

# **Inbetriebnahme, Funktionstest und Optimierung** **eines Photonenstrahldetektors**

## **Abschlussarbeit**

Zur Erlangung des akademischen Grades  
Bachelor of Engineering  
an der Beuth Hochschule für Technik Berlin

Fachbereich:	VII - Elektrotechnik - Mechatronik - Optometrie
Studiengang:	Mechatronik
Eingereicht von:	Breede, Heiko
Immatrikulationsnummer:	765723
Bearbeitungszeitraum:	31.07.2013 bis 31.10.2013
Abgabe:	26.09.2013 im SoSe 2013
betreuende Lehrkraft:	Prof. Dipl.-Phys. Jürgen Wittmann
betrieblicher Betreuer:	Dr. Dipl.-Phys. Martin Sachwitz
Themenstellendes Institut:	Deutsches Elektronen-Synchrotron Ein Forschungszentrum der Helmholtz- Gemeinschaft
Gruppe/Abteilung:	DLAB (Detektorlabor)

FB VII,

Studiengang: Mechatronik

Postanschrift DEUTLICH SCHREIBEN !!!

Name, Vorname	Breede, Heiko	EDV-Nr.
Straße		Telefon
PLZ, Ort		e-mail

**Diese Erklärung ist bei Abgabe der Bachelor-Arbeit dem Vorsitzenden des Prüfungsausschusses (Dekan) einzureichen.**

Erklärung zur Bachelor-Arbeit

Ich versichere, dass ich

- meine als Einzelarbeit angefertigte Bachelor-Arbeit
- meine als Teil eines Projektes angefertigte Bachelor-Arbeit

selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Berlin, den \_\_\_\_\_

Unterschrift

\*) Nicht zutreffendes streichen!

---

FB-Vermerke

PrA-Vors.:

Eingang Bachelor-

Arbeit am: \_\_\_\_\_ BA an \_\_\_\_\_ am: \_\_\_\_\_

Handzeichen: \_\_\_\_\_ 2. Ex. an \_\_\_\_\_

3. Ex. an \_\_\_\_\_

T.GA: \_\_\_\_\_ / m.Pr.: \_\_\_\_\_

Hz.: \_\_\_\_\_ Dat.: \_\_\_\_\_

## Abstract

„DESY ist eines der weltweit führenden Beschleunigerzentren und gehört zur Helmholtz-Gemeinschaft“ [2]. Eine der am Standort Hamburg betriebenen Anlagen ist PETRA III. Sie ist zurzeit die brillianteste Speicherring-Röntgenstrahlungsquelle der Welt [nach 5].

Es werden zahlreiche Messgeräte zur Bestimmung der Position, des Querschnitts sowie der Intensität des hochenergetischen Photonenstrahls eingesetzt. Eines dieser Messgeräte ist der Residual Gas X-Ray Beam Position Monitor (RGXBPM) an der Strahlführung P4. Er ist in der Lage, die Strahlparameter live auf einem Schirm nachzuverfolgen. Das Funktionsprinzip beruht auf der Photoionisation von Restgasen durch den Strahl in der UHV-Strahlführung und der darauffolgenden gerichteten Ablenkung der Ionen mittels eines homogenen elektrischen Feldes zu einem Phosphorschirm.

Das dort eingesetzte Gerät zeigt keine Abbildung des Strahls und es sind keine Parameter bestimmbar. Der vorliegende Bericht beinhaltet eine Systemanalyse des Gerätes, Hinweise zur Verbesserung des Gerätes, sowie die einzustellenden Parameter am RGXBPM, um die Funktionstüchtigkeit wieder herzustellen. Ein Teststand wurde aufgebaut um die Funktionstüchtigkeit zu überprüfen. Weiterhin wurden umfassende Praxistests am Teststand sowie an der Strahlführung P4 durchgeführt, die die Funktionstüchtigkeit beweisen.

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Aufgabenstellung .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Theorie .....</b>	<b>6</b>
	<b>3.1 Entstehung, Führung und Nutzung der Röntgenstrahlung .....</b>	<b>7</b>
	<b>3.2 Strahlparameter .....</b>	<b>12</b>
	3.2.1 Brillanz: .....	13
	3.2.2 Polarisationsmodi: .....	14
	<b>3.3 Photoionisation .....</b>	<b>15</b>
	<b>3.4 FEM-Simulation .....</b>	<b>17</b>
<b>4</b>	<b>Gerätebeschreibung des RGXBPM .....</b>	<b>18</b>
	<b>4.1 Aufbau &amp; Funktionsweise .....</b>	<b>18</b>
	<b>4.2 Messmethode &amp; Ermittlung der Strahlposition .....</b>	<b>21</b>
<b>5</b>	<b>Anforderungsliste.....</b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>Systemanalyse .....</b>	<b>25</b>
	<b>6.1 Abstrakte Darstellung des Gesamtsystems .....</b>	<b>25</b>
	<b>6.2 Finden der Gesamtfunktion .....</b>	<b>26</b>
	<b>6.3 Funktionsstruktur und Ermittlung der Teilfunktionen .....</b>	<b>27</b>
	<b>6.4 Detektoren für Teilchenstrahlung .....</b>	<b>29</b>
	6.4.1 Silizium-Streifendetektor / CCD / Halbleiterdetektor .....	30
	6.4.2 Phosphorschirm .....	30
<b>7</b>	<b>Aufbau eines Teststandes .....</b>	<b>31</b>
<b>8</b>	<b>FEM-Simulation &amp; erste Praxistests .....</b>	<b>35</b>
	<b>8.1 Durchführung .....</b>	<b>35</b>
	8.1.1 Potentialverteilung .....	36
	8.1.2 Elektrischen Feldstärke .....	39
	8.1.3 Erster Praxistest.....	45
	8.1.4 Anpassung der FEM-Simulation .....	46
	8.1.5 Zweiter Praxistest .....	50
	8.1.6 Flugbahn geladener Partikel.....	52
	<b>8.2 Fehlerbetrachtung .....</b>	<b>61</b>
<b>9</b>	<b>Funktionstest an P4 in Petra III .....</b>	<b>64</b>
	<b>9.1 Zugriff und Steuerung des RGXBPM an P4 .....</b>	<b>65</b>
	<b>9.2 Praxistest P4 1, P4 2, P4 3 .....</b>	<b>71</b>

9.3 Praxistest P4 4	71
10 Bestimmung des Strahlprofil .....	72
11 Ergebnisse .....	74
12 Auswertung & Ausblick .....	75
13 Literatur- & Quellenverzeichnis .....	76
14 Anhang .....	80

## 1 Einleitung

„DESY ist eines der weltweit führenden Beschleunigerzentren und gehört zur Helmholtz-Gemeinschaft. Bei DESY werden große Teilchenbeschleuniger entwickelt, gebaut und betrieben, um damit die Struktur der Materie zu erforschen. Das breit gefächerte, international ausgerichtete Forschungsspektrum von DESY beruht auf drei Schwerpunkten: Entwicklung, Bau und Betrieb von Beschleunigern, Forschung mit Photonen sowie Teilchen- und Astroteilchenphysik“ [2].

Eine der am Standort Hamburg betriebenen Anlagen ist PETRA III. Sie ist zurzeit die brillianteste Speicherring-Röntgenstrahlungsquelle der Welt. Die Anlage hat einen Umfang von 2'304m.

Die erzeugte Strahlung ist die leistungsstärkste Lichtquelle ihrer Art. Sie bietet Wissenschaftlern exzellente Experimentiermöglichkeiten. Davon profitieren vor allem Forscher, die sehr kleine Proben untersuchen wollen oder stark gebündeltes, sehr kurzwelliges Röntgenlicht für ihre Analysen benötigen. Es sind 14 verschiedene Messplätze mit jeweils bis zu 30 Instrumenten vorhanden (nach [5]).

Zur Erzeugung der Röntgenstrahlung müssen Elektronen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und daraufhin auf einen Slalomkurs gebracht werden. Dies geschieht in den in Abbildung 1 dargestellten Anlagen in mehreren Phasen. Ein grundlegender Überblick der Entstehung und Führung der Strahlung folgt in Kapitel 3.1. In nachfolgendem Kapitel 2 wird die Aufgabenstellung genannt.

## Anlagen zur Erzeugung von Röntgenstrahlung am DESY-Standort Hamburg

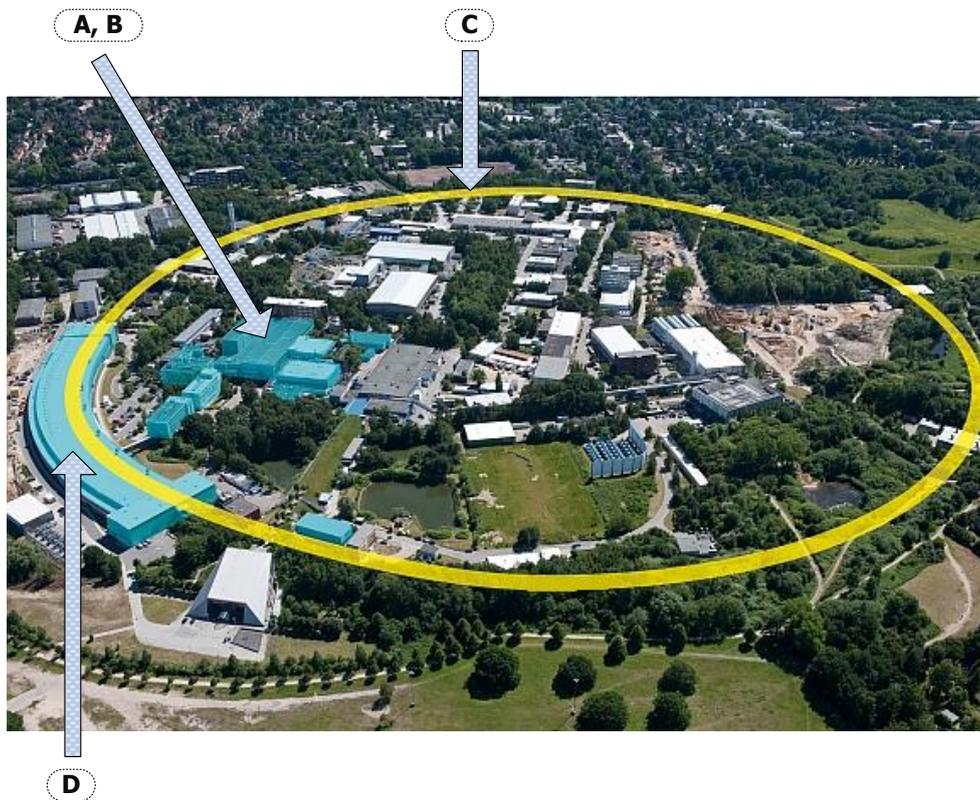


Abbildung 1: Anlagen zur Erzeugung von Röntgenstrahlung am DESY-Standort Hamburg (nach [3])

### Legende:

#	Anlagenname	Anlagentyp
A)	LINACII	Linearbeschleuniger
B)	DESYII	Ringbeschleuniger
C)	PETRA	Speicherring
D)	PETRAIII	Röntgenstrahlungsquellen mit Messplätzen

## 2 Aufgabenstellung

Das Strahlprofil der Strahlführung P04 an PETRAIII am DESY Standort Hamburg weist ein Spektrum mit einer Photonenenergie im Bereich von 250 eV bis zu 3'000 eV (ca. 5 nm – 0.4 nm) auf. Weiterhin ist der Strahl auch bezüglich seiner Geometrie sehr variabel, da er von einem linearen Polarisationsmodus stufenlos in einen zirkularen verstellt werden kann.

Je nach der gewünschten Photonenenergie und der Polarisation hat der Strahl Abmessungen im mm Bereich bis hin zu kleinen Strukturen im 100  $\mu\text{m}$  Bereich, die mit einer Genauigkeit, insbesondere in der Lage, von besser als 10  $\mu\text{m}$  x 10  $\mu\text{m}$  vermessen werden sollen.

Der Nutzer soll mithilfe des Strahlprofilmonitors RGXBPM den Strahlverlauf des Spots während seiner Messreihen live nachverfolgen bzw. zurückverfolgen können.

Die Strahlmittelpunktlage und Spotgröße mit der vom Anwender gewünschten und durch den Undulator eingestellten Photonenenergie ist jedoch in der aktuellen Realisierung des Systems auf der Strahlabbildung nur schwer zu identifizieren und das Profil ist nicht eindeutig ableitbar. Anstatt eines schmalen Strahlverlaufs ist auf der Abbildung die gesamte Breite des aus dem Kollimator stammenden Strahls erkenntlich. Dieser Untergrund stellt ein grundsätzliches Problem dieser Art von Monitor, nicht nur an der Strahlführung P04 mit weichem Röntgenlicht, sondern auch an Strahlführungen im härteren Energiebereich dar.

Das Problem und die Ursache sind zu analysieren und auf der Grundlage geeigneter Tests Lösungsmöglichkeiten vorzuschlagen und abzuwägen. Ein zur Verfügung gestellter RGXBPM ist geeignet in Betrieb zu nehmen, die Funktionstüchtigkeit herzustellen sowie zu überprüfen.

### 3 Theorie

Dieses Kapitel zeigt die theoretischen Grundlagen zur Erzeugung der Röntgenstrahlung und der Vorgänge im RGXBPM.

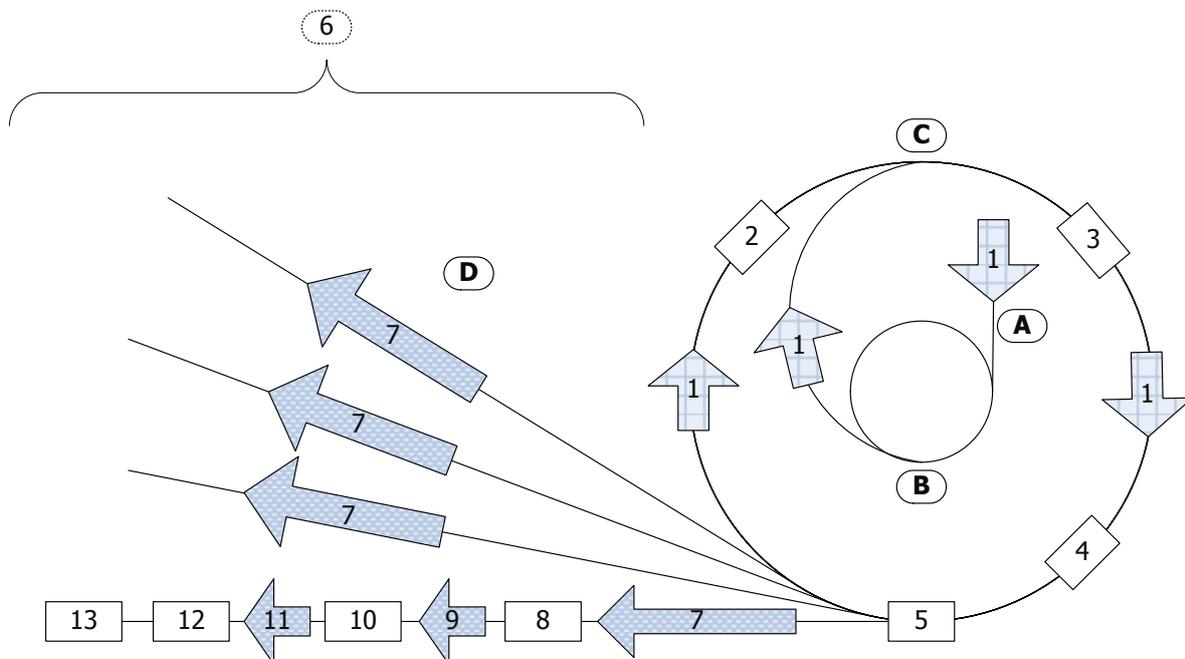
Vorerst die Definition von Röntgenstrahlung.

#### Röntgenstrahlung

„Es ist die Bezeichnung elektromagnetische Strahlung mit kleinerer Wellenlänge als der von optisch sichtbarer Strahlung (Licht). Sie unterscheidet sich von anderer kurzweiliger Strahlung, wie z.B. der Gammastrahlung, nur durch die Art ihrer Entstehung, nicht aber ihrer physikalischen Wirkung. Sie hat ein hohes Ionisations- sowie Durchdringungsvermögen. Sie entsteht durch Ablenkung von Elektronen im elektrischen Feld oder durch Wechsel von Elektronen aus einem energetisch höheren in einen energetisch niedrigeren Zustand. Durch Ablenkung entstandene Strahlung wird Bremsstrahlung genannt und weist ein breiteres Spektrum auf. Das Spektrum und die Polarisationsrichtung der Strahlung kann unter anderem durch unterschiedlich starke Ablenkung verändert werden“ [6].

### 3.1 Entstehung, Führung und Nutzung der Röntgenstrahlung

Der Weg von der Teilchenbeschleunigung über die Erzeugung der Röntgenstrahlung bis hin zu deren Nutzung am Messplatz durch die unterschiedlichen Anlagen lässt sich nach Abbildung 2 schematisch darstellen.



**Abbildung 2: Schematischer Ablauf der Entstehung, Führung & Nutzung der Röntgenstrahlung**

Legende:

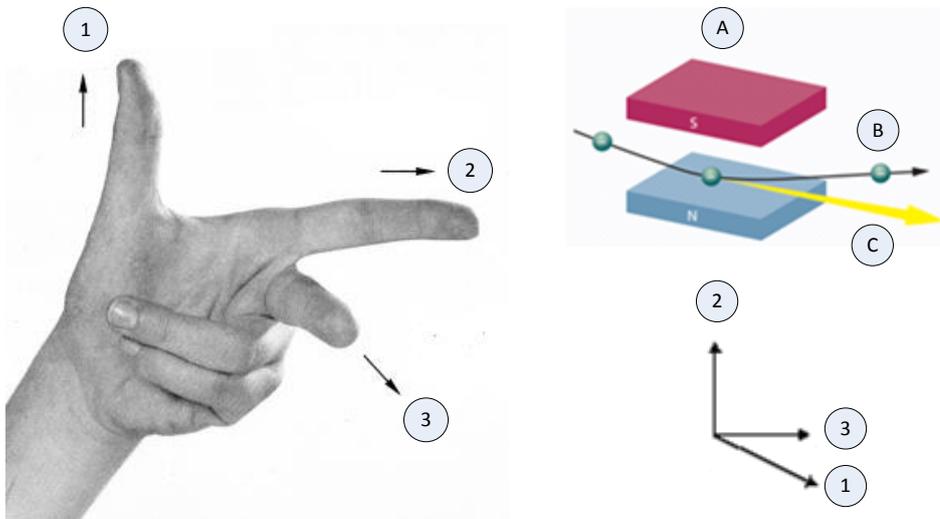
- |    |          |  |
|----|----------|--|
| A) | LINACII  | (Linearbeschleuniger)                      |
| B) | DESYII   | (Ringbeschleuniger)                        |
| C) | PETRA    | (Speicherring)                             |
| D) | PETRAIII | (Röntgenstrahlungsquellen mit Messplätzen) |
- 
- 01) Elektronenflugbahn
  - 02) Beschleunigungskavitäten
  - 03) Fokussierungskavitäten
  - 04) Ablenkmagnete bzw. Biegemagnete
  - 05) Undulator
  - 06) 14 Beamlines bzw. Röntgenstrahlführungen (in Abbildung nur vier gezeichnet)
  - 07) Röntgenstrahlung bzw. Synchrotronlicht
  - 08) Doppelkristallmonochromator
  - 09) Röntgenstrahl mit definierter Energie und geringer Bandbreite
  - 10) Kollimator
  - 11) Fokussierter Röntgenstrahl
  - 12) Strahlpositions- und Strahlprofilmessung
  - 13) Messplatz

Im Linearbeschleuniger werden Elektronen erzeugt und beschleunigt. Der Ringbeschleuniger erhöht die Elektronengeschwindigkeit weiter auf nahezu Lichtgeschwindigkeit und gibt die Elektronen dann an den Speicherring ab. Im Speicherring werden sie lediglich auf konstanter Geschwindigkeit gehalten. Die Beschleunigungskavitäten erhöhen bzw. halten die Geschwindigkeit der Elektronen in den Beschleunigern und im Speicherring, während Fokussierungskavitäten die Elektronen in der Mitte der Strahlführungen bündeln. Eine große Anzahl Ablenkmagnete zwingt schließlich die Elektronen auf eine Kreisbahn bzw. generell in eine bestimmte Richtung (nach [6]).

Die Ablenkung der Elektronen sowie das Entstehen von Röntgenstrahlung resultiert aus dem Wirken der Lorentz-Kraft, die sich mit der Linke-Hand-Regel veranschaulichen lässt.

Abbildung 3 zeigt die Entstehung und Wirkung dieser Kraft im Teilchenbeschleuniger.

Die Richtung der Röntgenstrahlung ist die, in die Elektronen ohne Ablenkung getragen worden wären (nach [6]).

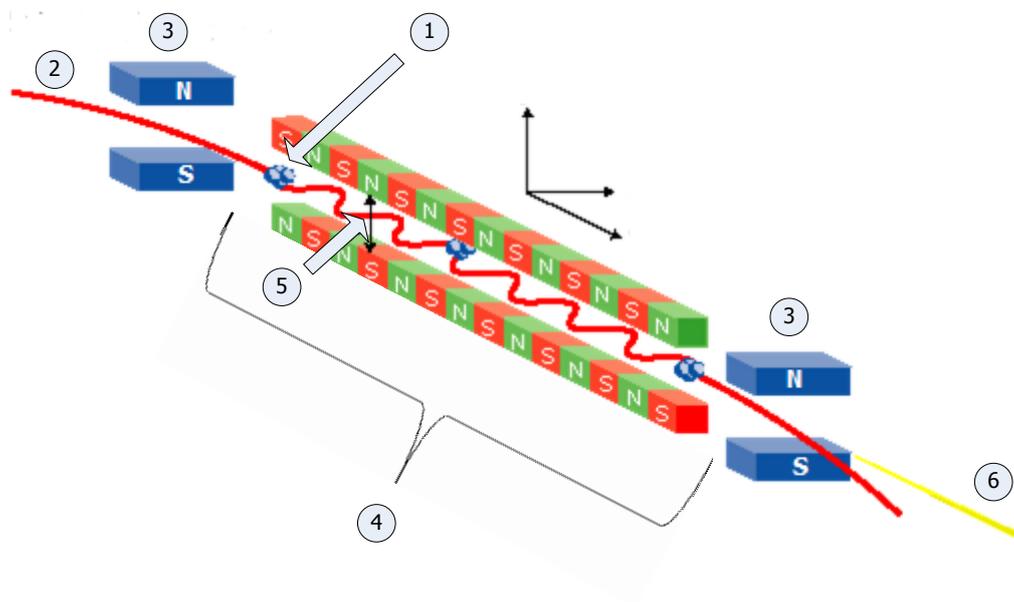


**Abbildung 3: Lorentz-Kraft (nach [4], [8], [9])**

Legende:

- 1) Elektronenbewegung und Richtung der Röntgenstrahlung  
(physikalische Stromrichtung von – nach +; Ursache der Kraftentstehung)
  - 2) Richtung der Magnetfeldlinien (von N nach S)
  - 3) Richtung der Lorentz-Kraft (Ablenkung der Elektronen in diese Richtung)
- 
- A) Magnetpaar
  - B) Elektronen auf ihrer Flugbahn im Speicherring
  - C) Röntgenstrahlung

Undulatoren sind eng aufeinander folgende lineare Magnetanordnungen im Speicherring PETRA, in denen die hochintensive Röntgenstrahlung erzeugt wird (siehe Abbildung 4).



