

Masterarbeit

Alexander Reich

Entwicklung einer motorisierten Ausrichtungseinheit

Alexander Reich

**Entwicklung einer motorisierten
Ausrichtungseinheit**

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

im Studiengang Berechnung und Simulation 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



Erstprüfer/in: Prof. Dr. Frank Schäfer

Industrieller Betreuer: M.Sc. Jan Torben Delitz

Abgabedatum: 12.04.2021

Zusammenfassung

Alexander Reich

Thema der Master Thesis

Entwicklung einer motorisierten Ausrichtungseinheit

Stichworte

Ausrichtungseinheit, Freiheitsgrade, Risikobeurteilung, Konstruktion, Siemens NX, EN ISO12100, EN ISO 13849-1, Maschinenrichtlinie 2006/42/EG, Safexpert, FEM

Kurzzusammenfassung

Ein Röntgenbeugungsexperiment misst die gebeugten Strahlen mittels eines CCD-Detektors, welche sich in einer Ultrahochvakuumumgebung befinden. Das Ziel dieser Arbeit ist die Integration des CCD-Detektors in die Experimentierstation SCS am Röntgenlaser XFEL. Die dafür entwickelte Baugruppe muss die geometrischen und technischen Anforderungen des Experiments erfüllen. Die Hauptanforderung an die zu entwickelnde Baugruppe ist die Möglichkeit einer motorisierten Ausrichtung des Detektors in fünf Freiheitsgrade im Experimentierbetrieb. Zusätzlich ist ein Festigkeitsnachweis der Konstruktion mit den auftretenden Belastungen durchzuführen. Ergänzend dazu sind die Vakuumpumpen für die Baugruppe auszulegen.

Alexander Reich

Title of the paper

Design of a motorized alignment unit

Keywords

Alignment unit, Degrees of freedom, Risk assessment, design, Siemens NX, EN ISO 12100, EN ISO 13849-1, Directive 2006/42/EG, Safexpert, FEM

Abstract

In an X-ray diffraction experiment, the diffracted beams are measured using a CCD detector, which is located in an ultra-high vacuum environment. The aim of this work is to integrate the CCD detector into the SCS experimental station at the X-ray laser XFEL. The assembly developed for this purpose must meet the geometrical and technical requirements of the experiment. The main requirement for the to be developed assembly is that it should be possible to align motorizedthe detector in five degrees of freedom during experimental operation. In addition, a strength verification of the construction with the occurring loads is to be carried out. In addition, the vacuum pumps for the assembly must be designed.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung.....	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung und Gliederung der Arbeit.....	1
2	Grundlagen.....	3
2.1	European XFEL GmbH	3
2.2	SCS-Instrument	6
2.3	Röntgenexperimente an SCS	8
2.3.1	Beugung erklärt am Spezialfall der spekularen Geometrie	8
2.3.2	Beugung in Vorwärtsstreuung	10
2.3.3	Röntgenspektroskopie	11
2.4	FastCCD-Detektor	12
2.5	Vakuumtechnik	14
2.5.1	Grundlagen Vakuumherzeugung	14
2.5.2	Vakuumgerechtes Konstruieren	17
2.6	Mechanik	21
2.6.1	Linearführungen.....	21
2.6.2	Schrittmotoren.....	26
2.6.3	Encoder-Systeme	28
2.7	Risikobeurteilung	30
3	Anforderungen und Randbedingungen	34
3.1.1	Geometrische Randbedingungen.....	34
3.1.2	Technische Randbedingungen	36
4	Konzept Herleitung und die technische Umsetzung	38
4.1	Auslegung der Turbomolekularpumpe	39
4.2	Ermittlung der vorhandenen Kräfte und Momente	43
4.3	Konzept der FastCCD-Baugruppen und der technischen Realisierung.....	47
4.3.1	Longitudinale Bewegung.....	48
4.3.1.1	Konzept der longitudinalen Bewegung	48
4.3.1.2	Technische Realisierung der longitudinalen Bewegung	49
4.3.2	Laterale Bewegung und die Drehung.....	55
4.3.2.1	Konzept der lateralen Bewegung und der Drehung	55
4.3.2.2	Technische Realisierung der lateralen Bewegung und Drehung.....	59
4.3.3	Vertikale Bewegung und die Neigung.....	67
4.3.3.1	Konzept der vertikalen Bewegung und der Neigung.....	67
4.3.3.2	Technische Realisierung der vertikalen Bewegung und der Neigung	73
4.3.4	Zusammenbau der FastCCD-Baugruppe und Integration in die SCS-Beamline	75
4.3.5	Bewertung der Konstruktion und Zusammenfassung aller Komponenten	77
5	Risikobeurteilung	80
5.1	Grenzen der motorisierten Ausrichtungseinheit	80
5.2	Lebensphasen der motorisierten Ausrichtungseinheit	82
5.3	Gefährdungen der motorisierten Ausrichtungseinheit	83
5.4	Risikobewertung und Risikominderung.....	85
5.5	Fazit der Risikobeurteilung	87
6	Zusammenfassung und Ausblick	89
7	Literatur	92

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1. Unterirdischer Tunnelverlauf	5
Abbildung 2.2. Ausrichtung des Koordinatensystems (XFEL)	6
Abbildung 2.3. Komponenten in der Strahlführung des SCS-Instruments.....	7
Abbildung 2.4. Darstellung einer Kristallstruktur aus Basis und Gitter	8
Abbildung 2.5. Darstellung des Prinzips der Beugung von Röntgenstrahlung an den Netzebenen eines Kristalls	9
Abbildung 2.6. Allgemeiner Aufbau eines Vorwärtsstreuungs-Versuchs	10
Abbildung 2.7. Allgemeiner Aufbau eines Spektroskopie Experiments.....	11
Abbildung 2.8. Auslesung des Ladungsmusters beim Interline-CCD-Sensor	13
Abbildung 2.9. Schnittdarstellung und Beschriftung der vorhandenen FastCCD-Baugruppe	13
Abbildung 2.10. CF-Flanschverbindung mit einer Metall Dichtung	16
Abbildung 2.11. Kreuzweises Anziehen der Schrauben an einen Flansch	17
Abbildung 2.12. Darstellung von Konstruktionsregeln für Bauteile im Vakuum	20
Abbildung 2.13. Freikörperbild einer Kiste auf einer rauen Unterlage	22
Abbildung 2.14. Vereinfachtes schematisches Modell des Stick-Slip-Effektes	23
Abbildung 2.15. Reibungskennlinie von Wälzführungen	24
Abbildung 2.16. Aufbau eines Kugelgewindetriebs	24
Abbildung 2.17. Wirkungsgrad – Steigungswinkel Diagramm. a) Rotation in lineare Bewegung b) Linear-Bewegung in Rotation Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	26
Abbildung 2.18. Grundsätzlicher Aufbau eines zwei-strängigen permanentmagnetisch erregten Schrittmotors	27
Abbildung 2.19. Beispiel Kennlinie eines Schrittmotors	28
Abbildung 2.20. Integration eines Encoders auf einer Linearführung (Vorder- und Seitenansicht)	29
Abbildung 3.1. Bauraum für die Integration der FastCCD in der SCS-Beamline (Drauf- und Seitenansicht)	36
Abbildung 4.1. Vakuumschema der FastCCD-Baugruppe	38
Abbildung 4.2. Abmaße der FastCCD-Baugruppe	40
Abbildung 4.3. Vereinfachtes Freikörperbild der FastCCD-Baugruppe.....	44
Abbildung 4.4. Schnittverlauf der FastCCD-Baugruppe	46

Abbildung 4.5. Baugruppenstruktur der FastCCD	48
Abbildung 4.6. Detaillierter Zusammenbau der Baugruppe trans_z	51
Abbildung 4.7. Drehmoment-Frequenz-Kennlinie für den Schrittmotor für die Z-Achse	55
Abbildung 4.8. Bewegungskonzept mit den Linearführungen.....	56
Abbildung 4.9. Darstellung der geometrischen Beziehungen (Lagerpunkt D und E).....	59
Abbildung 4.10. Design der Baugruppe: trans-x, rot-y.....	60
Abbildung 4.11. Abmaße der einzelnen Lagerstellen bei der Streckung des Membranbalges	61
Abbildung 4.12. Schnittdarstellung eines Blocks	61
Abbildung 4.13. Freischnitt für die Berechnung des wirkenden Momentes an der freien Linearführung in Lager D.....	62
Abbildung 4.14. Darstellung des vereinfachten Modells mit den gesetzten Randbedingungen im FEM- Modell.....	64
Abbildung 4.15. Zeichnung der Baugruppe "trans_x_rot_y"	65
Abbildung 4.16. Wirkende Kräfte auf die Linearführung in der X-Achse	66
Abbildung 4.17. Drehmoment-Frequenz-Kennlinie für den Schrittmotor für die X-Achse	67
Abbildung 4.18. Draufsicht: Bewegungskonzept mit den Hubspindeln	68
Abbildung 4.19. Skizze des Hubs (Y-Achse, Seitenansicht)	71
Abbildung 4.20. Geometrische Darstellung des Loslagers.....	72
Abbildung 4.21. Darstellung einer drehelastischen Kupplung (Klauenkupplung)	73
Abbildung 4.22. Konstruktive Umsetzung der Baugruppe: trans_y_rot_x	74
Abbildung 4.23. Zeichnung der Baugruppe FastCCD	76
Abbildung 5.1. Darstellung einer Risikobewertung im Safexpert (Risikograph)	85
Abbildung 5.2. Darstellung eines Risikographen für die Performance Level (Safexpert)	87

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Druckbereiche des Vakuums	15
Tabelle 2. Kennwerte von Edelstahlwerkstoffen	18
Tabelle 3. Eigenschaften von Aluminiumlegierungen	19
Tabelle 4. Grenzen einer Maschine	31
Tabelle 5. Geometrische Randbedingungen	35
Tabelle 6. Volumen und Mantelflächen der FastCCD-Baugruppe	41
Tabelle 7. Auspumpzeiten bei einer DN63 und DN100 Turbomolekularpumpe	43
Tabelle 8. Zusammenfassung der vorhandenen Belastungen	47
Tabelle 9. Wirkende Belastungen auf die Linearführung (Z-Achse).....	51
Tabelle 10. Koordinaten nach der Bewegung der Lagerstelle D.....	57
Tabelle 11. Koordinatenpunkte der Lagestellen nach der Drehung um die Y-Achse	59
Tabelle 12. Wirkende Momente an relevanten Stellen	63
Tabelle 13. Erreichte Neigung	72
Tabelle 14. Zusammenfassung aller Freiheitsgrade der Ausrichtungseinheit	77
Tabelle 15. Verwendete Komponenten	78
Tabelle 16. Zusammenfassung aller Belastungen	79
Tabelle 17. Grenzen der FastCCD Baugruppe	80
Tabelle 18. Gefährdungen in den einzelnen Lebensphasen	83
Tabelle 19. Relevante Gefährdungen und Maßnahmen.....	88

Formelzeichen und Abkürzungen

Lateinische Symbole

A	Fläche
A_M	Mantelfläche
A_{sp}	Querschnittsfläche der Spindel
A_y	Lagerreaktion des Lagers A in der Y-Achse
B_y	Lagerreaktion des Lagers B in der Y-Achse
B_z	Lagerreaktion des Lagers B in der Z-Achse
a	Seitenlänge
b	Kantenlänge
c	Federkonstante
	auch Kantenlänge
d	Netzebenen Abstand
	auch Durchmesser des Zylinders
d_2	Flankendurchmesser des Gewindes
E	Elastizitätsmodul
F	Konzentrierte Einzelkraft
	auch Druck- oder Zugkraft
F_{ax}	Axiale Kraft
F_G	Gewichtskraft
F_V	Vakuumkraft
g	Fallbeschleunigung
H	Haftreibungskraft
H_0	Haftungsgrenzwert
I	Flächenträgheitsmoment
h	Gewindesteigung
J_{ext}	Externes Massenträgheitsmoment
$J_{Spindel}$	Trägheitsmoment der Spindel (rotatorisch)
J_{Trans}	Translatorisches Trägheitsmoment
k	Boltzmannkonstante
k_0	Einfallender Strahlvektor
k_s	Streuvektor (nach der Probe)
$L_{e/c}$	Komprimierte oder gestreckte Membranlänge
L_f	Freie Membranlänge
l	Länge des Zylinders
$l_{Spindel}$	Länge der Spindel

l_k		Knicklänge des Stabes
l_t		Membran Faktor
M		Moment
$M_{Antrieb}$		Notwendiges Antriebsdrehmoment
m		Masse
	auch	Phasenzahl des Stators (Anzahl der Stränge)
N		Normalkraft
	auch	Teilchenanzahl eines Gases
n		Reflexionsordnung
	auch	Anzahl der Körper
$n_{Antrieb}$		Antrieb Drehzahl
n_b		Anzahl der Membranen
p		Druck
	auch	Polarpaarzahl des Rotors
p_i		Partialdruck
p_n		Umgebungsdruck
p_{tot}		Totaldruck
Q		Streuung
q_{des}		Desorptionsrate eines Werkstoffes
R		Gleitreibungskraft
$R_{p0,2}$		Dehngrenze
r		Anzahl der Lagerreaktionen
	auch	Radius
S		Sicherheitszahl
S_{TMP}		Saugleistung der Turbomolekularpumpe
S_V		Saugleistung der Vorpumpe
$S_{1,x}$		Schnittkoordinate X-Achse
$S_{1,z}$		Schnittkoordinate Z-Achse
s		Weg
T		Temperatur
t		Auspumpzeit
V		Volumen
V_{LBNL}		Volumen der LBNL Baugruppe
v		Anzahl der Verbindungsreaktionen
v_{max}		Maximale Geschwindigkeit

Griechische Symbole

α	Winkel
α	auch <i>Schrittwinkel (Schrittmotor)</i>
β	<i>Euler Faktor</i>
γ	Spezifisches Gewicht
η	Wirkungsgrad
η_{KGT}	Wirkungsgrad des Kugelgewindetriebs
λ	Wellenlänge
λ	auch Schlankheitsgrad
λ_g	Grenzschlankheit
Θ	Einfallswinkel
μ	Reibungskoeffizient
μ_0	Haftungskoeffizient
σ_k	Knickspannung nach Tetmajer
σ_{vor}	Vorhandene Spannung
φ	Gewindesteigungswinkel

Indizes

<i>max</i>	maximal
<i>min</i>	minimal

Abkürzungen

ALAS	<i>Alignment Laser System</i>
CAD	Computer-aided design
Co	Kohlenstoffmonoxid
CuNiSi	Kupferlegierung
DESY	Deutsches Elektronen Synchrotron
DN	Nennweite
DPS	Differential Pumping System
FastCCD	Fast Charge-Coupled Device
FFT	Forward-scattering fixed-target, The forward-scattering-target
FXE	Femtosecond X-ray Experiments
GSA	Sicherheitsanforderungen
HED	High Energy Densities
KBS	Kirkpatrick-Barez Focussing System
KGT	Kugelgewindetrieb

LBNL	Lawrence Berkeley National Laboratory
LIN	Laser In-Coupling
MID	Material Imaging and Dynamics
NX	Next Generation
Pa	Pascal
Ra	Mittenrauwert
SCS	Spectroscopy and Coherent Scattering
SI	Internationales Einheitssystem
SPB/SFX	Single Particles, Clusters and Biomolecules & Serial Femtosecond Crystallography
SQS	Small Quantum Systems
TIM	Transmission Intensity Monitor
XFEL	X-Ray Free-Electron Laser
XGM	X-Ray Gas Monitor

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 Motivation

Am European X-Ray Free Electron Laser (XFEL) in Schenefeld kommt es an der Spectroscopy and Coherent Scattering-Experimentierstation (SCS) mithilfe von weichen Röntgenstrahlen (250 - 3000 eV, 5- 0,4 nm) unter anderem zur Untersuchung des atomaren Aufbaus von Werkstoffen. Dabei bestrahlt ein Röntgenstrahl eine bevorzugt kristalline Probe. Die auftretenden Wechselwirkungen zwischen den Röntgenstrahlen und den Elektronen des Kristalls verursachen eine Vielzahl an von der Probe ausgehenden und auf einem zweidimensionalen Detektor aufgezeichneten gebeugten Röntgenstrahlen. Die Aufzeichnung und Auswertung der Beugungserscheinungen dient der Gewinnung eines Rückschlusses über den atomaren Aufbau des Kristalls, vergleichbar mit einem Fingerabdruck des Materials. Die Messung der abgelenkten Strahlung erfolgt an der SCS-Experimentierstation mittels eines kommerziellen Hochgeschwindigkeitsdetektors, dessen Sensor nach dem Prinzip des Charge-Coupled-Device (CCD) funktioniert. Das Betreiben dieses „FastCCD“ genannten Detektors vollzieht sich in einer Ultrahochvakuumumgebung (UHV). Zwischen den einzelnen Messungen ist der Detektor zum Stahl und zur Probe mit höchster Präzision $\left(+/ - 5 \frac{\mu m}{m} \right)$ auszurichten, was aus Sicherheitsgründen motorisiert erfolgen muss. Um eine hohe Datenqualität während eines Experiments zu erreichen, darf sich der Detektor während der tatsächlichen Messung nicht bewegen. Nach einem erfolgreichen Experiment werten Wissenschaftler die gesammelten Daten aus und publizieren diese im Anschluss [31, 39].

1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Das Ziel der Arbeit umfasst die Integration des FastCCD-Detektors in die SCS-Experimentierstation. Dafür ist ein Unterbau zu entwickeln, der fünf motorisierte Freiheitsgrade besitzt und die geometrischen und technischen Anforderungen des Experiments erfüllt. Die Abschnitte 3.1.1 und 3.1.2 erläutern diese Randbedingungen näher. Zusätzlich ist ein Festigkeitsnachweis der Konstruktion mit den auftretenden Belastungen durchzuführen.

Die Masterarbeit besteht aus sechs Kapiteln. Das erste Kapitel beschreibt die Motivation, das Ziel und den Aufbau dieser Ausarbeitung. Das zweite Kapitel befasst sich im Wesentlichen mit drei Hauptthemen:

Im ersten Thema steht die Vakuum Thematik im Fokus. Dafür kommt es zur Vorstellung der Forschungseinrichtung „European XFEL“ und des SCS-Instruments. Im Anschluss findet die Einführung des Prinzips eines Beugungsexperiments anhand des Spezialfalles der „spekularen Beugung“ statt.

Als Beispiele für andere mögliche Experimente dienen zusätzlich die Erwähnung und Erläuterung der Vorwärtsstreuung und der Spektroskopie. Ebenfalls kommt es zur näheren Betrachtung der Funktion des FastCCD-Detektors. Im Weiteren schließt sich die Beschreibung des Ablaufes an, der eine UHV-Umgebung erzeugt. Ein wichtiger Bestandteil dieses Herganges ist das vakuumgerechte Konstruieren. Das zweite Thema erläutert die technischen Komponenten, mit denen eine kontrollierte Bewegung erfolgen kann. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Umwandlung einer Rotation in eine translatorische Bewegung. Daran schließen sich die Erläuterungen der Komponenten an, die ein Drehmoment erzeugen und die Position des Systems ermitteln. Den Abschluss des zweiten Kapitels bilden die Grundlagen einer Risikobeurteilung.

Das dritte Kapitel beschreibt die Anforderungen und die geometrischen sowie technischen Randbedingungen.

Den Hauptteil der Arbeit bildet das vierte Kapitel. Hier kommt es im ersten Schritt zur Auslegung der Turbomolekularpumpen. Anschließend steht die Ermittlung der Kräfte und Momente an, welche auf die einzelnen Bauteile wirken. Die nächsten Schritte beinhalten das Beschreiben der einzelnen Konzepte und der technischen Umsetzungen der einzelnen Freiheitsgrade. Dabei findet für alle systemrelevanten Bauteile die Durchführung eines Festigkeitsnachweises statt. Nach der Entwicklung der einzelnen Baugruppen folgt das Zusammenfügen dieser zu einer Hauptgruppe „FastCCD“. Den Schluss des vierten Kapitels bildet eine Zusammenfassung und Bewertung der gesamten entwickelten Konstruktion.

Das vorletzte, fünfte Kapitel enthält die Durchführung einer Risikobeurteilung gemäß Maschinenrichtlinie 2006/42/EG. Alle Gefährdungen wurden identifiziert, bewertet und gegebenenfalls reduziert.

Das letzte, sechste Kapitel umfasst eine Zusammenfassung der Arbeit und vermittelt einen Ausblick in die Zukunft.

2 Grundlagen

Dieses Kapitel befasst sich mit den theoretischen, für die Erfüllung der Anforderungen notwendigen Grundlagen. Um diese Anforderungen besser zu verstehen, kommt es zur Vorstellung des Forschungsinstituts European XFEL und des SCS-Instruments mit den dort möglichen Experimenten. Anschließend folgt die Erläuterung des verwendeten Detektors. Dazu wird speziell auf die Vakuumtechnik eingegangen. In Anschluss findet im Abschnitt Mechanik die Beschreibung der technischen, in der Konstruktionsphase verwendeten Komponenten statt. Zuallerletzt steht eine Erläuterung der Grundlagen einer Risikobeurteilung an.

2.1 European XFEL GmbH

Der European XFEL ist eine internationale Forschungseinrichtung, an der derzeit zwölf zumeist europäische Länder beteiligt sind. Dabei hält Deutschland als Standort 58 % und Russland als zweitgrößter Geldgeber 27 % der Anteile [37].

Die am European XFEL erzeugte Strahlung ist derzeit einzigartig. Durch die Erzeugung von 27 000 Lichtblitzen pro Sekunde mit einer Leuchtstärke, welche milliardenfach höher ist als die der besten Röntgenstrahlungsquellen herkömmlicher Art, ergeben sich für Wissenschaftler aus aller Welt neue Forschungsmöglichkeiten. Mit der Durchführung von Experimenten am European XFEL können Wissenschaftlerteams die atomaren Details von Viren und Zellen entschlüsseln, dreidimensionale Aufnahmen von Nanostrukturen erzeugen sowie extreme Materialzustände untersuchen [37].

Die European XFEL GmbH betreibt die hochmoderne Forschungseinrichtung, die eine gemeinnützige Gesellschaft ist, welche mit ihrem Hauptgesellschafter, dem Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY), kooperiert. European XFEL beschäftigt mehr als 400 Mitarbeiter aus der ganzen Welt [37].

Der Aufbau der Forschungseinrichtung European XFEL ist in drei Hauptteile unterteilt. Der erste Hauptteil ist ein 1,7 Kilometer langer Teilchenbeschleuniger, der seinen Anfang auf dem DESY Gelände im Bahrenfeld hat. In der Praxis kommt es beim European XFEL nur zur Beschleunigung von Elektronen. Auf dem DESY Gelände werden Elektronen in Paketen auf hohe Energien und damit fast auf Lichtgeschwindigkeit gebracht. Wichtige Bestandteile von Teilchenbeschleunigern sind dabei die sogenannten Resonatoren, die mithilfe von schwingenden Mikrowellenfeldern ihre Energie auf die Elektronen übertragen und sie damit beschleunigen. Die Resonatoren bestehen aus dem Werkstoff Niob, der bei einer Betriebstemperatur von -271 Grad Celsius seinen elektrischen Widerstand verliert, wodurch es zur Übertragung der eingekoppelten elektrischen Leistung mit einem extrem hohen Wirkungsgrad auf die Teilchen kommt [37].

Im zweiten Hauptteil durchlaufen die beschleunigten Elektronen die sogenannten „Undulatoren“. Die Undulatoren besitzen eine spezielle Magnetanordnung, die die lichtschnellen Elektronen auf einen Slalomkurs bringen. Dadurch senden diese Elektronen Röntgenlicht aus, das sich durch die periodische Anordnung der Magnete immer weiter verstärkt. Der quadratische Verstärkungsfaktor entsteht durch die resonante Wechselwirkung des Röntgenlichts mit den Elektronen. Die Elektronen finden ihre Beeinflussung durch das elektrische Feld des von ihnen erzeugten Lichts, wobei bei manchen Elektronen eine Beschleunigung und bei anderen eine Abbremsung erfolgt. Dabei ordnen sich die Elektronen in dünne Scheiben hintereinander in den Minima des elektrischen Feldes an und strahlen im Gleichtakt. Das ist der Ausgangspunkt für die Entstehung von kurzen und intensiven Röntgenblitzen. Der Beschleuniger des European XFEL kann zehn Pulsfolgen pro Sekunde liefern, wobei jede Pulsfolge aus 2 700 Elektronenscheiben besteht. Als Ergebnis entsteht das Alleinstellungsmerkmal für European XFEL von 27 000 extrem brillanten Röntgenblitzen pro Sekunde. Ein Beschleuniger kann seine 27 000 Pulse aufteilen und damit mehrere Undulatoren gleichzeitig bedienen mit dem Ziel des Sendens von Elektropaketen in verschiedenen Photonentunneln, wobei gleichzeitig Experimente stattfinden können [27, 37].

Abbildung 2.1 zeigt den unterirdischen Tunnelverlauf. Zum jetzigen Zeitpunkt gibt es drei, jeweils mit „SASE“ bezeichnete Photonentunnel. Jede SASE erzeugt mittels eines speziellen Undulators eine maßgeschneiderte Röntgenstrahlung mit den von den Wissenschaftlern gewünschten Eigenschaften. Das Ende jeder SASE bilden immer zwei Hütten. Die erste Strahlenschutzhütte (sog. Experimentierhütte) beinhaltet den Aufbau der jeweiligen Experimente mit ihren Probenmanipulatoren und Detektoren. In der zweiten Hütte befinden sich die das Experiment fernsteuernde Elektronik und die Computer. Die Experimente sind unterschiedlich und entsprechend der genauen wissenschaftlichen Fragestellung aufgebaut. Im Strahlbetrieb hat jedes Experiment an einer SASE innerhalb von 24 Stunden jeweils zwölf Stunden Messzeit am Stück. European XFEL betreibt zurzeit folgende wissenschaftliche Instrumente:

- SPB/SFX – Single Particles, Clusters and Biomolecules & Serial Femtosecond Crystallography
 - hauptsächlich der strukturellen Untersuchung von biologischen Proben gewidmet
- FXE – Femtosecond X-ray Experiments
 - Untersuchung von ultraschnellen chemischen Reaktionen und anderen Phänomenen
- MID – Material Imaging and Dynamics
 - Untersuchung von Materialien mit harter Röntgenstrahlung
- HED – High Energy Densities
 - Untersuchung von Materie unter extremen Bedingungen (Temperatur & Druck)

- SQS – Small Quantum Systems
 - Grundlagenforschung von atomaren und molekularen Systemen
- SCS – Spectroscopy and Coherent Scattering
 - Materialforschung mit weicher Röntgenstrahlung mittels Spektroskopie, direkter Bildgebung und Beugung

Innerhalb dieser Arbeit kommt es zum Entwurf eines Systems für das SCS-Instrument, welches zum Photonentunnel SASE 3 gehört. Die Vorstellung des SCS-Instruments erfolgt in Abschnitt 2.2. Für einen Überblick über die weiteren Instrumente erfolgt ein Verweis auf die Homepage des European XFEL [49].

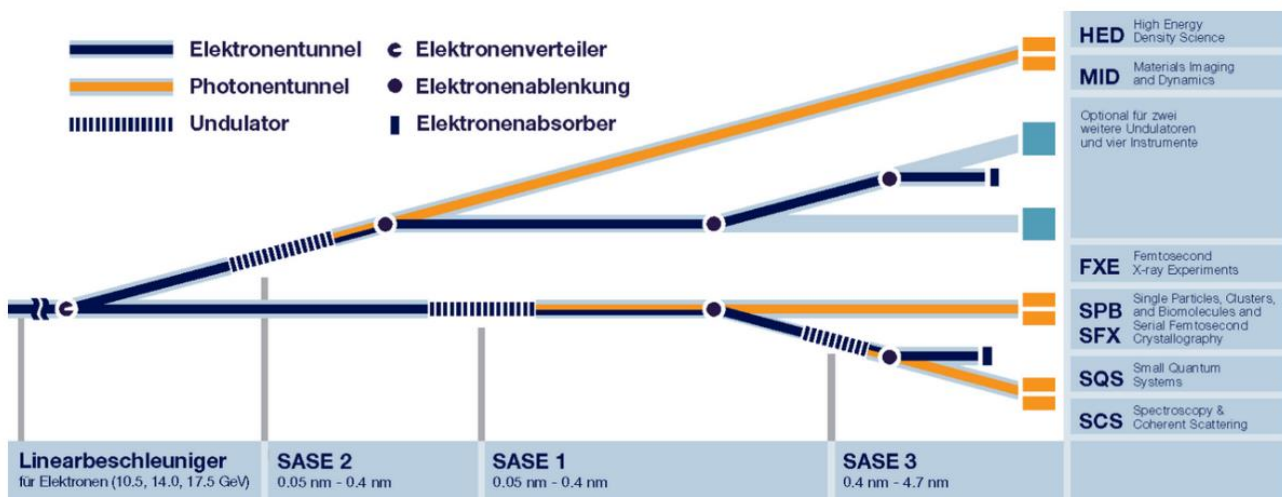


Abbildung 2.1. Unterirdischer Tunnelverlauf [37]

Vor der Definition des SCS-Instruments sind das Koordinatensystem sowie die Grundbegriffe einzuführen, welche bei der Auslegung von Komponenten eine wichtige Rolle spielen. Abbildung 2.2 erklärt die allgemeine Ausrichtung des Koordinatensystems beim European XFEL. Die Z-Achse (Himmelsrichtung West ist +) definiert dabei die Strahlrichtung. Die vertikale Richtung beschreibt die Y-Achse (+ Richtung ist nach oben). Die horizontale Richtung quer zur Strahlrichtung ist die X-Achse (+ = Süd). Alle Konzepte und Berechnungen in dieser Arbeit haben dieses Koordinatensystem als Grundlage [12, 45].

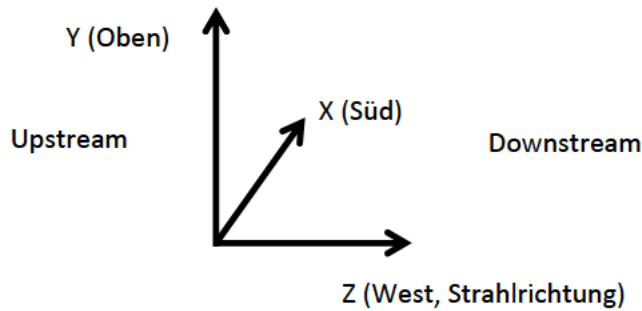


Abbildung 2.2. Ausrichtung des Koordinatensystems (XFEL) [45]

Zusätzlich kommt es noch zur Verwendung der Begriffe „downstream“ für in +Z Richtung und „upstream“ für in -Z Richtung. Angelehnt sind diese an die deutschen Begriffe stromauf- und -abwärts. Dabei ist der Strom der Photonen aus Richtung des Beschleunigers kommend und in Richtung des Detektors fließend gemeint. Der Detektor schaut demzufolge in Richtung upstream, die Strahlung verlässt die Vakuumprobenkammer in Richtung downstream [45].

2.2 SCS-Instrument

Die SCS-Experimentierstation ermöglicht die Beobachtung von elektronischen, magnetischen und strukturellen Veränderungen von weicher Materie wie Flüssigkeiten, Polymeren und biologischen Materialien, von magnetischen Materialien oder von Festkörperproben. Das SCS-Instrument arbeitet mit einem weichen Röntgenstrahl, der eine räumliche Auflösung von bis zu zehn Nanometern ermöglicht. Der nachstehende Abschnitt beschreibt grob den Ablauf eines SCS-Experiments [37, 39].

Das ganze SCS-Experiment wird in einer Ultrahochvakuumumgebung von min. 1×10^{-6} mbar bis max. 1×10^{-9} mbar betrieben. Der Einbau der zu untersuchenden Probe vollzieht sich in der Forward-scattering Fixed-Target Probenkammer, der sogenannten „FFT“, in einer speziellen Halterung. Die Bewegung dieser Probenhalterung in der Probenkammer kann zusätzlich in drei Freiheitsgraden translatorisch und in zwei Achsen rotatorisch erfolgen, um die Probe mit höchster Präzision zum Röntgenstrahl auszurichten. Im weiteren Verlauf der Justage erzeugt das Alignment Laser System (ALAS) einen sichtbaren Laserstrahl, der die genaue Position des Röntgenstrahls innerhalb des Experiments wiedergibt. Anhand des simulierten Röntgenstrahls kommt es anschließend zur Ausrichtung der Probe mittels der vorhandenen Freiheitsgrade zum Laserstrahl. Ein Vorteil des Systems besteht in der Möglichkeit, vor dem Beginn des Experiments alle relevanten Komponenten schon optimal zum Strahl auszurichten, und in der Einsparung von wertvoller Strahlzeit für die eigentlichen Messungen. Der nächste Schritt bestrahlt die Probe mit dem Röntgenstrahl. Ein Detektor zeichnet die von der Probe abgegebene Strahlung. Die Datensätze werden gesichtet, vorläufig ausgewertet, um das Experiment ggf. noch zu verbessern, und dann abgespeichert, um im Anschluss ausführlich analysiert und in entsprechenden Fachzeitschriften publiziert zu werden.

Das SCS-Instrument besteht aus weiteren Komponenten. Es folgt eine stichwortartige Erläuterung derselben und ihre Darstellung in der Abbildung 2.3:

- The Alignment Laser System: Es erzeugt einen sichtbaren Laserstrahl, welcher kollinear zum Röntgenstrahl verläuft. Mittels des Laserstrahls vollzieht sich das Justieren sämtlicher relevanter Komponenten vor dem Beginn des Experiments.
- Differential Pumping System (DPS1 + DPS2): Stufenweise Erhöhung oder Senkung des Vakuumdrucks im Instrument, um den X-Ray Gas Monitor betreiben zu können.
- X-Ray Gas Monitor (XGM): Gasbasierte Bestimmung der Intensität, der Wellenlänge und der Position des Röntgenstrahls für jeden der verwendeten 27 000 Pulse pro Sekunde.
- Kirkpatrick-Baez Focussing System (KBS): Fokussierung und Umlenkung des Röntgenstrahls in der vertikalen sowie horizontalen Ebene.
- Laser In-Coupling (LIN): Einkopplung eines IR-Lasers aus dem Laserraum in das SCS-Instrument zur Erzeugung spezieller Probenbedingungen. Der Laserstrahl und der Röntgenstrahl verlaufen dann kollinear.
- The Forward Scattering Fixed Target Chamber (FFT): In dieser Kammer wird die Probe eingebaut und zum Röntgenstrahl ausgerichtet.
- Rohrsektion 2.0: Verbindungskomponente, die aus Rohren besteht. Zum jetzigen Zeitpunkt dient diese Komponente als Platzhalter. Später besteht die Möglichkeit, hier weitere Komponenten hinzuzufügen.
- Transmission Intensity Monitor (TIM): Messung der Strahlintensität nach der Probe

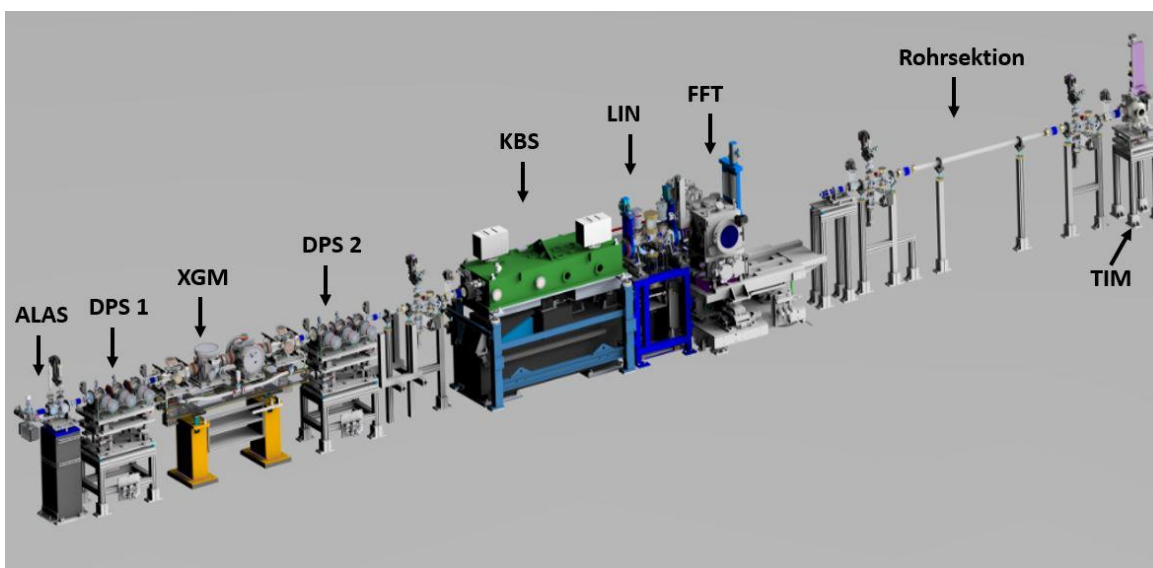


Abbildung 2.3. Komponenten in der Strahlführung des SCS-Instruments

2.3 Röntgenexperimente an SCS

Dieser Abschnitt der Arbeit stellt einige exemplarische, an der SCS-Experimentierstation durchzuführende Experimente vor. Zurzeit kommt es hauptsächlich zur Realisierung von drei Arten von Experimenten [39]:

1. Beugungsexperimente in spekulärer Geometrie zur Untersuchung der Struktur von Materie
2. Experimente in der Geometrie der Vorwärtsstreuung zur Untersuchung magnetischer Eigenschaften
3. Spektroskopische Experimente zur Untersuchung der chemischen Eigenschaften von Festkörpern

2.3.1 Beugung erklärt am Spezialfall der spekularen Geometrie

Eine kristalline Probe wird mit Röntgenstrahlung beschossen. Durch die Kristallstruktur werden die Strahlen abgelenkt und vom Detektor aufgezeichnet. Ein idealer Kristall besteht aus dreidimensionalen Bausteinen (Basis) in einer unendlich ausgedehnten und immer gleichen (homogenen) periodischen Anordnung (Gitter). Zusätzlich können die Eigenschaften des Kristalls richtungsabhängig (anisotrop) sein. Abbildung 2.4 verdeutlicht den Aufbau eines Kristalls. Alle denkbaren Kristallstrukturen lassen sich mittels eines von 14 verschiedenen Standardgittern darstellen. Diese Gittertypen finden Bezeichnung als „Bravais-Gitter“ [46].

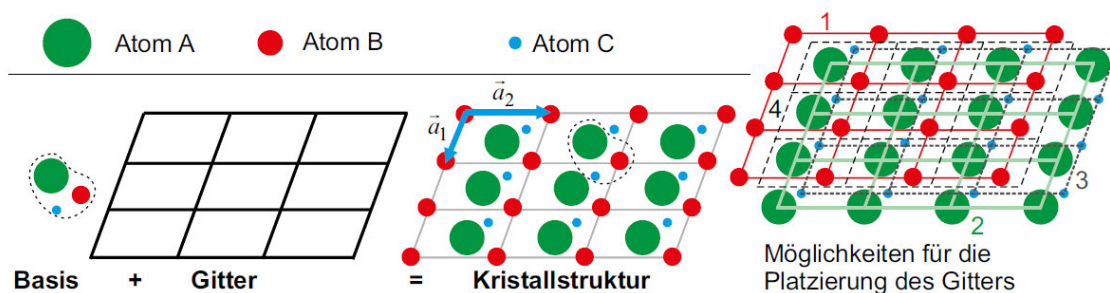


Abbildung 2.4. Darstellung einer Kristallstruktur aus Basis und Gitter [46]

Abbildung 2.5 stellt den Vorgang der Beugung verdeutlicht dar, wenn Röntgenstrahlung auf einen Kristall trifft. Die Strahlen durchdringen die obersten Mikrometer der Probe und erzeugen an den Elektronen der Gitteratome neue Röntgenstrahlen. Es findet ein Abstrahlen derselben in alle Richtungen und ein Interferieren mit den von benachbarten Atomen abgegebenen Strahlen statt. Zur Beugung kommt es immer dann, wenn bei der Überlagerung die „Bragg-Gleichung“ erfüllt ist. Die Ermittlung des Abstandes (d) der Netzebenen vollzieht sich mittels der Gleichung (2.1). Der erzeugte Röntgenstrahl trifft mit einer bekannten Wellenlänge (λ) und einem definierten Einfallswinkel (Θ) auf die Netzebene. Die Bragg-Gleichung ist genau dann erfüllt, wenn der Wegunterschied der an zwei

benachbarten Netzebenen gestreuten Röntgenstrahlen $2d \sin(\theta)$ exakt einem Vielfachen der Wellenlänge ($n \cdot \lambda$) entspricht. Das ist nur bei ganz speziellen Fällen des Einfallswinkels (θ) gegeben. Die Beugung des Strahles vollzieht sich dann mit dem gleich großen Ausfallwinkel (θ). In der Summe kommt es damit zur Ablenkung der Strahlung um den Winkel 2θ zur Originalrichtung. Nur unter diesem Winkel geschieht eine als konstruktive Interferenz bezeichnete Verstärkung. Bei allen anderen Winkeln entsteht eine destruktive Interferenz, bei der sich die Wellen gegenseitig auslöschen. Mit der Kenntnis der Röntgenwellenlänge und der Messung des Beugungswinkels 2θ lässt sich nun der Netzebenenabstand und damit die Gitterkonstante des untersuchten Kristalls exakt bestimmen [31].

$$n\lambda = 2d \sin(\theta) \quad (2.1)$$

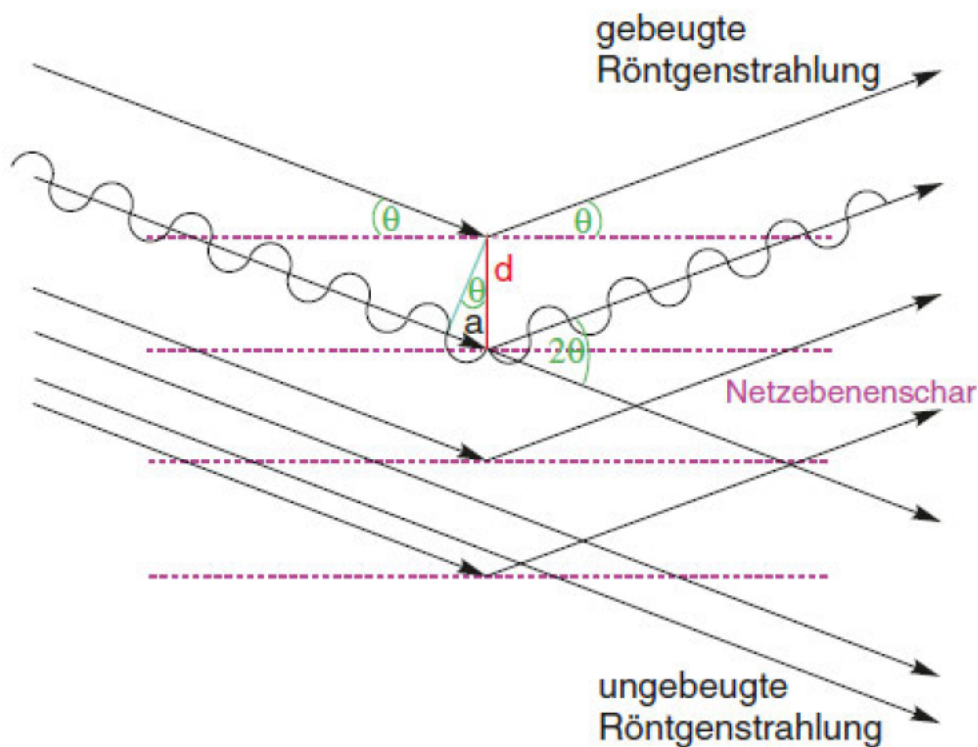


Abbildung 2.5. Darstellung des Prinzips der Beugung von Röntgenstrahlung an den Netzebenen eines Kristalls [31]

Bei einem entsprechenden Experiment ist die Wellenlänge der verwendeten Röntgenstrahlung exakt bekannt. Die Probe wird nun relativ zum einfallenden Röntgenstrahl gedreht, bis die Bragg-Bedingung erfüllt ist und der Detektor die gebeugte Strahlung detektiert. In dieser Geometrie ist es jetzt möglich, die Probe zum Beispiel durch das Beleuchten mit einem leistungsstarken Laser zu erwärmen, und die Änderung der Gitterkonstanten in Abhängigkeit von der Beleuchtungsenergie zu messen. Eine spezielle Software dient der Auswertung der gemessenen Datensätze. Abschnitt 2.4 stellt den hierfür verwendeten Detektor vor [31].

