

# Methodische Entwicklung von Experimentkomponenten für einen 6-Kreis-Diffraktometer-Aufbau

Bachelorthesis

Vorgelegt an der Fakultät Technik und Informatik

der

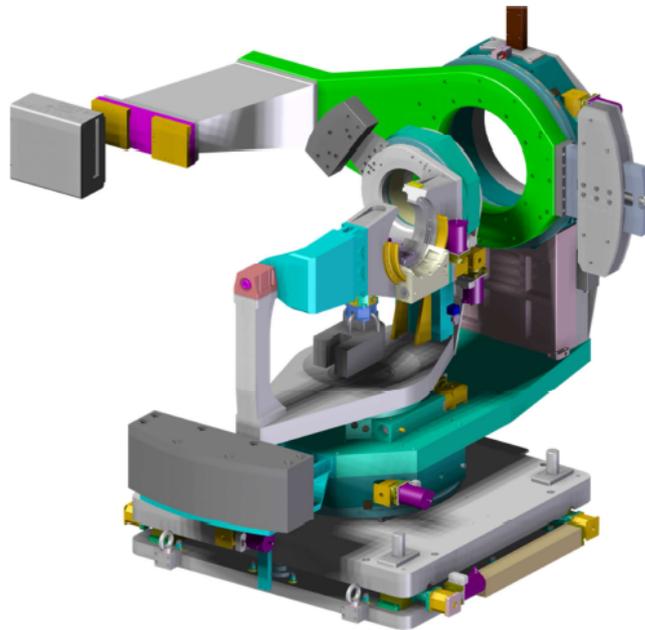
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Engineering (B.Eng.)

im Studiengang

Maschinenbau / Entwicklung und Konstruktion



von

Daniel Weschke

Februar 2013

---

## Kurzfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der methodischen Entwicklung von Experimentkomponenten zum Ausbau eines 6-Kreis-Diffraktometer-Aufbaus für Experimente mit hochenergetischer Röntgenstrahlung an der Kohärenzbeamline P10 von PETRA III des Deutschen Elektronen Synchrotron Hamburg.

Es wird die Entwicklung eines Probenhalters und eines motorisierten Strahl-Absorbers sowie von zwei adaptiven Flugrohre zur Minimierung von Streueffekten durch die Luft und eines Detektorhalters mit Peripheriezuleitung für verschiedene Detektoren methodisch erarbeitet. Dabei wird auf die Theorie und Konzeptarbeit sowie die anschließenden Lösungsabsicherung eingegangen.

## Abstract

This thesis is concerned with the methodological development of experiment components to extend a 6-circle diffractometer structure for experiments with high energy X-rays at the coherence beamline P10 at PETRA III at DESY.

The development of a sample holder and a motorized beamstop and two adaptive fly tubes to minimize scattering effects through the air and a detector holder with peripheral supply line for different detectors is developed methodically. This includes the theory and concept formulation as well as the following hedging of the solution.

**Erstprüfer:** Prof. Dr.-Ing. Jan Holländer  
Professor für Maschinenelemente und CAD  
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

**Zweitprüfer:** Dr. Michael Sprung  
Beamline Scientist at PETRA III, P10 Coherence Applications Beamline  
Deutsches Elektronen-Synchrotron Hamburg

Daniel Weschke  
Kühlungsborner Str. 56 · 22147 Hamburg  
daniel.weschke@gmail.com  
Hamburg, 28. Februar 2013

---

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis . . . . .	v
Tabellenverzeichnis . . . . .	vi
Formelzeichen und Abkürzungen . . . . .	viii
<b>1 Einleitung . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation mit Problemstellung . . . . .	2
1.2 Aufgabenstellung . . . . .	2
1.3 Kurzbeschreibung der Vorgehensweise zur Lösung der Aufgaben . . . . .	4
<b>2 Theorie . . . . .</b>	<b>6</b>
2.1 Deutsches Elektronen-Synchrotron . . . . .	6
2.2 Röntgenstrahlungsquelle PETRA III . . . . .	7
2.3 Kohärenzbeamline P10 . . . . .	9
2.4 Anwendungsgrenzen, Schwierigkeiten und Anforderungen an neue Konzepte . . . . .	10
2.5 Methodische Konstruktion . . . . .	11
2.6 Berechnung und Simulation . . . . .	14
<b>3 Konzepterarbeitung . . . . .</b>	<b>17</b>
3.1 Probenhalter für Standardprobensätze . . . . .	19
3.1.1 Anforderungen und Funktionsanalyse . . . . .	19
3.1.2 Morphologie, Lösungsprinzipien und Bewertung . . . . .	21
3.1.3 Gestaltung . . . . .	25
3.2 Motorisierter Strahl-Absorber zwischen Probenhalter und Detektor	31
3.2.1 Anforderungen und Funktionsanalyse . . . . .	31
3.2.2 Morphologie, Lösungsprinzipien und Bewertung . . . . .	33
3.2.3 Gestaltung . . . . .	38
3.3 Zwei adaptive Flugrohre zur Minimierung von Streueffekten durch die Luft . . . . .	44
3.3.1 Anforderungen und Funktionsanalyse . . . . .	44

3.3.2 Morphologie, Lösungsprinzipien und Bewertung . . . . .	45
3.3.3 Gestaltung . . . . .	49
3.4 Detektorhalter sowie Peripheriezuleitung für verschiedene Detektoren . . . . .	55
3.4.1 Anforderungen und Funktionsanalyse . . . . .	55
3.4.2 Morphologie, Lösungsprinzipien und Bewertung . . . . .	57
3.4.3 Gestaltung . . . . .	60
<b>4 Lösungsabsicherung . . . . .</b>	<b>66</b>
4.1 Statischer Nachweis . . . . .	66
4.2 FEM-Analyse . . . . .	67
<b>5 Zusammenfassung und kritische Bewertung . . . . .</b>	<b>71</b>
<b>Literatur . . . . .</b>	<b>73</b>
<b>Anhang . . . . .</b>	<b>76</b>
<b>Auflistung der zu erklärenden Begriffe . . . . .</b>	<b>105</b>
<b>Stichwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>106</b>

---

## Abbildungsverzeichnis

1	Freiheitsgrade des 6-Kreis-Diffraktometer-Aufbaus . . . . .	3
2	Transmissionsfilter von Luft und Helium auf eine Strecke von 2 m . . . . .	4
3	Übersicht von DESY mit seinen Teilchenbeschleunigern . . . . .	6
4	PETRA III-Halle . . . . .	7
5	Transmissionsfilter von Kupfer bei einer Dicke von 200 $\mu\text{m}$ . . . . .	11
6	Größenumsatz einer Funktion . . . . .	13
7	6-Kreis-Diffraktometer-Aufbau . . . . .	18
8	Drehzentrum des Diffraktometers . . . . .	19
9	Gesamtfunktion des Probenhalters . . . . .	20
10	Funktionsstruktur des Probenhalters . . . . .	21
11	Diffraktometer-Ausschnitt für Probenhalter . . . . .	25
12	Einzelteile des Probenhalters . . . . .	26
13	Gesamtaufbau des Probenhalters . . . . .	30
14	Gesamtfunktion des Strahl-Absorbers . . . . .	32
15	Funktionsstruktur des Strahl-Absorbers . . . . .	33
16	Aufbau runder Strahl-Absorber . . . . .	34
17	Aufbau von Strahl-Absorptions-Blenden . . . . .	34
18	Seitenansicht des Diffraktometers . . . . .	39
19	X 95 Profile System von Qioptiq . . . . .	39
20	Lineareinheit LX2001-B1-T2028-100 von MISUMI . . . . .	40
21	Transmissionsfilter von Ta und W bei einer Dicke von 100 $\mu\text{m}$ . . . . .	41
22	Transmissionsfilter von Ta und W bei einer Dicke von 100 $\mu\text{m}$ . . . . .	42
23	Gesamtaufbau des Strahl-Absorbers . . . . .	43
24	Gesamtfunktion der Flugrohre . . . . .	44
25	Funktionsstruktur der Flugrohre . . . . .	45
26	Diffraktometer-Draufsicht mit Strahlenkegel für Flugrohr mit 135 mm Austrittsfenster und 2 m Länge . . . . .	49
27	Flanschverbindung des Flugrohrs . . . . .	53
28	Halteungen des Flugrohrs . . . . .	54
29	Gesamtaufbau des Flugrohrs . . . . .	54
30	Gesamtfunktion des Detektorhalters . . . . .	56

---

31	Funktionsstruktur des Detektorhalters . . . . .	56
32	Halterungen des Detektorhalters – Biege-Variante . . . . .	62
33	Halterungen des Detektorhalters – Schraub-Variante . . . . .	63
34	Schiene des Detektorhalters . . . . .	64
35	Gesamtaufbau des Detektorhalters . . . . .	65
36	Biegelinie des Probenhalters mit 2kg Probe . . . . .	67
37	Flugrohr mit Detektorhalter . . . . .	68
38	FEM-Lasteinleitung der Schiene . . . . .	69
39	FEM-Verschiebung der Schiene ohne zusätzlichen Fenster . . . . .	70
40	6-Kreis-Diffraktometer-Aufbau mit den zu entwickelnden Experimentkomponenten . . . . .	72

## Tabellenverzeichnis

1	Morphologischer Kasten des Probenhalters . . . . .	22
2	Binäre Gewichtungsmatrix des Probenhalters . . . . .	24
3	Bewertungsliste des Probenhalters . . . . .	24
4	Übersicht einiger Werkstoffeigenschaften . . . . .	27
5	Morphologischer Kasten des Strahl-Absorbers . . . . .	36
6	Binäre Gewichtungsmatrix des Strahl-Absorbers . . . . .	37
7	Bewertungsliste des Strahl-Absorbers . . . . .	38
8	Morphologischer Kasten der Flugrohre . . . . .	46
9	Binäre Gewichtungsmatrix der Flugrohre . . . . .	48
10	Bewertungsliste der Flugrohre . . . . .	48
11	Durchmesser für Flugrohr mit 60 mm Austrittsfenster . . . . .	50
12	Durchmesser für Flugrohr mit 135 mm Austrittsfenster . . . . .	50
13	Minimale Wandstärken der Flugrohrabschnitte . . . . .	51
14	Reihe A Rohrmaße nach DIN 11850 – Reihe 2 . . . . .	52
16	Morphologischer Kasten des Detektorhalters . . . . .	58
15	Binäre Gewichtungsmatrix des Detektorhalters . . . . .	59
17	Bewertungsliste des Detektorhalters . . . . .	59

18 Anschluss-, Abmaße und Gewicht der Detektoren . . . . .	61
19 FEM-Verschiebung der Schiene . . . . .	70

---

## Formelzeichen und Abkürzungen

### Symbole

$A$	$\text{mm}^2$	Fläche
$A_{\text{PH}}$	$\text{mm}^2$	Querschnittsfläche der Isolierplatte vom Probenhalter
$a_{\text{p}}$		Parameter zur Bestimmung des kritischen Drucks
$a_i$		Freiwerte
$c$	$\text{J/kg K}$	spezifische Wärme
$d$	$\text{mm}$	Dicke
$d_a$	$\text{mm}$	Außendurchmesser
$d_i$	$\text{mm}$	Innendurchmesser
$d_{\text{PH}}$	$\text{mm}$	Dicke der Isolierplatte vom Probenhalter
$E$	$\text{MPa}$	Elastizitätsmodul
$g$	$\text{m/s}^2$	Erdbeschleunigung
$g_i$		Gewichtungsfaktor
$h$	$\text{mm}$	Wandstärke
$I$	$\text{m}^4$	Flächenträgheitsmoment
$\vec{j}$	$\text{W/m}^2$	Wärmestromdichte
$l$	$\text{mm}$	Länge
$L$	$\text{mm}$	Gesamtlänge
$m$	$\text{kg}$	Masse
$P_i$		Gewichtungs-Punkte
$p_c$	$\text{MPa}$	Beulendruck
$p_K$	$\text{MPa}$	Beulendruck
$\dot{Q}$	$\text{W}$	Wärmeleistung bzw. Wärmestrom
$\dot{Q}_{\text{PH}}$	$\text{W}$	Wärmeleistung der Isolierplatte vom Probenhalter
$q$	$\text{N/m}$	Linienlast
$R$	$\text{mm}$	mittlerer Radius
$T$	$\text{K}$	Temperatur
$\Delta T$	$\text{K}$	Temperaturdifferenz
$\Delta T_{\text{PH}}$	$\text{K}$	Temperaturdifferenz der Isolierplatte vom Probenhalter
$t$	$\text{mm}$	Wandstärke
$v$	$\text{mm}$	Auslenkung

$w$	m	Durchbiegung
$\alpha$	K <sup>-1</sup>	Längenausdehnungskoeffizient
$\eta$	W/m <sup>3</sup>	Wärmeleistungsdichte
$\lambda$	W/m K	Wärmeleitfähigkeit
$\lambda_{\text{PEEK}}$	W/m K	Wärmeleitfähigkeit von PEEK
$\nu$		Querkontraktionszahl
$\Pi$		Funktional / Potenzial
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$\sigma_{\text{Mises}}$	MPa	Vergleichsspannung nach Mises
$\varphi_i$		Ansatzfunktionen

#### Abkürzungen

CAD	Computer Aided Design
CDI	Coherent Diffraction Imaging
FEM	Finite Element Methode
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
PEEK	Polyetheretherketon
USAXS	Ultra-Small Angle X-ray Scattering
SAXS	Small-Angle X-ray Scattering
VUV	Vakuultraviolett
WAXS	Wide Angle X-ray Scattering
XPCS	X-Ray Photon Correlation Spectroscopy

#### Namen und Bezeichnungen

DESY	Deutsche Elektronen-Synchrotron
PETRA	Positron-Elektron-Tandem-Ring-Anlage
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

---

# 1 Einleitung

Das Deutsche Elektronen-Synchrotron (DESY) in Hamburg betreibt die weltweit brillanteste Speicherring-Röntgenstrahlungsquelle mit der Namenszusammenstellung Positron-Elektron-Tandem-Ring-Anlage (PETRA) III. Dabei wird nach HINTERBERGER [1] unter Brillanz, die Phasenraumdichte eines Elektronen- oder Ionenstrahls verstanden. Genauer gesagt, berücksichtigt die Brillanz neben den normalisierten Emittanzen auch die Impulsunschärfe des Strahls.

Die PETRA III stellt als Synchrotronstrahlungsquelle der dritten Generation für bisher 14 Strahlführungen – die als Beamlines bekannt sind – Röntgenlicht bereit. An den jeweiligen Beamlines von PETRA III stehen mehrere Messstationen für unterschiedliche Experimente bereit. So auch an der Beamline P10 für kohärente Streumethoden.

Kohärente Wellen sind zum ersten Verständnis nach STÖCKER: *Taschenbuch der Physik* [2] zwei Wellen mit einer nicht von der Zeit abhängende Phasendifferenz. Es muss aber der räumlichen und zeitlichen Aspekt der Kohärenz weiter verstanden werden, auf die hier nicht weiter eingegangen werden soll.

Eine dieser Messstationen ist ein 6-Kreis-Diffraktometer-Aufbau für Streuexperimente bei großen Streuvektoren  $Q$  in vertikaler sowie horizontaler Streugeometrie. Aufgebaut und in Betrieb genommen ist der 6-Kreis-Diffraktometer der Firma *HUBER Diffraktionstechnik*<sup>1</sup> an der Beamline P10 seit Anfang 2013.

Zur Durchführung von geplanten Experimenten am Diffraktometer werden zusätzliche Konstruktionen benötigt. Es werden Halterungen für Proben und Detektoren benötigt. Ebenso ein Absorber, der den transmittierten direkten Strahl abfängt. Und zwei unterschiedliche Flugrohre die jeweils die Absorption des gestreuten Signals von der Probe zum Detektor minimiert. Zu diesen Konstruktionen werden Konzepte erarbeitet.

In den anschließenden Abschnitten wird kurz auf die Ausgangssituation dieser Arbeit und auf die gegebene Aufgabenstellung des Auftraggebers DESY einge-

---

<sup>1</sup>HUBER Diffraktionstechnik: <http://www.xhuber.de/de>

gangen. Abschließend erfolgt eine Kurzbeschreibung der Vorgehensweise zur Lösung dieser Arbeit.

## 1.1 Ausgangssituation mit Problemstellung

Der 6-Kreis-Diffraktometer verfügt über elf Freiheitsgrade. Dabei haben alle Kreise das selbe Drehzentrum. Der gesamte Diffraktometer beziehungsweise das Drehzentrum kann mit Hilfe eines Tisches lateral  $y$  und vertikal  $z$  zum Strahl positioniert werden. Für die Probe stehen drei räumliche Translationsfreiheitsgrade  $x_P, y_P, z_P$  und vier Rotationsfreiheitsgrade  $\theta_h, \theta_v, \varphi, \chi$  zur Positionierung im Drehzentrum zur Verfügung. Zwei weitere Rotationsachsen  $\theta_{2h}, \theta_{2v}$  dienen zur Drehung des Detektors um das Drehzentrum in der vertikalen und horizontalen Ebene. Siehe auch Abbildung 1. Die Aufgabe des Detektors ist das Aufzeichnen der gestreuten Intensität der Probe.

Bei diesem Experimentaufbau wird eine Probe von Röntgenstrahlen beleuchtet. Dabei werden die von der Probe gestreuten Röntgenstrahlen in der horizontalen sowie vertikalen Ebene vom Detektor aufgezeichnet. In Abhängigkeit der Probenform, der Streugeometrie, variiert der Abstand zum Detektor. Ein Flugrohr, welches evakuiert oder mit Helium gespült ist, dient zur Minimierung von Hintergrundstrahlung zwischen dem Detektor und der Probe, also der Minimierung parasitärer Streueffekte durch die Luft. Zusätzlich wird zum Schutz der Detektoren ein Strahlabsorber direkt hinter der Probe positioniert, damit intensive transmittierte, sprich direkt durch die Probe, oder reflektierte Strahlung absorbiert werden kann.

## 1.2 Aufgabenstellung

Im Rahmen dieser Arbeit werden Konzepte mehrere Experimentkomponenten zum Ausbau des 6-Kreis-Diffraktometer-Aufbaus erarbeitet. Diese Experimentkomponenten sind für das Experiment am Diffraktometer notwendig. Bei der ersten Komponente handelt es sich um einen Probenhalter für Standardprobensätze. Dieser hat die Aufgabe Proben ortsfest und temperierbar zu halten. Die

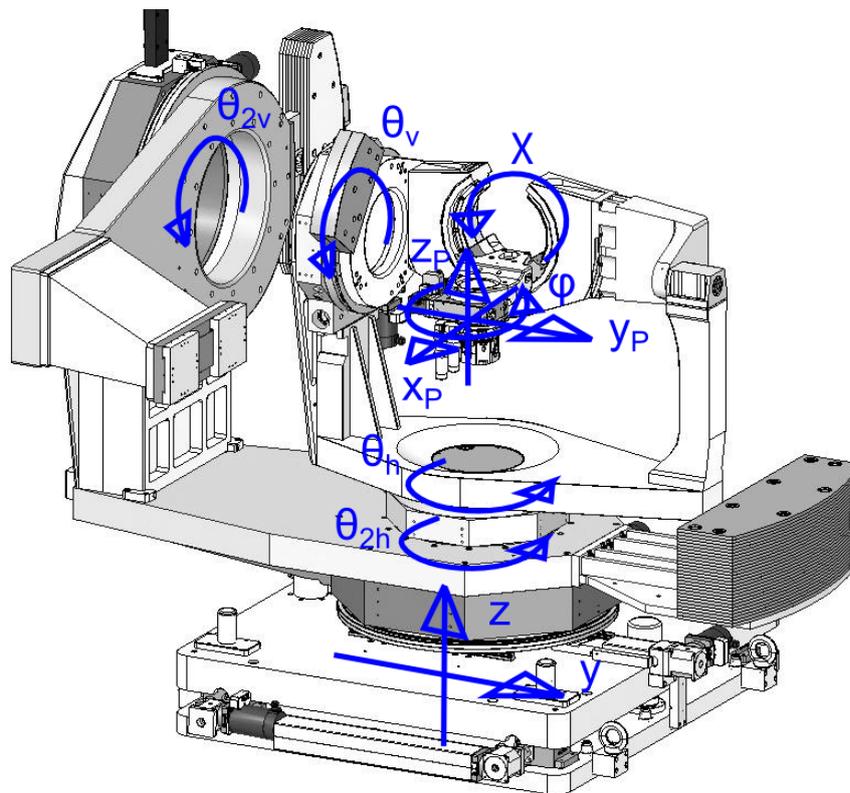


Abbildung 1: Freiheitsgrade des 6-Kreis-Diffraktometer-Aufbaus

zweite Komponente ist ein motorisierter Strahl-Absorber zwischen Probenhalter und Detektor. Mit diesem wird der direkt transmittierte beziehungsweise reflektierte Strahl abgefangen. Bei der dritten Komponente handelt es sich um zwei adaptive Flugrohre zur Minimierung von Streueffekten durch die Luft. Die beiden Flugrohre unterscheiden sich aufgrund der Anwendung in der Länge, die jeweils veränderbar sind, und im Durchmesser. In Abbildung 2 sind zwei Strahlentransmissionen auf eine Strecke von zwei Meter dargestellt, die den Nutzen von Flugrohre verdeutlicht. Die Abbildung 2 verdeutlicht, dass die Strahlung bei Luft (blaue Kurve), gegenüber Helium (rote Kurve), erst in höheren Energien eine erhöhte Transmission aufweist. Bei der letzten Komponente handelt es sich um einen Detektorhalter mit Peripheriezuleitung für verschiedene Detektoren.

Bei der Erarbeitung von Konzepten liegt aufgrund von Gewichtsrestriktion und hoher Dynamik des Aufbaus ein besonderes Augenmerk auf Leichtbau und hoher

Steifigkeit. Ebenso ist eine modulare Bauweise angestrebt. Weitere Anforderungen können dem Lastenheft im Anhang entnommen werden.

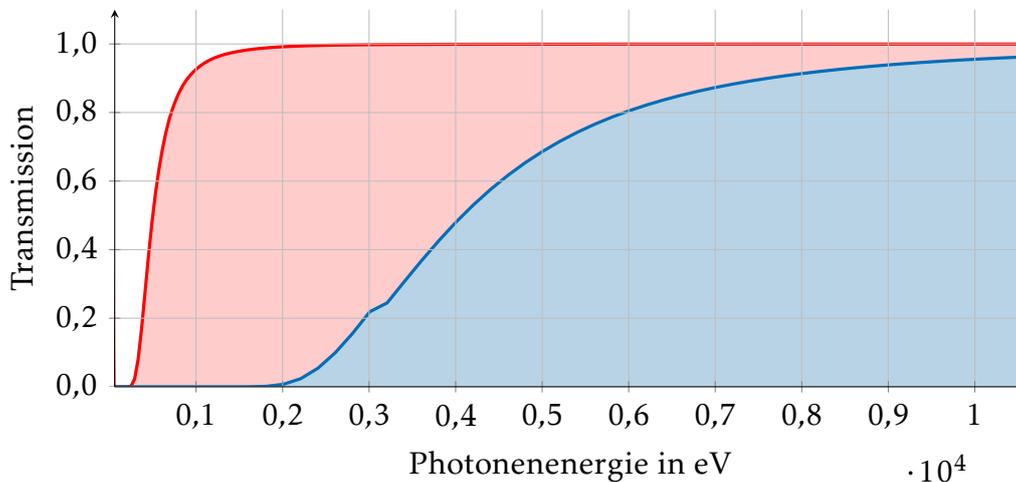


Abbildung 2: Transmissionsfilter von Luft — und Helium — auf eine Strecke von 2m <sup>(2)</sup>

### 1.3 Kurzbeschreibung der Vorgehensweise zur Lösung der Aufgaben

In den nachfolgenden Kapiteln wird auf DESY, die Anlage PETRA III sowie auf der dortigen P10 Beamline und deren Bedeutung eingegangen. Auch theoretische Grundlagen der methodischen Konstruktion werden hier vorgestellt. Als Referenzen dienen nationale sowie internationale Normen und Richtlinien. Weiter wird auf die Lösungsabsicherung durch gewählte Berechnungen und Simulationen eingegangen.

Anschließend erfolgt die Darstellung von Konzepterarbeitungen entsprechend der Aufgabenstellung. Jede Komponente durchläuft ausgehend von der Anforderungsliste und Funktionsanalyse über zu der Morphologie und dem Konzept. Und schließt mit der Bewertung und der Gestaltung ab. Schon zur Lösungsfin-

<sup>2</sup>Daten-Quelle: The Center for X-Ray Optics, URL: <http://henke.lbl.gov/>

derung werden virtuelle Modelle mit dem CAD-Programm *Solid Edge*<sup>3</sup> der Firma *SIEMENS* am Rechner erzeugt.

Die Lösungsabsicherung erfolgt dann für bestimmte Produkte mit gewählten Berechnungen und Simulationen. Damit werden unterschiedliche konstruktive Festigkeitsberechnungen und Simulationen nach der Finite Element Methode (FEM) angesprochen.

Zur Berechnung einzelner Nachweise wird *MATLAB*<sup>4</sup> der Firma *MathWorks* sowie *Mathcad*<sup>5</sup> der Firma *PTC* eingesetzt. Bei aufwendigere Analysen erfolgt die Berechnung mit *ANSYS*<sup>6</sup>. Mit ANSYS werden statische FEM-Untersuchungen der virtuellen Modelle als Workbench-Lösung in Solid Edge durchgeführt.

Zum Abschluss erfolgen im letzten Kapitel die Zusammenfassung mit kritischer Bewertung sowie die Darstellung entstandener Anwendungsgrenzen mit Handlungsbedarf.

---

<sup>3</sup>Solid Edge: [http://www.plm.automation.siemens.com/de\\_de/products/velocity/solidedge/index.shtml](http://www.plm.automation.siemens.com/de_de/products/velocity/solidedge/index.shtml)

<sup>4</sup>MATLAB: <http://www.mathworks.de/products/matlab/>

<sup>5</sup>Mathcad: <http://de.ptc.com/product/mathcad/>

<sup>6</sup>ANSYS: [http://www.ansys.com/Ansys/de\\_de](http://www.ansys.com/Ansys/de_de)

---

## 2 Theorie

### 2.1 Deutsches Elektronen-Synchrotron

DESY ist ein Forschungszentrum der Helmholtz-Gemeinschaft in Hamburg. Es feierte vor drei Jahren sein 50-jähriges Jubiläum<sup>7</sup>. DESY gewann mit seinen Teilchenbeschleunigern fundamentale Erkenntnisse zu den frühen Anfängen des Universums und den Elementarteilchen. Heute betreibt DESY Grundlagenforschung auf drei Forschungsschwerpunkten,

- der Beschleunigerphysik,
- der Teilchen- und Astroteilchenphysik sowie
- der Forschung mit Photonen.

Eine Übersicht des DESY-Geländes zeigt Abbildung 3.

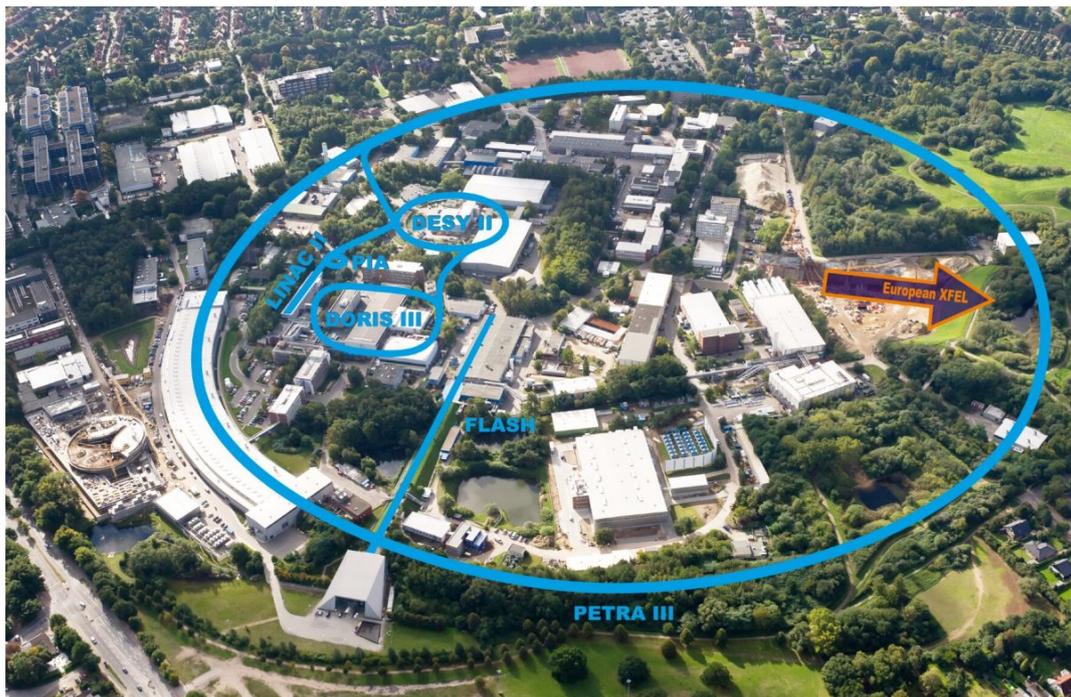


Abbildung 3: Übersicht von DESY mit seinen Teilchenbeschleunigern<sup>8</sup>

---

<sup>7</sup>Gegründet am 18. Dezember 1959 in Hamburg

<sup>8</sup>Copyright: © DESY 2011

Diese Arbeit ordnet sich in den Bereich „Forschung mit Photonen“ ein. Der Bereich „Forschung mit Photonen“ ermöglicht Experimente diverser naturwissenschaftlichen Disziplinen an modernen Röntgenquellen. Er ist um eine ständige Verbesserung der experimentellen Bedingungen bemüht.

Für diese Arbeit ist die DESY-Anlage PETRA III, ein moderner Synchrotron-Ringbeschleuniger für Elektronen und Positronen, relevant.

## 2.2 Röntgenstrahlungsquelle PETRA III

PETRA III ist eine Synchrotronstrahlungsquelle mit 14 individuellen Strahlführungen, auch „Beamlines“, genannt. Momentan ist PETRA III die Speicherring-Röntgenstrahlungsquelle mit der weltweit höchsten Brillanz. Betrieben wird PETRA III mit einer Elektronenenergie von 6 GeV. An den 14 Strahlführungen betreibt PETRA III circa 30 Instrumente (siehe nebenstehende Abbildung 4). Im Sommer 2013 beginnt der Aufbau von zehn weiteren Beamlines.



Abbildung 4: PETRA III-Halle<sup>9</sup>

### Technische Daten von PETRA III<sup>10</sup>

Umfang:	2304 m
Inbetriebnahme:	1978
Energie:	6 GeV
Strom:	100 mA
Undulatoren/Strahlführungen:	14
Instrumente:	30
typische Photonenwellenlänge:	0,1 nm
Brillanz des Lichts:	$10^{21}$ Photonen/(s·mrad <sup>2</sup> ·mm <sup>2</sup> ·0,1% Bandweite)

Synchrotronstrahlung entsteht, wenn relativistische Teilchen (hier Elektronen oder Positronen) durch ein Magnetfeld abgelenkt werden. Moderne Synchrotron-

<sup>9</sup>Copyright: © DESY 2009

<sup>10</sup>Informationen stammen aus dem Jahresbericht *DESY kompakt 2010* [3]

quellen nutzen dieses Verhalten aus, indem sie den Teilchenstrahl durch periodische Magnetstrukturen („Wiggler“ oder „Undulatoren“) leiten. Die so erzeugte Synchrotronstrahlung wird durch tangential angeordnete Strahlführungen bis zum Messplatz oder Instrument geleitet. Bei Bedarf filtern Monochromatoren aus dem Licht eine gewünschte Wellenlänge sowie Bandbreite heraus. Spiegel können unter streifenden Einfall als zusätzliche Tiefpässe eingesetzt werden, um die Qualität des Röntgenstrahls weiter zu optimieren. Bevor der Strahl auf die Probe gelassen wird, können Spalten und Fokussierungseinheiten eingesetzt werden, um die räumliche Ausdehnung des Strahls an das Experiment anzupassen. An PETRA III können Strahlgrößen von ca.  $20 \times 20 \text{ nm}^2$  bis zu  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  realisiert werden. Die von der Probe in einem bestimmten Raumwinkel gestreute Intensität wird mit modernen Röntgendetektoren gemessen. Jeder Messplatz ist für spezielle experimentelle Schwerpunkte und Messmethoden ausgerüstet und bei der Auswertung der Messwerte helfen schnelle Messplatzrechner und angepasste Computerprogramme.<sup>11</sup>

Das Licht beziehungsweise elektromagnetische Strahlung oder hier Synchrotronstrahlung aus dem Beschleuniger

- ist extrem hell und intensiv,
- ist stark gebündelt,
- ist exakt berechenbar und
- ist linear und elliptisch polarisiert.<sup>11</sup>

Aufgrund dieser Eigenschaften eignet sich Synchrotronstrahlung sehr gut zur Untersuchung verschiedensten Materialien auf kleinen Längenskalen. Die sehr hohe Intensität der Synchrotronstrahlung kann aber auch einen sehr hohen Strahlungsuntergrund erzeugen. Um dies zu verhindern muss der Röntgenstrahl möglichst schnell hinter der Probe absorbiert werden oder es muss verhindert werden, dass dieser Strahl hinter der eigentlichen Probe auf weitere Materie (dazu gehört auch Luft) trifft. Um dieses zu erreichen sollen ein motorisierter Strahl-Absorber sowie evakuierte oder mit Helium geflutete Flugrohre entwickelt werden.

---

<sup>11</sup>Quelle: [http://www.desy.de/forschung/forschungsbereiche/forschung\\_mit\\_photonen/einblick/lichterzeugung/index\\_ger.html](http://www.desy.de/forschung/forschungsbereiche/forschung_mit_photonen/einblick/lichterzeugung/index_ger.html)

## 2.3 Kohärenzbeamline P10

Eine der 14 Beamlines an PETRA III ist die Kohärenzbeamline P10. Diese Strahlführung stellt ein Energiespektrum von ca. 4 keV bis 30 keV durch einen fünf Meter langen Undulator zur Verfügung. Die höchste Brillanz liegt dabei im Energiebereich von 5 keV bis 9 keV.