**Abbildung 4: Entstehung der Röntgenstrahlung (nach [9])**

Legende:

- 1) Elektronen
- 2) Flugbahn der Elektronen
- 3) Ablenkmagnete
- 4) Undulator
- 5) Abstand der Magnetanordnungen
- 6) Röntgenstrahlung

Die Wellenlänge der Röntgenstrahlung wird durch die Amplitude der Elektronenauslenkung bestimmt. Es ist also möglich eine bestimmte Wellenlänge einzustellen, indem der Abstand der Magnetanordnung variiert wird. Die so veränderte Stärke des Magnetfeldes beeinflusst die Lorentz-Kraft und damit die Amplitude der Elektronenauslenkung.

Vor dem Undulator lenkt ein Biegemagnet die Elektronen von der Kreisbahn auf eine geradlinige Richtung durch den Undulator. Ein weiterer Ablenkmagnet nach dem Undulator zwingt die Elektronen wieder auf die Kreisbahn. Dadurch entsteht auch Strahlung, die allerdings für die Mess- und Experimentierzwecke unerwünscht ist. Aus der Undulator-Ablenkmagnet-Anordnung kommt somit ein Strahl mit einem sehr breiten Spektrum. Lediglich das durch den Undulator erzeugte Spektrum ist erwünscht.

Der nach dem Undulator angeordnete Doppelkristallmonochromator hat die Aufgabe, nur ein sehr dünnes Spektrum passieren zu lassen, also Störstrahlung herauszufiltern.

Nach dem Monochromator wird in einem Kollimator der Strahl parallel ausgerichtet (unendlicher Fokus).

Die Strahlposition und das Profil des Strahls müssen nun so genau wie möglich mittels eines Messgerätes festgestellt werden, um Proben am Messplatz exakt auszurichten.

Zahlreiche verschiedenartige Messgeräte sind beim Betrieb von PETRA III im Einsatz. Eines von mehreren Messgeräten zur Bestimmung der Lage und des Profils des Photonenstrahls ist der Residual Gas X-Ray Beam Position Monitor (RGXBPM). Sein größter Vorteil ist, dass er den Photonenstrahl nicht beeinflusst und eine LIVE-Überwachung der Strahlposition sowie des Strahlprofils ermöglicht. Kein anderes Gerät kann diese Funktionen in einem Gerät vereinen. Dies macht ihn zu einem unverzichtbaren Werkzeug jeglicher Art der Strahldiagnostik.

## 3.2 Strahlparameter

Um den unterschiedlichen Anforderungen der Nutzer gerecht zu werden weist jede Strahlführung der PETRA III – Anlage andere Strahlparameter auf. P04 ist die sogenannte variable Polarisationsbeamline mit extrem ultravioletter Röntgenstrahlung (Variable Polarization XUV Beamline). Extrem ultraviolette Röntgenstrahlung bedeutet, dass die Wellenlänge der elektromagnetischen Welle im Bereich von 0.2 bis 100 nm liegt.

In nachfolgender Tabelle sind die speziellen Parameter aufgeführt, die dem Nutzer zur Verfügung stehen. Nicht alle genannten Parameter sind relevant bezüglich der Aufgabenstellung, sind allerdings dennoch wichtig zur Strahlcharakterisierung. Die Parameter werden im Anschluss erläutert.

**Tabelle 1: Strahlparameter**

<b>Parameter</b>	<b>Kennwerte [Einheit]</b>
<b>Photonenenergie-Bandbreite</b>	<b>250 bis 3000 [eV]</b> (5 bis 0.4 [nm])
Energieauflösung ( <b>Varianz</b> einer eingestellten Photonenenergie von 1 [keV] (1.2 [nm]))	100 [eV] ( <b>10 [%]</b> )
<b>Photonenfluss im Spot</b>	<b>10E+13 [photons / second]</b>
<b>mögliche Probegröße</b>	<b>5 * 2 [mm<sup>2</sup>]</b> <b>bis zu</b> <b>10 * 10 [µm<sup>2</sup>]</b>
<b>Brillanz</b>	<b>10E+20</b> <b>[photons / ( s * mm<sup>2</sup> * mrad<sup>2</sup> * 0.1% bw * 100 mA)]</b>
<b>mögliche Probentypen</b>	<b>fester</b> oder <b>gasförmiger</b> Aggregatzustand (UHV-kompatibel)
mögliche <b>Polarisationsmodi</b> (Definition siehe Glossar)	von <b>linear</b> (horizontal/vertikal) stufenlos bis zu <b>zirkular</b> einstellbar
<b>Bunchabstand</b>	<b>128 oder 192 [ns]</b>
<b>Bunchlänge</b>	<b>95 bis 110 [ps]</b>

Die Photonenenergie-Bandbreite beschreibt in welchem Energie- bzw. Wellenlängenbereich der Photonenstrahl durch Variation der Undulator-Parameter (z.B.: Abstand der Magnete) variiert werden kann. Der Anwender bestimmt welche Energie eingestellt wird. Die Varianz sagt aus, wie stark die reale Energie (Istwert) von der vorgegebenen (Sollwert) abweichen kann. Dies hat der Anwender zu berücksichtigen. Der Photonenfluss im Spot beschreibt die Anzahl der Photonen, die in einer Sekunde auf der Probenfläche auftreffen. Der Photonenfluss ist auch mit der Definition der Strahlintensität vergleichbar. Die Spotgröße ist der Bereich, in der der genannte Photonenfluss auf die Probe auftrifft. Die Brillanz ähnelt von der Definition her ebenfalls stark der Strahlintensität, also der Stärke des Strahls. Allerdings wird in der Brillanz auch die spektrale Verteilung der Strahlung berücksichtigt. Die exakte Definition ist im folgenden Kapitel 3.2.1 zu finden. Der Polarisationsmodus stellt die Art der elektromagnetischen Lichtwelle dar. Hier ist die Definition in Kapitel 3.2.2 zu finden. Der Bunchabstand beschreibt die Distanz zwischen zwei Photonenimpulsen bzw. –paketen. Der Strahl weist somit keine kontinuierliche Charakteristik auf. Die Bunchlänge stellt die zeitliche Dauer des Impulses dar. Der Strahl hat je nach Polarisationsrichtung Abmessungen im mm Bereich bis hin zu kleinen Strukturen im 100 µm Bereich. Der Strahl hat Abmessungen von beispielweise 5x5mm. Im Strahl ist der 1x1 mm<sup>2</sup> große Spot mit der speziellen Wellenlänge. Die exakte Position des hochintensiven Spots des Strahls ist unbekannt.

### 3.2.1 Brillanz:

„Für röntgenoptische Abbildungen ist neben der gesamten emittierten Leistung die räumliche und spektrale Verteilung der emittierten Strahlung wichtig. Diese Eigenschaften werden in der Größe spektrale Brillanz  $B$  berücksichtigt. Darunter versteht man die Zahl  $N$  der emittierten Photonen geteilt durch die Zeit  $t$ , bezogen auf den Raumwinkel  $d\Omega$ , in den Strahlung emittiert wird., bezogen auf die relative Bandbreite  $d\lambda/\lambda$ , d.h.

$$B = \frac{N/t}{d\Omega * dF * (d\lambda/\lambda)}$$

Die größte spektrale Brillanz aller Röntgenquellen haben z.Zt. Synchrotronstrahlungsquellen, insbesondere Wiggler und Undulatoren“ [1].

### 3.2.2 Polarisationsmodi:

Der Polarisationsmodus beschreibt die Art des Verlaufs der elektromagnetischen Welle im Raum. Linear polarisiert bedeutet, dass die Lichtwelle nur in einer Ebene schwingt. Zirkular polarisiert bedeutet, dass das Licht in zwei Ebenen schwingt und bezüglich der Schwingungsebene eine Kreisform zeigt (siehe Abbildung 5). Die grünen, roten und lila markierten Linien zeigen die Projektion der Welle auf die jeweilige Ebene. Die Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle wird Schwingungsebene genannt [nach 23].

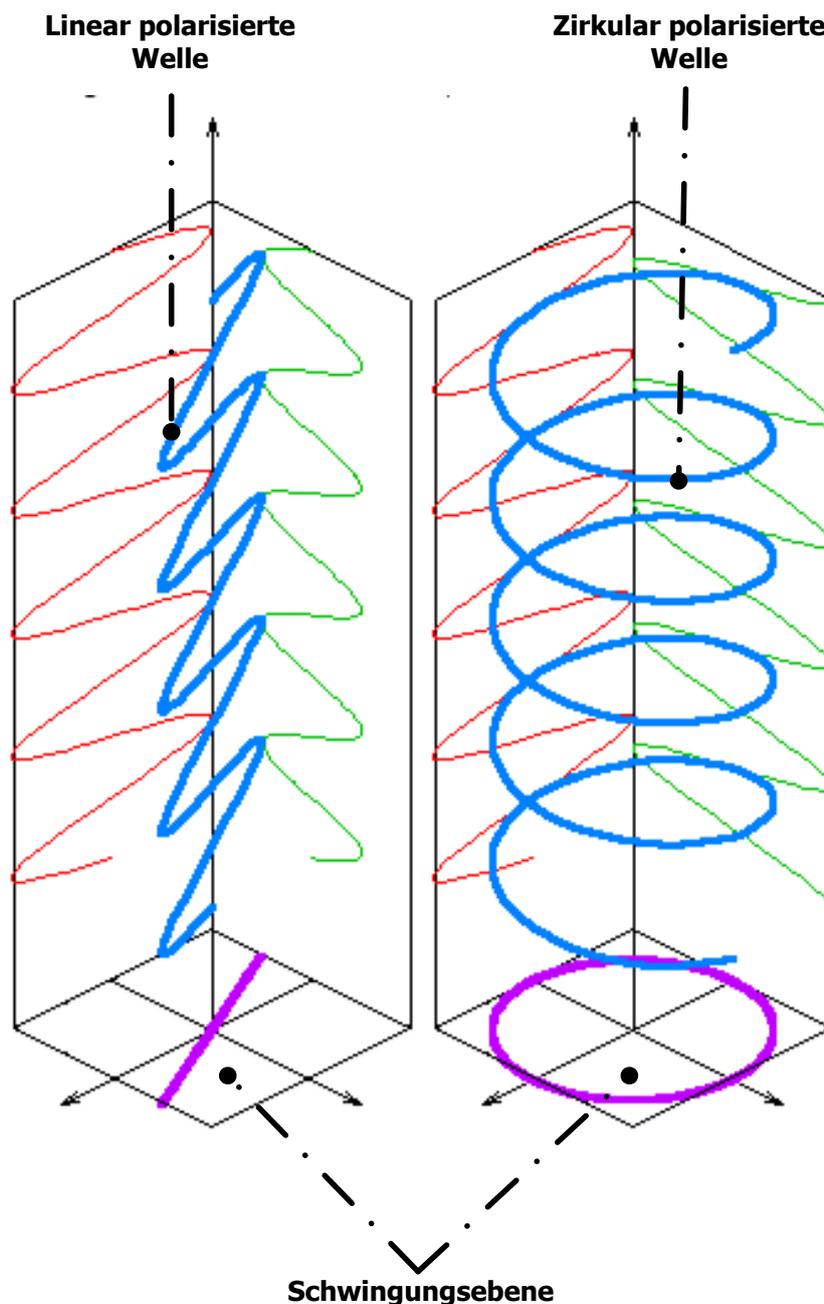


Abbildung 5: Polarisationsmodi [nach 22]

### 3.3 Photoionisation

Die Photoionisation ist ein physikalischer Prozess, bei dem ein Photon auf ein Atom, Ion oder Molekül trifft und dabei ein Elektron herausgeschlagen wird. Dieses Elektron wird Photoelektron genannt. Dieser Vorgang ist die Grundlage der Funktionsweise des BPM.

Die Anzahl der Elektronen, die aus der Hülle herausgeschlagen werden, hängt von der Intensität und der Wellenlänge der einfallenden Strahlung ab. Abbildung 6 veranschaulicht den Wirkungsquerschnitt. Zum besseren Verständnis wird vorerst der Begriff definiert.

#### **Wirkungsquerschnitt**

„Der Begriff stammt aus der Atom-, Kern- und Elementarphysik. Das Formelzeichen lautet  $\sigma$ . Bei Stoßprozessen gibt er ein Maß für die Wahrscheinlichkeit der Wechselwirkung von Teilchen einer Sorte A mit Teilchen einer Sorte B, d.h. für die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines bestimmten Ergebnisses (z.B. Anregung und Aktivierung von Atomen oder Kernen, Einfangprozessen Streuung von Teilchen in eine bestimmte Richtung, Erzeugung bestimmter Reaktionsprodukte) an. Der im Allgemeinen von der aufgenommen und abgegebenen Energie abhängige Wirkungsquerschnitt ist definiert als der Quotient der Zahl der Prozesse, die während einer bestimmten Zeit erfolgen, durch die Zahl der Teilchen, die je Flächeneinheit während dieser Zeit einfallen. Anschaulich geometrisch entspricht der Wirkungsquerschnitt einer Fläche, die z.B. ein Teilchen der Sorte A dem einfallenden Strom der Teilchen B senkrecht entgegenstellen müsste, um mit der gleichen Wahrscheinlichkeit getroffen zu werden, mit der der betreffende Prozess erfolgt.

Je nach Art der Prozesse wird zwischen Ionisations-, Reaktions-, Absorptions-, Stoß-, Streu- und Spaltquerschnitt usw. unterschieden. Dabei gibt ein totaler Wirkungsquerschnitt die Häufigkeit der in einem bestimmten Raumwinkelbereich gestreuten Teilchen an. Als totaler Wirkungsquerschnitt wird auch die Summe der zu verschiedenen Prozessen bzw. Reaktionskanälen gehörenden partiellen Wirkungsquerschnitte bezeichnet, z.B. als totaler Streuquerschnitt die Summe aus elastischem und unelastischem Streuquerschnitt. Der totale Wirkungsquerschnitt von Kernen, Molekülen oder Atomen liegt meist in der Größenordnung ihrer geometrischen Querschnitte (etwa  $10^{-22} \text{ m}^2 = 1 \text{ Mb}$  bei Kernen, etwa  $10^{-15} \text{ cm}^2$  bei Atomen). Er kann jedoch (z.B. wegen konkurrierender Prozesse) sehr viel kleiner oder (z.B. wegen Resonanzwechselwirkung) sehr viel größer sein“ [31].

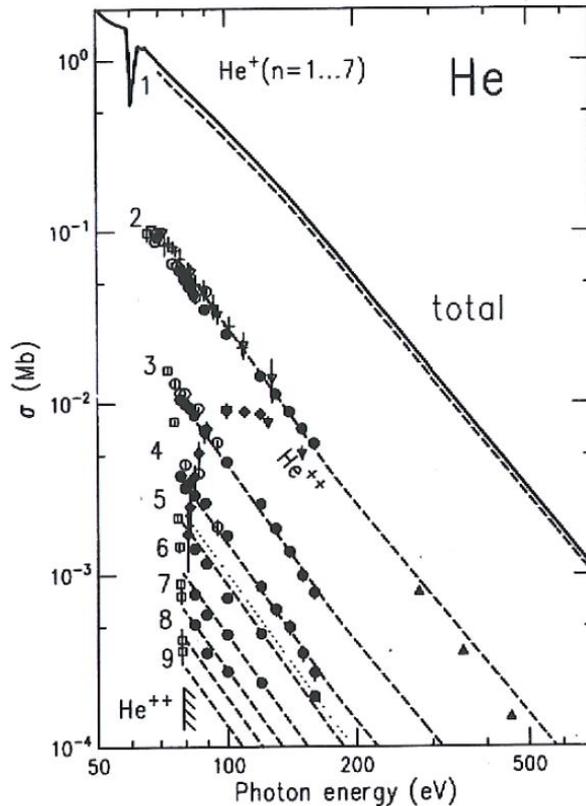


FIGURE 5. Partial cross sections for the different photoionization channels of He in a double logarithmic representation. The dashed lines are extrapolations of the measured data by exponential power laws, the dotted line is an analogue, quantum-defect-based extrapolation of the satellite intensity  $\sigma_n$  for all  $n > 8$ . The shaded line represents the adopted double ionization cross section, the solid line the total cross section of Ref. 45 and the dashed dotted line is the 1s partial cross section derived from these data. Experimental data points are taken from the following references:  $\bullet$ , Ref. 46 and unpublished results from the authors;  $\nabla$ , Ref. 47;  $\circ$ , Ref. 48;  $\square$ , Ref. 41;  $\nabla$ , Ref. 49;  $+$ , Ref. 50;  $\diamond$ , Ref. 40;  $\blacktriangle$ , Ref. 51.

### Abbildung 6: Wirkungsquerschnitt von Helium bei unterschiedlichen Wellenlängen [29]

In diesem Falle handelt es sich um einen Stoßprozess. Die Photonen schlagen die Elektronen aus der Atomhülle. Der Prozess ist von der Energie der Photonen abhängig.

Es ist erkennbar, dass mit größerer Wellenlänge die Ionisationsrate steigt. Somit erzeugt hochenergetische Strahlung weniger Elektronen bzw. Ionen als niederenergetische. Beispielsweise ist die Wahrscheinlichkeit, bei der eine bestimmte Anzahl Atome ionisiert werden bei 500 eV ( $\sigma \approx 1,5 \cdot 10^{-2}$ ) um den Faktor 10 geringer als bei 200 eV ( $\sigma \approx 1,5 \cdot 10^{-1}$ ). Die Abbildung gibt keine Aussage zur exakten Anzahl der ionisierten Atome. Sie ist unter anderem auch von der Restgasdichte, bzw. dem vorherrschenden Druck im Strahlrohr abhängig. Die zahlenmäßige Verteilung ist hierbei nicht von Belang. Die Verteilung (nicht die wertmäßige Verteilung) ist speziell bei der Strahlabbildung mit einem Phosphorschirm von Bedeutung, da niederenergetische Strahlung die hochenergetische überdeckt. Aus diesem Grunde ist am Messplatz P4 kein Strahlabbild zu erkennen. Der schmale hochenergetische Spot geht im Strahl unter. Ein Unterschied ist auf der Abbildung des Strahls auf dem Phosphorschirm nicht mehr zu erkennen.

### 3.4 FEM-Simulation

Es gilt unter anderem herauszufinden, welche elektrischen Potentiale angelegt werden sollen. Die elektrischen Potentiale bestimmen auch welche Partikelart zur Strahldetektion verwendet wird. Je nach Potentialgefälle werden positiv geladene Ionen oder negativ geladene Elektronen zur Mikro-Kanal-Platte (MCP) transportiert. Zur Bestimmung ihrer Flugbahn und der Optimierung der Homogenität des Feldes kann eine Simulationsrechnung durchgeführt werden. Der Simulation liegt die Finite-Elemente-Methode zugrunde.

„Die Finite-Elemente-Methode ist ein computergestütztes numerisches Verfahren zur Ermittlung von Verformungen, elektrischen Spannungen, Drehungen und anderen physikalischen Auswirkungen an komplizierten, analytisch nicht berechenbar belasteten Bauteilen. Hierbei wird das Bauteil gedanklich durch ein idealisiertes Modell aus einer endlichen Anzahl Elemente ersetzt. Das bedeutet, dass das komplexe, nicht berechenbare Modell durch viele einfache Bauelemente, deren Verhalten mathematisch formulierbar ist, ausgetauscht wird. Durch diese Aufgliederung komplexer Bauteile in einfache Bauteile wird die Berechnung ermöglicht. Sie stellt allerdings nur eine Näherung dar. Das Verfahren wird heute im gesamten ingenieurtechnischen Bereich eingesetzt“ [24].

Das Programm „ANSYS“ ermöglicht die Simulation des elektrischen Feldes beliebig komplexer Baugruppen. Ebenfalls ist es möglich, den Partikelflug aufgrund der Wirkung des elektrischen Feldes bei unterschiedlichen Positionen des Strahls zu bestimmen.

Für die Simulation des elektrischen Feldes ist die „Workbench-Oberfläche“ des Programms ANSYS nutzbar. Die Bestimmung der Flugbahn erfordert die Verwendung der primär quelltextbasierten und deutlich komplexer aufgebauten „ANSYS-Classic-Oberfläche“. Eine Simulation des Partikelfluges ermöglicht die rekursive Interpolation der Strahlposition aufgrund von Simulationsergebnissen.

Die durchzuführende Simulation gliedert sich somit in zwei Schritte.

1. Findung des optimalen Potentialverhältnisses
2. Bestimmung und Analyse der Flugbahn der Partikel

## 4 Gerätebeschreibung des RGXBPM

Zum Verständnis der Aufgabenstellung wird der aktuell eingesetzte Beam Position Monitor (BPM) zunächst bezüglich seines Aufbaus und der Funktionsweise analysiert.

### 4.1 Aufbau & Funktionsweise

Der BPM besteht im Wesentlichen aus den in Abbildung 7 dargestellten Elementen. Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen reale Ansichten der eingesetzten Baugruppe.

