



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterarbeit

Andrey Tsapurin

Konstruktion eines motorisierten Kamerahalters unter besonderer Berücksichtigung der mechanischen Vibrationen

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

Andrey Tsapurin

**Konstruktion eines motorisierten
Kamerahalters unter besonderer
Berücksichtigung der mechanischen
Vibrationen**

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

im Studiengang Konstruktionstechnik und Produktentwicklung im Maschinenbau
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:

European X-Ray Free-Electron Laser Facility GmbH
Holzkoppel 4
22869 Schenefeld

Erstprüfer/in: Prof. Dr. Frank Schäfer

Industrieller Betreuer: M.Sc. Jan Torben Delitz

Abgabedatum: 17.06.2022

Zusammenfassung

Andrey Tsapurin

Thema der Master Thesis

Konstruktion eines motorisierten Kamerahalters unter besonderer Berücksichtigung der mechanischen Vibrationen

Stichworte

Frequenzen, Schwingungsmessungen, Schwingungsanalyse, Beschleunigungssensor, Impulshammer, Eigenfrequenzen, Frequenzspektrum, Resonanz, Dämpfungsgrad, Konstruktion, MATLAB, Siemens NX, ANSYS, FEM, TRIZ

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit umfasst die Schwingungsmessungen, die Schwingungsanalyse und Entwicklung eines motorisierten Kamerahalters. Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines modifizierten Kamerahalters im Hinblick auf die Vibrationen, die im Betrieb herrschen. Dafür kommt es zur Messung der Schwingungen im Betrieb mittels der Analyse MATLAB. Zusätzlich findet auch eine Messung der Eigenfrequenzen statt und die Durchführung einer Prüfung des Resonanzverhaltens. Es schließt sich die Entwicklung einer verbesserten Konstruktion an mit einer Bewertung der Steifigkeit anhand einer erneuten Messung. Zum Schluss folgt die Durchführung der Messungen an der neuen Konstruktion angesichts der Betriebsbedingungen in Verbindung mit einer Analyse und einem Vergleich der Messungen an der alten Konstruktion.

Andrey Tsapurin

Title of the paper

Design of a motorized camera holder with special consideration of mechanical vibrations

Keywords

Frequencies, vibration measurements, vibration analysis, accelerometer, impact hammer, natural frequencies, frequency spectrum, resonance, damping ratio, construction, MATLAB, Siemens NX, ANSYS, FEM, TRIZ

Abstract

This work includes vibration measurements, vibration analysis and development of a motorized camera mount. The aim of the work is the development of a modified camera holder with regard to the vibrations that prevail during operation. For this it comes to the measurement of the vibrations in the operation by means of the analysis MATLAB. In addition, there is also a measurement of the natural frequencies and the execution of a test of the resonance behavior. This is followed by the development of an improved design with an evaluation of the stiffness based on another measurement. Finally, the execution of the measurements on the new construction in view of the operating conditions follows in connection with an analysis and a comparison of the measurements on the old construction.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
1.1	Motivation.....	1
1.2	Aufgabenstellung.....	1
1.3	Gliederung.....	2
2	Grundlagen	3
2.1	European XFEL GmbH.....	3
2.2	SCS-Instrument.....	5
2.3	Koordinatensystem.....	7
2.4	Schwingungen.....	8
2.5	Schwingungssensoren	11
2.6	IEPE Sensoren.....	15
2.6.1	Kistler triaxialer Beschleunigungssensor und Petrowachs	16
2.6.2	Kistler Ladungsverstärker	18
2.6.3	Impulshammer.....	20
2.7	Ermittlung der Abtastrate.....	22
2.8	Fast Fourier Transformation (FFT)	22
2.9	Mittelwert und Standardabweichung.....	24
2.10	Übertragungsfunktion	25
2.11	Dämpfung.....	28
2.12	Schwerpunkt von Körpern	31
3	FDM und FFT Chamber	33
3.1	FFT Kammer	33
3.1.1	FDM.....	35
3.1.2	Vertikale und horizontale FDM.....	36
3.1.2.1	Linearführung und die Platten.....	37
3.1.2.2	Der Piezomotor N472 PiezoMike	40
3.1.2.3	Mikroskop QM-1	41
3.1.2.4	Kamera Basler.....	42
3.1.2.5	Massenschwerpunkt	42
3.2	Umgebungsbedingungen	44
4	Durchführung und Analyse der Messungen im Betrieb.....	47
4.1	Verifizierung des Sensors.....	47
4.2	Messpositionen und Messprotokoll.....	49
4.3	Messung an der FFT Kammer.....	51
4.4	Messung am Flansch	54
4.5	Messung am Spiegelhalter	56

4.6	Messung an der Kamera	59
4.6.1	Kamera oben	59
4.6.2	Kamera unten	61
4.7	Messung am Hebelarm	64
4.8	Zusammenfassung der Messergebnisse	65
5	Experimentelle Ermittlung der Eigenfrequenzen bei der vorhandenen Konstruktion	67
5.1	Eigenfrequenzmessung am Hebelarm: Gewicht oben	68
5.2	Eigenfrequenzmessung am Hebelarm: Gewicht unten	70
5.3	Eigenfrequenzmessung. Spiegelhalter	72
5.4	Prüfung auf Resonanz.....	74
5.4.1	Resonanz am Hebelarm	74
5.4.2	Resonanz am Spiegelhalter	75
5.5	Zusammenfassung.....	77
6	Gestaltung der neuen Konstruktion	79
6.1	TRIZ.....	79
6.2	Anwendung von TRIZ.....	80
6.3	Neues Design.....	82
7	Experimentelle Ermittlung der Eigenfrequenzen auf der optimierten Konstruktion	90
7.1	Eigenfrequenzmessung am Hebelarm: Gewicht oben	90
7.2	Eigenfrequenzmessung am Hebelarm: Gewicht unten	93
7.3	Eigenfrequenzmessung am Spiegelhalter	94
7.4	Eigenfrequenzmessung. Hebelarm. Kreuzrippe.....	97
7.5	Steifigkeitsvergleich der Konstruktionen	98
8	Durchführung und Analyse der Messungen der neuen Konstruktion im Betrieb	101
8.1	Messpositionen und Messprotokoll.....	101
8.2	Messung am Spiegelhalter	102
8.3	Messung an der Kamera: oben	105
8.4	Messung an der Kamera: unten	107
8.5	Messung an dem Hebelarm.....	110
8.6	Zusammenfassung.....	111
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	112
10	Literaturverzeichnis.....	114

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Unschärfe an der Grenze zwischen der Probe und der Umgebung.	2
Abbildung 2.1: Undulator von EXFEL [6].....	3
Abbildung 2.2: Unterirdischer Tunnelverlauf [5].....	4
Abbildung 2.3: SCS-Instrument.....	6
Abbildung 2.4: Koordinatensystem XFEL [8].	7
Abbildung 2.5: Unterteilung der Schwingungen nach deren zeitlichem Verlauf [12].	8
Abbildung 2.6: Beispiel einer harmonischen Schwingung.	9
Abbildung 2.7: Einteilung der Schwingungen nach dem Entstehungsmechanismus [12].	11
Abbildung 2.8: Wegaufnehmer nach dem Berührungslosenprinzip [12].	12
Abbildung 2.9: Wegaufnehmer nach dem Lasertriangulationsprinzip (a), Messprinzip (b), (Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG) [12, 19].	13
Abbildung 2.10: Prinzip des Absolutaufnehmers [12].	13
Abbildung 2.11: Prinzip des piezoelektrischen Effektes.	16
Abbildung 2.12: Triaxialer Beschleunigungssensor Typ8688a5 der Kistler AG [23, 24].....	17
Abbildung 2.13: Der Sensor mit dem Clip [23].....	17
Abbildung 2.14: Petrowachs [25].	18
Abbildung 2.15: 4-Kanal Labor-Ladungsverstärker & Datenerfassung [28].	19
Abbildung 2.16: Impulshammer Kistler Typ 9722A [31].	20
Abbildung 2.17: Frequenzspektrum verschiedener Anschlagspitzen [32]	21
Abbildung 2.18: Umwandlung eines Signals aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich [37].	23
Abbildung 2.19: Darstellung der FFT eines Signals mit niedriger (links) und hoher (rechts) Blocklänge [37].	24

Abbildung 2.20: Beziehungen zwischen Ein- und Ausgang eines linearen, zeitinvarianten Systems [12].	25
Abbildung 2.21: Beispiel des charakteristischen Verlaufs der Übertragungsfunktion des Einmassenschwingers [12].	26
Abbildung 2.22: Amplitudenfrequenzgang für Beschleunigung unter der Krafterregung [12, 49].	27
Abbildung 2.23: Translationsschwinger mit Dämpfung [12].	29
Abbildung 2.24: Definition des logarithmischen Dekrements an der schwach gedämpften Schwingung [12].	30
Abbildung 2.25: Schwerpunkt [52].	31
Abbildung 2.26: Das Moment der Kraft [52].	31
Abbildung 3.1: Probenkammer mit vFDM und hFDM.	33
Abbildung 3.2: Turbopumpen Pfeiffer HiPace 300 links und HiPace 700 rechts [35, 36].	34
Abbildung 3.3: Scrollpumpe von Edwards Vacuum [54].	34
Abbildung 3.4: Reflexionsgesetz.	35
Abbildung 3.5: Horizontale (links) und vertikale (rechts) FDM an der Probekammer.	36
Abbildung 3.6: CAD-Bild der vFDM.	37
Abbildung 3.7: Linearführung [56].	37
Abbildung 3.8: Zwischenplatte.	38
Abbildung 3.9: Langplatte.	38
Abbildung 3.10: Konstantkraftfederhalter.	39
Abbildung 3.11: Konstantkraftfeder [57].	39
Abbildung 3.12: Spiegelhalter.	40
Abbildung 3.13: Linearaktor N472 PiezoMike [58].	40
Abbildung 3.14: Skizze des Konzepts.	41
Abbildung 3.15: QM 1 Long-Distance Microscope [59].	41

Abbildung 3.16: Camera coupling set (Links) und Basler avA2300-25gm (rechts) [61, 62].	42
Abbildung 3.17: Massenschwerpunktänderung bei hFDM. M1 unten. M2 oben.	43
Abbildung 3.18: Stab mit Einzelmasse am freien Ende [9].	43
Abbildung 3.19: Lageplan des SCS-Instruments.	44
Abbildung 3.20: Vorpumpen im geschlossenen Raum (Pumpen im vorderen Bereich befinden sich dort zur Lagerung).	45
Abbildung 3.21: FFT Kammer und Detektor mit der Vorpumpe.	45
Abbildung 4.1: Balken mit einem freien Ende.	47
Abbildung 4.2: Versuchsaufbau.	47
Abbildung 4.3: Modell des Balkens im ANSYS.	48
Abbildung 4.4: Skizze für den Plan der Messungen.	49
Abbildung 4.5: Sensor in der FFT Kammer.	51
Abbildung 4.6: Beschleunigungen von zwei Mittelwertmessungen in drei Achsen.	52
Abbildung 4.7: Frequenzspektrum der Messungen an der FFT Kammer. Piezo aus und an.	53
Abbildung 4.8: Der Flansch mit dem Sensor.	54
Abbildung 4.9: Beschleunigungen mit drei Achsen am Flansch. Piezomotoren aus und an.	55
Abbildung 4.10: Frequenzspektrum der Messungen am Flansch mit an- und ausgeschalteten Piezomotoren.	56
Abbildung 4.11: Spiegelhalter mit dem Sensor.	57
Abbildung 4.12: Die Beschleunigungen in drei Achsen der Messungen am Spiegelhalter mit an- und ausgeschalteten Piezomotoren.	57
Abbildung 4.13: Frequenzspektrum der Messungen am Spiegelhalter mit an- und ausgeschaltetem Piezomotor.	58
Abbildung 4.14: Kamera. Oben.	59
Abbildung 4.15: Beschleunigungen in drei Achsen. An der Kamera. Oben. Piezo an und aus.	60

Abbildung 4.16: Frequenzspektrum der Messungen. In drei Achsen. An der Kamera. Oben. Piezo an und aus.	61
Abbildung 4.17: Kamera. Unten.	62
Abbildung 4.18: Beschleunigungen in drei Achsen. An der Kamera. Unten. Piezo an und aus.	62
Abbildung 4.19: Frequenzspektrum der Messungen. Kamera. Unten. Piezo an und aus.	63
Abbildung 4.20: Der Sensor am Hebelarm.	64
Abbildung 4.21: Frequenzspektrum der Messungen am Hebelarm und an der Kamera (unten).	65
Abbildung 5.1: Plan für Eigenfrequenzermittlung.	67
Abbildung 5.2: Messungsort vom Hebelarm.	68
Abbildung 5.3: Strukturantwort. Gewicht oben.	69
Abbildung 5.4: Übertragungsfunktion. Hebelarm. Gewicht oben.	70
Abbildung 5.5: Strukturantwort. Gewicht unten.	71
Abbildung 5.6: Übertragungsfunktion. Hebelarm. Gewicht unten.	71
Abbildung 5.7: Messungsort des Spiegelhalters.	72
Abbildung 5.8: Strukturantwort. Spiegelhalter.	73
Abbildung 5.9: Übertragungsfunktion. Spiegelhalter.	73
Abbildung 5.10: Eigen- und Anregungsfrequenz. Hebelarm. Gewicht unten.	74
Abbildung 5.11: Eigenfrequenzmessung am Spiegelhalter und Mittelwertmessung am Spiegelhalter.	76
Abbildung 6.1: TRIZ-Vorgehensweise [75].	79
Abbildung 6.2: TRIZ für den vorliegenden Fall.	80
Abbildung 6.3: Kraftfluss auf der L-Platte.	82
Abbildung 6.4: Neue Konstruktion von vFDM.	83
Abbildung 6.5: Mikroskopführung.	84

Abbildung 6.6: Linearkugellager (links) und Wellenbock (rechts) [78, 79].....	84
Abbildung 6.7: Hochpräzisionswelle [80].....	85
Abbildung 6.8: Kammerschelle (1) und Kameraklemme (2).	86
Abbildung 6.9: Langloch an der Führungsplatte Support.....	87
Abbildung 6.10: Optimierte L-Platte und Langloch in der Führungsplatte.	88
Abbildung 6.11: Langloch für den Konstantkraftfederhalter auf der Führungsplatte.	88
Abbildung 6.12: Der neue Spiegelhalter.....	89
Abbildung 7.1: Der Plan der Eigenfrequenzmessung auf der neuen Konstruktion.....	90
Abbildung 7.2: Foto vom Messort.....	91
Abbildung 7.3: Strukturantwort. Hebelarm. Gewicht oben. Neukonstruktion.....	91
Abbildung 7.4: Übertragungsfunktion. Neue Konstruktion. Gewicht oben.....	92
Abbildung 7.5: Strukturantwort auf den Anregungsimpuls.....	93
Abbildung 7.6: Übertragungsfunktion. Hebelarm. Neue Konstruktion. Gewichtplatte unten.....	94
Abbildung 7.7: Messortfoto.	95
Abbildung 7.8: Strukturantwort. Neue Konstruktion. Spiegelhalter.	95
Abbildung 7.9: Übertragungsfunktion. Neue Konstruktion. Spiegelhalter.....	96
Abbildung 7.10: Kreuzrippe bei der Konstruktion.	97
Abbildung 7.11: Übertragungsfunktion. Hebelarm. Kreuzrippe (Gewicht unten - links, Gewicht oben -rechts).....	98
Abbildung 7.12: Vergleich zwischen Eigenfrequenzen aller drei Konstruktionen am Hebelarm.	99
Abbildung 7.13: Vergleich zwischen den Eigenfrequenzen des alten und neuen Spiegelhalters.	99
Abbildung 8.1: Skizze für den Plan der Messungen der neuen Konstruktion. Die Zahlen zeigen die Messpositionen.	101
Abbildung 8.2: Sensor am Spiegelhalter.	103

Abbildung 8.3: Beschleunigungen am Spiegelhalter. Neue und alte Konstruktion.....	103
Abbildung 8.4: Frequenzspektrum. Spiegelhalter. Alte und neue Konstruktion.....	104
Abbildung 8.5: Der Sensor an der Kamera: oben.....	105
Abbildung 8.6: Beschleunigungen der Mittelwertmessungen. Kamera oben. Alte und neue.	106
Abbildung 8.7: Frequenzspektrum von Mittelwertmessungen. Kamera oben. Alte und neue Konstruktion.....	107
Abbildung 8.8: Sensor an der Kamera: unten.	108
Abbildung 8.9: Beschleunigungen der Mittelwertmessungen an der Kamera. Unten. Alte und neue Konstruktion.	108
Abbildung 8.10: Frequenzspektrum der Mittelwertmessungen. Kamera unten. Alte und neue Konstruktion.....	109
Abbildung 8.11: Sensor am Hebelarm.	110
Abbildung 8.12: Frequenzspektrum der Messung am Hebelarm.....	110

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Unterteilung der Eingangsgrößen nach DIN 45661:2013-03.	12
Tabelle 2: Auswahl des Aufnehmers und der kinematischen Größe [12].	14
Tabelle 3: Hinweise zur Auswahl der kinematischen Größen [12].	15
Tabelle 4: Typ der Schlagspitzen und die Beschreibungen derselben [24, 31, 32].	21
Tabelle 5: Zusammenhang zwischen Abstimmungsverhältnis [12, 47, 49].	27
Tabelle 6: Übersicht verschiedener Dämpfungsgrade [11, 12].	28
Tabelle 7: Gemessene und simulierte Eigenfrequenzen.	48
Tabelle 8: Plan der Messungen vom 23.11.2021.	50
Tabelle 9: Mittelwert und Standardabweichung. FFT Kammer.	52
Tabelle 10: Mittelwert und Standardabweichung. Der Flansch.	55
Tabelle 11: Mittelwert und Standardabweichung. Spiegelhalter.	58
Tabelle 12: Mittelwert und Standardabweichung. Kamera oben.	60
Tabelle 13: Mittelwert und Standardabweichung. Kamera unten.	63
Tabelle 14: Vergleich zwischen den Mittelwerten an der Kamera: oben und unten.	66
Tabelle 15: Eigenfrequenz und Dämpfungsgrad von MATLAB. Hebelarm. Oben.	70
Tabelle 16: Eigenfrequenz und Dämpfungsgrad von MATLAB. Hebelarm. Unten.	72
Tabelle 17: Eigenfrequenz und die Dämpfungsgrade. Spiegelhalter.	74
Tabelle 18: Zusammenstellung zwischen dem alten und neuen Spiegelhalter.	77
Tabelle 19: Eigenfrequenz und Dämpfungsgrad von MATLAB. Neue Konstruktion. Gewicht oben.	92
Tabelle 20: Eigenfrequenzen der alten und der neuen Konstruktion: oben.	92
Tabelle 21: Eigenfrequenz und der Dämpfungsgrad von MATLAB. Neue Konstruktion. Gewicht unten.	94
Tabelle 22: Eigenfrequenzen der alten und der neuen Konstruktion: unten.	94

Tabelle 23: Eigenfrequenzen und der Dämpfungsgrad von MATLAB. Neue Konstruktion. Spiegelhalter.	96
Tabelle 24: Eigenfrequenzen zwischen dem alten und neuen Spiegelhalter.	96
Tabelle 25: Eigenfrequenzen und die Dämpfungsgrade von MATLAB. Kreuzrippe.	98
Tabelle 26: Der Plan der Messungen der neuen Konstruktion vom 25.04.2022.	102
Tabelle 27: Mittelwert und Standardabweichungen. Neuer und alter Spiegelhalter.	104
Tabelle 28: Mittelwert und Standardabweichung. Kamera oben. Neue und alte.	106
Tabelle 29: Mittelwert und Standardabweichung. Kamera unten. Neue und Alte.	109

Formelzeichen und Abkürzungen

Lateinische Symbole

a	Hebelarm
BL	Blocklänge
D	Messdauer
d	Dämpfung
d_f	Frequenzauflösung
E	Elastizitätsmodul
EI	Unteres Grenzmaß für die Bohrung
ES	Oberes Grenzmaß für die Bohrung
ei	Unteres Grenzmaß für die Welle
es	Oberes Grenzmaß für die Welle
F	Kraft
F_d	Dämpfungskraft
F_R	Resultierende Kraft
f	Frequenz
f_{Er}	Erregerfrequenz
f_n	Eigenfrequenz
<i>Auch</i>	Errechnerer Frequenzbereich
<i>Auch</i>	Nyquist-Frequenz
f_s	Abtastrate
G_{oB}	Höchstmaß Bohrung
G_{oW}	Höchstmaß Welle
G_{uB}	Mindestmaß Bohrung
G_{uW}	Mindestmaß Welle
g	Schwerebeschleunigung
$H_{aF}(\omega)$	Trägheit
$H_{vF}(\omega)$	Mobilität
$H_{xF}(\omega)$	Dynamische Steifigkeit
I	Flächenträgheitsmoment
k	Federkonstante
l	Länge des Hebels
M	Moment
M_i	Gegebener Wert
M_w	Mittelwert
m	Masse
m_{ges}	Gesamtmasse des Körpers
m_i	Teilmasse

N	Nennmaß
$Auch$	Anzahl der Elemente
n	Anzahl der Werte
P_{SH}	Höchstspiel
P_{SM}	Mindestspiel
S_a	Standardabweichung
T, T_d	Periode
t	Zeit
U	Unterschied
$X(j\omega)$	Komplexe Zahl des Eingangs
$X(f)$	Fourier Transformation
$x(t)$	Funktion
\hat{x}	Amplitude oder die Auslenkung
$x_k(t)$	Auslenkung in dem Zeitpunkt t
$x_{k+1}(t)$	Auslenkung in dem nächsten Zeitpunkt $t + 1$
\dot{x}	Geschwindigkeit
\ddot{x}	Beschleunigung
x_i	Schwerpunktkoordinate
x_i, x_s	Schwerpunktkoordinate in der X-Achse
$x(t)$	Eingangssignal aus dem Zeitbereich
$Y(j\omega)$	Komplexe Zahl des Ausgangs
y_i, y_s	Schwerpunktkoordinate in der Y-Achse
y_k	Ergebnis der Fast-Fourier-Transformation
z_i, z_s	Schwerpunktkoordinate in der Z-Achse

Griechische Symbole

α	Fallwinkel
α'	Reflektierter Winkel
α_{aF}	Amplitudenfrequenzgang der Beschleunigung
δ	Abklingkonstante
η	Abstimmungsverhältnis
ϑ	Dämpfungsgrad
Λ	Logarithmisches Dekrement
λ	Eigenwert
φ	Phasenwinkel
φ_0	Phasenwinkel in dem Zeitpunkt 0
Ω	Erregerkreisfrequenz
ω	Kreisfrequenz
ω_0	Eigenkreisfrequenz

ω_d Eigenkreisfrequenz des Einmassenschwingers

Abkürzungen

ALAS *Alignment Laser System*

ANSYS *Analysis System*

CAD *Computer Aided Desing*

DFT *Diskereete Fourier Transformation*

DPS1 *Differential pumping system 1*

DPS2 *Differential pumping system 2*

DSSC *DEPFET Sensor with Signal Compression*

FDM *Far Distance Microscope, Fused Deposition Modelling*

FEM *Finite Elemente Methode*

FFT *Forward Scattering Fixed Target Chamber, Fast Fourier Transformation*

fps *Frames Per Second*

FXE *Femtosecond X-Ray Experements*

HED *High energy density science*

hFDM *Horizontale Far Distance Microscope*

HRC *Härte nach Rockwell*

IEPE *Integrated Electronics Piezo Electric*

IR *Infrarot*

KBS *Kirkpatrick Baez Focussing*

LIN *Laser in coupling*

lsce *least-squares complex exponential*

lsrf *Least squares rational function*

LZI *Lineares Zeitinvariantes System*

MATLAB *Matrix Laboratory*

MID *Materials imaging and dynamics*

NX *Next Generation*

PLA *polyactid acid*

PP *Peak Picking*

SCS *Spectroscopy and coherent scattering*

SPB/SFX *Single particles, cluster and biomolecules and serial femtosecond crystallography*

SQS *Small quantum system*

TIM *Transmission Intensity Monitor*

TXT *Text*

UHV *Ultrahochvakuum*

vFDM *Vertikale Far Distance Microscope*

XFEL *X-Ray Free Electron Laser*

XGM *X Ray gas monitor*

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 Motivation

Die Experimentierstation „Spectroscopy and Coherent Scattering“ (SCS) am European X-Ray Free Electron Laser (XFEL) beschäftigt sich mit der Dynamik und Strukturuntersuchung von Nanosystemen und biologischen Systemen mit weichen Röntgenstrahlen (250 - 3000 eV, 5-0,4 nm) [1, 2]. Dabei bestrahlt der Röntgenstrahl die Probe. Während der Bestrahlung entsteht eine Wechselwirkung zwischen der Röntgenstrahlung und den Elektronen in der Probe. Diese verursachen eine von einem Detektor aufgezeichnete Röntgenstrahlbeugung. Wissenschaftler werten die von dem Detektor aufgezeichneten Daten aus, die der Gewinnung eines Rückschlusses über den atomaren und strukturellen Aufbau der Probe dienen. Bei einigen Fällen ist es erforderlich, die Probe sehr präzise zu dem Röntgenstrahl auszurichten. Die Ausrichtung der Probe erfolgt in einer Probenkammer. Die Probenkammer ist in der Ultrahochvakuumumgebung (UHV) zu betreiben. Der Einbau der Probe in die Probenkammer erfolgt vor dem Experiment mit einer Ausrichtung in vertikalen und horizontalen Projektionen. Während des Experiments muss die genaue Lage der Probe bekannt sein, um eine problemlose Messung zu ermöglichen. Die Erfassung der Position geschieht mittels eines extra entwickelten vertikalen und horizontalen Far Distance Microscopes (vFDM und hFDM). Außen angebracht liefert es durch ein Sichtfenster das Bild der Probe in der UHV-Kammer. Um eine präzise Kontrolle der Ausrichtung der Probe zu erreichen, muss das Bild der Probe möglichst scharf sein. Je schärfer das Bild der Probe, desto präzise die Ausrichtung der Probe und eine desto bessere Datenqualität ist bei dem Experiment zu erreichen. Nach jedem Experiment kommt es zur Auswertung und Publizierung der auf dem Detektor aufgezeichneten Daten [3, 4].

1.2 Aufgabenstellung

Die Wissenschaftler stellen bei den Experimenten eine besondere Unschärfe des Bildes der Probe an der Grenze zwischen der Probe und der Umgebung fest. Die Verschiebung der Pixel ist in der Abbildung 1.1 dargestellt. Diese Verschiebung verschlechtert die Ausrichtung der Probe. Vermutlich kommt die Verschiebung des Pixels durch die während des Betriebes herrschende Vibration.

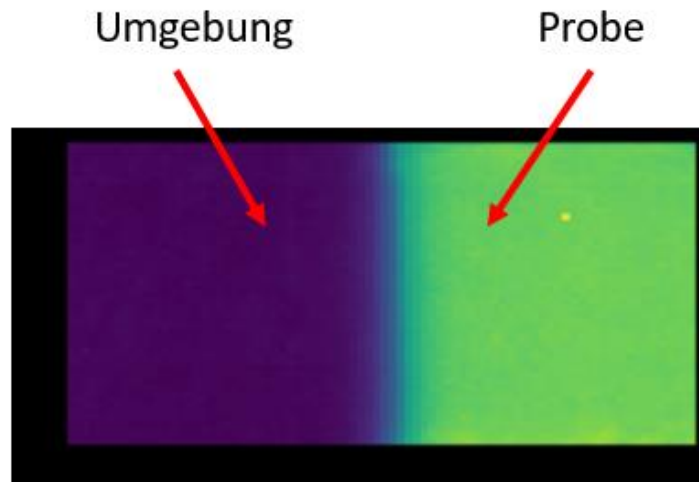


Abbildung 1.1: Unschärfe an der Grenze zwischen der Probe und der Umgebung.

Das Ziel der Arbeit ist die Optimierung der Konstruktion des Kamerahalters in Bezug auf die Vibrationen am FDM in der SCS-Experimentierstation. Dafür sind die Schwingungen bzw. Vibrationen mittels eines Sensors aufzunehmen und zu analysieren. Zusätzlich empfiehlt sich die Durchführung der Eigenfrequenzmessungen in Verbindung mit einem Vergleich der Betriebsmessungen. Eine verbesserte Konstruktion unter Berücksichtigung dieser Aspekte ist im Anschluss durchzuführen, zu analysieren und zu bewerten.

1.3 Gliederung

Das erste Kapitel beschreibt die Motivation, die Aufgabenstellung und die Gliederung der Arbeit. Kapitel zwei erläutert die Grundlagen der Schwingungen und ihrer Sensoren. Zusätzlich stellt das Kapitel das Institut European XFEL vor. Kapitel drei beschreibt die Umgebungsbedingungen, die Probenkammer und die Konstruktion von FDM. Kapitel vier, als Hauptteil der Arbeit, erläutert den Aufbau, die Durchführung und die Analyse der Messungen im Betriebszustand. Ein wichtiger Bestandteil des Kapitels ist die Identifizierung der möglichen Störquellen und Störfrequenzen. Den Schluss des Kapitels bilden eine Zusammenfassung der Messergebnisse und ein Beschluss hinsichtlich der nächsten Schritte. Kapitel fünf repräsentiert die experimentelle Ermittlung der Eigenfrequenz der vorhandenen Konstruktion. Kapitel sechs legt die neue Konstruktion mit Berücksichtigung auf die vorherigen Eigenfrequenzmessungen aus und stellt sie vor. Kapitel sieben befasst sich mit dem Vergleich zwischen der vorhandenen und der neuen Konstruktion in Bezug auf die Steifigkeit. Kapitel acht erläutert die Durchführung und die Analyse der Messungen an der neuen Konstruktion und stellt einen Vergleich zwischen den Messungen an der alten und der neuen Konstruktion anhand der Betriebsbedingungen zusammen. Das letzte Kapitel beinhaltet die Zusammenfassung der Arbeit.

2 Grundlagen

Kapitel zwei erläutert die für das Verständnis der Aufgabenstellung notwendigen theoretischen Grundlagen. Zuerst geschieht die Vorstellung des Forschungsinstituts European XFEL und anschließend des Instruments SCS. Außerdem kommt es zur Erläuterung der Schwingungen und ihrer Sensoren. Dazu folgt eine Beschreibung der speziell benutzten Messgeräte. Im Anschluss steht eine Betrachtung der Fast Fourier Transformation (FFT) und der Übertragungsfunktion an.

2.1 European XFEL GmbH

Die European XFEL GmbH als ein internationales Forschungsinstitut besitzt den weltweit größten Röntgenlaser. Zwölf Länder finanzieren gemeinsam das Institut, und zwar: Dänemark, Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Italien, Polen, Russland, Schweden, Schweiz, Slowakei, Spanien und Ungarn [5].

Der European XFEL erzeugt 27 000 ultrakurze Laserlichtblitze pro Sekunde; die Leuchtstärke davon ist milliardenfach höher als die der besten Röntgenlaser herkömmlicher Art [5]. Mittels dieser Laserlichtblitze haben die Wissenschaftler die Möglichkeit, den atomaren Aufbau von Materialien, Viren und Zellen zu untersuchen.

Der Laser von European XFEL besteht aus drei Bestandteilen. Der erste Abschnitt ist ein 1,7 km langer Teilchenbeschleuniger. Der Teilchenbeschleuniger hat sogenannte schwingende Mikrowellen erzeugende Resonatoren. Die Herstellung der Resonatoren geschieht aus dem Material Niob. Niob verliert bei der Kühlung von -271 °C den elektrischen Widerstand, infolgedessen nimmt der Energieverlust ab, das heißt, die schwingenden Mikrowellen übertragen nahezu alle Energie. Dadurch kommt es zu einer Beschleunigung der Elektronen fast auf bis zu Lichtgeschwindigkeit [6]. Im zweiten Teil durchqueren die beschleunigten Elektronen die sogenannten Undulatoren.

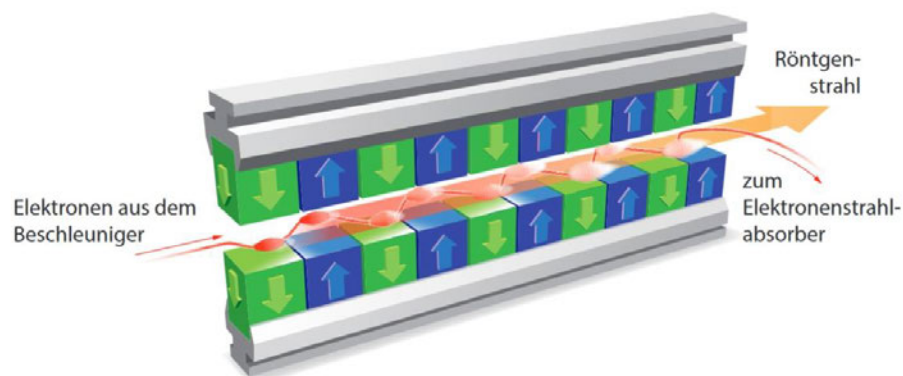


Abbildung 2.1: Undulator von EXFEL [6].

Die Undulatoren verfügen über eine spezielle Magnetanordnung. Dadurch werden die beschleunigten Elektronen auf einen engen Slalomkurs gebracht. Dabei findet das Erzeugen einer Röntgenstrahlung für jedes einzelne Elektron statt. Dieser Effekt verstärkt sich infolge der periodischen Magnetanordnung immer weiter. Abbildung 2.1 stellt das Prinzip der Undulatoren von XFEL dar.

Zusätzlich erzeugt das Licht eine Verstärkung der Wechselwirkung zwischen den Elektronen und der Röntgenstrahlung. Das Licht breitet sich schneller aus als die Elektronen, welche sich in einer Art Slalom bewegen. Dadurch kommt es zur Beschleunigung einiger Elektronen, zum Abbremsen bei anderen. Infolgedessen ordnen sich die Elektronen in zahlreichen dünnen Scheiben an und strahlen im Gleichtakt. Durch diesen Effekt entstehen extrem kurze und intensive Röntgenblitze.

Abbildung 2.2 stellt den unterirdischen Tunnelverlauf sowie die Anordnung der Experimentstationen dar.

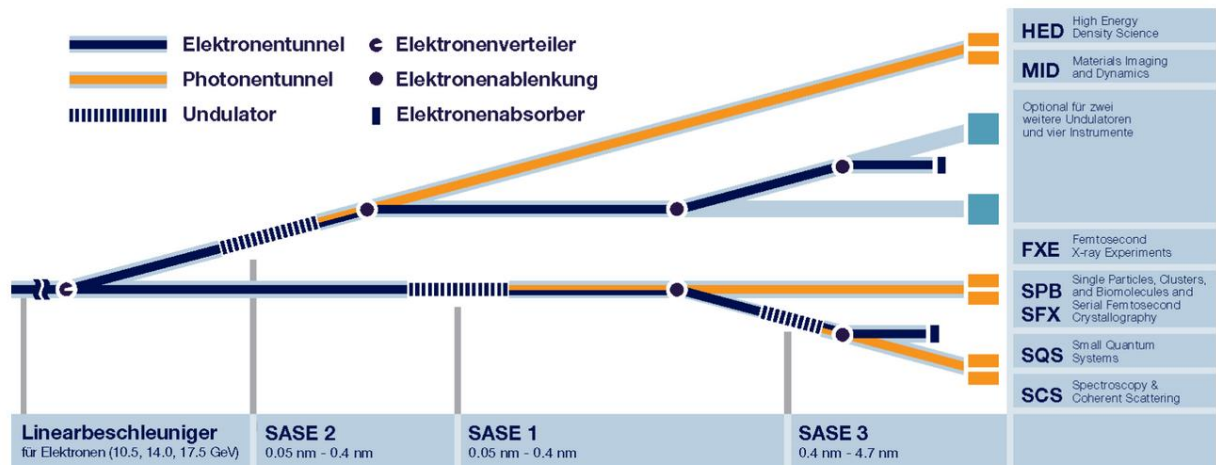


Abbildung 2.2: Unterirdischer Tunnelverlauf [5].

SASE 1-3 bezeichnen die jeweiligen Photonentunnel. In jedem Tunnel befinden sich Undulatoren, die je nach Anforderungen der Wissenschaftler die Strahlung mit speziellen Eigenschaften erzeugen. Es erfolgt eine Leitung der Photonenstrahlung weiter in die Instrumente.

Das Instrument befindet sich aus Strahlenschutzgründen in einer geschlossenen, während des Strahlbetriebes nicht zugänglichen Hütte. Das bedeutet, die Bediener müssen das Instrument von außen fernsteuern. In diesen Strahlenschutzhütten finden die Experimente statt.

Ein Elektronenbeschleuniger gestattet den Einsatz mehrerer Undulatoren gleichzeitig und ermöglicht das Erzeugen der Strahlung mit verschiedenen Eigenschaften. Zurzeit dienen drei Undulatorstrecken dem Betreiben von sechs Experimentierstationen. Diese sind für unterschiedliche Anwendungsgebiete abgestimmt:

1. FXE – Femtosecond X-Ray Experiment

Durchführung der Untersuchungen ultraschneller chemischer und biochemischer Reaktionen in Flüssigkeiten

2. HED – High energy density science

Untersuchungen von der Materie in extremen Zuständen wie Hochtemperatur oder Hochdruck

3. MID – Materials imaging and dynamics

Materialuntersuchungen mit dem harten Röntgenlicht

4. SCS – Spectroscopy and coherent scattering

Untersuchungen von elektronischen und strukturellen Eigenschaften komplexer Materialien, Moleküle und Nanostrukturen mit weichem Röntgenlicht

5. SPB/SFX – Single particles, clusters and biomolecules and serial femtosecond crystallography

Untersuchung der Struktur einzelner Teilchen biologischer Proben

6. SQS – Small quantum systems

Untersuchung der grundlegenden Prozesse der Licht-Materie-Wechselwirkung mit weichem Röntgenlicht

2.2 SCS-Instrument

Das SCS-Instrument beschäftigt sich mit den Untersuchungen von elektronischen und strukturellen Eigenschaften komplexer Materialien, Molekülen und Nanostrukturen mit weichem Röntgenlicht. Weiches Röntgenlicht bedeutet, die Energie des Röntgenlichts liegt in einem Bereich zwischen 250 eV und 3000 eV und einer Wellenlänge von 0,4 bis max 5 nm [1, 3, 4].

Das folgende Unterkapitel beschreibt die Komponenten des SCS-Instruments, in der Fachsprache auch als Beamline bezeichnet.

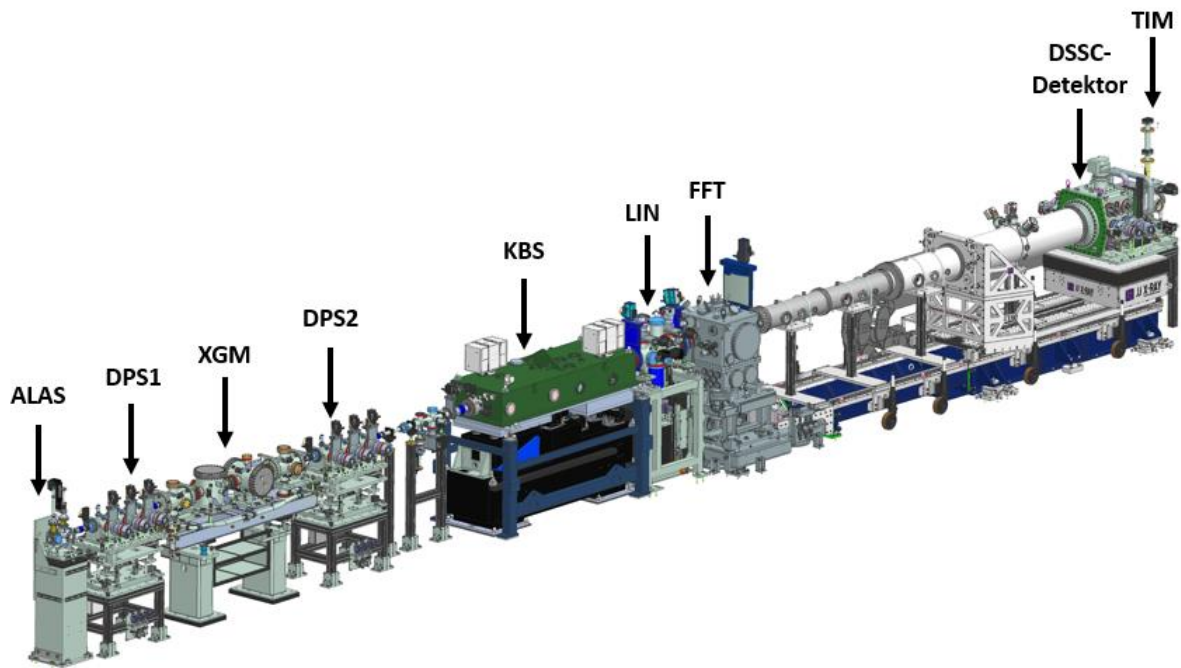


Abbildung 2.3: SCS-Instrument.

Das gesamte SCS-Instrument besteht aus verschiedenen, nachstehend beschriebenen Komponenten. Abbildung 2.3 stellt die Komponenten dar.

Ein SCS-Instrument besteht aus folgenden Komponenten:

- The Alignment Laser System ALAS: Es kommt zur Erzeugung eines sichtbaren, kollinear zum Röntgenstrahl verlaufenden Laserstrahls. Der Laserstrahl dient dem Justieren sämtlicher relevanter Komponenten vor dem Beginn des Experiments.
- Differential Pumping System DPS1 und DPS2: Diese Komponenten bestehen aus Turbopumpen und regulieren den Betriebsdruck in der Beamline. Sie erzeugen ein Vakuumniveau von 10^{-6} mbar bis 10^{-9} mbar .
- X-Ray Gas Monitor (XGM): Gasbasierte Methode zur Bestimmung der Intensität, der Wellenlänge und der Position des Röntgenstrahls.
- Kirkpatrick-Baez Focussing System (KBS): Fokussierung der Strahlgröße im μm Bereich und Umlenkung des Röntgenstrahls in der vertikalen sowie horizontalen Ebene.
- Laser In-Coupling (LIN): Einkopplung eines Infrarotlasers (IR-Laser) aus dem Laserraum in das SCS-Instrument zur Erzeugung spezieller Probenbedingungen. Der Laserstrahl und der Röntgenstrahl verlaufen dann kollinear. Dieser IR Laser erzeugt einen angeregten – daher auch als Pump-Laser bezeichneten – Zustand der Proben.
- The Forward Scattering Fixed Target Chamber (FFT): In dieser Kammer vollzieht sich das Einmontieren der Probe mit einer Ausrichtung zum Röntgenstrahl. Die FFT Kammer hat auch die angebaute vertikale und horizontale FDM, die Bestandteil dieser Arbeit sind.
- DSSC (DEPFET Sensor with Signal Compression)-Detektor: Die Aufzeichnung der Röntgenstrahlbeugung nach der Probe.

- Transmission Intensity Monitor (TIM): Messung der Strahlintensität und Zeit nach der Aufzeichnung der Röntgenstrahlbeugung.

Das Betreiben des gesamten SCS Experiments vollzieht sich in einer Ultrahochvakuumumgebung von 10^{-6} mbar bis $\text{max } 10^{-9} \text{ mbar}$.

Das SCS-Instrument hat Karabo-Software als Steuerungssystem [7]. Die Steuerung sämtlicher dargestellten Komponenten vollzieht sich mittels dieser Software.

2.3 Koordinatensystem

Die Einführung und Erläuterung des Koordinatensystems bezieht sich auf die Konzept- und Konstruktionsphase. Abbildung 2.4 enthält eine Darstellung des Koordinatensystems.

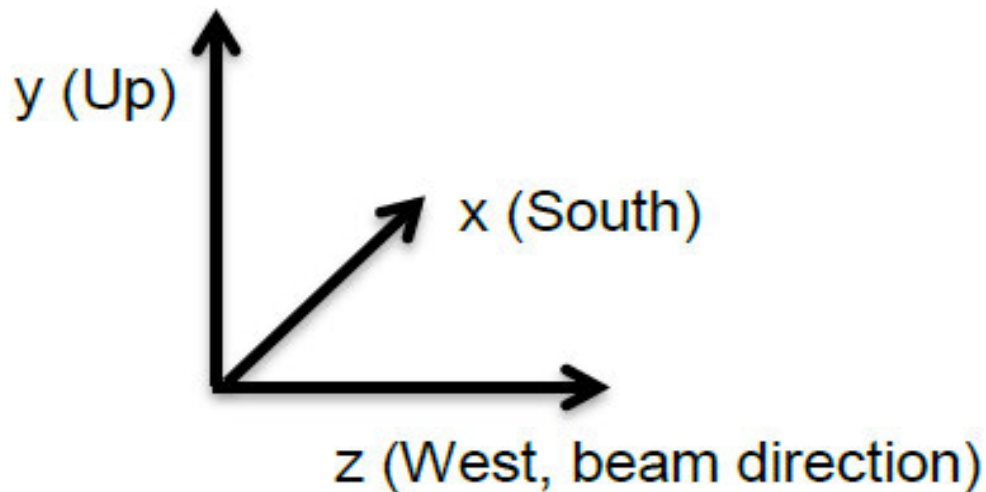


Abbildung 2.4: Koordinatensystem XFEL [8].

Die Z-Achse ist die Röntgenstrahlrichtung, die X-Achse zeigt nach Süden, die Y-Achse nach oben [8].

Sämtliche in der Arbeit verwendeten Koordinatenangaben haben hier ihre Grundlagen.

2.4 Schwingungen

Eine Schwingung ist ein wiederholbarer Bewegungsvorgang, bei dem eine Zustandsgröße mit der Zeit zu- und abnimmt [9, 10]. DIN 1311-1 unterteilt die Schwingungen in zwei Teile: in die deterministische und in die stochastische [11]. Diese sind in der Abbildung 2.5 dargestellt.

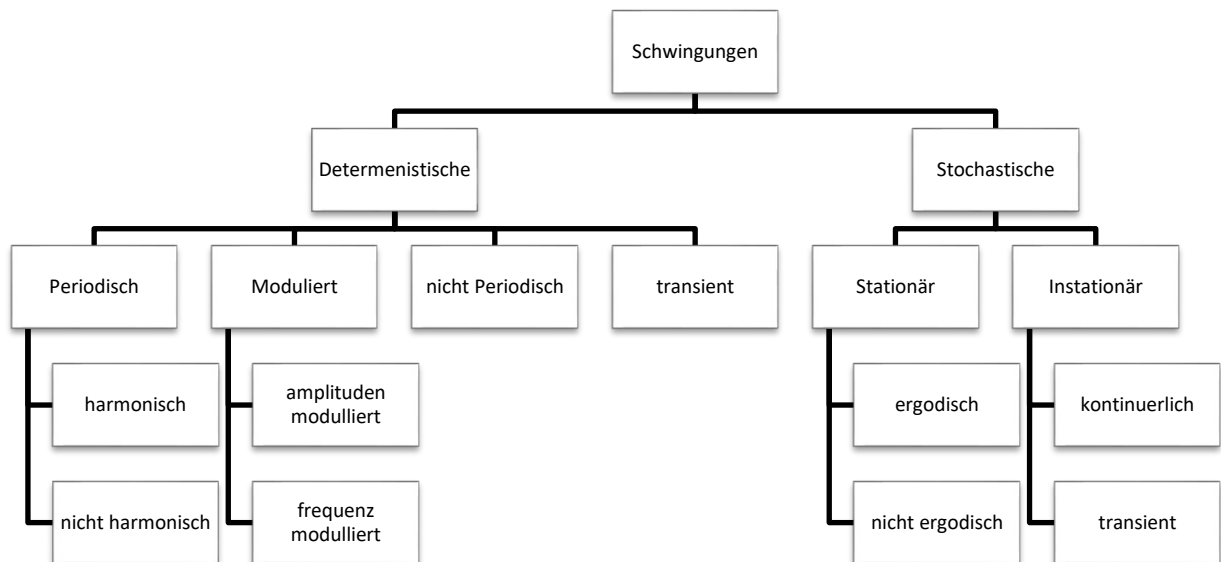


Abbildung 2.5: Unterteilung der Schwingungen nach deren zeitlichem Verlauf [12].

Deterministische Schwingungen lassen sich mittels einer Funktion im Zeitverlauf beschreiben.

Stochastische Schwingungen sind nicht vorhersagbar, infolgedessen ist es nicht möglich, diese im zeitlichen Verlauf mittels einer mathematischen Funktion zu beschreiben [10, 12].

Deterministische Schwingungen bestehen aus weiteren Bestandteilen wie periodisch, moduliert, nicht periodisch und transient [12]. Der Funktionsverlauf $x(t)$ von periodischen Schwingungen wiederholt sich nach einer Periodendauer T :

$$x(t) = x(t + T) \quad (2.1)$$

Die Frequenz f dient dem Beschreiben der Periodendauer T . Die Frequenz der Schwingungen ist die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde, abgekürzt gemessen Hertz Hz [13]:

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.2)$$

Harmonische Schwingungen lassen sich mittels einer harmonischen Zeitfunktion mit beliebigem Phasenwinkel beschreiben [9, 10]:

$$x(t) = \hat{x} \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (2.3)$$

\hat{x} ist dabei die Amplitude der Schwingung. Die Amplitude ist die maximale Auslenkung der Funktion. Abbildung 2.6.

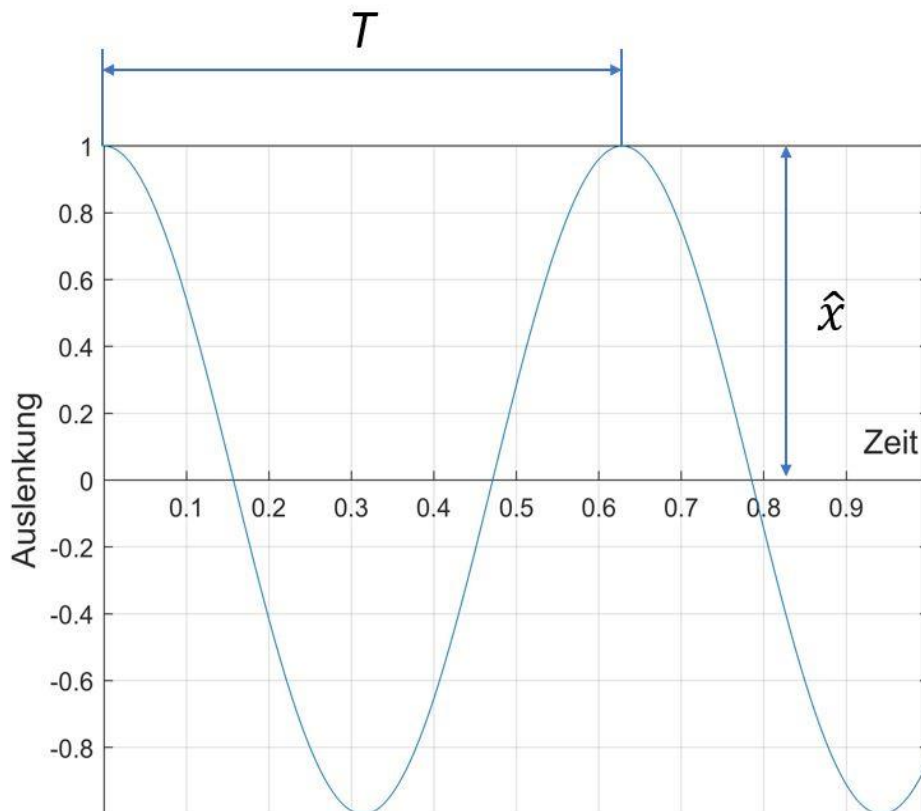


Abbildung 2.6: Beispiel einer harmonischen Schwingung.

φ_0 ist der Phasenwinkel für den Zeitpunkt $t = 0$. ω ist die Kreisfrequenz und bildet einen Zusammenhang mit der Frequenz f [10, 12]:

$$\omega = 2\pi f \quad (2.4)$$

Die Gleichung (2.3) gilt auch als Weg-Zeit-Funktion. Mittels der Differentiation dieser Funktion nach der Zeit ergibt sich die Geschwindigkeit:

$$\dot{x}(t) = -\hat{x} \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) \cdot \omega \quad (2.5)$$

Eine nochmalige Differenzierung der Gleichung (2.5) führt zur Ermittlung der Beschleunigung:

$$\ddot{x}(t) = -\hat{x} \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) \cdot \omega^2 \quad (2.6)$$

Die modulierten Schwingungen sind harmonische, mittels eines modulierenden Vorgangs veränderte Schwingungen. Sollte ein modulierender Vorgang die Amplitude ändern, so handelt es sich um amplitudenmodulierte Schwingungen. Bei frequenzmodulierten Schwingungen ändert sich die Frequenz [12].

Nicht periodische Schwingungen sind Schwingungen, bei denen sich der Zeitverlauf nicht wiederholt.

Transiente Schwingungen beschreiben den Übergang zwischen zwei Zuständen [12].

Stochastische Schwingungen sind nicht vorhersehbar, allerdings ist es möglich, eine statistische Aussage zu treffen, mit welcher Wahrscheinlichkeit diese Schwingung auftritt [12]. Daraus leiten sich der Mittelwert und die Verteilungsfunktion ab. Sollte der Mittelwert im Zeitverlauf unveränderlich bleiben, handelt es sich um eine stationäre stochastische Schwingung. Bei einer permanenten Änderung des Mittelwerts ist die Rede von einer instationären stochastischen Schwingung. Kommt es zur Durchführung mehrerer gleichartiger Prozesse eines zeitlichen Mittelwerts, erhält der Mittelwert zu einem Zeitpunkt den sogenannten Scharmittelwert dazu. Sollte der zeitliche Mittelwert dem Scharmittelwert gleich sein, handelt es sich um einen ergodischen Prozess [12].

Die Schwingungen lassen sich nach dem Entstehungsmechanismus einteilen. Abbildung 2.7 stellt die Einteilung der Schwingungen nach dem Entstehungsmechanismus dar.

Im Falle von autonomen Schwingungen bestimmt das Schwingungssystem selbst die Frequenzen der Zeitfunktion. Die Freien Schwingungen gehören dazu und entstehen im Fall eines sich selbst Überlassens eines Schwingungssystems. Bekommt ein Körper eine einmalige Anregung (gilt als Anfangsbedingung), führt er eine freie Schwingung aus. Beim Zuschlagen einer Autotür als typisches Beispiel schwingt danach die Karosserie. Freie Schwingungen heißen auch Eigenschwingungen [9, 12, 14]. Die Frequenz, mit der das schwingungsfähige System nach einmaliger Anregung schwingt, ist die Eigenschwingungsfrequenz oder die Eigenfrequenz [9, 12, 15, 16].

Selbsterregte Schwingungen entstehen mittels der Energiezufuhr zum Schwingungssystem, beispielweise bei einem Flugzeugtragflügel. Die Energiezufuhr erfolgt mittels der Luftströmung [12, 13].

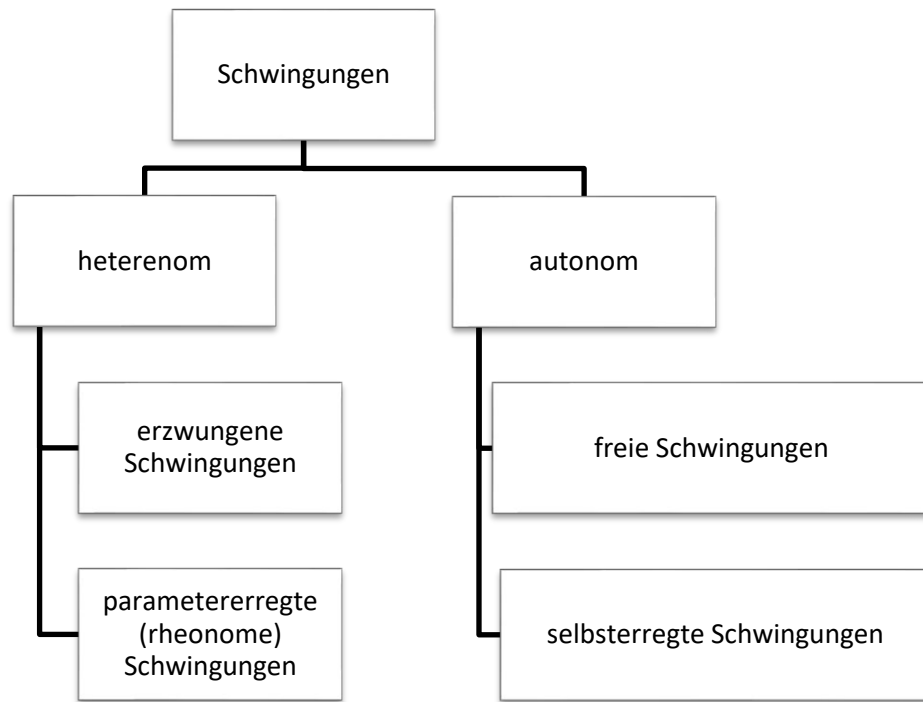


Abbildung 2.7: Einteilung der Schwingungen nach dem Entstehungsmechanismus [12].

Heteronome Schwingungen sind von der äußeren Auswirkung aufs System entstehende Schwingungen, das System schwingt mit der Frequenz dieser Auswirkung. Die Zuführung der äußeren Einwirkung auf das System ruft erzwungene Schwingungen hervor. Parametererregte Schwingungen oder rheonome Schwingungen entstehen durch die zeitliche Änderung der Parameter im Schwingungssystem. Als Parameter können Trägheitsgrößen, Dämpfungswerte oder Federkonstante dienen [15]. Ein Beispiel dafür ist die Torsionsschwingung im Getriebe. Während des Abwälzvorgangs von Zahnflanken ändert sich die Torsionssteifigkeit der Welle zeitabhängig. Zu der Auslenkung (Zahnraderverspannung) sind die Voraussetzungen für parametererregte Schwingungen gegeben. [12]. Ein weiteres Beispiel für diese Schwingung ist eine Schaukel [15]. Um die Schaukel in Gang bringen zu können, gilt es, das Neigen und Wiederaufrichten des Körpers mittels eines periodischen Knie-Beugens und -Streckens so auszuführen, damit sich während des Schaukelns der Schwerpunkt des Körpers ändert. Der Schwerpunkt des Körpers hebt sich während des Ganges durch die tiefste Lage und senkt sich in den Bereichen des Größtausschlages wieder [13].

2.5 Schwingungssensoren

Schwingungsaufnehmer bzw. die Schwingungssensoren wandeln die Eingangsgröße in eine (meist elektrische) Ausgabegröße um. Als Eingangsgröße lassen sich die verschiedenen Parameter nutzen. Laut DIN 45662:1996 – 12 sind die Schwingungssensoren nur für eine der kinematischen Schwingungsgrößen empfindlich [12, 17], demnach für translatorische,

rotatorische oder deformatrische Bewegungen. In Tabelle 1 sind alle kinematischen Größen sowie die Bezeichnungen und die Einheiten dargestellt [12, 18].

Kinematische Größe	Bezeichnung	Formelzeichen	Einheiten
Translatorische Bewegung	Weg (Amplitude)	$s(t), \hat{x}(t)$	m
	Geschwindigkeit	$v(t), \dot{x}(t)$	m/s
	Beschleunigung	$a(t), \ddot{x}(t)$	m/s ²
Rotatorische Bewegung	Drehwinkel	$\beta(t)$	Rad
	Drehgeschwindigkeit	$\dot{\beta}(t), \omega(t)$	Rad/s
	Drehbeschleunigung	$\ddot{\beta}(t), \dot{\omega}(t)$	Rad/s ²
Deformatrische Bewegung	Dehnung	$\epsilon(t)$	$\mu\text{m/m}$
	Torsion	$\gamma(t)$	Rad/m

Tabelle 1: Unterteilung der Eingangsgrößen nach DIN 45661:2013-03.

Alle Schwingungssensoren lassen sich nach Relativ- und Absolutaufnehmer unterteilen.

