erweist sich die programmgesteuerte Zuordnung der Sensorposen zum Dreiecksnetz als sehr geeignet und erreicht genauere Ergebnisse als manuelle Zuordnung durch Messingenieure. Zudem ist sie ohne Expertenwissen schnell durchführbar und in bestehende Datenerfassungssysteme integrierbar.

7.2 Validierung der Visualisierungsphase

Für die Visualisierungsphase spielt die Validierung von Interpolation, Bewegungsverfolgung der Kamera und kabelloser Datenübertragung eine besondere Rolle. Insgesamt erwies sich eine AR-Anwendung mit fünf elektromechanischen Sensoren als problemlos umsetzbar. Validierungen mit mehr Sensoren waren aufgrund beschränkter DAQ-Hardware nicht möglich. Die Anzahl möglicher Sensoren wird ausschließlich durch die begrenzte Bandbreite des WLAN-Netzes und die verwendete Abtastrate bestimmt. Zur Bewegungsverfolgung, wurde zusätzlich zur Tiefenkamera Intel Real Sense D455 die Intel Real Sense T265 genutzt. Die Tiefenkamera dient in diesem Kontext nur zur Bereitstellung der Farbbilder für die Visualisierung.

7.2.1 Validierung der Bewegungsverfolgung der Kamera

Die Bewegungsverfolgung der Kamera (siehe Bild 59) entsprach den Erwartungen und ist für das Einsatzgebiet ausreichend. Gemäß den Angaben des Herstellers weist die zur Bewegungsverfolgung eingesetzte Kamera unter den vorgesehenen Einsatzbedingungen eine unter einem Prozent liegende Drift im geschlossenen Regelkreis auf. Von Vorteil für die Bewegungsverfolgung sind angemessen viele eindeutige visuelle Merkmale im Sichtfeld. Die Leistung ist schlechter, wenn sich bewegende Objekte im Nahbereich der Kamera befinden, z.B. umherlaufende Personen. Wenn Menschenmengen in der Nähe der untersuchten Struktur erwartet werden, ist es ratsam, die Kamera nach oben zu richten, wo sie Merkmale an den Decken zur Navigation nutzen kann. Obwohl gut beleuchtete Umgebungen zu bevorzugen sind, arbeitet die Kamera Intel Real Sense T265 auch bei Beleuchtungsstärken von nur fünfzehn lx gut und kann, abhängig von der Struktur der Beleuchtung, manchmal sogar bei noch niedrigeren Beleuchtungsstärken eingesetzt werden. Dies unterscheidet sie stark von der eingesetzten Tiefenkamera.

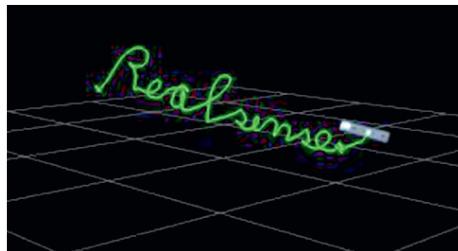


Bild 59: Ergebnisse der Bewegungsverfolgung der Kamera, nachdem „Realsense“ in die Luft geschrieben wurde; dargestellt ist die Bewegung der Pose im Realsense Viewer, Quelle: [102]

7.2.2 Validierung der kabellosen Datenübertragung

Der Einsatz des DAQIO-Protokolls funktionierte ohne Probleme und die kabellose, synchronisierte Datenübertragung war erfolgreich.



Bild 60: Bild des gesamten Messaufbaus zur Modalanalyse einer Stahlplatte; Links: Messkoffer; Mitte: tragbarer Rechner; Rechts: die elektromechanischen Sensoren auf der Stahlplatte wurden an den Messkoffer angeschlossen.

Der Messkoffer mit eigenem Rechner und der Rechner zur Visualisierung befanden sich dauerhaft in freier Sicht zueinander. Der Abstand zwischen Messkoffer und Visualisierungsrechner (siehe Bild 60) lag während der Messungen zwischen zwei und fünf m und es gab keine Störungen der WLAN-Übertragung. Zudem traten keine Beeinflussungen durch weitere WLAN-Netzgeräte in der Nähe auf. Zur Verbindung der WLAN-Netzgeräte wurde ein Netzrouter genutzt.

7.2.3 Validierung der Interpolation anhand von Eigenschwingungsformen

Zur Validierung des Interpolationsalgorithmus wurden im Rahmen einer Masterarbeit durchgeführte Messungen zur Modalanalyse an einem Flansch und einem Rotorblatt genutzt [103]. Um hohe Messauflösungen zur besseren Validierung der Interpolation zu erlangen, wurde ein 3D-Laser-Doppler-Vibrometer (PSV-500, Polytec) [26] eingesetzt. Anfangs wurde die Schwingungsantwort eines Edelstahlflansches mit der Größe von 120 mm x 14 mm auf Kraftanregungen untersucht. Der Flansch wurde dafür mit einem Gummiband an einem Rahmen befestigt. Wegen dieses freihängenden Aufbaus liegen keine Fixierungsrandbedingungen vor. Der Flansch wurde durch einen Shaker [104] über einen dünnen „Stachel“ (für engl. Stinger, Verbindungsstück zwischen Shaker und Prüfobjekt) mit einem Durchmesser von ca. 2 mm angeregt. Um eine Kraft senkrecht zur Oberfläche zu übertragen, wurde der Stinger mit einem Kraftsensor rückseitig am äußeren Rand des Flansches mit Klebstoff montiert, siehe Bild 61 linkes Bild. Die Systemantwort des Flansches auf die Kraftanregung wurde mit einem 3D-Laser-Doppler-Vibrometer gemessen. Als Testsignal wurde ein periodischer Zirp (für engl. Chirp, Zeitsignal, bei dem sich die Frequenz stetig ändert) verwendet. Basierend auf im Vorfeld durchgeführten Simulationen wurde der Frequenzbereich der Anregung auf 4-12 kHz begrenzt. Der Flansch wurde in allen drei Richtungen (x, y, z) mit mehr als 200 Messpunkten über die gesamte Flanschfläche vermessen. Die Korrelation zwischen Anregung und Antwort führt in jedem Messpunkt zu einer individuellen Frequenztransferfunktion, die zur Identifizierung der Modalparameter wie Eigenfrequenzen oder Eigenschwingungsformen genutzt wird. Das Systemverhalten eines kohlefaser verstärkten Polymer-Rotorblatts wurde ebenfalls untersucht. Das Rotorblatt mit 274 mm Länge wurde einseitig an seiner Wurzel fixiert, was seiner tatsächlichen Einbausituation entspricht. Zu diesem Zweck wurde das Rotorblatt an einem Rahmen montiert. Diese leichte Struktur wurde von einem automatischen Modalhammer angeregt, um eine zusätzliche Massenkopplung durch einen Sensor zu vermeiden. Um ausreichende Kraftübertragungen zu erreichen, wurde als Ort des Aufpralls das freie Ende der Blattspitze gewählt, siehe Bild 61 rechtes Bild. Zum Zeitpunkt der Messung war der intelligente Modalhammer noch nicht entwickelt, weshalb ein automatischer Modalhammer vom Typ WaveHit [18] eingesetzt wurde. Die erzielten Impulseigenschaften sind aber ebenfalls mit dem intelligenten Modalhammer erreichbar. Der Modalhammer wurde als Trigger zum Auslösen von Messungen mit dem 3D-Laser-Doppler-Vibrometer (3D-LDV) verwendet. Insgesamt wurde die individuelle Systemantwort in allen drei Richtungen (x, y, z) an 171 ungleichmäßig verteilten Messpunkten auf der gesamten Oberfläche der Struktur gemessen.



Bild 61: Links: Aufbau zur experimentellen Modalanalyse eines Flansches; die Struktur mit freien Randbedingungen wird durch einen Shaker zwischen 4-12 kHz angeregt und die Systemantwort über 3D-LDV erfasst. Rechts: Aufbau zur experimentellen Modalanalyse eines Rotorblatts; die einseitig befestigte Struktur wurde durch den automatischen Modalhammer vom Typ WaveHit angeregt und die Systemantwort über 3D-LDV erfasst.

Mit Hilfe des Algorithmus Poly-LSCF-AI (für engl. Poly-Least-Squares-Complex Frequency-Artificial-Intelligence) wurden für beide Strukturen aufgrund der Messergebnisse die in Tabelle 9 aufgelisteten Moden gefunden.

Tabelle 9: Auflistung aller Moden für die Strukturen Flansch und Rotorblatt

Nummer der Mode	Eigenfrequenzen EMA Flansch	Eigenfrequenzen EMA Rotorblatt
1	4603,32 Hz	302,63 Hz
2	7590,62 Hz	674,39 Hz
3	9617,07 Hz	751,38 Hz
4	9976,66 Hz	1054,77 Hz
5		1443,73 Hz
6		1705,76 Hz
7		2112,60 Hz
8		2401,16 Hz
9		2654,80 Hz

Zur Validierung der Interpolation wurde für den Flansch an 226 Punkten gemessen und die Anzahl der Messpunkte dann reduziert (siehe Bild 62). In einem Versuch wurden alle Messpunkte am Rand und zusätzliche Messpunkte in der Mitte der Struktur beibehalten. In einem zweiten Versuch wurden zufällig Punkte am Rand und in der Mitte ausgewählt. Zufällige Auswahl erhöht den Schwierigkeitsgrad, setzt aber kein Vorwissen über die Struktur voraus.

Bei der Interpolation blieben neben der großen visuellen Ähnlichkeit der Bilder auch Amplitude und Phase der ursprünglichen Eigenschwingungsformen über alle Moden hinweg vollständig erhalten. Die Ergebnisse sind sehr zufriedenstellend, da auch um 108

die Löcher in der Struktur herum ausreichend interpoliert wurde. Vergleichbare Ergebnisse wurden mit unterschiedlichsten Zufallsbelegungen erreicht.