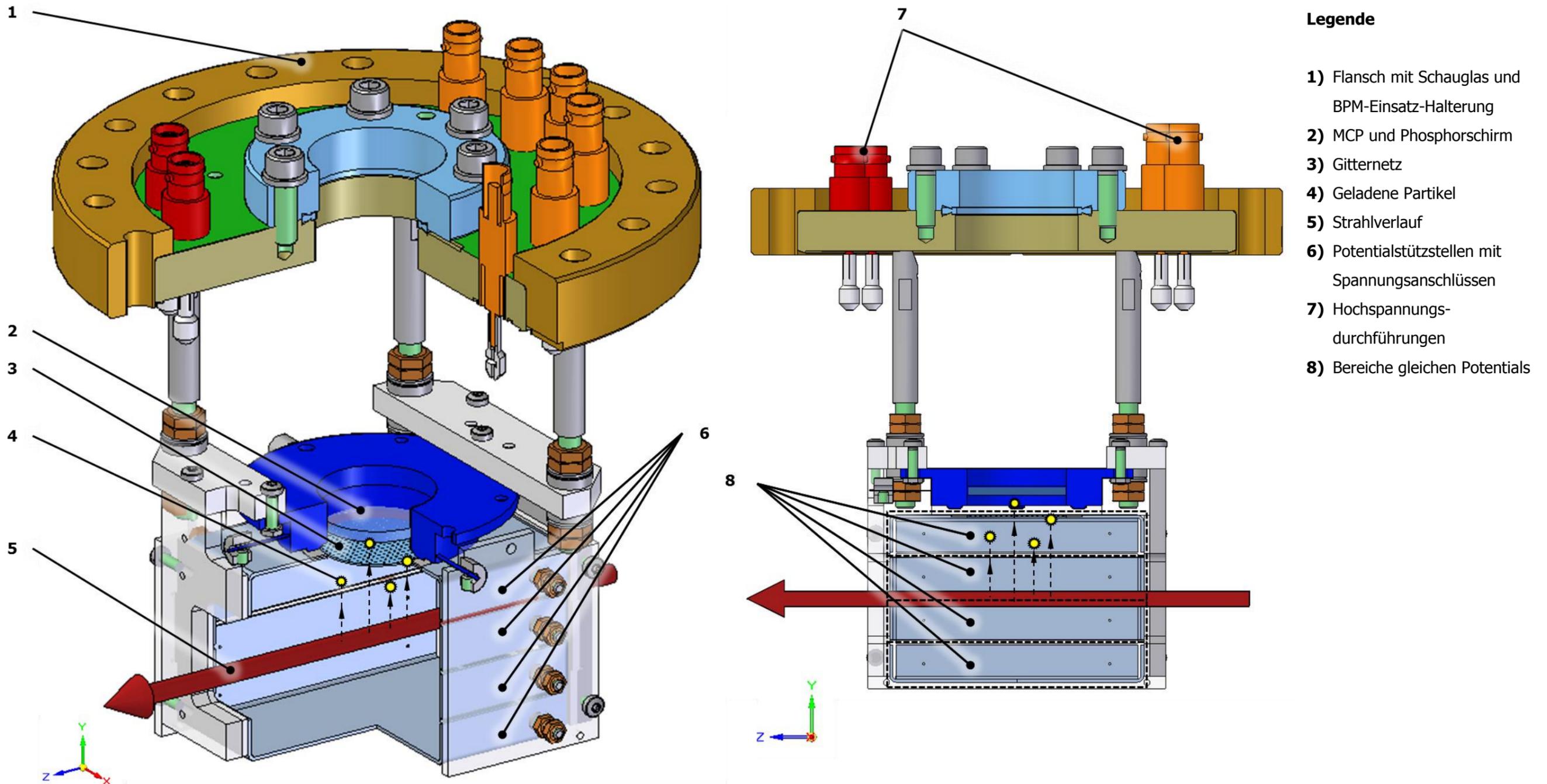


Abbildung 7: Aufbau und Funktionsweise des RGXBPM

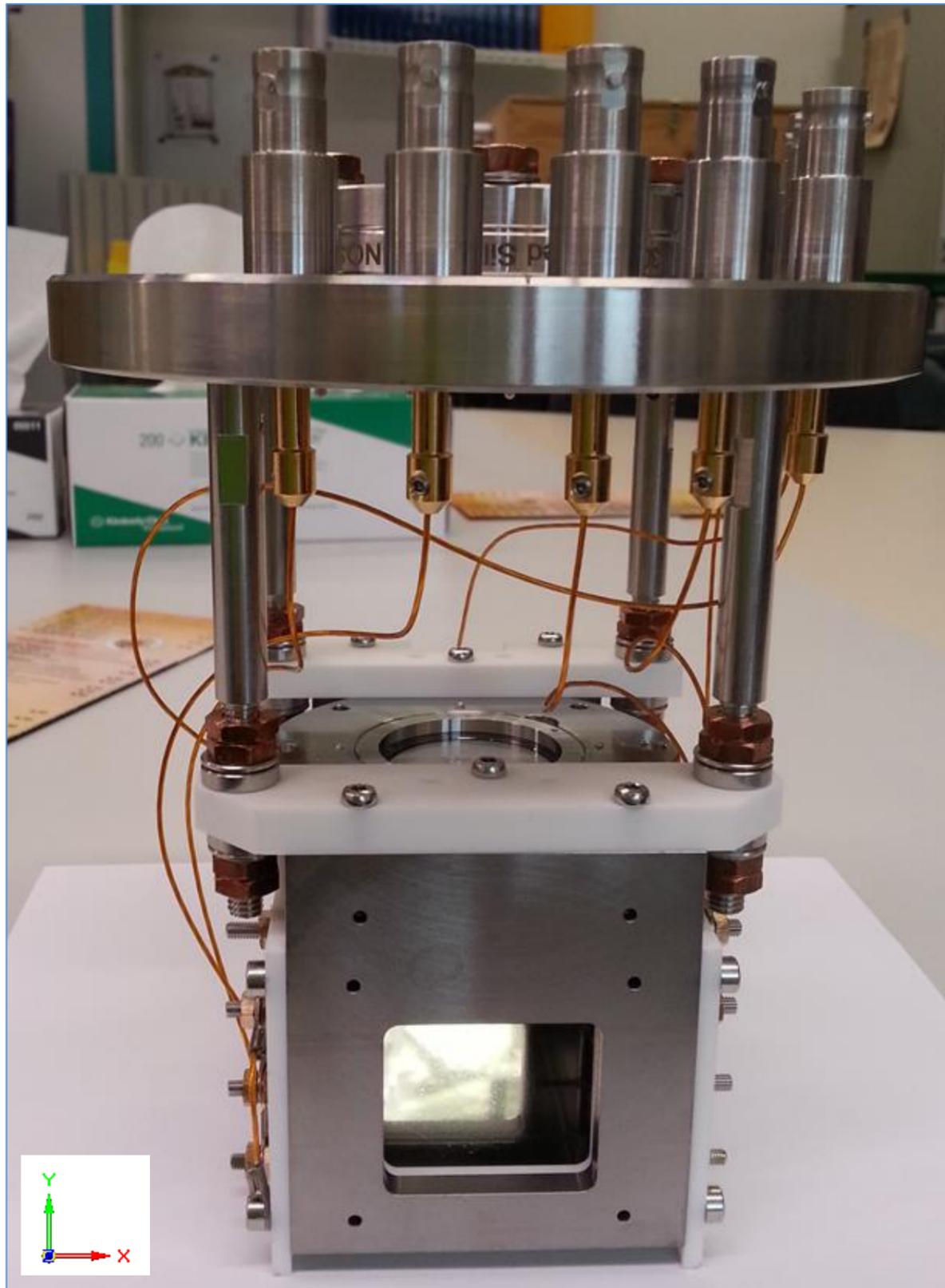


Abbildung 8: Vorderansicht des BPM-Einsatzes

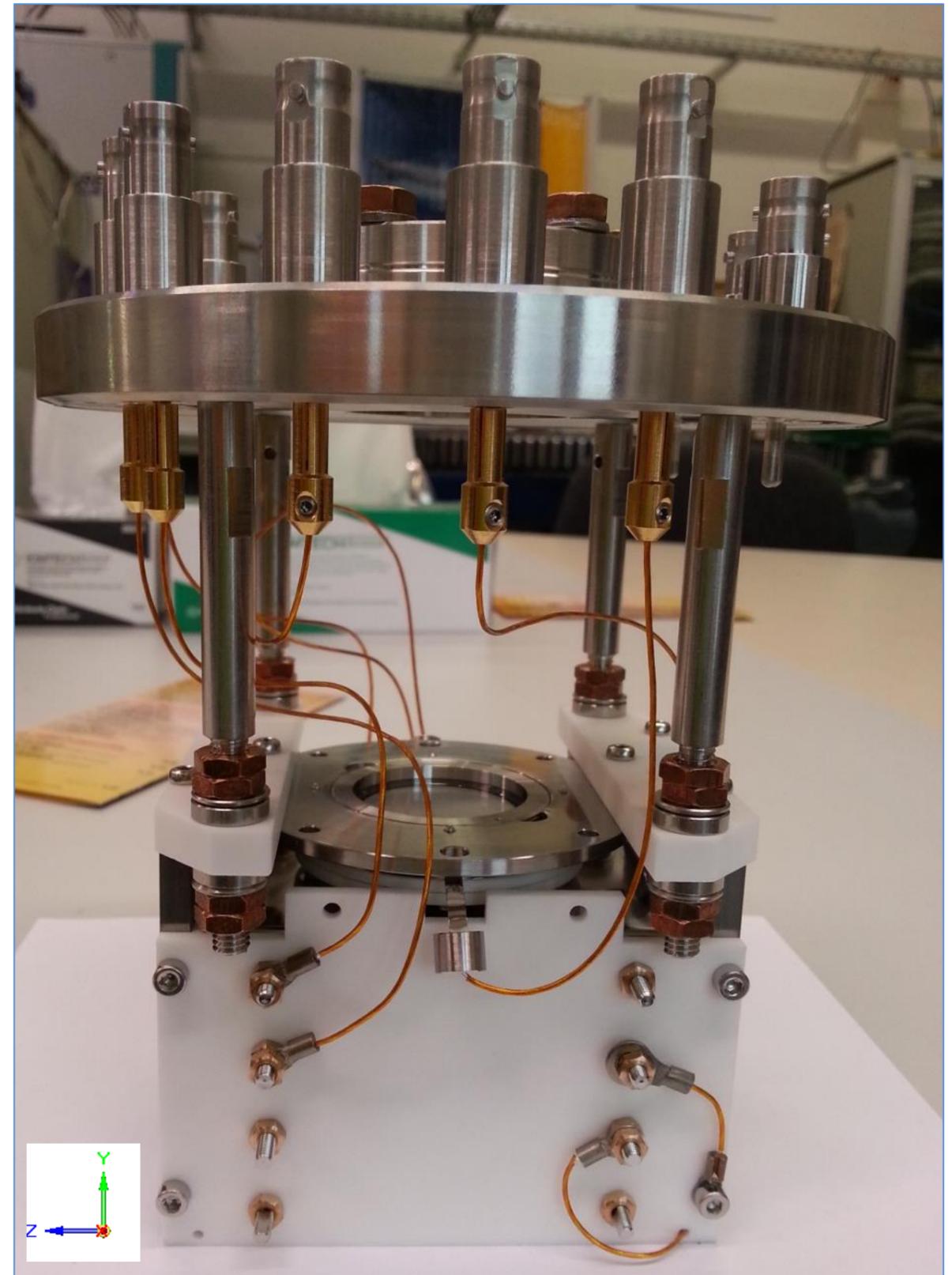


Abbildung 9: Seitenansicht des BPM-Einsatzes

Beim Betrieb im Beschleuniger befindet sich der BPM-Einsatz in einem Stahlcontainer, der durch Flansche mit dem Strahlrohr verbunden ist. Im Inneren des Strahlrohrs herrscht Ultrahochvakuum (Druck:  $10^{-12} \leq p \leq 10^{-7}$  mBar [12]). Im Ultrahochvakuum ist eine gewisse Anzahl an Atomen ( $10^4$  bis  $10^{12} \frac{\text{parts}}{\text{cm}^3}$  [13]) noch vorhanden. Hierbei handelt es sich um sogenannte Restgase.

Eine grundlegende Voraussetzung für eine hohe Genauigkeit des Messgerätes ist ein starres, äußerst homogenes elektrisches Feld. Dies wird durch unterschiedliches elektrisches Potential an den Potentialstützstellen erreicht (siehe Abbildung 7). Die Potentialstützstellen, die auf einer Höhe liegen, stellen einen Bereich gleichen Potentials dar. Es sind Hochspannungsdurchführungen notwendig, um von außerhalb der Baugruppe Spannungen an die Stützstellen im Gehäuse anlegen zu können.

Trifft der Strahl des Lasers auf ein Restgasatom werden Elektronen aus der Atomhülle schlagartig ausgetragen. Die Elektronen sind negativ geladen und werden in Richtung eines positiven bzw. höheren Potentials eines elektrischen Feld transportiert. Durch das Fehlen der Elektronen sind die Atome nun positiv geladen und werden in Richtung des negativen bzw. niedrigeren Potentials getragen. Die Wirkung des elektrischen Feldes ist so gerichtet, dass die beschleunigten Ionen (geladene Atome) gradlinig auf die Mikrokanalplatte treffen.

Die Mikrokanalplatte (MCP) fungiert als Signalverstärker. An ihr muss ebenfalls ein Potential angelegt werden, um diese Funktion zu erfüllen [11]. Durch das Auftreffen der Ionen auf die Wandungen der Mikrokanäle werden Elektronen freigesetzt und beschleunigt. Sie werden Sekundärelektronen genannt (siehe Abbildung 11 und Abbildung 10).

Auftreffende Elektronen würden ebenfalls Sekundärelektronen freisetzen.

Aktuell werden Ionen genutzt. Eine Strahlabbildung mittels Elektronen wurde nicht untersucht.

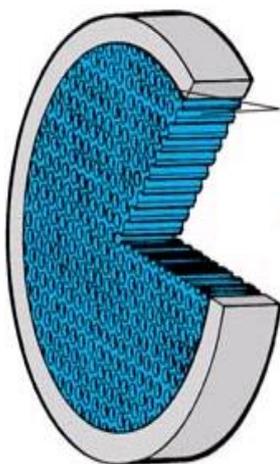


Abbildung 11: Aufbau eines MCP [14]

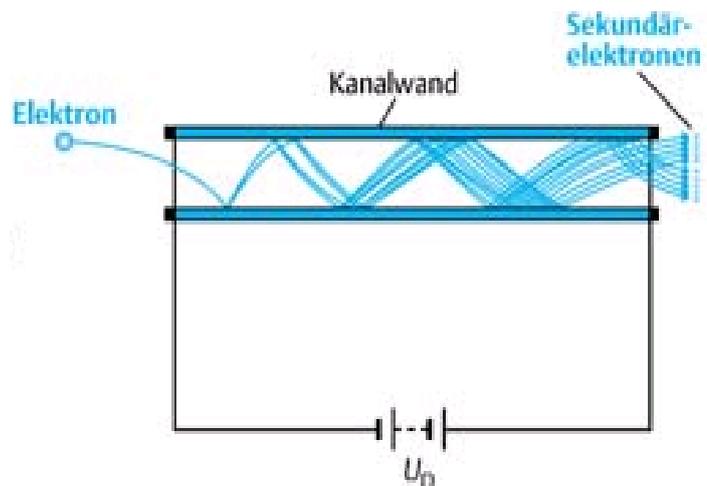
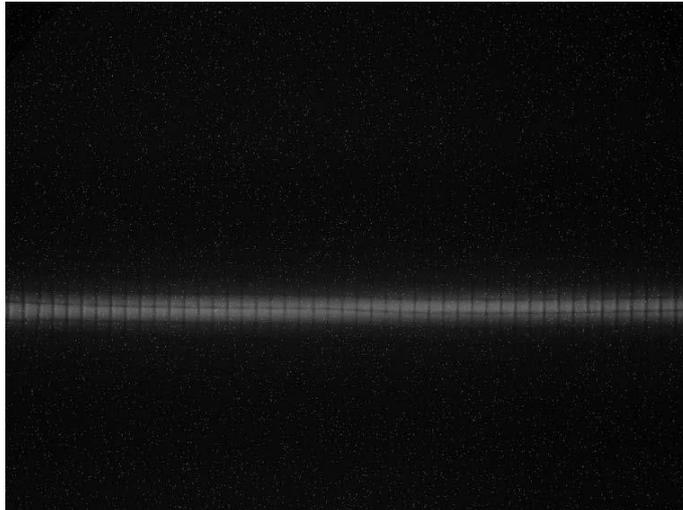


Abbildung 10: Funktionsweise eines MCP [15]

## 4.2 Messmethode & Ermittlung der Strahlposition

Die Sekundärelektronen treffen auf einen hinter der Mikrokanalplatte liegenden Phosphorschirm, der je nach Anzahl der auftreffenden Elektronen unterschiedlich intensiv leuchtet [10]. Die Abbildung des Strahls befindet sich demzufolge dort, wo die Lichtintensität auf dem Schirm am höchsten ist. Dieses Bild wird mittels einer hochauflösenden Kamera aufgenommen und digitalisiert. So kann jederzeit die aktuelle Strahlposition angezeigt und mittels Auswerteprogrammen bestimmt werden (siehe Abbildung 12). Diese Programme bestimmen die Mittelpunkt Lage des Strahls anhand des Bereichs mit der höchsten Lichtintensität.

Darüber hinaus kann aus der Breite und Intensität der Abbildung das Strahlprofil ermittelt werden. Die Schattierung des Strahlbildes in Abbildung 12 ist Folge der Maschenstruktur des Gitternetzes.



**Abbildung 12: Strahlabbild auf dem Phosphorschirm [18]**

Wie bereits erwähnt ist das elektrische Feld im BPM starr und daher werden die Ionen nur in eine Richtung transportiert. Somit können die Strahlposition und das Strahlprofil nur in einer Projektion bestimmt werden. Für die dreidimensionale Bestimmung der Position des Strahls muss ein zweites, um  $90^\circ$  gedrehtes Gerät verwendet werden. Somit bestimmt jeweils ein Gerät die horizontale oder die vertikale Position.

## 5 Anforderungsliste

Ausgehend der Aufgabenstellung wurde eine Anforderungsliste entwickelt und mit dem Leiter der PETRAIII Beamline Technology Grupp, Herrn Dr. Horst Schulte-Schrepping, abgestimmt sowie auf Vollständigkeit und Richtigkeit überprüft.

### Legende

- F: Festforderungen – müssen erfüllt werden -> Müssen erfüllt werden  
 Z: Zielforderungen /Mindest- bzw. Höchstforderungen -> Sollten optimal erfüllt werden  
 W: Wünsche -> Sollten möglichst erfüllt werden  
 1: niedrig  
 2: mittel  
 3: hoch

**Tabelle 2: Anforderungsliste [nach 19, 20]**

Bearbeiter/-in: Herr Breede				Anforderungsliste		Projekt: RGXBPM @ P4	
						Datum: 25.08.2013	
						Version: V1.9	
Forderungsgruppen und Arten von Bedingungen	Lfd. Nr.	Art der Anforderung (Zielforderung, Festforderung, Wunschforderung)	Gewicht der Zielforderung (3 - sehr wichtig)	Beschreibung qualitativ	Beschreibung quantitativ	Quelle der Forderung	Sachunterlage, Referenz
Technisch-physikalische	1	F		Messung der Lage & des Profils des PETRA-Photonenstrahls an Beamline P4 nach dem Prinzip der Restgasdetektion	keine Neuentwicklung der Messmethode, sondern Anpassung des Messgerätes / Messaufbaus an die neuen Zielforderungen der Beamline P4	Martin Sachwitz	Diplomarbeit von André Hofmann; Veröffentlichungen, Präsentationen und CAD-Daten zum RGXBPM im Sharepoint des DESY
	2	F		Laserstrahl muss Gerät durch ein Loch passieren können ohne es zu berühren	Durchgangsloch: $\varnothing > 29$ mm	Martin Sachwitz	
	3	F		keine Spannungsüberschläge / Kurzschlüsse	Isolierung spannungsführender Teile; Durchschlagspannung beachten	Heiko Breede	
	4	F		bisheriges Gehäuse des BPM Einsatzes muss weiterverwendet werden	maximale Abmaße des BPM Einsatzes: $\varnothing 130$ mm x 146 mm im Gehäuses $\varnothing 180$ mm x 500 mm außerhalb Gehäuses	Horst Schulte-Schrepping	CAD-Daten zum RGXBPM im Sharepoint des DESY

	5	F		Verwendung vorhandener Hochspannungsversorgungsgeräte	Wiener MpodC crate Spannungsmodule: 3 x iseg EHS 8 60n (max. 6 x -6 kV) 1 x iseg EHS 8 060p (max. 2 x 6 kV)	Horst Schulte-Schrepping	
	7	W	3	Sichtbarmachung der Position und Intensitätsverteilung eines bestimmten Spektrums	Bandpass der Photonenenergie; Bandbreite: 250 eV > B > 3'000e V	Horst Schulte-Schrepping	
	8	W	2	höchstmögliche Messgenauigkeit bei der Lagebestimmung	$\sigma < 5 \mu\text{m}$ je BPM-Einsatz; Toleranzbreite: 10 $\mu\text{m}$ x 10 $\mu\text{m}$ bei Verwendung zweier um 90° zueinander gedrehten BPM-Einsätzen	Heiko Breede	
	9	W		optische Auslese	Verwendung eines Phosphorschirms zur Strahlparameterbestimmung /Strahlabbildung; Bildaufnahme durch eine Kamera	Horst Schulte-Schrepping	
	10	W		BPM-Einsatz sollte von einer Person zu tragen sein	m < 10 kg	Heiko Breede	
Menschbezogene	11	Z	2	Gerät muss so weit wie möglich leicht und selbstständig hausintern gewartet werden können	MCP und Phosphorschirm müssen institutsintern getauscht werden können	Heiko Breede	
Wirtschaftliche	12	W	1	Verwendung von Standardbauteilen	Kostenminimierung und einfache Wartbarkeit	Heiko Breede	
	13	W	1	nur unbedingt notwendige bauliche Veränderungen durchführen	Möglichst Weiterverwendung des BPM-Einsatzes; Bauteile hinzufügen oder Bauteile ersetzen wird angestrebt	Heiko Breede	CAD-Daten zum RGXBPM im Sharepoint des DESY
Termin	14	W	3	Problemlösung und Funktionstest bis Ende Juli 2013		Heiko Breede	
Normative	15	F		Verwendung UHV-tauglicher Werkstoffe; UHV-gerechte Konstruktion	geringe Sublimation, Lüftungsbohrungen für kurze Evakuierungszeiten	Alexander Donot	<i>DESY-Werksnorm</i> Vakuum_005_DESY_UHV_Richtlinien_1-5_final_stamp.pdf
	16	F		UHV sicherer Anschluss mittels Flansche	Verwendung von DESY-Standardflanschen	Alexander Donot	<i>DESY-Werksnorm</i> Vakuum_001_Flansche_Allgemein_1-3_stamp.pdf (dort weitere Verweise zugelassener Flansche)

	17	F		bisheriges Gehäuse für den BPM Einsatz muss weiterverwendet werden	CF130er Anschlussflansch		
	18	F		Vakuumsicheres Gehäuse	ortsfester, vakuum-isolierter Behälter $p < 1 \cdot 10^{-5}$ mbar		<i>Grundanforderungen</i> DIN EN 13458-1 <i>Bemessung, Herstellung, Prüfung</i> DIN EN 13458-2 DIN EN 13458-2 Berichtigung 1 <i>Betriebsanforderungen</i> DIN EN 13458-3
Sonstige	19	Z		Aufbau eines geeigneten Teststandes zur Überprüfung der Funktionstüchtigkeit entwickelter Lösungsprinzipie / Problemlösungsvorschläge		Horst Schulte-Schrepping	

## 6 Systemanalyse

Um eine Problemlösung vorzubereiten wird der BPM zunächst in seine Grundfunktion und Grundelemente, bzw. einzelne Bauelemente aufgeteilt, um die Komponenten unabhängig voneinander zu untersuchen. In Anlehnung an VDI 2222 folgt die abstrakte Darstellung des Gerätes und daraufhin dessen weitere Analyse. Diese Vorgehensweise lässt eine lösungsneutrale Herangehensweise an die Problemstellung zu und verhindert eine frühzeitige Festlegung auf ein bestimmtes Lösungsprinzip. Sämtliche Vorgänge innerhalb des BPM können unabhängig voneinander betrachtet werden. Dies schafft einen leichten Überblick selbst über komplexeste Abläufe. Auch die Strahlparameter werden analysiert, da sie Einfluss auf die Funktion des BPM haben.

### 6.1 Abstrakte Darstellung des Gesamtsystems

Die abstrakte Darstellung reduziert den BPM (Gesamtsystem) auf eine Black Box mit Ein- sowie Ausgängen in Form von Stoff, Energie oder Information. Die Funktionen aller Geräte und Apparate lassen sich mithilfe dieser drei allgemeinen Größen beschreiben.



**Abbildung 13: Abstrakte Darstellung des BPM**

Eingangsgrößen	Ausgangsgrößen
S - geladene Partikel (Elektronen, Ionen) E - elektrische Energie E - Photonenstrahl	I' - Strahlposition und Profil

Weiterhin sollte festgestellt werden, welche allgemeine Größe hauptsächlich im System umgesetzt werden und welche nur nebensächlich als Folge oder zur Erfüllung des Hauptumsatzes dienen.

Hauptumsatz:           Stoff  
Nebenumsatz:         Energie, Information

## 6.2 Finden der Gesamtfunktion

Nach Kenntnis der fundamentalen Vorgänge kann in mehreren Abstraktionsstufen die Gesamtfunktion des BPM festgestellt werden, die in sehr einfacher Art und Weise die Arbeitsweise des Gerätes beschreibt. Eine Funktion ist der abstrakt beschriebene Wirkzusammenhang zwischen Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsgrößen eines Systems zum Erfüllen einer Aufgabe.