Wissenschaftler können durch international begutachte Anträge Messzeit an der P10 Beamline zugeteilt bekommen. Dabei werden in zwei Experimentierhütten insgesamt 5 verschiedene experimentelle Aufbauten zur Auswahl angeboten. Als Röntgenstreutechniken werden X-Ray Photon Correlation Spectroscopy (XPCS), Coherent Diffraction Imaging (CDI) und Rheologie in Kombination mit zeitaufgelöster Kleinwinkelstreuung (SAXS) angeboten.

XPCS, die Röntgenkorrelationsspektroskopie, dient zur Studie von Gleichgewichtsdynamiken an Oberflächen, Grenzflächen, dünnen Filmen oder komplexen Flüssigkeiten. Aber auch Nichtgleichgewichtsdynamiken komplexer Festkörpermateriale können untersucht werden.

CDI, die kohärente Diffraktionsabbildung, dient der Strukturbestimmung von Objekten auf der Nanometerskala.

Die Rheologie ist dem Ingenieur bereits als die Wissenschaft, die sich mit dem Verformungs- und Fließverhalten von Materie beschäftigt, bekannt. Der Aufbau an der P10 Beamline ermöglicht die zeitgleiche Untersuchung des Fließverhaltens und der Mikrostruktur.

Folgende 5 Messstationen stehen zur Verfügung:

- ein Aufbau für Ultra-Small Angle X-ray Scattering (USAXS)
- ein 6-Kreis-Diffraktometer
- Rheometer
- ein kombinierter SAXS / WAXS und
- ein Nanofocus-Imaging-Aufbau

Small-Angle X-ray Scattering (SAXS), oder die Kleinwinkel-Röntgenstreuungsmethode, wird zur Untersuchung von mesoskopischen Strukturen wie zum Beispiel Kolloiden aus Nanopartikeln oder biologischen Systemen eingesetzt. USAXS wer-

den Experimente genannt, die es ermöglichen Strukturen von bis zu einem Mikrometer Größe zu studieren. „Wide Angle X-ray Scattering“ (WAXS) ermöglicht die Untersuchung von atomaren Strukturen.

Im nächsten Kapitel werden Konzepte für benötigte Experimentkomponenten für das 6-Kreis Diffraktometer erarbeitet.

## 2.4 Anwendungsgrenzen, Schwierigkeiten und Anforderungen an neue Konzepte

Neukonstruktionen an der Beamline P10 bei DESY brauchen aufgrund der sehr feinen Röntgenstrahl-Experimenten, das heißt für sehr kleine Raumskalen, eine sehr hohe Reproduzierbarkeit der Montage. Oft wird der Nanobereich benötigt und zumeist der Mikrobereich. Dies stellt besondere Anforderungen an die Fertigung, die schon während der Konstruktion zu beachten sind.

Neben der Reproduzierbarkeit der Montage sind Experimentkomponenten des Öfteren thermischen Belastungen ausgesetzt. Hierbei sind zwei Anwendungen zu berücksichtigen. Zum ersten die Untersuchung von Proben in Temperaturbereichen zwischen 4 und 800 Kelvin. Und zweitens die notwendige Abkühlung auf unter 100K durch tiefkaltes Stickstoffgas zur Reduzierung der Strahlenschäden von einigen – beispielsweise biologischen – Proben. Aus diesem Grund sind thermische Entkopplungen vorzusehen um Ausdehnungen weitestgehend zu verhindern.

Komponenten, die mit Strahlungen in Berührung kommen, unterliegen besondere Anforderungen in der Werkstoffwahl. Im Fall eines Strahl-Absorbers muss der Werkstoff zur Absorption der Strahlung eine hohe Dichte besitzen. Bei einer geringeren Dichte würden die Absorber mit ähnlichem Ergebnis einen zu großen Raumbedarf beanspruchen. Daneben ist bei dem Werkstoff zu achten, dass im gewünschten Energiespektrum keine signifikanten Fluoreszenzkanten vorliegen. Diese Kanten zeichnen sich durch einen sehr starken Anstieg und sprunghaften Abfall in der Transmissionskurve aus, welche in der Regel nicht erwünscht sind. In Abbildung 5 ist eine Fluoreszenzkanten bei 9keV dargestellt.

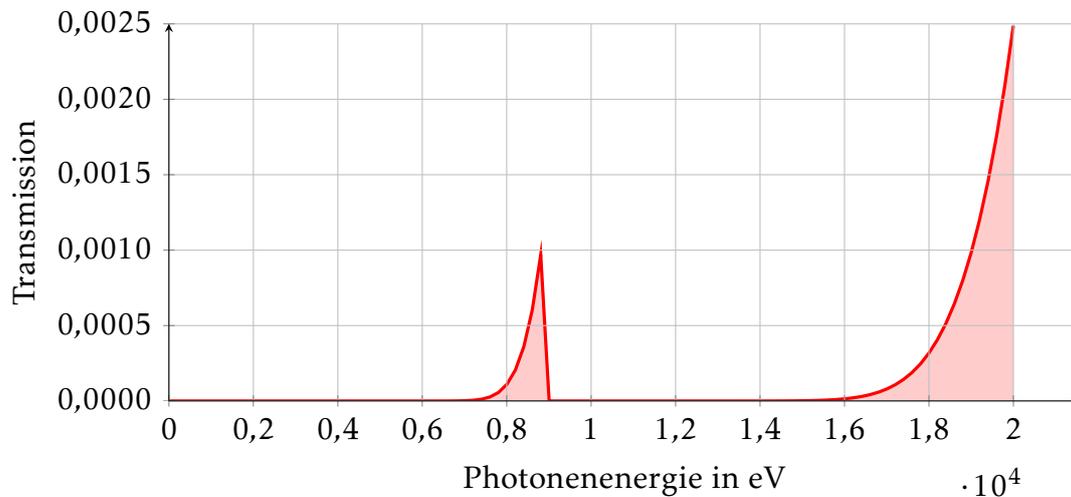


Abbildung 5: Transmissionsfilter von Kupfer bei einer Dicke von  $200 \mu\text{m}$ <sup>12</sup>

Aufgrund der Kinematik des Diffraktometers sind Konstruktionen leicht und steif zu konstruieren. Ebenso sind auf die Verfahrenswege des Diffraktometers zu achten. Besonders nahe dem Zentrum ist der Bauraum stark begrenzt.

Genaue Anforderungen an den Konstruktionen können dem Lastenheft im Anhang entnommen werden.

## 2.5 Methodische Konstruktion

Vorgestellt werden hier lediglich lösungsrelevante Werkzeuge der konstruktiven Methodik. Die Abgrenzung rechtfertigt sich durch die in der Aufgabenstellung festgehaltene Konzepterarbeitung von Experimentkomponenten sowie aus der Eigenschaft der Methoden als Richtlinie heraus. Einleitende Gedanken zu diesem Abschnitt sind überwiegend aus PAHL/BEITZ: *Konstruktionslehre* [4] sowie aus weiterer Fachliteratur aufgegriffen und finden im Kapitel 3 Anwendung.

Bei der Erstellung von effizienten Produkten und jene mit hoher Qualität ist ein methodisches Vorgehen zur Entwicklung brauchbarer Lösungen nötig. So kann beispielsweise auf frühere Lösungen zurückgegriffen werden und, mit Einbeziehung dieser, neue Anwendungsmöglichkeiten gefunden werden. Ebenso kann

<sup>12</sup>Daten-Quelle: The Center for X-Ray Optics, URL: <http://henke.lbl.gov/>

durch die schrittweise Verfeinerung von Lösungsansätzen eine Auswahl in der frühen Phase getroffen sowie Optimierungen mit geringerem Aufwand betrieben werden. Auch werden Fehlentscheidungen mit einem methodischen Vorgehen vermieden.

Die Planung und Konzipierung von neuen technischen Produkten wird in der *VDI-Richtlinie 2222* [5] und die Bewertung von Gestaltungsvarianten mit technischen und wirtschaftlichen Beurteilungskriterien in der *VDI-Richtlinie 2225* [6] beschrieben.

Im ersten Schritt der Lösungssuche, dem sogenannten *Kollektionsverfahren* [7], werden Information über den Stand der Technik gesammelt und ausgewertet. Dabei lassen sich die klassischen Verfahren wie der Literatur- und Patentrecherche effizient mit dem Internet durchführen. Mit diesem Verfahren soll eine aktive Lösungssuche oder passive Lösungsfindung gefördert werden.

Aus der historischen Entwicklung leiteten sich mehrere Gestaltungsprinzipien [4] heraus. An den Konstruktionen wird grundlegend, neben der Steifigkeit, der Leichtbau gefordert. Diese Forderung kann dem Prinzip vom minimalen Gewicht (Leichtbau) gleichgestellt werden. Neben dem Leichtbau sind weitere Gestaltungsprinzipien nach minimalen Herstellkosten (Sparbau) und nach minimalem Raumbedarf orientiert. Ebenso nach minimalen Verlusten und der günstigen Handhabung.

Die Systemtechnik ist Grundlage des methodischen Vorgehens. Aufgaben werden als technische Systeme mit Systemgrenzen zur Umwelt aufgefasst. [8–10] Der Austausch zwischen System und Umwelt, den Eingangs- und Ausgangsgrößen sowie der Umsatz [11] dieser, wird in drei Kategorien eingeteilt;

- Energie,
- Stoff und
- Signal.

Diesen Größen ist neben der Quantität auch Aussagen über Qualität und Kosten zu treffen. Ein Größenumsatz ist schematisch in Abbildung 6 dargestellt.

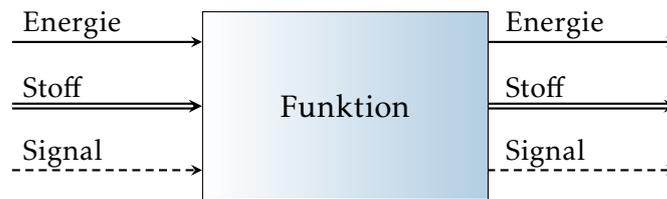


Abbildung 6: Größenumsatz einer Funktion

Als Zusammenhang von Ein- und Ausgangsgrößen werden Funktionen formuliert und zueinander analysiert [12]. Eine Funktionsstruktur beschreibt dabei die sinnvolle und zeitlich logische Verknüpfung von Teilfunktionen zu einer Gesamtfunktion. Dabei können Teilfunktionen weiter unterteilt werden, wenn dies unmittelbar beziehungsweise mittelbar dem Verständnis dient.<sup>13</sup> Für jede Teilfunktion werden nun möglichst viele, sinnvolle physikalische Effekte sowie geometrische und stoffliche Merkmale in einen Wirkzusammenhang gestellt (Wirkprinzip). Es werden also Umsatzgrößen quantitativ mit physikalischen Gesetzen beschrieben sowie Wirkgeometrie durch Wirkort und Wirkfläche gekennzeichnet und prinzipielle Werkstoffeigenschaften festgelegt. Die sinnvolle Kombination<sup>14</sup> einzelner Wirkprinzipien von Teilfunktionen bildet eine Wirkstruktur. Diese Wirkstruktur entspricht ein Lösungsprinzip. Abschließend folgt die prinzipielle Lösung durch Quantifizierung der Wirkstruktur mithilfe überschlägiger Rechnung.

Technische Systeme werden durch weitere Konkretisierung von Bauteilen und Baugruppen zu einem Bauzusammenhang gebracht. Dabei sind weitere, meist unerwünschte, Einflüsse, zum Beispiel durch menschliches Einwirken mit Rückwirkungen als Zweck- oder Nebenwirkung sowie Störungen ebenso als Nebenwirkung, zu beachten, damit auf diese frühzeitig entsprechende Maßnahmen getroffen werden.<sup>15</sup> Diese Einflüsse stehen mit dem System folglich in einen (System-) Zusammenhang.

Während des Konzipierens sind neben dem vorgegebenen Lastenheft weitere Einflüsse und allgemeine Bedingungen an Lösungen zu beachten. Dem ersten

<sup>13</sup>Wertanalyse: Siehe dazu Definitionen nach *DIN EN 1325-1* [13] und VDI 2800 Blatt 1 [14].

<sup>14</sup>In VDI 2222 als Prinzipkombination bezeichnet [5]

<sup>15</sup>Einfluss-Unterscheidungen nach VDI 2242 [15]

Fall gehören Einflüsse durch Zulieferer, Kunden, dem Konstrukteur selbst sowie die Umwelt. Allgemeine Merkmale sind die Zuverlässigkeit, die Formgebung und die Fertigungsart. Ebenso die Kontrolle und Montage als auch Transport, Gebrauch und Aufwand.

Zusammenfassend liegt der Lösungsprozess in Form eines (iterativen) Informationsumsatzes<sup>16</sup> vor, das heißt aus der Gewinnung und der Verarbeitung sowie der Ausgabe von Informationen.

Die Herangehensweise kann dabei ein methodisch stufenweise ablaufendes Vorgehen sein, bei dem alle Teilprobleme gemeinsam vom Wirkprinzip über das Lösungskonzept zum Entwurf voranschreiten. Dem gegenüber ist ein teilproblemorientiertes Vorgehen, bei dem jedes Teilproblem für sich diese Schritte nacheinander abläuft. Diese Arbeit ist der letzten Herangehensweise nach aufgebaut. [17] Die Lösungssuche erfolgt nach generierenden, bei dem unterschiedliche Lösungsprinzipien verglichen werden oder nach korrigierenden Gesichtspunkt, bei dem ausgehend von einer Idee diese schrittweise verbessert wird. Jeweils beide Vorgehensvarianten sind auch in Mischformen präsent.

Der Gesamtprozess der Lösungsfindung kann und wird heute mit Rechnereinsatz durchgeführt. Die dabei verwendeten Programme werden der Kategorie Computer Aided Design (CAD) zugeordnet und unterstützen den Konstrukteur zum Beispiel durch die Erzeugung von virtuellen Modellen als visuelle Veranschaulichung und bei der Bearbeitung von Berechnungsaufgaben.

## 2.6 Berechnung und Simulation

Zur Absicherung von Lösungen dienen verschiedene Nachweise der konstruktiven Festigkeit. Dabei wird neben dem statischen Nachweis auch die FEM-Analyse angesprochen.

Einfache mechanische Modelle können von Hand oder mit der Unterstützung eines Berechnungsprogrammes bearbeitet werden. Die Berechnung von komplexeren Modellen erfolgt als FEM-Simulation am Rechner. Simulationen sind mo-

---

<sup>16</sup>Begriffe zum Informationsumsatz in DIN ISO 2382 [16].

derne Hilfestellungen bei der Konkretisierung von Lösungen am virtuellen Modell. Im konstruktiven Ingenieurbau erlaubt die FEM in Verbindung mit Rechner grundsätzlich Lösungen von sehr schwierigen Fragestellungen mit beliebiger Genauigkeit, die dann aber mit einem erheblichen Aufwand verbunden sind.

Nach *Finite-Elemente-Methoden* von BATHE [18] ist für die Berechnung von technischen Systemen

- die Idealisierung des Systems auf eine Form, die berechnet werden kann,
- die Aufstellung der Gleichgewichtsbedingungen oder Bewegungsgleichungen, die das idealisierte System beherrschen mit Annahmen und Randbedingungen,
- die Lösung dieser Gleichung und schließlich
- die Interpretation der Ergebnisse

erforderlich.

Bei den klassischen Verfahren zur Aufstellung der Gleichgewichtsbedingungen oder Bewegungsgleichungen von technischen Systemen werden zwei Klassen von Systemen angewandt. Unterschieden wird zwischen den diskreten und kontinuierlichen Systemen.

Bei den diskreten Systemen wird die Systemantwort – unbekannte Zustandsgrößen – direkt mit einer endlichen Zahl von algebraischen Gleichungen beschrieben.

Gegenüber den diskreten Systemen wird die Antwort von kontinuierlichen Systemen mit Differentialgleichungen beschrieben. Dabei lassen sich exakte Lösungen mit allen Randbedingungen nur für relativ einfache Systeme ermitteln. Für alle anderen Fälle sind numerische Verfahren anzuwenden, die ein kontinuierliches System im Wesentlichen auf eine diskrete Idealisierung reduziert, welches so wie ein diskretes physikalisches System berechnet werden kann.

Am Anfang jeder Berechnung ist zu entscheiden ob ein Problem als diskret oder kontinuierlich betrachtet werden soll. Bei kontinuierlichen Systemen ist eine geeignete Reduzierung auf ein numerisches beziehungsweise diskretes System

festzulegen. Die numerische Idealisierung in systematischer Weise ermöglicht das Finite-Elemente-Verfahren.

Am Ende jeder FE-Simulation gehört der Abgleich der Ergebnisse mit experimentellen Daten.

---

### 3 Konzepterarbeitung

Die zu entwickelnden *neuen Produkte* oder richtiger *neuen Komponenten* am 6-Kreis-Diffraktometer-Aufbau sind mehr Anpassungskonstruktionen als Neukonstruktionen. Die Betonung auf die Entwicklung von Experimentkomponenten und die Tatsache, dass diese intern für die Experimente entwickelt werden und nicht in Massen produziert werden, soll erklären, dass diese nicht dem klassischen Produktlebenszyklus angehören wie sie unter anderem in [4, 19] dargestellt werden. Besonders gefordert ist die bestmögliche Umsetzung der definierten Anforderungen.

Konventionelle Hilfsmittel wie Recherchen vom Markt und Erfahrung sowie Analyse vorhandener Systeme im Institut DESY zeigen, dass bereits ähnliche Produkte im Einsatz sind. Invention und Innovation sind damit aber nicht ausgeschlossen. Intuitive Methoden wie das Brainstorming und beispielsweise die Methode 6-3-5 konnten nur bedingt mit Kollegen durchgeführt werden. Hauptsächlich werden diskursive Methoden angewandt, unter Verwendung von Lösungskatalogen [20, 21] und insbesondere der morphologischen Methode [22]. Hierbei werden Funktionen dargestellt, die im Hinblick des Lastenhefts, einen ausreichenden Spielraum aufweisen.

An den zu entwickelnden Komponenten ist hauptsächlich gefordert, dass sie korrosionsbeständig sind, eine hohe Steifigkeit aufweisen und von geringem Gewicht sind. Diese Forderungen erklären sich durch die Umgebungsbedingung, und der dynamischen Anwendung heraus. Weiter sollen Halbzeuge und insbesondere Normteile aus dem DESY-Lager bevorzugt verwendet werden. Zu den Wünschen zählt auch die Wirtschaftlichkeit der Komponenten. Die gesamte Anforderungsliste des Pflichtenheftes kann im Anhang (Seite 82) eingesehen werden.

Eine Vorauswahl von Lösungsprinzipien erfolgte mit einem betriebsinternen Ingenieur. Dabei werden bevorzugte und ausscheidende Aspekte berücksichtigt. Zur Bewertung der Lösungsvarianten findet eine binäre Gewichtungsmatrix An-

wendung, die die Bewertungskriterien zueinander gewichtet. Die Findung der Gesamtlösung erfolgt mit einer Bewertungsliste.<sup>17</sup>

Im nachfolgenden werden die Schritte komponentenweise von der Anforderung und der Funktionsanalyse über die Morphologie, das Konzept und die Bewertung, hin zu der Gestaltung durchlaufen. Zu einer Beurteilung über den Stand der Technik erfolgt im Voraus, eine Analyse des Marktes sowie eine Literatur- und Patentrecherche.

Begriffserklärend soll die  $x$ -Richtung als die Richtung entlang des Strahls, die  $y$ -Richtung parallel zur Erde nach links und die  $z$ -Richtung entsprechend eines Rechtssystems nach oben, verlaufen. Siehe dazu auch Abbildung 1 und 7.

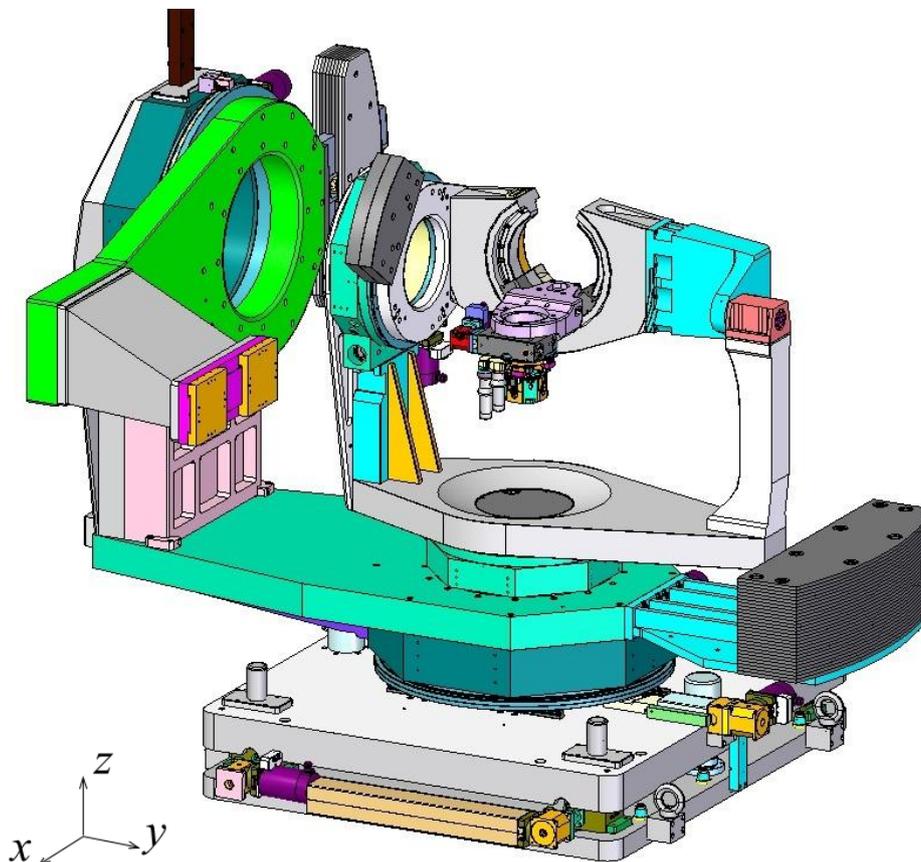


Abbildung 7: 6-Kreis-Diffraktometer-Aufbau

<sup>17</sup>Gewichtungsmatrix und Bewertungsliste in Anlehnung an VDI 2225 [6]

### 3.1 Probenhalter für Standardprobensätze

Der Probenhalter hat die Aufgabe unterschiedliche Proben ortsfest im Drehzentrum des Diffraktometers zu halten (siehe Abbildung 8) und dabei temperierbar zu sein. Die Proben können dabei bis zu einige Kilogramm schwer sein.

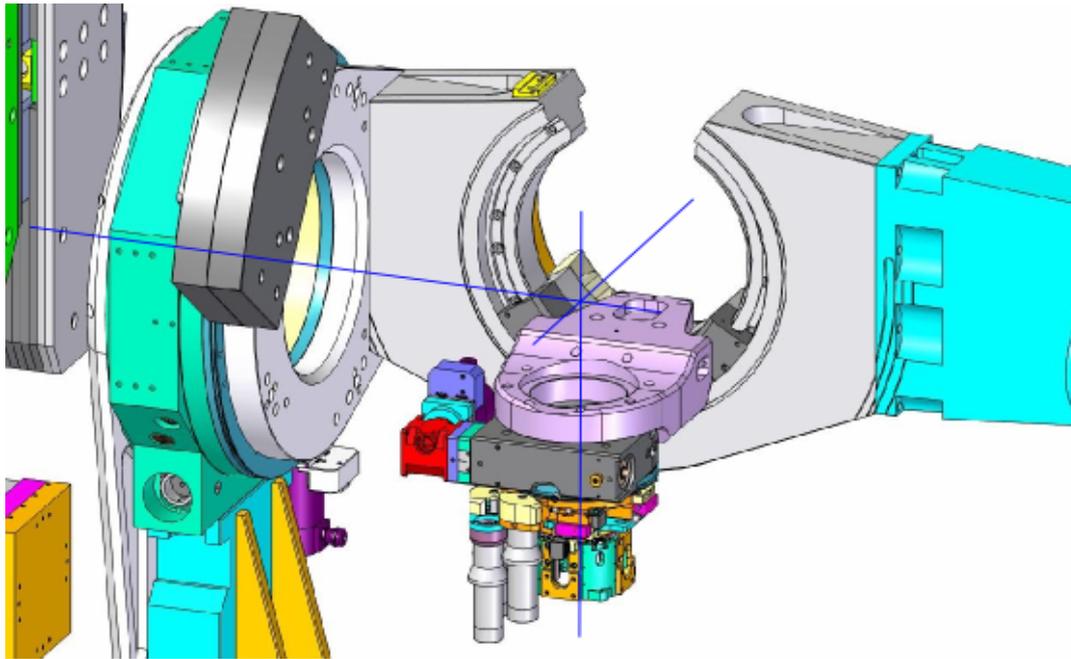


Abbildung 8: Drehzentrum des Diffraktometers

#### 3.1.1 Anforderungen und Funktionsanalyse

Die Positionierung und das Halten im Drehzentrum ist die Hauptanforderung an die Konstruktion. Zu den weiteren Forderungen am Probenhalter gehört

- eine hohe Reproduzierbarkeit der Montage, insbesondere der Teile untereinander, dafür sind Anschlagkanten oder Zentrierbohrungen vorzusehen.
- Aufgrund der thermischen Belastung soll der Halter selbst aus einem Werkstoff mit geringen Ausdehnungskoeffizienten bestehen und
- zur Basis hin thermisch isoliert sein.
- Die Länge der Basis (z-Richtung) muss unter 260 mm bleiben und

- maximal 20 mm über der Grundplatte des  $\varphi$ -Kreises sowie
- zur Kompatibilität eine M6 25×25 Bohrmuster aufweisen.
- Ebenso die Gewährleistung der Verfahrwege in  $x_p, y_p \pm 5$  mm und in  $z_p \pm 3$  mm sowie der  $\varphi$ -Rotation  $Rz = 360^\circ$  muss gegeben sein.

Die Gesamtfunktion des Probenhalters ist in Abbildung 9 dargestellt. Es werden unterschiedliche Proben an den Probenhalter montiert beziehungsweise vom Probenhalter abmontiert und diese gegebenenfalls mit tiefkalten Stickstoffgas gekühlt.

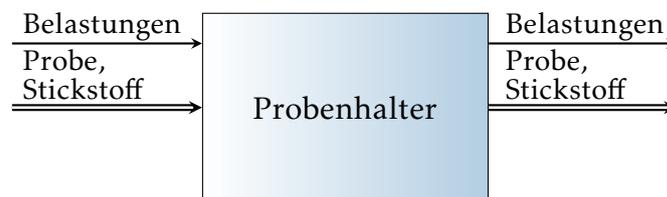


Abbildung 9: Gesamtfunktion des Probenhalters

Die Funktionsstruktur in Abbildung 10 zeigt den Zusammenhang von Teilfunktionen zur Gesamtfunktion und setzt sich aus den Teilfunktionen

- Belastungen direkt weiterleiten,
- Probe halten sowie
- Kühlung ein-, um- und ausleiten

zusammen. Der zuerst genannte Punkt ist vom Typ Energie und die beide zuletzt genannten vom Typ Stoff. Dabei wird die Belastung mit  $E_B$ , die Probe mit  $St_P$  und das Stickstoff mit  $St_{N_2}$  gekennzeichnet. Die Umsetzung aller Größen wird mit den Indizes 1 für den Eingang und 2 für den Ausgang gekennzeichnet.

Wirkprinzipien für das Ein- und Ausleiten sowie Übertragen von Belastungen kann eine form-, kraft- und stoffschlüssige Kopplung sein. Gleiches gilt für das Halten von Proben.

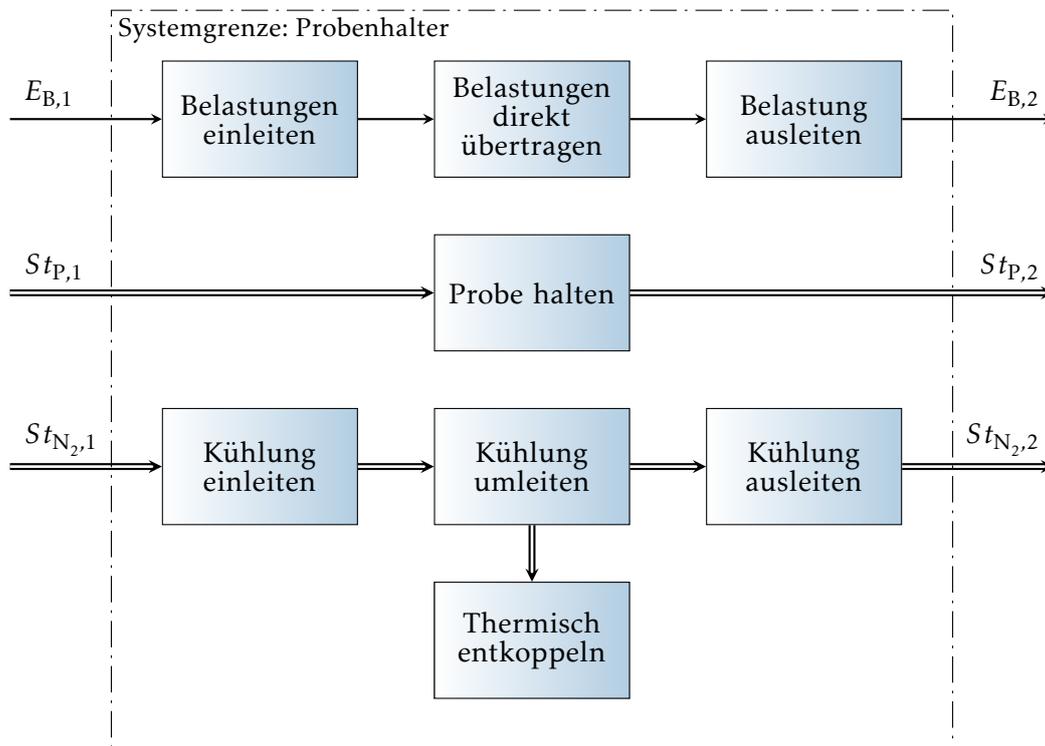


Abbildung 10: Funktionsstruktur des Probenhalters

### 3.1.2 Morphologie, Lösungsprinzipien und Bewertung

Der Übersicht halber werden ausgesuchte Teilfunktionsträger nach der morphologischen Methode in einer Tabelle – den sogenannten morphologischen Kästen – dargestellt, siehe Tabelle 1.

Belastungen – hier Bewegungen – können durch eine mit Anschlagkanten verschraubte Platte eingeleitet werden. Weitere Möglichkeiten ist die genaue Positionierung durch Zentrierstifte und die Befestigung durch verkleben.

Tabelle 1: Morphologischer Kasten des Probenhalters

		Teilfunktionsträger (Teillösungen)		
		1	2	3
Teilfunktionen	Belastungen einleiten	Platte mit Anschlagkanten verschrauben	Platte mit Zentrierstifte verschrauben	Platte mit Zentrierstifte verkleben
	Belastungen direkt übertragen	Profil radial verschrauben	Profil radial mit Stifte verbinden	Profil axial verschrauben
	Belastung ausleiten	Halter mit Zentrierabsatz verschrauben	Halter mit Anschlagkanten verschrauben	Halter seitlich führen und kontern
	Probe halten	Probenaufsatz halten mit Magnetkraft	Probenaufsatz radial verschrauben	Probenaufsatz axial verschrauben
	Kühlung einleiten	offen anblasen	Rohrsystem	
	Kühlung umleiten	mit Platte umlenken	Rohrsystem	
	Kühlung ausleiten	offen abführen	Rohrsystem	
	Thermisch entkoppeln	kontinuierliche Platte	Platte mit Luftkammern	

Gleiches gilt bei der Direktübertragung von Belastungen, hier können Profile radial oder axial verschraubt und mit Stiften verbunden und positioniert werden. Auch die Übertragung sowie das Ausleiten kann mit einem Zentrierabsatz oder mit Anschlagkanten verschraubt beziehungsweise seitlich geführt und gekontert werden. Der Probenaufsatz kann mit Magnetkraft gehalten oder radial beziehungsweise axial, am vorgesehenen Halter, verschraubt werden.

Die Kühlung kann offen angeblasen, mit einer Platte abgelenkt und wiederum offen abgeführt werden. Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung von Rohrsystemen, welches aber die Funktionalität beziehungsweise Flexibilität unterschiedlich stark einschränken könnte. Zur thermischen Entkopplung steht eine kontinuierliche oder mit Luftkammern versehene Platte zur möglichen Anwendung.

### **Lösungsprinzipien**

In der Tabelle 1 sind ausgesuchte Lösungsprinzipien eingezeichnet, die im nachfolgenden kurz beschrieben sind.

#### **1. Lösungsprinzip (Volllinie)**

Die Gesamtkonstruktion wird über eine Platte mit Anschlagkanten an den Diffraktometer verschraubt, hierbei wird die Bewegung übertragen. Die Höhendistanz wird mit Rohrprofilen überbrückt, die untereinander mit Zentrierabsätzen axial schraubt sind. Der Halter wird untereinander wieder mit Anschlagkanten verschraubt und hält den Probenaufsatz mit Magnetkraft. Die örtliche Kühlung erfolgt ohne zusätzliche Konstruktion. Eine vorgesehene Ablenkungskappe, nahe der Probe, soll dabei verhindern, dass sich die Kühlung nicht auf die restliche Konstruktion ausbreitet und damit eine große Wärmeausdehnung hervorruft. Dazu ist ebenso eine kontinuierliche Platte mit geringer Wärmeleitfähigkeit vorgesehen die zur nötigen thermischen Entkopplung beiträgt.

#### **2. Lösungsprinzip (Strichlinie)**

Hier wird die Gesamtkonstruktion und Bewegung über eine Platte mit Zentrierstiften an dem Diffraktometer verschraubt und übertragen. Die Höhendistanz wird wie die erste Lösung realisiert. Der Halter wird hier untereinander mit Zentrierstiften verschraubt und hält den Probenaufsatz mit einer radial verschraubten Schraube. Ebenso wird, wie zur ersten Lösungsvariante, auf eine Zusatzkonstruktion zur Kühlung verzichtet und nur auf eine Ablenkung sowie eine mit Luftkammer versehene Isolierplatte gesetzt.