Relativaufnahme bedeutet, der Relativaufnehmer bzw. der Sensor ist nicht direkt an dem Messort befestigt, sondern daneben, und die Übertragung der kinematischen Größen vollzieht sich formschlüssig, kraftschlüssig oder berührungsfrei [12].

Ein typisches Beispiel dafür ist ein Wegaufnehmer nach dem berührungslos funktionierenden Lasertriangulationsprinzip, dargestellt in Abbildung 2.8.

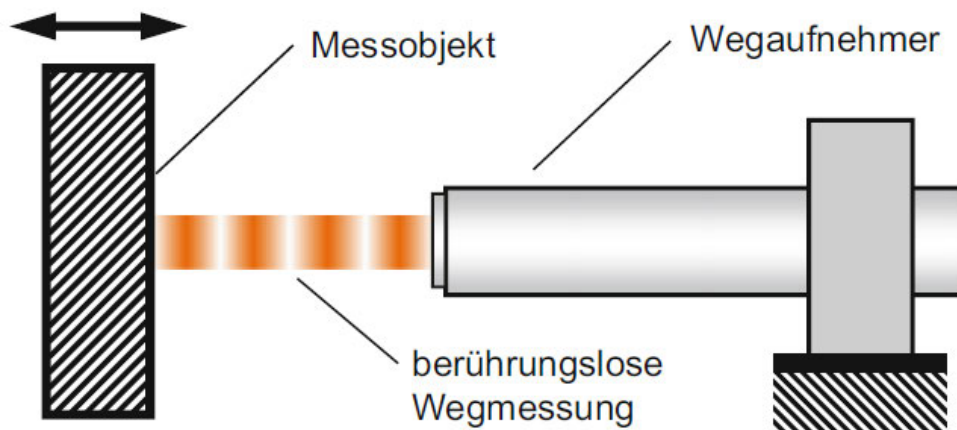


Abbildung 2.8: Wegaufnehmer nach dem Berührungslosenprinzip [12].

Triangulation bedeutet die Abstandsmessung durch Winkelberechnung. Es wird auf der Oberfläche des Messobjektes ein fokussierter Laserpunkt erzeugt, siehe Abbildung 2.9. Ein benachbartes, ortsempfindliches Sensorelement empfängt das reflektierte Licht dieses Laserpunktes abhängig von der Entfernung unter einem bestimmten Winkel und wertet es als Abstand des Messobjektes vom Wegaufnehmer aus [12, 19]. Die Schwingungen errechnen sich mittels der zeitlichen Änderung der Entfernung.

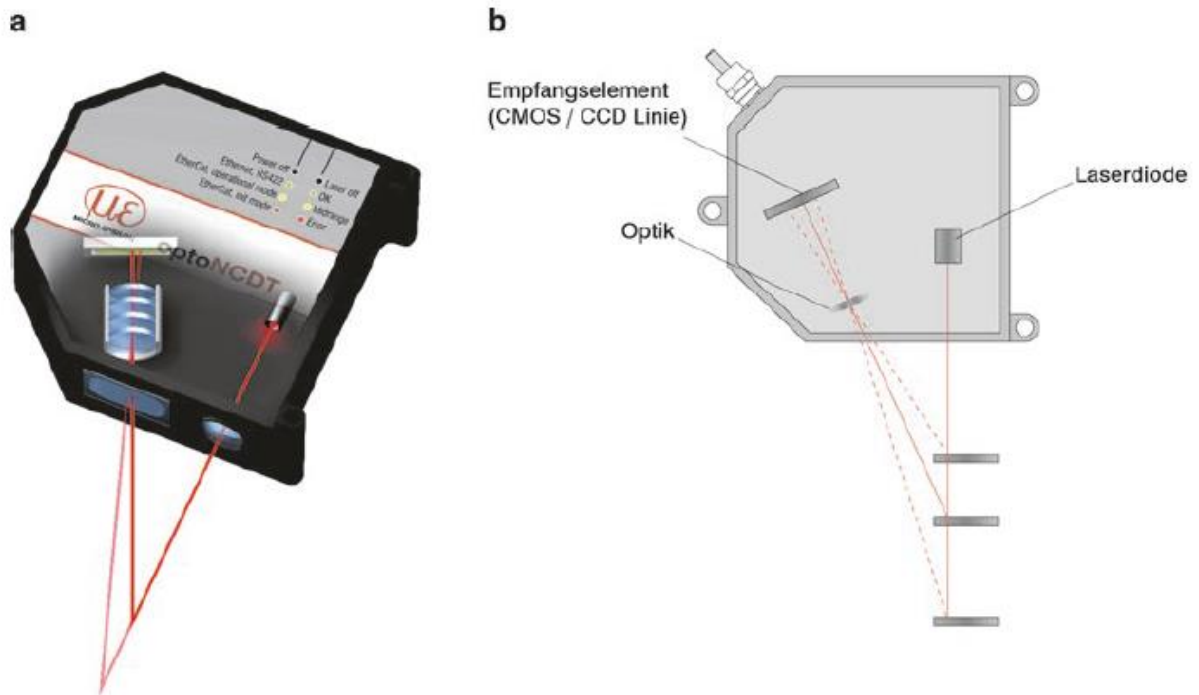


Abbildung 2.9: Wegaufnehmer nach dem Lasertriangulationsprinzip (a), Messprinzip (b), (Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG) [12, 19].

Relativaufnehmer haben einen sehr großen Nachteil. Es gestaltet sich in der Praxis schwierig, eine Messung relativ zu einem festen Bezugssystem vorzunehmen und einen festen Bezugspunkt zu verwirklichen [12].

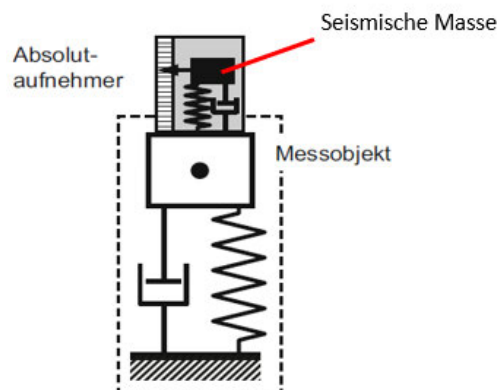


Abbildung 2.10: Prinzip des Absolutaufnehmers [12].

Im Gegensatz zum Relativaufnehmer ist der Absolutaufnehmer direkt am Messort befestigt. Diese Aufnehmer sind auch als seismische Aufnehmer zu bezeichnen, denn dieser nutzt die Trägheitseigenschaften der Masse im Schwerfeld der Erde [12]. Abbildung 2.10 stellt das Prinzip des Absolutaufnehmers dar. Der Absolutaufnehmer besitzt ein schwingungsfähiges „Feder-Masse-System“, bestehend aus einer seismischen Masse, einer Feder (ein Piezoelement, beschrieben in Kapitel 2.5) und teilweise einer Dämpfung. Die Bewegung des Messobjektes an der Befestigungsstelle gegenüber der seismischen Masse im Aufnehmer findet Verwendung als Messgröße [12]. Der Absolutaufnehmer misst in einem absolut festen Bezugssystem und besitzt eine kleine, leichte und robuste Gestaltung [12].

Die Auswahl des Sensors sowie die Messgröße hängen von der Messaufgabe ab. Die Entscheidung hinsichtlich des Sensors ist demnach abhängig vom Aufnehmer für den jeweiligen Frequenzbereich und der jeweiligen kinematischen Größe. Tabelle 2 beinhaltet eine Zusammenfassung der Aufnehmer und ihrer technischen Eigenschaften.

Kinematische Größe	Relativaufnehmer	Absolutaufnehmer
Weg (Amplitude)	<ul style="list-style-type: none"> • Potenziometrisch, • Kapazitiv • Induktiv • Wirbelstrom • Lasertriangulation 	
Geschwindigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Vibrometrie 	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrodynamisch • Elektromagnetisch
Beschleunigung		<ul style="list-style-type: none"> • Piezoelektrisch • Piezoresistiv • Kapazitiv • DMS

Tabelle 2: Auswahl des Aufnehmers und der kinematischen Größe [12].

Ist die messende Größe nicht festgelegt, gibt Tabelle 3 Hinweise zu der Auswahl [12]. Laut Tabelle passt die Messung der Beschleunigung am besten für hohe Frequenzen, gemessen als Absolutaufnehmer. Die Amplitude ist besser geeignet für tiefe Frequenzen, die Messung erfolgt mittels eines Relativaufnehmers.

Beschleunigung	Geschwindigkeit	Amplitude (Weg)
<ul style="list-style-type: none"> • Für hohe Frequenzen • Massenkräfte (Kraft proportional zur Beschleunigung) • Ermittlung der dynamischen Masse • Vergleichsweise kleine Aufnehmer mit geringerer Masse 	<ul style="list-style-type: none"> • Breiter Frequenzbereich für viele Messaufgaben • Dämpferkräfte (Kraft proportional zur Geschwindigkeit) • Ermittlung mechanischer Impedanz (Widerstand des Materials gegen mechanische Schwingung) • Zustandsüberwachung von Maschinen 	<ul style="list-style-type: none"> • Für tiefe Frequenzen • Aufnehmer benötigen Bezugspunkt • Federkräfte (Kraft proportional Weg) • Messung von Relativbewegungen und möglicher Kollisionen an Bauteilen

Tabelle 3: Hinweise zur Auswahl der kinematischen Größen [12].

Angesichts der jetzigen Konstruktion dürften während des Betriebes relativ hohe Frequenzen wirken. Außerdem gibt es eventuell keinen stabilen Untergrund für den Relativaufnehmer am Messort. Aus diesen Gründen kam es zur Verwendung eines Beschleunigungssensors für die Messungen. Die Beschleunigungssensoren werden als Absolutaufnehmer gefertigt und benutzen Piezokristalle. Kapitel 2.6 betrachtet diesen Sensor detaillierter.

2.6 IEPE Sensoren

Dieses Kapitel beschreibt die Funktionsweise des Integrated Electronics Piezo Electric (IEPE) – Sensors sowie die Auswahl der Abtastrate.

Die IEPE Sensoren nutzen das Piezoelement für die Arbeit. Das Piezoelement ist ein Körper, der einen piezoelektrischen Effekt erzeugen kann. Der piezoelektrische Effekt ist die Erzeugung einer elektrischen Ladung bei der Deformation, demnach einer Verformung des Festkörpers [12, 20].

Die atomare Ursache des piezoelektrischen Effekts ist die Polarisationsänderung (Dipoldichte im Volumen) durch Deformation des Materials [21]. Zusammen mit der Polarisationsänderung ändert sich die Dichte von Oberflächenladungen, welche als Spannung zwischen den entsprechenden Oberflächen messbar ist [21].

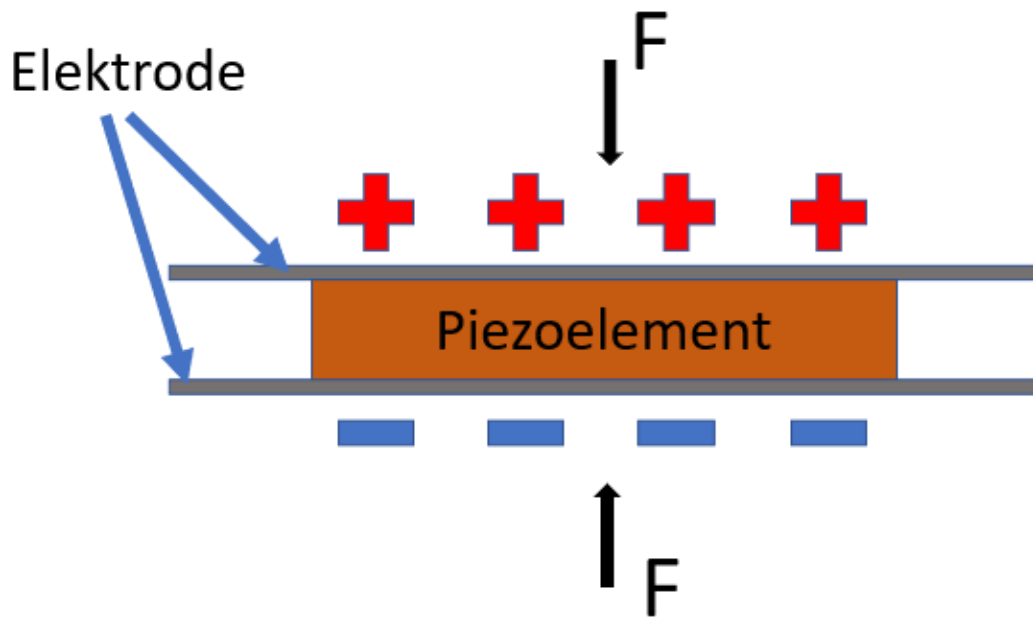


Abbildung 2.11: Prinzip des piezoelektrischen Effektes.

Die äußere Einwirkung der Kraft F (siehe Abbildung 2.11) verformt das Piezoelement, infolgedessen ändern sich die Strukturelemente, dadurch entstehen Dipole, welche die elektrische Spannung bilden [20]. Die Ableitung dieser Spannung erfolgt weiter mittels der Elektroden, auch als Strom zu nennen. Das Piezoelement lässt sich aus verschiedenen Piezomaterialien herstellen. Dazu gehören: Quarz, Lithiumniobat, Turmalin oder Piezokeramiken wie Bariumtitanat oder Bleizirkonat-Bleititanat-Mischkeramiken (PZT), die heutzutage sehr verbreitet sind [12].

IEPE Sensoren besitzen einen integrierten Ladungsverstärker, der das Ladungssignal bzw. den Strom des Piezoelements in ein Spannungssignal am Ausgang umwandelt.

Die IEPE Technologie verwendet den piezoelektrischen Effekt und gestattet die Realisierung der Stromversorgung des Sensors sowie der Signalübertragung nur mit einem Kabel von bis zu max. 10 m Länge, ohne dass es zu Messfehlern durch die Kabelbewegung kommt [22, 23].

2.6.1 Kistler triaxialer Beschleunigungssensor und Petrowachs

Für die weiteren Messungen findet der triaxiale Beschleunigungssensor der Kistler AG Verwendung. Dieser benutzt den piezokeramischen Biegebalken als Piezoelement. Dieser Sensor ermöglicht die Aufnahme der Werte in drei orthogonalen Achsen gleichzeitig [23]. Der Sensor findet auch Bezeichnung als Messkopf. Der Sensor ist in Abbildung 2.12 dargestellt.

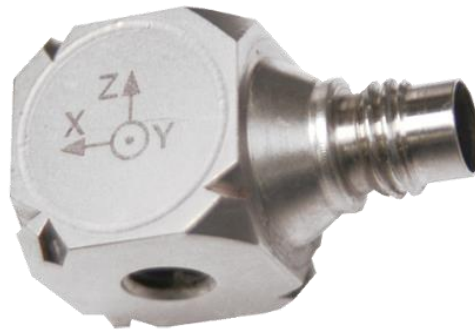


Abbildung 2.12: Triaxialer Beschleunigungssensor Typ8688a5 der Kistler AG [23, 24].

Das Gehäuse des Sensors ist aus Titan hergestellt, wodurch dieser sehr leicht ist. Sein Gewicht beträgt 6,7 Gramm. Das geringe Gewicht bedeutet eine geringere Massenzuladung an den Messstrukturen, die bei der Vibrationsmessung eine wichtige Rolle spielt [23]. Die Massenzuladung führt zu der Dämpfungsänderung, siehe Formel (2.24), was bei der Vibrationsmessung unerwünscht ist. Er hat folgende Abmaße: 12,5 mm Höhe x 12,5 mm Breite x 12,5 mm Länge und besitzt eine Würfelform, welche die Befestigung des Sensors am Messort auf jeder Seite mithilfe von extra entwickeltem Petrowachs, dargestellt in der Abbildung 2.14, erlaubt. Das Gehäuse des Sensors hat ein $\frac{1}{4}$ Außenzollgewinde, das zum Anschluss des Kabels dient, und ein 10-32 Innenzollgewinde, hauptsächlich genutzt für die Befestigung an der Messfläche, siehe Abbildung 2.12. Bei Bedarf kann die Befestigung des Gehäuses an der Messfläche mit einem extra Montageclip (Abbildung 2.13) erfolgen. Mit diesem Clip lässt sich der Sensor in einer der drei Sensorachsen ausrichten [23].



Abbildung 2.13: Der Sensor mit dem Clip [23].

Der Beschleunigungssensor erlaubt die Vibrationsmessung im Bereich von -5 g bis +5 g. Der messbare Frequenzbereich ist von 0,5 Hz bis 3 000 Hz [23]. Die detaillierten technischen Daten sind in Anhang A1 beigefügt.

Üblicherweise vor der Übergabe des Sensors an den Kunden erfolgen die Kalibrierung und die Beifügung des entsprechenden Nachweises bzw. des Kalibrierscheins. Der Kalibrierschein ist in Anhang A7 beigefügt.

Das Petrowachs (Abbildung 2.14) ist ein speziell gemischtes, entwickeltes Erdölprodukt, um die Bewegungen eines Testobjekts auf den Sensor zu übertragen. Das bietet eine bequeme Befestigung des Sensors auf der inhomogenen Oberfläche in nahezu jeder Ausrichtung.

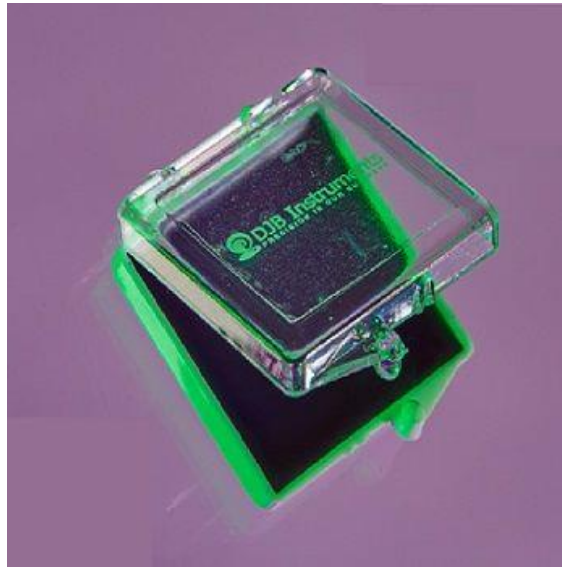


Abbildung 2.14: Petrowachs [25].

Zusammen mit dem Sensor bildet das Petrowachs ein stark gedämpftes Feder-Masse-System (Kapitel 2.5). Der nutzbare Frequenzgang des Sensors gerät somit zu einer Funktion der Aufnehmermasse, der Montagefläche, der Wachtiefe und der Temperatur. Das Petrowachs für die Verwendung ist bei einer Raumtemperatur von 20 °C bis 26 °C nach DIN EN ISO 7730 vorgesehen [25–27].

2.6.2 Kistler Ladungsverstärker

Der Beschleunigungssensor mit IEPE Technologie wandelt die Ladung des Piezoelements in ein Spannungssignal um. Um die Messung auswerten zu können, ist dieses Spannungssignal zu erfassen, zu digitalisieren und zu verarbeiten. Dies ist mittels eines sogenannten Ladungsverstärkers zu erreichen. Der Ladungsverstärker ist in der Abbildung 2.15 dargestellt [28].

Dieser Ladungsverstärker hat vier digitale Eingangskanäle für den Anschluss des Kabels des Sensors, Kanal 1, 2, 3 für X-, Y- und Z-Achsen entsprechend. An den vierten Kanal kann der Anschluss des Impulshammers erfolgen, der notwendig ist, um die Modalanalyse durchführen zu können, siehe Kapitel 4.1. Die anderen vier Kanäle sind Analogausgänge mit der

Möglichkeit, die digitalen Eingangssignale als Spannungssignale ausgeben und über ein Kabel mit dem BNS-Anschluss an ein System zur Weiterverarbeitung übertragen zu können.



Abbildung 2.15: 4-Kanal Labor-Ladungsverstärker & Datenerfassung [28].

Der Verstärker hat integrierte Hochpass-, Tiefpass- und Kerbfilter. Sie lassen sich nach Bedarf einschalten. Der Hochpassfilter trennt einen Anteil des Signals und bestimmt damit die untere Grenzfrequenz bzw. er lässt nur die hochfrequenten Signale durch. Die unterste Grenzfrequenz für den Hochpassfilter ist in Schritten von 0,1 Hz wählbar und kann im Frequenzbereich zwischen 0,1 Hz und 10 000 Hz liegen. Im Gegensatz dazu trennt ein Tiefpassfilter die hohen Frequenzen ab und lässt nur tieffrequente Signale durch. Die Grenzfrequenz für den Tiefpassfilter ist mit dem Schritt von einem Hz wählbar, beträgt ≥ 10 Hz und kann im Frequenzbereich zwischen 10 Hz und 100 000 Hz liegen. Demnach werden Signale mit einer minimalen Frequenz von 10 Hz durchgelassen. Der Kerbfilter filtert Frequenzen in einem Frequenzbereich heraus. Bei diesem Filter beträgt die Grenzfrequenz ≥ 10 Hz, der Schritt ist ein Hz und der Frequenzbereich liegt zwischen 10 Hz und 100 000 Hz [12, 28–30].

Die Bedienung des Verstärkers kann via Webinterface oder mittels einer speziell entwickelten Software LabAmp erfolgen. Die Software kann die gemessenen Dateien in einem Text (TXT) Format exportieren. Die detaillierten technischen Daten des Verstärkers sind in Anhang A2 beigefügt.

2.6.3 Impulshammer

Der Impulshammer hat einen piezoelektrischen Kraftsensor, der die Kraft eines Anschlages misst. Die Anregung der Schwingung der Struktur erfolgt mittels des Schlagimpulses [31]. Der Hammer ist in Abbildung 2.16 dargestellt.



Abbildung 2.16: Impulshammer Kistler Typ 9722A [31].

Der Kraftsensor verfügt über eine integrierte IEPE Technologie und kann eine Kraft bis zu 500 N messen. Der Anschluss des Hammers erfolgt mittels eines Kabels am Ladungsverstärker mit einer dort stattfindenden Ermittlung der ausgehenden Signale vom Hammer. Der Hammer kommt bei der Ermittlung der Eigenfrequenz zum Einsatz. Die detaillierten technischen Daten sind in Anhang A3 beigefügt. Mittels der mitgelieferten Hammerspitzen und einer Zusatzmasse (Metallstück 50 g mit Innengewinde), befestigt am Hammerkopf gegenüber der Hammerspitze, ist das Anregungsfrequenzspektrum (Abbildung 2.17) anzupassen [32]. Alle Hammerspitzen sind in Tabelle 4 genannt.

Tabelle 4 vermittelt eine Übersicht zu den einzelnen Typen der Hammerspitzen bzw. Schlagspitzen aus der Abbildung 2.17 her. Die Hammerspitzen haben auch eine Farbkodierung: Rot, Grün, Weiß.

Typ	Beschreibung
9912	Schlagspitze aus Weichgummi (Grau)
9910	Schlagspitze aus mittelhartem Gummi (Rot)
9908	Schlagspitze aus Hartgummi (Grün)
9906	Schlagspitze aus Weich-PVC
9904A	Schlagspitze aus Stahl, mit Delrinaufsatz (Kunststoffaufsatz, weiße Farbe).
9902A	Schlagspitze aus Stahl

Tabelle 4: Typ der Schlagspitzen und die Beschreibungen derselben [24, 31, 32].

Jede Hammerspitze ist für ihren Frequenzbereich bestimmt. Aus der Abbildung 2.17 ist es klar, bei der Notwendigkeit, hohe Frequenzen anzuregen, ist die Schlagspitze aus Stahl (Typ 9902A) zu verwenden. Gilt es, die tiefen Frequenzen anzuregen, ist die Schlagspitze aus Weichgummi (Typ 9912) zu verwenden.

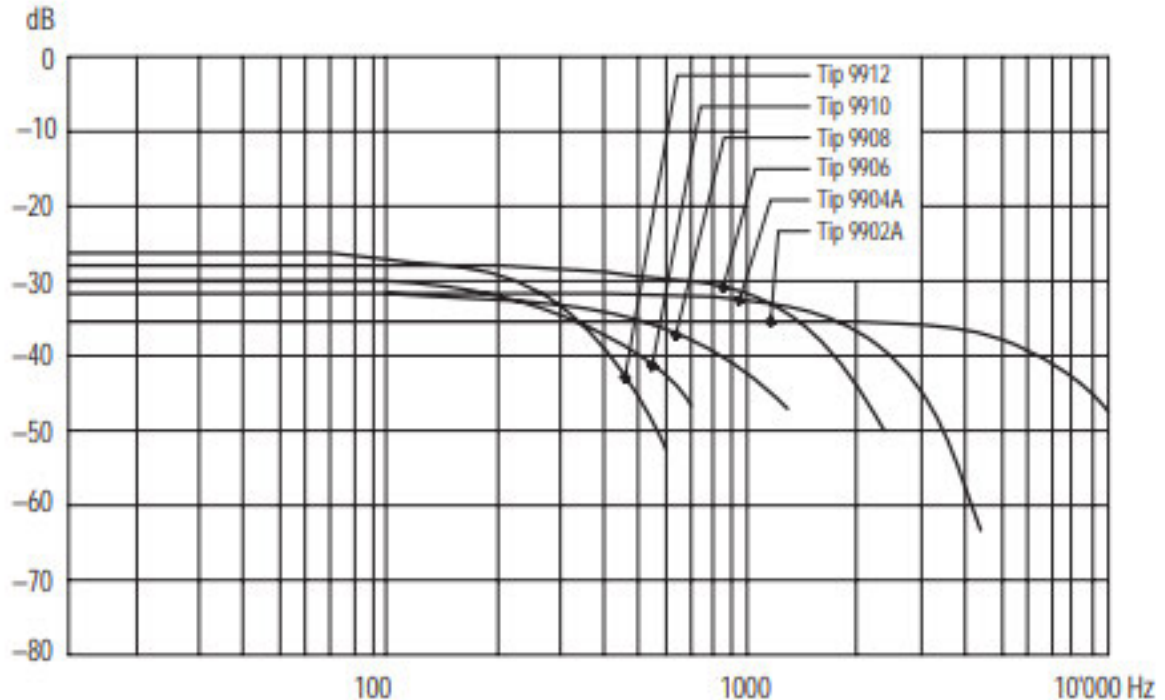


Abbildung 2.17: Frequenzspektrum verschiedener Anschlagspitzen [32].

2.7 Ermittlung der Abtastrate

Die Abtastrate (auch als Abtastfrequenz, Samplingrate, Samplerate oder Samplingfrequenz bezeichnet) ist die Häufigkeit, mit der ein Signal abgetastet bzw. gemessen wird. Die Wahl der Abtastrate muss so erfolgen, damit es möglich ist, das abgetastete Signal ohne Informationsverlust zu rekonstruieren [12]. Die Abtastrate ist entscheidend dafür, ob das gemessene Signal brauchbar ist. Sollte die Abtastrate zu groß sein, ist das Messergebnis auf jeden Fall brauchbar. Allerdings steigt bei einer großen Abtastrate auch die Datenmenge, was einen zeitlichen Einfluss auf die weitere Auswertung hat. Bei einer zu geringen Abtastrate ist das Messergebnis nicht brauchbar, das Signal war nicht genug abgetastet, infolgedessen ist eine fehlerhafte Darstellung möglich [12, 33].

Die Ermittlung der Abtastrate f_s erfolgt nach dem Abtasttheorem. Demzufolge soll die Abtastfrequenz größer sein als die doppelte maximale Frequenz f_{max} im Signal [12, 33, 34]:

$$f_s > 2 \cdot f_{max} \quad (2.7)$$

Das SCS-Instrument hat viele verschiedene, mit unterschiedlichen Frequenzen funktionierende Komponenten. Vermutlich kommt die maximale Frequenz f_{max} , die während des Betriebes entsteht, von den Turbopumpen, die das Ultrahochvakuum aufrechterhalten, daher ist die Drehfrequenz dieser Turbopumpe die maximale Frequenz.

Im SCS-Instrument sind zwei Arten der Turbopumpen installiert: Pfeiffer HiPace 300 und HiPace 700. Laut den technischen Daten beträgt die Betriebsfrequenz 1 000 Hz und 820 Hz entsprechend [35, 36]. Daher ist von einer maximalen Frequenz von f_{max} 1 000 Hz auszugehen. Nach der Formel (2.7) ergibt sich eine Abtastrate größer als 2 000 Hz:

$$f_s > 2 \cdot 1000 = 2000 \text{ Hz} \quad (2.8)$$

Bei den Messungen in der Praxis ist eine Abtastrate im Bereich von fünf bis zehn Mal höher als die maximale Frequenz zu empfehlen. Die maximale Frequenz f_{max} im Betrieb könnte falsch abgeschätzt sein [33]. Deswegen empfiehlt sich das Arbeiten mit einer Abtastrate f_s von 12 500 Hz.

2.8 Fast Fourier Transformation (FFT)

Die Fast Fourier Transformation – ins Deutsche übersetzt Schnelle Fourier Transformation – ist ein rechenoptimierter Algorithmus einer Diskreten Fourier Transformation (DFT). Dieser Algorithmus erlaubt die Umwandlung eines Signals aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich, siehe Abbildung 2.18 [37, 38].

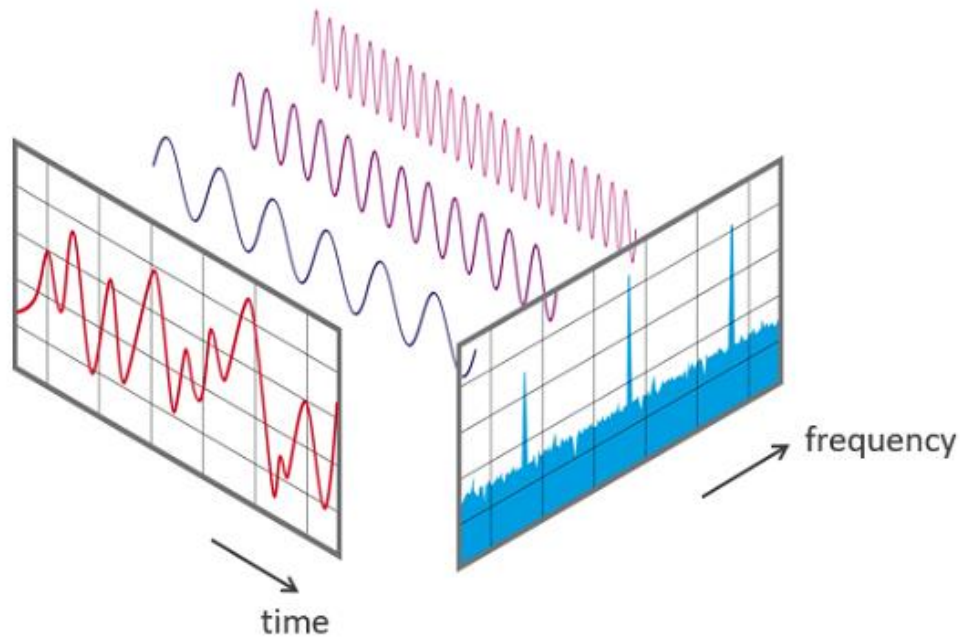


Abbildung 2.18: Umwandlung eines Signals aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich [37].

Mathematisch gesehen ist die schnelle Fourier Transformation $X(f)$ in der Formel (2.9) dargestellt:

$$X(f) = \mathbf{F}\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.9)$$

$x(t)$ ist ein Eingangssignal in dem Zeitbereich, f_t ist die Frequenz für die Analyse [39–41].

In ähnlicher Weise bildet die diskrete Fourier-Transformation (DFT) den Zeitbereich im Frequenzbereich ab. Die Definition für DFT ist in der Formel (2.10) abgebildet:

$$y_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j2\pi kn/N} \quad (2.10)$$

y_k ist das Ergebnis der Transformation, x_n das Eingangssignal und N die Anzahl der Elemente. Allerdings ist der Rechneraufwand sehr hoch, deswegen kommt meistens die schnelle Fourier Transformation zum Einsatz.

Der errechnete Frequenzbereich f_n lässt sich auch als Bandbreite oder Nyquist-Frequenz bezeichnen, der zwischen 0 und der halben Abtastrate (siehe Kapitel 2.7) liegt, die halbe Abtastrate als Wert kommt nicht mehr in diesem Bereich vor [38]. Der Frequenzbereich hat halb so viele Werte wie der Zeitbereich (2.11):

$$f_n = \frac{f_s}{2} = \frac{12500}{2} = 6250 \text{ Hz} \quad (2.11)$$

f_s ist die Abtastrate. Für die Messungen sind zwei Parameter entscheidend: die Abtastrate f_s und die Anzahl von Abtastwerten oder ‚Samples‘ bzw. die Blocklänge BL (2.12) [37, 38]:

$$BL = f_s \cdot D \quad (2.12)$$

f_s ist die Abtastrate und D die entsprechende Messdauer in Sekunden. Erhöht sich bei konstanter Abtastrate die Messdauer D , ergeben sich viel mehr Werte. Eine kleine Blocklänge BL führt zu den schnellen Messwiederholungen mit grober Frequenzauflösung, im Gegensatz dazu führt eine größere Blocklänge zu langsameren Messwiederholungen mit feiner Frequenzauflösung.

Frequenzauflösung d_f ist ein Frequenzabstand zwischen zwei Messergebnissen und errechnet sich aus der Abtastrate f_s und der Blocklänge BL (2.13) [37, 38]:

$$d_f = \frac{f_s}{BL} \quad (2.13)$$

In der Abbildung 2.19 deutlich zu sehen ist der Unterschied zwischen kleiner und hoher Blocklänge.

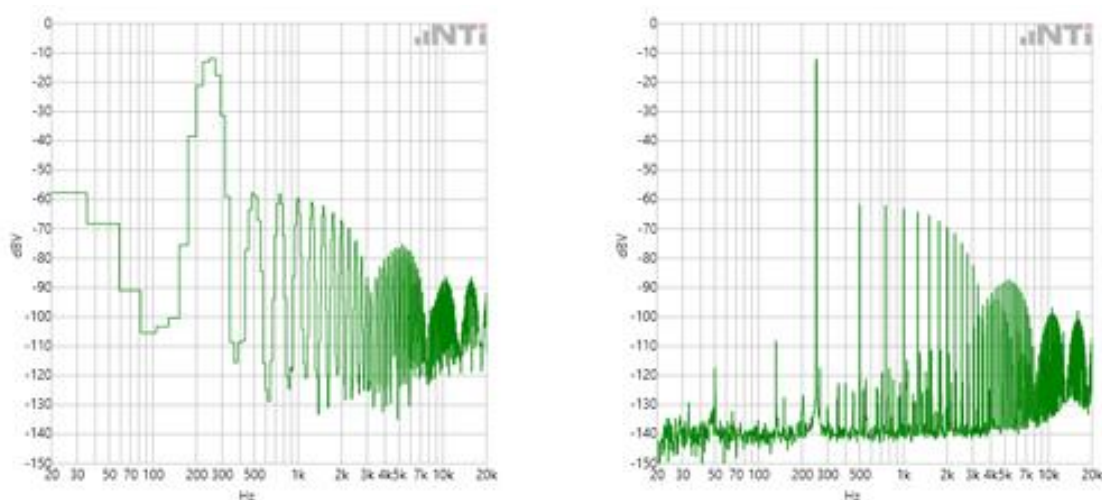


Abbildung 2.19: Darstellung der FFT eines Signals mit niedriger (links) und hoher (rechts) Blocklänge [37].

Das Erfordernis des Abtastens der genaueren Frequenzauflösung bzw. die detaillierte Untersuchung der Frequenzen ergibt nach Abbildung 2.19 die Durchführung einer hohen Blocklänge und damit einer längeren Messdauer [34].

2.9 Mittelwert und Standardabweichung

Der Mittelwert M_w oder der Durchschnitt in der Statistik ist die arithmetische Summe der gegebenen Werte M_i geteilt durch die Anzahl der Werte n . Der Mittelwert M_w zählt zu einem

der wichtigsten Lagemaße. Die Formel zur Ermittlung des Mittelwerts ist in (2.14) gegeben [42, 43]:

$$M_w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_i \quad (2.14)$$

Die Standardabweichung S_a ist ein Dispersionsmaß und bezeichnet die durchschnittliche Streuung des Mittelwertes M_w . Die Formel ist in (2.15) gegeben [42, 43]:

$$S_a = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (M_i - M_w)^2} \quad (2.15)$$

Die vorliegende Arbeit verwendet den Mittelwert und die Standardabweichung zur Analyse der Messergebnisse.

2.10 Übertragungsfunktion

Die Übertragungsfunktion $H(j\omega)$ verknüpft die Aus- und Eingangsgrößen eines schwingungsfähigen Systems. Diese sind im Frequenz- oder im Zeitbereich darstellbar. Die Messpraxis bevorzugt die Frequenzdarstellung [12]:

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \quad (2.16)$$

$Y(j\omega)$ ist eine komplexe Zahl des Ausgangs und $X(j\omega)$ des Eingangs. $H(j\omega)$ dient als Übertragungsfunktion der Kreisfrequenz. In Abbildung 2.20 sind die Beziehungen zwischen Ein- und Ausgangssignal in einem linearen zeitinvarianten System dargestellt [12]. Das lineare zeitinvariante System (LZI) ist ein System, welches sowohl ein Verhalten als auch Eigenschaften der Linearität aufweist als auch unabhängig von der Zeit ist [44–46].

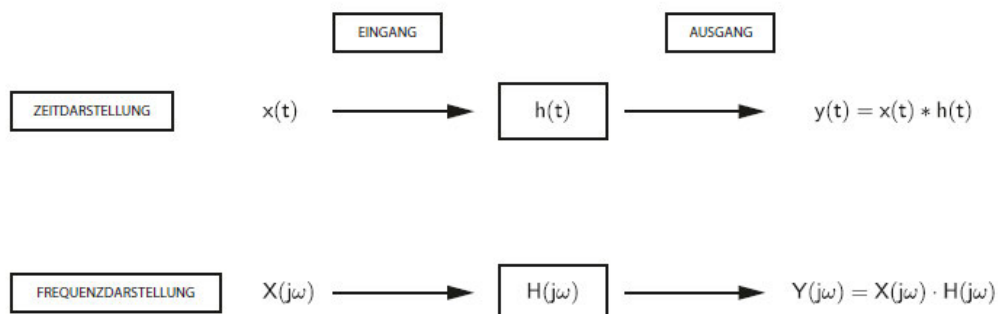


Abbildung 2.20: Beziehungen zwischen Ein- und Ausgang eines linearen, zeitinvarianten Systems [12].

Die Betrachtung im Frequenzbereich passt besser zur Analyse des Modells, da in diesem Frequenzbereich schwingungsrelevante Kerngröße wie z. B. die Eigenfrequenz Verwendung finden [12]. Durch die Benutzung der Übertragungsfunktion lassen sich folgende Werte im Frequenzbereich errechnen [12, 47]:

- Dynamische Steifigkeit $H_{xF}(\omega)$. Die Kraft F dient als Eingangssignal und die Auslenkung x als die Antwort der Struktur.
- Mobilität $H_{vF}(\omega)$. Die Kraft F ist Eingangssignal und die Geschwindigkeit \dot{x} Antwort.
- Trägheit, $H_{aF}(\omega)$, Auch die Kraft F als Eingangssignal und die Beschleunigung \ddot{x} dienen als Systemantwort.

Als dynamische Steifigkeit ist das frequenzabhängige Verhältnis der komplexen Dämpfungskraft zur eingangsseitigen komplexen Auslenkung während einfacher harmonischer Schwingungen zu bezeichnen [48].

Die Übertragungsfunktion beschreibt den charakteristischen Verlauf des Schwingers mit geschwindigkeitsproportionaler Dämpfung, siehe Abbildung 2.21 [12].

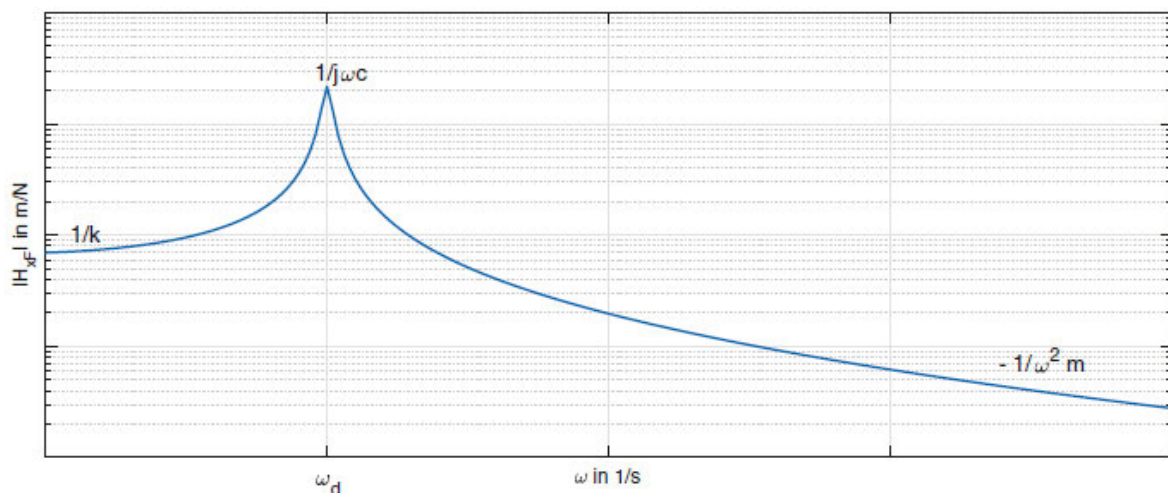


Abbildung 2.21: Beispiel des charakteristischen Verlaufs der Übertragungsfunktion des Einmassenschwingers [12].

In der Abbildung 2.21 ist die erste Eigenkreisfrequenz des Einmassenschwingers als ein Peak ω_d zu sehen. Die Eigenfrequenz f_n ist die Frequenz, mit der ein schwingungsfähiges System nach einmaliger Anregung schwingt. Je höher die Eigenfrequenz, desto niedriger ist der Betrag der Übertragungsfunktion und desto steifer die Konstruktion [12].

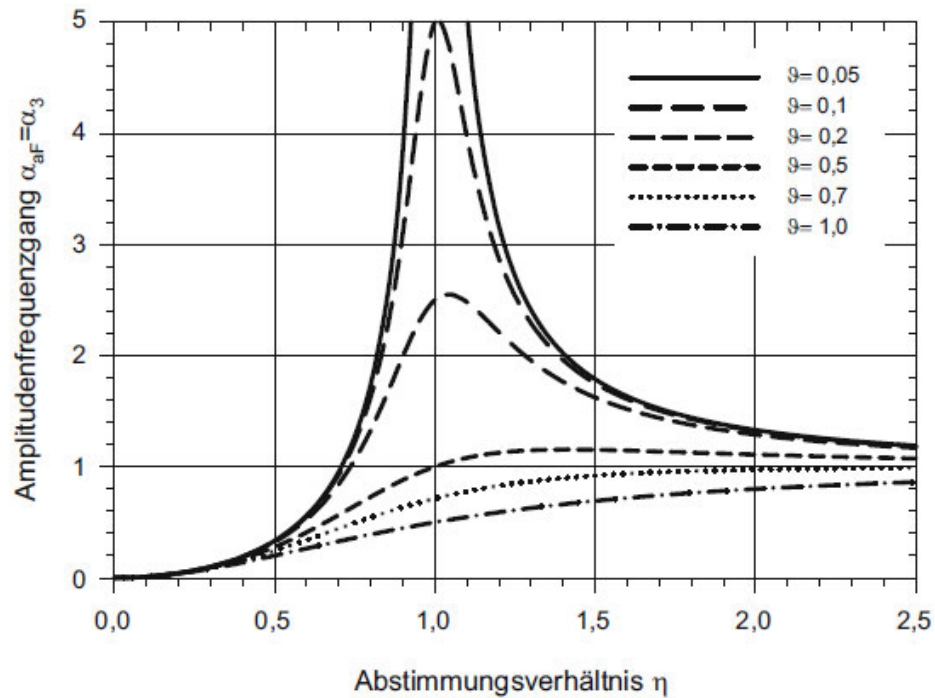


Abbildung 2.22: Amplitudenfrequenzgang für Beschleunigung unter der Krafterregung [12, 49].

Die Übertragungsfunktion ist eine komplexe, für Darstellungen als Amplitudengang verwendete Größe, dargestellt in Abbildung 2.22. Die Auftragung des Amplitudenanteils α_{aF} der Übertragungsfunktion über das Abstimmungsverhältnis η findet Bezeichnung als Amplitudenfrequenzgang, auch genannt als Vergrößerungsfunktion, und beschreibt einen Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsamplitude in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz.

Das Abstimmungsverhältnis η ist ein Verhältnis von der Erregerkreisfrequenz Ω zur Eigenkreisfrequenz des ungedämpften Schwingungssystems ω_0 [12, 47]:

$$\eta = \frac{\Omega}{\omega_0} \quad (2.17)$$

Tabelle 5 stellt den Zusammenhang zwischen dem Abstimmungsverhältnis dar [12, 47, 49].

Abstimmungsverhältnis η	Abstimmung	Erregung
$\eta < 0,8$	Hochabgestimmt	Unterkritisch
$0,8 < \eta < 1,2$	Resonanz	Kritisch, Annäherung an die Resonanz
$\eta > 1,2$	Tiefabgestimmt	Überkritisch

Tabelle 5: Zusammenhang zwischen Abstimmungsverhältnis [12, 47, 49].

Resonanz bedeutet die Übereinstimmung der Eigen- und Erregerfrequenz, wobei das schwingungsfähige System die maximale Amplitude α_{aF} erreicht. Der Dämpfungsgrad ϑ stimmt dieses Maximum ab. Ist der Dämpfungsgrad $\vartheta = 0$, dann wächst der Amplitudenfrequenzgang bzw. die Beschleunigung über alle Grenzen (siehe Abbildung 2.22) [12].

2.11 Dämpfung

Abbildung 2.22 stellt zusammen mit dem Abstimmungsverhältnis η auch den Dämpfungsgrad ϑ dar. Der Dämpfungsgrad ϑ ist ein Verhältnis von der Abklingkonstante δ zu der Eigenkreisfrequenz ω_0 [12]:

$$\vartheta = \frac{\delta}{\omega_0} \quad (2.18)$$

Die Abklingkonstante lässt sich auch mittels der Dämpfung d (Einheit kg/s) beschreiben [12, 50]:

$$\delta = \omega_0 \cdot d \quad (2.19)$$

Die Dämpfung d ist die Eigenschaft eines schwingungsfähigen Systems, Schwingungen widerstehen zu können. Die Dämpfung setzt sich zusammen aus der Werkstoffdämpfung, der Bauteildämpfung der Konstruktion, der Lagerdämpfung, der Umgebungsdämpfung durch umgebende Medien (Luft, Öl, Wasser usw.) [12, 49]

Die Dämpfung d lässt sich als linearer Zusammenhang zwischen der Dämpfungskraft F_d und der Geschwindigkeit \dot{x} darstellen (2.20) [12]:

$$F_d(\dot{x}) = d \cdot \dot{x} \quad (2.20)$$

d ist die Dämpfungskonstante. Dieser Zusammenhang ist als viskose Dämpfung bzw. nach DIN 1311-2 als Bauteildämpfung zu bezeichnen und lässt sich zur Beschreibung der Material-, Bauteil- und Flüssigkeitsdämpfung anwenden.

Bezeichnung nach DIN 1311-2	Dämpfungsgrad ϑ
Schwach gedämpft	$\vartheta \ll 1$
Stark gedämpft	$\vartheta < 1$
Aperiodischer Grenzfall	$\vartheta = 1$
Sehr starke Dämpfung	$\vartheta \geq 1$

Tabelle 6: Übersicht verschiedener Dämpfungsgrade [11, 12].

Tabelle 6 vermittelt eine Übersicht des Dämpfungsgrades ϑ [12]. Die Dämpfungskraft F_d des Dämpfers wirkt immer gegen die Geschwindigkeit eines bewegten Körpers, siehe Abbildung 2.23.

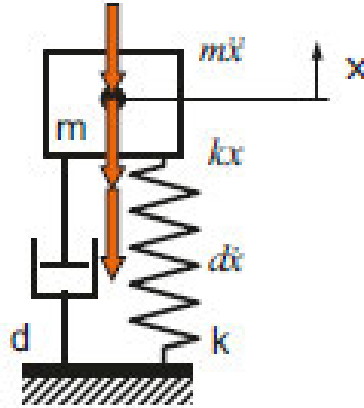


Abbildung 2.23: Translationschwinger mit Dämpfung [12].

Bei der Auslenkung aus der statischen Gewichtslage ändert sich die Kraftbilanz im System [12]:

$$m \cdot \ddot{x} + d \cdot \dot{x} + k \cdot x = 0 \quad (2.21)$$

m ist die Masse, d die Dämpfung und k die Federkonstante (Einheit N/m) oder in schwingungstechnischer Form [9]:

$$\ddot{x} + \frac{d \cdot \dot{x}}{m} + \frac{k \cdot x}{m} = 0 \quad (2.22)$$

Durch das Einsetzen der Eigenkreisfrequenz des ungedämpften Systems ergibt sich [9]:

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m} \quad (2.23)$$

Die Abklingkonstante δ , auch mittels Dämpfungs- und Masseverhältnis zu berechnen, ergibt sich aus der Gleichung (2.22) [9, 50]:

$$\delta = \frac{d}{2 \cdot m} \quad (2.24)$$

Zu erhalten ist die Bewegungsdifferentialgleichung (2.25):

$$\ddot{x} + 2 \cdot \delta \cdot \dot{x} + \omega_0^2 \cdot x = 0 \quad (2.25)$$

Diese zu lösende Gleichung beinhaltet die bereits bekannten Parameter. Die Funktion $x(t) = A \cdot e^{\lambda t}$ und deren Ableitungen $\dot{x}(t) = A \cdot \lambda e^{\lambda t}$ und $\ddot{x}(t) = A \cdot \lambda^2 e^{\lambda t}$ werden als Lösungseinsatz in die Formel (2.25) gesetzt [12]:

$$A \cdot \lambda^2 e^{\lambda t} + 2 \cdot \delta \cdot A \cdot \lambda e^{\lambda t} + \omega_0^2 \cdot A \cdot e^{\lambda t} = 0 \quad (2.26)$$

Das Abziehen von $A \cdot e^{\lambda t}$ in (2.26) führt auf die charakteristische Gleichung [12]:

$$\lambda^2 + 2 \cdot \delta \cdot \lambda + \omega_0^2 = 0 \quad (2.27)$$

Die Gleichung (2.27) hat die Lösung für beide komplexen Eigenwerte λ [12]:

$$\lambda_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} \quad (2.28)$$

Je nachdem, welcher Zahlenwert sich daraus ergibt, nimmt die Lösung unterschiedliche Formen an. DIN 1311-2 unterscheidet die Fälle [11, 12].

Zur Beschreibung der Dämpfung lässt sich auch das logarithmische Dekrement Λ nutzen [9, 12]:

$$\Lambda = \ln \left(\frac{x_k(t)}{x_{k+1}(t + T_d)} \right) \quad (2.29)$$

Das logarithmische Dekrement Λ ist der natürliche Logarithmus von zwei aufeinander folgenden Schwingungen. $x_k(t)$ ist die Auslenkung in dem Zeitpunkt t , $x_{k+1}(t)$ ist die Auslenkung der nächsten Schwingung in dem nächsten Zeitpunkt, T_d ist die Periode, siehe Abbildung 2.24. Neben der Auslenkung x_k lassen sich die Geschwindigkeit \dot{x}_k und die Beschleunigung \ddot{x}_k nutzen [9, 12, 50].

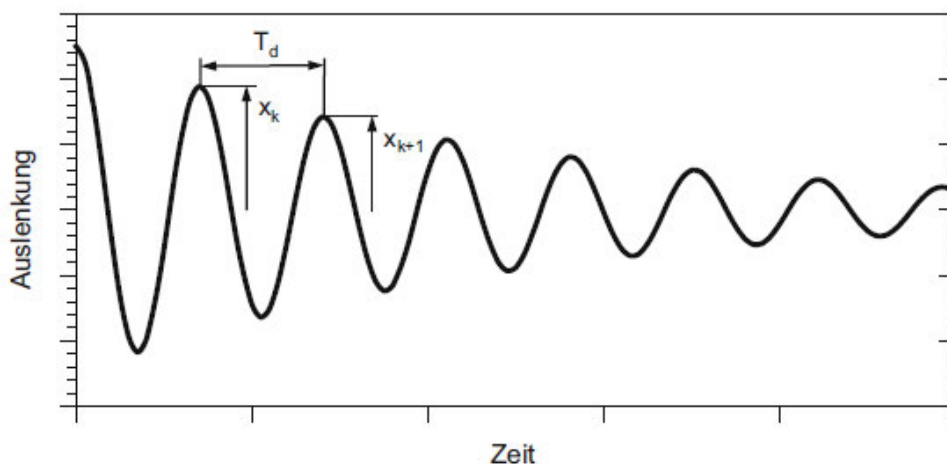


Abbildung 2.24: Definition des logarithmischen Dekrements an der schwach gedämpften Schwingung [12].

Das logarithmische Dekrement Λ und die Dämpfung ϑ haben eine Abhängigkeit [9, 12, 50]:

$$\vartheta = \frac{\Lambda}{\sqrt{4 \cdot \pi^2 + \Lambda^2}} \quad (2.30)$$

2.12 Schwerpunkt von Körpern

Wenn ein geometrisch schwieriger Körper in drei Teilkörper zerlegt wird, dann wirkt auf jeden der drei Teilkörper die Teil-Gewichtskraft $F_1 = m_1g$, $F_2 = m_2g$ und $F_3 = m_3g$; m ist die Masse des jeweiligen Körpers und g die Schwerebeschleunigung, siehe Abbildung 2.25 [51, 52].

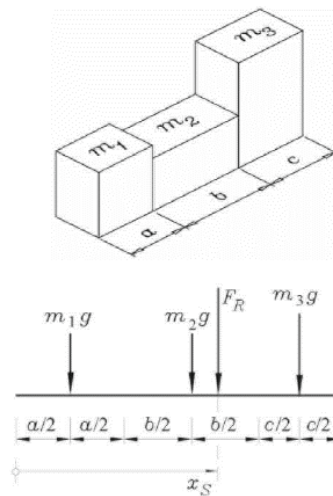


Abbildung 2.25: Schwerpunkt [52].

Die Summe der drei Gewichtskräfte – siehe Abbildung 2.25 – ist eine Resultierende Kraft F_R :

$$F_R = (m_1 + m_2 + m_3) \cdot g \quad (2.31)$$

Die Linie des Körpers, wodurch die Resultierende aller Gewichtskräfte bei beliebiger Lage des Körpers durchgeht, ist eine Schwerpunktlinie [52]. Diese Resultierende muss das gleiche Moment hinsichtlich eines Punktes haben wie die Summe der Momente der Einzelkräfte, siehe Formel (2.33) [51].

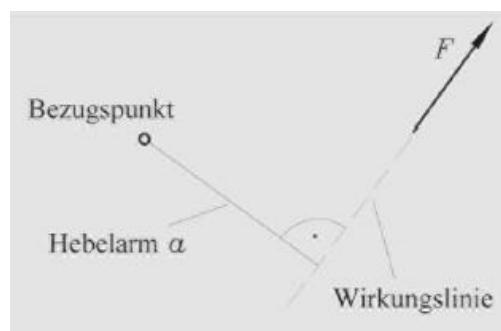


Abbildung 2.26: Das Moment der Kraft [52].

Das Moment M (2.32) ist ein Produkt aus der Kraft F und dem Hebelarm a . Der Hebelarm a ist der kürzeste Abstand vom Bezugspunkt bis zur Wirkungslinie der Kraft (Abbildung 2.26) [51, 52]:

$$M = F \cdot a \quad (2.32)$$

Aus (2.33) lässt sich die Koordinate des Schwerpunktes errechnen, allerdings nur in einer Achse:

$$(m_1 + m_2 + m_3) \cdot g \cdot x_s = m_1 g \frac{a}{2} + m_2 g \left(a + \frac{b}{2} \right) + m_3 g \left(a + b + \frac{c}{2} \right) \quad (2.33)$$

In einem kartesischen Koordinatensystem haben die Teilmassen m_i drei Schwerpunktkoordinaten x_i, y_i, z_i . In diesem Fall gelten folgende Formeln zur Berechnung (2.34) [52]:

$$x_s = \frac{1}{m_{ges}} \sum_{i=1}^n m_i x_i \quad y_s = \frac{1}{m_{ges}} \sum_{i=1}^n m_i y_i \quad z_s = \frac{1}{m_{ges}} \sum_{i=1}^n m_i z_i \quad (2.34)$$

Die Gesamtmasse des Körpers m_{ges} ist die Summe der Teilmassen m_i (2.35) [51, 52]:

$$m_{ges} = \sum_{i=1}^n m_i \quad (2.35)$$

Sind die Schwerpunktkoordinaten der Teilmasse bekannt, lassen sich diese Formeln anwenden. Sollte das nicht der Fall sein, sind diese in sehr viele Teilmassen $\Delta m_i \rightarrow dm$ zu unterteilen, so gestaltet sich die Summe zum bestimmten Integral [52]:

$$x_s = \frac{1}{m_{ges}} \int_V x \, dm \quad y_s = \frac{1}{m_{ges}} \int_V y \, dm \quad z_s = \frac{1}{m_{ges}} \int_V z \, dm \quad (2.36)$$

Die Bezeichnung V in dem Integralzeichen bedeutet „Integral über das gesamte Volumen“, was im ungünstigsten Fall ein dreifaches Integral bedeuten kann [52].

3 FDM und FFT Chamber

3.1 FFT Kammer

Die Probenkammer im SCS-Instrument findet auch Bezeichnung als FFT Kammer. Die FFT Kammer ist als Messumgebung für die Probe gedacht, über integrierte motorisierte Aktuatoren erfolgt die Ausrichtung der Probe in den Strahl, dargestellt in Abbildung 3.1. Sie hat auch angebaute horizontale und vertikale Far-Distance Microscopes. Beide Mikroskope hängen an den Flanschen und sind über den Flanschhaltern befestigt. Kapitel 3.1.2 enthält die detaillierte Beschreibung. Die Probenkammer verfügt über mehrere, für verschiedene Zwecke dienende Flansche, u. a: Sichtfenster zur Überwachung, Vakuummessung, elektrische Durchführungen. Die äußere Kammer selbst ist nicht verfahrbar und über Schraubverbindungen mit dem Boden verbunden.