2.3.2 Beugung in Vorwärtsstreuung

Die Laue-Gleichung (2.1) beschreibt Beugungsexperimente in Vorwärtsstreuung. Auch hier interferieren die von den Elektronen der Gitteratome gestreuten Röntgenstrahlen nur unter bestimmten Winkeln konstruktiv und löschen sich ansonsten aus. Experimente in dieser Geometrie sind nur mithilfe von dünnen und damit transparenten Proben möglich, da die verwendete weiche Röntgenstrahlung sonst von der Probe vollständig absorbiert würde und keine messbare Strahlung mehr am Detektor ankäme. Ein Vorteil der Geometrie bei der Verwendung eines zweidimensionalen Detektors ist die gleichzeitige Aufnahme von Informationen aus zwei Kristallrichtungen. Abbildung 2.6 verdeutlicht grafisch das Experiment und dient zur geometrischen Herleitung der Laue-Gleichung für den Fall der konstruktiven Interferenz. Ein Röntgenstrahl bestrahlt eine Probe. Der einfallende Strahl ist als Vektor $\underline{k}_0$ definiert. Trifft der Röntgenstrahl auf die Probe, kommt es anschließend zur Streuung desselben durch die Kristallstruktur und zur Beschreibung des Vektors $\underline{k}_s$. Dabei gilt: $|\underline{k}_0| = |\underline{k}_s| = \frac{2\pi}{\lambda}$. Mittels der geometrischen Gegebenheiten lässt sich die erzeugte Streuung nach der Gleichung (2.2) bestimmen [31].

$$|\underline{Q}| = Q = 2|\underline{k}_0| \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right) = \frac{4\pi}{\lambda} \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right) \quad (2.2)$$

Ein Detektor nimmt die entstehende Streuung anschließend auf. Die Winkel der gebeugten Strahlen geben nun Auskunft über die Struktur der Probe in den beiden Richtungen senkrecht zum Röntgenstrahl.

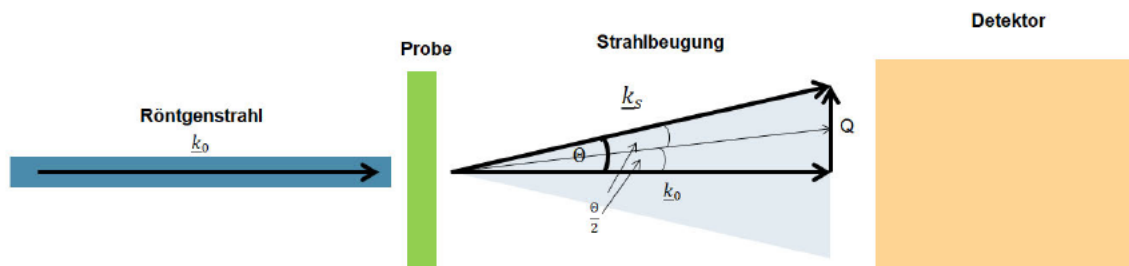


Abbildung 2.6. Allgemeiner Aufbau eines Vorwärtsstreuungs-Versuchs

2.3.3 Röntgenspektroskopie

Abbildung 2.7 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Spektroskopieexperiments. Die Spektroskopie untersucht frequenzabhängige Wechselwirkungen zwischen der Strahlung und einem Werkstoff.

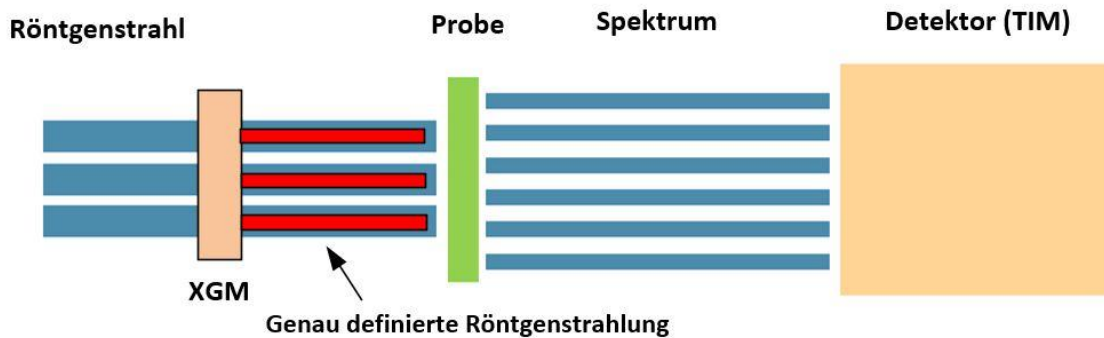


Abbildung 2.7. Allgemeiner Aufbau eines Spektroskopie Experiments

Während eines Spektroskopieexperiments bei SCS trifft der ankommende Röntgenstrahl auf die XGM Komponente. Mittels eines Gasbasierten Verfahrens findet die Ermittlung der genauen Intensität, des Wellenspektrums und der Position des Röntgenstrahles statt. Anschließend beleuchtet die genau charakterisierte Röntgenstrahlung die Probe. Zu unterscheiden sind Absorptions- und Emissionsexperimente. Bei Ersteren kommt es zur Verwendung eines kontinuierlichen Bereiches von Wellenlängen zur Bestrahlung der Probe. Fällt das Licht auf die Atome der Probe, kann es bei bestimmten Wellenlängen zur Absorption kommen. Ein hinter der Probe platzierter Detektor (TIM) würde dann im aufgezeichneten Spektrum eine Lücke bei genau der Wellenlänge messen. Bei der Emissionsspektroskopie besteht sowohl die Möglichkeit der Verwendung eines Kontinuums als auch eines monochromatischen Röntgenlichtes. Das einstrahlende Licht regt einen elektronischen Übergang in der Elektronenhülle der Atome in der Probe an. Nach der kurzen Lebensdauer des angeregten Zustands emittiert das Atom wieder ein Röntgenquant, das eine andere Wellenlänge als die einfallende Strahlung haben kann. Der Detektor nimmt diese auf. Für beide Arten von Experimenten ist es unverzichtbar, mit einem Detektor (hier XGM) die genaue spektrale Verteilung des auf die Probe einfallenden Lichts zu kennen. Die Differenz der beiden Spektren (vor und hinter der Probe) ist das eigentliche Messsignal, das Aufschluss über die elektronische Struktur der Probe gibt. Ein Detektor (TIM) kann anschließend das erzeugte Spektrum aufzeichnen [39].

2.4 FastCCD-Detektor

Ein zweidimensionaler Detektor zeichnet die auftretenden Wechselwirkungen zwischen den Röntgenstrahlen und der Probe auf. Der Hauptbestandteil des eingesetzten Detektors ist der CCD-Sensor. Dieser setzt sich aus einer Matrix von Metall-Oxid-Halbleitern (*MOS*) Kondensatoren zusammen. Die Sensorebene besteht aus vertikal angeordneten Pixeln. Drei oder vier Pixel bilden die Grundeinheit des vertikalen Schieberegisters. Zusätzlich sind die Grundeinheiten parallel auf der Sensorebene angeordnet. Mittels eines horizontalen Schieberegisters (Auslesungsregister), welches mit jedem vertikalen Schieberegister verbunden ist, findet die Auslesung statt. Die einfallenden Photonen lösen die Elektronen aus der Gitterstruktur des Halbleiters aus dem sogenannten Valenzband und wandern zum Leitungsband. Die übergangenen Elektronen können sich frei in der neuen Gitterstruktur bewegen. Durch die fehlenden Elektronen im Valenzband entstehen Löcher und ein positives Potenzial. Die Anlegung eines elektrischen Feldes an den CCD-Sensor verhindert eine Rekombination der Elektronen-Loch-Paare. Das Auslesen des Ladungsmusters vollzieht sich anschließend mittels der passenden Ansteuerung des Ladungsmusters. Abbildung 2.8 verdeutlicht das Auslesen der Ladungssätze anhand eines Interline-CCD-Sensors. Der erste Schritt beleuchtet den CCD-Sensor. Anschließend folgt das stufenweise Verschieben der Ladungen aus den vertikalen in die horizontalen Schieberegister. Im letzten Schritt findet eine Verstärkung und Auslesung des horizontalen Registers statt. Die erzeugte Elektronenladung steigt linear zur Photonenintensität und der Bestrahlungsdauer. Eine Elektronenerzeugung ist zusätzlich mithilfe von thermisch erzeugten Elektronen möglich. Diese thermisch erzeugten Elektronen bilden die Rauschquelle, bezeichnet als Dunkelstrom oder thermisches Rauschen. In der Auswertung ist ein Unterscheiden der thermisch erzeugten Elektronen von den optisch erzeugten Elektronen nicht möglich. Die Kühlung der CCD-Oberfläche verringert die Intensität des Rauschens [4, 9, 16].

Der eingesetzte CCD-Detektor mit den gelieferten Komponenten ist in Abbildung 2.9 dargestellt. Der Detektor ist an einen Halter montiert, welcher in seiner Geometrie einer Rakete ähnelt. Der Halter ist hohl und enthält in seinem Inneren ein Kupferrohr, das die Wärme vom FastCCD-Detektor abführt. Die Füße des Gestells „Rakete“ werden an einen DN200 Flansch verschraubt. Auf der downstream Seite des DN200 Flansches ist ein Kreuzstück verbaut, auf dem sich ein Kryostat befindet. Im Inneren des Kreuzstückes kommt es zum Verbinden des Kryostaten mithilfe von Kupferelementen mit dem Kupferrohr. Im Betrieb erzeugt der Kryostat Kälte, die die Kupferelemente an den Detektor leiten. Die Kühlung vermindert stark das thermische Rauschen des Detektors. Der DN200 Flansch besitzt zusätzlich Kabeldurchführungen mit der Möglichkeit des Anschlusses an alle elektrischen Anschlüsse des FastCCD-Detektors [26, 53].

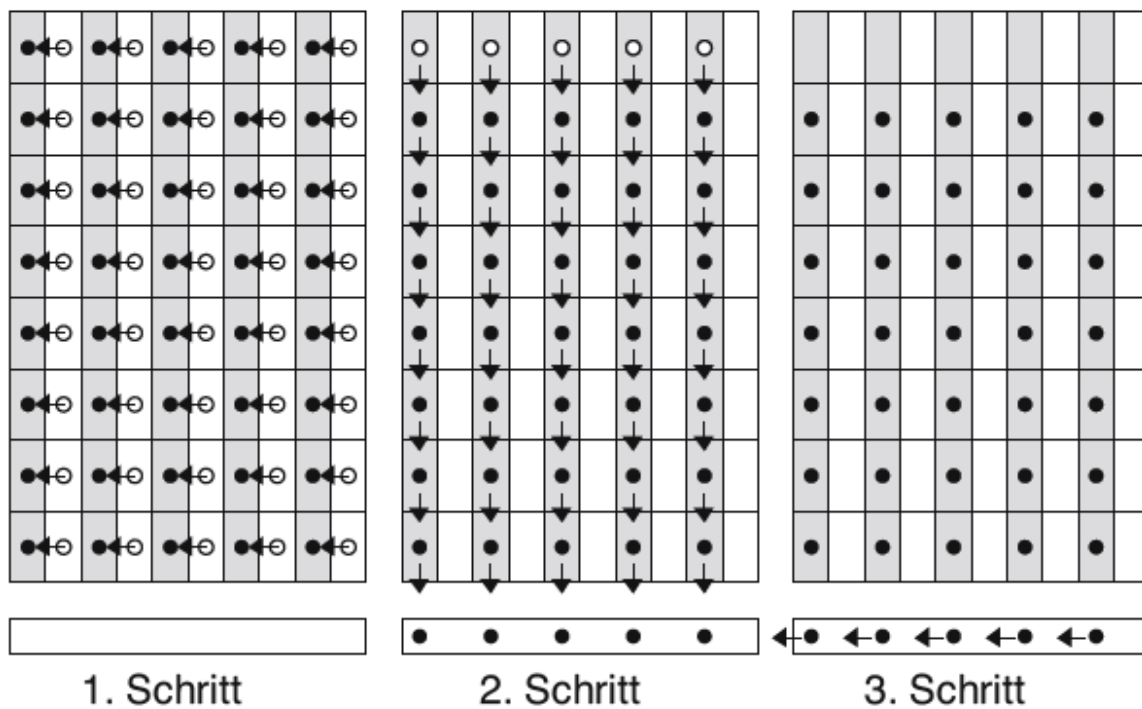


Abbildung 2.8. Auslesung des Ladungsmusters beim Interline-CCD-Sensor [9]

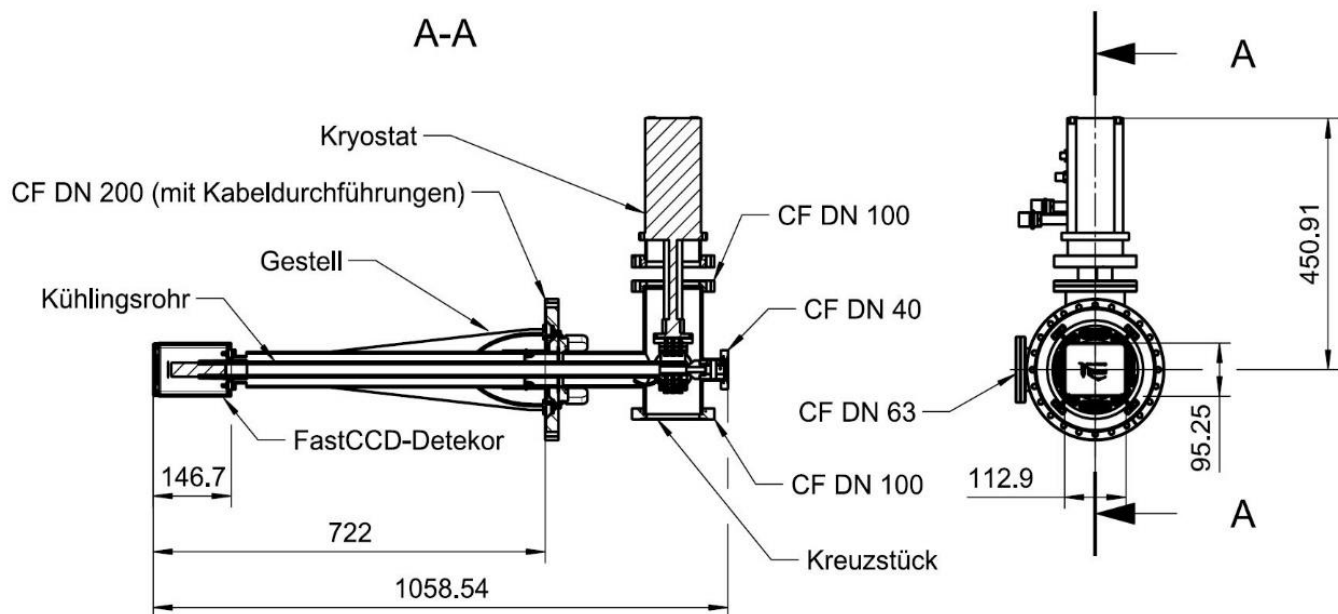


Abbildung 2.9. Schnittdarstellung und Beschriftung der vorhandenen FastCCD-Baugruppe

2.5 Vakuumtechnik

Die Vakuumtechnik spielt in vielen Bereichen der physikalischen Forschung eine große Rolle. Die Erzeugung einer Vakuumumgebung in einer Probenkammer reduziert die Teilchenzahl in dieser um viele Größenordnungen, wodurch ein niedrigerer Druck entsteht. Die geringe Anzahl an Teilchen ermöglicht es der Forschung, an definierten Systemen ohne den störenden Einfluss von Staub, Luftströmungen und Luftfeuchte Experimente wie in Abschnitt 2.3 beschrieben durchzuführen. Insbesondere würde die am SCS-Instrument verwendete weiche Röntgenstrahlung schon durch wenige Meter Luft bei Normaldruck komplett absorbiert. Die komplette Strahlführung ist daher im Ultrahochvakuum auszuführen. Dieser Abschnitt der Arbeit befasst sich mit den Grundlagen der Vakuumtechnik.

2.5.1 Grundlagen Vakuumerzeugung

Der Druck (p) ist als Verhältnis einer wirkenden senkrechten Kraft (F) auf ein Flächenelement (A) definiert. In der Vakuumtechnik ist der „Druck“ in der Regel der absolute Druck. Die Definitionsgleichung (2.3) beschreibt den mathematischen Ansatz. Die Einheit des Druckes ist im internationalen Einheitssystem (SI) angegeben. Ein Pascal (Pa) ist der Druck, welcher durch eine senkrecht wirkende Kraft von 1 Newton (N) auf eine Fläche von 1 m^2 entsteht. In der Vakuumtechnik ist neben Pa die Einheit *bar* bzw. *mbar* üblich [34].

$$p = \frac{F}{A} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (2.3)$$

Der Umgebungsdruck (p_n), welcher durch die vorhandene Luft entsteht, ist der Normaldruck, der nach der „ISO 554, ISO 3529/1, DIN 1343“ definiert ist. Der durchschnittliche Atmosphärendruck auf Meereshöhe entspricht [51, 22, 34]:

$$p_n = 101325\text{ Pa} \quad (2.4)$$

Ein Behälter steht unter Vakuum, wenn der Innendruck oder die Teilchendichte kleiner ist als in der umgebenden Atmosphäre. Die Art des Experiments legt den erforderlichen Druckbereich fest. Dabei gibt es vier Vakuumbereiche, die in Tabelle 1 aufgelistet sind [34].

Tabelle 1. Druckbereiche des Vakuums [34]

Druckbereich	Druck in [mbar]
Großvakuum	$10^3 - 10^0$
Feinvakuum	$10^0 - 10^{-3}$
Hochvakuum	$10^{-3} - 10^{-7}$
Ultrahochvakuum	$10^{-7} - 10^{-12}$

Alle durchgeführten Experimente an dem SCS-Instrument benötigen eine UHV-Umgebung. Um dies zu erreichen, sind gewisse Kriterien bei der Materialwahl und der Konstruktion von Komponenten zu befolgen und bestimmte Maßnahmen bei der Erzeugung und Erhaltung des Vakuums in den Experimentierkammern vorzunehmen. Eine Kernkomponente bei der Erzeugung der UHV-Umgebungen im SCS-Instrument ist die Turbomolekularpumpe. Bei der Erfüllung der richtigen Voraussetzungen kann diese einen Druck von bis zu 10^{-12} mbar erreichen. Bevor die Turbomolekularpumpe startet, ist ein Vordruck von 0,1 mbar bis 0,5 mbar mithilfe von Vorpumpen herzustellen. Dann kann die Turbomolekularpumpe des Typs „HiPace 80“ der Firma Pfeiffer mit der vollen Saugleistung von ~ 67 l/s die Gasmoleküle aus dem Rezipienten abpumpen. Von den Oberflächen der Kammer und der sich in der Kammer befindenden Komponenten desorbieren auch schon bei Raumtemperatur permanent Moleküle und diffundieren in das Kammervolumen. Diese Desorptionsrate ist fast konstant und nimmt nur langsam mit der Verringerung des Teilchenreservoirs auf den Oberflächen ab. In den höheren Druckbereichen ist die Desorption zu vernachlässigen, da diese Zahl in der Zahl der abgepumpten Teilchen (Teilchendichte * 67 l/s) der Turbopumpe verschwindet. Mit fallendem Druck werden aber immer weniger Teilchen pro Saugvolumen der Pumpe abgepumpt und bei einem bestimmten Druck ist ein Gleichgewicht zwischen der momentanen Desorptionsrate und der Saugrate der Pumpe erreicht. Der Druck fällt nun nur noch sehr langsam, da sich die Desorptionsrate mit der Abnahme der zur Verfügung stehenden Teilchen auf den Oberflächen verringert. Um das für einige Experimente notwendige Vakuumniveau zu erreichen, wäre ein Pumpen für mehrere Wochen erforderlich. Die Maßnahme der Wahl ist es nun, die Desorption zu beschleunigen, um bei einem schlechteren Druckbereich die überlegene Saugrate der Turbopumpe zu nutzen. Dazu ist das Vakuumsystem auf ca. 120°C zu erwärmen, wodurch die Desorption im Verhältnis zur Raumtemperatur stark ansteigt und ein zügiges Abpumpen der Teilchen vonstattengehen kann. Die Dauer des Ausheizprozesses ist anhand des Druckes zu definieren, welcher in der Kammer herrscht. Das Heizen ist beendet, wenn der Druck in der Kammer ca. 100-fach des zu erwarteten Enddruckes ist. Nach dem Abkühlen sinkt der Druck um jeweils eine Größenordnung pro 50°C in der Kammer und sollte ungefähr in dem gewünschten Druckbereich liegen. Alle wichtigen Formeln zum Auslegen eines Vakuumsystems sind in Abschnitt 4.1 aufgelistet [33, 34].

Beim Evakuieren einer Kammer kommt es zum Auspumpen von in der Kammer befindlichen Gasgemischen. Nach dem „Daltonschen Gesetz“ und der Gleichung (2.5) ist der Totaldruck (p_{tot}) gleich die Summe der einzelnen Partialdrücke (p_i) der vorhandenen Gase (i).

$$p_{tot} = \sum_i p_i \quad (2.5)$$

Den Partialdruck eines idealen Gases lässt sich mittels der Zustandsgleichung (2.6) berechnen. Dafür sind das Volumen der Kammer (V) und die wirkende Temperatur (T) zu bestimmen. Zusätzlich sind die Teilchenanzahl des Gases (N) und die Boltzmannkonstante (k) vonnöten. Die Boltzmannkonstante ist $1,3806505 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$ und erlaubt die Berechnung der mittleren thermischen Energie eines Teilchens aus der Temperatur [22].

$$pV = NkT \quad (2.6)$$

Zusätzlich zum Einsatz von leistungsstarken Pumpen und dem Ausheizen der Rezipienten sind bei der Konstruktion von Kammern und Komponenten bestimmte Kriterien und Konstruktionsprinzipien zu beachten. Eine Besonderheit bei den Flanschverbindungen von UHV-Rezipienten ist der Einsatz von Kupferdichtringen und die besondere Geometrie der Schneidkanten an den Flanschen. Das eingesetzte Kupfer muss von der Güte Oxygen Free High Conductivity (*OFHC*) sein, welche einen geringen Anteil an Sauerstoff aufweist, was zu einer niedrigen Ausgasrate führt. Ein weiterer Vorteil einer metallischen Dichtung besteht in der Aufheizbarkeit von bis zu $450^\circ C$. Die verwandten ConFlat (*CF*) Flansche besitzen eine spezielle Schneidkanten geometrie, definiert in der ISO 3669:2017. Bei dem Zusammenbau der Flansche verformt sich die Kupferdichtung aufgrund der Schneidgeometrie plastisch. Dementsprechend sind die metallischen Dichtungen nur einmal verwendbar. In Abbildung 2.10 ist die Dichtung und zwei CF-Flansche dargestellt [8, 50, 22].

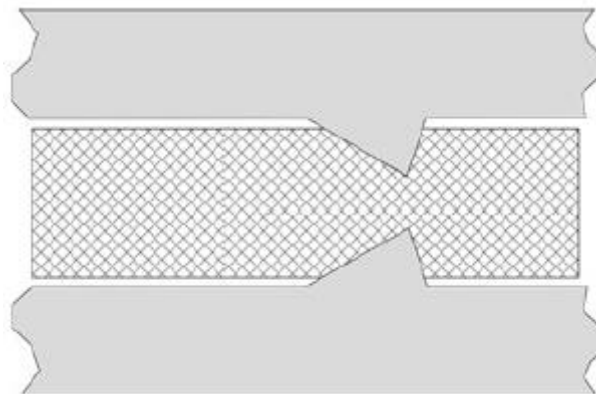


Abbildung 2.10. CF-Flanschverbindung mit einer Metall Dichtung [22]

Beim Anziehen der Schrauben eines CF-Flansches ist eine bestimmte Reihenfolge zu beachten. Diese Systematik hat einen Einfluss auf die Kraftverteilung der Dichtung. Nach dem Anziehen der Muttern müssen mindestens zwei und dürfen nicht mehr als fünf Gewindegänge am Schraubenende überstehen. Durch das Überstehen ist die volle Belastbarkeit der Mutter-Schraube-Kombination gewährleistet. Bei der Verwendung von Gewindestangen sollten die Überstände auf beiden Seiten gleich sein. In der Praxis haben sich zwei Methoden zur Verschraubung bewährt. Die erste Methode schraubt im ersten Schritt alle Schraubenköpfe handfest an die Flanschoberfläche. Anschließend erfolgt eine stufenweise Anziehung der Schrauben im Uhrzeigersinn. Das Anziehen der Schrauben erfolgt solange, bis diese beim geforderten Anzugsmoment sich nicht mehr weiterdrehen lassen. Die zweite Methode zieht die Schrauben über Kreuz an. Dabei ist die Durchführung von drei Durchgängen zu empfehlen. Beim ersten Durchgang werden die Schrauben mit etwa 30 % des Sollanzugsmoments angezogen, anschließend mit 60 % und zuallerletzt mit 100 %. Abbildung 2.11 verdeutlicht die Anziehreihenfolge der Schrauben bei verschiedener Schraubenanzahl [52].

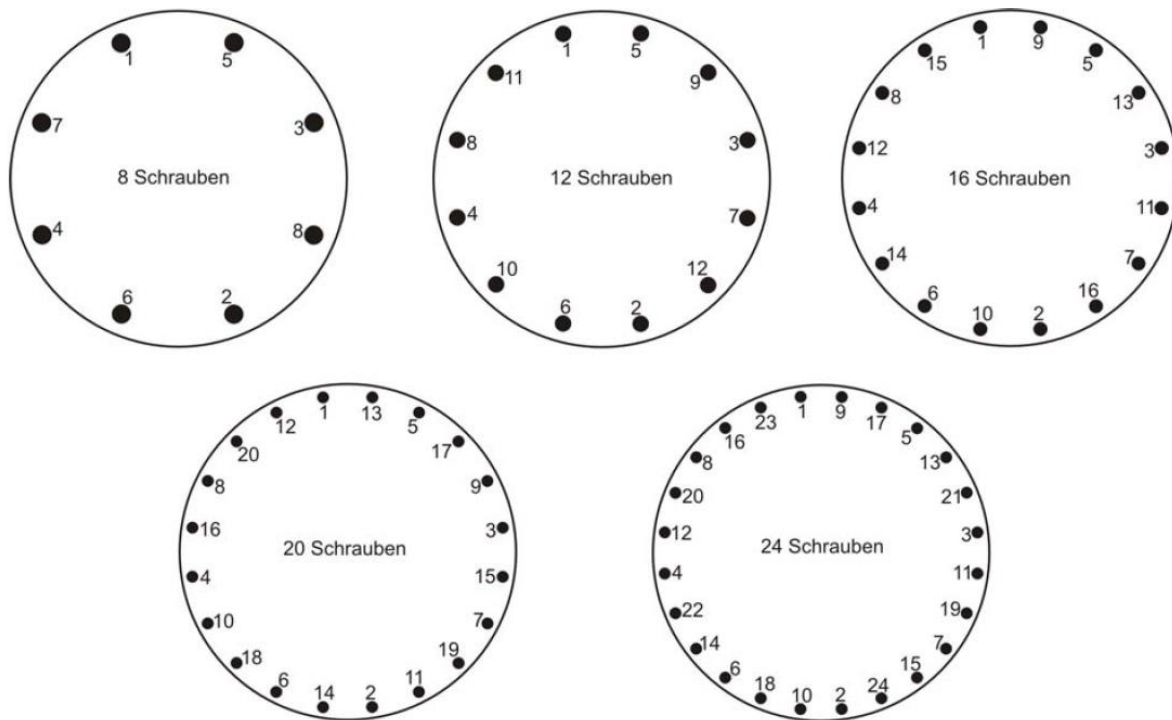


Abbildung 2.11. Kreuzweises Anziehen der Schrauben an einen Flansch [52]

2.5.2 Vakuumgerechtes Konstruieren

Der zweite Teil des Abschnitts „Vakuum“ erläutert das vakuumgerechte Konstruieren näher. Dabei liegt der Fokus bei der Auswahl der Werkstoffe für die Vakuumkammern und der in einer Vakuumumgebung zu verbauenden Komponenten. Die ausgewählten Werkstoffe sollten mehrere technische Anforderungen erfüllen. Das verwandte Material muss eine hohe mechanische Festigkeit über den gesamten Einsatztemperaturbereich besitzen, da der Umgebungsdruck auf eine evakuierte

Kammer mit der Fläche von 1 m^2 eine Kraft von $100\,000 \text{ N}$ nach der Gleichung (2.3) ausübt. Zusätzlich besteht die Möglichkeit einer temporären Ausheizung der Komponenten, um einen niedrigen Druck zu erreichen, wie in Abschnitt 2.5.1 beschrieben. Aus diesem Grund muss der Werkstoff zusätzlich eine gute Temperaturwechselbeständigkeit sowie ein angepasstes Ausdehnungsverhalten aufweisen. Das verwandte Material muss eine hohe Gasdichtheit besitzen. Weiterhin sollte das Material einen geringen Fremdgasgehalt besitzen, um die Ausgasrate nicht zu erhöhen. Beim Einsatz von Metallen sollten diese korrosionsbeständig sein. Grundsätzlich steigt die Anforderung an das Material, je geringer der Arbeitsdruck ist. Die vorliegende Ausarbeitung betrachtet die Anforderungen für die im Ultrahochvakuum eingesetzten Werkstoffe. Der allgemeine Baustahl S235 oder S355 kann in Vakuumanwendungen bis zu 10^{-6} mbar Verwendung finden. Für UHV Anwendungen ist dieser ungeeignet, da durch das Ausheizen der Kammer eine Gasabgabe durch den Kohlenstoff (CO) im Stahl kommt [22].

Durch die Verwendung von Edelstahl ist es möglich, einen Betriebsdruck niedriger als 10^{-6} mbar zu erreichen. Edelstahl besitzt eine gut passivierte Oberflächenstruktur, welche einen Schutz gegen Korrosion bietet. Ein weiterer Vorteil der Edelstahlgruppe sind die verschiedenen technischen Eigenschaften. Je nach Güte besitzt Edelstahl eine hohe Festigkeit. Die Werkstoffe lassen sich bis zu 300° C aufheizen. Das Material darf unter Umständen nur eine niedrige magnetische Permeabilität aufweisen oder muss sogar amagnetisch sein. In Tabelle 2 sind die Edelstahlwerkstoffe aufgelistet, welche die größte Verbreitung in der Vakuumtechnik haben. Die aufgelisteten physikalischen Eigenschaften treten bei einer Temperatur von 20° C auf [22, 33].

Tabelle 2. Kennwerte von Edelstahlwerkstoffen [20, 19, 18]

Normen und Bezeichnung		Zugfestigkeit (R_m) $\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\right]$	Elastizitätsmodul (E) $\left[\frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}\right]$	Spezifische Wärme $\left[\frac{\text{J}}{\text{kgK}}\right]$	Wärmeleit- fähigkeit $\left[\frac{\text{W}}{\text{mK}}\right]$
DIN EN 10088	AISI				
1.4306 (X2CrNi19-11)	304L	460-680	200	500	15
1.4404 (X2CrNiMo17-12-2)	316L	500-700	200	500	15
1.4429 (X2CrNiMoN17-12-3)	316LN	580-800	200	500	15

Ein weiterer möglicher Werkstoff ist Aluminium. Aluminium hat eine ausreichende Festigkeit und ist im Verhältnis zu Edelstahl deutlich leichter. Beim Einsatz des Werkstoffes für UHV-Bauteile muss die Aluminiumlegierung frei sein von Elementen mit hohem Dampfdruck wie Blei oder Zink. Bevorzugtes Legierungselement ist Silizium mit einem niedrigen Dampfdruck. Der Nachteil von Aluminium ist das Erfordernis einer aufwendigen Bearbeitung aufgrund seiner porösen Aluminiumoxidschicht für die UHV-Anwendung nach der Fertigung. Die große Wärmedehnung ist bei der Auslegung der Bauelemente zusätzlich zu beachten. Tabelle 3 enthält eine Auflistung der in UHV Konstruktionen zu verwendenden Aluminiumlegierungen [22, 33].

Tabelle 3. Eigenschaften von Aluminiumlegierungen [2]

Aluminiumlegierung	Materialschlüssel	Elastizitätsmodul $(E) \left[\frac{kN}{mm^2} \right]$	Zugfestigkeit $(R_m) \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	Wärmeleitung $\left[\frac{W}{mK} \right]$
Al-Mg	5xxx	70	239	141
Al-Mg-Si	6xxx	70	252	181

Titan ist ein weiteres vakuumgeeignetes Material, dessen Dichte zwischen dem des Edelstahls und dem des Aluminiums liegt. Der Kohlenstoffgehalt sollte hier ebenfalls sehr klein sein.

Kupfer ist ein wichtiger Werkstoff in der Vakuumtechnik. Durch seine hohe Wärmeleitfähigkeit und die gute elektrische Leitfähigkeit findet dieses bevorzugt Verwendung in der Kryotechnik. Bei der Verwendung von Kupfer in einer UHV-Umgebung gilt es zu beachten, dass das eingesetzte Kupfer der Güteklasse OFHC (Oxygen Free High Conductivity) ist. Der abgesenkte Sauerstoffgehalt verhindert eine Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser während einer Wärmebehandlung, was sonst das Gefüge im Kupfer sprengen würde [22].

Peek ist ein teilkristalliner thermoplastischer Kunststoff mit sehr guten mechanischen Eigenschaften. Der Werkstoff weist hohe Strahlen- und Chemikalienbeständigkeit sowie eine gute Wärmeformbeständigkeit auf. Im Betrieb ist eine Erwärmung desselben bis zu 260° C möglich. Ein weiterer Vorteil des Peeks ist die gute elektrische Isoliereigenschaft. Peek ist etwa 30 % leichter als Aluminium. Aufgrund der geringen Ausgasrate hat Peek in der Vakuumtechnik eine hohe Verwendung gefunden [7].

Zusammengefasst ist bei der Auswahl der Werkstoffe für Anwendungen im UHV-Bereich außer den allgemeinen Materialeigenschaften wie Festigkeit und Ausdehnungskoeffizienten ein möglichst niedriger Dampfdruck der Materialien zu beachten. Die Werkstoffe dürfen keine Bestandteile wie Blei, Schwefel, Natrium, Kalium, Zinn oder Zink enthalten, welche teilweise schon bei Raumtemperatur verdampfen [22, 33].

Bei der Konstruktion von im Ultrahochvakuum integrierten Bauteilen ist eine Vielzahl an Regeln zu beachten. Die Geometrie der Bauteile soll eine problemlose vakuumgerechte Reinigung (z. B. zur Entfernung von Schmierstoffen) ermöglichen mittels einer Vermeidung von unzugänglichen Volumina. Bei der Montage der Bauteile dürfen Sackbohrungen, Aussparungen oder Nuten nicht verschlossen sein, da es sonst zum sehr langsamen Ausgasen der Luft durch die isolierten Volumina kommen kann. Sollte es konstruktionsmäßig nicht anders möglich sein, sind Schrauben mit einer Durchgangsbohrung oder mit einer größeren Abflachung zu verwenden (Abbildung 2.12 Darstellung A und B). Bei Konstruktionen, in denen ein Volumen eingeschlossen ist, müssen Bohrungen vorhanden sein, wodurch die Gase entweichen können (Abbildung 2.12, Darstellung C). Die Bohrungen in den Elementen finden in der Praxis Bezeichnung als „Entlüftungsbohrung“. Die Oberflächenrauheit der Bauteile darf den arithmetischen Mittenrauwert von $R_a = 3,2 \mu m$ nicht überschreiten, da an einer rauen Oberfläche Fremdpartikel leichter anhaften können [8].

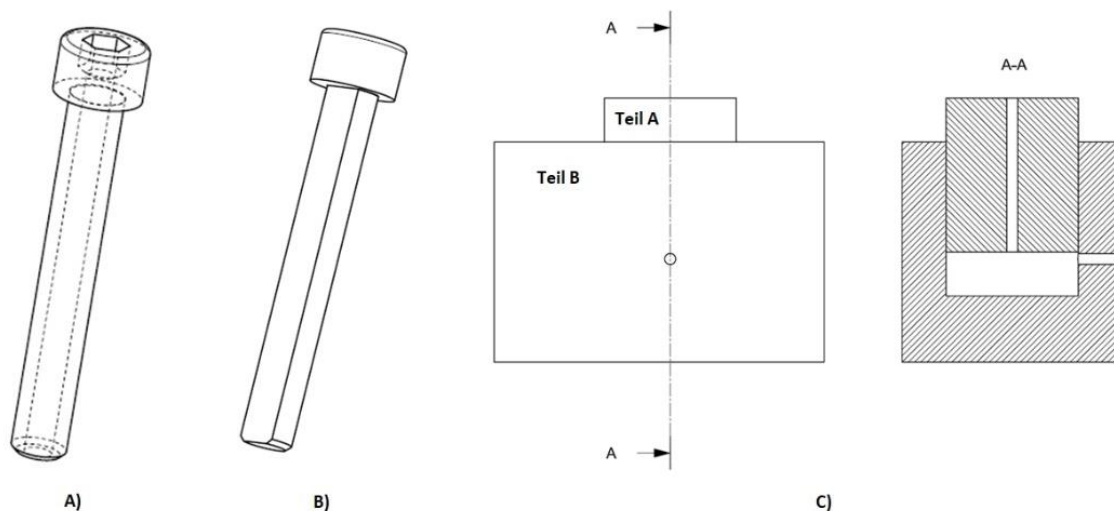


Abbildung 2.12. Darstellung von Konstruktionsregeln für Bauteile im Vakuum

Bei der Montage von mehreren Teilen miteinander müssen die Schnittstellen, demnach die Komponenten und deren Verbindungselemente (z. B. Gewinde und Schraube) aus verschiedenen Werkstoffen bestehen, da es sonst bei der Montage zur Kaltverschweißung kommen kann. Bei im Inneren einer Kammer verbauten Bauteilen ist das Verwenden von folgenden Paarungen möglich:

- Alu Teile mit belüfteten Schrauben aus Edelstahl oder Titan
- Peek Teile mit belüfteten Schrauben aus Edelstahl, Titan oder Alu

Für außerhalb einer Vakuumumgebung verbundene Bauteile ist die Verwendung derselben Verbindungspaare möglich, wobei eine Entlüftungsbohrung selbstverständlich nicht notwendig ist. Eine verbreitete Verbindungsart für Flanschverbindungen sind Edelstahlschrauben mit CuNiSi Muttern. CuNiSi ist eine Kupferlegierung mit einer hohen Festigkeit und guter Korrosionsbeständigkeit.

Sollte es aufgrund der Festigkeit keine Möglichkeit geben, Verbindungspaare mit unterschiedlichen Werkstoffen zu verwenden, so ist die Schraube oder die Mutter zu beschichten. Dafür ist diese mit Silber in einer Schicht von $5\ \mu\text{m}$ zu beschichten [33].

2.6 Mechanik

Dieses Unterkapitel erläutert die Grundlagen der Lineartechnik und beschreibt die Methode des Erzeugens einer translatorischen Bewegung aus einer rotatorischen Bewegung. Im Hinblick auf ein besseres Verständnis für die Lineartechnik erfolgt im ersten Abschnitt die Einführung der Reibung. Es schließt sich die Erklärung der Funktionsweise der Gleitführung sowie der Wälzführung ohne Antrieb an. Des Weiteren folgt die Vorstellung der Spindel als ein Teil des Antriebs. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Kugelgewindetrieben und Trapezgewindetrieben. Abschließend folgt eine Auflistung der wichtigsten Formeln zum Auslegen einer Linearführung. Der zweite Teil des Kapitels Mechanik erläutert die Funktionsweisen der Positionsermittlung und der Schrittmotoren.

2.6.1 Linearführungen

Der Einsatz einer Linearführung kann die vorhandenen sechs Freiheitsgrade eines ungeführten Bauteils auf nur noch einen translatorischen Freiheitsgrad beschränken. Mittels der richtigen Anordnung mehrerer Linearführungen ist es möglich, zusätzlich eine rotatorische Bewegung zu erzeugen. Um die Funktionsweise einer Linearführung zu verdeutlichen, findet als Erstes die Einführung der Reibung statt. In Abbildung 2.13 ist eine Kiste auf einem rauen Untergrund dargestellt. Aufgrund der Masse der Kiste und der Erdanziehung wirkt die Gewichtskraft $G = m \cdot g$ als Normalkraft auf den Boden der Kiste und damit auf den Untergrund. Kommt es nun zur Belastung der Kiste mit einer geringen Zugkraft (F), so bewegt sich diese nicht, da die der Zugkraft entgegengewirkende Haftreibungskraft ($H = G \cdot \mu_0$) größer ist. Dabei ist μ_0 der Haftreibungskoeffizient, der die Verzahnung zwischen dem Kistenboden und dem Untergrund angibt. Die Haftreibungskraft wirkt immer entgegengesetzt der Krafrichtung. Um die Kiste zu verschieben, muss die Zugkraft größer sein als die Haftreibungskraft. Tritt Bewegung auf, kommt es zur Überwindung der Haftreibungskraft und die Gleitreibungskraft ($R = G \cdot \mu_0$) wirkt entgegen der Bewegungsrichtung. Dabei ist μ_0 der Gleitreibungskoeffizient. Im Ruhezustand folgt aus den Gleichgewichtsbedingungen, dass $H = F$ ist. Die Reibungserscheinungen bestimmen sich einerseits von der Oberflächenbeschaffenheit der Körper her, andererseits durch Stoffe, welche zwischen den beiden sind und die Reibung erhöhen (z. B. Brems sand bei der Bahn) oder verringern (Schmiermittel) können. Dabei ist zwischen Flüssigkeitsreibung und trockener Reibung zu unterscheiden [13, 24].

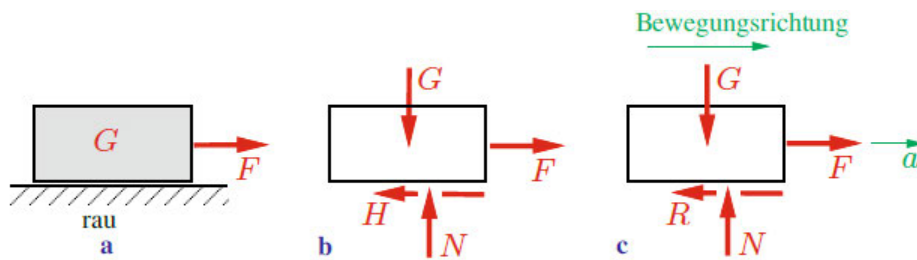


Abbildung 2.13. Freikörperbild einer Kiste auf einer rauhen Unterlage [13]

Die Auswirkung des Stoffes zwischen den Körpern auf die Haftung und Reibung findet Beschreibung mittels einer Modifikation von Haftungskoeffizienten (μ_0) und Reibungskoeffizienten (μ). Es findet eine experimentelle Ermittlung dieser Faktoren statt, die für jede Materialpaarung und jeden eingebrachten Stoff (Schmiermittel oder Reibverstärker) unterschiedlich sind. Zu beachten ist der stets größere Haftungskoeffizient gegenüber dem Reibungskoeffizienten. Dadurch ist nach dem Überwinden der Haftung weniger Kraft zum Schieben der Kiste vonnöten. Nach „Charles Augustine de Coulomb“ ist der maximale Haftungskgrenzwert (H_0) proportional zur Normalkraft N und lässt sich nach der Gleichung (2.7) berechnen [13, 24].

$$H_0 = \mu_0 N \quad (2.7)$$

Ein Körper haftet, wenn $F \leq H_0 = \mu_0 N = \mu_0 mg$ gilt. Sobald sich der Körper bewegt, entsteht eine Reibungskraft. Das Reibungsgesetz lautet: [13, 24]

$$R = \mu N \quad (2.8)$$

Zusammengefasst ist ein Körper durch die Haftungskraft (H) in Ruhe. Beim Überschreiten der maximalen Haftungskraft H_0 fängt der Körper an zu rutschen. Beim Rutschen wirkt die Reibungskraft entgegen der Bewegungsrichtung [13, 24].

