



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

## **Bachelorarbeit**

Hendrik Lindemann

# **Entwicklung einer Vakuumröhre für einen Speicherring-Röntgenstrahl-Messplatz**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Maschinenbau und Produktion*

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

**Hendrik Lindemann**

**Entwicklung einer Vakuumröhre für  
einen Speicherring-Röntgenstrahl-  
Messplatz**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau/Entwicklung und Konstruktion  
am Department Maschinenbau und Produktion  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:  
Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY  
Abteilung: FS-PETRA  
Notkestraße 85  
22607 Hamburg

Erstprüfer/in: Prof. Dr.-Ing. Stefan Wiesemann  
Zweitprüfer/in : Dipl.-Ing. Ralph Döhrmann

Abgabedatum: 09.09.2016

# **Zusammenfassung**

**Hendrik Lindemann**

## **Thema der Bachelorthesis**

Entwicklung einer Vakuumröhre für einen Speicherring-Röntgenstrahl-Messplatz

## **Stichworte**

Methodische Entwicklung, Konstruktion, Vakuumtechnik, Teleskopische Lösungen, Arbeitssicherheit

## **Kurzzusammenfassung**

Inhalt dieser Arbeit ist die methodische Entwicklung und Konstruktion einer längenveränderlichen Vakuumröhre für wissenschaftliche Experimente. Ziel dabei ist es den vorhandenen Messplatz flexibler zu gestalten und zu optimieren. Dazu werden Anforderungen definiert und mit Hilfe eines morphologischen Kastens Lösungsvorschläge erarbeitet. Im Fokus stehen dabei das Teleskopsystem, der Membranbalg und das Positionierungssystem. Die Lösungen werden systematisch verglichen. Der beste Lösungsvorschlag wird umfangreicher ausgearbeitet. Des Weiteren wird eine Preis- und Kostenanalyse durchgeführt und sowie ein Arbeitssicherheitskonzept erarbeitet. Der Kraftfluss wird untersucht und die sich in diesen befindlichen Komponenten werden berechnet und dimensioniert.

**Hendrik Lindemann**

## **Title of the paper**

Development of a vacuum tube for a storage ring X-ray experimental hutch

## **Keywords**

methodical development, construction, vacuum technology, telescopic solution, work safety

## **Abstract**

Content of this report is the methodical development and construction of a length-adjustable vacuum tube for scientific experiments. Aim of the development is to optimize the experiment and to increase the flexibility. To achieve this, specifications are defined. Possible solutions are found with a morphological box. The main points are the telescopic system, the vacuum bellow and the positioning system. The possible solutions are compared to each other systematically. The best solution is prepared detailed. Therefore a prize and cost analysis as well as a work safety concept are created. The flow of forces is checked and involved components are calculated and dimensioned.

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich beim DESY für das Hauptpraktikum und die Aufgabenstellung dieser Arbeit bedanken. Besonderer Dank gilt dabei meinem Betreuer im Praktikum und Zweitprüfer der Bachelorarbeit Ralph Döhrmann, der mir immer mit Rat und Tat zur Seite stand.

Außerdem möchte ich mich auch bei meinen Kollegen von am DESY für die herzliche Aufnahme und die Unterstützung während meiner Zeit am DESY bedanken. Ich freue mich darauf auch weiterhin Teil des Teams zu sein.

Ebenfalls bedanke ich mich bei meinem Erstprüfer Prof. Stefan Wiesemann für die Betreuung im Praktikum und während der Arbeit.

# **A u f g a b e n s t e l l u n g**

**für die Bachelorthesis**

von Herrn/Frau **Hendrik Lindemann**

Matrikel-Nummer: **2131922**

**Thema: Entwicklung einer Vakuumröhre für einen Speicherring-Röntgenstrahl-Messplatz**

Der PETRA-Ring wurde 2009 von DESY zur weltbesten Speicherring-Röntgenstrahlungsquelle ausgebaut, so dass an 14 Messplätzen mit bis zu 30 Instrumenten zahlreiche Analysen mit besonders hoher Brillanz durchgeführt werden können.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit ist nun für einen Messplatz der o.a. Versuchsanlage eine längenveränderliche Vakuumröhre zu entwickeln, wobei neben der methodischen Konstruktion dieser Baugruppe auch die mechatronischen Bauteile (Sensoren und Motoren) auszulegen und ein Sicherheitskonzept zu erarbeiten sind.

## **Schwerpunkte:**

- Beschreibung des Messplatzes
- Literatur- und Patentrecherche
- Erstellung einer Anforderungsliste
- Untersuchung des Kraftflusses
- Entwicklung der Vakuumröhre auf dem Prinzip des Methodischen Konstruierens
- Erarbeitung eines Arbeitssicherheitskonzeptes
- Preis- und Kostenanalyse

## **Inhalt**

1.	Einleitung .....	1
1.1.	Ziel der Arbeit .....	2
2.	Beschreibung des Messplatzes P06 Nanoprobe .....	3
2.1.	Prinzip der Ptychographie .....	3
2.2.	Prinzip der Fluoreszenz .....	4
2.3.	Technische Realisierung.....	5
3.	Lastenheft .....	8
3.1.	Allgemeine Produktbeschreibung.....	8
3.2.	Markt und Plankosten .....	8
3.3.	Produktnutzen/Kundenforderungen.....	8
3.4.	Umgebungs- und Einsatzbedingungen .....	10
4.	Pflichtenheft .....	11
4.1.	Technische Produktbeschreibung .....	11
4.2.	Vorab Risikoanalyse.....	11
4.3.	Anforderungsliste .....	12
4.4.	Gantt Diagramm .....	13
4.5.	Beschreibung der Arbeitspakete .....	13
5.	Konzeptfindung.....	15
5.1.	Lösungsfindung .....	15
5.2.	Lösungsbewertung.....	19
6.	Beschreibung der Konstruktion.....	24
6.1.	Membranbalg.....	24
6.2.	Teleskopsystem .....	31
6.3.	Kardanische Aufhängung .....	32
6.4.	Positionierungssystem .....	33
6.5.	Verfahrwege .....	34
6.6.	Pumpenanschluss.....	36
7.	Untersuchung des Kraftflusses.....	37
7.1.	Lagerkräfte Kugellager.....	38
7.2.	Lagerkräfte Führungswagen .....	39
7.3.	Spindelberechnung .....	42
7.4.	Auslegung der Motoren .....	46
8.	Kostenanalyse.....	49

9. Arbeitssicherheitskonzept .....	50
9.1. Risikoanalyse .....	50
9.2. Bedienersicherheit .....	51
9.3. Bauteilsicherheit .....	52
9.4. Steuerungskonzept.....	53
10. Ausblick .....	56
11. Fazit.....	56
Literaturverzeichnis.....	IX
Anhang .....	A 1

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: PETRA III auf dem DESY Campus Hamburg [20] .....	1
Abbildung 1-2: Übersicht Strahlführung P06 [17].....	2
Abbildung 2-1: Ptychographie Schema [vgl. 23 und 18].....	3
Abbildung 2-2: Entstehung der charakteristischen Strahlung [vgl. 8: 157].....	4
Abbildung 2-3: Gesamtansicht des aktuellen Stands des Experiments [28].....	5
Abbildung 2-4: Proben Positionierungssystem [28] .....	6
Abbildung 2-5: Detailansicht mit Linsenpositioniersystem [28] .....	7
Abbildung 3-1: bisheriges Einsatzprinzip der Messgeräte.....	9
Abbildung 3-2: Reduzierung der Verfahwege durch Weiterentwicklung .....	10
Abbildung 5-1: Mindmap Funktionsschema.....	15
Abbildung 5-2: Lösungsvorschlag 1 .....	16
Abbildung 5-3: Lösungsvorschlag 3 .....	18
Abbildung 5-4: Lösungsvorschlag 4 .....	19
Abbildung 6-1: Entwickelte Konstruktion in der Experimentierhütte .....	24
Abbildung 6-2: Schema Membranbalg [15].....	26
Abbildung 6-3: Foto einer bereits verwendeten Vakuumröhre am DESY (PETRA III Messplatz P03).....	27
Abbildung 6-4: Skizze der Membranbalgs geschnitten .....	28
Abbildung 6-5: Teleskopsystem.....	31
Abbildung 6-6: Kardanische Aufhängung .....	32
Abbildung 6-7: Positioniersystem .....	33
Abbildung 6-8: Skizze der Verfahwege auf der Führungsschiene .....	34
Abbildung 6-9: Pumpenanschluss .....	36
Abbildung 7-1: Qualitative Darstellung der Lagerreaktionskräfte .....	37
Abbildung 7-2: Radialkräfte auf Kugellager.....	38
Abbildung 7-3: Kräfte und Lager in ANSYS oben.....	40
Abbildung 7-4: Kräfte und Lager in ANSYS unten.....	41
Abbildung 7-5: 3D Ansicht der geplanten Spindeln .....	43
Abbildung 7-6: Herleitung des Knickfalls .....	43
Abbildung 7-7: Euler Knickfälle [10: 159].....	44

Abbildung 7-8: Skizze Kraftverteilung bei maximaler Schrägstellung des Rohres.....	45
Abbildung 7-9: Schrittmotor mit 5 A Drehzahl zu Drehmoment Diagramm [26: 11].....	47
Abbildung 7-10: Schrittmotor mit 2,3 A Drehzahl zu Drehmoment Diagramm [26: 11] .....	48
Abbildung 9-1: Vorschlag zur Anordnung der Lichtschranken.....	52
Abbildung 9-2: Lage der Sensoren.....	53
Abbildung 9-3: Funktionsblockdiagramm des Steuerkonzepts .....	55

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 4-1: Identifizierte Risiken in der Vorkonzeptphase .....	11
Tabelle 4-2: Anforderungsliste.....	12
Tabelle 4-3: Beschreibung der Arbeitspakete .....	13
Tabelle 5-1: Vergleich der Aufhängungsart.....	20
Tabelle 5-2: Auszug aus der Gewichtungsmatrix .....	21
Tabelle 5-3: Lösungsbewertung .....	22
Tabelle 6-1: Formelzeichen Membranbalg .....	24
Tabelle 6-2: Maße und Anzahl der Bauteile .....	29
Tabelle 6-3: Technische Daten der Membranbälge .....	30
Tabelle 6-4: Formelzeichen Verfährwege.....	34
Tabelle 7-1: Formelzeichen Kugellagerberechnung .....	38
Tabelle 7-2: Ergebnisse der FEM Analyse oben.....	40
Tabelle 7-3: Ergebnisse der FEM Analyse unten.....	41
Tabelle 7-4: Formelzeichen Spindelberechnung.....	42
Tabelle 7-5: Auszug Hersteller Katalog Spindelhubgetriebe [22: 55].....	45
Tabelle 7-6: Formelzeichen Motor Auslegung .....	46
Tabelle 7-7: Kennwerte der Motoren .....	48
Tabelle 8-1: Kaufteilliste.....	49
Tabelle 9-1: Risikoanalyse .....	50
Tabelle 9-2: Variablen der Steuerung .....	54

## 1. Einleitung

Am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) in Hamburg und Zeuthen betreiben etwa 2300 Mitarbeiter Forschung mit den Schwerpunkten Beschleunigertechnik, Teilchenphysik und Forschung mit Photonen. [vgl. 21] Am Standort Hamburg werden die Großgeräte PETRA III, FLASH und bald der noch im Bau befindliche European XFEL betrieben. Bei FLASH und XFEL handelt es sich um Freie-Elektronen-Laser, die ultrakurze Röntgenlichtblitze erzeugen.

Mit PETRA III wird am DESY eine der hellsten Speicherring-Röntgenstrahlungsquellen der Welt betrieben. [vgl. 19] Seit dem Jahr 2010 werden an 14 Strahlführungen mit bis zu 30 Messplätzen diverse Experimente in verschiedenen Forschungsgebieten durchgeführt. [vgl. 19] Abbildung 1-1 zeigt eine Luftaufnahme vom DESY Gelände in Hamburg. Hervorgehoben sind der Verlauf des PETRA Rings und die zugehörigen Forschungsgebäude.



Abbildung 1-1: PETRA III auf dem DESY Campus Hamburg [20]

An der Strahlführung P06 werden Forschungen mit harter Röntgenstrahlung an Mikrometer großen Proben durchgeführt. Die Strahlführung P06 besteht aus zwei Messplätzen: Microprobe und Nanoprobe. Die beiden Messplätze teilen sich den Strahl, das heißt es kann nur ein Experiment zur gleichen Zeit in der Micro- oder Nanoprobe durchgeführt werden. Abbildung 1-2 zeigt den Aufbau der Strahlführung P06.

Zurzeit wird beim Nanoprobe Experimentaufbau eine feste Vakuumröhre (siehe Seite 5) zwischen Detektor und Probe verwendet. Diese hat die Aufgabe, die Luftstreuung (und die damit verbunden Verfälschungen des Messsignals) auf ein Minimum zu reduzieren.

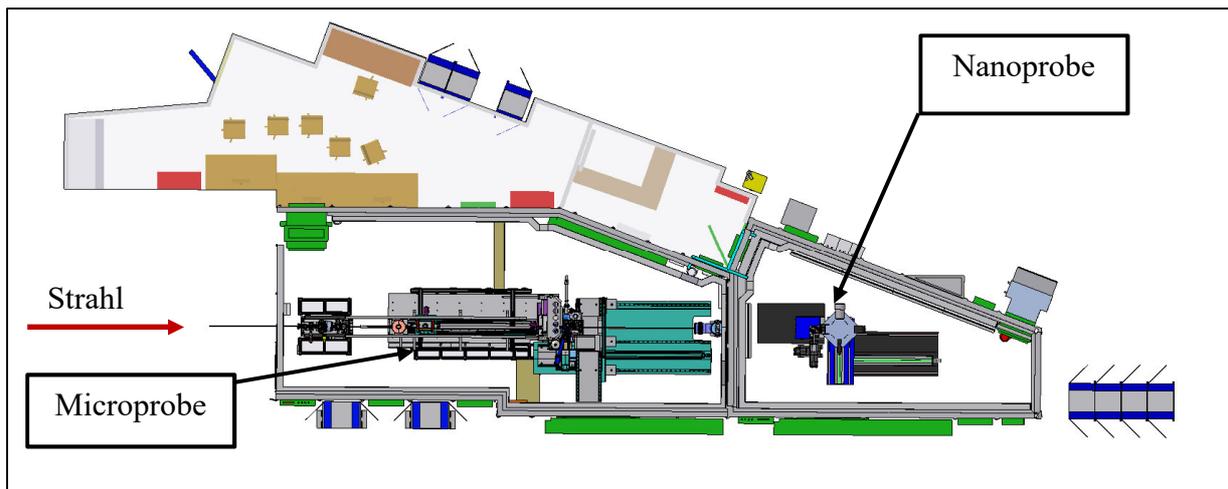


Abbildung 1-2: Übersicht Strahlführung P06 [17]

### 1.1. Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer längenveränderlichen Vakuumröhre für den Messplatz Nanoprobe. Es sollen Anforderungen für die neue Vakuumröhre definiert, mögliche Varianten verglichen und ein Modell konstruiert werden. Außerdem soll der Kraftfluss untersucht und die Dimension der Bauteile ausgelegt werden. Zusätzlich soll ein Arbeitssicherheitskonzept erstellt und eine Kostenanalyse durchgeführt werden.

## 2. Beschreibung des Messplatzes P06 Nanoprobe

Um die Möglichkeiten des Messplatzes Nanoprobe (PETRA III) zur erörtern, sind zunächst zwei häufig durchgeführte Versuchsverfahren erläutert. Am Messplatz werden auch diverse andere Versuche durchgeführt.

### 2.1. Prinzip der Ptychographie

Ptychographie ist ein Messverfahren zur Untersuchung von mikrometergroßen Proben mit Röntgenlicht. Grundprinzip der Ptychographie ist es mit Hilfe von überlappenden Scanbereichen von 60-80% [vgl. 8: 210] und dem nachträglichen verarbeiten der Daten anhand von Algorithmen eine Auflösung kleiner dem Strahldurchmesser zu erreichen.

Der Röntgenstrahl wird vor dem Auftreffen auf die Probe mit Hilfe von einem vertikalen und einem horizontalen 1-dimensionalen Röntgenlinsenstapel fokussiert. Ein Schlitzsystem und eine Lochblende dienen dazu Streustrahlung abzufangen und nur den fokussierten Strahl auf die Probe treffen zu lassen. (Abbildung 2-1 oben)

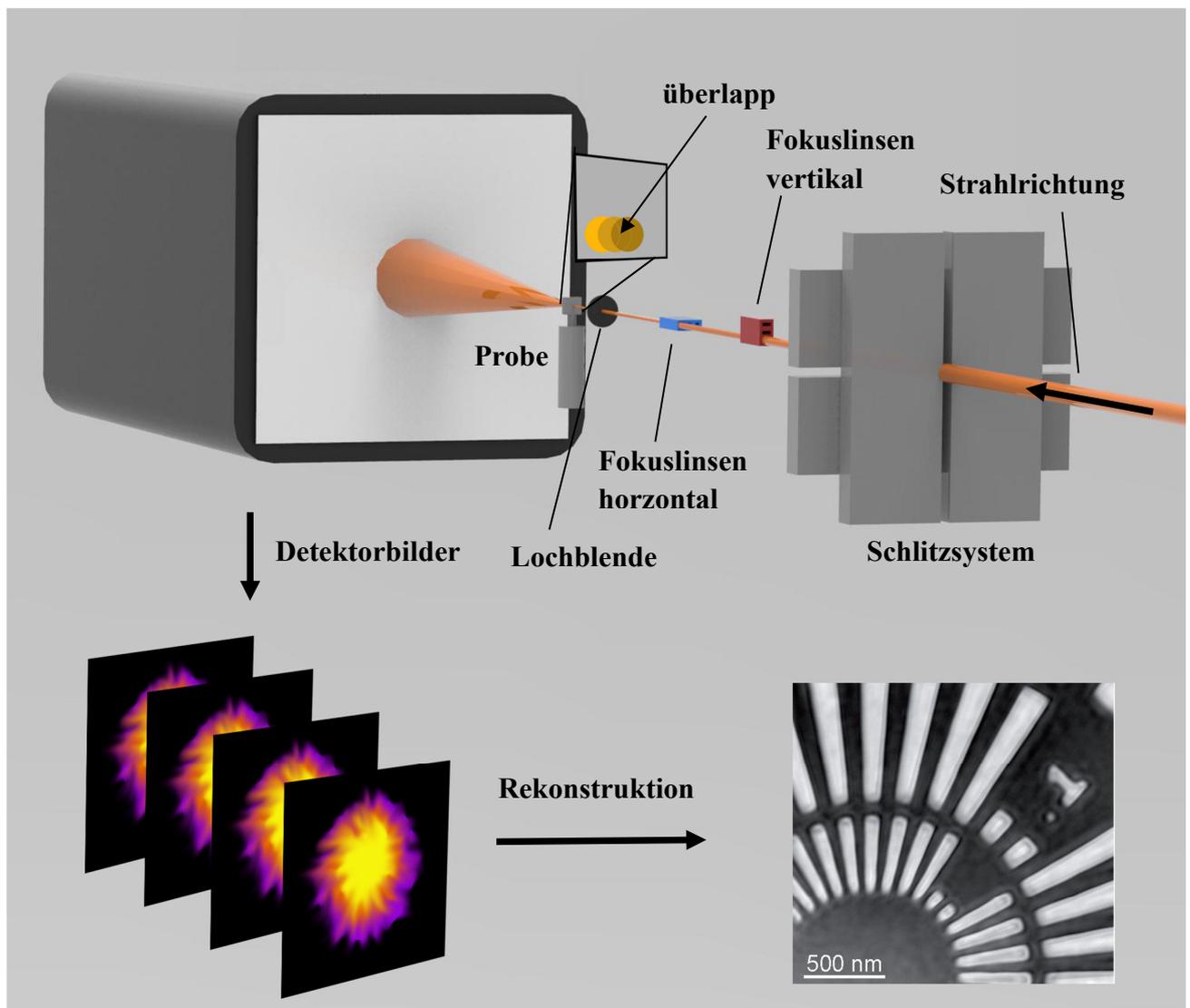


Abbildung 2-1: Ptychographie Schema [vgl. 23 und 18]

Für Ptychographie Experimente ist es wichtig, dass die Probe sehr präzise und stabil positioniert wird und durch Temperaturänderungen und Vibrationen entstehende Positionsänderungen gemessen und berücksichtigt werden. [vgl. 8: 213]

## 2.2. Prinzip der Fluoreszenz

Fluoreszenzanalyse wird verwendet um die chemische Zusammensetzung einer Probe zu untersuchen. Ein Röntgenstrahl ausreichender Energie durchstrahlt die Probe, dadurch werden Elektronen aus den getroffenen Atomen geschlagen, angeregt oder ionisiert. (Abbildung 2-2, links). [vgl. 8: 156] Bei der Neuordnung der Atome springen Elektronen auf die freigebliebenen Stellen der benachbarten Schale, dabei emittieren sie eine charakteristische Röntgenstrahlung (Abbildung 2-2 rechts). [vgl. 8: 156]

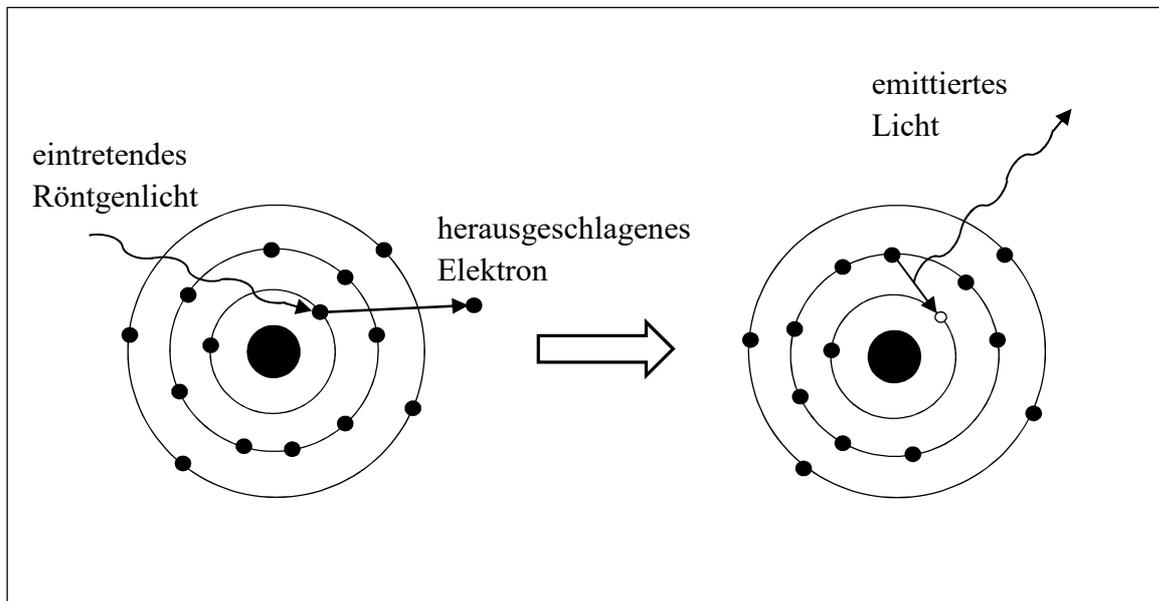


Abbildung 2-2: Entstehung der charakteristischen Strahlung [vgl. 8: 157]

### 2.3. Technische Realisierung

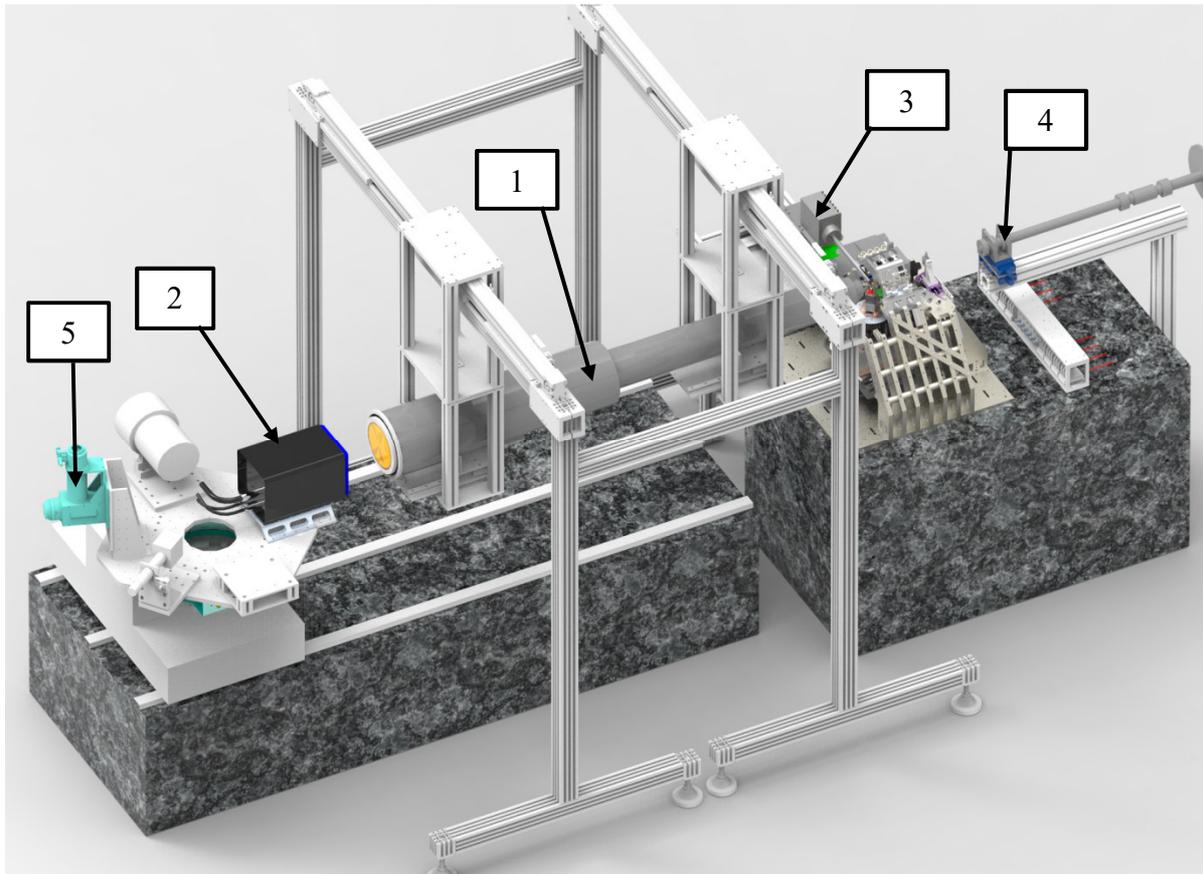


Abbildung 2-3: Gesamtansicht des aktuellen Stands des Experiments [28]

- 1) Zwischen Probe und Detektor befindet sich eine Vakuumröhre, diese kann in drei Achsen bewegt und gedreht werden. Sie dient zur Reduzierung der Luftstreuung hinter der Probe.
- 2) Der verwendete Röntgendetektor ist ein speziell für die Forschung an Synchrotrons entwickelter Detektor. Der Detektor ist unter anderem für die Verwendung in der Ptychographie optimiert. [vgl. 16]
- 3) Der Fluoreszenzdetektor dient dazu die entstandene charakteristische Röntgenstrahlung (siehe Kapitel 2.2) einzufangen und zu messen. Die detektierten Elemente werden im Ergebnisbild farbig am gemessenen Ort dargestellt.
- 4) Um Luftstreuung vor dem Experiment zu vermeiden werden Vakuumrohre eingesetzt. Das Rohr in der Experimentierkammer besitzt am Ende ein Diamantfenster, welches mit Hilfe von Linearpositioniertischen ausgerichtet werden kann. Das Diamantfenster bietet sehr gute Transparenz und ist für Hochvakuum Anwendungen geeignet. [vgl. 22]
- 5) Der Nahfeld-Röntgendetektor wird zum Beispiel zur Strahljustierung eingesetzt.

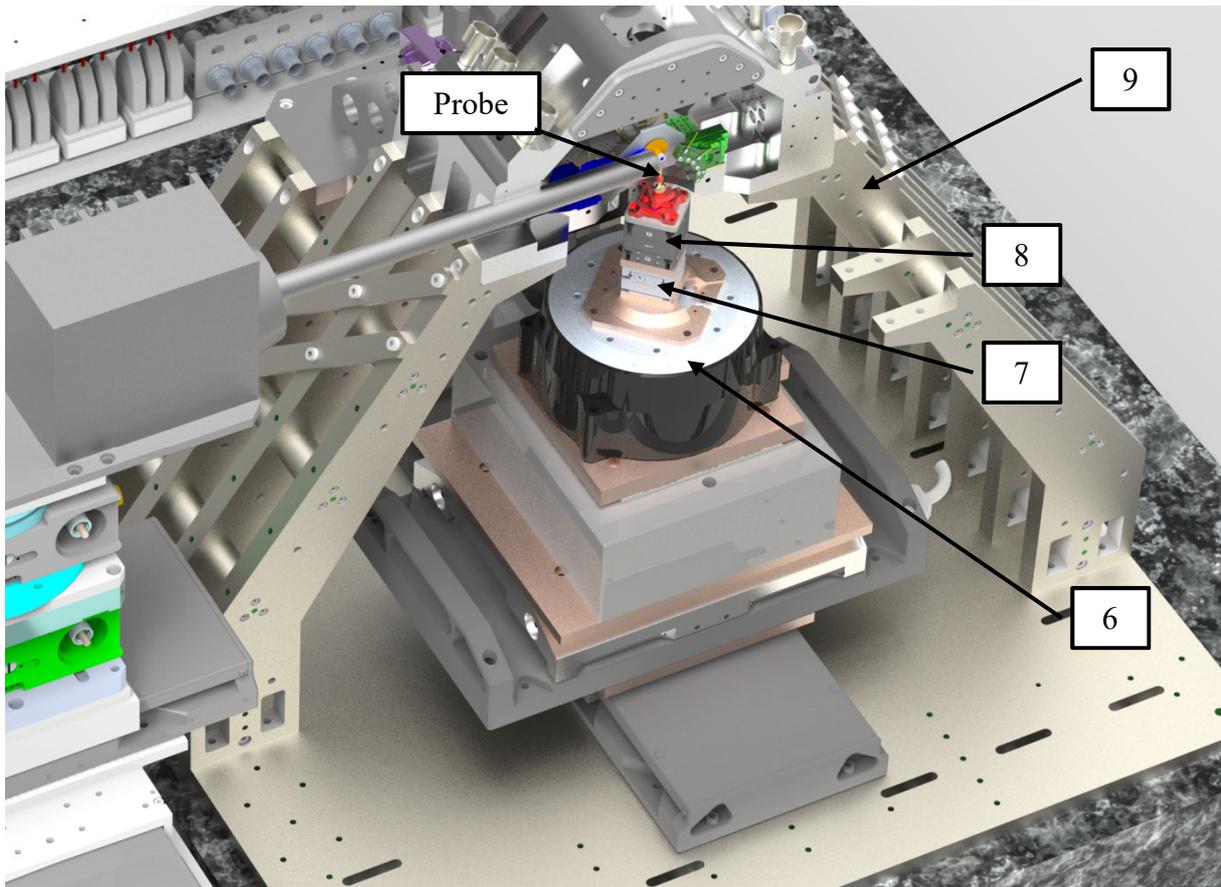


Abbildung 2-4: Proben Positionierungssystem [28]

- 6) Die Rotationsachse des Drehtisches wird mit Hilfe zweier Lineartische auf Strahlmitte gebracht. Die Höhe der Probe wird mit einem Hubtisch auf Strahlmitte gebracht.
- 7) Zwei Lineartische richten die Probe in das Drehzentrum der Rotationsachse aus.
- 8) Mit Hilfe von Nanometergenauen Positionier und Scanner Tischen wird die Probe im Strahl stabil gehalten und für die Aufnahme der Ptychogramme in Rasterschritten bewegt.
- 9) Der obere Rahmen besteht aus Invar (Fe65Ni35) und die Stützen aus Titan. Optimiert wurde der Rahmen auf Stabilität, hohe Eigenschwingungsfrequenzen und auf eine niedrige Wärmeausdehnung.