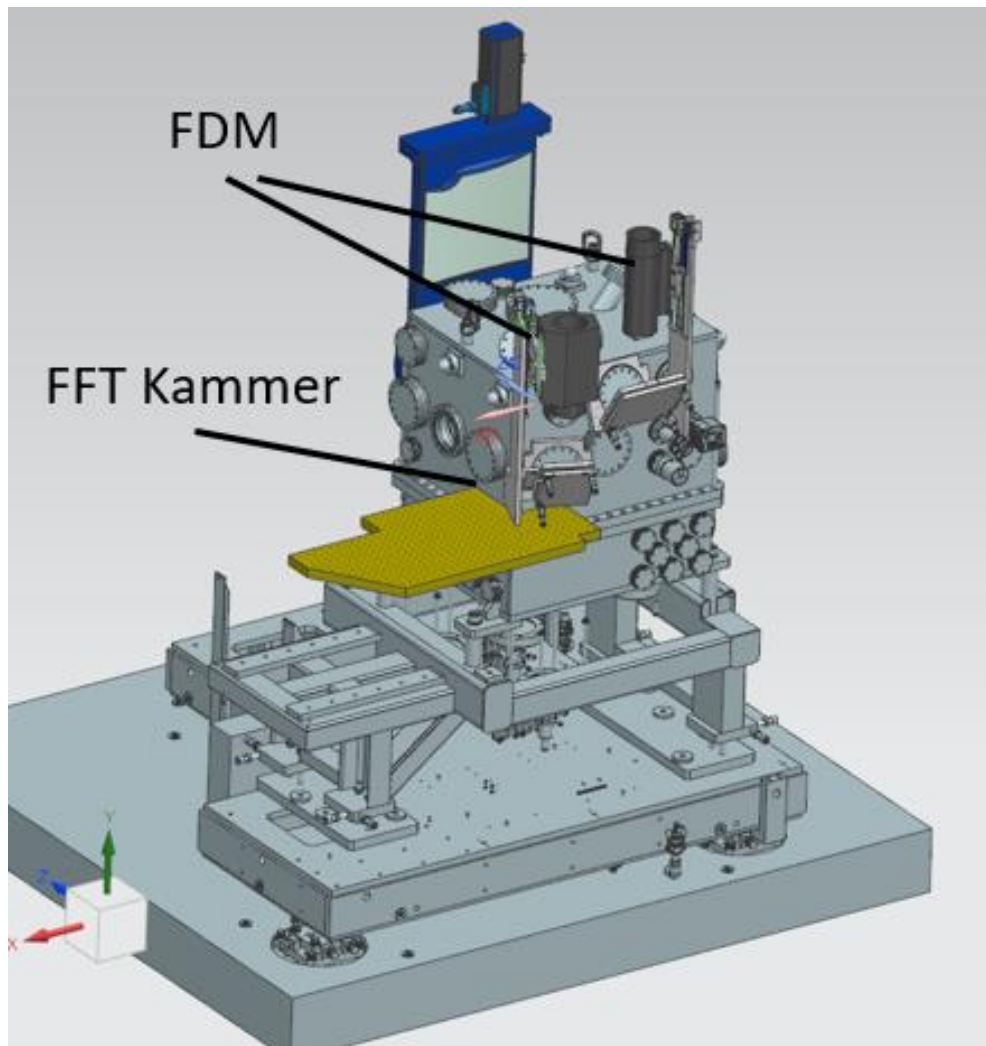


Abbildung 3.1: Probenkammer mit vFDM und hFDM.

Eine Ultrahochvakuumumgebung betreibt die Probenkammer, erreichbar mithilfe von zwei Turbopumpen, dargestellt in Abbildung 3.2.



Abbildung 3.2: Turbopumpen Pfeiffer HiPace 300 links und HiPace 700 rechts [35, 36].

Zum Betreiben der Turbopumpen sind Vorpumpen (hier verwendet Scrollpumpen) vonnöten, um den entsprechenden Vordruck 10^{-2} mbar für die Turbopumpe herzustellen [53]. Die eine von den Vorpumpen, sogenannte „Scrollpumpe“ ist in Abbildung 3.3 dargestellt.



Abbildung 3.3: Scrollpumpe von Edwards Vacuum [54].

Die Scrollpumpen sind weiter weg entfernt und befinden sich in einem geschlossenen Raum. Allerdings können einige Pumpen neben der Komponente des Instruments stehen und über Wellschläuche verbunden sein. Zunächst kommt es zum Aktivieren der Scrollpumpen: Sobald der Vakuumdruck 10^{-2} mbar beträgt, aktivieren sich die Turbopumpen, die den Druck bis max.

10^{-9} mbar erzeugen und aufrechterhalten [53]. Laut technischer Daten funktioniert diese Scrollpumpe mit 1 750 Umdrehungen pro Minute, was 29,16 Hz entspricht ($\frac{1750 \text{ rpm}}{60} = 29,16 \text{ Hz}$) [54].

3.1.1 FDM

Die Probenkammer dient der Ausrichtung der Probe. Allerdings gibt es keine Möglichkeit, die Probe direkt in der Probenkammer zu beobachten. Zur Gewährleistung der Probe kam es zur Entwicklung und Einführung der FDM.

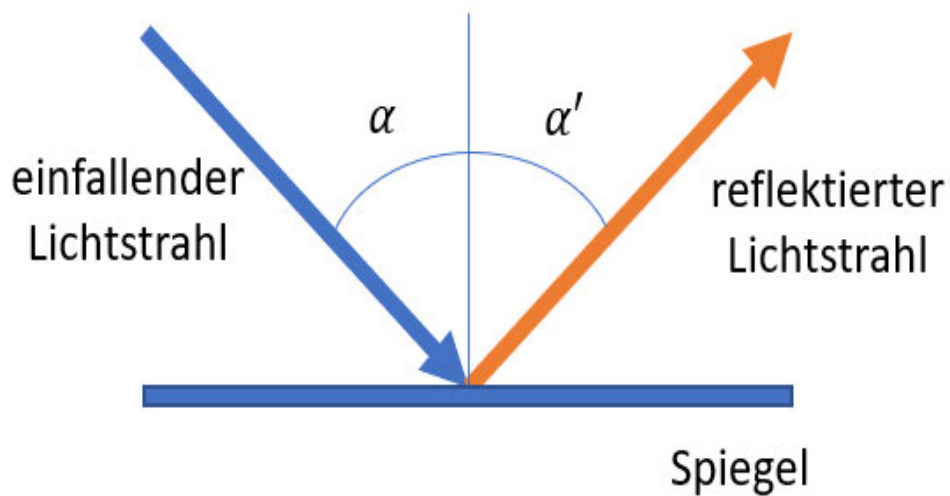


Abbildung 3.4: Reflexionsgesetz.

Die Beobachtung ist sowohl zur Strahljustage (für Röntgenstrahl und Anregungslaser) als auch während des Experiments nötig, um evtl. Schäden an der Probe sehen zu können.

FDM benutzen das Reflexionsgesetz für den Spiegel, dargestellt in Abbildung 3.4. Das Licht fällt unter einem bestimmten Winkel auf den Spiegel ein, mit exakt diesem Winkel verlässt das Licht den Spiegel [55].

Mathematisch gesehen ist das Reflexionsgesetz in der Formel (3.1) dargestellt [55]:

$$\alpha = \alpha' \quad (3.1)$$

Das heißt, jeder einfallende Lichtstrahl verlässt mit dem gleichen Winkel den Spiegel, mit dem er aufgetroffen ist.

3.1.2 Vertikale und horizontale FDM

Es gibt zwei Mikroskope (eins montiert in horizontaler, eins in vertikaler Richtung) an der FFT Kammer, welche ähnliche Konstruktionen haben, siehe Abbildung 3.5. Die Wirkweise und das mechanische Prinzip sind bei beiden Mikroskopen identisch, daher erfolgt nachstehend nur eine Erklärung für ein Mikroskop. Grundsätzlich kommt es zur Bewegung des Bildes über die Bewegung des Spiegels mithilfe von drei Piezomotoren.

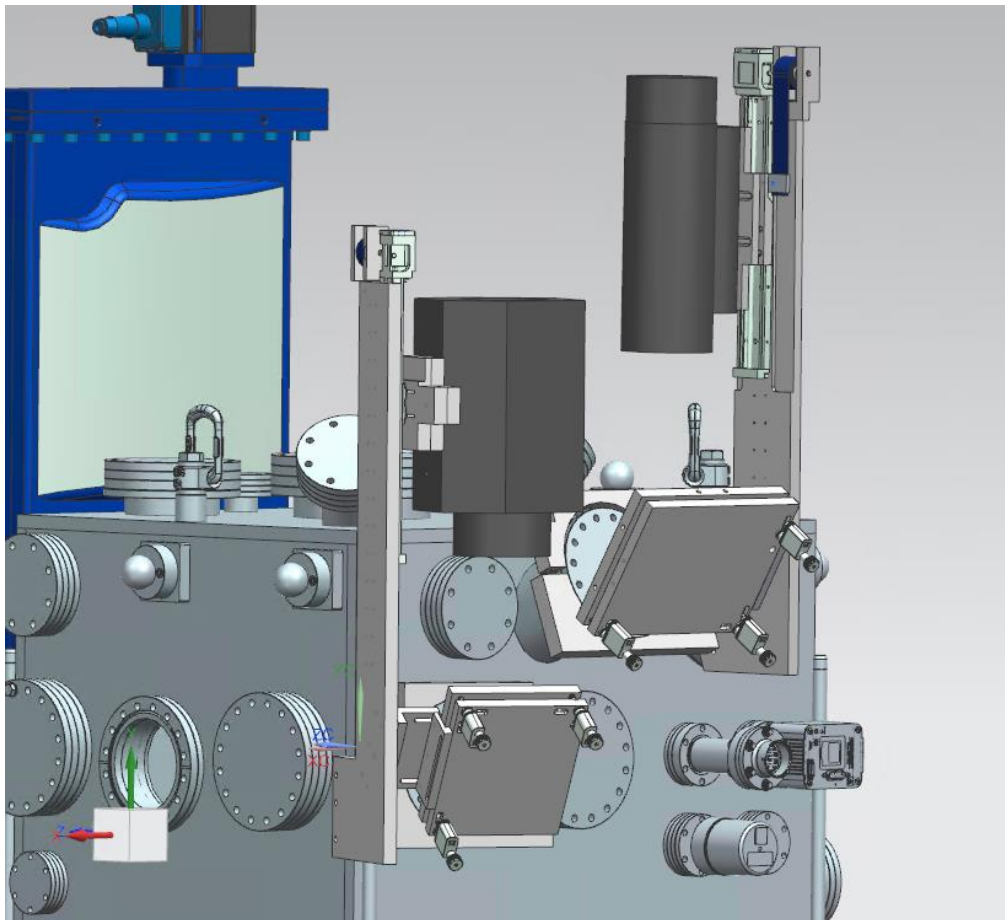


Abbildung 3.5: Horizontale (links) und vertikale (rechts) FDM an der Probekammer.

Der Fokus wird über eine Änderung der Position der Kamera in der Y-Achse verfahren. Eine Positionsänderung innerhalb der Y-Achse erfolgt mittels der motorisierten Linearführung. Jedes Mikroskop hat eine eigene Linearführung. Die Linearführungen ermöglichen die Verschiebung und die Fokussierung der Mikroskope in der Y-Achse bis zu 300 mm. Zur Positionsmessung ist ein absoluter Encoder aufgebaut, der es ermöglicht, die Position zu erfassen.

Da die Linearführungen keine Selbsthemmung haben, könnten sie, wenn der Motor stromlos ist, durch ihr Eigengewicht die Position in der Y-Achse ändern. Zur Verhinderung erfolgte das Einführen der Konstantkraftfeder in die Konstruktion, die die Mikroskope halten. Die vFDM (Abbildung 3.6) besteht aus: Mikroskop mit der Kamera (1), Spiegel (2), Spiegelhalter (3),

Linearführung mit den Platten (4), Konstantkraftfeder mit dem Halter (5), L-Platte (6), Piezomotoren (7) , Zugfedern mit Stiften (8), Führungsplatte (9) und dem Flanschhalter (10), der zur Befestigung der gesamten Konstruktion dient und dadurch einen Aufnahmepunkt bzw. einen Befestigungspunkt bildet.

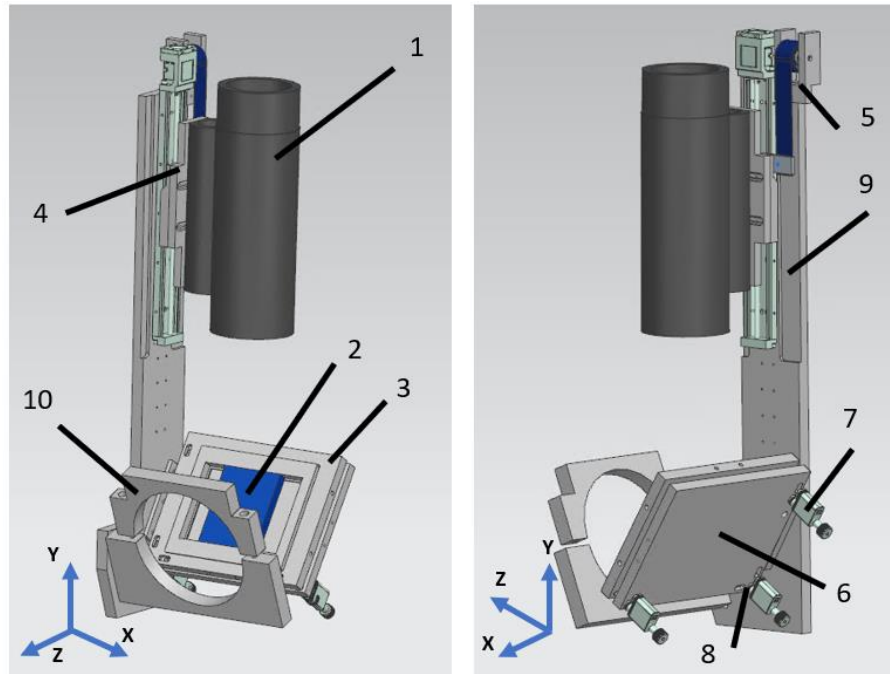


Abbildung 3.6: CAD-Bild der vFDM.

3.1.2.1 Linearführung und die Platten

Die Linearführung LX2005PG-B1-T2028-300 der Firma MISUMI ist in Abbildung 3.7 dargestellt. Die verwendete Linearführung hat einen Führungswagen mit einer Führungsschienenlänge von 300 mm. Die Steigung der Spindel beträgt 5 mm [56]. Ein Schrittmotor dient dem Antreiben [56].



Abbildung 3.7: Linearführung [56].

Der Wagen der Linearführung hat zur Montage der Platten zu verwendende M3 Bohrungen. Dieser Wagen enthält die einmontierten Platten mit dem Mikroskop. Eine Zwischenplatte ist in der Abbildung 3.8 dargestellt. Diese Platte hat M3 Durchgangsbohrungen und wird mit M3 Zylinderschrauben an dem Wagen befestigt.

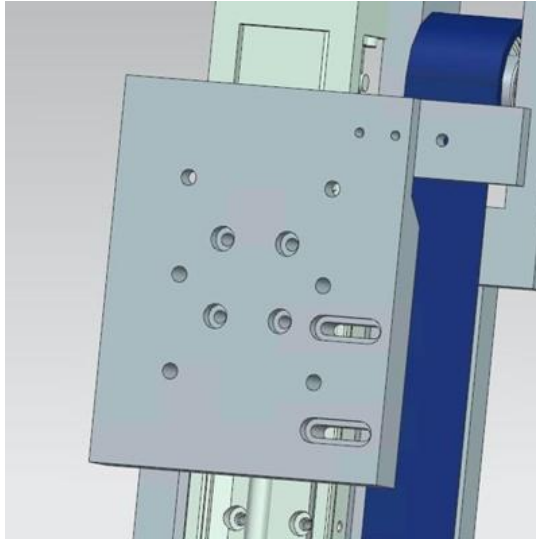


Abbildung 3.8: Zwischenplatte.

Die in der Abbildung 3.8 dargestellte Platte hat M5 Bohrungen, bei der die Befestigung der Langplatte (Abbildung 3.9) erfolgt. Die Zwischenplatte hat sowohl Bohrungen für die Fixierung des Konstantkraftfederhalters als auch zwei für den Encoder bzw. einen Positionsscanner vorgesehene Langlöcher. Die Montage einer anderen sogenannten Langplatte (Abbildung 3.9) findet auf der Zwischenplatte statt.

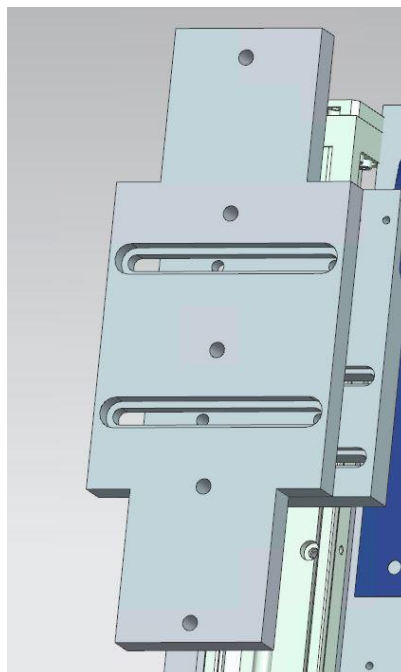


Abbildung 3.9: Langplatte.

Die Langplatte ist in der Abbildung 3.9 dargestellt und für die Mikroskopmontage vorgesehen. Sie hat zwei Langlöcher, die eine zusätzliche Mikroskopeinstellung in der Z-Achse ermöglichen.

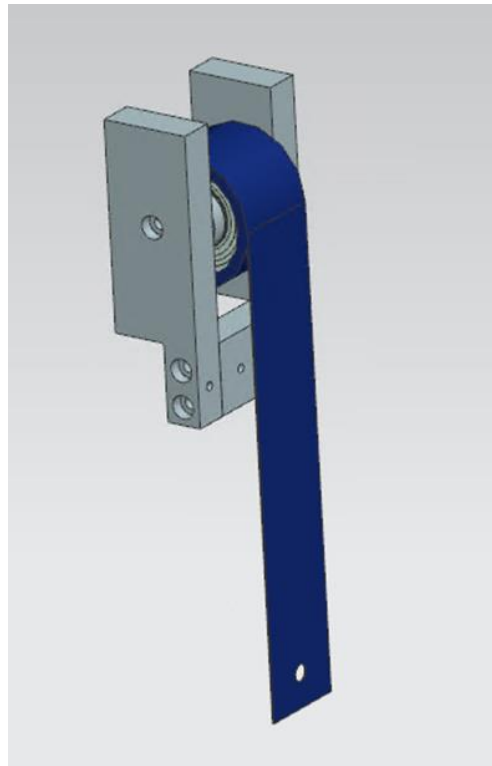


Abbildung 3.10: Konstantkraftfederhalter.

Der Konstantkraftfederhalter ist in Abbildung 3.10 dargestellt. Der Konstantkraftfederhalter ist für die Befestigung der Konstantkraftfeder vorgesehen. Abbildung 3.11 enthält eine Darstellung der Konstantkraftfeder.



Abbildung 3.11: Konstantkraftfeder [57].

Abbildung 3.11 stellt die Konstantkraftfeder dar, hergestellt aus den Federstählen mit einem Kraftzuwachs bei zunehmender Länge; allerdings ist der so gering, dass diese Art der Federn

als Konstantkraftfeder bezeichnet wird. Diese Federn finden ihren Einsatz als Gegengewicht bzw. als Schutz vor dem Herunterfallen des Mikroskops unter dem eigenen Gewicht [57].

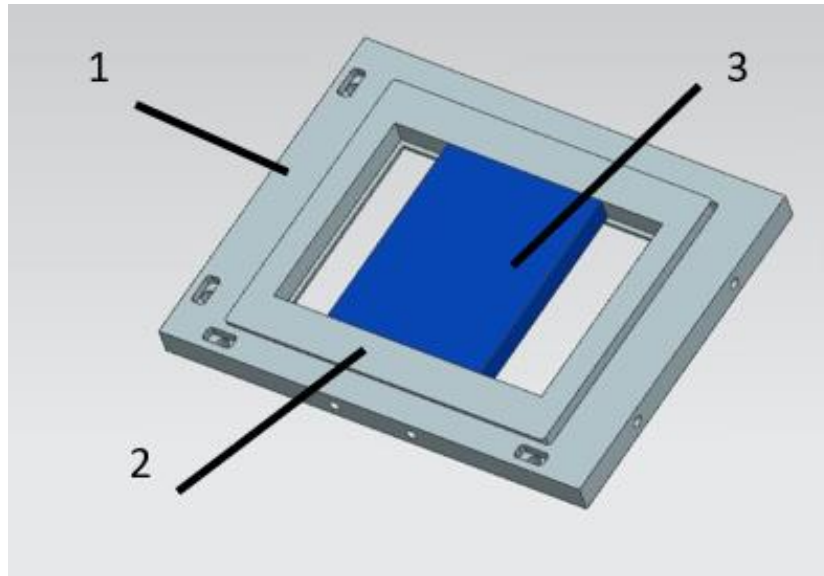


Abbildung 3.12: Spiegelhalter.

Der Spiegelhalter (Abbildung 3.12) besteht aus zwei Teilen: Spiegelhalter (1) und Innenhalter (2). Der Spiegel (3) wird zuerst in den Innenhalter (2) reingelegt und dann mit den Madenschrauben fixiert. Danach wird der Innenhalter in den Spiegelhalter reingelegt und befestigt. Da beim SCS-Instrument nicht viel Platz für das vFDM ist, ermöglicht diese Konstruktion eine bequeme Montage des Spiegels.

3.1.2.2 Der Piezomotor N472 PiezoMike

Der Spiegel ist über linearbewegende Piezomotoren ausrichtbar. Als Piezomotor kommt der Linearaktor N-472 PiezoMike der Firma PI zum Einsatz. Der Linearaktor ist in der Abbildung 3.13 dargestellt [58]. Die detaillierten technischen Daten sind in Anhang A4 beigefügt.



Abbildung 3.13: Linearktor N472 PiezoMike [58].

Die Piezomotoren sind auf der L-Platte befestigt und drücken gegen die Zugfedern, um die Bewegung zu gewährleisten. Der Spiegelhalter ist mit den Stiften auf der L-Plate und dem Spiegelhalter in den speziellen Nuten über die Federn verbunden. Abbildung 3.14 enthält die schematische Darstellung der Konstruktion.

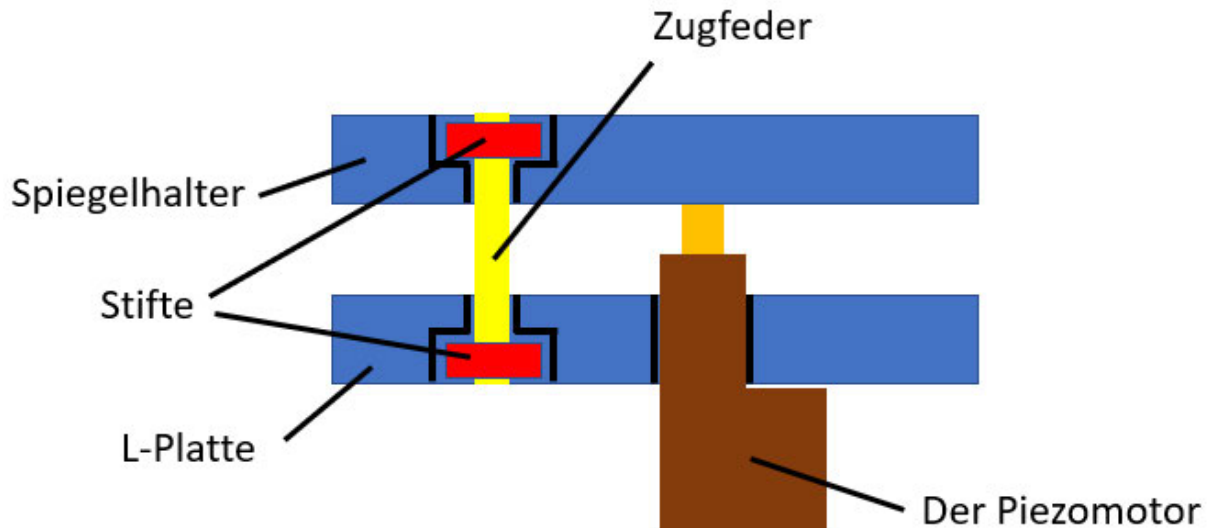


Abbildung 3.14: Skizze des Konzepts.

Diese Konstruktion ermöglicht sowohl die lineare Bewegung des Spiegelhalters, die Drehung um jede Achse als auch die Fixierung des Spiegels.

3.1.2.3 Mikroskop QM-1

Das Mikroskop QM-1 (Abbildung 3.15) stammt von der amerikanischen Firma Questar. Das Mikroskop QM-1 besitzt zwei wählbare Anschlüsse und ist mit Standardokularen, 35-mm- und Videoformaten kompatibel. Die detaillierten technischen Daten befinden sich in Anhang A5 [59, 60].



Abbildung 3.15: QM 1 Long-Distance Microscope [59].

3.1.2.4 Kamera Basler

Das Mikroskop QM-1 ist mit einer digitalen Kamera von Basler AG über ein 3.5" camera coupling set verbunden. Die Kamera hat eine Auflösung von acht Megapixeln und liefert das Bild mit der maximalen Bildrate von 26 frames per second (fps). Das bedeutet, die Kamera erfasst die Schwingungen im Bereich von 0 Hz bis 26 Hz. Die Kamera besitzt ein kompaktes Gehäuse (62 mm Breite x 62 mm Länge x 57 mm Höhe) und gestattet dadurch die Montage an schwer zugänglichen Stellen. Anhang A6 [58] enthält die detaillierten technischen Daten. In der Abbildung 3.16 sind camera coupling set sowie die Kamera selbst dargestellt.



Abbildung 3.16: Camera coupling set (Links) und Basler avA2300-25gm (rechts) [61, 62].

Die European XFEL Karabo-Software dient als Steuerungssystem des gesamten Instruments [7]. Das Steuerungssystem ist mit der Kamera über ein Kabel verbunden. Das Kabel der Kamera könnte auch einen Einfluss auf die Schwingungen haben, wenn es nicht fest befestigt ist, denn es schwingt mit, dadurch entsteht eine zusätzliche Störquelle. Ein nicht fest befestigtes Kabel könnte auch zu einem Wackelkontakt an dem Kameraanschluss führen, was sich letztendlich auf die Qualität des gelieferten Bildes auswirken könnte.

3.1.2.5 Massenschwerpunkt

Die Linearführung ermöglicht eine Änderung der Position in der Y-Achse. Allerdings ändert sich, zusammen mit der Änderung der Position in der Y-Achse, auch der Massenschwerpunkt M , siehe Abbildung 3.17.

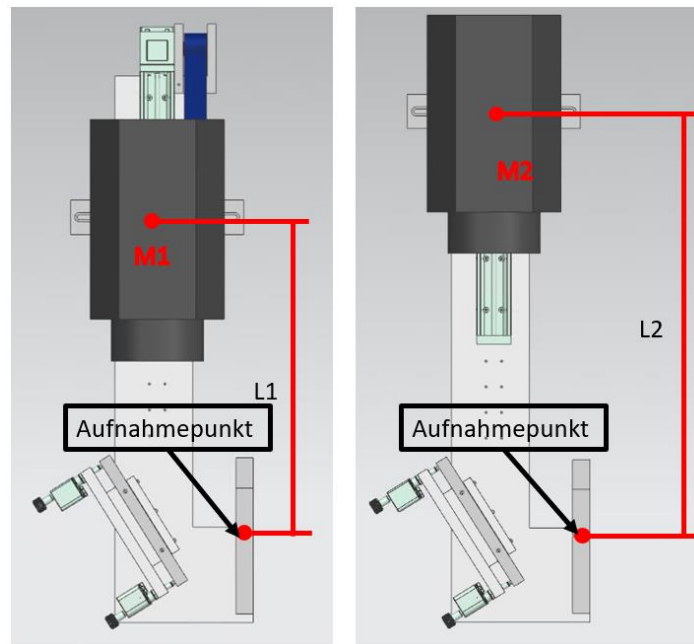


Abbildung 3.17: Massenschwerpunktänderung bei hFDM. M1 unten. M2 oben.

Es geht um die Änderung der Länge des Hebels des Bezugspunktes (Aufnahmepunkt) bis zum Massenschwerpunkt M . Infolgedessen wandelt sich mit der Änderung der Länge des Hebels auch die Schwingungsfrequenz, siehe Abbildung 3.18 und Formel (3.2) [14].

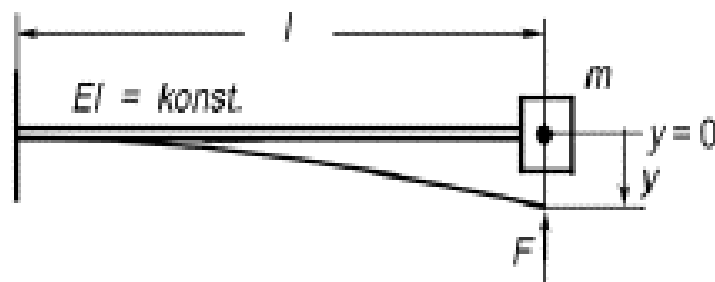


Abbildung 3.18: Stab mit Einzelmasse am freien Ende [9].

Anhand der Formel (3.2), wo l die Länge des Hebels, E das Elastizitätsmodul, I das Flächenträgheitsmoment, m die Masse ist, ist zu sehen: Je größer die Länge des Hebels l , desto kleiner die Kreisfrequenz ω , und im Gegensatz dazu, je kleiner die Länge des Hebels, desto größer gestaltet sich die Schwingungsfrequenz [9, 14] :

$$\omega = \frac{1}{l} \sqrt{\frac{3 \cdot E \cdot I}{l \cdot m}} \quad (3.2)$$

Das bedeutet, befindet sich die Kamera unten, zeigt sich eine größere Schwingungsfrequenz der Konstruktion. Sollte die Kamera oben sein, herrschen bei der Konstruktion kleinere Schwingungsfrequenzen, siehe Abbildung 3.17.

3.2 Umgebungsbedingungen

Das SCS-Instrument hat viele, zum Betrieb notwendige verschiedene Komponenten. Kapitel 2.2 enthält eine Beschreibung sämtlicher Komponenten. Das SCS-Instrument befindet sich in einer abschließbaren und strahlengeschützten Hütte, welche schematisch in der Abbildung 3.19 dargestellt ist. Daneben befindet sich ein Kontrollraum, in dem Wissenschaftler das Experiment durchführen.

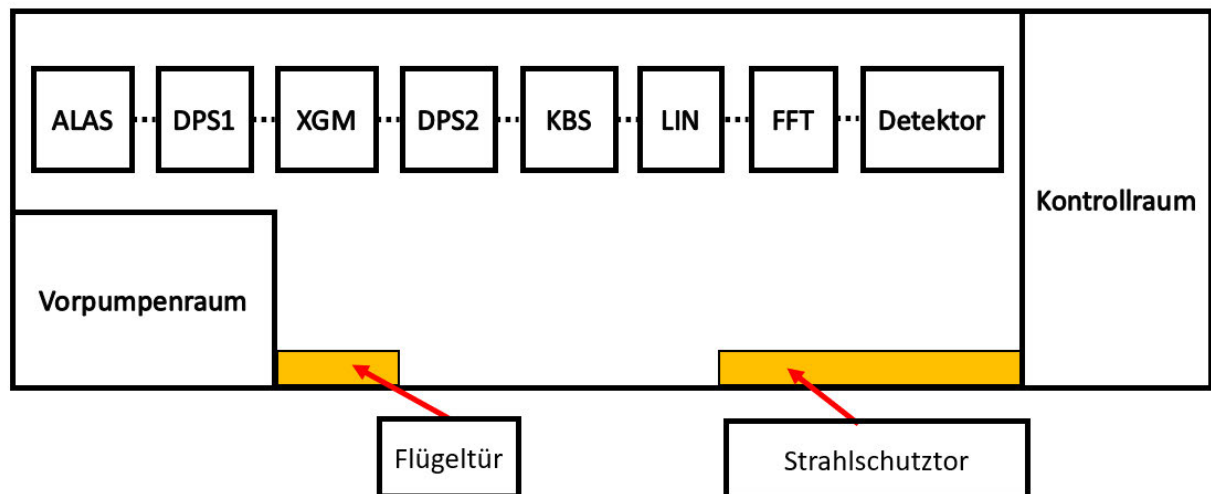


Abbildung 3.19: Lageplan des SCS-Instruments.

Da das SCS-Instrument eine potenzielle Strahlengefahr hat, sind die Wände und die Decke der Hütte aus Stahl-Platten gebaut worden, um den Strahlenschutz gewährleisten zu können. Die Eingangstüren zum Eintritt sind ebenfalls aus Stahl gebaut. Stahl-Platten sind schwingungstechnisch ungeeignet, denn die Schwingungsdämpfung dieser Platten beträgt ungefähr 2 % [63, 64]. Das bedeutet eine teilweise Dämpfung der Schwingungen von außen, allerdings verbleiben noch Einflüsse davon. Außerdem können diese Platten mitschwingen und die Vibration erfährt eine Weiterleitung durch den Fußboden an die FFT-Kammer.

Das SCS-Instrument wird unter dem Ultrahochvakuum getrieben. Zum Erzeugen desselben sind die Vorpumpen zu verwenden. Das nachstehende Unterkapitel beschreibt dies detaillierter. Die meisten Vorpumpen sind in einem geschlossenen Raum (Pumpenraum) einmontiert, um eine Dämpfung des Körperschalles und seiner ausgehenden Schwingungen zu reduzieren. Hierfür kommt es zum Betreiben der Vorpumpen aus einem mit Schwingungsdämpfern entkoppelten Gestell. Außerdem erzeugen die Vorpumpen Wärme, wodurch die Umgebungstemperatur über 21 °C steigt, was für ein Experiment nicht erwünscht ist; das ist der Grund, warum diese separat einmontiert sind. In dem Pumpenraum werden außerdem auch Kühler betrieben, die ebenfalls mit Dämpfern an den Boden angeschlossen sind. Abbildung 3.20 enthält eine Darstellung der Vorpumpen im Raum.

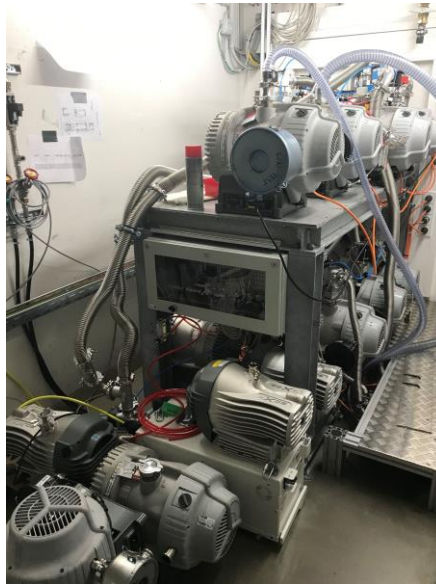


Abbildung 3.20: Vorpumpen im geschlossenen Raum (Pumpen im vorderen Bereich befinden sich dort zur Lagerung).

Da das SCS-Instrument umgebaut werden kann, bzw. je nach Anforderung der Wissenschaftler können einige Komponente ein-, oder demontiert werden, können die Vorpumpen direkt neben der Komponente stehen. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 3.21 dargestellt. Aus technischen Gründen ist es nicht möglich, den Detektor der Vorpumpen im geschlossenen Raum zu betreiben. Infolgedessen steht eine angeschlossene Vorpumpe neben dem Detektor.

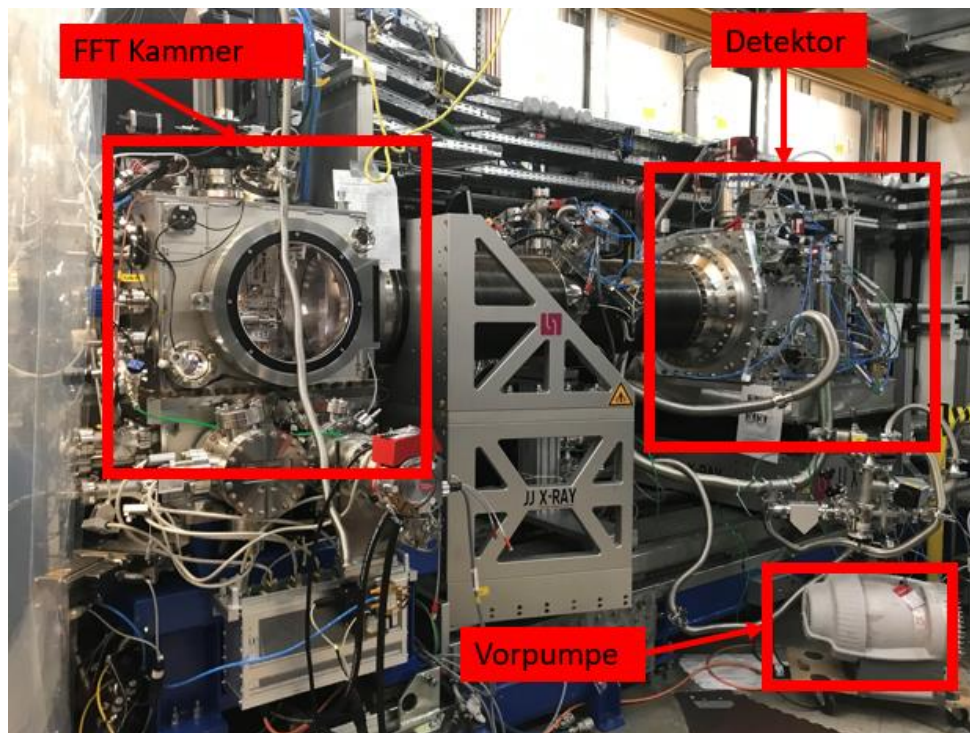


Abbildung 3.21: FFT Kammer und Detektor mit der Vorpumpe.

Die Vorpumpe ist mittels des Detektors über einen Metallwellschlauch verbunden. Da dieser Schlauch nicht fest einmontiert ist, schwingt er während des Betriebs mit, was infolgedessen einen Einfluss auf das Schwingungsverhalten des ganzen SCS-Instruments hat.

Da für das Experiment die Umgebungstemperatur nicht mehr als 21°C sein darf, kommt es in der Hütte zur Verwendung einer Klimaanlage, die die gewünschte Temperatur aufrechterhält. Die an der Decke befestigte Klimaanlage erzeugt die Vibrationen, es erfolgt eine Weiterleitung der Vibrationen von der Decke über die Metallwände mit dem Fußboden weiter an die FFT Kammer; somit dient die Klimaanlage als eine zusätzliche Schwingungsquelle.

Die weiteren schwingungstechnischen Einflüsse in der Hütte stammen von den Wasserpumpen und auch vom Fußboden.

Insgesamt hat die Hütte viele äußere Einflüsse von Schwingungen, die sowohl von Grundvibrationen der Halle kommen als auch von den Vibrationen der Komponenten des gesamten SCS-Instruments. Im Moment des Schreibens der Arbeit und der Durchführung der Messungen (im Herbst 2021 und im Frühling 2022) entsteht neben dem Hauptcampus ein neues Bürogebäude [65]. Es findet eine Weiterleitung der Vibrationen der Bauarbeiten und der Baumaschinen über den Grund an das SCS-Instrument statt; daher ist die Baustelle auch als zusätzliche Schwingungsquelle zu sehen.

Einige Komponenten wie Pumpen und Kühlgeräte sind schwingungstechnisch möglichst vom SCS-Instrument zu entkoppeln, um den Einfluss auf das Schwingungsverhalten des SCS-Instruments zu minimieren. Die Hütte selbst ist aus schwingungstechnischer Sicht nicht ideal, denn sie hat Wände aus Stahl, welche eine Dämpfung von nur 2 % aufweist [63, 64]. Demnach erfolgt lediglich eine teilweise Dämpfung der über die Wände übertragenen Schwingungen.

4 Durchführung und Analyse der Messungen im Betrieb

4.1 Verifizierung des Sensors

Für die Messungen gelangt der Beschleunigungssensor der Kistler AG zum Einsatz, der die Beschleunigungen in allen drei orthogonalen Achsen gleichzeitig misst. Kapitel 2.6.1 beschreibt den Sensor. Vor der Übergabe des Sensors an den Kunden findet das Kalibrieren desselben statt. Allerdings ist eine Beschädigung des empfindlichen Sensors während der Lieferung nicht auszuschließen. Um das prüfen zu können, erfolgt die Durchführung einer Verifizierung des Sensors. Dafür dient ein akademisches Beispiel, und zwar ein eingespannter Balken mit einem freien Ende, siehe Abbildung 4.1.

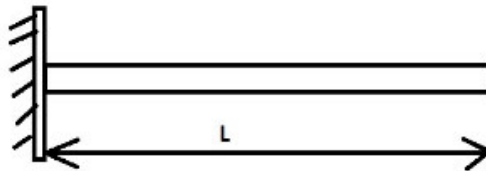


Abbildung 4.1: Balken mit einem freien Ende.

Es gilt, die Eigenfrequenzen mit dem Sensor zu messen und mit einem Ergebnis des numerischen Verfahrens zu vergleichen. Dazu diente die Verwendung eines numerischen Verfahrens mittels einer Finite Elemente Methode (FEM) in Verbindung mit der Durchführung des Analysis System (ANSYS) Programms.

Zum Einsatz kam ein Alu-Balken mit folgenden Abmaßen: 530 mm Länge, 80 mm Breite und 3 mm Dicke. 130 mm der Länge ging ab für die Befestigung am Tisch. Dementsprechend ist $L = 400$ mm die freie Länge, siehe Abbildung 4.2.



Abbildung 4.2: Versuchsaufbau.

Das Befestigen des Sensors vollzog sich am Rand des Balkens mittels eines Wachses (Kapitel 2.6.1) über einen Adapter, siehe Abbildung 4.2. Ein Impulshammer erregte die Schwingungen. Tabelle 7 enthält die Ergebnisse der Messungen.

Es kam zur Erstellung eines Modells des Balkens im ANSYS und einer Untersuchung mittels Modalanalyse. Eine Modalanalyse dient der Ermittlung der Eigenfrequenzen und Eigenformen einer Baugruppe oder eines Teiles [66]. Das numerische Modell des Balkens ist in Abbildung 4.3 dargestellt.

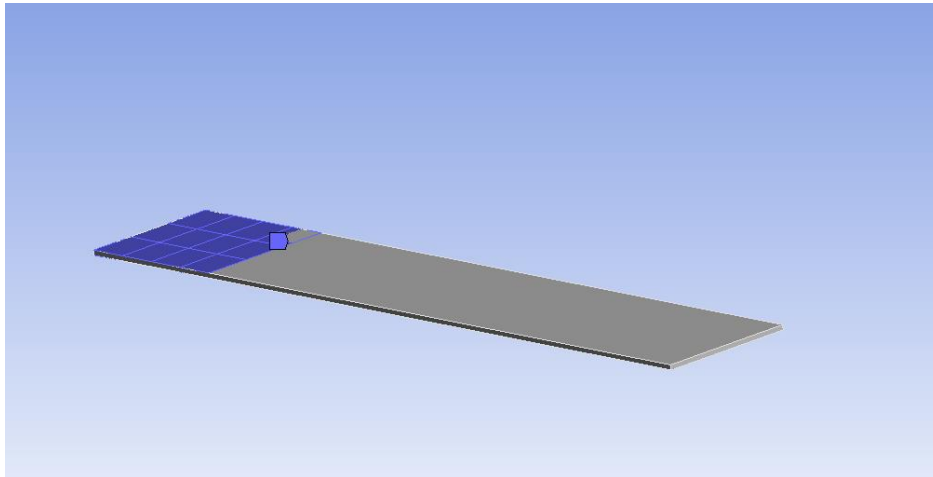


Abbildung 4.3: Modell des Balkens im ANSYS.

Das numerische Modell ist möglichst nah dem realen Modell (Abbildung 4.2) nachempfunden. Tabelle 7 beinhaltet die Ergebnisse der Simulation und der Messung.

Gemessene Eigenfrequenzen, Hz	Simulierte Eigenfrequenzen, Hz
13.9 Hz	13.915 Hz
89 Hz	87.079 Hz
146 Hz	143.74 Hz
253 Hz	244.26 Hz

Tabelle 7: Gemessene und simulierte Eigenfrequenzen.

Der maximale Unterschied U zwischen den gemessenen und simulierten Eigenfrequenzen [67]:

$$U = \frac{253 - 244.26}{253} \cdot 100\% = 3,45\% \quad (4.1)$$

Die gemessenen und simulierten Eigenfrequenzen liegen sehr nah beieinander. Der maximale Unterschied zwischen den simulierten und gemessenen Eigenfrequenzen beträgt weniger als 4 %. Das bedeutet ein korrektes Kalibrieren des Sensors mit der Möglichkeit der Verwendung für die Messungen.

4.2 Messpositionen und Messprotokoll

Die Verschiebung des Pixels kommt von der Vibration während des Betriebes. Die Durchführung der Messungen diente dem genauen Feststellen der Vibrationsstörquellen. Dabei erfolgte ein Umsetzen der Umgebungsbedingungen während der Messungen möglichst nah den Umgebungsbedingungen bei einem Experiment, demzufolge Personen in der Hütte, funktionierende Scroll- und Turbopumpen, alle Komponenten des Instruments angeschlossen und aktiviert.

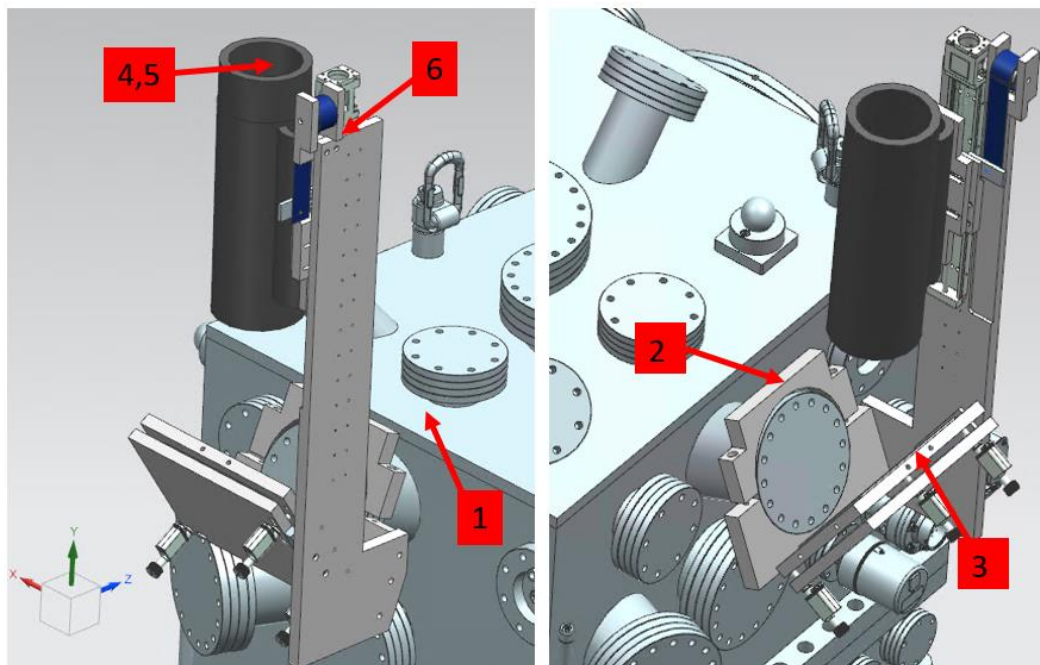


Abbildung 4.4: Skizze für den Plan der Messungen.

Die Dauer der Messungen soll möglichst groß sein. Der Grund dafür ist die niedrige Frequenzauflösung. Eine niedrige Frequenzauflösung wirkt sich auf die Qualität der Messdaten aus, detaillierter erklärt in Kapitel 2.7.

Aufgrund der beschränkten RAM-Kapazität des Rechners betrug die maximale Messlänge 175 Sekunden.

Die Durchführung der Messungen vollzog sich an verschiedenen Messpositionen, siehe Abbildung 4.4. Bei jeder Position fand eine Aufnahme von zwei Zuständen statt: ein- und ausgeschaltete Piezomotoren (im Messprotokoll als Piezo bezeichnet). Pro Position und

Zustand kam es zur Durchführung von fünf Messungen mit dem Erzeugen eines resultierenden, anschließend zu analysierenden Mittelwertsignals. Das ergibt insgesamt zehn Messungen pro eine Position 175 Sekunden lang, siehe Tabelle 8.

Ein Verdrehen, Knicken, Befestigen mit kleinen Radien oder mit der Zugspannung des Kabels zwischen dem Beschleunigungssensor und dem Ladungsverstärker muss unterbleiben, um Störspannungen auszuschließen [12].

Nummer. Abbildung 4.4	Messposition	Messzustand	Anzahl der Messungen	Messdauer
1	An der FFT Kammer	Piezo an	5	175 Sekunden
		Piezo aus	5	
2	Am Flansch	Piezo an	5	175 Sekunden
		Piezo aus	5	
3	Am Spiegelhalter	Piezo an	5	175 Sekunden
		Piezo aus	5	
4	An der Kamera: oben	Piezo an	5	175 Sekunden
		Piezo aus	5	
5	An der Kamera: unten	Piezo an	5	175 Sekunden
		Piezo aus	5	
6	Am Hebelarm	Piezo an. Kamera unten	1	175 Sekunden

Tabelle 8: Plan der Messungen vom 23.11.2021.

Die Durchführung der Messung am Hebelarm geschah zusätzlich, ursprünglich war sie im Plan der Messungen nicht vorgesehen. Die Durchführung der Messungen musste in der Hütte an einem ganz bestimmten Tag (23.11.2021) bis Mittag erfolgen; aufgrund dieser zeitlichen Beschränkung konnte nur eine Messung mit einem Zustand am Hebelarm (Nummer 6 in der Tabelle 8) stattfinden.

Kapitel 2.7 ermittelte die verwendete Abtastrate von 12 500 Hz. Alle Filter (Kapitel 2.6.2) erfuhren ihre Deaktivierung, um den kompletten Frequenzbereich zu bekommen. Eine Textdatei (TXT) nahm die Exportierung sämtlicher durchgeführter Messungen auf.

Im Hinblick auf unproblematisch greifbare Messdaten erfolgte die Aufarbeitung derselben im Programm Matrix Laboratory (MATLAB) bzw. ihre Umwandlung, Speicherung und Analyse aus dem TXT Format ins MATLAB Format. Das MATLAB Skript zur Auswertung befindet sich in Anhang A8.

4.3 Messung an der FFT Kammer

In Abbildung 4.5 ist in der FFT Kammer ein befestigter Sensor zu sehen. Alle drei Achsen des Sensors stimmen mit dem XFEL Koordinatensystem (Kapitel 2.3) überein.



Abbildung 4.5: Sensor in der FFT Kammer.

Pro Stelle erfolgte eine Aufnahme von zehn Messungen mit zwei Zuständen. Zu betrachten sind zwei Mittelwertmessungen mit angeschalteten und ausgeschalteten Piezomotoren. Abbildung 4.6 stellt die Beschleunigungen in drei Achsen dar.

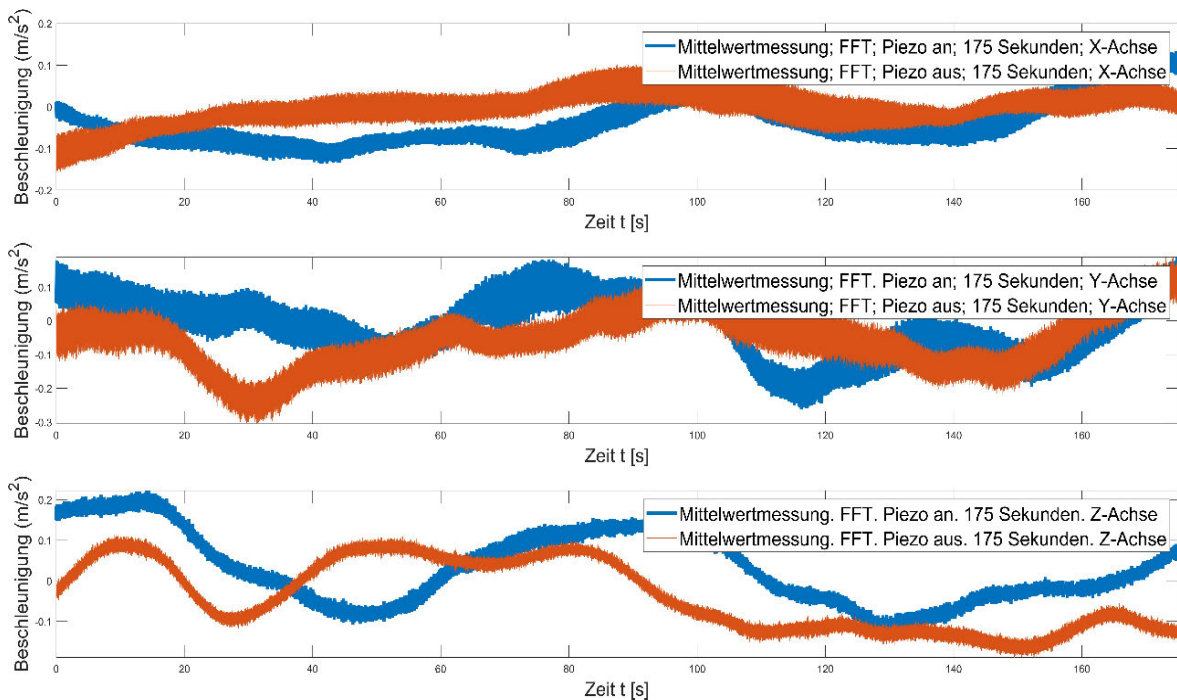


Abbildung 4.6: Beschleunigungen von zwei Mittelwertmessungen in drei Achsen.

Im Hintergrund treten für die Augen nicht erkennbare Wechselwirkungen auf, vermutlich infolge verschiedener Größenordnungen, z. B. äußere Einwirkungen hinsichtlich der Umgebung.

Tabelle 9 enthält den Mittelwert M_w und die Standardabweichung S_a dieser beiden Messungen. Eine negative Beschleunigung in der Tabelle 9 bedeutet eine gegen die gemessene Achse gerichtete Beschleunigungsrichtung.

Messung der Beschleunigung an der FFT Kammer	M_w und S_a bei FFT Kammer in [m/s ²]					
	M_w X-Achse	S_a X-Achse	M_w Y-Achse	S_a Y-Achse	M_w Z-Achse	S_a Z-Achse
Mittelwertmessung FFT. Piezo an	-0.0027	0.0548	0.0001	0.0847	0.0042	0.0980
Mittelwertmessung FFT. Piezo aus	0.0013	0.0772	-0.0043	0.1108	-0.0013	0.5081

Tabelle 9: Mittelwert und Standardabweichung. FFT Kammer.

Wie in der Abbildung 4.16 zu sehen ist, sind in allen drei Grafiken keine periodischen Schwingungsvorgänge der Beschleunigungsdaten zu erkennen. Dabei treten die Schwingungen in der jeweiligen Achse jeweils mit einer ungefähr konstanten Amplitude auf und ähneln sich im Verlauf sowohl mit eingeschalteten als auch ausgeschalteten Piezomotoren. Die Darstellung der Messsignale im Zeitbereich in diesem konkreten Fall eignet sich offenbar nicht, um daraus wertvolle Erkenntnisse zu erlangen. Aus diesem Grund kommen an dieser Stelle weitere Werkzeuge der Signalanalyse zum Einsatz.

Die Fast Fourier Transformation gestattet das Zerlegen eines zeitdiskreten Signals aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich. Beim Zerlegen eines Beschleunigungssignals wird auf der Ordinate (Y-Achse) immer noch eine Beschleunigung sein, die Abszisse (X-Achse) hingegen enthält statt der Zeit die Frequenzen.

Aus gemessenen Beschleunigungen (Abbildung 4.6) durch die Fast Fourier Transformation ergibt sich das Frequenzspektrum. Abbildung 4.7 enthält eine Darstellung des Frequenzspektrums. Die Darstellung sämtlicher dargestellter Frequenzspektren gestaltet sich doppellogarithmisch. Diese Art der Darstellung gestattet eine bessere Übersicht im Hinblick auf die Zusammenhänge im Bereich der kleinen Werte [68]. Aus diesem Grund sind alle Grafiken im Frequenzbereich so gestaltet.

In der Abbildung 4.7 ist der Frequenzbereich von 0 Hz bis 6250 Hz dargestellt, deutlich zu sehen sind die Peaks bei den Frequenzen 2 000 Hz, 1 640 Hz, 1 000 Hz, 820 Hz, 384 Hz und 29,7 Hz.

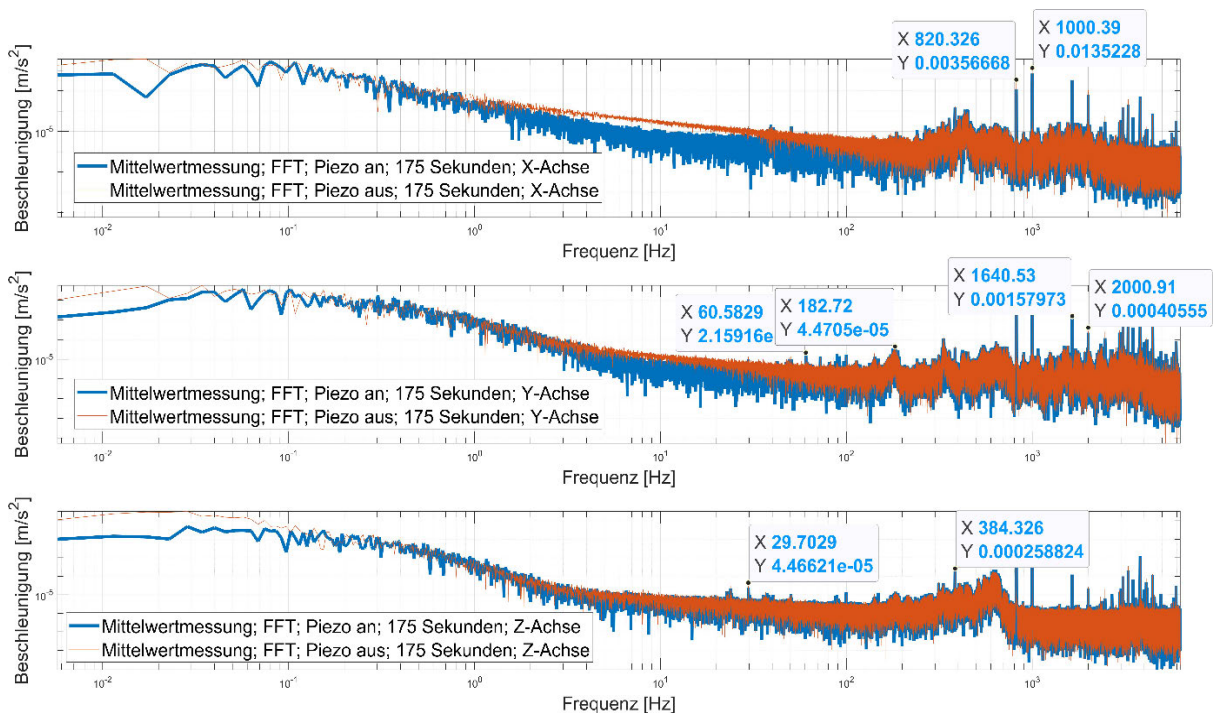


Abbildung 4.7: Frequenzspektrum der Messungen an der FFT Kammer. Piezo aus und an.

Einige davon sind identifizierbar: 1 000 Hz und 820 Hz sind die Turbopumpen, die mit diesen Frequenzen arbeiten [35]. 1 640 Hz und 2 000 Hz sind die harmonischen davon bzw. ein Vielfaches dieser Frequenzen. Die Herkunft der anderen Peaks ist nicht klar zu identifizieren bzw. Verursachern zuzuordnen, denn das SCS-Instrument hat viele Komponenten bzw. viele Mechanismen und Devices, die alle miteinander gekoppelt sind, jede von ihnen funktioniert mit ihrer eigenen Frequenz. Außerdem kann die Funktionsweise der Komponenten unharmonisch sein. Das bedeutet, sie können mit verschiedenen Eigenfrequenzen funktionieren, die sich je nach den Bedingungen (z. B. die Druckänderungen in der Beamline) ändern können, was signifikant die Identifizierung der Komponenten erschwert.

4.4 Messung am Flansch

Die Durchführung der nächsten Messung vollzog sich am Flansch. An diesem Flansch erfolgt das Befestigen des vertikalen FDM. Der Flansch mit dem Sensor ist in Abbildung 4.8 dargestellt.