1. Abstraktionsstufe: Strahlparameter messen
2. Abstraktionsstufe: Aus Stofffluss auf Strahlparameter schließen
3. Abstraktionsstufe: Stofffluss wandeln

Abstrakte Gesamtfunktion: Stofffluss wandeln

Die Gesamtfunktion des Gerätes lässt sich wie folgt als Blockschaltbild darstellen.



**Abbildung 14: Gesamtfunktion des BPM**

### 6.3 Funktionsstruktur und Ermittlung der Teilfunktionen

Mittels der nachfolgenden Funktionsstruktur in Abbildung 15 wird jedes Bauelement des BPM auf seine grundlegende Funktion, bzw. dessen Umsatz in Form von Stoff, Energie und Information reduziert. Auch dies dient einem lösungsneutralen Verständnis des Gerätes zur zielgerichteten Erfüllung der Anforderungen und Entwicklung von Lösungsprinzipien. Die primären Vorgänge vom Systemeingang (Photonenstrahl) zum Systemausgang (Strahlparameter) sind hervorgehoben. In der darauffolgenden Tabelle 3 sind die Vorgänge im BPM detailliert beschrieben. Der Weg der Abstrahierung von der speziellen Teilfunktion der Bauelemente (siehe auch Kapitel 4) zur allgemeinen Teilfunktion wird deutlich.

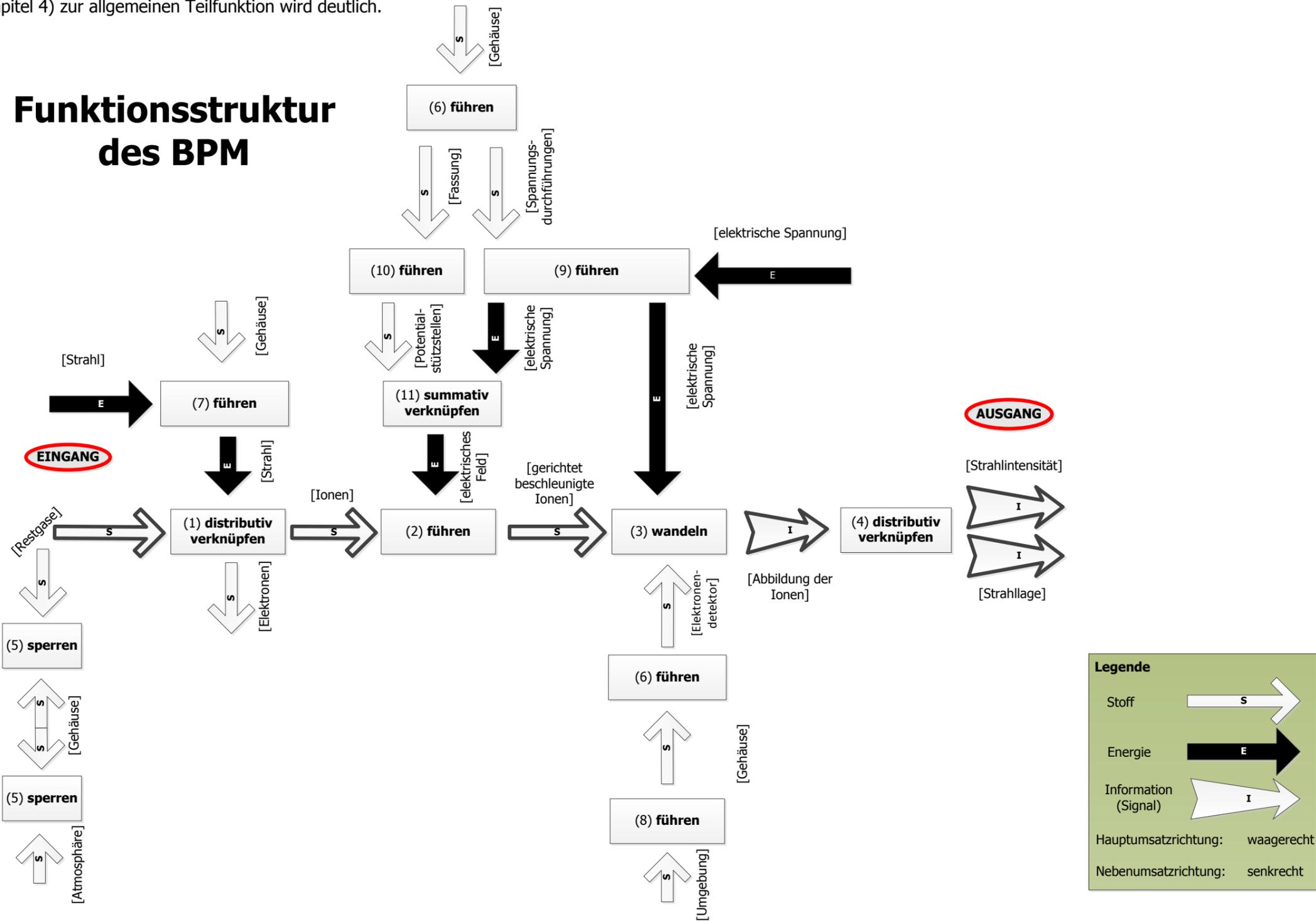


Abbildung 15: Funktionsstruktur des BPM

**Tabelle 3: Erläuterungen zur Funktionsstruktur**

<b>Nr.</b>	<b>Elemente</b>	<b>Aufgaben der Elemente</b>	<b>Spezielle Teilfunktionen</b>	<b>Allgemeine Teilfunktionen (TF)</b>
1	Restgase	Strahlposition finden	Restgasatome werden von Strahl ionisiert und Elektronen freigesetzt	Energie mit Stoff distributiv verknüpfen
2	elektrisches Feld	Ionen zum MCP tragen	Ionen werden vom elektrisches Feld zur MCP getragen	Stoff führen
3	Mikrokanalplatte (MCP)	Elektronen vervielfachen / Signal verstärken	Ionen schlagen auf Kanalwände der MCP, wodurch Sekundärelektronen freigesetzt werden; MCP benötigt Spannung zum Betrieb	Stoff wandeln
	Phosphorschirm	Partikelposition anzeigen	Elektronen treffen auf Phosphorschirm und Abbildung der Elektronen entsteht	
	Kamera	Partikelpositionen aufnehmen	analoge Abbildung in digitale wandeln, speichern und weiterleiten	
4	Software	Intensitätsverteilung bestimmen	digitale Abbildung auswerten; Strahlintensität und Strahlage bestimmen	Information distributiv verknüpfen
5	Gehäuse	Vakuum halten	Gehäuse sperrt Atmosphäre aus Gehäuse sperrt Restgase ein	Stoff sperren
6		Funktionselemente befestigen	Gehäuse befestigt Fassung Gehäuse befestigt Spannungsdurchführungen Gehäuse befestigt Mikrokanalplatte Gehäuse befestigt Schirm	Stoff führen
7		Strahl passieren lassen	Strahl durch Gehäuse hindurch führen	Energie führen
8		Gerät befestigen	Gerät in Umgebung befestigen bzw. Gesamtsystem sichern	Stoff führen
9		Spannungsdurchführungen	Spannung in Gehäuse bereitstellen	Spannung an Durchführung anlegen und in Gehäuse leiten
10	Fassung	Potentialstützstellen befestigen	-	Stoff führen
11	Potentialstützstellen	homogenes elektrisches Feld erzeugen	Spannung an Stützstellen anlegen und elektrisches Feld erzeugen	Stoff mit Energie summativ verknüpfen

## 6.4 Detektoren für Teilchenstrahlung

Zur Abhilfe der unzureichenden Unterscheidbarkeit der Anzahl der auftreffenden Elektronen und Ionen bietet sich eine andere Art der Auslese an, die feinste Unterschiede der Anzahl der auftreffenden Ionen bzw. Elektronen feststellen kann. Hierzu bietet sich ein Halbleiterdetektor oder ein Streifendetektor an. Beide Typen werden bereits seit langem an Teilchenbeschleunigern benutzt, um kleine Spuren von Elementarteilchen zu erkennen.

Bei der Auswahl des Detektors werden folgende Kriterien beachtet.

- Ortsauflösung
  - Maß für die Präzision mit der die Partikelbahn bestimmt werden kann
  - Können einzelne Partikel nachgewiesen werden oder ist eine Partikellawine nötig für Ausschlag? (mehrere direkt aufeinander folgende, bzw. parallel eintreffende Partikel für Messausschlag nötig?)
- Energieauflösung
  - benötigte Ionisationsenergie
  - Wie viel Energie muss von einem bzw. mehreren Elektronen auf Stoff eingebracht werden, um einen Messausschlag zu bewirken
- Nachweiswahrscheinlichkeit bzw. Rauschen
  - Wahrscheinlichkeit, dass auftreffende Partikel voneinander bzw. von Störungen unterschieden werden können
- Zeitverhalten
  - Totzeit: Zeit von Messung bis zur nächsten Messung (Detektor blind währenddessen)
  - Reaktionszeit: Zeit zwischen Eintreffen des Partikels bis zum Messsignal

### 6.4.1 Silizium-Streifendetektor / CCD / Halbleiterdetektor

Hierbei handelt es sich um eine sehr moderne Art des Teilchendetektors. Er besitzt hervorragende Eigenschaften. Eine Ortsauflösung von  $3\ \mu\text{m}$ , keine Totzeit, sowie eine Auslesezeit von  $10\text{-}100\ \mu\text{s}$  und er ist in der Lage, geringste Unterschiede auftreffender Teilchenmengen zu unterscheiden. Er eignet sich somit perfekt als Ausleseeinheit. In späteren Varianten sollte angestrebt werden, diese Variante auf ihre Funktionstüchtigkeit zu überprüfen. Aktuell wird allerdings auf eine optische Auslese mittels eines Phosphorschirms bestanden. Nachfolgende Abbildung 16 zeigt den Aufbau des Detektors.

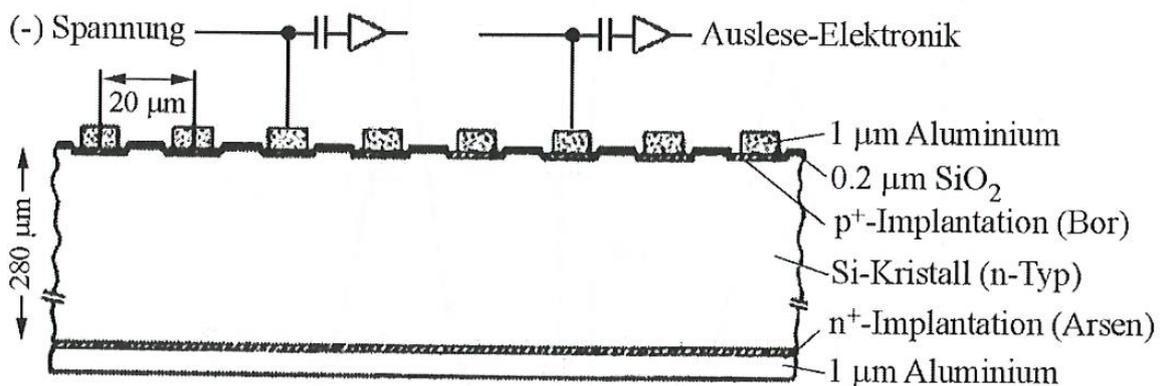


Abbildung 16: Silizium Streifendetektor [30]

### 6.4.2 Phosphorschirm

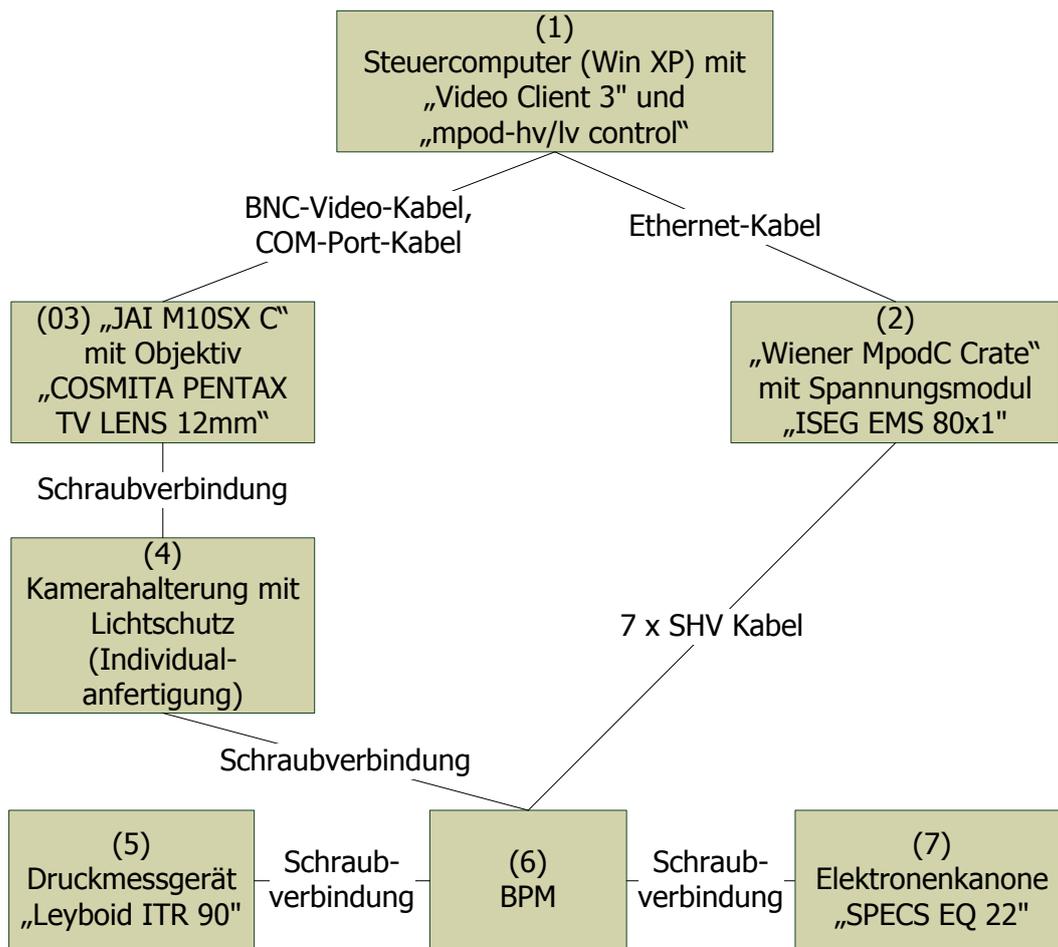
Traditionell wird ein Phosphorschirm zur Auslese verwendet. Er besitzt allerdings eine sehr lange Nachglühzeit (Zeit vom Auftreffen eines Ions bis Lichtpunkt erloschen ist). Dies lässt ein Wackeln des Strahls nur schwer nachverfolgen. Weiterhin hat der verwendete MCP einen Lochabstand von  $10\ \mu\text{m}$ .

Zu empfehlen ist die Verwendung eines neuen Phosphorschirms (Hamamatsu, Typ P47, Zusammensetzung:  $\text{Y}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ ) mit einer Nachglühzeit von nur  $100\ \text{ns}$ , sowie eines MCP mit einem Lochabstand von nur  $6\ \mu\text{m}$ . Beides wurde bestellt und wird zu einem späteren Zeitpunkt getestet. Auch das starke Rauschen sollte dadurch zu minimieren sein. Die Lieferzeit der Bauteile ist allerdings zu lang, als dass im Rahmen dieser Arbeit ein Test durchgeführt werden kann. Hamamatsu wurde als Lieferant gewählt.

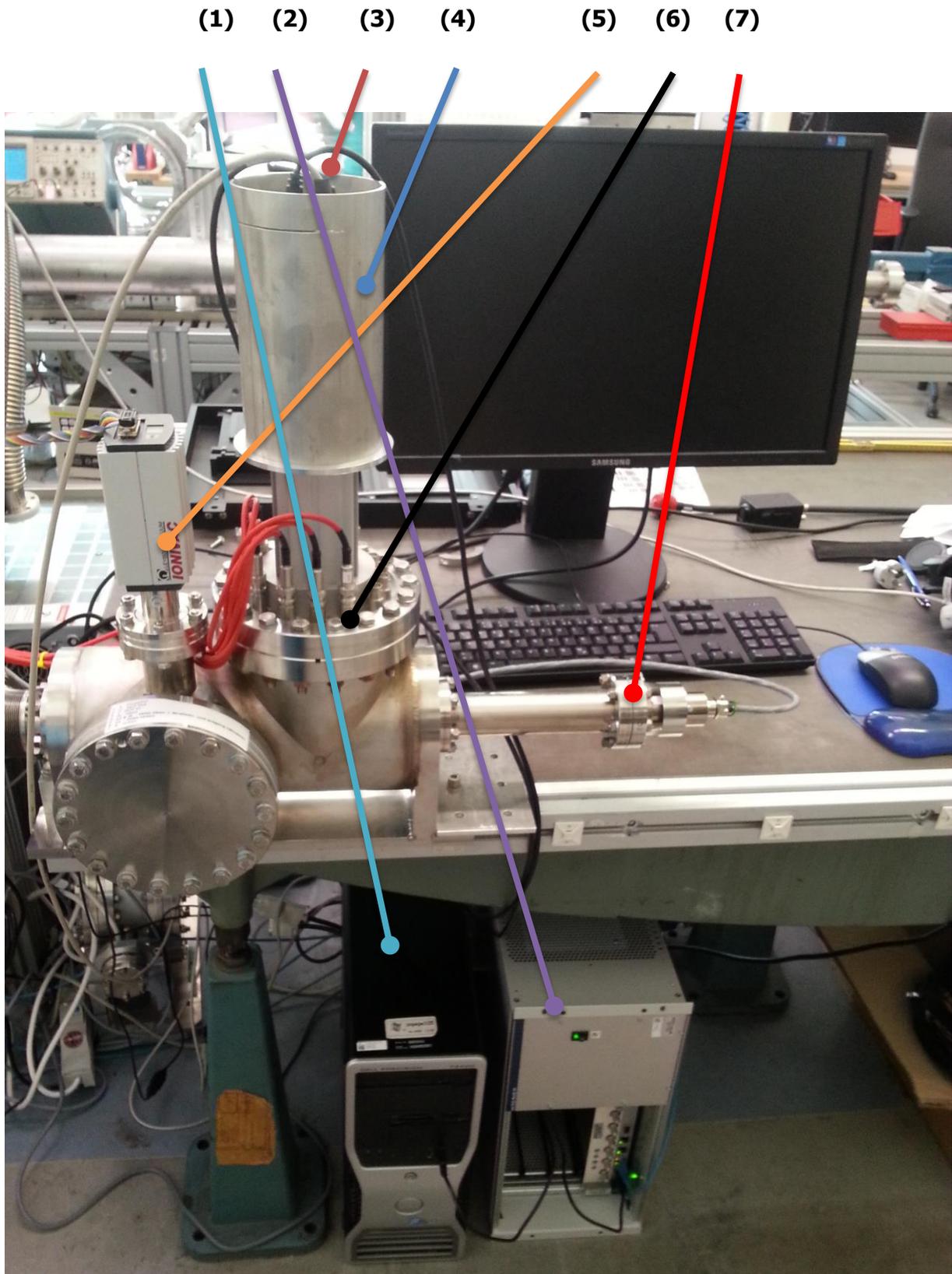
## 7 Aufbau eines Teststandes

Unterlagen zum Betrieb und Aufbau des zu untersuchenden BPM sind leider nur unzureichend vorhanden. Beispielweise sind die anzulegenden Potentiale unbekannt und müssen eigens herausgefunden werden. Nach Lieferung des BPM-Einsatzes und des Gehäuses aus Hamburg wird der Teststand aufgebaut und bestückt. Neben zahlreichen Schrauben werden auch Hochspannungskabel, ein Hochspannungsgerät, eine Kamera, ein Objektiv, eine Steuercomputer, sowie ein Auswertungs- und Diagnoseprogramm benötigt. Am Messstand P4 wird ein Hochspannungsgerät des Typs Wiener MpodC crate verwendet. Am Standort Zeuthen ist ebenfalls ein solches Gerät mit einem Spannungsmodul der Firma iseg des Typs EMS 80x1 (2x +6 kV / 1 mA, 4x max. +4 kV / 2 mA, 2x -2kV / 4mA) vorhanden. Als Leitungen werden entsprechende Kabel mit SHV Steckern verwendet. Die Elektronik-Abteilung hat passende bereitgestellt. Die Kamera hat maßgeblichen Einfluss auf die Messergebnisse. Je schneller sie Aufnahmen machen kann (Shutterzeit), desto besser lässt sich die Position des Strahls über die Zeit nach- und zurückverfolgen. Ein Farbbild des Strahls ist unnötig. Allerdings muss sie das spezifische Lichtspektrum, das der Schirm emittiert, sehr gut aufnehmen können. Das Spektrum variiert je nach Phosphorart. Verwendet wird Hamamatsu P43, der seine höchste Emission bei 545 nm (grün) zeigt. Allerdings lässt sich hiermit nur eine geringe zeitliche Auflösung erzielen. Die Nachglühzeit des Schirms beträgt 1 ms, also die Zeit die vergeht, bis ein durch ein Teilchen zum Leuchten gebrachter Lichtpunkt erlischt. Weiterhin ist mit hohem Untergrundrauschen zu rechnen. Die eingesetzte schnelle Kamera kann aufgrund der langen Nachglühzeit des Phosphorschirms dieses Rauschen nicht unterdrücken. Jedoch sind wesentlich schnellere Schirme verfügbar, wie z.B. der Hamamatsu P47 mit einer Nachglühzeit von lediglich 110 ns bei einer Wellenlänge von 430 nm (blau). Ein weiterer Nebeneffekt wäre eine zumindest theoretisch mögliche Aufzeichnung einzelner Bunche. Der Abstand der Bunche beträgt im kürzesten Modus 128 ns. Bunche mit solch hoher Folgefrequenz zu separieren ist bisher weltweit unerreicht, rückt somit allerdings in greifbare Nähe. Selbstverständlich bräuchte man hierzu dann eine Hochgeschwindigkeitskamera, die mit Kosten von rund 300'000 € pro Stück zu Buche schlagen würde. Verwendet wird im hier beschriebenen Teststand eine Kamera des Herstellers JAI des Typs M10SX C. Sie macht Schwarzweißaufnahmen mit einer Shutterzeit von minimal 1  $\mu$ s bei maximal 30 Bilder/sec. Die Parameter der Kamera gestatten es, problemlos einen schnelleren Phosphorschirm in den vorhandenen Aufbau zu integrieren. Das Ansprechvermögen des Chips beträgt 70% bei 430 nm. Optimal wäre eine Wellenlänge von 500 nm, jedoch ist der Leistungsverlust nicht dramatisch. Wünschenswert wäre, wenn

100% Ansprechvermögen bei 430nm vorliegen würde. Es muss auch darauf geachtet werden, dass das Schauglas für die Betrachtung des Phosphorschirms, wie im Teststand realisiert, eine hohe Transmission aufweist. Nur wenn der Schirm gegen einen schnelleren ausgetauscht wird ist die Verwendung eines Spezialglases notwendig. Die Ansteuerung der Kamera gestaltet sich schwierig, da sie lediglich mit einer speziellen PCI-Karte an einen Windows XP-Computer angeschlossen und betrieben werden kann. Glücklicherweise ist ein Computer mit diesem Betriebssystem noch vorhanden und steht zur freien Verfügung. Die Installation und Inbetriebnahme des Kamerasystems erfolgt durch das betriebsinterne Rechenzentrum. Die Auswertesoftware ist eine regelmäßig aktualisierte hausinterne Entwicklung (Kontaktperson: S. Weiße), die vollautomatisch den Strahlschwerpunkt bestimmt. Eine angeschlossene Elektronenkanone erzeugt einen Elektronenstrahl und simuliert so den Photonenstrahl. Ein Druckmessgerät überwacht permanent den Druck im Gerät. Alle Geräte dürfen nur bei einem Druck von weniger als  $10^{-6}$  mBar betrieben werden. Nachfolgende Abbildungen veranschaulichen den Aufbau. Wie bereits erwähnt sind die zu wählenden Potentiale an den Stützstellen des elektrischen Feldes unbekannt und müssen bestimmt werden. Um ein im hohen Grade homogenes elektrisches Feld sowie einen geradlinigen Partikelflug zu garantieren, ist eine FEM Simulation seit Jahren als gängiges Hilfsmittel der Ingenieure sinnvoll und naheliegend. Systematisches Simulieren der verschiedenen Potentialgefälle sollte zu einem guten Ergebnis führen.