Nach der Definition der Reibung folgt die Erläuterung der Funktionsweise der Linearführung am Beispiel einer Schlittenführung. Die wichtigsten Komponenten einer Schlittenführung sind zum einen der Schlitten und zum anderen die Schiene. Bei einer Bewegung wird der Schlitten durch die Schiene geführt. In der Lineartechnik ist zwischen Gleitführungen und Wälzführungen zu unterscheiden. Bei einer Gleitführung gleitet der Schlitten direkt an der Schiene ab. Ist kein Schmierfilm zwischen den zueinander sich bewegenden Teilen vorhanden, entsteht während des Prozesses eine Festkörperreibung. Ist ein durchgängiger Schmierfilm in der Bewegung vorhanden, liegt eine Flüssigkeitsreibung vor. Diese Art der Führung findet Bezeichnung als hydrostatische Gleitführung. Eine externe Druckzufuhr baut den vorhandenen Ölfilm auf. Eine andere Art der Reibung, die auftreten

kann, ist die Gasreibung, auch bezeichnet als aerostatische Gleitführung. Der erzeugte Gasfilm trennt die beiden Bauteile voneinander. Zusätzlich zu diesen Gleitreibungstypen gibt es noch Kombinationen der verschiedenen Reibungsarten. Dabei existiert zwischen den geführten Bauteilen ein Schmierfilm, der die beiden bewegten Teile nicht vollständig voneinander trennt. Diese liegen im Stillstand direkt aufeinander und verdrängen den Schmierfilm an den Kontaktstellen. Sobald die hohe Haftreibung überwunden ist, trennt der Schmierstoff die beiden Teile und die Gleitreibung ist deutlich geringer. Dabei tritt der sogenannte „Stick-Slip-Effekt“ auf, der bei kleinen Geschwindigkeiten in dem Bereich der Mischreibung eine Rolle spielt. Ein vereinfachtes Modell in Abbildung 2.14 verdeutlicht diesen Effekt. Die Feder setzt die Kiste in Bewegung. Die Feder mit ihrer Steifigkeit (c) bildet den elastischen Anteil in diesem Modell und simuliert die endliche Steifigkeit von Linearspindel, Vorschubgetriebe und anderen mechanischen Komponenten. Um die Kiste in Bewegung zu setzen, ist die Feder bis zur Überwindung der Haftreibung zu spannen. Die Kiste setzt sich anschließend in Bewegung. Während der Bewegung wirkt eine geringere Reibungskraft, sodass es zur Beschleunigung der Kiste kommt, wodurch sich die Federkraft entspannt. Die wirkende Zugkraft erfährt dabei eine intensive Reduzierung und die Kiste kommt wieder zum Stehen. Abbildung 2.14 verdeutlicht zusätzlich in zwei Diagrammen den Stick-Slip-Effekt. Das eine Diagramm zeigt das Verhalten der Federkraft bezogen auf die Zeit und das andere die zurückgelegte Strecke bezogen auf die Zeit [5, 25].

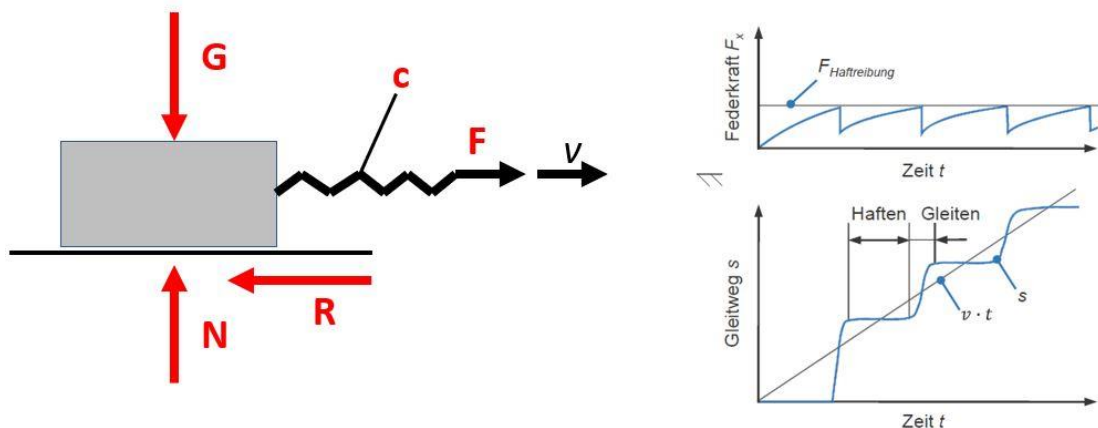


Abbildung 2.14. Vereinfachtes schematisches Modell des Stick-Slip-Effektes [5]

Linearführungen mit einer Wälzführung zeigen fast keinen Stick-Slip-Effekt und finden deshalb in der Praxis eine breite Anwendung. Die Wälzkörper, welche sich zwischen den beiden beweglichen Teilen befinden, haben die Form von Kugeln, Nadeln oder Rollen. Bei einer Bewegung des Schlittens rollt der Wälzkörper an den beiden Hauptteilen ab. Die dabei entstehende Rollreibung ist im Vergleich zur Reibung einer Gleitführung sehr gering. Ein weiterer Vorteil von Wälzausführungen ist ein durch das günstigere Reibverhalten geringerer Verschleiß. Die Reibungskennlinie einer Wälzführung ist in

Abbildung 2.15 dargestellt. Die Kennlinie verdeutlicht eine ähnlich große Haft- und Rollreibung, wodurch es zu einem um Größenordnungen geringeren Stick-Slip-Effekt kommen kann [17].

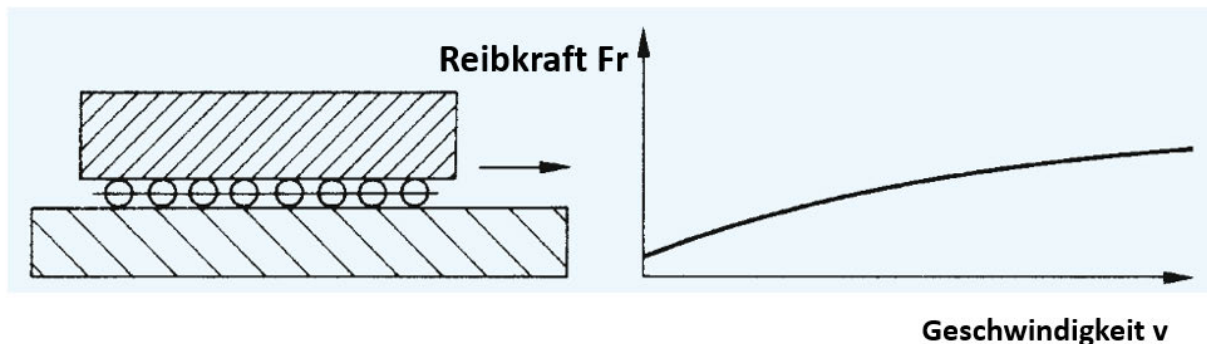


Abbildung 2.15. Reibungskennlinie von Wälzführungen [14]

Äußere, auf den Schlitten axial wirkende Kräfte treiben die bisher erwähnten Linearführungen an. In komplexen Maschinen erfolgt der Antrieb des Schlittens jedoch mittels einer Spindel. Die Hauptaufgabe einer Spindel ist das Antreiben des Schlittens mit einer ausreichend kinematischen Genauigkeit. Diese Ausarbeitung erläutert die Linearführungen mit einem Kugelgewindetrieb (KGT) und einem Trapezgewindetrieb. Bei dem Einsatz eines Kugelgewindetriebs erfolgt die Umwandlung einer Drehbewegung in eine Linearbewegung. Der Antrieb hat viele Vorteile wie z. B. einen sehr guten Wirkungsgrad, einen fehlenden Stick-Slip-Effekt, Spielfreiheit sowie eine hohe Steifigkeit. Der Kugelgewindetrieb aus Abbildung 2.16 a) besteht aus einer Spindel und einer Mutter, beide versehen mit einem Gewindeprofil. Die Flanken des Gewindes ähneln einer Kugelbahn, in der die Kugeln laufen. Die Kugeln trennen die Flächen der Spindel und der Mutter voneinander. Dadurch wirkt statt der Gleitreibung eine Rollreibung. Der Antrieb der Spindel geschieht rotatorisch. Durch die Gewindesteigung kommt es anschließend zu einer Relativbewegung zwischen der Mutter und der Spindel. Da die Kugeln sich während der Bewegung abwälzen, sind diese wieder zurück auf die Ausgangsposition zu führen. Die Umlenkmöglichkeiten sind in Abbildung 2.16 b) dargestellt [5].

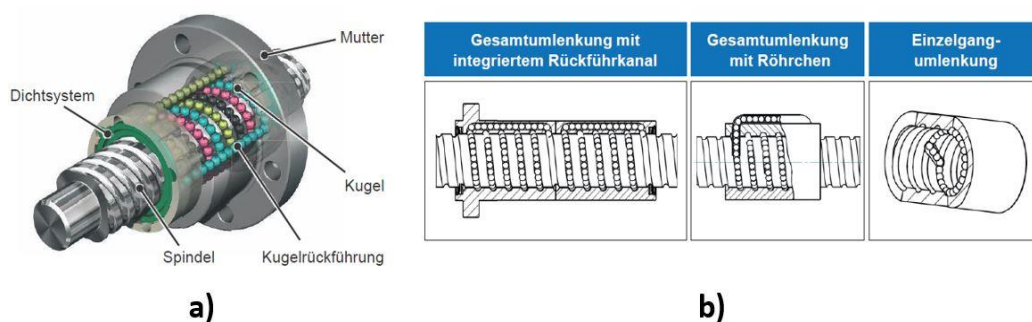


Abbildung 2.16. Aufbau eines Kugelgewindetriebs [14] Quelle: Bosch Rexroth

Trapezgewindetriebe finden Bevorzugung bei Großmaschinen. Die Mutter hat einen direkten Kontakt mit der Spindel. Bei einer Bewegung der Mutter wirkt die Gleitreibung, was zu einem niedrigen

Wirkungsgrad von 10 % bis 40 % führt. Um die Reibung zu reduzieren, ist ein Schmierfilm zwischen den beiden beweglichen Teilen vorhanden. Diese Ausführungsart findet auch Bezeichnung als hydrostatisches Spindel-Mutter-System. Eine weitere Möglichkeit, die Reibung zu reduzieren, ist die Verwendung von selbst schmierenden Materialien wie Bronze. Die Vorteile eines Trapezgewindetriebs sind die geringen Herstellungskosten. Das robuste Trapezgewinde kann Zug- sowie Druckkräfte übertragen. Zusätzlich können diese Systeme selbsthemmend sein und erfordern nicht zusätzlich eine Sicherung. Selbsthemmung im Stillstand liegt vor, wenn der Gewindesteigungswinkel (φ) größer als $2,4^\circ$ und kleiner als $4,5^\circ$ ist. Bei $\varphi > 4,5^\circ$ liegt keine Selbsthemmung vor. Die Bestimmung des Gewindesteigungswinkels erfolgt nach der Gleichung (2.9). Die Spindelsteigung (h) sowie der Flankendurchmesser d_2 sind dem Datenblatt des Herstellers zu entnehmen [5, 14, 40].

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{h}{d_2 \pi} \right) \quad (2.9)$$

Bei der Auslegung von Linearführungen gilt es, die vorhandenen Belastungen zu betrachten. Eine Linearführung kann Kräfte in den X-, Y- und Z-Achsen und Momenten um diese aufnehmen (die einzelnen Achsen). Die Spindel-Steigung spielt für die Auslegung eine große Rolle. Die maximale Geschwindigkeit des Schlittens bestimmt die Gleichung (2.11). Die Steigung wird mit der maximalen Drehzahl der Spindel $n_{Antrieb}$ multipliziert.

$$v_{max} = n_{Antrieb} * h \quad (2.11)$$

Ein weiterer wichtiger Parameter ist das Bestimmen des notwendigen Drehmoments ($M_{Antrieb}$), welches notwendig ist, um den Schlitten unter der bekannten axialen Kraft (F_{ax}) zu bewegen. Für die Berechnung des Drehmomentes benötigt die Formel (2.10) ebenfalls die Steigung und den Wirkungsgrad der Spindel (η_{KGT}). Die Ermittlung des Wirkungsgrades sowie des Reibkoeffizienten der Spindel geschieht mittels der Diagramme in Abbildung 2.17. In der Abbildung a) sind die Kennlinien für Kugelgewindetriebe/Trapezgewindetriebe, die rotatorischen Bewegungen in translatorische Bewegungen umzuwandeln. Aus Abbildung b) lassen sich die entsprechenden Kennwerte für Kugelgewindetriebe/Trapezgewindetriebe, welche eine translatorische Bewegung in eine rotatorische umwandeln lassen, ablesen. Um die Kennwerte ermitteln zu können, ist der Steigungswinkel der Spindel mittels der Gleichung (2.9) zu berechnen [5, 48, 55].

$$M_{Antrieb} = \frac{F_{ax} * h}{2\pi \eta_{KGT}} \quad (2.10)$$

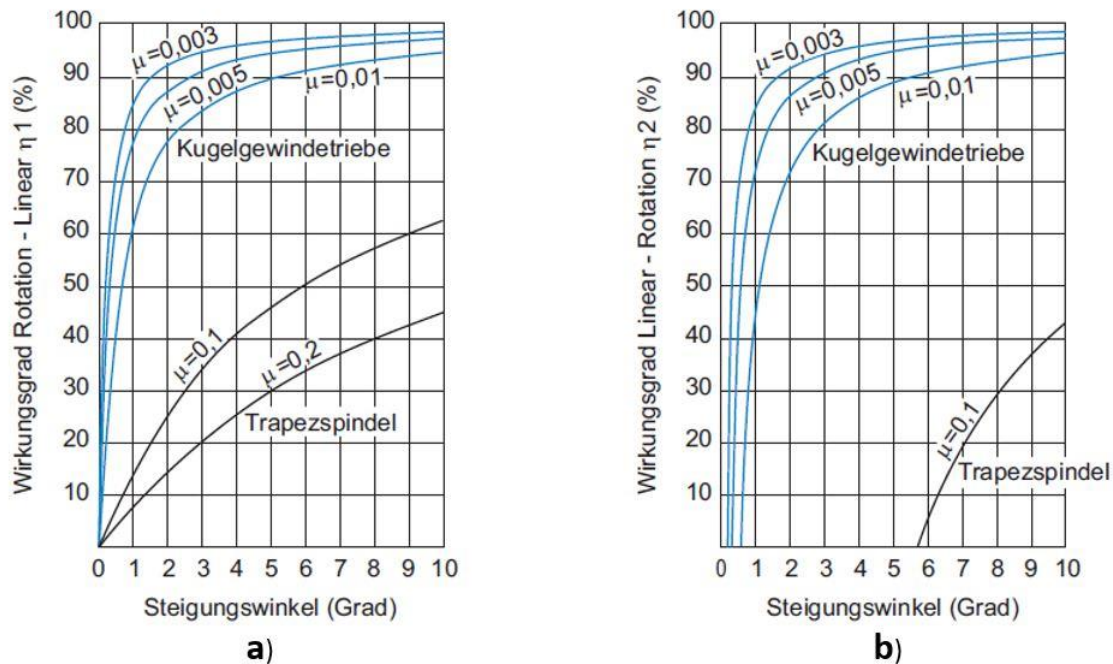


Abbildung 2.17. Wirkungsgrad – Steigungswinkel Diagramm. a) Rotation in lineare Bewegung
b) Linear-Bewegung in Rotation [48]

Das entwickelte Gesamtsystem darf nicht überbestimmt sein. Das heißt, die Linearführungen übernehmen die Führung und das Spindelsystem die Hubarbeit. Zusätzlich müssen die einzelnen Bewegungsbaugruppen eine Fest- und Loslagerung aufweisen. Im Falle einer Nichtberücksichtigung ist die Konstruktion überbestimmt und im Betrieb treten Verspannungen auf, die die für die Bewegung notwendigen Kräfte erhöhen und über zusätzliche Reibung einen erhöhten Verschleiß bis zum Ausfall des Systems verursachen [40].

2.6.2 Schrittmotoren

Schrittmotoren treiben die Linearführungen sowie die Hubspindeln an. Schrittmotoren haben eine große mechanische Robustheit, eine hohe Lebensdauer und benötigen lediglich eine geringe Wartung. Schrittmotoren sind eine Sonderbauform von Synchronmaschinen. Die Erläuterung der Funktionsweise eines Schrittmotors vollzieht sich anhand eines permanentmagnetisch erregten Schrittmotors (PM). Abbildung 2.18 zeigt den Aufbau eines PM-Motors. Ein PM-Motor besitzt ausgeprägte Ständerpole mit der Anspeisung ihrer Wicklung zyklisch mithilfe von Stromimpulsen. Aus diesem Grund entsteht ein umlaufendes Magnetfeld (rotierend). Der Rotor, welcher aus einem permanentmagnetischen Magneten besteht, stellt sich immer in polaritätsrichtige Koinzidenz mit der erregten Ständewicklung des erzeugten Magnetfeldes ein. Der in der Abbildung 2.18 dargestellte PM-Motor besteht aus den Strängen A und B und einem Rotor mit einer Polpaarzahl von eins. Soll der Motor einen Schritt im Uhrzeigersinn ausführen, ist Stang B zu bestromen. Für die Drehrichtung ist die Stromrichtung in den einzelnen Strangwicklungen relevant. Um einen weiteren Schritt auszuführen,

ist erneut Strang A zu bestromen. Zusammengefasst sind für eine Drehbewegung die Stränge abwechselnd zu bestromen. Aus Herstellungsgründen lassen sich bei PM-Motoren Schrittwinkel von $\alpha \geq 7,5^\circ$ erreichen. Reluktanz-Schrittmotoren haben in der Regel einen kleineren Schrittwinkel von $1,8^\circ$ bis $2,5^\circ$. Mit der Gleichung (2.12) lässt sich der Schrittwinkel eines PM-Motors ermitteln. In die Gleichung ist die Polpaarzahl des Rotors (p) sowie die Phasenzahl des Stators (m) Anzahl der Stränge) einzusetzen [38, 41].

$$\alpha = \frac{360^\circ}{2 * p * m} \quad (2.12)$$

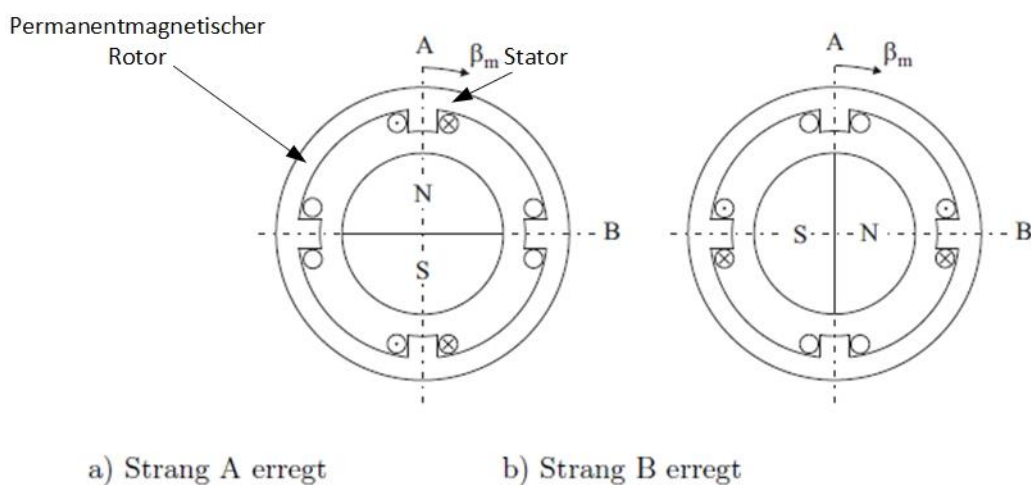


Abbildung 2.18. Grundsätzlicher Aufbau eines zwei-strängigen permanentmagnetisch erregten Schrittmotors [41]

Bei der Auswahl eines Schrittmotors gilt es, die Motorkennlinie zusätzlich zu betrachten. Die Kennlinien verdeutlichen die Grenzen des verwendeten Motors. Bei Überschreitung der Begrenzungslinie kommt es zum Schrittverlust oder zum kompletten Stillstand des Motors. In Abbildung 2.19 ist eine Beispielkennlinie eines Schrittmotors dargestellt. Die obere Darstellung enthält eine Abbildung der vertikalen Achse mit dem maximalen Drehmoment (M_{Mmax}), Startgrenzmoment (M_{Amax}) und dem Betriebsgrenzmoment (M_{Bmax}). Die horizontale Achse trägt die Schrittfrequenz (F_z) des Motors auf. Dabei gibt es drei wichtige Zustände. Die maximale Betriebsfrequenz (F_{Bmax}) beschreibt die Grenze, bei der das Betreiben des Motors unter einer bestimmten Last ohne Schrittverlust möglich ist. Zusätzlich ist die größte Schrittfrequenz beim Starten (F_{Amax}) unter einer bestimmten Last und die größte Schrittfrequenz ohne Last (F_{A0max}) angegeben. Die untere Kennlinie enthält die Angabe des Trägheitsmoments des Motors (Θ_w) ohne Last bezogen auf die Schrittfrequenz. Die Kurven drei und zwei in der oberen Abbildung verdeutlichen das Startverhalten des Schrittmotors. Die Kurve drei gilt für das Starten des Schrittmotors unter einer bestimmten Last. Die Kurve zwei beschreibt die Startbereich-Begrenzung für das Starten des Schrittmotors ohne Last. Nach einem erfolgreichen

Starten des Schrittmotors erfährt dieser anschließend seine Beschleunigung. Der Beschleunigungsbereich ist entweder zwischen Kurve drei und eins oder zwischen Kurve zwei und eins (obere Abbildung). Die Kurve eins definiert die Grenze, bei der das Betreiben des Motors unter Last ohne Schrittverluste möglich ist [38, 41].

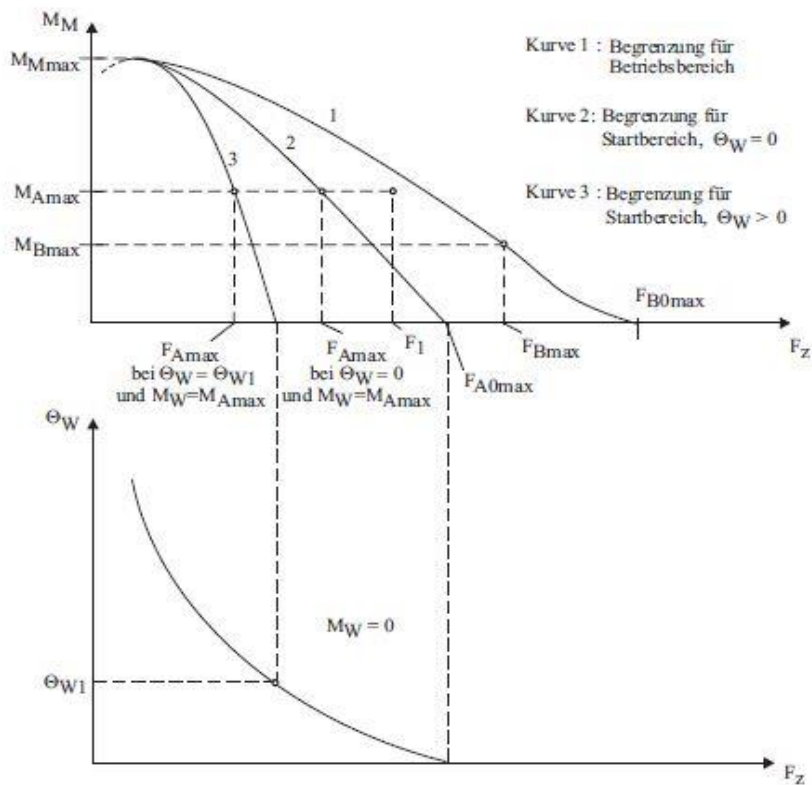


Abbildung 2.19. Beispiel Kennlinie eines Schrittmotors [38]

Bei XFEL kommen Schrittmotoren mit zwei Phasen zur Verwendung. Der Antrieb der Motoren darf eine maximale Stromstärke von 5 A und eine Spannung von 48 V haben. Der Grund für die Verwendung dieser Schrittmotoren ist, dass die Treiberstufen des Steuerungssystems (Beckhoff ES7041/EL7041) sowie die Kabel auf diese beiden Parameter ausgelegt sind [1].

2.6.3 Encoder-Systeme

Dieser Abschnitt beschreibt grob die Grundlagen der Encoder-Systeme. Zur Erläuterung gelangen lediglich die beiden Haupt-Messverfahren sowie die konstruktive Umsetzung, welche für die Ausrichtungseinheit verwendet worden ist.

Um einen definierten Abstand zwischen Probe und Detektor zu erreichen, gelangen Motor-Feedback-Systeme – auch bekannt als Encoder – zur Verwendung. In der Praxis kommen inkrementale und absolute Messverfahren zum Einsatz. Bei beiden Verfahren wird ein Laserkopf über einem Maßband

verbaut. Das Maßband hat eine feine definierte Teilung. Die Abstände der einzelnen Teilungen (Auflösung) liegen zwischen $2\ \mu\text{m}$ und $40\ \mu\text{m}$. Bei beiden Verfahren erfolgt die Position der Ermittlung mittels einer berührungslosen fotoelektrischen Abtastung [15, 35].

Bei dem inkrementalen Messverfahren muss der Laserkopf zuerst eine Referenzmarke (Nullpunkt) anfahren. Anschließend ist es möglich, mittels des Zählens der einzelnen Schritte (Teilungen) die Position bezogen auf den Referenzpunkt zu ermitteln. Das absolute Messverfahren ermittelt die Positionswerte direkt nach dem Einschalten aus dem Maßband. Die Anwendung des Verfahrens der einzelnen Achsen erübrigt sich [15, 35].

Abbildung 2.20 verdeutlicht die mögliche Anwendung eines Encoder-Systems bei einer Linearführung (longitudinale Bewegung). Es kommt zum Antreiben des beweglichen Führungswagens mittels der im festen Gehäuse gelagerten Gewindespindel. Um die genaue Position des Führungswagens zu ermitteln, ist das Maßband auf dem Gehäuse zu montieren. Der Laserkopf wird an den Führungswagen fixiert.

Der vom Hersteller definierte Abstand zwischen Laserkopf und Maßband ist unbedingt einzuhalten. In der Regel liegt dieser Wert zwischen $0,8\ \text{mm} - 1\ \text{mm}$. Bei einer Bewegung des Führungswagens bewegt sich der Laserkopf mit und ermittelt durch das berührungslose Abtasten des Maßbandes die genaue Position. Der Vorteil bei dieser Anbringung des Laserkopfes/Maßbandes liegt an der genauen Positionsermittlung. Die Steifigkeit der einzelnen Komponenten (Linearführung) oder Schrittfehler des Schrittmotors beeinflussen die Positionsermittlung nicht.

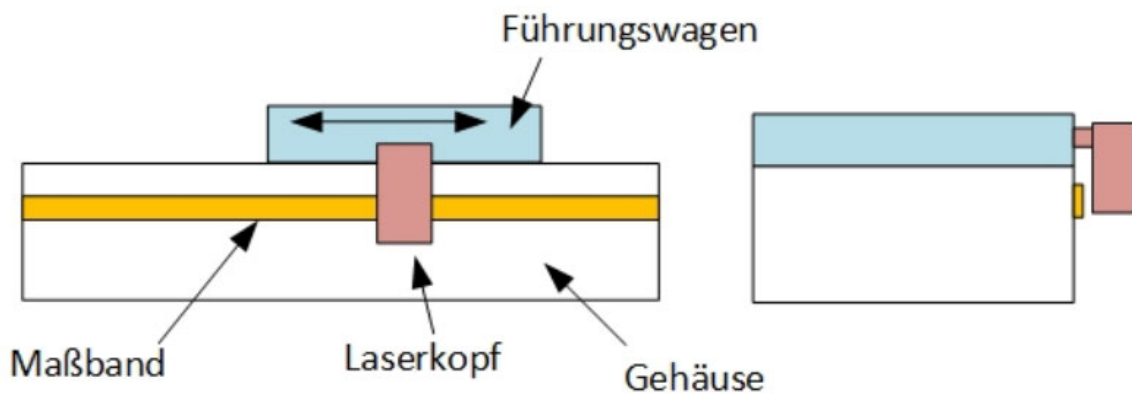


Abbildung 2.20. Integration eines Encoders auf einer Linearführung (Vorder- und Seitenansicht)

2.7 Risikobeurteilung

Vor der Entwicklung und Konstruktion eines technischen Systems ist die Sicherheit der entwickelten Maschine im Betrieb zu prüfen. Eine Maschine ist mit einem Antriebssystem ausgestattet oder besteht aus beweglichen Elementen, welche im zusammengebauten Zustand eine bestimmte Funktion ausführen. Bei der Durchführung sämtlicher Funktionen dürfen dabei keine Verletzungen oder Gesundheitsschäden am Bediener oder an Personen, welche sich im Arbeitsbereich der Maschine aufhalten, entstehen. Die Konstrukteure müssen die gesetzlichen nationalen und europäischen Vorgaben beachten und umsetzen. Beim Inverkehrbringen von Maschinen in Europa ist die europäische Maschinenrichtlinie 2006/42/EG zu befolgen. Das geltende EU-Recht (Europäische Union) ist von jedem europäischen Mitgliedstaat in nationales Recht umzusetzen. Durch die 9. Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz (ProdSV) erfolgte die Umsetzung in Deutschland. Damit ist u. a. die Erstellung einer Risikobeurteilung gesetzlich vorgeschrieben. Die Risikobeurteilung setzt sich aus zwei Hauptschwerpunkten – der Risikoanalyse und der Risikobewertung – zusammen. Die Risikoanalyse dient der Identifizierung und anschließenden Einschätzung der Gefahren. Im Anschluss daran erfolgt die Risikobewertung. Sollte diese ein zu hohes Risiko ergeben, muss zusätzlich eine Risikominderung erfolgen. Die Risikobeurteilung ist ein iterativer und individueller Prozess. Der gesamte Prozess mit seinen fünf einzelnen Schritten ist in Anhang A10 dargestellt. Zusammengefasst muss der Hersteller die Maschinenrichtlinie 2006/42/EG anwenden, in welcher die grundlegenden Sicherheitsanforderungen (*GSA*) definiert sind. Zum Erreichen der *GSA* sind entsprechende Sicherheitsnormen anzuwenden (Typ B und Typ C Normen) [36, 3, 30].

Der erste Schritt bestimmt exakt die Grenzen der Maschinen. Diese sind in der Tabelle 4 zusammengefasst. Hinsichtlich einer hohen Effektivität besteht die Empfehlung, bei der Bestimmung der Grenzen einer Maschine eine Checkliste auszuarbeiten. Die Grenzen der zu entwickelnden Maschinen sind so genau wie möglich festzulegen. Diese Grenzen beeinflussen den Konstruktionsprozess.

Tabelle 4. Grenzen einer Maschine [42, 30]

Grenzen der Maschine	Erklärung
Verwendungsgrenzen	• Bestimmungsgemäße Verwendung • Vorhersehbare Fehleranwendung • Qualifikation des Personals
Räumliche Grenzen	• Bewegungs-/Verfahrbereiche und Sicherheitsabstände • Platzbedarf bei der Installation, Wartung, Instandhaltung und Normal-Betrieb • Schnittstellen „Mensch/Maschine ...“
Energetische Grenzen	• Elektrische, mechanische, chemische oder physikalische Grenzen • Schnittstellen „Zufuhr und Abfuhr“
Stoffliche Grenzen	• Ausgangsstoffe, Hilfs-, Betriebsstoffe, Abgasprodukte • Schnittstellen „Zufuhr/Abfuhr“
Zeitliche Grenzen	• Lebensdauer der Maschine und der einzelnen Komponenten • Prüf-, Wartungs-, Instandsetzungsintervalle

Der zweite Schritt der Risikobeurteilung ermittelt alle Gefährdungen, welche bei der Benutzung der Maschine auftreten können. Beim Identifizieren der Gefährdungen sollte der Entwickler sich stets die folgenden vier Fragen stellen und sie beantworten:

- **Was** könnte auftreten? Vorhandene oder mögliche Gefährdungen sowie Gefährdungsereignisse sind zu identifizieren.
- **Wo** könnten die Gefährdungen auftreten (Gefährdungsbereiche)?
- **Wann** treten die Gefährdungen auf? Ermittlung der einzelnen Lebensphasen des Produkts (Montage/Installation, Bedienung, Wartung, Entsorgung).
- **Wie** kommt es zu dieser Gefährdung? Zusammenfassung der kompletten Gefährdungssituation.

Um keine wichtige Gefährdung zu übersehen, besteht die Empfehlung, eine Checkliste in Form einer Tabelle aus der EN ISO 12100 (Anhang B.1 und B.4) zu verwenden [42, 30].

Nach dem Identifizieren der möglichen Gefahren erfolgt für jede Gefahr die Durchführung einer Risikoeinschätzung. Die Durchführung der Risikoeinschätzung dieser Arbeit vollzieht sich mittels des Risikographen. Die Risikoeinschätzung bei Komponenten oder Baugruppen ohne relevante Steuerungselemente erfolgt nach der DIN EN ISO 12100. Im Falle der Ansteuerung von Sicherheitsrelevanten Komponenten oder Baugruppen erfolgt die Risikoeinschätzung nach der DIN EN ISO 13849-1. In beiden Fällen beruht der Risikograph auf Entscheidungen und verfügt über Knotenpunkte, welche abgehende Äste besitzen. Der gewählte Pfad hängt von der zutreffenden Situation ab. Am Ende jedes Pfades befindet sich ein Index oder eine Klasse mit einer Aussage über das Risiko. Die Risikographen unterscheiden sich von der Anzahl der Knotenpunkte und der Art der Bewertung der Risiken. Bei einem Risikographen für Komponenten oder Baugruppen ohne relevante Steuerung sind folgende Entscheidungen an den Knotenpunkten zu bestimmen. In Abbildung 5.1 ist der Aufbau eines Risikographen für steuerrelevante Bauteile bildlich dargestellt [42, 44, 43]:

- **Schadenausmaß**
 - S1: leichte Verletzungen; die Verletzungen sind in der Regel reversibel
 - S2: schwere Verletzungen; die Verletzungen sind irreversibel
- **Häufigkeit und/oder Dauer der Gefährdung**
 - F1: selten oder öfter und/oder kurze Dauer der Gefährdung
 - F2: häufig bis ständig und/oder lange Dauer der Gefährdung
- **Eintrittswahrscheinlichkeit der Gefährdung**
 - O1: gering; Auftreten der Gefährdung unwahrscheinlich
 - O2: mittel; gelegentliches Auftreten der Gefährdung
 - O3: hoch; häufiges Eintreten der Gefährdung
- **Möglichkeit der Vermeidung der Gefährdung**
 - A1: Bei bestimmten Maßnahmen möglich
 - A2: Gefahrvermeidung unmöglich

Das Ende jeden Pfades erhält die Zuordnung eines Risikoindex. Bei geringem Risiko entspricht dieser eins oder zwei. Ein Risikoindex von drei oder vier bedeutet ein mittleres Risiko. Höchstes Risiko liegt vor, wenn der Risikoindex fünf oder sechs beträgt [42, 44].

Bei Steuerung von relevanten Komponenten oder Baugruppen betrachtet der Risikograph die Eintrittswahrscheinlichkeit der Gefährdung nicht. Zusätzlich findet die Einstufung der Risiken anstelle in einem Risikoindex in einem Performance Level (PL) statt. Die vorliegende Ausarbeitung vertieft das weitere Vorgehen nicht. Die detaillierte Beschreibung des Vorgehens ist in der DIN ISO 13849-1 nachzuschlagen [42, 44, 43].

Sollte das Risiko zu hoch sein, sind Maßnahmen zur Risikominderung durchzuführen. Anschließend ist eine erneute Risikobeurteilung mit den neuen Maßnahmen durchzuführen. Bei der Herleitung von Maßnahmen ist das „Drei-Stufen-Verfahren“ anzuwenden. Der Hersteller muss bei der Wahl der angemessenen Lösung die genaue Reihenfolge einhalten. Im ersten Schritt gilt es, das Risiko durch eine inhärent sichere Konstruktion zu minimieren. Ist dies nicht möglich oder ausreichend, verringert der zweite Schritt eine Risiko-Minderung mithilfe von ergänzenden technischen Schutzmaßnahmen. Der dritte Schritt informiert den Benutzer durch Hinweisschilder oder Hinweise in der Betriebsanleitung. Dabei kommt es nicht zur Minimierung des Risikos. Nach dem Erreichen der Risikominderung ist die Risikobeurteilung schriftlich zu dokumentieren und aufzubewahren [42, 44, 43].

Der Hersteller oder der Inverkehrbringer einer Maschine muss eine Konformitätserklärung abgeben. In dieser bestätigt die Unternehmungsleitung, dass die entwickelte Maschine den geltenden Maschinenrichtlinien entspricht. Aufgrund der Konformitätserklärung darf der Hersteller ein CE-Zeichen an der Maschine anbringen. Sollte die entwickelte Maschine unvollständig sein, so muss der Hersteller in einer Einbauerklärung bestätigen, dass die Maschine den Vorschriften der EU-Richtlinien entspricht. In diesem Fall ist das Anbringen eines CE-Zeichens an der Maschine nicht erlaubt. In beiden Fällen ist eine Betriebsanleitung in der Amtssprache (Aufstellort der Maschine) zu erstellen [6].

3 Anforderungen und Randbedingungen

Vor Beginn der Konstruktionsphase sind alle Randbedingungen zu definieren. Diese Definitionsphase legt die Anforderungen mit den Projektwissenschaftlern und dem Ingenieur fest. Dabei sind die Hauptanforderungen in zwei Gruppen zu unterteilen, in die geometrischen sowie die technischen Randbedingungen. Unter geometrische Anforderungen zu verstehen sind der vorhandene reservierte Bauraum in der SCS-Experimentierstation sowie die Abmaße aller Komponenten, welche in die Konstruktion zu integrieren sind. Außerdem gehören dazu die erforderlichen Freiheitsgrade, der minimale sowie maximale Abstand der Probe zur FastCCD-Kamera und damit der gewünschte Verfahrbereich. Die technischen Randbedingungen beschreiben die Schnittstellen zwischen den einzelnen Baugruppen sowie die möglichen Konfigurationen der FastCCD-Kamera. Weiterhin kommt es zur Festlegung sämtlicher mechanischer wie auch elektrischer Eigenschaften.

3.1.1 Geometrische Randbedingungen

Das Konzept des FastCCD-Detektors entstand in der Forschungseinrichtung Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) in Kalifornien. Die von der LBNL gelieferte Baugruppe besteht aus der FastCCD-Kamera mit der kompletten Elektronik. Zusätzlich erfolgt eine Mitlieferung des Gestells (Rakete) – mit der Montierung der FastCCD-Kamera darauf – und eines Kühlungsrohres. Die Funktion des Kühlungsrohres besteht darin, die Wärme vom Detektor abzuleiten. Der Anschluss des Kühlaggregats (Kryostat) zur Erzeugung von Kälte erfolgt an einem der Flansche der FastCCD-Kammer. Als Kältemittel wird flüssiges Helium eingesetzt. Abschnitt 2.4 dieser Arbeit beschreibt weitere Details zur FastCCD-Kamera. Abbildung 3.1 macht die vorhandene Konstruktion ersichtlich und veranschaulicht das grobe Konzept bei der Integration der FastCCD-Kamera in die SCS-Beamline. Der Mittelpunkt des Detektors ist dabei an der Strahlhöhe von ca. 1 403 mm über dem Boden auszurichten. Die genaue Ausrichtung erfolgt dann über die Freiheitsgrade. Die entworfene Baugruppe mit ihren Translationen und Rotationen erfährt ihre Fixierung am Untergestell der FFT-Kammer. Vakuumtechnisch befindet sich zwischen FFT-Kammer und CCD-Baugruppe ein CF-DN350-Ventil, wodurch zwei unabhängige Vakuumsysteme entstehen. Bei einem Probenwechsel ist lediglich die FFT-Kammer zu belüften, während das Vakuum der FastCCD-Baugruppe unabhängig davon bestehen bleiben kann. Um den FastCCD-Detektor betreiben zu können, ist ein Druck von $< 10^{-7} \text{ mbar}$ vonnöten. Bei der Durchführung eines Experiments ist eine Probe mittels der Probenführung in der FFT-Kammer zu positionieren. Die Probe kann dann in die positive Z-Richtung um 180 mm verfahren werden. Im Laufe eines Experiments oder zwischen zwei verschiedenen Experimenten kann die Distanz zwischen der Probe und der FastCCD-Kamera so geändert werden. In Anhang A1 sind alle gewünschten Abstände der Probe zum Detektor aufgelistet. In einer Vorüberlegung gilt ein Abstand von 0 mm bis 750 mm als realisierbar. Die Proben- und Röntgenstrahlgröße definiert den Abstand. Je kleiner die Probe (μm), desto geringer muss der Abstand

zwischen dem Detektor und der Probe sein. Der Abstand beeinflusst zusätzlich die Auflösung (nm) der bestrahlten Probe. Der weitere Verlauf dieser Ausarbeitung leitet die Realisierbarkeit der Abstände aus technischer Perspektive her. Um den Detektor zum Röntgenstrahl auszurichten, soll die FastCCD-Kamera in fünf Freiheitsgraden motorisiert ausrichtbar sein. In der Y- sowie X-Achse ist eine translatorische Bewegung von jeweils $\pm 7,5$ mm erforderlich sowie eine Rotation um die Y- und X-Achse um jeweils $\pm 3^\circ$. Die translatorische Bewegung in der Z-Achse ist die Bewegung der Kamera zur Probe. Die Ausarbeitung berechnet im weiteren Verlauf den genauen Wert. Eine Rotation um die Z-Achse ist nicht notwendig. Anschließend ist die FastCCD-Konstruktion mit der Rohrsektion der Beamline zu verbinden. Die Verbindung darf nicht starr sein, um nicht sämtliche Freiheitsgrade zu blockieren. Abschnitt 4.3.1 geht auf diese Anforderung ein. In Tabelle 5 sind alle geometrischen Randbedingungen zusammengefasst.