### **Bewertung**

Die Bewertung erfolgt mit Hilfe einer binären Gewichtungsmatrix. Zu lesen ist die Tabelle 2 im Beispielvergleich von Kriterium 1 (Spalte) zu dem Kriterium 6 (Reihe): Das Kriterium 1 ist im Vergleich zum Kriterium 6 wichtiger.

Tabelle 2: Binäre Gewichtungsmatrix des Probenhalters

im Vergleich zu Kriterium	Kriterium					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Reproduzierbarkeit der Montage (1)	–	0	0	0	0	1
Geringe Ausdehnung (2)	1	–	0	0	0	1
wenig Teile (3)	1	1	–	1	0	1
einfache Fertigung (4)	1	1	0	–	0	1
leichte Montage (5)	1	1	1	1	–	1
Gewährleistbare Verfahrenwege (6)	0	0	0	0	0	–
Summe	4	3	1	2	0	5 = 15
Gewichtungsfaktor $g_i$ in Prozent	27	20	7	13	0	33 = 100

Legende: 1 = wichtiger; 0 = nicht wichtiger

Aufgrund des Gewichtungsfaktors  $g_5$  hat das Kriterium 5 keinen Einfluss auf die Lösungsbewertung (Tabelle 3). Damit das Kriterium  $g_5$  dennoch eine geringfügige Auswirkung hat, werden hierfür zwei Prozente berücksichtigt.

Tabelle 3: Bewertungsliste des Probenhalters

Bewertungskriterien	Gewichtung $g_i$	Variante 1		Variante 2	
		$P_i$	$P_i \cdot g_i$	$P_i$	$P_i \cdot g_i$
Reproduzierbarkeit der Montage	0,27	4	1,08	4	1,08
Geringe Ausdehnung	0,20	3	0,60	3	0,60
wenig Teile	0,07	3	0,21	1	0,07
einfache Fertigung	0,13	3	0,39	1	0,13
leichte Montage	0,02	4	0,08	3	0,06
Gewährleistbare Verfahrenwege	0,33	4	1,32	4	1,32
Summe			3,68		3,26
Technische Wertigkeit ( $P_i \cdot g_i/4$ )			0,90		0,80
Rang			1		2

Legende: 0 = unbefriedigend; 1 = noch tragbar; 2 = ausreichend; 3 = gut; 4 = sehr gut

Nach Tabelle 3 ist die erste Lösungsvariante zu gestalten. Im anschließenden wird eine Grobgestaltung dieser Variante dargestellt. Zur Lösungsvariante 2 muss eine Verbesserung zur einfacheren Fertigung und der geringeren Anzahl von Teilen erfolgen.

### 3.1.3 Gestaltung

In diesem Abschnitt wird die ausgesuchte Lösung grob gestaltet und ausgelegt. Das erste Ergebnis ist in Abbildung 11 angedeutet, dabei soll die Abbildung zur

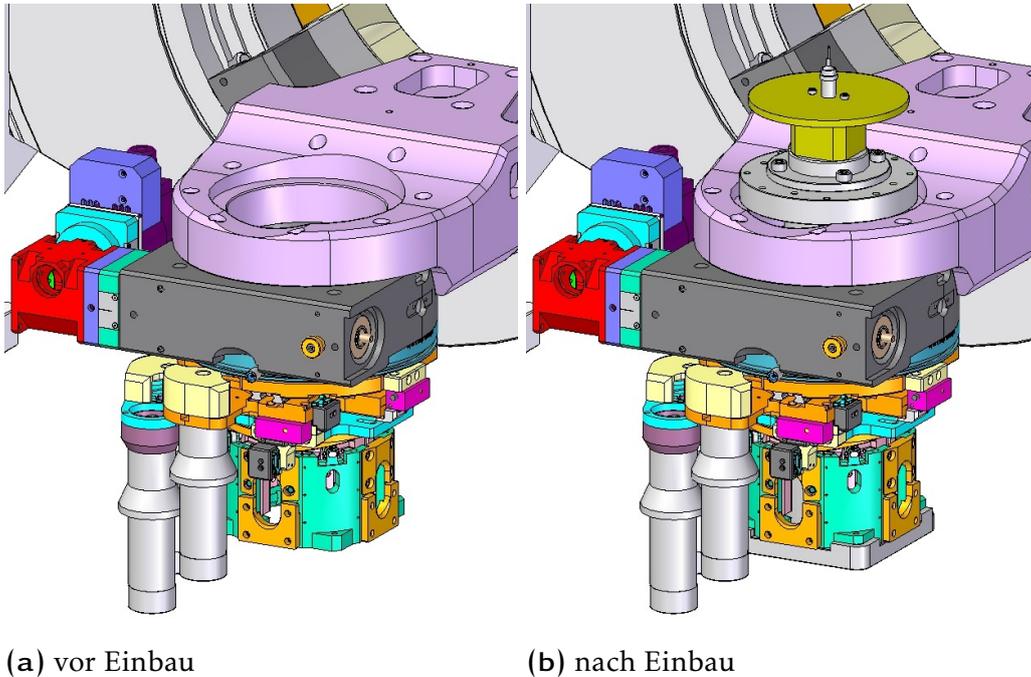
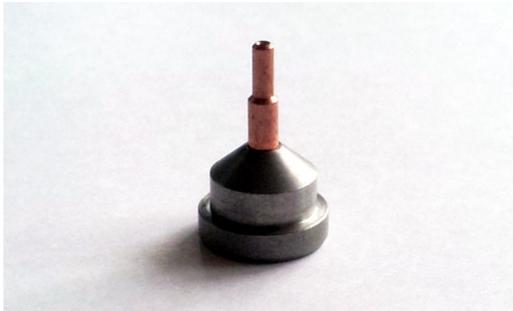


Abbildung 11: Diffraktometer-Ausschnitt für Probenhalter

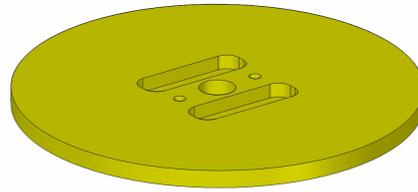
Einschätzung der Umgebung dienen.

Die entworfenen Einzelteile sind im Einzelnen in der Abbildung 12 und im Zusammenbau in der Abbildung 13 dargestellt. Bis auf der Abdeckung (12b) und der Isolierplatte (12d) sind alle Teile des Probenhalters, aufgrund des Gewichtes, aus Aluminiumguss. Die ausgeschlossenen Teile sind, aufgrund guten thermischen und mechanischen Eigenschaften, aus Polyetheretherketon (PEEK). Eine Übersicht einiger Wärmeleitkoeffizienten ist in Tabelle 4 dargestellt. Neben den genannten Teilen ist die Verwendung von Normteilen wie Gewindestiften und Zylinderschrauben vorgesehen.

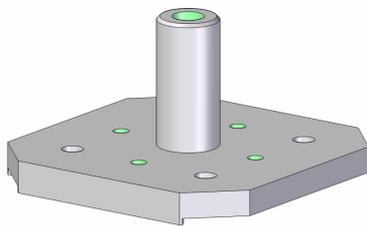
Bei der Konstruktion der Komponenten Adapterplatte (12f), Rohr (12g) und Grundplatte (12h) wurde angestrebt den größtmöglichen Raum im Tunnel (siehe Abbildung 11) einzunehmen, um damit eine hohe Steifigkeit und geringes



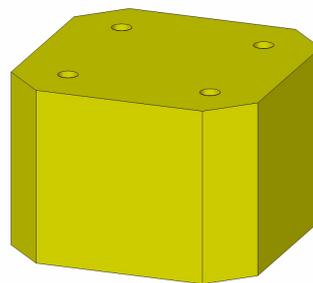
(a) Basecap



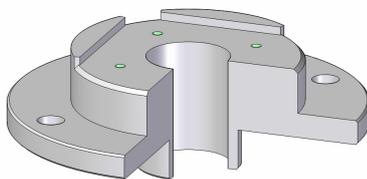
(b) Abdeckung



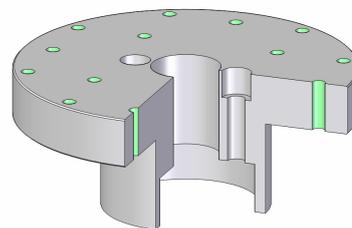
(c) Aufsatzhalter



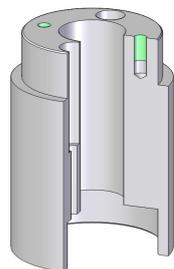
(d) Isolierplatte



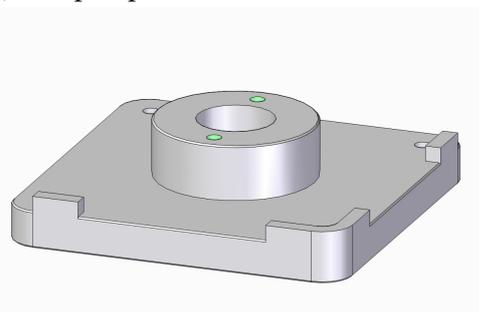
(e) Adapterauflage



(f) Adapterplatte



(g) Rohr



(h) Grundplatte

Abbildung 12: Einzelteile des Probenhalters

Tabelle 4: Übersicht einiger Werkstoffeigenschaften

Werkstoff	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ W/(m K)	Längenausdehnungskoeffizient $\alpha$ $10^{-6} \text{K}^{-1}$	Dichte $\rho$ g/cm <sup>3</sup>	E-Modul GPa
Stahl hochlegiert (austenitisch)	15	11,8	7,8	195
Aluminium	235	23,1	2,7	70
Invar	13	1,7 ... 2,0	8	130 ... 150
PEEK	0,25	0,43	1.32	3.70 ... 6.89

Pendelverhalten zu gewährleisten. Es sind die Verfahrenswege in allen Richtungen berücksichtigt.

Die Grundplatte (12h) ist der Referenzkörper für den gesamten Probenhalter der mit dem Diffraktometer verschraubt ist. Die Positionierbarkeit ist mit den Anschlagkanten gegeben. Über den Rohren (12g) wird die Positioniergenauigkeit mit Absätzen gewährleistet. Zur weiteren Gewichtsreduktion ist hier ein Hohl- statt Vollzylinder gewählt wurden. Die Adapterplatte (12f) bietet mit dem Bohrmuster eine universale Schnittstelle.

Den zweiten Teil bilden die Abdeckung (12b) und Aufsatzhalter (12c), Isolierplatte (12d) und Adapterauflage (12e). Hierbei kann die Adapterauflage (12e) als Referenzkörper des zweiten Abschnittes gesehen werden. Darauf folgt die thermische Entkopplung mit der Isolierplatte (12d) und die Probenaufnahme mit den Aufsatzhalter (12c). Dieser hält einen *Basecap* (12a) mit Magnetkraft. Dazu wird ein Dauermagnet (Neodym-Eisen-Bor) über ein Gewindestift in das Gewinde vom Aufsatzhalter (12c) gedreht und ist somit höhenverstellbar beziehungsweise Einstellbar in der Krafteinwirkung. Abschließend ist eine Abdeckung (12b) vorgesehen, die den groben Anteil der Stickstoffzufuhr ablenkt und hauptsächlich dafür sorgt, dass nur ein sehr geringer Wärmeaustausch mit der Adapterplatte (12f) erfolgt und somit einen Verzug der Konstruktion weitestgehend vermeidet.

Aussage zur Wärmeleitung gibt die Wärmeleitungsgleichung

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{j} = \eta \quad (3.1)$$

Dabei ist  $T$  die Temperatur,  $c$  die spezifische Wärme und  $\rho$  die Dichte,  $\vec{j}$  die Wärmestromdichte und  $\eta$  die Wärmeleistungsdichte.

Nach dem Fourierschen Wärmeleitungsgesetz ist die Wärmestromdichte dem Temperaturgradienten proportional

$$\vec{j} = -\lambda \vec{\nabla} T \quad (3.2)$$

mit  $\lambda$  als Wärmeleitfähigkeit.

Einsetzen des Fourierschen Wärmeleitungsgesetzes in die Wärmeleitungsgleichung führt auf

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (\lambda \vec{\nabla} T) + \eta \quad (3.3)$$

Der Einfachheit halber wird zur thermischen Entkopplung der Isolierplatte (12d) die durch Wärmeleitung übertragene Wärmeleistung mit dem vereinfachten Modell der ebenen Platte berechnet. Da Randeffekte vernachlässigt werden erfolgt die Rechnung eindimensional ( $x$ ). Aufgrund der Anwendung bei Raumtemperatur und der Kühlung mit Stickstoff auf etwa 90 K, beträgt das Temperaturpotenzial um die 200 K. Dabei erfolgt die Betrachtung stationär. Eine weitere Annahme ist, dass die geringere Wärmeleitfähigkeit von Luft in der Bohrung sowie die höhere Wärmeleitfähigkeit von der Schraube sich der Wärmeleitfähigkeit von Kunststoff angleichen. Es soll somit die Wärmeleitfähigkeit als konstant angesehen werden. Durch Einarbeiten der Randbedingungen vereinfacht sich die Wärmeleitungsgleichung (3.3) zu

$$\vec{\nabla}^2 T = 0 \quad (3.4)$$

und führt auf eine lineare Temperaturverteilung  $T(x) = ax + b$ , mit den beiden Integrationskonstanten  $a$  und  $b$ . Mit den beiden Randtemperaturen  $T_1$ , bei  $x$  gleich 0, und  $T_2$ , bei der Dicke  $d$ , ergibt sich die Temperaturänderung  $a$  zu

$$\frac{\partial T}{\partial x} = a = \frac{T_2 - T_1}{d} \quad (3.5)$$

Diese Temperaturänderung  $a$  wird benötigt um Aussagen zur Wärmeleistung beziehungsweise des Wärmestroms zu machen, welches die Integration der Wärmestromdichte über die konstante Querschnittsfläche ist (Wärmestromdichte  $\vec{j}$ )

nach (3.2) mit der Kenntnis von  $a$  nach (3.5):  $\vec{j} = -\lambda a \vec{e}_x$ ). Nachfolgend ist  $\vec{n}$  der Normalenvektor auf der Oberfläche des Berechnungsgebietes, hier entgegen  $\vec{e}_x$ .

$$\dot{Q} = \int dA \vec{n} \vec{j} = \vec{n} \vec{j} A = \lambda a A = \lambda \frac{T_2 - T_1}{d} A \quad (3.6)$$

Mit der Fläche  $A_{PH}$  von  $1751 \text{ mm}^2$  sowie der Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffes PEEK  $\lambda_{PEEK}$  bei Raumtemperatur von  $0,25 \text{ W/m K}$  und einer gewählten Dicke der Isolierplatte  $d_{PH}$  von  $30 \text{ mm}$  sowie der Temperaturdifferenz  $\Delta T_{PH} (= T_2 - T_1)$  von  $200 \text{ K}$  ergibt sich eine Wärmeleistung  $\dot{Q}_{PH}$  der Isolierplatte vom Probenhalter zu

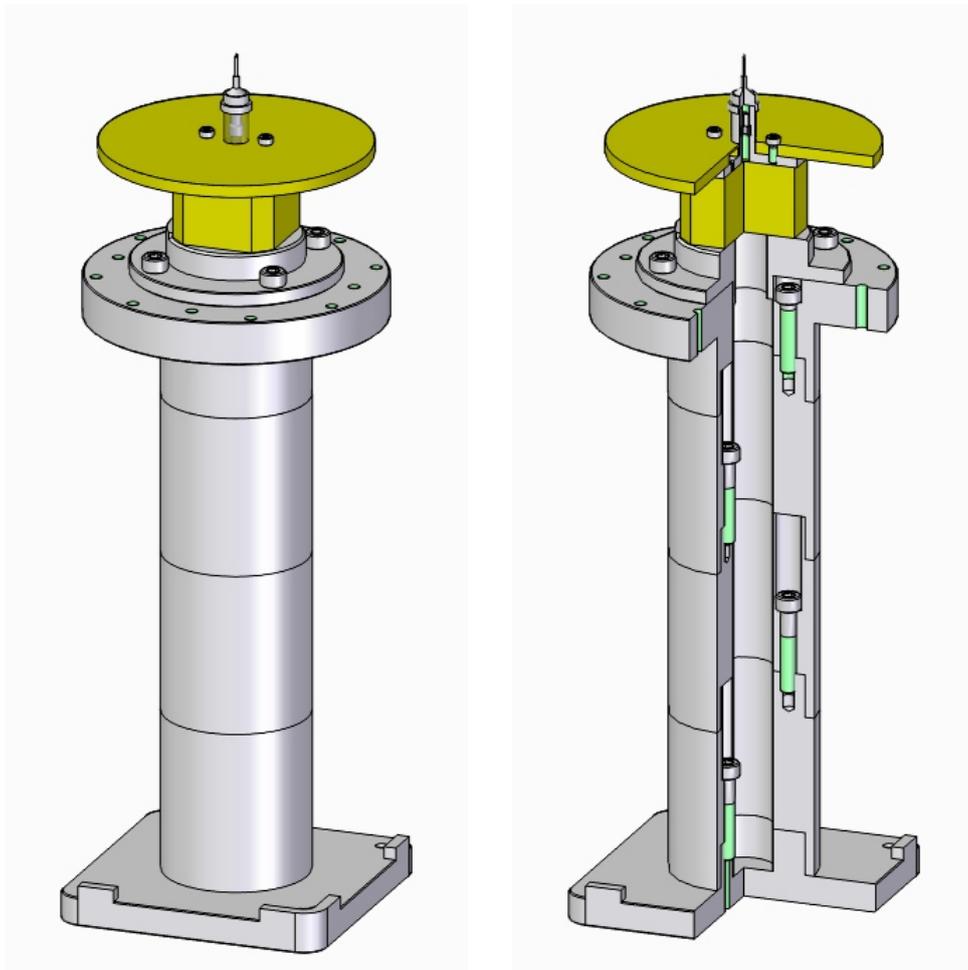
$$\dot{Q}_{PH} = \lambda_{PEEK} \frac{\Delta T_{PH}}{d_{PH}} A_{PH} = 0,25 \text{ W/m K} \frac{200 \text{ K}}{30 \text{ mm}} 1751 \text{ mm}^2 = 2,9 \text{ W}$$

Vorgabe ist unterhalb von  $5 \text{ W}$  Wärmeleistung zu bleiben, dies ist hier gegeben. Somit ist die gewählte Fläche  $A_{PH}$  von  $1751 \text{ mm}^2$  und Dicke der Isolierplatte  $d_{PH}$  von  $30 \text{ mm}$  als eine taugliche Dimensionierung bestätigt.

Weitere Aspekte sind im detaillierten Entwurf zu berücksichtigen. Wie die Verwendung von Invar und Edelstahl anstelle den hier bevorzugten Aluminiumguss. Invar und Edelstahl besitzen im Vergleich zu Aluminium eine höhere Dichte jedoch einen geringeren Längenausdehnungskoeffizient, insbesondere der Werkstoff Invar (siehe Tabelle 4). Und somit könnte gegebenenfalls auf die Isolierung mit PEEK verzichtet werden.

Die Aluminiumteile werden oberflächentechnisch eloxiert, diese Eloxalschicht besitzt, neben dem Korrosionsschutz, eine härtere und von Kratzer unempfindlichere Oberfläche. Diese Eigenschaften gewährleisten definierte Flächen und damit eine bessere Reproduzierbarkeit in der Montage.

Aus wirtschaftlichen Gründen sowie der Fertigungsmöglichkeit sind auf einfache Dreh- und Fräsarbeiten geachtet worden. Das Gesamtgewicht für den Probenhalter beläuft sich auf  $2,75 \text{ kg}$ .



(a) ohne Schnitt

(b) mit Schnitt

Abbildung 13: Gesamtaufbau des Probenhalters

## 3.2 Motorisierter Strahl-Absorber zwischen Probenhalter und Detektor

Der motorisierte Strahl-Absorber (Beamstop) hat die Aufgabe sehr nah hinter Probe den direkt transmittierten beziehungsweise reflektierten Strahl abzufangen.

### 3.2.1 Anforderungen und Funktionsanalyse

Die Hauptanforderung an die Konstruktion ist, dass die Bewegungsfreiheit vom Diffraktometer nicht eingeschränkt wird. Weitere Forderungen am Strahl-Absorber sind

- die Motorisierung auf zwei Achsen in  $y$ - und  $z$ -Richtung.
- Aufgrund der internen Anforderung sind die Motoren mit zwei Phasen, bipolar und parallel geschaltet und mit mindestens 200 Schritt sowie
- Lemo 1B Anschlüssen nach PETRA III-Standard zu wählen.
- Eine Reproduzierbarkeit von  $5\ \mu\text{m}$  mit
- einer  $1\ \mu\text{m}$  Auflösung ohne Encoder soll erreicht werden.
- Der Verfahrweg von  $\pm 20\text{mm}$  in beiden Achsen ist zu gewährleisten und mit
- einstellbare Endstops zu versehen.
- Die Bauweise ist kompakt und steif zu halten.
- Der eigentliche Strahl-Absorber muss aus einem Werkstoff mit hohem Absorptionsgrad (hoher Dichte) bestehen und
- darf keine signifikanten Fluoreszenzkanten im Bereich von 5 bis 25 keV aufweisen sowie
- eine oder zwei scharfe Kanten von  $R_z\ 0,025$  besitzen, damit die Möglichkeit besteht die gewünschte Strahlung von dicht beieinander liegenden unerwünschten Strahlungen abzuschneiden.
- Hilfreich dazu auch die Neigung der scharfen Kante von 1 bis 2 Grad
- Die gesamte Beamstop-Konstruktion soll in der Lage sein, manuell vorpositioniert zu werden.

Die Gesamtfunktion des Strahl-Absorbers ist in Abbildung 14 dargestellt. Der Strahl-Absorber wird durch elektrische Signale an bestimmte Positionen verfahren, hierdurch kann ungewollte Strahlung abgefangen und von gewollte Strahlung abgeschnitten werden. Die gewollte Strahlung kann dann ungestört vom Detektor aufgezeichnet werden.

Weiter sollen signalgebende Verfahrensweg-Beschränkungen (Schranken) eingebaut werden. Hiermit wird sichergestellt, dass der motorisierte Schlitten nicht mit höchstmöglicher Geschwindigkeit gegen seine Endposition fährt.

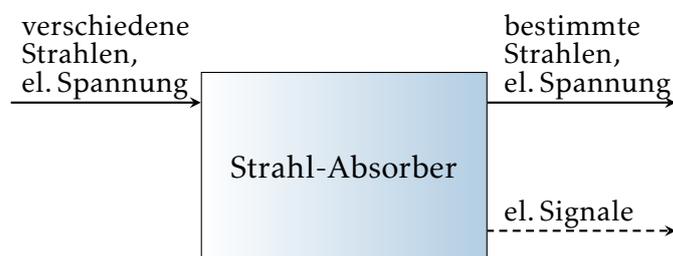


Abbildung 14: Gesamtfunktion des Strahl-Absorbers

Die Funktionsstruktur in Abbildung 15 zeigt den Zusammenhang von Teilfunktionen zur Gesamtfunktion und setzt sich aus den Teilfunktionen

- Strahlung einleiten, abschneiden und ausleiten sowie
- elektrische Spannung ein- und ausleiten als auch
- Bewegung und
- Signale erzeugen sowie ausleiten

zusammen. Die ersten drei Punkte sind vom Typ Energie und der letzte – wie der Name schon verrät – vom Typ Signal. Die Kennzeichnungen hier sind  $E_S$  für die Energieform Strahlung sowie  $E_{eS}$  von elektrische Spannung und erstmalig  $S_{eS}$  für die Signalform von elektrischen Spannung.

Wirkprinzipien für das Abschneiden von Strahlungen ist beispielsweise die Absorption über einen Körper hoher Dichte. Die Bewegungserzeugung infolge elek-

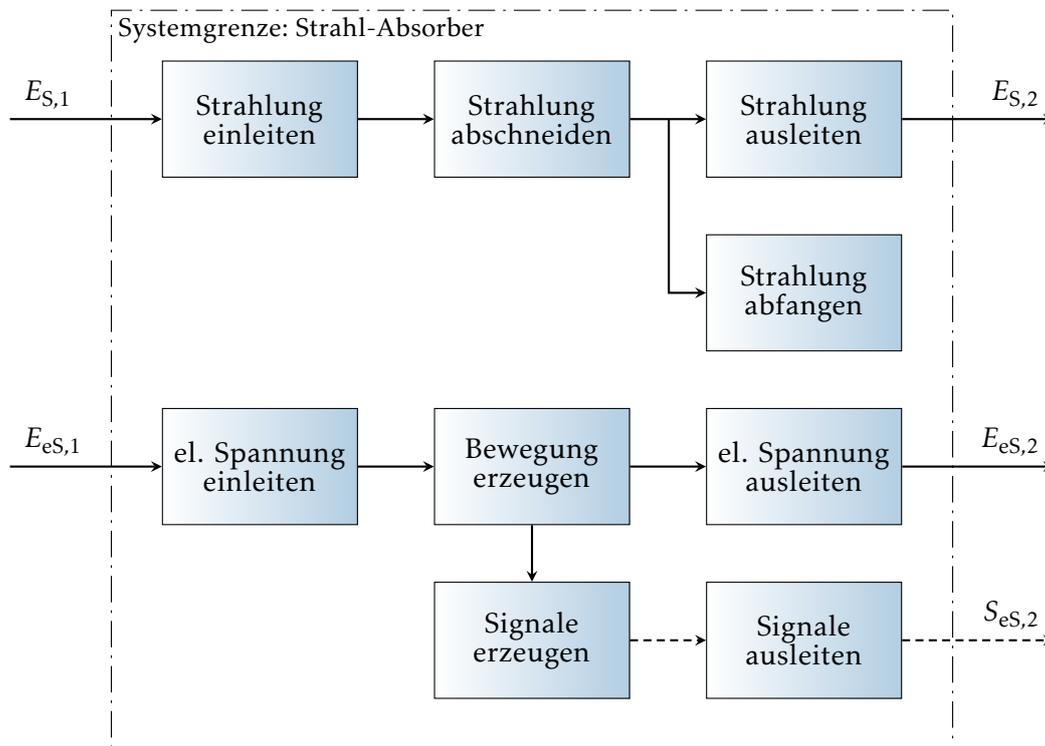


Abbildung 15: Funktionsstruktur des Strahl-Absorbers

trischer Energie ist mit magnetischen oder elektrischen<sup>18</sup> Feldern realisierbar. Signale können elektrischer, optischer oder akustischer Natur sein.

### 3.2.2 Morphologie, Lösungsprinzipien und Bewertung

Je nach Probe oder Experiment werden drei unterschiedliche Arten von Strahl-Absorber benötigt.

#### Runder Strahl-Absorber

Runde Strahl-Absorber (auch „Beamstop“ genannt) kommen meistens bei Experimenten in Transmissionsgeometrie zum Einsatz. Dieser Strahl-Absorber absorbiert den zentralen transmittierten Strahl, siehe Abbildung 16. Je nach Messtechnik wird der Strahl-Absorber an einem Draht, beispielsweise ein 0,5 bis 0,7 mm

<sup>18</sup>Nach Patent: HENKE, A.: DE102006034454A1 : *Elektromotor mit dem Wirkprinzip des elektrischen Feldes*. 31.01.2008

Wolfram-Draht, oder in einem Rahmen auf Polyimid-Folien<sup>19</sup> aufgeklebt. Polyimidfolien werden aufgrund der thermische Stabilität und der hohen Transmittivität, also Durchlässigkeit des Mediums, für Röntgenlicht häufig als Fenstermaterial von Vakuumkammern verwendet. Polyimide behalten auch bei hohen Temperaturen ihre hohe mechanische Festigkeit.

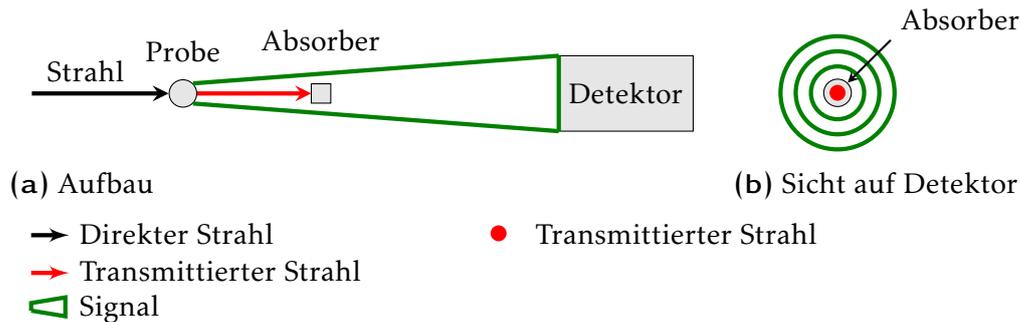


Abbildung 16: Aufbau runder Strahl-Absorber

### Strahl-Absorptions-Blende oder -Blenden

Strahl-Absorptions-Blenden kommen meistens bei Reflexionsexperimenten zum Einsatz. Ihre Aufgabe besteht darin ein starkes ungewollt reflektiertes Signal von der Probe aufzufangen und dabei möglichst viel von dem gewollten schwächeren Streusignal der Probe zum Detektor durchzulassen. Je nach Messtechnik werden dabei ein bis zwei zueinander gekreuzte Blenden verwendet.

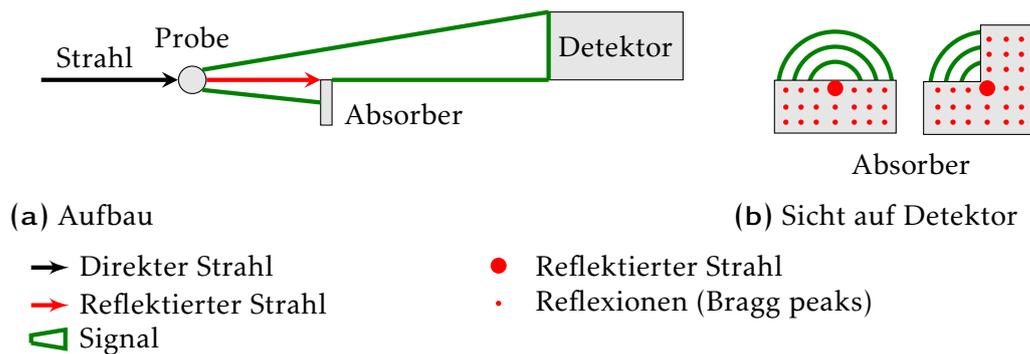


Abbildung 17: Aufbau von Strahl-Absorptions-Blenden

<sup>19</sup>Bekannt unter dem Produktnamen Kapton der Firma DuPont.

Teilfunktionsträger sind in der Tabelle 5 in Form eines morphologischen Kastens dargestellt.

Zur Realisierung der Teilfunktionen kann die Strahlung mit einer Platte hoher Dichte absorbiert werden und mit einer scharfen Kante beziehungsweise mehreren scharfen Kanten abgeschnitten werden. Neben den scharfen Kanten, an einer Platte, sind auch Zylinder mit sehr geringer Rauheit denkbar.

Spannungen ein- und ausleiten ist mit elektrischen Leitungen die in Führungen oder mit Kabelbinder fixiert werden denkbar. Zur Erzeugung von Bewegungsenergie kommt ein Schritt- und Servomotor in Frage. Bei der Signalerzeugung können Druckschalter verwendet werden. Der Signaltransport ist dabei in elektrischen und optischen Leitungen durchführbar. Letzteres mit Hilfe von Leuchtdioden. Neben einer Verkabelung ist auch eine Anwendung von akustischen Signalen denkbar.

### **Lösungsprinzipien**

In der Tabelle 5 sind ausgesuchte Lösungsprinzipien eingezeichnet, die im nachfolgenden kurz beschrieben sind.

#### **1. Lösungsprinzip (Volllinie)**

Hier wird die Gesamtkonstruktion über eine Grundplatte seitlich an den Diffraktometer verschraubt. Diese Grundplatte stellt dabei die Grundlage einer Schienenstruktur dar, die zur ersten Distanzüberbrückung beziehungsweise Vorpositionierung verwendet wird. Die Einzelteile werden zueinander verschraubt. Zum Ende der Schienenkette sind zwei Linearführungen mit Schrittmotoren seriell geschaltet, diese positionieren den Strahl-Absorber mit der geforderten Genauigkeit zur Endposition. Die Strahl-Absorbierung erfolgt an einem Zylinder geringer Rauheit, welcher an einer Platte über den Motor verschraubt ist. Endpositionen werden mit einem Druckschalter aufgenommen. Die Signalübermittlung sowie alle notwendige elektrische Versorgungen erfolgt mit Hilfe elektrischer Leitungen. Befestigt werden die Leitungen mit Kabelbinder an der Schienenkonstruktion.

#### **2. Lösungsprinzip (Strichlinie)**

Hier wird die Gesamtkonstruktion ebenfalls über eine Grundplatte seitlich an

Tabelle 5: Morphologischer Kasten des Strahl-Absorbers

		Teilfunktionsträger (Teillösungen)		
		1	2	3
Teilfunktionen	Strahlung einleiten	offen ohne Hindernis	Fenster	
	Strahlung abschneiden	Platte mit einer scharfer Kante	Platte mit zwei scharfen Kanten	Zylinder mit sehr geringer Rauheit
	Strahlung ausleiten	offen ohne Hindernis	mit Reflektor extern	Fenster
	Strahlung abfangen	Platte hoher Dichte	Abfangen	
	el. Spannung einleiten	el. Leitung mit Kabelbinder fixiert	el. Leitung in Führungen	
	Bewegung erzeugen	Bewegungsenergie durch Schrittmotor	Bewegungsenergie durch Servomotor	Bewegung durch Piezo-Positionierer
	el. Spannung ausleiten	verbunden mit einleiten	el. Leitung mit Kabelbinder fixiert	el. Leitung in Führungen
	Signale erzeugen	Druckschalter	Druckschalter mit Leuchtdioden	
	Signale ausleiten	elektrische Leitungen	optische Leitung (Lichtwellenleiter)	akustisch durch Schallwandler

den Diffraktometer verschraubt. Gleichwohl ist eine Schienenstruktur zur Vorpositionierung über die Grundplatte vorgesehen. Ebenso zur ersten Lösungsvariante werden die Einzelteile zueinander verschraubt. Wie auch der eigentliche

Positionierung durch zwei mit Schrittmotoren angetriebene und seriell geschaltete Linearführungen. Anders zu Funktionen wie der Absorbierung und des Abschneidens von Strahlen, ist hier eine Platte mit zwei scharfen Kanten vorgesehen. Diese Platte ist wiederum an den Motor verschraubt. Endpositionen werden mit einem Druckschalter aufgenommen. Die Signalübermittlung erfolgt mit Lichtwellenleiter und die elektrische Versorgung mit elektrischen Leitungen. Die Leitung wird in vorgesehenen Führungen verlegt.