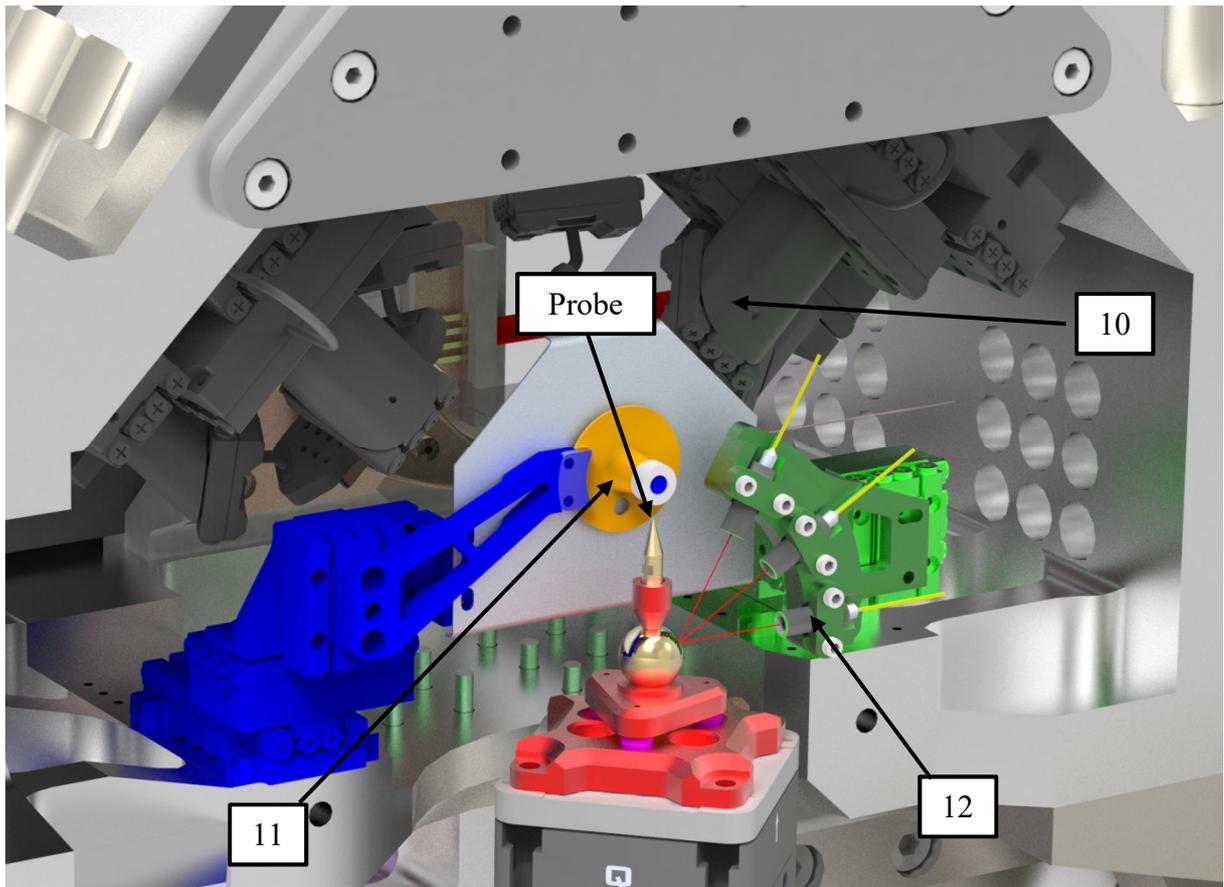


Abbildung 2-5: Detailansicht mit Linsenpositioniersystem [28]

- 10) Zur Positionierung der 1D Röntgenlinsenstapel im Strahl werden Parallel-Kinematische Roboter (Smarpods) mit nanometergenauen Schrittweiten verwendet. Die Smarpods können die Linsen in alle 3 Translations- und Rotationsrichtungen bewegen.
- 11) Die Lochblende und das dazugehörige Abschirmschild werden mit einem 3-Achsen Lineartischsystem im Strahl positioniert.
- 12) Die Position der Probe wird mit Infrarot-Interferometern in der Ebene senkrecht zum Strahl überwacht. Diese sind wie die Lochblende in 3 Achsen positionierbar.
- 13) Das verwendete Schlitzsystem (nicht Abgebildet) positioniert mit Hilfe von Schrittmotoren 4 Blenden in der Ebene senkrecht zum Strahl, dadurch entsteht ein rechteckiges Fenster.

### **3. Lastenheft**

#### **3.1. Allgemeine Produktbeschreibung**

Das zu entwickelnde Vakuumrohr soll längenverstellbar sein. Es wird mit Hilfe von Motoren zusammen und auseinander gefahren, dabei ist es möglich beide Enden unabhängig voneinander anzusteuern. Dazu ist es nicht nötig das Vakuum zu brechen. Die Dimension des neuen Rohres orientiert sich am vorhandenen. Es ist beidseitig sowohl vakuumtauglich als auch röntgenstrahldurchlässig, verschlossen und probenseitig ist eine Reduzierung, wie beim bereits verwendeten Rohr, angebracht.

#### **3.2. Markt und Plankosten**

Das Vakuumrohr ist als Sonderanfertigung für den Messplatz Nanoprobe der PETRA III Halle am DESY vorgesehen. Das heißt, ein DESY externer Verkauf ist nicht vorgesehen. Das Konzept kommt für andere PETRA III Experimente in Frage und kann dort eventuell wieder verwendet werden.

#### **3.3. Produktnutzen/Kundenforderungen**

Das zu entwickelnde Vakuumrohr ersetzt das vorhandene starre Vakuumrohr zwischen Probe und Detektor. Die Längenverstellung erleichtert den Einsatz der vorhandenen Detektoren, indem es die Verfahrenswege verkürzt und eine Zeitersparnis bietet. (Abbildung 3-1, Abbildung 3-2) Der Umbau der Messgeräteplattform wird in folgenden Weiterentwicklungen realisiert: Durch die motorisierte Steuerung ist es nicht mehr notwendig den Raum zu betreten um das Rohr zu entfernen, wodurch eine zusätzliche Zeitersparnis entsteht. Die Variabilität der Länge ermöglicht außerdem mehrere Arbeitsabstände für den Detektor, was das Experiment flexibler macht. Um die idealen Abstände proben- und detektorseitig einstellen zu können, werden die beiden Enden unabhängig voneinander angesteuert.

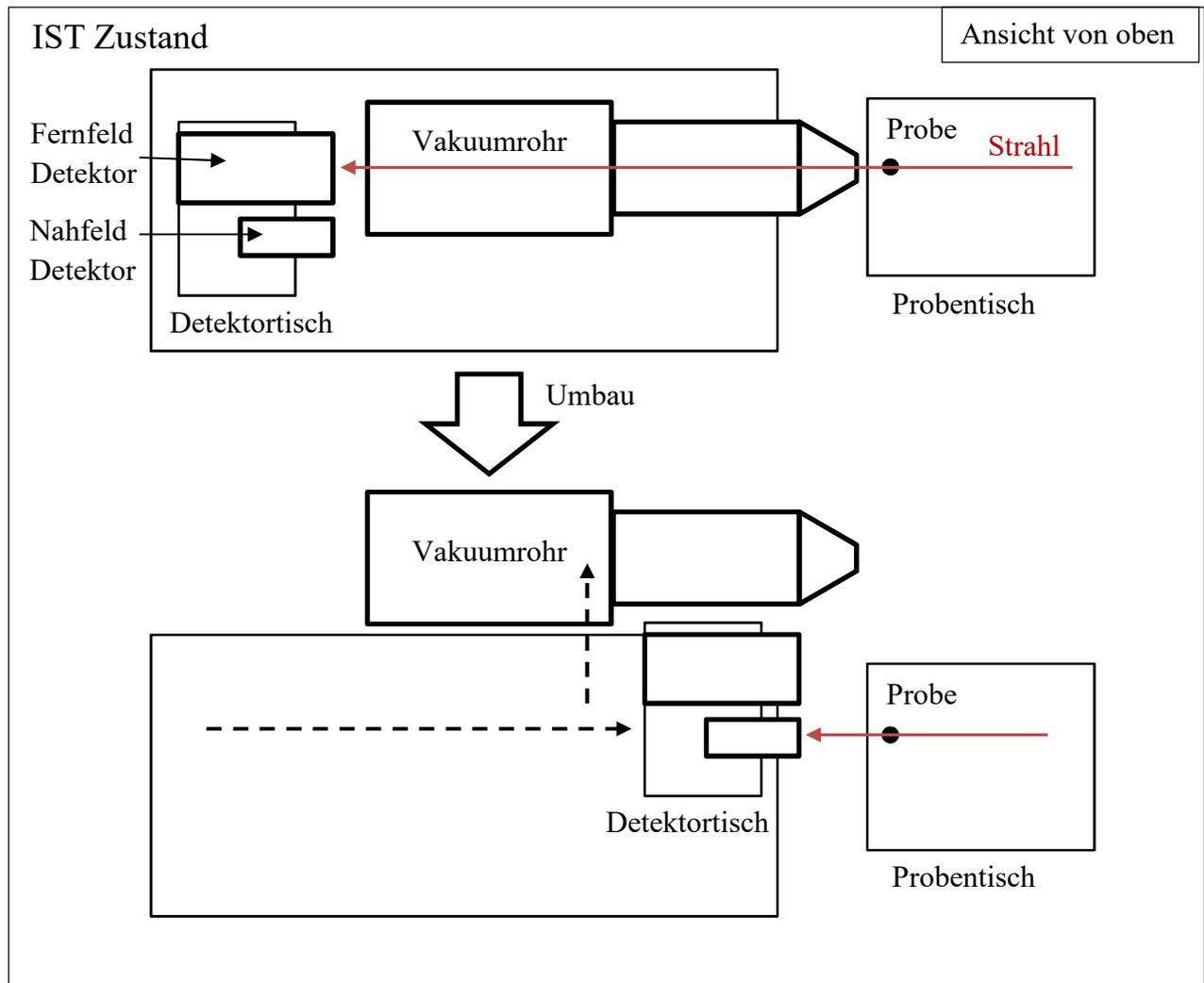


Abbildung 3-1: bisheriges Einsatzprinzip der Messgeräte

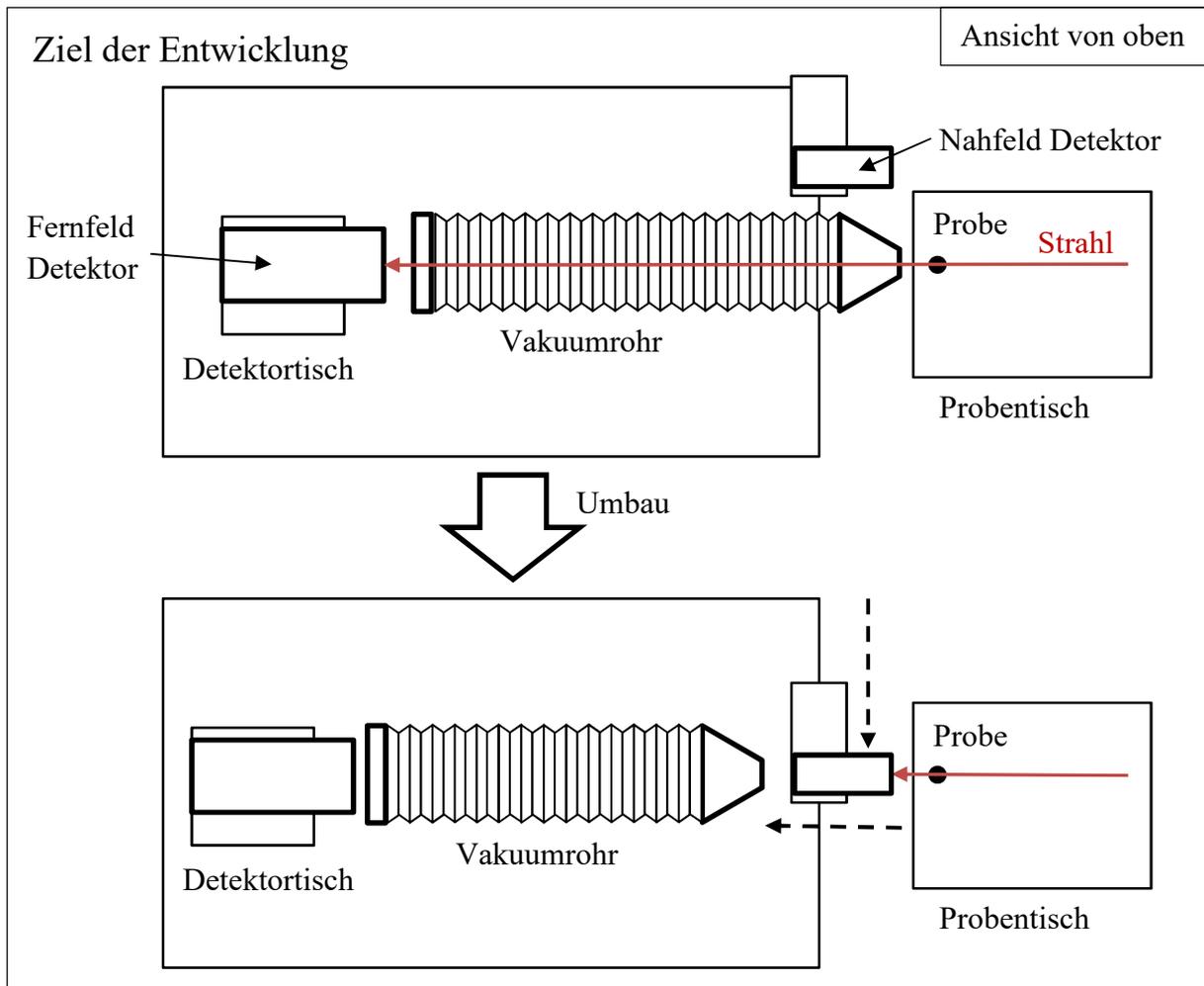


Abbildung 3-2: Reduzierung der Verfahrenswege durch Weiterentwicklung

### 3.4. Umgebungs- und Einsatzbedingungen

Im Versuchsraum herrschen durchschnittlich 22,3 °C und eine relative Luftfeuchtigkeit von 20 bis 30 %. [27] Der Versuchsraum ist als Reinraum ausgelegt und frei von groben Staubpartikeln. Mit Spritzwasser ist nicht zu rechnen, trotzdem sind alle Bauteile aus korrosionsbeständigem Material vorzusehen. Elektrische Bauteile sollen die Anforderungen der Schutzklasse IP 54 einhalten. („IP 54 = 5: Vollständiger Schutz gegen Berühren; Schutz gegen schädliche Staubablagerungen; 4: Schutz gegen Spritzwasser aus beliebigen Richtungen“ [7: 243-244])

## 4. Pflichtenheft

### 4.1. Technische Produktbeschreibung

Die Längenänderung wird mit Hilfe von Membranbälgen realisiert, da diese keine Kräfte aufnehmen können, ist eine geeignete ebenfalls einfahrbare Kraftaufnahme vorgesehen. Um ein Durchhängen der Bälge zu verhindern werden diese mit Stützringen ausgestattet und geführt gelagert. Im festen Teil der flexiblen Vakuumpöhre befinden sich Öffnungen um zusätzliche Sensoren oder Strahlfänger zu installieren. Ausgefahren soll das Vakuumrohr eine Länge von 3,1 m haben. Die Verbindung der Bauteile erfolgt über ISO-K Flansche der Dimension 200 mm nach DIN 28404.

### 4.2. Vorab Risikoanalyse

Um zusätzliche Anforderungen an die Sicherheit zu identifizieren wurde eine Unfallrisikoanalyse durchgeführt. Dabei wurden folgende Unfallursachen, Folgen und Gegenmaßnahmen gefunden.

Tabelle 4-1: Identifizierte Risiken in der Vorkonzeptphase

Unfallursache	Folgen	Gegenmaßnahmen
Motorüberhitzung durch Überlastung	Feuergefahr durch Staubentzündung	Überwachung durch Thermoelement, Staubdicht ausführen, Motoren richtig dimensionieren
	Hautverbrennung	
Kabelbruch	Strom auf Gehäuse	Erdung der metallischen Bauteile, RCD Schutzschalter, Niedrige Spannung, Rücksichtsvolle Kabelführung
	Offene Kontakte mit Werkzeug berührbar	
Luftgefüllt zusammenfahren	Zerbersten der schwächsten Bauteile, dabei lauter Knall	Überdruckventil, Luftdrucküberwachung
Überschreiten der Endlage	Membranbrüche	Endlagensensoren, Softwareseitige Begrenzungen, Motordrehmomentsensor
	Motorüberlastung	
Unkontrolliertes Verfahren	Kollisionen mit anderen Bauteilen	Kollisionssensoren, niedrige Verfahrgeschwindigkeiten
	Kollision mit Personen	
Kontakt von Personen mit sich bewegenden Teilen	Quetschverletzungen	Geschützter Arbeitsbereich, geschultes Personal, rotierende Teile abdecken, langsame Verfahrgeschwindigkeit, NOT-AUS Einrichtungen, Signalton vor dem Anfahren
	Haare, Stoff in rotierende Teile	
Wellen- oder Motorversagen, Stromausfall	unkontrolliertes Zusammenfahren	Selbsthemmung, Bremsen
Scharfe (rotierende) Kanten	Schnittverletzungen	Handschuhe, Kanten verrunden

### 4.3. Anforderungsliste

Die Anforderungen wurden in Zusammenarbeit mit Ralph Döhrmann und Andreas Schropp (beide DESY FS-PETRA) aufgestellt.

Tabelle 4-2: Anforderungsliste

Nr.	F/W	Beschreibung	Kommentar, Daten
1		<b>Allgemein</b>	
1.1	F	Vakuumpumpen und Messgeräte Anschluss	
1.2	F	Balg Durchbiegung unter 10mm	
1.3	W3	modularer Aufbau	
1.4	F	Membranbälge als flexible Rohrbauteile	
2		<b>Dimension</b>	
2.1	F	Vakuumpumpensystem ISO-K	
2.2	F	Rohrdimension DN 200	
2.3	F	minimale Länge voll ausgefahren > 3100 mm	
2.4	W2	Gewicht kleiner 40 kg	
2.5	F	geeignet für technisches Vakuum < $1 \times 10^{-5}$ mbar	
2.6	W3	minimale Länge unter 1100 mm	
3		<b>Kinematik</b>	
3.1	W3	Mittelstück relativ zu den Rohrenden +/- 300 mm verfahrbar	
3.2	F	Rohrenden separat ansteuer- und verfahrbar	
3.3	F	mechanische Synchronisierung bei Parallelkinematik	
3.4	F	probenseitig min. 400 mm einfahrbar	
4		<b>Steuerung</b>	
4.1	F	max. Motorstrom 5 A	
4.2	W4	2-Phasen Schrittmotor	
4.3	F	Positioniergenauigkeit: Schrittweiten < 0,1 mm	
4.4	F	mit PC steuerbar	
5		<b>Sicherheit</b>	
5.1	F	verfahrgeschwindigkeiten unter 33 mm/s (bei Scherbewegungen)	[3: 27]
5.2	F	Sicherung gegen ungewollte Bewegung	
5.3	F	Sicherung gegen Überdruck	
5.4	F	Sicherung gegen Überschreiten der Endlage	
5.5	W2	Sicherung gegen Kollisionen softwareseitig	
5.6	W3	Sicherung gegen Kollisionen durch Sensoren	
5.7	F	mindestens IP Schutzklasse 54 bei stromführenden Teilen	

F= Forderung, W4 = Sehr wichtig, W3 = wichtig, W2 = interessant, W1 = wenn möglich

#### 4.4. Gantt Diagramm

	13.06.2016	20.06.2016	27.06.2016	04.07.2016	11.07.2016	18.07.2016	25.07.2016	01.08.2016	08.08.2016	15.08.2016	22.08.2016	29.08.2016	05.09.2016	12.09.2016		
Arbeitspakete	Woche 1	Woche 2	Woche 3	Woche 4	Woche 5	Woche 6	Woche 7	Woche 8	Woche 9	Woche 10	Woche 11	Woche 12	Woche 13	Woche 14		
Lastenheft/Pflichtenheft	■		■					A		■					B	
Konzeptfindung			■			■										
Berechnung					■		■									
Konstruktion								■			■					
Bachelor Thesis			■				■		■			■				
Meilensteine:																
A = Morphologischer Kasten ist fertig und ein primäres Konzept ist gewählt																
B = CAD Modell und Thesis sind digital Fertig zur Abgabe																

#### 4.5. Beschreibung der Arbeitspakete

Tabelle 4-3: Beschreibung der Arbeitspakete

<b>Lastenheft/Pflichtenheft</b>	
Inhalt	Beschreibung des Messplatzes und der Messverfahren Zeitplan Ziele des Projektes Einsatzbedingungen Anforderungsliste
Ergebnis	Lastenheft, Pflichtenheft mit Anforderungsliste
Zeitraum	13.06.16 – 26.06.16   2 Wochen

<b>Konzeptfindung</b>	
Inhalt	Vorauslegung, Randbedingungen Recherchen Morphologischer Kasten Konzeptauswahl: Gewichtung, Vergleich
Ergebnis	Morphologischer Kasten, Konzeptzeichnung
Zeitraum	27.06.16 – 24.07.16   4 Wochen

<b>Berechnung</b>	
Inhalt	Berechnung der Rohrbalgen Abmaßen Berechnung Kräfte, Momente, Verfahrwege Dimensionierung der Bauteile
Ergebnis	Bauteil Dimensionen
Zeitraum	18.07.16 – 31.07.16   2 Wochen

<b>Konstruktion</b>		
Inhalt	Ermittlung von Bestelldaten der Kaufteile Konstruktion der Bauteile Zusammenstellen einer CAD Baugruppe „digital master“ des besten Konzepts Steuerungskonzept, Arbeitssicherheitskonzept Preis- und Kostenanalyse	
Ergebnis	CAD Modell, Steuerungskonzept, Arbeitssicherheitskonzept, Kostenanalyse	
Zeitraum	01.08.16 – 28.08.16	4 Wochen

<b>Bachelor Thesis</b>		
Inhalt	Dokumentation des Projektes in Form der Thesis Druck und Abgabe der Thesis	
Ergebnis	Thesis	
Zeitraum	27.06.16 – 12.09.16	12 Wochen

## 5. Konzeptfindung

### 5.1. Lösungsfindung

Zur Lösungsfindung wird ein morphologischer Kasten (siehe Anhang) verwendet. Um diesen aufzustellen werden zunächst die Hauptfunktionen und Unterfunktionen bzw. Bauteile der neuen Vakuumröhre (im Folgenden Flexibles Vakuumrohr genannt) identifiziert und in einer Mindmap dargestellt. (Abbildung 5-1) Ziel des morphologischen Kastens ist es, sinnvolle Kombinationen aus den erarbeiteten Lösungsmöglichkeiten für die Unterfunktionen zu finden. Zur Erstellung einer Gesamtlösung wird pro Zeile eine Lösung ausgewählt und zu einer passenden Gesamtlösung vereint. Es können pro Zeile auch mehrere zusammenpassende Teillösungen verwendet werden.

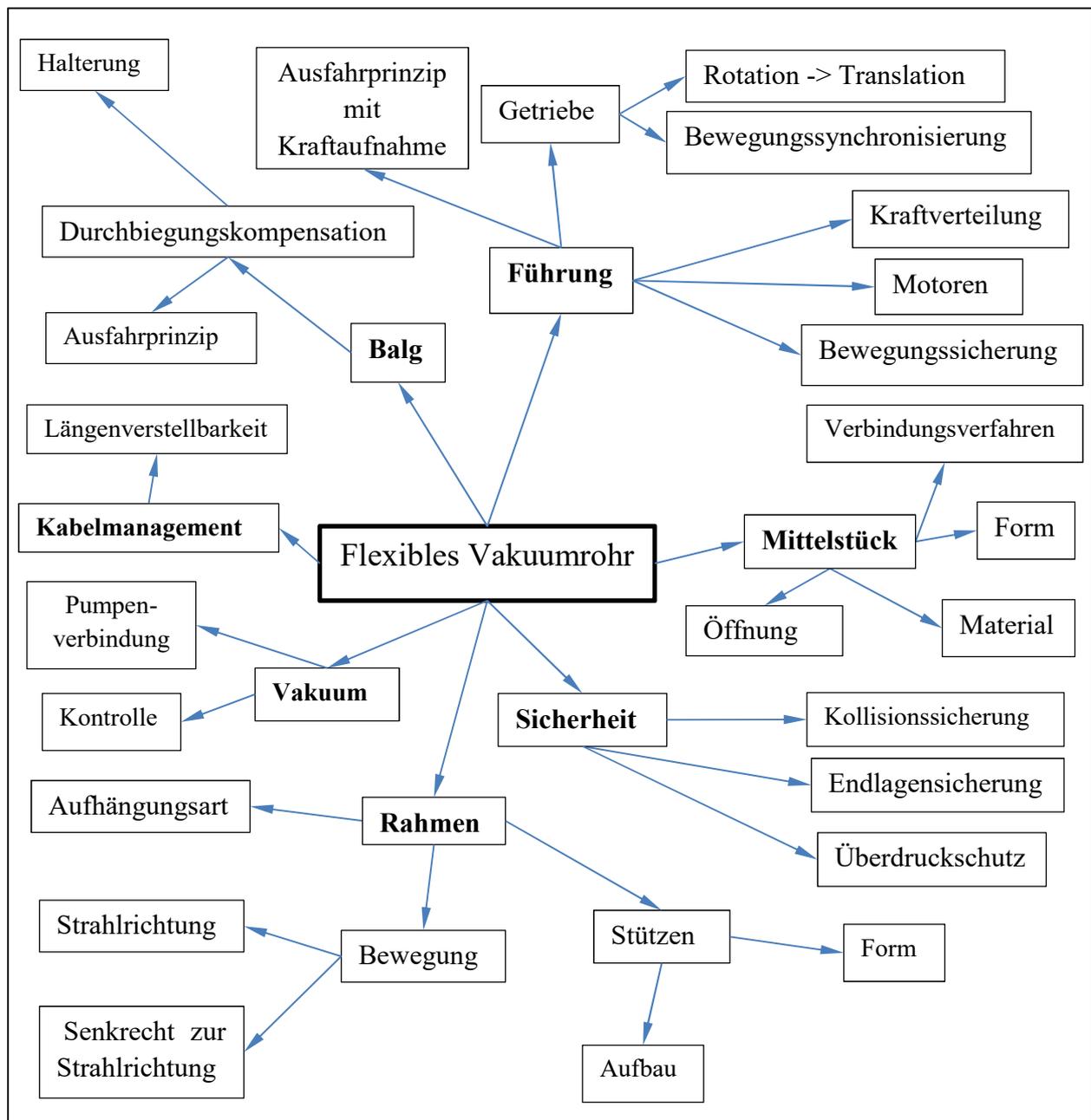


Abbildung 5-1: Mindmap Funktionsschema

Insgesamt wurden 4 Lösungsvorschläge (Anhang) erarbeitet. Die Hauptfunktionsweisen und Ziele der Lösungsvorschläge werden im Folgenden erläutert:

### Lösungsvorschlag 1:

*Ziel:* modularer Aufbau mit wenigen, möglichst einfachen Bauteilen

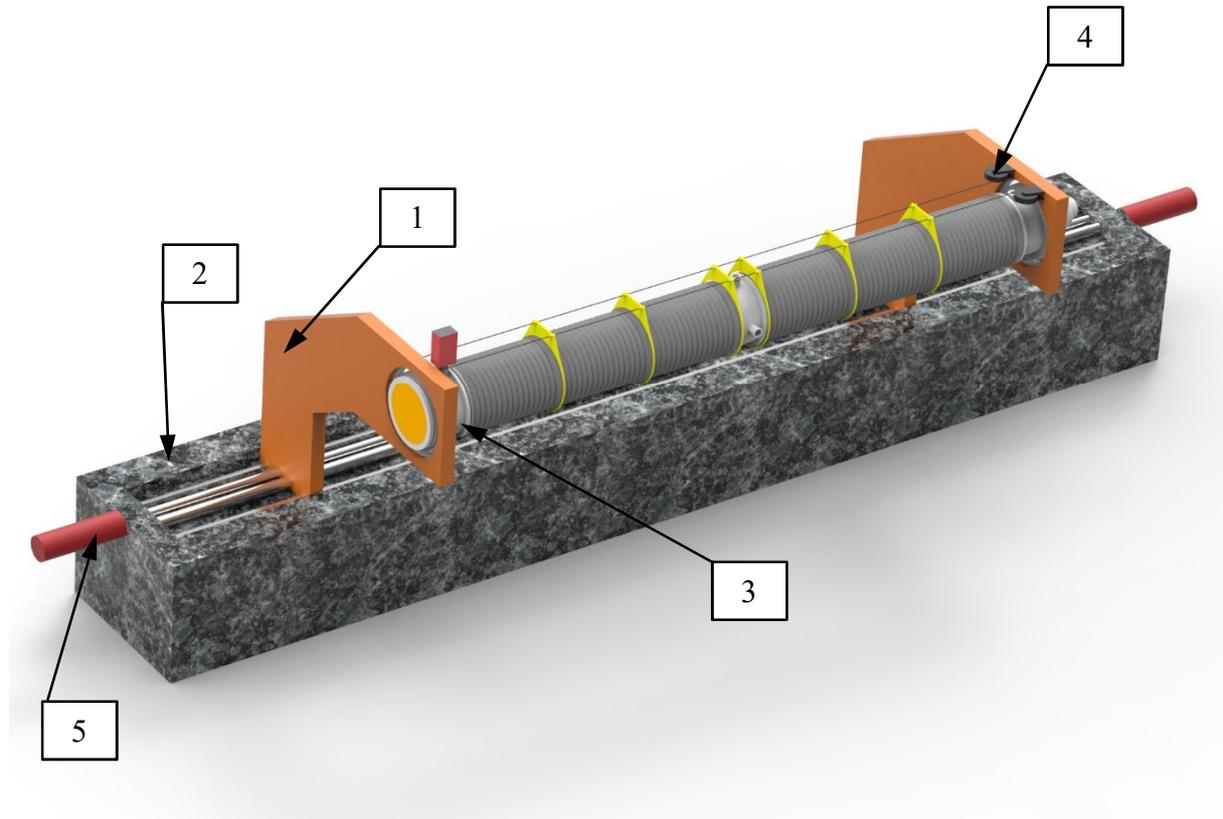
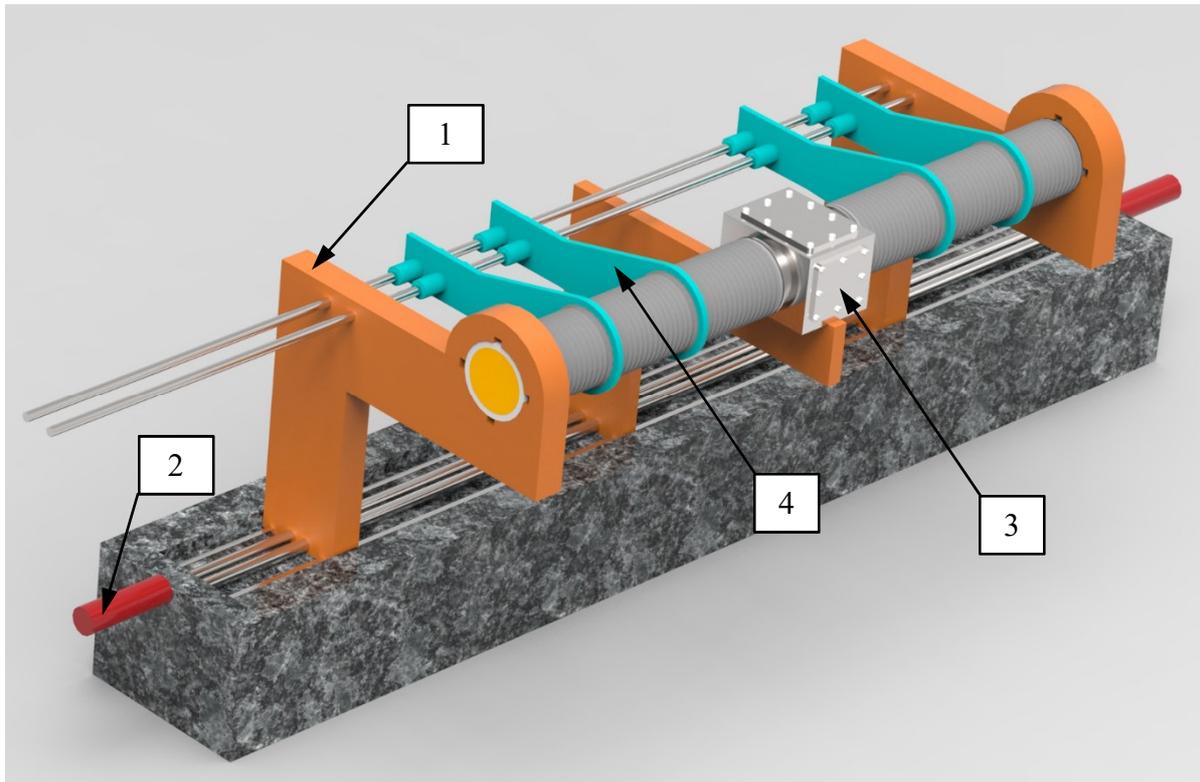


Abbildung 5-2: Lösungsvorschlag 1

*Beschreibung:* Die Membranbälge werden an den Enden gelagert, dort wird die aus dem Vakuum resultierende Kraft über die Stützen (1) in die massive Bodenbefestigung (2) übertragen. Pro Ende befindet sich jeweils noch ein Rohrstück mit Anschlussflanschen (3) für Vakuummessgeräte und Schlauch zur Vakuumpumpe. Die Zwischenringe der Membranbälge werden mit Ringen an einem gespannten Seil (4) aufgehängt. Um das Mittelstück zu verfahren werden diese mit einem Motor auf- bzw. abgewickelt. Die Enden werden mit Spindeltrieben durch Motoren (5) verfahren. Die Endlagen werden durch mechanische Schalter an der Bodenschiene begrenzt. Die Seillänge wird mit ein Drehpositionsgeber überwacht um ein Überschreiten der Endlagen des Mittelstücks zu verhindern. Kollisionen werden mit Lichtschranken an den Enden verhindert.

**Lösungsvorschlag 2:**

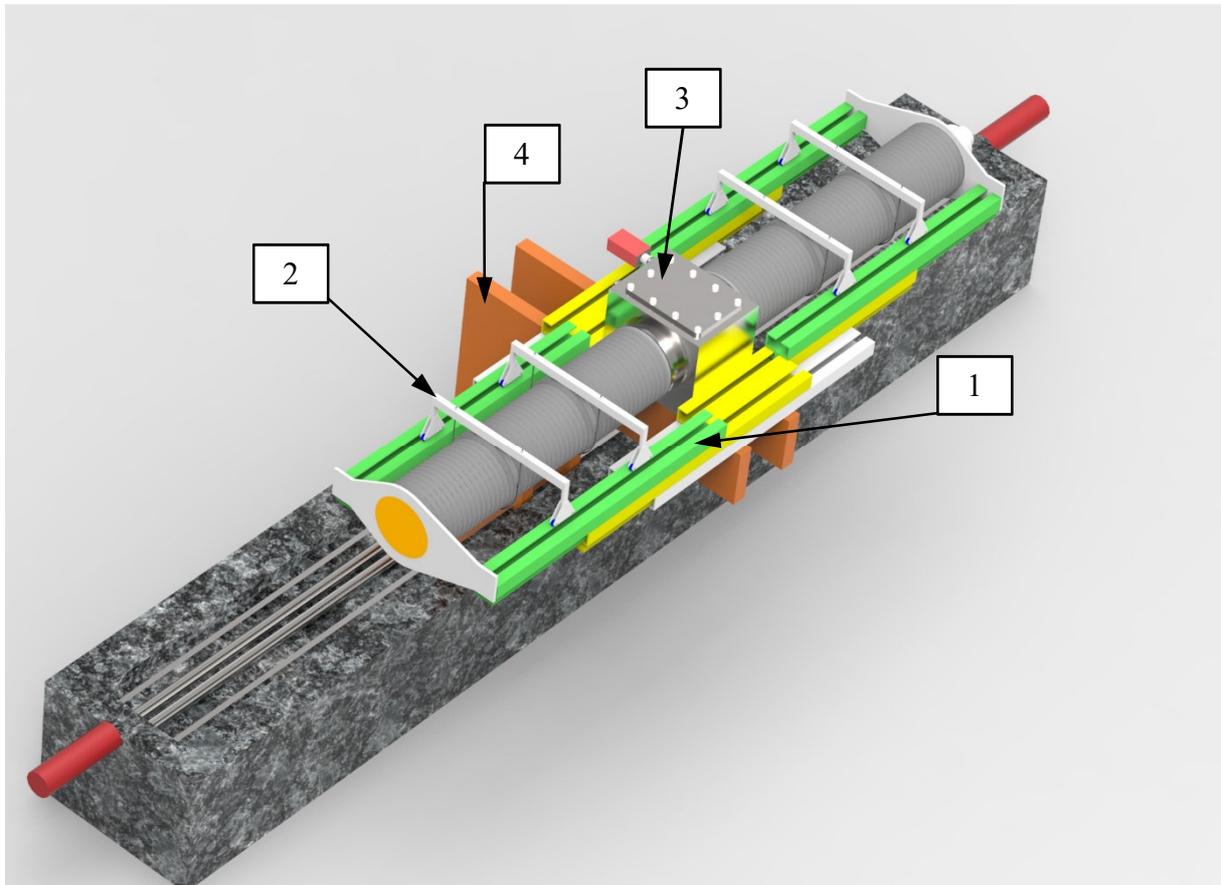
*Ziel:* stabiler Aufbau unter Verwendung einfacher Technik



*Beschreibung:* Enden und Mittelteil werden jeweils mit einer Stütze (1) gelagert, die Kraftaufnahme erfolgt wie bei Lösungsvorschlag 1 über ein massives Schienensystem am Boden. Verfahren werden die Stützen mit Spindelantrieben, dabei bewegt jeweils ein Motor eine Stütze. Diese Bauweise ermöglicht ein unabhängiges Verfahren der Enden und des Mittelteils. Die Endlagen werden durch Lichtschranken in der Bodenschiene, sowie durch Seilzugpositionsgeber zwischen Mittelstück und Enden begrenzt. Das Mittelstück (3) ist als Kasten ausgeführt und besitzt abnehmbare Deckel. Vakuummessgerät und Pumpenanschluss sind ebenfalls am Mittelstück angebracht. Die Zwischenringe werden über zwei Stangen mit vier linear geführten Blechen (4) gehalten. Kollisionsschäden werden mit Kontaktringen an den Enden verhindert.

**Lösungsvorschlag 3:**

*Ziel:* Bauraumreduzierung durch teleskopisch ausfahrbare Kraftaufnahme

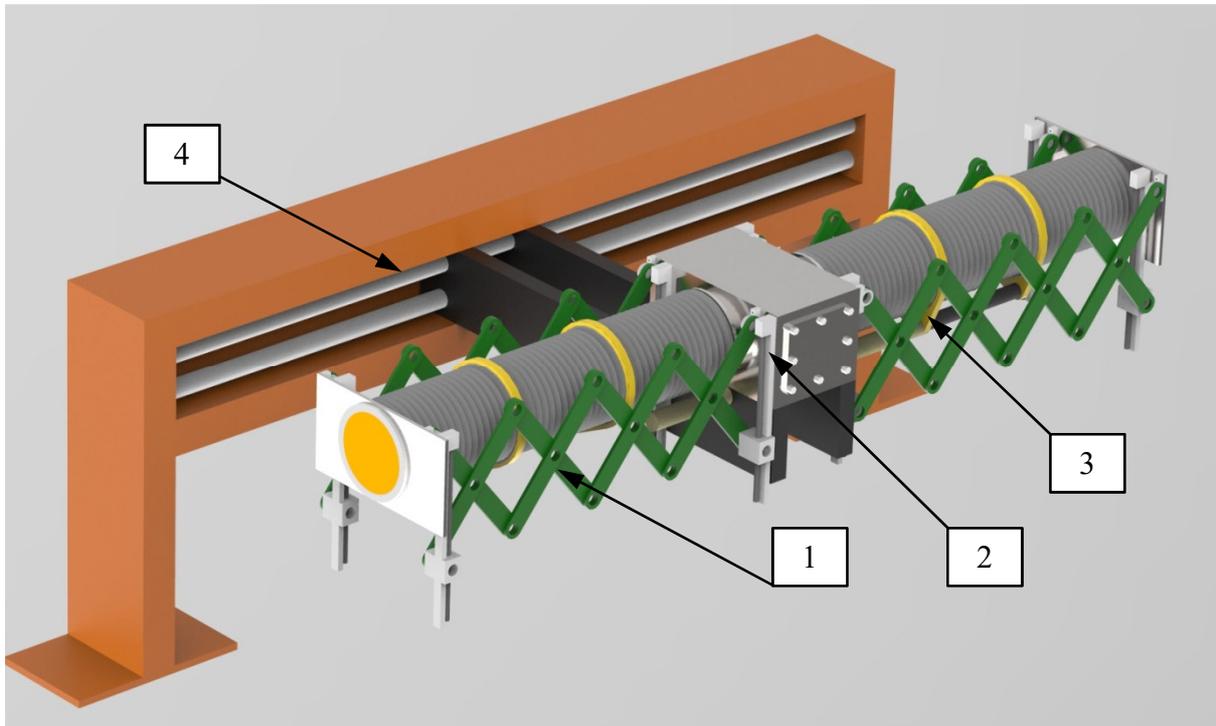


**Abbildung 5-3: Lösungsvorschlag 3**

*Beschreibung:* Die Kraftaufnahme erfolgt über Schienensysteme (1), die mit Schneckengetrieben und Zahnstangen ausgefahren werden können. Die Zwischenringe werden mit fahrbaren Portalhaltern (2) gestützt. Die Schienensysteme werden mit einem Motor pro Seite angetrieben und mit Keilriemengetrieben synchronisiert. Das Mittelstück (3) ist ähnlich wie bei Lösungsvorschlag 3 aufgebaut und wird über die Stützen (4) auf der Bodenschiene verfahren. Die Endlagen werden mit mechanischen Schaltern an den Schienenenden abgesichert. Kollisionsschäden werden mit Kontaktringen an den Enden verhindert.

**Lösungsvorschlag 4:**

*Ziel:* optimale teleskopische Übersetzung der Kraftaufnahme mit geringem Gesamtgewicht



**Abbildung 5-4: Lösungsvorschlag 4**

*Beschreibung:* Die Kraftaufnahme erfolgt mit Scherensystemen (1) die mit einem Spindelantrieb (2) ausgefahren werden. Das Mittelstück ist wieder ähnlich dem von Lösungsvorschlag 2 aufgebaut, außer das oben ein Stirnradgetriebe zur Synchronisierung der Scherensysteme vorgesehen ist. Dieses Getriebe wird mit einem Motor pro Seite angetrieben. Die Endlagen werden mit Hilfe von mechanischen Schaltern an den Schienen des Scherensystems gesichert. Kollisionen werden durch Lichtschranken verhindert. Das Rohr wird über Stützen im Schienensystem (4) verfahren. Die Zwischenringe werden mit teleskopisch ausziehbaren Haltern (3) unter dem Mittelstück gestützt.

## 5.2. Lösungsbewertung

Die Aufhängungsart bildet einen zentralen Unterschied in der Komplexität des technischen Aufbaus, daher werden zunächst Vor- und Nachteile der Aufhängungsarten in Tabelle 5-1 aufgestellt. Diese fließen als konkrete Bewertungskriterien in die Bewertung der Lösungen mit ein.

Tabelle 5-1: Vergleich der Aufhängungsart

<b>Mittelaufhängung</b>	<b>vs.</b>	<b>Endaufhängung</b>
+ kleinerer Bauraum		+ weniger Gewicht an hängenden Rohr, da weniger Bauteile
+ Kürzeres Schienensystem am Boden		+ günstig für weitere Entwicklungsschritte, da weitere Bewegungsrichtungen und Drehrichtungen leichter integriert werden können
- Enden können Schwingen		+ am Mittelstück ist mehr Platz für Öffnungen
- es wird eine einfahrbare Kraftaufnahme benötigt (Kosten)		+ Keine angetriebene parallel Kinematik, daher auch keine mechanische Synchronisation nötig (Anforderungsliste)
- Steuerung ist komplizierter in der Programmierung		+ der Aufbau kann leichter umgerüstet werden z.B. Mittelteil austausch
		+ bereits verwendete Technik an anderen Strahlmessplätzen (erprobt mit positiver Erfahrung)
		+ Endlagen sind unkompliziert am Boden zu realisieren
		- Mittelteil muss drehbar gelagert sein
		- Enden müssen drehbar gelagert sein
		- Momente durch Vakuumkräfte größer

Um die Wirtschaftlichkeit der Lösungsvorschläge zu berücksichtigen, werden folgende wirtschaftliche Bewertungskriterien mit in die Bewertung aufgenommen:

- **Herstellungsaufwand:** Um den Herstellungsaufwand gering zu halten, sollten zu komplexe Strukturen oder Bauteile vermieden werden. Lösungen, welche das Potential bieten mit besonders einfacher und fertigungsfreundlicher Technik auszukommen, sind positiv zu bewerten.
- **Betriebskosten:** Der Hauptpunkt für die Betriebskosten ist der Stromverbrauch. Lösungen, die sowohl im Standby als auch im Betrieb das Potential bieten mit wenig Energie auszukommen, sind positiv zu bewerten. Dies kann zum Beispiel durch wenige Motoren oder niedrige Motorleistungen erreicht werden.
- **Anschaffungskosten:** Unter Anschaffungskosten werden nur DESY externe Kosten verstanden, zum Beispiel Kaufteile. Lösungen, welche das Potential besitzen mit möglichst wenigen Bauteilen und günstiger Technik zu funktionieren, sind im Bereich Anschaffungskosten positiv zu bewerten.
- **Wartungsaufwand:** Kriterien für einen geringen Wartungsaufwand sind: Gute Zugänglichkeit der Bauteile, die Verfügbarkeit von Ersatzteilen und ein langer Zeitraum zwischen den Wartungen bis hin zur Wartungsfreiheit. Lösungen, die das Potential bieten diese Kriterien weitestgehend zu erfüllen, sind positiv zu bewerten.

Die Bewertungskriterien sind nicht Gleichwertig und werden gewichtet. Es wird eine Rangfolgegewichtung verwendet. Aus Literatur: [4: 396]. Bei der Rangfolgegewichtung werden die Kriterien miteinander verglichen und festgelegt welches höherwertiger ist. Dieses

wird mit einem Plus in der Tabelle (Anhang, Gewichtungsmatrix) gekennzeichnet. Das weniger wichtige mit einem Minus. Die Summe der Pluszeichen bestimmt welches die wichtigsten Kriterien sind (je höher, desto wichtiger). Der Gewichtungsfaktor G berechnet sich aus Formel [5.1] mit S=Summe der Pluszeichen und G= Gewichtungsfaktor. Tabelle 5-2 zeigt das Ergebnis der Rangfolgegewichtung und die entsprechenden Gewichtungsfaktoren.

$$G_N = \frac{S_N}{\sum_i^N S_N} \cdot 100 \quad [5.1]$$

Tabelle 5-2: Auszug aus der Gewichtungsmatrix

Gewichtungsmatrix <b>Flexibles Vakuumrohr</b>				
Nr.	aus:	Bewertungskriterium	$\Sigma +$	G
1	Wünsche Anforderungsliste	modularer Aufbau	18	7,11
2		Gewicht kleiner 40 kg	13	5,14
3		minimale Länge unter 1100 mm	21	8,30
4		2-Phasen Schrittmotor verwendbar	22	8,70
5		Sicherung gegen Kollisionen softwareseitig	11	4,35
6		Sicherung gegen Kollisionen durch Sensoren	17	6,72
7		Mittelstück relativ verfahrbar	19	7,51
8	Vor- und Nachteile der Aufhängungsart	kompakte Bauweise	8	3,16
9		Schienensystem am Boden möglichst platzsparend	1	0,40
10		Schwingungsreduzierung der Enden	20	7,91
11		einfache einfahrbare Kraftaufnahme	16	6,32
12		Komplexität der Steuerung gering	0	0,00
13		Begünstigung zukünftiger Funktionen	7	2,77
14		Nutzbarkeit des Bauraums am Mittelstück	12	4,74
15		geringe Komplexität der mechanischen Synchronisierung	15	5,93
16		Umbau- und Montagefreundlichkeit	9	3,56
17		am DESY erprobte Technik verwendet	6	2,37
18		einfache Lagerungen	5	1,98
19	geringe Dimension der Standfüße (Momentaufnahme)	2	0,79	
20	Wirtschaftlichkeit	Herstellungsaufwand	10	3,95
21		Betriebskosten	3	1,19
22		Anschaffungskosten	14	5,53
23		Wartungsaufwand	4	1,58
		Summe:	253	100

Mit 8,23 hat die Schwingungsreduzierung der Enden einen sehr hohen Gewichtungsfaktor. Das Erzeugen von Schwingungen ist bei der Konstruktion generell zu vermeiden, kann aber nicht gänzlich verhindert werden. An den Enden werden Verschlüsse aus Kaptonfolie oder Diamantfenster verwendet, welche durchstrahlt werden. Vibrationen an dieser Stelle können während das Experiment im ungünstigsten Fall die Messung beeinflussen, daher sollten die Enden so stabil wie möglich gelagert werden. Bei mittiger Lagerung und frei hängenden Enden ist dies mit höherem Aufwand verbunden als bei Lagerung der Enden.

Zur Lösungsbewertung werden die Lösungsvorschläge gemäß der festgelegten Kriterien subjektiv mit Punkten von 0-4 bewertet. Verfahren nach VDI 2225 [9]. Die Punktezahl wird mit der Gewichtung der jeweiligen Kategorie multipliziert. Die Summe dieser Werte legt eine Gesamtpunktezahl für den jeweiligen Lösungsvorschlag fest, damit werden die Lösungsvorschläge vergleichbar.

Tabelle 5-3: Lösungsbewertung

0: unbefriedigend 1: mit großem Aufwand tragbar 2: ausreichend 3: gut 4: sehr gut [vgl. 9: 4]										
Nr	Bewertungskriterien	Gewichtung	Lösungs- vorschlag 1		Lösungs- vorschlag 2		Lösungs- vorschlag 3		Lösungs- vorschlag 4	
			P <sub>1</sub>	P <sub>1</sub> *G	P <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> *G	P <sub>3</sub>	P <sub>3</sub> *G	P <sub>4</sub>	P <sub>4</sub> *G
		G	P <sub>1</sub>	P <sub>1</sub> *G	P <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> *G	P <sub>3</sub>	P <sub>3</sub> *G	P <sub>4</sub>	P <sub>4</sub> *G
1	modularer Aufbau	7,11	4	28,46	3	21,34	2	14,23	1	7,11
2	Gewicht kleiner 40 kg	5,14	4	20,55	3	15,42	1	5,14	1	5,14
3	minimale Länge unter 1100 mm	8,30	4	33,20	3	24,9	2	16,60	4	33,20
4	2-Phasen Schrittmotor verwendbar	8,70	4	34,78	4	34,78	4	34,78	4	34,78
5	Sicherung gegen Kollisionen softwareseitig	4,35	4	17,39	4	17,39	2	8,70	2	8,70
6	Sicherung gegen Kollisionen durch Sensoren	6,72	2	13,44	3	20,16	3	20,16	3	20,16
7	Mittelstück relativ verfahrbar	7,51	1	7,51	3	22,53	4	30,04	4	30,04
8	kompakte Bauweise	3,16	2	6,32	1	3,16	3	9,49	4	12,65
9	Schienensystem am Boden möglichst platzsparend	0,40	1	0,40	1	0,40	4	1,58	4	1,58
10	Schwingungsreduzierung der Enden	7,91	4	31,62	4	31,62	2	15,81	1	7,91
11	einfache einfahrbare Kraftaufnahme	6,32	4	25,30	4	25,30	2	12,65	2	12,65
12	Komplexität der Steuerung gering	0,00	2	0,00	3	0,00	2	0,00	1	0,00
13	Begünstigung zukünftiger Funktionen	2,77	2	5,53	4	11,07	2	5,53	0	0,00
14	Nutzbarkeit des Bauraums am Mittelstück	4,74	4	18,97	3	14,23	1	4,74	2	9,49
15	geringe Komplexität der mechanischen Synchronisierung	5,93	3	17,79	4	23,72	2	11,86	3	17,79
16	Umbau- und Montagefreundlichkeit	3,56	4	14,23	3	10,67	2	7,11	1	3,56
17	Am DESY erprobte Technik verwendet	2,37	2	4,74	4	9,49	2	4,74	0	0,00
18	einfache Lagerungen	1,98	3	5,93	3	5,93	4	7,91	2	3,95
19	geringe Dimension der Standfüße (Momentaufnahme)	0,79	3	1,58	3	2,37	4	3,16	4	3,16
20	Herstellungsaufwand	3,95	4	15,81	3	11,86	2	7,91	1	3,95
21	Betriebskosten	1,19	3	3,56	4	4,74	2	2,37	2	2,37
22	Anschaffungskosten	5,53	4	22,12	2	11,06	1	5,53	2	11,07
23	Wartungsaufwand	1,58	3	4,74	4	6,32	2	3,16	2	3,16
Summe:			333,97		328,46		233,20		232,41	
Wertigkeit X <sub>G</sub> :			0,835		0,821		0,583		0,581	
<b>Rang:</b>			<b>1</b>		<b>2</b>		<b>3</b>		<b>4</b>	

Um die Wertigkeit  $X_G$  der Lösungsvorschläge zu ermitteln wird die Formel 5.2 mit  $G_1$  bis  $G_N$  = Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien,  $P_1$  bis  $P_N$  = die dazugehörige Punktezahl und  $P_{max}$  = maximal erreichbare Punktezahl verwendet. Ziel ist es eine Wertigkeit möglichst nahe der Eins zu erreichen. Die Lösung, die am dichtesten daran liegt, ist die Beste.

$$X_G = \frac{G_1 \cdot P_1 + G_2 \cdot P_2 + \dots + G_N \cdot P_N}{\sum G_i \cdot P_{max}} \quad [\text{vgl. 9: 4}] \quad [5.2]$$

Mit 0,83 ist Lösungsvorschlag 1 die am besten geeignete Lösung. Bei einer Vorstellung in der Forschungsgruppe ergab die Besprechung, dass ein festes Mittelteil weniger Vorteile bietet als ein festes Rohrstück am detektorseitigen Ende, die Konstruktion wird dahingehend verbessert.

Um die Lösung zu optimieren, sollte das Seilsystem durch ein geeignetes starres Linearsystem ersetzt werden. Ohne festes Mittelstück ist es günstiger, drei Membranbälge anstatt zwei zu verwenden. Dieser Aufbau eignet sich besser für das Linearsystem. (Siehe Kapitel 6.2) Damit ergibt sich die in Kapitel 6 genauer beschriebene Konstruktion.

## 6. Beschreibung der Konstruktion

Als Schnittstellen für die Konstruktion dienen ein geplanter Granitblock (1) auf dem Boden, sowie die Probenhalterung (2) und die Detektorbank (3). Außerdem muss die Konstruktion in den Bauraum (4) passen. Als Koordinatengrundlage für die Bewegungen des Vakuumrohrs dient die Strahlrichtung X.

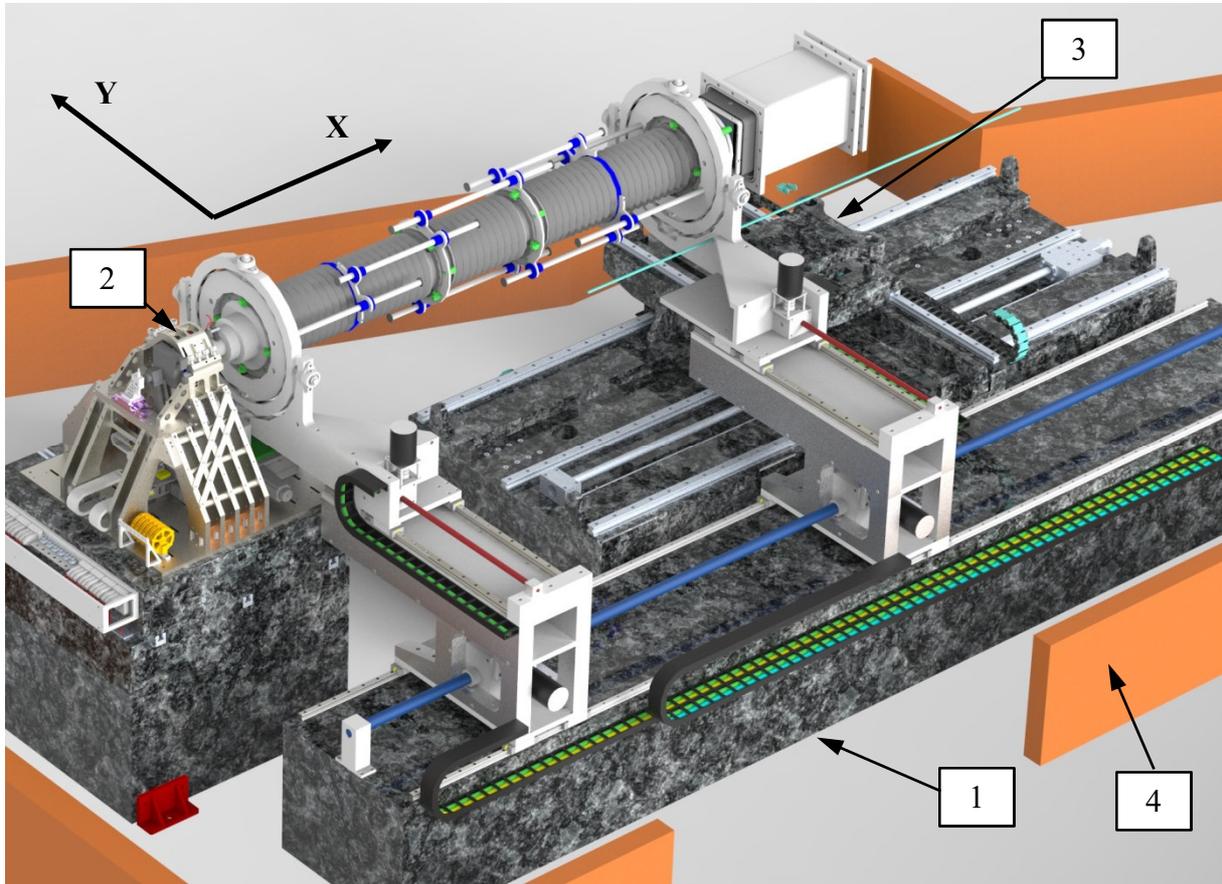


Abbildung 6-1: Entwickelte Konstruktion in der Experimentierhütte

### 6.1. Membranbalg

Tabelle 6-1: Formelzeichen Membranbalg

Bedeutung	Formelzeichen	Wert/Einheit
atmosphärischer Normluftdruck	$p_{atmosphäre}$	1013,25 mbar [2]
Vakuum nach Anforderungsliste	$p_{tech. Vakuum}$	$1 \cdot 10^{-5}$ mbar
Druckdifferenz	$\Delta p$	N/mm <sup>2</sup>
Kraft durch Druckdifferenz	$F_p$	N
Effektive Oberfläche DN 200 [14]	$EA$	37900 mm <sup>2</sup>
Druck vor der Längenänderung	$p_1$	mbar
Druck nach der Längenänderung	$p_2$	mbar

Ausgangslänge Balg	$l_1$	m
Länge des Balges nach Bewegung	$l_2$	m
Fläche Allgemein	$A$	m <sup>2</sup>
Kraftdifferenz, welche aus Druckdifferenz resultiert	$\Delta F$	N
Federkonstante Membranpaar [14]	$SRCz$	74 N/mm
Gedrückte Länge Membranpaar [14]	$l_c$	0,7 mm
Hub Membranpaar [14]	$z$	4,3 mm
Freie Länge Membranpaar [14]	$l_f$	3,2 mm
Gestreckte Länge Membranpaar	$l_a$	mm
Federweg Membranbalg	$L_s$	mm
Länge des ausgefahrenen Rohrs	$L_A$	mm
Breite des Anschlussstücks	$L_{AS}$	mm
Breite des Verbindungsstücks	$L_{VS}$	mm
Breite der Reduzierung	$L_{Red}$	mm
Breite des Blindflanschs im Kaptonfolie	$L_{BF}$	mm
Breite eines Zwischenrings	$L_{ZW}$	mm
Breite des Balganschlussstücks	$L_{BA}$	mm
Breite einer DN 200 Dichtung	$L_D$	mm
Länge der fixen Bauteile	$L_{Fix}$	mm
Anzahl der Membranpaare	$N$	-
Federkonstante Allgemein	$c$	N/mm
Ersatzfederkonstante	$c_e$	N/mm
resultierende Federkraft (maximal gestreckt)	$F_c$	N
auf das Rohrende wirkende Gesamtkraft	$F_{Gesamt}$	N

Membranpaare funktionieren im Prinzip wie zwei zusammengeschweißte Tellerfedern. Die Paare lassen sich zu einer beliebig langen Kette zusammenschweißen. Der Hub entsteht dabei aus der elastischen Verformung der einzelnen Membranpaare. Im Verbund ergibt sich der Hub aus der Summe der einzelnen Verformungen.