Tabelle 5. Geometrische Randbedingungen

	Z-Achse	X-Achse		Y-Achse	
Abmaße FastCCD-Kamera	146,7 mm	112,9 mm		95,25 mm	
Freier Bauraum in der SCS-Beamline	3082,5 mm	730 mm		576 mm	
Abstand Probe zum FFT-Flansch	303 mm			1403 mm	
Verfahrweg der Probenführung	180 mm				
Freiheitsgrade	wird in Abschnitt 4.3.1.2 ermittelt	Translatorisch	Rotation	Translatorisch	Rotation
		± 7.5 mm	$\pm 3^\circ$	± 7.5 mm	$\pm 3^\circ$

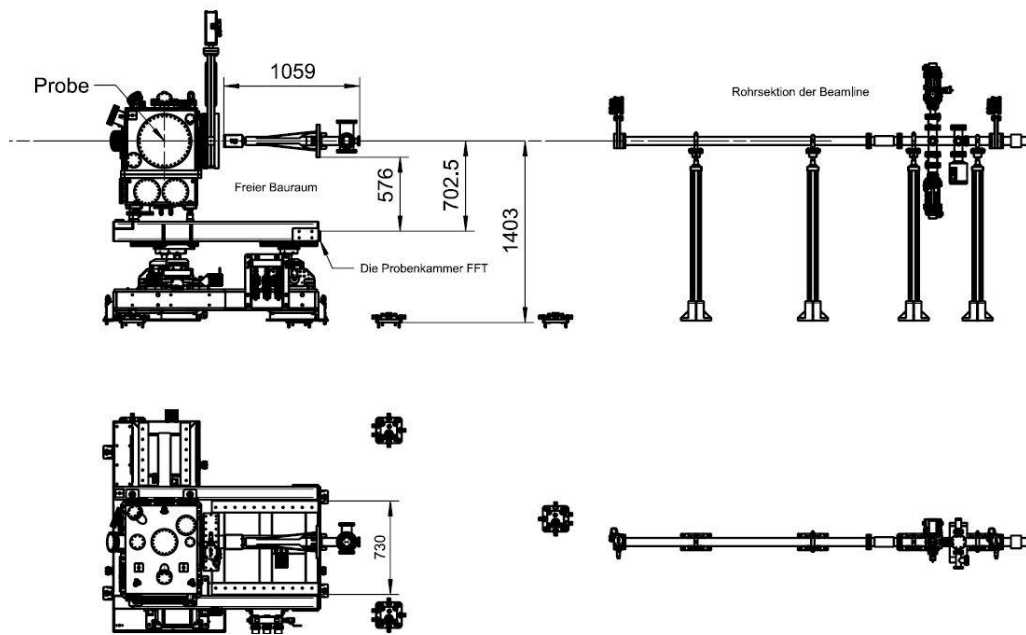


Abbildung 3.1. Bauraum für die Integration der FastCCD in der SCS-Beamline (Drauf- und Seitenansicht)

3.1.2 Technische Randbedingungen

Die technischen Randbedingungen beinhalten alle mechanischen sowie elektrischen Anforderungen. Die Art des Experiments definiert die Einbaulage der FastCCD-Baugruppe in der SCS-Beamline und beschreibt, ob diese direkt an den FFT Flansch zu integrieren ist oder nach dem CF-DN350-Ventil. Ein Membranbalg ermöglicht das Ausrichten und Bewegen des FastCCD-Detektors, welcher zwischen der FFT (CF-DN350-Ventil) und der FastCCD-Kammer verbaut ist. Die Werkstoffeigenschaften der einzelnen Membranen, die Zyklen-Zahl und die komprimierte/gestreckte Länge des eingesetzten Membranbalgs definieren die maximalen translatorischen Bewegungen in der Z-, Y- und X-Achse. Aufgrund der Größe des FastCCD-Detektors muss der Membranbalg einen minimalen Innendurchmesser von 200 mm haben. Abschnitt 4.3.1 erläutert die Auslegung eines Membranbalgs. Der FFT-Flansch sowie das DN350-Ventil haben eine kundenspezifisch gefertigte Schneidkante, die nicht der Norm ISO 3669 entspricht. Anhang A2 beschreibt unter „Customized DN350 CF knife edge geometry“ die entsprechende Geometrie dieser Schneidkante. Alle Schneidkanten der restlichen Flanschgrößen sind nach der ISO 3669 angefertigt.

Die Ausrichtung der FastCCD-Kamera erfolgt anhand von fünf motorisierten Freiheitsgraden, zusammengefasst in Tabelle 1. Das Antreiben der einzelnen Achsen ist mithilfe von zwei Phasen Schrittmotoren mit einer maximalen Stromstärke von 5 A bei einer maximalen Spannung von 48 V zu

vollziehen. Die Position der FastCCD-Kamera ist mittels eines Absolut-Encoders mit einer 26-Bit- oder 32-Bit-Schnittstelle zu erfassen.

Der zur Installation zu benutzende Kran hat eine maximale Tragfähigkeit von 1 000 kg. Aus diesem Grund darf die gesamte FastCCD-Konstruktion eine Masse von 1 000 kg nicht überschreiten.

4 Konzept Herleitung und die technische Umsetzung

Dieses Kapitel der Arbeit beschreibt als Erstes den Prozess, bei dem es zum Erreichen des gewünschten Arbeitsdruckes kommt. Dabei findet in erster Linie das Dimensionieren der Vakuumpumpen statt. Im Anschluss daran sind die Belastungen, demzufolge die wirkenden Kräfte und Momente, zu ermitteln, welche durch die in Kapitel 3 erläuterten Anforderungen entstehen. Nach der Definition aller Belastungen kommt es zur Umsetzung der einzelnen Konzepte und der technischen Realisierung zu den motorisierten Verfahranforderungen.

Das Betreiben des FastCCD-Detektors vollzieht sich in einem Druckbereich kleiner als 10^{-7} mbar. Das Vorvakuum, welches zwischen 0,01 mbar und 20 mbar für diese Art von Pumpen liegt, ist mithilfe von Scrollpumpen zu erzeugen. Nach dem Erreichen des Vordrucks findet das Evakuieren der FastCCD-Baugruppe mittels einer Turbomolekularpumpe statt. Dabei gilt es zu beachten, welchen Einfluss die unterschiedlichen Saugleistungen einer DN100 und einer DN63 Pumpe auf die Abpumpzeit und bedingt durch die unterschiedlichen Abmessungen auf den Abstand der Probe zum Detektor haben, welcher ein sehr wichtiges Kriterium für die Konstruktion ist [34].

Abbildung 4.1 zeigt den schematischen Aufbau aller notwendigen Vakuumkomponenten bei der Integration der FastCCD-Baugruppe in den reservierten Bauraum der SCS-Beamline. Erreicht die Vorvakuumpumpe (Sv) einen Druck von 10^{-2} mbar, kommt es zum Öffnen des pneumatischen Ventils (V2). Parallel startet die Turbopumpe (K1). Die Druckmessdosen M1 und M2 ermitteln durchgehend den aktuellen Druck im System. Die Druckmessdose M1 ermittelt den Vorvakuumdruck und die Druckmessdose M2 misst den Druck in der FastCCD-Baugruppe.

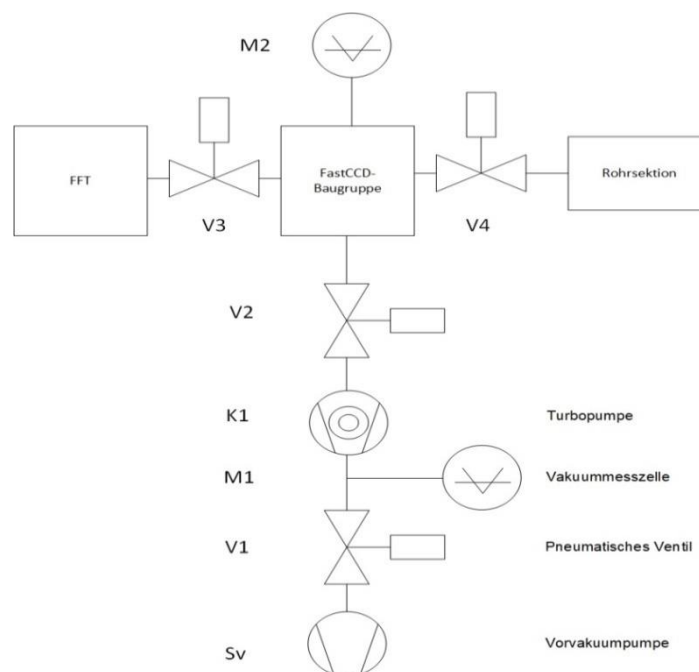


Abbildung 4.1. Vakuumschema der FastCCD-Baugruppe

4.1 Auslegung der Turbomolekularpumpe

Der erste Iterationsdurchlauf nimmt an, dass die FastCCD-Baugruppe mittels einer DN63 Turbomolekularpumpe mit einer Saugleistung von $S_{TMP} = 67 \frac{l}{s}$ evakuiert wird. Eine trockene Pumpe mit einer Saugleistung von $S_V = 35 \frac{m^3}{h}$ dient dem Erreichen des erforderlichen Vordrucks. Anschließend kommt es zu einem Vergleich der ermittelten Abpumpzeiten mit einer DN100 Turbomolekularpumpe mit einer Saugleistung von $255 \frac{l}{s}$. Die notwendige Auspumpzeit der FastCCD-Baugruppe setzt sich aus den folgenden vier Zeitabschnitten (t) zusammen:

t_1 = Auspumpzeit zum Erreichen des erforderlichen Vordrucks für die Turbopumpe

t_2 = Auspumpzeit der Turbomolekularpumpe bis zu einem Druck von 10^{-4} mbar

t_3 = Auspumpzeit zur Desorption der Edelstahloberfläche

t_4 = Pumpzeit zur Desorption der Dichtung

Damit lässt sich die gesamte Auspumpzeit (t_{ges}) nach der Gleichung (4.1) bestimmen [33, 34].

$$t_{ges} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \quad (4.1)$$

Für die Dimensionierung der Turbomolekularpumpe ist in erster Linie das gesamte auszupumpende Volumen (V_{ges}), zu bestimmen. Die vorhandene LBNL-FastCCD-Baugruppe ist in Abbildung 4.2 schematisch dargestellt. Die Montage der Baugruppe geschieht an einer Vakuumkammer, welche über Anschlüsse für Pumpen verfügt. Sämtliche Komponenten der Baugruppe haben die Grundform eines Zylinders. Die angenommenen Abmaße der einzelnen Zylinder sind Näherungswerte, die aber auf das Gesamtergebnis keinen großen Einfluss haben. Das zu ausgepumpte Volumen weist keine komplexe Geometrie auf, zusätzlich ist ein Betriebsdruck gefordert, welcher kleiner als 10^{-7} mbar beträgt (im Anfangsbereich des UHV Bereichs liegt). Das gesamte zu befördernde Volumen besteht aus der Pumpenkammer (V_1) und der LBNL-FastCCD-Baugruppe. Die wiederum setzt sich aus dem Detektor mit dem Kühlungsrohr (V_2) und dem Kreuzstück (V_3) zusammen. Von der Summe der drei Volumina ist das Volumen der inneren Komponenten (V_{LBNL}) zu subtrahieren. Das Volumen des Detektors sowie der Einheit mit dem Kühlungsrohr sind mittels eines CAD-Programms (Siemens NX) ermittelt worden.

$$V_{ges} = V_1 + V_2 + V_3 - (V_{LBNL}) \quad (4.2)$$

Mit der Gleichung (4.3) lässt sich das Volumen der einzelnen Abschnitte bestimmen. Die Variable d ist der Durchmesser des Zylinders und l die Länge.

$$V_1 = \frac{\pi * d^2}{4} * l \quad (4.3)$$

Zur Bestimmung der Auspumpzeiten t_2 bis t_4 ist zusätzlich die Größe der inneren Oberflächen aller Teilabschnitte zu determinieren. Die Berechnung der Mantelflächen der Zylinder vollzieht sich nach der Formel (4.4). Die Ermittlung der Mantelflächen des Detektors und des Kühlungsrohres sowie des Gestells (Rakete) geschieht mittels des CAD Programms „Siemens NX“.

$$A_M = \pi * d * l \quad (4.4)$$

Tabelle 6 beinhaltet alle Volumina und die Mantelflächen, welche notwendig sind, um die Pumpdauer zu berechnen. Die Ermittlung sämtlicher Werte basiert auf Abbildung 4.2. Die genaue Rechnung ist in Anhang A3 zu finden.

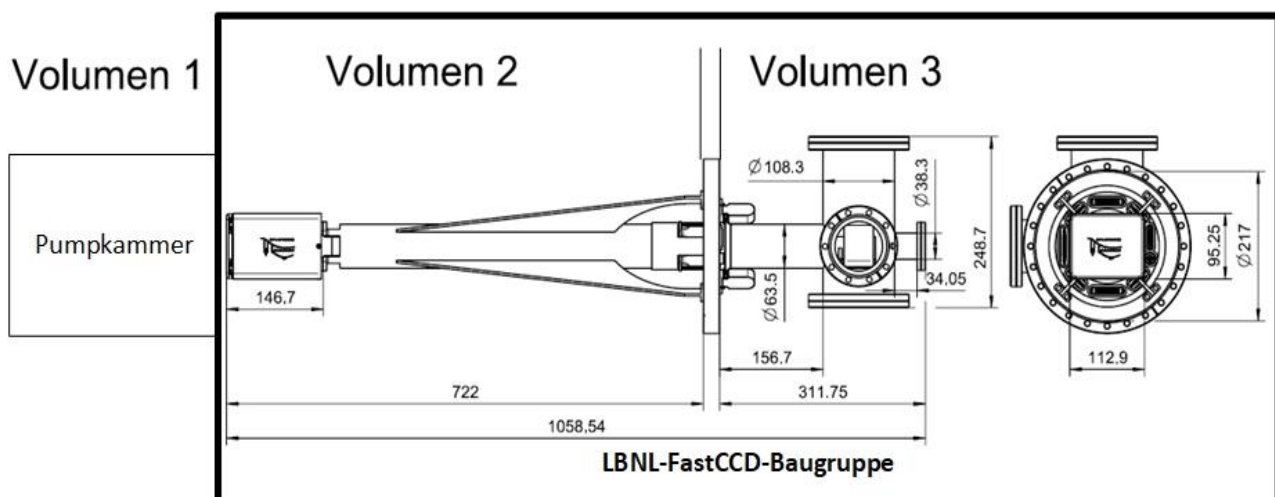


Abbildung 4.2. Abmaße der FastCCD-Baugruppe

Tabelle 6. Volumen und Mantelflächen der FastCCD-Baugruppe

Komponente	Volumen [m^3]	Volumen [l]	Mantelfläche [m^2]
Pumpkammer	0,0074	7,4	0,136
FastCCD-Kammer Abschnitt 2	0,027	27	0,492
FastCCD-Kammer Abschnitt 3	0,00283	2,83	0,119
LBNL Baugruppe	0,00068	0,682	0,443
Gesamt Körper	0,0362	36,25	1,19

Die Berechnung der Zeit t_1 zum Erreichen des erforderlichen Vorvakuums von $0,1 \text{ mbar}$ lässt sich nach der Formel (4.5) ermitteln. P_0 ist der Druck im Zeitpunkt $t = 0 \text{ s}$, $S_v = 35 \frac{m^3}{h}$ ist das Saugvolumen der Vorpumpe und V_{ges} das Volumen, welches zu befördern ist [33, 34].

$$p(t) = p_0 * e^{-\frac{S_v}{V_{ges}} * t} \quad (4.5)$$

Nach der Umstellung der Gleichung (4.5) nach der Zeit lässt sich die Auspumpzeit für den erforderlichen Vordruck für die Turbomolekularpumpe t_1 und anschließend die Zeit t_2 zum Erreichen des Druckes von $p_e = 10^{-4} \text{ mbar}$ bestimmen. Die Bestimmung der Variable t_2 basiert auf folgenden angenommenen Werten: $p_0 = 0,1 \text{ mbar}$, $S_v = S_{TMP} = 67 \frac{l}{s}$ und $p_v = p_e = 10^{-4} \text{ mbar}$

$$t_1 = \frac{V_{ges}}{S_v} \ln\left(\frac{p_0}{p_v}\right) = \frac{0,0362 \text{ m}^3}{35 \frac{m^3}{h}} \ln\left(\frac{1013 \text{ mbar}}{0,1 \text{ mbar}}\right) = 0,0095 \text{ h} = 0,57 \text{ min} \quad (4.6)$$

$$= 34,34 \text{ s}$$

Nach dem Erreichen des erforderlichen Vordrucks von $0,1 \text{ mbar}$ startet die Turbomolekularpumpe. Bis auf einen Druck von $p_e = 10^{-4} \text{ mbar}$ findet das Auspumpen der Kammer ohne das Ausgasen der Innenflächen des Rezipienten (Gasmoleküle) statt. Ab einem Druck von niedriger als 10^{-4} mbar beginnen die angedockten Gasmoleküle an der Innenfläche zu verdampfen. Dieser Prozess heißt Desorption. Die näher in Abschnitt 2.5.1 erläuterte Desorptionsrate ist abhängig vom Werkstoff sowie von der Oberflächenbeschaffenheit. Die Fertigung der Baugruppenkomponenten geschieht aus rostfreiem Stahl „316L“ mit kugelgestrahlten Innenflächen. Die Desorptionsrate für diese Komponente in einer Stunde beträgt $q_{des} = 3 * 10^{-10} \frac{l}{cm^2}$. Der Wert für die erforderliche Auspumpzeit t_3 bis zum

Erreichen eines Druckes von 10^{-7} mbar lässt sich nach der Gleichung (4.7) berechnen. Die Variable (S_{TMP}) ist die Saugleistung der Molekulturbopumpe und der Arbeitsdruck ist als (p_{Arb}) definiert.

$$t_3 = \frac{q_{des} * A_{M,ges} * t_0}{S_{TMP} * p_{Arb}} = \frac{3 * 10^{-10} \frac{\text{mbar l}}{\text{s cm}^2} * 11900 \text{ cm}^2 * 1 \text{ h}}{67 \frac{\text{l}}{\text{s}} * 10^{-7} \text{ mbar}} = 0,53 \text{ h} \quad (4.7)$$

$$= 32 \text{ min} = 1920 \text{ s}$$

Der letzte Schritt betrachtet das Ausgasen der Dichtung. Bei der Verwendung einer Dichtung aus Kupfer der Güte OF (Oxygen Free) oder OFHC (Oxygen Free High Conductivity) ist die Berechnung der Zeit t_4 zu vernachlässigen, da die Kupfer-Dichtungsfläche im Verhältnis zur gesamten Kammerfläche sehr klein ist. Das Aufheizen des sauerstofffreien Kupfers kann bis auf eine maximale Temperatur von 450°C erfolgen.

Tabelle 7 fasst die gesamten Auspumpzeiten einer DN63 und DN100 Turbomolekularpumpe bei verschiedenen Drücken zusammen. Die ermittelten Werte sind nur zu erreichen, wenn ideale Bedingungen herrschen, d. h., wenn die FastCCD-Baugruppe gereinigt und das System partikelarm ist. Eine DN100 Pumpe erreicht durch ihre höhere Saugleistung im Verhältnis ca. 3,5 Mal schneller den erforderlichen Druck als eine DN63-Turbopumpe. Für das Erreichen des notwendigen Betriebsdruckes von kleiner 10^{-7} mbar macht die unterschiedliche Pumpleistung einer DN63 und DN100 keinen entscheidenden Unterschied. Ein weiterer wichtiger Aspekt: Die integrierte FastCCD-Kamera beinhaltet einen komplexen Aufbau mit vielen Kabeln, welcher eine höhere ausgasrate aufweist. Dieses führt zu längeren Auspumpzeiten als die ideal berechneten.

Wie bereits oben beschrieben, beeinflusst die Größe der Pumpe im Weiteren den Abstand zwischen der Probe und dem Detektor. Bei der Verwendung einer DN63 Pumpe ist es möglich, den Detektor $38,1 \text{ mm}$ näher an die Probe zu fahren (Differenz der Außendurchmesser eines DN100-Flansches und eines DN63-Flansches).

Um den Abstand zwischen der Probe und dem Detektor so gering wie möglich zu halten, findet die Verwendung einer DN63 Turbomolekularpumpe des Typs „HiPace 80“ von der Firma „Pfeiffer Vacuum“ statt.

Tabelle 7. Auspumpzeiten bei einer DN63 und DN100 Turbomolekularpumpe

Druck [<i>mbar</i>]	Pumpengröße	Auspumpzeit t_{ges} [min]
10^{-7}	DN 63	32,6
	DN 100	9
10^{-8}	DN 63	320
	DN 100	84,75
10^{-9}	DN 63	3201
	DN 100	841
10^{-10}	DN 63	32011
	DN 100	8411

4.2 Ermittlung der vorhandenen Kräfte und Momente

Bei einer Kammer unter Vakuum wirken auf die äußeren Wände Kräfte, welche durch den Umgebungsdruck entstehen. Die Wände des Behälters dürfen sich dabei im Idealfall nicht verformen und die Kammer darf sich nicht bewegen. Zusätzlich entsteht aufgrund des Hebelarmes ein Moment, welcher auf den Fixierungspunkt der Einheit wirkt. Im vereinfachten Auslegungsmodell ist die Kammer die komplette FastCCD-Baugruppe und die FFT dient als fixer Untergrund. Durch die Wahl eines festen Lagers auf einer Seite und eines losen Lagers auf der anderen ist das System statisch bestimmt. Durch eine Ableitung von Abbildung 3.1 ist ein vereinfachtes Freikörperbild erstellt worden.

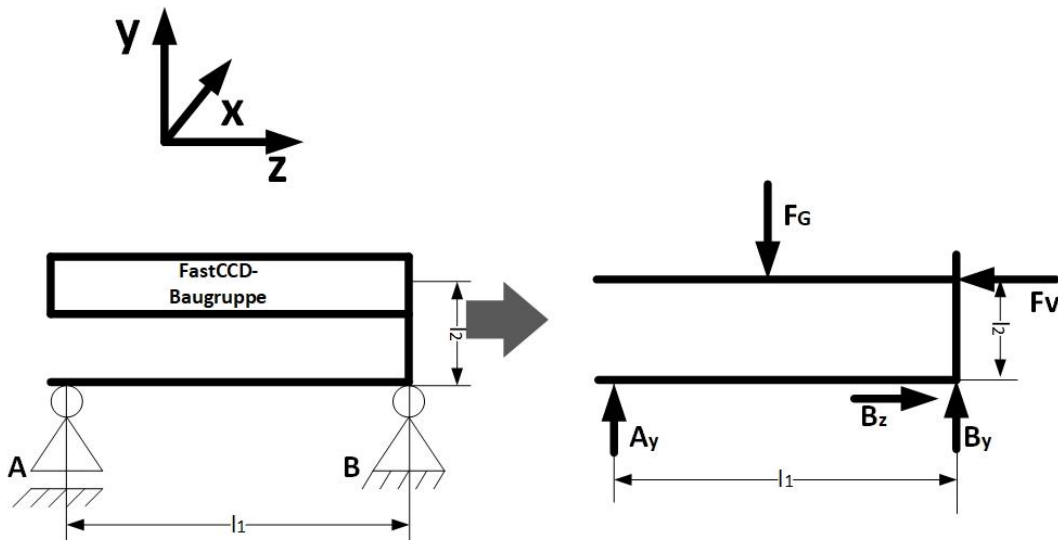


Abbildung 4.3. Vereinfachtes Freikörperbild der FastCCD-Baugruppe

Die Formel (4.8) ermittelt die statische Bestimmtheit des Systems. Die Variable r definiert die Anzahl der Lagerreaktionen (Anzahl der Lager), v ist die Anzahl der Verbindungsreaktionen und n ist die Anzahl der Körper. Die Verbindungsreaktionen treten in einem Gelenk, in einer Parallelführung und in einem Pendelstab auf. Die Konstruktion ist statisch bestimmt, wenn $r + v = 3n$ ist. Bei $r + v < 3n$ liegt eine Unterbestimmtheit vor und das System ist beweglich. Eine statische Überbestimmung tritt auf, wenn $r + v > 3n$ vorliegt. Dabei kommt es zur Versteifung des Systems, was die Berechnung der Lagerreaktionen erheblich erschwert [13].

$$r + v = 3n \quad (4.8)$$

Die FastCCD-Baugruppe besteht aus einem einzelnen Körper, gelagert durch ein fest und los Lager (statisch bestimmt). Somit sind drei Lagerreaktionen zu ermitteln. Da nur ein Körper vorhanden ist, gibt es keine Verbindungsreaktionen. Durch Einsetzen der Werte in die Formel (4.8) kommt es zur Bestätigung der statischen Bestimmtheit des Systems.

$$3 + 0 = 3 \cdot 1 \quad (4.9)$$

Vor Bestimmung der Lagerreaktionen kommt es zur Ermittlung der auf das System wirkenden oder durch das System erzeugten Kräfte. Das Produkt der Masse der Baugruppe ($m = 1\,000\,kg$) und der Fallbeschleunigung ($g = 9,81\,\frac{m}{s^2}$) ergibt die Gewichtskraft.

$$F_G = m \cdot g = 1000\,kg \cdot 9,81\,\frac{m}{s^2} = 9810\,N = 9,81\,kN \quad (4.10)$$

Die entstehende Vakuumkraft F_v setzt sich aus der Fläche eines DN200 Flansches und dem Umgebungsdruck zusammen.

$$F_v = \frac{\pi * d^2}{4} * p_0 = \frac{\pi * (0,206 \text{ m})^2}{4} * 100000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 3332,92 \text{ N} \quad (4.11)$$

Die Ermittlung der Lagerreaktionen vollzieht sich im weiteren Vorgehen mittels des Kräftegleichgewichts. Bei drei Unbekannten sind drei Gleichungen aufzustellen.

$$\uparrow \sum = 0 = -F_G + A_y + B_y \quad (4.12)$$

$$\rightarrow \sum = 0 = B_z - F_v \quad (4.13)$$

Durch das Moment in Punkt A entsteht die dritte Gleichung (4.14). Die Ableitung der einzelnen Längen basiert auf Abbildung 3.1.

$$\curvearrowright A \sum = 0 = -F_G * \frac{l_1}{2} + B_y * l_1 + F_v * l_2 \quad (4.14)$$

Der letzte Schritt stellt die Gleichungen (4.12), (4.13), (4.14) nach den Lagerreaktionen um.

$$B_y = \frac{F_G}{2} - \frac{F_v * l_2}{l_1} = \frac{9810 \text{ N}}{2} - \frac{3332,92 \text{ N} * 702,5 \text{ mm}}{1059 \text{ mm}} = 2694,07 \text{ N} \quad (4.15)$$

$$A_y = F_G - B_y = 9810 \text{ N} - 2694,07 \text{ N} = 7115,93 \text{ N} \quad (4.16)$$

$$B_z = F_v = 3332,92 \text{ N} \quad (4.17)$$

Nach der Bestimmung aller Lagerreaktionen und Kräfte kommt es zur Determinierung des auf die Fixierungseinheit wirkenden Moments. Dabei erfolgt ein Schnitt vor den Lagerreaktionen an der Stelle s (Abbildung 4.4). Dabei sind die Längen wie folgt definiert: $x_1 = \frac{l_1}{2}$ und $x_2 = l_2$.

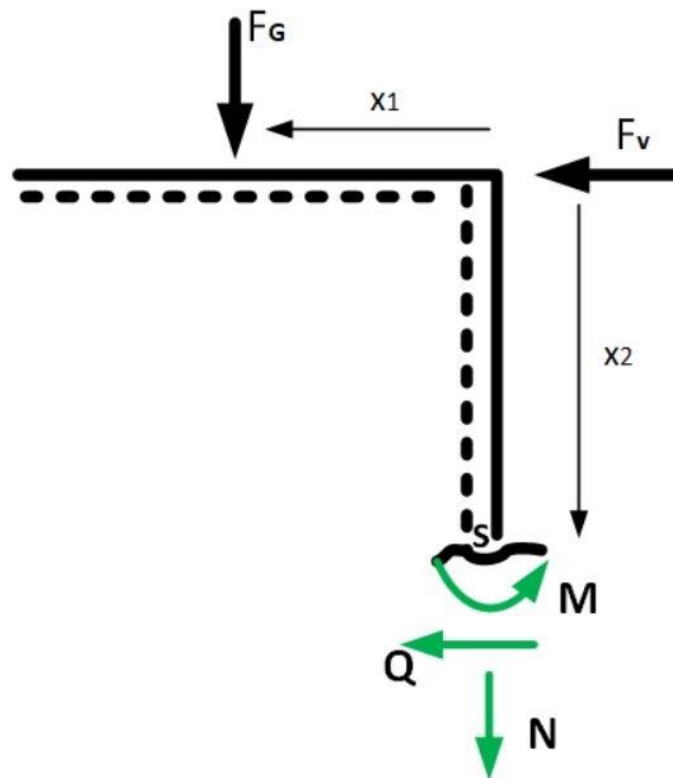


Abbildung 4.4. Schnittverlauf der FastCCD-Baugruppe

$$\sum \vartheta = 0 = M + F_G \cdot x_1 + F_v \cdot x_2 \quad (4.18)$$

$$\begin{aligned} M &= -F_G \cdot \frac{l_1}{2} - F_v \cdot l_2 = -9810 \text{ N} \cdot \frac{1059 \text{ mm}}{2} - 3332,92 \text{ N} \cdot 702,5 \text{ mm} \quad (4.19) \\ &= -7535771,3 \text{ Nmm} = -7535,77 \text{ Nm} = -7,54 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Tabelle 8 fasst alle Kräfte und Momente zusammen, die auf die FFT Einheit wirken. Die Berechnung basiert auf der Annahme einer Masse von 1 000 kg und der Vakuumkraft eines DN200 Membranbalges. Die Vakuumkraft ist nur vorhanden, wenn die Vakuumkammer des Systems evakuiert ist. Im belüfteten Zustand wirkt nur die Gewichtskraft. Die ermittelten Belastungen unter Vakuum dienen als angenommene Grundbasis für die Konzept- und Konstruktionsphase, da der Betrieb im Vakuum den Extremzustand für diese Rechnungen darstellt. Im Laufe der Konstruktion ändern sich die Belastungen sowie die Hebelarme aufgrund der detaillierten Auslegung der einzelnen Komponenten/Baugruppen. Die wirkende Masse auf die einzelnen Baugruppen steigt von oben nach unten. In der detaillierten Berechnung kommt eine zusätzliche Federkraft hinzu. Die Erläuterung dieser erfolgt in Abschnitt 4.3.1. Die Berechnung der Momente der einzelnen Unterbaugruppen basiert auf der Gleichung (4.19).

Tabelle 8. Zusammenfassung der vorhandenen Belastungen

Lagerreaktion/Kräfte/Schnittpunkt	Kraft in [N]	Moment in [Nm]
A_y	7115,93	
B_y	2694,07	
B_z	3332,92	
M		7535,7
F_G	9810	
F_v	3332.92	

4.3 Konzept der FastCCD-Baugruppen und der technischen Realisierung

Nach der Festlegung aller Randbedingungen und Belastungen steht die Herleitung eines Konzeptes für die Konstruktion der „FastCCD“ Baugruppen. Bei der Berechnung aller Kräfte und Momente kommt es zur Verwendung der Gleichungen aus Abschnitt 4.2. Die oberste Baugruppe „FastCCD“ besteht aus vier Unterbaugruppen und die Ausrichtungseinheit aus drei. Der Aufbau ist in Abbildung 4.5 dargestellt. Die Benennung der einzelnen Unterbaugruppen beinhaltet deren Freiheitsgrade. Die Abkürzung „trans_y_rot_x“ bedeutet, dass diese Baugruppe eine translatorische Bewegung in der Y-Achse ermöglicht und zusätzlich eine Drehung um die X-Achse. Die Reihenfolge der Entwicklung der einzelnen Baugruppen erfolgt von oben nach unten, demnach von der Strahlhöhe zum Fixpunkt am FFT-Kammer-Untergestell. Die Position des Strahles in der Hütte ist in allen drei Hauptgruppen genau definiert und gilt somit als absolute Positionsreferenz. Dieses Kapitel beschreibt die Bewegungs-Konzepte detaillierter und erläutert die technische Realisierung. Die Konzeptbeschreibung beinhaltet das Bewegungsprofil jeder Baugruppe. Zusätzlich kommt es zur näheren Definierung der für die Umsetzung der Anforderungen verwendeten Komponenten. Die Wahl der Abmaße und der Verfahrenswege der einzelnen Komponenten erfolgte bestmöglich zu den geometrischen und technischen Randbedingungen. Zusätzlich findet die Durchführung eines Festigkeitsnachweises für relevante Bauteile statt.

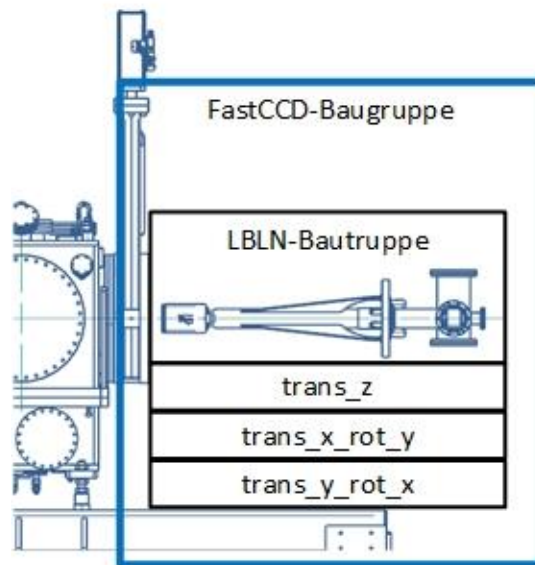


Abbildung 4.5. Baugruppenstruktur der FastCCD

4.3.1 Longitudinale Bewegung

Dieser Teilabschnitt beschreibt die Umsetzung der longitudinalen (translatorisch) Bewegung entlang der Z-Achse. Der Name der Baugruppe mit diesem Freiheitsgrad ist als „trans_z“ definiert.

4.3.1.1 Konzept der longitudinalen Bewegung

Diese Baugruppe beinhaltet eine longitudinale Bewegung entlang der Z-Achse. Die Umsetzung der Realisierung dieser Bewegung geschieht mittels einer motorisierten Linearführung. Die Baugruppe ist direkt mit der LBLN-FastCCD-Baugruppe verbunden. Um den FastCCD-Detektor bewegen zu können, darf der Bereich zwischen dem DN350 Ventil und dem Flansch des FastCCD-Detektors nicht starr sein. Mit dem Einsatz eines Membranbalges vollzieht sich die Umsetzung der flexiblen Verbindung. Ein Membranbalg besteht aus dünnwandigen, durch Längsnahtschweißung kontinuierlich verbundenen Rohren. Die zusammengeschweißten Rohre finden Bezeichnung als Membranpaare. Die Dicke der einzelnen Membrane variiert von 0,1 mm bis 0,8 mm und beeinflusst den maximalen translatorischen Hub sowie den maximal möglichen lateralen Versatz. Zusätzlich bestimmt die Dicke der Membrane die Lebensdauer eines Membranbalges. Die Lebensdauer ist mit der Lastwechselzahl angegeben. Ein Lastwechsel liegt bei einer kompletten Komprimierung und erneuten Streckung des Membranbalges vor. Die typische Lastwechselzahl eines Membranbalges liegt bei 10 000 Zyklen. Ein Membranbalg hat drei Grundstellungen – die komprimierte Konfiguration, die gestreckte Konfiguration und die freie Länge bei einer Nichtbelastung des Balges. Mittels der Werte aus Tabelle in Anhang A5 und der Gleichung (4.20) lassen sich die drei Grundlängen berechnen. Die Anzahl der Membranen (n_b) wird mit dem Faktor (l_t) multipliziert. Der Faktor l_t ist für jede Grundposition unterschiedlich und hängt

vom Werkstoff und den inneren und äußeren Durchmessern der Membranen ab. Die Werte aus Tabelle A5 (Anhang) sind experimentell ermittelt worden und gelten für Berechnungen von Membranbalgen mit einer Lastwechselzahl von 10 000 Zyklen [28].

$$L_{balk} = n_b * l_t \quad (4.20)$$

Ein Membranbalg verhält sich wie eine Feder; bei einer Streckung oder Komprimierung desselben wirkt eine zusätzliche Kraft entgegen der Bewegung. Diese Federkraft (F_k) setzt sich aus der Federkonstante (c) des Membranbalges und dem zurückgelegten Weg (s) zusammen. Mittels der Gleichung (4.21) kommt es zur Berechnung der Federkraft [13].

$$F_k = c * s \quad (4.21)$$

Das Bestimmen des verfügbaren Weges des Membranbalges vollzieht sich mittels des Subtrahierens der freien Länge des Membranbalges (L_f) von der gestreckten bzw. komprimierten Länge ($L_{e/c}$).

$$s = L_{e/c} - L_f \quad (4.22)$$

Der Abstand der Probe zum FastCCD-Detektor hängt vom Experiment ab und sollte in einem Bereich von 0 mm bis 750 mm liegen. Abschnitt 4.3.1.2 leitet den tatsächlich möglichen erreichbaren Abstand her. Ein weiterer wichtiger Aspekt dieser Baugruppe ist der sichere Betrieb. Sollte es während eines Experiments zum Stromausfall kommen, darf sich die Linearführung nicht aufgrund der Vakuumkraft oder der Federkraft bewegen.

4.3.1.2 Technische Realisierung der longitudinalen Bewegung

Die longitudinale Bewegung in der Z-Achse erfolgt mittels einer Linearführung. Die zusammengesetzte Konstruktion ist in Abbildung 4.6 verdeutlicht. Die Linearführung wird auf eine Platte montiert und definiert den variablen Abstand der Probe zum Detektor. Der minimale sowie maximale Abstand der Probe zum FastCCD-Detektor hängt vom eingesetzten Membranbalg und der Linearführung ab. Die komprimierte Länge des Faltenbalges beeinflusst den kleinstmöglichen Abstand der Probe zum Detektor und die gestreckte Länge den größtmöglichen. Zusätzlich bestimmt der Verfahrensweg der Linearführung die beiden Parameter. Auf den Schlitten der Linearführung wird ein Gestell mit einem Halbring montiert, der einen Ausschnitt besitzt, durch den der Außendurchmesser des Membranbalges passt. Zusätzlich hat das Gestell Langlöcher, die auf demselben Lochkreis liegen wie das Bohrmuster des Flansches des Membranbalges. Durch die Langlöcher besteht die Möglichkeit, den Flansch bei der Montage auszurichten. Das Gestell dient als Verbindungselement zwischen der

Linearführung und dem Membranbalg (Abbildung 4.6). Das Ende auf der downstream-Seite ist durch die vorhandenen Freiheitsgrade der einzelnen Baugruppen beweglich. Das gegenüberliegende Ende (upstream) ist mit einer Pumpkammer verbunden, die wiederum am DN350 Ventil angeschlossen ist. Die upstream-Seite bildet das feste Ende. Der eingesetzte Membranbalg hat einen Hub (s_m) von 620,2 mm. Die komprimierte Länge (L_c) beträgt 129,5 mm, die gestreckte Länge (L_e) ist 749,7 mm. Die Linearführung kann insgesamt 594 mm verfahren werden, was nicht dem kompletten Hubweg des Membranbalges entspricht. Der Grund für diese Abweichung liegt auf nicht vorhandenen passenden Linearführungen auf dem Markt. Um den gesamten Hubweg zu erreichen, müsste eine kundenspezifisch gefertigte Linearführung erfolgen. Dieses würde unnötige Kosten verursachen, daher fiel die Entscheidung, die auf dem Markt erhältlichen zu nehmen. Nach der Integration der Baugruppe beträgt der maximale Abstand der Probe zum FastCCD-Detektor 618,5 mm bei einer kompletten Streckung des Membranbalges (Abbildung 4.6). Der minimale Abstand der Probe zum Detektor kann theoretisch 0 mm betragen und setzt sich wie folgt zusammen: Die Komprimierung des Membranbalges geschieht mittels des kompletten Hubs der Linearführung um 594 mm. Die Gleichung (4.23) bestimmt den minimalen Hub, der durch die eingesetzte Linearführung erreichbar ist.

$$s_{min} = 618,5 \text{ mm} - 594 \text{ mm} = 24,5 \text{ mm} \quad (4.23)$$

Nach dem Nutzen des kompletten Verfahrweges der Linearführung in Richtung upstream entsteht ein Abstand von 24,5 mm zwischen der Probe und dem Detektor. Die eingebaute Linearführung in der FFT-Probenkammer kann die Probe um 180 mm in Richtung downstream bewegen. Dadurch ist es möglich, den Spalt von 24,5 mm komplett zu komprimieren. Die technischen Eigenschaften des Membranbalges und der Linearführung sind in Anhang A5 im Detail dargestellt.

Wie in Kapitel 4.3.1 erwähnt, wirkt eine zusätzliche Federkraft im Falle des Streckens oder des Komprimierens des Membranbalges aus der freien Länge. Die entstehende Federkraft wirkt immer entgegengesetzt der Bewegungsrichtung. Beim Strecken des Membranbalges erhöht sich die gesamte wirkende Kraft aus Vakuum- und Federkraft. Beim Komprimieren kompensieren sich die beiden Kräfte teilweise, da sie entgegengesetzt wirken. Die Ermittlung der Federkraft vollzieht sich nach der Gleichung (4.21). Die Verfahrwege beim Komprimieren oder Strecken sind unterschiedlich. Die Ermittlung des maximalen Verfahrweges beim Strecken geschieht durch das Abziehen von der maximalen gestreckten Länge der freien Länge des Membranbalges. Der berechnete komprimierte Weg ergibt sich aus der Subtrahierung der komprimierten Länge von der freien Länge. In Anhang A6 sind die Berechnungen für die Bestimmung der Verfahrwege sowie die Ermittlung der neu wirkenden Kräfte und des wirkenden Momentes festgehalten. Bei der Auslegung der Linearführung finden die bei der Streckung des Membranbalges entstehenden höheren Kennwerte Berücksichtigung. Bei der Bestimmung der Belastungen wurde eine Masse von 250 kg angenommen (LBNL-Baugruppe). Der Hebelarm beträgt 250 mm. Zusammengefasst muss die Linearführung eine Kraft in der Axial-Richtung

(Z-Achse) und ein Moment um die X-Achse wie in Abschnitt 4.2 beschrieben aufnehmen können. Die wirkenden berechneten Belastungen auf die Linearführung sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

Nach einer Marktrecherche bieten die Linearführungen der Firma „Föhrenbach“ die besten Lösungen für die vorhandenen Belastungen an. Die verwendete Linearführung des Typs „PFSG225“ kann aufgrund eines langen Schlittens ein Moment um die X-Achse von 11965 Nm aufnehmen. Der Verfahrweg beträgt 594 mm. An der Linearführung ist ein Absolutencoder der Firma „Renishaw“ installiert. Das Datenblatt der verwendeten Linearführung ist in Anhang A5 enthalten [11].