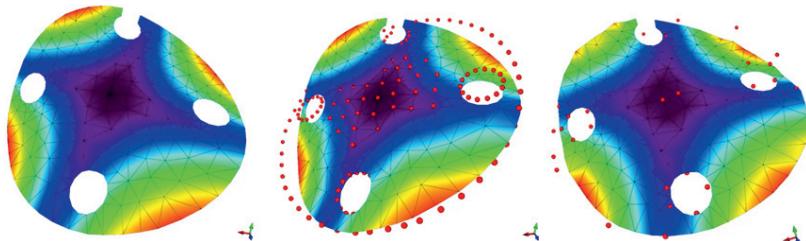


Bild 62: Exemplarische Interpolation für die erste Mode des Flansches bei 4603,32 Hz. Links: ursprüngliche Eigenschwingungsform mit 226 Messpunkten; Mitte: erste Interpolation mit 142 Messpunkten; Rechts: zweite Interpolation mit 35 Messpunkten; rot dargestellt sind die für die Interpolation verwendeten Messpunkte, an den anderen Punkten wurde interpoliert.

Das Rotorblatt wurde mit 171 Messpunkten vermessen und dann die Interpolation wieder mit zwei Teilmengen von Punkten validiert (siehe Bild 63). Im Gegensatz zum Flansch wurde beides Mal eine zufällige Verteilung der Messpunkte verwendet, um eine schwierigere Ausgangslage für die Interpolation zu schaffen, denn es wäre trivial gewesen, die Messpunkte am Rand zu verwenden, da der Flügel ähnlich wie ein Balken schwingt.



Bild 63: Exemplarische Interpolation für die erste Mode des Rotorblatts bei 302,63 Hz. Links: ursprüngliche Eigenschwingungsform mit 171 Messpunkten; Mitte: Interpolation mit 90 Messpunkten; Rechts: Interpolation mit 20 Messpunkten; rot dargestellt sind die für die Interpolation verwendeten Messpunkte, an den anderen Punkten wurde interpoliert.

Auch bei dieser Struktur konnte schon mit wenigen zufällig verteilten Stützpunkten eine große visuelle Ähnlichkeit zu den originalen Eigenschwingungsformen erreicht werden. Aufgrund der zufälligen Auswahl der Messpunkte zeigten sich für einige Moden stärkere Abweichungen von den vollständig gemessenen, da die zufälligen Stützpunkte der Interpolation nicht alle signifikanten Punkte der Moden abdeckten. Wenn wesentliche Punkte ausgelassen werden (bspw. auf Bergen oder in Tälern

innerhalb der Eigenschwingungsformen), kann der Informationsverlust natürlich durch Interpolation nicht kompensiert werden. Zusätzlich zum visuellen Vergleich wurde das „modale Sicherheitskriterium“ (MAC, für engl. Modal Assurance Criterion) zwischen ursprünglicher Messung und interpolierter Lösung berechnet, um die Qualität der Interpolation zu bestimmen. MAC ist ein populärer Indikator im Bereich der Modalanalyse, um die Ähnlichkeit zwischen Eigenschwingungsformen zu bestimmen. Seine Werte liegen zwischen 0 und 1, wobei 1 für identische und 0 für stark unterschiedliche Modenform steht

Tabelle 10: MAC-Werte der Ähnlichkeit der an 226 Punkten gemessenen Eigenschwingungsformen des Flansches mit zwei Interpolationen über alle Moden

Mode	Interpolation mit 142 Stützpunkten	Interpolation mit 35 Stützpunkten
4603,32 Hz	99,6 %	93 %
7590,62 Hz	96 %	91 %
9617,07 Hz	98 %	92 %
9976,66 Hz	98 %	92 %

Tabelle 10 bestätigt die visuelle Ähnlichkeit zwischen den gemessenen und interpolierten Eigenschwingungsformen erneut durch hohe MAC-Werte über alle Moden hinweg.

Tabelle 11: MAC-Werte der Ähnlichkeit der an 171 Punkten gemessenen Eigenschwingungsformen des Rotorblatts mit zwei Interpolationen über alle Moden

Mode	Interpolation mit 90 Stützpunkten	Interpolation mit 20 Stützpunkten
302,63 Hz	99 %	99 %
674,39 Hz	99 %	95 %
751,38 Hz	98 %	88 %
1054,77 Hz	98 %	91 %
1443,73 Hz	96 %	89 %
1705,76 Hz	96 %	88 %
2112,60 Hz	96 %	87 %
2401,16 Hz	95 %	86 %
2654,80 Hz	95 %	85 %

Aufgrund der bereits erwähnten Zufallsverteilung und der geringeren Anzahl an Stützpunkten für die Interpolation sind die MAC-Werte in Tabelle 11 im Vergleich zum Flansch niedriger. Dennoch sind sie in den meisten Moden sehr ähnlich, selbst bei wenigen Messpunkten. Mit einer besseren Auswahl der Stützpunkte, die Vorwissen über Maxima und Minima über alle Moden hinweg berücksichtigt, wären höhere MAC-Werte bei weniger Messpunkten möglich. Im Rahmen dieser Validierung sollten aber auch ungünstige Fälle der Sensorpositionierung betrachtet werden. Daher wurden die

Messpunkte zufällig ausgewählt, um die Güte der Interpolation auch bei ungenügenden Sensorpositionen abschätzen zu können. Die erzielten Ergebnisse der Interpolation sind sehr zufriedenstellend und werden in Zukunft auch für die Anwendung der Modalanalyse weiter genutzt. Es sei aber darauf hingewiesen, dass die Interpolation von der Güte der Rekonstruktionsergebnisse und der Wahl der Stützpunkte abhängig ist, da sie einen topologischen Ansatz verfolgt.

7.3 Validierung von Instrumentierung und Aufschlagkraftsuche des intelligenten Modalhammers

Der intelligente Modalhammer wurde für alle unten aufgeführten Untersuchungen an unterschiedlichen Prüfobjekten (siehe Bild 64) und Materialien (Stahl, Aluminium, Kunststoff, Holz, Glas, Gummi) validiert. Diese Untersuchungen wurden mit allen vorliegenden Instrumentierungen ausgeführt. Zur Validierung wurde der Zeit- und Frequenzbereich des Kraftsensorsignals ausgewertet. Hierfür wurde der intelligente Modalhammer auf einem mechanischen Messstativ befestigt. Pro Prüfobjekt und Instrumentierung wurde eine Schlagserie durchgeführt, um die prozentuale Abweichung der Schlagkraft innerhalb der Schlagserie und den maximal anzuregenden Frequenzbereich zu bestimmen. Die Kraft darf in diesem Frequenzbereich um maximal 20 Dezibel abfallen, um ausreichenden Energieeintrag über dem gesamten Frequenzbereich zu garantieren. Automatische Einzelschläge waren für alle Prüfobjekt-Instrumentierungs-Kombinationen möglich. Bei den Schlagserien wurde der Hammerarm senkrecht über den Prüfobjekten positioniert, weil Einzelschläge ansonsten nicht garantiert werden können. Um einen Doppelschlag zu erzwingen, muss der Hammerarm schräg auf das Prüfobjekt auftreffen und beim Schlag am Prüfobjekt abrutschen. Die automatische Schlagpunktsuche funktionierte bei allen Kombinationen ohne Probleme. Ähnliche Versuche wurden auch im handgeführten Betrieb durchgeführt und ergaben die gleichen positiven Resultate. Zusammengefasst war vollständig automatische, stativ- und handgeführte Strukturanregung (Einzelschlag bzw. Impulsanregung) möglich, wie sie in der Zielstellung (siehe Abschnitt 3.2) formuliert ist. Neben der Fähigkeit zum automatischen Einzelschlag wurde im nächsten Validierungsschritt die Abweichung der Aufschlagskraft (siehe Bild 65) im Serienbetrieb ermittelt, um die Reproduzierbarkeit zu untersuchen. Im Durchschnitt lag die Übereinstimmung bei über 95%. Eine maximale Schlagkraft von 2000 N und ein maximal anzuregender Frequenzbereich von 12 kHz wurde mit 60 g Zusatzgewicht und Stahlspitze beim Schlagen auf eine Autobremse aus Stahl erreicht. Bei bestimmten Kombinationen aus Hammerspitze und Material kam es allerdings auch zu Ausreißern (bspw. Stahlspitze auf Struktur aus Stahl). Die Ausreißereffekte waren alle sensor- oder materialbedingt zu erklären. Bis auf die seltenen Ausreißer (v.a. bei Stahl auf Stahl) konnte damit die

Reproduzierbarkeit der Strukturanregung über unterschiedlichste Prüfobjekt-Instrumentierungs-Kombinationen gezeigt werden.