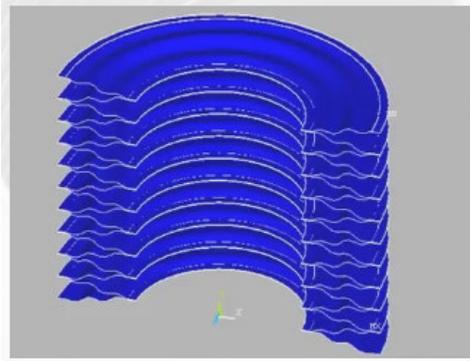


Abbildung 6-2: Schema Membranbalg [15]

Um die Kräfte durch das Vakuum abschätzen zu können wird die Druckdifferenz zwischen Vakuum und Atmosphäre mit der effektiven Oberfläche eines handelsüblichen Membranbalges (DN 200, Innendurchmesser 200 mm Material AM350) verrechnet.

$$\Delta p = (p_{\text{atmosphäre}} - p_{\text{tech. Vakuum}}) \cdot 0,0001 \frac{N}{\text{mm}^2 \cdot \text{mbar}} \quad [6.1]$$

$$\Delta p = 0,101324999 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$p = \frac{F_p}{A} \quad [5: 38] \quad [6.2]$$

$$F_p = \Delta p \cdot EA \quad [6.3]$$

$$F_p = 3840,217462 \cong 3,9 \text{ kN}$$

Im ungünstigsten Fall wird die restliche Luft weiter dekomprimiert und der Druck im inneren verringert sich, dadurch steigt die Druckdifferenz zum Außendruck. Zur Abschätzung wird ein Verhältnis von ausgefahrener Länge = 6 mal Anfangslänge verwendet.

Um die Volumenänderung und die damit verbundene Druckänderung abzuschätzen wird folgende Annahme getroffen:

Die Temperatur bleibt auf Grund der geringen Menge an Luftmolekülen nahezu konstant: Näherungsweise: Isotherme Zustandsänderung.

$$V \cdot p = \text{const. (für } T = \text{const. ) Boyle-Mariotte-Gesetz [6: 9] \quad [6.4]$$

$$\rightarrow V_1 \cdot p_1 = V_2 \cdot p_2 \rightarrow \frac{p_2}{p_1} = \frac{V_1}{V_2} \quad [6.5]$$

$$V_1 = A \cdot l_1 \quad [6.6]$$

$$V_2 = A \cdot l_2 \quad [6.7]$$

[5.4] nach  $p_2$  aufgelöst und in [6.6] und [6.7] eingesetzt, ergibt:

$$p_2 = \frac{l_1 \cdot A \cdot p_1}{l_2 \cdot A} \text{ mit } p_1 = p_{\text{tech. Vakuum}}, l_1 = 1\text{m}, l_2 = 6\text{m} \quad [6.8]$$

$$p_2 = \frac{1m \cdot 10^{-5} mbar}{6m} = 1, \bar{6} \cdot 10^{-6} mbar$$

$$F_{p2} = (p_{atmosphäre} - p_2) \cdot 0,0001 \frac{N}{mm^2 \cdot mbar} \cdot EA \quad [6.9]$$

$$F_{p2} = 3840,21749$$

$$\Delta F = F_{p2} - F_{p1} \quad [6.10]$$

$$\Delta F = 0,000032 N$$

Die Kraftänderung liegt im Bereich von zehntausendstel Newton, damit ist sie vernachlässigbar klein. Die Bauteile sollten jedoch mindestens für ein Vakuum von  $10^{-6}$  geeignet sein. Wird das Vakuumrohr mit Luft gefüllt zusammengefahren lässt sich mit der Formel [5.8] der entstehende Überdruck abschätzen. Dabei gilt das Verhältnis von eingefahrenen Länge = 6 mal Anfangslänge und  $p_1 = p_{atmosphäre}$ .

$$p_2 = \frac{l_1 \cdot A \cdot p_{atmosphäre}}{l_2 \cdot A} \text{ mit } l_1 = 6, l_2 = 1 \quad [6.11]$$

$$p_2 = \frac{6 \cdot 1013,25 mbar}{1} = 6079,5 mbar \cong 6 bar$$

Dieser Überdruck ist kritisch hoch. Daraus folgt, dass eine Sicherung gegen Entstehen eines Überdrucks vorzusehen ist. Dies ist in der Anforderungsliste unter Punkt 5.3 berücksichtigt.

Um die vorläufige Zahl der Membranpaare, welche den benötigten Hub bieten, zu ermitteln werden folgende Annahmen getroffen.

Die ausgefahrene Gesamtlänge des Rohres beträgt laut Anforderungsliste mindestens 3100 mm. Um den Balg nicht an der technischen Grenze zu betreiben und somit die Lebensdauer zu erhöhen werden noch 300 mm addiert, damit beträgt die ausgefahrene Gesamtlänge 3400 mm. Damit ein Einknicken während des Abpumpens vermieden wird, sollten Zwischenringe eingesetzt werden. [vgl. 12: 844] Ein bereits bei DESY verwendetes Membranbalgsystem gleicher Dimension (Abbildung 6-3) ist mit einem Zwischenring pro 120 Membranpaaren stabil gegen durchhängen des Balges unter Vakuum und Einknicken des Rohres beim Abpumpen, daher werden bei den beiden längeren Bälgen Zwischenringe eingeplant.

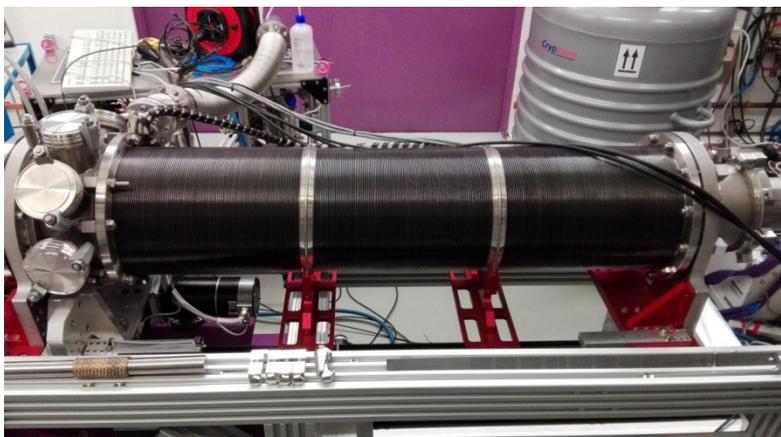


Abbildung 6-3: Foto einer bereits verwendeten Vakuumröhre am DESY (PETRA III Messplatz P03)

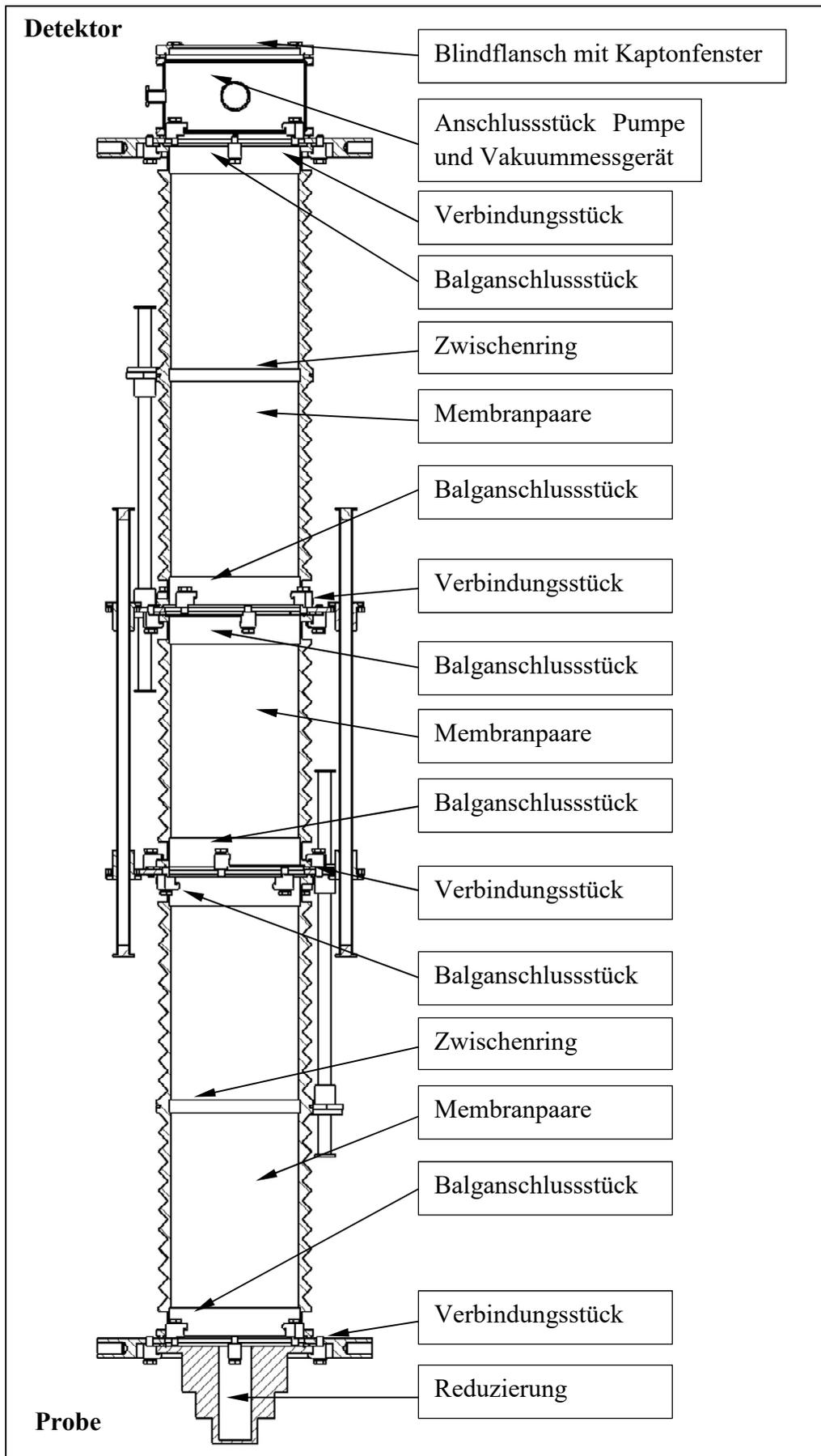


Abbildung 6-4: Skizze der Membranbalgs geschnitten

Abbildung 6-4 zeigt einen Schnitt des Balgsystems mit folgenden Bauteilen:

Tabelle 6-2: Maße und Anzahl der Bauteile

Name	Anzahl	Breite
Blindflansch mit Kaptonfenster	1	12 mm
Anschlussstück Pumpe und Vakuummessgerät	1	100 mm
Verbindungsstück	4	8 mm
Balganschlussstück [13]	6	44 mm
Zwischenring	2	20 mm
Dichtung [25]	9	3,9 mm
Reduzierung	1	125 mm
Membranpaare	N	0,7 – 5 mm

Um die Membranpaarzahl für die ausgefahrene Länge von 3400 mm zu bestimmen werden folgende Gleichungen aufgestellt:

Die Länge der fixen, d.h. nicht einfahrbaren, Bauteile:

$$L_{Fix} = L_{BF} + L_{AS} + 4 \cdot L_{VS} + 6 \cdot L_{BA} + 2 \cdot L_{ZW} + 9 \cdot L_D + L_{Red} \quad [6.12]$$

$$L_{Fix} = (12 + 100 + 4 \cdot 8 + 6 \cdot 44 + 2 \cdot 20 + 9 \cdot 3,9 + 125)mm = 608,1 mm$$

$$l_a = l_c + z \quad [6.13]$$

$$l_a = 0,7 mm + 4,3 mm = 5 mm$$

$$L_A = L_{Fix} + N \cdot l_a = 3400 mm \quad [6.14]$$

$$\rightarrow N = \frac{L_A - L_{fix}}{l_a} = \frac{(3400 - 608,1)mm}{5 mm} = 558,38 \cong 560 \text{ Membranpaare}$$

Damit ergibt sich für die zusammengefahrte Länge:

$$L_C = L_{Fix} + N \cdot l_c \quad [6.15]$$

$$L_C = 608,1 mm + 560 \cdot 0,7 mm = 1000,1 mm < 1100 mm \quad [6.16]$$

Diese liegt unter der geforderten Länge von 1100 mm auf der Anforderungsliste, d. h. die Membranpaarzahl von 560 kann verwendet werden.

Gemäß Skizze (Abbildung 6-4) werden die Gesamtmembranpaare in zwei Baugleiche Membranbälge mit Zwischenring und einen ohne Zwischenring unterteilt. Tabelle 6-3 zeigt die Daten der Membranbälge.

Tabelle 6-3: Technische Daten der Membranbälge

Beschreibung	Membranbalg außen	Membranbalg innen	Gesamtrohr
Dimension	200 mm	200 mm	200 mm
Außendurchmesser	235 mm	235 mm	235 mm
Flanschsystem	ISO-K	ISO-K	ISO-K
Membranpaare Gesamt	230	100	560
Membranpaare pro Abschnitt	115	100	-
Länge ausgefahren	1258 mm*	588 mm*	3408,1 mm
Länge zusammengefahren	269 mm*	158 mm*	1000,1 mm
Hub	989 mm	430 mm	2408 mm
Breite Zwischenring	20 mm	kein	20 mm

\* inklusive Anschlussstücke beidseitig und Zwischenring

Mit der Membranpaarzahl ist es möglich die Federkräfte zu berechnen. Im ungünstigsten Fall addieren sich die Federkräfte des Balges und die aus dem Vakuum resultierende Kraft auf. Zur Abschätzung der Federkräfte wird angenommen, dass der Membranbalg wie ein Federpaket in Reihe wirkt. Um den Federweg zu berechnen wird die gestreckte Länge mit der freien Länge aller Membranpaare subtrahiert, da die freie Länge die Ruhelage des Federpakets darstellt.

Federpaket in Reihe:

$$\frac{1}{c_e} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{c_i} \quad [\text{vgl. 1: 253}] \quad [6.17]$$

$$\text{Für } c_1 = c_2 = \dots = c_N \text{ gilt: } \frac{1}{c_e} = N \cdot \frac{1}{c} \quad [6.18]$$

$$\rightarrow \frac{1}{c_e} = N \cdot \frac{1}{SRCZ} \rightarrow c_e = SRCZ \cdot \frac{1}{N} \quad [6.19]$$

$$c_e = 74 \frac{N}{mm} \cdot \frac{1}{560} = 0,132 \frac{N}{mm}$$

$$L_s = N \cdot (l_a - l_f) \quad [6.20]$$

$$L_s = 560 \cdot (5 \text{ mm} - 3,2 \text{ mm}) = 1008 \text{ mm}$$

$$F_c = L_s \cdot c_e \quad [\text{vgl. 5: 33}] \quad [6.21]$$

$$F_c = 1008 \text{ mm} \cdot 0,132 \frac{N}{mm} = 133,056 \text{ N}$$

Die Federkraft wirkt zusätzlich zur Druckkraft auf die Lagerungen. Pro Lagerung wirkt also eine Gesamtkraft von:

$$F_{\text{Gesamt}} = F_p + F_c = 3840,22 \text{ N} + 133,056 \text{ N} = 3973,276 \text{ N} \cong 4 \text{ kN} \quad [6.22]$$

Auf die Rohrenden wirkt im ungünstigsten Fall jeweils eine Kraft von 4 kN. Dies ist bei der Dimensionierung der Bauteile zu beachten.

## 6.2. Teleskopsystem

Um den Balg gegen Durchhängen zu stabilisieren wird ein teleskopisch einfahrbares System verwendet. Diese Konstruktion wurde entwickelt, weil handelsübliche Teleskopsysteme den geforderten Hub nicht erfüllen konnten. Um Gewicht einzusparen, werden Rohre (1) verwendet. Diese sind mit Linearkugellagern (2) gelagert. Damit die Rohre nicht aus den Lagern rutschen, ist an jedem Rohrende eine Kappe (3) angebracht. Um ein Verdrehen im Lager zu verhindern, werden immer zwei gegenüberliegende Rohre (4) verwendet. Die äußeren Enden sind fest mit den Außenringen (5) verbunden. Die Rohre sind kreisförmig um das Balgsystem im Winkel von jeweils 36 Grad angeordnet und an den Zwischenringen (6) und Verbindungsringen (7) gelagert. Abbildung 6-5 zeigt eine Ansicht von oben des Teleskopsystems am Vakuumrohr.

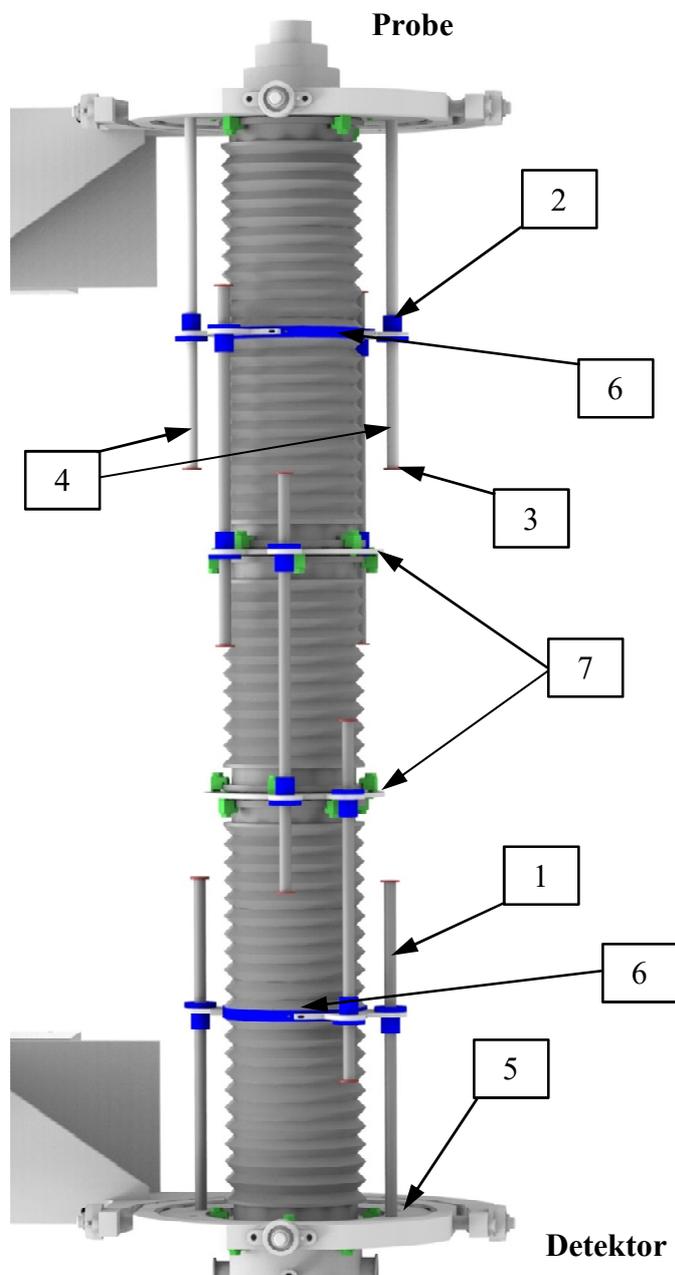


Abbildung 6-5: Teleskopsystem

### 6.3. Kardanische Aufhängung

Der Membranbalg ist für eine gewisse angulare Verformung geeignet, diese ist aber für die gewünschten Verfahrswege zu klein. Damit das Rohrsystem bei einseitigem Verfahren in y-Richtung nicht verbogen wird, müssen die Enden drehbar gelagert werden. In der Konstruktion wird daher eine kardanische Aufhängung (Abbildung 6-6) verwendet. Weil in Zukunft eine Hubfunktion geplant ist, wird die kardanische Aufhängung gleich mit zwei drehbaren Achsen ausgeführt. Technisch wird die kardanische Aufhängung mit vier Kugellagern und einem drehbaren Zwischenring realisiert.

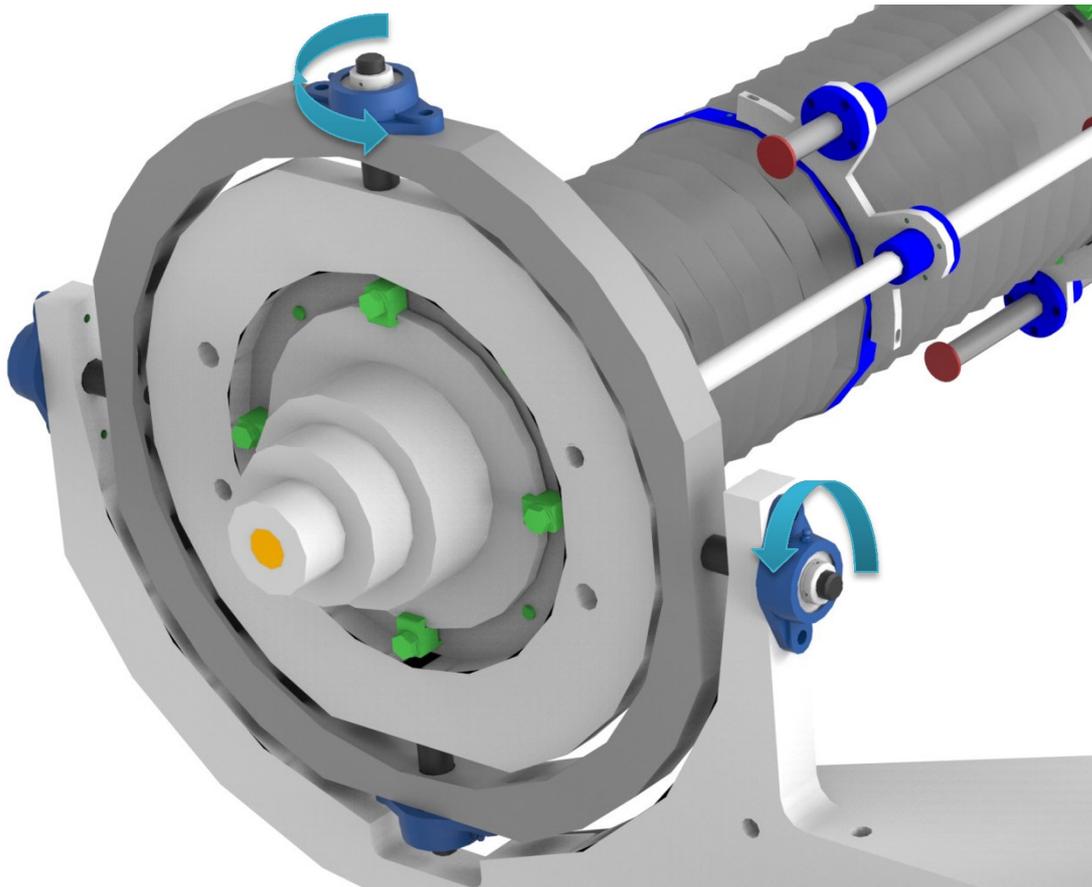


Abbildung 6-6: Kardanische Aufhängung

#### 6.4. Positionierungssystem

Um die Rohrenden zu positionieren und die Kräfte aufzunehmen, werden zwei Halterungen verwendet. (Abbildung 6-7) Das System baut auf einem Granitblock (1) auf dem Boden auf. Geführt werden die Halterungen mit Linearführungswagen (2) und passenden Profilschienen (3). Kugelumlaufspindeln (4) nehmen dabei die Kräfte in x-Richtung auf und ermöglichen die Verstellung in dieser Achse. Die beiden unteren Spindelhubgetriebe (5) werden mit Schrittmotoren (6) angetrieben. Die Spindel steht in ihrer Position fest und die Getriebe laufen auf dieser. Die oberen Spindelhubgetriebe (7) werden ebenfalls mit Schrittmotoren angetrieben und bewegen das Rohr in y-Richtung. (Dimensionen der Spindel und Getriebe siehe 7.3 Spindelberechnung). Die Bauteile der Halterung (8) können mit Hilfe von Wasserstrahlschneidern aus entsprechenden Blechen ausgeschnitten werden. Die Bauteile werden dann miteinander verschraubt. Die zugehörigen Motorleitungen werden mit Schleppketten (9) geführt.

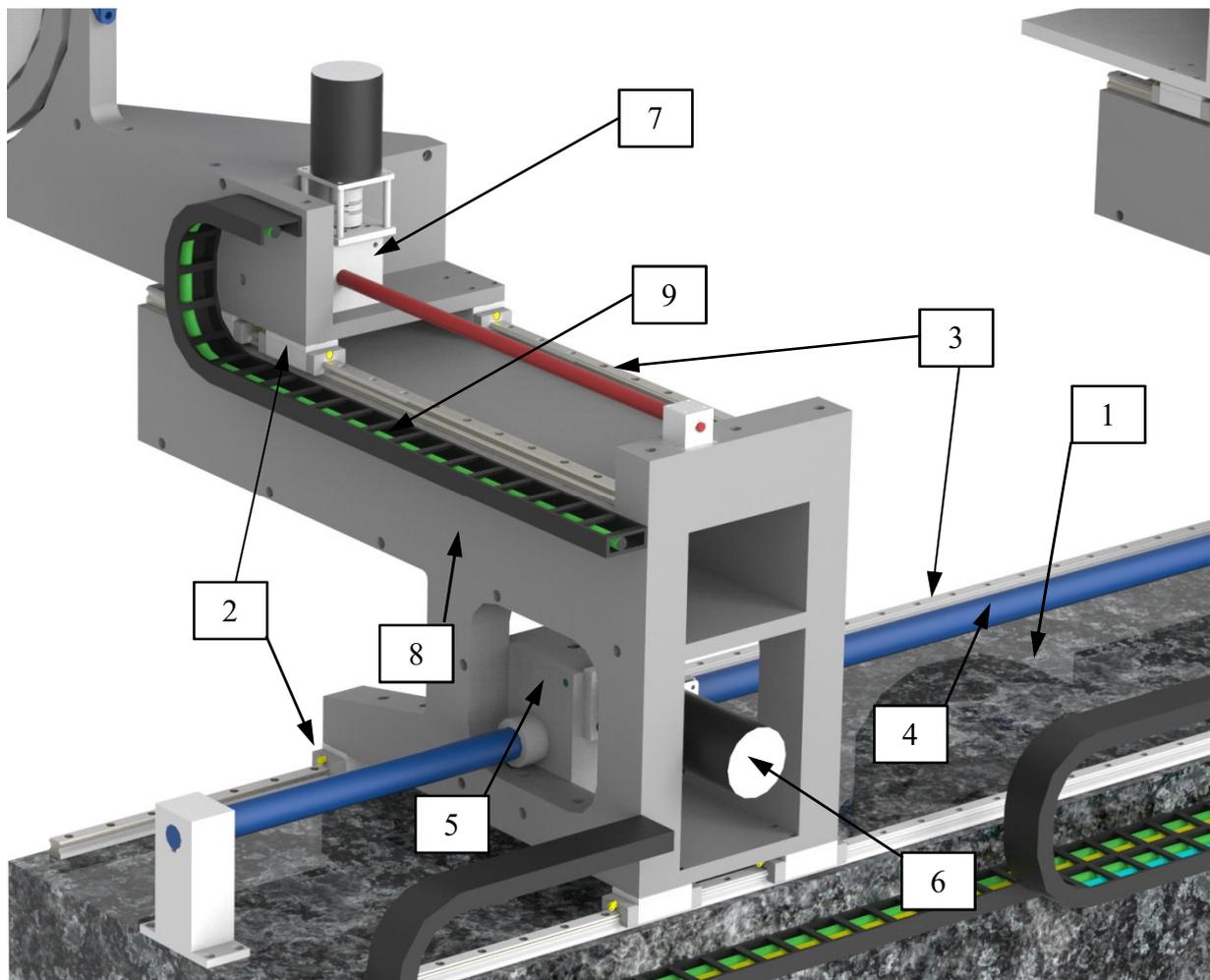


Abbildung 6-7: Positioniersystem

## 6.5. Verfahrswege

Tabelle 6-4: Formelzeichen Verfahrswege

Bedeutung	Formelzeichen	Wert/Einheit
Länge des ausgefahrenen Balgs im Normalbetrieb	$L_{AU}$	3100 mm
Position des inneren Endlagensensors	$S_{fix}$	mm
Verfahrweg des Rohres innen	$x_1$	mm
Verfahrweg von Halter 1 Rohrende	$x_2$	mm
Verfahrweg von Halter 2 Rohrende	$x_3$	mm

Um das Überschreiten der äußeren und inneren Endlagen zu verhindern werden Endlagenschalter verwendet. Die Anordnung und Abstände dieser Schalter werden in Abbildung 6-8 dargestellt. Die Probenposition wird mit dem Wert Null auf der x-Achse angenommen.