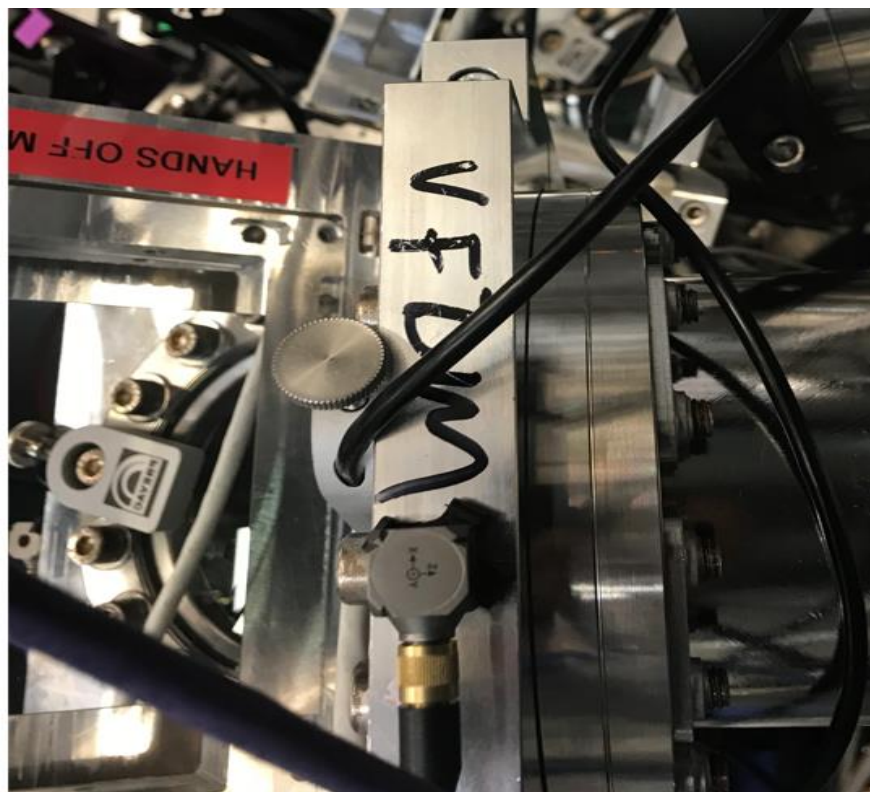


Abbildung 4.8: Der Flansch mit dem Sensor.

In Abbildung 4.9 sind die Beschleunigungen mit zwei Zuständen dargestellt: Piezomotoren an (blaue Kurve) und Piezomotoren aus (orange Kurve).

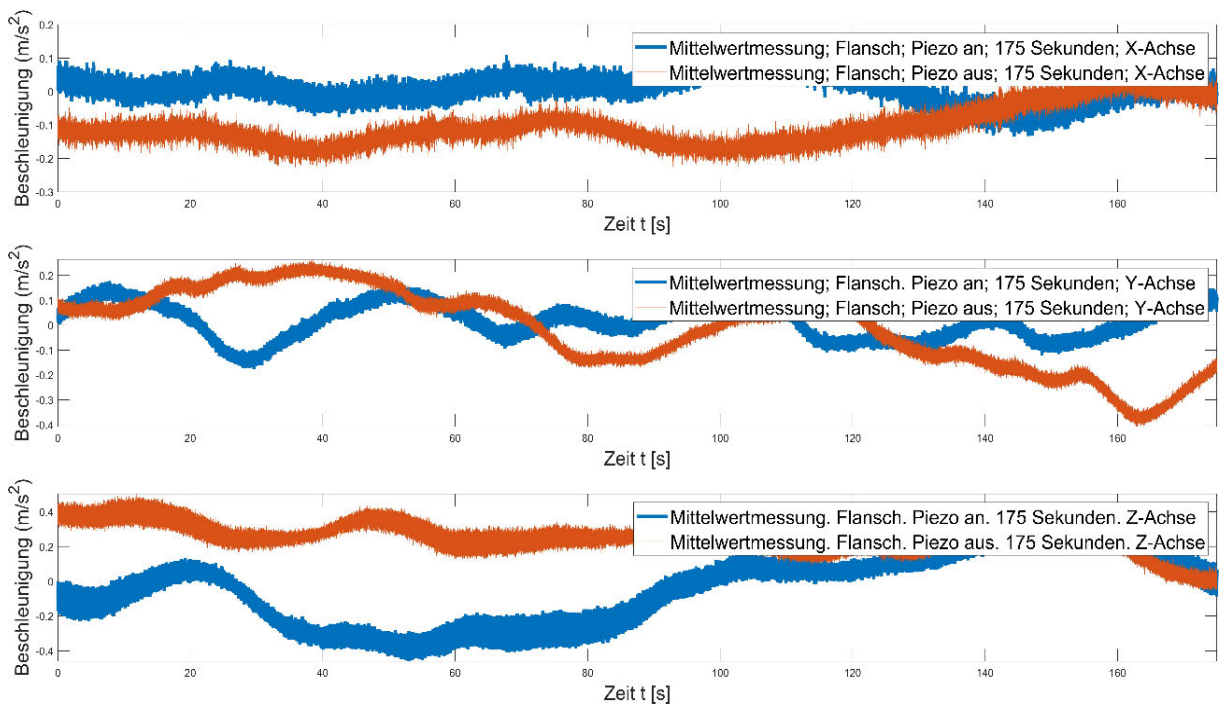


Abbildung 4.9: Beschleunigungen mit drei Achsen am Flansch. Piezomotoren aus und an.

Die dargestellten Grafiken beweisen keine harmonischen Schwingungen, infolgedessen gestaltet es sich schwierig, sie im Zeitbereich zu betrachten. Allerdings ist die Amplitude in der Y-Achse im Vergleich zu der Messung an der FFT Kammer kleiner geworden, ungefähr von 0 bis 0,1 m/s² an der FFT gegen 0,05 bis 0,1 m/s² am Flansch.

Tabelle 10 enthält eine Darstellung der Mittelwerte M_w und der Standardabweichungen S_a der Messungen am Flansch.

Messung der Beschleunigung am Flansch	M_w und S_a bei Flansch in [m/s ²]					
	M_w X-Achse	S_a X-Achse	M_w Y-Achse	S_a Y-Achse	M_w Z-Achse	S_a Z-Achse
Mittelwertmessung Flansch. Piezo an	-0.0027	0.0750	0.0026	0.1169	0.0034	0.1583
Mittelwertmessung Flansch. Piezo aus	-0.0105	0.0945	-0.0010	0.1415	0.0159	0.2007

Tabelle 10: Mittelwert und Standardabweichung. Der Flansch.

Allerdings zeigen die Mittelwerte M_w der Y-Achse mit angeschalteten Piezomotoren einen größeren Betrag als in der Messung an der FFT Kammer, siehe Tabelle 9. Die

Mittelwertmessung am Flansch in der X-Achse mit angeschalteten Piezomotoren zeigt denselben Betrag wie an der FFT Kammer in der X-Achse mit angeschalteten Piezomotoren.

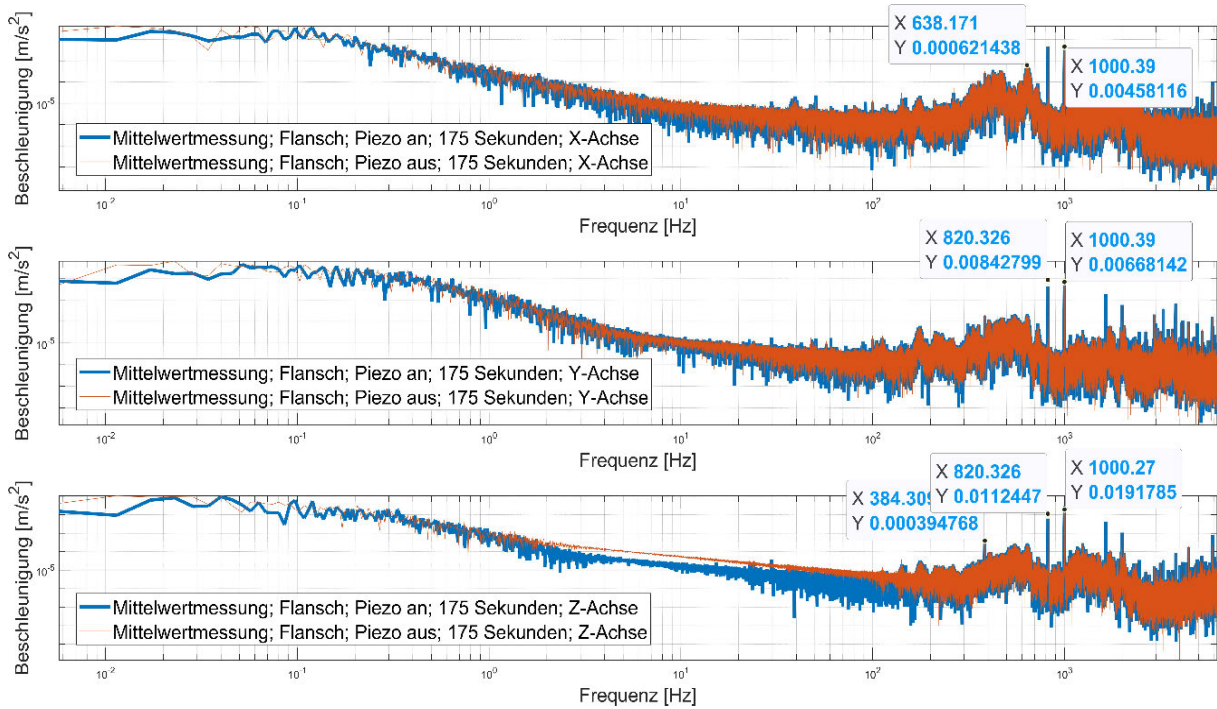


Abbildung 4.10: Frequenzspektrum der Messungen am Flansch mit an- und ausgeschalteten Piezomotoren.

Abbildung 4.10 stellt das Frequenzspektrum der beiden Mittelwertmessungen dar. In der dargestellten Grafik sind die Frequenzen der Turbopumpen von 1 000 Hz und 820 Hz zu sehen. Die Frequenz von 384 Hz ist ebenfalls dort dargestellt. Der Peak bei 638 Hz ist schwierig zu identifizieren.

4.5 Messung am Spiegelhalter

Die Verschiebungen des Pixels, die am Bild des Mikroskops herrschen, können die Vibrationen vom Spiegel selbst sein. Die Messung am Spiegel selbst ist allerdings nicht möglich, da diese eine Beschädigung desselben hervorrufen könnte. Deswegen kam es zur Entscheidung, den Sensor am Spiegelhalter zu befestigen. Der Sensor ist in Abbildung 4.11 dargestellt.

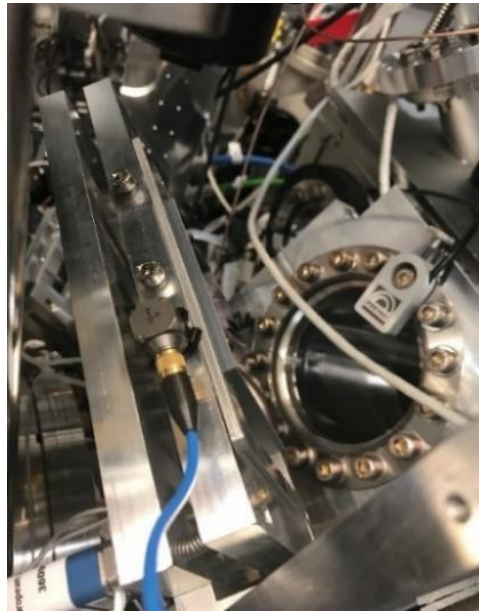


Abbildung 4.11: Spiegelhalter mit dem Sensor.

Das Befestigen des Kabels geschah auch mit Klebeband, damit es nicht mitschwingt. Andernfalls könnten die Messungen unbrauchbar sein.

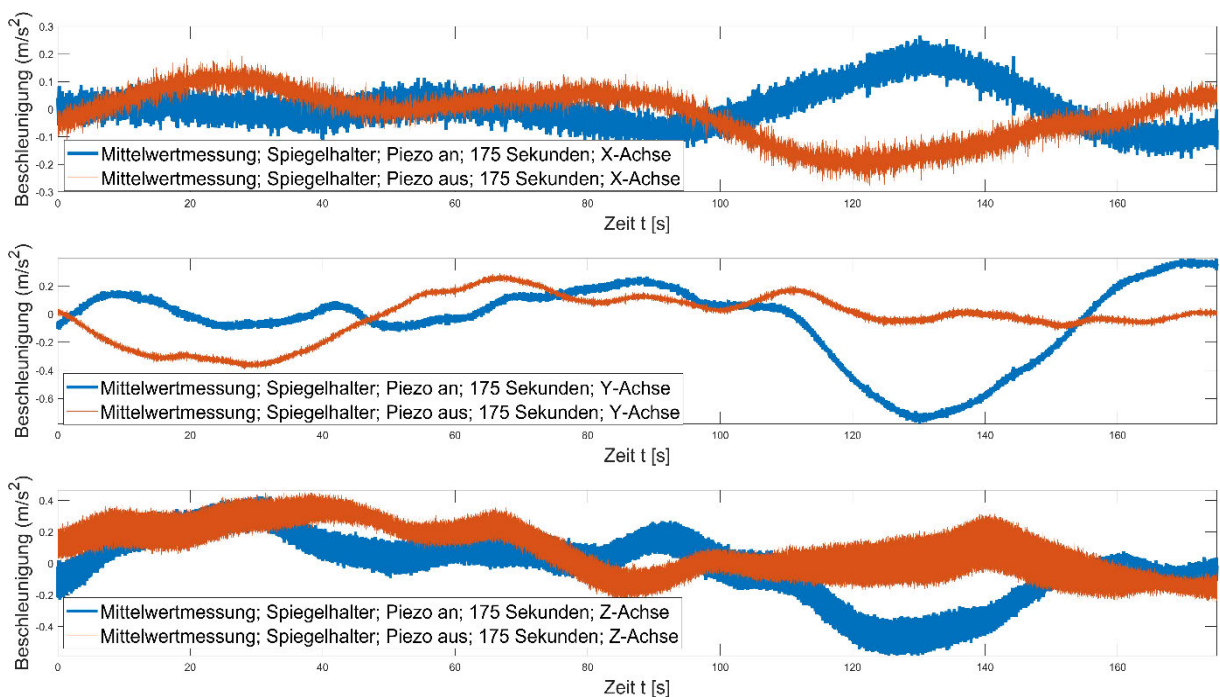


Abbildung 4.12: Die Beschleunigungen in drei Achsen der Messungen am Spiegelhalter mit an- und ausgeschalteten Piezomotoren.

Die gemessenen Beschleunigungen sind in Abbildung 4.12 dargestellt. Die maximale Beschleunigungsamplitude ist in der Z-Achse zu sehen. Sie beträgt $0,2 \text{ m/s}^2$. Der Spiegelhalter ist in der Z-Achse durch die Zugfedern unterstützt, eventuell ist es der Grund für diese

Beschleunigungsamplitude. In der Tabelle 11 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Messungen am Spiegelhalter zu sehen.

Messung der Beschleunigung am Spiegelhalter	M_w und S_a bei Spiegelhalter in [m/s ²]					
	M_w	S_a	M_w	S_a	M_w	S_a
	X-Achse	X-Achse	Y-Achse	Y-Achse	Z-Achse	Z-Achse
Mittelwertmessung Spiegelhalter. Piezo an	0.0026	0.0739	0.0050	0.2259	0.0039	0.1808
Mittelwertmessung Spiegelhalter. Piezo aus	2.31e-05	0.0839	0.0004	0.2532	0.0029	0.1932

Tabelle 11: Mittelwert und Standardabweichung. Spiegelhalter.

Es gibt definitiv einen Einfluss vonseiten der an- und ausgeschalteten Piezomotoren. Der Mittelwert bei angeschalteten Piezomotoren ist größer als bei ausgeschalteten. Abbildung 4.13 enthält eine Darstellung des Frequenzspektrums der beiden Messungen.

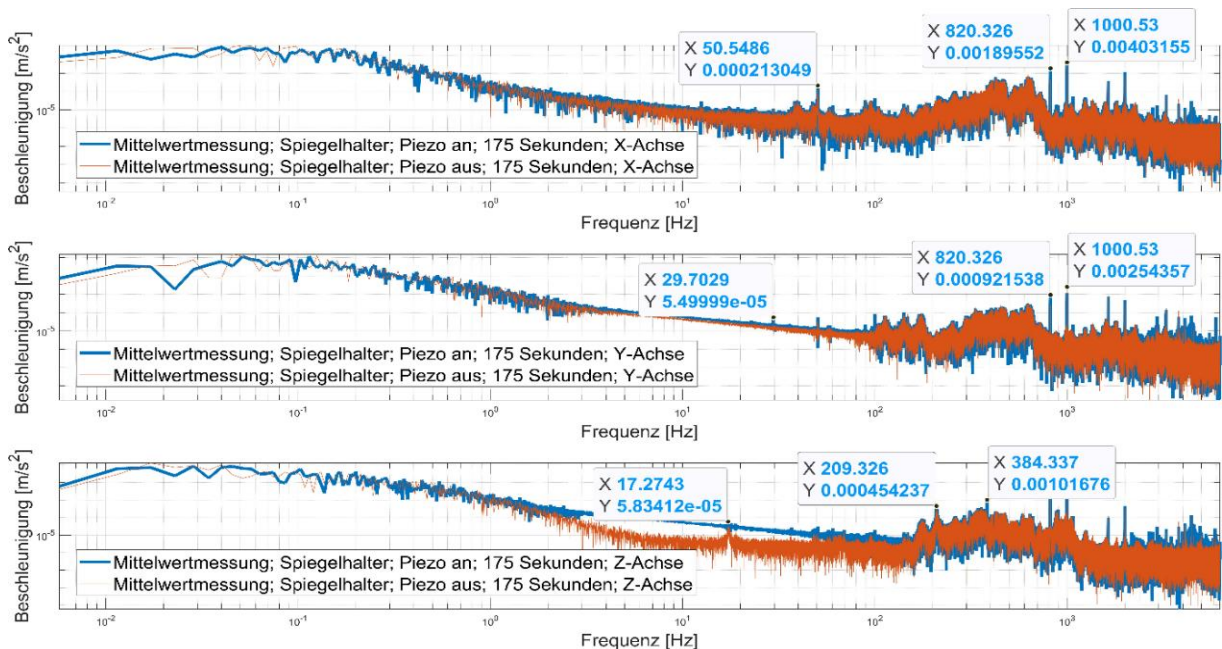


Abbildung 4.13: Frequenzspektrum der Messungen am Spiegelhalter mit an- und ausgeschaltetem Piezomotor.

Dieses Spektrum lässt auch die andere Frequenz sehen: 17.27 Hz. Die Frequenz 29,7 könnte einer der Vorpumpe gehören ($\frac{1750 \text{ rpm}}{60} = 29,16 \text{ Hz}$) [54]. Die anderen Grafiken könnten diese Frequenz ebenfalls beinhalten. Hierzu gibt es zwei Optionen: Bei der ersten könnte der

Einfluss dieser Frequenz am vorherigen Messort zu niedrig gewesen sein, um sie eindeutig identifizieren zu können. Diese Option beruht auf einer zu großen Entfernung der Störquelle vom Messort. Nach der zweiten Option könnte diese Frequenz zu einer Komponente gehören, die nur während der Messung am Spiegelhalter aktiviert war.

4.6 Messung an der Kamera

Da die Kamera einen motorisierten Antrieb bzw. eine motorisierte Linearführung hat, erfolgte die Durchführung der Messungen in zwei Positionen, die oberste und die unterste. Der Unterschied zwischen ihnen betrug 300 mm [56]. Der Masseschwerpunkt ändert sich, und es ist auch eine Änderung der Schwingungsfrequenzen zu erwarten (Kapitel 3.1.2). An der X-Achse sind auch die größten Auslenkungen zu erwarten, denn dort wirkt der Hebel ein.

4.6.1 Kamera oben

Abbildung 4.14 enthält ein Foto des Messortes. Der Sensor stimmt mit dem XFEL Koordinatensystem überein.



Abbildung 4.14: Kamera. Oben.

Abbildung 4.15 beinhaltet die Mittelwertmessungen der Kamera: oben im Zeitbereich. Die Beschleunigungsamplitude in der X-Achse ist relativ konstant und beträgt ca. $0-0,1 \text{ m/s}^2$. Dies ist zu erwarten, denn in dieser Achse wirkt sich der Einfluss des Hebels aus. Die anderen Achsen sind chaotisch.

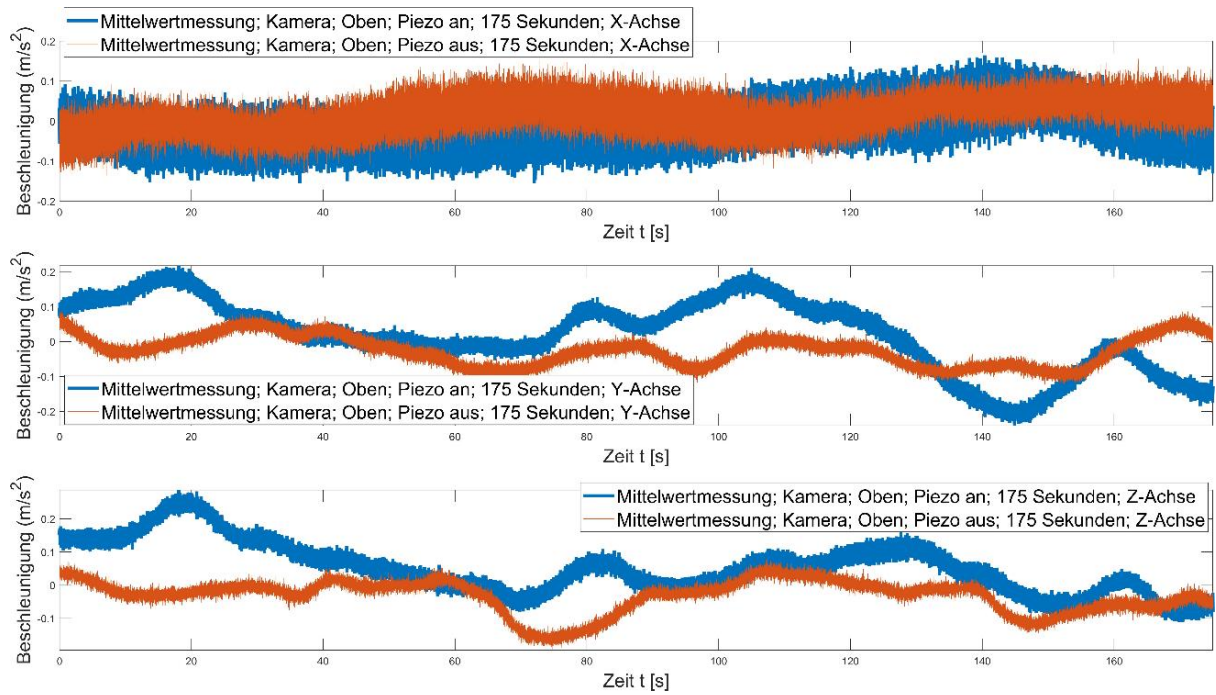


Abbildung 4.15: Beschleunigungen in drei Achsen. An der Kamera. Oben. Piezo an und aus.

Tabelle 12 enthält eine Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen dieser beiden Messungen. Obwohl die Beschleunigungsamplitude in der X-Achse am größten zu sein scheint, liegt der größte Mittelwert bei der Z-Achse, es hängt damit zusammen, dass die Auslenkung der Beschleunigungsamplitude in einem Zeitbereich den Betrag fast bis zu $-0,2 \text{ m/s}^2$ erreicht, was im Bereich zwischen 60 und 80 Sekunden erkennbar ist, siehe Abbildung 4.15. Die Beschleunigungsamplitude in den Achsen Z und Y ist nicht konstant im Gegensatz zur X-Achse.

Messung der Beschleunigung an der Kamera: oben	M_w und S_a bei Kamera oben in $[\text{m/s}^2]$					
	M_w X-Achse	S_a X-Achse	M_w Y-Achse	S_a Y-Achse	M_w Z-Achse	S_a Z-Achse
Mittelwertmessung Kamera oben. Piezo an	-0.0009	0.044	-4.53e-06	0.0693	0.0007	0.0903
Mittelwertmessung Kamera oben. Piezo aus	0.0012	0.0481	-0.00032	0.0568	0.0018	0.0873

Tabelle 12: Mittelwert und Standardabweichung. Kamera oben.

Abbildung 4.16 zeigt das Frequenzspektrum der gemessenen Mittelwertmessungen der Abbildung 4.15.

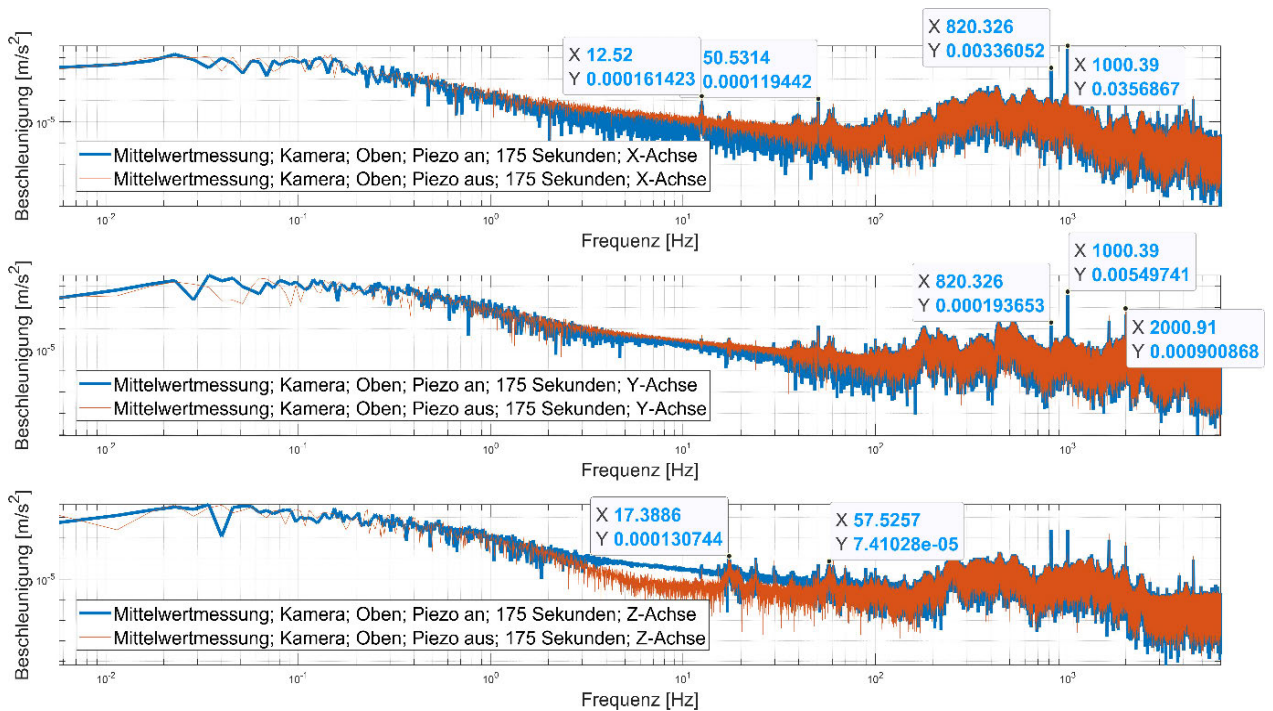


Abbildung 4.16: Frequenzspektrum der Messungen. In drei Achsen. An der Kamera. Oben. Piezo an und aus.

Der zusätzliche Peak liegt in Abbildung 4.16 deutlich erkennbar bei 12,52 Hz. Diese Frequenz ist der erste im Frequenzspektrum auftretende Peak. Die Peaks im Bereich von 23-24 Hz könnten einer der Vorpumpe gehören, denn sie funktioniert in diesem Frequenzbereich ($\frac{1440 \text{ rpm}}{60} = 24 \text{ Hz}$) [69]. Laut Kapitel 3.1.2.4 funktioniert die Kamera bzw. das Mikroskop mit der maximalen Frequenz von 26 Hz [61]. Das heißt, die am meisten störende Vibration der Pixel dürfte im Frequenzbereich von 0 Hz bis 26 Hz liegen.

4.6.2 Kamera unten

Die Hebelarmlänge in dieser Position ist kleiner, das heißt, der erste Peak der Frequenz sollte höher liegen, siehe Formel (3.2). Abbildung 4.17 enthält ein Foto vom Messort.

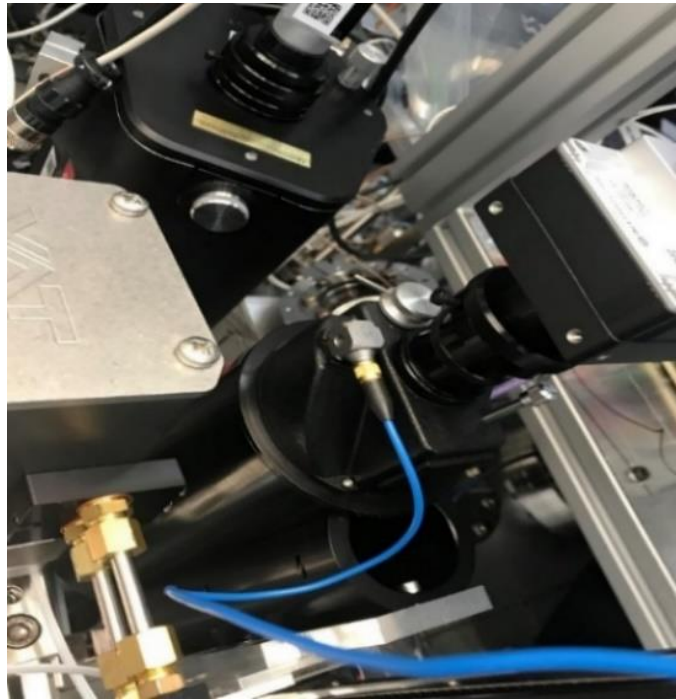


Abbildung 4.17: Kamera. Unten.

Abbildung 4.18 beinhaltet die Mittelwertmessungen im Zeitbereich. Blaue Kurve – Piezo ist an. Orange Kurve – Piezo ist aus.

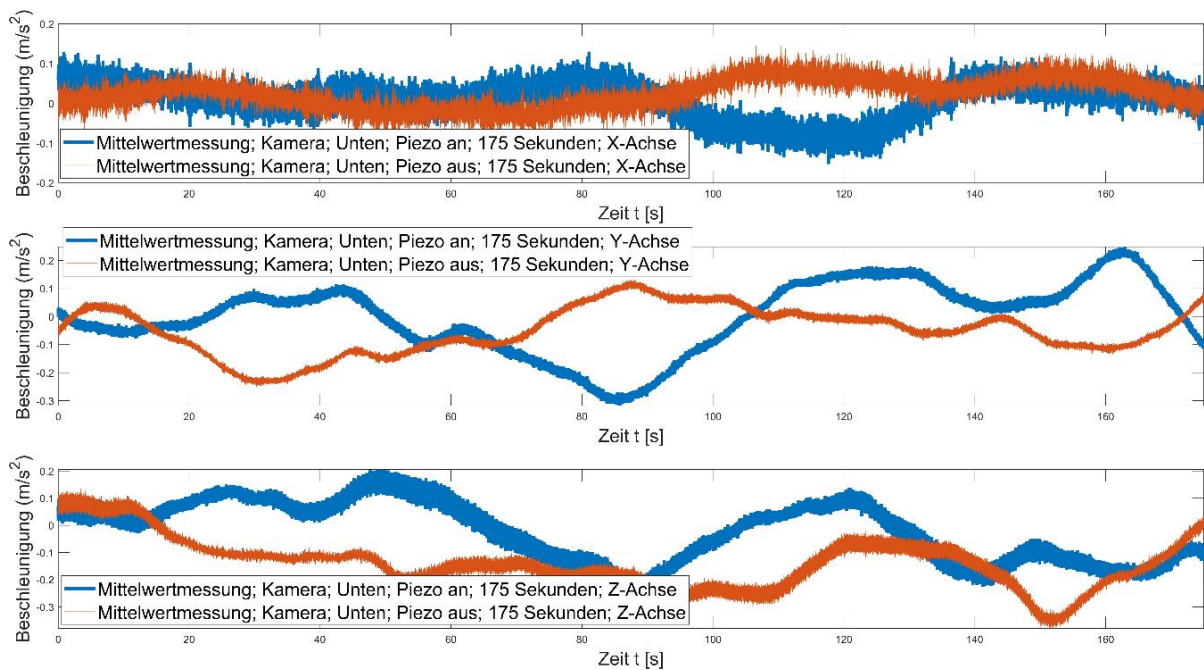


Abbildung 4.18: Beschleunigungen in drei Achsen. An der Kamera. Unten. Piezo an und aus.

Wie in der vorherigen Messung (Kapitel 4.6.1) zeigt diese Messung eine relativ konstante Beschleunigungsamplitude in der X-Achse. Tabelle 13 beinhaltet die Mittelwerte und die Standardabweichungen dieser Messungen.

Messung der Beschleunigung an der Kamera: unten	M_w und S_a bei Kamera unten in [m/s ²]					
	M_w X-Achse	S_a X-Achse	M_w Y-Achse	S_a Y-Achse	M_w Z-Achse	S_a Z-Achse
Mittelwertmessung Kamera unten. Piezo an	-0.0018	0.0438	0.0011	0.0963	0.0054	0.1158
Mittelwertmessung Kamera unten. Piezo aus	0.0027	0.0488	-0.0020	0.1263	-0.0068	0.1545

Tabelle 13: Mittelwert und Standardabweichung. Kamera unten.

Tabelle 13 verdeutlicht einen Einfluss der Piezomotoren auf die Kamera in dieser Position, denn die Beschleunigungsrichtungen in den Mittelwerten M_w ändern sich bei aus- und angeschalteten Piezomotoren.

Abbildung 4.19 enthält eine Darstellung des Frequenzspektrums der beiden Mittelwertmessungen.

Befindet sich die Kamera oben, tritt der erste Peak bei 12,5 Hz auf, in Abbildung 4.19 deutlich erkennbar. Befindet sich die Kamera unten, tritt der erste Peak bei 16,46 Hz auf, Abbildung 4.19; denn da ändert sich die Hebelarmlänge.

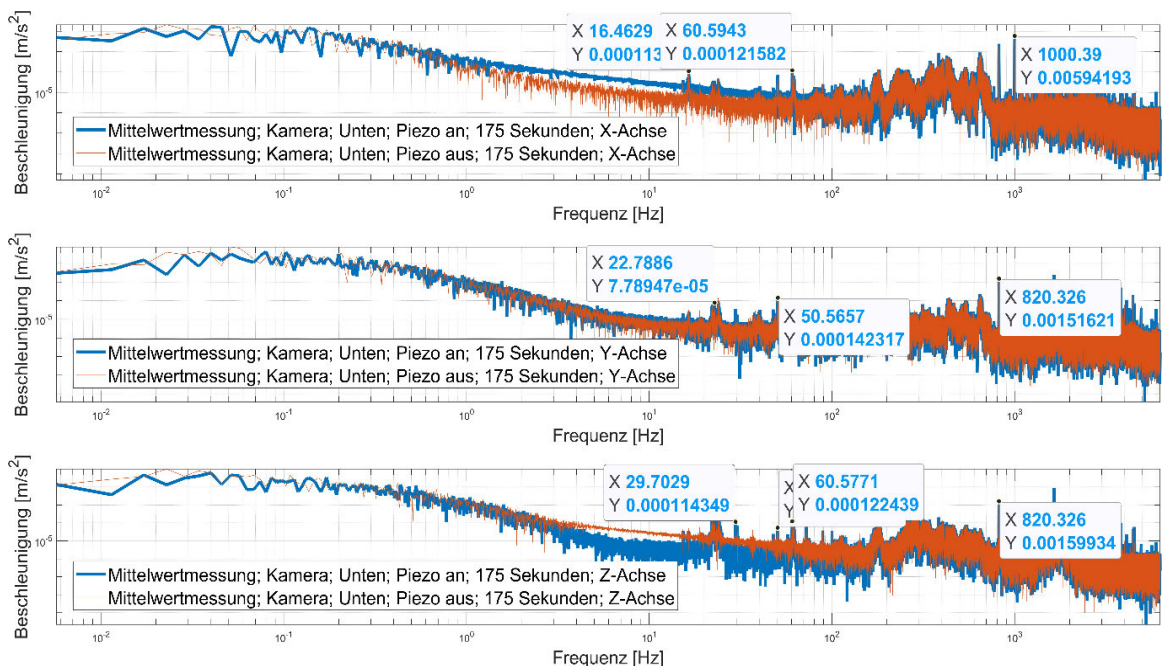


Abbildung 4.19: Frequenzspektrum der Messungen. Kamera. Unten. Piezo an und aus.

Je kleiner die Hebelarmlänge, desto höher liegt die Frequenz. Im Gegensatz dazu: Je größer die Hebelarmlänge, desto tiefer liegt die Frequenz [9, 14]. Kapitel 3.1.2.5 hat dies detaillierter erklärt. Die durchgeführten Messungen und die Analyse bestätigen diese Theorie.

4.7 Messung am Hebelarm

Zusätzlich zu den Hauptmessungen erfolgte eine weitere Messung am Hebelarm. Aufgrund der zeitlichen Beschränkung fand die Messung nur mit angeschalteten Piezomotoren statt. Die Kamera befand sich unten während der Messung, siehe Abbildung 4.20.

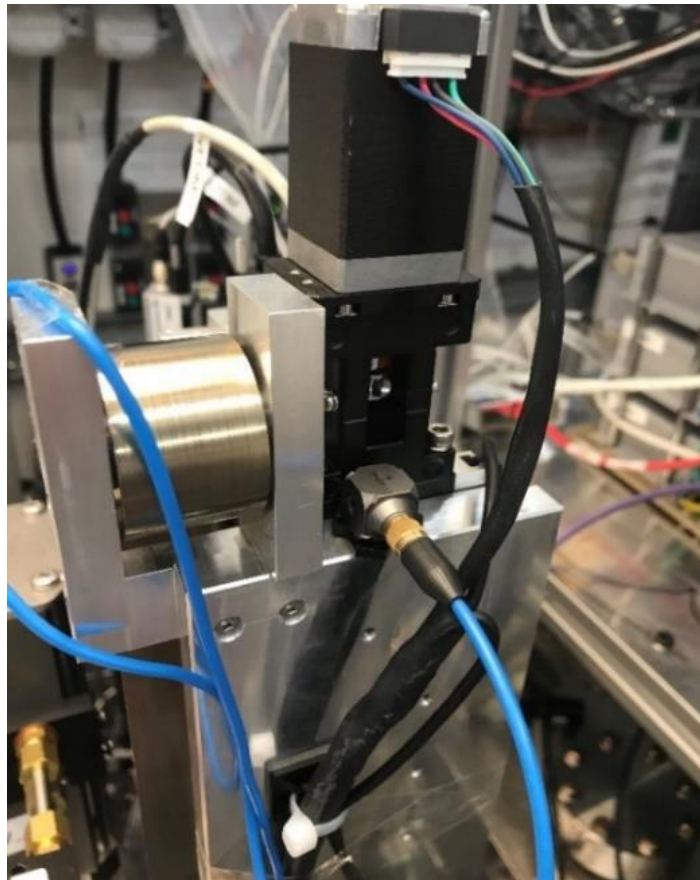


Abbildung 4.20: Der Sensor am Hebelarm.

Um den Unterschied im Frequenzspektrum sehen zu können, ist zum Vergleich eine Messung an der Kamera in der obersten Position (Kapitel 4.6.1) vorzunehmen. Die Kamera war während der Messung am Hebelarm unten.

Die blaue Kurve ist die Messung am Hebelarm. (Abbildung 4.20), die orange Kurve ist die Messung an der Kamera. Unten (Abbildung 4.17).

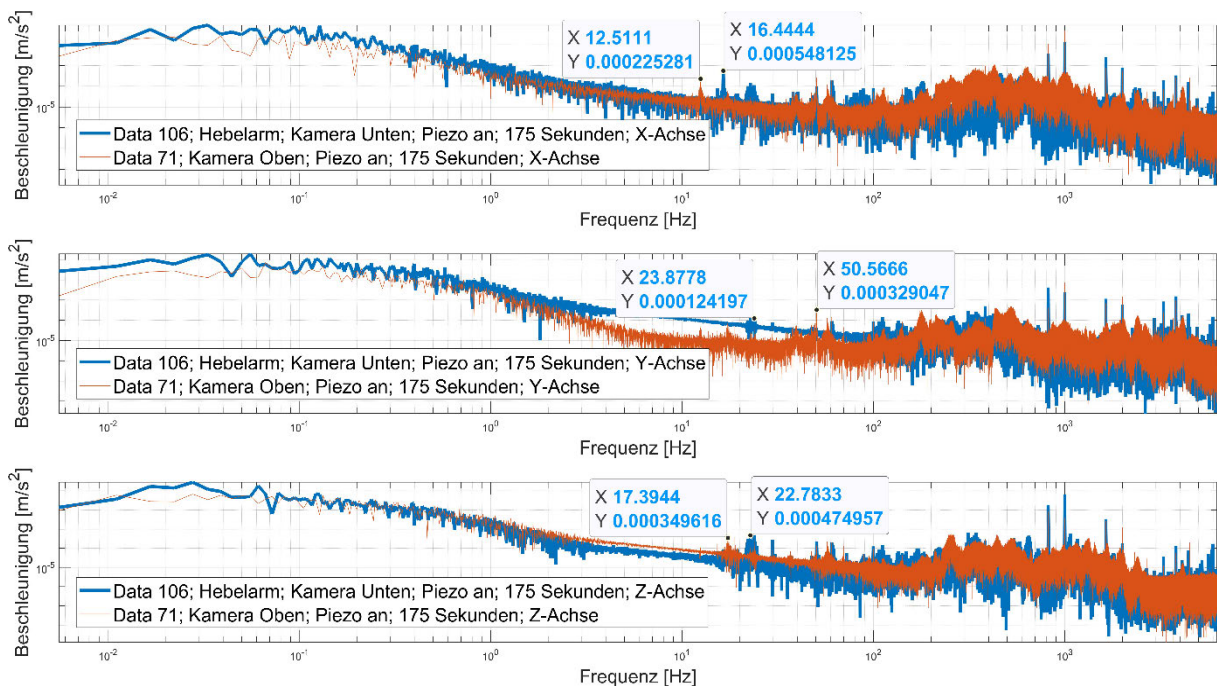


Abbildung 4.21: Frequenzspektrum der Messungen am Hebelarm und an der Kamera (unten).

In der Abbildung 4.21 ist der Unterschied zwischen den Positionen oben und unten sehr deutlich erkennbar. 12,47 Hz ist der erste Peak bei Kamera oben. 16,44 Hz ist der erste Peak bei einer Hebelarmmessung (Kamera unten). Die Peaks im Bereich von 23-24 Hz und 29-30 Hz können den Vorpumpen gehören. Die Frequenzen im Bereich über 26 Hz sind irrelevant, denn die Kamera funktioniert mit der Frequenz von 26 Hz, infolgedessen kann sie hohe Frequenzen (höher als 26 Hz) nicht erfassen. Außerdem ist es unmöglich, Frequenzen von 820 Hz und 1 000 Hz zu beseitigen, da diese von den Turbopumpen stammen, die ein Ultrahochvakuum erzeugen und aufrechterhalten.

4.8 Zusammenfassung der Messergebnisse

Bei sämtlichen Frequenzspektren sind immer die Peaks bei den Frequenzen von 1 000 und 820 Hz zu sehen. Diese Frequenzen kommen von den Turbopumpen und sind nicht zu eliminieren. Die Frequenz von 384 Hz gehört nicht zu den Piezomotoren, denn sie ist immer zu sehen, sowohl bei an- als auch bei ausgeschalteten Piezomotoren. Die Herkunft dieser Frequenz ist unklar. Die Frequenzen im Bereich von 23-24 Hz und 29-30 Hz können eventuell den Vorpumpen gehören [54, 69]. Die relevanteste Achse ist die X-Achse, da dort der Hebel einwirkt. Wie in Kapitel 3.1.2.4 erwähnt, funktioniert die Kamera mit einer Bildrate von 26 fps [61]. Das bedeutet, die Schwingungen, die die Kamera erfasst, liegen im Frequenzbereich von 0 bis 26 Hz.

Bei nahezu allen Messungen lag die Beschleunigung auf der X-Achse relativ konstant, während die Beschleunigung auf den anderen zwei Achsen abwechselnd gewesen ist.

Außerdem hat die Hebelarmlänge bzw. der Schwerpunktabstand einen Einfluss. Je länger der Hebelarm oder der Schwerpunktabstand, desto kleiner müssen die Frequenzen sein, siehe Formel (3.2).

Tabelle 14 enthält die Darstellung eines Vergleiches zwischen den Beschleunigungsmittelwerten von Messungen an der Kamera in der oberen und unteren Position. Die Beträge der Beschleunigungswerte in der unteren Position sind laut den Messungen größer als in der oberen.

Position der Kamera:	M_w der Messungen an der Kamera: oben und unten [m/s ²].		
	M_w X-Achse	M_w Y-Achse	M_w Z-Achse
Kamera oben	-0,0009	-4,53e-06	0,0007
Kamera unten	-0,0018	-0,0020	0,0054

Tabelle 14: Vergleich zwischen den Mittelwerten an der Kamera: oben und unten.

Die während des Betriebes entstehenden Schwingungen sind stochastisch bzw. zufällig. Dazu hat das SCS-Instrument viele Komponenten, die mit seiner eigenen Frequenz funktionieren, die Schwingung einer Komponente beeinflusst die Schwingung einer anderen Komponente. Darüber hinaus existiert ein Einfluss von äußeren Anregungsfrequenzen, siehe Kapitel 3.2. Daraus ergibt sich ein gekoppeltes Problem. Ein gekoppeltes Problem beeinflusst die Bewegung eines Schwingers und eines anderen Schwingers oder mehrerer Schwinger des Systems [70]. Aus diesem Grund gestaltet es sich schwierig, die Schwingungsquellen zu identifizieren. Allerdings sind einige Frequenzen identifiziert worden.

Außerdem herrscht möglicherweise während des Betriebes eine Resonanz bzw. eine Koinzidenz zwischen der Eigenfrequenz der Konstruktion und einer von außen einwirkenden Frequenz. Um das herauszufinden, führt das nächste Kapitel eine Eigenfrequenzmessung durch.

5 Experimentelle Ermittlung der Eigenfrequenzen bei der vorhandenen Konstruktion

Die Ermittlung der Eigenfrequenzen ist wichtig für die Bestimmung der Steifigkeit und den Dämpfungsgrad. Sie wurden schon im Kapitel 2.10 und 2.11 erwähnt. Je höher die Eigenfrequenz ist, desto steifer ist die Konstruktion [12]. Während des Betriebes dürfte eine Resonanz herrschen bzw. eine Koinzidenz zwischen der Eigenfrequenz der Konstruktion und der außereinwirkenden Frequenz. Die Eigenfrequenzmessungen erfolgen am vFDM zusammen mit der Probenkammer. Denn dies entspricht mehr den realen Bedingungen im Betrieb. Deswegen wurde gesamte Konstruktion an der FFT Kammer verbaut und gemessen.

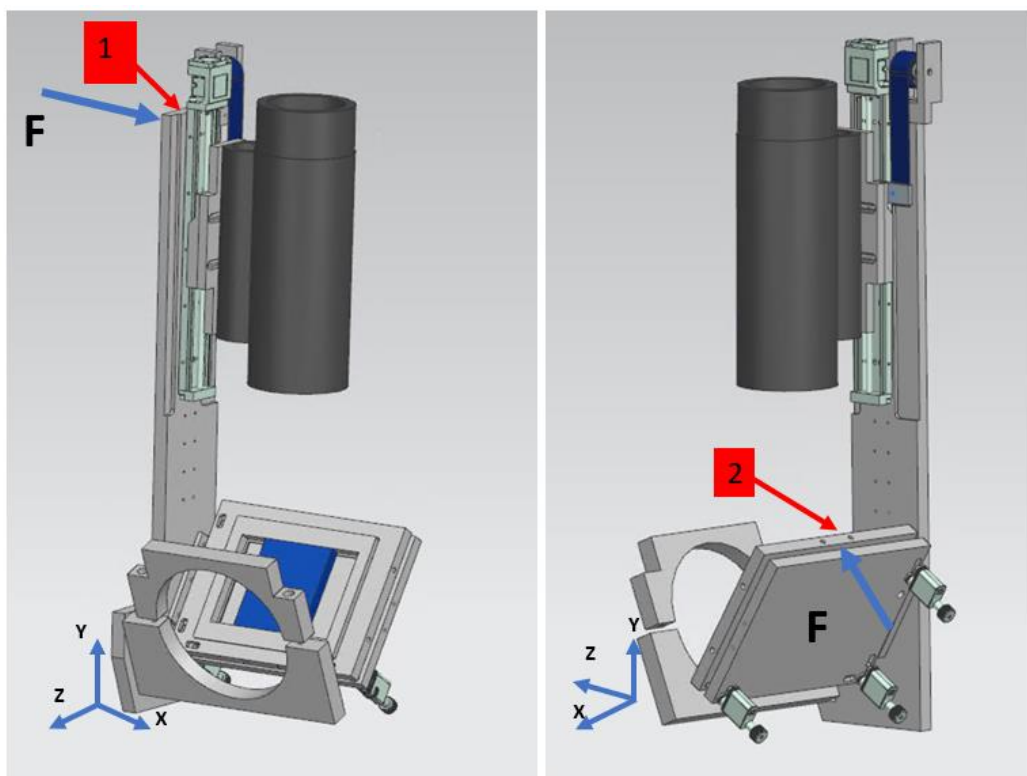


Abbildung 5.1: Plan für Eigenfrequenzermittlung.

Zur Messung gelangen die Eigenfrequenzen in zwei Messpositionen, siehe Abbildung 5.1: am Hebelarm (1) und dem Spiegelhalter (2). Die Pfeile F zeigen den Ort, an dem die Schwingungen mittels eines Impulshammers (Kapitel 2.6.3) angeregt waren. Weil die Mikroskope und die Kamera (siehe Kapitel 3.1.2) sehr empfindliche Geräte sind, könnten Einschläge des Impulshammers sie beschädigen. Der Ersatz durch eine Platte mit dem gleichen Gewicht ($\approx 1,6 \text{ Kg}$) sollte das verhindern. Die Aufnahme der Messung am Hebelarm umfasst zwei Zustände: Gewichtsplatte unten, Gewichtsplatte oben. Die Eigenfrequenzen dürften sich ändern, je nachdem, wo sich das Gewicht befindet, siehe Kapitel 3.1.2. Die benutzte Abtastrate betrug 12 500 Hz. Wie in Kapitel 4.2 erwähnt, gelangte MATLAB zum Einsatz für die Analyse der Messergebnisse. MATLAB hat einen integrierten Befehl für die

Übertragungsfunktion *modalfirf* [71]. Für die Bestimmung der Eigenfrequenz und des Dämpfungsgrades findet der Befehl *modalfit* Verwendung [72]. Das Ermitteln der Eigenfrequenz und des Dämpfungsgrades vollzieht sich mittels dieses Befehls.

Zur Ermittlung der Dämpfung bietet MATLAB mittels der Funktion *modalfit* unterschiedliche Methoden an [72]:

- Least-squares complex exponential (lsce) Methode. Der Mathematiker und Ingenieur Gaspar Riche de Prony entwickelte im Jahr 1795 diese Methode. Sie berechnet die Impulsantwort der Übertragungsfunktion und fittet diese durch Summierung der komplexen gedämpften Schwingungen [12, 72].
- Least-squares rational function (lsrf). Die Anwendung dieses Algorithmus hat eine Besonderheit, er lässt sich anwenden, wenn die Auflösung eines Frequenzvektors (Kapitel 2.7) nicht einheitlich ist [12, 72].
- Peak picking Methode. (PP). Nach dieser Methode hat jeder Peak in der Übertragungsfunktion eine Eigenmode. Diese Methode liefert ziemlich präzise Ergebnisse bei Übertragungsfunktionen mit erkennbaren Peaks [12, 72].

Die Peak Picking Methode findet Verwendung für die Ermittlung des Dämpfungsgrades und der Eigenfrequenz; denn sie liefert präzise Ergebnisse. Das MATLAB Skript zur Auswertung befindet sich in Anhang A8.

5.1 Eigenfrequenzmessung am Hebelarm: Gewicht oben

Abbildung 5.2 enthält ein Foto vom Messungsort. Die Achsen des Sensors stimmen mit dem XFEL-Koordinatensystem überein.

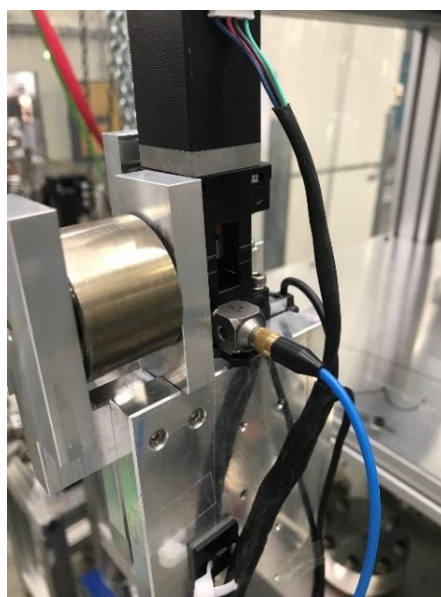


Abbildung 5.2: Messungsort vom Hebelarm.

Der Einschlag durch den Impulshammer war senkrecht zu der Führungsplatte gegeben. Der Anregungsimpuls ist gegeben und sofort kommt es zur Aufnahme der Strukturantwort bzw. der Beschleunigung. Abbildung 5.3 enthält die Darstellung der Antwort der Struktur auf den Anregungsimpuls.

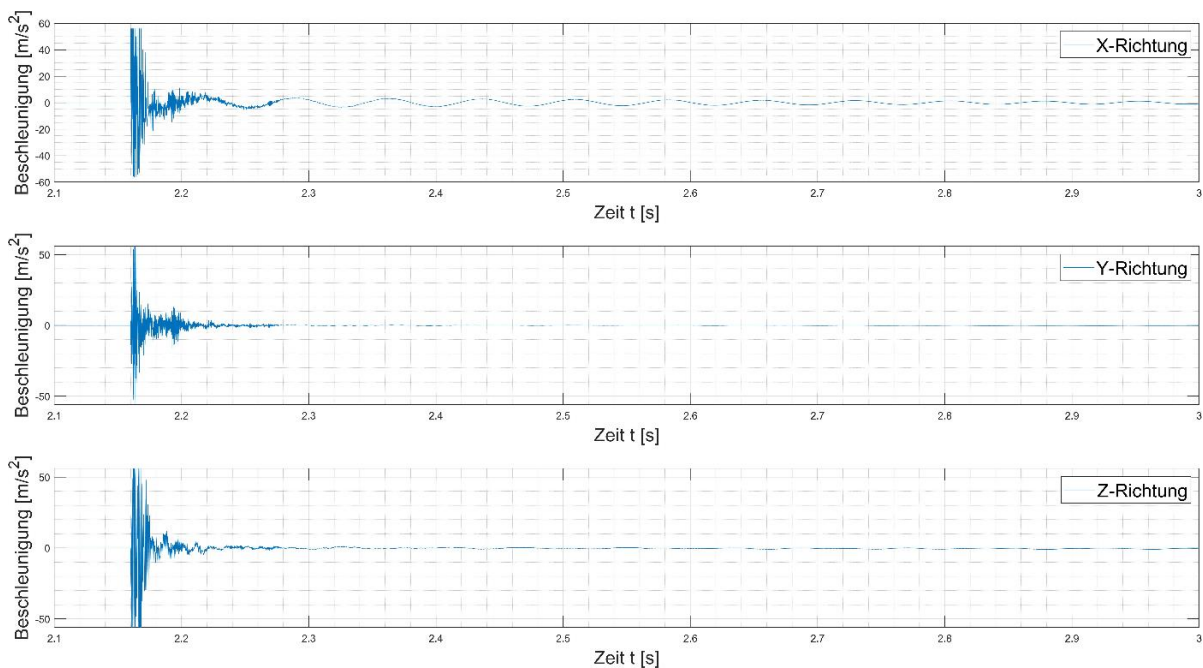


Abbildung 5.3: Strukturantwort. Gewicht oben.

Der Ladungsverstärker misst alle vier Signale (die Beschleunigung in drei Achsen und den Kraftimpuls) gleichzeitig. Sobald der Kraftimpuls gegeben ist, gibt es sofort die Strukturantwort. Die Strukturantwort in der ersten Zeit nach dem Anschlag (Abbildung 5.3 ab 2.15 s) ist sehr stark, infolgedessen ist die Beschleunigung größer als 50 m/s^2 . Der Sensor kann aber nur im Bereich von -50 bis $+50 \text{ m/s}^2$ messen. Deswegen sind am Anfang alle drei Signale der Beschleunigung auf 50 m/s^2 begrenzt. Findet ein Dämpfen der Strukturantwort statt, kommt der Sensor wieder in den Messbereich und nimmt die Beschleunigungswerte weiter auf, was in der Abbildung 5.3 gut zu sehen ist.

Durch das Einsetzen der Strukturantwort und den Anregungsimpuls in die Formel (2.16) ergibt sich die Übertragungsfunktion. MATLAB beinhaltet den Übertragungsfunktionsbefehl `modalfreq` [71]. Die Strukturantwort und der Anregungsimpuls wurden dort eingesetzt und das Ergebnis ist in der Grafik dargestellt. In der Abbildung 5.4 ist die Eigenfrequenz der Messung am Hebelarm: oben.

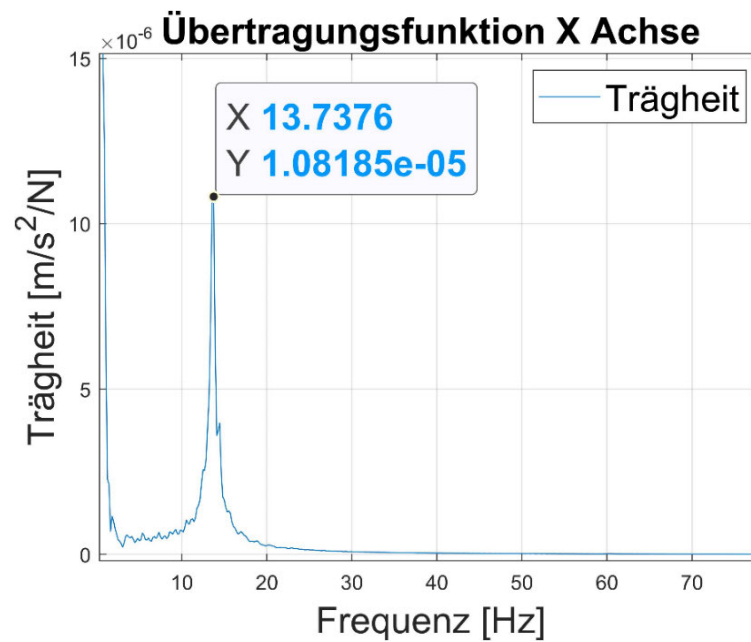


Abbildung 5.4: Übertragungsfunktion. Hebelarm. Gewicht oben.

Die Eigenfrequenz ist mehr in der X-Achse (siehe Abbildung 5.1) zu sehen, denn dort wirkt der Hebel ein.

Das Ermitteln des Dämpfungsgrades ergibt sich mittels der Benutzung des im MATLAB integrierten Befehls *modalfit* [12, 72]. Die Eigenfrequenz und der Dämpfungsgrad sind in der Tabelle 15 gegeben.

Eigenfrequenz f_n	Dämpfungsgrad ϑ .
13,74 Hz	0,0167

Tabelle 15: Eigenfrequenz und Dämpfungsgrad von MATLAB. Hebelarm. Oben.

Laut Tabelle 6 handelt es sich beim Dämpfungsgrad von 0,0167 um eine schwache Dämpfung.

5.2 Eigenfrequenzmessung am Hebelarm: Gewicht unten

Der Messort ist derselbe geblieben, siehe Abbildung 5.2. Allerdings befand sich die Gewichtsplatte unten. Die Strukturantwort auf den Anregungsimpuls ist in Abbildung 5.5 dargestellt. Die meisten Schwingungen dürften in der X-Achse auftreten. Diese Schwingungen sollten mit deutlich hoher Frequenz auftreten, denn die Gewichtsplatte befindet sich unten.