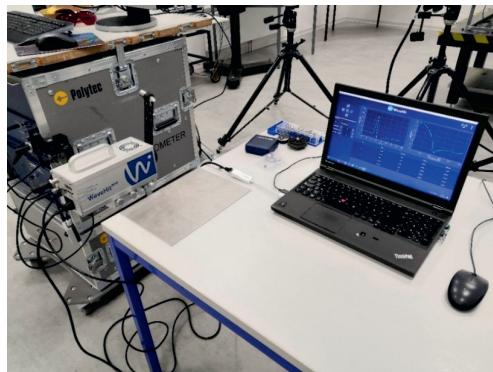


Bild 64: Links: Messaufbau zur Validierung der Aufschlagkraft und der unterschiedlichen Instrumentierungen an einer Stahlplatte; Rechts: Auswerterechner

	Kraftsensor – 2200 N			Kraftsensor – 450 N		
	12 g	60 g		12 g	60 g	
Zusatzgewicht	12 g	60 g		12 g	60 g	
Metall	500...2000 N	500...2000 N		80...450 N	-	
Kunststoff	200...1200 N	200...2000 N		70...450 N	-	
Gummi (weich)	-	80...280 N		50...250 N	80...280 N	
Gummi (ex. weich)	-	100...170 N		50...150 N	70...270 N	

Bild 65: Übersicht über die erzielten Kraftbereiche abhängig von der gewählten Instrumentierung

Zum Abschluss der Validierung wurde die empirische Schlagkraftsuche auf unterschiedlichste Prüfobjekte ausgedehnt. Die Anzahl der Iterationen lag pro Suche zwischen zwei und maximal fünf Schlägen. Bei den Untersuchungen wurden fast immer Abweichungen von weniger als 10% von der gewünschten Schlagkraft erzielt, sofern die Struktur stativgeführt angeregt wurde. Bei handgeführter Strukturanregung oder bei sich während des Schlagbetriebes bewegenden Strukturen erhöhten sich die Abweichungen der Schlagkraftsuche. Dennoch liegen die Abweichungen immer noch deutlich unter denen, die mit einem klassischen handgeführten Modalhammer erzielt werden können. Auch die Anzahl der Iterationen zum Finden der Aufschlagkraft liegt

deutlich unter der, die zur manuellen Einstellung eines Modalhammers notwendig sind. Insgesamt zeigen die Untersuchungen, dass auch die Zielstellung der vollautomatischen Schlagkraftsuche mit dem intelligenten Modalhammer gelöst werden konnte. Zusammengefasst konnten alle Entwicklungsziele erreicht und durch die Untersuchungen erfolgreich validiert werden.

7.4 Validierung des Gesamtsystems

Zum Abschluss des Kapitels werden die Komponenten zur Datenerfassung, Strukturkonfiguration und zur Visualisierung sowie der intelligente Modalhammer an einer Stahlplatte und einer Fahrzeugfelge zum Zwecke von Modalanalysen validiert. Die jeweils ermittelten Moden werden anhand der Fahrzeugfelge mit denen einer Messung mittels Laser-Doppler-Vibrometer und anhand der Stahlplatte mit denen einer Simulation verglichen. Für beide Analysen wurde die Software Wavelmage zur Modalanalyse und der intelligente Modalhammer zur Strukturanregung genutzt.

7.4.1 Experimentelle Modalanalyse einer Fahrzeugfelge

Bei der Validierung des Gesamtsystems wurde die in Abschnitt 3.4 festgelegte Abfolge der Messkette beachtet.

7.4.1.1 Konfiguration der Datenerfassung

Zu Beginn der Messung wurde die Datenerfassung konfiguriert. Dafür wurden Versuchsaufbau, Messstrategie sowie Anzahl und Posen der elektromechanischen Sensoren festgelegt. Die verwendete Fahrzeugfelge besteht aus Aluminium und wurde im gebrauchten Zustand vermessen. Die Felge wurde freihängend mit Gummibändern in einem Aluminiumprofilrahmen befestigt und vermessen. Durch den freihängenden Aufbau müssen keine Fixierungsrandbedingungen beachtet werden. Vor der Messung wurden fünf ArUco-Marker ausgedruckt und auf die eingesetzten elektromechanischen Beschleunigungssensoren geklebt. Ein weiterer ArUco-Marker diente zur Positionierung des Rekonstruktionswürfels, in dem die 3D-Rekonstruktion stattfindet. Danach wurden Sensoren an den Messkoffer angeschlossen, der intelligente Modalhammer mittels Stativ am Testobjekt positioniert, die Sensoren mittels Heißwachs am Prüfobjekt angeklebt und die Marker-IDs Kanälen des Datenerfassungsgerätes zugeordnet. Weiterhin wurden die Tiefenkamera Intel Real Sense D455 und die Kamera Intel Real Sense T265 zur Bewegungsverfolgung übereinander angebracht und an zwei USB-Anschlüsse am Visualisierungsrechner angeschlossen. Danach folgte die Mehrkamera-Kalibrierung zur Bestimmung der

extrinsischen Parameter der beiden Kameras. Wenn die Positionierung der Kameras konstant bleibt, wird die Kalibrierung nur einmal benötigt. Zudem wurde die DAQIO-Kommunikation zwischen dem Rechner im Messkoffer (Server) und dem Client im Visualisierungsrechner über einen Netzrouter aufgebaut. Schließlich wurden noch Datenerfassungseinstellungen im Messkoffer vorgenommen, u.a. der Abtastrate und des Triggers. Für die Messung wurde die Überschreitung eines Schwellwerts, durch die Werte des Kraftsensors vom Modalhammer als Trigger genutzt.

7.4.1.2 Strukturkonfiguration

Daran anschließend erfolgte die 3D-Rekonstruktion der Struktur (siehe Bild 66, links). Es ist zu beachten, dass die Rekonstruktion nicht nachbearbeitet wurde. Bei höheren Ansprüchen an die Visualisierung ist eine automatisierte Nachbearbeitung der 3D-Rekonstruktion möglich, die jedoch keinen Einfluss auf die strukturdynamischen Eigenschaften hätte. Danach wurden die Sensorposen mittels ArUco-Markern bestimmt. Ist der Anwender mit einer ermittelten Sensorpose einverstanden, kann diese ausgewählt und anschließend die nächste Sensorpose ermittelt werden (siehe Bild 66, Mitte). Danach schließt sich die Zuweisung zwischen den detektierten Sensorposen und der Rekonstruktion an (siehe Bild 66, rechts).

7.4.1.3 Visualisierung, Validierung und Durchführung der Messung

Zum Abschluss wurde die Echtzeitvisualisierung zum Zwecke einer Betriebsschwingformanalyse inklusive Datenübertragung durchgeführt. Die Visualisierung diente sowohl zur Validierung des Messaufbaus als auch zur permanenten Validierung der Messung. Die reproduzierbare und automatisierbare Impulsanregung der Strukturen erfolgte mittels des intelligenten Modalhammers (siehe Bild 35). Ausgestattet mit einem Kraftsensor vom Typ PCB 208C03 [64], einer Kunststoffspitze und einer Zusatzmasse von 60 Gramm wurde eine wiederholbare Anregung von 500 Newton erreicht, um an allen Messpunkten das beste Signal-Rausch-Verhältnis zu erhalten. Die Reaktion der Fahrzeugfelge in z-Richtung, also senkrecht zur Felge, wurde mit fünf Beschleunigungsaufnehmern vom Typ MMF KS943B.100 gemessen. Es wurde eine Serie von drei Messungen mit reproduzierbarer Anregung und jeweils fünf Messpunkten durchgeführt. Zuerst wurden an einem Teil des Außenradius der Felge, dann am zweiten Teil des Außenradius und schließlich am Innenradius der Felge gemessen. Aufgrund der vollständigen Reproduzierbarkeit der Anregung wurden drei Messungen zu einer Messung zusammengefasst. Zum Vergleich der Moden der Autofelge wurde diese auch mit einem 3D-Laser-Doppler-Vibrometer (PSV-500, Polytec) [26] vermessen, um zur besseren Validierung der Ergebnisse eine hohe Messauflösung zu erlangen. Dafür wurde der gleiche freihängende Messaufbau wie bei der Messung mit elektromechanischen Sensoren verwendet. Das Prüfobjekt wurde

mit dem intelligenten Modalhammer angeregt. Eine Kraftschwelle wurde als Trigger der Messung eingestellt. Insgesamt wurde an 454 Punkten gemessen.



Bild 66: Darstellung der unterschiedlichen Phasen der Strukturkonfigurationsphase der Autofelge; Links: 3D-Rekonstruktion; Mitte: Ermittlung der Posen der fünf Sensoren; Rechts: Zuordnung der Sensorposen zur 3D-Rekonstruktion über drei Messungen an jeweils fünf Sensoren

Beide Messungen wurden zur besseren Vergleichbarkeit mit einer Abtastrate von 8000 Hz und ausschließlich in z-Richtung durchgeführt. Zur Validierung wurden beide Messdatensätze mit der Software Wavemeasure analysiert. Für die experimentelle Modalanalyse (siehe Abschnitt 2.1.3) wurden Eigenfrequenzen und Modenformen mit dem „Komplexe-Moden-Indikatorfunktion-Algorithmus“ (CMIF-AI, für engl. Complex-Mode-Indicator-Function-Artificial-Intelligence) [14] extrahiert. In Bild 67 sind die CMIF-Ergebnisse und in Tabelle 12 alle ermittelten Eigenfrequenzen dargestellt.

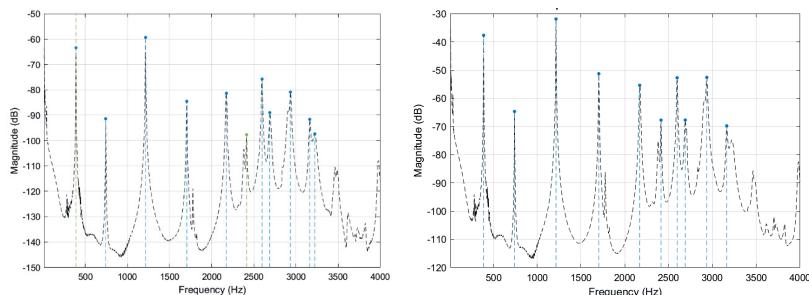


Bild 67: Komplexe-Moden-Indikatorfunktion (CMIF AI) der Fahrzeugfelge; Links: mit elektromechanischen Sensoren, 15 Messpunkten und dem Ergebnis der Arbeit; Rechts: Messung mit dem Laser-Doppler-Vibrometer an 454 Punkten

Für beide Messungen konnten zehn Moden ermittelt werden. Dabei sind acht Moden bezüglich der Eigenfrequenzen nahezu identisch. Nur zwei Moden weichen voneinander ab. Zum weiteren Vergleich wurden zusätzlich die MAC-Matrizen beider

Messungen gegenübergestellt, um die lineare Abhängigkeit zwischen den Eigenschwingungsformen zu bestimmen. Eine lineare Abhängigkeit kann nur zwischen den Moden zwei und fünf bei der Messung mit elektromechanischen Sensoren festgestellt werden. Weiterhin gibt es keine signifikanten Abhängigkeiten in beiden Messungen zwischen allen Moden, was für eine korrekte Messung spricht.