### Bewertung

Zur Bewertung der Lösungsvarianten sind in Tabelle 6 Gewichtungsfaktoren formuliert.

**Tabelle 6:** Binäre Gewichtungsmatrix des Strahl-Absorbers

im Vergleich zu Kriterium	Kriterium					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Anzahl scharfe Kanten (1)	–	1	0	1	1	1
Flexibilität (2)	0	–	0	1	0	1
wenig Teile (3)	1	1	–	1	1	1
einfache Fertigung (4)	0	0	0	–	0	1
leichte Montage (5)	0	1	0	1	–	1
Gewährleistbare Verfahrenwege (6)	0	0	0	0	0	–
Summe	1	3	0	4	2	5 = 15
Gewichtungsfaktor $g_i$ in Prozent	7	20	0	27	13	33 = 100

Legende: 1 = wichtiger; 0 = nicht wichtiger

Aufgrund des Gewichtungsfaktors  $g_3$  hat das Kriterium 3 keinen Einfluss auf die Lösungsbewertung (Tabelle 7). Damit das Kriterium  $g_3$  dennoch eine geringfügige Auswirkung hat, werden hierfür zwei Prozente berücksichtigt.

Nach Tabelle 7 ist die erste Lösungsvariante zu gestalten. Im anschließenden wird eine Grobgestaltung dieser Variante dargestellt. Zur zweiten Lösungsvariante muss eine Verbesserung zur einfacheren Fertigung und der leichteren Montage erfolgen.

Tabelle 7: Bewertungsliste des Strahl-Absorbers

Bewertungskriterien	Gewichtung $g_i$	Variante 1		Variante 2	
		$P_i$	$P_i \cdot g_i$	$P_i$	$P_i \cdot g_i$
Anzahl scharfe Kanten	0,07	3	0,21	4	0,28
Flexibilität	0,20	3	0,60	3	0,60
wenig Teile	0,02	3	0,06	2	0,04
einfache Fertigung	0,27	4	1,08	3	0,81
leichte Montage	0,13	4	0,52	3	0,39
Gewährleistbare Verfahrenwege	0,33	3	0,99	3	0,99
Summe			3,46		3,11
Technische Wertigkeit ( $P_i \cdot g_i/4$ )			0,85		0,76
Rang			1		2

Legende: 0 = unbefriedigend; 1 = noch tragbar; 2 = ausreichend; 3 = gut; 4 = sehr gut

### 3.2.3 Gestaltung

In diesem Abschnitt wird die ausgesuchte Lösung grob gestaltet und ausgelegt. Zur Einschätzung der Umgebung kann die Abbildung 7 und 18 genutzt werden. Die zu nutzende Schnittstelle ist die untere rechteckige, grau dargestellte, Grundplatte. Der eigentliche Strahl-Absorber wird zur bestmöglichen Signalqualität dicht hinter der Probe beziehungsweise in Zentrumsnähe des Diffraktometers positioniert. Zur geringsten Beeinträchtigung der Verfahrenwege, muss bei der Gestaltung bereits auf die Position des Flugrohrs (Abschnitt 3.3) geachtet werden. Das Flugrohr verläuft vom Zentrum zur, in Abbildung 18 gelb dargestellten, Platte.

Zur manuellen Vorpositionierung werden Schienensysteme von *Qioptiq*<sup>20</sup> – bekannter unter der Marke *LINOS* – verwendet (siehe Abbildung 19). Zur ersten Befestigung mit dem Diffraktometer ist eine Grundplatte konstruiert, die bestehende Bohrungen des Diffraktometers nutzt. Auf dieser Grundplatte sind, mit den Schienensystemen FLS95 und Profilsystem X95 von LINOS, drei Achsen nachempfunden um die Vorpositionierung vorzunehmen. Diese Schienen sind aus Aluminium und damit leichter gegenüber vergleichbare Stahl-Varianten und

<sup>20</sup>Qioptiq / LINOS: <http://www.qioptiq.de/pr-linos-rebrand.html>

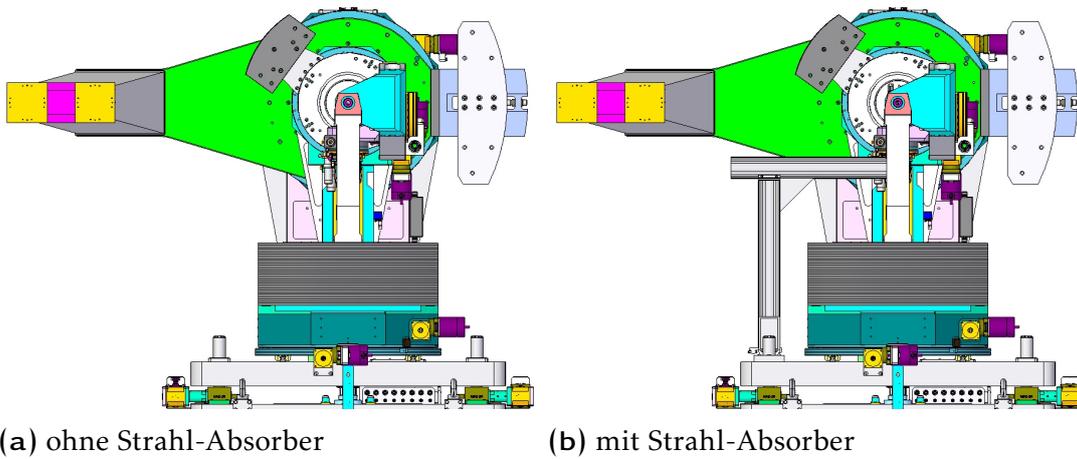


Abbildung 18: Seitenansicht des Diffraktometers

besitzen aufgrund der Form ein hohes Trägheitsmoment. Vorteilhaft ist ebenfalls die einfache Handhabung und Korrosionsbeständigkeit.

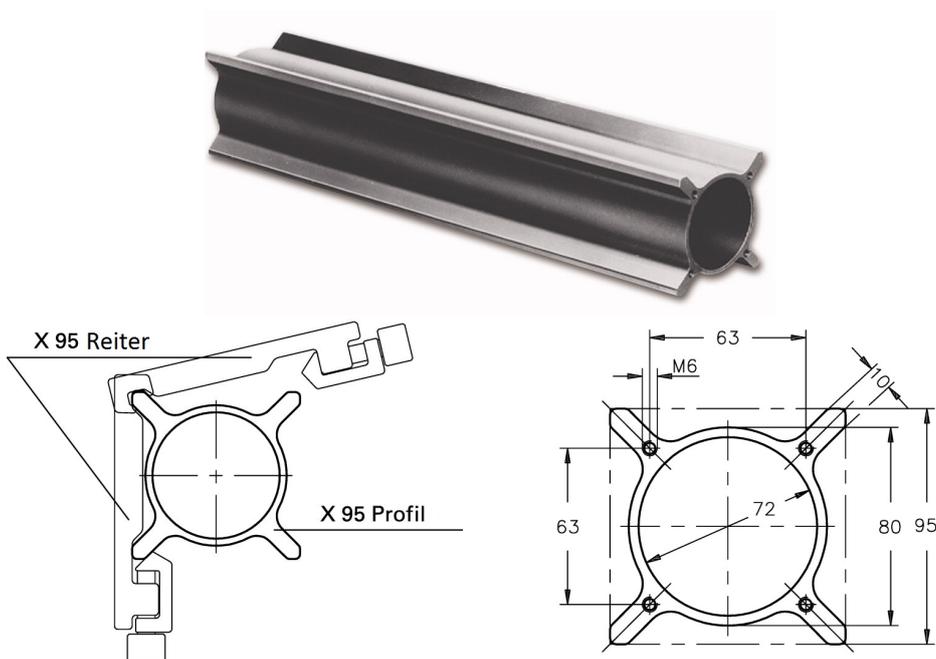


Abbildung 19: X 95 Profile System von Qioptiq<sup>21</sup>

Am Ende der Schienenkette sind zwei angetriebene Lineartische seriell befestigt. Die Lineartische werden mit Schrittmotoren angetrieben und übernehmen die Feinpositionierung des Strahl-Absorbers. Am Endeffektor – dem letzte Element der kinematischen Kette – befindet sich der eigentliche Strahl-Absorber. Zur weiteren Versteifung der gut 50 kg schweren Gesamtkonstruktion des Strahl-Absorbers (Abbildung 23) sind Winkel an den Achsübergängen vorgesehen.

Lineartische und Motoren werden aufgrund der geforderten Steifigkeit, Kompaktheit und Genauigkeit von Drittfirmen eingekauft. Die Marktrecherche liefert bezüglich den Anforderungen befriedigende Ergebnisse. Eine wirtschaftlich konkurrierende Eigenkonstruktion mit den bisher gefunden Lösungen ist nicht realistisch. Infrage kommt die *Lineareinheit LX20* von *MISUMI* (siehe Anhang Seite 94 und Abbildung 20) und der *Präzisions-Lineartisch LTM 45* von *OWIS* (siehe Anhang Seite 96).



Abbildung 20: Lineareinheit LX2001-B1-T2028-100 von MISUMI<sup>22</sup>

Bezogen auf den Anforderungen fiel die Wahl auf die *Lineareinheit LX2001-B1-T2028-100* von *MISUMI*. Diese Einheit hat ein Effektivhub von 36,5 mm, einen 2-Phasen Schrittmotor von *Oriental Motor* und eine Gesamtlänge des Grundkörpers von 100 mm beziehungsweise 156 mm gesamt. Dem gegenüber umfasst der *Präzisions-Lineartisch LTM 45-25-MiSM* einen Stellweg von 25 mm, einen 2-Phasen Schrittmotor und einer Gesamtlänge von 178 mm. Die gewählte Lineareinheit von *MISUMI* ist in Abbildung 20 abgebildet.

<sup>21</sup>Quelle: Qioptiq, URL: <http://www.qioptiq-shop.com/en/Optomechanics/Rail-Systems/Rail-System-95/X-95-Profile-System.html>

<sup>22</sup>Quelle: MISUMI, URL: <http://de.misumi-ec.com/>

Der zur *MISUMI*-Lineareinheit gehörende *Oriental Motor* der CSK Serie ist ein 200 Schrittmotor mit 2 Phasen (Vollschrittbetrieb  $1,8^\circ/\text{Schritt}$  und 200 Schritte/Umdrehung). Mit der Spindelsteigung<sup>23</sup> von 1,5 werden im Vollschrittbetrieb  $7,5\ \mu\text{m}$  Hub geleistet ( $= 1,5\ \text{mm} \cdot 1,8^\circ/360^\circ$ ). Zur Steigerung der Auflösung kann der Motor im Mikroschritt betrieben werden. Bei 1/10 erhöhen sich die Schritte pro Umdrehung um das zehnfache und dementsprechend verringert sich der Hub pro Schritt um ein Zehntel ( $0,75\ \mu\text{m}$ ). Die statische Traglast beträgt mit der Lineareinheit 6199N und gewährleistet eine Wiederholgenauigkeit von  $5\ \mu\text{m}$ .

Endpositionen der Verfahwege werden durch Druckschalter aufgenommen. Der Informationsaustausch von Endstellungen und die Versorgung aller elektrischen Geräte erfolgt mit elektrischen Leitungen. Die dabei anfallenden Leitungen werden mit Hilfe von Kabelbindern an der Schienenkonstruktion befestigt.

Bei der Werkstoffwahl, des eigentlichen Strahlabsorbers, muss auf eine genügend hohe Absorption der Röntgenstrahlung geachtet werden. Der Absorber muss in der Lage sein den vollen direkten Strahl von typischer Weise  $10^{12}$  Photonen/s aufzuhalten. Dabei ist zu beachten, dass die Absorption von Röntgenstrahlung stark von der Energie der Röntgenstrahlung abhängt. Abbildung 21 zeigt die Transmission der Röntgenstrahlung von Tantal beziehungsweise Wolfram, mit einer

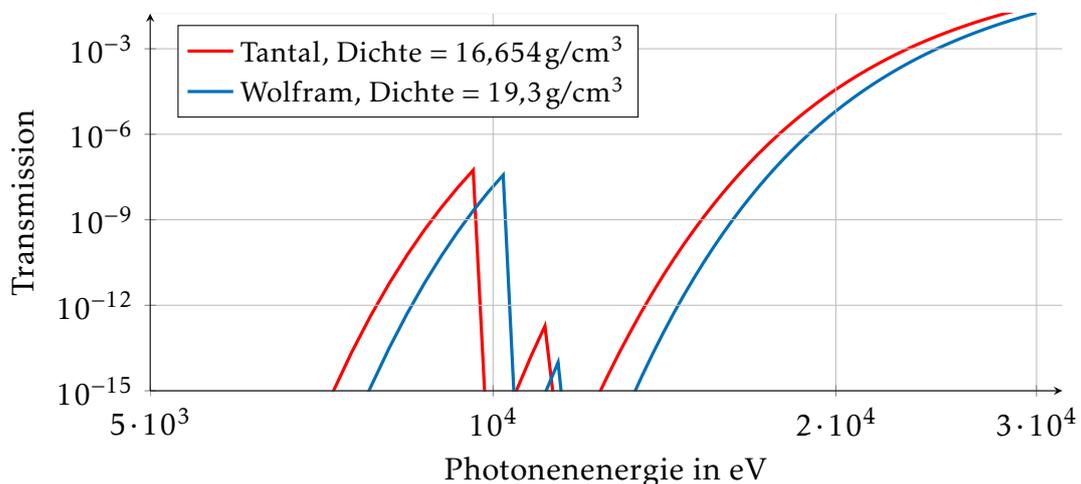


Abbildung 21: Transmissionssfilter von Ta — und W — bei einer Dicke von  $100\ \mu\text{m}$ <sup>24</sup>

<sup>23</sup>Von der Lineareinheit LX2001-B1-T2028-100

<sup>24</sup>Daten-Quelle: The Center for X-Ray Optics, URL: <http://henke.lbl.gov/>

Dichte von  $16,654\text{g/cm}^3$  beziehungsweise  $19,3\text{g/cm}^3$  für einen Energiebereich von 5 bis 30keV. Die Überprüfung der Absorptionsfähigkeit beider Materialien bei einer Stärke von  $100\mu\text{m}$  zeigt, dass beide Materialien gut absorbieren, aber auch, dass diese Dicke nicht ausreichend für Energien nahe 30keV ist. Es zeigt sich, dass eine Materialdicke von 1mm benötigt wird, um den vollen direkten Strahl um einen Faktor  $10^{12}$  bei 30keV abzuschwächen (Abbildung 22). Bei diesen niedrigen Transmissionen beider Werkstoffe spielen die Absorptionskanten nahe 10keV keine Rolle mehr. Beide Werkstoffe können als Absorptionsmaterial eingesetzt werden. Die Wahl fällt aufgrund der günstigeren Anschaffungskosten auf Wolfram.

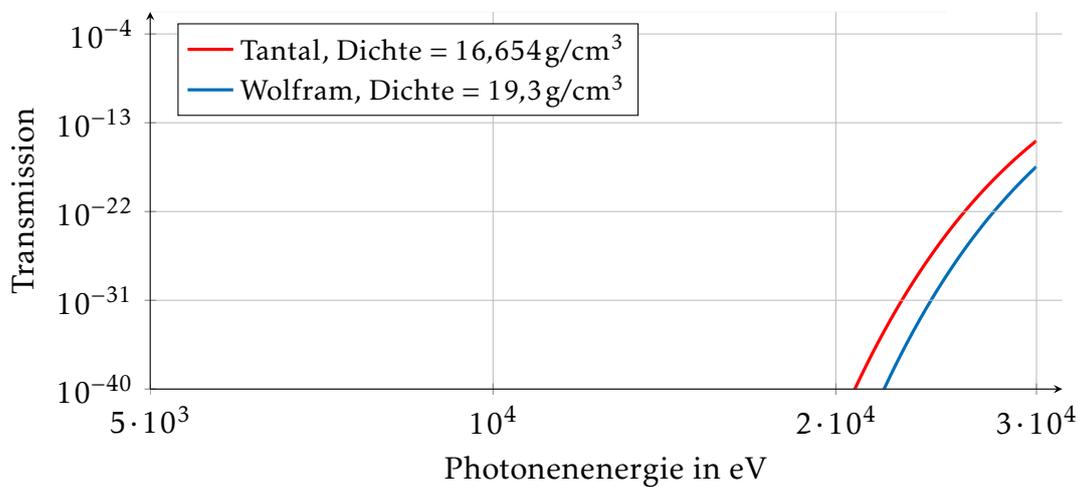


Abbildung 22: Transmissionsfilter von Ta — und W — bei einer Dicke von 1 mm<sup>25</sup>

<sup>25</sup>Daten-Quelle: The Center for X-Ray Optics, URL: <http://henke.lbl.gov/>

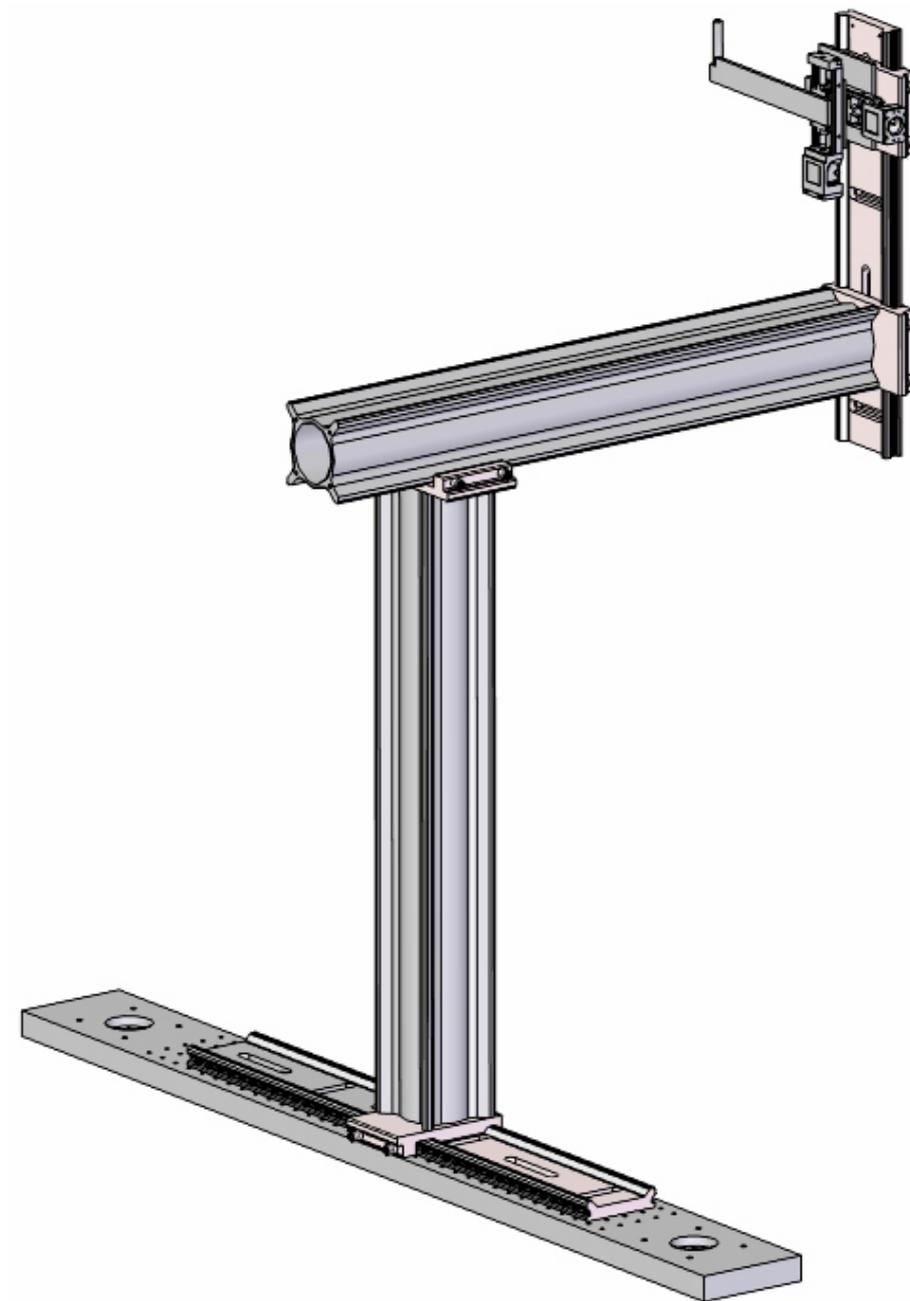


Abbildung 23: Gesamtaufbau des Strahl-Absorbers

### 3.3 Zwei adaptive Flugrohre zur Minimierung von Streueffekten durch die Luft

Die Flugrohre (Flytubes) haben die Aufgabe die Streueffekte von Strahlungen durch die Luft zu minimieren.

#### 3.3.1 Anforderungen und Funktionsanalyse

Die Forderungen der Flugrohre ist

- die Evakuierung beziehungsweise
- das Fluten der Flugrohre mit Helium.
- Austrittsfenster mit Durchmesser von 60 mm und 135 mm sowie
- adaptive Längen der Flugrohre zwischen 500 mm und 3000 mm beziehungsweise 500 mm und 2000 mm.

Die Gesamtfunktion der Flugrohre ist in Abbildung 24 dargestellt. Es sollen sich Strahlungen ungehindert zum Detektor ausbreiten. Die Flugrohre werden dazu entweder evakuiert oder mit Helium geflutet.

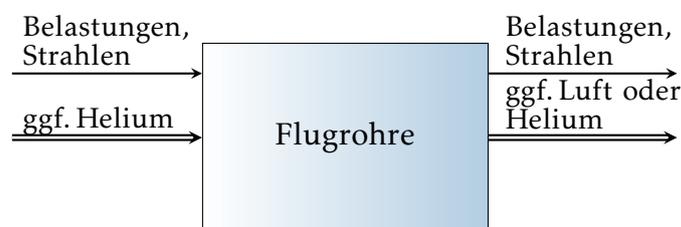


Abbildung 24: Gesamtfunktion der Flugrohre

Die Funktionsstruktur in Abbildung 25 zeigt den Zusammenhang von Teilfunktionen zur Gesamtfunktion und setzt sich aus folgenden Teilfunktionen zusammen:

- Belastung ein- und weiterleiten sowie
- Strahlung ein- und ausleiten.
- Ebenso Streueffekte minimieren. Dabei muss gegebenenfalls
- Helium ein- und ausgeleitet beziehungsweise Luft ausgeleitet werden.

Die ersten beiden Punkte sind vom Typ Energie und der letzte Punkte vom Typ Stoff. Die Kennzeichnungen für die Energieform sind hier  $E_B$  für die Belastung und  $E_S$  für die Strahlung. Bei der Stoffform Luft ist es  $St_L$  und bei Helium  $St_{He}$ .

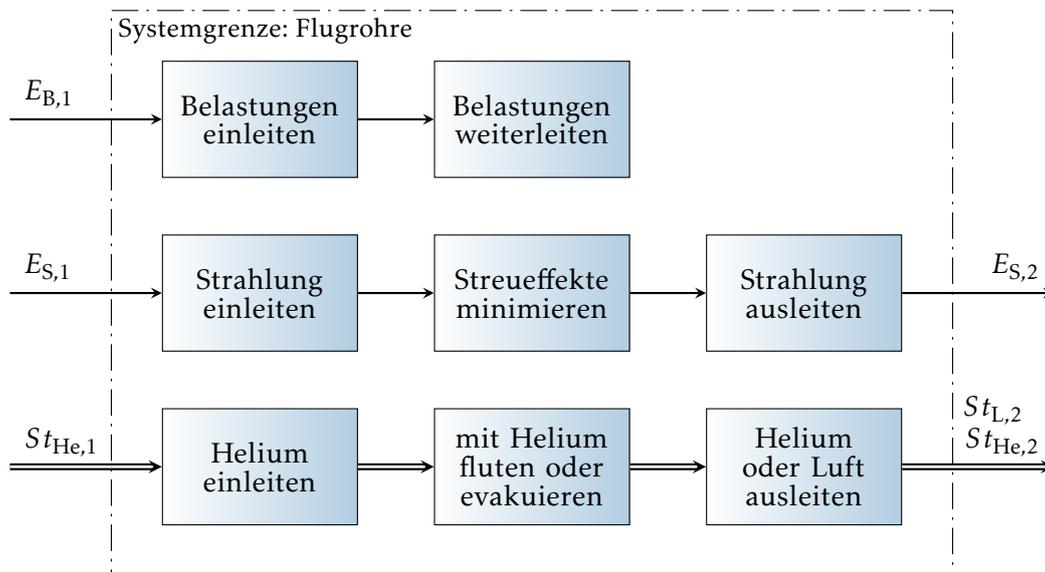


Abbildung 25: Funktionsstruktur der Flugrohre

Wirkprinzipien zur bestmöglichen Minimierung von Streueffekten ist die Evakuierung. Eine weitere Variante ist das Fluten mit einem Gas geringer Dichte wie Helium. Beide Varianten benötigen einen geschlossenen Körper.

### 3.3.2 Morphologie, Lösungsprinzipien und Bewertung

Teilfunktionsträger sind in der Tabelle 8 in Form eines morphologischen Kastens dargestellt.

Zur Realisierung der Teilfunktionen können Belastungen – hier Bewegungen – durch eine verschraubte Halterung eingeleitet werden. Neben der Möglichkeit die Halterung am Diffraktometer selbst zu befestigen, besteht die Möglichkeiten die Schienenkonstruktion des Detektorhalters zu nutzen.

Strahlungen sind durch ein Fenster in ein Rohrsystem ein- und ausleitbar. Das Rohrsystem ist aufgrund der Evakuierung oder Heliumflutung als abschließba-

ren Körper zu entwickeln. Die Rohre können mit geraden oder konischen Elementen zusammengesetzt sein. Die hierfür infrage kommenden Werkstoffe sind Aluminium, Kunststoff und Edelstahl. Diese Werkstoffe stehen aufgrund den Anschaffungskosten und der Dichte im Bereich der Anforderungen zur Auswahl.

Tabelle 8: Morphologischer Kasten der Flugrohre

		Teilfunktionsträger (Teillösungen)		
		1	2	3
Teilfunktionen	Belastungen einleiten	Halterung vertikal verschrauben	Halterung horizontal verschrauben	Halterung vertikal und horizontal verschrauben
	Belastungen weiterleiten	Rohr durch Halterung verklemmen	Halterung am Flansch verschrauben	
	Strahlung einleiten	Fenster mit Polyimid-Folie	Fenster mit Glas	offen ohne Hindernis
	Streuereffekte minimieren	evakuierte Rohre	mit Helium geflutete Rohre	offen ohne Hindernis
	Strahlung ausleiten	Fenster mit Polyimid-Folie	Fenster mit Glas	offen ohne Hindernis
	Helium einleiten	Ventil	Fenster öffnen	Nichtumsetzung
	mit Helium fluten oder evakuieren	abgeschlossene Konstruktion	abschließbare Konstruktion	offene Konstruktion
	Helium oder Luft ausleiten	Ventil	Fenster öffnen	

Zur Evakuierung oder Flutung mit Helium des Flugrohres ist ein beziehungsweise sind zwei Ventilen notwendig.

### **Lösungsprinzipien**

In der Tabelle 8 sind ausgesuchte Lösungsprinzipien eingezeichnet, die im nachfolgenden kurz beschrieben sind.

#### **1. Lösungsprinzip (Volllinie)**

Hier wird die Gesamtkonstruktion als Schweißbaugruppe mit evakuierten Aluminiumrohren realisiert. Einzelne Rohrabschnitte werden mit einem Flansch und einer Elastomerdichtung, in Form eines O-Rings, verschraubt und verdichtet. Die Evakuierung kann dabei an einem zusätzlichen Anschluss durchgeführt werden. Mit Reduzierstücke werden Durchmesserwechsel ermöglicht. Montiert wird das Flugrohr direkt am Rohr über Halterungen die selber an der Schiene vom Detektorhalter befestigt sind.

#### **2. Lösungsprinzip (Strichlinie)**

Hier wird die Gesamtkonstruktion mit Helium-geflutete Kunststoffrohre realisiert. Einzelne Rohrabschnitte werden ebenfalls mit einem Flansch und einer Elastomerdichtung, in Form eines O-Rings, verschraubt und verdichtet. Zur Befüllung und Entnahme von Helium sind zwei zusätzliche Anschlüsse vorgesehen. Durchmesserwechsel werden direkt über die Flansche ermöglicht. Die Montage des Flugrohrs erfolgt auch hier über die Schiene vom Detektorhalter.

### **Bewertung**

Zur Bewertung der Lösungsvarianten sind in Tabelle 9 Gewichtungsfaktoren formuliert.

Aufgrund des Gewichtungsfaktors  $g_3$  hat das Kriterium 3 keinen Einfluss auf die Lösungsbewertung (Tabelle 10). Damit das Kriterium  $g_3$  dennoch eine geringfügige Auswirkung hat, werden hierfür zwei Prozente berücksichtigt.

Nach Tabelle 10 sind beide Lösungsprinzipien in der Wertigkeit dicht beieinander. Im anschließenden wird eine Grobgestaltung der ersten Lösungsvariante dargestellt. Zur zweiten Lösungsvariante muss eine Verbesserung zur Streueffekt-Minimierung und der einfachen Fertigung erfolgen.

Tabelle 9: Binäre Gewichtungsmatrix der Flugrohre

im Vergleich zu Kriterium	Kriterium					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Streueffekt-Minimierung (1)	–	0	0	0	0	0
Gerings Gewicht (2)	1	–	0	0	0	1
wenig Teile (3)	1	1	–	1	1	1
einfache Fertigung (4)	1	1	0	–	0	1
leichte Montage (5)	1	1	0	1	–	1
Gewährleistbare Verfahrswege (6)	1	0	0	0	0	–
Summe	5	3	0	2	1	4 = 15
Gewichtungsfaktor $g_i$ in Prozent	33	20	0	13	7	27 = 100

Legende: 1 = wichtiger; 0 = nicht wichtiger

Tabelle 10: Bewertungsliste der Flugrohre

Bewertungskriterien	Gewichtung $g_i$	Variante 1		Variante 2	
		$P_i$	$P_i \cdot g_i$	$P_i$	$P_i \cdot g_i$
Streueffekt-Minimierung	0,33	4	1,32	3	0,99
Gerings Gewicht	0,20	3	0,60	4	0,80
wenig Teile	0,02	3	0,06	3	0,06
einfache Fertigung	0,13	4	0,52	3	0,39
leichte Montage	0,07	4	0,28	3	0,21
Gewährleistbare Verfahrswege	0,27	3	0,81	4	1,08
Summe			3,59		3,53
Technische Wertigkeit ( $P_i \cdot g_i/4$ )			0,88		0,87
Rang			1		2

Legende: 0 = unbefriedigend; 1 = noch tragbar; 2 = ausreichend; 3 = gut; 4 = sehr gut

### 3.3.3 Gestaltung

Die Achse des Flugrohrs muss im Abstand von 220 mm zur Schnittstelle am Diffraktometer positioniert werden. Da das Flugrohr an der Schiene vom Detektorhalter befestigt wird, muss die Halterung für das Flugrohr immer im Zusammenhang mit dem Detektorhalter erarbeitet werden. Zur Einschätzung der Umgebung kann die Abbildung 26 genutzt werden.

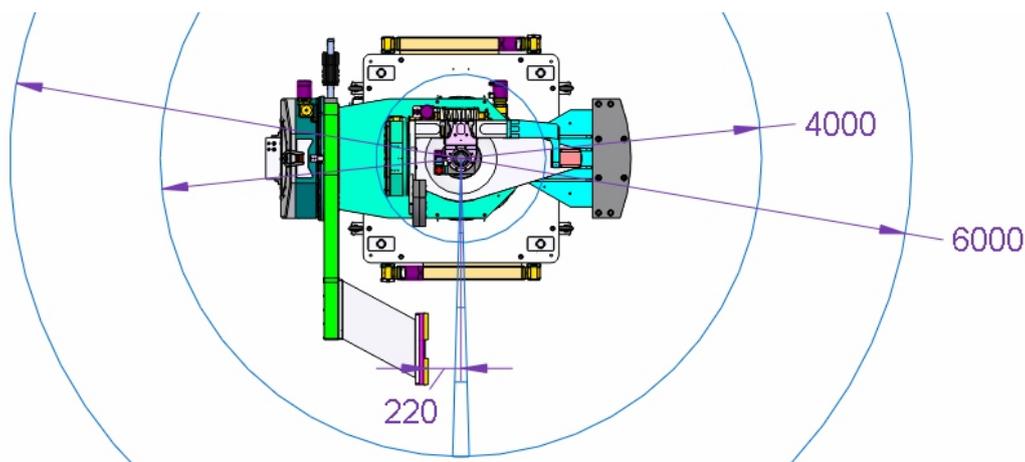


Abbildung 26: Diffraktometer-Draufsicht mit Strahlenkegel für Flugrohr mit 135 mm Austrittsfenster und 2 m Länge

Aufgrund von Gewichtsreduktion werden, gegenüber Rohre mit konstantem Durchmesser, Rohrabschnitte mit abgestuften Durchmessern verwendet. Die Durchmesser der Flugrohre leiten sich hierbei von dem Strahlenkegel ab. Der Strahlenkegel hat den Ursprung im Zentrum des Diffraktometers und breitet sich zum Detektor hin aus. Die Größe des Fensters vom Detektor stellt den Enddurchmesser des Strahlenkegels dar. Die Bestimmung von Durchmessern  $D_{\text{gesucht}}$  des Strahlenkegels an bestimmten Entfernungen zum Zentrum lassen sich mit dem Dreisatz berechnen, also aus dem Produkt des geforderten Enddurchmessers  $D_{\text{gesamt}}$  mit dem Quotient der Entfernung am gesuchten Durchmesser  $L_{\text{gesucht}}$  zur Gesamtlänge des Rohres  $L_{\text{gesamt}}$  ( $D_{\text{gesucht}} = D_{\text{gesamt}} \times L_{\text{gesucht}} / L_{\text{gesamt}}$ ).