**Abbildung 17: Struktur des Teststandes**



**Abbildung 18: Foto des Teststandes**

Die Beschreibung der Beschriftung bitte aus Abbildung 17 entnehmen.

## **8 FEM-Simulation & erste Praxistests**

Die folgenden Erläuterungen widmen sich zum einen der Findung eines Potentialverhältnisses für die Stützstellenebenen (siehe Abbildung 19; weitere Erläuterungen in Kapitel 8.1), das ein so homogen wie mögliches elektrisches Feld erzeugt. Zum anderen wird der Partikelflug ausgewertet und bewertet. Mit Kenntnis des Partikelfluges bei unterschiedlichen Strahlpositionen kann die Präzision des Messgerätes verbessert werden.

### **8.1 Durchführung**

Der Ablauf der Simulation am Modell wird nachfolgend dargestellt. Jeder Schritt baut auf dem vorhergehenden auf und ist ohne ihn nicht durchführbar.

### 8.1.1 Potentialverteilung

Zur Ermittlung der Potentialverteilung in der Baugruppe müssen der Simulation Randbedingungen gesetzt werden. Randbedingungen sind z.B. angreifende Kräfte, anliegende Spannungen, fließende Ströme, Materialkontakten oder Temperaturen. Notwendige Randbedingungen einer Simulation der Potentialverteilung im Raum:

- Elektrisches Potential in [V]
- Permittivität in [1] (d.h. einheitenlos)

Die Permittivität gibt die Durchlässigkeit eines Materials für elektrische Felder an. Der Fassung (Werkstoff: MACOR-Glaskeramik) wurde der Wert  $\epsilon=6$  [27] und dem die gesamte Baugruppe umgebenden Raum der Wert des Vakuums  $\epsilon=1$  [28] zugewiesen. Die weiteren Bauteile der Baugruppe sind Metalle d.h. elektrische Leiter. Für elektrische Leiter muss aus programminternen Gründen kein Wert der Permittivität vorgeben werden.

Mittels einer Parameterstudie des Simulationsprogramms ANSYS (Workbench-Oberfläche) wurden unterschiedliche Potentiale an die Stützstellen angelegt, um die Werte für ein so homogen wie mögliches elektrisches Feld zu finden. Eine Parameterstudie variiert die Werte von Randbedingungen. Das Programm variiert die Werte nicht selbstständig. Sie müssen manuell vorgeben werden.

In dieser Simulation wurden die Potentialverhältnisse zwischen den Stützstellenebenen (siehe Abbildung 19) variiert, um vorerst ein grobes Verhältnis der anzulegenden Potentiale für ein homogenes Feld zu ermitteln. Ein homogenes Feld verdeutlicht sich durch einen weitläufig parallelen Verlauf der Äquipotentiallinien zur Mikrokanalplatte. Ein im hohen Grade homogenes elektrisches Feld ist auf der folgenden Seite in Abbildung 19 dargestellt. Es führt zu einem geradlinigen Flug von Elektronen oder Ionen entlang der X-Achse im weitgehend parallelen Bereich der Äquipotentiallinien. Das Verhältnis der Potentiale der Stützstellenebenen 2 und 3 bestimmt den Grad der Homogenität. Die Höhe des angelegten Potentials spielt in dieser Simulation noch keine Rolle.

Ein ungünstiger Potentialverlauf ist in Abbildung 20 dargestellt. Die weit ausgedehnte stärkere Wölbung der Äquipotentiallinien ist deutlich erkennbar (Vergleiche Abbildung 19 und Abbildung 20).

## Homogenes elektrisches Feld:

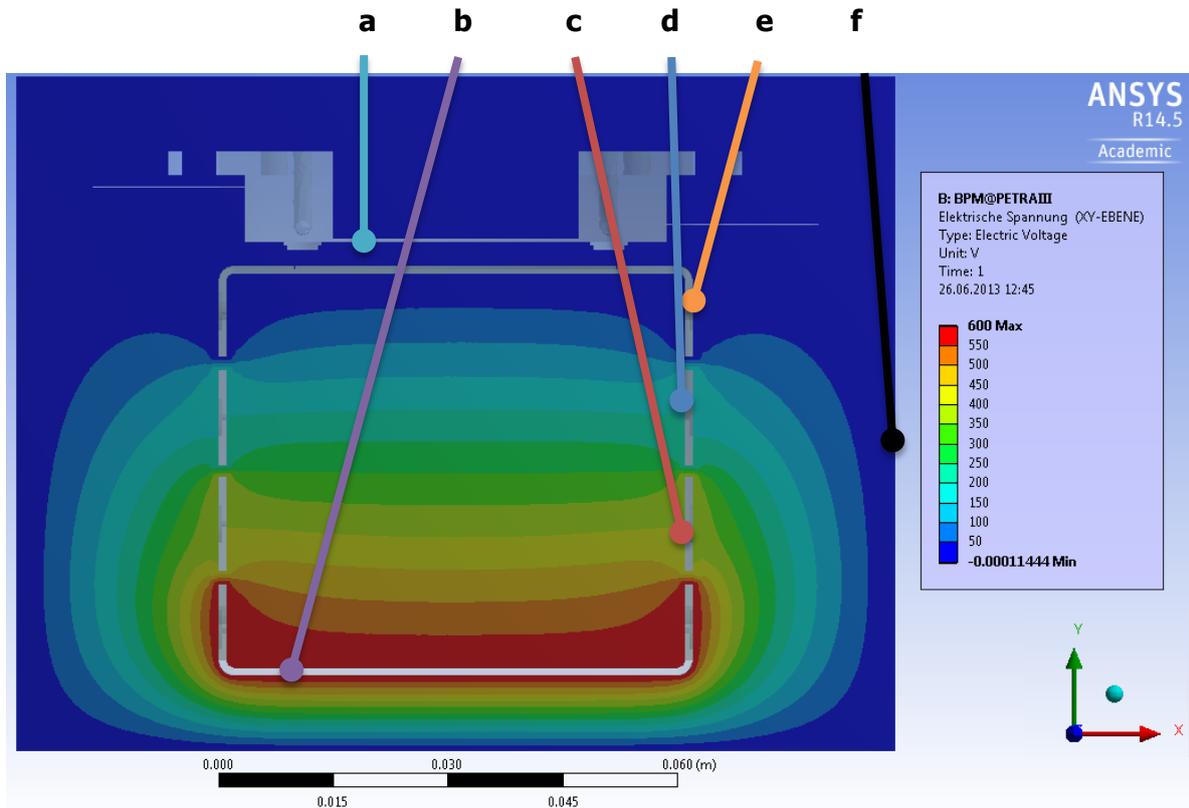
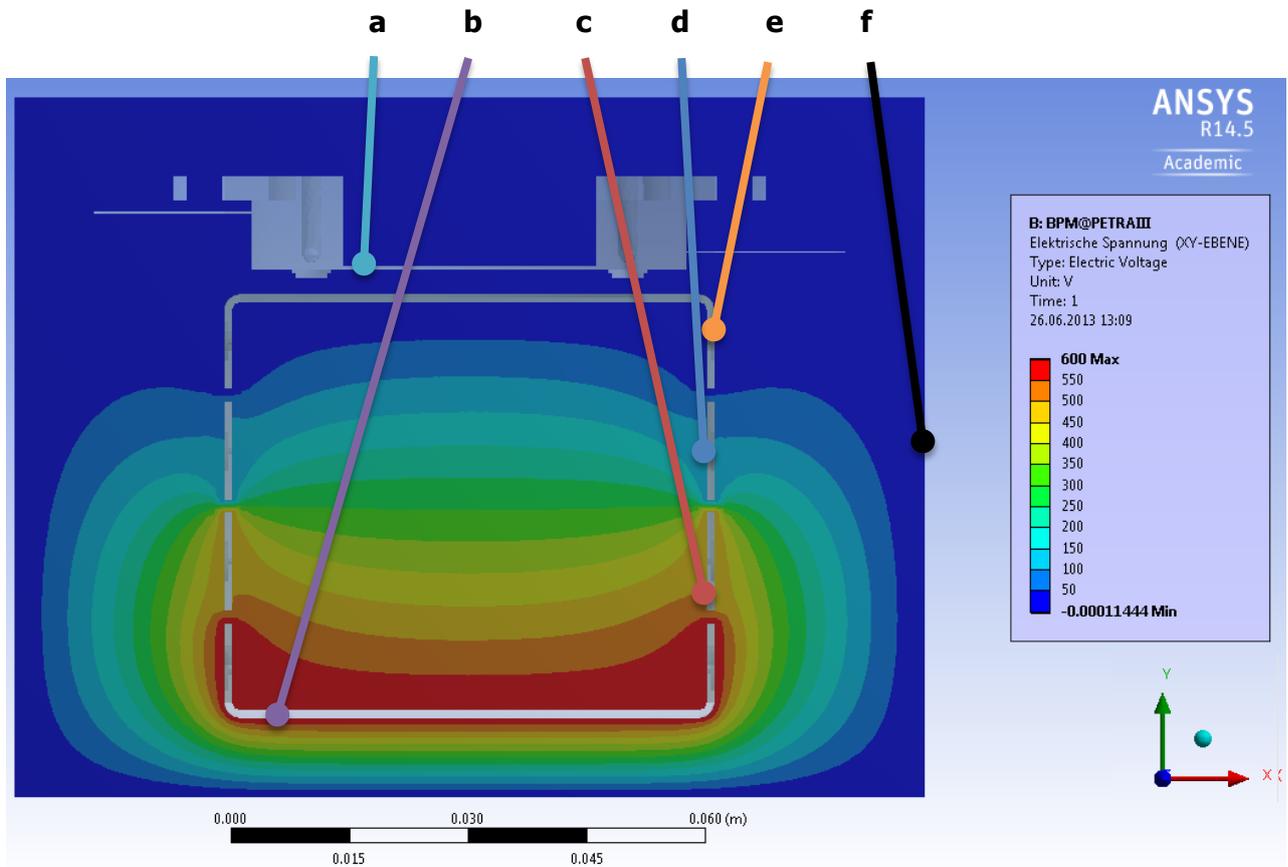


Abbildung 19: Potentialverteilung im Schnitt durch XY-Ebene, Partikelflugrichtung in positive Y-Achse (1)

### Legende der Randbedingungen (Potentiale):

- a) Mikrokanalplatten: 0V
- b) Stützstellenebene H4: 600V
- c) Stützstellenebene H3: 400V
- d) Stützstellenebene H2: 200V
- e) Stützstellenebene H1: 0V
- f) Gehäuse bzw. Randbereich: 0V

## Inhomogenes elektrisches Feld:



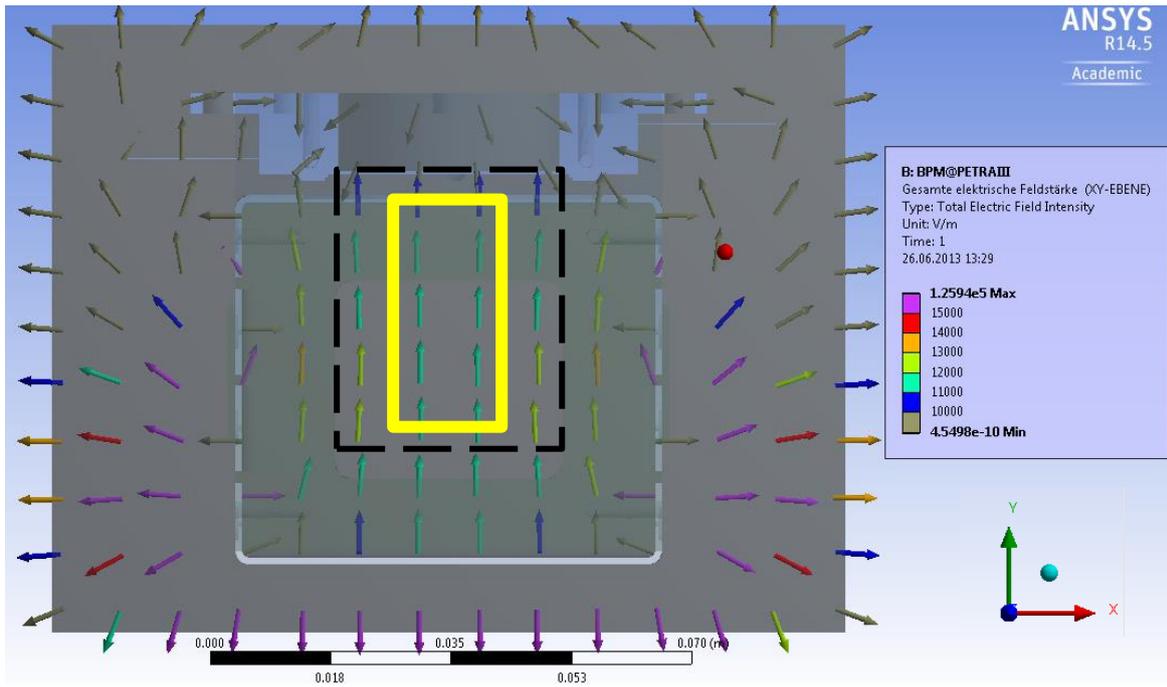
**Abbildung 20: Potentialverteilung im Schnitt durch XY-Ebene, Partikelflugrichtung in positive Y-Achse (2)**

### Legende der Randbedingungen (Potentiale):

- a)** Mikrokanalplatten: 0V
- b)** Stützstellenebene H4: 600V
- c)** Stützstellenebene H3: 500V
- d)** Stützstellenebene H2: 100V
- e)** Stützstellenebene H1: 0V
- f)** Gehäuse bzw. Randbereich: 0V

### 8.1.2 Elektrische Feldstärke

Die notwendigen Randbedingungen sind analog zu denen der Potentialverteilung vorgegeben. Elektrisch geladene Partikel werden infolge des anliegenden elektrischen Feldes in Richtung der elektrischen Feldstärkevektoren beschleunigt und zur Mikrokanalplatte getragen. Ein guter geradliniger Verlauf in Richtung der Mikrokanalplatte ist bei Verwendung der Randbedingungen aus Abbildung 19 aufgetreten. Dies war aus dem harmonischen Verlauf der Äquipotentiallinien bereits zu erwarten. In Abbildung 21 ist die elektrische Feldstärke vektoriell dargestellt. Im markierten Bereich (schwarze gestrichelte Linien) verlaufen die Vektoren optisch gerade und homogen in Richtung Käfigwand. Jedoch ist nur der durch eine gelbe Volllinie markierte Bereich interessant, da die in der Geräteanalyse beschriebene Mikrokanalplatte lediglich einen Durchmesser von 14mm hat. Außerhalb dieses Bereiches sind Abbildungen des Strahls unmöglich. Es ist allerdings wichtig, dass keine Partikel von außerhalb des interessanten Gebietes in den betrachteten Bereich getragen werden, da sie die Abbildung des Strahls verfälschen oder ein Rauschen verursachen würden. Bei Ansicht und Analyse der Feldstärkevektoren außerhalb des interessanten Bereichs ist dies auszuschließen, da optisch kein relevanter Vektor weit genug in dessen Richtung zeigt. Der Bereich zwischen Käfigwand und Mikrokanalplatte, welchen die Partikel auch passieren müssen, kann vorerst ignoriert werden, da die elektrische Feldstärke dort nahezu null ist und somit das elektrische Feld dort zu keiner nennenswerten Beeinflussung der Abbildungsgenauigkeit des Strahls führt. Die Massenträgheit der Partikel soll sie durch diesen Bereich tragen.



**Abbildung 21: Elektrische Feldstärke im Schnitt durch XY-Ebene, Partikelflugrichtung in Richtung positiver Y-Achse**

Bei genauer Betrachtung der Feldstärkevektoren im interessanten Bereich ist allerdings festzustellen, dass sie nicht absolut gerade in Richtung der Mikrokanalplatte verlaufen. Um dies genauer zu untersuchen wurden die Vektoren der elektrischen Feldstärke zielgerichtet betrachtet. Die vektorielle Darstellung besteht aus der X, Y, und Z-Komponente. Gewünscht ist nur eine X-Komponente. Eine Y- oder Z-Komponente bewirkt eine störende Ablenkung der Partikel. Diese ungewollte Ablenkung führt zur Ungenauigkeit des zu entwickelnden Messgerätes. Die Atome und Elektronen folgen dem Verlauf der Vektoren der elektrischen Feldstärke.

Weitere Parametervariationen im Bereich der gefundenen Randbedingungen, die unter Abbildung 19 dargestellt wurden, führten zum Auffinden eines Potentialverhältnisses mit einem Minimum der Y- und Z-Komponente der elektrischen Feldstärke.

Hierzu wurden jene Komponenten des elektrischen Feldes bis zur Mikrokanalplatte nachverfolgt, die sich während ihres Fluges maximal 5mm unterhalb ( $Y=-5$  mm), 5 mm in Richtung Strahlrohr ( $Z=5$  mm) und 5mm horizontal ( $X=5$  mm) der Strahlachse entfernt befinden. Außerhalb dieser Varianz ist der Strahl nicht zu erwarten. Es wird die Parameterkombination ausgewählt, die in X-Richtung die kleinste Abweichung von der idealen Gerade aufweist. Zum Vergleich sind solche Komponenten angegeben, welche eine Verschiebung um 0 mm und um 10 mm (analog der obigen Beschreibung) aufweisen. Die maximal und minimal auftretenden Komponenten wurden im Betrag addiert, um die geringstmöglichen Werte zu finden und somit geringstmöglichen Versatz der Partikel infolge von Inhomogenität des elektrischen Feldes zu garantieren. Folgende Formel zeigt die Berechnung am Beispiel von Datenparametersatz DP4 (siehe Tabelle 4).

#### **Formel 1: Berechnung des Betrags / Vergleichswertes**

$$|F_{x,e,max}| + |F_{x,e,max}| = \text{Vergleichswert}$$
$$|-70.97| + |+32.08| = 103.05$$

Die Tabellenauswertung folgt auf die Tabelle. Wichtige Parameterkombinationen sind hervorgehoben.

**Legende:**

- DP: Datenparametersatz

**Tabelle 4: Komponenten der elektrischen Feldstärke 1**

NAME	DP 1	DP 19	DP 3	DP 18	DP 17	DP 16	DP 15	DP 4	DP 10	DP 11	DP 12	DP 27	DP 28	DP 29	DP 5	DP 6	DP 7	DP 8	DP 21	DP 9	DP 22
<b>H1 Magnitude [V]</b>	0	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>H2+Wolframplatte Magnitude [V]</b>	260	256	255	254	253	<b>252</b>	<b>251</b>	<b>250</b>	<b>249</b>	248	247	246	245	244	225	200	175	150	150	125	100
<b>H3 Magnitude [V]</b>	340	344	345	346	347	<b>348</b>	<b>349</b>	<b>350</b>	<b>351</b>	352	353	354	355	356	375	400	425	450	450	475	500
<b>H4 Magnitude [V]</b>	600	600	600	600	600	<b>600</b>	<b>600</b>	<b>600</b>	<b>600</b>	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600
<b>Komponente der elektrischen Feldstärke X (MITTE) Minimum [V m<sup>-1</sup>]</b>	-0.39	-0.36	-0.35	-0.35	-0.34	<b>-0.33</b>	<b>-0.32</b>	<b>-0.31</b>	<b>-0.31</b>	-0.30	-0.29	-0.28	-0.27	-0.27	-0.57	-1.16	-1.76	-2.36	-2.36	-2.96	-3.56
<b>Komponente der elektrischen Feldstärke X (MITTE) Maximum [V m<sup>-1</sup>]</b>	0.66	0.62	0.61	0.60	0.59	<b>0.58</b>	<b>0.57</b>	<b>0.56</b>	<b>0.55</b>	0.54	0.53	0.53	0.53	0.53	0.87	1.52	2.18	2.84	2.84	3.49	4.15
<b>Komponente der elektrischen Feldstärke Y (MITTE) Minimum [V m<sup>-1</sup>]</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Komponente der elektrischen Feldstärke Y (MITTE) Maximum [V m<sup>-1</sup>]</b>	11589.70	11609.84	11614.87	11619.91	11624.94	<b>11629.98</b>	<b>11635.01</b>	<b>11640.05</b>	<b>11645.08</b>	11650.11	11655.15	11660.18	11665.22	11670.25	11765.91	11891.77	12017.63	12143.49	12143.49	12269.35	12395.21
<b>Komponente der elektrischen Feldstärke Z (MITTE) Minimum [V m<sup>-1</sup>]</b>	-0.08	-0.08	-0.07	-0.07	-0.07	<b>-0.07</b>	<b>-0.07</b>	<b>-0.07</b>	<b>-0.07</b>	-0.07	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.13	-0.19	-0.24	-0.30	-0.30	-0.36	-0.42
<b>Komponente der elektrischen Feldstärke Z (MITTE) Maximum [V m<sup>-1</sup>]</b>	0.20	0.20	0.19	0.19	0.19	<b>0.19</b>	<b>0.19</b>	<b>0.19</b>	<b>0.19</b>	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.20	0.28	0.36	0.43	0.43	0.51	0.58

Komponente der elektrischen Feldstärke X (X=5 Y=5 Z=5) Minimum [V m <sup>-1</sup> ]	-90.43	-82.65	-80.70	-78.76	-76.81	<b>-74.87</b>	<b>-72.92</b>	<b>-70.97</b>	<b>-69.82</b>	-68.72	-67.62	-66.64	-65.79	-65.01	-104.83	-159.87	-214.91	-269.95	-269.95	-324.98	-380.02
Komponente der elektrischen Feldstärke X (X=5 Y=5 Z=5) Maximum [V m <sup>-1</sup> ]	15.94	21.77	23.49	25.21	26.92	<b>28.64</b>	<b>30.36</b>	<b>32.08</b>	<b>33.80</b>	35.51	37.33	39.19	41.04	42.90	80.23	138.27	203.82	273.42	273.42	343.25	414.44
<b>Betrag</b>	106.38	104.42	104.19	103.96	103.74	<b>103.51</b>	<b>103.28</b>	<b>103.05</b>	<b>103.61</b>	104.23	104.95	105.83	106.83	107.91	185.06	298.14	418.73	543.36	543.36	668.23	794.46
Komponente der elektrischen Feldstärke Z (X=5 Y=5 Z=5) Minimum [V m <sup>-1</sup> ]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Komponente der elektrischen Feldstärke Z X=5 Y=5 Z=5) 2 Maximum[V m <sup>-1</sup> ]	143.24	145.07	145.52	145.98	146.44	<b>146.90</b>	<b>147.35</b>	<b>147.81</b>	<b>148.27</b>	148.73	149.18	149.64	150.10	150.56	159.25	170.69	182.13	193.56	193.56	205.00	216.44
<b>Betrag</b>	143.24	145.07	145.52	145.98	146.44	<b>146.90</b>	<b>147.35</b>	<b>147.81</b>	<b>148.27</b>	148.73	149.18	149.64	150.10	150.56	159.25	170.69	182.13	193.56	193.56	205.00	216.44
Komponente der elektrischen Feldstärke X (X=10 Y=10 Z=10) Minimum [V m <sup>-1</sup> ]	-271.53	-251.61	-246.63	-241.66	-236.68	<b>-231.70</b>	<b>-226.72</b>	<b>-221.74</b>	<b>-216.76</b>	-211.78	-206.80	-201.82	-196.84	-191.86	-283.75	-465.90	-654.29	-846.03	-846.03	-1037.76	-1229.50
Komponente der elektrischen Feldstärke X (X=10 Y=10 Z=10) Maximum [V m <sup>-1</sup> ]	99.68	111.78	114.80	117.82	120.85	<b>123.87</b>	<b>126.94</b>	<b>130.87</b>	<b>134.81</b>	138.75	142.69	146.62	150.56	154.50	230.94	385.67	542.44	712.86	712.86	898.02	1083.18
<b>Betrag</b>	371.21	363.39	361.44	359.48	357.52	<b>355.57</b>	<b>353.65</b>	<b>352.61</b>	<b>351.57</b>	350.53	349.49	348.45	347.40	346.36	514.69	851.57	1196.73	1558.88	1558.88	1935.78	2312.68
Komponente der elektrischen Feldstärke Z (X=10 Y=10 Z=10) Minimum [V m <sup>-1</sup> ]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Komponente der elektrischen Feldstärke Z (X=10 Y=10 Z=10) Maximum [V m <sup>-1</sup> ]	272.64	276.48	277.44	278.41	279.37	<b>280.33</b>	<b>281.29</b>	<b>282.25</b>	<b>283.21</b>	284.17	285.13	286.09	287.06	288.02	306.28	330.30	354.33	378.36	378.36	402.38	426.41
<b>Betrag</b>	272.64	276.48	277.44	278.41	279.37	<b>280.33</b>	<b>281.29</b>	<b>282.25</b>	<b>283.21</b>	284.17	285.13	286.09	287.06	288.02	306.28	330.30	354.33	378.36	378.36	402.38	426.41

Ein im hohen Grade homogenes elektrisches Feld mit den geringsten Abweichungen der Y- und Z-Komponenten ist mit nachfolgend dargestellten Randbedingungen ermittelt worden. Auch in dieser Simulation spielt die Höhe des Potentials keine Rolle, sondern lediglich deren Verhältnis zueinander.