Tabelle 12: Alle Moden der Fahrzeugfelge; Links: mit elektromechanischen Sensoren, 15 Messpunkten und dem Ergebnis der Arbeit; Rechts: Messung mit dem Laser-Doppler-Vibrometer an 454 Punkten

Nummer der Mode	EMA Eigenfrequenz mit elektromechanischen Sensoren	EMA Eigenfrequenz mit Laser-Doppler-Vibrometer
1	388 Hz	388 Hz
2	741 Hz	741 Hz
3	1215 Hz	1215 Hz
4	1703 Hz	1703 Hz
5	2175 Hz	2170 Hz
6	2597 Hz	2413 Hz
7	2690 Hz	2597 Hz
8	2935 Hz	2690 Hz
9	3163 Hz	2936 Hz
10	3223 Hz	3163 Hz

Zusätzlich wurden zur Beurteilung der Messungen noch die Kohärenzfunktion zwischen Eingangs- und Ausgangssignal und das Komplexitätsmaß zur Bewertung der Eigenschwingungsformen herangezogen (siehe Bild 68).

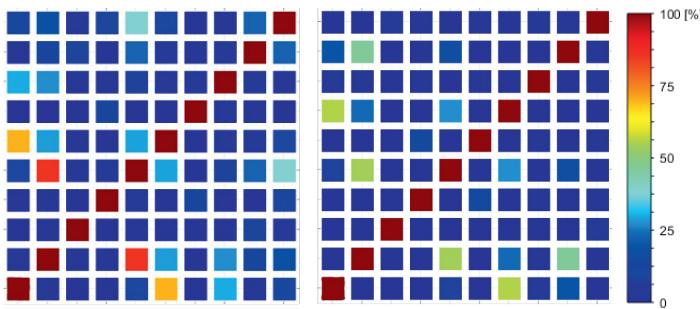


Bild 68: MAC-Matrizen zur Fahrzeugfelge; Links: mit elektromechanischen Sensoren, 15 Messpunkten und dem Ergebnis der Arbeit; Mitte: Messung mit dem Laser-Doppler-Vibrometer an 454 Punkten; Rechts: Einfärbung, 100 bedeutet hohe lineare Abhängigkeit, 0 bedeutet keine lineare Abhängigkeit

Alle Indikatoren bestätigen eine korrekte Durchführung beider Messungen. Zum Abschluss der Validierung werden die ausgewählten Eigenschwingungsformen (siehe Bild 69, 70) gegenübergestellt. Zur Interpolation wurde die in Abschnitt 5.5

beschriebene Methode in die Software Wavelimage integriert und angewendet. Grundsätzlich sind die mit elektromechanischen Sensoren gewonnenen Messergebnisse im Vergleich zu den Ergebnissen der Messung mit dem Laser-Doppler-Vibrometer trotz deutlich weniger Messpunkten sehr vielversprechend. Aufgrund der deutlich höheren Messauflösung weisen bei der Laser-Doppler-Vibrometer-Messung Schwingungsverläufe weniger Sprünge der Sensorwerte auf. Diese Einschränkung wird aber nicht durch die eingesetzte Interpolationsmethode verursacht, sondern vielmehr dadurch, dass mehr Messpunkte benötigt worden wären, insbesondere in der Mitte der Felgenstege.



Bild 69: Eigenschwingungsform der ersten Mode bei 388 Hz der Fahrzeugfelge; Links: mit elektromechanischen Sensoren, 15 Messpunkten und dem Ergebnis der Arbeit; Rechts: Messung mit dem Laser-Doppler-Vibrometer an 454 Punkten



Bild 70: Eigenschwingungsform der dritten Mode bei 1215 Hz der Fahrzeugfelge; Links: mit elektromechanischen Sensoren, 15 Messpunkten und dem Ergebnis der Arbeit; Rechts: Messung mit dem Laser-Doppler-Vibrometer an 454 Punkten

Die erzielten Eigenschwingungsformen sehen trotz geringen Zeitaufwandes für die Konfiguration auch ohne Vorwissen über die untersuchte Struktur und wenigen Messpunkten recht realistisch aus. Die Vorteile des entstandenen Systems gegenüber Messungen mit Laser-Doppler-Vibrometern sind folgende:

- Der Konfigurations- und Messaufwand war deutlich geringer im Vergleich zur Laser-Doppler-Vibrometer-Messung. Für die Messung mit elektromechanischen Sensoren wurden inklusive Messaufbau und nachträglich durchgeführter experimenteller Modalanalyse circa 30 Minuten, bestehend aus 10 Minuten Messaufbau, 9 Minuten Rekonstruktion, 1 Minute Erkennen der Sensorpose, 5 Minuten Messung, 5 Minuten Export und experimentelle Modalanalyse, gebraucht. Für die Laser-Doppler-Vibrometer-Messung wurden trotz Messexpertise vier Stunden für den gesamten Prozess benötigt. Die Zeitsparnis gegenüber optischer Messung ist aber nur durch die automatische Strukturkonfigurationsphase möglich. Ansonsten wäre dieser Konfigurationsaufwand größer als der beim Laser-Doppler-Vibrometer.
- Das Laser-Doppler-Vibrometer bringt höhere Investitionskosten mit sich und einen deutlich höheren Schulungsaufwand.
- Zusätzlich steht ein komplettes Dreiecksnetz nach der Messung zur Verfügung. Beim Laser-Doppler-Vibrometer müsste für ein vollständig abgeschlossenes Volumenmodell die untersuchte Struktur aus mindestens drei unterschiedlichen Positionen vermessen werden.

7.4.2 Experimentelle Modalanalyse einer Stahlplatte

Auch bei dieser Validierung wurde der in Abschnitt 3.4 festgelegte Ablauf der Messkette beachtet. Die verwendete Stahlplatte (siehe Bild 71) weist eine Größe von 60 x 60 x 1 cm auf:



Bild 71: Darstellung der unterschiedlichen Phasen der Strukturkonfigurationsphase der Stahlplatte; Links: 3D-Rekonstruktion; Mitte: Ermittlung der Sensorposen der fünf Sensoren; Rechts: Zuordnung der Sensorposen zur 3D-Rekonstruktion mit fünf Sensoren

Sie wurde ebenfalls freihängend mit Gummibändern an einem Aluminiumprofilrahmen befestigt und vermessen. Durch den freihängenden Aufbau müssen keine Fixierungsrandbedingungen beachtet werden. Die Impulsanregung der Struktur

erfolgte ebenfalls mittels des intelligenten Modalhammers (siehe Bild 35) und gleicher Instrumentierung wie bei der Fahrzeugfelge.

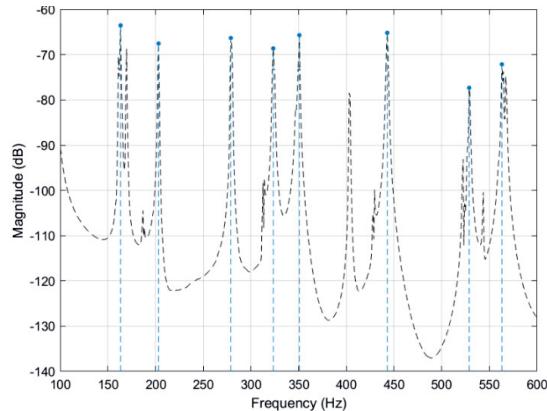


Bild 72: Komplexe-Moden-Indikatorfunktion (CMIF AI) der Stahlplatte

Zur Messung der Schwingungsantwort wurden ebenfalls fünf Beschleunigungsaufnehmer vom Typ MMF KS943B.100 der Firma Metra [101] verwendet. Die Sensoren wurden mit Magneten an der Stahlplatte befestigt. Die Messungen liefen analog zu denen der Fahrzeugfelge ab. Der intelligente Modalhammer wurde ebenfalls als Trigger für die Messungen festgelegt. Es wurde ausschließlich in einer Richtung, und zwar senkrecht zur Stahlplatte, gemessen. Die Messungen wurden dreimal wiederholt, um die Qualität der Transferfunktionen zu verbessern. Insgesamt konnten somit fünf Transferfunktionen ermittelt werden. Die Resultate der Strukturkonfigurationsphase sind in Bild 71 zu sehen. Die experimentelle Modalanalyse wurde mit der Software Wavelimage und dem CMIF-AI-Algorithmus durchgeführt. In Bild 72 ist die ermittelte Indikatorfunktion und in Tabelle 13 die Auflistung aller ermittelten Moden zu sehen.

Tabelle 13: Alle Moden der Stahlplatte.

Nummer der Mode	EMA Eigenfrequenz mit elektromechanischen Sensoren
1	163 Hz
2	203 Hz
3	278 Hz
4	323 Hz
5	350 Hz
6	442 Hz
7	528 Hz
8	563 Hz

Zur weiteren Validierung der Messung wurde zusätzlich die MAC-Matrix (siehe Bild 73) analysiert.