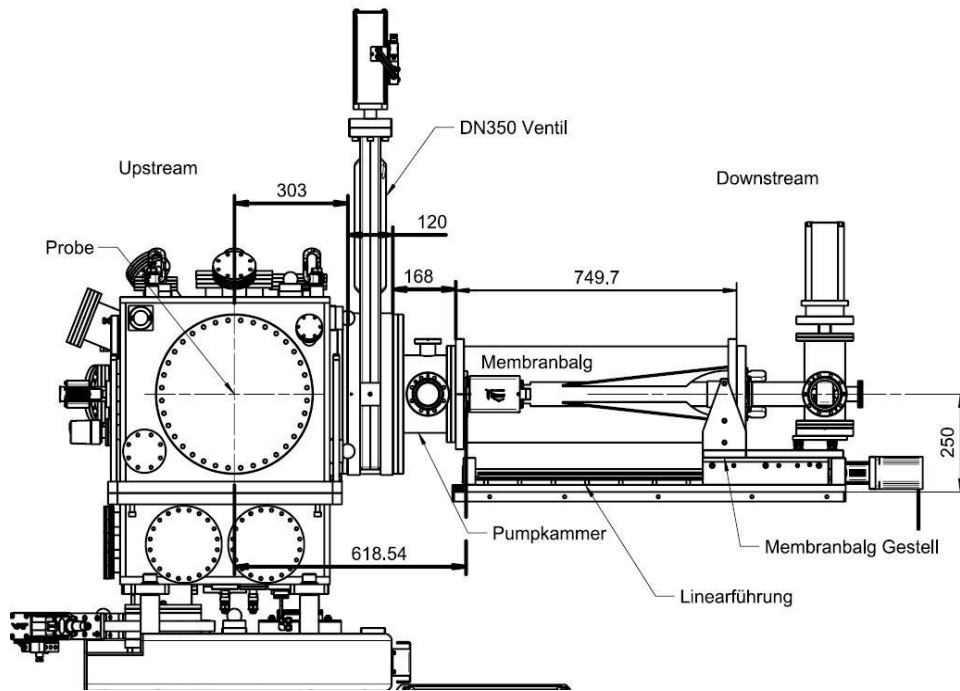


Abbildung 4.6. Detaillierter Zusammenbau der Baugruppe trans_z

Tabelle 9. Wirkende Belastungen auf die Linearführung (Z-Achse)

	Membranbalg komprimiert	Membranbalg gestreckt
Entstehende Federkraft [N]	319	362,67
Gesamt wirkende Kraft [N]	3013,9	3695,6
Moment [Nm]	753	923
Verfahrweg des Membranbalges [mm]	290	329,7

Eine weitere wichtige Komponente dieser Baugruppe ist die Pumpkammer. An die Kammer lassen sich zwei Pumpen der Größe DN63 anschließen, was die ermittelte Auspumpzeit (Tabelle 7) weiter verbessern würde. Zusätzlich besitzt die Kammer oben einen DN40 Anschluss, an dem der Anschluss einer Messdruckdose und eines Belüftungsventils möglich ist. Die Auslegung der Breite der Kammer vollzog sich so gering wie möglich. Um die Montage zu erleichtern, ist jeder Flansch an der Kammer rotierbar.

Anschließend erfolgt die Überprüfung, ob der Einsatz eines vorhandenen Schrittmotors mit einem Drehmoment von 8,5 Nm und einem Massenträgheitsmoment des Rotors von $3400 \cdot 10^{-7} \text{ kgm}^2$ für die vorhandenen Belastungen ausreichend ist. Die Annahme der vorhandenen Belastungen bei der Berechnung des Motors basiert auf Tabelle 9. Das Gewicht, welches der Schlitten der Linearführung bewegt, beträgt ca. 150 kg. Da es bei dem Betrieb von Schrittmotoren Grenzen gibt, ist als Erstes das externe Massenträgheitsmoment (J_{ext}) des vorhandenen Systems zu ermitteln. Das externe Massenträgheitsmoment setzt sich aus der Summe des rotatorischen Trägheitsmoments ($J_{spindel}$) der Spindel und des translatorischen Trägheitsmoments (J_{Trans}) der zu bewegenden Masse zusammen und findet Berechnung nach Gleichung (4.24) [55].

$$J_{ext} = J_{Spindel} + J_{Trans} \quad (4.24)$$

Bei der Bestimmung des rotatorischen Trägheitsmoments erfolgt eine nähere Betrachtung der Spindel der Linearführung. Die relevanten Kennwerte sind der Radius (r), die Länge ($l_{spindel}$) und das spezifische Gewicht (γ) der Spindel. Mittels der Gleichung (4.25) vollzieht sich die Ermittlung des rotatorischen Trägheitsmoments [55].

$$\begin{aligned} J_{spindel} &= \frac{1}{2} \pi * r^4 * l_{spindel} * \gamma = \frac{1}{2} \pi * (0,01 \text{ m})^4 * 0,65 \text{ m} * 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ &= 8,015 * 10^{-5} \text{ kgm}^2 \end{aligned} \quad (4.25)$$

Das translatorische Trägheitsmoment hängt von der bewegten Masse ab sowie von der Steigung (h) der Spindel.

$$J_{Trans} = m * \left(\frac{h}{2\pi} \right)^2 = 150 \text{ kg} * \left(\frac{0,005 \text{ m}}{2\pi} \right)^2 = 9,45 * 10^{-5} \text{ kgm}^2 \quad (4.26)$$

Nach dem Einsetzen der translatorischen und rotatorischen Trägheitsmomentes in die Gleichung (4.24) ergibt sich das gesamte Trägheitsmoment des Systems von $1,75 * 10^{-4} \text{ kgm}^2$. Im weiteren Vorgehen wird das Massenträgheitsmoment des bestehenden Systems ins Verhältnis zum Massenträgheitsmoment des Rotors (J_{rot}) des Schrittmotors gesetzt. Der dimensionslose Wert

definiert, ob ein fehlerfreies Starten oder Stoppen des Schrittmotors möglich ist. Bei optimalen Bedingungen liegt der Wert unter vier [55].

$$n = \frac{J_{ext}}{J_{rot}} = \frac{1,7513 * 10^{-4} \text{ kgm}^2}{3400 * 10^{-7} \text{ kgm}^2} = 0,51 \quad (4.27)$$

Nach dem Überprüfen des Verhältniswertes kommt es zum Bestimmen des Drehmoments, welches notwendig ist, um den Schlitten unter Last zu bewegen. Dafür ist als Erstes die auf den Schlitten wirkende Kraft zu berechnen. Diese Kraft setzt sich aus der Vakuumkraft und der Gewichtskraft zusammen. Die Vakuumkraft F_v wirkt in der axialen Richtung auf das System und bleibt konstant. Die Gewichtskraft F_G hängt von der Neigung der Linearführung ab und setzt sich somit aus den Anteilen der Y- und der Z-Achse zusammen. Im vorliegenden Fall beträgt der Neigungswinkel (α) immer 0°. Zusätzlich beeinflusst der Reibkoeffizient (μ) der Spindel die Gewichtskraft. Der Reibkoeffizient hat nur eine Auswirkung auf den Gewichtskraftanteil in der Y-Richtung. Der Kraftanteil in der Y-Richtung ist die Normalkraft. Der Reibkoeffizient hängt von der Oberflächenbeschaffenheit und den Werkstoffen der Elemente ab. Außerdem beeinflusst die Art der Schmierung den Reibkoeffizienten. Die eingesetzten Linearführungen haben einen Kugelgewindetrieb mit einem sehr geringen Reibkoeffizienten. Bei der Bestimmung des Reibkoeffizienten und des Wirkungsgrades der Spindel ist in erster Linie der Gewindesteigungswinkel nach Gleichung (2.9) zu berechnen [13, 55].

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{h}{d_2 \pi}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{5 \text{ mm}}{20 \text{ mm} * \pi}\right) = 4,55^\circ$$

Aus dem Diagramm in Abbildung 2.17 a) ist ein Reibkoeffizient von 0,01 und ein Wirkungsgrad von 88 % für die vorhandenen Spindeln ablesbar. Außerdem ist die eingesetzte Linearführung nicht selbsthemmend, da der Gewindesteigungswinkel $> 4,5^\circ$ beträgt. [48].

In den weiteren Schritten berechnet die Formel (4.28) die resultierende Kraft, welche auf den Schlitten wirkt. Der Anteil der Gewichtskraft in der Z-Richtung mit $\sin(\alpha)$ und der Y-Richtung Anteil mit $\cos(\alpha)$ ist zu berechnen. Der Anteil der Gewichtskraft aus der Y-Richtung ist zusätzlich mit dem Reibkoeffizienten zu multiplizieren, da dieser auch der Normalkraft entspricht.

$$\begin{aligned} F &= F_v + F_G(\sin(\alpha) + \mu \cos(\alpha)) = \\ &= 3695,6 \text{ N} + 1471,5 \text{ N} * (\sin(0) + 0,01 * \cos(0)) = 3710,315 \text{ N} \end{aligned} \quad (4.28)$$

Das Bestimmen des notwendigen Drehmoments für den Schrittmotor vollzieht sich nach dem Bestimmen der wirkenden resultierenden Kraft.

$$M_T = \frac{F * h}{2\pi * \eta_{Spindel}} = \frac{3710,315 \text{ N} * 0,005 \text{ m}}{2\pi * 88 * 0,01} = 3,35 \text{ Nm} \quad (4.29)$$

Bei einem Sicherheitsfaktor von zwei muss der Schrittmotor ein Drehmoment von $6,7 \text{ Nm}$ aufbringen können.

Sollte es im Betrieb zum Stromausfall kommen, darf sich das System aufgrund der wirkenden Kräfte (Vakuum- und Federkraft) sowie fehlender Selbsthemmung nicht bewegen. Aus diesem Sicherheitsgrund ist eine Bremse zu integrieren. Das Montieren der Bremse geschieht auf die verlängerte Welle, die aus der Rückseite des Schrittmotors herausragt. Liegt an der Bremse eine Spannung an, ist diese geöffnet. Bei einem Spannungsverlust schließt die Bremse automatisch und blockiert damit die Drehbewegung der Welle des Schrittmotors. Ein weiterer Sicherheitsaspekt ist der den Schrittmotor betreibende Treiber. Der Treiber definiert die Stromstärke, ob sie konstant wirkt oder im Betrieb variiert. Die Stromstärke beeinflusst linear das Drehmoment, welches der Schrittmotor aufwenden kann. Bei $4,5 \text{ A}$ kann der Motor $8,5 \text{ Nm}$ aufbringen, bei $2,5 \text{ A}$ sind es ca. $4,25 \text{ Nm}$. Zusätzlich zu der Stromstärke ist die Drehmoment-Frequenz-Kennlinie des Schrittmotors zu betrachten, welche in Abbildung 4.7 für eine Stromstärke von $4,5 \text{ A}$ dargestellt ist. Bei steigender Betriebsfrequenz reduziert sich das Drehmoment, welches der Schrittmotor aufbringen kann.

Der vorhandene Schrittmotor „PKP2913D45B“ der Firma „Oriental Motors“ kann ein Drehmoment von $8,5 \text{ Nm}$ aufbringen und ist für die Belastungen geeignet bei der Erfüllung von folgenden Randbedingungen:

- wenn im Betrieb eine konstante Stromstärke von $4,5 \text{ A}$ vorhanden ist
- bei einer Betriebsfrequenz von maximal 50 kHz
- Optional: Zwischenschaltung eines Getriebes (zwei Zahnräder) zwischen der Linearführung und dem Schrittmotor. Das Getriebe erhöht das vorhandene Drehmoment des Schrittmotors.

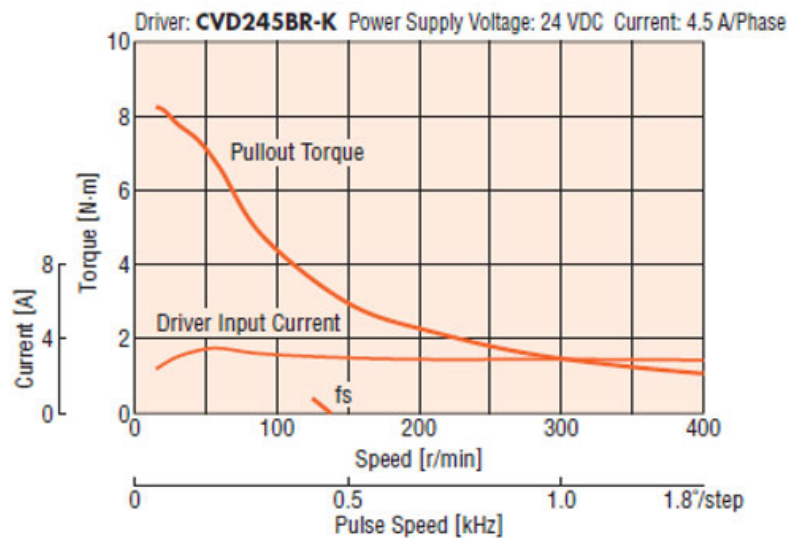


Abbildung 4.7. Drehmoment-Frequenz-Kennlinie für den Schrittmotor für die Z-Achse [32]

Die Baugruppe trans_z ermöglicht eine longitudinale Bewegung. Durch den verbauten Membranbalg und die Linearführung lässt sich ein Abstand zwischen Probe und Detektor von 0 mm bis 618 mm einstellen. Der geforderte maximale Abstand von 750 mm wurde nicht erreicht.

4.3.2 Laterale Bewegung und die Drehung

Dieser Teilabschnitt beschreibt die Umsetzung der lateralen Bewegung (translatorisch) entlang der X-Achse und einer Drehung (Rotation) um die Y-Achse. Der Name der Baugruppe in der Konstruktion mit diesen Freiheitsgraden ist als „trans_x_rot_y“ definiert.

4.3.2.1 Konzept der lateralen Bewegung und der Drehung

Laut dem Anforderungsprofil muss in dieser Baugruppe eine laterale Bewegung in der X-Achse von $\pm 7,5$ mm und eine Drehung um die Y-Achse von $\pm 3^\circ$ Grad möglich sein. Die Realisierung der Bewegungen in dieser Baugruppe vollzieht sich mithilfe von Linearführungen. Auf einer rechteckigen Platte sind drei Lagerpunkte. Lagerpunkt C besteht aus einer motorisierten Linearführung, die einen Verfahrbereich in der X-Achse hat. Lagerstelle D ist eine Kombination aus einer motorisierten Linearführung mit einem Verfahrbereich in der X-Achse und einer Linearführung, welche sich in der Z-Achse frei bewegen kann. Lager E besteht aus zwei Linearführungen, die einen Verfahrbereich in der X- und Z-Achse haben (ohne Motor). Abbildung 4.8 zeigt die Anordnung derselben. Fahren die motorisierten Linearführungen im Lagerpunkt C und D gleichzeitig in dieselbe Richtung, entsteht eine laterale (translatorisch) Bewegung in der X-Richtung. Eine Rotation um die Y-Achse entsteht, wenn die Lagerstelle C fix ist und der Lagerpunkt D in die positive oder negative X-Richtung verfahren wird. Bei der Auslegung der Verfahrwege der einzelnen Lagerpunkte dürften die motorisierten Linearführungen einen Hub von 30 mm besitzen.

Um einen symmetrischen Verfahrensweg zu gewährleisten, erfolgt der Einbau der Linearführungen mittig bei einem Hub von $\pm 15 \text{ mm}$.

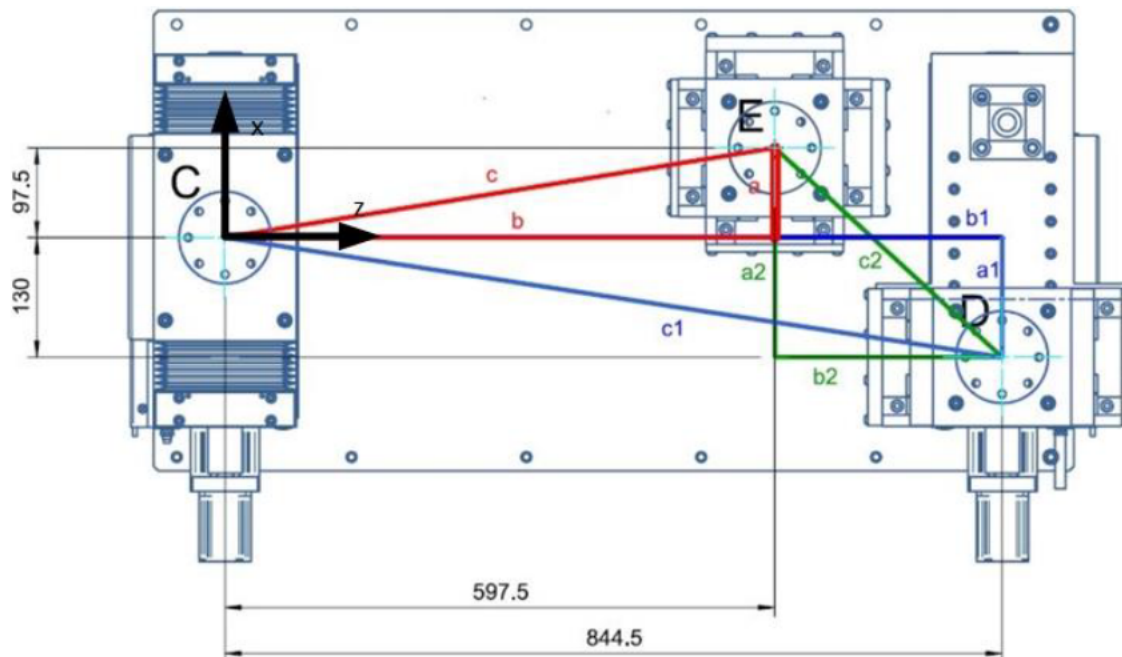


Abbildung 4.8. Bewegungskonzept mit den Linearführungen

Im Weiteren ermittelt dieser Abschnitt die Bewegungen der einzelnen Lagerstellen anhand der Abbildung 4.8. Der Koordinatenursprung liegt im Lagerpunkt C. Die detaillierte Berechnung für die neuen Koordinaten ist in Anhang A7 dargestellt. Bei der Bestimmung der neuen Koordinaten von Punkt D und Punkt E kommt es zunächst zur Bestimmung der Hypotenusen der einzelnen rechtwinkligen Dreiecke in der Ausgangsposition mittels des Satzes des Pythagoras. Die Länge der ermittelten Hypotenusen – der Kreisbogen, auf denen entweder der Lagerpunkt D oder E folgt – bleibt bei jeder Bewegung konstant. Bei einem positiven oder negativen Hub der Linearführung im Lager D bewegt sich Punkt D in einem Kreisbogen mit dem Radius von $c_1 = 854,44 \text{ mm}$. Die Bewegung der Lagerstelle E hängt von den konstanten Längen $c = 605,4 \text{ mm}$ und $c_2 = 335,81 \text{ mm}$ ab. Zusammengefasst entsteht bei einer Rotation eine kombinierte lineare Bewegung in der Z- und X-Achse. Bei der Ermittlung der neuen Positionen sind in erster Linie die neuen Koordinaten des Punktes D zu bestimmen. Verfährt die Linearführung in Punkt D z. B. um 15 mm in die positive X-Richtung, ändert sich zusätzlich der Abstand in der Z-Achse. Die Anwendung des Satzes des Pythagoras bestimmt den neuen senkrechten Abstand b_1 zwischen den Lagerpunkten C und D.

$$b_1 = \sqrt{c_1^2 - a_1^2} = \sqrt{(854,45 \text{ mm})^2 - (115 \text{ mm})^2} = 846,676 \text{ mm} \quad (4.30)$$

Der nächste Schritt ermittelt die Bewegung in der Z-Achse. Dafür ist der Ausgangsabstand zwischen Punkt C und D von dem neu ermittelten Abstand abzuziehen (Gleichung (4.31)).

$$\Delta z = |844,5 \text{ mm} - b_1 = 844,5 \text{ mm} - 846,67 \text{ mm} = -2,17 \text{ mm}| \quad (4.31)$$

Tabelle 10 fasst die berechneten Koordinaten der Lagerstelle D zusammen. Für ein besseres Verständnis gibt es in den Spalten für den Hub der motorisierten Linearführungen zwei Werte. Der Wert ohne Klammer ist der tatsächliche Verfahrweg der Linearführung (von 0 mm bis 30 mm). Der Wert in der Klammer ist der neu definierte, für den Betrieb relevante Nullpunkt (+/-15 mm). Bei einem maximalen Hub von 15 mm der Linearführung in der Lagerstelle D bewegt sich Punkt D in der X-Achse um +15 mm und in der Z-Achse um +2,17 mm.

Tabelle 10. Koordinaten nach der Bewegung der Lagerstelle D

Hub motorisierte Linearführung im Lager C [mm]	Hub motorisierte Linearführung im Lager D [mm]	Kreisbogen c_1 [mm]	Lagerabstand C zu D (Z-Achse) [mm]	Koordinate Lager D in der X-Achse [mm]	Δx [mm]	Δz [mm]
15 (0)	15 (0)	854,44	844,5	-130	0	0
15 (0)	30 (15)	854,44	846,67	-115	15	2,17

Nach der Ermittlung der neuen Koordinaten von Punkt D lassen sich die Koordinaten des Lagerpunktes E bestimmen. Die kommenden Berechnungen und die Benennung der Variablen beziehen sich auf Abbildung 4.9. In dieser Darstellung ist die Position von Punkt D nach einer positiven Bewegung von 15 mm abgebildet. Um die neue Lage des Punktes E zu bestimmen, ist ein Kreis mit einem Radius von $a = 605,4 \text{ mm}$ in Punkt C und ein Kreis in Punkt D mit dem Radius $b_3 = 335,8 \text{ mm}$ zu zeichnen. Der Schnittpunkt S_1 der beiden Kreise ergibt die neuen Koordinaten von Punkt E. Die Herleitung der Koordinaten von Punkt S_1 erfolgt in drei Schritten. Im ersten Schritt kommt es zur Berechnung des Winkels α_1 mit der Winkelfunktion Tangens [29]:

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left(\frac{a_1}{b_1} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{115 \text{ mm}}{846,67 \text{ mm}} \right) = 7,735^\circ \quad (4.32)$$

Anschließend findet die Bestimmung des Winkels α_2 des schiefwinkligen Dreiecks mit Einsatz des Cosinus-Satzes statt [29].

$$a^2 = b^2 + c_1^2 - 2 * b * c_1 \cos(\alpha_2) \quad (4.33)$$

Die Umstellung des Cosinus-Satzes vollzieht sich nach Winkel α_2 .

$$\alpha_2 = \cos^{-1} \left(\frac{-a^2 + b^2 + c_1^2}{2 * b * c_1} \right) = \quad (4.34)$$

$$\cos^{-1} \left(\frac{-(605,4 \text{ mm})^2 + (335,8 \text{ mm})^2 + (854,44 \text{ mm})^2}{2 * 854,44 \text{ mm} * 335,8 \text{ mm}} \right) =$$

$$\alpha_2 = 33,896^\circ$$

Der letzte Schritt berechnet Winkel α_3 . Die Summe aller α Winkeln ergibt 90° . Die Umstellung der Formel (4.35) geschah nach dem gesuchten Winkel.

$$\alpha_3 = 90^\circ - \alpha_1 - \alpha_2 = 90^\circ - 7,735^\circ - 33,869^\circ = 48,369^\circ \quad (4.35)$$

Nach der Bestimmung des Winkels α_3 erfolgt die Ermittlung der Längen a_3 und c_3 mittels der Winkelfunktion Sinus und Cosinus.

$$a_3 = \sin(\alpha_3) * b = \sin(48,369^\circ) * 335,8 \text{ mm} = 250,99 \text{ mm} \quad (4.36)$$

$$c_3 = \cos(\alpha_3) * b = \cos(48,369^\circ) * 335,8 \text{ mm} = 223,082 \text{ mm} \quad (4.37)$$

Der letzte Schritt kann die Schnittpunkte in der X- und Z-Ebene, bezogen auf das Koordinatensystem, welches in Punkt C liegt, wie folgt bestimmen.

$$S_{1,x} = c_3 - a_1 = 223,082 \text{ mm} - 115 \text{ mm} = 108,08 \text{ mm} \quad (4.38)$$

$$S_{1,z} = b_1 - a_3 = 846,67 \text{ mm} - 250,99 \text{ mm} = 595,68 \text{ mm} \quad (4.39)$$

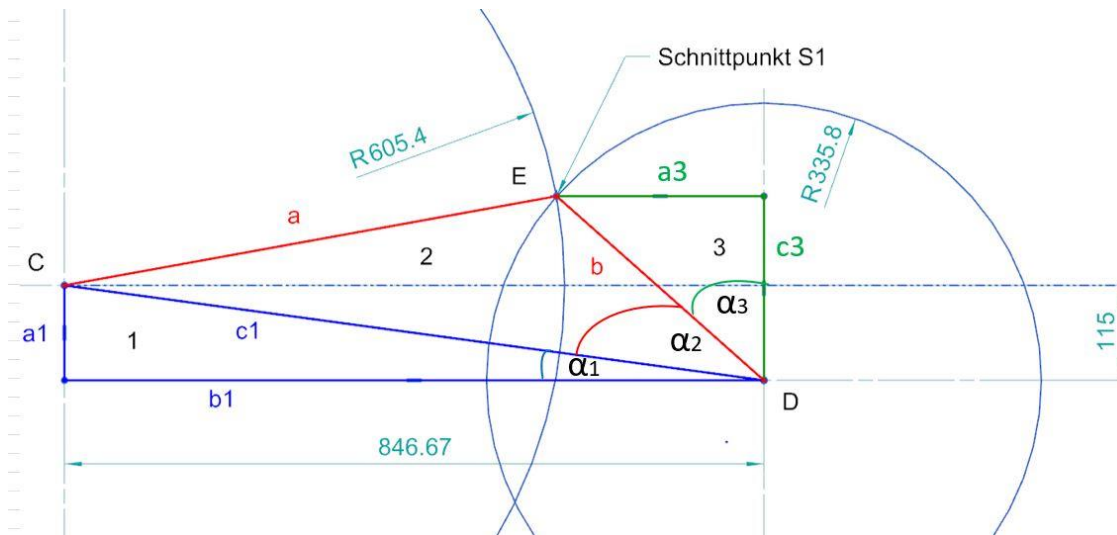


Abbildung 4.9. Darstellung der geometrischen Beziehungen (Lagerpunkt D und E)

Tabelle 11 fasst die neuen Koordinaten der einzelnen Lagerpunkte, nachdem die Linearführung in Punkt D um den maximalen Verfahrbereich in die positive X-Richtung von 15 mm bewegt worden ist, zusammen. Der Koordinatenursprung liegt in Punkt C. Die Tabelle beinhaltet zusätzlich die tatsächlichen Bewegungen der einzelnen Lagerpunkte bezogen auf die Ausgangsposition.

Tabelle 11. Koordinatenpunkte der Lagestellen nach der Drehung um die Y-Achse

Lagestelle	Koordinate X-Achse [mm]	Koordinate Z-Achse [mm]	Δx [mm]	Δz [mm]
C	0	0	0	0
D	-115	846,67	15	2,17
E	108,08	595,68	10,58	1,82

Nach der Bestimmung der Bewegungen aller Lagerpunkte müssen die Linearführungen in Lagerpunkt C und D in der X-Richtung einen Verfahrweg von $\pm 15 \text{ mm}$ und in Punkt E einen Verfahrweg von $\pm 10,58 \text{ mm}$ aufweisen. In der Z-Richtung benötigt die Linearführung eine minimale translatorische Freiheit von $\pm 2,17 \text{ mm}$.

4.3.2.2 Technische Realisierung der lateralen Bewegung und Drehung

Ausgehend von der konzeptionellen Überlegung für diese Bewegungen beschreibt dieses Kapitel die technische Umsetzung der translatorischen Bewegung in der X-Achse und die Drehung um die Y-Achse. Abbildung 4.10 visualisiert die umgesetzte Konstruktion dieses Konzeptes.

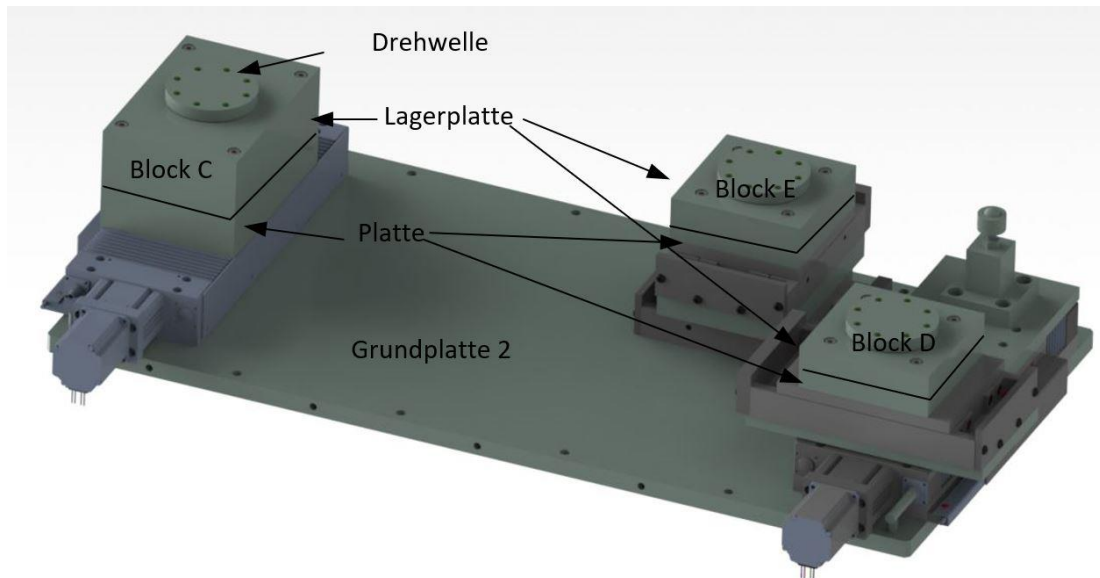


Abbildung 4.10. Design der Baugruppe: trans-x, rot-y

Das Montieren der Linearführungen vollzieht sich auf der Grundplatte 2 mit der anschließenden Fixierung der Blöcke C, D und E. Die Blöcke dienen als Schnittstelle zwischen dieser Baugruppe und der übergeordneten Baugruppe „trans_z“. Abbildung 4.12 enthält eine detaillierte Darstellung der Blöcke. Jeder Block besitzt eine Lagerplatte, in der ein einreihiges Schrägkugellager eingepresst ist. Das einreihige Schrägkugellager lässt sich axial in einer Richtung belasten. Zusätzlich nimmt es radiale Kräfte auf. Eine weitere Eigenschaft des Schrägkugellagers besteht in der Möglichkeit, dieses unter einen Winkel von 40° belasten zu können. In der Regel kommt es aufgrund der einseitigen axialen Belastung zum Verbau von zwei einreihigen Schrägkugellagern in entgegengesetzter Richtung. Diese Ausarbeitung hat eine vereinfachte Lösung gewählt. Sollten axiale Kräfte in der Richtung entgegen der Gewichtskraft entstehen, nimmt die Sicherungswelle die Kräfte auf. Die Sicherungswelle ist mit einer Schraube mit der Drehwelle verbunden. Zwischen der Sicherungswelle und der Lagerplatte besteht ein Spalt von 0,2 mm mit der dadurch entstehenden Ermöglichung einer Drehbewegung. Das eingesetzte Schrägkugellager ist nach DIN 620 genormt. Innen- und Außenring des Lagers besitzen die Toleranzklasse P6. Leichte Hammerschläge pressen sowohl die Drehwelle als auch das Lager beim Fügen ein, was eine Übermaßpassung charakterisiert. Die Rechnung für die Auslegung der Passungspaare ist in Anhang A8 zu finden [10, 47].

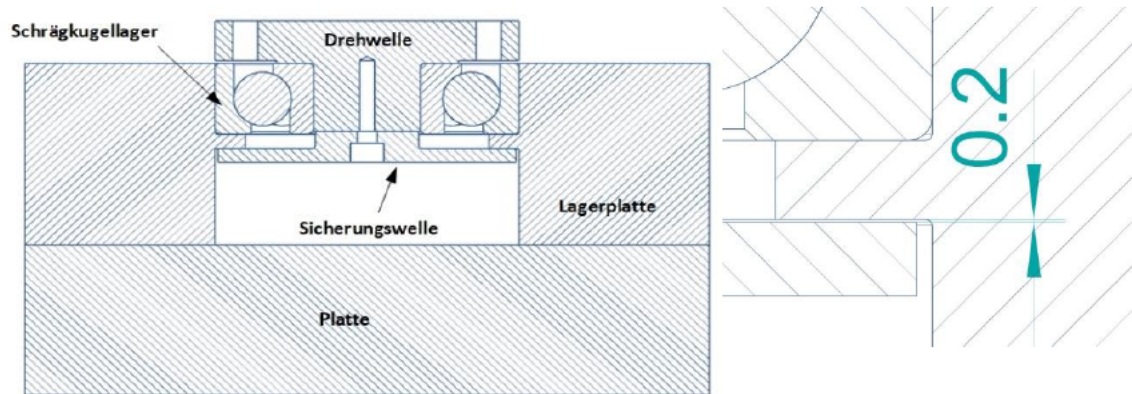


Abbildung 4.12. Schnittdarstellung eines Blocks

Nach dem Zusammenfügen der Baugruppe „trans_z“ mit der Baugruppe „trans_x-rot_y“ verändern sich die einzelnen Kräfte und Momente, welche auf die Linearführungen dieser Baugruppe wirken. Dabei sind die beiden Extremzustände des Membranbalges (gestreckt oder komprimiert) zu betrachten. In der vereinfachten Zeichnung in Abbildung 4.11 sind die Abmaße und die Stellen mit der Berechnung der Momente dargestellt.

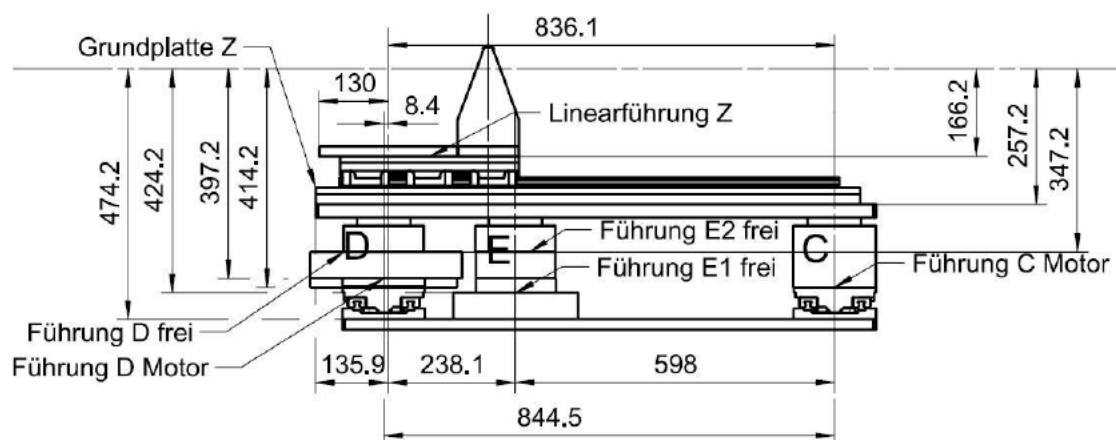


Abbildung 4.11. Abmaße der einzelnen Lagerstellen bei der Streckung des Membranbalges

Die Berechnung der einzelnen Momente ist nach der Ermittlung des Momentes an der „Führung D frei“ ausgerichtet. Der erste Schritt erstellt ein Freikörperbild (Abbildung 4.13). Anschließend kommt es im weiteren Vorgehen zum Ableiten der Momentengleichung und zum Umstellen nach dem gesuchten Moment. Die Bestimmung des Momentes richtete sich aus nach einer Vakuumkraft von 3700 N und einer Gewichtskraft von 2500 N. Die gedrückte Position des Membranbalges rechnete mit denselben Belastungen.

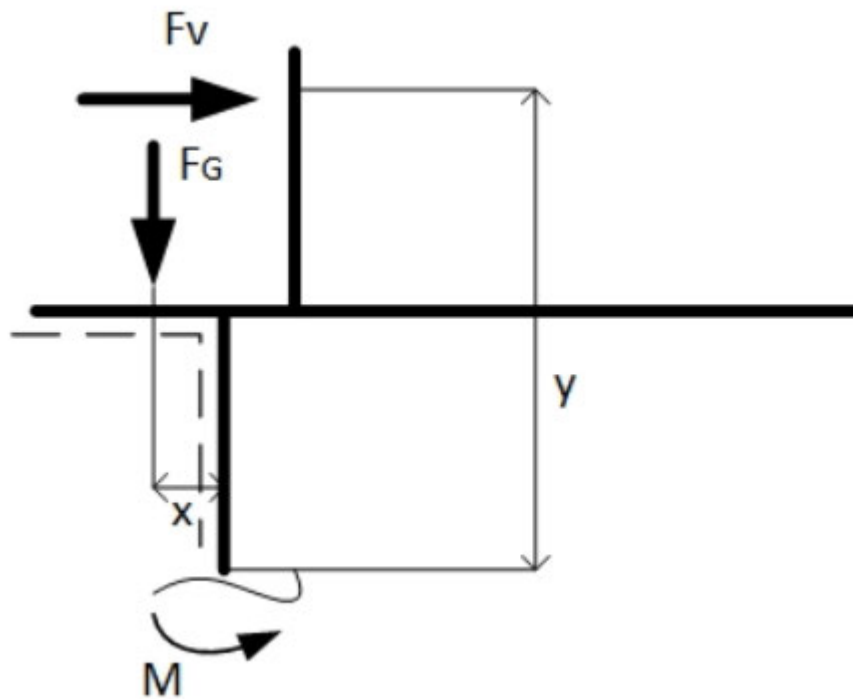


Abbildung 4.13. Freischnitt für die Berechnung des wirkenden Momentes an der freien Linearführung in Lager D

$$\sum \varnothing = 0 = M + F_G * x - F_v * y$$

$$M = -F_G * 8,6 \text{ mm} + F_v * 347,2 \text{ mm} = \quad (4.40)$$

$$-2500 \text{ N} * 8,6 \text{ mm} + 3700 \text{ N} * 347,2 \text{ mm} = 1263,14 \text{ N}_m$$

Die Gleichung (4.40) dient der Berechnung des Moments an der Position „Führung D Frei“. Die Bestimmung sämtlicher restlicher Momente in der gestreckten sowie gedrückten Position des Membranbalges ist nach diesem Schema erfolgt. Die dazugehörigen Freibilder und Rechnungen sind in Anhang A9 zu finden. Die Ergebnisse der analytischen Berechnung sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) kam es zur zusätzlichen Überprüfung der Ergebnisse der komplexen Geometrie. Dafür diente in erster Linie eine Vereinfachung der Baugruppen „trans_z und

trans_x_rot_y“ mittels des Entfernnens aller Schrauben, Lager, Fasen und Radien. Modellerte Stopfen haben alle Freiräume und Bohrungen verschlossen. Es kam zur Vernetzung des vereinfachten Modells aus Abbildung 4.14, die drei vorhandenen Randbedingungen (Vakuumkraft, Gewichtskraft und Feste Lagerung) wurden gesetzt. Dabei wirkt die Vakuumkraft in die positive Z-Richtung auf den Halbring des Membranbalghalters. Die Gewichtskraft wirkt in Richtung der negativen Y-Achse auf die komplette rechteckige Platte des Halters, auf der der Halbring montiert ist. Die unterste Grundplatte ist als eine fixierte Lagerung definiert. Diese lässt keine Verschiebungen und Drehungen in den sechs Freiheitsgraden zu. Die simulierten Ergebnisse, ebenfalls in Tabelle 12 aufgelistet, ähneln den berechneten. Aus diesem Grund findet keine weitere Optimierung der Simulation statt. In dieser Ausarbeitung wurde die FEM-Analyse als Kontrollwerkzeug verwendet und findet hier keine weitere Vertiefung. Die Durchführung der Simulation des gedrückten Membranbalges geschah mit einer Vakuumkraft von 3700 N anstatt 3020 N. Für die weiteren Auslegungen finden die simulierten Momente, welche im gedrückten Zustand des Membranbalges entstehen, Berücksichtigung [23].

Tabelle 12. Wirkende Momente an relevanten Stellen

	Berechnet		Simuliert	
Lage	Gestreckt [<i>Nm</i>]	Gedrückt [<i>Nm</i>]	Gestreckt [<i>Nm</i>]	Gedrückt [<i>Nm</i>]
Linearführung Z	625	614	714	714
Grundplatte Z	930	2792	1048	2455
Führung D frei	1263	2807	1274	2782
Führung D Motor	1548	3055	1400	2942
Führung E 2 frei	689	2190	538	2052
Führung E 1 frei	974	2475	842	2347
Führung C Motor	541	943	734	793

Die eingesetzten motorisierten Linearführungen der Firma Föhrenbach vom Typ „PFSG155“ mit einem langen Verschiebeschlitten können ein Moment von 2 916 Nm um die X-Achse aufnehmen, was bei den bestehenden Belastungen ausreichend ist. Die mittig in die Konstruktion integrierte Schlittenführung lässt sich um 60 mm bewegen. Durch die mittige Ausrichtung des Schlittens ist ein symmetrischer Verfahrweg von +/-30 mm möglich. Der begrenzte Bauraum in der X-Richtung begrenzt den Bewegungsbereich der Linearführungen auf +/-15 mm. Dabei ist eine Drehung um die Y-Achse um +/-1 ° realisierbar. Um die geforderte Drehung von +/-3 ° zu erreichen, muss der Verfahrweg des

Schlittens ± 44 mm betragen. Die genaue Rechnung ist in Anhang A7 und das Datenblatt der Linearführung in Anhang A5 hinterlegt [11].

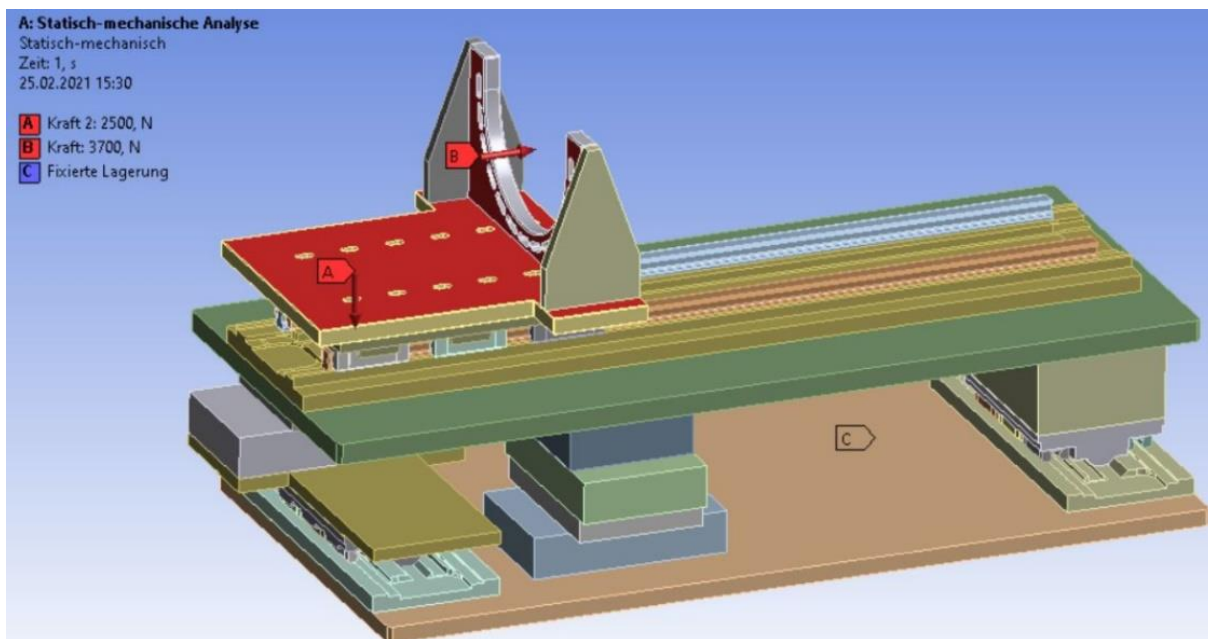


Abbildung 4.14. Darstellung des vereinfachten Modells mit den gesetzten Randbedingungen im FEM-Modell

Die verwendeten freien Linearführungen (ohne Antrieb) für die Lagerstellen D und E stammen von der Firma „Bosch Rexroth“. Pro Freiheitsgrad kam es zur Verwendung von vier Führungswagen, welche auf zwei Schienen liegen (zwei Wagen pro Schiene). Die Führungswagen sind mit einer rechteckigen Platte miteinander verbunden. Dadurch erfolgt eine Aufteilung des wirkenden Moments im Betrieb auf die einzelnen Wagen. In der Lagerstelle D und E1 können die vier Führungswagen des Typs „1653-30“ ein Moment von 2 960 Nm und die Einheit an der Lagerstelle E2 mit der Kennung „1653-25“ von 2 120 Nm aufnehmen.