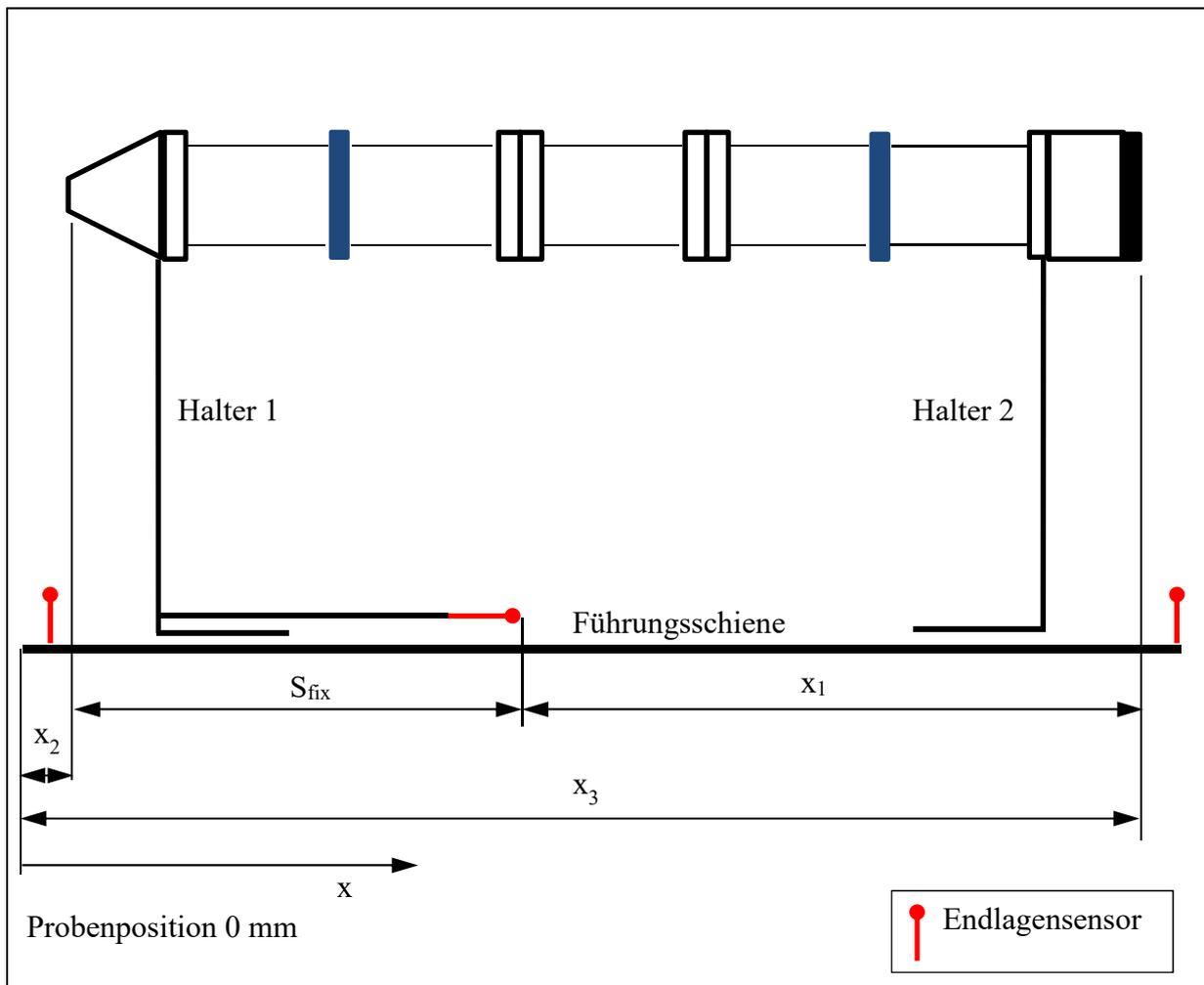


Abbildung 6-8: Skizze der Verfahrswege auf der Führungsschiene

Berechnung der möglichen Verfahrswege innerhalb der Endlagenschalter laut Skizze:

$$S_{fix} = L_C = 1000,1 \text{ mm} \quad [6.23]$$

$$x_{1 \max} = L_{AU} - S_{fix} = 3100 \text{ mm} - 1000 \text{ mm} = 2100 \text{ mm} \quad [6.24]$$

$$x_{2 \max} = L_{AU} - L_C = 3100 \text{ mm} - 1000 \text{ mm} = 2100 \text{ mm} \quad [6.25]$$

$$x_{3 \min} = L_C = 1000 \text{ mm} \quad [6.26]$$

$$x_{3 \max} = L_{AU} = 3100 \text{ mm} \quad [6.27]$$

Damit ergeben sich die Verfahrswege:

$$x_1 = \{0 | x_{1 \max}\} = \{0 \text{ mm} | 2100 \text{ mm}\}$$

$$x_2 = \{0 | x_{2 \max}\} = \{0 \text{ mm} | 2100 \text{ mm}\}$$

$$x_3 = \{x_{3 \min} | x_{3 \max}\} = \{1000 \text{ mm} | 3100 \text{ mm}\}$$

## 6.6. Pumpenanschluss

Zur Erzeugung des Vakuums im Rohr (Abbildung 6-9) wird eine geeignete Vakuumpumpe (1) verwendet. Um die Vibrationen der Pumpe nicht direkt in das Rohr einzuleiten wird ein Welschlauch (2) verwendet. Der Welschlauch ist flexibel genug, um die Bewegung des Rohres in y-Richtung bei fester Pumpenposition zu ermöglichen. Damit die Turbopumpe eingesetzt werden kann, muss im Rohr zunächst ein Vorvakuum herrschen. Dieses wird mit einer Vorvakuumpumpe erzeugt. Weil diese Pumpen sehr laut sind und Vibrationen verursachen, wird die verwendete Pumpe, wie bereits beim aktuellen Aufbau, außerhalb des Versuchsraums aufgestellt. Eine Schlauchverbindung (3) führt nach draußen zu dieser Pumpe. Kontrolliert wird das Vakuum im Rohr mit Hilfe eines Messgerätes (4). Pumpen und Messgeräte sind am DESY bereits vorhanden und werden daher nicht in der Kaufteilliste aufgeführt.

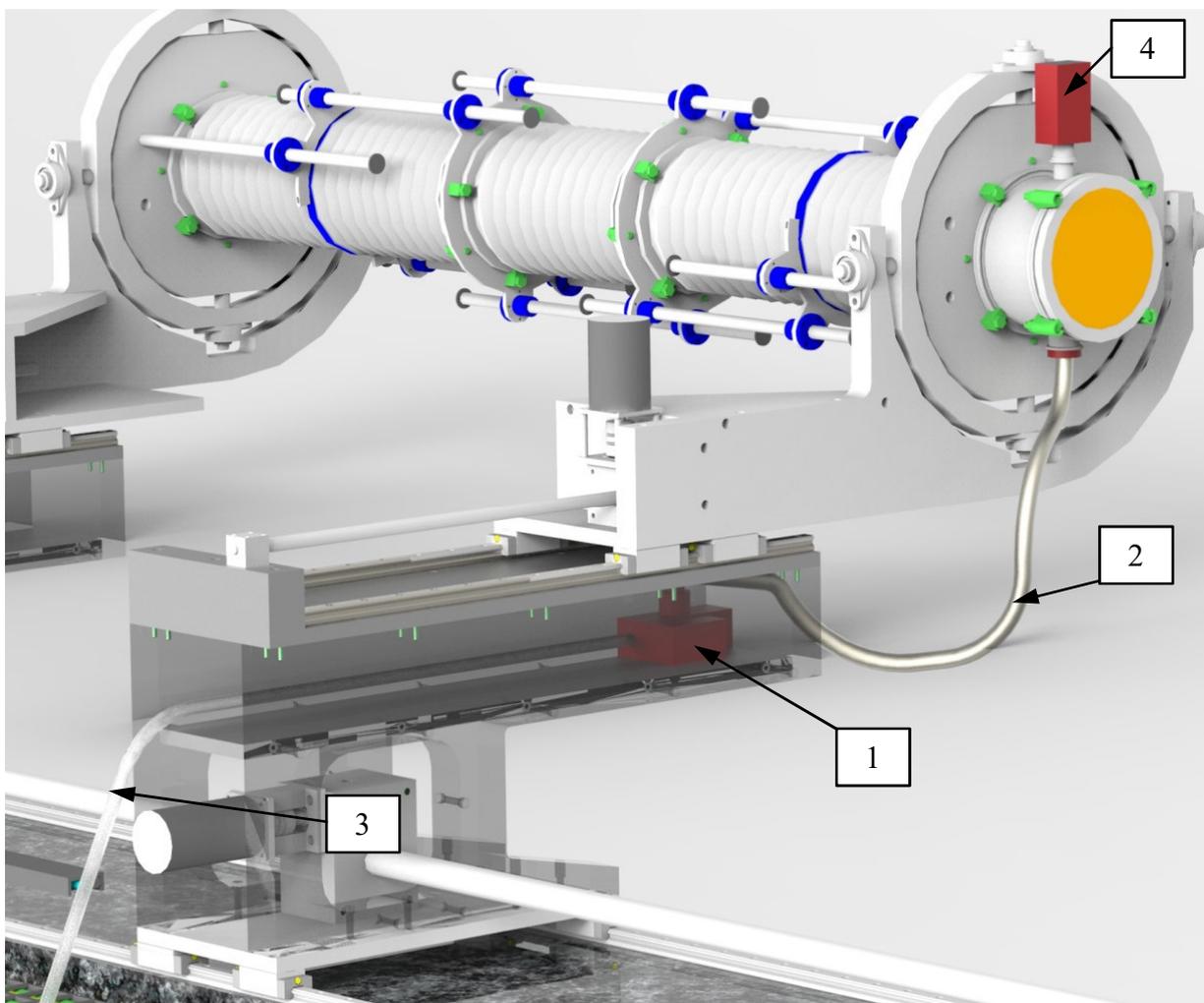


Abbildung 6-9: Pumpenanschluss

## 7. Untersuchung des Kraftflusses

Folgende Bauteile liegen im Kraftfluss:

- Die Kugellager der kardanischen Aufhängung
- Die Führungswagen der Positioniersysteme
- Die Spindel und das Getriebe der Positioniersysteme
- Die Schrittmotoren der Positioniersysteme

Für diese Bauteile wird eine Berechnung der Dimension vorgenommen. Die dabei verwendeten Formeln dienen nur zu Vorabschätzung für das Konzept. Alle Bauteile sind mit einer großzügigen Sicherheit ausgelegt. Wird der Vorschlag konstruktiv umgesetzt sind genauere Nachrechnungen nötig. Abbildung 7-1 stellt Qualitativ die aus der Belastung (rot) resultierenden Kräfte (grün) da.

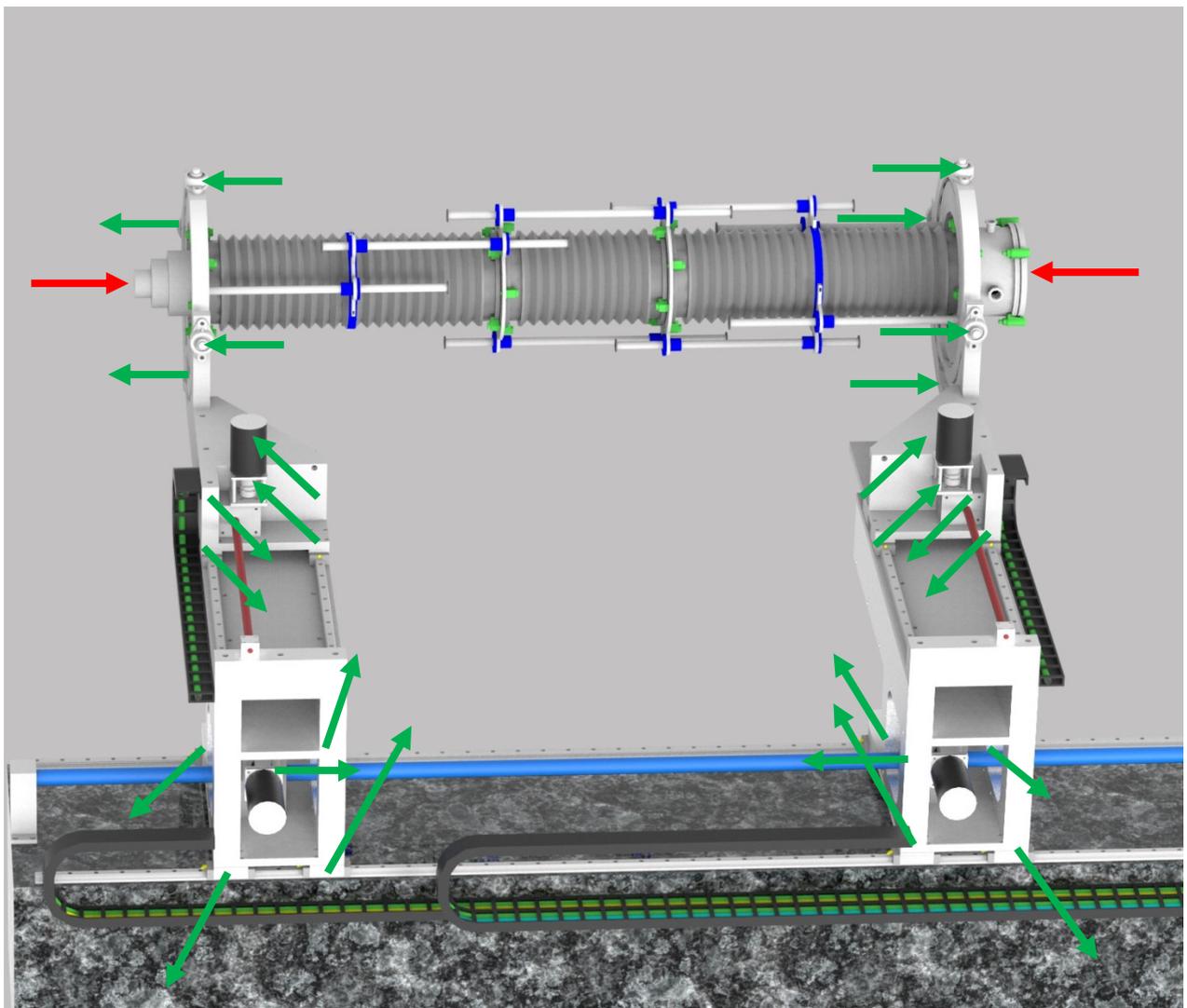


Abbildung 7-1: Qualitative Darstellung der Lagerreaktionskräfte

## 7.1. Lagerkräfte Kugellager

Tabelle 7-1: Formelzeichen Kugellagerberechnung

Bedeutung	Formelzeichen	Wert/Einheit
Geschätzte Gewichtskraft pro Lager	$F_G$	400 N
statische Radialkraft	$F_{r0}$	N
statische Axialkraft	$F_{a0}$	N
statischer Radialfaktor	$X_0$	-
statischer Axialfaktor	$Y_0$	-
statische Lagerbelastung	$P_0$	N
statische Tragsicherheit	$S_0$	-
erforderliche statische Tragzahl	$C_{0erf}$	kN

Da sich die Kraft aus dem Balg auf jeweils zwei Lager aufteilt wird mit der halben Gesamtkraft pro Lager als Radialkraft gerechnet. (Abbildung 7-2)

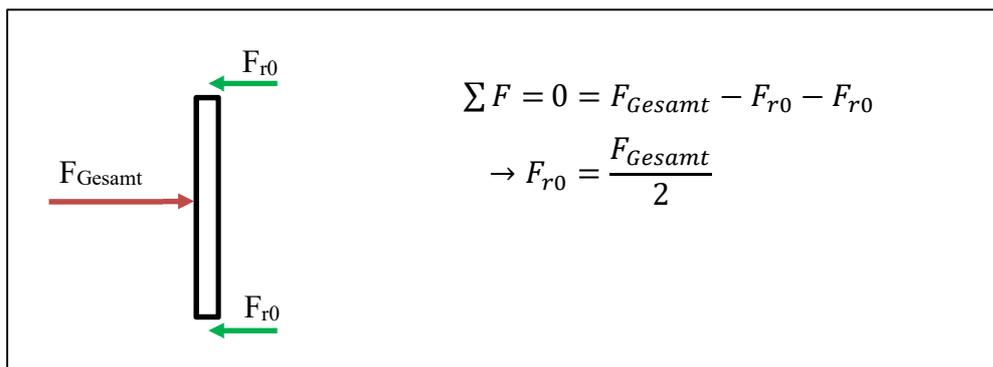


Abbildung 7-2: Radialkräfte auf Kugellager

$$F_{r0} = \frac{4000 \text{ N}}{2} = 2000 \text{ N} \quad [7.1]$$

Die Axialkraft des Festlagers wird mit der geschätzten Gewichtskraft angenommen.

$$F_{a0} = F_G = 400 \text{ N} \quad [7.2]$$

Um die statische Tragzahl zu ermitteln wird zunächst die statisch äquivalente Lagerbelastung  $P_0$  ermittelt.

$$P_0 = X_0 \cdot F_{r0} + Y_0 \cdot F_{a0} \quad [10: 507] \quad [7.3]$$

Für den Axial- und Radialfaktor für Rillenkugellager gilt folgende Aufteilung:

$$\frac{F_{a0}}{F_{r0}} \leq 0,8 \rightarrow X_0 = 1 ; Y_0 = 0 \text{ und} \quad [11: 147]$$

$$\frac{F_{a0}}{F_{r0}} > 0,8 \rightarrow X_0 = 0,6 ; Y_0 = 0,5 \quad [11: 147]$$

$$\frac{400 N}{2000 N} = 0,2 < 0,8 \rightarrow X_0 = 1 ; Y_0 = 0 \quad [7.4]$$

Damit gilt für die statische Lagerbelastung:

$$P_0 = 1 \cdot 2000 N + 0 \cdot 400 N = 2000 N$$

Für die statische Tragsicherheit wird bei normaler Betriebsweise für nicht umlaufende Kugellager ein Faktor von 0,5 empfohlen. [vgl. 10: 506] Für die erforderliche statische Tragzahl gilt:

$$C_{0\text{erf}} \geq P_0 \cdot S_0 \quad [11: 506] \quad [7.5]$$

$$C_{0\text{erf}} \geq 2000 N \cdot 0,5 = 1000 N \hat{=} 1 \text{ kN}$$

Da das Lager hauptsächlich statisch belastet wird und nicht umlaufend betrieben wird, ist die dynamische Tragzahl zu vernachlässigen. Die Welle ist mit einem Durchmesser von 20 mm geplant um der Belastung auf die Ringe der kardanischen Aufhängung standzuhalten und die Verformung zu reduzieren. Daher wird folgendes Lager verwendet:

Rillenkugellager mit Flanschgehäuse:

- Innendurchmesser: 20mm
- Außendurchmesser: 47 mm
- Lagerbreite: 17 mm
- Dynamische Tragzahl: 9,88 kN
- Statische Tragzahl: 6,2 kN

Damit ergibt sich eine statische Sicherheit von 6,2.

## 7.2. Lagerkräfte Führungswagen

Um die Kräfte auf die Linearführungswagen zu bestimmen wurde eine FEM Analyse mit ANSYS Workbench 17.0 durchgeführt. Die Führungswagen (Lager D bis G, Abbildung 7-3 und Abbildung 7-4) sind dabei als Reibungsfreie Lagerung entsprechend ihrer Freiheitsgrade angenommen. Die Spindelkraft (C) ist über eine Verschiebung von Null entsprechend ihrer Freiheitsgrade angenommen. Mit Hilfe der ANSYS Tools Kraftreaktion wurden die Lagerkräfte ausgegeben. (siehe Tabelle 7-2 und Tabelle 7-3) Die Gewichtskraft ergibt sich aus dem CAD Modell mit dem Material Aluminium und ist nur ein vorläufiger Richtwert.

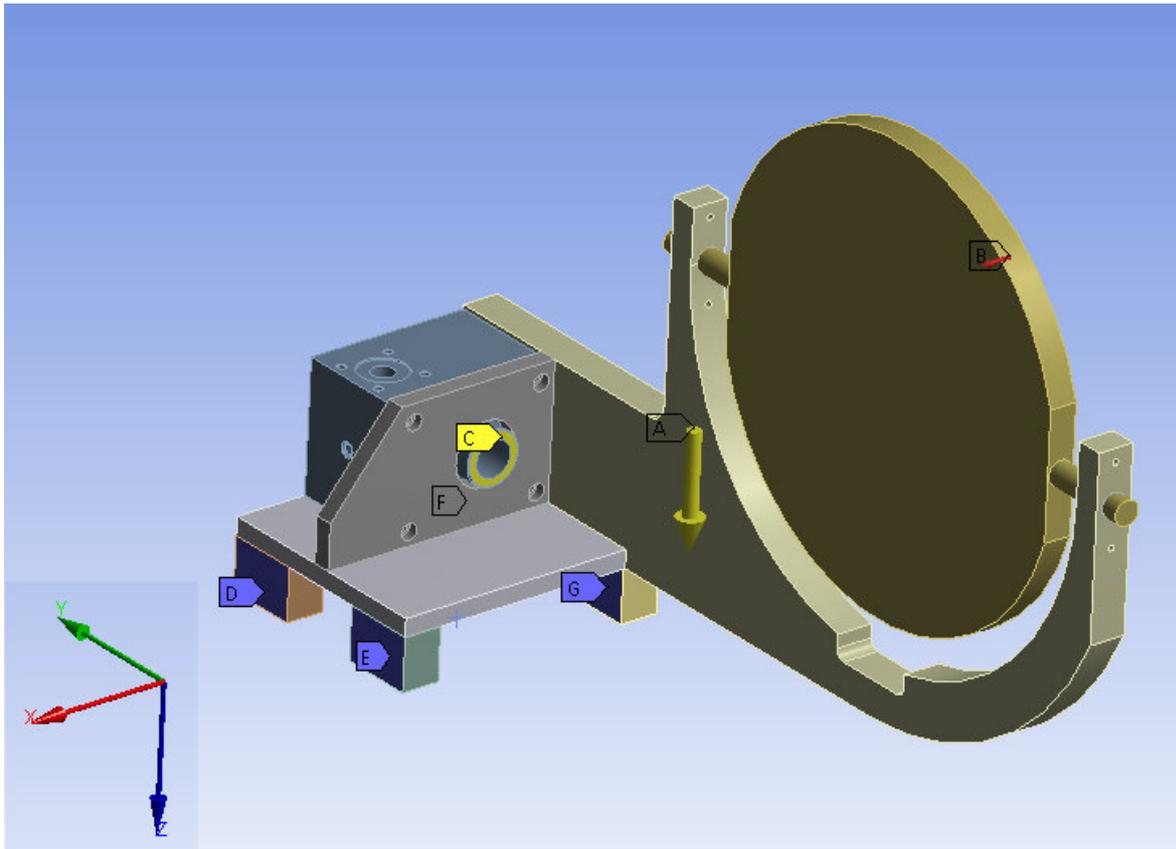


Abbildung 7-3: Kräfte und Lager in ANSYS oben

Tabelle 7-2: Ergebnisse der FEM Analyse oben

Beschreibung	X-Komponente	Y-Komponente	Z-Komponente
Gravitation A	0 N	0 N	1268 N
Druckkraft B	4000 N	0 N	0 N
Spindelkraft C	0 N	~0 N	0 N
Führungswagen D	-329 N	0 N	-1818 N
Führungswagen E	-5323 N	0 N	-1361 N
Führungswagen F	5900 N	0 N	2687 N
Führungswagen G	-4248 N	0 N	-776 N
Summe der Kräfte	0 N	~0 N	0 N

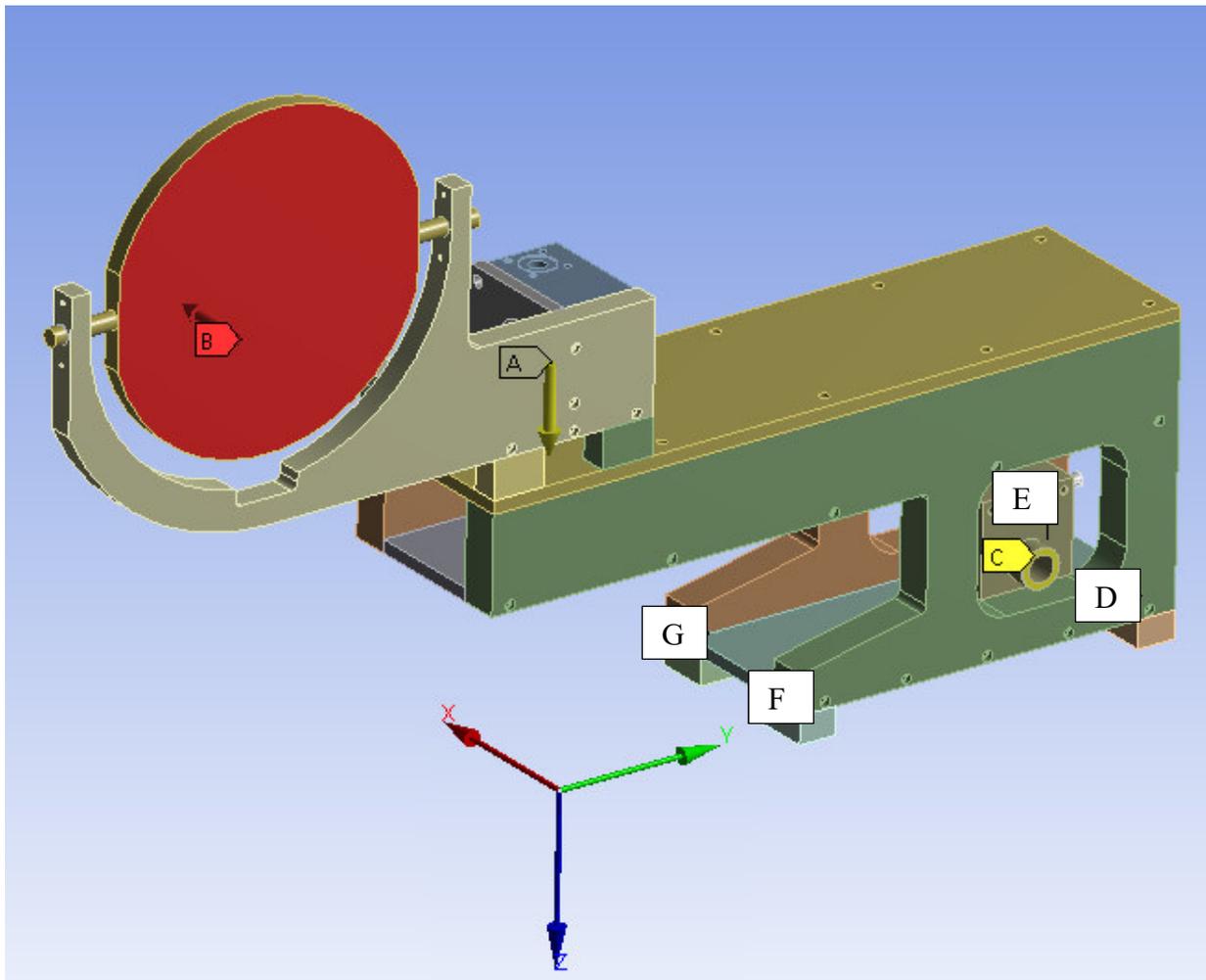


Abbildung 7-4: Kräfte und Lager in ANSYS unten

Tabelle 7-3: Ergebnisse der FEM Analyse unten

Beschreibung	X-Komponente	Y-Komponente	Z-Komponente
Gravitation A	0 N	0 N	4725 N
Druckkraft B	4000 N	0 N	0 N
Spindelkraft C	-4000 N	0 N	0 N
Führungswagen D	0 N	8164 N	14275 N
Führungswagen E	0 N	-12950 N	-13276 N
Führungswagen F	0 N	13425 N	-5769 N
Führungswagen G	0 N	-8639 N	45 N
Summe der Kräfte	0 N	0 N	0 N

Die Führungswagen sollen Baugleich ausgeführt werden, d. h. die größte berechnete Belastung ist für die Dimensionierung ausschlaggebend. Diese liegt bei 14,3 kN vertikal und 13,4 kN horizontal.

Um eine hohe Sicherheit zu gewährleisten werden folgende Führungswagen verwendet:

Führungswagen lange Ausführung

- Kugeln aus Wälzlagerstahl
- Schienengröße: 25 mm
- Wagenbreite: 48 mm
- Wagenlänge: 110 mm
- Dynamische Tragzahl: 30 kN
- Statische Tragzahl: 56 kN

Damit ergibt sich eine statische Sicherheit von 3,9 und eine dynamische Sicherheit von 2,1 für den am stärksten beanspruchten Wagen.

### 7.3. Spindelberechnung

Die Aufhängungen des flexiblen Vakuumrohrs werden mit Kugelgewindespindeln verfahren. Kugelgewindespindeln bieten hohe Präzision, sehr geringe Reibung, wirken aber nicht selbsthemmend. Um die Genauigkeit zu verbessern sollen die Getriebe grundsätzlich eine möglichst hohe Übersetzung haben. Die folgenden Rechnungen bieten eine Abschätzung über die Spindel- und Getriebedimensionen. „Die vorgewählte Spindel ist in jedem Fall auf Festigkeit und meist noch auf Knicksicherheit zu prüfen.“ [10: 267] Abbildung 7-5 zeigt eine 3D Ansicht mit Angabe der Einbaulage der verwendeten Spindeln.