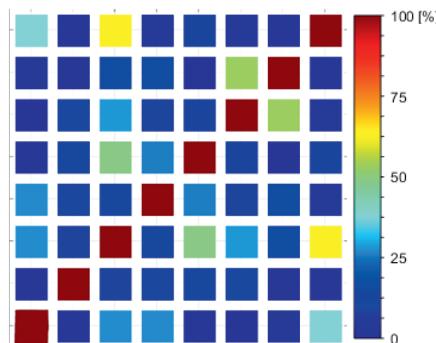


Bild 73: MAC-Matrix der Stahlplatte

Es gibt keine signifikanten Abhängigkeiten zwischen allen Moden. Zusätzlich wurden zur Beurteilung der Messungen noch die Kohärenzfunktion zwischen Eingangs- und Ausgangssignal und das Komplexitätsmaß zur Bewertung der Eigenschwingungsformen herangezogen. Alle Indikatoren bestätigen eine korrekte Durchführung der Messungen. Zur Validierung der ermittelten Eigenschwingungsformen wurden die Eigenschwingungsformen der Stahlplatte zusätzlich mit der Finite-Elemente-Analyse der Software Wavelmage (siehe Abschnitt 2.1.6) simuliert.

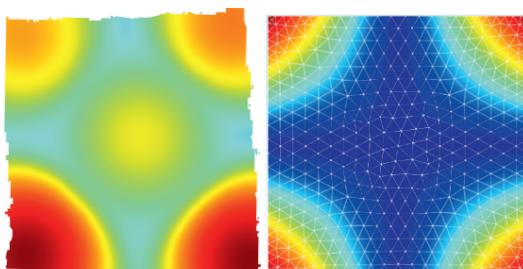


Bild 74: Eigenschwingungsform der ersten Mode bei 163 Hz (EMA) der Stahlplatte; Links: mit elektromechanischen Sensoren, fünf Messpunkten und dem Ergebnis der Arbeit; Rechts: Simulationsergebnis für die gleiche Mode mit einem Dreiecksnetz von über 7000 Vertizes

Für die Simulation wurden die Materialparameter Elastizitätsmodul, Massendichte und Querkontraktionszahl aus einer Materialdatenbank für Stähle entnommen und ein Dreiecksnetz der Stahlplatte erzeugt. Danach wurden die simulativ und die durch experimentelle Modalanalyse ermittelten Eigenschwingungsformen einander gegenübergestellt (siehe Bild 74, 75, 76, 77).

Die Gegenüberstellung der Eigenschwingungsformen wurde anhand der höchsten Ähnlichkeiten (MAC-Matrix) zueinander bestimmt.

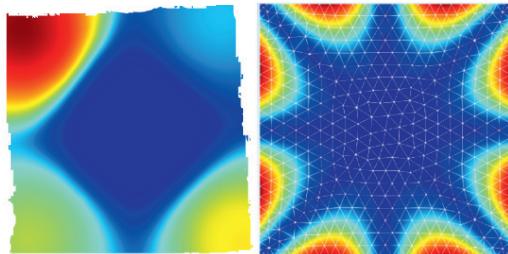


Bild 75: Eigenschwingungsform der zweiten Mode bei 203 Hz (EMA) der Stahlplatte; Links: mit elektromechanischen Sensoren, fünf Messpunkten und dem Ergebnis der Arbeit; Rechts: Simulationsergebnis für die gleiche Mode mit einem Dreiecksnetz von über 7000 Vertizes

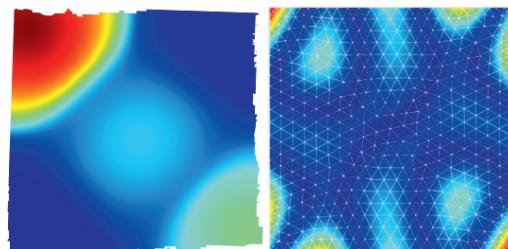


Bild 76: Eigenschwingungsform der dritten Mode bei 278 Hz (EMA) der Stahlplatte; Links: mit elektromechanischen Sensoren, fünf Messpunkten und dem Ergebnis der Arbeit; Rechts: Simulationsergebnis für die gleiche Mode mit einem Dreiecksnetz von über 7000 Vertizes

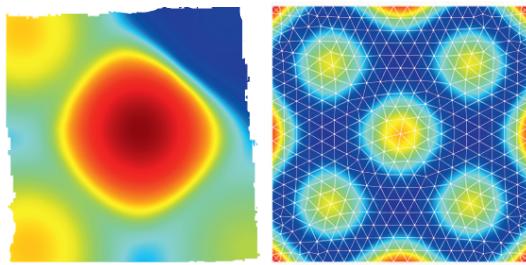


Bild 77: Eigenschwingungsform der sechsten Mode bei 442 Hz (EMA) der Stahlplatte; Links: mit elektromechanischen Sensoren, fünf Messpunkten und dem Ergebnis der Arbeit; Rechts: Simulationsergebnis für die gleiche Mode mit einem Dreiecksnetz von über 7000 Vertizes

Grundsätzlich sind die Ergebnisse der Messungen mit fünf Messpunkten im Vergleich zu denen der Simulation mit 7000 Berechnungspunkten sehr vielversprechend. Aufgrund der deutlich unterschiedlichen Auflösung werden bei der Simulation die Schwingungsverläufe detailreicher und damit näher an der Realität dargestellt. Dieser Nachteil wird aber nicht durch die eingesetzte Interpolationsmethode verursacht, sondern vielmehr durch die geringe Anzahl an Messpunkten, die mit Absicht so gewählt wurde, um das Gesamtsystem an den Grenzen der Machbarkeit zu validieren. Trotz dieser deutlichen Erschwerisse konnten alle Moden der Messung in den Simulationsergebnissen wiedergefunden werden. In der dreidimensionalen Ansicht der Eigenschwingungsformen fällt der Vergleich im Gegensatz zur reinen Betrachtung der Farbkarte nochmals besser aus. Insgesamt sind wie auch bei der Fahrzeugfelge trotz weniger Messpunkte und geringem Konfigurationsaufwand die Resultate sehr vielversprechend. Für die Messungen mit den elektromechanischen Sensoren wurden inklusive Messaufbau und nachträglich durchgeföhrter experimenteller Modalanalyse circa 20 Minuten, bestehend aus 10 Minuten Messaufbau, 3 Minuten Rekonstruktion, 1 Minute Erkennen der Sensorpose, 1 Minute Messung, 5 Minuten Export und experimentelle Modalanalyse, benötigt. Zusammengefasst ist mit dem hier entstandenen System die korrekte Durchführung von Modal- und Betriebsschwingformanalysen mit elektromechanischen Sensoren bei weniger Zeitaufwand im Vergleich zum gegenwärtigen Stand der Technik und fast ohne Expertenwissen möglich. Aufgrund der kurzen Messzeit von unter einer Sekunde, die durch die Impulsanregung ermöglicht wird, ist Echtzeitvisualisierung bei der Impulsanregung nicht relevant. Bei der Betriebsschwingformanalyse mit ambienter oder Shakeranregung spielt die Echtzeitvisualisierung jedoch eine größere Rolle.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Arbeit noch einmal zusammengefasst. Darauf aufbauend werden Anregungen für zukünftige technische Weiterentwicklungen gegeben. Zum Abschluss wird auf unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Strukturdynamik eingegangen.

8.1 Zusammenfassung

Grundsätzlich konnten alle geplanten Teilziele (siehe Abschnitt 3.2) erreicht und validiert werden. Zur Verbesserung der Strukturkonfiguration wurden neuartige Konzepte entwickelt. Darunter fallen effiziente 3D-Rekonstruktion, optisches Markertracking der Schwingungssensoren und automatische Zuordnung der Sensorposen zum Dreiecksnetz einer zu untersuchenden Struktur. Diese Arbeitsschritte erleichtern das derzeitige manuelle Vorgehen in vielfältiger Weise. Zur Durchführung müssen ausschließlich ArUco-Marker ausgedruckt und auf die eingesetzten Sensoren aufgeklebt sowie die Kameras Intel Real Sense D455 und T265 erworben und an zwei USB-3.0-Anschlüsse des Visualisierungsrechners angeschlossen werden. Mittels dieser Hardware, marktgängiger Datenerfassungssysteme und den im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Softwarekomponenten kann die gesamte Strukturkonfiguration automatisiert durchgeführt werden. Entstandene Dreiecksnetze und dazugehörige Sensorzuordnungen können auch autonom mit externen Softwarekomponenten weiter genutzt werden, dienen aber auch als Strukturkonfiguration in der anschließenden Visualisierungsphase. Durch die rechnergestützte Erweiterung der Realitätswahrnehmung sind modellhafte Abbildungen von Betriebsschwingformen direkt in der Realität möglich, und zwar erstmals mittels farblich codierter, das Videobild anreichernder Sensorwerte. Mit dieser Art von Visualisierung lassen sich ein Messaufbau und die anschließende Erfassung von Messdaten deutlich schneller und leichter validieren. Um auch Punkten eines Dreiecksnetzes Sensorwerte zuweisen zu können, an denen nicht gemessen wurde, wird interpoliert. Die gewählte Art der Interpolation ermöglicht eine realistische Flächenmessung auch mit elektromechanischen Sensoren und wurde erstmals in der Strukturdynamik eingesetzt. Sie beruht auf einem Verfahren der diskreten Differentialgeometrie und berücksichtigt sowohl die Konnektivität als auch die Krümmung der Strukturgeometrie sowie Randbedingungen der Fixierung. Die technische Umsetzung dieser Vorgehensweise wurde an unterschiedlichen Prüfobjekten mittels Messungen zur Modalanalyse validiert und konnte vollends überzeugen. Im Vergleich zu herkömmlichen Messketten wurde mit den Ergebnissen

der Arbeit eine deutliche Verringerung der Messzeit⁽¹⁵⁾ und eine deutlich vereinfachte Durchführung bei gleichbleibenden Resultaten erreicht. Insgesamt bietet das System zur Datenerfassung eine neue Art der Interaktion und Assistenz vor und während Messungen, die in dieser Form bisher noch nicht existierte.