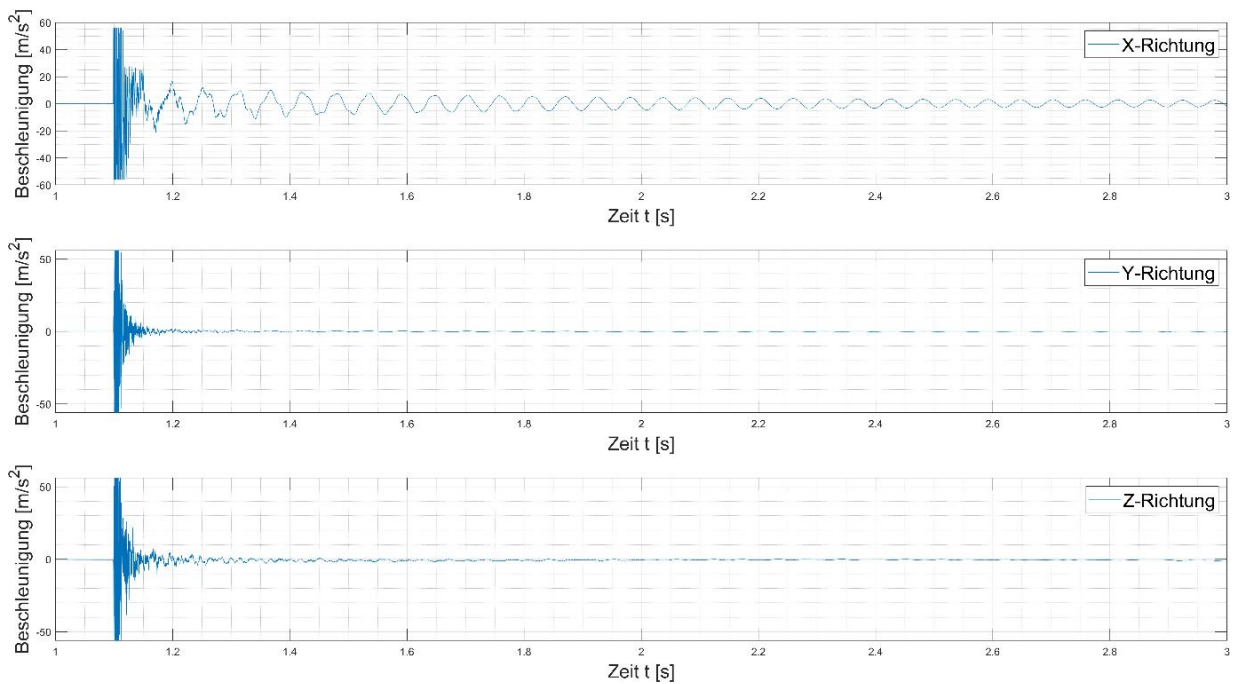


Abbildung 5.5: Strukturantwort. Gewicht unten.

Direkt nach dem Anschlag ist die Beschleunigung größer als 50 m/s^2 , deswegen nimmt der Sensor nur den maximalen Wert der Strukturantwort und deshalb kommt es nur für kurze Zeit zum Anzeigen des maximalen Wertes von 50 m/s^2 . Sobald die Beschleunigung kleiner als dieser Wert ist, kann der Sensor die Werte wieder aufnehmen.

Laut Abbildung 5.5 ist die gedämpfte Schwingung auf der X-Achse im Zeitbereich von 1.1 bis 3 Sekunden zu sehen. In der X-Achse wirkt sich ein Hebel aus, deswegen ist die Schwingung dort deutlich zu erkennen.

In Abbildung 5.6 ist die Eigenfrequenz in der X-Achse in der Übertragungsfunktion von MATLAB zu sehen [71].

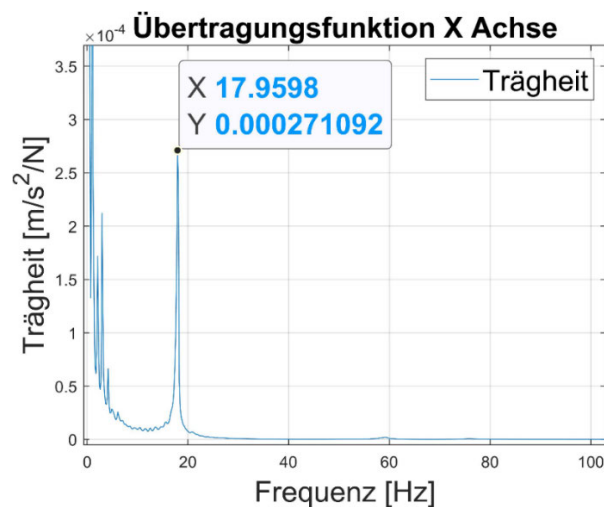


Abbildung 5.6: Übertragungsfunktion. Hebelarm. Gewicht unten.

Die Eigenfrequenz ist in der Übertragungsfunktion deutlich zu sehen, denn da ist die Schwingung sehr gut erkennbar.

Befindet sich die Gewichtsplatte unten, steigt die Eigenfrequenz von 13,74 auf 17,95 Hz. Die Länge des Hebels ändert sich, siehe Kapitel 3.1.2. In Tabelle 16 sind die Eigenfrequenz und der Dämpfungsgrad von MATLAB gegeben [71, 72].

Eigenfrequenz f_n [Hz].	Dämpfungsgrad ϑ .
17,9598 Hz	0,0033

Tabelle 16: Eigenfrequenz und Dämpfungsgrad von MATLAB. Hebelarm.

In der unteren Position ist der Dämpfungsgrad kleiner als in der oberen Position. Siehe Tabelle 15.

5.3 Eigenfrequenzmessung. Spiegelhalter

Es erfolgte eine weitere Messung der Eigenfrequenzen am Spiegelhalter. Der Messort ist in Abbildung 5.7 dargestellt. Das Kabel des Sensors ist mit einem Klebeband an der Konstruktion befestigt, damit das Kabel während der Messung nicht mitschwingt, sonst könnten die Messungen fehlerhaft ausfallen.



Abbildung 5.7: Messungsort des Spiegelhalters.

Der Einschlag des Impulshammers ist senkrecht zur L-Platte gegeben. Da der Spiegelhalter mithilfe von vier Befestigungspunkten (vier Zugfedern mit Stiften, siehe Abbildung 3.14) fixiert ist, ist die Strukturantwort in allen drei Achsen relativ gleichmäßig zu verteilen. Abbildung 5.8 enthält eine Darstellung der Strukturantwort auf den Anregungsimpuls.

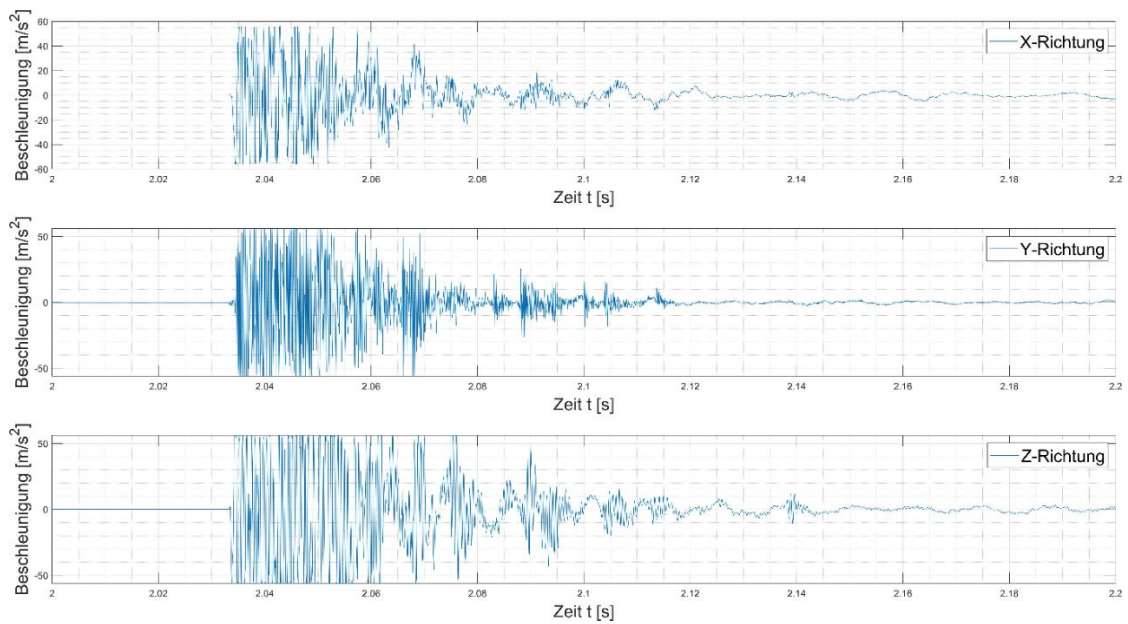


Abbildung 5.8: Strukturantwort. Spiegelhalter.

Erst nach dem Anschlag kommt es wieder zur maximalen Beschleunigung, was im Zeitbereich zwischen 2,04 s und 2,06 s gut zu sehen ist. In Abbildung 5.8 sind die Schwingungen auf allen drei Achsen verhältnismäßig gleich verteilt. Aus diesem Grund ist die Übertragungsfunktion in allen drei Achsen zu betrachten, denn auf einer Achse können nicht alle Eigenfrequenzen auftreten.

In Abbildung 5.9 sind die Eigenfrequenzen in der Übertragungsfunktion von MATLAB in allen drei Achsen doppellogarithmisch zu sehen [71].

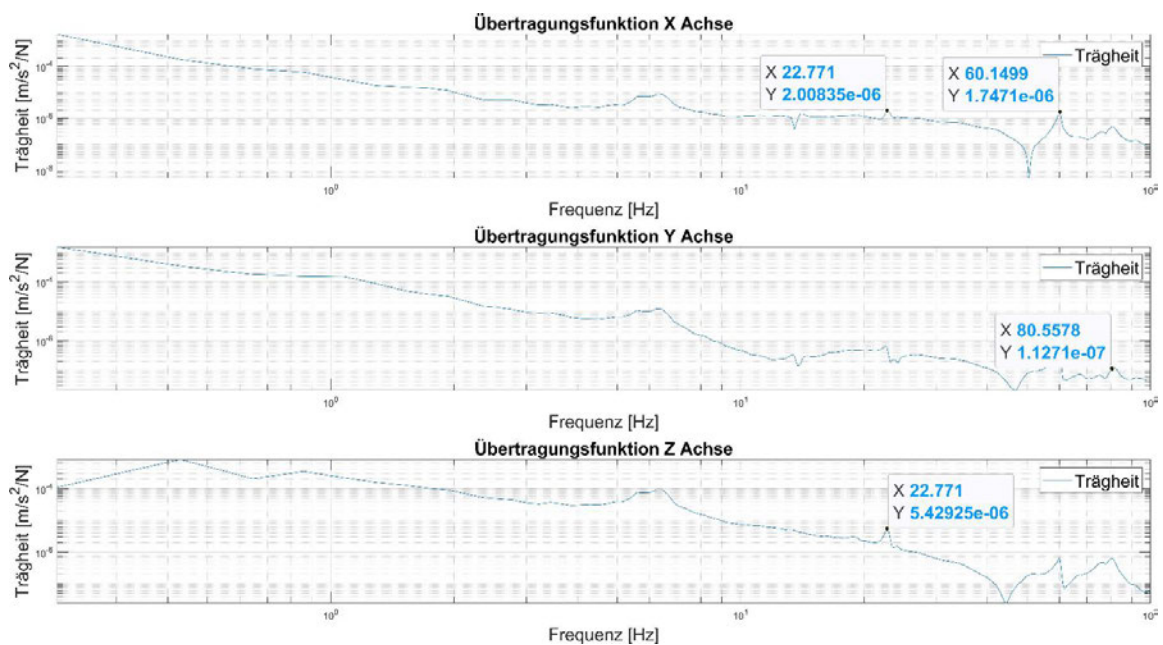


Abbildung 5.9: Übertragungsfunktion. Spiegelhalter.

Für die zusätzliche Bestimmung der Dämpfungsgrade und der Eigenfrequenzen kommt es im MATLAB zur Verwendung des Befehls *modalfit* [72]. In Tabelle 17 sind die Eigenfrequenzen und die Dämpfungsgrade dafür gegeben. Es findet ein Abrunden der Eigenfrequenzen statt.

Eigenfrequenz f_n [Hz].	Dämpfungsgrad ϑ .
22,8 Hz	0,026
60 Hz	0,00598
81 Hz	0,0179

Tabelle 17: Eigenfrequenz und die Dämpfungsgrade. Spiegelhalter.

Laut den errechneten Dämpfungsgraden existiert nach Tabelle 6 überhaupt keine Dämpfung an der Konstruktion.

5.4 Prüfung auf Resonanz

5.4.1 Resonanz am Hebelarm

Um eine Resonanz beweisen oder widerlegen zu können, ist ein Vergleich zwischen der Eigenfrequenz und der Anregungsfrequenz bzw. dem Abstimmungsverhältnis durchzuführen [12, 50]. Dafür ist die Eigenfrequenz am Hebelarm, Gewicht unten (Kapitel 5.2) und eine Mittelwertmessung an der Kamera in der unteren Position (Kapitel 4.6.2) angenommen worden. In Abbildung 5.10 sind beide Frequenzen doppellogarithmisch zu sehen.

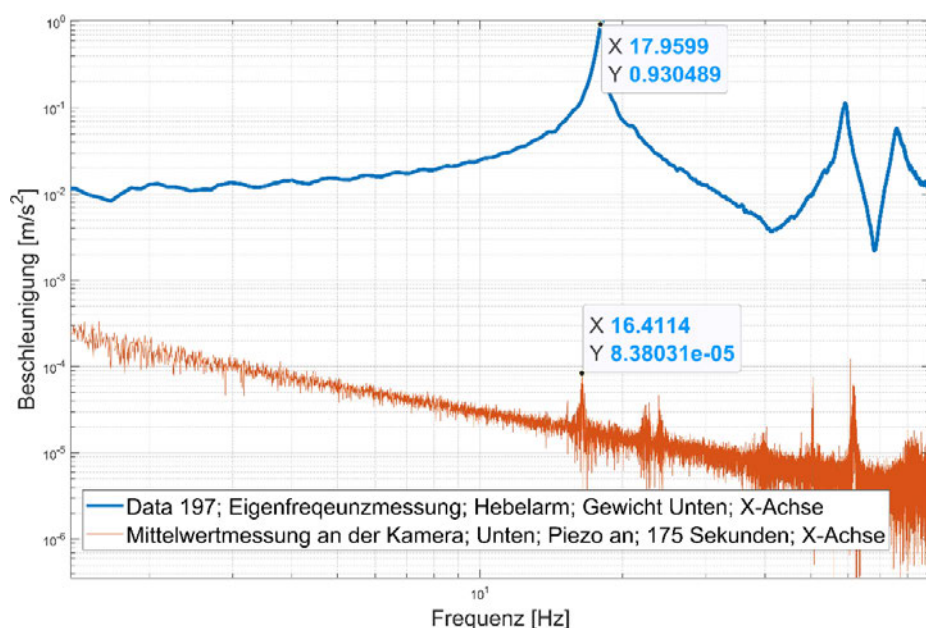


Abbildung 5.10: Eigen- und Anregungsfrequenz. Hebelarm. Gewicht unten.

Diese beiden Frequenzen in der Abbildung 5.10 liegen sehr nah beieinander. Hinsichtlich einer tatsächlich gegebenen Resonanz ist eine Durchführung im Hinblick auf das Abstimmungsverhältnis, Formel (2.17), zu vollziehen. Im Abstimmungsverhältnis handelt es sich um eine Erreger- und Eigenkreisfrequenz [12]. In den Messungen geht es allerdings um eine „normale“ Frequenz. Der Zusammenhang zwischen „normaler“ und Kreisfrequenz ist 2π , siehe Formel (2.4). Das heißt, sowohl die Eigenfrequenz als auch die Erregerfrequenz ist erst mit 2π zu multiplizieren, um in der Formel (2.17) zum Einsatz zu kommen. Da 2π während des Dividierens allerdings wegfällt, ist es möglich, die Formel zu vereinfachen:

$$\eta = \frac{\Omega}{\omega_0} = \frac{2\pi \cdot f_{Er}}{2\pi \cdot f_n} = \frac{f_{Er}}{f_n} \quad (5.1)$$

f_{Er} ist die Erregerfrequenz (orange Kurve) und f_n die Eigenfrequenz (blaue Kurve). Es erfolgt das Einsetzen der Werte in die Formel (5.1):

$$\eta = \frac{f_{Er}}{f_n} = \frac{16,4114}{17,9599} = 0,913 \quad (5.2)$$

Das errechnete Abstimmungsverhältnis liegt im Bereich von 0,8 bis 1,2 was laut Tabelle 5 schon ein Resonanzfall ist. Eine Resonanz ist auf dem Hebelarm bestätigt [12, 47, 49].

5.4.2 Resonanz am Spiegelhalter

Jetzt findet eine Prüfung des Spiegelhalters auf die Resonanz statt. Dafür kam es zur Annahme einer Eigenfrequenzmessung am Hebelarm mit einem Vergleich der Mittelwertmessung am Spiegelhalter. Sie sind in Abbildung 5.11 doppellogarithmisch dargestellt. Das MATLAB Skript zur Auswertung befindet sich in Anhang A8.

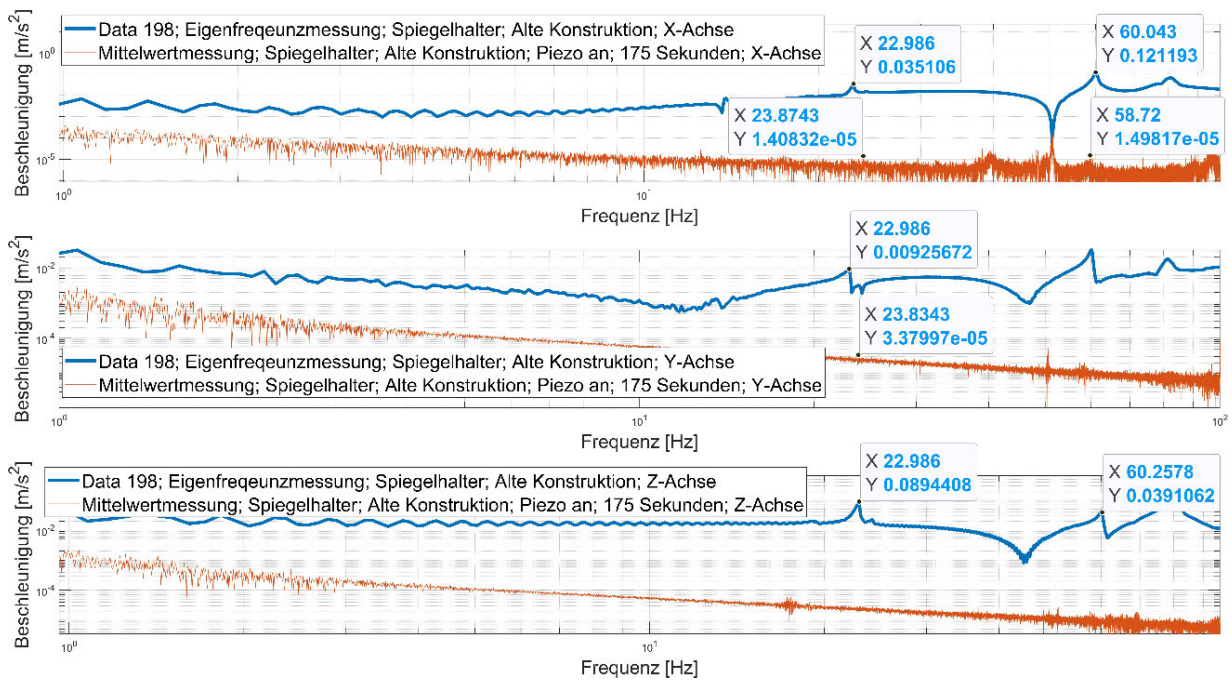


Abbildung 5.11: Eigenfrequenzmessung am Spiegelhalter und Mittelwertmessung am Spiegelhalter.

Die blaue Kurve ist die Eigenfrequenzmessung und die orange Kurve ist die Mittelwertmessung am Spiegelhalter. Die Eigenfrequenzen des Spiegelhalters sind Tabelle 17 entnommen.

Auf der X-Achse liegen zwei Frequenzen sehr nah beieinander: 60,043 Hz (Tabelle 17) und 58,72 Hz. 60,043 Hz ist die Eigenfrequenz f_n und 58,72 die Erregerfrequenz f_{Er} . Im Abstimmungsverhältnis nach (2.14):

$$\eta = \frac{f_{Er}}{f_n} = \frac{58,72}{60,043} = 0,978 \quad (5.3)$$

Das Verhältnis von 0,978 liegt im kritischen Frequenzbereich. (Tabelle 5)

Auf der Y-Achse liegen auch zwei, sehr nah beieinander befindliche Frequenzen: 22,98 (Tabelle 17) und 23,8726 Hz. 22,98 Hz ist die Eigenfrequenz f_n und 23,8726 Hz die Erregerfrequenz f_{Er} . Das Abstimmungsverhältnis nach (2.14):

$$\eta = \frac{f_{Er}}{f_n} = \frac{23,834}{22,98} = 1,04 \quad (5.4)$$

Das Verhältnis von 1,04 liegt auch im kritischen Bereich bzw. auch die Resonanz am Spiegelhalter [47]. Tabelle 18 beinhaltet eine Zusammenstellung zwischen den Eigenfrequenzen und den Anregungsfrequenzen des Spiegelhalters sowie einem errechneten Abstimmungsverhältnis.

Eigenfrequenz des Spiegelhalters f_n [Hz]	Erregungsfrequenz f_{Er} [Hz]	Abstimmungsverhältnis $\eta = \frac{f_{Er}}{f_n}$	Bedingung nach Tabelle 5	Beurteilung nach Tabelle 5
22,8 Hz	23,834	1,04	0,8 < η < 1,2	Resonanz
60 Hz	58,72	0,978		Resonanz
81 Hz	-	-		-

Tabelle 18: Zusammenstellung zwischen dem alten und neuen Spiegelhalter.

Das errechnete Abstimmungsverhältnis bestätigt auch die Resonanz am Spiegelhalter [12, 47, 49].

5.5 Zusammenfassung

Für die zukünftige Ausarbeitung der Konstruktion galt es, die Steifigkeit des Ist-Zustandes zu analysieren. Dafür kam es zum Messen von zwei aussagekräftigen Parametern hinsichtlich der Steifigkeit, und zwar: Eigenfrequenz und Dämpfungsgrad. Nach der ersten Analyse waren zwei Orte feststellbar, an denen Schwingungen meist auftreten: am Hebelarm und am Spiegelhalter.

Der Hebelarm ist wichtig, weil er nur auf der rechten Seite des Flansches befestigt ist. Die linke Seite des Flansches hat keine Unterstützung, infolgedessen schwingt der Hebelarm in die X-Richtung mit einer ganz leichten Anregung, siehe Abbildung 5.1. Deswegen ist diese Achse am relevantesten und die Eigenfrequenz in dieser Achse zu messen.

Der zweite wichtige Messort ist der Spiegelhalter. Der Spiegelhalter hat keine starre Verbindung mit der Konstruktion und zusätzlich vier, ebenfalls mitschwingende Zugfedern. Die Schwingungen am Spiegelhalter können in allen drei Achsen herrschen, aus diesem Grund kam es zum Messen der Eigenschwingungen bzw. der Eigenfrequenzen in allen Achsen. Ein Kraftimpulshammer diente für die Messungen an diesen Messorten, siehe Abbildung 2.16. Für die Ermittlung der Eigenfrequenzen und der Dämpfungsgrade erfolgte der Einsatz der Übertragungsfunktion *modalfreq* und eines MATLAB Befehls *modalfit* mittels der Pick-Picking Methode.

Der Hebelarm versetzt den Schwingungsgang mittels einer ganz leichten Anregung. Außerdem ähnelt sich die gesamte Konstruktion mit dem Stabbalken mit dem freien Ende (siehe Abbildung 3.18) Das bedeutet, die Eigenfrequenzen könnten tief liegen, und da das SCS-Instrument viele verschiedene, mit eigener Frequenz funktionierende Komponenten hat,

kann sich eine Resonanz bzw. eine Übereinstimmung der Eigen- und Anregungsfrequenz von SCS-Komponenten ergeben. Aufgrund dieses Verdachts fand die Durchführung einer Prüfung auf die Resonanz hin statt. Laut der durchgeführten Prüfung ist eine Resonanz sowohl am Hebelarm als auch am Spiegelhalter gegeben.

Die gemessenen Eigenfrequenzen und die Dämpfungsgrade gelangen zur Verwendung als Referenzwerte für die neue Konstruktion.

6 Gestaltung der neuen Konstruktion

6.1 TRIZ

Bei der Gestaltung der neuen Konstruktion kam es zur Verwendung einiger Gestaltungsregeln sowie eines Werkzeugs hinsichtlich der Theorie der erfinderischen Problemlösung (TRIZ). Es ist möglich, die Entwicklungsprozesse mittels der Verwendung von TRIZ zu beschleunigen, infolgedessen bedeutet das eine Einsparung an Finanzmittel und Zeit. TRIZ basiert auf der Analyse von mehr als einer Million Patenten, wobei mehr als 99 % kreative Problemlösungen bereits bekannte Lösungsprinzipien beinhalten [74].

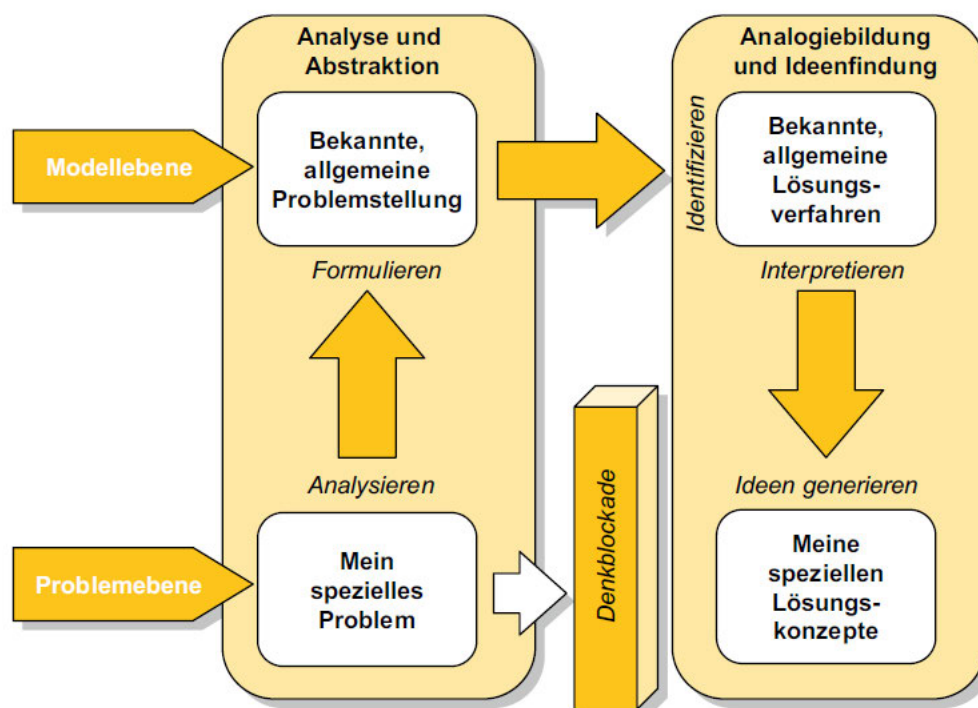


Abbildung 6.1: TRIZ-Vorgehensweise [75].

Abbildung 6.1 stellt die TRIZ-Vorgehensweise dar. Zuerst erfolgt eine Analyse und eine Beschreibung des Problems. Daran schließt sich ein Abstrahieren des spezifischen Problems und das Bearbeiten des allgemeinen Problems an. Weiterhin geht es um das Finden von bekannten Lösungen für dieses allgemeine Problem. Es gilt, eine infrage kommende Lösung zu interpretieren und für die spezielle Aufgabe anzuwenden [74, 75]. Dies dient einer Einsparung an Entwicklungskosten und -zeit.

Es gibt unterschiedliche Werkzeuge zur Analyse des abstrakten Problems wie: Idealität und ideales Endresultat, Ressourcen, Situationscheckliste, Trimmen, Effekte-Datenbank, Widerspruchsmatrix, Operator Menge Zeit Kosten (MZK) usw. [74, 75]. Zum Einsatz gelangen einige Instrumente von TRIZ.

6.2 Anwendung von TRIZ

Die Abbildung 6.1 zeigt die Herangehensweise von TRIZ [75]. Das zu lösende Hauptproblem ist die Verschiebung der Pixel am Bild von FDM. Diese Verschiebung entsteht infolge der Vibration in der SCS-Beamline, weiter an der Konstruktion. Als bekannte oder allgemeine Problemdarstellung gilt die Vibration der Konstruktion. Abbildung 6.2 stellt die Herangehensweise für den vorliegenden Fall dar.

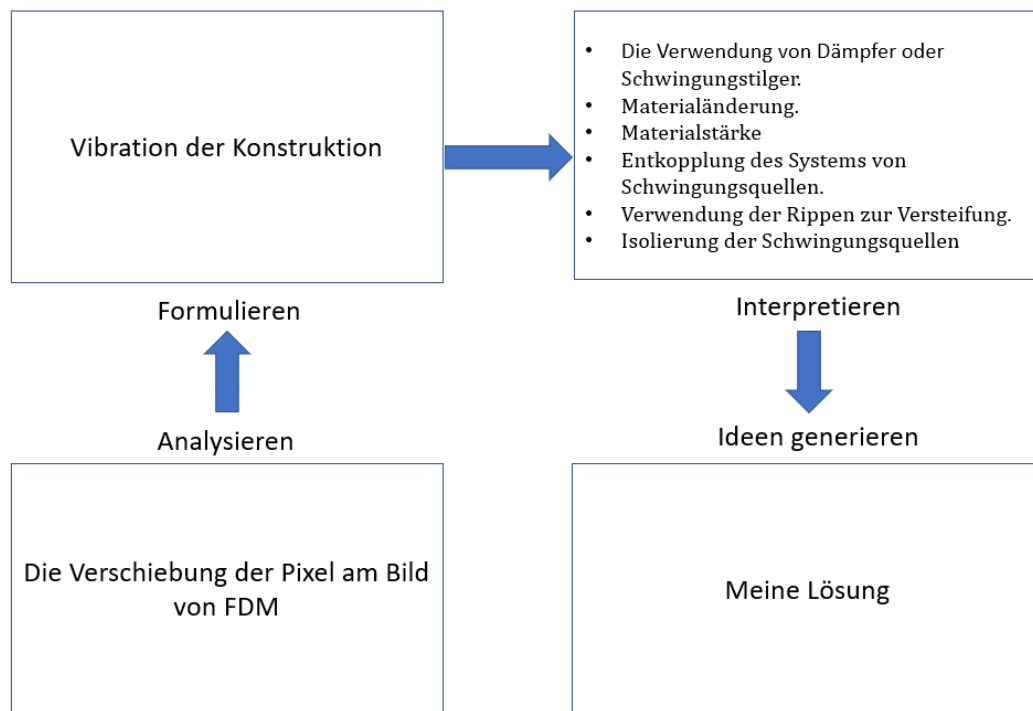


Abbildung 6.2: TRIZ für den vorliegenden Fall.

Die Vibration an der Konstruktion ist die bekannte Aufgabe, für die bereits Lösungen existieren:

- Verwendung von Dämpfern oder des Schwingungstilgers für die Konstruktion; der Schwingungstilger ist eine Art an einer Konstruktion befestigter Schwingungsdämpfer [76]. Seine Eigenfrequenz ist auf die Resonanzfrequenz der Konstruktion eingestellt, bei dieser Frequenz hat die Konstruktion nur eine sehr geringe Amplitude der Bewegung [76];
- Vergrößerung der Materialstärke und infolgedessen die Steigerung der Masse, siehe Formel (2.24);
- Benutzung des Materials mit höherer Dichte, um die Masse der Konstruktion zu vergrößern, siehe Formel (2.24);
- Das System kann von der Vibrationsquelle entkoppelt werden;
- Es ist möglich, die Konstruktion mittels einer zusätzlichen Rippe zu versteifen;
- Möglichkeit der Isolation der Schwingungsquelle bzw. der Vibrationsquelle.

Es wird auch ein Instrument von der TRIZ Methode zur Analyse verwendet, und zwar die Ressourcenanalyse. Unter der Ressource sind die Substanzen, Zeit, Information, Raum, Anlagen usw. zu verstehen [75].

Ressourcenanalyse heißt die Benutzung eines bereits existierenden Systems oder von Komponenten des Systems. Im vorliegenden Fall sind dies die Piezomotoren, der Konstantkraftfederhalter, Zugfedern mit den Stiften und die Linearführung mit den Platten und der Bauraum Komponenten, die ihre Ressourcen nicht erschöpft haben und noch zu nutzen sind.

Es kommt noch ein Instrument zur Verwendung, und zwar die Idealität und das Ideale Endresultat.

Laut TRIZ ist es ein ideales Endresultat, wenn das Problem sich selbst löst [75]. Z. B. besteht die Möglichkeit, statt eine Fläche vom Staub zu putzen, einer Beschichtung der Körperfläche, die der Haftung vom Staub widersteht.

Es ist ein ideales Endresultat, wenn es keine Verschiebungen der Pixel mehr am Bild gibt. Um das zu erreichen, ist das Mikroskop zusammen mit der Kamera komplett von der Beamline zu entkoppeln, um die Vibration von der Beamline zu trennen. Das Mikroskop und die Kamera sind an dem Fußboden zu befestigen, denn der Fußboden ist deutlich stabiler. Es ist auch möglich, die Befestigung der Kamera und des Mikroskops in der FFT Kammer zu gestalten, denn drin in der FFT-Kammer ist es auch deutlich stabiler als am Flansch.

Nun kommt die Interpretierung der vorgeschlagenen Lösungen zum Einsatz.

- Die Verwendung von Dämpfern oder des Schwingungstilgers erfordert eine signifikante Vergrößerung des Bauraums, was im vorliegenden Fall inakzeptabel ist.
- Der Ersatz des Materials durch ein anderes Material mit einer höheren Dichte führt zu einer Steigerung der Masse der Konstruktion, was sich schwingungstechnisch vorteilhaft auswirkt, allerdings bedeutet dies eine größere Belastung am Flansch sowie Schwierigkeiten bei der Montage in Bezug auf die Ergonomie.
- Die Vergrößerung der Materialstärke führt zu einer Vergrößerung des Bauraums, was auch inakzeptabel ist, da der Bauraum sehr beschränkt ist.
- Die Entkopplung des Systems von der Beamline und die Befestigung am Fußboden ist unmöglich wegen des sehr kompakten Bauraums.
- Die Befestigung des Mikroskops und der Kamera in der FFT Kammer ist ebenfalls unmöglich, denn es existiert zurzeit kein Mikroskop und keine Kamera, welche die wissenschaftlichen Anforderungen erfüllen und in der UHV-Umgebung funktionieren können.
- Die Isolierung von Schwingungsquellen ist auch unmöglich, denn es ist ein gekoppeltes Problem und infolgedessen schwierig, die Schwingungsquellen exakt zu identifizieren.

Die Verwendung der Versteifungsrippe zusammen mit den vorhandenen Ressourcen ist als Lösung zu betrachten und gelangt weiter zum Ausbau.

6.3 Neues Design

Es kam zum Beschluss, die Versteifungsrippe sei zusammen mit den vorhandenen Ressourcen in die Konstruktion einzuführen. Das Hauptproblem ist eine lediglich einseitige Unterstützung der L-Platte und der Führungsplatte, siehe Abbildung 3.6. Infolgedessen entsteht dort ein ungünstiger Kraftfluss, siehe Abbildung 6.3.

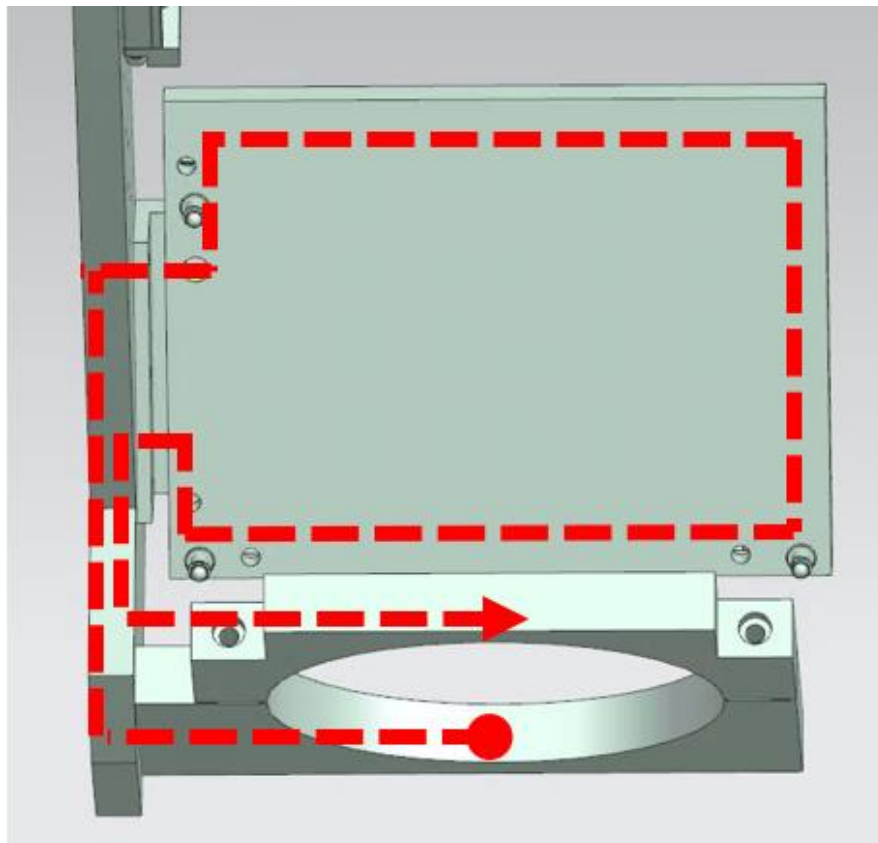


Abbildung 6.3: Kraftfluss auf der L-Platte.

Der Kraftfluss beschreibt den Weg einer Kraft von der Stelle, an der die Kraft wirkt, bis zur Stelle, wo der Aufnahme dieser Kraft dient. Bei der Gestaltung waren zwei Kraftflussregeln zu berücksichtigen: 1. Der Kraftfluss ist eindeutig zu führen bzw. es ist eine Vermeidung von Überbestimmungen oder Unklarheiten anzustreben. 2. Der Kraftfluss ist auf kürzestem Wege für leichte und steife Bauweisen zu führen [77]. Bei den Konstruktionen mit unvermeidbaren Schwingungen gilt es, direkte und kürzeste Kraftleitungswege zu gestalten [77]. Aus diesem Grund kam es zur kompletten Verarbeitung bzw. Modifizierung einiger Komponenten; es folgt eine detaillierte Beschreibung derselben.

Bei der Modellierung der Konstruktion kam die kommerzielle Computer-Aided Design (CAD) Software der Firma Siemens Next Generation (NX) zum Einsatz. Die neue Konstruktion muss

versteift sein, dafür sollten Supports für die L-Platte erfolgen, um den kürzesten Kraftfluss zu erreichen und den zusätzlichen Support für das Mikroskop.

Die neue Konstruktion (Abbildung 6.4) besteht aus: Führungsplatte (1), Führungsplatte Support (2), Spiegelhalter (3), Linearführung mit bereits vorhandenen Platten (4), Konstantkraftfederhalter (5), Distanzbuchsen mit Versteifungsklemmen (6), L-Platte (7), Mikroskopführung (8), (siehe Abbildung 6.5), Flanschhalter (9) und Flanschschelle (10). Die Herstellung fast aller entwickelten Komponenten geschah aus EN AW-5083 (AlMg4,5Mn0,7). Die Führungsplatte hat die zweite M3 Bohrungsreihe, sie ist für das Kabelmanagement vorgesehen. Das Fixieren der modifizierten Konstruktion vollzieht sich an einem 150 mm Flansch über den Flanschhalter (9) und die Flanschschelle (10), die einen Befestigungspunkt am Flanschzentrum bilden.

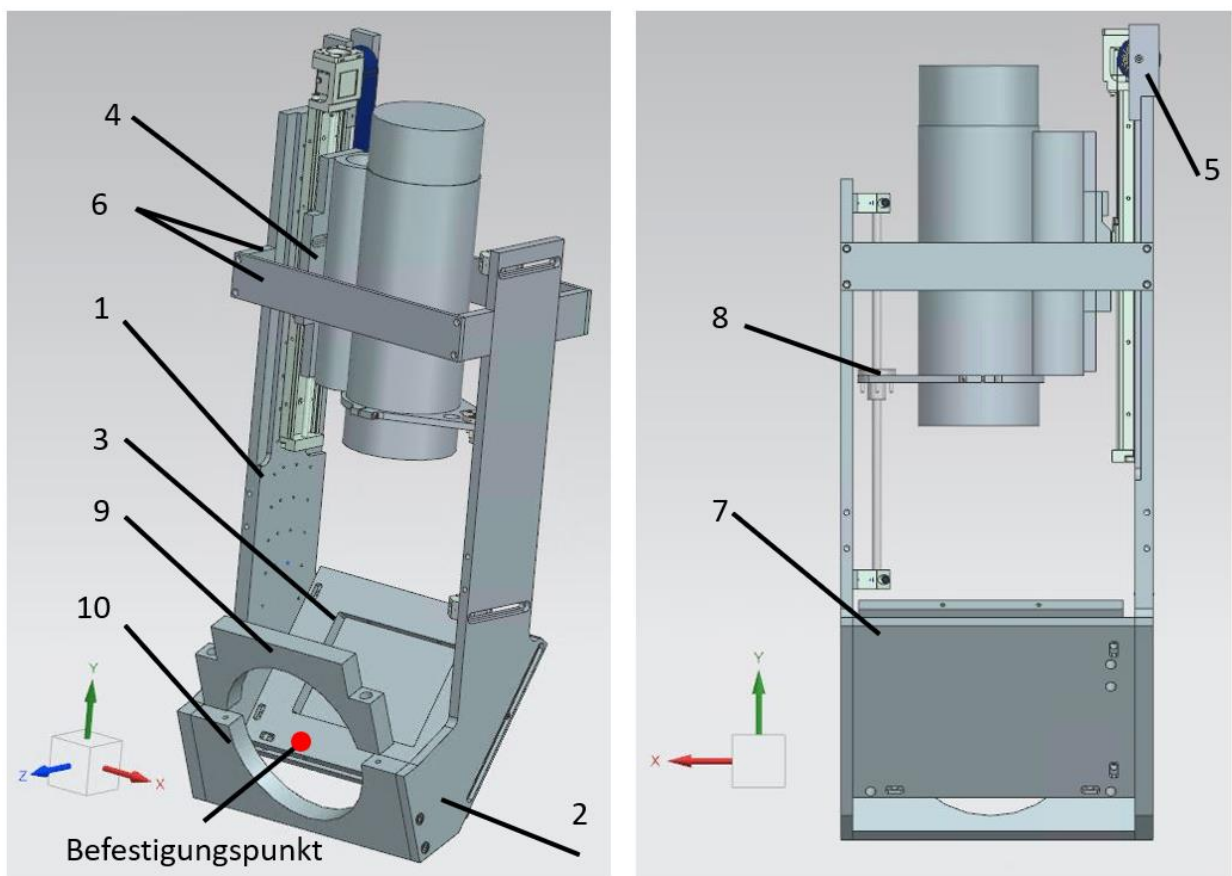


Abbildung 6.4: Neue Konstruktion von vFDM.

Die Kamera und das Mikroskop sind auch dieselben geblieben. Die Kameraführung (8) ist die zusätzliche Versteifung der Konstruktion.

Zur zusätzlichen Versteifung in der X-Achse kam es zum Einbau von zwei Versteifungsklemmen mit vier Durchgangsbohrungen M6, Abbildung 6.4. Jede Führungsplatte hat acht M6 Bohrungen (vier je Seite). Sie dienen der Gewährung von besseren

Versteifungsmöglichkeiten. Sollte z. B. auf einer Seite nicht genug Platz für die Klemme sein, ist es möglich, diese auf die andere Seite zu übertragen.

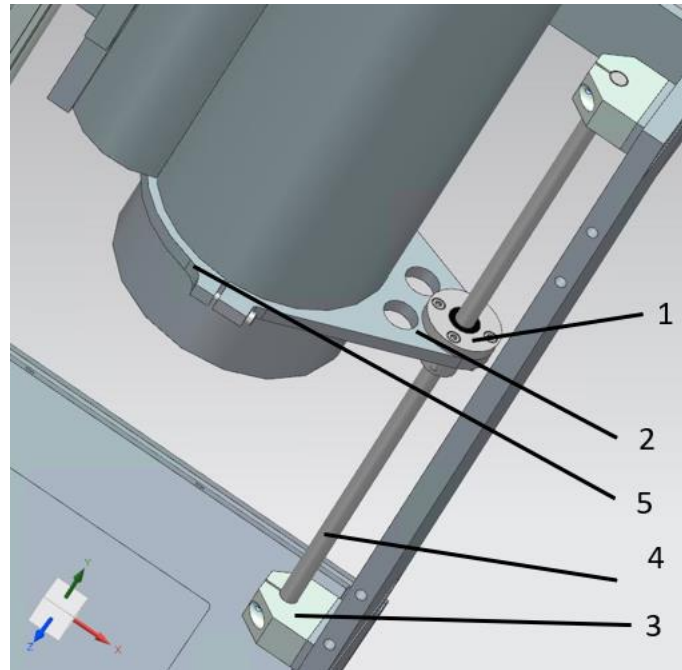


Abbildung 6.5: Mikroskopführung.

Die Mikroskopführung, dargestellt in Abbildung 6.5, besteht aus folgenden Komponenten: dem Gleitlager (1), der Kameraschelle (2), 2 x die Wellenböcke mit Distanzbuchsen (3) und Hochpräzisionswelle $\varnothing 8$ mm (4) und Kameraklemme (5). Die Wellenböcke, die Welle und das Gleitlager sind bei MÄDLER erworbene Standardteile.

Die Wellenböcke GW-1 ISO Serie 1 haben eine $\varnothing 8$ mm Bohrung für die Welle und besitzen zwei Innengewinde Bohrungen M5 zur Befestigung an der Struktur. Das Linearkugellager KB-ST-F hat einen Innendurchmesser von $\varnothing 8$ mm mit der Toleranzklasse H7. Das Linearkugellager ist beidseitig abgedichtet, was eine Leckage mit Schmierstoff verhindert [78].
Abbildung 6.6.



Abbildung 6.6: Linearkugellager (links) und Wellenbock (rechts) [78, 79].

Es besteht für das Linearkugellager (Abbildung 6.6) die Empfehlung, eine Präzisionswelle zu benutzen; daher erfolgte die Auswahl einer Welle mit der Durchmessertoleranz h6 aus dem MÄDLER Katalog. Die Welle ist in Abbildung 6.7 dargestellt.



Abbildung 6.7: Hochpräzisionswelle [80].

Die Welle ist aus dem Stahl 1.1213 (CF53) hergestellt und bis 59 Härte nach Rockwell (HRC) gehärtet [80].

Laut technischer Information es ist empfohlen, zusammen mit einem Linearkugellager eine Hochpräzisionswelle mit der Toleranzklasse h6 zu nutzen. Es ergibt sich daraus eine Passung H7/h6 [81].

Zur Berechnung gelangt ein Höchstspiel P_{SH} und Mindestspiel P_{SM} für die Passung $\varnothing 8$ mm H7/h6. Alle Werte wurden von DIN EN ISO 286-1 und DIN EN ISO 286-2 entnommen.

Es folgt zunächst die Berechnung des Höchstmaßes der Bohrung G_{oB} , und des Mindestmaßes G_{uB} . Die Berechnung des Höchstmaßes gestaltet sich nach der Formel (6.1), N ist das Nennmaß und ES das obere Grenzabmaß für die Bohrung [81] :

$$G_{oB} = N + ES = 8 + 0,015 = 8,015 \text{ mm} \quad (6.1)$$

Die Mindestmaß Bohrung G_{uB} berechnet sich nach der Formel (6.2), EI ist das untere Grenzabmaß für die Bohrung [81] :

$$G_{uB} = N + EI = 8 + 0 = 8,00 \text{ mm} \quad (6.2)$$

Nun kommt es zur Berechnung des Höchstmaßes der Welle G_{oW} und des Mindestmaßes G_{uW} . Die Berechnung des Höchstmaßes gestaltet sich nach der Formel (6.3), N ist das Nennmaß und es das obere Grenzabmaß für die Welle [81] :

$$G_{oW} = N + es = 8 + 0 = 8,00 \text{ mm} \quad (6.3)$$

Die Mindestmaß der Welle G_{uW} berechnet sich nach (6.4), ei ist das untere Grenzmaß der Welle [81]:

$$G_{uW} = N + ei = 8 + (-0,009) = 7,991 \text{ mm} \quad (6.4)$$

Nun lassen sich das Höchstspiel P_{SH} und das Mindestspiel P_{SM} errechnen [81]:

$$P_{SH} = G_{oB} - G_{uW} = 8,015 - 7,991 = 0,024 \text{ mm} \quad (6.5)$$

$$P_{SM} = G_{uB} - G_{oW} = 8,00 - 8,00 = 0 \text{ mm}$$

Das Höchstspiel P_{SH} beträgt 24 μm . Das Mindestspiel P_{SM} ist 0 μm . Daraus ergibt sich, dass die Passung H7/h6 eine Spielpassung ist.

Die Kameraschelle (1) und die Kameraklemme (2) sind in Abbildung 6.8 dargestellt. Beide Teile sind miteinander mit M3 Zylinderschrauben verbunden. Die Kameraschelle dient der Führung des Mikroskops und die Kameraklemme der Fixierung des Mikroskops in der Kameraschelle.

Die Kameraklemme (2) wurde additiv bzw. mittels der Fused Deposition Modelling (FDM) Technologie aus polyactic acid (PLA) Plastik gefertigt, um den Mikroskopumfang „weicher“ zu gestalten. Sonst könnte beim Anziehen der Klemme die Kraft aufs Mikroskop zu groß geraten und das Mikroskop beschädigen.

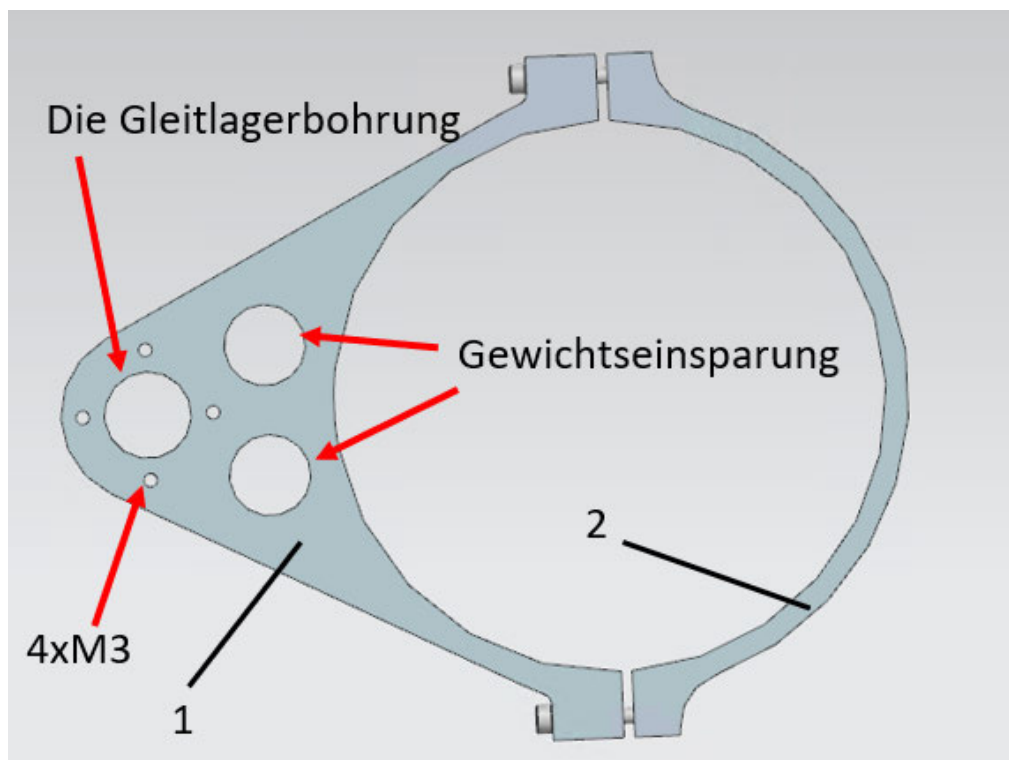


Abbildung 6.8: Kameraschelle (1) und Kameraklemme (2).

Die Kameraschelle hat vier M3 Innengewindebohrungen, die zur Befestigung des Linearkugellagers dienen. Die anderen zwei einfachen Bohrungen ermöglichen eine Einsparung an Gewicht. Die Kameraschelle übernimmt die während des Betriebes am Gehäuse des Mikroskops möglicherweise entstehenden Vibrationen und es findet das Ableiten derselben über das Linearkugellager und über die Welle weiter in den Befestigungspunkt (gebundene Flanschschele mit Flanschhalter statt, siehe Abbildung 6.4).

Damit während des Betriebes keine Verklemmung des Mikroskops vorkommt, erfolgte an der Supportsführungsplatte eine Berücksichtigung der Langlöcher zur Befestigung der Wellenböcke, Abbildung 6.9. Vor der Benutzung im Betrieb müssen die Schrauben der Wellenböcke ein bisschen locker sein, danach sind mehrere Durchgänge des Mikroskops von unten nach oben (oder umgekehrt) vorzunehmen. Während dieser Vorgänge kommt es zur Selbstzentrierung der Wellenböcke, danach sind die Schrauben nur noch nachzuziehen.

Der Führungswagen der Linearführung kann sich bis zu 300 mm verschieben, das bedeutet, die Länge der Welle Abbildung 6.7 muss auch mindestens 300 mm sein [56]. Aus konstruktiven Gründen erfolgte der Einbau einer $\varnothing 8$ mm Welle mit einer Länge von 330 mm.

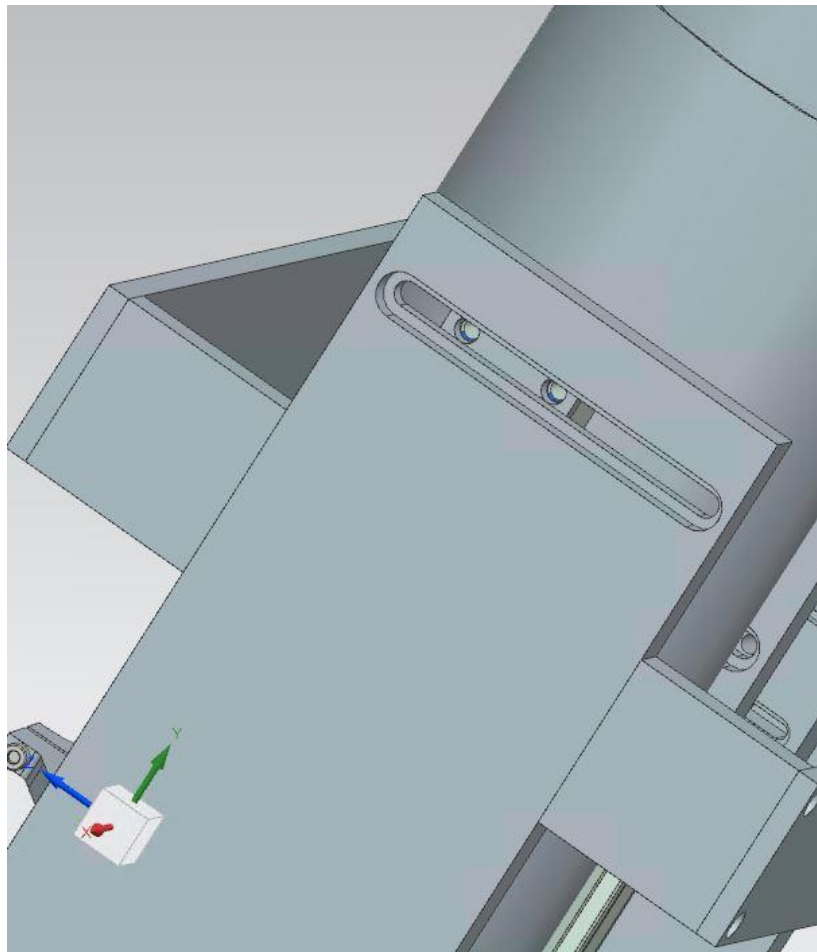


Abbildung 6.9: Langloch an der Führungsplatte Support.

Die Hauptänderung ist die Einführung der Supportführungsplatte und die starre Verbindung zwischen der Führungsplatte über die L-Platte, Abbildung 6.10. Die modernisierte L-Platte hat eine größere Kontaktfläche mit den beiden Führungsplatten, was die Schwingungen vorteilhaft beeinflussen soll. Darüber hinaus ließ sich der kürzeste Kraftfluss erreichen. Außerdem waren in den beiden Führungsplatten die Langlöcher zur Einstellung der L-Platte zu berücksichtigen, siehe Abbildung 6.10. Diese Langlöcher sind für M4 Zylinderschrauben entwickelt.

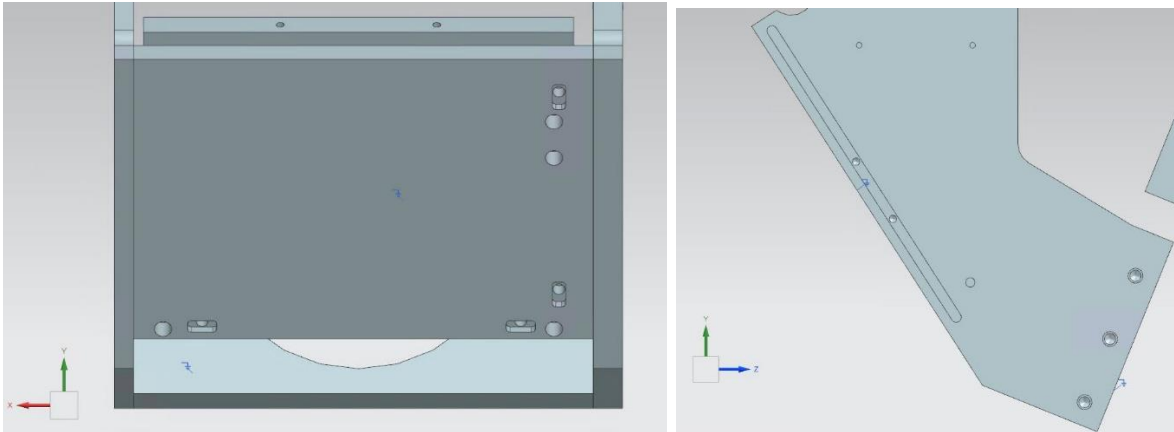


Abbildung 6.10: Optimierte L-Platte und Langloch in der Führungsplatte.

Die zusätzliche Modifizierung ist ein Langloch für den Konstantkraftfederhalter auf der Führungsplatte, siehe Abbildung 6.11. Der Zweck dieses Langloches ist die Positionseinstellung in der Z-Achse des Halters, um eine Verklemmung der Konstantkraftfeder zu vermeiden.