Tabelle 7-4: Formelzeichen Spindelberechnung

Bedeutung	Formelzeichen	Wert/Einheit
Druckkraft auf die Spindel	$F$	N
Sicherheitsfaktor	$S$	6...8 [10: 267]
rechnerische Knicklänge	$l_k$	mm
Spindellänge	$l$	mm
E-Modul von Stahl	$E$	$2,1 \cdot 10^5 \frac{N}{mm^2}$
Spindelkerndurchmesser	$d_3$	mm
Wirkungsgrad Getriebe	$\eta$	-
Hub pro Umdrehung Getriebe	$i$	mm
Leerlaufmoment Getriebe	$M_0$	Nm
Antriebsmoment Getriebe	$M_T$	Nm

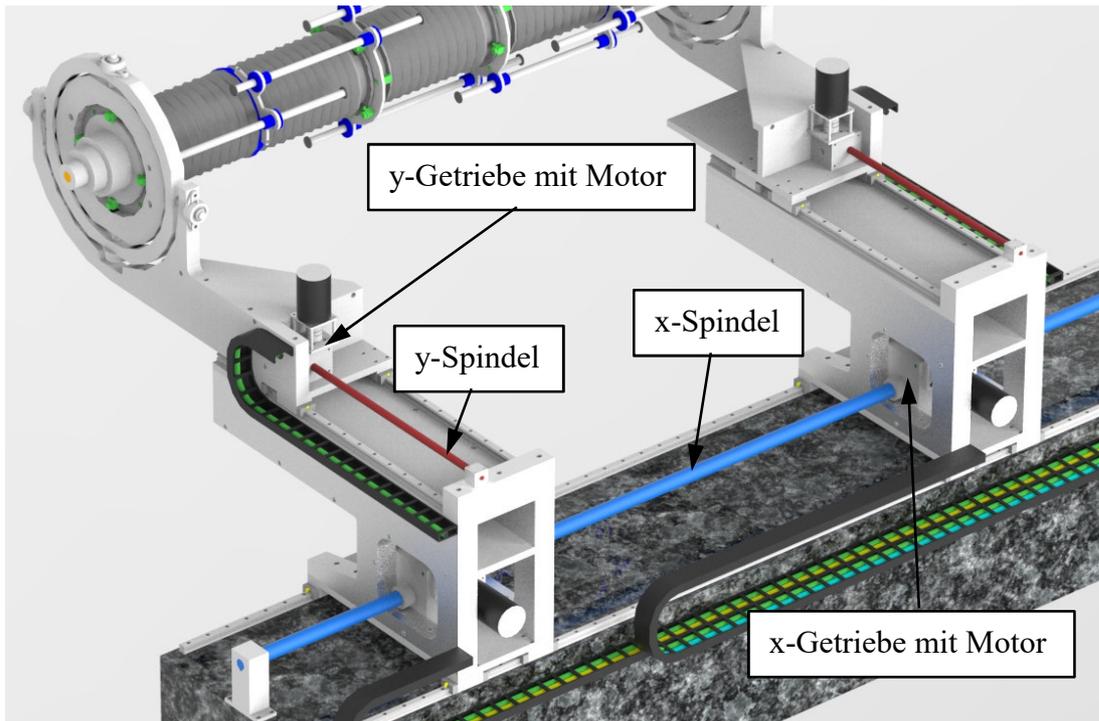


Abbildung 7-5: 3D Ansicht der geplanten Spindeln

**Berechnung der x-Spindel und des zugehörigen Getriebes (Abbildung 7-5):**

Abbildung 7-6 zeigt die Herleitung des Knickfalls für die x-Spindel.

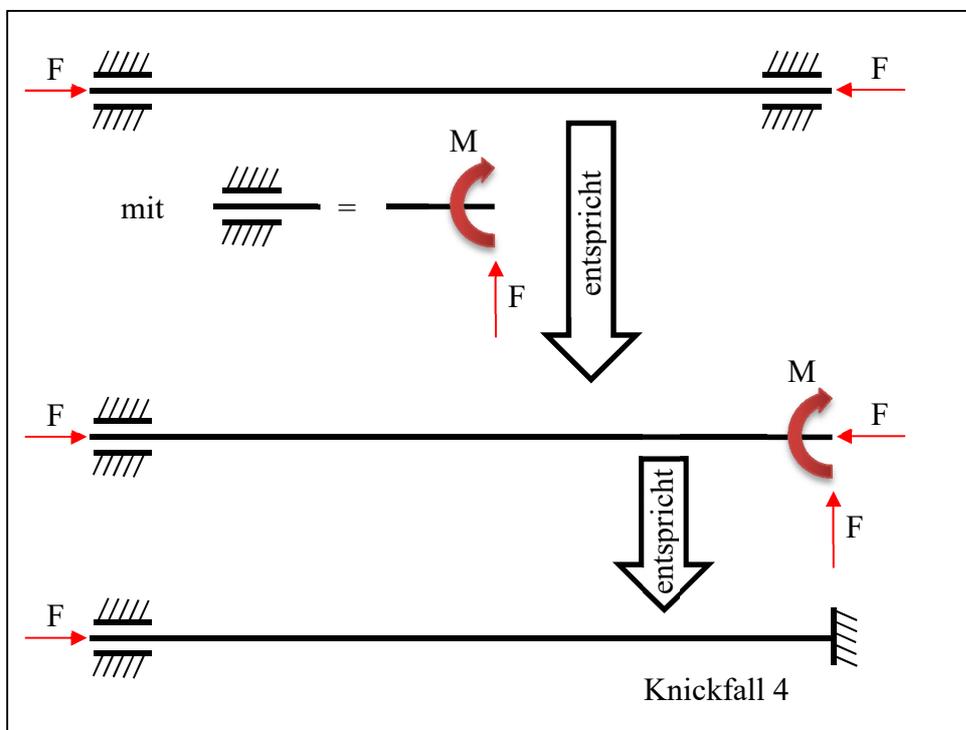


Abbildung 7-6: Herleitung des Knickfalls

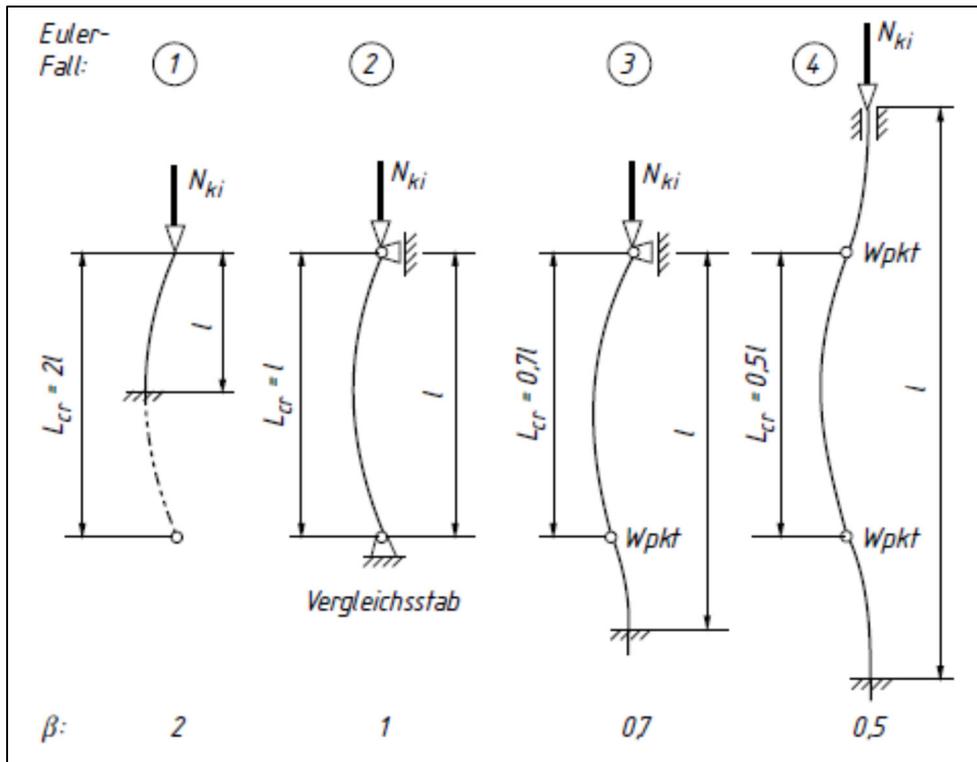


Abbildung 7-7: Euler Knickfälle [10: 159]

Lange, druckbeanspruchte Spindeln werden zweckmäßig auf Knickung ausgelegt. [vgl. 10: 267] Die gegebene Belastung lässt sich mit dem Euler Knickfall 4 (Abbildung 7-7) abschätzen, denn die Getriebe können Kräfte und durch die Führungen auch Momente aufnehmen. Als Spindelkraft wird der aus der FEM Analyse ermittelte Wert von 4 kN verwendet. Die Länge zwischen den Getrieben wird mit 3000 mm angenommen, da das Gesamtsystem laut Anforderungsliste 3100 mm lang sein soll. Daraus folgt für die rechnerische Knicklänge:

$$l_k = l \cdot 0,5 = 3000 \text{ mm} \cdot 0,5 = 1500 \text{ mm} \quad [7.6]$$

$$d_3 = \sqrt[4]{\frac{64 \cdot F \cdot S \cdot l_k^2}{\pi^3 \cdot E}} \quad [10: 267] \quad [7.7]$$

Da diese Formel nur der Abschätzung des Kerndurchmessers dient wird mit einer Sicherheit von 8 gerechnet. Damit ergibt sich für den minimalen Spindelkerndurchmesser:

$$d_3 = \sqrt[4]{\frac{64 \cdot 4000 \text{ N} \cdot 8 \cdot (1500 \text{ mm})^2 \cdot \text{mm}^2}{\pi^3 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \text{ N}}} = 29 \text{ mm}$$

Die passende Spindel ist laut Herstellerkatalog [24: 8] eine Kugelgewindespindel mit einem Außendurchmesser von 40 mm und einem Kerndurchmesser von 36,9 mm.

Für die Getrieberechnung wird ein handelsübliches Spindelhubgetriebe gewählt. Für die Spindelgröße 40 mm wird aus Tabelle 7-5 ein Getriebe der Baugröße M4 mit einer 4005 Spindel und einer Übersetzung von 28:1 gewählt und berechnet.

Tabelle 7-5: Auszug Hersteller Katalog Spindelhubgetriebe [22: 55]

Baugröße	M1	M2	M3	M4	
Maximale Hubkraft [kN]	5	10	12,5	22	42
Durchmesser und Steigung [mm]	1605	2005	2505	4005	4010
Hub pro Umdrehung der Antriebswelle [mm]	Übers. H	1,25	1,25	0,83	1,43
	Übers. L	0,31	0,31	0,21	0,36
Übersetzung	Übers. H	4:1	4:1	7:1	
	Übers. L	16:1	16:1	28:1	
Wirkungsgrad [%]	Übers. H	57	56	53	56
	Übers. L	46	44	43	45
Leerlaufmoment [Nm]	H	0,04	0,11	0,35	
	L	0,03	0,10	0,25	

Das erforderliche Antriebsmoment:

$$M_T = \frac{F}{2000 \cdot \pi \cdot \eta} \cdot i + M_0 \quad [\text{vgl. 24: 95}] \quad [7.8]$$

$$M_T = \frac{4 \text{ kN}}{2 \cdot \pi \cdot 0,43} \cdot 0,18 \text{ mm} + 0,25 \text{ Nm} = 0,5165 \text{ Nm}$$

**Berechnung der y-Spindel und des zugehörigen Getriebes (Abbildung 7-5):**

Die Spindeln in y-Richtung werden nach demselben Prinzip berechnet. Nur dass diese eine geringere Kraft aufnehmen müssen.

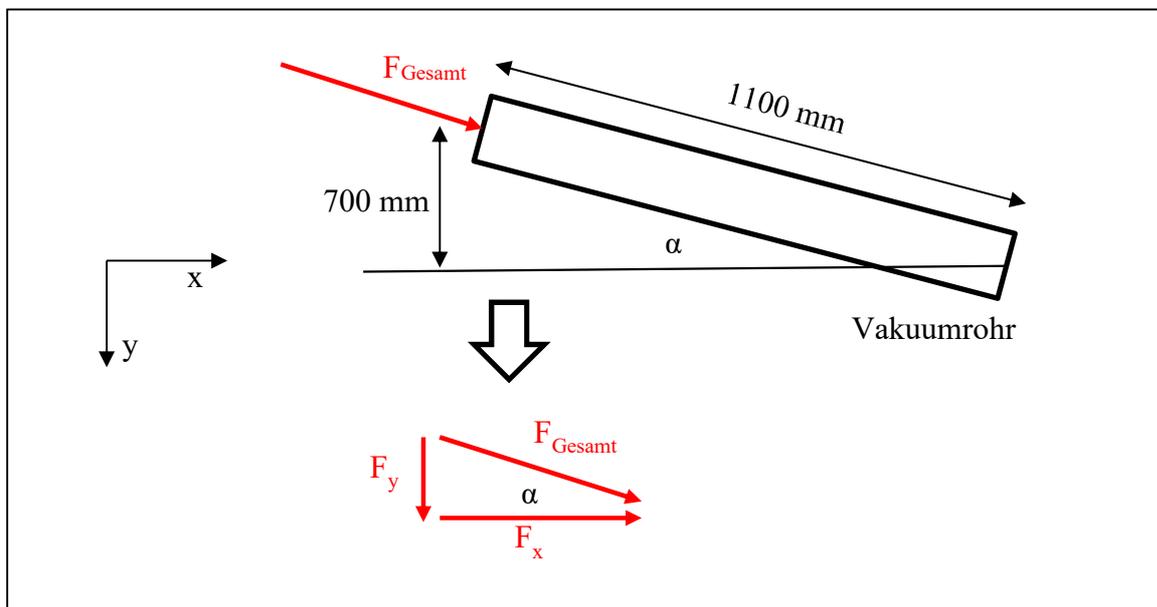


Abbildung 7-8: Skizze Kraftverteilung bei maximaler Schrägstellung des Rohres

Der ungünstigste Belastungsfall für die y-Spindel ist in Abbildung 7-8 gezeigt. Während ein Rohrende voll eingefahren ist steht das andere 700 mm weit ausgefahren. In dieser Stellung wirkt die y-Komponente von  $F_{\text{Gesamt}}$  als Spindelkraft.

$$\sin \alpha = \frac{700 \text{ mm}}{1100 \text{ mm}} \rightarrow \alpha = \arcsin \frac{700 \text{ mm}}{1100 \text{ mm}} \quad [7.9]$$

$$\alpha = 39,52^\circ$$

$$\frac{F_y}{F_{Gesamt}} = \sin \alpha \rightarrow F_y = \sin \alpha \cdot F_{Gesamt} \quad [7.10]$$

$$F_y = \sin 39,52^\circ \cdot 4000 \text{ N} = 2545,46 \text{ N}$$

Aus Formel [7.10] ergibt sich mit  $F_y$  als Spindelkraft bei 700 mm Spindellänge:

$$l_k = 700 \text{ mm} \cdot 0,5 = 350 \text{ mm} \quad \text{Knickfall 4}$$

$$d_3 = \sqrt[4]{\frac{64 \cdot 903,23 \text{ N} \cdot 8 \cdot (350 \text{ mm})^2 \cdot \text{mm}^2}{\pi^3 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \text{ N}}} = 12,51 \text{ mm}$$

Das ergibt eine Kugelgewindespindel mit dem Außendurchmesser von 16 mm und einem Kerndurchmesser von 12,9 mm. Für diese Spindel wird aus Tabelle 7-5 ein Getriebe der Baugröße M1 mit einem Übersetzungsverhältnis von 16:1 gewählt. Das Antriebsmoment ergibt sich damit wie folgt aus Formel [7.8]:

$$M_T = \frac{2,55 \text{ kN}}{2 \cdot \pi \cdot 0,46} \cdot 0,31 \text{ mm} + 0,03 \text{ Nm} = 0,30 \text{ Nm}$$

#### 7.4. Auslegung der Motoren

Tabelle 7-6: Formelzeichen Motor Auslegung

Bedeutung	Formelzeichen	Wert/Einheit
Lineargeschwindigkeit	$v_{linear}$	$\frac{mm}{min}$
Drehgeschwindigkeit	$v_{rot}$	$\frac{U}{min}$
Schrittweite auf der Linearachse	$\Delta s$	mm
Schrittweite Motor	$\phi$	°

Zur Auswahl der Motoren wird zunächst das Antriebsmoment der Getriebe berücksichtigt. Dieses wird mit einer Sicherheit von 2 beaufschlagt, um ein sauberes Anfahren und eine gleichmäßige Betriebstemperatur der Motoren zu gewährleisten. Für den Motor der x-Spindel gilt also ein Drehmoment von 1 Nm. Laut Anforderungsliste darf der Motorstrom 5 A nicht überschreiten. Abbildung 7-9 zeigt ein Herstellerdiagramm (Drehzahl zu Drehmoment) eines passenden 5 A Schrittmotors.

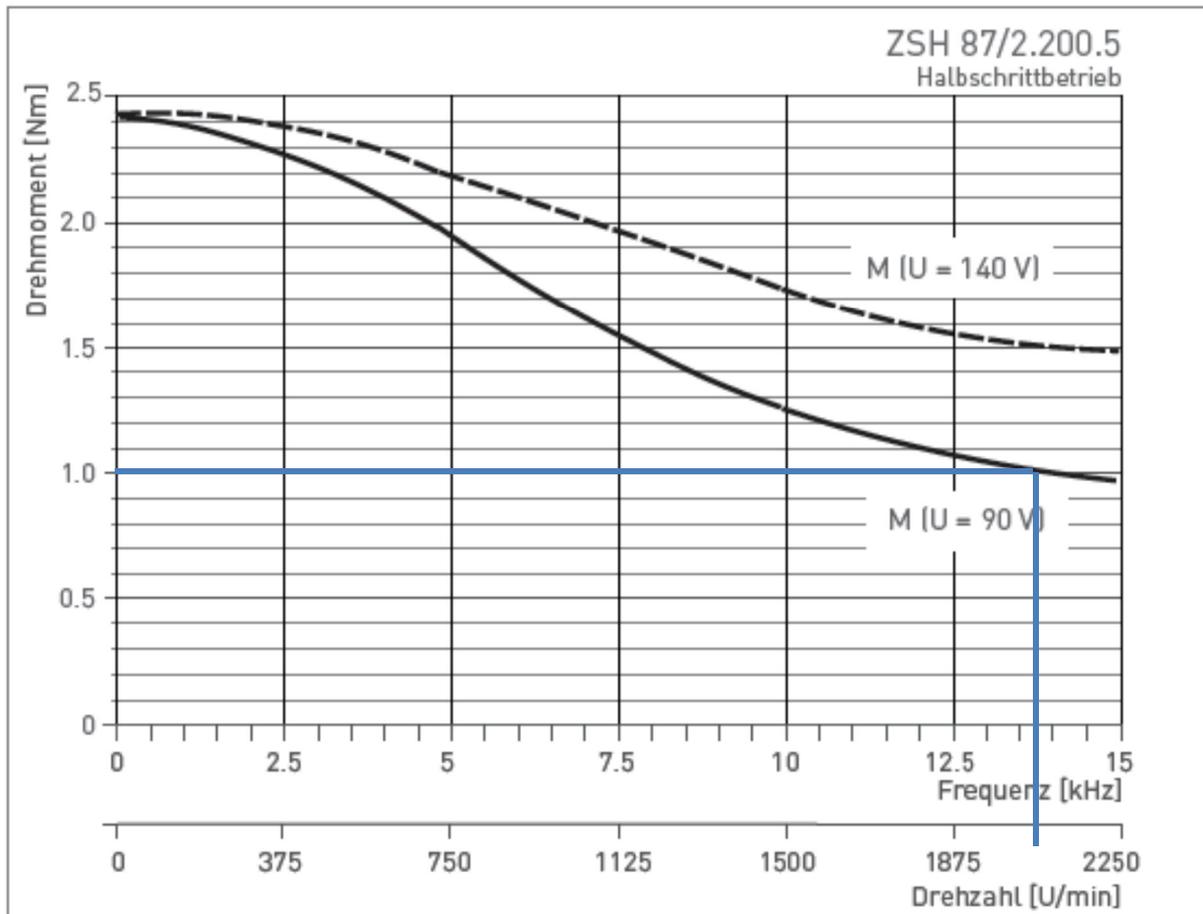


Abbildung 7-9: Schrittmotor mit 5 A Drehzahl zu Drehmoment Diagramm [26: 11]

Es soll, nach Rücksprache, die 90 V Version verwendet werden. Diese bietet bei ca. 2000 Umdrehungen pro Minute noch das benötigte Moment von einem Nm. Die maximale Fahrgeschwindigkeit ergibt sich damit aus Übersetzung und Drehgeschwindigkeit.

$$v_{linear} = v_{rot} \cdot i \quad \text{mit } i = 0,18 \frac{mm}{U} \text{ für Getriebebaugröße M4} \quad [7.11]$$

$$v_{linear} = 2000 \frac{U}{min} \cdot 0,18 \frac{mm}{U} = 360 \frac{mm}{min} \cong 6 \frac{mm}{s}$$

Nach Rücksprache mit dem Auftraggeber am DESY wurde diese Geschwindigkeit für geeignet erklärt, um die Sicherheit der Benutzer zu gewährleisten. Für die y-Spindeln soll die gleiche Geschwindigkeit verwendet werden. Formel [7.11] umgestellt nach Drehgeschwindigkeit ergibt die Drehzahl für den y-Motor.

$$v_{rot} = \frac{v_{linear}}{i} \quad \text{mit } i = 0,31 \frac{mm}{U} \text{ für Getriebegröße M1}$$

$$v_{rot} = \frac{360 \frac{mm \cdot U}{min}}{0,31 \frac{mm}{U}} = 1161,3 \frac{U}{min}$$

Wie zuvor wird das benötigte Antriebsmoment auf 0,60 Nm erhöht. Da das benötigte Antriebsmoment kleiner ist, kann ein kleinerer Motor verwendet werden. Das passende Diagramm ist auf Abbildung 7-10 dargestellt. Dieser wird auch mit einer Spannung von 90 V betrieben, benötigt aber nur 2,3 A.

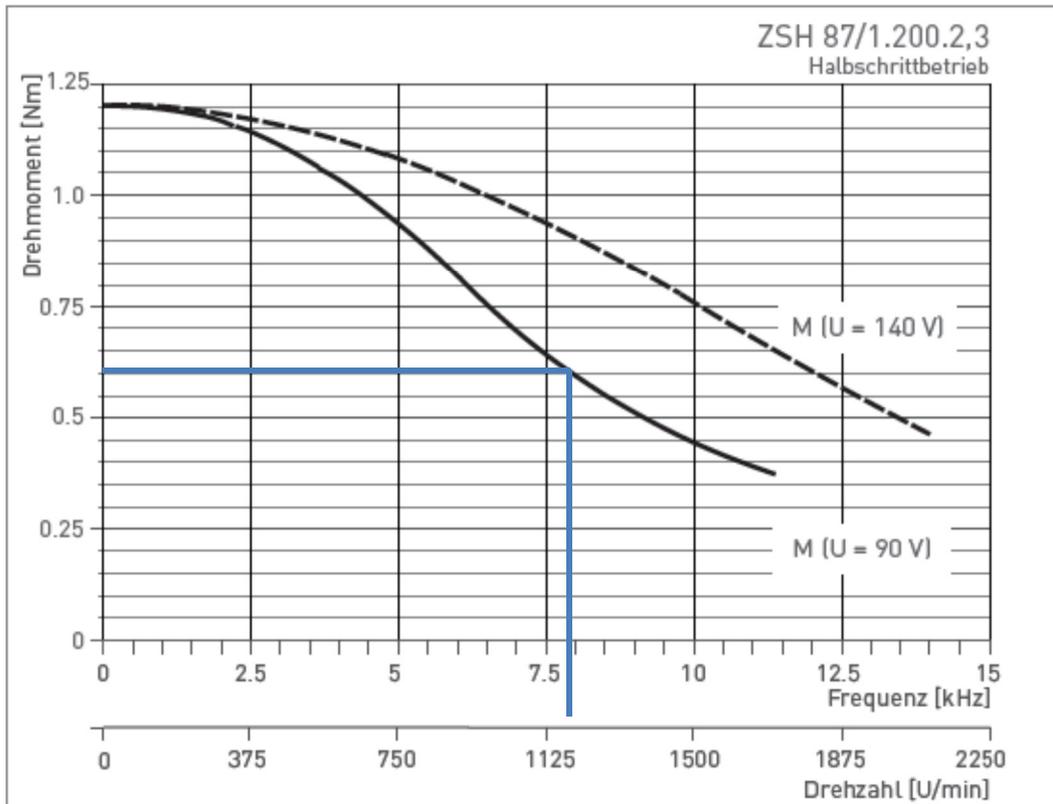


Abbildung 7-10: Schrittmotor mit 2,3 A Drehzahl zu Drehmoment Diagramm [26: 11]

Da die Kugelumlaufspindeln keine Selbsthemmung bieten, besitzen alle Motoren eine Permanentmagnetbremse. Aufgabe der Bremse ist es im Falle eines Stromausfalls die Motoren im Stillstand zu halten. Tabelle 7-7 zeigt einige Kernwerte der gewählten Motoren.

Tabelle 7-7: Kennwerte der Motoren

Kennwert	x-Spindel	y-Spindel
Motor	Zweiphasen-Hybrid-Schrittmotor	Zweiphasen-Hybrid-Schrittmotor
Spannung	90 V	90 V
Strom	5 A	2,3 A
Schrittauflösung	1,8 °	1,8 °
Bremse	Permanentmagnetbremse	Permanentmagnetbremse
Durchmesser	86 mm	86 mm
Länge	163 mm	131 mm
IP Schutzklasse	IP 54	IP 54
Betriebsdrehzahl	2000 min <sup>-1</sup>	1160 min <sup>-1</sup>

Mit der Schrittauflösung von 1,8 ° berechnet die theoretische Einstellgenauigkeit mit:

$$\Delta s = \frac{\phi}{360^\circ} \cdot i \quad [7.12]$$

$$\Delta s = \frac{1,8^\circ}{360^\circ} \cdot 0,18 \text{ mm} = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \quad \text{für die x-Spindel und}$$

$$\Delta s = \frac{1,8^\circ}{360^\circ} \cdot 0,31 \text{ mm} = 1,55 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \quad \text{für die y-Spindel}$$

## 8. Kostenanalyse

Die Preise in der Kaufteilliste sind gemäß Angebot der entsprechenden Hersteller und Händler. Um die Preiskonditionen des DESY nicht öffentlich zu machen, sind die Bauteile nicht genauer beschrieben. Die Liste dient der Abschätzung der DESY externen Kosten (keine Werkstattkosten) für die Anschaffung der benötigten Komponenten.

Tabelle 8-1: Kaufteilliste

Nr.	Menge	Bezeichnung	Einzelpreis (netto)	Gesamtpreis (netto)
1	4	Klammerschraube Stahl M10	3,95 €	15,80 €
2	32	ISO-K-Pratze Stahl DN 160/250 M10	4,15 €	132,80 €
3	9	ISO-Zentrierring Al / Viton Dichtung DN 200	39,80 €	358,20 €
4	16	Linearkugellager mit D=20mm	30,13 €	482,08 €
5	2	Membranbalg mit Zwischenring und Anschlusssteilen DN 200	7.900,00 €	15.800,00 €
6	1	Membranbalg mit Anschlusssteilen DN 200	4.500,00 €	4.500,00 €
7	8	Gehäuselagereinheit Flanschlager D=20mm	30,17 €	241,36 €
8	16	Führungswagen Lang Gr. 25	54,66 €	874,56 €
9	11,4 m	Profilführungsschiene Gr. 25 (Preis pro Meter ca.)	110,00 €	1.254,00 €
10	2	Kupplung mit Befestigungsschraube 20-10 mm	28,80 €	57,60 €
11	2	Kupplung mit Befestigungsschraube 14-10 mm	28,80 €	57,60 €
12	2	Spindelhubgetriebe mit 40x5 mm Kugelgewindespindel 4100 mm lang	1.400,00 €	2.800,00 €
13	2	Spindelhubgetriebe mit 20x5 mm Kugelgewindespindel 800 mm lang	460,00 €	920,00 €
14	2	Schrittmotor 2 Magnet mit Bremse	430,00 €	860,00 €
15	2	Schrittmotor 1 Magnet mit Bremse	370,00 €	740,00 €
16	7	Miniatur Gabel Lichtschranke	1,70 €	11,90 €
17	2	Endschalter Federstab tastend	27,25 €	54,50 €
18	2	Energieketten, Schleppketten 20x10 mm 1680 mm Länge 3240 mm	64,69 €	129,38 €
19	2	Energieketten, Schleppketten 20x10 mm 1680 mm Länge 1040 mm	22,89 €	45,78 €
20	5	Reflektions-Lichtschranke mit Sender und Reflektor	100,00 €	500,00 €
			Summe (netto):	29.835,56 €

## 9. Arbeitssicherheitskonzept

### 9.1. Risikoanalyse

Zur Identifizierung der wahrscheinlichsten Unfallrisiken werden die bereits ermittelten Risiken aus Tabelle 4-1 bewertet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9-1 dargestellt.

- Die Auftretenswahrscheinlichkeit (A) berücksichtigt wie wahrscheinlich der Fehler auftritt. Ein hoher Wert steht hier für ein wahrscheinliches Auftreten während des normalen Betriebs
- Die Bedeutung (B) berücksichtigt die Schwere der Schäden, die bei Auftreten des Fehlers an Bauteilen oder Personen entstehen. Hohe Werte stehen hier für gefährliche Personenschäden.
- Die Entdeckungswahrscheinlichkeit (E) beschreibt die Wahrscheinlichkeit mit der ein Benutzer den Fehler vor dem Eintreten eines Schadens bemerken kann. Hohe Werte stehen hier für einen für den Laien nicht sichtbaren Fehler.
- Die Risikoprioritätszahl (RPZ) bietet einen Vergleichswert der verschiedenen Unfallursachen. Je höher die Risikoprioritätszahl, desto umfangreicher müssen die Sicherheitsmaßnahmen ausfallen. Sie wird berechnet aus:

$$RPZ = A \cdot B \cdot E$$

[9.1]

Tabelle 9-1: Risikoanalyse

Unfallursache	Folgen	A	B	E	RPZ
Motorüberhitzung durch Überlastung	Feuergefahr durch Staubentzündung	3	9	9	243
	Hautverbrennung				
Kabelbruch	Strom auf Gehäuse	3	5	9	135
	Offene Kontakte mit Werkzeug berührbar				
Luftgefüllt zusammenfahren	Zerbersten der schwächsten Bauteile, dabei lauter Knall	7	9	5	315
Überschreiten der Endlage	Membranbrüche	6	5	7	210
	Motorüberlastung				
Bedienfehler	Kollisionen mit anderen Bauteilen	9	9	5	405
	Kollision mit Personen				
Kontakt von Personen mit sich bewegenden Teilen	Quetschverletzungen	5	10	4	200
	Haare, Stoff in rotierende Teile				
Wellen- oder Motorversagen, Stromausfall	unkontrolliertes Zusammenfahren	10	5	8	400
Scharfe (rotierende) Kanten	Schnittverletzungen	1	9	3	27

## 9.2. Bediener sicherheit

Die Hauptrisiken für die Bediener der Anlage sind:

- Stromschläge bei Kabelbruch
- Hautverbrennung an überhitzten Motoren
- Trommelfell Verletzungen beim Zerbersten des Kaptonfensters
- Einklemmen in sich bewegenden Teilen

Durch übliche Sicherheitsmaßnahmen für elektrische Anlagen, wie Erden der Bauteile und Einsatz eines Fehlerstromschutzschalters sinkt die Gefahr von Stromschlägen auf ein Minimum, außerdem werden generell sichere Kleinspannungen verwendet.