Neben neuartigen Möglichkeiten der Datenerfassung wurde der erste „intelligente Modalhammer“ eingeführt. Unter intelligent wird in diesem Zusammenhang die geräteinterne Sensordatenauswertung verstanden. Durch Verwendung dieses Modalhammers wird eine weitere Vereinfachung und Beschleunigung der strukturdynamischen Messkette erreicht. Der Hammer ist neben der Modalanalyse auch für Anwendungen im Bereich der Klangprüfung prädestiniert und sollte daher auch in solchen Anwendungen verwendet werden. Bei manueller Anwendung von Hämtern wird die aktuelle Hammerkopfposition ständig vom menschlichen Auge verfolgt. Diese Sensorinformationen beeinflussen direkt den parallel stattfindenden Bewegungsablauf der Arm-Hand-Kombination zur Aufschlagfläche. Dieses Konzept der direkten Beeinflussung des Bewegungsablaufs durch das Sensorsignal wurde auf den intelligenten Modalhammer übertragen, indem durch Einsatz eines Sensors und Einbeziehung des Sensorsignals in die Bewegungssteuerung ein geschlossener Regelkreis etabliert wird, der den Bewegungsablauf während des Schlagbetriebs reaktiv beeinflusst. Durch direkte Sensordatenauswertung im Gerät ist es nicht mehr erforderlich, vorab mittels eines manuell-iterativen Prozesses eine statische Konfiguration zu finden, die den Anforderungen des jeweils gewählten Prüfaufbaus genügt und prellfreie Einzelschläge gewährleistet. Insgesamt sind dadurch erstmalig vollständig automatische, reproduzierbare Impulsanregungen mit einstellbaren Impulsparametern möglich geworden. Mit diesem Gerät sind Einzelschläge sogar mit handgeführten Strukturanregungen oder bei leichten Bewegungen des Prüfobjekts im Schlagbetrieb möglich. Unterschiedliche Instrumentierungen (Kraftsensor, Hammer spitze, Zusatzgewicht) des intelligenten Modalhammers lassen zudem präzise Einstellungen der gewünschten Impulseigenschaften zu.

8.2 Ausblick

Aufbauend auf den erzielten Ergebnissen können zusätzliche Schritte von Messung bzw. Analyse zur weiteren Vereinfachung und Beschleunigung der Messkette in das Messsystem integriert, aber auch bestehende Verfahren verbessert werden. Durch das Konzept des intelligenten Modalhammers sind Modifikationen am Hammerarm und ein Austausch des Schrittmotors ohne großen Zeitaufwand möglich. Dadurch könnte eine noch größere Anzahl an Strukturen zum Zwecke von Modalanalysen bzw. Klangprüfungen angeregt werden.

¹⁵ Die Verringerung der Messzeit ist abhängig vom Prüfobjekt und vom Erfahrungsgrad des Anwenders und kann daher nicht in absoluten Zahlen angegeben werden.

8.2.1 Technische Weiterentwicklung

Möglichkeiten zur technischen Weiterentwicklung werden vor allem hinsichtlich 3D-Rekonstruktion, Interpolation und weiterer Funktionalitäten zur Unterstützung des Messingenieurs gesehen. Für die 3D-Rekonstruktion (siehe Abschnitt 5.2) wurden Funktionalitäten aus dem Intel- und RecFusion-SDK genutzt. Während der Arbeit wurden die Algorithmen zur 3D-Rekonstruktion und Bewegungsverfolgung der Kamera ständig verbessert. Daher ist davon auszugehen, dass auch in Zukunft Weiterentwicklungen möglich sein bzw. auch andere Algorithmen zur Rekonstruktion entstehen werden. Die Software wurde durchgehend modular programmiert, sodass die Kamera, die Funktionalität zur Bewegungsverfolgung der Kamera als auch der Algorithmus zur 3D-Rekonstruktion austauschbar und somit die Anwendung auch mit anderen Tiefenkameras und Algorithmen umsetzbar sind. Eine wesentliche Aufgabenstellung innerhalb der Messkette mit elektromechanischen Sensoren, die Expertenwissen benötigt, ist Bestimmung der Anzahl und Positionierung von Sensoren an einer Struktur. Die Positionen werden anhand von Simulationsergebnissen oder durch Vorwissen über ähnlich schwingende Strukturen bestimmt. Um die Anzahl der benötigten Sensoren bzw. Sensorpositionen zu ermitteln, müssen Positionen gefunden werden, die Extremwerten der Deformationen über alle Eigenschwingungsformen hinweg entsprechen. Wenn zu wenige Sensoren eingesetzt werden, können nicht alle Moden ermittelt werden. Weiterhin führt eine Sensorpositionierung, die nicht die Extremwerte der Eigenschwingungsformen zu messen erlaubt, zu fehlerhaften Eigenformen. Optimale Sensoranzahl und -positionen können ebenfalls direkt aus einer 3D-Rekonstruktion mittels Eigenformanalyse gewonnen werden. Diese Informationen könnten dann zusätzlich innerhalb der AR-Anwendung und somit direkt an der Struktur visualisiert werden.

Um den intelligenten Modalhammer auch für Strukturen zu ertüchtigen, die aufgrund ihrer hohen Eigenfrequenzen einen maximal anzuregenden Frequenzbereich von über 12 kHz oder wegen ihrer Größe bzw. Schweren Aufschlagkräfte von über 2 kN benötigen, gibt es neben der Instrumentierung noch weitere Möglichkeiten, die Impulseigenschaften zu modifizieren und dadurch diese Anforderungen zu erfüllen. Darunter fallen Veränderungen des Gewichts bzw. der Form des Hammerarms, des Trägheitsmoments des Motors und der Form der Hammerspitze. Durch die modulare Programmierung der Firmware und die gewählte Methodik sind diesbezügliche Modifikationen ohne großen Mehraufwand möglich.

8.2.2 Schlussbetrachtung

Nach dem durch die Ergebnisse dieser Arbeit erweiterten Stand der Technik können nun auch Anwender mit geringem Experten- und Vorwissen strukturdynamische

Messungen mit elektromechanischen Sensoren vornehmen, denn Erstellung geometrischer Modelle, Ermittlung von Sensorposen und Zuordnung der Sensorposen zur Strukturgeometrie benötigen bisher umfangreiches Expertenwissen. Dies ist vor allem deswegen relevant, da in vielen Einrichtungen, die strukturdynamische Messungen durchführen, entsprechende Fachkräfte fehlen. Daher müssen Mitarbeiter speziell geschult werden oder es wird auf externe Dienstleister zurückgegriffen. Der neue Stand der Technik kann aber auch die Arbeit erfahrener Messingenieure deutlich vereinfachen und beschleunigen. Die Unterstützung von Messingenieuren mittels AR-Anwendungen oder durch intelligente Sensorik und Aktorik bei der Durchführung von Messungen bzw. zu Schulungszwecken spielt in vielen Industriebereichen eine wesentliche Rolle. Zusammengefasst bieten die Ergebnisse der Arbeit erstmalig die Möglichkeit, strukturdynamische Messungen in Form einer AR-Anwendung zu erleben. Dadurch ist direkte und intuitive Interaktion mit untersuchten Strukturen im Betrieb möglich. Die neuartige Verwendung intelligenter Aktorik zur Strukturanregung ermöglicht weiterhin vollständig automatische und reproduzierbare Impulsanregung mit einstellbaren Impulsparametern. Durch die erzielten Resultate wird die interdisziplinäre Verknüpfung zwischen Strukturdynamik und digitalen Technologien in mehreren Punkten deutlich vorangetrieben. Die Originalität der Resultate wurde durch Erteilung des deutschen Patents DE 10 2018 103 333 „Verfahren und System zur dynamischen Strukturanalyse“ [105] amtlich bestätigt.

9 Literaturverzeichnis

- [1] D. Herfert: Wavemage Modal - Software zur Bestimmung von Schwingungseigenschaften, *GFaI Informationen*, 02/2018, pp. 6 Berlin: GFaI, 2018.
- [2] T. Kuttner und A. Rohnen: *Praxis der Schwingungsmessung. Messtechnik und Schwingungsanalyse mit Matlab*, München: Springer Verlag, 2019.
- [3] DIN 1311-1: *Schwingungen und Schwingungsfähige Systeme. Teil 1: Grundbegriffe, Einteilung*, 2000.
- [4] K.P.K.S.W. Magnus: *Schwingungen*, Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag, 2016
- [5] M. Zollner: *Frequenzanalyse*, Regensburg: Autoren-Selbstverlag, 1999.
- [6] C. Ranieri und G. Fabbrocino: *Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures*, New York: Springer Verlag, 2014.
- [7] R. Brincker und C. Ventura: *Introduction to Operational Modal Analysis*, Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, 2015.
- [8] W. Buerakov: *Identifikation mechanischer Strukturen mittels experimenteller Modalanalyse*, Aachen: Shaker Verlag, 2012.
- [9] B.R.M. Schwarz: Introduction to operating deflection shapes, Proc. *CSI Reliability Week*, pp. 121-126, 1999.
- [10] R.H.S. Heaton: *The use of Operating Deflection Shapes (ODS) to model the vibration of sanders and polishers*, Buxton: Health & Safety Laboratory, 2006.
- [11] H.A. Gaberson: Determination and animation of machinery rigid body operating deflection shapes with MATLAB, *Proc. of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2(1) 1526-1532, 1998.
- [12] D. Herfert, M. Koddenbrock, J. Heimann und J. Pehe: Wavemage Bridges the Gap Between Measurement and Simulation. An Application Example of How to Create a Modal Digital Twin using FE Model Updating, Proc. *39th Intl. Modal Analysis Conf.*, Cham: Springer Verlag, 2021.
- [13] D. Herfert und M. Gollnick: Wavemage: Ein System zur Messung, Analyse und zum Monitoring von Schall und Schwingungen, *21. Kolloquium Schallemission*, Vortrag 22, 2017.
- [14] D. Herfert, M. Gollnick und J. Heimann: Automatic Modal Parameter Identification with Methods of Artificial Intelligence, in *Topics in Modal Analysis & Testing*, Vol. 8, pp. 89-96, Cham, Springer Verlag, 2020.
- [15] D. Herfert und J. Heimann: Experimentelle Validierung der Model Updating Komponente der Software Wavemage unter zusätzlicher Berücksichtigung von Temperaturveränderungen, *45. Deutsche Jahrestagung für Akustik*, pp. 473-477, 2019.
- [16] P. Blaschke: Automatischer Modalhammer vom Typ SAM, <https://nv-tech-design.de/>