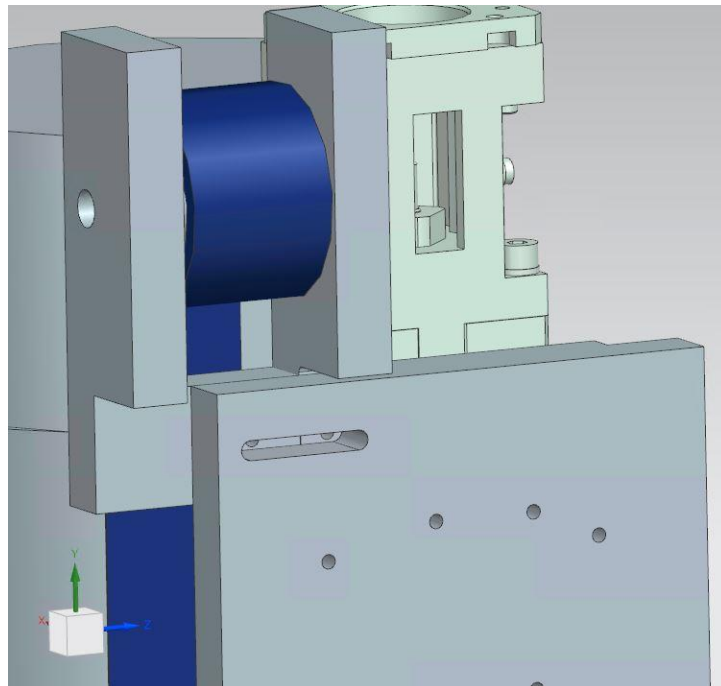


Abbildung 6.11: Langloch für den Konstantkraftfederhalter auf der Führungsplatte.

Es galt, auch den Spiegelhalter – dargestellt in Abbildung 6.12 – neu zu konzipieren. Der Spiegelhalter hat dieselbe Zugfeder, Nuten für die Stifte und besitzt dieselben Verbindungsstellen für die Piezomotoren.

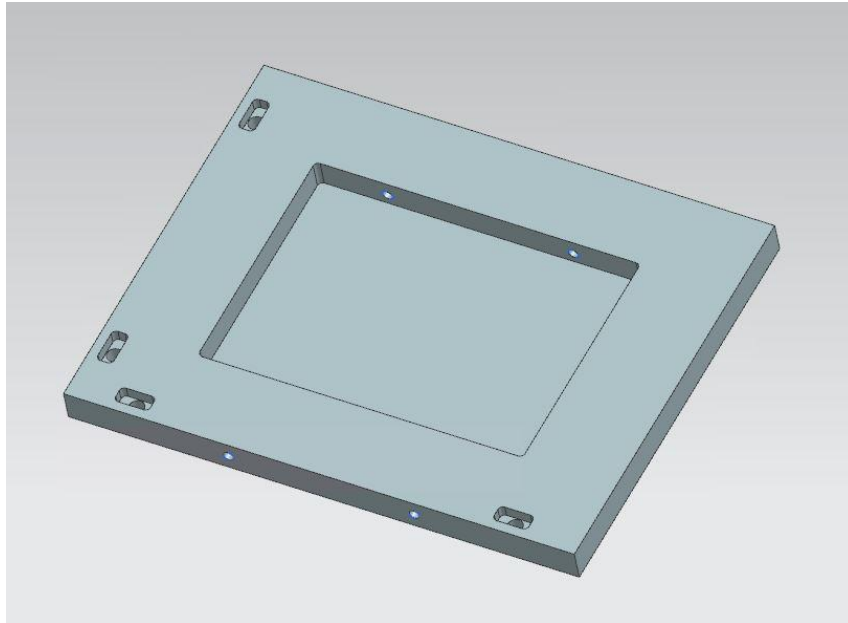


Abbildung 6.12: Der neue Spiegelhalter.

Die äußeren Ausmaße sind dieselben geblieben, allerdings hat der neue Spiegelhalter dickere Wände und keinen durchgängigen Ausschnitt. Infolgedessen ergibt sich eine größere Masse ($0,505\text{ Kg}$ gegen $0,93\text{ Kg}$ laut den Daten von CAD) und das wirkt sich vorteilhaft auf die Dämpfung aus, siehe Formel (2.24). Nun ist es möglich, den Spiegel direkt in den Spiegelhalter ohne einen Innenhalter reinzulegen, siehe Kapitel 3.1.2.

7 Experimentelle Ermittlung der Eigenfrequenzen auf der optimierten Konstruktion

Die neue Konstruktion soll steifer sein. Um das zu bestätigen, sind die Eigenfrequenzen zu messen. Sollen die Eigenfrequenzen höher als bei der vorhandenen Konstruktion liegen, ist die Konstruktion steifer [12]. Das Messen der Eigenfrequenzen vollzog sich an denselben Messpositionen. Der Plan der Messung ist in Abbildung 7.1 dargestellt.

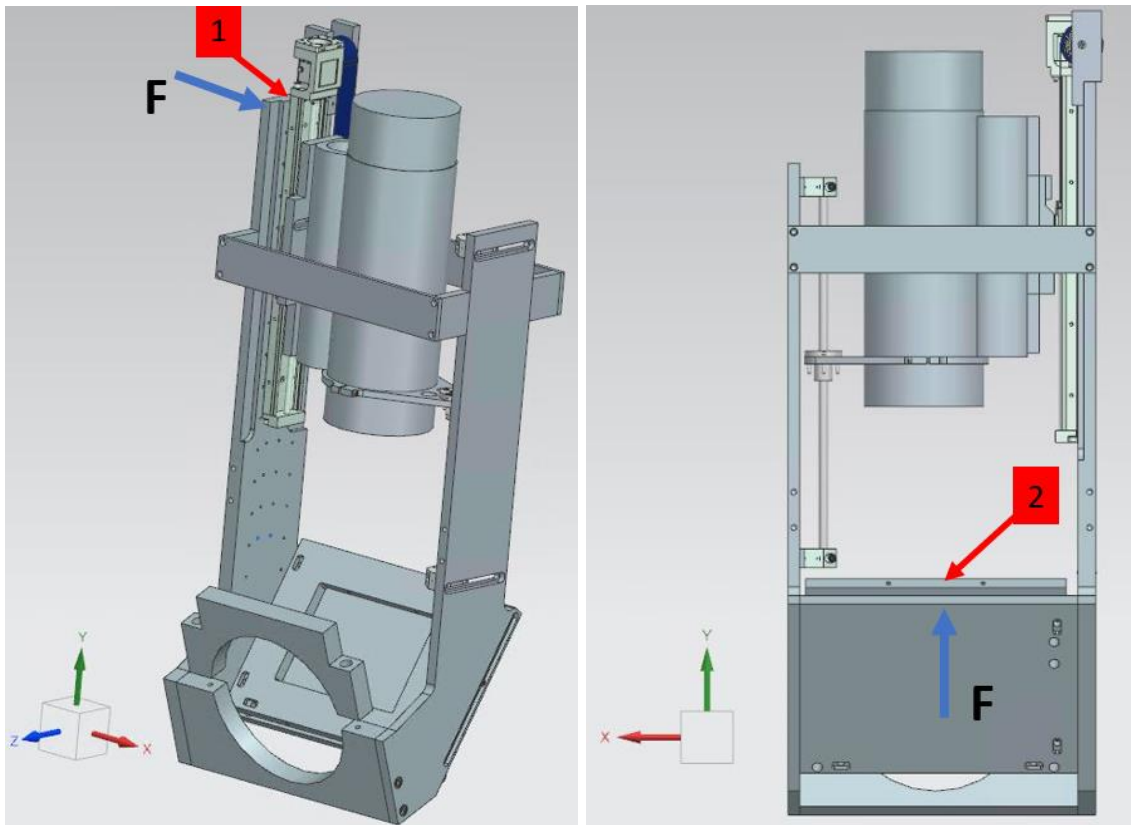


Abbildung 7.1: Der Plan der Eigenfrequenzmessung auf der neuen Konstruktion.

Das Messen der Eigenfrequenzmessung am Hebelarm (siehe Abbildung 7.1) (1) vollzog sich in zwei Positionen mit der Gewichtplatte: oben und unten. Darüber hinaus kam es zum Messen der Eigenfrequenzen am modernisierten Spiegelhalter. Die Pfeile F zeigen den Ort, an dem die Schwingungen mit einem Impulshammer angeregt waren. Das MATLAB Skript zur Auswertung befindet sich in Anhang A8.

7.1 Eigenfrequenzmessung am Hebelarm: Gewicht oben

In Abbildung 7.2 ist ein Foto vom Messort dargestellt.



Abbildung 7.2: Foto vom Messort.

Abbildung 7.3 enthält eine Darstellung der Strukturantwort auf diesen Anregungsimpuls. Der Anregungsimpuls war senkrecht zu der Führungsplatte neben dem Beschleunigungssensor gegeben.

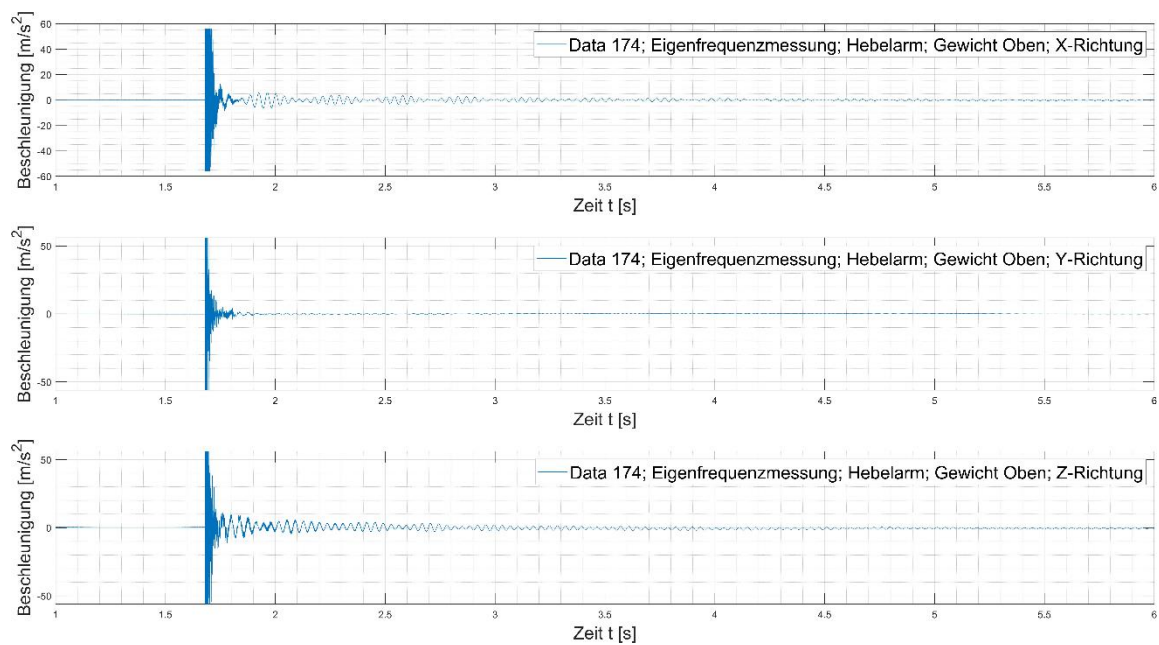


Abbildung 7.3: Strukturantwort. Hebelarm. Gewicht oben. Neukonstruktion.

Die Gewichtplatte war oben während der Messung. Mittels der Benutzung der Übertragungsfunktion *modalfrf* kommt es zur Errechnung der Eigenfrequenzen [71]:

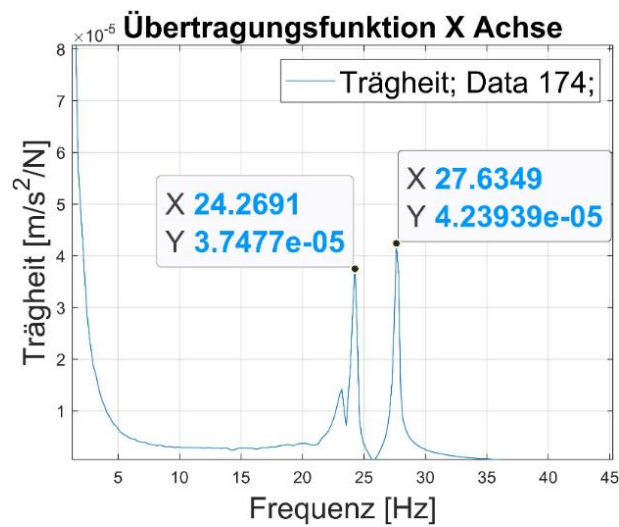


Abbildung 7.4: Übertragungsfunktion. Neue Konstruktion. Gewicht oben.

Tabelle 19 beinhaltet die Eigenfrequenz und den entsprechenden Dämpfungsgrad. MATLAB bestimmt mittels des Befehls *modalfit* den Dämpfungsgrad [72]. Erkennbar ist eine zweite Eigenfrequenz (24,27 Hz) der Konstruktion nach der Einführung der Versteifungsklemme. Es hängt damit zusammen, dass die Versteifungsklemme auch mitschwingt.

Eigenfrequenz f_n [Hz].	Dämpfungsgrad ϑ .
24,27	0,0036
27,6349	0,0036

Tabelle 19: Eigenfrequenz und Dämpfungsgrad von MATLAB. Neue Konstruktion. Gewicht oben.

Um den Vergleich zwischen der alten und neuen Konstruktion übersichtlicher darzustellen, erfolgte eine Zusammenstellung der Eigenfrequenzen der neuen und alten Konstruktion in der oberen Position in Tabelle 20.

Eigenfrequenz f_n [Hz]. Alte Konstruktion: Kamera oben	Eigenfrequenz f_n [Hz]. Neue Konstruktion: Kamera oben	Dämpfungsgrad ϑ . Alte Konstruktion: Kamera oben.	Dämpfungsgrad ϑ . Neue Konstruktion: Kamera oben.
13,74	24,27	0,0167	0,0036
–	27,6349	–	0,0036

Tabelle 20: Eigenfrequenzen der alten und der neuen Konstruktion: oben.

Die neue Konstruktion hat in der oberen Position eine größere erste Eigenfrequenz (13,74 Hz gegen 24,27 Hz, siehe Tabelle 20), allerdings wegen der Einführung einer Versteifungsklemme, die auch mitschwingt, wird eine neue Eigenfrequenz erzeugt. Durch die zunehmenden Eigenfrequenzen steigt auch die Steifigkeit der Konstruktion [12]. Die Dämpfungsgrade sind ebenfalls kleiner geworden.

7.2 Eigenfrequenzmessung am Hebelarm: Gewicht unten

Abbildung 7.5 enthält eine Darstellung der Strukturantwort auf den Anregungsimpuls. Die meisten Strukturantworten dürften in der X-Achse sein, weil dort der Hebel einwirkt. Diese Schwingung sollte länger dauern als bei der Messung mit dem Gewicht oben.

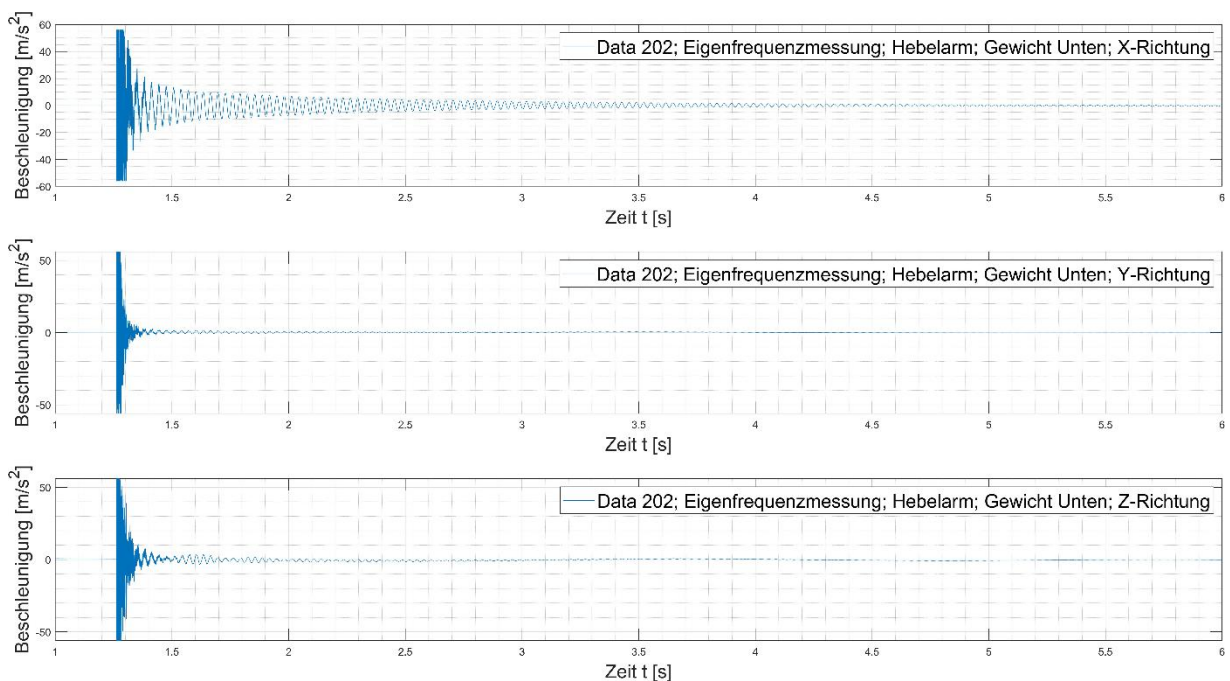


Abbildung 7.5: Strukturantwort auf den Anregungsimpuls.

Auf der X-Achse ist die Schwingung deutlich erkennbar, welche bis sechste Sekunde komplett gedämpft wird. Nach Abbildung 7.5 ist diese Erwartung als erfüllt zu bezeichnen.

In Abbildung 7.6 ist die Eigenfrequenz in der Übertragungsfunktion dargestellt.

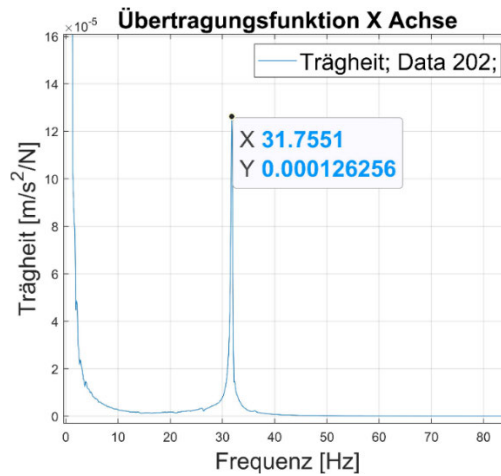


Abbildung 7.6: Übertragungsfunktion. Hebelarm. Neue Konstruktion. Gewichtplatte unten.

Nach Abbildung 7.6 liegt der Peak der Eigenfrequenz bei 31,75 Hz. Für die präzisere Bestimmung der Eigenfrequenz und den entsprechenden Dämpfungsgrad kommt MATLAB zum Einsatz [71, 72].

Eigenfrequenz f_n [Hz].	Dämpfungsgrad ϑ .
31,7551	0,0134

Tabelle 21: Eigenfrequenz und der Dämpfungsgrad von MATLAB. Neue Konstruktion. Gewicht unten.

Das System hat jetzt die erhöhte Eigenfrequenz in dieser Position. Die Tabelle 22 stellt einen Vergleich zwischen den Eigenfrequenzen der alten und neuen Konstruktion in der oberen Position zusammen.

Eigenfrequenz f_n [Hz]. Alte Konstruktion: Kamera unten	Eigenfrequenz f_n [Hz]. Neue Konstruktion: Kamera unten	Dämpfungsgrad ϑ . Alte Konstruktion: Kamera unten	Dämpfungsgrad ϑ . Neu Konstruktion: Kamera unten
17,9598	31,7551	0,0033	0,0134

Tabelle 22: Eigenfrequenzen der alten und der neuen Konstruktion: unten.

Bei der neuen Konstruktion ist die Eigenfrequenz gestiegen, auch die Steifigkeit in der unteren Position hat zugenommen [12].

7.3 Eigenfrequenzmessung am Spiegelhalter

Abbildung 7.7 enthält ein Foto vom Messort mit dem befestigten Sensor.

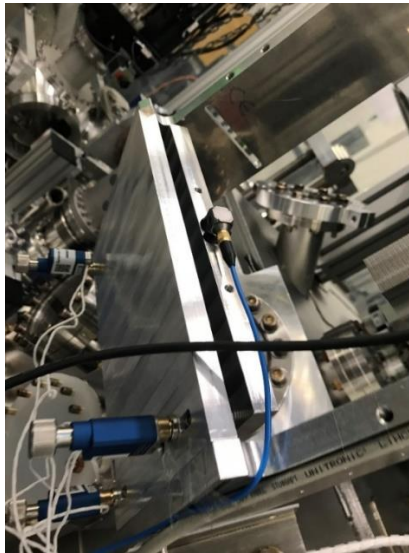


Abbildung 7.7: Messortfoto.

In Abbildung 7.8 ist die Strukturantwort in allen drei Achsen auf den Anregungsimpuls dargestellt.

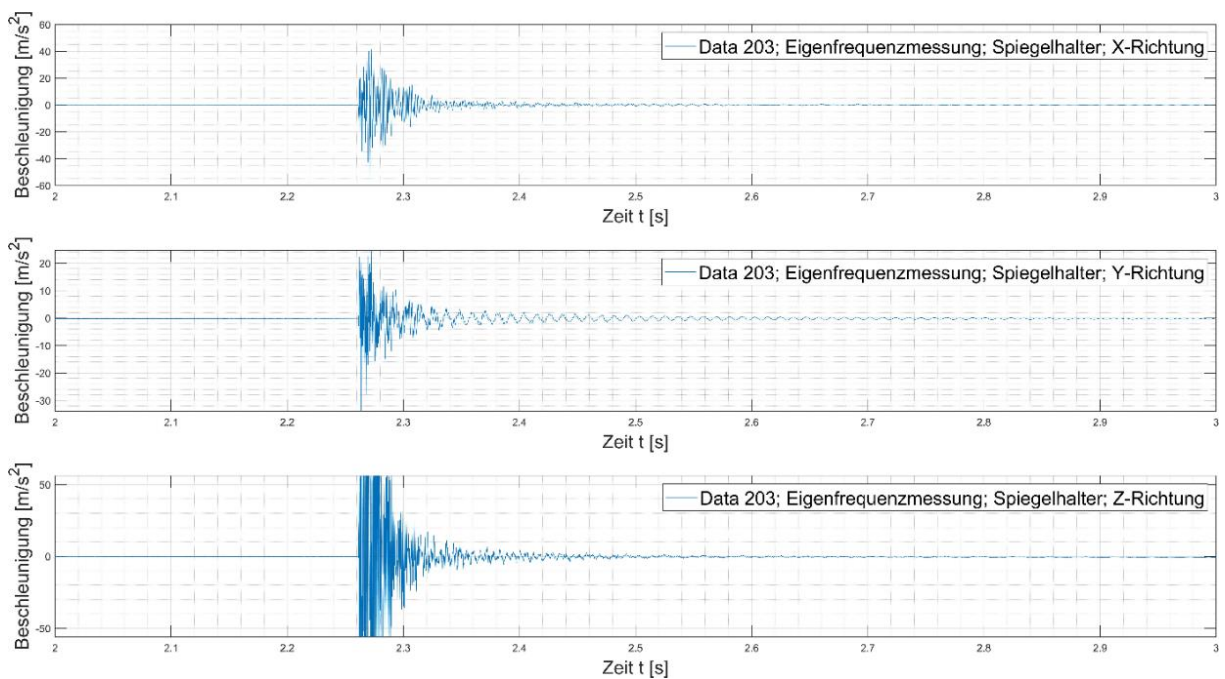


Abbildung 7.8: Strukturantwort. Neue Konstruktion. Spiegelhalter.

Der Anschlag ist senkrecht zur L-Platte gegeben, deswegen kommt der Beschleunigungssensor in der Z-Achse über den Messbereich, denn zuerst erfolgte lediglich eine Aufnahme der maximalen Beschleunigung.

Demnach treten Schwingungen in allen drei Achsen auf; deshalb gilt es, die Übertragungsfunktion in allen drei Achsen zu betrachten, denn nicht alle Eigenfrequenzen

können auf einer einzigen Achse dargestellt sein. In Abbildung 7.9 ist die Übertragungsfunktion MATLAB von der Messung am Spiegelhalter mit drei Achsen zu sehen [71].

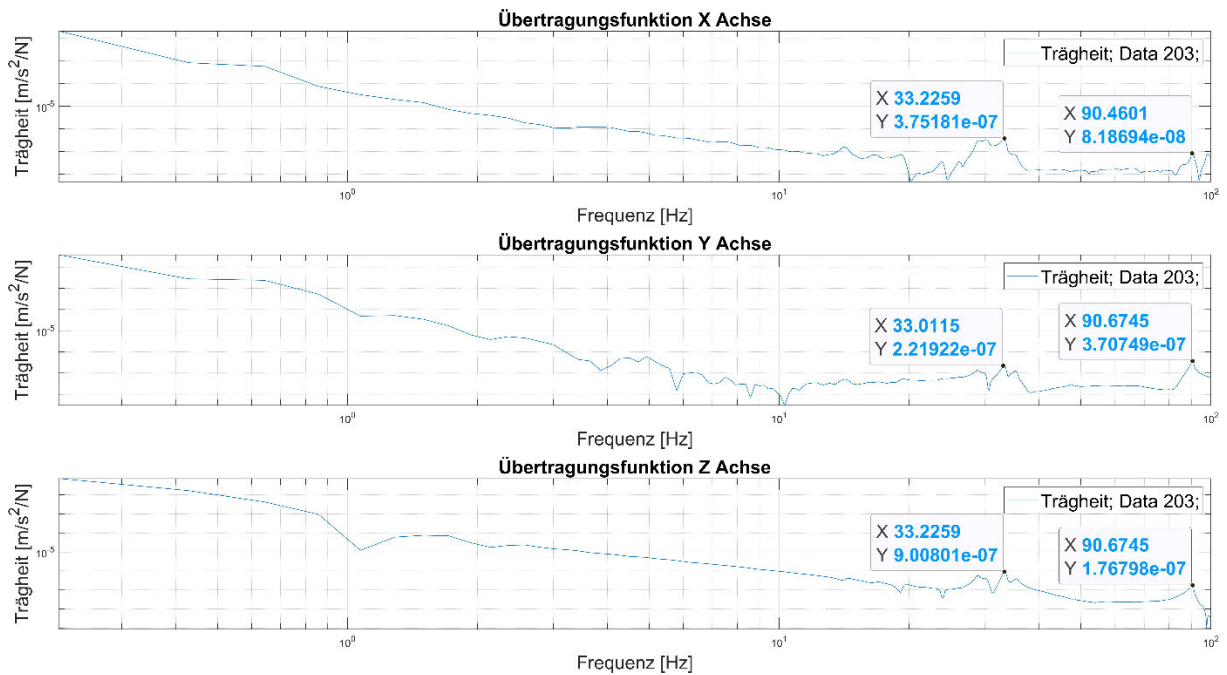


Abbildung 7.9: Übertragungsfunktion. Neue Konstruktion. Spiegelhalter.

Aus der Abbildung 7.9 ist es schwierig, die Eigenfrequenzen zu identifizieren, deswegen fand dafür der MATLAB Befehl `modalfit` Verwendung [72]. In Tabelle 23 sind die Eigenfrequenzen und die entsprechenden Dämpfungsgrade von MATLAB gegeben [71, 72].

Eigenfrequenz f_n [Hz].	Dämpfungsgrad ϑ .
33,2 Hz	0,0120
90,48 Hz	0,0076

Tabelle 23: Eigenfrequenzen und der Dämpfungsgrad von MATLAB. Neue Konstruktion. Spiegelhalter.

Tabelle 24 stellt einen Vergleich zwischen dem alten und neuen Spiegelhalter zusammen.

Eigenfrequenz f_n [Hz]. Alter Spiegelhalter.	Eigenfrequenz f_n [Hz]. Neuer Spiegelhalter.	Dämpfungsgrad ϑ . Alter Spiegelhalter.	Dämpfungsgrad ϑ . Neuer Spiegelhalter
22,8	33,2	0,026	0,0120
60	-	0,00598	-
81	90,48	0,0179	0,0076

Tabelle 24: Eigenfrequenzen zwischen dem alten und neuen Spiegelhalter.

Bei dem neuen Spiegelhalter wurden nur zwei Eigenfrequenzen nachgewiesen. Die alte Konstruktion bzw. der alte Spiegelhalter bestehen aus zwei Teilen: dem Spiegelhalter selbst und einem Innenhalter (siehe Abbildung 3.12), das bedeutet, in dieser Konstruktion schwingen zwei Bauteile mit. Im Gegensatz dazu ist der neue Spiegelhalter nur ein einziges Bauteil. Die Eigenfrequenzen des neuen Spiegelhalters sind gestiegen. Siehe Tabelle 24. Die Dämpfungsgrade sind gesunken. Die Konstruktion und die Masse des Spiegelhalters haben sich verändert, siehe Formel (2.24).

7.4 Eigenfrequenzmessung. Hebelarm. Kreuzrippe.

Als zweite Option zur zusätzlichen Versteifung wurde noch eine sogenannte Kreuzrippe entwickelt und eingebaut. Sie ist in der Abbildung 7.10 dargestellt.

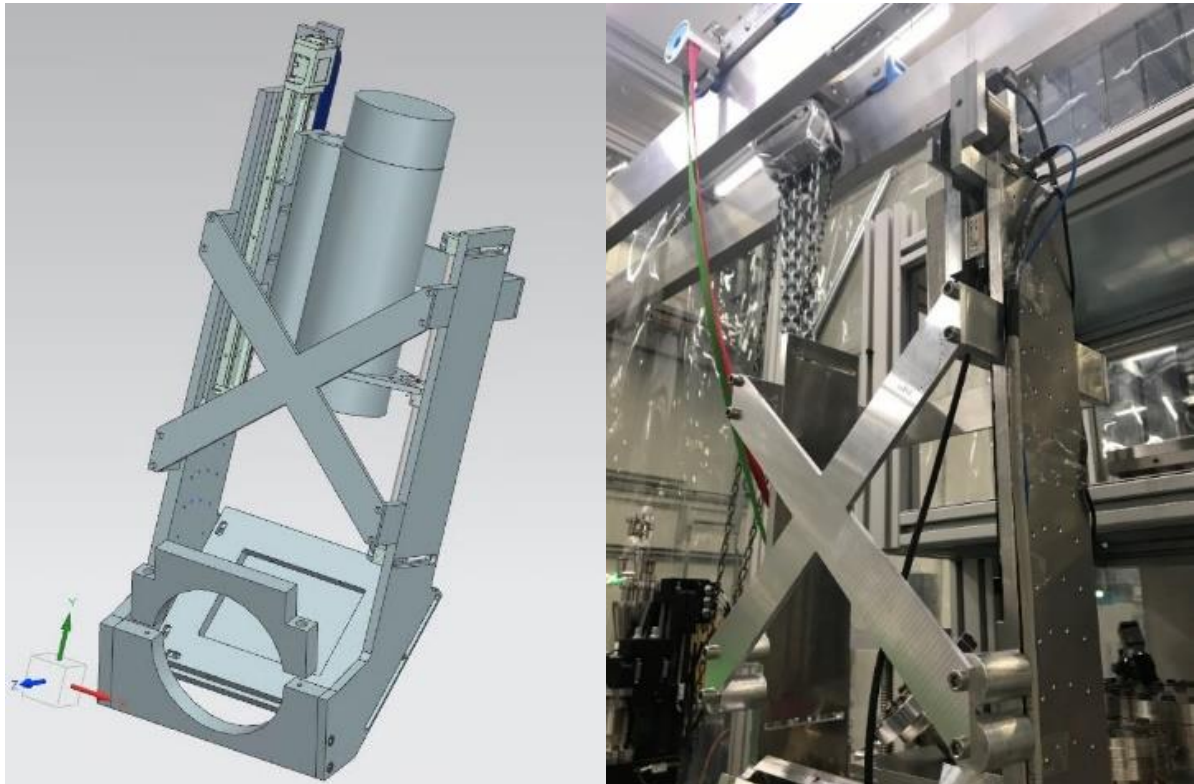


Abbildung 7.10: Kreuzrippe bei der Konstruktion.

Das Messen der Eigenfrequenzen mit zwei Positionen vollzog sich mittels dieser Kreuzrippe: Gewicht oben und Gewicht unten. Die Übertragungsfunktionen der beiden Messungen sind in Abbildung 7.11 dargestellt.

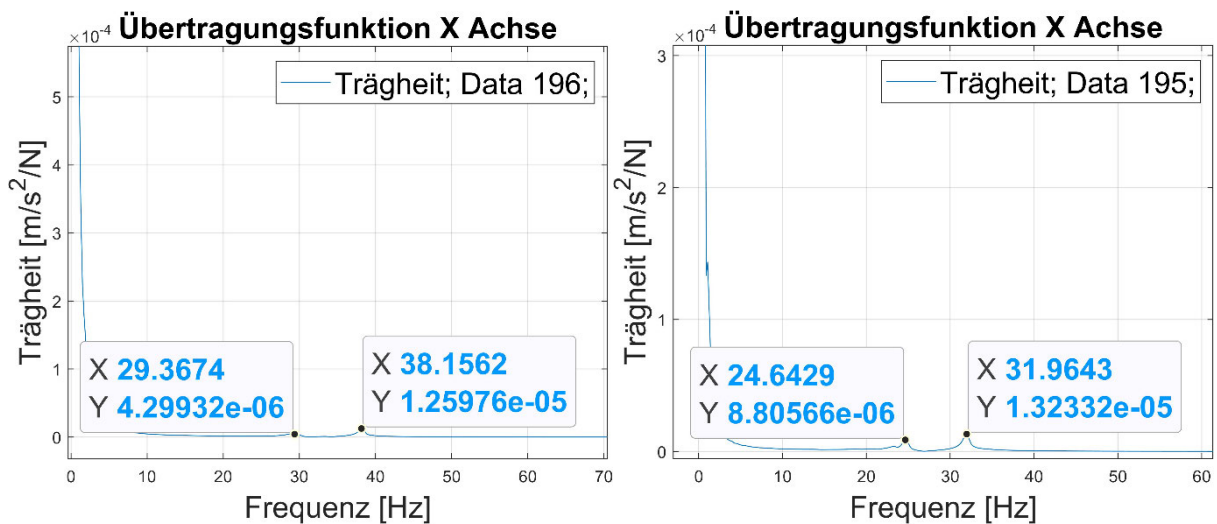


Abbildung 7.11: Übertragungsfunktion. Hebelarm. Kreuzrippe (Gewicht unten - links, Gewicht oben - rechts).

In der Tabelle 25 sind die Eigenfrequenzen und entsprechende Dämpfungsgrade für beide Messpositionen gegeben, berechnet von MATLAB [71, 72].

Eigenfrequenz f_n [Hz]. Mit Kreuzrippe		Dämpfungsgrad ϑ .
Gewicht unten	29,36 Hz	0,0267
	38,1562 Hz	0,0075
Gewicht oben	24,6429 Hz	0,0103
	31,9643 Hz	0,0091

Tabelle 25: Eigenfrequenzen und die Dämpfungsgrade von MATLAB. Kreuzrippe.

Laut der Auswertung entstehen zwei Frequenzen in jeder Position. (Tabelle 25). Eventuell kann sich die Kreuzrippe in der Z-Achse biegen, während innerhalb der Messung im Zentrum der Kreuzrippe auch eine Schwingung entsteht.

7.5 Steifigkeitsvergleich der Konstruktionen

Um den Vergleich übersichtlicher zu gestalten, kam es zum Messen von drei Eigenfrequenzen zum Vergleich: die Messung auf der alten Konstruktion (Kapitel 5.2), die Messung auf der optimierten bzw. neuen Konstruktion (Kapitel 6.3) und die optimierte Konstruktion mit der Kreuzrippe (Kapitel 7.4). Die Durchführung sämtlicher Messungen gestaltete sich am Hebelarm und an der Gewichtplatte unten. In Abbildung 7.12 sind alle drei Eigenfrequenzen auf einem Plot in der Übertragungsfunktion MATLAB zusammengestellt [71].

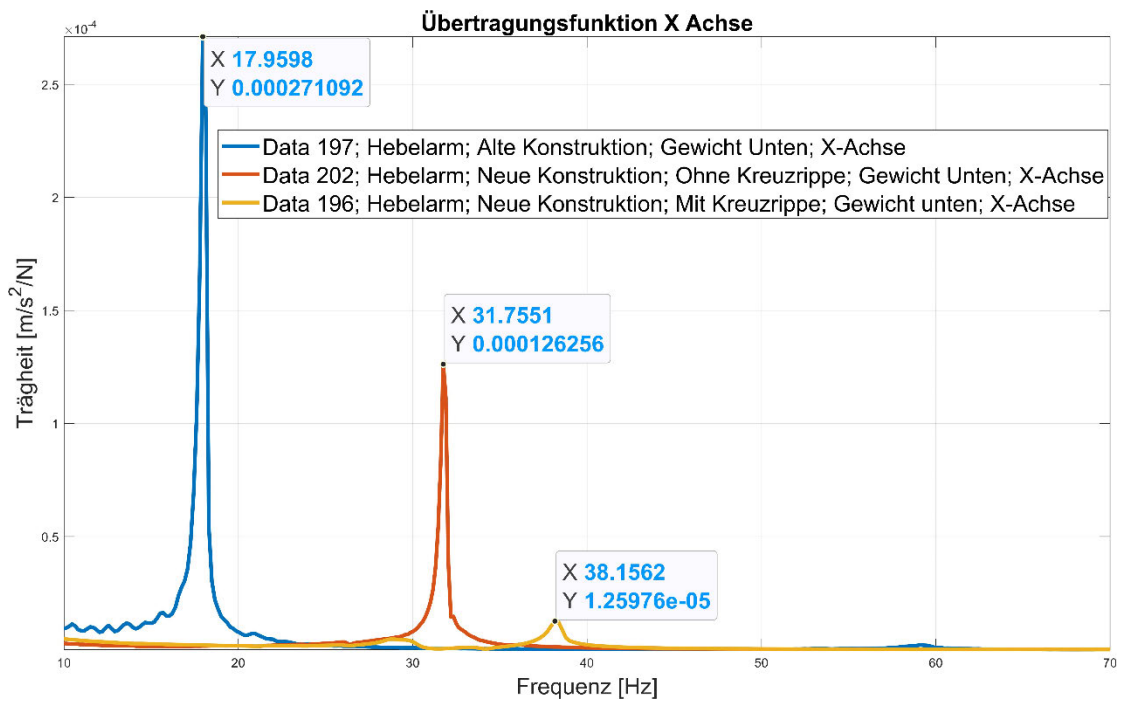


Abbildung 7.12: Vergleich zwischen Eigenfrequenzen aller drei Konstruktionen am Hebelarm.

Laut Abbildung 7.12 liegt die erste Eigenfrequenz der alten Konstruktion (Abbildung 3.6) deutlich erkennbar bei 18 Hz. Bei der neuen Konstruktion mit der Kreuzrippe (Abbildung 7.10) liegt die erste Eigenfrequenz bei 38,15 Hz. Diese Frequenz hat den kleinsten Betrag in der Übertragungsfunktion und je kleiner der Betrag der Übertragungsfunktion (im vorliegenden Fall ist das die Trägheit), desto höher liegt die Frequenz und desto steifer ist die Konstruktion [12]. Demzufolge ist die Steifigkeit um 2,11 mal (38,15 Hz/18 Hz) gestiegen. Derselbe Vergleich kam für den Spiegelhalter in Betracht, dargestellt in Abbildung 7.13.

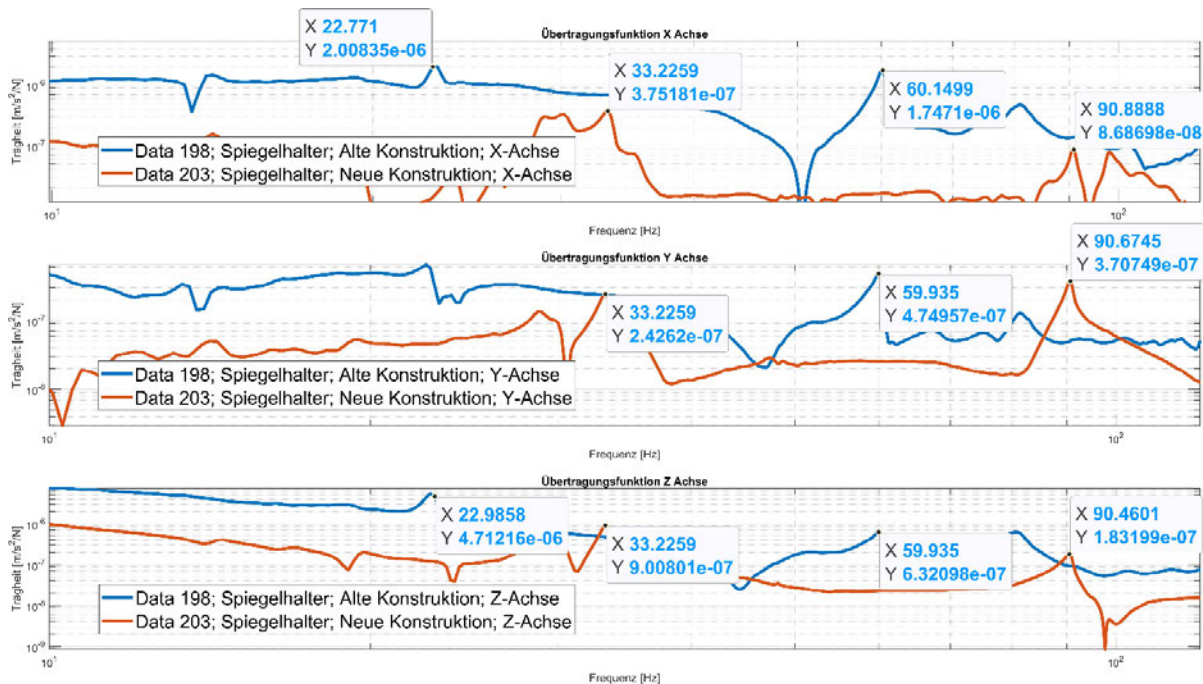


Abbildung 7.13: Vergleich zwischen den Eigenfrequenzen des alten und neuen Spiegelhalters.

In Abbildung 7.13 sind zwei Messungen dargestellt. Die erste und zweite Eigenfrequenz des alten Spiegelhalters (Kapitel 5.3) liegen bei 22,8 Hz, 60 Hz und 80 Hz und haben eine blaue Farbe. Die erste und zweite Eigenfrequenz mit 33,26 Hz und 90,48 Hz haben eine orange Farbe (Kapitel 7.3). Die Steifigkeit des Spiegelhalters ist demnach um 1,45 mal ($33,26 \text{ Hz}/22,8 \text{ Hz}$) größer geworden. Das MATLAB Skript zur Auswertung befindet sich in Anhang A8.

8 Durchführung und Analyse der Messungen der neuen Konstruktion im Betrieb

Die neue Konstruktion wurde ausgearbeitet, bestellt, zusammengebaut und geprüft auf die Steigerung der Steifigkeit. Es folgt die Durchführung der Messungen der neuen Konstruktion unter realen Betriebsbedingungen nach einem Experiment. Die Messungen mussten an einem bestimmten Tag (25.04.2022) stattfinden.

8.1 Messpositionen und Messprotokoll

Ein erstelltes Messprotokoll diente den Messungen der neuen Konstruktion, die sehr ähnlich dem in Kapitel 4.2 vorgestellten Messprotokoll ist. Da sich bei einigen Messpositionen (wie Flansch und FFT) keine Änderungen ergeben hatten, unterblieb eine Durchführung der Messungen bei diesen Positionen. In Abbildung 8.1 ist die Skizze der Messpositionen dargestellt.

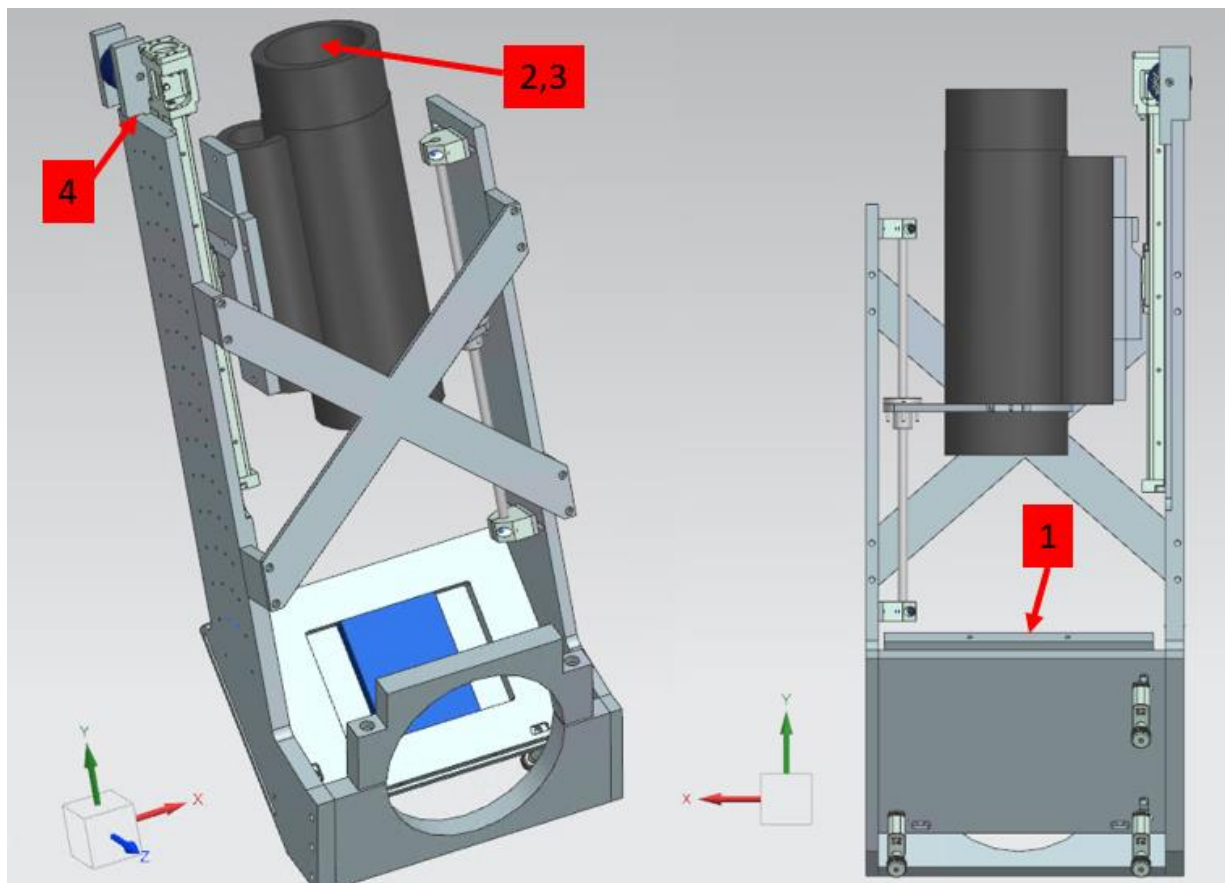


Abbildung 8.1: Skizze für den Plan der Messungen der neuen Konstruktion. Die Zahlen zeigen die Messpositionen.

Die Durchführung der Messungen vollzieht sich an vier Messpositionen (siehe Abbildung 8.1): am Spiegelhalter (1), an der Kamera oben (2), Kamera unten (3) und am Hebelarm (4). Die

Messdauer betrug auch 175 Sekunden wie in Kapitel 4.2. Pro eine Messposition kam es zur Durchführung von fünf Messungen mit eingeschalteten Piezomotoren. Es fiel die Entscheidung, die Durchführung der Messungen nur mit einem Zustand vorzunehmen, was mehr der Realität entspricht.

Anhand von fünf Messungen kommt es zum Erzeugen einer resultierenden und zu analysierenden Mittelwertmessung. Tabelle 26 stellt den Plan der Messungen dar.

Nummer. Abbildung 8.1.	Messposition	Messzustand	Anzahl der Messungen	Messdauer
1	Spiegelhalter	Piezomotoren an	5	175 Sekunden
2	An der Kamera: oben	Piezomotoren an	5	175 Sekunden
3	An der Kamera: unten	Piezomotoren an	5	175 Sekunden
4	Am Hebelarm	Piezomotoren an	5	175 Sekunden

Tabelle 26: Der Plan der Messungen der neuen Konstruktion vom 25.04.2022.

Die Abtastrate für die Messungen betrug 12 500 Hz. Alle in Kapitel 2.6.2 beschriebenen Filter sind deaktiviert worden, um den vollen Frequenzbereich zu bekommen. Es kam zum Exportieren sämtlicher durchgeführter Messungen in eine Text (TXT) Datei.

Damit die Messdaten unproblematisch greifbar sind, wurden diese im Programm Matrix Laboratory (MATLAB) aufgearbeitet bzw. aus TXT Format ins MATLAB Format umgewandelt, gespeichert und analysiert. Das MATLAB Skript zur Auswertung befindet sich in Anhang A8.

8.2 Messung am Spiegelhalter

Die Durchführung der ersten Messung der neuen Konstruktion vollzog sich am Spiegelhalter. Das Koordinatensystem des Sensors stimmt mit dem XFEL Koordinaten System überein. Abbildung 8.2 enthält die Darstellung eines Fotos vom Messort.



Abbildung 8.2: Sensor am Spiegelhalter.

Die Mittelwertmessung am neuen Spiegelhalter erfährt einen direkten Vergleich mit der Mittelwertmessung am alten Spiegelhalter. Abbildung 8.3 beinhaltet eine Darstellung der Beschleunigungen der Mittelwertmessungen.

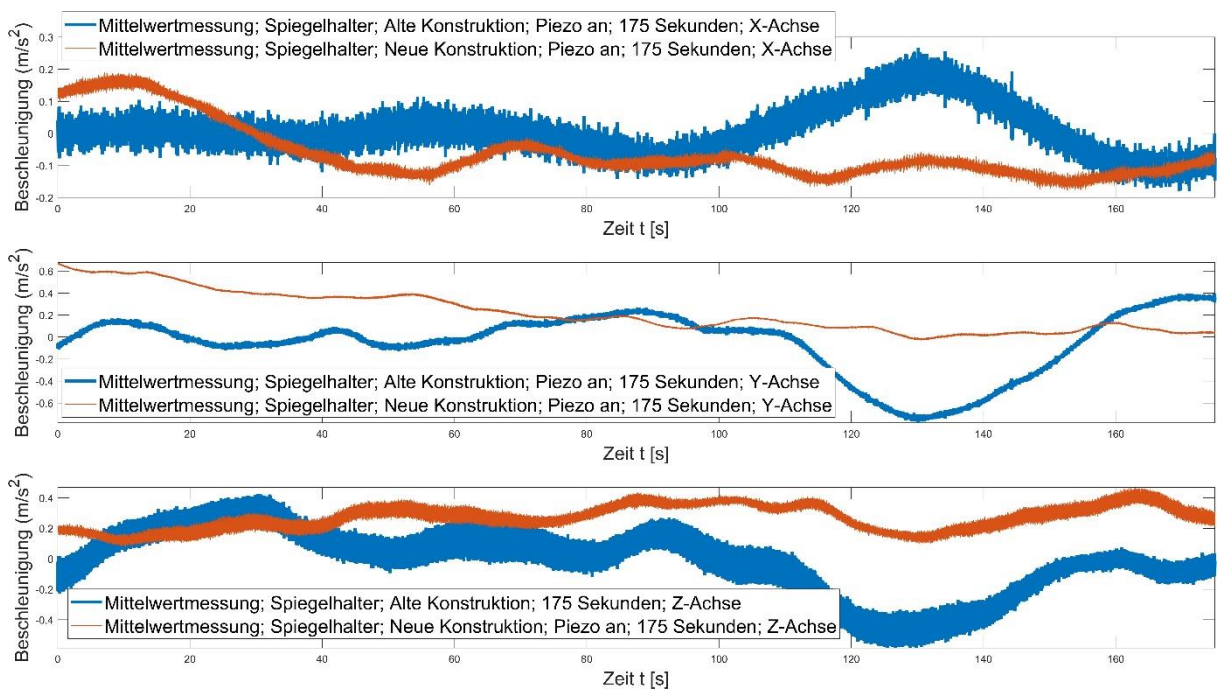


Abbildung 8.3: Beschleunigungen am Spiegelhalter. Neue und alte Konstruktion.

Laut Abbildung 8.3 ist die Beschleunigungsamplitude der neuen Konstruktion deutlich kleiner als jene der alten Konstruktion. Von 0-0,2 der alten und von 0-0,05 der neuen Beschleunigungsamplitude in der X-Achse und Y-Achse sind die Werte geringer geworden. Bei allen drei Achsen ist keine harmonische Schwingung oder Vibration zu erkennen. Die Mittelwerte und Standardabweichungen der beiden Messungen sind in Tabelle 27 gegeben.

Messung der Beschleunigung am Spiegelhalter. Neue und alte	M_w und S_a bei Spiegelhalter in [m/s ²]					
	M_w X-Achse	S_a X-Achse	M_w Y-Achse	S_a Y-Achse	M_w Z-Achse	S_a Z-Achse
Mittelwertmessung Spiegelhalter. Piezo an. Alte	0.0026	0.0739	0.0050	0.2259	0.0039	0.1808
Mittelwertmessung Spiegelhalter. Piezo an. Neue	-0.0089	0.1035	0.0109	0.1471	0.0448	0.5761

Tabelle 27: Mittelwert und Standardabweichungen. Neuer und alter Spiegelhalter.

In Tabelle 27 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen gegeben. Die Beschleunigungsmittelwerte sämtlicher Achsen in der neuen Konstruktion sind größer als die Mittelwerte der alten Konstruktion.

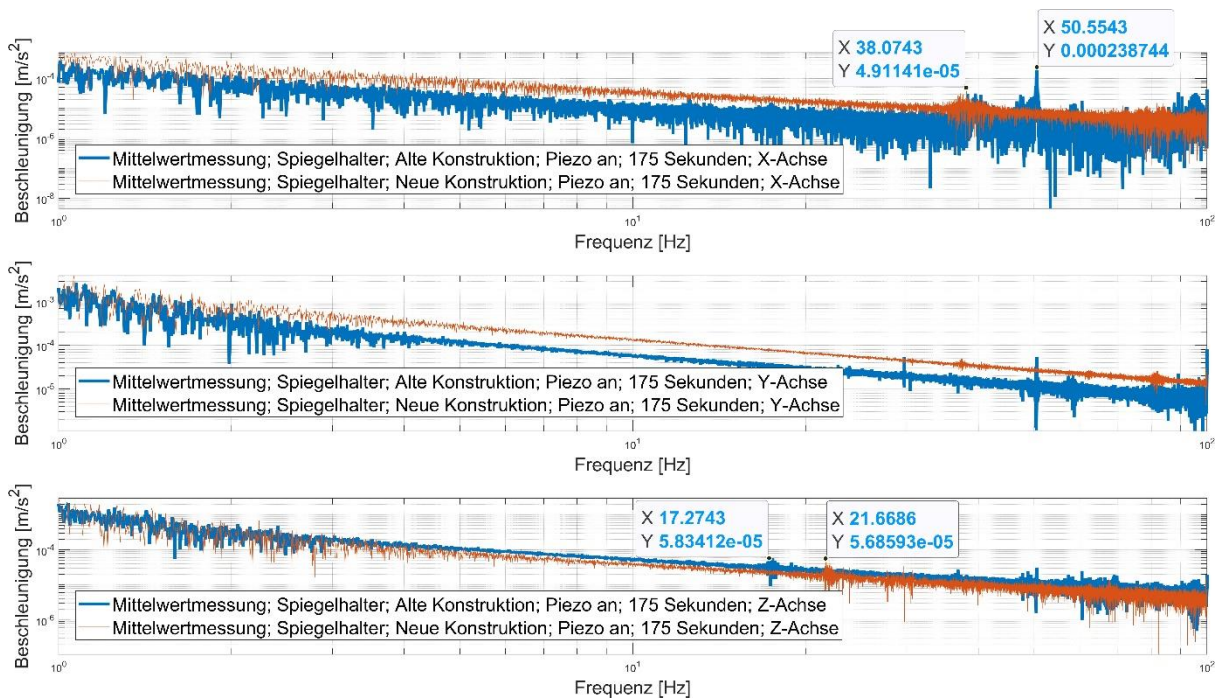


Abbildung 8.4: Frequenzspektrum. Spiegelhalter. Alte und neue Konstruktion.

In Abbildung 8.4 sind die Frequenzspektren der beiden Messungen bei der alten und neuen Konstruktion im Bereich von 0 Hz bis 100 Hz dargestellt. Die orange Kurve ist die neue Konstruktion, die blaue ist die alte.

Wie in Kapitel 4.8 beschlossen, ist der wichtigste Frequenzbereich von 0 Hz bis 26 Hz, weil die Kamera in diesem Bereich funktioniert [61]. Außerdem findet die Resonanz sowohl am Hebelarm als auch am Spiegelhalter Bestätigung. In diesem Frequenzbereich sind fast keine Peaks mehr gegeben. Die ersten großen Peaks liegen im Bereich von 40 Hz und 50 Hz. Auch im größeren Frequenzbereich, in dem eine Resonanz vorhanden ist, ist diese Schwingung nicht erkennbar, da die Kamera diese Schwingungen mit diesen Frequenzen nicht erfassen kann.

8.3 Messung an der Kamera: oben

Die Durchführung der nächsten Messung fand an der Kamera in der oberen Position statt. Ein Foto vom Messort ist in Abbildung 8.5 dargestellt.



Abbildung 8.5: Der Sensor an der Kamera: oben.

In Abbildung 8.6 sind die Beschleunigungen der Mittelwertmessungen sowohl auf der alten Konstruktion als auch auf der neuen Konstruktion an der Kamera in der oberen Position zu sehen. Die blaue Kurve ist die alte Konstruktion und die orange Kurve die neue.

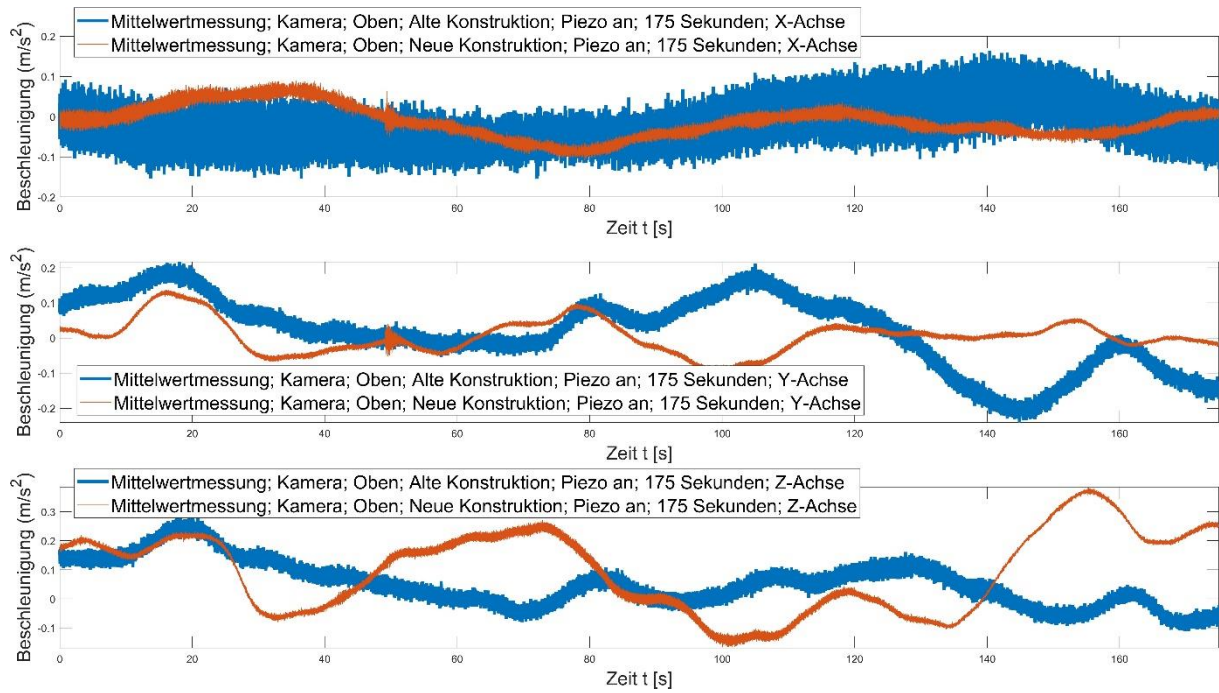


Abbildung 8.6: Beschleunigungen der Mittelwertmessungen. Kamera oben. Alte und neue.