In den Tabellen 11 und 12 sind minimale und gewählte Durchmesser für beide Flugrohre in 500 mm-Stufungen aufgelistet. Gewählte Rohre, mit dem Fensterdurchmesser von 60 mm, nach Tabelle 11, sind 40, 50, 65 und 80 Millimeter im

Durchmesser. Rohre mit dem Fensterdurchmesser von 135 mm sind nach Tabelle

**Tabelle 11:** Durchmesser für Flugrohr mit 60 mm Austrittsfenster

		Entfernung zum Zentrum in m						
		0,25	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Durchmesser für 3 m	minimal	5	10	20	30	40	50	60
	gewählt	40	40	40	40	50	65	80
Durchmesser für 2,5 m	minimal	6	12	24	36	48	60	
	gewählt	40	40	40	50	65	80	
Durchmesser für 2 m	minimal	7,5	15	30	45	60		
	gewählt	40	40	40	65	80		
Durchmesser für 1,5 m	minimal	10	20	40	60			
	gewählt	40	40	50	80			
Durchmesser für 1 m	minimal	15	30	60				
	gewählt	40	40	80				
Durchmesser für 0,5 m	minimal	30	60					
	gewählt	40	80					
Durchmesserangaben in mm								

12; 100, 125 und 150 Millimeter im Durchmesser.

**Tabelle 12:** Durchmesser für Flugrohr mit 135 mm Austrittsfenster

		Entfernung zum Zentrum in m				
		0,25	0,5	1	1,5	2
Durchmesser für 2 m	minimal	16,88	33,75	67,5	101,25	135
	gewählt	40	40	80	125	150
Durchmesser für 1,5 m	minimal	22,5	45	90	135	
	gewählt	40	50	100	150	
Durchmesser für 1 m	minimal	33,75	67,5	135		
	gewählt	40	80	150		
Durchmesser für 0,5 m	minimal	67,5	135			
	gewählt	80	150			
Durchmesserangaben in mm						

Die Dicken-Bestimmung der Rohrabschnitte erfolgt mit einem Stabilitätsnachweis. In diesem Fall mit dem Versagensfall Beulen nach innen. Gerechnet wird dabei nach der in DUBBEL [23] angegebenen Formel für Beulen von Schalen, genauer Kreiszyinderschalen. Angenommen ist dabei konstanter radialer Außendruck  $p$  und die Vernachlässigung von Randeffekten (unendlich lange Schale).

$$p_K = \frac{Eh^3}{4R^3(1-\nu^2)} \quad (3.7)$$

Hierin stehen  $p_K$  für den Beulendruck,  $E$  für den Elastizitätsmodul,  $h$  für die Rohrwandstärke,  $R$  für den mittleren Radius des Rohres und  $\nu$  für die Querkontraktionszahl des Werkstoffes.

Um die minimale Rohrwandstärke

$$h = R \sqrt[3]{\frac{4p_K(1-\nu^2)}{E}} \quad (3.8)$$

zu bestimmen wird der mittlere Luftdruck der Atmosphäre auf Meereshöhe  $p_u$  von 0,101325 MPa als Beulendruck  $p_K$  angenommen. Neben den beiden Materialkennwerten für Aluminium, dem Elastizitätsmodul  $E$  von 70 GPa und der Querkontraktion  $\nu$  von 0,35, ist die Wandstärke noch vom mittleren Radius abhängig. Dabei werden zur ersten Auslegung die Radien von den Tabellen 11 und 12 verwendet. Die Abmaße der DN-Rohre sind aus der Tabelle 14 herleitbar. Der Übersicht halber sind die Ergebnisse in der nachstehenden Tabelle 13 zusammengefasst.

**Tabelle 13:** Minimale Wandstärken der Flugrohrabschnitte

gewählte Nennweite DN/DIN	40	50	65	80	100	125	150
Wandstärke nach DUBBEL	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	1,1	1,4
Wandstärke nach YAMAKI	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3
Angaben in mm							

In der Dissertation „Stabilitäts- und Sensitivitätsuntersuchungen dünnwandiger Kreiszyylinder unter axialem und radialem Druck mit der Methode der Finiten Elemente“ von EWERT E. [24] ist eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung von Kreiszyylinder-Wandstärken unter Außendruckbeanspruchung angegeben. Diese

Möglichkeit ist aus der Arbeit „Elastic stability of circular cylindrical shells“ von YAMAKI N. entnommen. Der Beulendruck  $p_c$  ist dabei folgendermaßen definiert.

$$p_c = \frac{\pi^2}{12(1-\nu^2)^{3/4}} a_p E \left(\frac{R}{L}\right) \left(\frac{t}{R}\right)^{5/2}$$

Abweichend den Bezeichnungen in (3.7) sind hierin  $a_p$  ein Parameter zur Bestimmung des kritischen Drucks und  $t$  die Rohrwandstärke. Der Parameter  $a_p$  ist angegeben mit 1,05 für wölbfreie Lagerung. Die, mit dieser nach der Wandstärke umgestellten Formel, ergebenen Wandstärken sind in Tabelle 13 zusammengestellt.

Da die Wandstärken nach YAMAKI im Allgemeinen größer sind und ebenso den Einfluss der Länge berücksichtigt, werden diese minimalen Wandstärken gewählt.

Resultierend werden für die Rohrabschnitte *Reihe A Rohrmaße* nach DIN 11850 – Reihe 2 [25] ausgewählt, siehe dazu Tabelle 14.

**Tabelle 14:** Reihe A Rohrmaße nach DIN 11850 – Reihe 2

gewählte Nennweite DN/DIN	40	50	65	80	100	125	150
Rohr-Außendurchmesser	41	53	70	85	104	129	154
Rohr-Innendurchmesser	38	50	66	81	100	125	150
Wanddicke	1,5	1,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Angaben in mm							

Zur Verbindung der einzelnen Rohrabschnitte werden Flanschverbindungen verwendet, die mit den Rohren verschweißt sind. Nach dem Produktkatalog der Firma VACOM [26] ist die ISO-K-Norm (DIN 28404 [27], ISO 1609 [28]) für Klammerflanschverbindungen die Standardverbindung für Vakuumleitungen ab Nennweite DN63 im Fein- und Hochvakuum. Da Klammerschrauben bei Klammerflanschverbindungen für Aluminium-Bauteile nicht ideal sind, sind eigene Verbindungen vorgesehen. Zur Dichtung werden Elastomerdichtungen, in Form von O-Ringen, eingesetzt. O-Ringe eignen sich als Vakuumdichtungen, da diese sich an feinen Unebenheiten der Dichtungsflächen anpassen. In Abbildung 27 ist eine konkrete Flanschverbindung inklusive Reduzierung dargestellt. Zur Verbindung

der Rohre und den Flanschen sind Innenschweißnähte vorzusehen. Diese vermeiden vakuumseitige Risse und Spalten und damit latente Lecks.

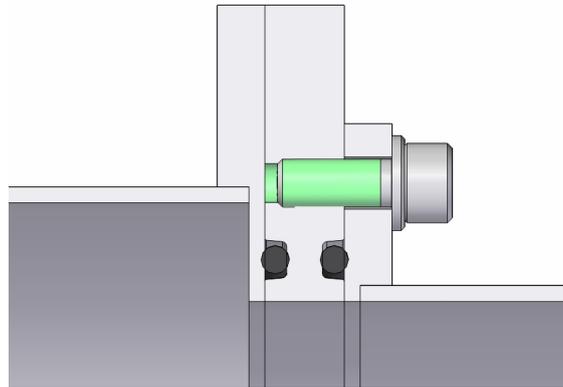


Abbildung 27: Flanschverbindung des Flugrohrs

Aufgrund der bei P10 verwendeten Rohrabschnitte mit KF-Übergängen, ist der letzte Rohrabschnitt als Adapter zu verstehen. Es sind dabei zwei Arten von Adapter vorgesehen. Der erste reduziert vom letzten Rohrdurchmesser auf Nennweite 40 und der zweite auf 50.

Das gesamte Flugrohr (Abbildung 29) mit gut 9 kg ohne Halter beziehungsweise 11 kg Gewicht mit Halter wird über mehrere Halter an die Schiene des Detektorhalters befestigt. Somit können, bis auf dem letzten Abschnitt, den Adapter, einzelne Rohrabschnitte voneinander unabhängig an die Schiene montiert werden. In Abbildung 28 sind die Halterungen für Nennweite 150, 125 und 80 dargestellt.

Bei der Evakuierung der Rohre sind kurze Rohrabschnitte ebenfalls mit KF Anschluss von Nennweite 16 vorgesehen. Geschlossen wird das Flugrohr mit beispielsweise an den Rohrenden aufgeklebten Polyimid-Folien<sup>26</sup>.

---

<sup>26</sup>Einige Eigenschaften zu Polyimid-Folien siehe Abschnitt 3.2.2

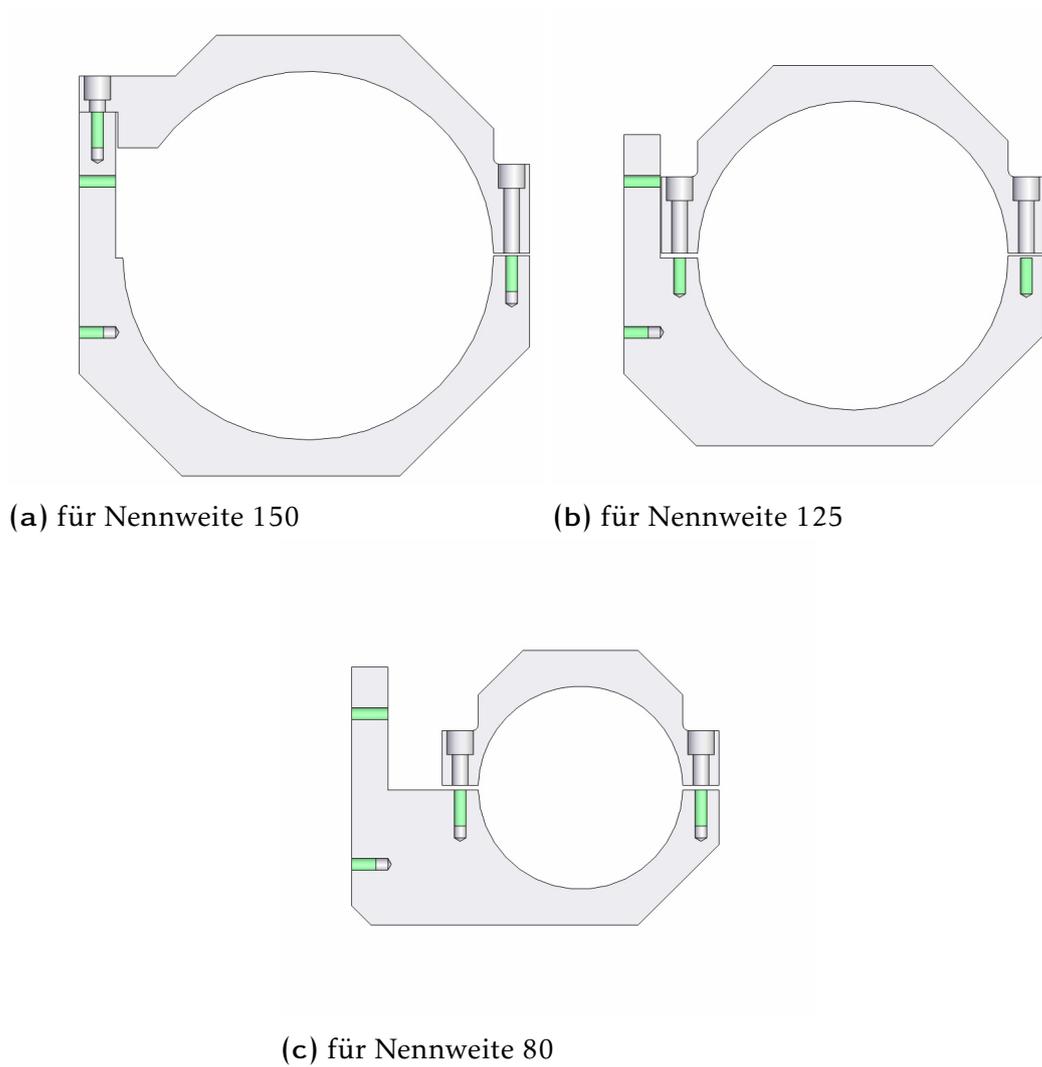


Abbildung 28: Halterungen des Flugrohrs

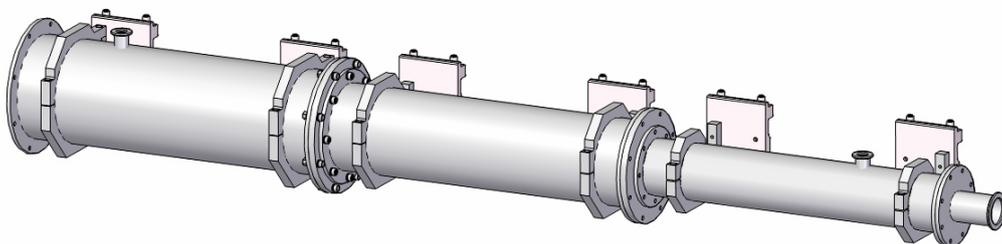


Abbildung 29: Gesamtaufbau des Flugrohrs

### 3.4 Detektorhalter sowie Peripheriezuleitung für verschiedene Detektoren

Der Detektorhalter hat die Aufgabe verschiedene Detektoren in unterschiedlichen Abständen zu positionieren und notwendige Peripherie zu versorgen.

#### 3.4.1 Anforderungen und Funktionsanalyse

Die Hauptanforderung am Detektorhalter ist die Positionierung von unterschiedlichen Detektoren im Drehzentrum des Diffraktometers. Weitere Forderungen des Detektorhalters sind

- das halten der folgenden Detektoren
  - Pilatus 300K von Dectris
  - Maxipix 2x2 von ESRF
  - Princeton Instruments PIXIS-XB CCD
  - Princeton Instruments LCX CCD
  - Andor iKon-L 936 CCD
  - Avalanche Photodiode
- sowie einstellbare Abstände zwischen Detektor und Proben zwischen 500 und 3000 mm.

Da Detektoren bis zu drei Meter vom Zentrum positioniert werden, gelten besondere Forderungen in der Steifigkeit und im Leichtbau.

Die Gesamtfunktion des Detektorhalters ist in Abbildung 30 dargestellt. Es werden unterschiedliche Detektoren an den Detektorhalter montiert beziehungsweise abmontiert. Diese detektieren die gestreute Strahlung und geben elektrische Signale ab.

Die Funktionsstruktur in Abbildung 31 zeigt den Zusammenhang von Teilfunktionen zur Gesamtfunktion und setzt sich aus den folgenden Teilfunktionen zusammen:

- Belastung ein- und weiterleiten sowie
- Strahlung ein- und weiterleiten.



Abbildung 30: Gesamtfunktion des Detektorhalters

- Ebenso Detektor halten als auch
- el. Spannung ein-, weiter- und ausleiten

zusammen. Die ersten beiden Punkte sind vom Typ Energie, der dritte Punkt vom Typ Stoff und der letzte Punkt vom Typ Energie und Signal. Die Kennzeichnungen hier sind  $E_B$  und  $E_S$  für die Energieform Belastung und Strahlung. Für den Detektor ist es  $St_D$  und für die Spannung  $S_{eS}$  beziehungsweise  $E_{eS}$ .

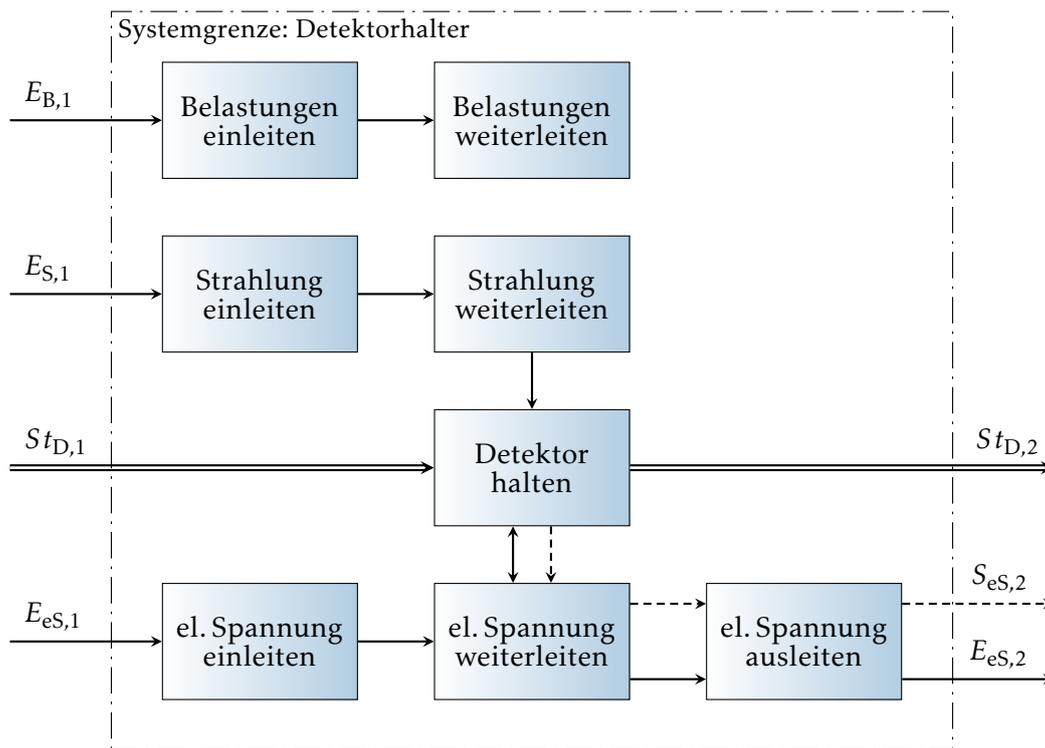


Abbildung 31: Funktionsstruktur des Detektorhalters

Wirkprinzipien für das Einleiten und Übertragen von Belastungen kann eine form-, kraft- und stoffschlüssige Kopplung sein. Gleiches gilt für das Halten von Detektoren.

### 3.4.2 Morphologie, Lösungsprinzipien und Bewertung

Teilfunktionsträger sind in der Tabelle 16 in Form eines morphologischen Kastens dargestellt.

Zur Realisierung der Teilfunktionen können Belastungen – hier Bewegungen – durch eine verschraubte oder geklemmte Halterung eingeleitet werden. Für die Spannungen ist das Ein- und Ausleiten mit elektrischen Leitungen, die in Führungen oder mit Kabelbinder fixiert werden, denkbar.

#### Lösungsprinzipien

In der Tabelle 16 sind ausgesuchte Lösungsprinzipien eingezeichnet, die im nachfolgenden kurz beschrieben sind.

##### 1. Lösungsprinzip (Volllinie)

Hier wird die Gesamtkonstruktion über vertikal verschraubte Halter am Diffraktometer befestigt. Eine stufenlose Einstellung des Abstandes zwischen Detektor und Probe wird mit einer Rohrschiene realisiert. Dazu werden für die unterschiedlichen Detektoren jeweils angepasste Halterungen verwendet. Zuleitungen werden in der Rohrschiene und an zusätzliche Halter geführt und an bestimmten Stellen mit Kabelbinder fixiert.

##### 2. Lösungsprinzip (Strichlinie)

Hier wird die Gesamtkonstruktion über vertikal verklemmte Halterungen am Diffraktometer befestigt. Die stufenlose Einstellung des Abstandes erfolgt hierbei durch ein C-Profil. Der für die Detektoren vorgesehene Halter beinhaltet eine angepasste Führung zur Befestigung mehrerer Detektoren. Im Gegensatz zum ersten Lösungsprinzip werden hier Zuleitungen durchgängig in vorgesehene Führungen mit zusätzlichen Halterungen geführt.

Tabelle 16: Morphologischer Kasten des Detektorhalters

		Teilfunktionsträger (Teillösungen)		
		1	2	3
Teilfunktionen	Belastungen einleiten	Halterung vertikal verschrauben	Halterung vertikal und horizontal verschrauben	Halterung vertikal verklemmen
	Belastungen weiterleiten	Rohrschiene	T-Profil	C-Profil
	Strahlung einleiten	offen	Fenster	
	Strahlung weiterleiten	offen	Rohr	Gehäuse
	Detektor halten	an Winkel-Platte verschrauben	Platte mit Anschlagkanten verschrauben	Platte mit Führung verschrauben
	el. Spannung einleiten	el. Leitung in Führungen	el. Leitung mit Kabelbinder fixiert	
	el. Spannung weiterleiten	el. Leitung in Führungen	el. Leitung mit Kabelbinder fixiert	
	el. Spannung ausleiten	wie einleiten	el. Leitung in Führungen	el. Leitung mit Kabelbinder fixiert

**Bewertung**

Zur Bewertung der Lösungsvarianten sind in Tabelle 15 Gewichtungsfaktoren formuliert.

Tabelle 15: Binäre Gewichtungsmatrix des Detektorhalters

im Vergleich zu Kriterium	Kriterium					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Variationsmöglichkeit (1)	–	1	0	0	0	1
Steifigkeit (2)	0	–	0	0	0	0
wenig Teile (3)	1	1	–	1	1	1
einfache Fertigung (4)	1	1	0	–	0	1
leichte Montage (5)	1	1	0	1	–	1
Gewährleistbare Verfahrenwege (6)	0	1	0	0	0	–
Summe	3	5	0	2	1	4 = 15
Gewichtungsfaktor $g_i$ in Prozent	20	33	0	13	7	27 = 100

Legende: 1 = wichtiger; 0 = nicht wichtiger

Nach Tabelle 15 hat das Kriterium 3, aufgrund des Gewichtungsfaktors  $g_3$ , keinen Einfluss auf die Lösungsbewertung (Tabelle 17). Damit das Kriterium  $g_3$  dennoch eine geringfügige Auswirkung hat, werden hierfür zwei Prozente berücksichtigt.

Tabelle 17: Bewertungsliste des Detektorhalters

Bewertungskriterien	Gewichtung $g_i$	Variante 1		Variante 2	
		$P_i$	$P_i \cdot g_i$	$P_i$	$P_i \cdot g_i$
Variationsmöglichkeit	0,20	4	0,80	4	0,80
Steifigkeit	0,33	4	1,32	3	0,99
wenig Teile	0,02	3	0,06	3	0,06
einfache Fertigung	0,13	4	0,52	3	0,39
leichte Montage	0,07	3	0,21	3	0,21
Gewährleistbare Verfahrenwege	0,27	4	1,08	4	1,08
Summe			3,99		3,53
Technische Wertigkeit ( $P_i \cdot g_i/4$ )			0,98		0,87
Rang			1		2

Legende: 0 = unbefriedigend; 1 = noch tragbar; 2 = ausreichend; 3 = gut; 4 = sehr gut

Mit dem Ergebnis aus Tabelle 17 ist die erste Lösungsvariante zu gestalten. Im anschließenden wird eine Grobgestaltung dieser Variante dargestellt. Zur zwei-

ten Lösungsvariante muss eine Verbesserung zur Steifigkeit und der einfacheren Fertigung erfolgen.

### 3.4.3 Gestaltung

Die Zentren aller Detektoren müssen im Drehzentrum des Diffraktometers, welches sich im Abstand von 220 mm zur Schnittstelle am Diffraktometer befindet (Abbildung 26), positioniert werden. Dabei soll die Positionierung des eigentlichen Detektorhalters variabel sein um verschiedene Distanzen von bis zu drei Meter zum Drehzentrum einzustellen. Die Umgebung kann in Abbildung 26 eingeschätzt werden.

Die variable Positionseinstellung wird mit einer Schiene ermöglicht. Diese Schiene ist aufgrund der vorgesehenen Detektorposition auf Torsion beansprucht und sollte dementsprechend die eigene Masse weitestgehend außen konzentriert haben. Dafür wird das gleiche Profilsystem X95 von Qioptiq wie schon für den Strahl-Absorber gewählt.

Für eine geringere Beeinträchtigung des Diffraktometers in seinen Bewegungen, beginnt die Schiene bei einem Radius von 565 mm (innerster blauer Kreis in der Abbildung 26) und endet bei den geforderten 2000 mm oder 3000 mm zuzüglich einen Abstand um den Detektor außerhalb zu positionieren. Gewählte Längen sind 1650 mm und 2650 mm. Minimale Längen ohne Detektorhalterungen wären  $(2000 - 565) \text{ mm} = 1435 \text{ mm}$  und  $2435 \text{ mm}$  bei 3000 mm. Die zusätzliche Länge von 215 mm  $(1650 - 1435)$  zur Halterung ergibt sich für die größte Detektor-Länge von 262 mm (siehe Tabelle 18).

Bei dem eigentlichen Halter werden für die unterschiedlichen Detektoren abweichende Anschlussmaße benötigt. Aufgrund den unterschiedlichen Dimensionen und den zum Teil unterschiedlichen Montage-Positionen werden jeweils eigenständige Halterungen konzipiert. Dies dient auch der Forderung der Gewichtsreduktion, da somit keine zusätzlichen Adapterplatten oder ähnliches benötigt werden. Die Tabelle 18 stellt alle Anschlussmaße, Abmaße und Gewichte von den unterschiedlichen Detektoren in Übersicht dar. Die zum Teil unverständlich

**Tabelle 18:** Anschluss-, Abmaße und Gewicht der Detektoren [29–33]

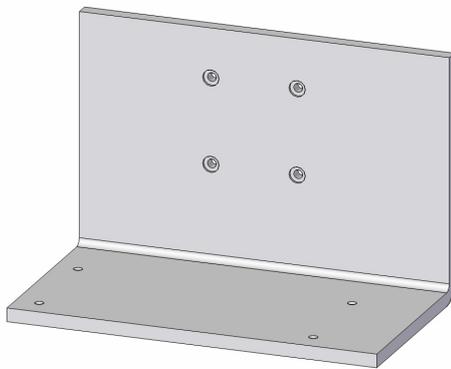
Detektor	Abmaße in mm			Anschlussmaße in mm	Gewicht in kg	Bemer- kung
	L	B	H			
PILATUS 300K	262	160	194	200×75 M6×1-6H 200×(175 Ø7×50 Ø6,6) Befestigungsteile	7,5	unten oben
Maxipix	222	145	140	2×(□34 4×M4)-86	4,7	unten
PIXIS-XB	166	118	114	Ø100 3×120°M5×0,8I11	2,27	Seite
LCX	222	118	118	Δ 1/4-20, 3/8-16 or M6	4,54	unten
Andor	210	128	154	50 3×1/4-20 H62,5	4,6	hinten
Avalanche	—	—	—	—	—	—

dargestellten Anschlussmaße können mit den Datenblättern im Anhang (Seiten 100 – 104) entschlüsselt werden.

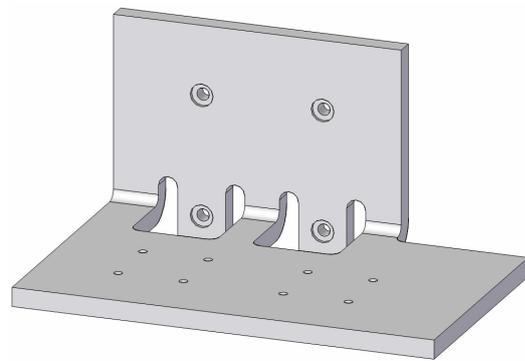
Die Abbildungen 32 und 33 zeigen die entworfenen Detektorhalterungen. Die Detektorhalterungen sind zum einen als Blechkonstruktion (Abbildungen 32) zur Minimierung des Gewichts und zum anderen als Schraubkonstruktion (Abbildungen 33) zur einfacheren Fertigung entworfen. Das Gewicht jeden Halters liegt dabei zwischen 1 bis 2,5kg. Zu der Schraubvariante werden mindestens zwei Schrauben von unten beziehungsweise der Seite mit der aufrecht stehenden Platte verschraubt. In Bezug auf das Gewicht können beide Haltervarianten mit zusätzlichen Aussparungen versehen werden.

Zur Gewichtsreduktion der X95-Schiene mit 8,7kg werden zusätzliche Taschen eingefräst. Denkbar sind rechteckige und dem Fachwerk nachempfundene Aussparungen, siehe dazu Abbildung 34. Dabei haben die rechteckigen Aussparungen eine Länge von 120mm und eine Höhe von 60mm mit einer resultierenden Gewichtsersparnis von 4kg. Bei den dreieckförmigen Taschen verbleibt gegenüber der rechteckigen jeweils eine 15mm starke Diagonale und somit eine verminderte Gewichtsersparnis von 2,7kg. Einzelne Aussparungen sind mit einem Abstand von 30mm angesetzt. Denkbar sind nach einer FEM-Überprüfung größere Aussparungen zu verwenden.

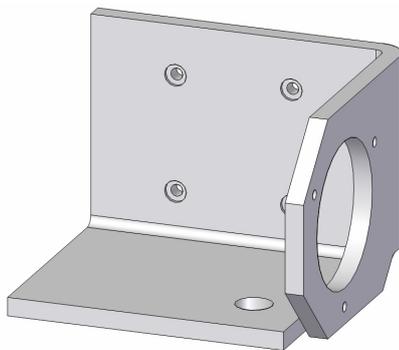
Für die unterschiedlichen Schienenvarianten soll mithilfe einer FEM-Analyse eine Aussage zur Auslenkung erfolgen. Dabei wird zur besseren Approximation



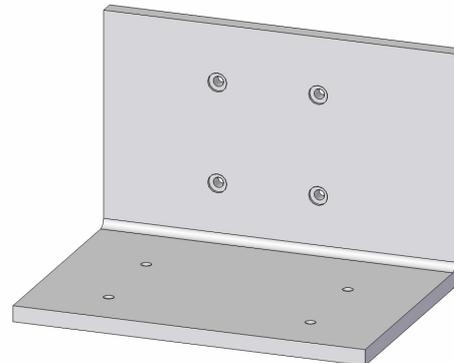
(a) für PILATUS 300K



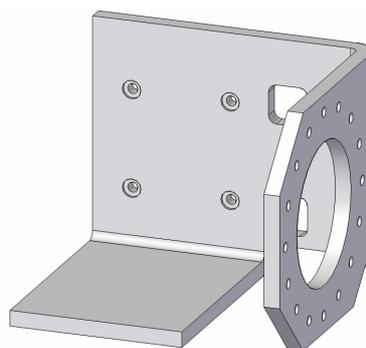
(b) für Maxipix



(c) für PIXIS-XB

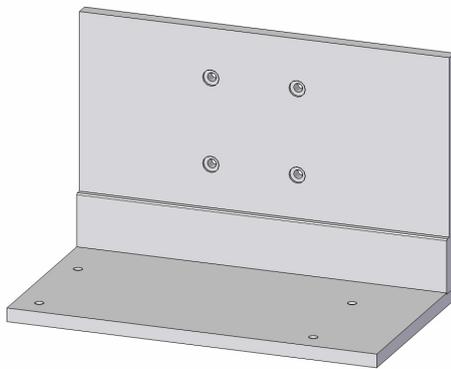


(d) für LCX

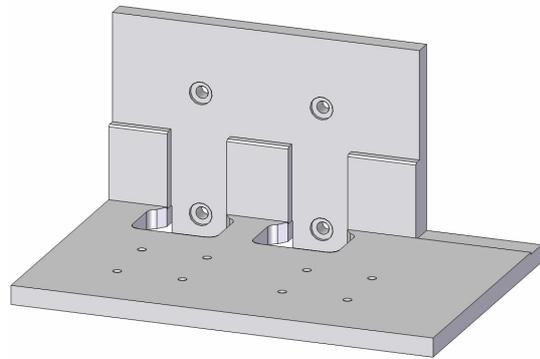


(e) für Andor

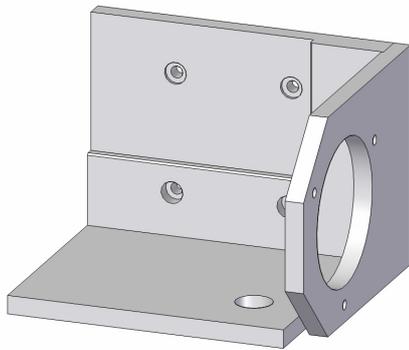
Abbildung 32: Halterungen des Detektorhalters – Biege-Variante



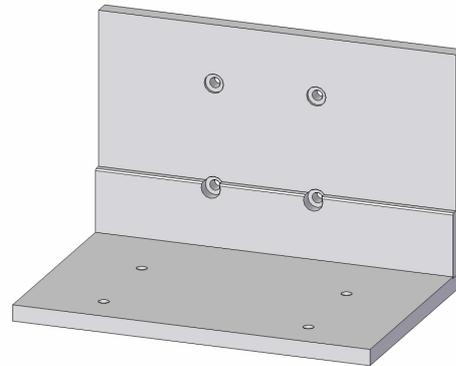
(a) für PILATUS 300K



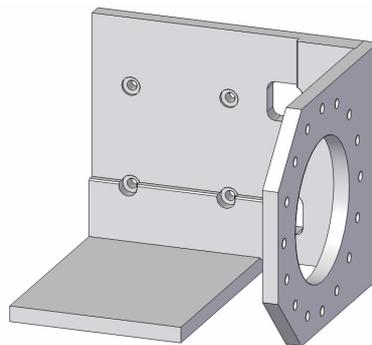
(b) für Maxipix



(c) für PIXIS-XB



(d) für LCX



(e) für Andor

Abbildung 33: Halterungen des Detektorhalters – Schraub-Variante

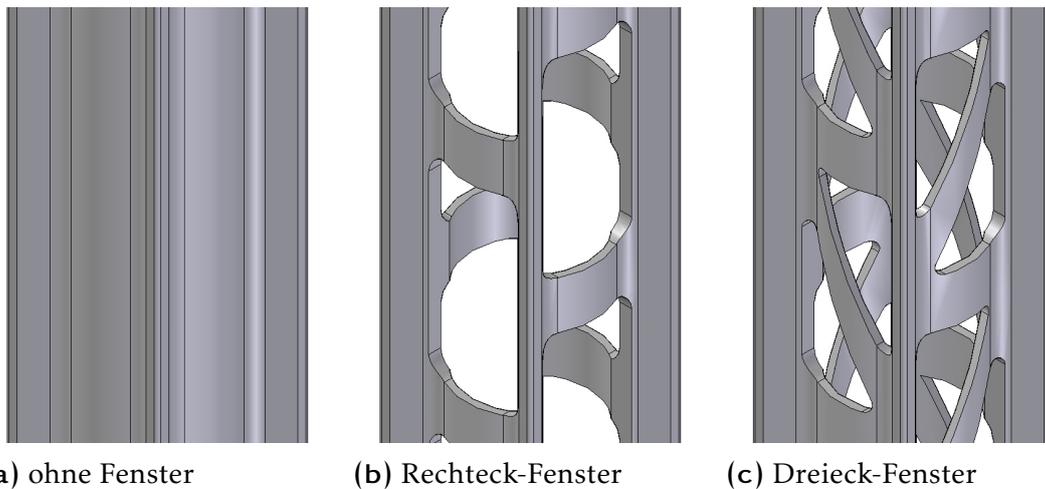


Abbildung 34: Schiene des Detektorhalters

der Absenkung ebenfalls das gut 9 kg schwere Flugrohr mit einbezogen. Das Vorgehen der FEM-Analyse ist im Abschnitt 4.2 einzusehen. Berechnet wird der PILATUS 300K – welcher für einen Abstand von zwei Metern vorgesehen ist – aufgrund dem im Vergleich zu den anderen Detektoren größten Gewicht (siehe Tabelle 18) und dem damit größten hervorgerufenen Biege- und Torsionsmoment auf die Schiene. Auch im Hinblick darauf, dass die anderen Detektoren bei einem Abstand von drei Meter zum Einsatz kommen. Die Toleranzwerte der Schiene belaufen sich für die Biegung auf 0,5 mm/m und für den Drall auf 0,6 mm/m. [34]

Die maximal berechnete Absenkung von  $176\ \mu\text{m}$  ergibt sich für das Rohr ohne Aussparungen. Zur Orientierung bedeutet dies für den PILATUS 300K-Detektor eine Verschiebung von über einen Pixel. Die Pixel vom PILATUS sind quadratisch und haben eine Kantenlänge von  $172\ \mu\text{m}$ . [29] Die geringste Auslenkung von  $102\ \mu\text{m}$  ergibt sich bei der Variante mit den dreieckförmigen Aussparungen. Es zeigt sich, dass beide Aussparungsvarianten nicht nur das Gewicht mindern sondern auch ein steiferes Verhalten bei der gegebenen Belastung in der Schiene hervorruft. Da dieses Ergebnis nicht ohne weiteres auf Richtigkeit überprüft werden kann, muss das Ergebnis im Experiment verifiziert werden. Denkbar ist, dass sich aufgrund dem fehlenden Material und der geringeren Torsionssteifigkeit sich die Schiene stärker verdrillt und somit eine höhere Biegefestigkeit hervor-

ruft. Aufgrund dem reduzierten Gewicht und der Steifigkeit wird die Schiene mit dreieckförmigen Aussparungen gewählt.