Um eine kompakte Bauweise zu gewährleisten, kommt es längs der Strahlrichtung an jeder Kante zum Montieren von Zwischenplatten auf die Grundplatte 2. Eine Zwischenplatte besitzt zwei Ausschnitte für die Motoren der Linearführungen. Eine zusätzliche Platte verbindet diese anschließend miteinander von oben. Durch diese Anordnung der Platten entstehen auf jeder Seite „Flügel“, welche als Schnittstellen zu der unterliegenden Baugruppe „trans_y_rot_x“ dienen. Die Schnittstelle zur oberen Baugruppe (trans_z) sind die Drehwellen. Die zusätzliche obere Platte gestaltet das ganze System steifer. Abbildung 4.15 verdeutlicht den Aufbau.

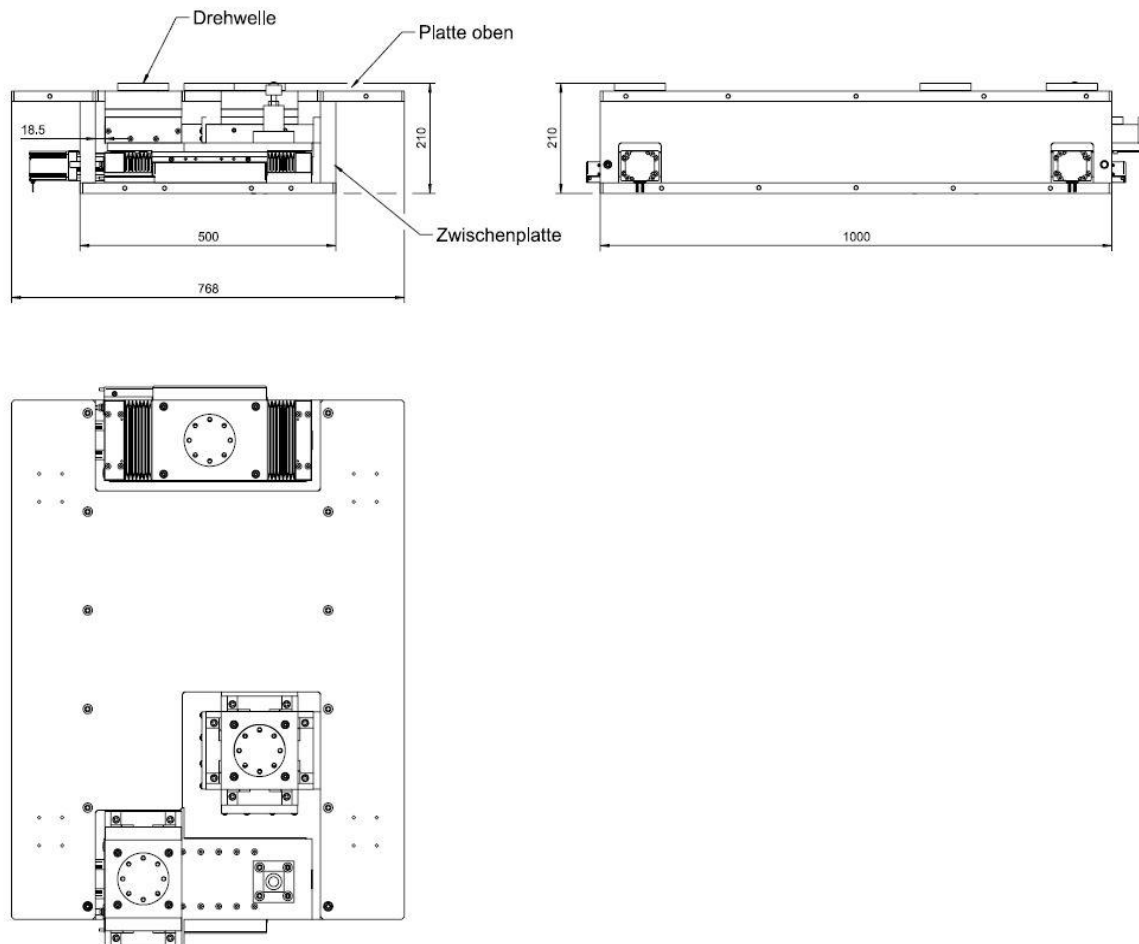


Abbildung 4.15. Zeichnung der Baugruppe "trans_x_rot_y"

Die Linearführungen sind jeweils mittels eines Schrittmotors anzutreiben. Die Spindel der Linearführung hat einen Radius von 10 mm und eine Steigung von 5 mm . Die Länge der Spindel beträgt 400 mm . Das Gewicht pro Schlitten beträgt 250 kg . Der erste Schritt berechnet den Gewindesteigungswinkel der Spindel nach der Gleichung (2.9). Mittels dieses Kennwertes lässt sich aus der Abbildung 2.17 der Reibkoeffizient und der Wirkungsgrad ablesen.

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{h}{d_2 \pi} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{5\text{ mm}}{20\text{ mm} * \pi} \right) = 4,55^\circ$$

Ein Kugelgewindetrieb mit einem Gewindesteigungswinkel von $4,55^\circ$ Grad hat einen Reibkoeffizienten von $0,01$ und einen Wirkungsgrad von 88% . Diese Linearführungen sind zusätzlich nicht selbsthemmend. Trotz der nicht vorhandenen Selbsthemmung ist keine Bremse notwendig. In der Grundstellung wirken eine Gewichtskraft sowie eine Vakuumkraft seitlich auf die Linearführungen. Eine Belastung in der axialen Richtung findet nicht statt (Abbildung 4.16 a)). Bei einer Drehung der trans_z Baugruppe von 3° Grad um die Y-Achse teilt sich die Vakuumkraft in zwei Komponenten auf. Der Kraftanteil in der X-Achse ist der relevante, da dieser in der axialen Richtung der Linearführungen

(Abbildung 4.16 b)) wirkt. Die Berechnung des Anteiles in der X-Richtung erfolgt nach der Gleichung (4.41).

$$F_x = \sin(\alpha) * F_v = \sin(3) * 3695,6 \text{ N} = 193,4 \text{ N} \quad (4.41)$$

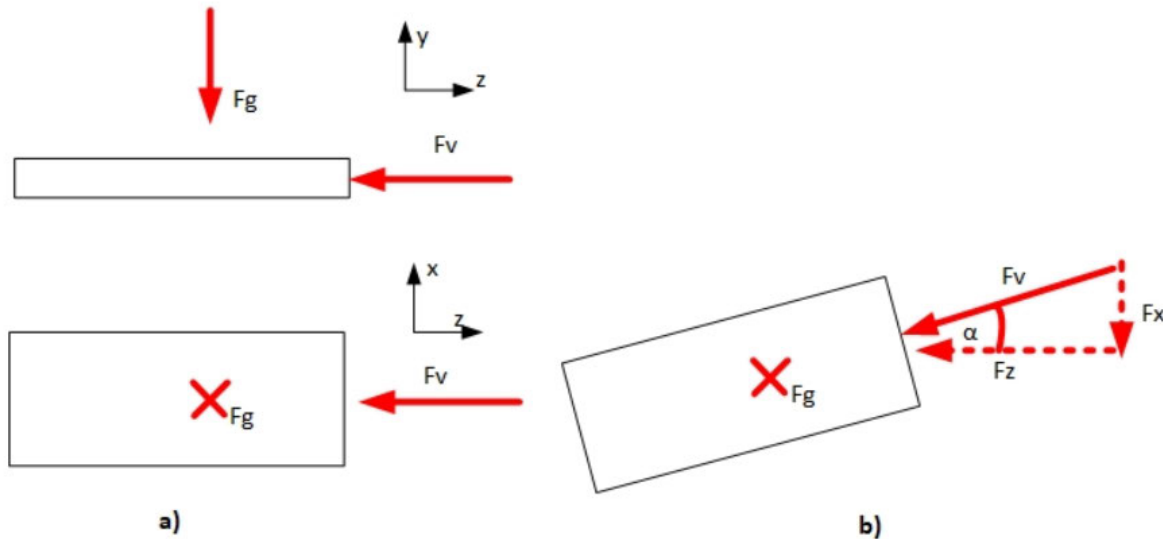


Abbildung 4.16. Wirkende Kräfte auf die Linearführung in der X-Achse

Der nächste Schritt ermittelt die gesamtwirkende Kraft, welche für die Bestimmung des notwendigen Drehmomentes des Schrittmotors notwendig ist. Die relevante Kraft setzt sich aus der vorhandenen Gewichtskraft sowie der Kraft, welche in der axialen Richtung wirkt (Anteil aus der X-Ebene), zusammen. Zusätzlich kommt es zum Multiplizieren der Gewichtskraft (Normalkraft) mit dem Reibkoeffizienten.

$$F = F_x + F_G * \mu = 193,4 \text{ N} + \left(250 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) * 0,01 = 217,9 \text{ N} \quad (4.42)$$

Zum Schluss erfolgt die Berechnung des notwendigen Drehmomentes, welchen der Schrittmotor leisten muss. Die ermittelten Kennwerte werden in der Gleichung (4.29) eingesetzt.

$$M_T = \frac{F * h}{2\pi * \eta_{\text{Spindel}}} = \frac{217,9 \text{ N} * 0,005 \text{ m}}{2\pi * 88 * 0,01} = 0,2 \text{ Nm}$$

Bei einer Sicherheitszahl von zwei benötigt jede Linearführung für die X-Achse einen Schrittmotor mit einem Drehmoment von $0,4 \text{ Nm}$. Aufgrund der kaum vorhandenen axialen Belastungen ist das Notwendige Drehmoment gering. Die Wahl fiel auf einen Schrittmotor der Firma „Oriental Motors“ vom Typ „PKP268D28A2“. Dieser Schrittmotor kann bei einer Stromstärke von $2,8 \text{ A}$ ein Drehmoment von $2,5 \text{ Nm}$ aufbringen. Abbildung 4.17 zeigt die Drehmoment-Frequenz-Kennlinie des gewählten Schrittmotors [32].

PKP268D28A2/PKP268D28B2

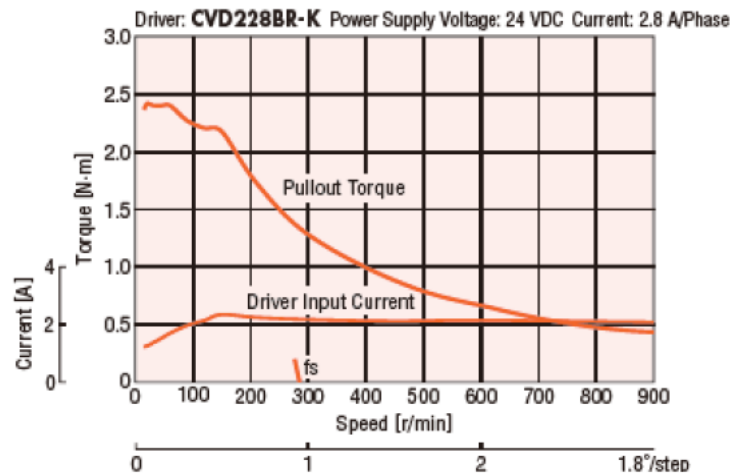


Abbildung 4.17. Drehmoment-Frequenz-Kennlinie für den Schrittmotor für die X-Achse [32]

4.3.3 Vertikale Bewegung und die Neigung

Dieser Teilabschnitt beschreibt die Umsetzung der vertikalen (translatorischen) Bewegung entlang der Y-Achse und eine Neigung (Rotation) um die X-Achse. Der Name der Baugruppe in der Konstruktion mit diesen Freiheitsgraden ist als „trans_y_rot_x“ definiert.

4.3.3.1 Konzept der vertikalen Bewegung und der Neigung

Die Hauptaufgabe dieser Baugruppe besteht darin, eine vertikale (translatorische) Ausrichtung in der Y-Achse und eine Neigung, um die X-Achse zu ermöglichen. Abbildung 4.18 verdeutlicht das Konzept. Die notwendigen Bewegungen erfolgen mithilfe von vier Hubspindeln. Bei den Hubspindeln gibt es zwei Haupttypen. Beim ersten Typ ist die Gewindestange beweglich, bei dem zweiten ist diese gelagert. Die Bestandteile einer Hubspindel sind in einem Gehäuse verbaut. Bei der ersten Variante treibt im Gehäuse eine Schneckenwelle eine gelagerte Mutter an. In der getriebenen Mutter ist eine Gewindestange. Durch die Drehbewegung der gelagerten Mutter bewegt sich die Gewindestange auf und ab. Bei der zweiten Variante ist die Gewindestange auf beiden Seiten gelagert. Zusätzlich ist auf der Gewindestange eine Laufmutter montiert. Die Schneckenwelle treibt die gelagerte Gewindestange an und versetzt die Laufmutter in Bewegung. Die Umsetzung des Konzeptes erfolgt unter dem Einsatz von Hubspindeln des Typs eins. Die Montage derselben erfolgt an einer rechtwinkligen Platte. In jeder Ecke ist eine Hubspindel montiert. Jeweils die gegenüberliegenden Hubspindeln sind mit einer Welle miteinander verbunden, wodurch Antriebsstrang A und B definiert werden. Ein Schrittmotor treibt jeden Strang an. Beim gleichzeitigen Antreiben der Stränge A und B erfolgt eine translatorische Bewegung entlang der Y-Richtung. Eine Rotation um die X-Achse entsteht beim Antreiben lediglich einer der Stränge. Um das ganze System nicht zu verspannen, sind die Bewegungen genau aufeinander

abzustimmen. Bei der vertikalen Bewegung fahren die Hubspindeln mit der gleichen Geschwindigkeit in dieselbe Richtung. Die Umsetzung dieser Anforderung erfolgt durch das Einsetzen von Absolut-Encodern. Diese ermitteln durchgehend die genaue Position jeder Achse [40].

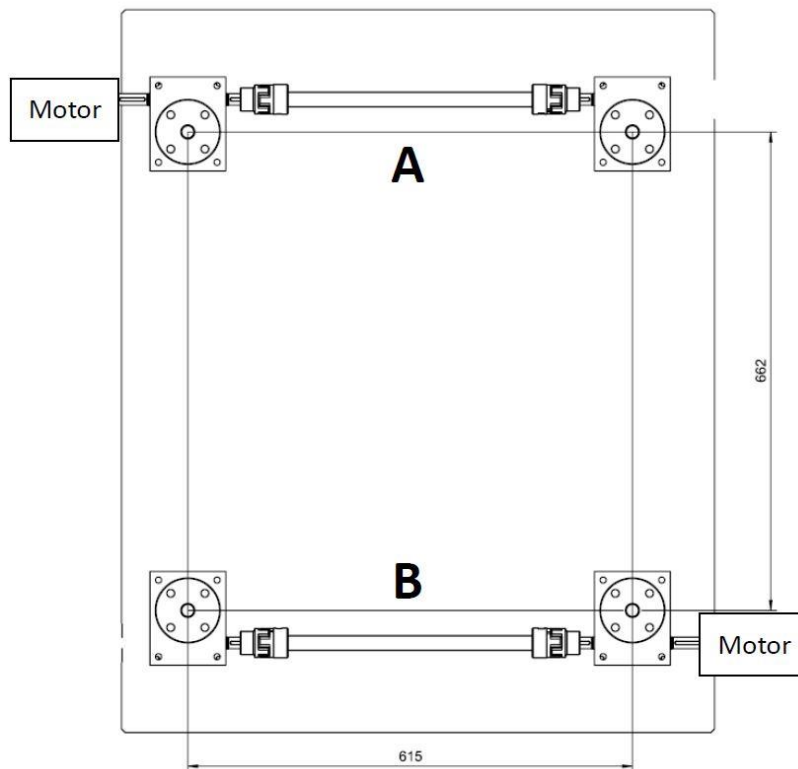


Abbildung 4.18. Draufsicht: Bewegungskonzept mit den Hubspindeln

Bei der Auslegung besteht die Annahme, eine Hubspindel könne ein Gewicht von 1 000 kg heben. Diese darf bei dieser Belastung nicht knicken. Bei dem Nachweis gegen Knicken kommt es zur Annahme des Eulerfalles 1, bei dem eine Spindel mit einem Durchmesser von 30 mm horizontal gelagert ist. Das untere Ende der Spindel ist fest eingespannt, das oberste Ende ist komplett frei beweglich. Die Kraft wirkt senkrecht auf das oberste Ende. Der erste Schritt bestimmt die Knicklänge (l_k). Bei der Bestimmung der Knicklänge kommt es zum Multiplizieren der Länge des Stabes von 60 mm mit dem Faktor β . Der Faktor β hängt von dem Eulerfall ab, wodurch die Knicklänge von Fall zu Fall unterschiedlich ist [54].

$$l_{k=1} = \beta * l = 2 * 60 \text{ mm} = 120 \text{ mm} \quad (4.43)$$

Der nächste Schritt berechnet den Schlankheitsgrad (λ). Der Schlankheitsgrad ist ein dimensionsloser Wert, welcher die Knickgefährdung eines Querschnitts ausdrückt. Die Ermittlung des Schlankheitsgrades erfolgt mittels der Formel (4.44). Bei der Berechnung sind die Querschnittsfläche der Spindel (A_{sp}) und das kleinste Flächenträgheitsmoment (I_{min}) vonnöten. Die Berechnung der erforderlichen Größen ist in Anhang A4 enthalten [54].

$$\lambda = \sqrt{\frac{A_{sp}}{I_{min}}} * l_k = \sqrt{\frac{706,86 \text{ mm}^2}{39760,78 \text{ mm}^4}} * 120 \text{ mm} = 16 \quad (4.44)$$

Das weitere Vorgehen bestimmt die Grenزشlankheit (λ_g). Die Grenزشlankheit ist werkstoffabhängig und beschreibt den Übergang zwischen dem elastischen Knicken und dem plastischen Fließen des Werkstoffes. Das Material der Spindel besteht aus Edelstahl (1.4305). Das Material hat ein Elastizitätsmodul (E) von $200000 \frac{N}{mm^2}$ und eine Elastizitätsgrenze ($R_{p0.2}$) von $190 \frac{N}{mm^2}$. Durch das Einsetzen der Werkstoffkennwerte in die Gleichung (4.45) lässt sich die Grenزشlankheit bestimmen [54].

$$\lambda_g = \pi * \sqrt{\frac{E}{0,8 * R_{p0.2}}} = \pi * \sqrt{\frac{200000 \frac{N}{mm^2}}{0,8 * 190 \frac{N}{mm^2}}} = 113,96 \quad (4.45)$$

Der letzte Schritt ermittelt, ob das Ausknicken im elastischen oder unelastischen Bereich erfolgt. Dabei wird der Schlankheitsgrad der Spindel mit der Grenزشlankheit des Werkstoffes in Beziehung gesetzt. Eine elastische Knickung liegt vor, wenn $\lambda \geq \lambda_g$ ist. Dabei erfolgt die Ermittlung der Knickspannung nach Euler. Für $\lambda < \lambda_g$ erfolgt die Knickung im unelastischen Bereich. Die Berechnung der Knickspannung erfolgt nach Tetmajer [54].

$$\lambda < \lambda_g = 16 < 114 \quad (4.46)$$

Die vorhandenen Randbedingungen im vorliegenden Fall führen zu einer Knickung im unelastischen Bereich. Die Knickspannung ist dabei nach Tetmajer mittels der Gleichung (4.47) zu berechnen.

$$\sigma_k = 310 - 1,14 * \lambda = 310 - 1,14 * 16 = 291,76 \frac{N}{mm^2} \quad (4.47)$$

Die Knickspannung muss gegenüber der vorhandenen Spannung (σ_{vorh}) eine ausreichende Sicherheit (S) besitzen. Bei einer elastischen Knickung muss die erforderliche Sicherheit (S_{erf}) bei mindestens 3-6 liegen, bei einer unelastischen Knickung bei mindestens 2-4. Die Berechnung zur vorhandenen Spannung ist in Anhang A4 hinterlegt [54].

$$S = \frac{\sigma_k}{\sigma_{vorh}} = \frac{291,76 \frac{N}{mm^2}}{13,88 \frac{N}{mm^2}} = 21 \quad (4.48)$$

Bei der Belastung von 1 000 *kg* einer Hubspindel mit einem Durchmesser von 30 *mm* und einer Stablänge von 60 *mm* liegt kein Stabilitätsproblem vor. Die Knickspannung ist größer als die Streckgrenze und die Sicherheit gegen Versagen liegt bei 21.

Des Weiteren findet eine Überprüfung statt, ob die verwandten Hubspindeln selbsthemmend sind und der passende Schrittmotor ausgelegt ist. Selbsthemmung liegt vor, wenn die Bedingung $2,3^\circ < \varphi < 4,5^\circ$ erfüllt ist. Mittels der Gleichung (2.9) erfolgt die Berechnung des Gewindespindelwinkels.

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{h}{d_2 \pi} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{6 \text{ mm}}{30 \text{ mm} * \pi} \right) = 3,64^\circ \quad 4.49$$

Die verwendeten Trapezgewindehubspindeln sind selbsthemmend und benötigen keine zusätzlichen Bremsen für die einzelnen Stränge. Aus Abbildung 2.17 ist anschließend ein Wirkungsgrad von 23 % und ein Reibkoeffizient von 0,2 abzulesen. Die ermittelten Kennwerte in Gleichung (4.29) ergeben das notwendige Drehmoment, welches jeder Schrittmotor haben muss.

$$M_T = \frac{F * h}{2\pi * \eta_{Spindel}} = \frac{9810 \text{ N} * 0,006 \text{ m}}{2\pi * 23 * 0,2} = 2,04 \text{ N}_m \quad 4.50$$

Bei einer Sicherheitszahl von zwei muss der Schrittmotor ein Drehmoment von 4,08 *N_m* aufbringen können. Da die Hubspindel eine Übersetzung von 24:1 aufweist (Schneckenwelle zu Trapezgewindestange), fiel die Wahl auf einen Schrittmotor der Firma „Oriental Motors“ vom Typ „PKP268D28A2“. Das Getriebe erhöht das Drehmoment des Schrittmotors von 2,5 auf ca. 60 *Nm* (ohne Betrachtung der Reibung).

Die integrierten Hubspindeln in der Baugruppe haben einen Hub von 20 *mm*. Beim Konstruieren kommt es zum Einbau der Hubspindeln bei einer ausgefahrenen Spindel von 10 *mm*. Dadurch ergibt sich beim Ausrichten der FastCCD ein symmetrischer Fahrweg von $+/- 10 \text{ mm}$. Abbildung 4.19 verdeutlicht die Konfiguration in der Seitenansicht. Das blaue Dreieck definiert den maximalen theoretischen Winkel, wenn die Spindel A bei 0 *mm* und die Spindel B bei 20 *mm* Hub eingestellt ist. Das rote Dreieck beschreibt die Einbaupositionen der Hubspindeln bei einem symmetrischen Fahrbereich.

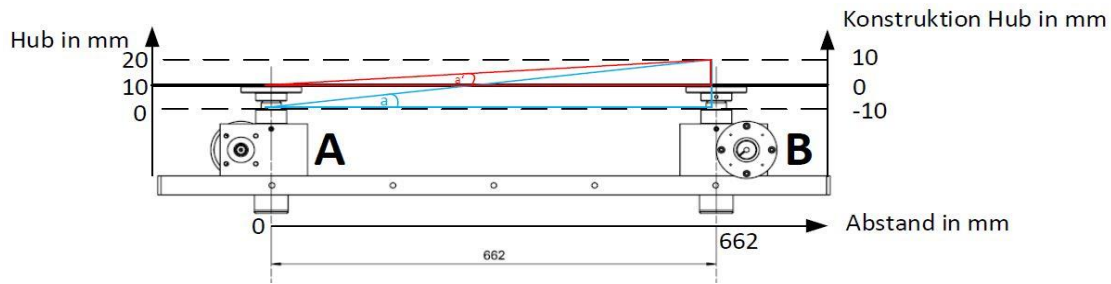


Abbildung 4.19. Skizze des Hubs (Y-Achse, Seitenansicht)

Mittels der Tangens Funktion (Gleichung (4.51)) kommt es zur Bestimmung des maximalen Winkels beim Rausfahren einer Hubspindel um 10 mm. Mit der Formel (4.52) erfolgt die Umrechnung von Grad in mrad.

$$\alpha' = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Gegenkathete}}{\text{Ankathete}} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{10 \text{ mm}}{662 \text{ mm}} \right) = 0,87^\circ \quad (4.51)$$

$$\alpha' * \frac{\pi}{180} * 1000 = \text{mrad} = 0,87^\circ * \frac{\pi}{180} * 1000 = 15,18 \text{ mrad} \quad (4.52)$$

Der letzte Schritt erläutert die Lagerung. Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, ist Strang A ein Loslager, Strang B ein Festlager. Die verwendeten Variablen beziehen sich auf die Abbildung 4.20. Beim Ausfahren des Stranges B um 10 mm folgt das Loslager dem Kreisbogen mit dem Radius $c = 662 \text{ mm}$. Der Abstand der Lager zueinander ändert sich dabei (Z-Achse). Mittels des Satzes des Pythagoras lässt sich der neue Abstand zwischen den beiden Lagern A und B nach einem Hub der Hubspindel B ermitteln.

$$b = \sqrt{c^2 - a^2} = \sqrt{(662 \text{ mm})^2 - (10 \text{ mm})^2} = 661,924 \text{ mm} \quad (4.53)$$

Es schließt sich die Berechnung der Verschiebung in Lager A an. Dafür ist der Ausgangsabstand der Lager zueinander mit dem neuen senkrechten Abstand zu subtrahieren: $662 \text{ mm} - 661,924 \text{ mm} = 0,076 \text{ mm}$.

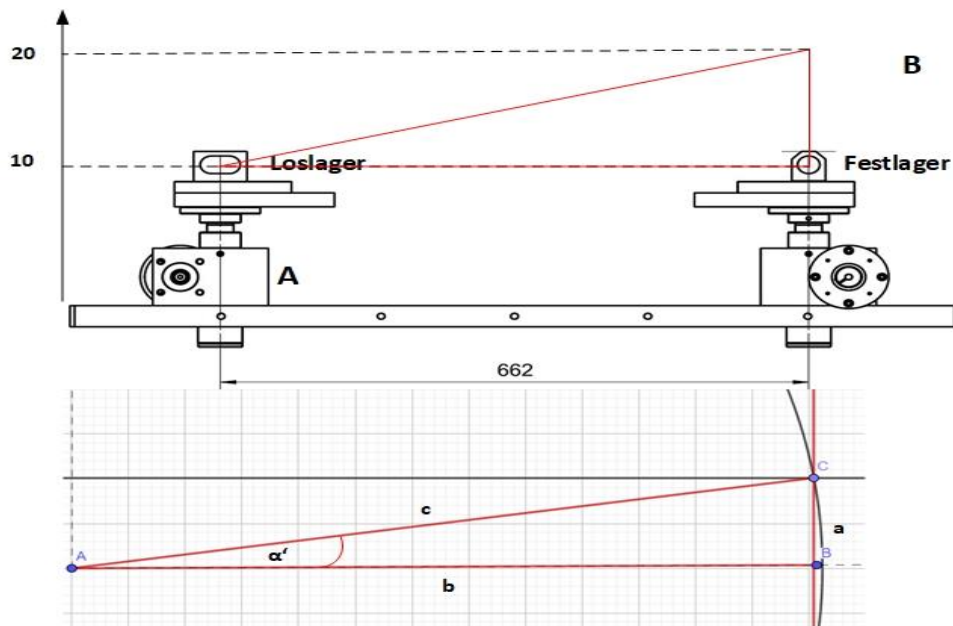


Abbildung 4.20. Geometrische Darstellung des Loslagers

Tabelle 13 fasst die möglichen Winkel zusammen, die bei den Verfahrenswegen der Hubspindeln zu erreichen sind. Die Verschiebung in der Z-Achse ist ebenfalls aufgelistet.

Tabelle 13. Erreichte Neigung

Spindel A, Position in mm	Spindel B Position in mm	Winkel in °	Winkel in <i>mr</i> ad	Verschiebung des Lagers A in der z-Achse in mm
0	20	1,7313	30,216	0,30
10	20	0,865	15,11	0,074

Die ausgewählte Hubspindel ist für die erforderliche Belastung überdimensioniert. Der Vorteil dieser Auslegung ist die mögliche zukünftige Verwendung der Konstruktion auch für andere schwerere Aufbauten als Unterbau. Bei diesem Konzept wurde der erforderliche vertikale Hub von $\pm 7,5 \text{ mm}$ in

der Y-Achse erreicht. Um die geforderte Drehung um die X-Achse von $\pm 3^\circ$ zu erreichen, müsste der Hub der Spindeln ± 34 mm bei demselben Lagerabstand betragen.

4.3.3.2 Technische Realisierung der vertikalen Bewegung und der Neigung

Wie in Abschnitt 4.3.3 hergeleitet, erfolgt die translatorische Bewegung in der Y-Achse und die Drehung um die X-Achse mithilfe von Hubspindeln. Auf einer rechteckigen Grundplatte wird in jeder Ecke eine Hubspindel montiert. Durch die Montage der Hubspindeln an den Kanten entsteht ein freier Bereich für das Integrieren der Baugruppe „trans_x_rot_y“. Eine Welle verbindet zwei Hubspindeln miteinander, was einen Antriebsstrang ergibt (A und B). Die Verbindung zwischen der Welle und der Hubspindel erfolgt mittels einer drehelastischen Kupplung, auch „Klauenkupplung“ genannt. Der Vorteil dieser Kupplung ist der Ausgleich von Fluchtungsfehlern zwischen den Wellenenden. Die Kupplung besteht aus zwei gleichen Naben und einem elastischen Zahnkranz (Abbildung 4.21). Durch den Zahnkranz lassen sich axiale, angulare und laterale Versätze ausgleichen. Zusätzlich dient der Zahnkranz als Puffer, welcher die Drehmomentstöße dämpft [40].

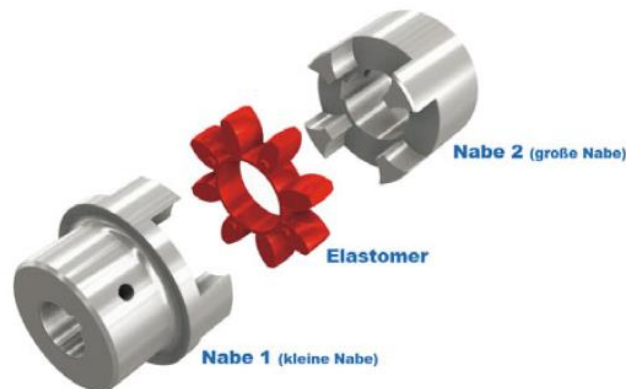


Abbildung 4.21. Darstellung einer drehelastischen Kupplung (Klauenkupplung) [40]

Abbildung 4.22 stellt die Umsetzung der Konstruktion dar. Am Ende jeder Hubspindel ist eine runde Befestigungsplatte mit vier Gewindelöchern, welche auf einem Teilkreis liegt. Eine Zwischenplatte wird mit der Befestigungsplatte verschraubt. Auf der Zwischenplatte wird anschließend das einfache Gelenklager montiert. Die beiden Hubspindeln (Strang A), welche als Loslager definiert sind, haben ein Langloch. Das Langloch nimmt den Versatz in der Z-Richtung auf, wodurch sich das System nicht verspannt. Das Festlager besitzt eine Bohrung. Das Gegenstück zu den einfachen Gelenklagern sind die doppelten Gelenklager (U-Form). Die Verbindung dieser miteinander erfolgt mittels eines Scharnierbolzens. Die Sicherung des Scharnierbolzens vollzieht sich mittels eines Sicherungsringes gegen das Verrutschen. Zusätzlich findet das Montieren einer Welle auf der Zwischenplatte statt, parallel mitverfahren zur Spindel. In der Grundplatte ist ein Linearlager mit einem runden Flansch verbaut zum Führen der Welle. Die zusätzliche Welle an jeder Spindeleinheit erhöht die Steifigkeit der

Baugruppe und minimiert zusätzlich die Knickgefahr. Pro Strang sind ein Endschalter und eine Encoder-Einheit zu integrieren. Damit die Endschalter auslösen können, ist auf der Zwischenplatte der Einheiten A1 und B1 ein Nippel zu installieren. Das Installieren des Nippels löst den Endschalter aus. Die Montage der Endschalter erfolgt auf einer Platte mit Längslöchern. Der Vorteil der Längslöcher ist die Möglichkeit, den Auslösebereich genau einzustellen. Auf den Zwischenplatten der Einheiten A2 und B2 erfolgt die Montage des Lesekopfes des Absolutencoders. Ein Edelstahlmaßband der Firma „Renishaw“ des Typs „RTLA-S“ findet Platzierung gegenüber dem Laserkopf in Form eines Aufklebers. Die Auflösung beträgt $\pm 5 \frac{\mu m}{m}$ bei einer Raumtemperatur von $20^\circ C$ [35].

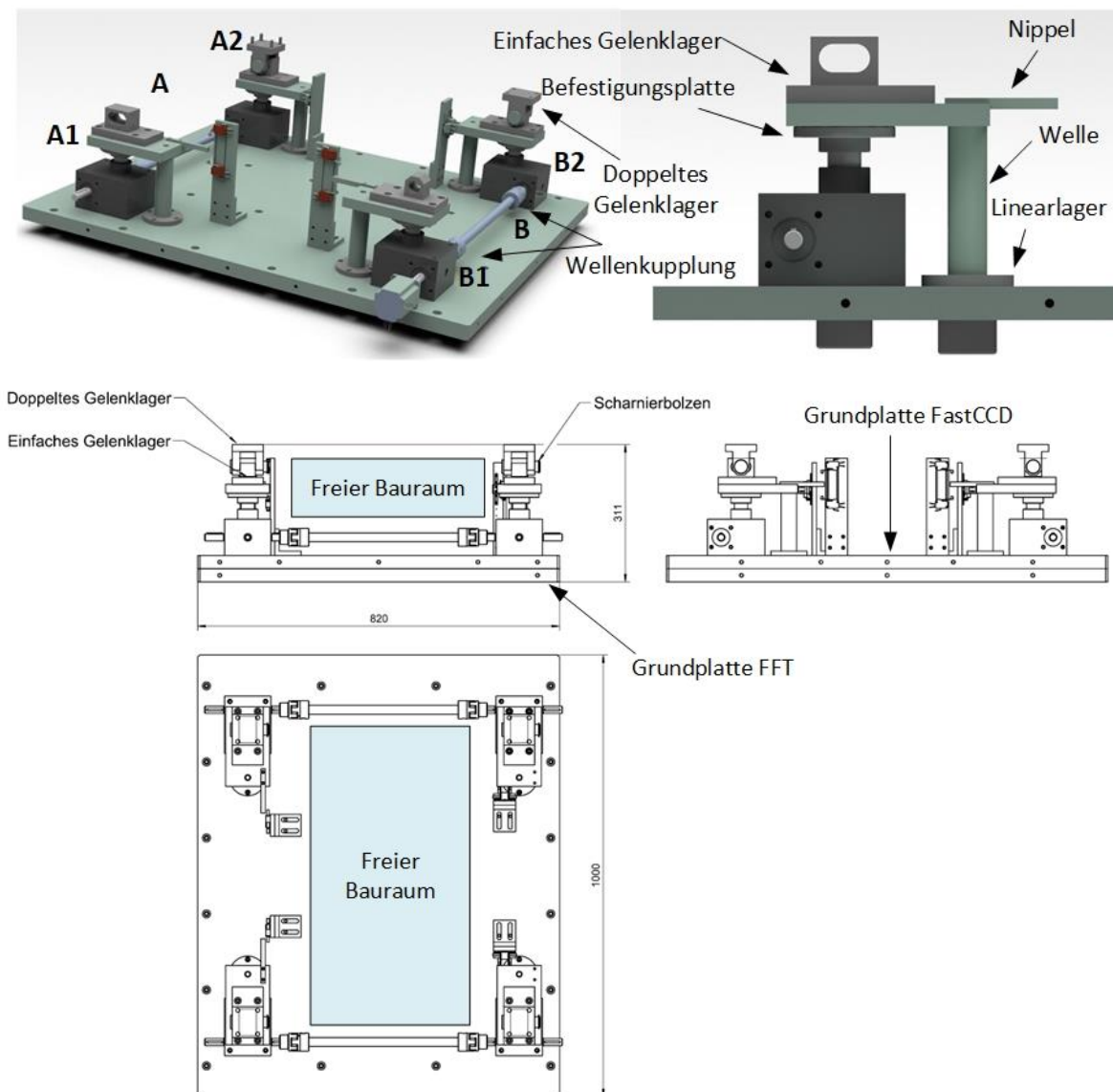


Abbildung 4.22. Konstruktive Umsetzung der Baugruppe: trans_y_rot_x

Die eingesetzten Hubspindeln der Firma „NEFF Gewindetriebe GmbH“ des Typs „M3“ haben eine Hubkraft von je $25 kN$. Jede Spindel hat einen gesamten Hub von $20 mm$, der symmetrisch in die Konstruktion eingebaut wird. Der vertikale Verfahrweg in der Y-Richtung der Hubspindeln beträgt

somit $\pm 10\text{ mm}$, die geforderten $\pm 7,5\text{ mm}$ sind somit erfüllt. Durch das Verfahren der Hubspindeln lässt sich ein maximaler Winkel von $\pm 0,87^\circ$ realisieren. Um die geforderte Neigung von $\pm 3^\circ$ zu erreichen, muss der Verfahrweg der Hubspindeln $\pm 34\text{ mm}$ betragen. Die genaue Berechnung ist in Anhang A7 und das Datenblatt für die Hubspindeln in Anhang A5 zu finden.

4.3.4 Zusammenbau der FastCCD-Baugruppe und Integration in die SCS-Beamline

Nach der Entwicklung der einzelnen Unterbaugruppen sind diese zu einer Baugruppe zusammenzubauen, dargestellt in Abbildung 4.23. Die zusammengebaute Oberbaugruppe beinhaltet anschließend die erforderlichen fünf Freiheitsgrade. Das Fügen findet in einer Werkstatt statt. Die Montage sämtlicher Vakuumkomponenten geschieht erst in einem Reinraum in der SCS-Hütte. Der erste Schritt fixiert die Baugruppe „trans_y_rot_x“ fest auf einer Palette mit Schraubzwingen. Die Montage findet ohne die „Grundplatte FFT“ statt. Da die Wellenenden der Hubspindeln und Versteifungseinheiten aus der „Grundplatte FastCCD“ herausragen, ist ein Zwischenstück mit einer Dicke von mind. 80 mm zwischen Grundplatte FastCCD und der Transportpalette zu stecken. Die vorhandenen Hubspindeln in dieser Baugruppe haben am Ende ein doppeltes Gelenklager (U-Form), welches mit einem einfachen Gelenklager durch einen Bolzen verbunden ist. Die doppelten Gelenklager bilden die Schnittstelle zu der nächsten Baugruppe „trans_x_rot_y“. Durch M8 Zylinderschrauben entsteht eine feste Verbindung zwischen den beiden Baugruppen. Die Schnittstelle zur letzten Baugruppe „trans_z“ sind die gelagerten Drehwellen, die auf den Linearführungen der Baugruppe „trans_x_rot_y“ montiert sind. Diese sind ebenfalls mit M8 Zylinderschrauben mit der Grundplatte der Baugruppe „trans_z“ fest zu verschrauben. Beim Zusammenbau der einzelnen Baugruppen lassen sich alle Freiheitsgrade mithilfe von Muskelkraft frei bewegen. Dazu ist es nicht erforderlich, die Schrittmotoren anzusteuern. In der Hütte erfolgt das Montieren der Baugruppe mittels des Hüttenkrans auf die „Grundplatte FFT“. Die „Grundplatte FFT“ wurde vorher an die FFT-Kammer geschraubt. Das elektrische Fachpersonal schließt anschließend alle Endschalter, Encoder, Motoren, Pumpen und Ventile an. Der letzte Schritt beinhaltet das Verbinden der FastCCD-Baugruppe mit der Beamline. Dafür ist als Erstes ein Reinraum über der Einbaustelle aufzubauen. Der Reinraum Ventilator drückt die angesaugte Luft durch einen Partikelfilter und damit alle vorhandenen Partikel aus der Einbauumgebung nach unten und anschließend aus dem Reinraum hinaus. Danach folgt das Montieren der Pumpkammer an das DN350 Ventil. An die Pumpkammer kommt anschließend der DN200-Membranbalg. Der letzte Schritt enthält das Montieren des FastCCD-Detektors (Abbildung 2.9).

Zu dem Zeitpunkt der Ausarbeitung dieser Arbeit sind alle Komponenten und fertigen Bauteile (Dreh-Frästeile) bestellt worden. Das Testen der Funktionen findet nach Abschluss dieser schriftlichen Arbeit statt.

Vor der Verwendung der Ausrichtungseinheit in Experimenten muss die Konstruktion eine erfolgreiche, aus zwei Teilen bestehende Testphase durchlaufen. Der erste Schritt testet die Funktionsweise der Endschalter der einzelnen Achsen. Die Linearführungen, Hubspindeln werden in die beiden Extrem-Positionen verfahren. Dabei sollen die Endschalter auslösen. Es schließt sich das Prüfen der Funktionsweise der Encoder an. Es ist zu überprüfen, ob die ausgelesenen Encoder Werte das richtige Vorzeichen haben. Beim Verfahren in die positive Z-Richtung gestaltet sich der Encoder Wert größer. Anschließend werden alle Freiheitsgrade ohne Last verfahren. Sollte die erste Testphase erfolgreich sein, erfolgt die Montage der Ausrichtungseinheit in der SCS-Beamline. Die Ausrichtungseinheit wird auf die FFT fixiert und mit dem DN200 Membranbalg verbunden. Der FastCCD-Detektor ist nicht verbaut. In der zweiten Testphase wird, die FastCCD-Baugruppe evakuiert (Vakuumkraft). Danach erfolgt das Verfahren aller Achsen unter Last. Nach dem erfolgreichen Bestehen der beiden Tests kommt es zur Freigabe der Ausrichtungseinheit für die Experimente.