Wie in der Messung am Spiegelhalter (Kapitel 8.2) sind alle Beschleunigungsamplitude der neuen Konstruktion kleiner geworden. Der Verlauf der Beschleunigung der X-Achse in der Abbildung ist verhältnismäßig stabil geblieben. Die anderen Verläufe der Y- und Z-Achse sind unharmonisch geblieben. Die Mittelwerte sämtlicher Messungen sind in Tabelle 28 gegeben.

Messung der Beschleunigung an der Kamera: oben. Neue und alte	M_w und S_a bei Kamera oben in [m/s ²]					
	M_w X-Achse	S_a X-Achse	M_w Y-Achse	S_a Y-Achse	M_w Z-Achse	S_a Z-Achse
Mittelwertmessung Kamera oben. Piezo an. Alte	-0.0009	0.044	-4.53e-06	0.0693	0.0007	0.0903
Mittelwertmessung Kamera oben. Piezo an. Neue	-0.0010	0.0320	0.0009	0.0539	0.0068	0.1202

Tabelle 28: Mittelwert und Standardabweichung. Kamera oben. Neue und alte.

Laut Tabelle 28 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Beschleunigungen bei der neuen Konstruktion auch größer geworden als bei der alten, das auch bestätigt die Zunahme der Steifigkeit in der oberen Position der Kamera. Abbildung 8.7 stellt das

Frequenzspektrum der beiden Konstruktionen vor. Die blaue Kurve – alte Konstruktion, die orange – die neue.

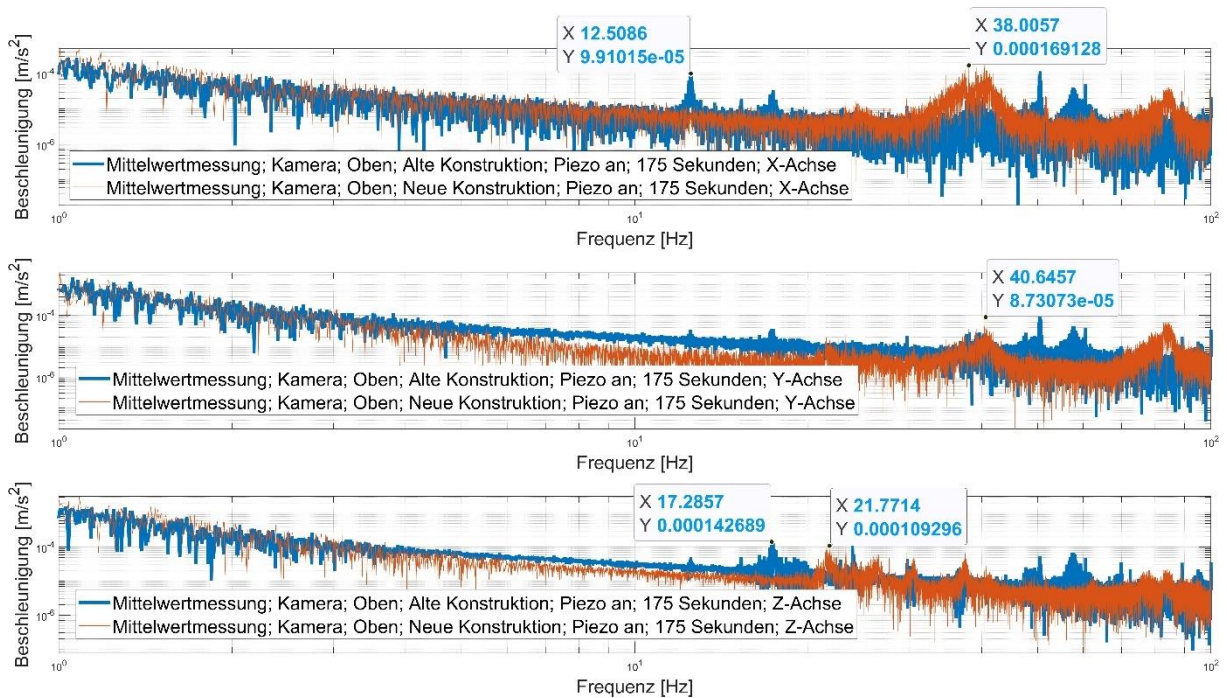


Abbildung 8.7: Frequenzspektrum von Mittelwertmessungen. Kamera oben. Alte und neue Konstruktion.

In der Abbildung 8.7 ist das Frequenzspektrum der beiden Konstruktionen vorgestellt. Blaue Kurve – alte Konstruktion, orange – neue.

In Abbildung 8.7 befinden sich keine großen Peaks im Frequenzbereich von 0 Hz bis 26 Hz. Das bedeutet, es gibt keine Resonanz an der Kamera in der oberen Position in diesem Frequenzbereich. In der Z-Achse befindet sich der Peak von 17 Hz im Bereich von 22 Hz.

Wie in der letzten Messung ist der erste große Peak im Bereich von 40 Hz, irrelevant für die vorliegende Arbeit wegen der fps der Kamera.

8.4 Messung an der Kamera: unten

Abbildung 8.8 enthält die Darstellung eines Fotos vom Messungsort.



Abbildung 8.8: Sensor an der Kamera: unten.

In Abbildung 8.9 sind die Beschleunigungen der Mittelwertmessungen sowohl auf der alten Konstruktion als auch auf der neuen Konstruktion an der Kamera in der unteren Position zu sehen. Die blaue Kurve ist die alte Konstruktion und die orange Kurve die neue.

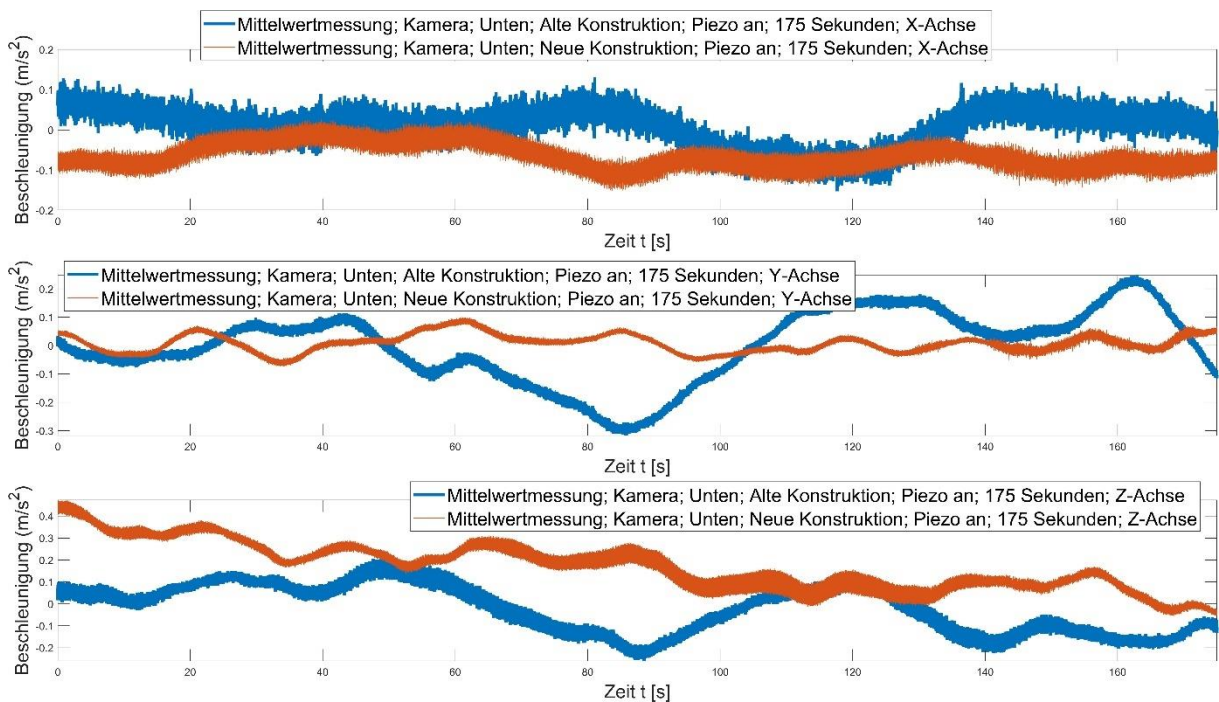


Abbildung 8.9: Beschleunigungen der Mittelwertmessungen an der Kamera. Unten. Alte und neue Konstruktion.

Der Beschleunigungsverlauf der neuen Konstruktion in der Y- und X-Achse ist relativ stabil, die letzte Z-Achse zeigt keinen stabilen Verlauf und die Beschleunigungsamplitude jeder Achse der neuen Konstruktion ist auch kleiner geworden.

Messung der Beschleunigung an der Kamera: unten. Neue und alte.	M_w und S_a bei Kamera unten in [m/s ²]					
	M_w X-Achse	S_a X-Achse	M_w Y-Achse	S_a Y-Achse	M_w Z-Achse	S_a Z-Achse
Mittelwertmessung Kamera unten. Piezo an. Alte	-0.0018	0.0438	0.0011	0.0963	0.0054	0.1158
Mittelwertmessung Kamera unten. Piezo an. Neue	-0.0068	0.0378	0.0691	0.1263	-0.0142	0.1540

Tabelle 29: Mittelwert und Standardabweichung. Kamera unten. Neue und Alte.

In Tabelle 29 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen beider Messungen gegeben. Sämtliche Beschleunigungsmittelwerte der neuen Konstruktion sind ebenfalls größer geworden. Dadurch ist die Zunahme der Steifigkeit in dieser Position auch nachgewiesen. Abbildung 8.10 beinhaltet die Darstellung eines Frequenzspektrums beider Messungen.

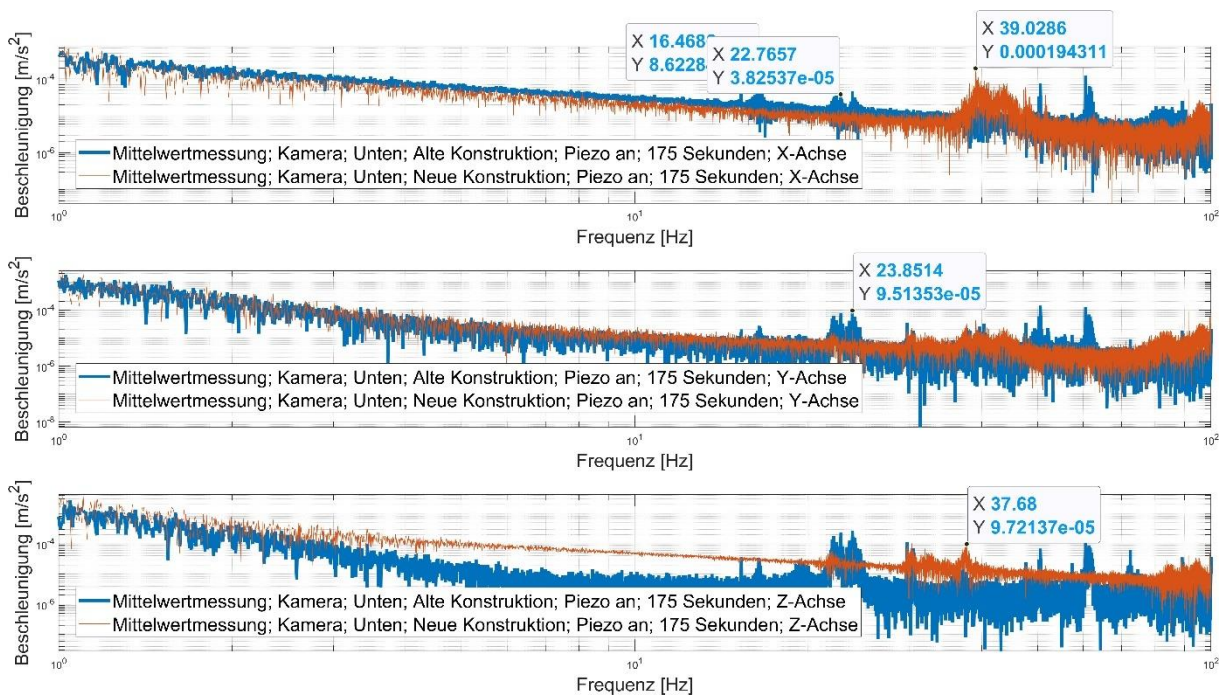


Abbildung 8.10: Frequenzspektrum der Mittelwertmessungen. Kamera unten. Alte und neue Konstruktion.

Das in der Abbildung 8.10 dargestellte Frequenzspektrum belegt ein relativ stabiles Spektrum im Bereich von 0 bis 26 Hz bei der neuen Konstruktion. Der erste große Peak befindet sich im

Bereich von 40 Hz. Die Peaks der alten Konstruktion sind nicht mehr im Frequenzspektrum der neuen enthalten, das heißt, deren Auswirkung ist nicht mehr da.

8.5 Messung an dem Hebelarm

In Abbildung 8.11 ist ein Foto vom Messort dargestellt. Die Koordinatensysteme von Sensor und XFEL stimmen überein.

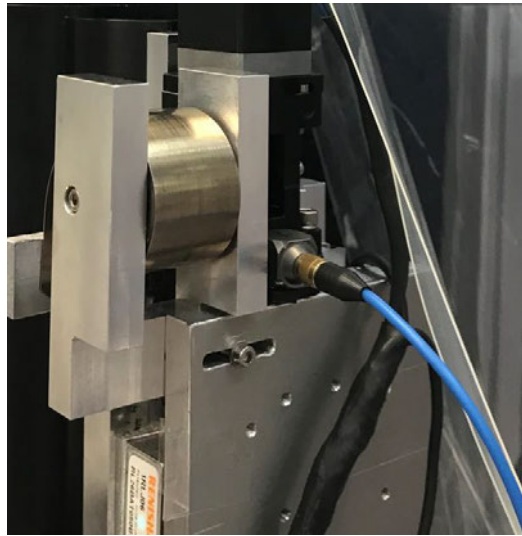


Abbildung 8.11: Sensor am Hebelarm.

Da die Messung in dieser Position in Kapitel 4.7 ursprünglich im Plan der Messungen vom 23.11.2021 nicht vorgekommen ist und fakultativ bzw. zusätzlich nur einmal durchgeführt wurde, findet ein Vergleich dieser mit einer einzigen Messung des neuen Designs statt. Abbildung 8.12 stellt das Frequenzspektrum der Messungen dar.

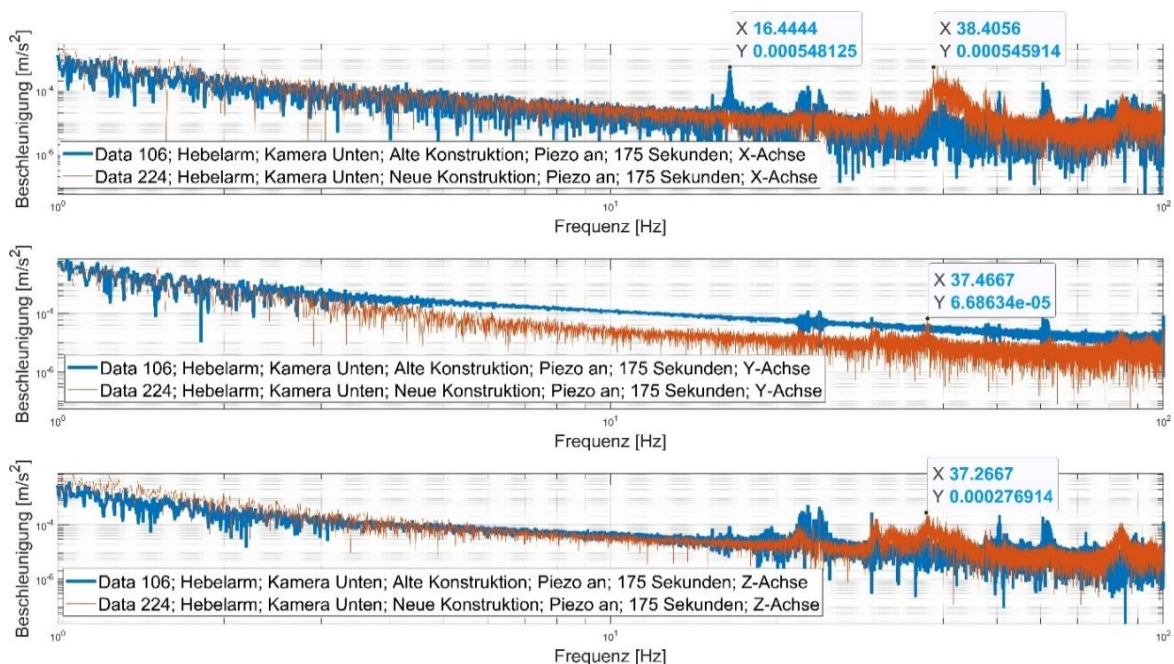


Abbildung 8.12: Frequenzspektrum der Messung am Hebelarm.

Dieses Frequenzspektrum zeigt auch den stabilen Verlauf im Bereich von 0 Hz bis 26 Hz. Es kam zur Eliminierung der Resonanz bei 16,44 Hz vom Hebelarm, denn diese Resonanzfrequenz ist nicht mehr im Frequenzspektrum der neuen Konstruktion enthalten.

Der Vergleich einer einzigen Messung am Hebelarm (vom 23.11.2021) mit der Mittelwertmessung (vom 25.04.2022) am Hebelarm bietet sich nicht an, es findet der Vergleich eines normalen Signals mit dem Mittelwertsignal statt, was inkorrekt ist. Deswegen wurde dafür nur ein Datensatz angenommen und analysiert.

8.6 Zusammenfassung

Zur Durchführung gelangen Messungen mit vier Positionen mit angeschalteten Piezomotoren an der neuen Konstruktion. Die Messung der Vibrationen fand nur an den Messpositionen statt, an dem die Änderungen vorgenommen worden sind wie z. B. am Spiegelhalter, am Hebelarm und an der Kamera in der oberen und unteren Position. Der Flansch und die FFT Kammer waren ohne Änderungen, infolgedessen war eine Messung einer Vibration dort nicht erforderlich. Die Durchführung der Messungen gestaltete sich mittels identischer Messbedingungen, um den Vergleich zwischen der alten und neuen Konstruktion korrekt zusammenzustellen. Allerdings ist nur mit den angeschalteten Piezomotoren bzw. in einem Zustand aufgenommen worden, denn dies entspricht mehr den realen Betriebsbedingungen. Nach der Auswertung der durchgeführten Messungen sind sämtliche Frequenzspektren der Messungen an der neuen Konstruktion im relevantesten Frequenzbereich von 0 Hz bis 26 Hz deutlich stabiler geworden. Es gibt keine großen Peaks in diesem Bereich und die Resonanz, die am Hebelarm mit der Frequenz von 16,4 Hz herrschte, ist eliminiert worden, denn sie ist nicht mehr in dem Frequenzspektrum der neuen Konstruktion enthalten. Die ersten großen Peaks treten nur im Bereich von 40 Hz auf, was für die Kamera nicht erfassbar ist.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Masterarbeit kam es zur Durchführung der Ausarbeitung der Konstruktion des motorisierten Kamerahalters, des sogenannten Far-Distance Microscope (FDM), unter besonderer Berücksichtigung mechanischer Vibrationen. Erst fand eine messtechnische Aufnahme der im Betrieb herrschenden Schwingungen statt in Verbindung mit einer Analyse. Das Programm Matrix Laboratory (MATLAB) diente der Analyse der aufgenommenen Schwingungen.

Um die Problematik richtig verstehen und anschließend lösen zu können, galt es, zunächst die Grundlagen der Schwingungen zu erarbeiten. Dabei kam es noch zur Erläuterung hinsichtlich der Schwingungssensoren, sowohl der Schwingungsanalyse als auch der Schwingungsmessung und der Eigenfrequenzmessung.

Der nächste Punkt beinhaltete die Beschreibung sowohl der Umgebungsbedingungen als auch der FFT Kammer als auch des Ist-Zustandes von FDM. Dort kam es zur Erläuterung der FFT Kammer und der Wirkweise von FDM. Das beinhaltet auch die Beschreibung von gekauften FDM Komponenten.

Vor der Durchführung der Messungen fand eine Verifizierung des Sensors statt. Dafür diente ein Beispiel mit dem eingespannten Balken mit dem freien Ende in Verbindung mit einer anschließenden Analyse. Mittels des Beschleunigungssensors und des Impulshammers waren die Eigenfrequenzen zu messen und mit den Eigenfrequenzen der Finite Elemente Methode bei ANSYS zu vergleichen. Der Unterschied zwischen den Ergebnissen beträgt weniger als 4 %, was die Durchführung der Messungen im weiteren Verlauf erlaubt.

Als Erstes kam es zur Durchführung von Messungen im Betrieb sowie von Eigenfrequenzmessungen der alten Konstruktion. Zur Aufnahme gelangte die Beschleunigung an der FFT Kammer an mehreren Positionen. Die Auswertung brachte ein gekoppeltes Problem zutage. Bei diesem Problem ist es schwierig, alle Schwingungsquellen zu finden, weil diese sich überlappen. Allerdings war es möglich, einige Schwingungsquellen zu identifizieren. Die technischen Daten der Kamera stellten die Anforderungen für den relevantesten Frequenzbereich, der zwischen 0 Hz und 26 Hz liegt. Laut der Auswertung liegen in diesem Frequenzbereich einige große Peaks, was auf die Resonanz hindeuten kann. Um das prüfen zu können, kam es zur Messung der Eigenfrequenz von FDM in zwei Positionen mittels des Impulshammers und des Beschleunigungssensors und zu einem Vergleich mit Frequenzspektren von realen Betriebsbedingungen. Das errechnete Abstimmungsverhältnis hat die Resonanz in beiden Positionen bestätigt.

Vor Beginn der Konstruktionsphase erfolgte die Verwendung einiger Instrumente der TRIZ Methode wie z. B. der Ressourcenanalyse und der Idealität des Systems, um verstehen zu können, welches System oder welche Komponenten noch weiterverwendet werden können

und welche Lösung ideal wäre. Nach allen Auswertungen kam es zur Entwicklung einer verbesserten bzw. modifizierten Konstruktion mittels CAD Programm (NX). Diese war eine der wichtigsten Aufgaben, die Steigerung der Eigenfrequenz vom neuen Design. Besondere Aufmerksamkeit erhielt der Bauraum der Konstruktion, da das SCS-Instrument über einen begrenzten Bauraum verfügt. Die Entwicklung berücksichtigte auch die Einstellungsmöglichkeiten einiger Komponenten der Konstruktion.

Zur Einführung gelangte die neue Versteifungsrippe, Führungen sowie eine Entwicklung der Kreuzrippe mit einer Einführung in die Konstruktion.

Nach der Fertigung der Bauteile und dem Einkauf der Standardkomponenten schließt sich der Anbau der Komponenten an das Instrument an. Zum Nachweis der Steifigkeit des neuen Designs fand eine Messung der Eigenfrequenzen statt mit einem Vergleich der Eigenfrequenzen des alten Designs. Der Vergleich belegte deutlich höhere Eigenfrequenzen des neuen Designs und eine höhere Steifigkeit von mindestens 1,45 Mal.

Als Letztes kam es zur Durchführung und Analyse der Messungen hinsichtlich der realen Betriebsbedingungen an dem neuen Design. Die Analyse der Frequenzspektren zeigt relativ stabile Verläufe ohne große Peaks im Bereich von 0 Hz bis 26 Hz, was auch die Steifigkeit der Konstruktion nachweist. Die ersten großen Peaks treten allein im Bereich von 40 Hz auf.

Daher zeigt die Arbeit anhand der Messungen konstruktive Verbesserungen im Hinblick auf eine erheblich bessere Schwingungseigenschaft des Systems.

Es gilt, sämtliche Störquellen bzw. die Schwingungsquelle zu vermeiden, allerdings besteht zurzeit nur die Möglichkeit, die Schwingungsquelle des Kabels zu vermeiden. Die Kabel jeder elektronischen Komponente haben einen Einfluss auf das Schwingungsverhalten des Instruments, denn sie schwingen mit; daher sind sie alle zu befestigen oder bei Bedarf durch das Kabelmanagement bzw. mit der Schleppkette zu führen, um den Einfluss auf die Schwingungseigenschaften minimieren zu können. In naher Zukunft dürfte es möglich sein, dies mittels Ergänzung durch das neue Kabelmanagement zu berücksichtigen.

Es besteht weiterhin permanent der Versuch, Vibrationsquellen wie Pumpen usw. in der Umgebung durch Entkopplung vom Boden zu eliminieren. In der nächsten Zeit dürfte es Wissenschaftlern gelingen, zusätzlich zu den durchgeführten Untersuchungen Messungen durchzuführen, allerdings bezogen auf das Bild von der Kamera. Es erfolgt eine Messung mittels der Kamera hinsichtlich der Verschiebung der Pixel am Bild, um zu untersuchen, welchen Einfluss die neue Konstruktion auf das gesamte Schwingungsverhalten des Bildes hat.

10 Literaturverzeichnis

- [1] European XFEL, *Instrument Design. SCS*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.xfel.eu/facility/instruments/scs/instrument_design/index_eng.html (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [2] European XFEL, *Experimentierstationen*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.xfel.eu/anlage/experimentierstationen/index_ger.html (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [3] T. Oeser, *Kristallstrukturanalyse Durch Röntgenbeugung: Spektroskopiekurs Kompakt*. Wiesbaden: Springer Vieweg. in Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=5755032>
- [4] A. Scherz, R. Carley und J. T. Delitz, „Scientific Instrument Spectroscopy and Coherent Scattering (SCS) – Technical design report“. Hamburg.
- [5] European XFEL, *Überblick*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.xfel.eu/anlage/ueberblick/index_ger.html (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [6] European XFEL, *Funktionsweise*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.xfel.eu/anlage/ueberblick/funktionsweise/index_ger.html (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [7] European XFEL, *The Karabo Universe*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.xfel.eu/news_and_events/arts_projects/projects/the_karabo_universe/index_eng.html (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [8] H. Sinn, *Coordinate Systems for the Beam Distribution Systems*. [Online]. Verfügbar unter: <https://xfel.tind.io/record/442> (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [9] M. Knaebel, H. Jäger und R. Mastel, *Technische Schwingungslehre: Grundlagen - Modellbildung - Anwendungen*, 9. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz470721812cov.htm>
- [10] R. Freymann, *Strukturodynamik: Ein anwendungsorientiertes Lehrbuch*, 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011.
- [11] *DIN 1311-1:2000-02 Schwingungen und schwingungsfähige Systeme - Teil 1: Grundbegriffe, Einteilung*, DIN.
- [12] T. Kuttner und A. Rohnen, *Praxis der Schwingungsmessung: Messtechnik und Schwingungsanalyse mit MATLAB®*, 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.

- [13] K. Magnus, K. Popp und W. Sextro, *Schwingungen: Eine Einführung in die physikalischen Grundlagen und die theoretische Behandlung von Schwingungsproblemen ; mit 68 Aufgaben mit Lösungen*, 8. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2008.
- [14] D. Guicking, *Schwingungen: Theorie und Anwendungen in Mechanik, Akustik, Elektrik und Optik*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.springer.com/>
- [15] Wikipedia, *Freie Schwingungen*. [Online]. Verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Schwingung#Freie_Schwingungen (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [16] Wikipedia, *Eigenmode*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Eigenmode> (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [17] *DIN 45662:1996-12 Schwingungsmesseinrichtung – Allgemeine Anforderungen und Begriffe*, DIN.
- [18] *DIN 45661:2013-03 Schwingungsmesseinrichtungen – Begriffe*, DIN.
- [19] Micro-Epsilon, *Laser-Triangulation*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.micro-epsilon.de/service/glossar/Laser-Triangulation.html#:~:text=Triangulation%20bedeutet%20Abstandsmessung%20durch%20Winkelberechnung,bestimmten%20Winkel%20auf%20ein%20Empfangelement.> (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [20] Kistler AG, *Piezoelektrischer Effekt*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kistler.com/de/glossar/begriff/piezoelektrischer-effekt/> (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [21] Peter Neumeister, *Dielektrika im elektrischen Feld*. [Online]. Verfügbar unter: https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ifww/anw/ressourcen/dateien/studium/keramische_funktionswerkstoffe/termine_und_skripte/2017_Neumeister_V2.pdf?lang=de (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [22] Kistler AG, *IEPE*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kistler.com/de/glossar/begriff/iepe-integrated-electronics-piezo-electric/> (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [23] Kistler AG, *Datenblatt Kistler Typ8688a...* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kistler.com/files/document/000-843d.pdf?callee=frontend> (Zugriff am: 18. Mai 2022).

- [24] Kistler AG, *Triaxialer Beschleunigungssensor IEPE*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kistler.com/de/produkt/type-8688a/> (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [25] DJB Instruments, *Petrowax*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.djbinstruments.com/files/datasheets/Petrowax%20SDS%20BS%20ISO%2016063.pdf> (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [26] DJB Instruments, *Petrowax. Features*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.djbinstruments.com/products/instrumentation/view/petrowax> (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [27] *DIN ISO 7730:2005 Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit*, DIN.
- [28] Kistler AG, *Ladungsverstärker Typ5165A*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kistler.com/files/document/003-146d.pdf> (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [29] T. Görne, *Tontechnik: Schwingungen und Wellen ; Hören ; Schallwandler ; Impulsantwort, Faltung ; Sigma-Delta-Wandler ; Stereo, Surround, WFS ; Regiegeräte, tontechnische Praxis] ; mit 33 Tabellen*. München, Wien: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl., 2006.
- [30] Kistler AG, *Manual for Ladungsverstärker Typ5165A*.
- [31] Kistler AG, *Impulshammer Kistler Typ 9722A*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kistler.com/de/produkt/type-9722a/> (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [32] Kistler AG, *Impulshammer. Datenblatt, Typ 9722A...* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kistler.com/files/document/000-272d.pdf?callee=frontend> (Zugriff am: 8. Juni 2022).
- [33] imc Test & Measurement GmbH, *Wahl der Abtastraten bei Messsystemen*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.imc-tm.de/fileadmin/Public/Downloads/Whitepapers/WP_DE_Richtige_Abstastfrequenz.pdf (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [34] D. Kreß und B. Kaufhold, *Signale und Systeme verstehen und vertiefen: Denken und Arbeiten im Zeit- und Frequenzbereich ; mit 34 Übungsaufgaben*, 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010.
- [35] Pfeiffer Vacuum, *HiPace® 300 mit TC 400, DN 100 CF-F*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.pfeiffer->

vacuum.com/de/produkte/vakuumerzeugung/turbopumpen/hybridgelagert/hipace-300/4501/hipace-300-mit-tc-400-dn-100-cf-f (Zugriff am: 8. Juni 2022).

- [36] Pfeiffer Vacuum, *HiPace® 700 M mit TM 700, DN 160 CF-F*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/de/produkte/vakuumerzeugung/turbopumpen/magnetgelagert/hipace-700-m/12167/hipace-700-m-mit-tm-700-dn-160-cf-f> (Zugriff am: 8. Juni 2022).
- [37] NTI Audio, *Fast Fourier Transformation FFT - Grundlagen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nti-audio.com/de/service/wissen/fast-fourier-transformation-fft> (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [38] National Instruments Corp., *FFT-Praxis in NI DIAdem*. [Online]. Verfügbar unter: <https://docplayer.org/17271722-Fft-praxis-in-ni-diadem.html> (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [39] National Instruments Corp., *Using Fast Fourier Transforms and Power Spectra in LabVIEW*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ni.com/de-de/innovations/white-papers/06/using-fast-fourier-transforms-and-power-spectra-in-labview.html> (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [40] Klemens Burg, Herbert Haf, Friedrich Wille, Andreas Mesiter, *Gewöhnliche Differentialgleichungen, Distributionen, Integraltransformationen: Mit 12 Tabellen und 85 Aufgaben*, 5. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009.
- [41] T. Butz, *Fouriertransformation für Fußgänger*, 7. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011.
- [42] M. Falk, J. Hain und F. Marohn, *Statistik in Theorie und Praxis: Mit Anwendungen in R*. Berlin: Springer Spektrum, 2014.
- [43] H. Walser, *Statistik für Naturwissenschaftler*, 1. Aufl. Bern, Stuttgart, Wien: Haupt, 2011.
- [44] A. V. Oppenheim, R. W. Schafer und J. R. Buck, *Zeitdiskrete Signalverarbeitung*, 2. Aufl. München: Pearson Studium, 2004.
- [45] H. Unbehauen, *Klassische Verfahren zur Analyse und Synthese linearer kontinuierlicher Regelsysteme, Fuzzy-Regelsysteme: Mit 22 Tabellen*, 10. Aufl. Braunschweig: Vieweg, 2000.
- [46] Wikipedia, *Lineares zeitinvariantes System*. [Online]. Verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Lineares_zeitinvariantes_System (Zugriff am: 18. Mai 2022).

- [47] Prof. Dr. Wandinger, *Skript. Strukturodynamik. Übertragungsfunktion*. [Online]. Verfügbar unter: https://wandinger.userweb.mwn.de/StruktDyn/v2_3.pdf (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [48] Dr.-Ing. Mathias Eickhoff, „Dynamische Eigenschaften eines Stoßdämpfermoduls Optimierung der Fahrzeugakustik“, *Automobiltechnische Zeitschrift*, Mai. 2009, 2009.
- [49] *DIN 1311-2:2002-08 Schwingungen und schwingungsfähige Systeme. Teil 2: Lineare, zeitrelevante schwingungsfähige Systeme mit einem Freiheitsgrad.*, DIN.
- [50] M. Beitelschmidt und H. Dresig, Hg., *Maschinendynamik - Aufgaben und Beispiele*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2015.
- [51] A. Böge und W. Böge, *Technische Mechanik: Statik - Reibung - Dynamik - Festigkeitslehre - Fluidmechanik*, 32. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.
- [52] J. Dankert und H. Dankert, *Technische Mechanik: Statik, Festigkeitslehre, Kinematik/Kinetik ; mit 128 Übungsaufgaben, zahlreichen Beispielen und weiteren Abbildungen und Aufgaben im Internet*, 6. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011.
- [53] K. Jousten, Hg., *Handbuch Vakuumtechnik*, 12. Aufl. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.springer.com/>
- [54] Edwards Vacuum, *Datasheet XDS35i*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.edwardsvacuum.com/content/dam/brands/edwards-vacuum/edwards-website-assets/scientific-vacuum/documents/datasheets/Edwards-XDS35i-Dry-Scroll-Pump-PD-3601-0458-01.pdf> (Zugriff am: 13. Juni 2022).
- [55] grund-wissen, *Reflexion*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.grundwissen.de/physik/optik/lichtreflexion.html> (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [56] MiSUMi, *Motorisierte Lineareinheit*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.misumi-ec.com/vona2/detail/110300075020/> (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [57] DE SPIRAL, *Konstantkraftfeder*. [Online]. Verfügbar unter: <https://despiraal.de/produkte/konstantkraftfeder/> (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [58] Physikinstrumente, *N-472 PiezoMike Linearaktor*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.physikinstrumente.de/fileadmin/user_upload/physik_instrumente/files/datasheets/N-472-Datenblatt.pdf (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [59] Questar. The Optical Innovators, *QM 1 Long Mount. Long-Distance Microscope*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.questarcorporation.com/qm1LMss.htm> (Zugriff am: 18. Mai 2022).

- [60] Polytec, *QM-1 Long Mount. Questar Long-Distance Microscope. Datasheet*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.polytec.com/fileadmin/website/photonique-vision/pdf/questar/DS_QM1_long_mount.pdf (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [61] Basler. The power of sight., *Basler Aviator Serie. User´s manual*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.baslerweb.com/fp-1574066332/media/downloads/documents/discontinued_cameras/discontinued_cameras___manuals/Users_Manual_Aviator_GigE.pdf (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [62] Astronemics, *3.5" CAMERA COUPLING SET, NEEDS QUESTAR T-RING*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.astronemics.com/3-5-camera-coupling-set-needs-questar-t-ring.html> (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [63] Prof. Dr. Wandinger, *Skript. Elastodynamik 2: 4. Plattenschwingungen*. [Online]. Verfügbar unter: https://wandinger.userweb.mwn.de/LA_Elastodynamik_2/v4_3.pdf (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [64] CAE-WIKI, *Rayleigh-Dämpfung*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.cae-wiki.info/wikiplus/index.php/Rayleigh-Dämpfung> (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [65] European XFEL, *European XFEL feiert Richtfest für neues Bürogebäude*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.xfel.eu/aktuelles/news/index_ger.html?openDirectAnchor=1956&two_columns=0 (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [66] C. Gebhardt, *Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench: Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik*, 3. Aufl. München: Hanser, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.hanser-fachbuch.de/9783446450011>
- [67] prozentrechner.cc, *Prozentrechner*. [Online]. Verfügbar unter: <https://prozentrechner.cc> (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [68] Wikipedia, *Logarithmische Darstellung*. [Online]. Verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Logarithmische_Darstellung (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [69] Dekont Vakuum Service GmbH, *Scrollpumpen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://dekont.de/gebrauchtepumpen/scrollpumpen/> (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [70] Stilianos Louca, *Gekoppelte & Normalschwingungsanalyse. Eine Einführung*. [Online]. Verfügbar unter: https://physik-jena.de/login/veroeffentlichungen/artikel/artikel/artikel_normalschwingungsanalyse_stilianoslouca.pdf (Zugriff am: 18. Mai 2022).

- [71] MATLAB, *Frequency-response functions for modal analysis*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.mathworks.com/help/signal/ref/modalfrf.html> (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [72] MATLAB, *Modal parameters from frequency-responce functions*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.mathworks.com/help/signal/ref/modalfit.html#d123e105717> (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [73] Georg-August-Universität Göttingen., *Erzwungene Schwingungen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/6073> (Zugriff am: 5. Mai 2022).
- [74] K. Koltze und V. Souchkov, *Systematische Innovation: TRIZ-Anwendung in der Produkt- und Prozessentwicklung*, 1. Aufl. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2010. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.hanser-elibrary.com/action/showBook?doi=10.3139/9783446426313>
- [75] C. Hentschel, C. Gundlach und H. T. Nähler, *TRIZ: Innovation mit System*. München: Hanser, 2010.
- [76] Wikipedia, *Schwingungstilger*. [Online]. Verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Schwingungstilger#:~:text=Als%20Schwingungstilger%20\(auch%20kurz%20Tilger,eliminierende%20Resonanzfrequenz%20des%20Objekts%20abgestimmt.](https://de.wikipedia.org/wiki/Schwingungstilger#:~:text=Als%20Schwingungstilger%20(auch%20kurz%20Tilger,eliminierende%20Resonanzfrequenz%20des%20Objekts%20abgestimmt.) (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [77] K.-J. Conrad, *Grundlagen der Konstruktionslehre: Maschinenbau-Anwendungen und Orientierung auf Menschen : mit 104 Tabellen, zahlreichen Kenntnisfragen und Aufgabenstellungen mit Lösungen*, 7. Aufl. München: Hanser, 2019.
- [78] MÄDLER, *Linearkugellager KB-ST-F mit rundem Flansch, kurze Ausführung*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.maedler.de/product/1643/7201/linearkugellager-kb-st-f-mit-rundem-flansch-kurze-ausfuehrung> (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [79] MÄDLER, *Präzisions-Wellenböcke GW-1 ISO-Reihe 1*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.maedler.de/product/1643/1630/553/praezisions-wellenboecke-gw-1-iso-reihe-1> (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [80] MÄDLER, *Präzisions-Wellenstahl Werkstoff CF53, gehärtet und geschliffen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.maedler.de/product/1643/1630/559/praezisions-wellenstahl-werkstoff-cf53-gehaertet-und-geschliffen> (Zugriff am: 18. Mai 2022).
- [81] R. Gomeringer *et al.*, *Tabellenbuch Metall: Mit Formelsammlung*, 48. Aufl. Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel, 2019.

Anhang

A1: Datenblatt vom Beschleunigungssensor Kistler Typ 8688A5

Acceleration



Miniature PiezoBeam® Accelerometer

Type 8688A...

Lightweight, IEPE Triaxial TEDS Accelerometer

Type 8688A... is a high sensitivity triaxial accelerometer that simultaneously measures vibration in three orthogonal axes. The sensor is designed primarily for modal analysis applications and offers selective use as a general purpose vibration sensor.

- IEPE, ± 5 g, ± 10 g, and ± 50 g ranges
- Smallest PiezoBeam® triaxial accelerometer with lowest mass
- Low cost, miniature and lightweight triaxial
- High sensitivity, low noise and high dynamic range
- Choice of ranges and sensitivities
- Ground isolated mounts
- TEDS option
- Conforming to C€

Description

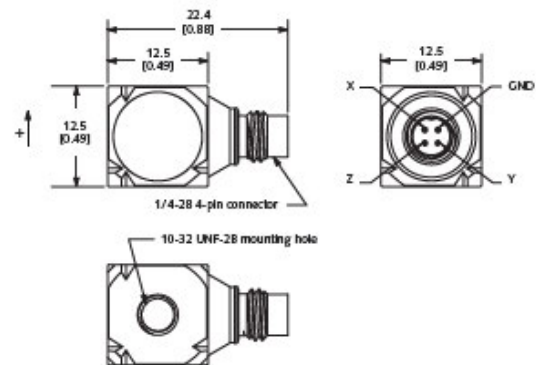
Internal to the PiezoBeam accelerometer is a unique sensing element consisting of a ceramic beam supported by a center post that, when bending occurs as a result of being subjected to vibration, the cantilevered beam element yields an electrical charge. The charge signal is converted by the internal low noise charge amplifier to a proportional high level voltage signal at an output impedance of less than 500 ohms. Patented methods are used to thermally compensate the sensing element.

Type 8688A... is a miniature and lightweight triaxial accelerometer that reduces mass loading on thin-walled structures important to multi-channel modal applications or general vibration measurements.

Type 8688A... triaxial accelerometers, have an integral 4 pin connector and is designed for easy installation in confined areas where sensor may be mounted on any of three faces. Type 8688A... has welded titanium housing and is ground isolated when mounted with the mounting clip or adhesive mounting adapter. The sensing element design provides outstanding amplitude and phase response over a wide frequency range.

The accelerometer operates directly from the internal power source found in most FFT analyzers, from several Kistler Piezotron® power supply couplers or any industry standard IEPE (Integrated Electronic Piezo Electric) compatible power source.

Dimensions



Dimensions are shown in [in], unless otherwise noted.

Application

This miniature and lightweight triaxial accelerometer series is ideally suited for multiple channel modal analysis on small components or subsystems, as well as full vehicle testing for aviation, space, automotive and a wide range of general test structures.

NOTE: Requires a thermally stable environment. Slight temperature fluctuations may cause high thermal transient output or error.

Accessing TEDS Data

Accelerometers with a "T" suffix are variants of the standard version incorporating the "Smart Sensor" design (PiezoSmart®). Viewing an accelerometer's data sheet requires an Interface/Coupler, such as Kistler LabAmp Type 5165A... The interface operates per the Class 1 MMI defined in IEEE 1541.4, altering the operating mode of the PiezoSmart® sensor while allowing the program editor software to read or add information contained in the memory chip.

8688A_000-848e-05.17

Page 1/4

This information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes. Liability for consequential damage resulting from the use of Kistler products is excluded.

©2010 ... 2017, Kistler Group, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Switzerland
Tel. +4152 224 11 11, Fax +4152 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com
Kistler is a registered trademark of Kistler Holding AG.

Technical Data

Type Number	Unit	8688A5 / 8688A5T	8688A10 / 8688A10T	8688A50 / 8688A50T
Acceleration range	g	±5	±10	±50
Acceleration limit	g _{pk}	±8	±16	±80
Threshold (1 ... 10 kHz)	g _{rms}	0.00014	0.00016	0.00036
Sensitivity (±10 %)	mV/g	1,000	500	100
Resonant frequency mounted, nom.	kHz	15	15	25
Frequency response (±5 %)	Hz	0.5 ... 3,000	0.5 ... 3,000	0.5 ... 5,000
Phase shift <5 °	Hz	2 ... 3,000	2 ... 3,000	2 ... 5,000
Amplitude non-linearity	%FSO	±1	±1	±1
Time constant nom.	s	1.1	1.1	1.1
Transverse sensitivity typ. (max. 3)	%	1.5	1.5	1.5

Environmental

Base strain sensitivity @ 250 µe	g/µe	0.004	0.004	0.004
Random vibration max.	g _{rms}	50	50	100
Shock limit (1 ms pulse)	g _{pk}	7,000	7,000	10,000
Temperature coeff. of sensitivity	%/°C [%/°F]	0.17 [0.09]	0.23 [0.13]	0.23 [0.13]
Operating temperature range	°C [°F]	-40 ... 55 [-40 ... 130]	-40 ... 65 [-40 ... 150]	-40 ... 65 [-40 ... 150]

Output

Bias nom.	VDC	13	13	13
Impedance	Ω	<100	<100	<100
Voltage full-scale **	V	±5	±5	±5

Power supply *

Voltage **	VDC	22 ... 30	22 ... 30	22 ... 30
Constant current	mA	2 ... 6	2 ... 6	2 ... 6

Construction

Sensing element	type	PiezoBeam	PiezoBeam	PiezoBeam
Housing/base	material	Titanium	Titanium	Titanium
Sealing-housing/connector (EN 60529)	type	Hermetic	Hermetic	Hermetic
Connector	type	¼-28, 4 pin pos.	¼-28, 4 pin pos.	¼-28, 4 pin pos.
Ground isolated		with accessory	with accessory	with accessory
Mass	grams	6.7	6.7	6.5
Mounting	type	wax, adhesive, clip, magnet, stud (10-32 UNF-28)	wax, adhesive, clip, magnet, stud (10-32 UNF-28)	wax, adhesive, clip, magnet, stud (10-32 UNF-28)
Mounting torque	N·m [in·lbf]	0.7 [6.2]	0.7 [6.2]	0.7 [6.2]

* If a Data Acquisition System (DAQ) is used, it must allow an input voltage greater than or equal to the minimum power supply voltage.

** A power supply voltage of less than the minimum recommended voltage will decrease sensor range (i.e. clipping).

1 g = 9.80665 m/s², 1 in = 25.4 mm, 1 Gram = 0.03527 oz, 1 lbf-in = 0.113 N·m

8688A_000-843e-05.17

Mounting

The cube-shaped configuration of the triaxial accelerometer allows for the sensor to be attached to the test surface using any available side with wax, adhesive and/or tape. The off-ground mounting clip can be used in three sensor orientations for mounting flexibility. The primary mounting surface also has a 10-32 UNF threaded hole which is compatible with ground isolated screw-on mounting accessories. Namely, an adhesive mounting base and a magnetic mounting base. The specified frequency response is unaffected when the adhesive mounting base or magnetic mounting base is used. When the ground isolated mounting clip is used, the upper frequency limits are as follows:

- Without grease: 1 kHz (±5 %) for all ranges
- With grease: 3 kHz (±5 %) for 5 g and 10 g ranges
- With grease: 4 kHz (±5 %) for the 50 g range

Reliable and accurate measurements require that the mounting surface be clean and flat. The instruction manual for the Type 8688A... series provides detailed information regarding mounting surface preparation.



Fig. 1: Mounting accessories

Accessories Included

- Ground isolated mounting clip Type 800M155
- Ground isolated adhesive mounting clip Type 800M157
- Mounting wax Type 8432

Optional Accessories

- Magnetic mounting base Type 800M159

Optional Cables

- Fluoropolymer jacketed breakout cable, 1/4-28 4 pin (neg.) to 3x BNC (pos.) (xx = length: 3, 5, or 10 meters – For other special length requests use 1756CK04sp) Type 1756CxxK04
- Flexible silicone jacketed breakout cable – 1/4-28 4 pin (neg.) to 3x BNC (pos.); (xx = length: 1, 3, 5, or 10 meters) Type 1734Axx/K04

Ordering Key

Measuring range		Type 8688A...
±5 g	5	□
±10 g	10	□
±50 g	50	□

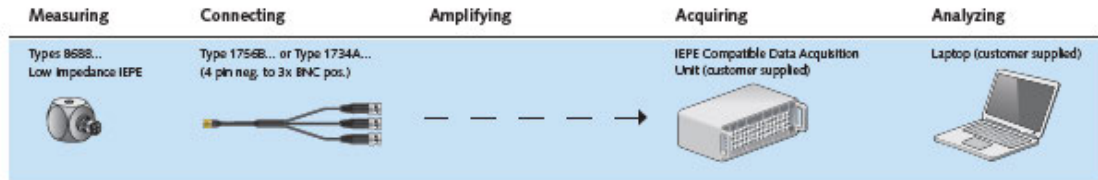
TEDS Templates / Variants

Standard	–
Default IEEE 1451.4 V0.9 Template 0 (UTID 1)	T
IEEE 1451.4 V0.9 Template 24 (UTID 116225)	T01
LMS Template 117, Free format Point ID	T02
LMS Template 118, Automotive Format (Field 14 Geometry = 0)	T03
LMS Template 118, Aerospace Format (Field 14 Geometry = 1)	T04
P1451.4 V1.0 Template 25 – Transfer Function Disabled	T05
P1451.4 V1.0 Template 25 – Transfer Function Enabled	T06

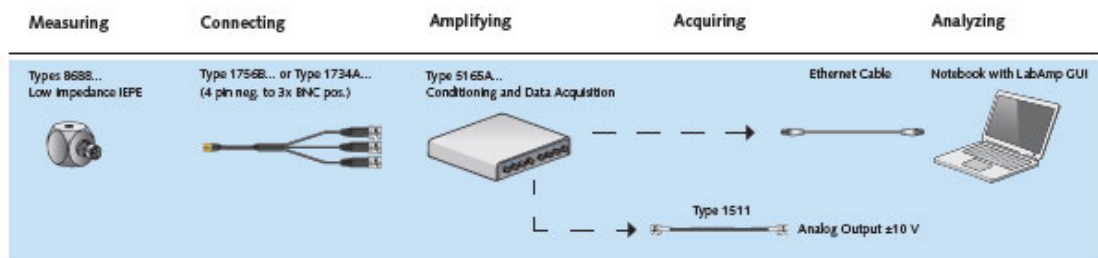
8688A_000-843e-05.17

Measuring Chains

IEPE Sensor and Customer IEPE Compatible DAQ



IEPE Sensor and Kistler LabAmp



8688A_000-843e-05.17

A2: Datenblatt vom Ladungsverstärker Kistler Typ 5165A4

Elektronik & Software

KISTLER
measure. analyze. innovate.

Kistler LabAmp

Typ 5165A...

Ladungsverstärker und Datenerfassungsgerät für dynamische Messungen

Der Kistler LabAmp Typ 5165A... ist der universelle Labor-Messverstärker für dynamische Signale¹⁾. Sowohl piezoelektrische Sensoren, Piezotron Sensoren (IEPE) als auch Spannungssignale werden hochauflösend digitalisiert und verarbeitet. Einfache Datenakquisitions-Funktionen sowie frei konfigurierbare Analogausgänge unterstreichen die umfassenden Einsatzmöglichkeiten des Gerätes.

- 1- oder 4-kanaliger Verstärker für piezoelektrische Sensoren (Ladung), Piezotron (IEPE) und Spannung
- Integrierte 24-Bit-Datenerfassung mit bis zu 200 kSps pro Kanal
- Durchgehend digitale Signalverarbeitung bei geringsten Latenzzeiten
- Flexible Einstellungen für Tiefpass-, Hochpass- und Kerbfiler¹⁾
- Rauscharmes Design
- TEDS (IEEE1541.4) für Piezotron-Sensoren
- 1 oder 4 Analogausgänge mit flexibler 2-Punkt-Skalierung und internem Routing
- Kanal-Statusanzeige mittels LED
- Virtuelle Kanäle für Echtzeitberechnungen mit einem oder mehreren Sensorkanälen²⁾
- Konfiguration und Steuerung mittels Standard-Webbrowser oder über das KiStudio Lab Software-Paket Typ 2910A (einschließlich der Post-Processing Software jBEAM)
- Virtual Instrument-Treiber für LabVIEW
- Zwei Ethernet-Schnittstellen mit integrierter Switch-Funktionalität
- PTP Synchronisations-Option für Datenerfassung mit mehreren Geräten²⁾

Beschreibung

Der Kistler LabAmp Typ 5165A... ist nicht nur ein hervorragender, rauscharmer Messverstärker für dynamische Signale, sondern auch ein leistungsfähiges Datenerfassungsgerät, das die digitalisierten Messwerte via Ethernet zur weiteren Analyse an einen übergeordneten Rechner überträgt. Konfiguriert und bedient wird er über ein Web-Interface, das bequem via Standard-Webbrowser zugänglich ist oder über das KiStudio Lab Software-Paket Typ 2910A (einschließlich der Post-Processing Software jBEAM). Aufgrund modernster Signalverarbeitungstechnologie bietet der Kistler LabAmp Typ 5165A... eine beeindruckende Flexibilität. Die Frequenzen des Hochpass-, Tiefpass- und Kerbfilters können direkt als numerische Werte in Hertz eingegeben werden. Die Eingangssignale können flexibel auf die Ausgangskanäle geschaltet werden.



Die grafische Bedienoberfläche bietet nicht nur eine einfache und intuitive Art und Weise zur Konfiguration des Geräts, sondern dient auch zur Anzeige von Messgrößen (z.B. Momentanwert, Spitzenwert, Mittelwerte). Die virtuellen Kanäle²⁾ ermöglichen Echtzeitberechnungen mit verschiedenen Eingangssignalen.

Der Webbrowser-basierte Daten-Download ermöglicht die einfache Weiterverarbeitung der erfassten Signale in einer Analyse-Software. Für spezifischere Aufgaben oder direkte Analysen kann der Messverstärker mit dem mitgelieferten Virtual Instrument-Treiber direkt in LabVIEW integriert werden.

Für höhere Kanalzahlen ermöglicht die Synchronisierungsfunktion (PTP) das Erfassen von Daten mehrerer 5165A-Geräte. Kistler LabAmp-Geräte Typ 5167A... können ebenso mit Typ 5165A... synchronisiert werden. Das ermöglicht z.B. die kombinierte Erfassung von dynamischen IEPE-Signalen mit quasi-statischen Signalen piezoelektrischer Sensoren. Keine weiteren Kabel sind dazu nötig.

¹⁾ dynamische PE/IEPE Signale ab 0,1 Hz (Zeitkonstante $\approx 1,6$ s) / Spannungssignale ab 0 Hz; nicht geeignet für quasi-statische Ladungsmessungen

²⁾ Diese Funktionalität benötigt eine zusätzliche Lizenz, siehe Bestellschlüssel auf der letzten Seite.

Seite 1/5

Die Informationen entsprechen dem aktuellen Wissensstand. Kistler behält sich technische Änderungen vor. Die Haftung für Folgeschäden aus der Anwendung von Kistler-Produkten ist ausgeschlossen.

© 2014 ... 2020 Kistler Gruppe, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Schweiz
Tel. +4152224 1111, info@kistler.com, www.kistler.com. Die Produkte der Kistler Gruppe sind durch verschiedene gewerbliche Schutzrechte geschützt. Mehr dazu unter www.kistler.com

Kistler LabAmp – Ladungsverstärker und Datenerfassungsgerät für dynamische Messungen, Typ 5165A...

KISTLER
measure. analyze. innovate.

Technische Daten

Anschlüsse

Anzahl Kanäle		
Typ 5165A1		1
Typ 5165A4		4
Steckertyp Eingang		BNC neg.
Steckertyp Analogausgang		BNC neg.
Ethernet-Schnittstelle		2xRJ45

Ladungseingang

Messbereiche	pC	±100 ... 1.000.000
Frequenzbereich (-3dB)	Hz	0,1 ... 100.000

Eingangsbezogenes Rauschen (typ.)

1 Hz ... 100 kHz

100 pC	pC _{rms}	0,006
1.000 pC	pC _{rms}	0,008
10.000 pC	pC _{rms}	0,048
100.000 pC	pC _{rms}	0,67
1.000.000 pC	pC _{rms}	4,6

1 Hz ... 10 kHz

100 pC	pC _{rms}	0,006
1.000 pC	pC _{rms}	0,007
10.000 pC	pC _{rms}	0,03
100.000 pC	pC _{rms}	0,35
1.000.000 pC	pC _{rms}	2,8

Max. Eingangsspannung	V	±30
Messunsicherheit		
Messbereich <100 pC	%	<1
Messbereich ≥100 pC	%	<0,5
Übersprechen zwischen Kanälen	dB	≤-80
Sensorwiderstand	MΩ	>10

Piezotron-Eingang

Verstärkung		1/10
Sensor-Versorgungsspannung	V	22
Stromversorgung	mA	4/10
Frequenzbereich (-3dB)	Hz	0,1 ... 100.000

Eingangsbezogenes Rauschen (typ., 0 Ω Shunt am Eingang)

1 Hz ... 100 kHz

Verstärkung 10	μV _{rms}	6
Verstärkung 1	μV _{rms}	45

1 Hz ... 10 kHz

Verstärkung 10	μV _{rms}	3,5
Verstärkung 1	μV _{rms}	28

Max. Eingangsspannung	V	±30
Messunsicherheit		
Verstärkung 10	%	<1
Verstärkung 1	%	<0,5
Übersprechen zwischen Kanälen	dB	≤-80

Spannungseingang

Eingangstyp		asymmetrisch
Messbereich	V	±1 ... 10
Eingangswiderstand	MΩ	10
Frequenzbereich (-3dB)	Hz	0 ... 100.000

Eingangsbezogenes Rauschen (typ.)

1 Hz ... 100 kHz

Messbereich 1 V	μV _{rms}	6
Messbereich 10 V	μV _{rms}	45

1 Hz ... 10 kHz

Messbereich 1 V	μV _{rms}	3,5
Messbereich 10 V	μV _{rms}	28

Max. Eingangsspannung	V	±30
Messunsicherheit		
Messbereich <1 V	%	<1
Messbereich ≥1 V	%	<0,5
Übersprechen zwischen Kanälen	dB	≤-80

Analogausgang (Spannung)

Nennausgangsbereich	V	±10
Ausgangswiderstand	Ω	10
Max. Ausgangsstrom	mA	±2
Max. Gleichtaktspannung zwischen Ein- und Ausgangsmasse	V	±14
Ausgangsrauschen (alle Bereiche)		
1 Hz ... 100 kHz, typ.	mV _{rms}	0,046
1 Hz ... 10 kHz, typ.	mV _{rms}	0,041
Frequenzbereich (-3dB)	Hz	0 ... 100.000
Gruppenlaufzeit (Eingang zu Ausgang, Filter aus)	μs	≤12
Nullpunktfehler	mV	<±2
DAC-Auflösung	Bit	16

Seite 2/5

Die Informationen entsprechen dem aktuellen Wissensstand. Kistler behält sich technische Änderungen vor. Die Haftung für Folgeschäden aus der Anwendung von Kistler-Produkten ist ausgeschlossen.

© 2014 ... 2020 Kistler Gruppe, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Schweiz
Tel. +4152224 11 11, info@kistler.com, www.kistler.com. Die Produkte der Kistler Gruppe sind durch verschiedene gewerbliche Schutzrechte geschützt. Mehr dazu unter www.kistler.com

Kistler LabAmp – Ladungsverstärker und Datenerfassungsgerät für dynamische Messungen, Typ 5165A...