- [17] Maul Theet GmbH: Produktseite des automatischen Modalhammers vom Typ vimpact, <https://www.maul-theet.com/produkte/vibration-modal-vmeas/hardware/vimpact-automatischer-modalhammer/>
- [18] gfa tech GmbH: Produktseite des automatischen Modalhammers vom Typ WaveHit, <https://wave-image.com/automatischer-modalhammer-wavehit/>
- [19] PCB Synotech GmbH: Katalogauszug Modalhämmern, https://www.synotech.de/produkte_skript/downloads/marketing/PCB_Impact_Hammers_Katalogauszug_ENG_1106.pdf
- [20] D. Herfert: Gegenüberstellung und Validierung unterschiedlicher Arten der Anregung zur Modalanalyse, *44. Deutsche Jahrestagung für Akustik*, pp. 587-591, 2018.
- [21] A. Rossmann: *Strukturbildung und Simulation technischer Systeme. Band 2, Teil 2: Elektrische und mechanische Dynamik*, Berlin: Springer Vieweg Verlag, 2018.
- [22] H. Jimin und F. Zhi-Fang: *Modal Analysis*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.
- [23] D.J. Ewins: *Modal Testing: Theory, Practice and Application*, West Sussex: John Wiley & Sons, 2009.
- [24] K.H. Ruhm: Sensoren der Schwingungsmesstechnik, <http://www.mmm.ethz.ch/dok01/d0000019.pdf>
- [25] PCB Synotech GmbH: Produktseite der Beschleunigungssensoren der Firma PCB, <https://wwwpcb.com/sensors-for-test-measurement/accelerometers/general-purpose/triaxial>
- [26] Polytec GmbH: Produktseite des Full-Field Scanning Vibrometer vom Typ PSV-500-3D, <https://www.polytec.com/de/vibrometrie/produkte/full-field-vibrometer/psv-500-3d-scanning-vibrometer>
- [27] GOM GmbH: Produktseite des GOM ARAMIS SRX Systems Schneller hochauflösender 3D-Bewegungs- und Verformungssensor, <https://www.gom.com/de/news/aktuelles/aramis-srx-schneller-hochaufloesender-3d-bewegungs-und.html>
- [28] Polytec GmbH: Produktseite des Multi Point Vibrometers, <https://www.polytec.com/de/vibrometrie/produkte/full-field-vibrometer/mpv-800-multipoint-vibrometer/>
- [29] B. Möller: *Multi-Mosaikbilder: Ein Ansatz zur ikonischen Repräsentation von Bilddaten aktiver Kameras*, Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2005.
- [30] R. Hartley: *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [31] S. Edgerton: *Die Entdeckung der Perspektive*, Paderborn: Wilhelm Fink Verlag, 2002.

- [32] Wikimedia Foundation Inc.: Bildquelle: Projektiver Raum - Railroad tracks "vanishing" into the distance, https://de.wikipedia.org/wiki/Projektiver_Raum#/media/File:Railroad-Tracks-Perspective.jpg
- [33] A. Nüchter: Rotation und Euler-Winkel, <http://kos.informatik.uni-osnabrueck.de/download/diplom/node26.html>
- [34] Wikimedia Foundation Inc.: Bildquelle: 6 degrees of freedom, https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=File:6DOF_en.jpg
- [35] F. Keuder: *2D-3D-Registrierung mit Parameterentkopplung für die Patientenlagerung in der Strahlentherapie*, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2009.
- [36] M. Koecher und R. Remmert: Hamiltonische Quaternionen, in *Grundwissen Mathematik*, pp. 155-181, Berlin-Heidelberg, Springer Verlag, 1988.
- [37] M. Weiser: The Computer for the 21st Century, *Scientific American*, 265(3) 94-105, 1991.
- [38] R. Azuma: A survey of augmented reality, *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 6(4) 355-385, 1997.
- [39] R. Bill und M.L. Zehner: *Lexikon der Geoinformatik*, Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag, 2001.
- [40] P. Milgram und F. Kishino: A taxonomy of mixed reality visual displays, *IEICE Transactions on Information and Systems*, 77(12) 1321-1329, 1994.
- [41] M. Tönnis: *Augmented reality: Einblicke in die erweiterte Realität*, Berlin-Heidelberg: Springer Verlag, 2010.
- [42] R. Dörner, W. Broll, P. Grimm und B. Jung: *Virtual und augmented reality (VR/AR): Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität*, Berlin-Heidelberg: Springer Verlag, 2014.
- [43] R. Azuma, Y. Baillot, R. Behringer, S. Feiner, S. Julier und B. Macintyre: Recent advances in augmented reality, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21(6) 34-47, 2001.
- [44] Stereolabs Inc.: Produktseite der ZED 2 Kamera, <https://www.stereolabs.com/zed-2/>
- [45] B. Kling: Bildquelle: Google kündigt Glass Enterprise Edition an, <https://www.zdnet.de/88305013/google-kuendigt-glass-enterprise-edition-an/>
- [46] Naturalpoint Inc.: Startseite der OptiTrack Produktlinie, <http://optitrack.com/>
- [47] Northern Digital Inc.: Produktseite der Reflective Marker Spheres, <https://www.ndigital.com/products/passive-marker-spheres/disposable-reflective-marker-sphere/>
- [48] Wikimedia Foundation Inc.: Bildquelle: Comparison of some augmented reality fiducial markers for computer vision. User: Cmglee, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Comparison_of_augmented_reality_fiducial_markers.svg

- [49] J. Köhler, A. Pagani und D. Stricker: Detection and Identification Techniques for Markers Used in Computer Vision, in *Visualization of Large and Unstructured Data Sets Applications in Geospatial Planning, Modeling and Engineering*, pp. 36-44, Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik, 2010.
- [50] M. Fischler und R. Bolles: Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, *Communications of the ACM*, 24(6) 381-395, 1981.
- [51] D. Lowe: *Object Recognition from Local Scale-Invariant Features*, Washington: IEEE Computer Society, 1999.
- [52] D. Lowe: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, *International Journal of Computer Vision*, 60(2) 91-110, 2004.
- [53] H. Bay, T. Tuytelaars und L. Gool: SURF: Speeded Up Robust Features, *European Conf. on Computer Vision*, pp. 404-417, Berlin-Heidelberg, Springer Verlag, 2006.
- [54] I. Petrović und I. Cvišić: Stereo odometry based on careful feature selection and tracking, *European Conference on Mobile Robots*, pp. 1-6, Washington: IEEE Computer Society, 2015.
- [55] I. Cvišić, J. Ćesić, I. Marković und I. Petrović: SOFT-SLAM: Computationally Efficient Stereo Visual SLAM for Autonomous UAVs, *Journal of Field Robotics*, 35(4) 578-595, 2018.
- [56] A. Geiger, P. Lenz und R. Urtasun: Are we ready for Autonomous Driving? The KITTI Vision Benchmark Suite, Proc. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 3354-3361, 2012.
- [57] G. Klein und D. Murray: Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces, Proc. *6th IEEE and ACM Intl. Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 225-234, Washington: IEEE Computer Society, 2007.
- [58] L. Wenkai, A. Nee und S. Ong: A State-of-the-Art Review of Augmented Reality in Engineering Analysis and Simulation, *Multimodal Technologies and Interaction*, 1(3) 17, 2017.
- [59] Y. Turkan, R. Radkowski, A. Karabulut-İlgı und A. Behzadan: Mobile Augmented Reality for Teaching Structural Analysis, *Advanced Engineering Informatics*, 34, 90-100, 2017.
- [60] R. Hözl: *Verfahren zum Erfassen von Vibrationen einer Vorrichtung und Vibrationserfassungssystem*, Internationales Patent WO/2016/169554, 2016.
- [61] T. Voelkel: *Erfassung und Auswertung von mechanischen Schwingungssignalen*, Deutsches Patent DE10204043, 2002.
- [62] A. Lemke und D. Herfert: WaveHit^{MAX} - Sensor-based system for impulse, bounce-free excitation of macroscopic solid structures, <https://wave-hit.com>, Berlin: GFal e.V., 2021.