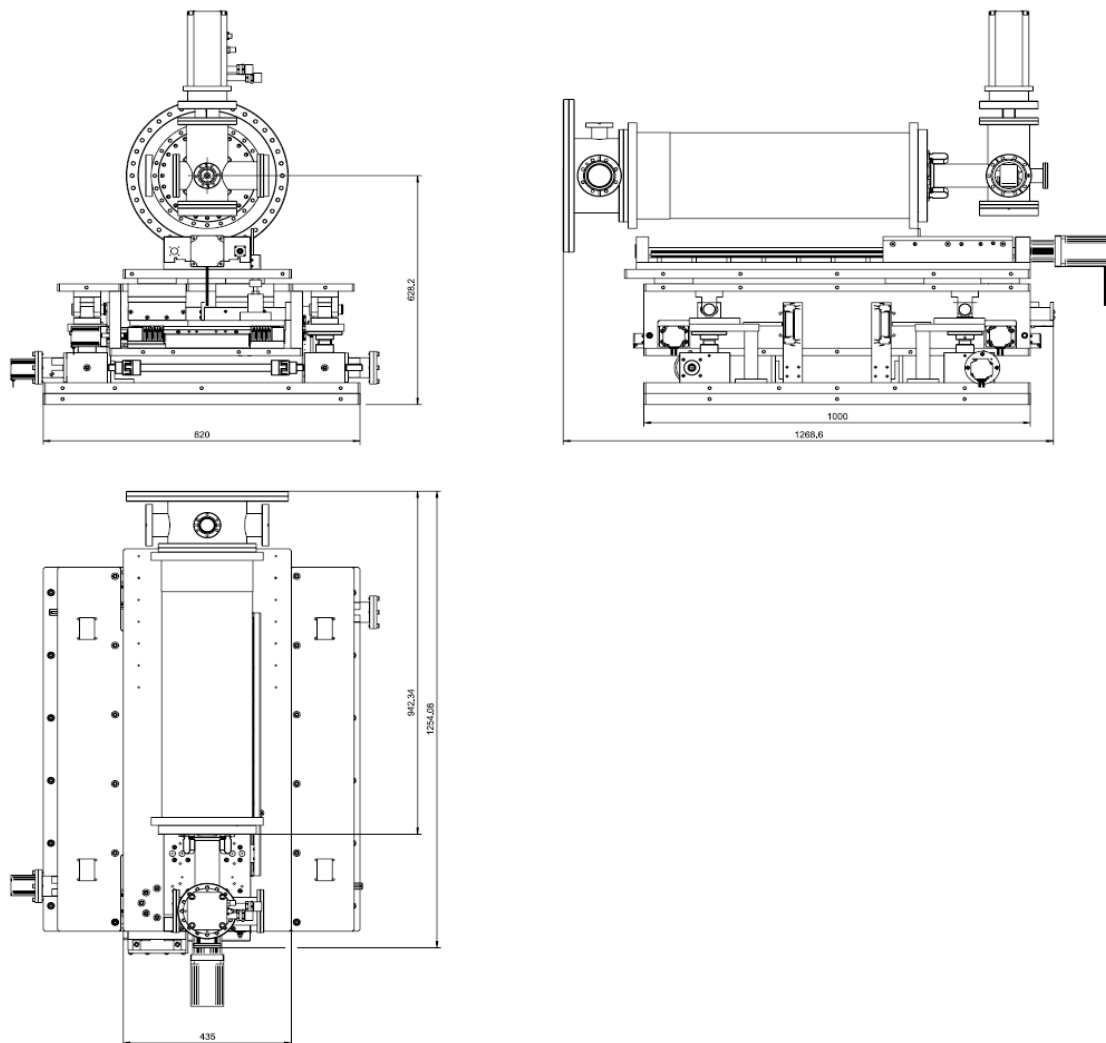


Abbildung 4.23. Zeichnung der Baugruppe FastCCD

4.3.5 Bewertung der Konstruktion und Zusammenfassung aller Komponenten

Die entwickelte motorisierte Ausrichtungseinheit verfügt über die fünf geforderten Freiheitsgrade. Der geforderte laterale und vertikale Verfahrbereich ist erreicht worden. Der longitudinale Verfahrbereich und die Drehung und Neigung entsprechen nicht dem Anforderungsprofil. Aufgrund der hohen Vakuumkraft, die durch den DN200 Membranbalg im Betrieb entsteht, galt es, Schwerlast Linearführungen zu verbauen. Diese nehmen einen Großteil des begrenzten, für die Ausrichtungseinheit in der SCS-Beamline reservierten Bauraums ein. Bei der Auslegung der einzelnen Baugruppen (Verfahrbereiche) ist der maximal mögliche Bauraum als ausgereizt zu sehen. Um die geforderte Drehung und Neigung sowie die longitudinale Bewegung zu erreichen, müsste eine Erweiterung der gesamten Konstruktion in allen Achsen erfolgen. Das Vergrößern der einzelnen Baugruppen ist in der geforderten Einbauposition aber nicht möglich. Tabelle 14 fasst die geforderten und alle erreichten Verfahrbereiche der einzelnen Freiheitsgrade zusammen.

Das gesamte Gewicht der FastCCD Baugruppe beträgt 750 kg und liegt damit deutlich unter den maximal erlaubten 1 000 kg. Die Ermittlung des Gewichts erfolgte mittels des CAD-Programms „Teamcenter NX“ von der Firma Siemens. Dafür kam es in der Modellierphase zur Zuweisung der einzelnen Komponenten der entsprechenden Materialien. Die Fertigung sämtlicher großer Platten gestaltete sich mit dem Werkstoff Aluminium, um Gewicht einzusparen.

Tabelle 14. Zusammenfassung aller Freiheitsgrade der Ausrichtungseinheit

Achse	Geforderter Verfahrbereich/ Drehung	Erreichter Verfahrbereich/Drehung
Z-Achse (translatorisch)	750 mm	594 mm
X-Achse (translatorisch)	+/- 7,5 mm	+/- 15 mm
Y-Achse (translatorisch)	+/- 7,5 mm	+/- 10 mm
Rotation um die X-Achse	+/- 3 °	+/- 0,87 °
Rotation um die Y-Achse	+/- 3 °	+/- 1 °

Die Ausrichtungseinheit besteht aus drei Unterbaugruppen. Alle verwendeten technischen Komponenten sind in Tabelle 15 zusammengefasst. Die Tabelle beinhaltet zusätzlich den Herstellernamen sowie die genaue Typbezeichnung.

Tabelle 15. Verwendete Komponenten

Komponenten	Firma	Typ	Verfahr Bereich [mm]
Linearführung (Z-Achse) (motorisiert)	Föhrenbach GmbH	PFSG225	594
Linearführung (X-Achse) (motorisiert)	Föhrenbach GmbH	PFSG155	+/- 30
Hubspindel (Y-Achse) (motorisiert)	NEFF Gewindetriebe GmbH	M3-N-24:1-T-30x6-19- 8-M-BP	+/- 10
Linearführungen (Z- und X-Achse)	Bosch Rexroth	1653-30 und 1653-25	+/- 30
Motor (Z-Achse)	Oriental Motor GmbH	PKP2913D45B	
Motor (Y- und X-Achse)	Oriental Motor GmbH	PKP268D28A2	
Encoder (Z-Achse)	Renishaw	RL-26B-AT050B99F (Resolute)	
Encoder (X-Achse)	Renishaw	RL-26B-AT050B99F (Resolute)	
Encoder (Y-Achse)	Renishaw	RL-26B-AT050B99F (Resolute)	

Die Ausrichtungseinheit mit den verwendeten Komponenten sind für einen maximalen Membranbalg von DN200 und eine maximale Gewichtskraft von 250 kg ausgelegt. Befindet sich der FastCCD-Detektor unter Vakuum und ist der Membranbalg in der freien Länge, wirken die Vakuumkraft (DN200) und die Gewichtskraft (FastCCD-Baugruppe). In der Position, in der die Probe am weitesten vom Detektor entfernt ist, wirkt ergänzend eine Federkraft. Die Federkraft hängt von der Federkonstante sowie dem Verfahrensweg des Membranbalges ab. Diese drei Kräfte erzeugen im Betrieb ein Moment, welches auf die Komponenten der Ausrichtungseinheit wirkt. Die berechneten Belastungen sind in Tabelle 12 und Tabelle 16 zusammengefasst. Bei dem Festigkeitsnachweis für die Linearführungen sind die Zustände des gedrückten und gestreckten Membranbalges zu betrachten. Sollte das ganze System belüftet sein und der Membranbalg ist in der Position der „freien Länge“, wirkt nur die Gewichtskraft. Dadurch reduzieren sich die wirkende Momente in diesem Zustand auf die einzelnen Abschnitte der Hauptbaugruppe.

Tabelle 16. Zusammenfassung aller Belastungen

Belastungsart	[N]	Hebelarm [mm]	[N _m]
Gewichtskraft	7357,5		
Vakuumkraft	3332,9		
Federkraft Membranbalg	362,7		
Maximal wirkende Kraft	3695,6		
Größtes Moment Baugruppe trans_z		250	2792
Größtes Moment Baugruppe trans_x_rot_y		470	3055
Größtes Moment Fixierungseinheit FFT		630	4001

5 Risikobeurteilung

Vor der Entwicklung der Ausrichtungseinheit für den FastCCD-Detektor ist eine Risikobeurteilung durchzuführen. Die Risikobeurteilung ist mittels des Programms „Safexpert“ der Firma IBF Solutions zu erstellen. Das Programm richtet sich nach der aktuell geltenden Maschinenrichtlinie 2006/42/EG und vereinfacht das Umsetzen der Risikobeurteilung. Das Programm führt den Entwickler Schritt für Schritt durch die Risikobeurteilung. Das systematische Abarbeiten von Lebensphasen, Gefahren und Grenzen gewährleistet das Abarbeiten sämtlicher relevanter Punkte. Ein Vorteil von Safexpert liegt in der Möglichkeit der Abspeicherung der Projektdaten in einer Datenbank. Zusätzlich sind diese mit geringem Aufwand für neue oder andere Projekte abrufbar und wiederverwendbar, wenn z. B. die Maßnahmen gleicher Art sind [21].

5.1 Grenzen der motorisierten Ausrichtungseinheit

Der erste Schritt der Risikobeurteilung definiert die genauen Grenzen der Ausrichtungseinheit. Dafür sind die Punkte aus Tabelle 4 so genau wie möglich festzulegen. In Tabelle 17 sind die Grenzen der FastCCD (Maschine) zusammengefasst. In der Konstruktionsphase sind diese Grenzen ständig zu beachten.

Tabelle 17. Grenzen der FastCCD Baugruppe

Grenzen	Definition der Grenzen
Bestimmungsgemäße Verwendung	Die Maschine dient als motorisierter Unterbau für Detektoren mit einem maximalen Gewicht von $m=250$ kg. Zusätzlich gilt es, eine Vakuumkraft von 3 332 N nicht zu überschreiten. Die maximale Flanschgröße des Detektors darf die Größe DN 200 nicht überschreiten. Der maximale Abstand vom Mittelpunkt des Detektors zur Grundplatte der trans_z Baugruppe darf 150 mm nicht überschreiten. Der maximale Bewegungsfreiraum der einzelnen Achsen aus Tabelle 14 ist zu beachten. Die Maschine ist ausschließlich für Forschungszwecke vorgesehen, ihre Betreibung darf nur auf dem Betriebsgelände von „European XFEL“ stattfinden. Für den Aufbau der Maschine sind mindestens zwei, am besten drei Personen vonnöten, die über eine technische Ausbildung verfügen. Das Betreiben der Maschine erfolgt durch Personen, die eine

	Unterweisung erhalten haben. Das Steuern einzelner Achsen erfolgt aus dem Kontrollraum. Das Anschließen von elektrischen Komponenten darf nur eine Elektrofachkraft durchführen.
Vernünftigerweise/ vorhersehbare Fehlanwendung	Befindet sich der FastCCD-Detektor unter Vakuum und der Membranbalg ist in der freien Länge, wirkt die Vakuumkraft von 3 332 N. Ein DN200 Membranbalg erzeugt die Vakuumkraft. Zusätzlich wirkt auf die Ausrichtungseinheit eine Gewichtskraft von maximal 2 452 N (250 kg). Alle Komponenten in der Ausrichtungseinheit sind für einen maximalen Membranbalgdurchmesser von DN200 ausgelegt. Zu einer Fehlanwendung des technischen Systems kann es im Falle des Überschreitens der Belastungen aus Tabelle 16 kommen. Des Weiteren könnte es durch nicht unterwiesenes Personal zu einer Fehlfunktion kommen.
Räumliche Grenzen	Der Einsatz der Maschine hat in geschlossenen, trockenen Räumen zu erfolgen. Im Betrieb ist die Maschine in der SCS-Beamline integriert. Der dafür vorgesehene Bauraum ist in Tabelle 5 zusammengefasst. Zusätzlich können der Aufbau und das Betreiben der Maschine in weiteren Räumen des European XFEL vonstattengehen. Die Schnittstelle zu den anderen Gestellen ist die „Grundplatte FFT“.
Energetische Grenzen	Die Versorgung der elektrischen Komponenten der Maschine erfolgt mit maximal 24 V und 5 A. Das Betreiben der Ventile vollzieht sich mittels Druckluft. Der maximale Druck dabei beträgt 6 bar. Befindet sich die Maschine unter Vakuum, wirkt eine Vakuumkraft von ca. 3 332 N. Zusätzlich erzeugt der Membranbalg eine Federkraft von ca. 360 N. Im Betrieb kann eine Umwandlung der potenziellen Energie in kinetische Energie erfolgen.
Stoffliche Grenzen	Beim Evakuieren der Maschine werden Teilchen aus der Kammer mithilfe von Pumpen befördert.

	Flüssiges Helium dient zum Betreiben des Kryostaten. Dieser kühlt im Betrieb das kupferne Kühlrohr. Das Kupferrohr leitet anschließend die Kälte an den FastCCD-Detektor weiter.
Zeitliche Grenzen	Die Maschine ist für 200 Messzeiten ausgelegt. Eine Messzeit setzt sich aus sieben Schichten zusammen. Eine Schicht dauert ca. zwölf Stunden. Der eingesetzte Membranbalg hat eine Lebensdauer von 2 500 Zyklen. Alle anderen Bauteile dürfen angesichts der voraussichtlichen Nutzungsdauer des Systems ihre Lebensdauer nicht überschreiten. Die Maschine ist zwei Mal im Jahr zu warten. Die Wartung besteht aus einer Sichtprüfung sowie der Schmierung aller beweglichen Komponenten.
Weitere Grenzen	keine

5.2 Lebensphasen der motorisierten Ausrichtungseinheit

Der nächste Schritt identifiziert die Gefährdungen sämtlicher Lebensphasen der Ausrichtungseinheit. In der Werkstatt erfolgt der Zusammenbau der gelieferten einzelnen Bauteile zu einer Baugruppe. Anschließend erfolgt der Transport der FastCCD Baugruppe in die SCS Hütte. Mit einem Kran wird die Baugruppe in der SCS-Hütte anschließend auf dem dafür vorgesehenen Gestell montiert und mit der Beamline verbunden. Der nächste Schritt beinhaltet die Inbetriebnahme der Ausrichtungseinheit. Im Normalbetrieb ist die SCS-Hütte aufgrund der Strahlung abgeschlossen und die Steuerung der einzelnen Achsen erfolgt aus dem Kontrollraum. Sollte es zu Störungen kommen, ist der Strahlbetrieb zu unterbrechen und ein Betreten der Hütte durch Personal unausweichlich. Zwischen den einzelnen Experimenten könnte es zu einer Umrüstung der FastCCD-Baugruppe kommen z. B. im Falle einer Änderung der Distanz zwischen Probe und Detektor durch ein Rohrzwischenstück. Nach Abschluss der Experimente ist die FastCCD-Baugruppe abzubauen und ins Lager zu transportieren. Eine Instandhaltung der FastCCD-Baugruppe findet zwei Mal im Jahr statt. Zusammengefasst ergeben sich folgende Lebensphasen der FastCCD-Baugruppe:

- Aufbau
- Transport
- Inbetriebnahme
- Normalbetrieb
- Fehlfunktion
- Umrüsten
- Abbau

- Wartung

5.3 Gefährdungen der motorisierten Ausrichtungseinheit

Nach der Definition der einzelnen Lebensphasen sind die Gefährdungen zu identifizieren, welche in jedem Lebensabschnitt der FastCCD-Baugruppe auftreten können. Die Zusammenfassung ist in Tabelle 18 aufgelistet. Diese Ausarbeitung erläutert die am häufigsten und am wahrscheinlichsten auftretenden Gefährdungen. Eine nähere Beschreibung weniger häufig auftretender Gefährdungen beinhaltet die Risikobeurteilung. Die Gefahr „Quetschen“ tritt in fast jeder Lebensphase auf. Besonders beim Transport und bei der Montage der Ausrichtungseinheit auf dem vorgesehenen Gestell besteht die Gefahr, Körperextremitäten einzuklemmen. Bei der Bewegung der einzelnen Achsen besteht die Gefahr der Quetschung ebenfalls (bewegliche Maschinenteile). Um eine Gefährdung durch elektrischen Strom zu vermeiden, darf bei der Inbetriebnahme der einzelnen Achsen nur elektrisches Fachpersonal die elektrischen Komponenten wie Motoren, Encoder und Endschalter anschließen. Im Betrieb wird der FastCCD-Detektor durch den Kryostaten auf ca. $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ gekühlt. Um Erfrierungen am Gewebe durch die Kälte zu vermeiden, ist das Arbeiten an der Baugruppe erst erlaubt, wenn eine Temperatur $> 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ erreicht ist.

Tabelle 18. Gefährdungen in den einzelnen Lebensphasen

Lebensphase	Gefährdung
Aufbau, Transport	• Weggeschleudert werden • Quetschen • Ausrutschen, Stolpern und Stürze • Bewegliche Teile der Maschine • Kontakt mit rotierenden offenen Enden
Inbetriebnahme	• Quetschen • Elektrischer Schlag • Zugang und Kontakt mit beweglichen Teilen der Maschine • Kontakt mit rotierenden offenen Enden

	• Erfrierung
Normalbetrieb	• Bewegliche Teile der Maschine • Vorhandene potentiale Energie • Unbeabsichtigter/unerwarteter Anlauf (Steuerung)
Umrüsten	• Quetschen • Elektrischer Schlag • Weggeschleudert werden • Kontakt mit rotierenden offenen Enden • Bewegliche Teile der Maschine • Erfrierung
Fehlfunktion	• Quetschen • Elektrischer Schlag • Bewegliche Teile der Maschine • Kontakt mit rotierenden offenen Enden • Vorhandene potentiale Energie
Abbau	• Quetschen • Ausrutschen, Stolpern und Stürzen • Elektrischer Schlag • Erfrierung

5.4 Risikobewertung und Risikominderung

Nach dem Identifizieren der vorhandenen Gefährdungen kommt es zur Durchführung der Risikobewertung für jede einzelne Gefährdung. Die Bewertung erfolgt mittels eines Risikographen. Der Risikograph für die Gefahr „Quetschen“ in der Lebensphase „Inbetriebnahme“ ist in Abbildung 5.1 beispielhaft dargestellt. Im ersten Schritt ist im „Safexpert“ Graph zu entscheiden, welchen Grad die Verletzung verursachen würde. Im Weiteren ist zu beurteilen, wie oft eine Person den Gefahrenbereich betritt. Anschließend ist im nächsten Knotenpunkt zu definieren, ob die Gefahr vermeidbar (M) oder kaum vermeidbar (K) ist. Zuletzt erfolgt die Bewertung der Gefahr. Dabei ist eine Wahl zwischen drei Klassen möglich. Bei einem unwahrscheinlichen Auftreten der Gefahr ist die Klasse KL zu wählen, bei einer mittleren Wahrscheinlichkeit (einige Male im Jahr) die Klasse MI. Die Klasse GR ist für häufige Eintrittswahrscheinlichkeiten (Verletzungen einmal im Quartal). Zusätzlich endet der Pfad in einem der vier möglichen Bereiche. Die Bereiche sind farblich unterschiedlich gestaltet. Der rote Bereich bedeutet „Gefahr“, der orange „Warnung“, der gelbe „Vorsicht“ und der graue bedeutet einen „Hinweis“. Um das Risiko zu mindern, gilt es, Gefahrenminderungsmaßnahmen einzuführen. Anschließend erfolgt eine erneute Risikobewertung.

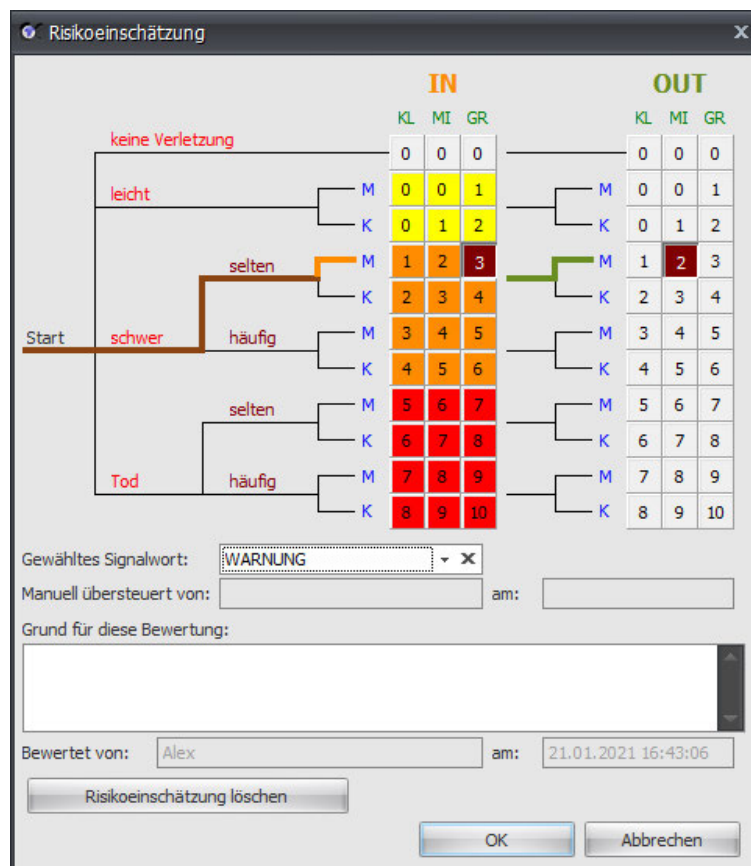


Abbildung 5.1. Darstellung einer Risikobewertung im Safexpert (Risikograph) [21]

Die Risikobeurteilung findet Erläuterung anhand des Beispiels Quetschen zwischen beweglichen Maschinenteilen in der Lebensphase Inbetriebnahme. Sollte es zu Quetschungen von Körperextremitäten zwischen beweglichen Teilen der Maschine kommen, können schwere Verletzungen entstehen, da die Linearführungen/Hubspindeln Tonnen bewegen können. Im Weiteren ist die Gefährdung des Quetschens mithilfe von bestimmten Maßnahmen verhinderbar. Da die meisten Experimentaufbauten aufgrund von Zeitmangel sehr stressig werden können, ist das Risiko des Quetschens als groß eingestuft. Ein großer Faktor dieser Entscheidung ist eine potenzielle Unaufmerksamkeit des Personals. Da das Risiko zu hoch ist, ist die Durchführung einer Risikominderungsmaßnahme unverzichtbar. Ein Einbau eines Faltenbalgs zwischen den beweglichen Teilen würde das Risiko des Quetschens von hoch auf mittel reduzieren. Eine vollständige Reduzierung des Risikos ist nicht möglich.

Bei Komponenten, welche sicherheitsbezogene Teile eines Steuerungssystems sind, ist zusätzlich eine Risikobeurteilung nach EN ISO 13849 durchzuführen. Dabei kommt es zur Einstufung der technischen Teile in Performance Level. Ein Performance Level definiert die Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Ausfalls pro Stunde. Abbildung 5.2 zeigt die Risikobewertung der Bremse (Fehlfunktion), welche die wirkende Vakuumkraft in der Z-Achse bei einem Stromausfall während des Normalbetriebs anstatt des Schrittmotors halten muss. Sollte es zu einer Fehlfunktion der Bremse kommen, würden reversible Verletzungen entstehen (S1). Durch die Vakuum- und Federkraft würde eine unkontrollierte Bewegung entstehen. Beim Prototypenbau ist die Eintrittswahrscheinlichkeit mit häufig (F2) eingestuft. Der Ursprung dieser Entscheidung liegt in der erstmaligen Inbetriebnahme einer neu entwickelten Maschine. Die Vermeidung der Fehlfunktion der Bremse ist unter bestimmten Voraussetzungen möglich (P1). Im letzten Schritt ist die Wahrscheinlichkeit des Gefährdungsereignisses zu bestimmen. Bei hoher unbekannter Wahrscheinlichkeit ist HO zu wählen, NI bei niedriger. Bei der Risikobeurteilung der Bremse fiel die Wahl auf ein Performancelevel von b. D. h., die verwendete Bremse muss die PL Klasse b bis d haben. Eine Komponente mit der Klasse a darf keine Verwendung finden. Mit dem Programm „Sistema“ lässt sich der Performance Level der verwendeten Komponenten mit den Werten aus dem Datenblatt bestimmen.

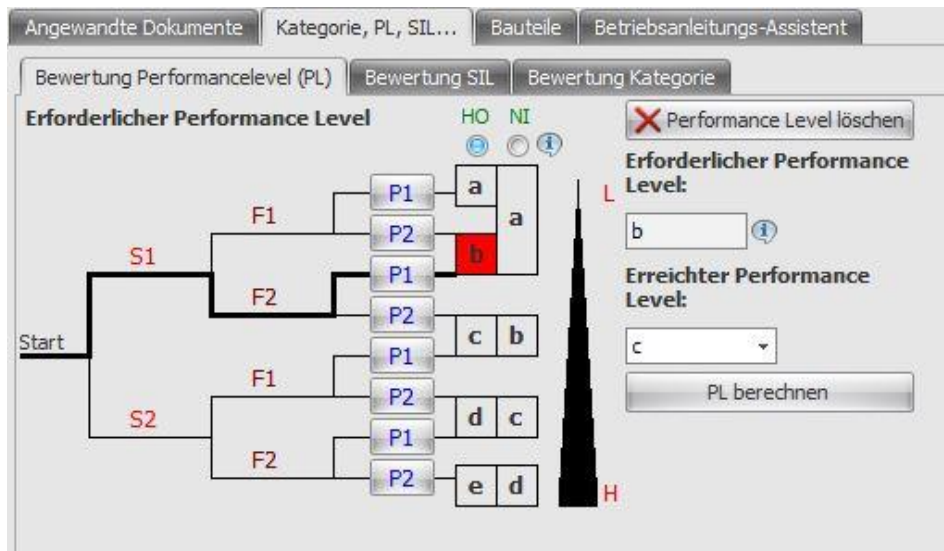


Abbildung 5.2. Darstellung eines Risikographen für die Performance Level (Safexpert) [21]

Die vollständige Risikobeurteilung für die motorisierte Ausrichtungseinheit ist in der DESY Cloud hinterlegt. Abschließend kommt es zum Verfassen einer Betriebsanleitung für die motorisierte Ausrichtungseinheit und zur Abgabe einer Konformitätserklärung. Aufgrund der Konformitätserklärung ist das Anbringen eines CE-Zeichens an der Maschine möglich.

5.5 Fazit der Risikobeurteilung

Nach der Durchführung der Risikobeurteilung der motorisierten Ausrichtungseinheit war die Umsetzung von Maßnahmen zur Risikominderung für die vorhandenen Gefährdungen als unabdingbar anzusehen. Tabelle 19 listet die Gefährdungen auf, welche zu schweren Verletzungen führen können. Die umgesetzten Maßnahmen zur Risikominderung finden ebenfalls Beschreibung. Die restlichen Gefährdungen und die diesbezüglich zu ergreifenden Maßnahmen sind in der Risikobeurteilung in der SCS-Cloud zu finden.

Ein weiterer wichtiger Punkt für das sichere Betreiben der motorisierten Ausrichtungseinheit ist ein geschultes Personal. Erst nach einer gründlichen Unterweisung ist es zulässig, die FastCCD-Baugruppe in die SCS-Beamline zu integrieren und zu betreiben. Im Falle von Änderungen oder Hinzufügungen von Funktionen ist eine erneute Risikobeurteilung und auch eine entsprechende Unterweisung durchzuführen.

Tabelle 19. Relevante Gefährdungen und Maßnahmen

Gefährdung	Maßnahme zur Risikominderung
Quetschen von Körperextremitäten zwischen beweglichen Teilen der Ausrichtungseinheit	1. Anbringen eines Faltenbalges zwischen den beweglichen Teilen 2. Anbringen von Hinweisschildern 3. Hinweis in der Betriebsanleitung
Stromausfall oder Versagen des Schrittmotors, welcher an der Z-Linearführung angebracht ist	1. Anbringen einer Bremse. Bei einem Stromausfall würde die Bremse die Z-Spindel sperren.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung einer Ausrichtungseinheit mit der Möglichkeit, einen FastCCD-Detektor in fünf Freiheitsgraden ferngesteuert zum Röntgenstrahl auszurichten. Bei dem Modellieren der einzelnen Komponenten/Baugruppen kam eine kommerzielle Computer-Aided Design Software (NX) zum Einsatz. Mittels der Finite-Elemente-Methode (ANSYS) erfolgte die Durchführung einer Simulation an den kritischen Konstruktionsstellen mit dem Resultat einer Bestätigung der berechneten Ergebnisse. Eine spezielle Software (Safexpert) diente der Risikobeurteilung.

Eine naturwissenschaftliche Forschungseinrichtung wie European XFEL zeichnet sich anhand ihres sehr spezifischen Fachgebietes aus. Um alle relevanten Anforderungen zu verstehen und anschließend diese umsetzen zu können, waren in erster Linie die fachspezifischen Grundlagen zu erarbeiten. Dabei kam es zur Erläuterung hinsichtlich der Forschungseinrichtung sowie der kompletten SCS-Beamline mit den möglichen Experimenten. Um den FastCCD-Detektor in der SCS-Beamline erfolgreich zu integrieren, erfolgte eine genaue Betrachtung der Grundlagen der Vakuumtechnik. Der Schwerpunkt lag dabei bei der Erzeugung der Notwendigen Vakuumumgebung von $<10^{-7} \text{ mbar}$. Dieser gewünschte Betriebsdruck lässt sich nur bei Beachtung der Konstruktionsregeln für Vakuumverbaute Bauteile erreichen.

Vor Beginn der Konstruktionsphase waren sämtliche Anforderungen mit den Projektwissenschaftlern und dem Ingenieur festzulegen. Die Hauptfunktionen der Ausrichtungseinheit betreffen das Ausrichten des FastCCD-Detektors in fünf Freiheitsgraden. Der FastCCD-Detektor ist ferngesteuert auszurichten. Dabei soll die FastCCD-Kamera longitudinal (Z-Achse, 0 mm- 750 mm), lateral (X-Achse, +/- 7,5 mm), vertikal (Y-Achse, +/- 7,5 mm) beweglich sein. Ergänzend dazu sind eine Neigung (um X-Achse, +/- 3 °) und eine Drehung (Y-Achse, +/- 3 °) erforderlich.

Als Hersteller und gleichzeitig Betreiber der Ausrichtungseinheit diente vor der Konstruktionsphase die Durchführung einer Risikobeurteilung nach der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG. Dabei kam es zur Identifizierung der Gefährdungen sowie der Maschinengrenzen mit der Anwendung der DIN ISO 12100. Im Anschluss daran erfolgte im Hauptteil dieser Ausarbeitung die Umsetzung der geforderten Anforderungen. Der Konstruktionsteil besteht aus drei Teilabschnitten. Der erste Abschnitt wies eine DN63 Turbomolekularpumpe als ausreichend aus, um den gewünschten Betriebsdruck von $<10^{-7} \text{ mbar}$ zu erreichen. Der nächste Punkt bestimmte die wirkenden Belastungen (Kräfte und Momente). Der relevante Zustand liegt vor, wenn die FastCCD-Baugruppe evakuiert ist (wirkende Vakuumkraft). Aufgrund der geometrischen Abmaße des FastCCD-Detektors ist ein Membranbalg mit einem Innendurchmesser von größer als 200 mm zu verwenden. Dieser erzeugt eine Vakuumkraft von ca. 3 332 N. Zusätzlich ist die Federkraft des Membranbalges zu beachten, welche im gestreckten sowie komprimierten Zustand des Membranbalges wirkt. Der letzte Teil des

Hauptkapitels hat die einzelnen Konzepte und die technische Realisierung dieser hergeleitet. Die Ausrichtungseinheit besteht aus insgesamt drei Unterbaugruppen. Jede Baugruppe beinhaltet einen oder zwei Freiheitsgrade. Bei der Entwicklung der einzelnen Unterbaugruppen ging es vorrangig darum, ein Konzept für die Bewegung zu erstellen. Anschließend fand die technische Umsetzung statt. Die longitudinale Bewegung entlang der Z-Achse führt eine Linearführung aus. Der Einsatz von Linearführungen dient ebenfalls der Umsetzung der lateralen Bewegung in der X-Achse. Dabei kam es zur parallelen Anordnung von zwei Linearführungen. Beim Verfahren dieser beiden gleichzeitig in eine Richtung entsteht eine laterale Bewegung. Beim Verfahren einer Linearführung entsteht eine Drehung um die Y-Achse. Die Hauptelemente bei der vertikalen Bewegung in der Y-Achse sind die Hubspindeln. Zwei Hubspindeln sind durch eine Welle verbunden und bilden einen Strang. In der Konstruktion sind zwei Stränge parallel verbaut. Beim Verfahren der beiden Stränge in dieselbe Richtung entsteht eine vertikale Bewegung. Bei Verfahren eines einzelnen Stranges kommt es zu einer Neigung um die X-Achse. Bei einer lateralen und vertikalen Bewegung müssen die Verfahrelemente in dieselbe Richtung und Geschwindigkeit verfahren werden. Nach der Auslegung der einzelnen Baugruppen kam es zur Neuberechnung der Belastungen (Kräfte und Momente) aufgrund der bekannten Geometrie. Eine FEM Simulation bestätigte die Ergebnisse. Die Positionsermittlung der einzelnen Achsen geschieht mittels eines Absolut-Encoders.

Die entwickelte Ausrichtungseinheit verfügt über die fünf erforderlichen Freiheitsgrade. Der longitudinale Verfahrbereich liegt zwischen 0 mm bis 618 mm anstatt des geforderten Abstandes von 0 mm bis 750 mm. In der X-Achse ist ein lateraler Verfahrbereich von ± 15 mm möglich. Die Hubspindeln können die FastCCD-Kamera um ± 10 mm heben. Der Detektor lässt sich um 1° drehen und um $0,87^\circ$ neigen.

Es kam nicht zum Erreichen des geforderten Verfahrbereiches entlang der longitudinalen Richtung und der Neigung und Drehung. Der Grund dafür liegt am begrenzten reservierten Bauraum in der SCS-Beamline, welcher für die Ausrichtungseinheit zur Verfügung steht. Wegen der hohen Vakuumkraft waren Schwerlast Linearführungen zu verbauen. Diese nehmen in der Regel einen großen Bauraum ein. Sollte ein Abstand zwischen der Probe und dem Detektor von mehr als 618 mm erforderlich sein, ließe sich dieser mittels eines Zwischenrohres realisieren. Nach Absprache mit den Projektwissenschaftlern ist die erreichte mögliche Drehung und Neigung akzeptabel.

Die verbauten kritischen Komponenten in der Ausrichtungseinheit sind die motorisierten sowie freien Linearführungen. Für diese wurde ein Festigkeitsnachweis durchgeführt. Zusammengefasst ist der Verbau eines maximalen Membranbalges von DN200 möglich. Zusätzlich darf die Baugruppe mit der FastCCD-Kamera ein Gewicht von 250 kg nicht überschreiten. Das Betreiben der Ausrichtungseinheit ist in der SCS-Hütte sowie auf dem kompletten European XFEL Betriebsgelände zulässig.

Nach der Fertigung aller Bauteile und dem Eintreffen aller Kaufelemente kommt es zum Aufbau der drei Unterbaugruppen einzeln in der XFEL Werkstatt und anschließend zum Zusammenfügen.

Daran schließt sich die Testphase an. Der erste Schritt beinhaltet das Einstellen sämtlicher Endschalter und Encoder. Nachfolgend werden alle Freiheitsgrade ohne Last verfahren. Nach dem erfolgreichen Test erfolgt die Montage der Ausrichtungseinheit auf dem vorgesehenen Gestell (FFT) in der SCS-Beamline. Die Ausrichtungseinheit wird nun mit dem DN200 Membranbalg (ohne FastCCD-Detektor) verbunden und evakuiert. Anschließend beinhaltet die zweite Testphase das Verfahren sämtlicher Freiheitsgrade unter Last (Vakuumkraft). Nach einem erfolgreichen Test erfolgt die Freigabe der Ausrichtungseinheit und die Montage des FastCCD-Detektors kann stattfinden. Die Ausrichtungseinheit kann als Unterbau für verschiedene Experimente zusätzlich zum Einsatz kommen.

7 Literatur

- [1] Beckhoff Automation GmbH & Co. KG: EL70x1 – Schrittmotorklemmen, 2020.
- [2] *Bergner, U.; Wolfgramm, S.; Gottschall, S.*: Vakuumkomponenten für UHV und XHV aus Aluminium – Teil 1: Mechanische Eigenschaften. *In: Vakuum in Forschung und Praxis* (2015), Vol.27 Nr.1, S. 33-35.
- [3] *Bernstein, H.*: Sicherheits- und Antriebstechnik – Umweltgerechte Konstruktion und Normung der Maschinensicherheit. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016.
- [4] *Beyerer, J.; Puente León, F.; Frese, C.*: Automatische Sichtprüfung – Grundlagen, Methoden und Praxis der Bildgewinnung und Bildauswertung. Springer Vieweg, Berlin, 2012.
- [5] *Brecher, C.; Weck, M.*: Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 2 – Konstruktion, Berechnung und messtechnische Beurteilung, VDI-Buch, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2017.
- [6] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V.: Herstellen und Betreiben von Geräten und Anlagen für Forschungszwecke – CE-Konformität und Betriebssicherheit. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V., Berlin, 2018.
- [7] *Domininghaus, H.; Elsner, P.; Eyerer, P. et al. (Hrsg.)*: Kunststoffe – Eigenschaften und Anwendungen ; mit 275 Tabellen, VDI-Buch, Springer, Heidelberg, 2012.
- [8] Dommach; Martin: UHV Guidelines for X-Ray Beam Transport Systems – XFEL.EU TN-2011-001-05. European XFEL, 2015.
- [9] *Erhardt, A.*: Einführung in die digitale Bildverarbeitung – Grundlagen, Systeme und Anwendungen ; mit 35 Beispielen und 44 Aufgaben, Studium, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2008.
- [10] *Fischer, U.*: Tabellenbuch Metall – XXL - das Medienpaket mit Formelsammlung und CD, Europa-Fachbuchreihe für Metallberufe, Verl. Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten, 2008.
- [11] Föhrenbach GmbH: Motorische Präzisionsschlitten Typ PFS. Föhrenbach GmbH, 2017.
- [12] *Graeff, W.*: Koordinatensystem für das XFEL-Projekt – Hasylab. DESY, Hamburg, 2005.
- [13] *Gross, D.; Hauger, W.; Schröder, J. et al.*: Statik, Springer-Lehrbuch/ Dietmar Gross, Werner Hauger, Jörg Schröder, Wolfgang A. Wall ; Bd. 1, Springer Vieweg, Berlin, 2016.
- [14] *Grote, K.-H.; Bender, B.; Göhlich, D. (Hrsg.)*: Taschenbuch für den Maschinenbau. Springer Vieweg, Berlin, Germany, 2018.
- [15] Heidenhain: Längenmessgeräte, Deutschland, 2019.
- [16] *Hering, E.; Martin, R.; Bergmann, R. (Hrsg.)*: Photonik – Grundlagen, Technologie und Anwendung ; mit 50 Tabellen. Springer, Berlin, 2006.
- [17] *Hirsch, A.; Hoyer, H.G.; Mahn, U.*: Lineare Wälzfürungen – Anforderungen, Auswahl, Auslegung, Ausführungsbeispiele, Schadensfälle, Springer eBooks, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2019.

- [18] HSM Stahl- und Metallhandel GmbH: Werkstoffdatenblatt – 1.4301 X5CrNi18-10 Nichtrostender Stahl, austenitisch, 2020.
- [19] HSM Stahl- und Metallhandel GmbH: Werkstoffdatenblatt – 1.4404 / X2CrNiMo17-12-2 Nichtrostender Stahl, austenitisch, 2020.
- [20] HSM Stahl- und Metallhandel GmbH: Werkstoffdatenblatt – 1.4429 / X2CrNiMoN17-12-3 Nichtrostender Stahl, austenitisch, 2020.
- [21] ibf-solutions.com: Safexpert: Software CE-Kennzeichnung | ibf-solutions.com, 2021, <https://www.ibf-solutions.com/software-ce-kennzeichnung-safexpert/> [Zugriff am: 04.02.2021].
- [22] Jousten, K. (Hrsg.): Handbuch Vakuumtechnik. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Springer Reference Technik, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2018.
- [23] Klein, B.: FEM – Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau, Lehrbuch, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015.
- [24] Kolarov, G.: Technische Mechanik 1 – Haftung und Reibung. HAW Hamburg, Hamburg.
- [25] Künne, B.: Einführung in die Maschinenelemente – Gestaltung, Berechnung, Konstruktion. Teubner, Stuttgart, 2001.
- [26] Kuster, M.: Detectors for the European X-ray Free Electron Laser (XFEL.EU) – Challenges and Status, Starnberg, 2013.
- [27] Massimo, A.: Der Röntgenlaser European XFEL und die Herausforderungen unserer Zeit. Die Printur Braun & Behrmann GmbH, Kaltenkirchen, 2016.
- [28] Membranbalg, UHV Komponenten, Orbitalschweißen | Mewasa AG, 2021, <http://www.mewasa.ch/> [Zugriff am: 27.02.2021].
- [29] Merziger, G.: Formeln + Hilfen höhere Mathematik. Binomi, Barsinghausen, 2010.
- [30] Mössner, T.: Risikobeurteilung im Maschinenbau. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Forschung, Bundesanst. für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund, 2012.
- [31] Oeser, T.: Kristallstrukturanalyse durch Röntgenbeugung – Spektroskopiekurs kompakt, Springer eBooks, Springer Spektrum, Wiesbaden, 2019.
- [32] ORIENTAL MOTOR GENERAL: Motor Only/Driver Only – Stepper Motors. Oriental Motor General, 2017/2018.
- [33] Pfeiffer Vacuum GmbH: Einführung in die Hoch- und Ultrahochvakuum-Erzeugung. Hanser Verlag und Vieweg Verlag, Berlin, 2003.
- [34] Pfeiffer Vacuum GmbH: Vacuum Technology – Know How. Hanser Verlag und Vieweg Verlag, Berlin, 2009.
- [35] Renishaw plc: RESOLUTE absolute, optische Messsysteme mit serieller BiSS Schnittstelle – Datenblatt: L-9517-9449-04-G. Renishaw, 2017.
- [36] L157/24: Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates. DE, Ausgabe 2006.
- [37] Robert Feidenhans'l: Licht der Zukunft. Druckerei Siepmann GmbH, Hamburg, 2018.

- [38] *Rummich, E.*: Elektrische Schrittmotoren und -antriebe – Funktionsprinzip Betriebseigenschaften Messtechnik, utb-studi-e-book Heft 5187, UTB GmbH; UVK, Stuttgart, 2015.
- [39] *Scherz, A.; Carley, R.; Delitz, J.T.*: Scientific Instrument Spectroscopy and Coherent Scattering (SCS) – Technical design report. European XFEL, Hamburg, 2014.
- [40] *Schmalzhaf, P.; Disterheft, R.; Pfeil, G. (Hrsg.)*: Grundlagen linearer Antriebstechnik – Hubgetriebe, Stellantriebe und Elektrohübsylinder. Grob GmbH Antriebstechnik, Expertenwissen Technik, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013.
- [41] *Schröder, D.*: Elektrische Antriebe, Lehrbuch, Springer Vieweg, Berlin, 2017.
- [42] DIN EN ISO 12100: Sicherheit von Maschinen – Allgemeine Gestaltungsleitsätze – Risikobeurteilung und Risikominderung (ISO 12100:2010) Deutsche Fassung EN ISO 12100:2010. Ausgabe März 2011.
- [43] Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze (ISO 13849-1:2015); Deutsche Fassung EN ISO 13849-1:2015. DIN EN ISO 13849-1, Ausgabe Juni 2016.
- [44] Sicherheit von Maschinen-Risikobeurteilung-Teil2: Praktische Leitfaden und Verfahrenbeispiele. DIN ISO/TR 14121-2, Ausgabe Februar 2013.
- [45] *Sinn, H.*: Coordinate Systems for the Beam Distribution Systems – Technical note: XFEL'.EU TN-2012-003-02. European XFEL, Hamburg, 2013.
- [46] *Spieß, L.; Teichert, G.; Schwarzer, R. et al.*: Moderne Röntgenbeugung – Röntgendiffraktometrie für Materialwissenschaftler, Physiker und Chemiker. Vieweg & Teubner, Wiesbaden, 2018.
- [47] *Steinmüller, A.; Bergner, O.*: Zerspantechnik – Fachbildung, Europa-Fachbuchreihe für Metallberufe, Verl. Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer, Haan-Gruiten, 2008.
- [48] THK GmbH European Headquarters: Merkmale der Kugelgewindetriebe – Merkmale und Typen, 2020, https://tech.thk.com/de/products/pdf/de_b15_006.pdf.
- [49] Überblick, 2021, https://www.xfel.eu/anlage/ueberblick/index_ger.html [Zugriff am: 21.03.2021].
- [50] ISO 3669:2017(E): Vacuum technology — Bakeable flanges — Dimensions of knife-edge flanges. Ausgabe 2017.
- [51] Vakuumtechnik; Verzeichnis von Fachausdrücken und Definitionen; Teil 1: Allgemeine Ausdrücke. Ausgabe Juli 2019.
- [52] Verband der Chemischen Industrie e.V.: Leitfaden zur Montage von Flanschverbindungen in verfahrenstechnischen Anlagen. Verband der Chemischen Industrie e.V., Frankfurt am Main, 2011.
- [53] *Weizeorick, J.*: Fast CCD X-ray Detector Collaboration with LBNL, 2012.
- [54] *Wittel, H.; Muhs, D.; Jannasch, D. et al.*: Roloff/Matek Maschinenelemente – Normung, Berechnung, Gestaltung. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015.
- [55] Wohlfeld; Stefan: Dimensionierung eines Spindelantriebs für DESY – Rev: A. Phytron GmbH, 2010.