In Abbildung 35 ist die Gesamtkonstruktion mit der Halterung für und mit den Detektor PILATUS 300K sowie die zusätzliche Peripheriehalterung dargestellt. Zur erhöhten Verwendbarkeit der anfallenden Peripherie sind bei der Peripheriehalterung zwei Platten, welche entlang des Schwenkarms vom Diffraktometers verlaufen, mit einem Bohrmuster von M6 auf  $\square 25$  vorgesehen. Auf diese dann diverse Zuleitungen und zusätzliche Gehäuse, wie zum Beispiel Transformatoren, montiert werden können. Dabei sind die Platten am Ende des Diffraktometer-Schwenkarms mit zwei bis zehn Schrauben zu befestigen.

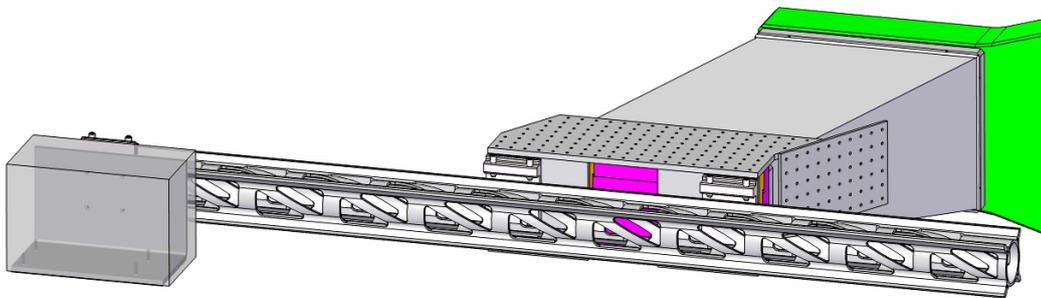


Abbildung 35: Gesamtaufbau des Detektorhalters

---

## 4 Lösungsabsicherung

In diesem Kapitel werden neben den unterschiedlichen Lösungsabsicherungen durch Analogiebetrachtungen weitere Möglichkeiten zur Optimierung gezeigt.

### 4.1 Statischer Nachweis

Durchgeführt ist ein statischer Nachweis für den Probenhalter (Abschnitt 3.1).

#### Biegelinie $w(x)$ vom Probenhalter

Im Nachfolgenden ist ein statischer Nachweis zur Biegelinie des Probenhalters aufgezeigt. Aufgrund der hohen Positionier-Anforderung soll mit einem mathematischen Modell beziehungsweise einem Computermodell die Durchbiegung berechnet werden.

Das Modell ist ein in vier Abschnitten unterteilter Balken. Jeder Abschnitt stellt die Kerndimension des Realmodells nach Abbildung 13 wieder. Bei den Modell-Abmaßen sind jeweils entweder kleinere oder gleiche Abmaße gewählt worden. Somit wird sichergestellt, dass das Modell nicht steifer als das zu simulierende Realteil wird. Ebenso kann davon ausgegangen werden, dass die Durchbiegung des Realteils geringer der der Simulation sein wird. Weiter, ist das Eigengewicht als Linienlast  $q$  berücksichtigt.

$$\begin{aligned} l &= \begin{bmatrix} 0,270 & 0,030 & 0,025 & 0,008 \end{bmatrix} \text{ m} \\ m &= \begin{bmatrix} 1,988 & 0,067 & 0,081 & 0,004 \end{bmatrix} \text{ kg} \\ q_i &= m_i g / l_i, \end{aligned} \quad \text{mit } g = 9,81 \text{ m/s}^2 \quad (4.1)$$

Der erste und dritte Abschnitt stellen Hohlzylinder mit den Außendurchmesser  $d_{a1}$  von 60 mm beziehungsweise  $d_{a3} = 9,5$  mm sowie Innendurchmesser  $d_{i1}$  von 25 mm beziehungsweise  $d_{i3} = 5$  mm dar. Der zweite Abschnitt ist als Quader mit den quadratischen Querschnittskanten  $d_2$  von 43 mm realisiert. Der letzte Abschnitt ist ein Vollzylinder mit einen Durchmesser  $d_4$  von 0,75 mm.

Aufgrund der schnellen Umsetzbarkeit und der guten Approximation der Durchbiegung fiel die Wahl auf die Energiemethode, unter Anwendung des Verfahrens

nach Walter Ritz. Die mathematische Herleitung sowie rechnergestützte Umsetzung des Verfahrens ist bei Bedarf im Anhang A.4.1 auf Seite 86 einzusehen.

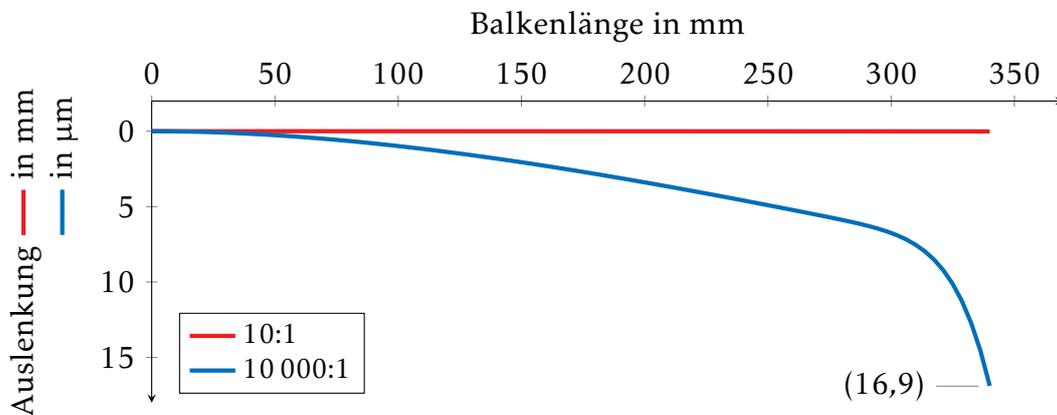


Abbildung 36: Biegelinie des Probenhalters mit 2 kg Probe

In Abbildung 36 kann die ermittelte maximale Auslenkung des Simulations-Modells bei einer 2 kg Probe von 17 µm abgelesen werden. Beide dargestellten Linien repräsentieren die gleiche Durchbiegung und unterscheiden sich rein in der Skalierung einer Achse. Die blaue Kurve ist in der Auslenkung gegenüber der roten um den Faktor 1000 erhöht, hier ist die abnehmende Biegesteifigkeit gut erkennbar.

## 4.2 FEM-Analyse

Die FEM-Analyse wird mithilfe von *ANSYS Workbench 14.5* und *Solid Edge ST3* durchgeführt. Bei der folgenden Berechnung handelt es sich um eine statisch-mechanische Analyse.

### Verschiebungen der Schiene vom Detektorhalter (Abschnitt 3.4)

Die maximale Verschiebung der Schiene soll für den Fall mit dem Detektor PILATUS 300K berechnet werden. Der PILATUS ist für einen maximalen Abstand von zwei Metern vorgesehen und ruft aufgrund des größten Gewichts, im Vergleich zu den anderen Detektoren (siehe Tabelle 18), das größte Biege- und Tor-

sionsmoment auf die Schiene hervor. Auch im Hinblick darauf, dass die anderen Detektoren bei einem Abstand von drei Meter zum Einsatz kommen.

Neben der Schiene und dem Detektor wird zur besseren Approximation der Absenkung ebenfalls das gut 9 kg schwere Flugrohr mit einbezogen. Um den Aufwand der FEM-Berechnung zu reduzieren wird die Konzeptlösung nach Abbildung 37 mit vereinfachtem Halter versehen, siehe dazu beispielsweise Abbildung 38.

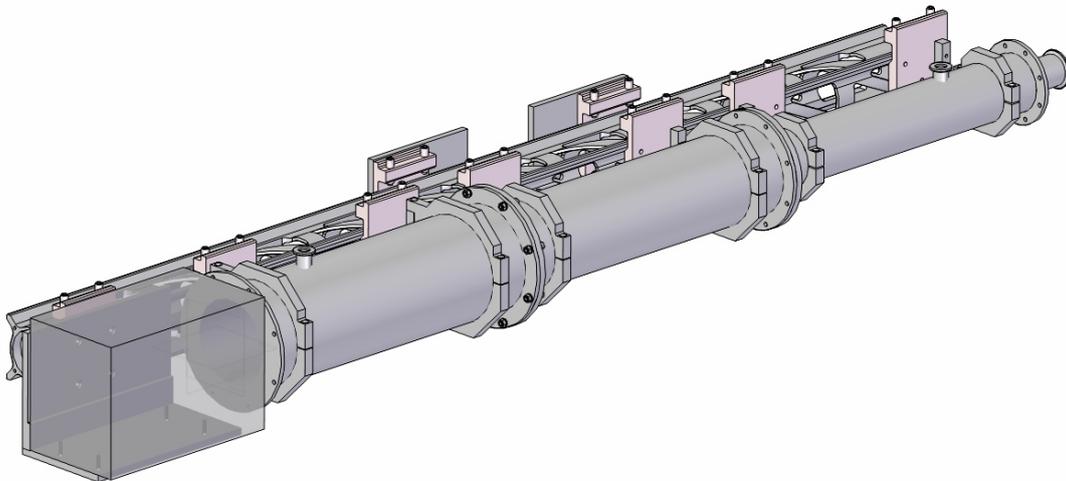
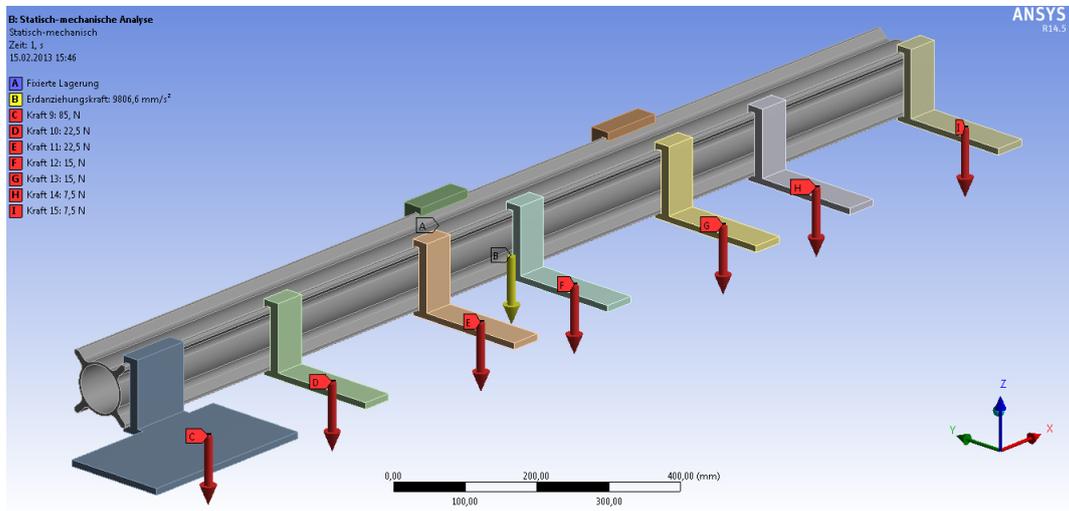


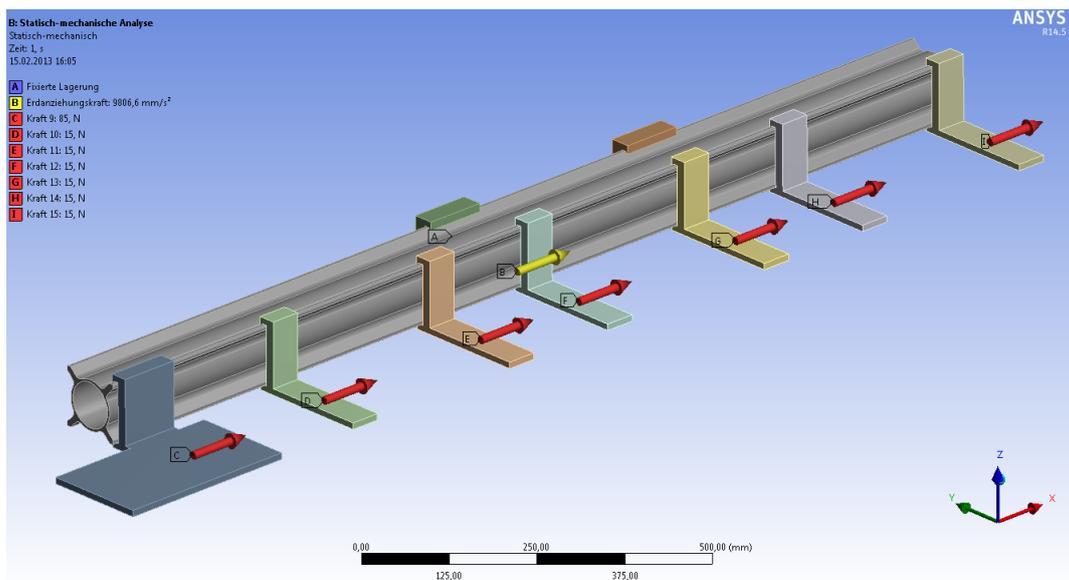
Abbildung 37: Flugrohr mit Detektorhalter

Auf den vorderen Halter wird das Gewicht des Detektors und auf den restlichen das Gewicht des Flugrohrs aufgebracht, siehe Abbildung 38. Der Detektor hat nach eigener Abschätzung den Schwerpunkt im ersten Drittel zur Gesamtlänge und befindet sich mittig in Bezug auf die Breite. Zur Berücksichtigung der Peripheriezuleitung wird eine zusätzliche Masse von 1 kg angenommen und dem Detektor zugetan. Wie in der Abbildung 38 zu sehen wird die Last in horizontaler und vertikaler Ausrichtung beaufschlagt. Diese repräsentieren die horizontale und vertikale Position des Detektorhalters und Flugrohrs. Zu sehen auch an den horizontalen und vertikalen gelben Pfeil. Dieser gelbe Pfeil stellt die Erdbeschleunigung dar. Die roten Pfeile sind Gewichtskräfte. Der vordere mit 85 N für den Detektor und die Peripherie. Die restlichen sechs roten Pfeile sind, für die horizontale Position, mit  $2 \times 22,5\text{ N}$ ,  $2 \times 15\text{ N}$  und  $2 \times 7,5\text{ N}$  beaufschlagt um das Flugrohr von 9 kg Gewicht geeignet wiederzugeben. Bei der vertikalen Position

sind die sechs roten Pfeile gleichmäßig mit je 15 N beaufschlagt. Da angenommen wird, dass jeder Halter den gleichen Anteil vom Gesamtgewicht trägt.



(a) Horizontale Ausrichtung



(b) Vertikale Ausrichtung

Abbildung 38: FEM-Lasteinleitung der Schiene

In der Tabelle 19 sind die Ergebnisse der FEM-Berechnung dargestellt. Die größte Auslenkung  $v_{ges}$  von 176  $\mu\text{m}$  ergibt sich für die Variante ohne Ausparungen an der Schiene und die geringste Auslenkung von 102  $\mu\text{m}$  für die Variante mit

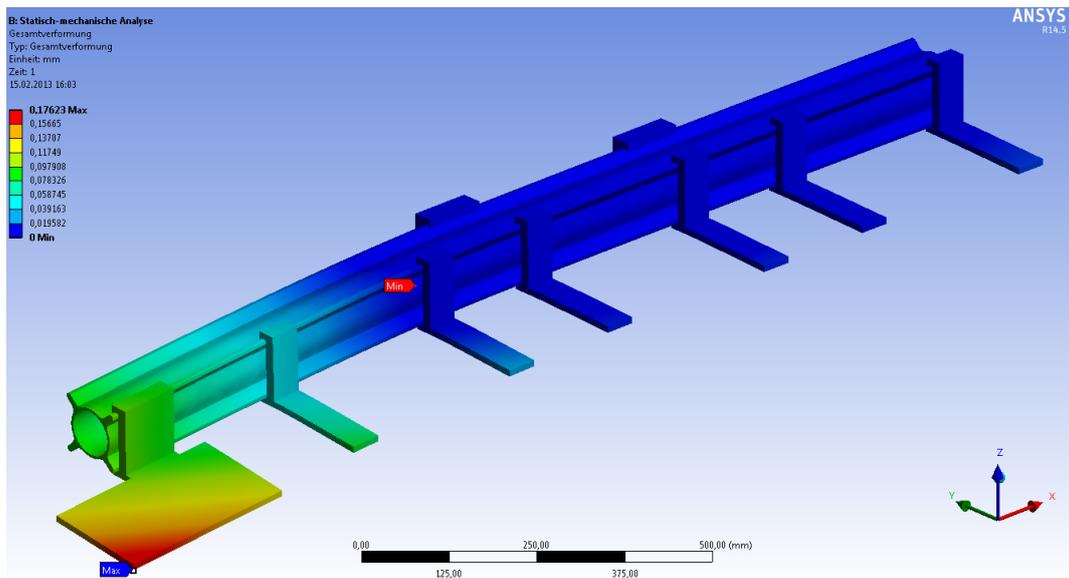


Abbildung 39: FEM-Verschiebung der Schiene ohne zusätzlichen Fenster

den dreieckförmigen Aussparungen. Diese Ergebnisse sind wie schon im letzten Kapitel angedeutet mit weiteren Untersuchungen am Modell und im Experiment zu verifizieren.

Tabelle 19: FEM-Verschiebung der Schiene

	$\sigma_{Mises}$ MPa	$v_{ges}$ mm	$v_x$ mm	$v_y$ mm	$v_z$ mm
Horizontal					
Ohne Fenster	3,1509	0,17623	0,0096404	0,0095641	0,17573
Recheckfenster	13,124	0,12151	0,0064492	0,0084088	0,12107
Dreickfenster	6,5015	0,10253	0,0056412	0,0064849	0,1022
Vertikal					
Ohne Fenster	0,82542	0,049047	0,021115	0,043362	0,01006
Recheckfenster	1,4258	0,033239	0,014257	0,029465	0,0062169
Dreickfenster	1,2425	0,026058	0,011129	0,023121	0,0052731

Die gesamte ANSYS-Konfiguration ist im Anhang einzusehen.

---

## 5 Zusammenfassung und kritische Bewertung

Mit dieser Arbeit wurden vier unterschiedliche Experimentkomponenten zur Vervollständigung des 6-Kreis-Diffraktometer-Aufbaus methodisch entwickelt. Diese Komponenten ermöglichen den Einsatz von verschiedenen Proben mit hoher Positionier- und Reproduziergenauigkeit. Mithilfe der vorgesehenen Schnittstelle am Probenhalter sind weitere Halter für andere Proben, als jene die hier berücksichtigt sind, ohne großen Aufwand möglich. Mit dem Strahl-Absorber und den vorgesehenen Schienen sind intensive Strahlen nahe der Probe, in grob und fein einstellbare Positionen, abfangbar. Das Flugrohr ermöglicht die ungestörte Ausbreitung von gewünschten Strahlen beziehungsweise Signalen in bedarfsgerechten Längen. Mit dem Detektorhalter werden Flugrohr und Detektor in beliebige Positionen, innerhalb des geforderten Bereichs und der geforderten Positioniergenauigkeit, gehalten. Der Diffraktometer inklusive den entwickelten Komponenten ist in Abbildung 40 abgebildet.

Die Entwürfe der Experimentkomponenten sind stark auf die Anforderungsliste und den geplanten Einsatz abgestimmt. Bei einer Veränderung der Randbedingungen ist zu prüfen ob einzelne Teile oder ganze Komponenten mitgeändert werden müssen. In einem größeren Bearbeitungsteam wären insbesondere in der Anfangsphase eine variationsreichere und innovativere Lösungsfindung gegeben. Vorbeugend kann im Rahmen des Qualitätsmanagements zur Fehlervermeidung und Erhöhung der technischen Zuverlässigkeit die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) eingesetzt werden. Mit diesen Methoden kann anstelle einer nachsorgenden Fehlererkennung und kostenintensive Fehlererkorrektur eine vorsorgende Fehlervermeidung erfolgen. [35]

Zu den wichtigsten Informationsquellen gehört die Messung und experimentelle Untersuchung an ausgeführte Modellversuche. [4] Diese Untersuchungen sind zur detaillierten Ausarbeitung der Experimentkomponenten auszuführen. Insbesondere sind die Berechnungen der Lösungsabsicherung im Experiment zu verifizieren. Dies gilt insbesondere für die Schiene des Detektorhalters, da hier aus Zeitgründen keine intensive FEM-Analyse durchgeführt werden konnte. Abschließend sind zu den entwickelten Komponenten Fertigungsunterlagen und

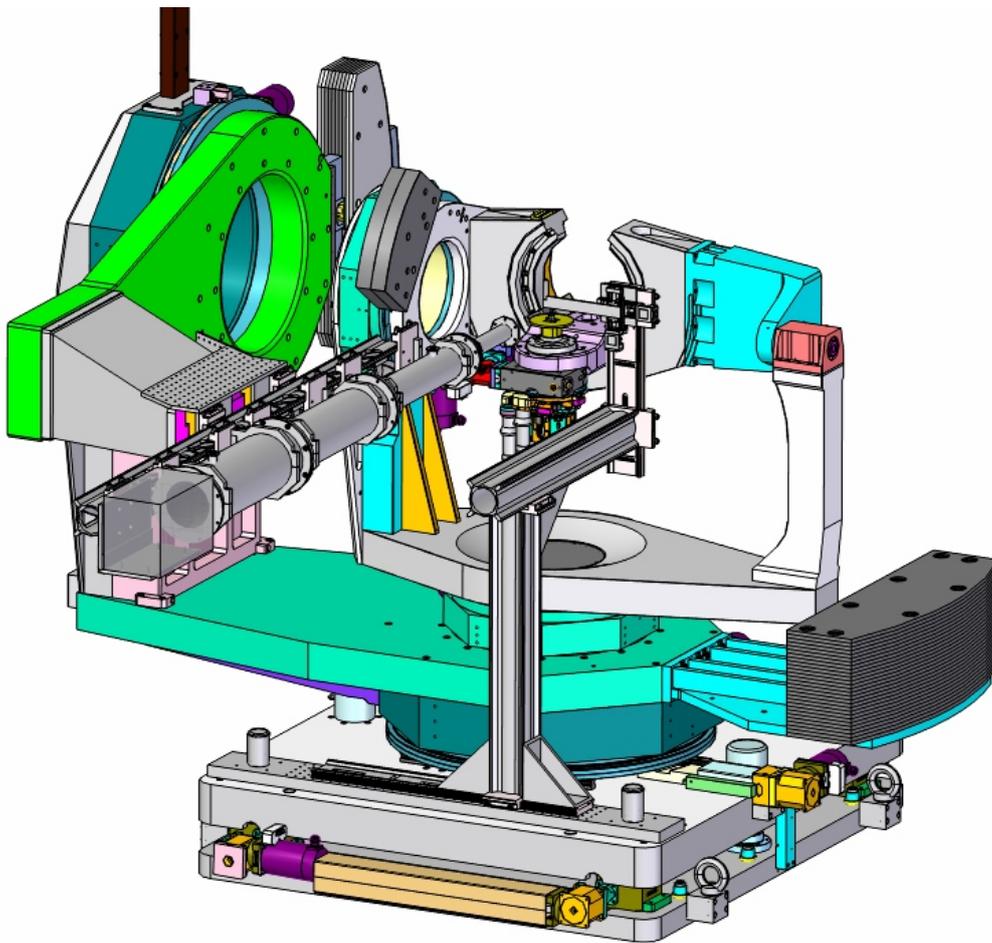


Abbildung 40: 6-Kreis-Diffraktometer-Aufbau mit den zu entwickelnden Experimentkomponenten

Anfragen zu erstellen beziehungsweise zu stellen, da diese Komponenten für Experimente zum Frühjahr benötigt werden.

---

## Literatur

- [1] HINTERBERGER, F.: *Physik der Teilchenbeschleuniger und Ionenoptik*. 2. Aufl. Heidelberg : Springer-Verlag Berlin, 2008.
- [2] STÖCKER, H., Hrsg.: *Taschenbuch der Physik : Formeln, Tabellen, Übersichten*. 6., korrigierte Aufl. Frankfurt am Main : Deutsch, 2010.
- [3] DEUTSCHES ELEKTRONEN-SYNCHROTRON: *DESY kompakt 2010*. Jahresbericht. 2010.
- [4] PAHL, G. u. a.: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre : Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung*. 7. Aufl. Heidelberg : Springer-Verlag Berlin, 2007.
- [5] VDI-RICHTLINIE 2222 BLATT 1: *Konstruktionsmethodik : Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*. Düsseldorf : VDI-Verlag, Juni 1997.
- [6] VDI-RICHTLINIE 2225: *Konstruktionsmethodik : Technisch-wirtschaftliches Konstruieren*. Blatt 3: 1998, Blatt 4: 1997. Düsseldorf : VDI-Verlag, Juni 1997.
- [7] KRAMER, F.: *Innovative Produktpolitik : Strategie – Planung – Entwicklung – Einführung*. Heidelberg : Springer-Verlag Berlin, 1986.
- [8] HUBKA, V.: *Theorie technischer Systeme : Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre*. 2., völlig neubearb. u. erw. Aufl. Heidelberg : Springer-Verlag Berlin, 1984.
- [9] HUBKA, V.: *Theory of Technical Systems : A Total Concept Theory for Engineering Design*. 1. Aufl. Heidelberg : Springer-Verlag Berlin, 1988.
- [10] HUBKA, V.: *Einführung in die Konstruktionswissenschaft : Übersicht, Modell, Ableitungen*. 1. Aufl. Heidelberg : Springer-Verlag Berlin, 1992.
- [11] RODENACKER, W. G.: *Methodisches Konstruieren : Grundlagen, Methodik, praktische Beispiele*. 4., überarb. Aufl. Heidelberg : Springer-Verlag Berlin, 1991.
- [12] VDI-RICHTLINIE 2803 BLATT 1: *Funktionenanalyse : Grundlagen und Methode*. Düsseldorf : VDI-Verlag, Okt. 1996.

- 
- [13] DIN EN 1325-1: *Value Management, Wertanalyse, Funktionenanalyse, Wörterbuch : Teil 1: Wertanalyse und Funktionenanalyse*. Berlin : Beuth, Nov. 1996.
- [14] VDI-RICHTLINIE 2800 BLATT 1: *Wertanalyse*. Düsseldorf : VDI-Verlag, Aug. 2010.
- [15] VDI-RICHTLINIE 2242 BLATT 1: *Konstruieren ergonomiegerechter Erzeugnisse : Grundlagen und Vorgehen*. Düsseldorf : VDI-Verlag, Apr. 1986.
- [16] DIN ISO 2382-1: *Informationstechnik - Begriffe : Teil 1: Grundbegriffe*. Berlin : Beuth, Nov. 1993.
- [17] FRICKE, G.: *Konstruieren als flexibler Problemlöseprozeß : Empirische Untersuchung über erfolgreiche Strategien und methodische Vorgehensweisen beim Konstruieren*. Fortschritt-Berichte VDI-Reihe 1, Nr. 227, Dissertation. Darmstadt, 1993.
- [18] BATHE, K.-J.: *Finite-Elemente-Methoden : Matrizen und lineare Algebra, die Methode der finiten Elemente, Lösung von Gleichgewichtsbedingungen und Bewegungsgleichungen*. 1. Aufl. Heidelberg : Springer-Verlag Berlin, 1986.
- [19] WITTEL, H. u. a.: *Roloff/Matek Maschinenelemente : Normung, Berechnung, Gestaltung*. 19. Aufl. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2009.
- [20] ROTH, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen : Konstruktionslehre*. 3., erw. u. neu gestaltete Aufl. Bd. 1. Heidelberg : Springer-Verlag Berlin, 2000.
- [21] ROTH, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen : Kataloge*. 3., wesentl. erg. Aufl. Bd. 2. Heidelberg : Springer-Verlag Berlin, 2001.
- [22] HOLLIGER, H.: *Morphologie : Idee und Grundlage einer interdisziplinären Methodenlehre*. Kommunikation 1. Vol. Quickborn : Schnelle, 1970.
- [23] GROTE, K.-H.; FELDHUSEN, J., Hrsg.: *DUBBEL – Taschenbuch für den Maschinenbau*. 22. Berlin : Springer, 2007.
- [24] EWERT, E.: *Stabilitäts- und Sensitivitätsuntersuchungen dünnwandiger Kreiszyylinder unter axialem und radialem Druck mit der Methode der Finiten Elemente*. Dissertation. Karlsruhe, 2008.

- 
- [25] DIN 11850: *Rohre aus nichtrostendem Stahl für Lebensmittel und Chemie : Maße, Werkstoffe*. Berlin : Beuth, Juni 2009.
- [26] VACOM VAKUUM KOMPONENTEN & MESSTECHNIK GMBH: *Produktkatalog*. 2013.
- [27] DIN 28404: *Vakuumtechnik; Flansche; Maße*. Berlin : Beuth, Okt. 1986.
- [28] ISO 1609: *Vakuumtechnik; Flanschabmessungen*. Berlin : Beuth, März 1986.
- [29] DECTRIS LTD.: *PILATUS 300K : Now for your Laboratory*. Datenblatt. Nov. 2011.
- [30] ESRF/ISDD: *MAXIPIX technical data*. Datenblatt. Aug. 2011.
- [31] PRINCETON INSTRUMENTS: *PIXIS-XB: 400BR*. Datenblatt. Feb. 2011.
- [32] PRINCETON INSTRUMENTS: *PI-LCX System*. Datenblatt. März 2011.
- [33] ANDOR: *iKon-L Series*. Datenblatt. Dez. 2012.
- [34] QIOPHIQ PHOTONICS GMBH & Co. KG: *Der LINOS Katalog*. Produktkatalog. Apr. 2012.
- [35] DIN EN 60812: *Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen : Verfahren für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)*. Berlin : Beuth, Nov. 2006.
- [36] GROSS, D. u. a.: *Technische Mechanik : Hydromechanik, Elemente der Höheren Mechanik, Numerische Methoden*. 7. Aufl. Bd. 4. Heidelberg : Springer-Verlag Berlin, 2009.

---

# Anhang

## Inhaltsangabe

A.1	Aufgabenstellung von DESY . . . . .	77
A.2	Elemente des Lastenhefts . . . . .	79
A.2.1	Anforderungsmatrix . . . . .	79
A.3	Elemente des Pflichtenheftes . . . . .	82
A.3.1	Anforderungsliste . . . . .	82
A.4	Mathematische Herleitungen und rechnergestützte Umsetzung . .	86
A.4.1	Ritz-Verfahren . . . . .	86
A.5	ANSYS-Konfiguration . . . . .	92
A.6	Verwendete Hilfsmittel . . . . .	93
A.7	Datenblätter . . . . .	94
A.7.1	MISUMI : Lineareinheit LX20, Standardausführung . . . . .	94
A.7.2	OWIS : Präzisions-Lineartische LTM 45 . . . . .	96
A.7.3	Dectris : Pilatus 300K . . . . .	100
A.7.4	ESRF : Maxipix 2x2 . . . . .	101
A.7.5	Princeton Instruments : PIXIS-XB CCD . . . . .	102
A.7.6	Princeton Instruments : LCX CCD . . . . .	103
A.7.7	Andor : iKon-L 936 CCD . . . . .	104

Die Anhänge auf den Seiten 100 bis 104 sind entnommene Ausschnitte aus den Datenblätter [29–33].