Randbedingungen (Potentiale):

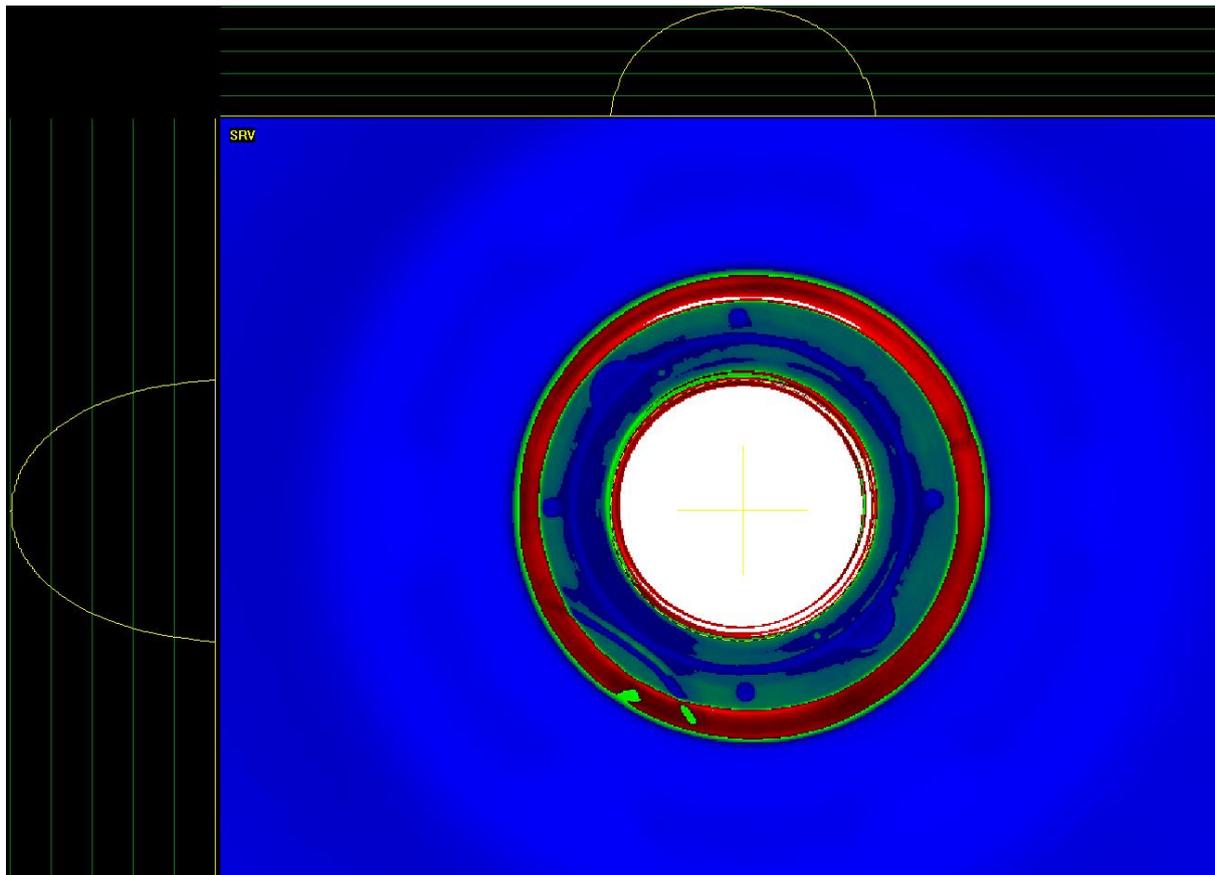
- a)** Mikrokanalplatten: 0V
- b)** Stützstellenebene H4: 600V
- c)** Stützstellenebene H3: 350V
- d)** Stützstellenebene H2: 250V
- e)** Stützstellenebene H1: 0V
- f)** Gehäuse bzw. Randbereich: 0V

Auf eine grafische Darstellung der elektrischen Feldstärke und der Potentiale wird verzichtet, da optisch kein Unterschied zu Abbildung 21 festgestellt werden kann.

### 8.1.3 Erster Praxistest

Die in den Simulationsrechnungen gefunden Potentialverhältnisse müssen in der Praxis überprüft werden, um ihre Richtigkeit zu bestätigen.

Mit der im Kapitel 4 beschriebene Kamera JAI M10SX C wurde ein Bild bei einer Shutterzeit von 2 ms aufgenommen (siehe Abbildung 22).



**Abbildung 22: Strahlbild bei 0V – 250V – 350V – 600V**

Der gesamte Schirm leuchtet mit hoher Intensität, jedoch ist ein Abbild des Strahls nicht ersichtlich. Je heller die Farbe, desto höher die Lichtintensität. Die oben und links auf der Abbildung ersichtlichen Graphen zeigen die Projektion der Intensitätsverteilung des gewählten Bereichs - hier der runde Schirm. Die Abwesenheit der Strahlabbildung kann mehrere Ursachen haben. Eine mögliche Erklärung wäre ein fehlendes Potentialgefälle zwischen MCP-Out und dem davorliegenden Netz. Offenbar bremst das grobmaschig gewählte Netz die Ionen so stark ab, dass sie den MCP nicht mehr erreichen können. Ein weiteres bekanntes Problem ist die Ablenkung des Elektronenstrahls der niederenergetischen (5 keV) Elektronenkanone durch das elektrische Feld des BPM. Der Strahl kann den BPM

nicht gradlinig passieren und wird zum positiven Potential (H4) gezogen. Eine Abschätzung der Ablenkung durch die Lorentzkraft bei Spannungen an den Stützstellen von bis zu 5'000 V (maximal angelegte Potentiale anderer BPM-Varianten) zeigt, dass der Strahl nicht in den sichtbaren Bereich gelangen kann. Stromdurchflossene Kompensationsspulen oberhalb und unterhalb des BPM konnten bei diesen Varianten die Ablenkkraft kompensieren. Um die Nebeneffekte von hohen Spannungen (spezielle HV-Durchführungen, Überschläge, starke elektrische Felder, Sicherheitsanforderungen) zu vermeiden und unter Laborbedingungen einen Elektronenstrahl nachweisen zu können wurde im aktuellen Versuch angestrebt, möglichst niedrige Spannungen anzulegen. Völlig andere Randbedingungen erwarten uns beim Betrieb des BMP am Beschleuniger PETRA III, da es sich im Gebiet der Strahlführung P04 nicht um einen Elektronenstrahl, sondern um einen Photonenstrahl handelt, der nicht durch ein elektrisches Feld abgelenkt werden kann. Hauptaugenmerk liegt daher auf der Erarbeitung eines funktionsfähigen Konzepts für den Betrieb des BPM am Beschleuniger PETRA III.

#### **8.1.4 Anpassung der FEM-Simulation**

Um die im vorigen Kapitel beschriebenen Fehlerursachen zu beheben wurde eine weitere Parameterstudie mit veränderten Potentialwerten betrachtet.

Die Potentiale, die zu einem geringen Versatz führen sollten, wurden allesamt um 200V erhöht, um so ein Ansaugen der Ionen vom MCP zu bewirken und um sicherzustellen, dass die Potentialwerte optimale Voraussetzungen für den gradlinigen Partikelflug aufweisen. Nachfolgende Tabelle 5 zeigt, wie schon Tabelle 4, simulierte Varianten und die gewählten Parameter.

**Legende:**

- DP: Datenparametersatz

**Tabelle 5: Komponenten der elektrischen Feldstärke 2**

NAME	DP 31	<b>DP 32</b>	DP 33	DP 34	DP 30	DP 25	DP 24	DP 26
<b>H1 Magnitude [V]</b>	200	<b>200</b>	200	200	200	200	200	200
<b>H2+ Wolframplatte Magnitude [V]</b>	452	<b>451</b>	450	449	447	446	445	444
<b>H3 Magnitude [V]</b>	548	<b>549</b>	550	551	553	554	555	556
<b>H4 Magnitude [V]</b>	800	<b>800</b>	800	800	800	800	800	800
<b>Komponente der elektrischen Feldstärke X (MITTE) Minimum [V m<sup>-1</sup>]</b>	-0,43	<b>-0,42</b>	-0,41	-0,40	-0,39	-0,38	-0,37	-0,36
<b>Komponente der elektrischen Feldstärke X (MITTE) Maximum [V m<sup>-1</sup>]</b>	0,71	<b>0,70</b>	0,69	0,68	0,66	0,65	0,64	0,64
<b>Komponente der elektrischen Feldstärke Y (MITTE) Minimum [V m<sup>-1</sup>]</b>	11048,40	<b>11043,05</b>	11037,70	11032,35	11021,64	11016,29	11010,93	11005,58
<b>Komponente der elektrischen Feldstärke Y (MITTE) Maximum [V m<sup>-1</sup>]</b>	64516,13	<b>64516,13</b>	64516,13	64516,13	64516,13	64516,13	64516,13	64516,13
<b>Komponente der elektrischen Feldstärke Z (MITTE) Minimum [V m<sup>-1</sup>]</b>	-0,12	<b>-0,12</b>	-0,12	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,10
<b>Komponente der elektrischen Feldstärke Z (MITTE) Maximum [V m<sup>-1</sup>]</b>	0,28	<b>0,27</b>	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,26
<b>Komponente der elektrischen Feldstärke X (X=5 Y=5 Z=5) Minimum [V m<sup>-1</sup>]</b>	-107,87	<b>-106,33</b>	-105,23	-104,14	-102,03	-101,18	-100,32	-99,74
<b>Komponente der elektrischen Feldstärke X (X=5 Y=5 Z=5) Maximum [V m<sup>-1</sup>]</b>	16,63	<b>17,90</b>	19,42	21,13	24,57	26,29	28,00	29,72

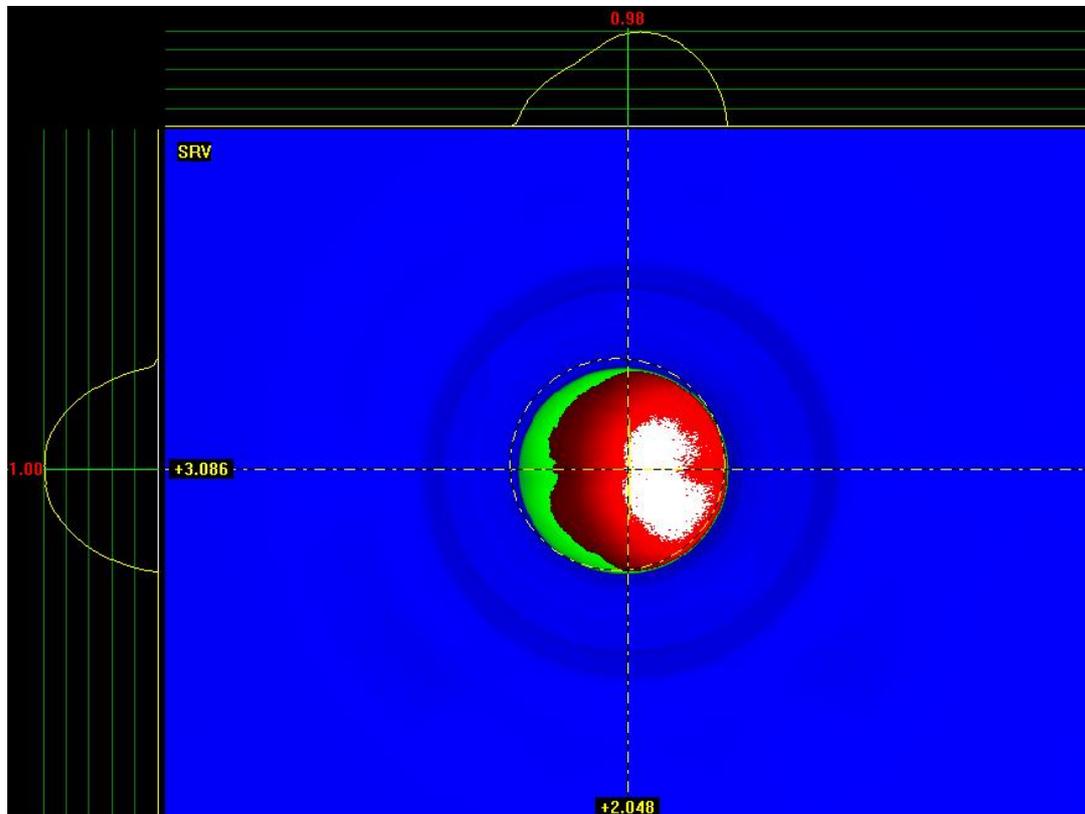
<b>Betrag</b>	124,50	<b>124,23</b>	124,65	125,27	126,60	127,46	128,33	129,47
<b>Komponente der elektrischen Feldstärke Z (X=5 Y=5 Z=5) Minimum [V m<sup>-1</sup>]</b>	0,00	<b>0,00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Komponente der elektrischen Feldstärke Z X=5 Y=5 Z=5) 2 Maximum [V m<sup>-1</sup>]</b>	213,60	<b>214,06</b>	214,52	214,97	215,89	216,35	216,81	217,26
<b>Betrag</b>	213,60	<b>214,06</b>	214,52	214,97	215,89	216,35	216,81	217,27
<b>Komponente der elektrischen Feldstärke X (X=10 Y=10 Z=10) Minimum [V m<sup>-1</sup>]</b>	-317,09	<b>-312,11</b>	-307,13	-302,15	-292,19	-287,21	-282,23	-277,25
<b>Komponente der elektrischen Feldstärke X (X=10 Y=10 Z=10) Maximum [V m<sup>-1</sup>]</b>	98,36	<b>101,38</b>	104,40	107,43	113,47	116,50	119,55	123,49
<b>Betrag</b>	415,44	<b>413,49</b>	411,53	409,58	405,66	403,71	401,78	400,74
<b>Komponente der elektrischen Feldstärke Z (X=10 Y=10 Z=10) Minimum [V m<sup>-1</sup>]</b>	-0,02	<b>-0,02</b>	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02
<b>Komponente der elektrischen Feldstärke Z (X=10 Y=10 Z=10) Maximum [V m<sup>-1</sup>]</b>	404,76	<b>405,72</b>	406,68	407,64	409,56	410,53	411,49	412,45
<b>Betrag</b>	404,78	<b>405,74</b>	406,70	407,66	409,58	410,54	411,50	412,46

Die Potentiale des Parametersatzes DP32 zeigen die geringsten X- Abweichungen von der idealen, gradlinigen elektrischen Feldstärke bei einem Abstand von der Strahlrohrmitte von 5 mm. Bemerkenswert ist, dass bei einem Abstand von 10 mm eine andere Parameterkombination zu besseren Resultaten führen würde. Da der Strahl allerdings typischerweise nicht stärker als 5mm variiert, spielt die Kombination für unsere Betrachtungen keine Rolle, diese sollte allerdings zur Kenntnis genommen werden.

Es zeigte sich, dass ein geringfügig anderes Potentialverhältnis zu einem anderen Ergebnis führt. Der so ermittelte Parametersatz muss selbstverständlich in einem Praxistest geprüft werden. Allerdings ist zu erwarten, dass aufgrund der hohen elektrischen Feldstärke der Strahl abgelenkt und somit nicht sichtbar sein wird.

### 8.1.5 Zweiter Praxistest

Die Potentiale des Parametersatzes DP32 führten zu der auf Abbildung 23 dargestellten Kameraaufnahme.

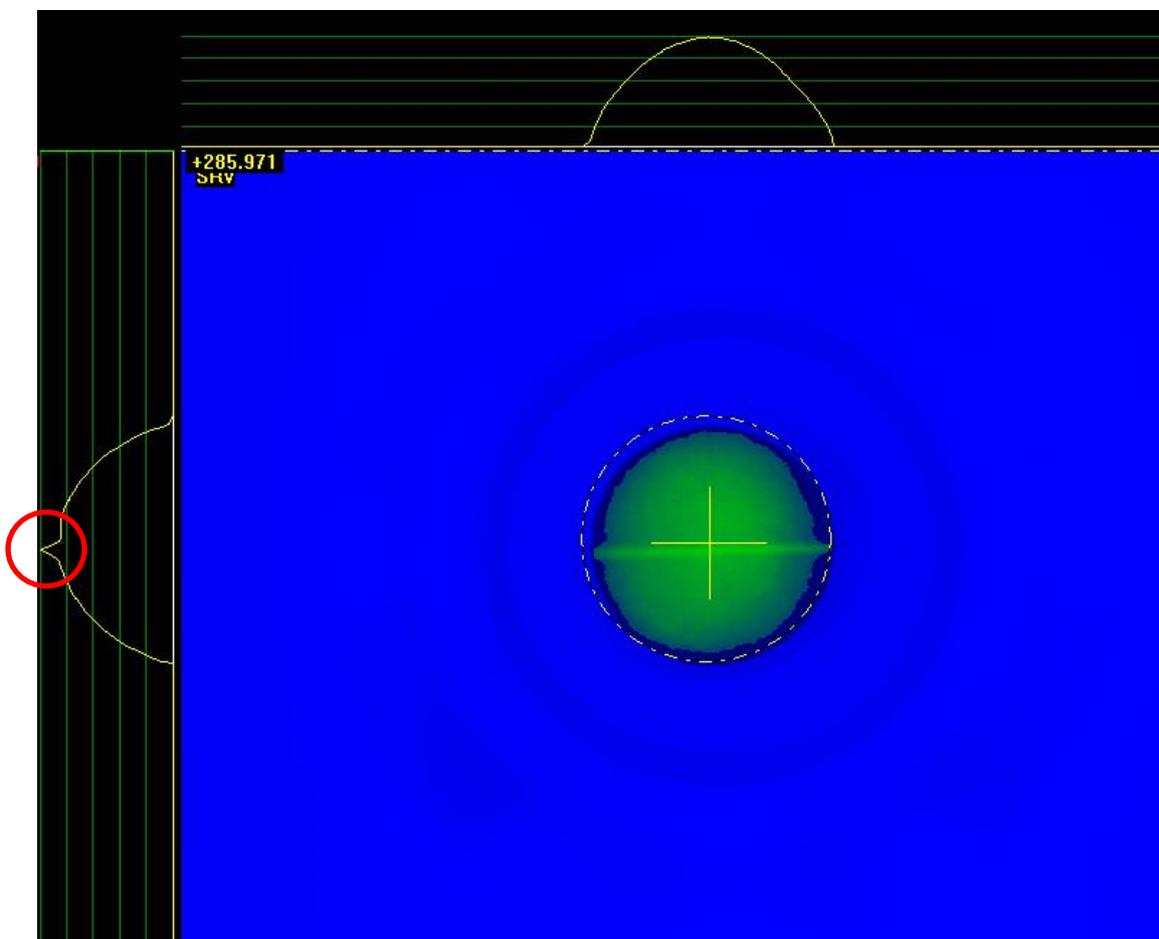


**Abbildung 23: Strahlbild bei 200 V – 449 V – 551 V – 800 V**

Es ist kein Abbild des Strahls erkennbar, da wie bereits erwähnt, der Elektronenstrahl durch die zu hohe elektrische Feldstärke abgelenkt wird.

Durch Probieren ließ sich eine Parameterkombination finden, die ein Strahlabbild zeigt. Um beide Versuche wenigstens im Ansatz vergleichbar zu halten, wurde als minimale Spannung 200 V und als maximale Spannung 800 V festgelegt. Die vorliegende elektrische Feldstärke im Käfig bleibt hierdurch in ähnlichen Relationen. Folgende Potentiale führten zu einer Strahlabbildung, die im folgenden Kapitel näher untersucht wird.

- Stützstellenebene H4: 500 V
- Stützstellenebene H3: 800 V
- Stützstellenebene H2: 500 V
- Stützstellenebene H1: 200 V



**Abbildung 24: 200 V – 500 V – 800 V – 500 V**

Die Intensitätsspitze am linken Graphen zeigt eindeutig die Strahlmittelpunktlage. Aus der Ausprägung des Spitze lässt sich die Intensitätsverteilung ableiten. Dies wird nicht weiter verfolgt, da zum einen zuvor eine Kalibrierung der Lichtintensität des Schirms zu einer Strahlintensität durchgeführt werden müsste und zum anderen dies nicht Teil der Aufgabenstellung ist. Die leichte Schiefelage des Strahls liegt an einer leicht verschobenen Kameraausrichtung und ist hier nicht weiter von Belang.