Um eine Überlastung der Motoren und eine daraus resultierende Überhitzung zu vermeiden sind die Motoren ausreichend dimensioniert. Die Motoren können mit Hilfe eines Thermoelements überwacht werden, um die Entdeckung einer Überhitzung zu ermöglichen. Da die Motoren nach Schutzklasse IP 54 gegen Staubablagerungen im Inneren geschützt sind, fällt auch das Risiko einer Staubexplosion weg.

Um ein Zerbersten des Kaptonfensters zu vermeiden ist im Vakuumrohr ein Druckschalter verbaut, der eine Bewegung der Motoren nur zulässt, wenn im Rohr Vakuum herrscht. Generell tragen beim Verfahren des Rohres alle im Raum anwesenden Personen einen Gehörschutz. Warnschilder und eine Warnung am Bildschirm bei aufrufen der Steuerbefehle weisen die Bediener der Anlage darauf hin. Generell wird die Anlage nur von ausgewiesenen Personen bedient.

Um das Einklemmen von Personen zwischen den sich bewegenden Bauteilen zu vermeiden sind sehr langsame Bewegungsgeschwindigkeiten gewählt. Da hierbei aber die schwersten Verletzungen entstehen können und es keine persönliche Schutzausrüstung gegen Einklemmen gibt, muss eine zusätzliche Sicherung erfolgen. Dies wird mit einer Sperrzone aus Lichtschranken gelöst. (Abbildung 9-1: Vorschlag zur Anordnung der LichtschrankenAbbildung 9-1) Werden die Lichtschranken unterbrochen stoppen die Motoren bzw. können nicht gestartet werden. Sollten diese Systeme versagen ist ein Handbedienbarer NOT STOP Knopf in der Experimentierhütte und im Kontrollraum angebracht.

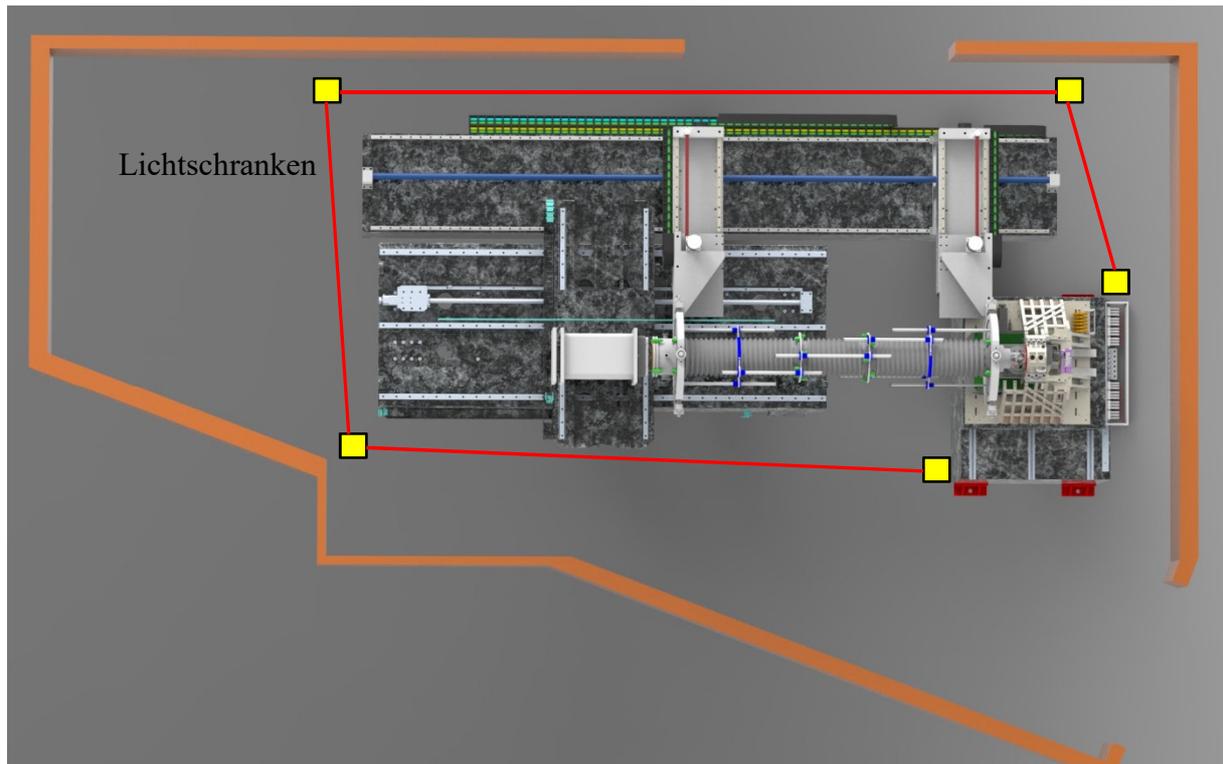


Abbildung 9-1: Vorschlag zur Anordnung der Lichtschranken

### 9.3. Bauteilsicherheit

Die Hauptursache für Schäden an Bauteilen ist die falsche Bedienung, deshalb soll die Anlage nur von unterwiesenen Personen bedient werden. Um die Sicherheit noch zu verbessern werden folgende Hauptschadensquellen abgesichert:

- Kollisionen zwischen Vakuumrohr und Detektor oder Probenhalterung durch Bedienfehler
- Überschreiten der Endlagen der Membranbälge
- Stromausfall und damit Wegfall der Motorhaltemomente

Um Kollisionen der Bauteile zu vermeiden werden Federstabschalter eingesetzt. Diese treffen am Granit auf stabile Bereiche und lösen einen STOP aus, bevor es zu einer Berührung an empfindlichen Bauteilen, wie den Detektor, kommt.

Die Endlagen der Membranbälge werden mit Gabellichtschranken an der Schiene abgesichert. (siehe Kapitel 6.5)

Um einer unkontrollierten Bewegung im Falle eines Stromausfalls vorzubeugen, sind die Schrittmotoren mit elektromagnetischen Bremsen ausgestattet. Diese Bremsen lösen bei Wegfallen der Motorspannung aus und halten die Motorwellen fest.

#### 9.4. Steuerungskonzept

Die Abbildung 9-3 zeigt ein Logikkonzept für eine Steuerung, welche die genannten Sicherheitsmaßnahmen berücksichtigt. Tabelle 9-2 zeigt den Deklarationsteil der Steuerung. Die Abkürzungen setzen sich jeweils aus den fett dargestellten Buchstaben zusammen, z.B. Zeile 1: **M**otor + **x**-Spindel + **p**robenseitig = MXP. Die ungefähren Einbaulagen der Sensoren sind in Abbildung 9-2 dargestellt.

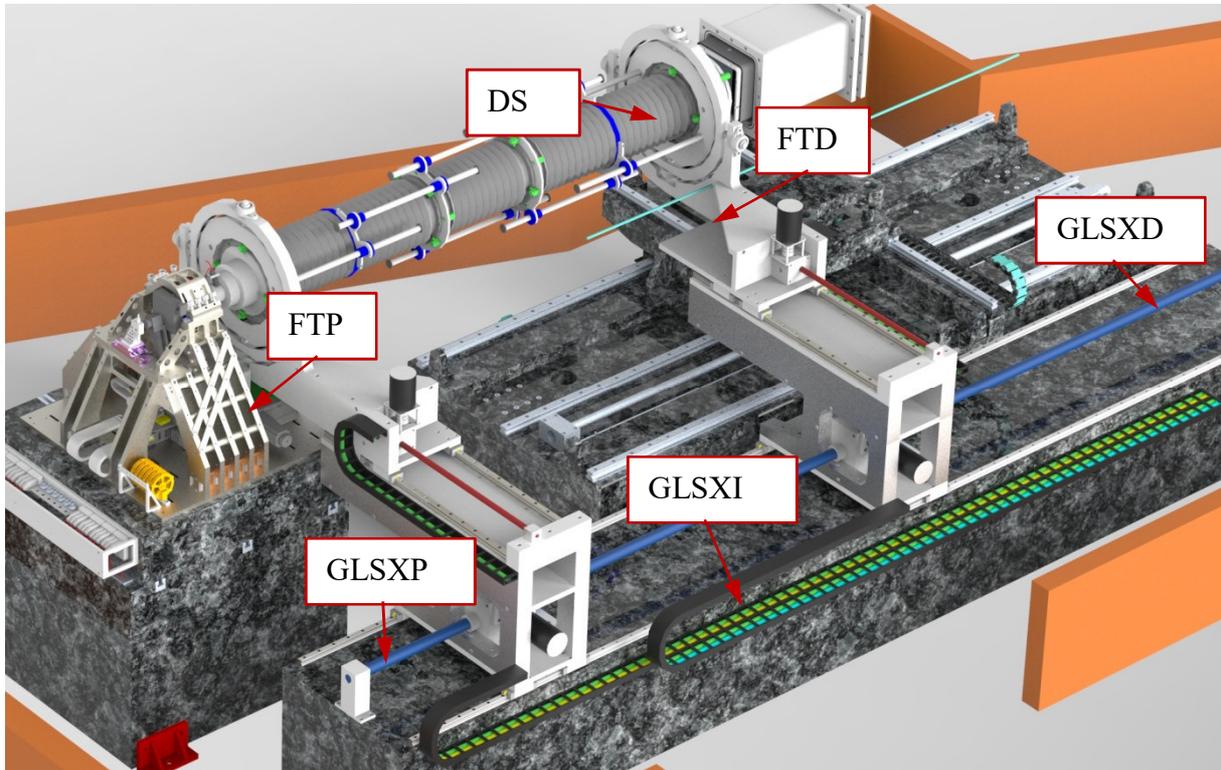


Abbildung 9-2: Lage der Sensoren

Die Logik basiert auf der Programmiersprache Funktionsblockdiagramm. Die Zustände der Signale können dabei TRUE = 1 oder FALSE = 0 sein. Der Speicherbaustein SET hält den Zustand TRUE am Ausgang A, sobald ein TRUE im Eingang S eingetruft und solange bis ein TRUE am Eingang R vorliegt. Sind beide Eingänge TRUE ist der Ausgang FALSE (Rücksetzdominant). Die verwendeten AND Bausteine geben (durch die Negierung am Ausgang) ein FALSE, wenn alle Eingänge TRUE sind. NOT wandelt das Signal von TRUE zu FALSE oder umgekehrt.

Tabelle 9-2: Variablen der Steuerung

Name	Abkürzung	Zustände
<i>Eingänge:</i>		
Fahrbehl an <b>probenseitigen Motor</b> auf der <b>x</b> -Spindel	MXP	1 = Motor wird aus der Software gestartet, 0 = Motor wird nicht gesteuert
Fahrbehl an <b>detektorseitigen Motor</b> auf der <b>x</b> -Spindel	MXD	1 = Motor wird aus der Software gestartet, 0 = Motor wird nicht gesteuert
Fahrbehl an <b>probenseitigen Motor</b> auf der <b>y</b> -Spindel	MYP	1 = Motor wird aus der Software gestartet, 0 = Motor wird nicht gesteuert
Fahrbehl an <b>detektorseitigen Motor</b> auf der <b>y</b> -Spindel	MYD	1 = Motor wird aus der Software gestartet, 0 = Motor wird nicht gesteuert
<b>Gabellichtschranke</b> an der <b>x</b> -Spindel auf Seite der <b>Probe</b>	GLSXP	1 = Lichtstrahl ist nicht unterbrochen, 0 = Lichtstrahl ist unterbrochen
<b>Gabellichtschranke</b> an der <b>x</b> -Spindel für die <b>innere Endlage</b>	GLSXI	1 = Lichtstrahl ist nicht unterbrochen, 0 = Lichtstrahl ist unterbrochen
<b>Gabellichtschranke</b> an der <b>x</b> -Spindel auf Seite des <b>Detektors</b>	GLSXD	1 = Lichtstrahl ist nicht unterbrochen, 0 = Lichtstrahl ist unterbrochen
<b>Gabellichtschranken</b> an der <b>y</b> -Spindel auf Seite der <b>Probe</b>	GLSYP	1 = keine der Lichtschranken ist unterbrochen, 0 = eine der Lichtschranken ist unterbrochen
<b>Gabellichtschranken</b> an der <b>y</b> -Spindel auf Seite des <b>Detektors</b>	GLSYD	1 = keiner der Lichtstrahlen ist unterbrochen, 0 = einer der Lichtstrahlen ist unterbrochen
<b>Federtaster</b> auf Seite des <b>Detektors</b>	FTD	1 = der Taster ist in Ruhelage, 0 = der Taster zeigt einen Ausschlag
<b>Federtaster</b> auf Seite der <b>Probe</b>	FTP	1 = der Taster ist in Ruhelage, 0 = der Taster zeigt einen Ausschlag
<b>Lichtvorhang</b> um den Aufbau	LV	1 = keine der Lichtschranken ist unterbrochen, 0 = eine oder mehrere Lichtschranken sind unterbrochen
<b>Druckschalter</b> im Vakuumrohr	DS	1 = der Schalter wurde durch Unterdruck ausgelöst, 0 = der Schalter ist nicht betätigt
<i>Ausgänge:</i>		
Ansteuerung des <b>probenseitigen Motors</b> auf der <b>x</b> -Spindel	MotorXP	1 = Motor fährt gemäß der Softwarevorgabe, 0 = Motor steht in letzter gegebener Position
Ansteuerung des <b>detektorseitigen Motors</b> auf der <b>x</b> -Spindel	MotorXD	1 = Motor fährt gemäß der Softwarevorgabe, 0 = Motor steht in letzter gegebener Position
Ansteuerung des <b>detektorseitigen Motors</b> auf der <b>y</b> -Spindel	MotorYP	1 = Motor fährt gemäß der Softwarevorgabe, 0 = Motor steht in letzter gegebener Position
Ansteuerung des <b>probenseitigen Motors</b> auf der <b>y</b> -Spindel	MotorYD	1 = Motor fährt gemäß der Softwarevorgabe, 0 = Motor steht in letzter gegebener Position

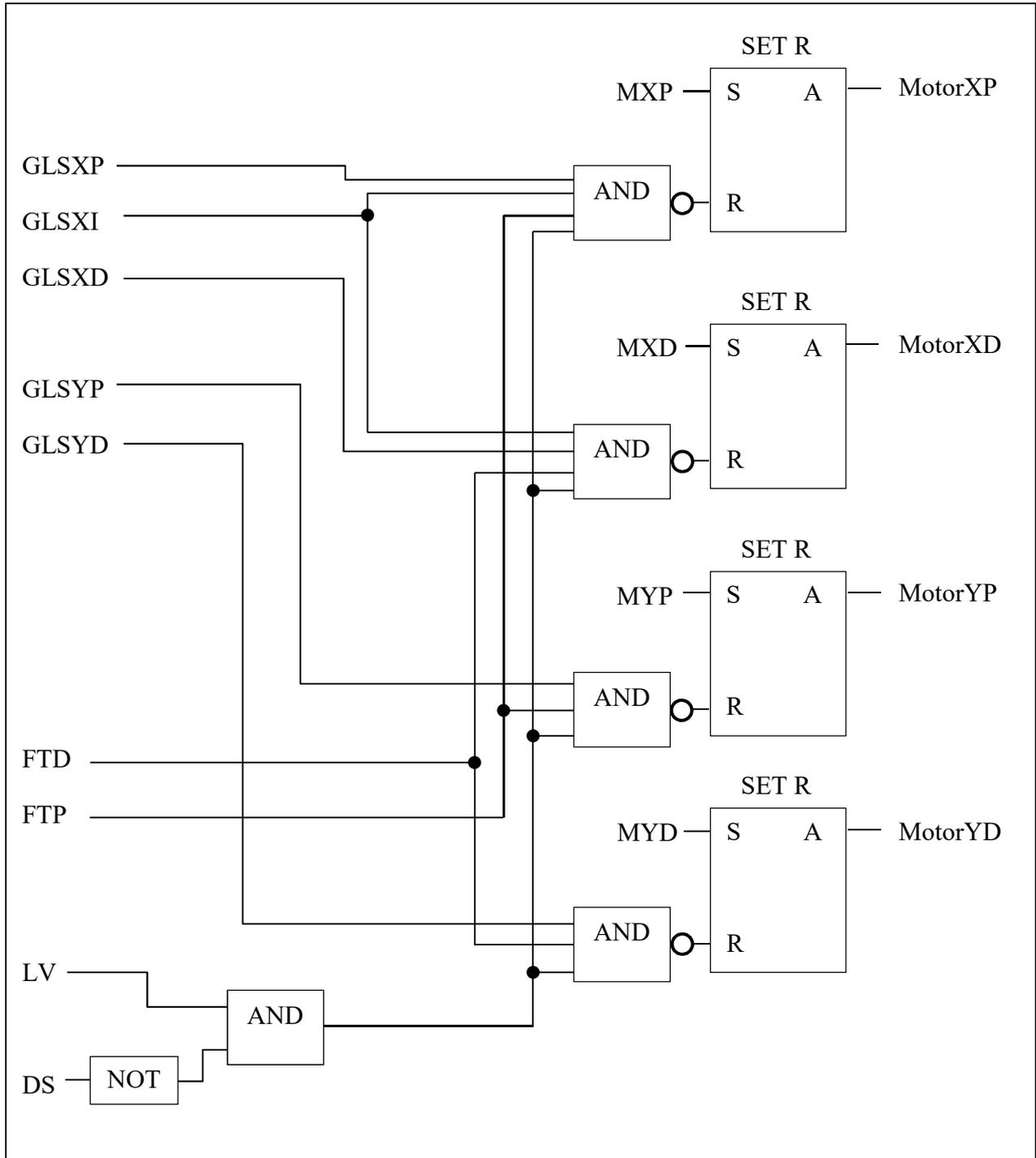


Abbildung 9-3: Funktionsblockdiagramm des Steuerkonzepts

## 10. Ausblick

Das erarbeitete Konzept ist als CAD-Modell fertig gestellt. In der nächsten Entwicklungsphase muss es noch detailliert nachgerechnet werden. Die Halterungen sollten auf Biegung berechnet und konstruktiv optimiert werden. Die in Kapitel 6 vordimensionierten Bauteile müssen nachgerechnet werden. Zusätzlich soll noch eine Möglichkeit zur vertikalen Verstellung in die Konstruktion integriert werden.

Nach der Optimierung auf Biegung ist gegebenenfalls eine Optimierung hinsichtlich der Fertigungsverfahren vorzunehmen. Die gewählten Blechteile sind auf die Herstellung mit einem Wasserstrahlschneider konzipiert, da dieser am DESY vorhanden ist. Die Fertigung kann dann nach Erstellung der Unterlagen beginnen.

Des Weiteren ist die bereits vorhandene Steuerung für die neuen Bauteile zu erweitern.

Eine Möglichkeit zur weiteren Entwicklung bietet die Konstruktion eines „Beamstops“ im detektorseitigen Teil des Vakuumrohres. Dieser ist innerhalb des Vakuumrohres eingebaut und kann in mehreren Achsen verfahren werden. Diese Entwicklung würde die Anlage um weitere Experimentiermöglichkeiten ergänzen.

## 11. Fazit

Ziel dieser Arbeit ist die Konstruktion eines flexiblen Vakuumrohres mit Hilfe konstruktiver Methoden. Dazu sind verschiedene Ansätze in den morphologischen Kasten eingeflossen. Die besonderen Schwerpunkte der Arbeit sind:

- die Auslegung der Membranbälge,
- die Entwicklung eines Teleskopsystems zur Stützung des Balgs und zur Kraftaufnahme,
- die Integration der neuen Entwicklung in die bereits vorhandene Experimentierhütte, die Untersuchung des Kraftflusses und Dimensionierung der Bauteile und
- die Erarbeitung eines Arbeitssicherheitskonzeptes.

Die Arbeit bietet außerdem einen Einblick in die wissenschaftliche und technische Funktionsweise des Messplatzes am DESY.

Der Grundgedanke war ursprünglich ein Vakuumrohr mit festem Mittelstück und zwei flexiblen Teilen. Nach mehreren Gesprächen im Gruppenmeeting und mit Herrn Döhrmann wurde entschieden, dass ein festes Rohrstück am detektorseitigen Ende vorteilhafter ist. Die ausgearbeitete Lösung ist damit unter Berücksichtigung der Wünsche der späteren Benutzer entstanden und trägt damit einen hohen Anteil zur Verbesserung des gesamten Messplatzes bei.

## Literaturverzeichnis

- [1] Böge A. 2009: Technische Mechanik. 28. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner
- [2] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 1990: DIN 1343. Referenzzustand, Normzustand, Normvolumen. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [3] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2010: DIN EN ISO 11161. Sicherheit von Maschinen – Integrierte Fertigungssysteme – Grundlegende Anforderungen. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [4] Feldhusen J., Grote K.-H. (Herausgeber) 2013: Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Berlin Heidelberg: Springer Verlag
- [5] Fischer U., Gomeringer R., Heinzler M., Kilgus R., Näher F., Oesterle S., Paetzold H., Stephan A. 2011: Tabellenbuch Metall. 45. Auflage. Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel
- [6] Lauth G., Kowalcyk J. 2015: Thermodynamik. Eine Einführung. Berlin: Springer-Verlag
- [7] Pläßmann W., Schulz D. (Herausgeber) 2014: Formeln und Tabellen Elektrotechnik. Arbeitshilfen für das technische Studium. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien
- [8] Stangl J., Mocuta C., Charmard V., Carbone D. 2014: Nanobeam X-Ray Scattering. Probing Matter at the Nanoscale. Weinheim: WILEY-VCH Verlag
- [9] Verein Deutscher Ingenieure 1998: Konstruktionsmethodik. Technisch-wirtschaftliches Konstruieren. Technisch-wirtschaftliche Bewertung. Blatt 3. Berlin: Beuth Verlag
- [10] Wittel H., Muhs D., Jannasch D., Voßiek J. 2013: Roloff/Matek Maschinenelemente. Normung Berechnung Gestaltung. 21. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien
- [11] Wittel H., Muhs D., Jannasch D., Voßiek J. 2013: Roloff/Matek Maschinenelemente. Tabellenbuch. Wiesbaden: Springer Fachmedien
- [12] Wutz M., Jousten K. (Herausgeber) 2013: Handbuch Vakuumtechnik. 11. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien

### Internet:

- [13] Comvat AG Haag 2016: Balganschlussteile, 2-teilig. In:  
<http://www.comvat.com/de/membranbaelge/balganschlussteile.html> (Zugriff 14.06.16)
- [14] Comvat AG Haag 2016: Membrane DN 200 Material AM350. In:  
<http://www.comvat.com/de/membranbaelge/membrane.html> (Zugriff 14.06.16)

- [15] Comvat AG Haag 2016: Was ist ein Membranbalg? In:  
<http://www.comvat.com/de/technik/was-ist-ein-membranbalg.html> (Zugriff 24.08.16)
- [16] DECTRIS Ltd. Baden-Dättwil 2016: EIGER X DETECTOR SERIES. In:  
[https://www.dectris.com/EIGER\\_X\\_Detectors.html#main\\_head\\_navigation](https://www.dectris.com/EIGER_X_Detectors.html#main_head_navigation)  
(Zugriff 14.06.16)
- [17] Deutsches Elektronen Synchrotron Hamburg 2016: Beamline P06 at sector 4. Beamline Layout. In:  
[http://photon-science.desy.de/facilities/petra\\_iii/beamlines/p06\\_hard\\_x\\_ray\\_micro\\_probe/beamline\\_layout/index\\_eng.html](http://photon-science.desy.de/facilities/petra_iii/beamlines/p06_hard_x_ray_micro_probe/beamline_layout/index_eng.html) (Zugriff 05.09.16)
- [18] Deutsches Elektronen Synchrotron Hamburg 2012: DESY-Lichtquelle PETRA III bietet Rekord-Röntgenblick.  
[http://www.desy.de/infos\\_services/presse/pressemeldungen/@@news-view?id=3421](http://www.desy.de/infos_services/presse/pressemeldungen/@@news-view?id=3421)  
(Zugriff 13.06.16)
- [19] Deutsches Elektronen Synchrotron Hamburg 2015: PETRA III. Röntgenstrahlungsquelle PETRA III. In:  
[http://www.desy.de/forschung/anlagen\\_projekte/petra\\_iii/index\\_ger.html](http://www.desy.de/forschung/anlagen_projekte/petra_iii/index_ger.html) (Zugriff 16.06.16)
- [20] Deutsches Elektronen Synchrotron Hamburg 2016: PETRA III. In:  
[http://photon-science.desy.de/facilities/petra\\_iii/index\\_eng.html](http://photon-science.desy.de/facilities/petra_iii/index_eng.html) (Zugriff: 23.08.16)
- [21] Deutsches Elektronen Synchrotron Hamburg 2016: Über DESY. In:  
[http://www.desy.de/ueber\\_desy/desy/index\\_ger.html](http://www.desy.de/ueber_desy/desy/index_ger.html) (Zugriff 08.09.16)
- [22] Diamond Materials GmbH 2016 Freiburg: Diamant-Vakuumfenster. In:  
[http://www.diamond-materials.com/DE/products/optical\\_windows/uhv\\_vacuum\\_windows.htm](http://www.diamond-materials.com/DE/products/optical_windows/uhv_vacuum_windows.htm) (Zugriff 22.06.16)
- [23] Hönig S., Hoppe R., Patommel J., Schropp A., Stephan S., Schöder S., Burghammer S., Schroer C. 2011: Full optical characterization of coherent x-ray nanobeams by ptychographic imaging. In:  
[https://www.osapublishing.org/DirectPDFAccess/A59D10CB-F66C-3CA3-5B2BABE952C9B7AB\\_221753/oe-19-17-16324.pdf](https://www.osapublishing.org/DirectPDFAccess/A59D10CB-F66C-3CA3-5B2BABE952C9B7AB_221753/oe-19-17-16324.pdf) (Zugriff 13.06.16)
- [24] NEFF Gewindetribe GmbH 2016 Heilbronn: Katalog Gewindetribe Spindelhubelemente. In:  
<http://www.neff-gewindetribe.de/downloads/neff-de.pdf> (Zugriff: 22.08.16)

[25] novotek Vakuumtechnik GmbH Magstadt 2016: ISO-Zentrierring Al. In:  
<http://www.novotek.de/Klammerflanschbauteile-ISO-K/ISO-Zentrierring-AlPerb-DN-200-b210-c213-d39-e8.html> (Zugriff 25.08.16)

[26] Phytron GmbH 2016 Gröbenzell: ZSH Schrittmotoren. Robust. Kraftvoll. Zuverlässig.  
In:  
[ftp://ftp.phytron.de/datasheets/stepper\\_motors/zsh-de.pdf](ftp://ftp.phytron.de/datasheets/stepper_motors/zsh-de.pdf) (Zugriff: 23.08.16)

**Sonstige:**

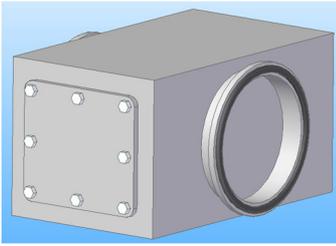
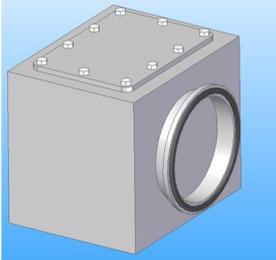
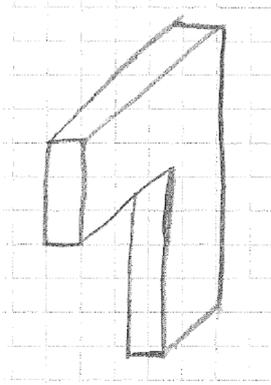
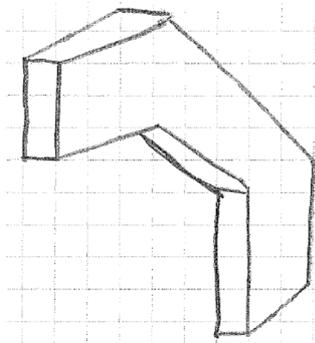
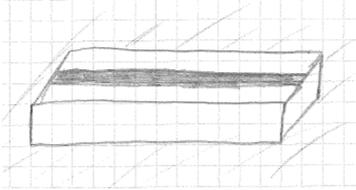
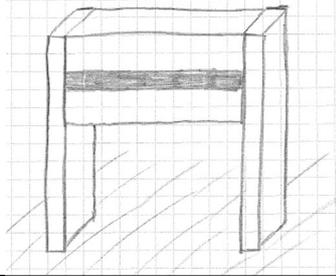
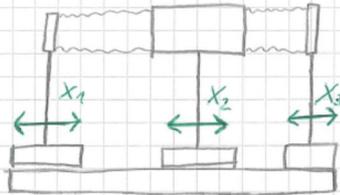
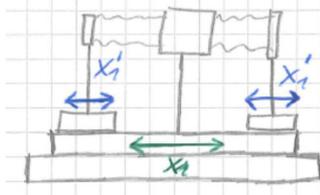
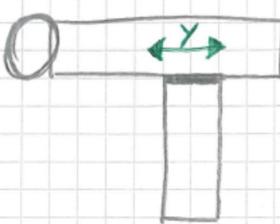
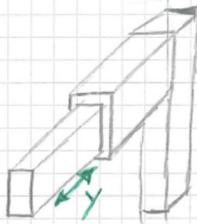
[27] Deutsches Elektronen Synchrotron Hamburg 2016: Internes Datenarchiv.  
(Zugriff 16.06.16)

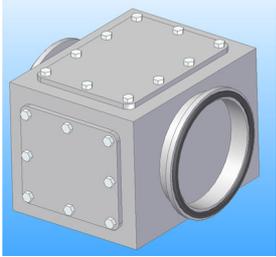
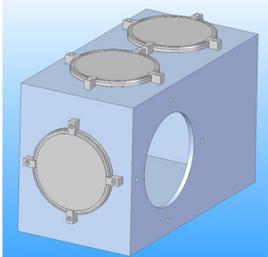
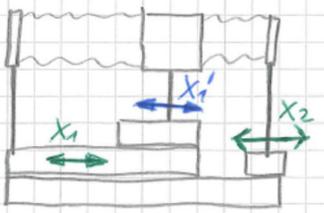
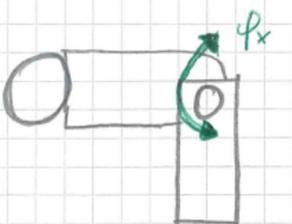
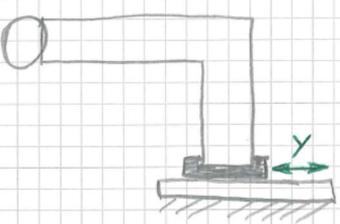
[28] Deutsches Elektronen Synchrotron Hamburg 2016: SharePoint CAD Datenarchiv.  
(Zugriff 22.06.16)