## Aufgabestellung für eine Bachelor-Thesis

### Thema: Konstruktion von Experimentkomponenten für einen 6-Kreis-Diffraktometer-Aufbau an der Petra III Kohärenz-Beamline P10

**Sergej Bondarenko**

Tel. +494089981920

Fax +494089941920

sergej.bondarenko@desy.de

11. Juni 2012

Petra III ist eine Synchrotronstrahlungsquelle der dritten Generation und stellt das momentan brillianteste Röntgenlicht für zur Zeit 14 Strahlführungen, sogenannte Beamlines, bereit. Eine dieser Beamlines ist die Beamline P10, die auf kohärente Streumethoden spezialisiert ist. An der P10 Beamline stehen den Messgästen mehrere Messstationen für Experimente zur Verfügung. Eine dieser Messstationen wird der 6-Kreis-Diffraktometeraufbau für Streuexperimente bei großen Streuvektoren  $Q$  in vertikaler und horizontaler Streugeometrie sein. Das 6-Kreis-Diffraktometer der Fa. HUBER Diffractionstechnik wird voraussichtlich im Januar 2013 an der Beamline P10 aufgebaut und in Betrieb genommen.

**DESY Deutsches  
Elektronen-Synchrotron**  
Notkestraße 85  
22607 Hamburg  
Tel. +49 40 8998-0  
Fax +49 40 8998-3282

**Briefanschrift**  
22603 Hamburg

**Standorte DESY**  
Hamburg  
Zeuthen/Brandenburg

**Direktorium**  
Dr. R. Brinkmann  
Prof. Dr. H. Dosch  
(Vorsitzender)  
Prof. Dr. J. Mnich  
C. Scherf  
Prof. Dr. E. Weckert  
Prof. Dr. C. Stegmann  
(Vertreter des Direktoriums  
in Zeuthen)

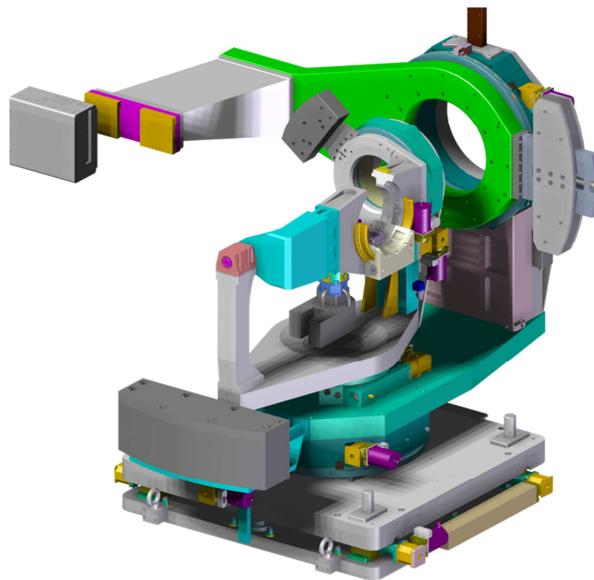


Abbildung 1: P10 6-Kreis-Diffraktometer.

Das Diffraktometer verfügt über einen X, Y, Z - Tisch und RX, RY, RZ - Rotationsachsen (Euler-Wiegen) zur Positionierung der Probe sowie RY, RZ - Rotationsachsen zur Positionierung des Detektors in der vertikalen und horizontalen Ebene. Des Weiteren kann das gesamte Diffraktometer im Strahl mit Hilfe eines Y, Z - Tisches positioniert werden.

Bei Experimenten mit diesem Aufbau wird eine Probe vom Röntgenstrahl beleuchtet und mit einem Detektor wird von der Probe gestreute Röntgenstrahlung in den horizontalen und



Seite 2/2

Datum 11. Juni 2012

vertikalen Ebenen detektiert. Je nach Beschaffenheit der Probe bzw. der Streugeometrie wird der Abstand zwischen der Probe und dem Detektor variiert. Um parasitären Streueffekte durch die Luft, den so genannten Untergrund, zu minimieren, wird der Abstand zwischen dem Detektor und der Probe mit einem evakuierten oder mit Helium gespülten Flugrohr überbrückt. Des Weiteren wird der intensive, durch die Probe transmittierte bzw. reflektierte Stahl unmittelbar nach der Probe von einem Beamstop absorbiert. Dies dient zum einen zur Reduktion des Untergrundes sowie zum anderen dem Schutz der Detektoren vor intensiver Strahlung.

Im Rahmen der Bachelor-Thesis sollen für den 6-Kreis-Diffraktometeraufbau folgende Experimentkomponenten entwickelt und konstruiert werden:

- Probenhalter für Standardprobensätze MiTeGen Magnetic Goniometer Bases
- Motorisierte YZ-Beamstop-Translation hinter dem Probenhalter
- Adaptives Flugrohr mit einer Länge zwischen 500 und 3000 mm und einem Austrittsfenster mit Durchmesser  $D_i = 60$  mm
- Adaptives Flugrohr für einen Pilatus 300K Detektor mit einer Länge zwischen 500 und 2000 mm und einem Austrittsfenster mit Durchmesser  $D_i = 110$  mm
- Detektorhalter und Peripheriezuleitung für die folgenden Detektoren:
  1. Pilatus 300K
  2. Maxipix 2x2
  3. Princeton Instruments PIXIS-XB CCD
  4. Princeton Instruments LCX CCD
  5. Andor iKon-L 936 CCD
  6. Avalanche Photodiode

Aufgrund von Gewichtrestriktion und hoher Dynamik des Aufbaus ist bei der Auslegung der Konstruktion ein besonderes Augenmerk auf Leichtbau und hohe Steifigkeit der Komponenten zu legen. Des Weiteren ist eine modulare Bauweise angestrebt. Weitere Anforderungen können dem Lastenheft entnommen werden.

Die Arbeit erfolgt überwiegend bei DESY Hamburg in der Bereichsgruppe FS-PE an der P10 Beamline. Die Arbeit ist in geeigneter Weise zu dokumentieren und zusammenzufassen. Die Betreuung bei DESY Hamburg erfolgt durch Dipl. Ing. (FH) Sergej Bondarenko.

## A.2 Elemente des Lastenhefts

### A.2.1 Anforderungsmatrix

Anforderungsmatrix

Pos.	Merkmal / Ziel	Art		Kommentar / Hinweis
		F	W	
<b>1</b>	<b>Allgemeine Anforderungen</b>			
1.1	Verwenden von korrosionsbeständige Materialien		X	
1.2	Bei Verwendung von nicht Korrosionsbeständigen Materialien sind diese Materialien korrosionsbeständig zu beschichten	X		
1.3	Wirtschaftlichkeit		X	
1.4	Leichtbau	X		
1.5	Hohe Steifigkeit	X		
1.5	Halbzeuge von DESY-Lager		X	
1.5	Normteile von DESY-Lager	X		
<b>2</b>	<b>Probenhalter</b>			
2.1	Basisteil-Länge = 260 mm	X		
2.2	Maximal 20 mm über der Grundplatte der Eulerwiege	X		
2.3	Verfahrwege in $x, y \pm 5$ mm, in $z \pm 3$ mm und Rotation $Rz = 360^\circ$	X		
2.4	Keine Einschränkung der Verfahrwege	X		
2.5	Anschlagkanten oder Zentrierbohrungen zur genauen Montage der Teile untereinander	X		Zentrierbohrung 20H7
2.6	Basis mit M6 25×25 Bohrmuster	X		
2.7	Halter aus einem Werkstoff mit geringen Ausdehnungskoeffizienten	X		Invar
2.8	Höhenverstellbar	X		Magnetkraft
Legende: F = Forderung; W = Wunsch		Weiter auf nächster Seite		

## Anforderungsmatrix – Fortsetzung von vorheriger Seite

Pos.	Merkmal / Ziel	Art		Kommentar / Hinweis
		F	W	
2.9	Höhenadapter thermisch zur Basis isoliert	X		
<b>3</b>	<b>Beamstop (Strahlabsorber)</b>			
3.1	Motorisiert mit 2 Achsen (YZ)	X		
3.2	Motoren 2 Phasen mit min. 200 Schritt, bipolar und parallel geschaltet (4 Litzen)	X		Phytron oder Oriental Motor
3.3	Auflösung 1 $\mu\text{m}$	X		
3.4	Reproduzierbarkeit 5 $\mu\text{m}$	X		
3.5	Endstops einstellbar	X		
3.6	Ohne Encoder	X		
3.7	Kompakt	X		
3.8	Steif	X		
3.9	Verfahrweg $\pm 10$ ( $\pm 20$ ) in beiden Achsen	X		
3.10	Manuelle Vorpositionierung	X		X95, FLS95
3.11	Anschlüsse Lemo 1B (Motorstecker) mit 4 Litzen für den Motor (0,25...0,7 mm <sup>2</sup> ) und 3 Litzen für die Endstops (0,1 mm <sup>2</sup> )	X		
3.12	Beamstop aus einem Werkstoff mit hohem Absorptionsgrad	X		W, D185 oder Ta
3.13	Keine signifikanten Fluoreszenzkanten im Bereich von 5 bis 25 keV	X		
3.14	Form Rund, Rechteckig mit einer scharfen Kante oder L-förmig mit zwei scharfen Kanten	X		scharfe Kanten Rz 0,025
3.15	Scharfe Kante im Winkel von 1 bis 2 Grad	X		
<b>4</b>	<b>Flugrohre</b>			
4.1	Evakuierung der Flugrohre	X		
4.2	Fluten der Flugrohre mit Stickstoff	X		
Legende: F = Forderung; W = Wunsch		Weiter auf nächster Seite		

**Anforderungsmatrix** – Fortsetzung von vorheriger Seite

Pos.	Merkmal / Ziel	Art		Kommentar / Hinweis
		F	W	
4.3	Austrittsfenster der Flugrohre mit Durchmesser von 60mm und 135mm	X		
4.4	Adaptive Längen der Flugrohre zwischen 500mm und 3000mm sowie 500mm und 2000mm	X		
<b>5</b>	<b>Detektorhalter und Peripheriezuleitung</b>			
5.1	Halterung für <ul style="list-style-type: none"> <li>– Pilatus 300K</li> <li>– Maxipix 2x2</li> <li>– Princeton Instruments PIXIS-XB CCD</li> <li>– Princeton Instruments LCX CCD</li> <li>– Andor iKon-L 936 CCD</li> <li>– Avalanche Photodiode</li> </ul>	X		
Legende: F = Forderung; W = Wunsch				

### A.3 Elemente des Pflichtenheftes

#### A.3.1 Anforderungsliste

##### Anforderungsliste

Lfd. Nr.	Anf. Art	Anforderung	Änderung
<b>1. Allgemeine Anforderungen</b>			
1	W	Korrosionsbeständigen Materialien	
2	F	Bei Verwendung von nicht Korrosionsbeständigen Materialien sind diese Materialien korrosionsbeständig zu beschichten	
3	W	Wirtschaftlichkeit, einfache Fertigung	
4	F	Leichtbau	
5	F	Hohe Steifigkeit	
6	W	Einheitliche Farbgebung	
7	W	Rahmenkonstruktion angepasst an bestehende Konstruktionen	
8	W	Halbzeuge vom DESY-Lager	
9	F	Normteile vom DESY-Lager	
<b>2. Probenhalter</b>			
10	F	Basisteil-Länge = 260 mm	
10	F	max. 20 mm über der Grundplatte der Eulerwiege	
11	F	Verfahrwege in $x, y \pm 5$ mm, in $z \pm 3$ mm und Rotation $Rz = 360^\circ$	
12	F	Keine Einschränkung der Verfahrwege	
13	F	Anschlagkanten oder Zentrierbohrungen zur genauen Montage der Teile untereinander	
14	F	Basis mit M6 25×25 Bohrmuster	
15	F	Werkstoff mit geringen Ausdehnungskoeffizienten	
16	F	Höhenverstellbar	
17	F	Höhenadapter thermisch zur Basis isoliert	
Legende: F = Forderung; W = Wunsch		Weiter auf nächster Seite	

Anforderungsliste – Fortsetzung von vorheriger Seite

Lfd. Nr.	Anf. Art	Anforderung	Änderung
18	W	Stecksystem	
		<b>3. Beamstop (Strahlabsorber)</b>	
19	F	Motorisiert mit 2 Achsen (YZ)	
20	F	Motoren 2 Phasen mit min. 200 Schritt, bipolar und parallel geschaltet (4 Litzen)	
21	F	Auflösung 1 µm	
22	F	Reproduzierbarkeit 5 µm	
23	F	Endstops einstellbar	
24	F	Ohne Encoder	
25	F	Kompakt	
26	F	Steif	
27	F	Verfahrweg ±10 (±20) mm in beiden Achsen	
28	F	Manuelle Vorpositionierung	
29	F	Anschlüsse Lemo 1B (Motorstecker) mit 4 Litzen für den Motor (0,25... 0,7 mm <sup>2</sup> ) und 3 Litzen für die Endstops (0,1 mm <sup>2</sup> ) nach PETRA III-Standard	
30	F	Werkstoff mit hohem Absorptionsgrad	
31	F	Keine signifikanten Fluoreszenzkanten im Bereich von 5 bis 25 keV	
32	W	Form Rund, Rechteckig oder L-förmig	
33	F	Eine scharfe Kante (Rz 0,025)	
34	W	Zwei scharfe Kante (Rz 0,025)	
35	F	Scharfe Kante im Winkel von 1 bis 2 Grad	
		<b>4. Flugrohre</b>	
36	F	Evakuierung der Flugrohre	
37	F	Fluten der Flugrohre mit Stickstoff	
38	F	Adaptive Längen der Flugrohre zwischen 500mm und 3000mm sowie 500mm und 2000mm	
Legende: F = Forderung; W = Wunsch		Weiter auf nächster Seite	

**Anforderungsliste – Fortsetzung von vorheriger Seite**

<b>Lfd. Nr.</b>	<b>Anf. Art</b>	<b>Anforderung</b>	<b>Änderung</b>
39	F	Austrittsfenster der Flugrohre mit Durchmesser von 60mm und 135 mm	
		<b>5. Detektorhalter und Peripheriezuleitung</b>	
40	F	Halterung für – Pilatus 300K – Maxipix 2x2 – Princeton Instruments PIXIS-XB CCD – Princeton Instruments LCX CCD – Andor iKon-L 936 CCD – Avalanche Photodiode	
41	F	Einstellbare Abstände zwischen Detektor und Proben zwischen 500 und 3000 mm	
		<b>6. Montage und Reinigung</b>	
42	W	leichte Montage	
43	W	Montagedauer $\leq 20$ min	
44	W	Reinigungsdauer $\leq 20$ min	
45	W	offene Konstruktion (einfache Zugänglichkeit)	
46	W	wenig Teile	
		<b>6. Sicherheit</b>	
47	F	Kollisionsschutz	
48	W	vor Überlast schützen	
		<b>7. Gebrauch</b>	
49	F	Umgebungstemperatur von 21 °C	
50	F	Probeneinsatz im Temperaturbereich von 4 bis 800 K	
51	W	Bedienung ohne Werkzeug	
52	W	Lebensdauer 8 Jahre	
53	W	Sofort einsatzbereit	
Legende: F = Forderung; W = Wunsch		Weiter auf nächster Seite	

Anforderungsliste – Fortsetzung von vorheriger Seite

Lfd. Nr.	Anf. Art	Anforderung	Änderung
		<b>8. Instandhaltung</b>	
54	W	Wartungsfrei	
55	W	Schmierung	
		<b>9. Recycling</b>	
56	W	Wiederverwendbare Werkstoffe verwenden	
		<b>10. Stückzahlen</b>	
57	W	Gesamtproduktion 2	
		<b>11. Kosten</b>	
58	W	Herstellkosten ≤ 15.000 €	
		<b>11. Termine</b>	
59	W	Konzeptfertigstellung Februar 2013	
Legende: F = Forderung; W = Wunsch			

## A.4 Mathematische Herleitungen und rechnergestützte Umsetzung

Grundlage zur Herleitung des Verfahren nach Ritz ist das Werk von GROSS/HAUGER/WRIGGERS: *Technische Mechanik 4* [36].

### A.4.1 Ritz-Verfahren

Das Verfahrens nach Walter Ritz kann mit dem Prinzip vom Minimum des elastischen Potentials formuliert werden (Variationsproblem), welches allgemein in der Form

$$\Pi(y) = \int_0^L F(x, y, y', y'') dx \rightarrow \text{Minimum} \quad (\text{A.1})$$

gegeben ist. Für die gesuchte Funktion  $y$ , hier  $w$ , wird eine vollständiger Näherungsansatz (Ritz-Ansatz) gewählt:

$$\tilde{w}(x) = \sum_{i=1}^n a_i \varphi_i(x) \quad (\text{A.2})$$

Dabei müssen die Ansatzfunktionen  $\varphi_i$  die wesentlichen beziehungsweise hier geometrischen Randbedingungen erfüllen. Die unbekanntes Freiwerte  $a_i$  sind nach der notwendigen Bedingung

$$\frac{\partial \Pi}{\partial a_i} = 0, \quad i = 1, \dots, n \quad (\text{A.3})$$

zu bestimmen, damit das elastische Potential mit den gewählten Ansätzen noch den minimalen Wert annimmt. Diese Bedingung liefert  $n$  Gleichungen für die  $n$  unbekanntes Koeffizienten  $a_i$ . Nach einsetzen von (A.2) in (A.1) folgt

$$\Pi(\tilde{w}) = \int_0^L F(x, \tilde{w}, \tilde{w}', \tilde{w}'') dx \rightarrow \text{Minimum} \quad (\text{A.4})$$

Mit dem Funktional des Balken-Randwertproblems (vgl. [36], 411)

$$\Pi(w) = \frac{1}{2} \int_0^L (EI w''^2 - 2qw) dx \rightarrow \text{Minimum} \quad (\text{A.5})$$

folgt mit dem Ritz-Ansatz (A.2) das elastische Potenzial zu

$$\Pi(\tilde{w}) = \frac{1}{2} \int_0^L \left[ EI \left( \sum_{i=1}^n a_i \varphi_i'' \right)^2 - 2q \left( \sum_{i=1}^n a_i \varphi_i \right) \right] dx \rightarrow \text{Minimum} \quad (\text{A.6})$$

und mit der partielle Ableitung, aus der notwendigen Bedingung für die Freiwerte  $a_i$ , folgt ein lineares Gleichungssystem heraus

$$\frac{\partial \Pi}{\partial a_j} = \int_0^L \left[ EI \left( \sum_{i=1}^n a_i \varphi_i'' \right) \varphi_j'' - q \varphi_j \right] dx = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (\text{A.7})$$

Mit der Einführung von

$$k_{ij} = k_{ji} = \int_0^L EI \varphi_i'' \varphi_j'' dx, \quad P_j = \int_0^L q \varphi_j dx \quad (\text{A.8})$$

ist das Gleichungssystem in folgende Form

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} \quad (\text{A.9})$$

und letztlich auch in der symbolischen Matrixnotation

$$\mathbf{K} \mathbf{a} = \mathbf{P} \quad (\text{A.10})$$

darstellbar, welches mit der Inversen von  $\mathbf{K}$  gelöst werden kann.

$$\mathbf{a} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{P} \quad (\text{A.11})$$

Die Existenz der Inversen  $\mathbf{K}$  ist mit einem vollständigen Ansatz gegeben (keine linearen Abhängigkeiten der Ansatzfunktionen  $\varphi_i$ ). Mit dem Kenntnis der Koeffizienten  $\mathbf{a}$  ist die Näherungsfunktion  $\tilde{w}$  (A.2) vollständig bestimmt.

### Umsetzung mit MATLAB

Die folgende MATLAB-Umsetzung dient der im Abschnitt 4.1 simulierten *Biegelinie*  $w(x)$  vom Probenhalter.

Zuvor wird für die Umsetzung des Ritz-Ansatzes die zusammengesetzte Simpson'sche Regel zur numerischen Integration benötigt.

$$I = \int_{x=a}^b y(x) dx \approx \frac{h}{3}(y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + 2y_4 + 4y_5 + \dots + 2y_{n-2} + 4y_{n-1} + y_n) \quad (\text{A.12})$$

mit  $h = \frac{b-a}{n}$

Hier werden durch jeweils drei benachbarte Punkte (Funktionswerte) eine eindeutige quadratische Parabel gelegt, mit dem sich jeweils über die Breite  $2h$  erstreckende Begrenzungen Teilflächen entstehen. Die Aufsummierung dieser exakt durch Integration berechenbaren Teilflächen ist in (A.12) zusammengefasst. Mit der Anforderung von geradzahligem  $n$  und äquidistanten Teilintervallen  $h$ .

Zuerst werden dem Programm alle notwendigen Parameter, wie Längen, Biegesteifigkeiten und Lastgrößen übergeben. Diese Parameter sind, entsprechend eines Mehrfeld-Problems, in Vektorform gleicher Längen einzubinden. Im folgenden sind  $l$ ,  $L$ ,  $EI$  und  $F$  die Abschnittslängen, Gesamtlänge, Biegesteifigkeiten und Einzelkraft. Die erste und dritte Variable sind für vier Abschnitte vektoriell initialisiert.

Anschließend wird eine Vorbereitung der numerischen Integration vorgenommen. Hierin ist die Gesamtlänge (Gesamtintervall)  $L$  nach (A.12)  $b - a$ .

```

1 n = 90 ;           % geradzahlige Anzahl der Abschnitte
2 h = L / n ;       % Breite eines Integrationsintervalls
3 ns = n + 1 ;      % Anzahl der Stützstellen
4 xs = 0 : h : L ;  % Koordinaten der Stützpunkte

```

Es werden Ansatzfunktionen definiert und deren 1., 2. und 3. Ableitungen sowie Funktionswerte an den Stützstellen berechnet. Als erste Ansatzfunktion ist  $\varphi(x) = x^2/L^2$  gewählt. Jede nachfolgende Ansatzfunktion ist im Grad um einen höher als der Vorgänger ( $\cdot x/L$ ). In Zeile 8 werden diese definiert. Aus einer Konvergenzstudie folgen die gewählten zehn Ansatzfunktionen.

```

5 m = 10 ;           % Anzahl der Ansatzfunktionen
6 for i=1:m
7   w(i).P           = zeros(1,i+2);
8   w(i).P(1)       = 1/L^(i+1);
9   w(i).PD          = polyder(w(i).P);
10  w(i).PDD         = polyder(w(i).PD);
11  w(i).PDDD        = polyder(w(i).PDD);
12  w(i).phi         = polyval(w(i).P , xs)' ;
13  w(i).phid        = polyval(w(i).PD , xs)' ;
14  w(i).phidd       = polyval(w(i).PDD , xs)' ;
15  w(i).phidd       = polyval(w(i).PDDD , xs)' ;
16 end

```

Im Quelltext werden markante Punkte wie Lagerungen – hier die linke Einspannung – und Querschnittsübergänge beziehungsweise Änderungen der Biegesteifigkeiten sowie Lasten – hier eine Einzellast am freien Ende – angelegt.

```

17 xL=0;             % Lage des Lagers
18 iLager = round(n*xL/L)+1; % Lager
19 xN = zeros(1,length(1)-1);
20 iN = zeros(1,length(1)-1);
21 for i=1:length(1)-1
22   xN(i)=sum(1(1:i)); % Lage des Übergangs
23   iN(i) = round(n*xN(i)/L)+1; % Übergang
24 end
25 xF=L;            % Ort der Einzelkraft
26 iF = round(n*xF/L + 1); % Einzelkraft

```

Zur Vorbereitung der Ergebnisauswertung werden die Biegesteifigkeiten und Linienlasten den Stützstellen anhand der markanten Punkten zugeordnet.

```

27 EIx = zeros(ns, 1) ; % Biegesteifigkeit
28 qx = zeros(ns, 1) ; % Linienlast
29 for i=1:ns
30   if(length(1)-1 == 0) % für Einfeld
31     EIx(i) = EI(1) ;
32     qx(i) = q(1) ;

```

```

33 else                                     % für Mehrfeld
34     for j=1:length(l)-1
35         if( (j==1 && i<=iN(j)) || ...
36             (j>1 && i>iN(j-1) && i<=iN(j)) )
37             EIx(i) = EI(j) ;
38             qx(i)  = q(j)  ;
39         end
40     end
41     if(i>iN(j))
42         EIx(i) = EI(length(l)) ;
43         qx(i)  = q(length(l))  ;
44     end
45 end
46 end

```

Aufbau des Gleichungssystems zur Bestimmung der Ansatzparameter. Im Vektor  $P$  sind neben der Linienlast  $q$  alle äußeren Lasten wie Einzelkräfte und Momente einzubauen. In der Matrix  $K$  wiederum neben der Biegesteifigkeit alle weiteren Potentiale wie Längs- und Drehfedern.

```

47 K = zeros (m, m) ;
48 P = zeros (m, 1) ;
49 for i=1:m                                     % Schleife über alle Gleichungen
50     % Rechte Seite
51     Summe = qx(1)*w(i).phi(1) + qx(ns)*w(i).phi(ns) ;
52     faktor = 4 ;
53     for k=2:n                                 % Numerische Integration (Simpson)
54         Summe = Summe + qx(k)*w(i).phi(k)*faktor ;
55         if(faktor == 4), faktor = 2 ;
56         else          faktor = 4 ;
57         end
58     end
59     P(i) = Summe*h/3 + F*w(i).phi(iF) ;
60     % + weitere Einzelkraftanteile + Anteile von äußeren Momenten
61
62     for j=1:m                                 % ii-te Zeile (Koeffizienten A)

```

```

63     Summe = EIx(1) * w(i).phidd(1) * w(j).phidd(1) + ...
64           EIx(ns) * w(i).phidd(ns) * w(j).phidd(ns) ;
65     faktor = 4 ;
66     for k=2:n           % Numerische Integration (Simpson)
67         Summe = Summe + ...
68             EIx(k)*w(i).phidd(k)*w(j).phidd(k) * faktor ;
69         if(faktor == 4), faktor = 2 ;
70         else           faktor = 4 ;
71         end
72     end
73     K(i,j) = Summe*h/3; % ...
74         % + kF*phi(iKF,ii)*phi(iKF,jj) ...
75         % + cT*phid(iCT,ii)*phid(iCT,jj) ;
76         % + weitere Federanteile + Drehfederanteil
77     end
78 end

```

Mit der Kenntnis der Ansatzparameter folgt das Lösen des Gleichungssystems und Bestimmung der gesuchten Biegelinie  $w_h(x)$ . Das Ergebnis ist in der Abbildung 36 auf Seite 67 zu sehen.

```

79 ai    = K \ P ;
80 wh    = [w.phi] * ai ;      % Biegelinie
81 whdd  = [w.phidd] * ai ;
82 whddd = [w.phiddd] * ai ;
83 Mb    = - EIx .* whdd ;    % Biegemoment
84 Q     = - EIx .* whddd ;   % Querkraft

```

Eine Auswertung des Biegemoments und besonders der Querkraft sind mit Vorsicht zu genießen, vor allem bei Modellen wie diesen oder höherer Komplexität. Diese Größen sind über den Balken, bis auf Stellen von Steifigkeitsänderungen, stetig.

## A.5 ANSYS-Konfiguration

Im folgenden sind abweichende Einstellungen zu den voreingestellten Standardwerten der FEM-Berechnung mit *ANSYS Workbench 14.5* – auf die in Abschnitt 4.2 eingegangen wurde – aufgelistet.

Modell (B4) -> Netz:

- Standard Einstellungen
  - Physikvoreinstellung = Explizit
  - Relevanz = 51
- Elementgröße
  - Physikgestützte Relevanz = Mittel
  - Glätten = Hoch
  - Übergang = Langsam
  - Spannweite = Grob
- Erzeugung der Prismenschichten (Inflation)
  - Optionen zur Erzeugung der Prismenschichten = Weicher Übergang

Statisch-mechanisch (B5) -> Analyseeinstellung:

- Solver-Steuerungen
  - Schwache Federn = Ein

Lösung (B6):

- Adaptive Netzverfeinerung
  - Max. Anz. Verfeinerungszyklen = 4
  - Verfeinerungstiefe = 3

## A.6 Verwendete Hilfsmittel

Für die Ausarbeitung und Gestaltung der Abschlussarbeit fanden folgende Programme Anwendung:

**L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X** als hauptsächliches Werkzeug bei der Erzeugung der schriftlichen Ausarbeitung, des Layouts sowie der Abbildungen und Tabellen dieser Arbeit. **L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X** baut auf das Textsatzprogramm **T<sub>E</sub>X** auf. Unter Verwendung weitere Makros (Makropakete), wird die Arbeit mit **T<sub>E</sub>X** vereinfacht. Dieses Softwarepaket steht zum kostenlosen Gebrauch, auf mehreren Internetseiten, als Download zur Verfügung. Einige wichtige Pakete:

- TikZ für Zeichnungen
- listings für Quelltexte
- longtable für mehrseitige Tabellen

**MATLAB** dient zur Aufbereitung von Datenfelder, die in Diagrammen verwendet wurden. Wie in der Einleitung schon erwähnt können mit **MATLAB** große Matrizen verrechnet werden. Es dient speziell zur numerische Berechnung und bietet gute Programmiermöglichkeit, ähnlich anderer Programmier-Hochsprachen wie C/C++ oder Java.





■ X-bezogene Angaben		
Spezifikationen	S. 401 -	S. 404
Kupplung	S. 961 -	S. 970
Näherungssensor	S. 1745 -	S. 1754
Fotозelle - Schiene	S. 1725 -	S. 1744
Auswahl - Lebensdauer-Berechnungsbeispiel	S.1905 -	S. 1908

➔ CAD-Daten

Teilenummer		Führungswagen Stückz.	Motorbefestigungen	Gesamtlänge Grundkörper L	Effektivhub		Maße für Befestigungsbohrung					
Hohe Güte	* Präzisionsgüte				Ein Führungswagen	Zwei Führungswagen	A	P	B	Anz. der Abstände	Anzahl der Bohrungen N	
(Standardfett) <b>LX2001</b> <b>LX2005</b>	(Standardfett) <b>LX2001P</b> <b>LX2005P</b>	(1 Stk.) B1 (2 Stk.) B2	(Servo-Motoren) <b>A2025 A2028</b> <b>A2038 A2040</b> <b>E2040</b>	<b>80</b>	16.5	-	10	60	10	1	4	
				<b>100</b>	36.5	-	20	60	20	1	4	
				(Schrittmotoren) <b>T2028 T2042</b>	<b>150</b>	86.5	-	15	60	15	2	6
(Fett mit geringer Partikelbildung) <b>LX2001G</b> <b>LX2005G</b>	(Fett mit geringer Partikelbildung) <b>LX2001PG</b> <b>LX2005PG</b>			(Ohne Befestigungen) <b>N</b> (Ohne Motorhalterung) <b>F</b>	<b>200</b>	136.5	79.5	40	60	40	2	6
					<b>250</b>	186.5	149.5	35	60	35	3	8
					<b>300</b>	236.5	199.5	30	60	30	4	10

**Präzisionsstandards**

Ⓢ Präzisionsnachweise liegen Artikeln mit bestimmten Präzisionsgüten bei.

Präzisionsstandards	Hohe Güte	Präzisionsgüte
Positioniergenauigkeit (mm)	0.06	0.02
Spiel (mm)	0.01	0.003
Wiederholgenauigkeit (mm)	±0.005	±0.003
Laufparallelität (mm)	0.025	0.01
Anlaufdrehmoment (N · cm)	1.2	1.2

\* Bei der Angabe des effektiven Hubs ist ein Randabstand von je 2.5mm auf beiden Seiten einkalkuliert.

\* Präzisionsnachweise liegen Artikeln mit bestimmten Präzisionsgüten bei.

\* Die Ausführung ohne Befestigungen besteht aus einem Stützglied und einer Halterung. Bitte beachten, dass es sich nicht um diese Motorausführung ohne Halterung handelt.

**Zulässiges statisches Lastmoment**

Anz. Führungswagen	Statische Traglast (N)	Zulässiges statisches Moment (N · m)		
		Ma	Mb	Mc
1	6199	27	27	93
2	12398	353	353	186

Ⓢ Die Referenzwerte gelten für einen statischen Zustand.

Für Lebensdauerberechnungen verwenden Sie bitte unsere Technische Berechnungssoftware.

Ⓢ Zulässige statische Momentangaben, siehe S.402.

**Trägheitsmoment**

Grundkörperlänge L	Trägheitsmoment (kg · cm <sup>2</sup> )			
	LX2001		LX2005	
	Ein Führungswagen	Zwei Führungswagen	Ein Führungswagen	Zwei Führungswagen
80	0.0047	-	-	-
100	0.0049	-	0.0054	-
150	0.0053	-	0.0059	-
200	0.0058	0.0058	0.0063	0.0069
250	-	-	0.0068	0.0074
300	-	-	0.0073	0.0078

**Gewicht**

Grundkörperlänge L	Gesamtgewicht (kg)	
	Ein Führungswagen	Zwei Führungswagen
80	0.40	-
100	0.45	-
150	0.58	-
200	0.71	0.79
250	0.83	0.92
300	0.96	1.05

**Maximale Geschwindigkeit**

Grundkörperlänge L	Teilenummer	
	LX2001	LX2005
80	190	-
100	190	694
150	190	694
200	190	694
250	-	694
300	-	633

**Servomotor-Verwendungstabelle**

Teilenummer	Flanschgröße	Hersteller	Leistung
<b>A2025</b>	25	Yasukawa Electric Corporation	10W/20W/30W
<b>A2028</b>	28	Mitsubishi Electric Corporation	10W/20W/30W
<b>A2038</b>	38	Panasonic	30W/50W/100W
<b>E2040</b>	40	SIEMENS	50W/100W
<b>A2040</b>	40	Yasukawa Electric Corporation	30W/50W
		Mitsubishi Electric Corporation	50W
		Sanyo Denki Co., Ltd.	30W/50W
		Omron Corporation	30W/50W
		Keyence Corporation	50W

**Schrittmotor-Verwendungstabelle**

Teilenummer	Flanschgröße	Hersteller	Ausführung
<b>T2028</b>	28	Oriental Motor	2 Phasen/5 Phasen/α Schritt
<b>T2042</b>	42		2 Phasen/5 Phasen/α Schritt

Ⓢ Detailzeichnungen zur Motoradapterplatte und zugehörige Motorenmodelle, siehe S.413.

**Bestellbeispiel** Teilenummer - Anz. Führungswagen - Motoradapterplatten - Gesamtlänge Grundkörper (L)  
**LX2001 - B1 - A2025 - 200**

**Lieferzeit** Hochwertiger Standardschmierstoff/Standardfett/Präzisionsgüte  
 LX2001 · 2005 **8** Arbeitstage  
 LX2001P · 2005P **10** Arbeitstage  
 Fett mit geringer Partikelbildung ohne Motorhalterung **13** Arbeitstage

Ⓢ Alle Artikel ohne Halterungen gehen 13 Tage nach Eingang der Bestellung in den Versand.  
 Ⓢ Bei Bestellung von 8 oder mehr identischen Modellen, die jeweilige Lieferzeit bitte anfragen.