## 8.1.6 Flugbahn geladener Partikel

Die Simulation der Flugbahn von Partikeln im elektrischen Feld ist mittels der ANSYS 14 Workbench-Oberfläche nicht möglich. Allerdings besitzt ANSYS eine weitere quelltextbasierende Oberfläche namens ANSYS-Classic, mit der dies mithilfe spezieller Befehle möglich ist. Verwendet wurde unter anderem der Befehl „pltrac“, auf den nur grob eingegangen werden soll. Der äußerst umfangreiche eigens geschriebene Quelltext befindet sich im Anhang.

### 8.1.6.1 Einleitung

Es liegen der Simulation der Flugbahn idealisierte Bedingungen zugrunde. Die Berechnungen stellen allerdings eine sehr gute Näherung an die realen Bedingungen dar.

Die Simulationsergebnisse sind nur für das Ultrahochvakuum (UHV) gültig. Vereinfacht ausgedrückt wird bei dieser Simulation ein einziges Partikel im idealen Vakuum ausgesetzt und dessen Bahnverlauf bestimmt. Dies ist aufgrund folgender Gründe zulässig.

Reibung der Partikel zur Luft kommt nicht vor, da der Partikelflug im Ultrahochvakuum (Druck:  $10^{-7} \geq p \geq 10^{-12}$  mBar [26]) stattfindet.

Das genannte Kommando „pltrac“ lässt keine direkte Berücksichtigung der Schwerkraft zu, weswegen eine Annahme getroffen wurde. Ihr Einfluss wird durch Vorgabe einer Startgeschwindigkeit in Höhe von 0.981 m/s in Richtung der negativen Y-Achse einbezogen. Hierbei wurde angenommen, dass ein Partikel sich 100 mm in Folge der Erdgravitation nach unten bewegt und somit diese Geschwindigkeit erreicht hat.

Im UHV sind real nur sehr wenige Partikel vorhanden, sodass der Einfluss von Kollisionen der Partikel untereinander zu vernachlässigen ist. Die mittlere freie Weglänge (durchschnittliche Weglänge bis ein Ion bzw. Elektron mit einem anderen kollidiert) beträgt  $10^3$  bis  $10^8$  m [25]. Kollisionen sind somit äußerst unwahrscheinlich bei einer Weglänge von nur rund 0.02 m vom Startpunkt am Strahl zur Mikrokanalplatte. Lediglich der Weg zwischen deren Entstehung am Strahl und Auftreffen auf der Platte ist relevant. Trotz der Anzahl von  $10^4$  bis  $10^{12} \frac{\text{parts}}{\text{cm}^3}$  [25] ist somit nicht mit einer Beeinflussung als Folge von Kollisionen zu rechnen.

Der Einfluss der Ladung der Elektronen und Ionen auf das elektrische Feld und die daraus folgende Veränderung des Feldes ist ebenfalls nicht berücksichtigt. Die Anzahl der geladenen Ionen und Elektronen ist gering und zusätzlich deren Ladung sehr gering, womit auch hierbei mit keiner relevanten Beeinflussung zu rechnen ist. Am stärksten wirkt sich eine Inhomogenität des Feldes aus.

Um Rechenzeit zu sparen wurden die Simulationen am halben Modell unter Anwendung einer Symmetrierandbedingung entlang der XY-Ebene durchgeführt. Die Baugruppe ist wie bereits erwähnt symmetrisch bzgl. dieser Ebene.

Des Weiteren wurde die Netzdichte im interessanten Bereich erhöht, was lokal zu genaueren Ergebnissen führt. Dies führt gleichzeitig aber auch zu einer wesentlichen Verlängerung der Berechnungszeit, was allerdings unvermeidbar ist um exakte Ergebnisse zu erhalten.

Netzverfeinerung und hohe Genauigkeit von Darstellungen erkennt man an stetig verlaufenden Linien in Abbildungen von Simulationsergebnissen. Im inneren Bereich der Baugruppe, die in Abbildung 19 dargestellt ist, verlaufen die Äquipotentiallinien auf diese Weise. Der äußere Bereich ist von einigen Ecken und Kanten durchzogen. Dies weist auf Ungenauigkeiten hin und darf nicht auftreten in Bereichen, in denen eine Auswertung vorgenommen werden soll. Aktuell sind Auswertungen außerhalb der Baugruppe nicht von Belang und somit ist eine größere Ungenauigkeit der Werte in diesem Bereich zulässig. Nachfolgende Randbedingungen müssen den Partikeln zugewiesen werden für eine Flugbahnbestimmung.

- Startkoordinaten bzgl. X, Y und Z-Achse in [ $\mu\text{m}$ ]
- Startgeschwindigkeit bzgl. X,Y und Z-Achse in [ $\mu\text{m/s}$ ]
- Ladung in [ $\text{pA}\cdot\text{s}=\text{pC}$ ]
- Masse in [ $\text{kg}$ ]

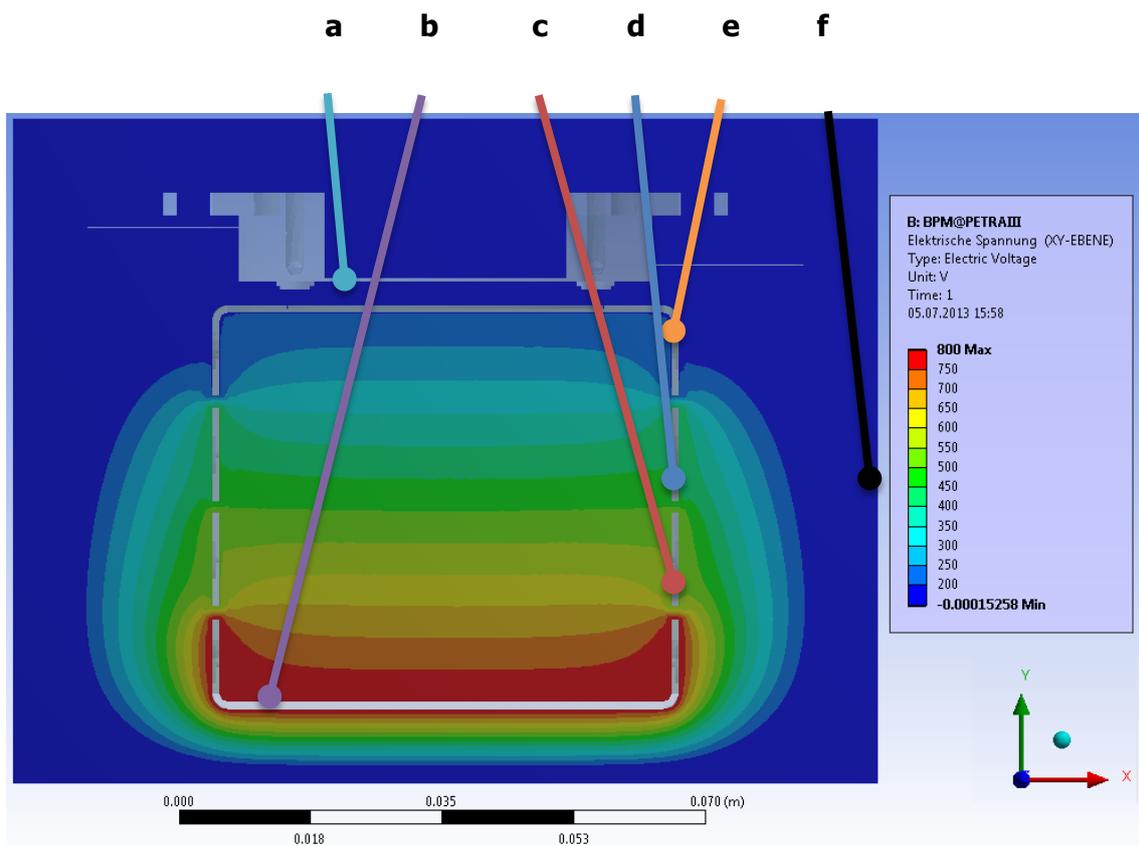
Selbstverständlich müssen auch die anliegenden Potentialen und Permittivitäten vorgegeben werden. Die Höhe der Potentiale spielt in der Flugbahnbestimmung nun eine Rolle, da sie die Höhe der elektrischen Feldstärke und somit auch der Partikelgeschwindigkeit bestimmt.

#### **8.1.6.2 Randbedingungen**

Die Permittivitäten der Materialien sind identisch mit denen aus Kapitel 8.1.1.

Die empfohlenen Potentiale für P4 von DP32 wurden verwendet.

Zur besseren Veranschaulichung sind die Randbedingungen und die sich daraus ergebenden Potentialverläufe in der folgenden Abbildung 25 dargestellt.



**Abbildung 25: Randbedingungen für Partikelflug**

Legende der Randbedingungen (Potentiale):

- |                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| <b>a)</b> Mikrokanalplatten:        | 0V    |
| <b>b)</b> Stützstellenebene H4:     | 800 V |
| <b>c)</b> Stützstellenebene H3:     | 551 V |
| <b>d)</b> Stützstellenebene H2:     | 449 V |
| <b>e)</b> Stützstellenebene H1:     | 200 V |
| <b>f)</b> Gehäuse bzw. Randbereich: | 0V    |

Bisher wurden ausschließlich Ionen für den IPM genutzt, somit wird nachfolgend die Flugbahn eines zweifachpositiv geladenen Stickstoffions bestimmt. Der überwiegende Anteil im Restgas ist Stickstoff. Es wurde die Flugbahn ausgehend vom Punkt (x=5/y=5/z=0) bestimmt. Weiterhin wurde der Verlauf des Elektronenstrahls durch den BPM bestimmt. Die Elektronenkanone erzeugt 5 keV Elektronen. Dies lässt sich umrechnen in eine Geschwindigkeit (siehe Formel 2).

$$E = 5.000 \text{ eV} = 8.01 \cdot 10^{-16} \text{ J} \quad m = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \quad 1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-16} \text{ J}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot E}{m}} = 41'936'859.5 \frac{\text{m}}{\text{s}} = \mathbf{41.9 \text{ mio} \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

### Formel 2: Berechnung der Elektronengeschwindigkeit der Elektronenkanone

Schwere und gering geladene Partikel sollten ein trägeres Verhalten als leichte und höher geladene zeigen.

Die verwendeten Massen- und Ladungswerte sind in folgender Tabelle dargestellt.

**Tabelle 6: Massen und Ladungen berücksichtigter Partikel**

Name	Masse [kg]	Ladung [pC]
Elektron	9,11E-31	-1,60E-07
Stickstoffion	2,33E-26	3,20E-07

Die Startpunkte der Partikel sind in nachfolgender Tabelle 7 dargestellt.

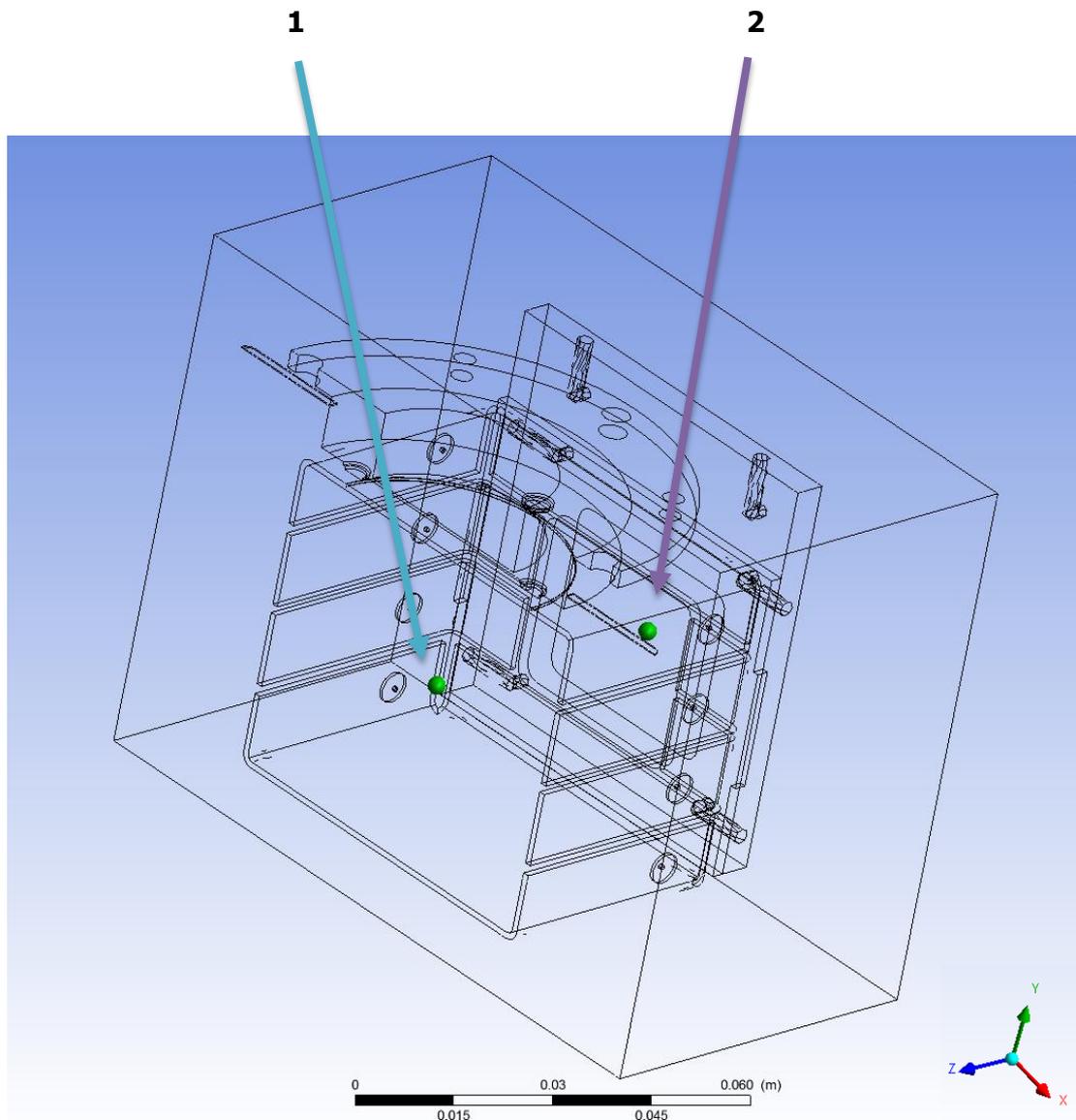
Die darauffolgenden Abbildungen veranschaulichen die Startpunkte.

Der Koordinatenursprung befindet sich exakt mittig in der Baugruppe.

**Tabelle 7: Koordinaten der Partikelstartpunkte**

Nr. des Startpunktes	X-Koordinate [mm]	Y-Koordinate [mm]	Z-Koordinate [mm]
1	5	5	0
2	0	0	50

Die Startpunkte sind in der folgenden Abbildung veranschaulicht. Startpunkt 2 ist der Punkt von dem ausgehend der Elektronenstrahl simuliert wird.



**Abbildung 26: Startpunkte der Partikel - räumliche Darstellung**

**Legende:**

- 1) Startpunkt des Stickstoffion
- 2) Startpunkt des Elektron (Elektronenstrahl)

### 8.1.6.3 Ergebnisse der Partikelflugsimulation

Es werden nachfolgend die Ergebnisse der Partikelflugsimulation dargestellt und ausgewertet. Es folgt die Simulation des Elektronenstrahls.

#### 8.1.6.3.1 Elektronenstrahl

Zunächst sind Parameter aus DP 32 (siehe Tabelle 5) vorgegeben worden. Es ist klar zu sehen, dass der Strahl unmöglich den BPM passieren kann. Er wird zu stark abgelenkt. Zu Anschauungszwecken ist auch ersichtlich, welche Flugbahn Partikel nehmen würden, wenn sie vom Strahl in Baugruppenmitte getroffen würden. Der Abstand der Partikel voneinander bezüglich der Z-Achse ist 5mm. Es wurde hierbei keine Verschiebung bzgl. der X- oder Y-Achse vorgegeben.

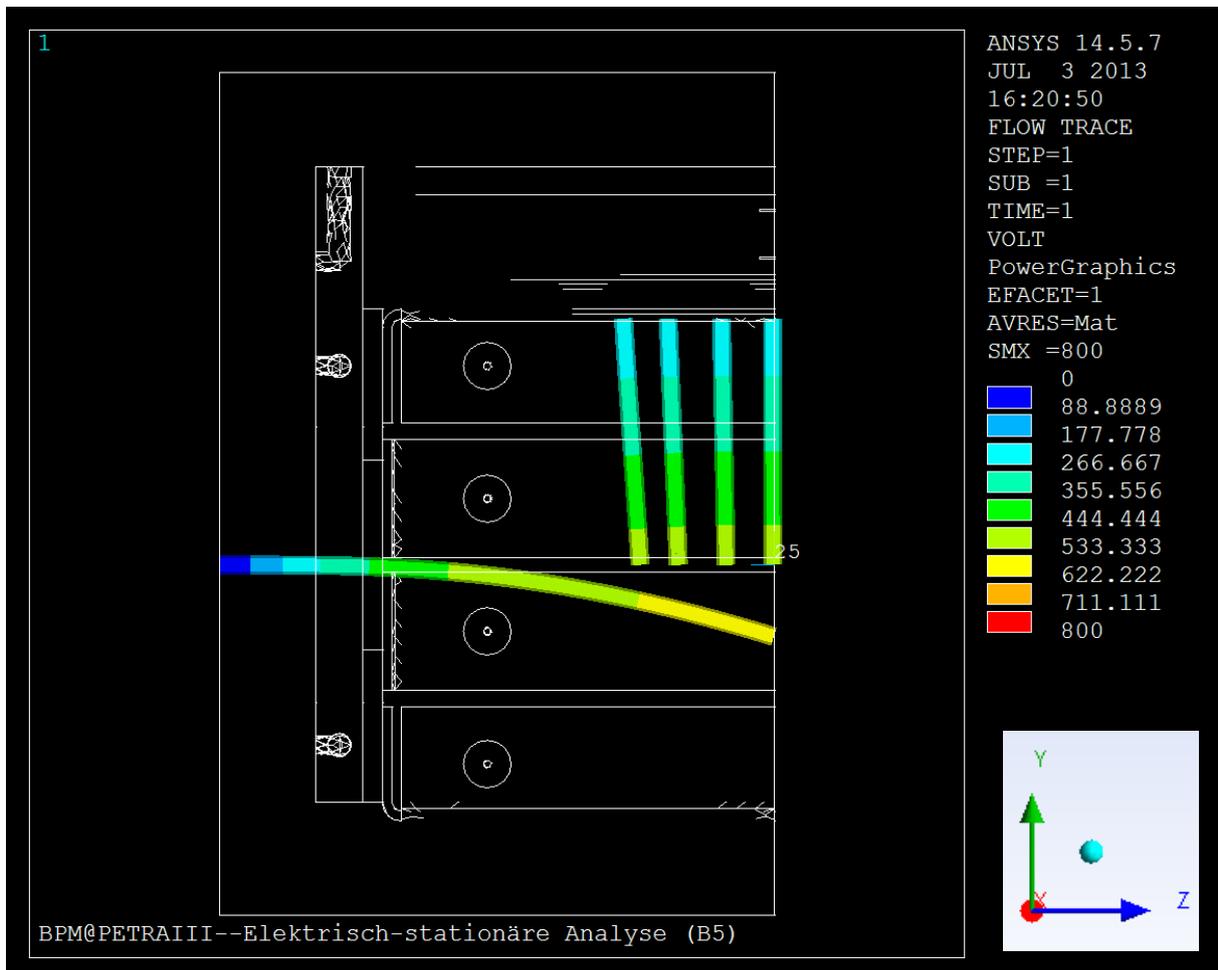
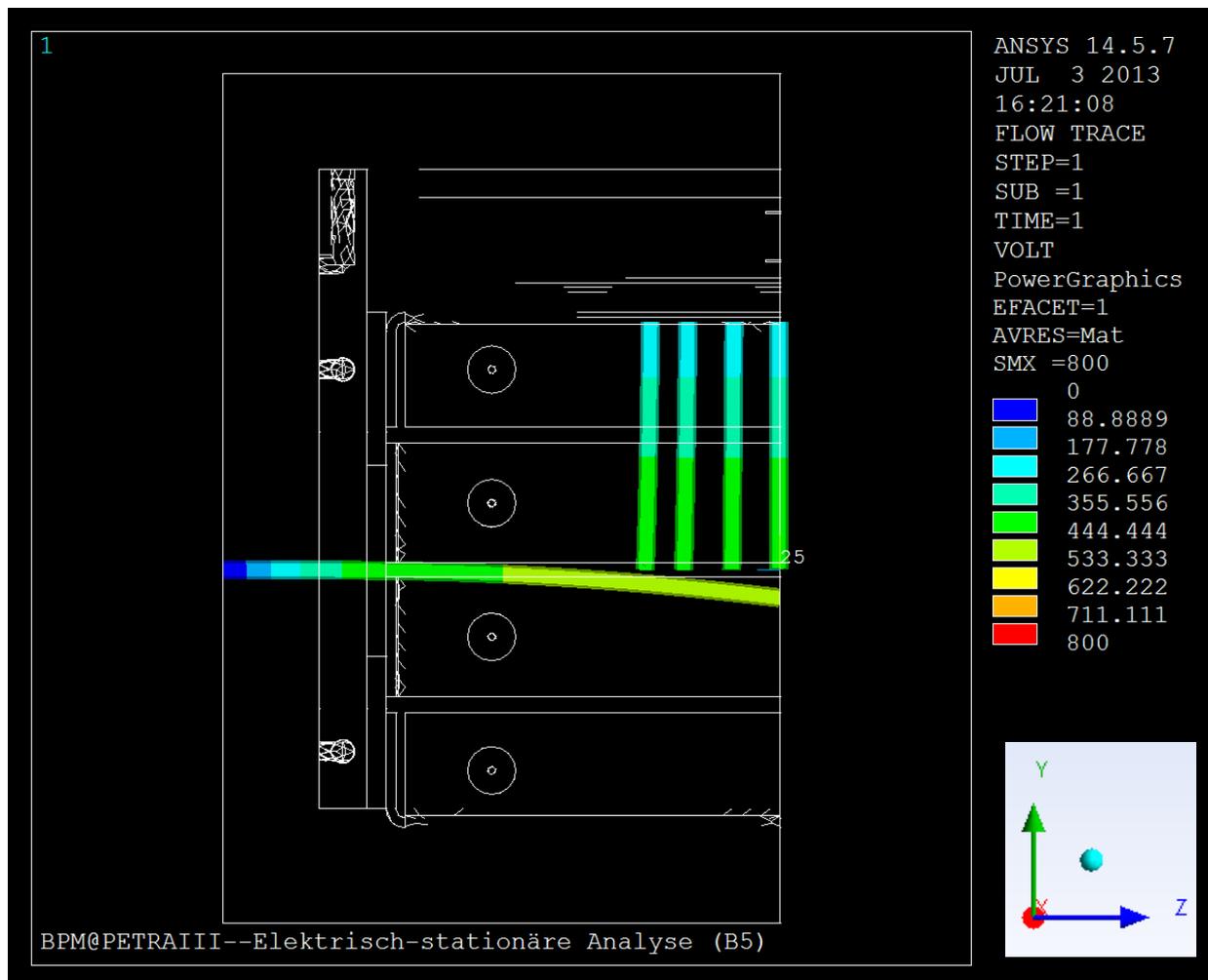


Abbildung 27: Elektronenstrahl DP 32

Die nachfolgende Abbildung zeigt den Strahlverlauf mit den Parametern, die zu einer Abbildung des Strahls führten (siehe 8.1.5). Es wird deutlich, dass der Strahl zwar abgelenkt wird, aber den BPM passieren kann.