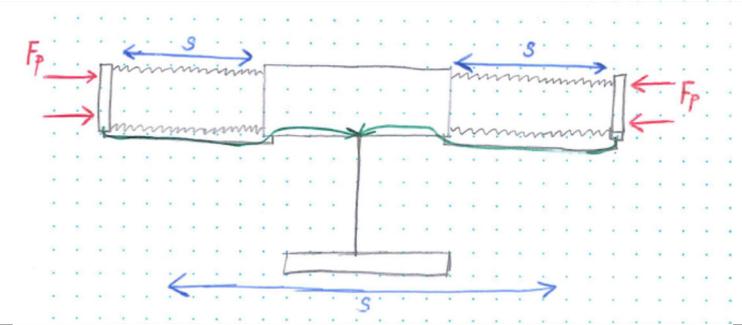
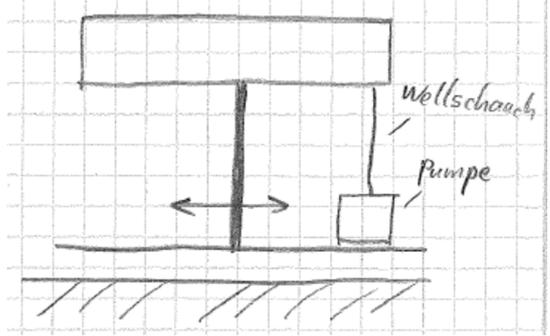
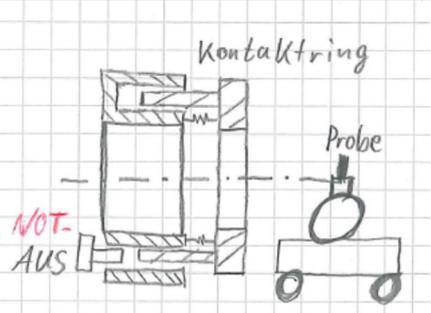
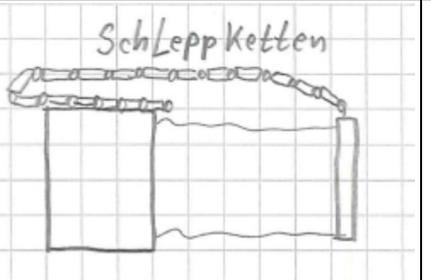
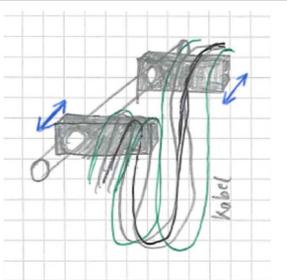
## **Anhang**

- Morphologischer Kasten
- Lösungsvorschläge
- Gewichtungsmatrix

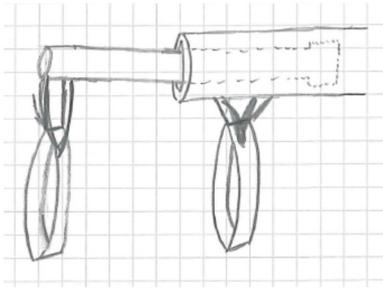
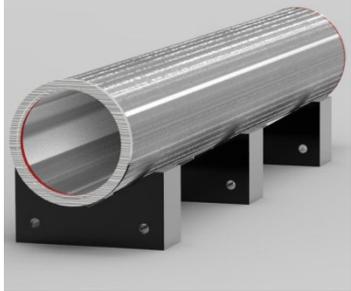
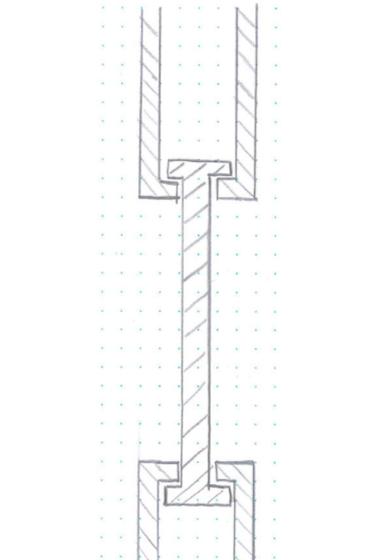
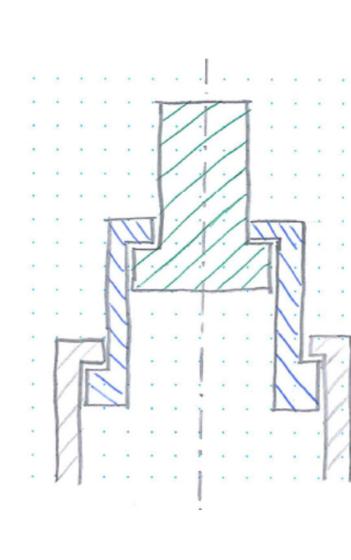
# Morphologischer Kasten

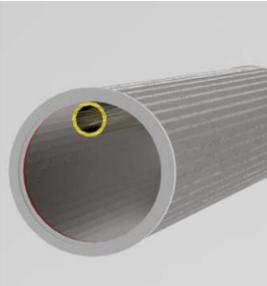
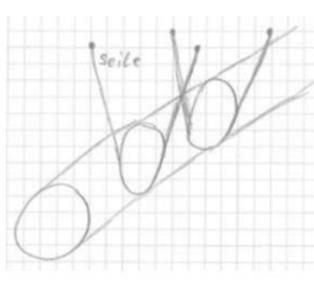
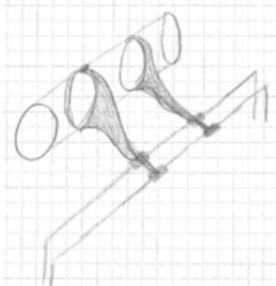
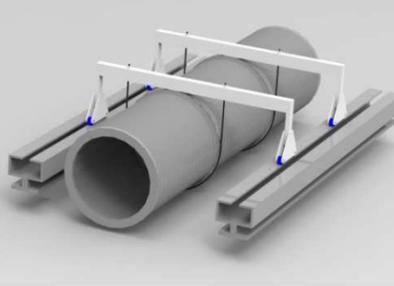
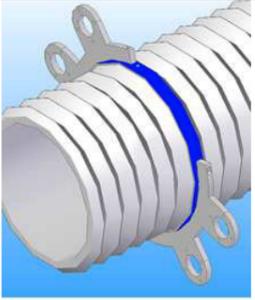
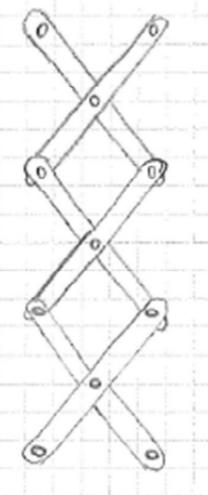
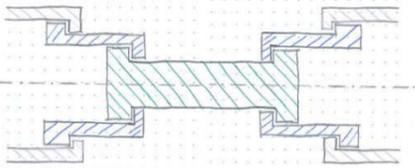
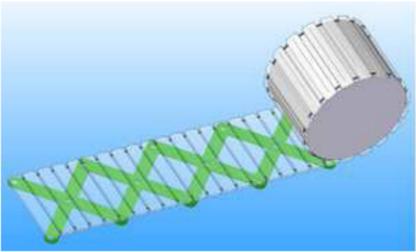
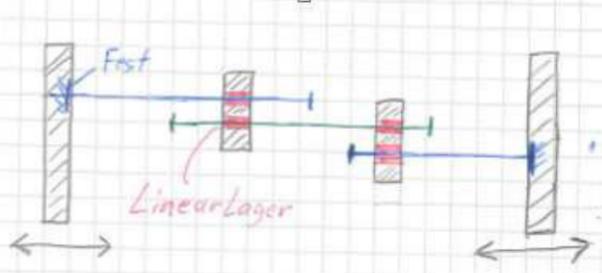
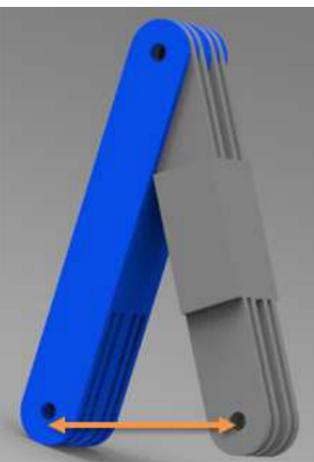
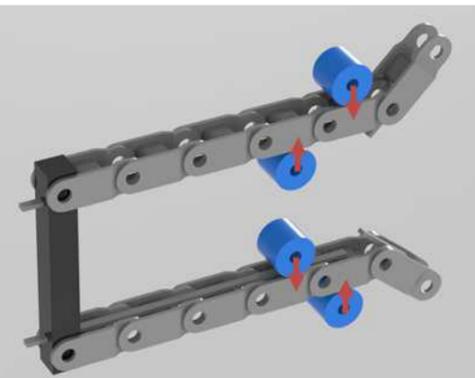
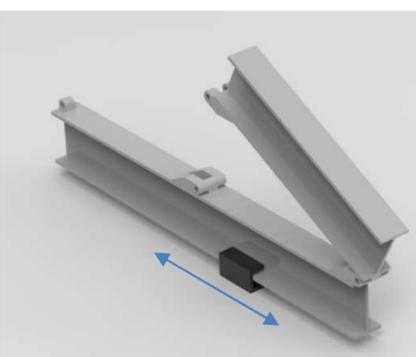
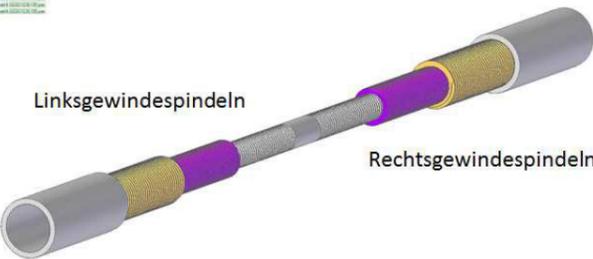
<b>Mittelstück</b>	Form		Rohr	Kasten
	Material		Edelstahl	Aluminium
	Verbindungs- verfahren		Schrauben	Schweißen
	Öffnung			
<b>Rahmen</b>	Stützen	Form		
		Aufbau	Vollmaterial	Fachwerk
	Führung	Lage		
	Bewegung	Strahl- richtung		
		Senkrecht zur Strahl- richtung		

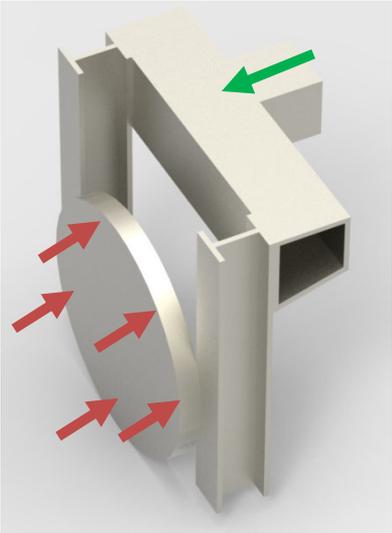
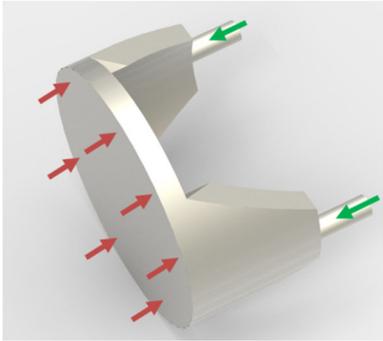
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Keramik	Titan			
Löten	Guss teil			
				
Hohlprofil				
				
				

Rahmen	Aufhängungsart			
	Vakuum	Pumpenverbindung		
	Vakuumkontrolle		Kapazitätsvakuummeter	Wärmeleitungs- vakuummeter
Sicherheit	Überdruckschutz		Druckschalter als NOT AUS	3) Überdruck Sicherheitsventil 
	Endlagensicherung	Innen	Seilzug Drehgeber	Ultraschall
		Außen	Seilzug Drehgeber	Ultraschall
	Kollisions-sicherung			Lichtschanke
Kabelmanagement	Längenverstellung			

Druckschalter öffnet Sicherheitsventil	Druckschalter überwacht Vakuum	
Lichtschranke	Induktiv	Mechanischer Schalter/Taster
Lichtschranke	Induktiv	Mechanischer Schalter/Taster
Ultraschall Abstand	NOT AUS Schalter Handbetätigt	Federstab Taster
Kohlebürstenkontakte		

<b>Balg</b>	Durchbiegungskompensation	Halterung		
		Ausfahrprinzip		
<b>Führung</b>	Ausfahrprinzip mit Kraftaufnahme			
	Getriebe	Bewegungs Synchronisierung	Zahnriemen	Stirnrad
Rotation -> Translation		Spindel	Zahnstange	

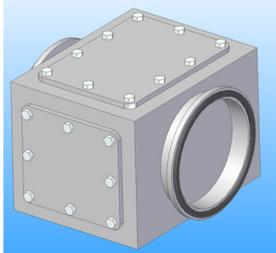
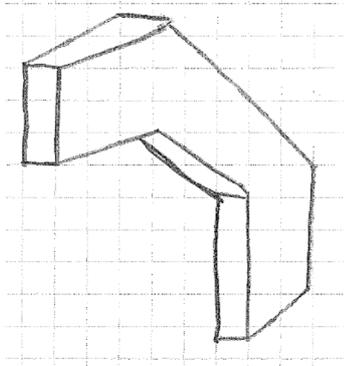
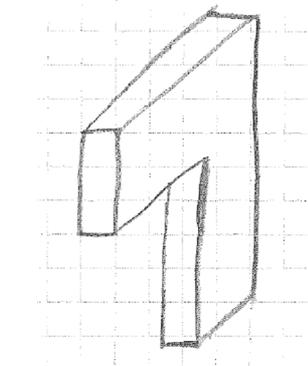
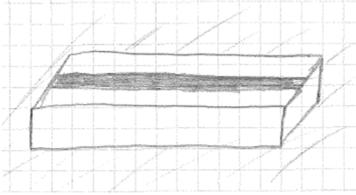
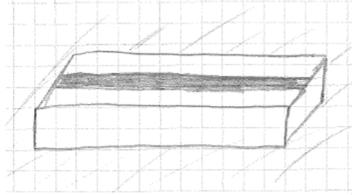
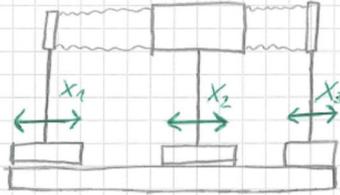
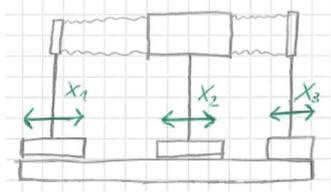
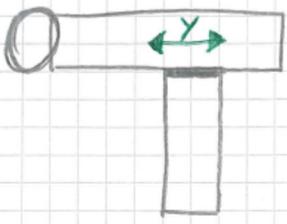
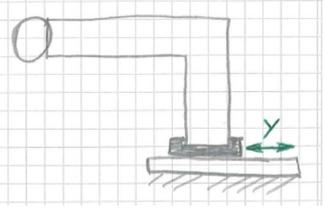
					
					
					
<p>4)</p> <p>Ketten</p>				<p>5)</p> <p>2)</p>	
<p>Seil / Gurt auf wickeln</p>					

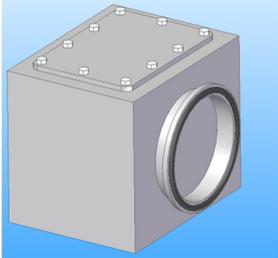
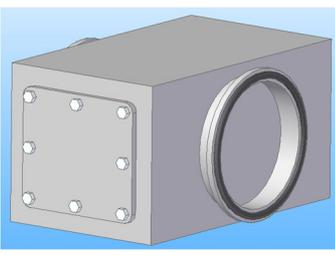
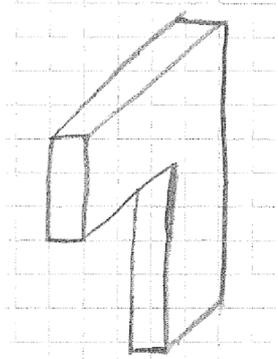
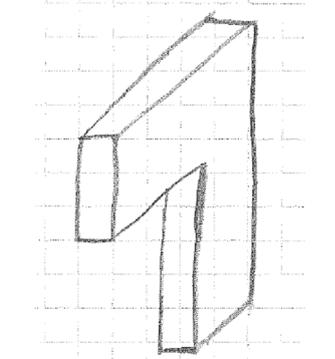
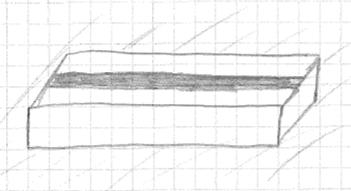
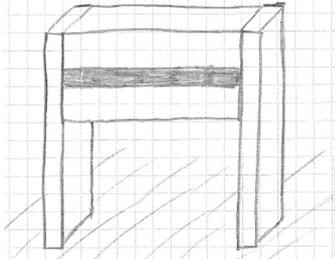
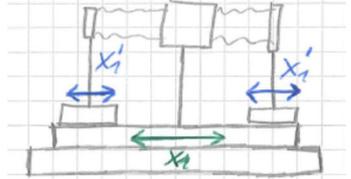
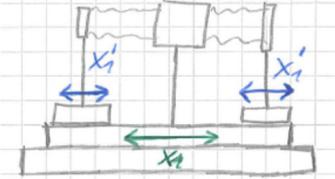
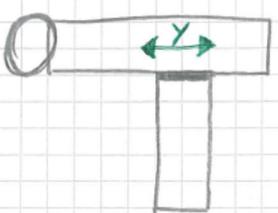
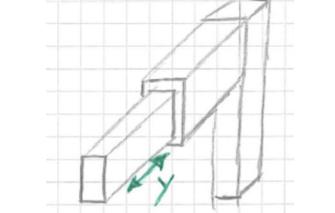
<b>Führung</b>	<b>Kraftverteilung</b>		
	<b>Motoren</b>	2-Phasen Schrittmotor	Servomotor
	<b>Bewegungs-sicherung</b>	Spindel mit Selbsthemmung	Elektromagnetische Bremse

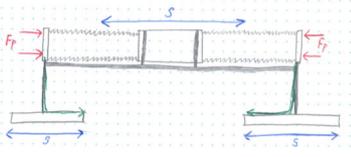
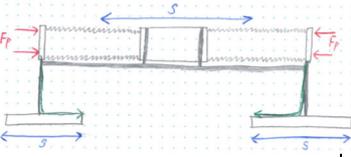
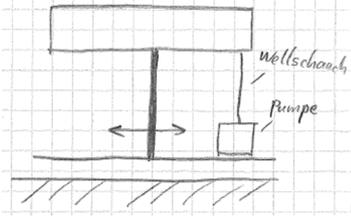
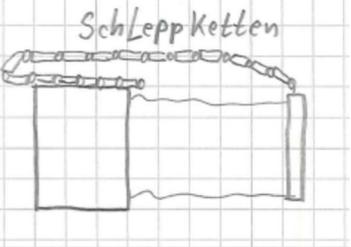
**Tabelle 1: Bilder Quellen**

1)	<a href="http://www.neff-gewindetriebe.de/downloads/20150930_Produktflyer_Teleskopgewinde_A4_RGB.PDF">http://www.neff-gewindetriebe.de/downloads/20150930_Produktflyer_Teleskopgewinde_A4_RGB.PDF</a>
2)	<a href="https://www.jlg.com/-/media/jlg/current-materials-no-password/products/europe%20-%20ce/jlg%20telehandlers/ps%20series/4014ps%20series%20ii/images/4014ps-gallery-silos.png?mw=320?w=100&amp;mw=320?w=100">https://www.jlg.com/-/media/jlg/current-materials-no-password/products/europe%20-%20ce/jlg%20telehandlers/ps%20series/4014ps%20series%20ii/images/4014ps-gallery-silos.png?mw=320?w=100&amp;mw=320?w=100</a>
3)	<a href="https://www.druckluft-fachhandel.de/Vollhub-Sicherheitsventil-DN8-G1-4-226.01?c=485">https://www.druckluft-fachhandel.de/Vollhub-Sicherheitsventil-DN8-G1-4-226.01?c=485</a>
4)	<a href="http://www.albrecht-liftsysteme.de/hebebuehnen.html">http://www.albrecht-liftsysteme.de/hebebuehnen.html</a>
5)	<a href="http://www.norelem.de/de/de/Produkte/Produkt%C3%BCbersicht/Systeme-Komponenten-Maschinenbau-Anlagenbau/Schlittenf%C3%BChrungen-F%C3%BChrungsschienen-Positioniertische-Miniaturgleitf%C3%BChrungen-Positionsanzeiger/Rollenf%C3%BChrungsschienen/Teleskopschienen-Doppelanordnung.html">http://www.norelem.de/de/de/Produkte/Produkt%C3%BCbersicht/Systeme-Komponenten-Maschinenbau-Anlagenbau/Schlittenf%C3%BChrungen-F%C3%BChrungsschienen-Positioniertische-Miniaturgleitf%C3%BChrungen-Positionsanzeiger/Rollenf%C3%BChrungsschienen/Teleskopschienen-Doppelanordnung.html</a>

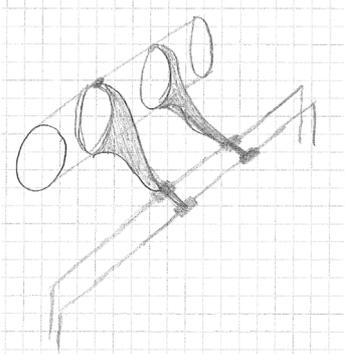
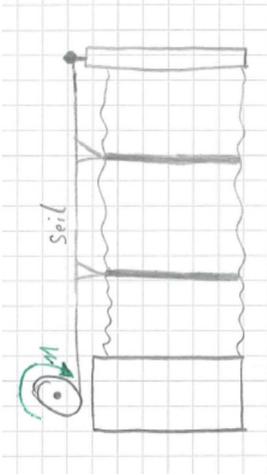
<p style="text-align: center;">Schneckengetriebe</p>	

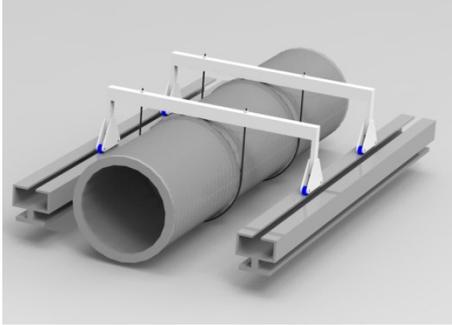
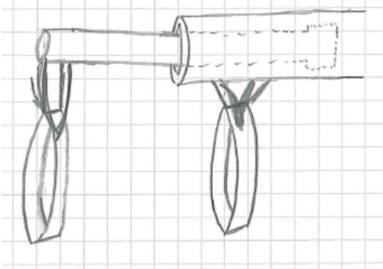
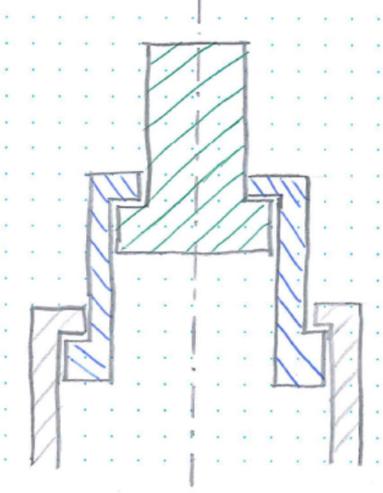
Funktionen		Lösungsvorschlag 1	Lösungsvorschlag 2	
<b>Mittelstück</b>	Form	Rohr	Kasten	
	Material	Edelstahl	Edelstahl	
	Verbindungs- verfahren	Schweißen	Schweißen	
	Öffnung			
<b>Rahmen</b>	Stützen	Form		
		Aufbau	Vollmaterial	Hohlprofil
	Führung	Lage		
	Bewegung	Strahl- richtung		
		Senkrecht zur Strahl- richtung		

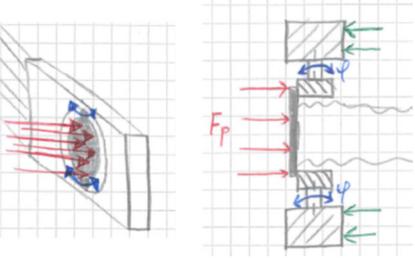
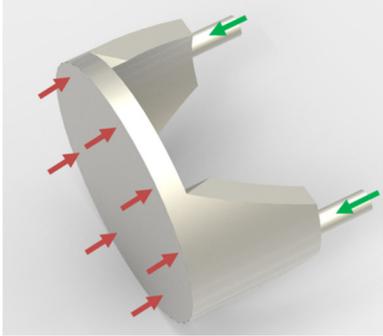
Lösungsvorschlag 3	Lösungsvorschlag 4
Kasten	Kasten
Edelstahl	Aluminium
Löten	Guss teil
	
	
Fachwerk	Hohlprofil
	
	
	

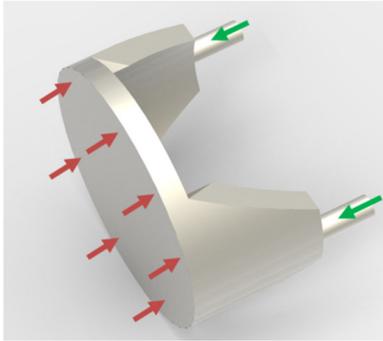
<b>Rahmen</b>	Aufhängungsart			
		<b>Vakuum</b>	Pumpenverbindung	
	Vakuumkontrolle		Wärmeleitungs-vakuummeter	Wärmeleitungs-vakuummeter
<b>Sicherheit</b>	Überdruckschutz		Druckschalter überwacht Vakuum	Sicherheitsventil
	Endlagensicherung	Innen	Lichtschanke	Induktiv
		Außen	Lichtschanke	Induktiv
Kollisions-sicherung		Federstab Taster	Lichtschanke	
<b>Kabelmanagement</b>	Längenverstellung			

<p>Wärmeleitungs-vakuummeter</p>	<p>Wärmeleitungs-vakuummeter</p>
<p>Druckschalter öffnet Sicherheitsventil</p>	<p>Druckschalter öffnet Sicherheitsventil</p>
<p>Mechanischer Schalter/Taster</p>	<p>Mechanischer Schalter/Taster</p>
<p>Ultraschall</p>	<p>Seilzug Drehgeber</p>

<b>Balg</b>	Durchbiegungskompensation	Halterung		
		Ausfahrprinzip		Keins (Stange mit fester Länge)
<b>Führung</b>	Ausfahrprinzip mit Kraftaufnahme		keins nötig	keins nötig
	Getriebe	Bewegungs Synchronisierung	keine nötig	keine nötig
		Rotation -> Translation	Spindel	Spindel

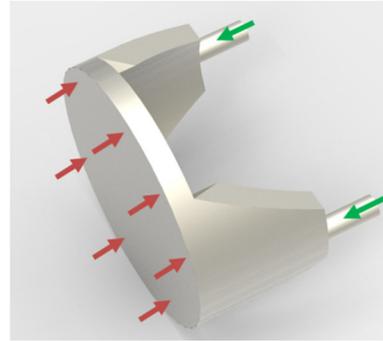
	
<p>Keins (Schiene mit fester Länge)</p>	
	
<p>Zahnriemen</p>	<p>Stirnrad</p>
<p>Zahnstangen</p>	<p>Spindel</p>

<b>Führung</b>	Kraftverteilung			
	Motoren		2-Phasen Schrittmotor	2-Phasen Schrittmotor
	Bewegungs-sicherung		Elektromagnetische Bremse	Schneckengetriebe



2-Phasen Schrittmotor

Schneckengetriebe



2-Phasen Schrittmotor

Spindel mit Selbsthemmung

		Gewichtungsmatrix <b>Flexibles Vakuumrohr</b>																											
Nr.	aus:	Bewertungskriterium	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Σ +	G		
1	Wünsche Anforderungsliste	modularer Aufbau	X	+	-	-	+	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	18	7,79		
2		Gewicht kleiner 40 kg	-	X	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-	+	13	5,63	
3		minimale Länge unter 1100 mm	+	+	X	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	21	8,30	
4		2-Phasen Schrittmotor verwendbar	+	+	+	X	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	22	8,70	
5		Sicherung gegen Kollisionen softwareseitig	-	-	-	-	X	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	+	11	4,76	
6		Sicherung gegen Kollisionen durch Sensoren	-	+	-	-	+	X	-	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	17	7,36	
7		Mittelstück relativ verfahrbar	+	+	-	-	+	+	X	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	19	7,51	
8	Vor- und Nachteile der Aufhängungsart	kompakte Bauweise	-	-	-	-	-	-	-	X	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+	+	-	+	-	+	8	3,46		
9		Schienensystem am Boden möglichst platzsparend	-	-	-	-	-	-	+	-	X	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,43	
10		Schwingungsreduzierung der Enden	+	+	-	-	+	+	-	+	+	X	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	20	7,91	
11		einfache einfahrbare Kraftaufnahme	-	+	-	-	+	-	-	+	+	-	X	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	16	6,93	
12		Komplexität der Steuerung gering	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0,00	
13		Begünstigung zukünftiger Funktionen	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	X	-	-	-	+	+	+	+	-	+	-	+	7	3,03	
14		Nutzbarkeit des Bauraums am Mittelstück	-	-	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	X	-	+	+	+	+	+	+	+	-	+	12	5,19	
15		geringe Komplexität der mechanischen Synchronisierung	-	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	X	-	+	+	+	+	+	+	+	+	15	6,49	
16		Umbau- und Montagefreundlichkeit	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	X	+	+	+	+	-	+	-	+	9	3,90	
17		Am DESY erprobte Technik verwendet	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	X	-	+	+	+	-	+	-	+	6	2,60
18		einfache Lagerungen	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	X	-	+	-	+	-	+	5	2,16	
19	geringe Dimension der Standfüße (Momentaufnahme)	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	2	0,87		
20	Wirtschaftlichkeit	Herstellungsaufwand	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	X	-	+	10	4,33		
21		Betriebskosten	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	X	-	-	3	1,30	
22		Anschaffungskosten	-	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	X	+	14	6,06	
23		Wartungsaufwand	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+	-	X	4	1,73	
Datum: 13.07.16			Bearbeitung durch: Hendrik Lindemann																				Gesamt:	231	100				



## 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: Lindemann

Vorname: Hendrik

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

Entwicklung einer Vakuumröhre für einen Speicherring-Röntgenstrahl-Messplatz

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

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

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

Hamburg

Ort

08.09.2016

Datum

Unterschrift im Original