**Preis**

Stückpreis hohe Güte in € 1 - 2 Stk.										
Teilenummer	L=80 (nur Steigung 1)	L=100	L=150	L=200	L=250 (nur Steigung 5)	L=300 (nur Steigung 5)	Motorbefestigungen	Anz. Führungswagen	Gewindewellen-Ø	Steigung
<b>LX20 --B1-</b>							Servo-Schrittmotor	1	6	1
<b>LX20 --B2-</b>							Ohne Adapter	2		
<b>LX20 --B1-F</b>							Ohne Halterung	1	6	5
<b>LX20 --B2-F</b>								2		

Ⓢ Bei noch größeren Bestellmengen muss die Lieferzeit im Einzelfall geschätzt werden.

Ⓢ Sensoren der LX20... Serie können als Option gewählt werden. Einzelheiten zu Optionen S.414

**Präzisionsgüte · Aufpreis für Fett mit geringer Partikelbildung**

Spezifikationen	€ Stückpreis
Präzisionsgüte	
Fett mit geringer Partikelbildung	

Ⓢ Listenpreis + Stückzahl in € = Artikelpreis

**PRODUKTINFORMATION**  
*PRODUCT INFORMATION*

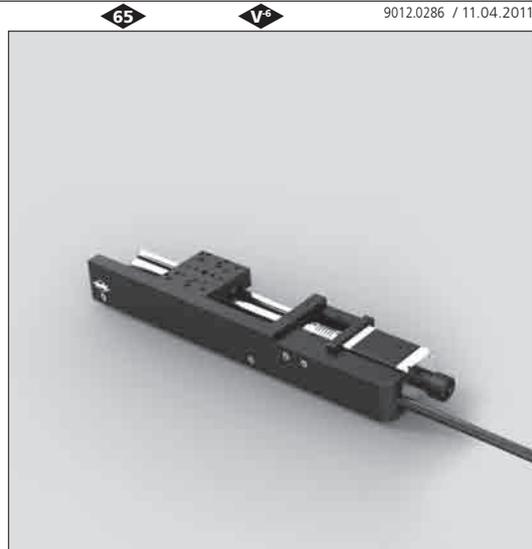
PRÄZISION IN PERFEKTION  
*PRECISION IN PERFECTION*



**Präzisions-Lineartische**  
**Precision Linear Stages**

**LTM 45**

- |  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Stellweg 25 mm, 40 mm, 65 mm, 85 mm und 110 mm</li> <li>• industrietauglich</li> <li>• verzugsarmes Aluminium</li> <li>• reflexionsarm, schwarz eloxiert</li> <li>• spielarme, geschliffene Feingewindespindel</li> <li>• Schlitten mit geschliffenen und korrosionsbeständigen Kugelumlauf Führungen</li> <li>• Hall-Effekt- oder mechanische Endschalter</li> <li>• 2-Phasen Schrittmotor oder DC-Servomotor mit Encoder</li> <li>• mit OWISid</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• travel 25 mm, 40 mm, 65 mm, 85 mm and 110 mm</li> <li>• designed for industrial application</li> <li>• deformation-resistant aluminium</li> <li>• reflection-poor, black anodized</li> <li>• ground fine-thread spindle with low backlash</li> <li>• carriage with ground and stainless recirculating ball bearing guides</li> <li>• Hall-effect or mechanical limit switches</li> <li>• 2-phase step motor or DC servo motor with encoder</li> <li>• with OWISid</li> </ul> |
|--|---|



Die preiswerten Lineartische LTM 45 sind die schmalsten der LTM Serie und eignen sich für den Einsatz im Dauerbetrieb und den Einbau in Maschinen.

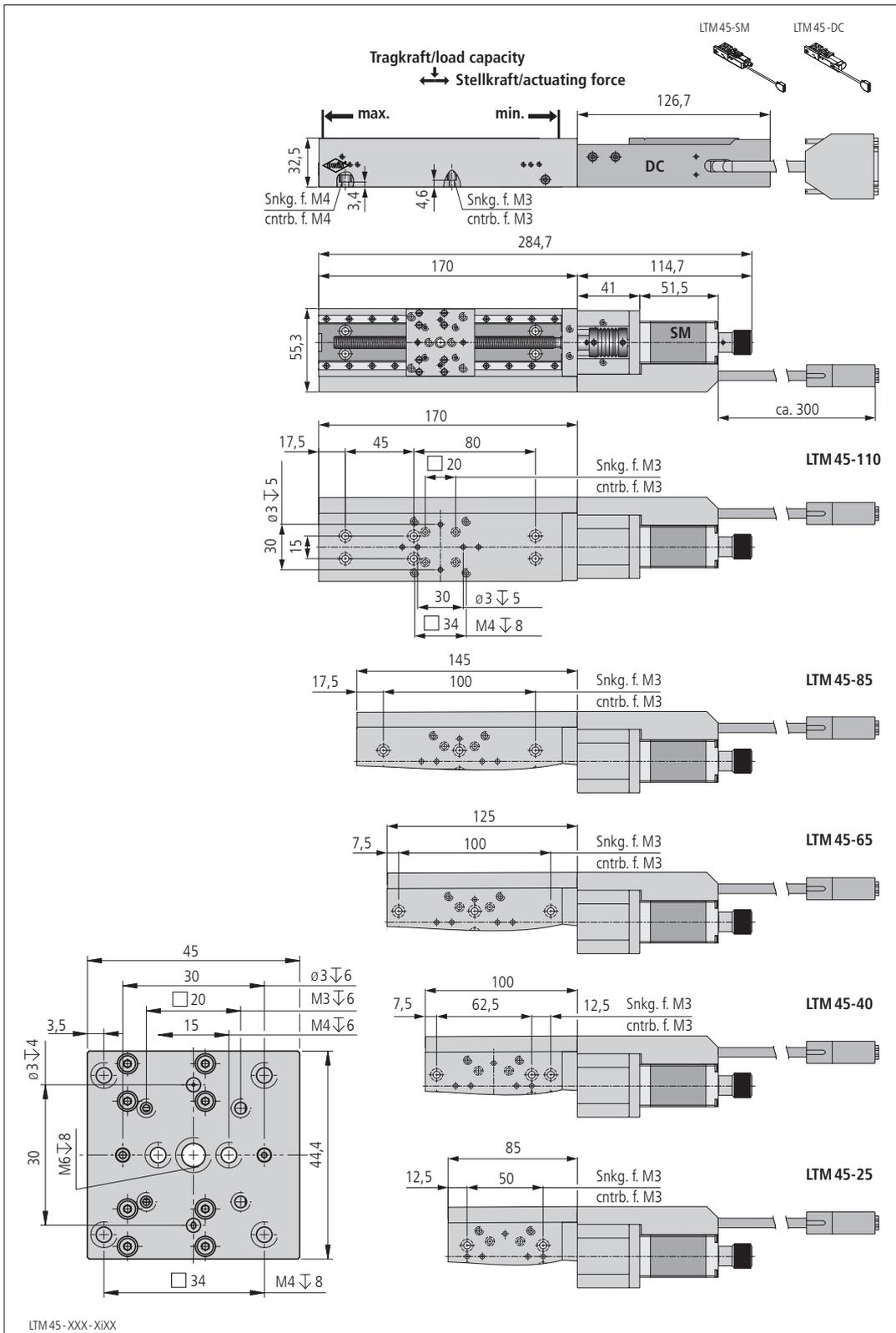
Die speziellen Führungen sorgen für praktisch slip-stick-freien Lauf sowie für hohe Belastbarkeit. Die Werkstoffkombination von Gewindespindel und Mutter gewährleistet geringen Verschleiß und hohe Lebensdauer.

Alle Aluminiumteile haben eine hochwertige schwarze Eloxal-Schutzschicht.

The economically priced LTM 45 linear stages are the slimest of the LTM series and particularly suitable for continuous operation and installation in machines.

The special guides provide practically slip-stick free movement as well as high load capacity. The material combination of spindle and nut ensures low abrasion and long life time.

All aluminium parts have a top-quality black anodized protective coating.

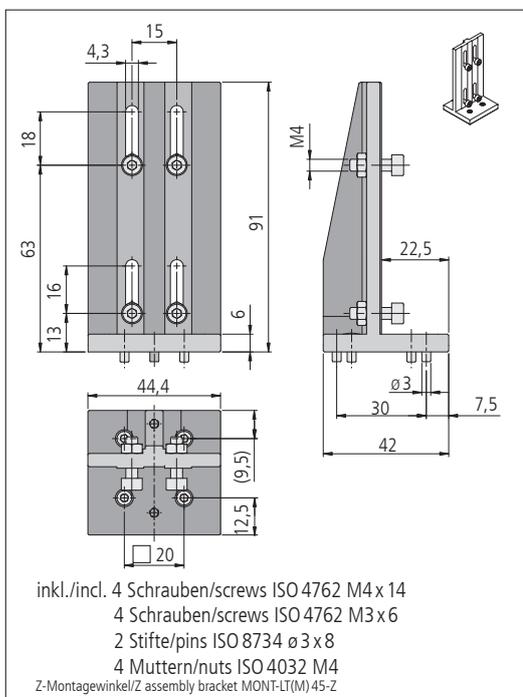
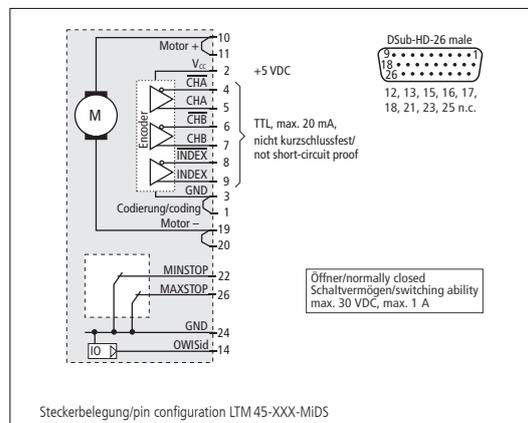
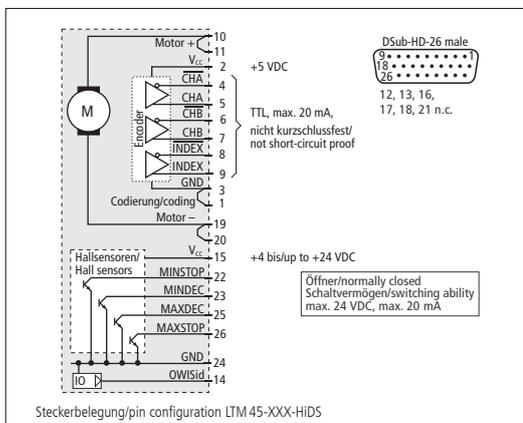
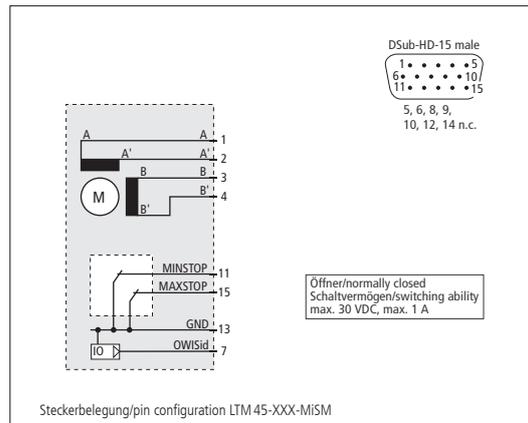
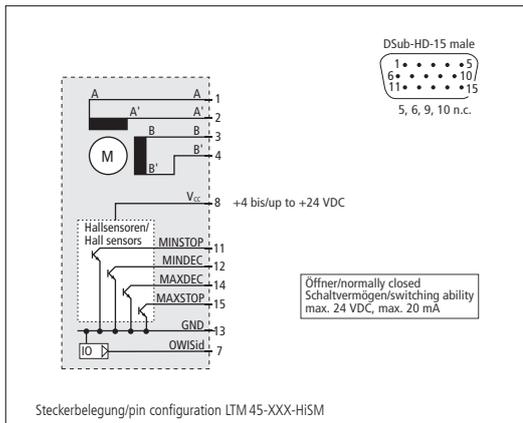


Änderungen vorbehalten

Copyright reserved by OWIS (2010)

Subject to change without notice

M14



**Technische Daten/Technical Data LTM 45** (bei 20 °C/@20 °C, ohne Last/no load)

		Schrittmotor step motor	DC-Servomotor DC servo motor	
Geschwindigkeit	velocity	max. 5	max. 10	mm/s
Tragkraft	load capacity		max. 70	N
Stellkraft	actuating force		max. 20	N
Kippmoment (Mx, Mz)	moment of tilt (Mx, Mz)		max. 3	Nm
Kippmoment (My)	moment of tilt (My)		max. 2	Nm
Spindelsteigung	spindle pitch		1	mm
Wiederholfehler (bidirektional)	repeatability (bidirectional)		< 15	µm
Positionierfehler	positioning error		< 35	µm/100 mm
Gierwinkel	yaw angle		< 300	µrad
Nickwinkel	pitch angle		< 250	µrad
Höhenschlag	vertical deviation		< 7	µm
Seitenschlag	lateral deviation		< 10	µm
Motorspannung	motor voltage	max. 50	max. 24	V
Motor-Haltespannung	holding voltage	6,2	—	V
Motorstrom	motor current	max. 0,67 <sup>1)</sup>	max. 1,9	A
Schritte/Impulse pro Motorumdrehung	steps/pulses per motor revolution	200 <sup>2)</sup>	2000	
Betriebsumgebungstemperatur <sup>3)</sup>	ambient operating temperature <sup>3)</sup>		+10 bis/up to +50	°C
Lagerungstemperatur <sup>3)</sup>	storing temperature <sup>3)</sup>		-20 bis/up to +70	°C

<sup>1)</sup> pro Phase/per phase    <sup>2)</sup> im Vollschrittbetrieb/in full-step mode    <sup>3)</sup> ohne Betauung/without condensation

**Alle technischen Daten sind abhängig von Einbaulage, Anwendung und eingesetzter Steuerung.  
All technical data depend on orientation, application and used control.**

**Bestellangaben/Ordering Information**

Präzisions-Lineartische/precision linear stages

mit Schrittmotor/with step motor	mit Hall-Effekt-Endschaltern with Hall-effect limit switches		mit mechanischen Endschaltern with mechanical limit switches	
	Typ/type	Bestell-Nr./part no.	Typ/type	Bestell-Nr./part no.
25 mm Stellweg/travel	LTM 45-25-HISM	41.045.25AN	LTM 45-25-MiSM	41.045.25BN
40 mm Stellweg/travel	LTM 45-40-HISM	41.045.40AN	LTM 45-40-MiSM	41.045.40BN
65 mm Stellweg/travel	LTM 45-65-HISM	41.045.65AN	LTM 45-65-MiSM	41.045.65BN
85 mm Stellweg/travel	LTM 45-85-HISM	41.045.85AN	LTM 45-85-MiSM	41.045.85BN
110 mm Stellweg/travel	LTM 45-110-HISM	41.045.11AN	LTM 45-110-MiSM	41.045.11BN

mit DC-Servomotor/with DC servo motor	mit Hall-Effekt-Endschaltern with Hall-effect limit switches		mit mechanischen Endschaltern with mechanical limit switches	
	Typ/type	Bestell-Nr./part no.	Typ/type	Bestell-Nr./part no.
25 mm Stellweg/travel	LTM 45-25-HiDS	41.045.25GE	LTM 45-25-MiDS	41.045.25WE
40 mm Stellweg/travel	LTM 45-40-HiDS	41.045.40GE	LTM 45-40-MiDS	41.045.40WE
65 mm Stellweg/travel	LTM 45-65-HiDS	41.045.65GE	LTM 45-65-MiDS	41.045.65WE
85 mm Stellweg/travel	LTM 45-85-HiDS	41.045.85GE	LTM 45-85-MiDS	41.045.85WE
110 mm Stellweg/travel	LTM 45-110-HiDS	41.045.11GE	LTM 45-110-MiDS	41.045.11WE

**Zubehör/Accessories**

Z-Montagewinkel für LT 45, LTM 45, LTM 45M und LIMES 44	Z assembly bracket for LT 45, LTM 45, LTM 45M and LIMES 44	MONT-LT(M) 45-Z	41.045.0001
XY-Montagesatz für LT 45, LTM 45, LTM 45M und LIMES 44, ohne Montage	XY assembly kit for LT 45, LTM 45, LTM 45M and LIMES 44, without assembly	MONT-LT(M) 45-XY	41.045.0004
XY-Montagesatz für LT 45, LTM 45, LTM 45M und LIMES 44, mit Montage	XY assembly kit for LT 45, LTM 45, LTM 45M and LIMES 44, with assembly	MONT-LT(M) 45-XY-MM	41.045.0014
Fett für Führungen, 5 ml im Applikator	grease for guides, 5 ml in applicator	SST.F2	90.999.0002

Änderungen vorbehalten

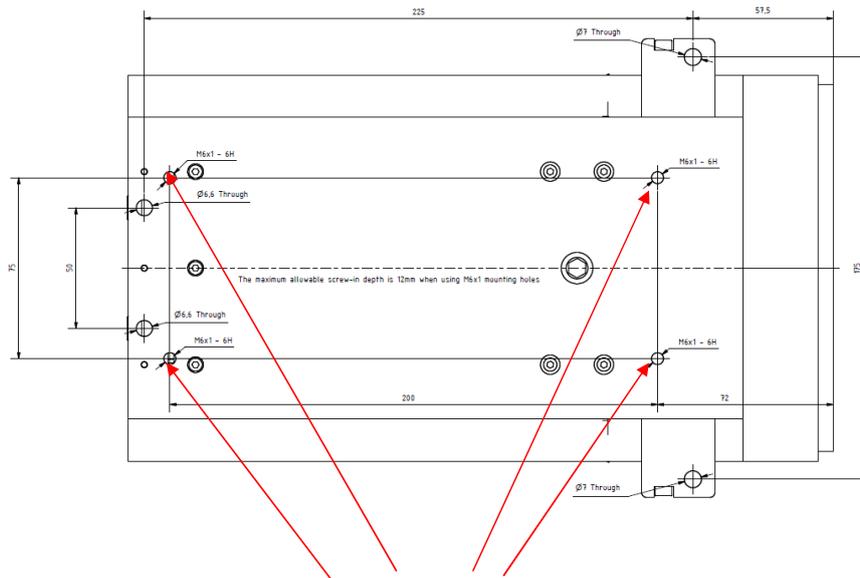
Copyright reserved by OWIS (2010)

Subject to change without notice



### 5.2.2 Mounting from the bottom

From the bottom with four M6 bolts.



Mounting points when mounting from the bottom

- 

The four M6 bolts should not intrude into the detector more than 2 cm.
- 

Make sure the detector is properly mounted.
- 

Make sure the detector has enough space for proper ventilation. The ventilator on the back of the detector should not be covered.
- 

Do not use in vacuum.

The PC can be mounted in a standard 19 inch rack, which has to be properly grounded.



Technical data

**Fixture interface (bottom side)**

The bottom side is fitted with M4 threadings for direct mounting of Microcontrolle X48 rail carriers.

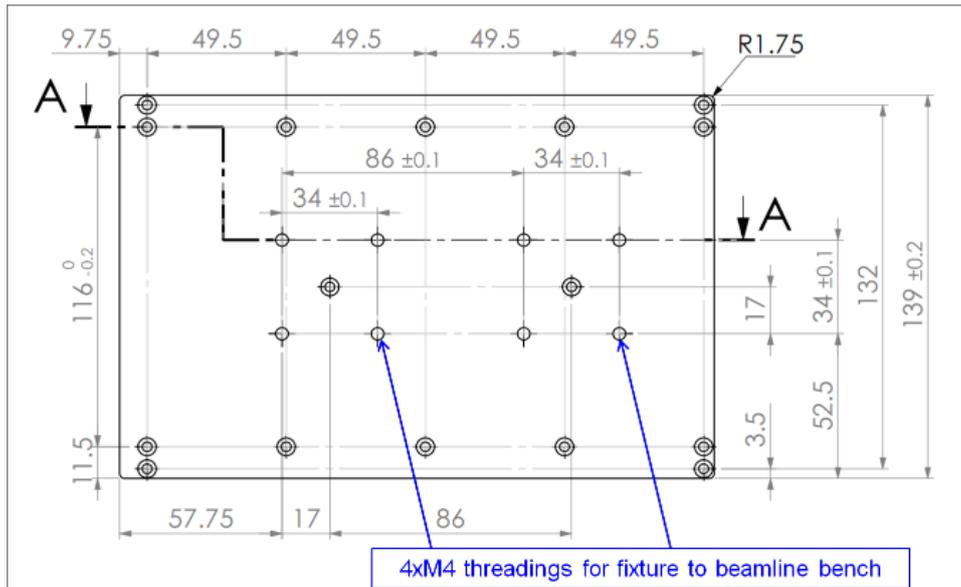
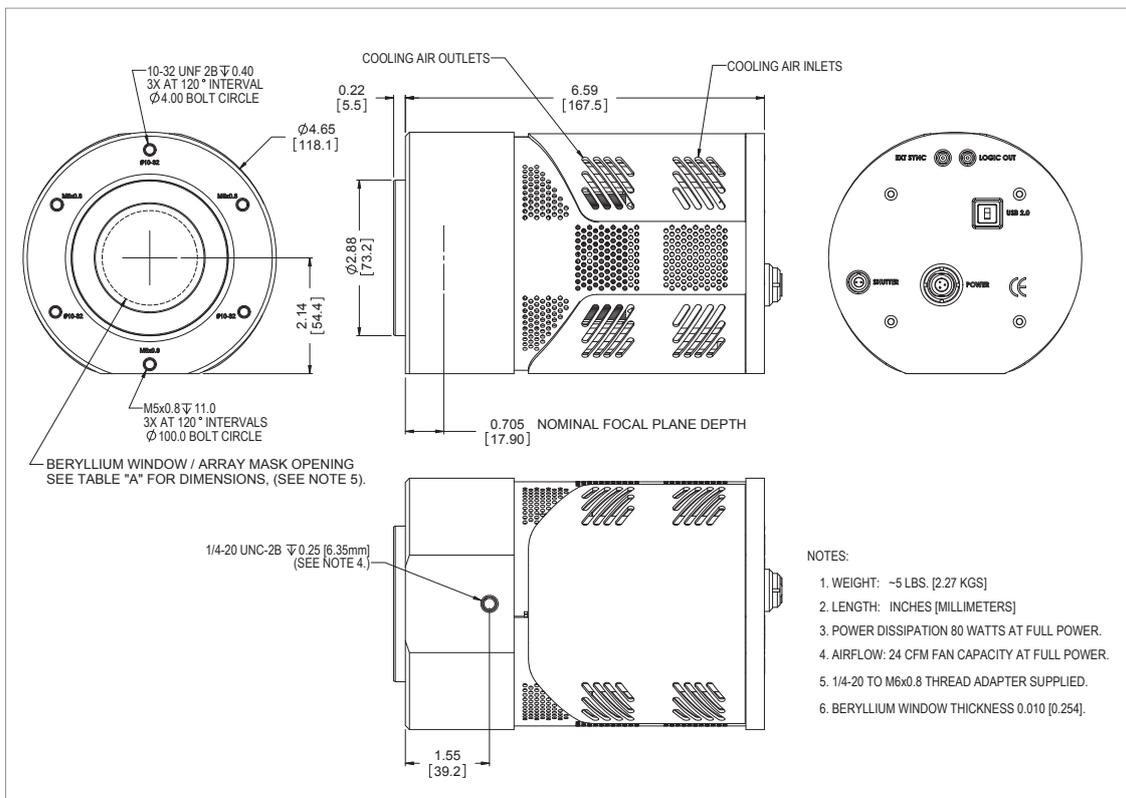


Fig. 2: Detector bottom side

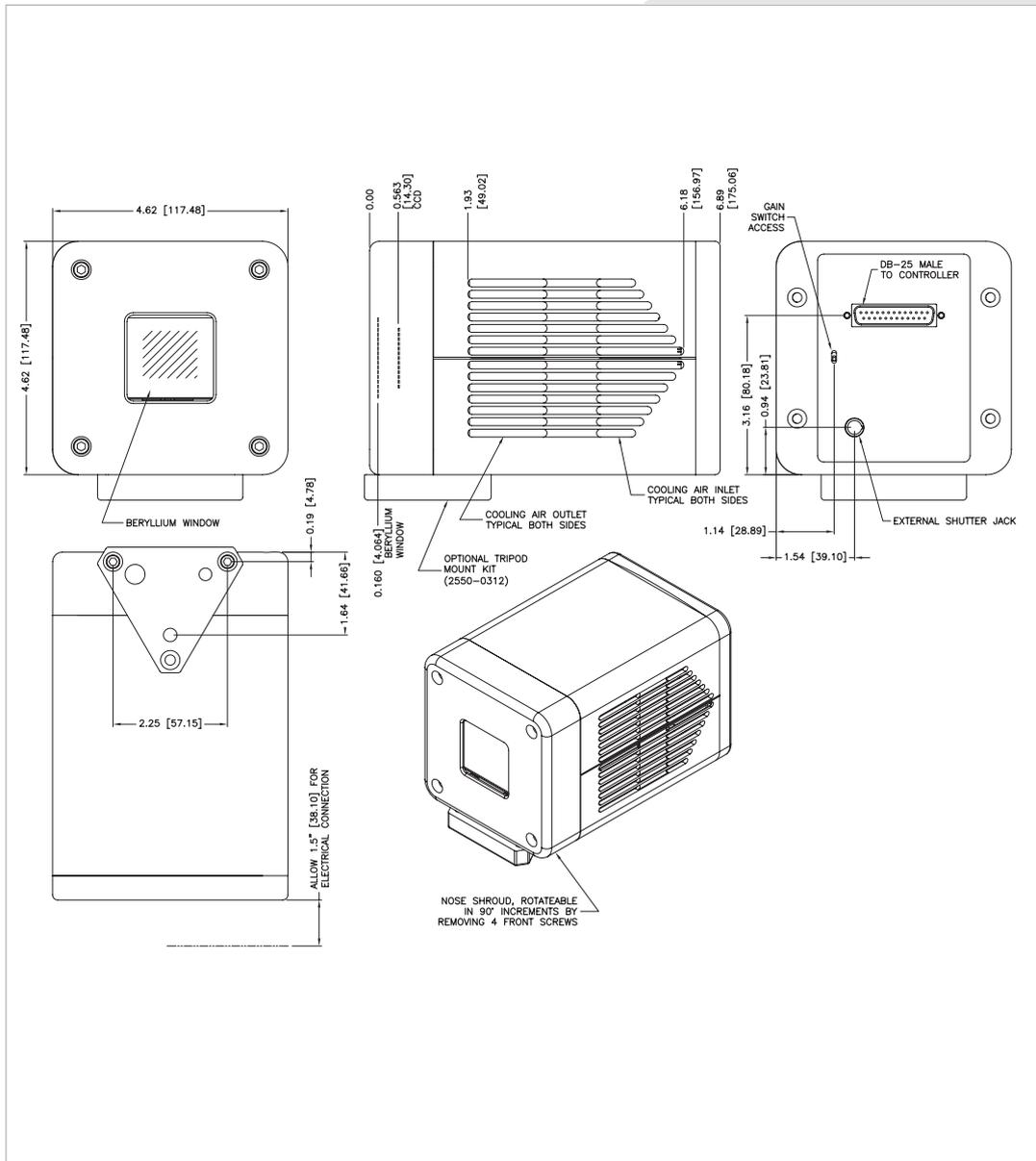


**OUTLINE DRAWING**

**PIXIS-XB: 1340 X 1300BR AIR COOLED**



PI-LCX Drawings



www.piaction.com

email: moreinfo@piaction.com  
 USA +1.877.4 PIACTION | Benelux +31 (347) 324989  
 France +33 (1) 60.86.03.65 | Germany +49 (0) 89.660.779.3  
 UK +44 (0) 28.38310171 | Asia/Pacific +65.6293.3130  
 China +86 135 0122 8135 | Japan +81.3.5639.2741

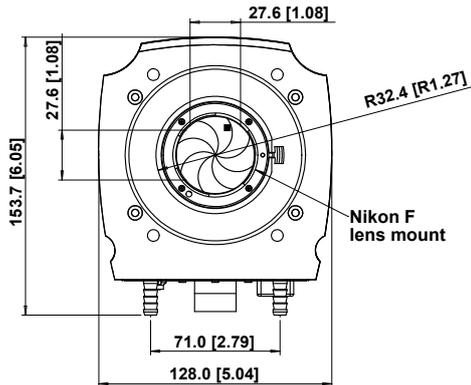
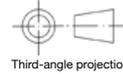


## iKon-L Series

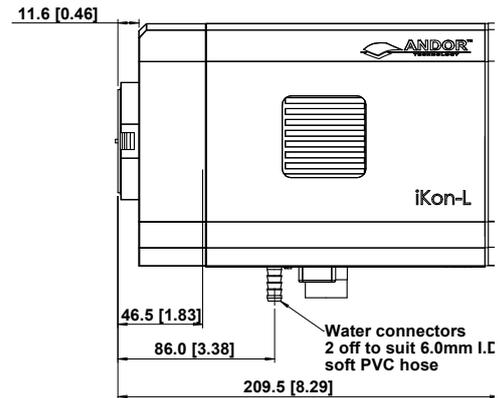
4 Megapixel, -100°C,  
5 MHz Imaging CCD

### Product Drawings

Dimensions in mm [inches]



■ = position of pixel 1,1  
Weight: 4.6 kg [10.2 lb]



### Connecting to the iKon-L

#### Camera Control

Connector type: USB 2.0

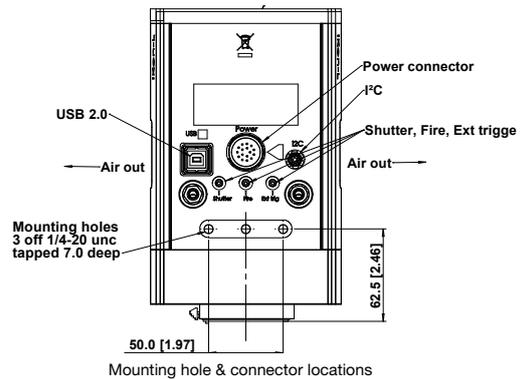
#### TTL / Logic

Connector type: SMB, provided with SMB - BNC cable  
Fire (Output), External Trigger (Input), Shutter (Output)

#### I<sup>2</sup>C connector

Compatible with Fischer SC102A054-130  
Shutter (TTL), I<sup>2</sup>C Clock, I<sup>2</sup>C Data, +5 Vdc, Ground

Minimum cable clearance required at bottom of camera  
90 mm



### Typical Applications

Astronomy
Biochip Reading
Bioluminescence/Chemiluminescence
Bose-Einstein Condensation (BEC)
Fluorescence Microscopy
High Throughput Screening
Hyper-Spectral imaging
In-Vivo Luminescence
Laser Induced Fluorescence (LIF)
Neutron Radiography
Semiconductor analysis

---

## Auflistung der zu erklärenden Begriffe

**Beamline** siehe Strahlenführung

**Brillanz** wird als Phasenraumdichte eines Elektronen- oder Ionenstrahls verstanden. Genauer gesagt, berücksichtigt die Brillanz neben den normalisierten Emittanzen auch die Impulsunschärfe des Strahls. Gemessen wird die Brillanz in Einheit Schwinger:  $1 \text{ Sch} = 1 \text{ Photon pro } (\text{s mrad}^2 \text{ mm}^2 0,1\% \text{ Bandweite})$ .

**Diffraktometer** detektiert Beugungsphänomene beziehungsweise Reflexe an diskreten Orten im Raum und Intensität von Röntgenstrahlungen. Bestehend aus Goniostat zur Drehung der Anordnung, je nach Ausstattung, in unterschiedlicher Anzahl von Kreise. Die kardanische Aufhängung beziehungsweise Euler-Wiege ist in allen drei Eulerschen Winkeln drehbar.

**Funktional** hier lineares Funktional ist eine lineare Abbildung eines Vektorraums in seinen Grundkörper. Im Falle dass der Vektorraum selbst ein Funktionsraum ist, sind die Argumente des Funktionals Funktion, also eine Funktion von Funktionen. Beispielsweise  $I = \int_a^b F(x, y, y') dx$  mit  $y = f(x)$

**Kohärente Wellen** sind zwei Wellen mit einer nicht von der Zeit abhängende Phasendifferenz.

**Lastenheft** die Formulierung von Forderung des Auftraggebers an einen Auftragnehmer.

**Pflichtenheft** auf Grundlage des Lastenheft die Erstellung einer konkreten Beschreibung vom Auftragnehmer zur Lösung der Anforderungen des Auftraggebers.

**Strahlenführung** der Ort an dem unterschiedliche Strahlenexperimente durchgeführt werden.

**Undulator** eine Magnetstruktur, genauer eine lineare Folge von Dipolmagneten in abwechselnder Ausrichtung, zur Erzeugung von Synchrotronstrahlung.

**Variationsproblem** auffinden einer Funktion  $f$  für die ein gegebenes Funktional einen Extremwert darstellt, zum Beispiel kann die Lösung eines Variationsproblems auf die Integration einer Differentialgleichung zurückgeführt werden oder direkt mit Näherungsverfahren gelöst werden.

---

## Stichwortverzeichnis

### — B —

Beamstop ..... 31ff.

### — C —

CDI ..... 9

### — D —

DESY ..... 6

    Kohärenzbeamline P10 ..... 9

    PETRA III ..... 7

Detektorhalter ..... 55ff.

Diffraktometer ..... 10

### — F —

Flugrohr ..... 44ff.

Flytube ..... 44ff.

### — K —

Konstruktion

    Detektorhalter ..... 55ff.

Flugrohr ..... 44ff.

Probenhalter ..... 19ff.

Strahl-Absorber ..... 31ff.

### — L —

Lastenheft ..... 79

### — P —

Peripheriezuleitung ..... 55

Pflichtenheft ..... 82

Probenhalter ..... 19ff.

### — S —

SAXS ..... 9

Strahl-Absorber ..... 31ff.

Synchrotronstrahlung ..... 8

### — X —

XPCS ..... 9