- [63] D. Herfert und A. Lemke: WaveHit - The First Smart Impulse Hammer for Fully Automatic Impact Testing, Proc. *39th Intl. Modal Analysis Conf.*, Cham: Springer Verlag, 2021.
- [64] gfa tech GmbH: Produktseite des intelligenten Modalhammers vom Typ WaveHit MAX, <https://wave-hit.com/>
- [65] PCB Synotech GmbH: Produktseite des Kraftsensors PCB 208 C02, <https://wwwpcb.com/products?model=208c02>
- [66] PCB Synotech GmbH: Produktseite des Kraftsensors PCB 208 C03, <https://wwwpcb.com/products?model=208c03>
- [67] Tegara Corp.: We compared 3 types of 8D cameras in various environments [indoor], https://www.tegakari.net/en/2020/09/3dcamera_compare_2/
- [68] Tegara Corp.: We compared 3 types of 8D cameras in various environments [outdoor], https://www.tegakari.net/en/2020/09/3dcamera_compare_1/
- [69] Intel Corp.: Intel Real Sense Depth Camera D455, <https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d455>
- [70] Intel Corp.: Intel Real Sense SDK 2.0, <https://www.intelrealsense.com/developers>
- [71] Intel Corp.: Intel Real Sense Tracking Camera T265, <https://www.intelrealsense.com/tracking-camera-t265/>
- [72] Intel Corp.: Intel Real Sense Stereo Depth, <https://www.intelrealsense.com/stereo-depth>
- [73] ImFusion GmbH: REC Fusion SDK, <https://www.recfusion.net/documentation>
- [74] R. Newcomber: Kinect Fusion: Real-time dense surface mapping and tracking, Proc. *IEEE Intl. Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 127-136, Washington: IEEE Computer Society, 2011.
- [75] W.E. Lorensen und H.E. Cline: Marching Cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm, *Computer Graphics*, 21(4) 163-169, 1987.
- [76] Intel Corp.: Robust Visual Inertial Tracking, <https://www.intelrealsense.com/visual-inertial-tracking-case-study>
- [77] S. Garrido-Jurado, R. Munoz-Salinas, F. Madrid-Cuevas und M. Martin-Jimenez: Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion, *Pattern Recognition*, 47(6) 2280-2292, 2014.
- [78] S. Suzuki und K. Abe: Topological structural analysis of digitized binary images by border following, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 30(1) 32-46, 1985.
- [79] D.H.D.T.K. Peucker: Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent a Digitized Line or its Caricature, *The Canadian Cartographer*, 10(2) 112-122, 1973.
- [80] N. Otsu: A threshold selection method from gray-level histograms, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1) 62-66, 1979.

- [81] T. Collins und A. Bartoli: Infinitesimal Plane-Based Pose Estimation, *International Journal of Computer Vision*, 109(3) 252-286, 2014.
- [82] Open Source Computer Vision Library: Detection of ArUco Markers, https://gregorkovalcik.github.io/opencv_contrib/tutorial_aruco_detection.html
- [83] S. Tordal und G. Hovland: Relative Vessel Motion Tracking using Sensor Fusion, Aruco Markers, and MRU Sensors, *Modeling, Identification and Control: A Norwegian Research Bulletin*, 38, 79-93, 2017.
- [84] K. Crane, F. Goes, M. Desbrun und P. Schröder: Digital Geometry Processing with Discrete Exterior Calculus, in *ACM SIGGRAPH 2013 Courses*, pp. 1-126, New York: ACM, 2013.
- [85] D. Herfert, J. Heimann und K. Henning: Automatic Interpolation for the Animation of Unmeasured Nodes with Differential Geometric Methods, in *Rotating Machinery, Optical Methods & Scanning LDV Methods*, Vol. 6, pp. 53-59, Cham: Springer Verlag, 2020.
- [86] O. Sorkine: Laplacian Mesh Processing, Proc. *Eurographics 2005 - State of the Art Reports*, pp. 53-70, Oxford: The Eurographics Association, 2005.
- [87] M. Fiedler: Algebraic connectivity of graphs, *Czechoslovak Mathematical Journal*, 23(2) 298-305, 1973.
- [88] F. Chung: *Spectral Graph Theory*, Providence, Rhode Island: American Mathematical Society, 1997.
- [89] J. Benoit: Webseite der C++ Bibliothek Eigen für lineare Algebra, http://eigen.tuxfamily.org/dox/group__TopicSparseSystems.html
- [90] W. Vogt: *Zur Numerik linearer Gleichungssysteme*, pp. 13-18, Technische Universität Ilmenau, 2004.
- [91] National Instruments Corp.: CompactDAQ Chassis, <https://www.ni.com/de-de/shop/select/compactdaq-chassis>
- [92] National Instruments Corp.: National Instruments Treiber, NIDAQmx, <https://www.ni.com/de-de/support/downloads/drivers/download.ni-daqmx.html#348669>
- [93] R. Fielding und R. Taylor: *Architectural styles and the design of network-based software architectures*, Ph.D. Dissertation, University of California at Irvine, 2000.
- [94] C. Gilbert und A. Jeffs: C++11 RESTful webserver Bibliothek, <https://github.com/meltwater/served>
- [95] B. Dawes: Boost.Aasio, https://www.boost.org/doc/libs/1_66_0/doc/html/boost_asio.html
- [96] D. Crockford: JSON Standard, <https://www.json.org/json-de.html>
- [97] M. Yip: RapidJSON Documentation, <https://rapidjson.org/>
- [98] QT Company Inc.: Startseite der Gesellschaft, <https://www.qt.io/>
- [99] M. Christen: Open GL Shading Language, https://www.opengl.org/sdk/docs/tutorials/ClockworkCoders/glsl_overview.php

- [100] Group Khronos: OpenGL Spezifikation, <https://www.opengl.org/>
- [101] Metra GmbH: Datenblatt des Beschleunigungssensors KS943B100, <https://www.mmf.de/pdf/1-8-1.pdf>
- [102] Y. Yingwei: Introduction to Intel Real Sense Technology Visual SLAM and T265 tracking camera, <https://www.programmersought.com/article/54014720134/>
- [103] J. Heimann: *Experimentelle Validierung eines Eigenwert-Optimierers sowie Erweiterung des Parameterraums zur Berücksichtigung von Temperatureinflüssen*, Masterarbeit, Technische Universität Berlin, 2019.
- [104] PCB Synotech GmbH: Produktseite des Smart Shakers Modell K2007E01, <http://www.modalshop.com/excitation/SmartShaker-with-Integrated-Power-Amplifier?ID=272>
- [105] D. Herfert: *Verfahren und System zur dynamischen Strukturanalyse*, Deutsches Patent DE102018103333, 2018.
- [106] D. Herfert, M. Gollnick und P. Giese: Feature Based Monitoring Application for Automatic Crack Detection Using Wavemage, Proc. 39th Intl. Modal Analysis Conf., Cham: Springer Verlag, 2021.
- [107] D. Herfert und K. Henning: WaveAR - A Real Time Sensor Based Augmented Reality Implementation for Operating Deflection Shapes, Proc. 39th Intl. Modal Analysis Conf., Cham: Springer Verlag, 2021.
- [108] D. Herfert, M. Gollnick und M. Urban: Wavemage - Order ODS for Rotating Machineries, Proc. 39th Intl. Modal Analysis Conf., Cham: Springer Verlag, 2021.

Alle oben aufgeführten URLs wurden im April 2021 letztmalig aufgerufen.

Lebenslauf

Name	Daniel Herfert
Geburtsort	Rüdersdorf
Geburtsdatum	28.12.1980

Ausbildung

Okt. 2001 – Jul. 2002	Studium der Zahnmedizin, Humboldt-Universität zu Berlin
Okt. 2002 – Mär. 2010	Diplomstudium der Informatik, Abschluss: Diplom (Dipl.-Inf.), Humboldt-Universität zu Berlin

Berufserfahrung

Jan. 2007 – Dez. 2009	Studentischer Mitarbeiter, Lehrstuhl für künstliche Intelligenz, Humboldt-Universität zu Berlin
Apr. 2010 – Dez. 2012	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Bereich Adaptive Modellierung /Mustererkennung, Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V.
Jan. 2013 – heute	Bereichsleiter, Bereich Strukturdynamik/Mustererkennung, Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V.

Alle 23 Reihen der „Fortschritt-Berichte VDI“
in der Übersicht – bequem recherchieren unter:
elibrary.vdi-verlag.de

Und direkt bestellen unter:
www.vdi-nachrichten.com/shop

- Reihe 01** Konstruktionstechnik/
Maschinenelemente
- Reihe 02** Fertigungstechnik
- Reihe 03** Verfahrenstechnik
- Reihe 04** Bauingenieurwesen
- Reihe 05** Grund- und Werkstoffe/Kunststoffe
- Reihe 06** Energietechnik
- Reihe 07** Strömungstechnik
- Reihe 08** Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
- Reihe 09** Elektronik/Mikro- und Nanotechnik
- Reihe 10** Informatik/Kommunikation
- Reihe 11** Schwingungstechnik
- Reihe 12** Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik
- Reihe 13** Fördertechnik/Logistik
- Reihe 14** Landtechnik/Lebensmitteltechnik
- Reihe 15** Umwelttechnik
- Reihe 16** Technik und Wirtschaft
- Reihe 17** Biotechnik/Medizintechnik
- Reihe 18** Mechanik/Bruchmechanik
- Reihe 19** Wärmetechnik/Kältetechnik
- Reihe 20** Rechnergestützte Verfahren
- Reihe 21** Elektrotechnik
- Reihe 22** Mensch-Maschine-Systeme
- Reihe 23** Technische Gebäudeausrüstung



OHNE PROTOTYP GEHT NICHTS IN SERIE.

Unser Podcast ist das Werkzeug, mit dem Sie Ihre Karriere in allen Phasen entwickeln – vom Studium bis zum Chefsessel. Egal, ob Sie Ingenieur*in, Mechatroniker*in oder Wissenschaftler*in sind: Prototyp begleitet Sie. Alle 14 Tage hören Sie die Redaktion von INGENIEUR.de und VDI nachrichten im Gespräch mit prominenten Gästen.

INGENIEUR.de
TECHNIK - KARRIERE - NEWS



PROTOTYP

Karriere-Podcast

JETZT REINHÖREN UND KOSTENFREI ABONNIEREN:
[WWW.INGENIEUR.DE/PODCAST](http://www.ingenieur.de/podcast)

IN KOOPERATION MIT VDI NACHRICHTEN

REIHE 11
SCHWINGUNGS-
TECHNIK



NR. 353

ISBN 978-3-18-335311-8

BAND
1|1

VOLUME
1|1