KISTLER
measure. analyze. innovate.

Technische Daten (Fortsetzung)

Datenerfassung

ADC-Auflösung	Bit	24
Interne ADC-Abtastrate	kSps	625
Datenerfassungsrate pro Kanal (einstellbar)	kSps	≤200

Zu beachten: Für die Datenerfassung ab ≥ 25 kSps wird automatisch ein Anti-Aliasing-Filter mit Grenzfrequenz $0,3 \dots 0,45 \times$ eingestellte Datenerfassungsrate gesetzt.

Digitaler Hochpassfilter

Ordnung		1.
Grenzfrequenz (-3dB) wählbar in Schritten von 0,1 Hz	Hz	$\geq 0,1 \dots 10.000$
Toleranz (typ.)	%	<1

Digitaler Tiefpassfilter

Filtertypen		Bessel oder Butterworth
Ordnung		2./4.
Grenzfrequenz (-3dB) wählbar in Schritten von 1 Hz	Hz	≥ 10
Toleranz (typ.)	%	<1

Digitaler Kerbfilter

Sperrfrequenz wählbar in Schritten von 1 Hz	Hz	≥ 10
Toleranz (typ.)	%	<1
Q-Faktor		0,9 ... 1.000

Anwendung

Der Kistler LabAmp Typ 5165A... wurde für den Einsatz in Forschung, Entwicklung und Labor entwickelt. Er ist überall dort die ausgezeichnete Wahl, wo dynamische Signale präzise und mit hoher Signalqualität gemessen werden müssen. Beschleunigungs- und Schwingungsanalysen, pulsierende Druckanwendungen oder Kraftmessungen bei schnellen Bearbeitungsvorgängen sind nur wenige Beispiele, bei denen der Kistler LabAmp Typ 5165A... seine Stärken ausspielt.

Betrieb via Standard-Webbrowser

Sämtliche Einstellungen werden in einem Standard-Webbrowser über die grafische Bedienoberfläche vorgenommen. Durch die Eingabe seines Namens im Netzwerk wird die Verbindung mit dem Kistler LabAmp Typ 5165A... hergestellt und es kann umgehend mit der Arbeit begonnen werden. Eine einfache Datenerfassung steht ebenfalls direkt im Browser zur Verfügung. Mit einem manuellen Start-/Stopp-Button wird die Messwertfassung gesteuert. Selbstverständlich ist darüber

Virtuelle Kanäle ¹⁾

Anzahl Kanäle		
Typ 5165A1		1
Typ 5165A4		2

Ethernet-Schnittstelle

Datenrate	MBit	100
-----------	------	-----

Spannungsversorgung

Versorgungsspannungsbereich	VDC	18 ... 30
Leistungsaufnahme	W	<15
Anschlussbuchse für Hohlstecker (IEC 60130-10 Typ A)	mm	5,5x2,5x9,5
Anforderungen an Netzteil		- galvanische Trennung - PE und GND nicht verbunden

Allgemeine Daten

Betriebstemperaturbereich	°C	0 ... 60
Lagerungstemperaturbereich	°C	-10 ... 70
Rel. Feuchtigkeit, nicht kondens.	%	≤90
Schutzart (EN 60529)		IP20
Außenabmessungen mit Fuss und Anschlüssen (BxHxT)	mm	~218x50x223
Gewicht	kg	1,2

¹⁾ Diese Funktionalität benötigt eine zusätzliche Lizenz, siehe Bestellschlüssel auf der letzten Seite.

hinaus auch eine API verfügbar, um automatisierte Messaufgaben rechnergestützt durchzuführen.



Seite 3/5

5165A_003-146d-10.20

Die Informationen entsprechen dem aktuellen Wissensstand. Kistler behält sich technische Änderungen vor. Die Haftung für Folgeschäden aus der Anwendung von Kistler-Produkten ist ausgeschlossen.

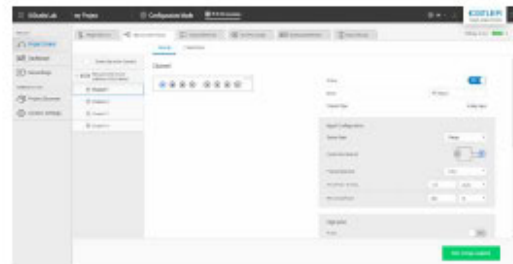
© 2014 ... 2020 Kistler Gruppe, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Schweiz
Tel. +4152224 1111, info@kistler.com, www.kistler.com. Die Produkte der Kistler Gruppe sind durch verschiedene gewerbliche Schutzrechte geschützt. Mehr dazu unter www.kistler.com

Kistler LabAmp – Ladungsverstärker und Datenerfassungsgerät für dynamische Messungen, Typ 5165A...



Betrieb via KiStudio Lab Software-Paket Typ 2910A

Die intuitive Software KiStudio Lab ermöglicht es dem Anwender, den LabAmp Typ 5165A im Handumdrehen einzurichten und Daten zu erfassen. Wenn mehrere LabAmp Geräte (Typ 5165A und Typ 5167A, auch in Kombination mit KiDAQ Systemen) synchronisiert werden müssen, ermöglicht KiStudio Lab die Konfiguration der Geräte und die Erfassung der synchronisierten Daten auf bequeme und zentralisierte Weise.



Mit der leistungsstarken Analysesoftware jBEAM, die Teil des KiStudio Lab Software-Pakets ist, erhält der Anwender ein umfassendes Post-Processing Tool zur Datenanalyse, Visualisierung und Berichterstellung.

Blockschaltbild

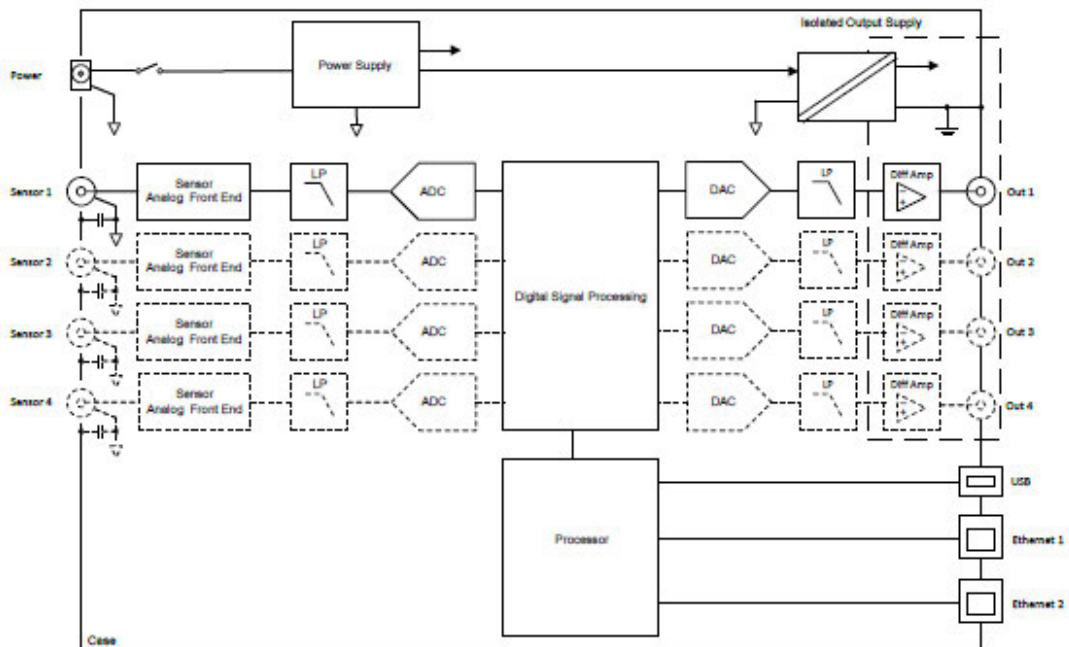


Bild 1: Blockschaltbild des Kistler LabAmp Typ 5165A...

5165A_003-146d-10.20

Kistler LabAmp – Ladungsverstärker und Datenerfassungsgerät für dynamische Messungen,
Typ 5165A...

KISTLER
measure. analyze. innovate.

Abmessungen

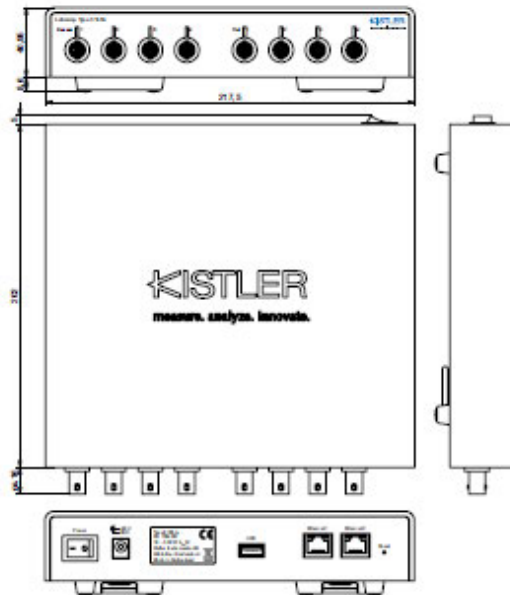
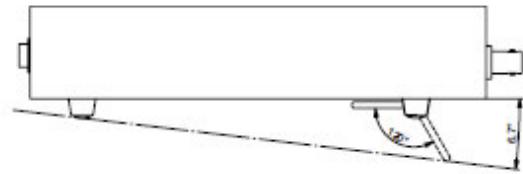


Bild 2: Abmessungen Kistler LabAmp Typ 5165A4



Bestellschlüssel

LabAmp		Typ 5165A
1-Kanal	1	
4-Kanal	4	
SW-Bestellung für existierendes Gerät	-	
Set mit Verstärker, 24 V Spannungsversorgung, 2 m Ethernet-Kabel	K	
Nur Verstärker oder SW-Bestellung für existierendes Gerät	-	
Hardware & Software (Neugerät mit potentiellen SW-Funktionen)	H	
SW-Bestellung für existierendes Gerät	S	
Keine Synchronisation der Datenerfassung	0	
PTP Gerätesynchronisation	1	
SW-Bestellung für existierendes Gerät: keine Änderung an bestehender Konfiguration	-	
Keine virtuellen Kanäle	0	
Virtuelle Kanäle	1	
SW-Bestellung für existierendes Gerät: keine Änderung an bestehender Konfiguration	-	

Enthaltenes Zubehör

- Kalibrierblatt
- Schnellstartanleitung

Typ/Mat. Nr.

-
-

Optionales Zubehör

- Steckernetzteil* 24 V
einschl. länderspezifischem Netzstecker
- Trägerplatte für Montage in 19"-Rack
- Blindplatte für leeren 19"-Platz
- PTP Synchronisation pro Gerät
- Virtuelle Kanäle pro Gerät
- KiStudio Lab Software-Paket (einschließlich der Post-Processing Software jBEAM)
- DynoWare Software
Vollversion mit HASP Lizenzschlüssel
- jBEAM Professional T&M
Software für Messdatenanalyse

Typ/Mat. Nr.

5779A2
5748A1
5748A2
5165A--S1-
5165A--S-1
2910A
2825A-03-2
2897A2

- * Lieferbar als Kombi-Set zusammen mit dem Verstärker

Konfigurationsbeispiele:

- 5165A4KH10: 4-Kanal Gerät, inkl. Netzteil & Ethernet Kabel, inkl. PTP Gerätesynchronisation
- 5165A--S-1: Virtuelle Kanäle für existierendes 5165A Gerät

LabVIEW ist ein eingetragenes Warenzeichen von National Instruments Corporation.

Seite 5/5

Die Informationen entsprechen dem aktuellen Wissensstand. Kistler behält sich technische Änderungen vor. Die Haftung für Folgeschäden aus der Anwendung von Kistler-Produkten ist ausgeschlossen.

© 2014 ... 2020 Kistler Gruppe, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Schweiz
Tel. +4152224 11 11, info@kistler.com, www.kistler.com. Die Produkte der Kistler Gruppe sind durch verschiedene gewerbliche Schutzrechte geschützt. Mehr dazu unter www.kistler.com

A3: Datenblatt vom Impulshammer Kistler Typ 9722a

Beschleunigung - AIF

KISTLER
measure. analyze. innovate.

Kraftsensor mit Spannungsausgang

Typ 9722A...

Impulshammer; niedriger Kraftbereich

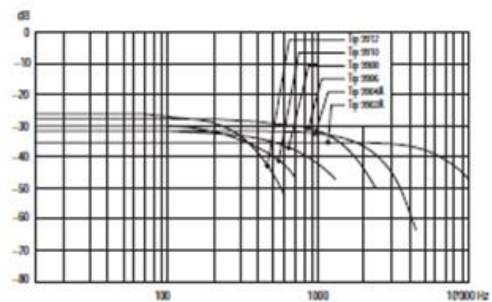
Impulshämmer enthalten ein Quarz-Messelement zum dynamischen Messen von Kraftimpulsen. Sie dienen dem Anregen einer zu untersuchenden Struktur mit einer bestimmten Kraftamplitude innerhalb eines bestimmten Frequenzbereichs. Die Strukturantwort wird mit einem Beschleunigungssensor gemessen. In Verbindung mit einem FFT-Analysator wird aus dem Beschleunigungs- und Kraftsignal die Übertragungsfunktion der Struktur bestimmt.

- Spannungsausgang
- Langzeitstabiles Quarz-Messelement
- Zubehör für zahlreiche Anwendungen
- Sensorkabel im Hammerstiel integriert
- CE-konform

Beschreibung

Das dynamische Verhalten einer Struktur kann während ihrer Entwicklungsphase oder im aktuellen Einsatz mit der Impulshammerprüfung leicht bestimmt werden. Unter Verwendung eines FFT-Analysators kann die Übertragungsfunktion der Struktur aus dem mit einem Beschleunigungssensor gemessenen Antwortsignal und dem mit einem Impulshammer erzeugten und gemessenen Kraftimpuls bestimmt werden. Die Impulshammermethode liefert umfangreiche Informationen über das Frequenz- und Dämpfungsverhalten der untersuchten Struktur.

Der Hammerkopf aus rostfreiem Stahl ist mit einem Kraftsensor versehen, der ein Quarz-Messelement mit Spannungsausgang hat. Am Kraftsensor können verschieden harte Schlagspitzen aus Stahl, diversen Kunststoffen und unterschiedlich hartem Gummi montiert werden. Zusammen mit einer Zusatzmasse kann damit das Frequenzspektrum der Anregung an die zu untersuchende Struktur angepasst werden. Die Strukturantwort wird mit Beschleunigungssensoren erfasst, die ein Schubquarz-Messelement mit Spannungsausgang haben. Sie sind unempfindlich auf Basisdehnung, thermische Transienten und Seitenbeschleunigung. Sie sind in grosser Vielfalt erhältlich und erlauben daher das Messen der Strukturantwort kleiner, leichter und dünnwandiger Strukturen ebenso wie die einer Stahlbrücke.



Der Quarz-Kraftsensor des Hammers enthält einen eingebauten Piezotron-Impedanzwandler. Dadurch steht ein stabiles, auf Umgebungseinflüsse unempfindliches Spannungssignal zur Verfügung. Hammer und Beschleunigungssensor können mit ein- oder mehrkanaligen Kupplern gespeist werden, die in grosser Modellvielfalt erhältlich sind.

Anwendung

Der Hammer eignet sich zum Anregen leichter bis mittelschwerer Strukturen mit mittleren bis hohen Frequenzen, z.B. Bremscheiben, Fahrzeugverkleidungen, Strukturmechanik von Luftfahrzeugen, allgemeine Strukturprüfungen, etc. Mit dem Impulshammer wird das dynamische Verhalten mechanischer Strukturen untersucht. Die durch den Hammerschlag hervorgerufenen Schwingungen der zu untersuchenden Struktur werden mit einem Beschleunigungssensor gemessen.

Seite 1/2

Die Informationen entsprechen dem aktuellen Wissensstand. Kistler behält sich technische Änderungen vor. Die Haftung für Folgeschäden aus der Anwendung von Kistler-Produkten ist ausgeschlossen.

© 2005, Kistler Instrumente GmbH, Postfach 12 62, D-73748 Ostfildern
Tel. +49 711-34 07-0, Fax +49 711-34-07-159, info.de@kistler.com,
www.kistler.com

Impulshammer; niedriger Kraftbereich, Typ 9722A...

KISTLER
measure. analyze. innovate.

Technische Daten

Messgröße	Einheit	9722A500	9722A2000
Bereich	N	0 ... 500	0 ... 2000
Überlast	N	2500	10000
Empfindlichkeit, nom.	mV/N	10	2
Resonanzfrequenz	kHz	27	27
Frequenzbereich (-10 dB), mit Schlagspitze aus Stahl	Hz	8200	9300
Zeitkonstante, nom.	s	500	500
Steiifheit	kN/ μ m	0,8	0,8
Betriebstemperaturbereich	$^{\circ}$ C	-20 ... 70	-20 ... 70
Ausgang:			
Spannung, FSO	V	\pm 5	\pm 5
Ruhe spannung , nom.	VDC	11	11
Widerstand	Ω	<100	<100
Speisung:			
Spannung	V	20 ... 30	20 ... 30
Konstantstrom	mA	2 ... 20	2 ... 20
Abmessungen des Hammerkopfs:			
Durchmesser	mm	17,5	17,5
Länge	mm	61	61
Gewicht	Gramm	100	100
Stiellänge	mm	188	188
Stecker	Typ	BNC neg.	BNC neg.

1 N = 0,2248 lb, 1 g = 9,80665 m/s², 1 Inch = 25,4 mm, 1 Gramm = 0,03527 oz**Lieferumfang**

	Typ
• Schlagspitze aus Stahl	9902A
• Schlagspitze aus Stahl, mit Delrinaufsatz	9904A
• Schlagspitze aus Weich-PVC	9906
• Schlagspitze aus Hartgummi (grün)	9908
• Schlagspitze aus mittelhartem Gummi (rot)	9910
• Schlagspitze aus Weichgummi (grau)	9912
• Adapter für Schlagspitzen aus Gummi	9928
• Zusatzmasse (50 Gramm)	9922
• Ringgabelschlüssel für Schlagspitzen	1370
• Kunststoffkoffer	

Bestellschlüssel

Bereich	9722A	
500 N	500	
2000 N	2000	

9722A_000-272-d-05 05

Seite 2/2

Die Informationen entsprechen dem aktuellen Wissensstand. Kistler behält sich technische Änderungen vor. Die Haftung für Folgeschäden aus der Anwendung von Kistler-Produkten ist ausgeschlossen.

© 2005, Kistler Instrumente GmbH, Postfach 12 62, D-73748 Ostfildern
Tel. +49 711-34 07-0, Fax +49 711-34-07-159, info.de@kistler.com,
www.kistler.com



Antriebs Eigenschaften	Einheit	Toleranz	N-472.110	N-472.110Y	N-472.11V	N-472.11VY	N-472.120	N-472.120Y	N-472.12V	N-472.12VY
Antriebstyp			Piezo-elektrischer Trägheitsantrieb	Piezo-elektrischer Trägheitsantrieb	Piezo-elektrischer Trägheitsantrieb	Piezo-elektrischer Trägheitsantrieb	Piezo-elektrischer Trägheitsantrieb	Piezo-elektrischer Trägheitsantrieb	Piezo-elektrischer Trägheitsantrieb	Piezo-elektrischer Trägheitsantrieb
Betriebsspannung	V		80	80	80	80	80	80	80	80
Nennspannung	V		80	80	80	80	80	80	80	80
Antriebskraft in positiver Bewegungsrichtung in X	N	max.	22	22	22	22	22	22	22	22
Maximale Betriebsfrequenz im Dauerbetrieb	Hz		400	400	200	200	400	400	200	200
Maximale Betriebsfrequenz kurzzeitig	Hz		2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000

Mechanische Eigenschaften	Einheit	Toleranz	N-472.110	N-472.110Y	N-472.11V	N-472.11VY	N-472.120	N-472.120Y	N-472.12V	N-472.12VY
Haltekraft in X, passiv	N	min.	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100
Mechanisches Interface			M10x1 Befestigungsgewinde	M10x1 Befestigungsgewinde	M10x1 Befestigungsgewinde	M10x1 Befestigungsgewinde	9,5 mm Klemmschaft	9,5 mm Klemmschaft	9,5 mm Klemmschaft	9,5 mm Klemmschaft
Gesamtmasse	g		200	200	250	250	200	200	250	250
Material			Schraube: Edelstahl. Gehäuse: Aluminium, Bronze.	Schraube: Edelstahl. Gehäuse: Aluminium, Bronze.	Schraube: Edelstahl. Gehäuse: Edelstahl, Bronze.	Schraube: Edelstahl. Gehäuse: Edelstahl, Bronze.	Schraube: Edelstahl. Gehäuse: Aluminium, Bronze.	Schraube: Edelstahl. Gehäuse: Aluminium, Bronze.	Schraube: Edelstahl. Gehäuse: Edelstahl, Bronze.	Schraube: Edelstahl. Gehäuse: Edelstahl, Bronze.

Anschlüsse und Umgebung	Einheit		N-472.110	N-472.110Y	N-472.11V	N-472.11VY	N-472.120	N-472.120Y	N-472.12V	N-472.12VY
Anschluss			D-Sub 15-polig (m)	D-Sub 15-polig (m)	D-Sub 15-polig (m)	D-Sub 15-polig (m)	D-Sub 15-polig (m)	D-Sub 15-polig (m)	D-Sub 15-polig (m)	D-Sub 15-polig (m)
Vakuumklasse	hPa				10E-6	10E-6			10E-6	10E-6
Empfohlene Controller / Treiber			E-873.1AT	E-873.1AT	E-873.1AT	E-873.1AT	E-873.1AT	E-873.1AT	E-873.1AT	E-873.1AT
Kabellänge	m		2	2	1	1	2	2	1	1
Betriebstemperaturbereich	°C		10 bis 40	10 bis 40	10 bis 40	10 bis 40	10 bis 40	10 bis 40	10 bis 40	10 bis 40

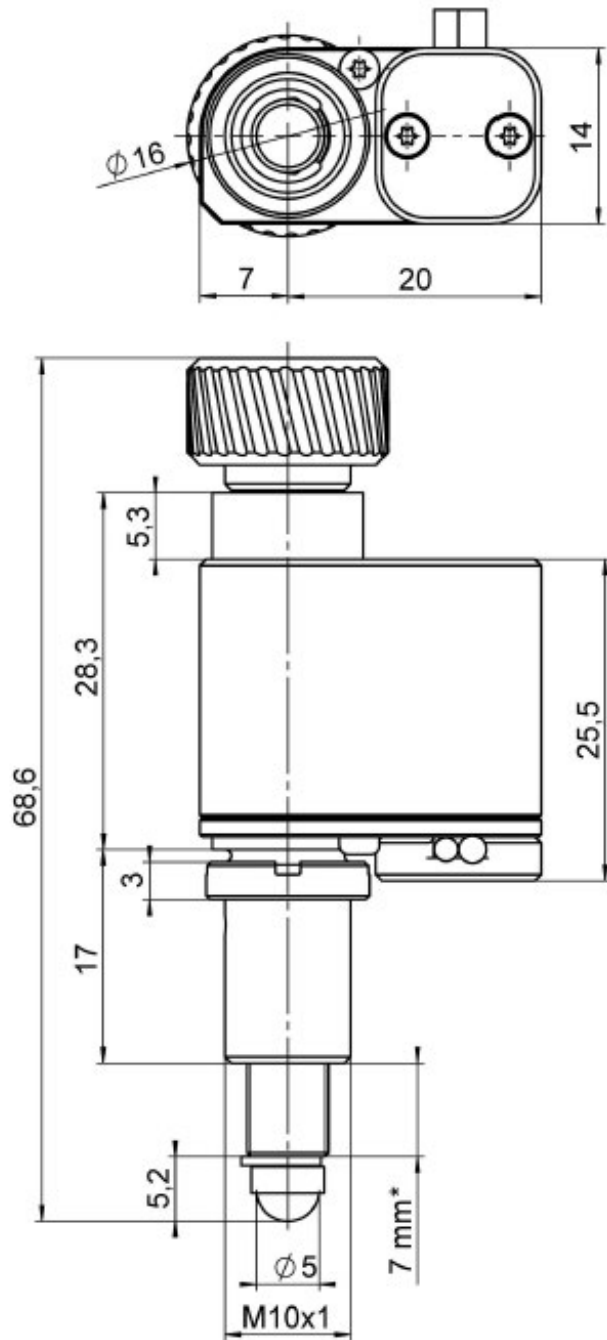
Maximale Geschwindigkeit für den Dauerbetrieb nicht geeignet (siehe Benutzerhandbuch).

Linearitätsabweichung: 20 N Vorlast, gemessen über gesamten Hub, temperaturdriftkompensiert.

Unidirektionale Wiederholgenauigkeit / kleinste Schrittweite: 20 N Vorlast, gemessen bei 100 µm Hub, temperaturdriftkompensiert.

Kabellänge vakuumkompatibler Modelle: 1 m Anschlusskabel am Aktor, Kabelende mit offenen Litzen; 2 m separates Anschlusskabel, D-Sub 15 (m) auf offene Litzen. Sonderausführungen auf Anfrage.

Zeichnungen / Bilder



Modelle N-472.11x(x) mit Gewinde M10x1, Abmessungen in mm. (* Stellweg)

A5: Datenblatt vom Mikroskop QM-1



QM 1 - Long Mount

The QM 1, for which Questar Corporation received an IR-100 award in 1983, was the first of a new series of long-distance microscopes.

It has a working range of 560 mm to 1520mm inches, a 30 to 1 variability in field of view, and remarkable depth of field, linearity and chromatic correction which make it an indispensable tool for a wide variety of laboratory and industrial applications.

The QM 1 Long Mount includes two selectable ports, a semi-rugged tube design with integrated full length mount for system stability and is compatible with standard eyepieces, 35 mm, and video formats.



QM 1 - Long Mount Questar Long-Distance Microscope Datasheet



Technical data

Type	Maksutov Cassegrain Catadioptric		
Working range	560 mm to 1 520 mm, subject plane to front element		
Clear aperture	89 mm		
Entrance Pupil	Primary Mirror 96 mm		
Relative Aperture/ Numerical Aperture	Working Distance	N.A.	f/no
	1400 mm	.0288	16.8
	1020 mm	.0385	12.9
	700 mm	.0511	10
560 mm	.0580	8.7	
Resolution	Better than 3 microns at 560 mm		
Magnification	To 125 times visual, to 12 times at image plane		
Format	Diffraction limited field 12 mm, 18 mm nearly diffraction limited		
Back Focal Distance	70 mm minimum measured from back plate		

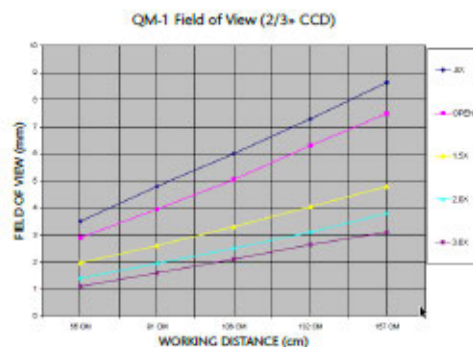
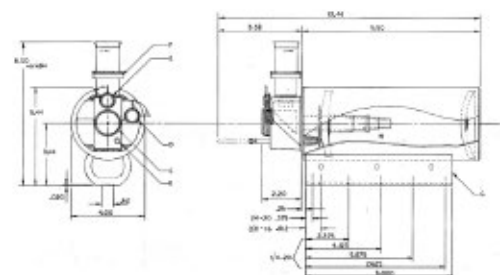
Optics

Corrector	BK7, Magnesium Fluoride Coated, 89 mm diameter
Primary Mirror	Pyrex, Aluminum Coated, SiO overcoated, 96 mm diameter
Secondary Mirror	Aluminum Coated, R1 surface of corrector, 22 mm diameter
Baffling	Helix in central tube, all interior surfaces black anti-reflection coated

Mechanical

Barrel	Aluminum Hollow Bar, machined full length, with integrated lens cell and out, black anodized exterior finish Length (with control box) 30.5 cm; Outside diameter 10.8 cm; Weight 3.7 pounds
Rear Closure Plate	With stainless steel central tube - precision machining and alignment after assembly
Focusing Mechanism	Mirror thimble integral with stainless steel sliding tube. Slides on fixed, stainless steel light baffle tube (centerless ground)
Control Box	Cast Aluminum, selectable axial or 90o port. Internally mounted 1.5X Barlow selectable for 90° port, flick knob controlled.
Knobs	Aluminum 245-T4, corrosion-resistant, hand-turned on turret lathe, stainless steel shafts and levers

*Specifications subject to change without notice

**QM-1 Long Mount**

- B - Main System Focus Rod
- C - Axial Photographic Port
- D - Main System Filter Actuation Knob
- E - Internal Barlow Actuation Knob
- F - Diapler Adapter Ring Focus, Top Port
- G - Mount Bracket - Standard Rotating Mount
- H - Internal Main System Optics and Baffle System

A6: Datenblatt von der Kamera Basler avA2300-25gm/gc

Fast Readout and Sensitivity

The Basler aviator family is a series of high speed mainstream CCD cameras with Gigabit Ethernet and Camera Link interface and a very attractive price/performance ratio. It features mono and color camera models with resolutions of 1, 2 (4:3 and HDTV), and 4 megapixels with progressive scan readout and global shutter technology.

Superior image quality, even at high image capture rates, makes a convincing argument for this advanced camera family. Basler aviator cameras are equipped with Kodak's latest CCD sensor generation with four tap readout technology. These sensors are up to four times faster than standard CCD sensors of the same resolution. With the aviator, Basler has applied the unique tap balancing competence we gained during the development of our earlier camera families such as the Basler pilot series, which also employs Kodak multi-tap sensors.



The Camera Link interface is the best way to integrate the full performance of the aviator's four tap Kodak sensors into your application with no bandwidth related delays. The Basler aviator GigE models benefit from our extensive experience designing and building GigE cameras and feature 100 meter cable length, easy integration and a cost-saving system layout.

Basler aviator cameras are an ideal fit for a variety of applications including semiconductor and electronics manufacturing, traffic applications (ITS), metrology, or medical imaging.

Your benefits include:

- Excellent linearity, dynamic range, and noise level
- The best tap balance by performing individual tap calibration during production
- More than 25 camera features such as auto-gain, auto-exposure or the signal input debouncer support easy system integration
- More than 100 megabytes of data per second and up to 100 meter cable length with GigE
- The widest bandwidth connection for maximum grabbing speed with Camera Link and compatibility with all common frame grabbers
- Additional opto-isolated I/Os for external devices (e.g., strobe) in the Camera Link models
- Rugged housing featuring safe locking connections and an easy integration due to different mounting positions
- Field-proven Basler pylon driver package with both filter and performance drivers
- "GenICam over Camera Link" or direct register access support
- Very attractive price/performance ratio

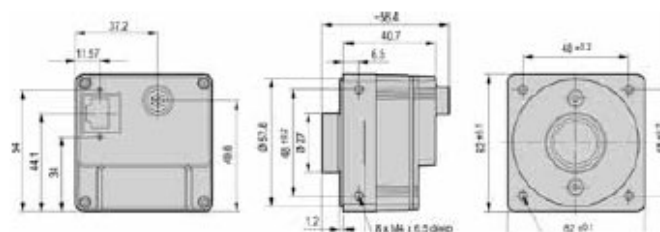
Specifications **GigE** VISION

Basler pylonator	avA1000-100gm/gc	avA1600-50gm/gc	avA1900-50gm/gc	avA2300-25gm/gc
Camera				
Resolution Size (H x V pixels)	1024 x 1024	1600 x 1200	1920 x 1080	2330 x 1750
Sensor	Kodak KAI-01050	Kodak KAI-02050	Kodak KAI-02150	Kodak KAI-04050
Sensor Size (optical)	1/2"	2/3"	2/3"	1"
Sensor Technology	Progressive Scan CCD, global shutter			
Pixel Size	5.5 x 5.5 μ m			
Frame Rate	101 fps	55 fps	51 fps	26 fps
Mono/Color	Mono/Color			
Video Output Format	Mono 8, Mono 12, Mono 12 Packed, YUV 4:2:2 Packed, YUV (4:2:2) (YUYV) Packed, Bayer GB 8, Bayer GB 12, Bayer GB 12 Packed			
Interface	Gigabit Ethernet (1000 Mbit/s)			
Synchronization	Via external trigger, via the Ethernet connection, or free-run			
Exposure Control	Via external trigger signal or programmable via the camera API			
Mechanical / Electrical				
Housing Size (L x W x H)	40.7 mm x 62 mm x 62 mm			
Housing Temperature	Up to 50°C			
Lens Mount	C-mount			
Digital I/O	2 opto-isolated input / 4 opto-isolated output			
Power Requirements	12 VDC (\pm 10%) via 12-pin Hirose connector			
Power Consumption (typical)	5.6 W	5.8 W	5.8 W	6.3 W
Weight (typical)	<300 g			
Conformity	CE, FCC, IP30, RoHS			
Software / Driver				
Driver	Basler pylon SDK including filter and performance driver			
Operating System	Windows, Linux - 32 bit and 64 bit			
Conformity	GigE Vision, GenICam			

Specifications are subject to change without prior notice.

For detailed technical information, please see the camera manual that can be found on our website: www.baslerweb.com/manuals

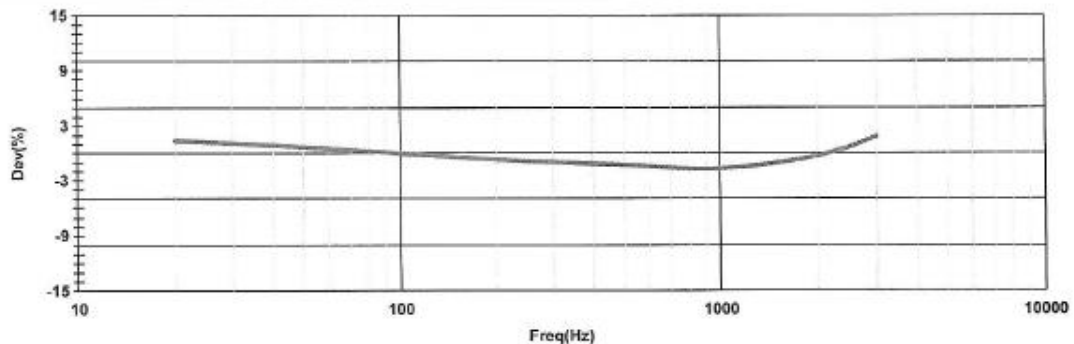
Dimensions (in mm)



A7: Kalibrierschein vom Beschleunigungssensor Kistler Typ 8688a5


**KALIBRIERSCHEIN
BESCHLEUNIGUNGSSENSOR**
**CALIBRATION CERTIFICATE
ACCELEROMETER**

Typ / Type	8688A5	Hersteller / Manufacturer	Kistler		
Serien-Nr / Serial Number	5856095	Cert ID # / Cert ID #	41-5856095-210420T1212		
Bereich	Range	g	± 5		
Max. Bereich	Max. Range	g	± 8		
Betriebstemperaturbereich	Temp. Range, operating	°C	-40 bis 55		
Ausgangsimpedanz	Output Impedance	Ω	≤100		
		X Achse	Y Achse	Z Achse	
Zeitkonstante	Time Constant	s	1,2	1,2	1,2
Ruhespannung	Bias Voltage	V _{cc}	14,1	13,0	12,4
Resonanzfrequenz montiert (fn)	Mounted Resonant Frequency (fn)	kHz	15,0	15,0	15,0
Seitenempfindlichkeit	Transverse Sensitivity	%	3,0	3,0	3,0
Typischer Frequenzgang	Typical Frequency Response				



Empfindlichkeit bei 159 Hz, 3,0g rms	Sensitivity at 159 Hz, 3,0 g rms	mV/g	X Achse 1064	Y Achse 1082	Z Achse 1039	$g = gn = 9,80665 \text{ m/s}^2$
Umgebungstemperatur	Environmental Temperature	°C	22 ± 4			
Relative Feuchte	Relative Humidity	%	30 ± 30			
Kalibriert von	Calibration Technician	Mark Thomas				
Datum	Calibration Date	20.04.2021				

Dieser Sensor ist gemäss Kistler Testprozedur 978-5473-701 kalibriert worden, unter Verwendung einer Vergleichstechnik nach Kistler Arbeitsnormen. Kistler Arbeitsnormen werden periodisch mit einem primären Standardsystem abgeglichen, welches seinerseits periodisch mit dem National Institute of Standards and Technology (NIST) oder anderen anerkannten nationalen Standards in Einklang gebracht wird. Messungswerte von anerkannten Werten physikalischer Konstanten abgeleitet, gemäss dem International System of Units (SI). Diese Kalibrierung erfüllt oder übersteigt die Anforderungen von ISO 9001:2015, ANSI/NCSL 2540-1-1994 (R2002), und entspricht ISO/IEC 17025:2017, verifiziert durch das ANSI-ASQ National Accreditation Board/ANAB - Siehe Zertifizierung AC-1117. Die geschätzte Ungenauigkeit beträgt ± 0,84% der gemessenen Werte gegenüber dem primären Standard. Zertifikatskopien sind bei Kistler dokumentiert und können schriftlich angefordert werden. Dieses Zertifikat kann nicht ohne schriftliches Einverständnis von Kistler Instrumente AG, und nur in seiner Gesamtheit, reproduziert werden. This sensor was calibrated per Kistler test procedure 978-5473-701 using a comparison technique against a Kistler working standard. Kistler working standards are periodically calibrated against a primary standard system, which in turn is periodically recertified to the National Institute of Standards and Technology (NIST) or another recognized national standard. Measurements are derived from accepted values of natural physical constants according to the International System of Units (SI). This calibration meets or exceeds the requirements of ISO 9001:2015, ANSI/NCSL 2540-1-1994 (R2002), and is accredited to ISO/IEC 17025:2017 as verified by the ANSI-ASQ National Accreditation Board/ANAB. Refer to certificate and scope of accreditation AC-1117. Estimated uncertainty is ± 0.84% of reading with respect to the primary standard. Certificates are on file at Kistler and may be requested in writing. This certificate shall not be reproduced, except in full, without written approval of Kistler Instrument Corporation.

Referenz Geräte/Reference	Hersteller/Mfg.	Typ/Type	Serien-Nr/SN	Referenz Geräte/Reference	Hersteller/	Typ/Type	Serien-Nr/SN
Beschleunigungs-Sensor/Accel.(GN)	Kistler	8076K	C148323	Multimeter/Multimeter (UUT)	HP	34401A	3146A65537
Ladungsverstärker/Charge Amp.(GN)	Kistler	5020	C93919	Multimeter/Multimeter (Std)	HP	34401A	3146A65544
Beschleunigungs-Sensor/Accel.(BN)	Kistler	8002K	C197006	Funktionsgenerator/Function Gen.	Keysight	33509B	MY52101110
Ladungsverstärker/Charge Amp. (BN)	Kistler	5020	C4870	Ladungsverstärker/Charge Amp.(UUT)	Kistler	5010	C72053

GN = Gebrauchsnorm/Working Standard, BN = Bezugsnorm/Primary Standard, UUT = Funktionsgenerator /Unit Under Test, Std = Normal/Standard

Kistler Instrument Corp.
75 John Glenn Drive
Amherst, NY 14228-2171

Tel 1-888-KISTLER
Fax 1-716-691-5226
info.us@kistler.com

ISO 9001 Certified Quality System
ISO 17025 Accredited Calibration Laboratory
040-0052-001 Rev D - Seite 2 von 2

www.kistler.com

A8: MATLAB Skript zur Auswertung der Daten

```
clc
```

```
clear all, close all
```

%% Einlesen der Daten.

```
name = 'Messung_am_Spiegelhalter_1.txt';
opt = detectImportOptions(name,'NumHeaderLines',5); %Reading of TXT Datei
opt.Delimiter = ';'; %Delimiter in dem File
a = readtable(name,opt); %Reading of table
format long; %Nachkommestelle
```

%% Aufbereitung der Daten.

```
close all
l = size(a,1);
sf = 12500; % Abtastrate
ts = 1/sf; % Frequenzauflösung
data = zeros(l,3); % Matrix
tic %
for i = 1:4 % Schleife Vektor. Von 1-3 Beschleunigungen. 4 - Kraft
    for j = 1:l %
        data(j,i) = str2num(strrep(a.(i+1){j},','));
    end
end
toc;
t_elaps = toc
t = 0:ts:(l-1)*ts; % Timevektor
```

%% Berechnung aus G (9.81) in m/s² und Speicherung im MATLAB Format

```
data=data;
for i=1:3
    data(:,i)= data(:,i)*9.81;
end
%save AK_Messung_Eigenfrequenz_am_Hebelarm_Gewicht_oben_Piezo_an.mat data
```

%% Erzeugung von der Mittelwertmessung

```
data_mittelwertmessung=((data1+data2+data3+data4+data5)/5);
%save data.mat data_mittelwertmessung
```

%% Mittelwert und Standardabweichung für 2 Datensätze.

```
name1=data209_bis_data213_Mittelwert_NK_an_der_Kamera_unten_Piezo_an;
```

```

name2=data91_bis_data95_mittelwert_Kamera_unten_Piezo_an_175sec;
x= [name1(:,1),name2(:,1)];
y= [name1(:,2),name2(:,2)];
z= [name1(:,3),name2(:,3)];
mx=mean(x) %Mittelwert X-Achse
my=mean(y) %Mittelwert Y-Achse
mz=mean(z) %Mittelwert Z-Achse
sax=std(x) %Standardabweichung X-Achse
say=std(y) %Standardabweichung Y-Achse
saz=std(z) %Standardabweichung Z-Achse

```

%% Beschleunigung zwei Datensätze. Erster Datensatz

```

name3=data91_bis_data95_mittelwert_Kamera_unten_Piezo_an_175sec;
l3 = size(name3,1);
sf = 12500;      % Sampling frequency
ts3 = 13/sf;    % Time Step
t3 = 0:ts3:(l3-1)*ts3; % Timevektor

```

%% Beschleunigung zwei Datensätze. Zweiter Datensatz

```

name4=data209_bis_data213_Mittelwert_NK_an_der_Kamera_unten_Piezo_an;
l4 = size(name4,1);
sf = 12500;      % Sampling frequency
ts4 = 14/sf;    % Time Step
t4 = 0:ts4:(l4-1)*ts4; % Timevektor

```

%% subplot von Beschleunigungen in X,Y,Z

```

figure(2)
fs = 18;
subplot(3,1,1)
bb1=plot(t3,name3(:,1),'Linewidth',3),grid minor
xlabel('Zeit t [s]','FontSize',fs),ylabel('Beschleunigung (m/s^2)','FontSize',fs)
xlim([0 175])
hold on
bb2=plot(t4,name4(:,1)),grid minor
xlabel('Zeit t [s]','FontSize',fs)
ylabel('Beschleunigung (m/s^2)','FontSize',fs)
legend('Mittelwertmessung; Kamera; Unten; Alte Konstruktion; Piezo an; 175 Sekunden; X-
Achse','Mittelwertmessung; Kamera; Unten; Neue Konstruktion; Piezo an; 175 Sekunden; X-
Achse','FontSize',fs)
subplot(3,1,2)
bb3=plot(t3,name3(:,2),'Linewidth',3),grid minor,axis tight

```

```

hold on
bb4=plot(t4,name4(:,2)),grid minor,axis tight
xlabel('Zeit t [s]','FontSize',fs)
ylabel('Beschleunigung (m/s^2)','FontSize',fs)
legend('Mittelwertmessung; Kamera; Unten; Alte Konstruktion; Piezo an; 175 Sekunden; Y-
Achse','Mittelwertmessung; Kamera; Unten; Neue Konstruktion; Piezo an; 175 Sekunden; Y-
Achse','FontSize',fs)
xlim([0 175])
subplot(3,1,3)
bb5=plot(t3,name3(:,3),'Linewidth',3),grid minor,axis tight
xlabel('Zeit t [s]','FontSize',fs)
ylabel('Beschleunigung (m/s^2)','FontSize',fs)
xlim([0 175])
hold on
bb6=plot(t4,name4(:,3)),grid minor,axis tight
legend('Mittelwertmessung; Kamera; Unten; Alte Konstruktion; Piezo an; 175 Sekunden; Z-
Achse','Mittelwertmessung; Kamera; Unten; Neue Konstruktion; Piezo an; 175 Sekunden; Z-
Achse','FontSize',fs)
xlim([0 175])
bb1.DataTipTemplate.FontSize = fs;
bb2.DataTipTemplate.FontSize = fs;
bb3.DataTipTemplate.FontSize = fs;
bb4.DataTipTemplate.FontSize = fs;
bb5.DataTipTemplate.FontSize = fs;
bb6.DataTipTemplate.FontSize = fs;
%exportgraphics(gcf,'Beschleunigung_Mittelwertmessungen_Kamera_unten_AK_NK.jpg','Re
solution',500)

```

%% FFT erster Datensatz

```

name5=data106;
l5 = size(name5,1);
sf = 12500;
for i = 1:3; % 1=X; 2=Y und 3=Z
b(:,i) = fft(name5(:,i));
P2(:,i) = abs(b(:,i))/l5;
P1(:,i) = P2(1:l5/2+1,i);
P1(2:end-1,i) = 2*P1(2:end-1,i);
f = sf*(0:(l5/2))/l5;
end

```

%% FFT zweiter Datensatz

```

close all
name6=data224;
l6 = size(name6,1);
for i = 1:3; % 1=X; 2=Y und 3=Z
b1(:,i) = fft(name6(:,i));
P21(:,i) = abs(b1(:,i))/l4;
P11(:,i) = P21(1:l6/2+1,i);
P11(2:end-1,i) = 2*P11(2:end-1,i);
f4 = sf*(0:(l6/2))/l6;
end

```

%% subplot. Frequenzspektrum. Zwei Datensätze

```

clf
subplot (3,1,1)
fs = 18;
pp1=loglog(f,P1(:,1),'Linewidth',3)% X Achse 74 P1
loglog(f,2*(P1x(:,1).*1/sqrt(2)).^2,'Linewidth',3)
hold on
pp2=loglog(f4,P11(:,1))% X Achse 75 P1
hold on
xlabel('Frequenz [Hz]','FontSize',fs)
ylabel('Beschleunigung [m/s^2]','FontSize',fs)
legend('Data 106; Hebelarm; Kamera Unten; Alte Konstruktion; Piezo an; 175 Sekunden; X-
Achse','Data 224; Hebelarm; Kamera Unten; Neue Konstruktion; Piezo an; 175 Sekunden; X-
Achse', 'FontSize',fs,'Location', 'Best'),axis tight,grid on
axis tight
grid on
%xlim([1 100])
%ylim([0 0.001])
subplot(3,1,2)
pp3=loglog(f,P1(:,2),'Linewidth',3)% X Achse 74 P1
hold on
pp4=loglog(f4,P11(:,2))% X Achse 75 P1
xlabel('Frequenz [Hz]','FontSize',fs)
ylabel('Beschleunigung [m/s^2]','FontSize',fs)
legend('Data 106; Hebelarm; Kamera Unten; Alte Konstruktion; Piezo an; 175 Sekunden; Y-
Achse','Data 224; Hebelarm; Kamera Unten; Neue Konstruktion; Piezo an; 175 Sekunden; Y-
Achse', 'FontSize',fs,'Location', 'Best'),axis tight,grid on
axis tight
xlim([1 100])
%ylim([0 0.001])

```



```

subplot(3,1,3)
pp5=loglog(f,P1(:,3),'Linewidth',3)% X Achse 74 P1
hold on
pp6=loglog(f4,P11(:,3))% X Achse 75 P1
xlabel('Frequenz [Hz]','FontSize',fs)
ylabel('Beschleunigung [m/s^2]','FontSize',fs)
legend('Data 106; Hebelarm; Kamera Unten; Alte Konstruktion; Piezo an; 175 Sekunden; Z-
Achse','Data 224; Hebelarm; Kamera Unten; Neue Konstruktion; Piezo an; 175 Sekunden; Z-
Achse','FontSize',fs,'Location','Best'),axis tight,grid on
axis tight
xlim([1 100])
%ylim([0 0.001])
pp1.DataTipTemplate.FontSize = fs;
pp2.DataTipTemplate.FontSize = fs;
pp3.DataTipTemplate.FontSize = fs;
pp4.DataTipTemplate.FontSize = fs;
pp5.DataTipTemplate.FontSize = fs;
pp6.DataTipTemplate.FontSize = fs;
%exportgraphics(gcf,'Frequeunzspektrum_Hebelarm_Kamera_unten_AK_NK_04.05.2022.jpg'
,'Resolution',500)

```

%% Übertragungsfunktion. Ein Datensatz

```

%clc
%clear all close all
figure(1)
fs=18;
sf=12500;
name7=data196;
l = size(name5,1);
wind=hann(l/2);
subplot(3,1,1)
[frfx,fsx]=modalfrf(name7(:,4),name7(:,1),sf,wind,'Sensor','acc'); %dis für Auslenkung oder
acc für Beschleunigung.
uf1=plot(fsx,abs(frfx));
grid on
axis tight
legend('Trägheit; Data 196;','FontSize',fs)
title('Übertragungsfunktion X Achse','FontSize',fs)
xlabel('Frequenz [Hz]','FontSize',fs)
ylabel('Trägheit [m/s^2/N]','FontSize',fs)
%xlim([0 100])

```

```

subplot(3,1,2)
[frfy,fsy]=modalfrrf(name7(:,4),name7(:,2),sf,wind,'Sensor','acc'); %dis für Auslenkung oder
acc für Beschleunigung.
uf2=plot(fsy,abs(frfy));
legend('Trägheit; Data 196;','FontSize',fs)
title('Übertragungsfunktion Y Achse','FontSize',fs)
xlabel('Frequenz [Hz]','FontSize',fs)
ylabel('Trägheit [m/s^2/N]','FontSize',fs)
grid on
axis tight
%xlim([0 100])
subplot(3,1,3)
[frfz,fsz]=modalfrrf(name7(:,4),name7(:,3),sf,wind,'Sensor','acc'); %dis für Auslenkung oder
acc für Beschleunigung.
uf3=plot(fsz,abs(frfz));
legend('Trägheit; Data 196;','FontSize',fs)
title('Übertragungsfunktion Z Achse','FontSize',fs)
xlabel('Frequenz [Hz]','FontSize',fs)
ylabel('Trägheit [m/s^2/N]','FontSize',fs)
grid on
axis tight
%xlim([0 100])
uf1.DataTipTemplate.FontSize = fs;
uf2.DataTipTemplate.FontSize = fs;
uf3.DataTipTemplate.FontSize = fs;
%exportgraphics(gcf,'Übertragungsfunktion_NK_Hebelarm_Kreuz_unten_2.jpg','Resolution',
500)

```

%% Bestimmung der Eigenfrequenz und des entsprechenden Dämpfungsgrades

```

[fnx,drx]=modalfit(frfx,fsx,sf,2,'FitMethod','pp') %% Achse X
[fny,dry]=modalfit(frfy,fsy,sf,2,'FitMethod','pp') %% Achse Y
[fnz,drz]=modalfit(frfz,fsz,sf,2,'FitMethod','pp') %% Achse Z

```

%% Übertragungsfunktion. Zwei Datensätze

```

sf=12500;
fs = 18;
name8=data197;
l8 = size(name8,1);
wind8=hann(l8/2);
name9=data202;

```

```

l9 = size(name9,1);
wind9=hann(l9/2);
subplot(3,1,1)
[frfx21,fsx21]=modalfrrf(name8(:,4),name8(:,1),sf,wind8,'Sensor','acc'); %dis für Auslenkung
oder acc für Beschleunigung.
aa1=plot(fsx21,abs(frfx21),'Linewidth',3);
grid on
axis tight
hold on
[frfx22,fsx22]=modalfrrf(name9(:,4),name9(:,1),sf,wind9,'Sensor','acc'); %dis für Auslenkung
oder acc für Beschleunigung.
aa2=plot(fsx22,abs(frfx22),'Linewidth',3);
legend('Data 197; Hebelarm; Alte Konstruktion; Gewicht Unten; X-Achse','Data 202;
Hebelarm; Neue Konstruktion; Ohne Kreuzrippe; Gewicht Unten; X-
Achse','FontSize',fs,'Location', 'Best')
title('Übertragungsfunktion X Achse','FontSize',fs)
xlabel('Frequenz [Hz]','FontSize',fs)
ylabel('Trägheit [m/s^2/N]','FontSize',fs)
xlim([10 70])
subplot(3,1,2)
[frfy21,fsy21]=modalfrrf(name8(:,4),name8(:,2),sf,wind8,'Sensor','acc'); %dis für Auslenkung
oder acc für Beschleunigung.
aa3=loglog(fsy21,abs(frfy21),'Linewidth',3);
hold on
[frfy22,fsy22]=modalfrrf(name9(:,4),name9(:,2),sf,wind9,'Sensor','acc'); %dis für Auslenkung
oder acc für Beschleunigung.
aa4=loglog(fsy22,abs(frfy22),'Linewidth',3);
legend('Data 198; Spiegelhalter; Alte Konstruktion; Y-Achse','Data 203; Spiegelhalter; Neue
Konstruktion; Y-Achse','FontSize',fs,'Location', 'Best')
title('Übertragungsfunktion Y Achse')
xlabel('Frequenz [Hz]')
ylabel('Trägheit [m/s^2/N]')
grid on
axis tight
xlim([10 120])
subplot(3,1,3)
[frfz21,fsz21]=modalfrrf(name8(:,4),name8(:,3),sf,wind8,'Sensor','acc'); %dis für Auslenkung
oder acc für Beschleunigung.
aa5=loglog(fsz21,abs(frfz21),'Linewidth',3);
hold on

```

```
[frfz22,fsz22]=modalfrf(name9(:,4),name9(:,3),sf,wind9,'Sensor','acc'); %dis für Auslenkung
oder acc für Beschleunigung.
aa6=loglog(fsz22,abs(frfz32),'Linewidth',3);
legend('Data 198; Spiegelhalter; Alte Konstruktion; Z-Achse','Data 203; Spiegelhalter; Neue
Konstruktion; Z-Achse','FontSize',fs,'Location','Best')
title('Übertragungsfunktion Z Achse')
xlabel('Frequenz [Hz]')
ylabel('Trägheit [m/s^2/N]')
grid on
axis tight
xlim([10 120])
aa1.DataTipTemplate.FontSize = fs;
aa2.DataTipTemplate.FontSize = fs;
aa3.DataTipTemplate.FontSize = fs;
aa4.DataTipTemplate.FontSize = fs;
aa5.DataTipTemplate.FontSize = fs;
aa6.DataTipTemplate.FontSize = fs;
%exportgraphics(gcf,'Eigenfrequenzen_Hebelarm_AK_NK_Kreuzrippe.jpg','Resolution',500)
```

%% Übertragungsfunktion. Drei Datensätze

```
sf=12500;
fs = 18;
name10=data197;
l10 = size(name10,1);
wind10=hann(l10/2);
name11=data202;
l11 = size(name11,1);
wind11=hann(l11/2);
name12=data196;
l12 = size(name12,1);
wind12=hann(l12/2);
subplot(3,1,1)
[frfx31,fsx31]=modalfrf(name10(:,4),name10(:,1),sf,wind10,'Sensor','acc'); %dis für
Auslenkung oder acc für Beschleunigung.
aa7=plot(fsx31,abs(frfx31),'Linewidth',3);
grid on
axis tight
hold on
[frfx32,fsx32]=modalfrf(name11(:,4),name11(:,1),sf,wind11,'Sensor','acc'); %dis für
Auslenkung oder acc für Beschleunigung.
sa8=plot(fsx32,abs(frfx32),'Linewidth',3);
```

```

[frfx33,fsx33]=modalfrf(name12(:,4),name12(:,1),sf,wind12,'Sensor','acc'); %dis für
Auslenkung oder acc für Beschleunigung.
aa9=plot(fsx33,abs(frfx33),'Linewidth',3);
legend('Data 197; Hebelarm; Alte Konstruktion; Gewicht Unten; X-Achse','Data 202;
Hebelarm; Neue Konstruktion; Ohne Kreuzrippe; Gewicht Unten; X-Achse','Data 196;
Hebelarm; Neue Konstruktion; Mit Kreuzrippe; Gewicht unten; X-
Achse','FontSize',fs,'Location','Best')
title('Übertragungsfunktion X Achse','FontSize',fs)
xlabel('Frequenz [Hz]','FontSize',fs)
ylabel('Trägheit [m/s^2/N]','FontSize',fs)
xlim([10 70])
subplot(3,1,2)
[frfy31,fsy31]=modalfrf(name10(:,4),name10(:,2),sf,wind10,'Sensor','acc'); %dis für
Auslenkung oder acc für Beschleunigung.
aa10=loglog(fsy31,abs(frfy31),'Linewidth',3);
hold on
[frfy32,fsy32]=modalfrf(name11(:,4),name11(:,2),sf,wind11,'Sensor','acc'); %dis für
Auslenkung oder acc für Beschleunigung.
aa11=loglog(fsy32,abs(frfy32),'Linewidth',3);
[frfy33,fsy33]=modalfrf(name12(:,4),name12(:,2),sf,wind12,'Sensor','acc'); %dis für
Auslenkung oder acc für Beschleunigung.
plot(fsy33,abs(frfy33));
legend('Data 197; Hebelarm; Alte Konstruktion; Gewicht unten; Y-Achse','Data 202;
Hebelarm; Neue Konstruktion; Ohne Kreuzrippe; Y-Achse','Eigenfrequenzmessung;
Spiegelhalter; Neue Konstruktion. Kreuzrippe. Gewicht unten Y-
Achse','FontSize',fs,'Location','Best')
title('Übertragungsfunktion Y Achse')
xlabel('Frequenz [Hz]')
ylabel('Trägheit [m/s^2/N]')
grid on
axis tight
xlim([10 120])
subplot(3,1,3)
[frfz31,fsz21]=modalfrf(name10(:,4),name10(:,3),sf,wind10,'Sensor','acc'); %dis für
Auslenkung oder acc für Beschleunigung.
aa12=loglog(fsz21,abs(frfz31),'Linewidth',3);
hold on
[frfz32,fsz22]=modalfrf(name11(:,4),name11(:,3),sf,wind11,'Sensor','acc'); %dis für
Auslenkung oder acc für Beschleunigung.
aa13=loglog(fsz22,abs(frfz32),'Linewidth',3);

```

```
[frfz33,fsz33]=modalfrf(name12(:,4),name12(:,3),sf,wind12,'Sensor','acc'); %dis für  
Auslenkung oder acc für Beschleunigung.  
aa14=plot(fsz33,abs(frfz33));  
legend('Data 197; Hebelarm; Alte Konstruktion; Gewicht unten; Z-Achse','Data 202;  
Hebelarm; Neue Konstruktion; Ohne Kreuzrippe; Z-Achse','Eigenfrequenzmessung.  
Hebelarm. Neue Konstruktion. Kreuzrippe. Gewicht unten Z-Achse','FontSize',fs,'Location',  
'Best')  
title('Übertragungsfunktion Z Achse')  
xlabel('Frequenz [Hz]')  
ylabel('Trägheit [m/s^2/N]')  
grid on  
axis tight  
xlim([10 120])  
aa7.DataTipTemplate.FontSize = fs;  
aa8.DataTipTemplate.FontSize = fs;  
aa9.DataTipTemplate.FontSize = fs;  
aa10.DataTipTemplate.FontSize = fs;  
aa11.DataTipTemplate.FontSize = fs;  
aa12.DataTipTemplate.FontSize = fs;  
aa13.DataTipTemplate.FontSize = fs;  
aa14.DataTipTemplate.FontSize = fs;  
%exportgraphics(gcf,'Eigenfrequenzen_Hebelarm_AK_NK_Kreuzrippe.jpg','Resolution',500)
```



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Tsapurin

Vorname: Andrey

dass ich die vorliegende Masterarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Konstruktion eines motorisierten Kamerahalters unter besonderer Berücksichtigung der mechanischen Vibrationen.

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

17.06.2022

Ort

Datum

Original