Anhang

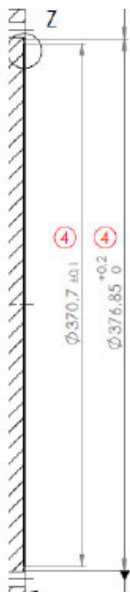
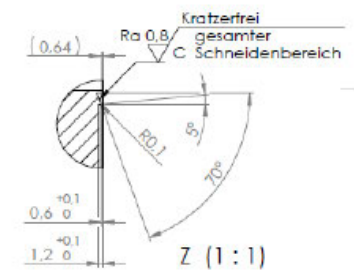
A1: Tabelle der Abstände der Probe zum FastCCD-Detektor bezogen auf die Proben und Strahlgröße

Sample size ϕ_{obj} [μm]	1	3	5	10
FEL diameter [μm]	3	9	15	30
FastCCD distance [mm]				
0.5 keV	48	145	242	484
0.8 keV	77	232	387	774
1.2 keV	116	348	581	1161
2.0 keV	194	581	968	1936
3.0 keV	290	871	1452	2904
Resolution [nm]	4 (2)	13 (6)	21 (10)	42 (21)

A2: CF-Schneidgeometrie nach Pfeiffer GmbH

Customized DN350 CF Knife-edge geometry

(NOT according ISO 3669)



A3: Berechnung der vorhandenen Volumina und Mantelflächen

$$V = \frac{\pi * d^2}{4} * l$$

$$V_1 = \frac{\pi * (217 \text{ mm})^2}{4} * 200 \text{ mm} = 7396722,82 \text{ mm}^3 = 7,4 \text{ l}$$

$$V_2 = \frac{\pi * (217 \text{ mm})^2}{4} * 722 \text{ mm} = 26702169,39 \text{ mm}^3 = 27 \text{ l}$$

Das Volumen V_3 setzt sich aus drei Rohrabschnitten zusammen

$$V_{3,1} = \frac{\pi * (63,5 \text{ mm})^2}{4} * 156,7 \text{ mm} = 496256,63 \text{ mm}^3$$

$$V_{3,2} = \frac{\pi * (108,3 \text{ mm})^2}{4} * 248,7 \text{ mm} = 2290986,76 \text{ mm}^3$$

$$V_{3,3} = \frac{\pi * (38,2 \text{ mm})^2}{4} * 34,05 \text{ mm} = 39024,17 \text{ mm}^3$$

Berechnung des Gesamtvolumens V_3

$$V_{3,ges} = V_3 = V_{3,1} + V_{3,2} + V_{3,3} = 2826267,5 \text{ mm}^3 = 2,83 \text{ l}$$

Berechnung des Gesamtvolumens V_{ges}

$$\begin{aligned} V_{ges} &= V_1 + V_2 + V_3 - V_{LBNL} \\ &= 7396722 \text{ mm}^3 + 26702169 \text{ mm}^3 + 2826267 \text{ mm}^3 \\ &\quad - 680000 \text{ mm}^3 = 36245158 \text{ mm}^3 = 36,25 \text{ l} \end{aligned}$$

Bestimmung der Mantelflächen der einzelnen Abschnitte

$$A_M = \pi * d * l$$

$$A_{M1,} = \pi * 217 \text{ mm} * 200 \text{ mm} = 136345,12 \text{ mm}^2$$

$$A_{M,2} = \pi * 217 \text{ mm} * 722 \text{ mm} = 492205,88 \text{ mm}^2$$

Die Mantelfläche $A_{M,3}$ setzt sich aus drei Rohrabschnitten zusammen.

$$A_{M,3.1} = \pi * 63,5 \text{ mm} * 156,7 \text{ mm} = 31260,26 \text{ mm}^2$$

$$A_{M,3.2} = \pi * 108,3 \text{ mm} * 248,7 \text{ mm} = 84616,31 \text{ mm}^2$$

$$A_{M,3.3} = \pi * 38,2 \text{ mm} * 34,05 \text{ mm} = 4086,30 \text{ mm}^2$$

Berechnung der Mantelfläche $A_{M,3}$

$$A_{M,3} = A_{M,3.1} + A_{M,3.2} + A_{M,3.3} = 119962,871 \text{ mm}^2$$

Berechnung der gesamten Mantelfläche

$$A_{M,ges} = A_{M,1} + A_{M,2} + A_{M,3} + A_{M,LBNL} = 11915 \text{ cm}^2$$

A4: Knicken

Berechnen der Querschnittsfläche der Spindel

$$A_{sp} = \frac{\pi * d^2}{4} = \frac{\pi * (30 \text{ mm})^2}{4} = 706,86 \text{ mm}^2$$

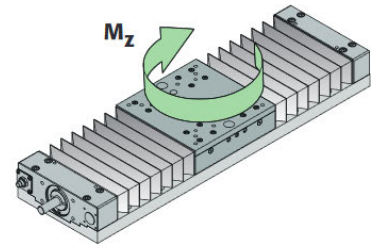
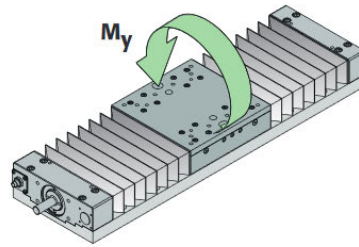
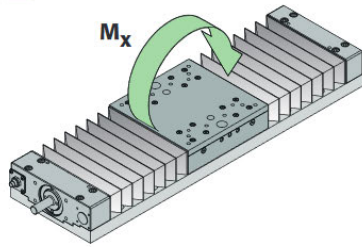
Berechnung des Flächenträgheitsmomentes der Spindel

$$I_{min} = \frac{\pi * d^4}{64} = \frac{\pi * (30 \text{ mm})^4}{64} = 39760,78 \text{ mm}^4$$

Berechnung der vorhandenen Spannung

$$\sigma_{vorh} = \frac{F_G}{A_{sp}} = \frac{1000 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{706,86 \text{ mm}^2} = 18,88 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

A5: Datenblätter

Momentenbelastbarkeit und Torsionssteifigkeit
Torsional load rating and torsional stiffness


Größe Size	Länge Verschiebeteil Length sliding element	Momentenbelastbarkeit [Nm] Torsional load rating [Nm]						Torsionssteifigkeit K_T [Nm/°] bei Belastung mit Torsional stiffness K_T [Nm/°] for loading with					
								Werkstoff: Aluminium Material: Aluminium			Werkstoff: Grauguss Material: Grey cast iron		
		M_x (dyn)	M_x (stat)	M_y (dyn)	M_y (stat)	M_z (dyn)	M_z (stat)	M_x	M_y	M_z	M_x	M_y	M_z
PFS 100	100	443	664	478	717	443	332	1795	1939	3103	2693	2908	4654
PFS 100	150	1023	1771	691	1196	1023	880	5386	2908	12411	8078	4362	18617
PCS 100	100	130	230	130	230	130	230	1256	1551	2327	—	—	—
PFS 155	155	993	1718	1279	22214	993	854	9850	12693	11211	14775	19040	16816
PFS 155	225	1791	3100	1685	2916	1791	2030	26656	19040	36489	39984	28560	54734
PCS 155	155	210	360	250	430	210	360	—	—	—	7880	10789	8969
PFS 225	225	4487	5983	5048	6731	4487	2940	30600	34425	41888	45900	51637	62832
PFS 225	335	8974	11965	6648	8865	8974	7800	91800	51637	36489	137700	77456	251327
PCS 225	225	880	1180	1990	1320	880	1180	—	—	—	24480	29261	35605
PFS 325	325	9930	12937	10658	13885	9930	6399	—	—	—	113897	122246	198973
PFS 325	540	21575	28109	14037	18288	21575	7800	—	—	—	371210	183369	939342
PFS 425	425	18553	23911	17935	23114	18553	11880	—	—	—	281849	241585	604117
PFS 425	700	36832	47468	23622	30443	36832	31088	—	—	—	791860	362377	2119357

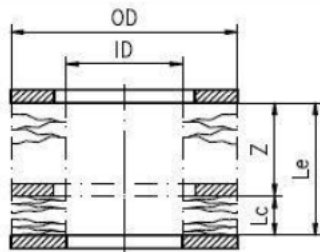
MEWASA AG
Membranbälge, Vakuumkomponenten



Membranbalgdaten axial / Bellows data sheet axial

170251

Artikelbezeichnung Part description		NS-200-235-0.2-1.4404		Druckdatum: Print Date:	
Kalkulationsnummer Calculation number		1703-009			
Innen - ø Inner - ø	ID	200 mm	Betriebsdruck innen Working pressure inside	Pi	0.00000001 bar
Aussen - ø Outer - ø	OD	235 mm	Betriebsdruck aussen Working pressure outside	Pa	1 bar
Wandstärke Wall thickness	t	0.2 mm	Betriebstemperatur Working temperature	OT	20 °C
Werkstoff Material		1.4404	Ausheiztemperatur Baking temperature	HT	80 °C
Membranform Diaphragm form		NS	Lastwechselzahl Guaranteed cycles	Nz	1'000
Anzahl Membranpaare Number of convolutions		114	Federrate Spring rate	SRz	1.1 N/mm
Hub axial Stroke axial	Z	620.2 mm	Druckdiff.-Kraft Pressure diff. Force	FZp	3723.4 N
		ohne Endstück w/o endpiece	mit Endstück with endpiece		
Länge frei (als Referenz) Length free (reference only)	Lf	376 mm	420 mm	Länge ES links /Length EP left 22 mm	
Länge gedrückt Length compressed	Lc	85.5 mm	129.5 mm	Länge ES rechts /Lenght EP right 22 mm	
Länge gestreckt Length extended	Le	705.7 mm	749.7 mm	Länge Ring /Lenght ring 0 mm	



Typ Material	Form	ID [mm]	OD [mm]	t [mm]	lf [mm]	lc [mm]	z [mm]	le [mm]	SRCz [N/mm]
NS									
1.4404 (316 L)	NS	6.00	13.00	0.076	0.55	0.35	0.25	0.60	130.00
1.4404 (316 L)	NS	6.60	16.00	0.076	0.76	0.30	0.52	0.82	54.00
1.4404 (316 L)	NS	8.00	16.00	0.076	0.60	0.35	0.40	0.75	80.00
1.4404 (316 L)	NS	9.00	20.00	0.1	0.80	0.40	0.60	1.00	87.00
1.4404 (316 L)	NS	10.00	20.00	0.1	0.82	0.35	0.60	0.95	100.00
1.4404 (316 L)	NS	12.50	25.00	0.1	1.00	0.30	1.00	1.30	98.00
1.4404 (316 L)	NS	13.00	26.00	0.1	1.10	0.35	0.85	1.20	84.00
1.4404 (316 L)	NS	16.00	31.50	0.127	1.18	0.43	1.21	1.64	50.00
1.4404 (316 L)	NS	19.00	37.00	0.127	1.60	0.45	1.60	2.05	94.00
1.4404 (316 L)	NS	21.00	41.00	0.127	1.83	0.48	1.80	2.28	54.00
1.4404 (316 L)	NS	26.00	46.00	0.1	1.70	0.40	1.70	2.10	47.00
1.4404 (316 L)	NS	26.00	46.00	0.127	1.75	0.45	1.75	2.20	62.00
1.4404 (316 L)	NS	31.00	51.00	0.127	2.15	0.45	2.05	2.50	44.00
1.4404 (316 L)	NS	36.00	56.00	0.127	1.90	0.45	1.95	2.40	40.00
1.4404 (316 L)	NS	39.00	59.00	0.1	1.91	0.50	1.95	2.45	24.00
1.4404 (316 L)	NS	39.00	59.00	0.127	2.19	0.44	2.00	2.44	41.00
1.4404 (316 L)	NS	46.00	62.50	0.127	1.65	0.50	1.50	2.00	116.00
1.4404 (316 L)	NS	46.00	71.00	0.127	2.50	0.50	2.30	2.80	44.00
1.4404 (316 L)	NS	51.00	76.00	0.127	2.40	0.50	2.40	2.90	52.00
1.4404 (316 L)	NS	60.00	88.00	0.15	2.50	0.65	2.65	3.30	65.00
1.4404 (316 L)	NS	65.00	90.00	0.15	2.40	0.55	2.70	3.25	72.00
1.4404 (316 L)	NS	70.50	95.00	0.15	2.20	0.75	2.65	3.40	81.00
1.4404 (316 L)	NS	75.00	100.00	0.15	2.50	0.55	2.75	3.30	79.00
1.4404 (316 L)	NS	77.00	107.00	0.15	2.60	0.74	2.86	3.60	50.00
1.4404 (316 L)	NS	83.50	108.00	0.15	2.11	0.66	2.53	3.19	77.00
1.4404 (316 L)	NS	90.00	120.00	0.15	3.10	0.60	2.90	3.50	53.00
1.4404 (316 L)	NS	102.00	132.00	0.15	2.91	0.65	2.90	3.55	60.00
1.4404 (316 L)	NS	127.00	157.00	0.15	2.73	0.70	3.00	3.70	62.00
1.4404 (316 L)	NS	127.00	157.00	0.2	2.96	0.75	3.20	3.95	130.00
1.4404 (316 L)	NS	132.50	165.00	0.2	3.10	0.75	3.25	4.00	120.00
1.4404 (316 L)	NS	150.00	185.00	0.2	3.40	0.75	3.50	4.25	110.00
1.4404 (316 L)	NS	162.50	195.00	0.2	2.45	0.75	3.00	3.75	144.00
1.4404 (316 L)	NS	170.00	200.00	0.2	3.00	0.75	3.20	3.95	140.00
1.4404 (316 L)	NS	180.00	215.00	0.2	2.90	0.75	3.40	4.15	124.00
1.4404 (316 L)	NS	200.00	235.00	0.2	3.30	0.75	3.40	4.15	120.00

A6: Bestimmung der Verfahrwege des Membranbalges

Verfahrweg beim Strecken des Membranbalges

$$s_{st} = L_e - L_f = 749,7 \text{ mm} - 420 \text{ mm} = 329,7 \text{ mm}$$

Verfahrweg beim Komprimieren des Membranbalges

$$s_{kom} = L_f - L_c = 420 \text{ mm} - 129,5 \text{ mm} = 290,5 \text{ mm}$$

Bestimmung der Federkraft beim Strecken des Membranbalges

$$F_{c,e} = c * s_{st} = 1,1 \frac{N}{mm} * 329,7 \text{ mm} = 362,67 \text{ N}$$

Bestimmung der Federkraft beim Komprimieren des Membranbalges

$$F_{c,c} = c * s_{kom} = 1,1 \frac{N}{mm} * 290 \text{ mm} = 319 \text{ N}$$

Bestimmung der gesamt wirkenden Kraft beim Strecken des Membranbalges

$$F_{ges,le} = F_v + F_{c,e} = 362,7 \text{ N} + 3332,9 \text{ N} = 3695,6 \text{ N}$$

Bestimmung der gesamt wirkenden Kraft beim Komprimieren des Membranbalges

$$F_{ges,cc} = F_v - F_{c,c} = 3332,9 \text{ N} - 319 \text{ N} = 3013,9 \text{ N}$$

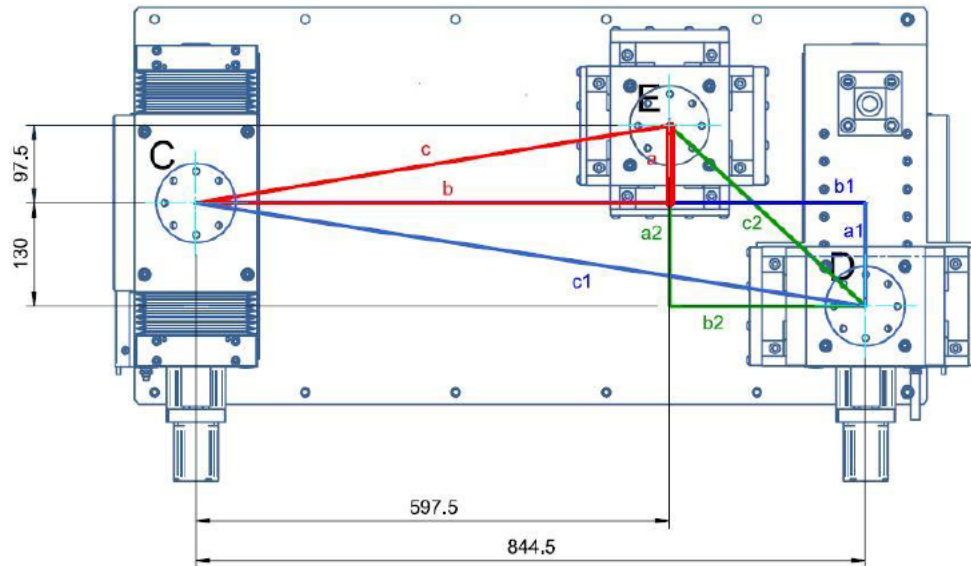
Bestimmung des Moments (Membranbalg komprimiert)

$$M_c = F_v * l = 3013,9 \text{ N} * 250 \text{ mm} = 753,25 \text{ Nm}$$

Bestimmung des Moments (Membranbalg gestreckt)

$$M_e = F_v * l = 3695,6 \text{ N} * 250 \text{ mm} = 923,9 \text{ Nm}$$

A7: Bestimmung der neuen Koordinaten des Punktes D



Berechnung der Hypotenusen c , c_1 und c_2

$$c = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{(97.5 \text{ mm})^2 + (597.5 \text{ mm})^2} = 605,4 \text{ mm}$$

$$c_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} = \sqrt{(130 \text{ mm})^2 + (844.5 \text{ mm})^2} = 854,44 \text{ mm}$$

$$c_2 = \sqrt{a_2^2 + b_2^2} = \sqrt{((844,5 - 597,5) \text{ mm})^2 + ((130 + 97,5) \text{ mm})^2} \\ = 335,81 \text{ mm}$$

Bestimmung der neuen Strecke b_1 (der neue senkrechte Lagerabstand von Punkt C und D)

$$b_1 = \sqrt{c_1^2 - a_1^2} = \sqrt{(854,45 \text{ mm})^2 - (115 \text{ mm})^2} = 846,676 \text{ mm}$$

Bestimmung des maximalen Winkels bei der Drehung um die Y-Achse

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{\text{Gegenkathete}}{\text{Hypotenuese}} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{(150 \text{ mm} - 115 \text{ mm})}{854,44 \text{ mm}} \right) = 1^\circ$$

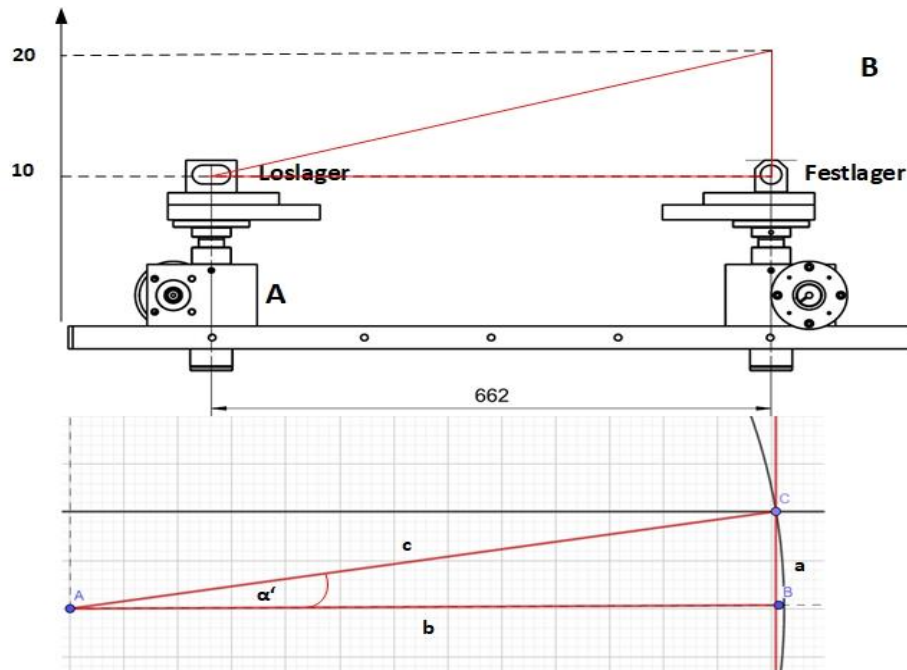
Bestimmung des Verfahrweges um eine Drehung von $\alpha = 3^\circ$ um die Y-Achse zu erreichen

$$a_1 = \sin(\alpha) * c_1 = \sin(3) * 854,44 \text{ mm} = 44,7 \text{ mm}^\circ$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{a}{b}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{10 \text{ mm}}{662 \text{ mm}}\right) = 0,87^\circ$$

Bestimmung des Verfahrweges um eine Drehung von $\alpha = 3^\circ$ um die X-Achse zu erreichen

$$a = \tan(\alpha) * b = \tan(3) * 662 \text{ mm} = 34,69 \text{ mm}$$



A8: Auslegung der Passung des Schrägkugellagers

Der Innen- und der Außenring des Schrägkugellagers haben die Toleranzklasse P6. Im folgenden wird zuerst die oberste und die unterste Toleranzgrenze des Außenrings berechnet und anschließend die des Innenrings.

$$G_{oWA} = N + es = 100 \text{ mm} + 0 \text{ mm} = 100 \text{ mm}$$

$$G_{uWA} = N + ei = 100 \text{ mm} - 0,013 = 99,987 \text{ mm}$$

$$G_{oBI} = N + ES = 35 \text{ mm} + 0 \text{ mm} = 35 \text{ mm}$$

$$G_{uBI} = N + EI = 35 \text{ mm} - 0,01 \text{ mm} = 34,99 \text{ mm}$$

Bei der Fertigung der Passungen wird der Fertiger den Mittelwert der obersten und der untersten Toleranz wählen.

$$T_{M,A} = \frac{G_{oWA} + G_{uWA}}{2} = \frac{100 \text{ mm} + 99,987 \text{ mm}}{2} = 99,9935 \text{ mm}$$

$$T_{M,I} = \frac{G_{oBI} + G_{uBI}}{2} = \frac{35 \text{ mm} + 34,99 \text{ mm}}{2} = 34,995 \text{ mm}$$

Berechnung der Presspassung für die Drehwelle und den Lagersitz. Die Passungen sollen 0,02mm kleiner sein als die Abmaße der Schrägkugellagers (Außenring, Innenring), damit das Fügen mit einer Presse möglich ist.

$$G_{oBL} = T_{M,A} - 0,02 \text{ mm} = 99,9935 \text{ mm} - 0,02 \text{ mm} = 99,9735 \text{ mm}$$

$$G_{oWD} = T_{M,I} - 0,02 \text{ mm} = 34,995 \text{ mm} - 0,02 \text{ mm} = 34,975 \text{ mm}$$

Für die Drehwelle wird die Toleranzklasse js5 und für den Lagersitz die Toleranzklasse N7 gewählt.

$$G_{oW} = N + es = 35 \text{ mm} + 0,0055 \text{ mm} = 35,0055 \text{ mm}$$

$$G_{uW} = N + ei = 35 \text{ mm} - 0,0055 \text{ mm} = 34,9945 \text{ mm}$$

$$G_{oB} = N + ES = 100 \text{ mm} - 0,01 \text{ mm} = 99,99 \text{ mm}$$

$$G_{uB} = N + EI = 100 \text{ mm} - 0,045 \text{ mm} = 99,955 \text{ mm}$$

A9: Berechnung der einzelnen Kräfte und Momente an den relevanten Stellen

$$F_G = m * g = 150 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1471,5 \text{ N} = 1,47 \text{ kN}$$

$$F_G = m * g = 250 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 2452,5 \text{ N} = 2,45 \text{ kN}$$

$$F_G = m * g = 750 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 7335,5 \text{ N} = 7,33 \text{ kN}$$

$$F_G = m * g = 1000 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 9810 \text{ N} = 9,81 \text{ kN}$$

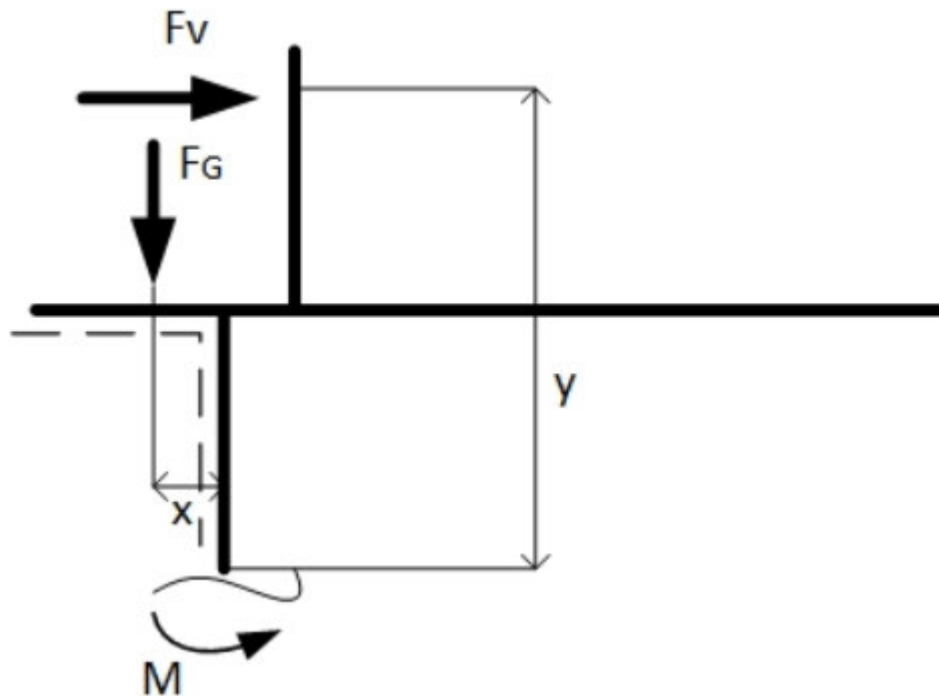
Membranbalg gestreckt

Moment Linearführung Z

$$M_{\text{Linearführung } z} = -F_G * x + F_v * y =$$

$$-2500N * 130 \text{ mm} + 3700 \text{ N} * 257,2 \text{ mm} = 625,9 \text{ N}_m$$

Körperfreibild Führung D Motor und die Momenten Gleichung



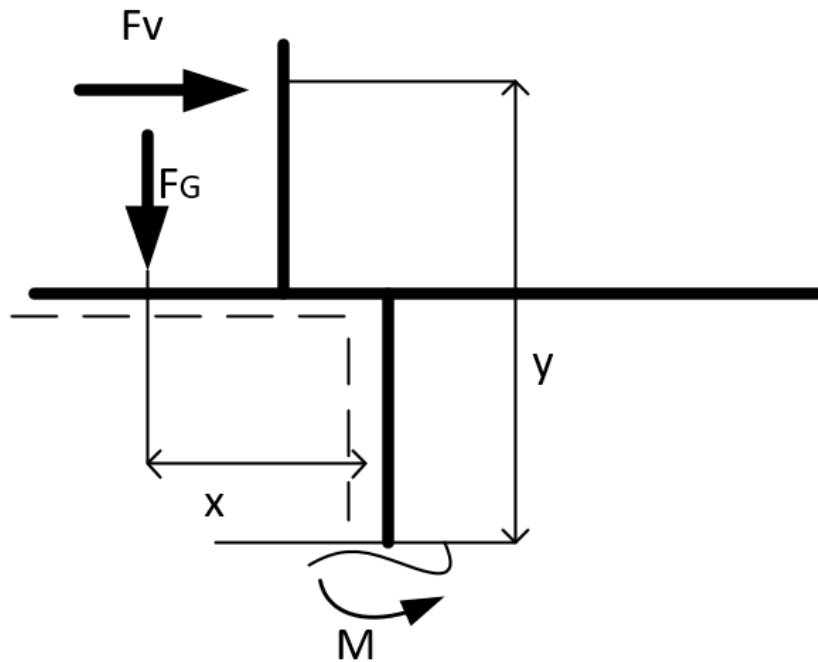
$$M_{D,motor} = -F_G * x + F_v * y =$$

$$-2500N * 8,4 \text{ mm} + 3700 \text{ N} * 424,2\text{mm} = 1548 \text{ N}_m$$

$$M_{\text{Grundplatte } z} = -F_G * x + F_v * y =$$

$$-2500 \text{ N} * 8,4 \text{ mm} + 3700 \text{ N} * 257,2 \text{ mm} = 930 \text{ N}_m$$

Führung E2 und E1 frei und die Momentengleichung



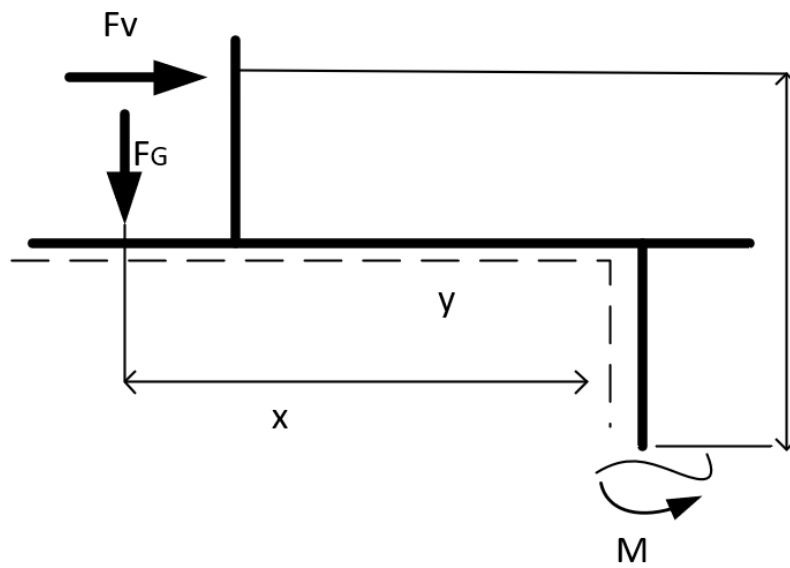
$$M_{E2, frei} = -F_G * x + F_v * y =$$

$$-2500 \text{ N} * 238,1 \text{ mm} + 3700 \text{ N} * 347,2 \text{ mm} = 689 \text{ N}_m$$

$$M_{E1, frei} = -F_G * x + F_v * y =$$

$$-2500 \text{ N} * 238,1 \text{ mm} + 3700 \text{ N} * 424,2 \text{ mm} = 974,29 \text{ N}_m$$

Freikörperbild Führung C Motor

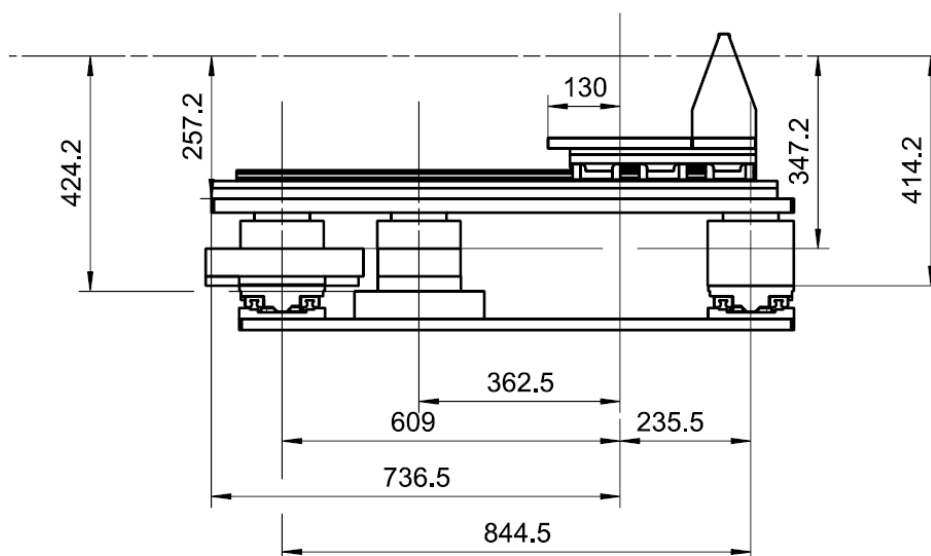


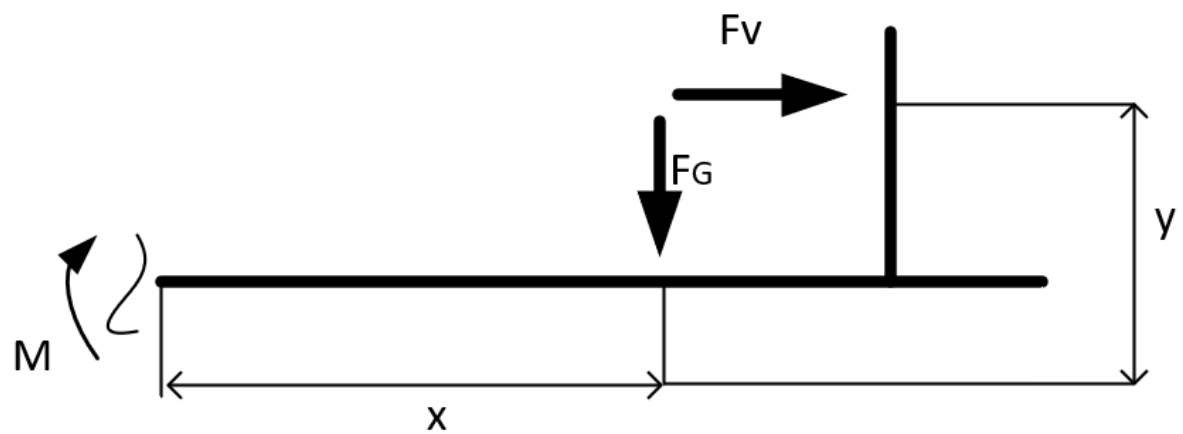
$$M_{C,motor} = -F_G * x + F_v * y =$$

$$-2500 \text{ N} * 844,5 \text{ mm} + 3700 \text{ N} * 424,2 \text{ mm} = -541 \text{ N}_m$$

Membranbalg gedrückt

Freikörperbild Grundplatte Z





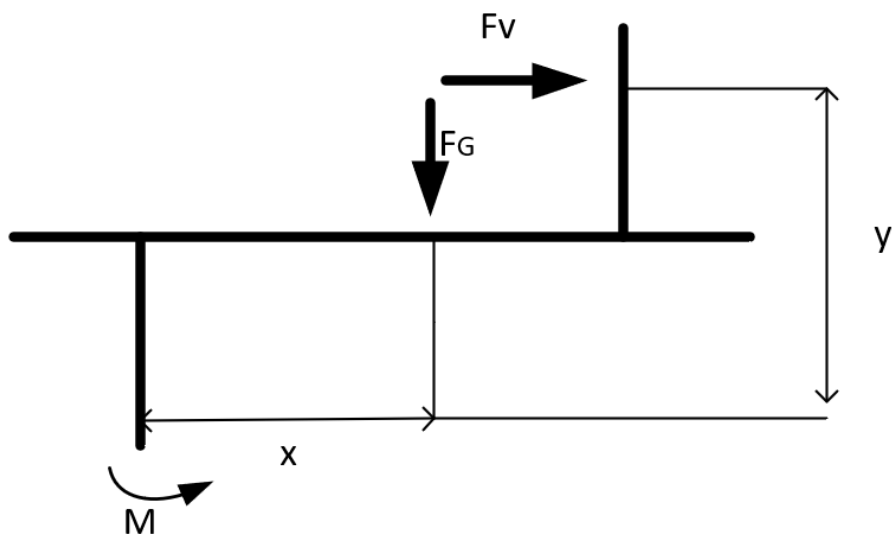
$$M_{Gundplatte,Z} = -F_G * x - F_v * y =$$

$$-2500 \text{ N} * 736,5 \text{ mm} - 3700 \text{ N} * 257,2 \text{ mm} = -2792 \text{ Nm}$$

$$M_{Linear_Z} = F_v * y =$$

$$3700 \text{ N} * 166 \text{ mm} = 614 \text{ Nm}$$

Freikörperbild für Führung D, Führung D Motor, Führung E1 frei und Führung E2 frei



$$M_{D,frei} = F_G * x + F_v * y =$$

$$2500 N * 609 mm + 3700 N * 347,2 mm = 2807 N_m$$

$$M_{D,Motor} = F_G * x + F_v * y =$$

$$2500 N * 609 mm + 3700 N * 424,2 mm = 3055 N_m$$

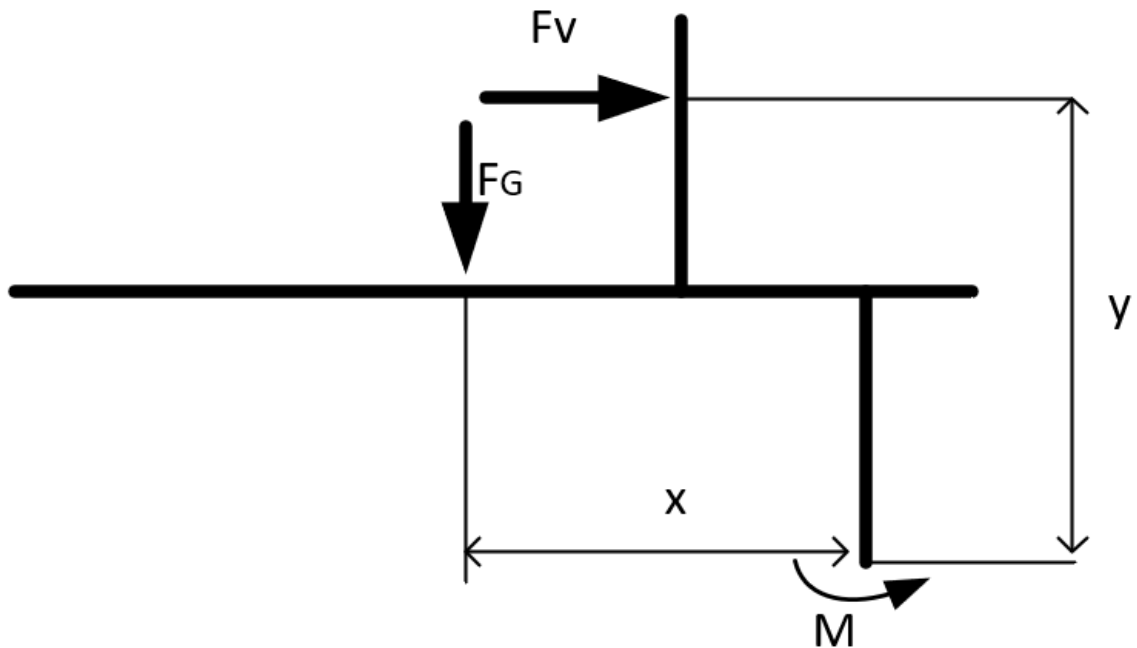
$$M_{E2,frei} = F_G * x + F_v * y =$$

$$2500 N * 362,5 mm + 3700 N * 347,2 mm = 2190 N_m$$

$$M_{E1,frei} = F_G * x + F_v * y =$$

$$2500 N * 362,5 mm + 3700 N * 424,2 mm = 2475 N_m$$

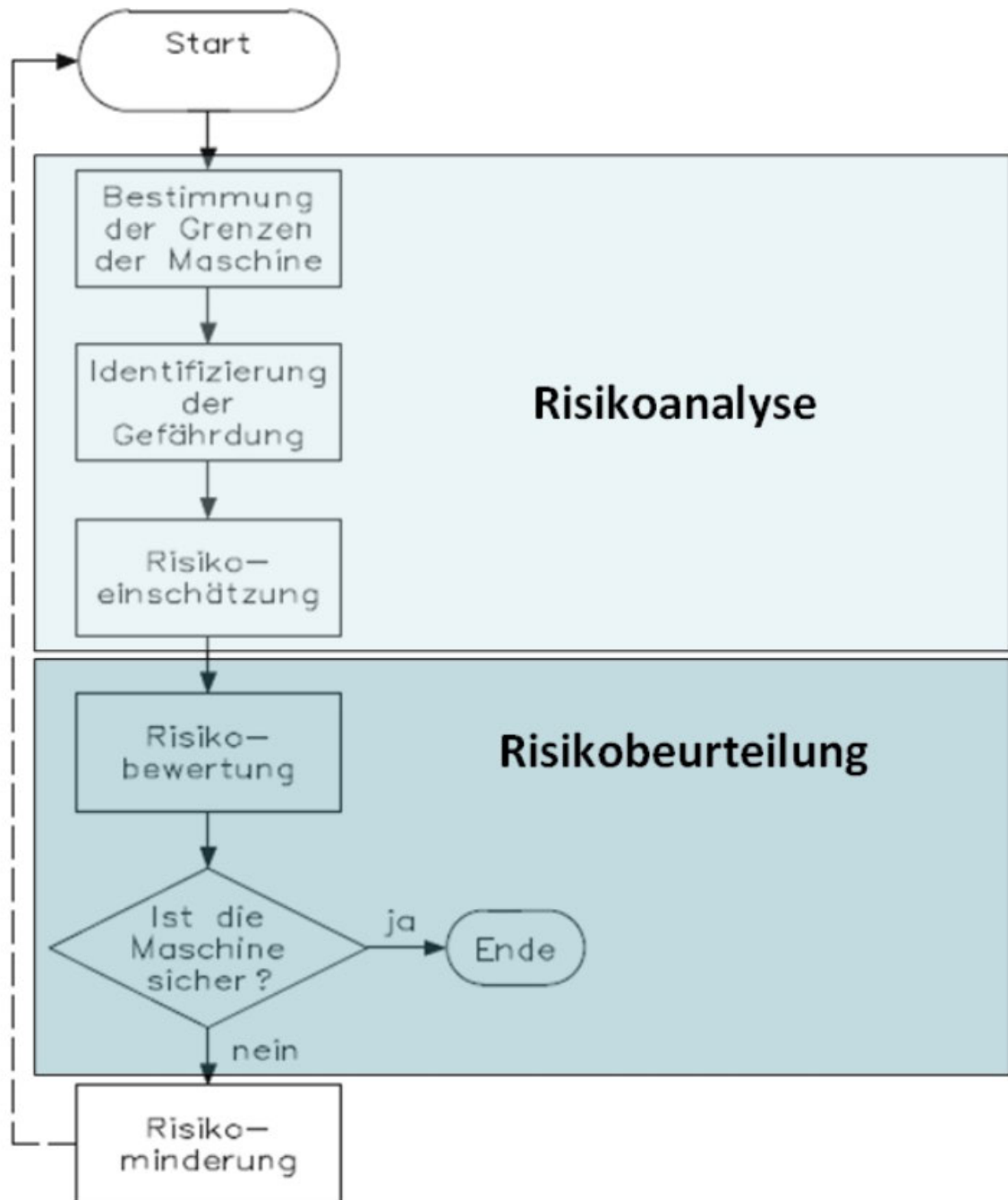
Freikörperbild Führung C Motor



$$M_{c,motor} = -F_G * x + F_v * y =$$

$$-2500 N * 235,5 mm + 3700 N * 414,2 mm = 943 N_m$$

A10:





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: Reich

Vorname: Alexander

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

Entwicklung einer motorisierten Ausrichtungseinheit mit fünf Freiheitsgraden

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:

Ort

Datum

Unterschrift im Original