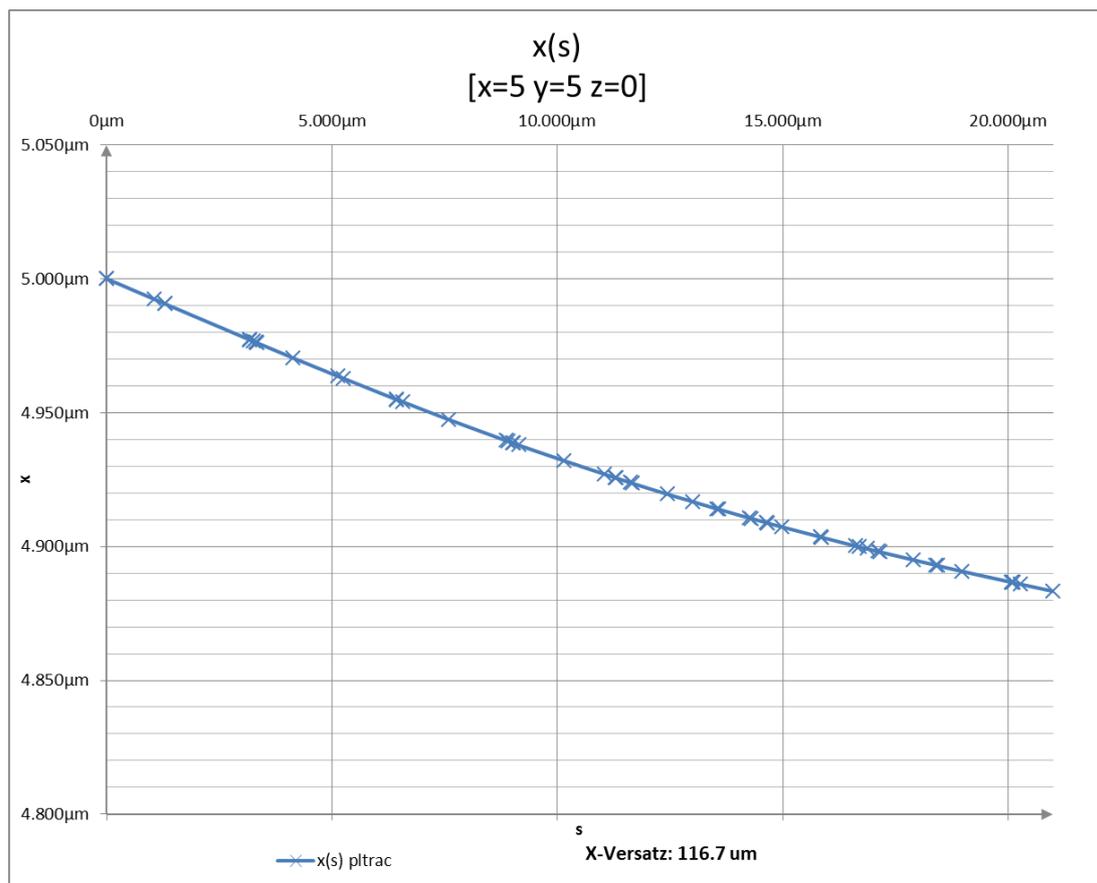
**Abbildung 28: Elektronenstrahl**

Die Elektronenflugbahn spielt nur am Teststand eine Rolle. An Petra III wird der Photonenstrahl nicht vom elektrischen Feld beeinflusst.

### 8.1.6.3.2 Stickstoffionenflugbahn

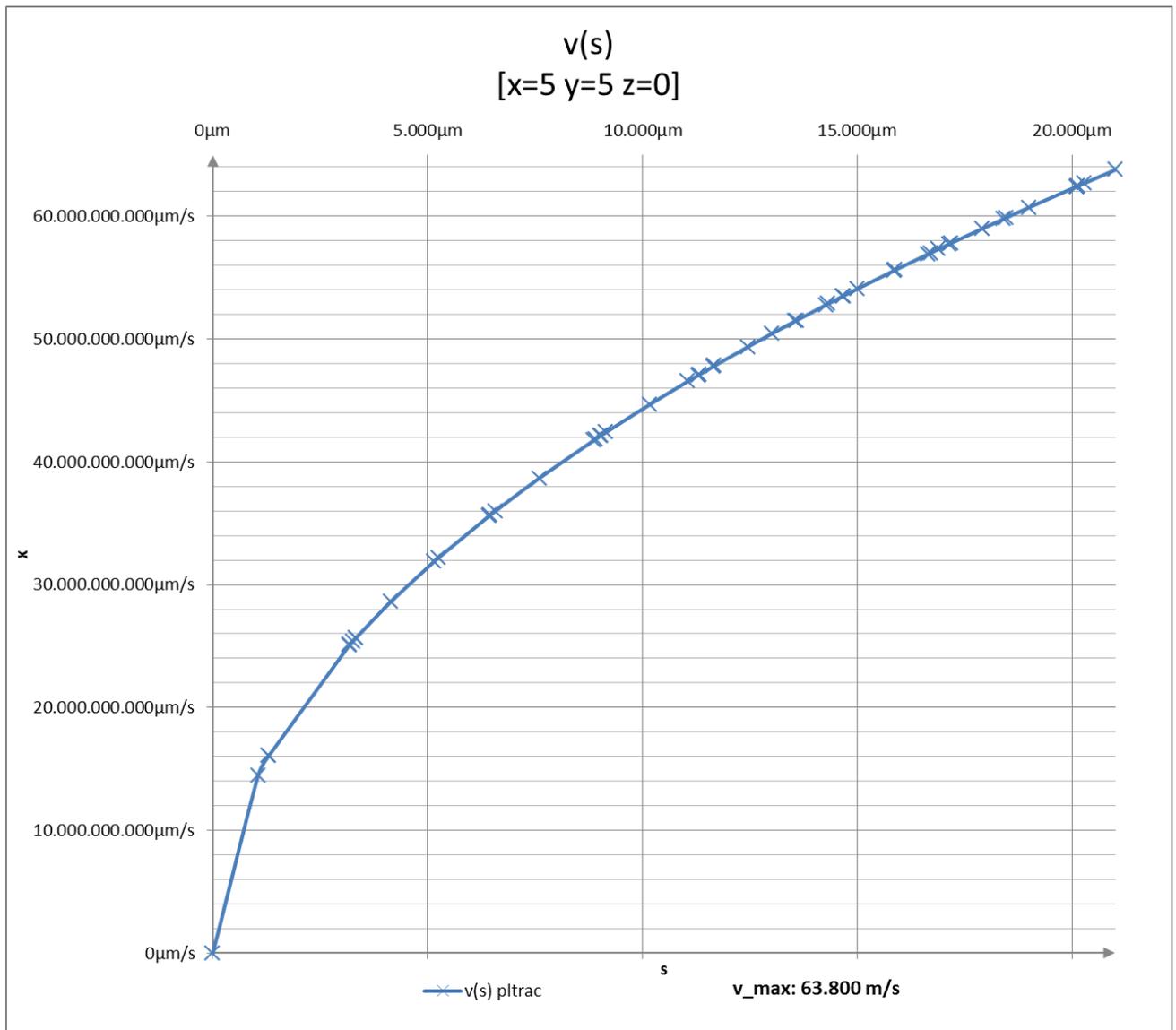
Die Flugbahn der Ionen ist von Belang. Sie bestimmt wesentlich die Genauigkeit des BPM. Graphen zeigen den Verlauf der Flugbahn ( $s$ , zurückgelegter Weg) und der Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeit wird dargestellt, um einen Vergleich mit der manuellen Rechnung aus Kapitel 8.2 zu ermöglichen.

- **X = 5 mm, Y = 5 mm, Z = 0 mm**



**Abbildung 29: Partikelflug eines Stickstoffion - Position**

Ein Versatz in Höhe von 116.7  $\mu\text{m}$  ist als unerfreulich zu bezeichnen. Eine weitere Optimierung des elektrischen Felds ist im aktuellen Zustand allerdings als unwahrscheinlich zu betrachten, da durch die Durchführung der FEM-Rechnungen bereits bestmögliche elektrische Potentialverhältnisse bestimmt wurden. Somit ist hierbei keine grundsätzliche Verbesserung mehr zu erwarten. Die wahre Position kann nur durch eine Interpolation noch genauer bestimmt werden. Hierfür wären weitere Simulationen nötig. Ist die Partikelflugbahn bei unterschiedlichen Strahlpositionen bekannt, so kann eine genauere Positionsbestimmung durch Subtraktion des simulierten Versatzes rekursiv durchgeführt werden.



**Abbildung 30: Partikelflug eines Stickstoffions – Geschwindigkeit**

Die maximale Geschwindigkeit beträgt 63.000 m/s.

## 8.2 Fehlerbetrachtung

Eine FEM-Simulation durchzuführen birgt unzählige Fehlermöglichkeiten in sich. Allein die Einarbeitung in den äußerst komplexen Aufbau des Simulationsprogramms ANSYS benötigt Monate des Selbststudiums und der intensiven Anwendung zur Entwicklung aussagekräftiger Ergebnisse. Auch wegen der Komplexität einer FEM-Analyse ist es in sicherheitsrelevanten Bereichen wie der Luft und Raumfahrttechnik nicht gestattet, Simulationsergebnisse als Grundlage für Konstruktionen zu verwenden, ohne dass ein Prototyp oder äquivalente manuelle Rechnungen die Ergebnisse bestätigen. Schon dies zeigt die Fehleranfälligkeit. Äquivalente Handrechnungen für die nötige Detailtiefe sind in unserem Fall aufgrund der Komplexität des elektrischen Feldes nicht möglich.

Die Einbeziehung der Massenträgheit wird mittels manueller Handrechnung verifiziert. Es ist möglich die Geschwindigkeit eines Ions im elektrischen Längsfeld eines Plattenkondensators manuell auszurechnen. Stimmt die Simulation der Geschwindigkeit und der benötigten Flugzeit mit der manuell berechneten gut überein, so ist dies ein weiterer Hinweis auf deren Glaubwürdigkeit. Nachfolgend wird manuell berechnet, wie lange ein Stickstoffion benötigt, um einen Weg von 210 mm in einem Plattenkondensator des Plattenabstandes 52 mm zurückzulegen. Dies entspricht dem Simulationszustand der bestimmten Partikelflugbahn. Es wird eine Potentialdifferenz von 600V angenommen. Die Spannungsdifferenz zwischen H1 und H4 wies in der Simulation diesen Betrag auf. So sind annähernd gleiche Voraussetzungen an Simulation und manuelle Rechnung gestellt worden.

Gegeben :  $q_{\text{Stickstoff}_2} := 2 \cdot 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{s}$      $U := 600 \text{ V}$   
 $m_{\text{Stickstoff}} := 2.33 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$     Plattenabstand := 0.52m

Schritt 1:  $E := \frac{U}{\text{Plattenabstand}}$      $E = 1153.846 \frac{\text{V}}{\text{m}}$

**Formel 3: Betrag der elektrischen Feldstärke**

Schritt 2:  $F_{\text{Feld}} := (q_{\text{Stickstoff}_2}) \cdot E$      $F_{\text{Feld}} = 3.697 \times 10^{-16} \text{ N}$

**Formel 4: Betrag der elektrischen Kraft**

Schritt 3:  $F_{\text{Feld}_2} := m_{\text{Stickstoff}} \cdot a_{\text{Stickstoff}_2}$

$$a_{\text{Stickstoff}_2} := \frac{F_{\text{Feld}}}{m_{\text{Stickstoff}}}$$

$$a_{\text{Stickstoff}_2} = 1.587 \times 10^{10} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

**Formel 5: Beschleunigung des Ions**

Schritt 4:  $s_{\text{Stickstoff}} := \frac{a_{\text{Stickstoff}_2} \cdot t_{\text{Flug}}^2}{2}$

$$s_{\text{Stickstoff}} := 0.21 \text{ m}$$

$$t_{\text{Flug}_2} := \sqrt{2 \cdot \frac{s_{\text{Stickstoff}}}{a_{\text{Stickstoff}_2}}}$$

$$t_{\text{Flug}_2} = 5.145 \mu\text{s}$$

**Formel 6: Flugzeit**

Schritt 5:  $v_{\text{Stickstoff}_2} := a_{\text{Stickstoff}_2} \cdot t_{\text{Flug}_2}$

$$v_{\text{Stickstoff}_2} = 8.163 \times 10^4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

**Formel 7: Endgeschwindigkeit**

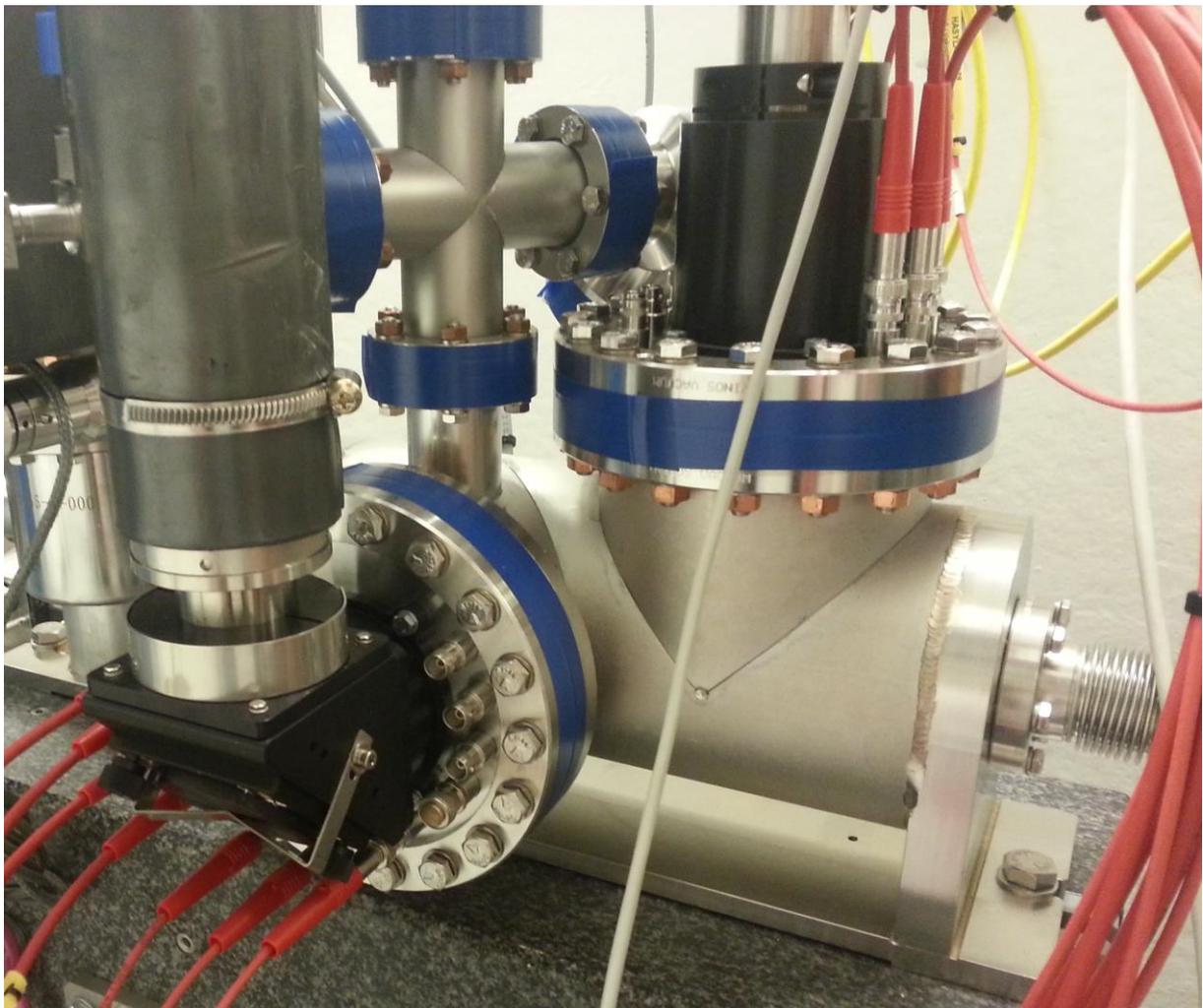
**Abbildung 31: Manuelle Berechnungen zum Stickstoffion**

Die maximale Geschwindigkeit, ermittelt durch die Simulationsrechnung, befindet sich in der gleichen Größenordnung wie die manuelle Handrechnung und somit ist die Simulation verifiziert (siehe 8.1.6.3.2). Eine manuelle Handrechnung führte zu einer Endgeschwindigkeit von 81.630 m/s und die Simulation zu 63.800 m/s.

Außerdem wurde während der Simulation permanent Rücksprache mit der Anwenderbetreuung des Programms ANSYS gehalten um triviale Fehler gar nicht erst auftreten zu lassen. Dies sollte ein Höchstmaß an Sorgfalt und Sicherheit garantieren. Letztendlich kann jedoch nur ein Praxistest die Richtigkeit der Rechnungen beweisen.

## 9 Funktionstest an P4 in Petra III

Die Einbausituation veranschaulicht nachfolgende Abbildung. Die angeschlossenen Geräte sind prinzipiell identisch mit dem Teststand. Lediglich andere Kameras wurden angeschlossen und das verwendete Hochspannungsmodul im MpodC crate ist ein anderes. Dies ist vorerst unwesentlich. Zum Schutz der Kameras vor Strahlung sind sie mit einem Rohr aus Blei ummantelt.



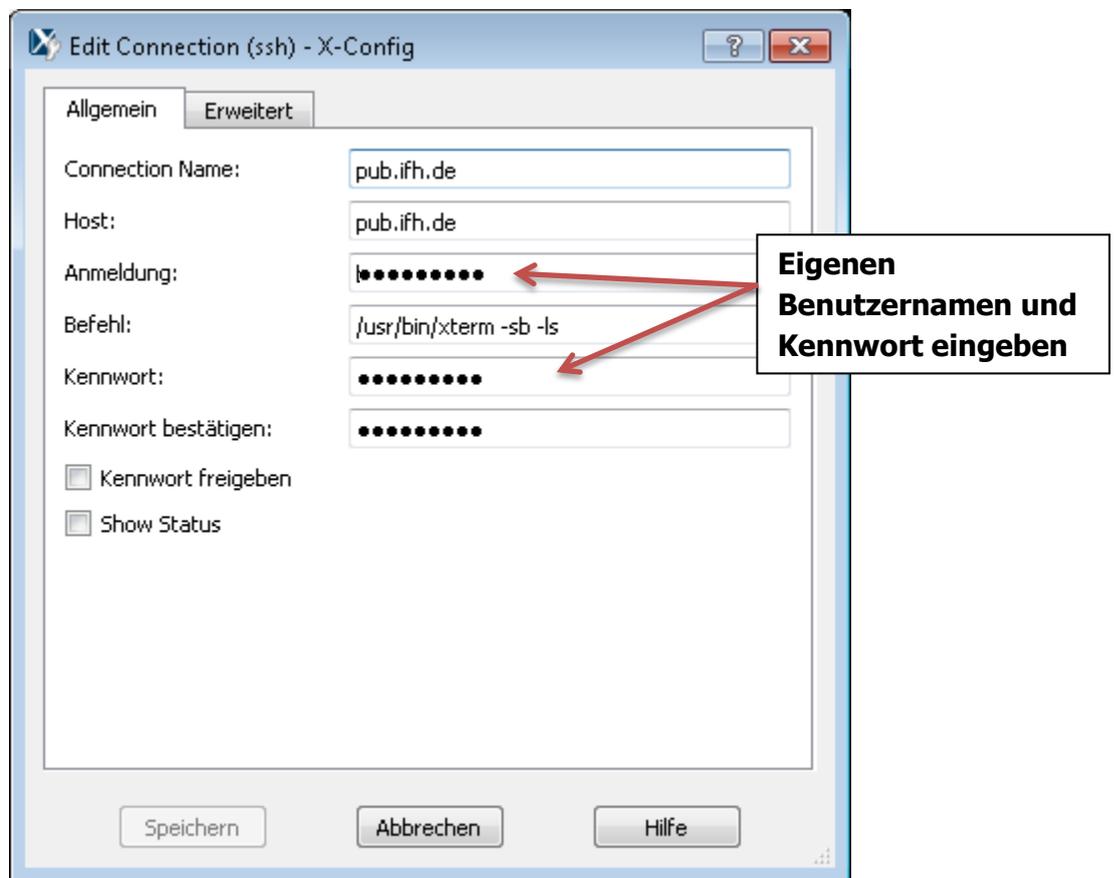
**Abbildung 32: BPM an P4 in PETRAIII**

## 9.1 Zugriff und Steuerung des RGXBPM an P4

Es ist nicht trivial, Zugriff auf alle Steuerungs- und Überwachungssysteme zu erhalten. Deshalb wurden die nachfolgenden kleinen Anleitungen angegeben, sodass auch andere Nutzer des BPM schnell auf alle Funktionen zugreifen können.

### **Spannungskonfiguration mit „TANGO“**

- 1.) XWIN32 installieren
- 2.) XWIN32 wie auf folgender Abbildung erkenntlich konfigurieren und auf starten klicken



- 3.) In der Konsole folgenden Quelltext eingeben
  - „ssh \*\*\*\*\*
  - Passwort eingeben: „\*\*\*\*\*“
  - „jive“
- Benutzernamen und Kennwörter sind an P4 zu erfragen
- 4.) Im Verzeichnisbaum auf folgende Ebene wechseln
  - HVISEG.EHS80 -> Petra-3 -> HVISEG.ES80

5.) Mit einem Doppelklick auf den gewünschten Kanal können die Potentiale verändert werden.

6.) Die Potentiale können unter folgender Seite eingesehen werden.

- <http://haspp04hv.desy.de/>

### **Kamerabildansicht und Konfiguration**

Die folgenden beiden JAVA-Programme herunterladen.

- [Universal Slow Control Client](#)
- [ACOP Video Application \(Hasylab\)](#)
- [http://photon-science.desy.de/research/technical\\_groups/experiment\\_control/tools/index\\_eng.html](http://photon-science.desy.de/research/technical_groups/experiment_control/tools/index_eng.html)

### **Kamerabildansicht mit "ACOP Video Application (Hasylab)"**

1. Folgenden Quelltext in das mittlere Feld eingeben und auf Play drücken

- Horizontale Kamera: `/HASLAB/P04_BPM_1H/Output/Frame.Sched`
- Vertikale Kamera: `/HASLAB/P04_BPM_1V/Output/Frame.Sched`
- In den Ansichteinstellungen auf JET oder PITZ stellen

### **Kamerakonfiguration mit „Universal Slow Control Client“**

- Horizontale Kamera:
  - P04\_BPM\_1H
  - Group: P04
  - Device: P04\_BPM\_1H
  - Description: P04\_BPM\_1H
- Horizontale Kamera:
  - P04\_BPM\_1V
  - Group: P04
  - Device: P04\_BPM\_1V
- video gain: Verstärkung in db
- exposure time: Shutterzeit in Mikrosekunden

Mit der aktuellen Konfiguration des Hochspannungsmoduls im MpodC crate lassen sich die zu testenden Potentialwerte nicht vorgeben. Die oberen beiden Potentialstützstellen H1 und H2 sind an ein negatives Hochspannungsmodul angeschlossen. Um vorerst den Istzustand mit eigenen Potentialen zu beschicken und keine baulichen Veränderungen vorzunehmen werden die eigenen Potentiale leicht angepasst, um mit der aktuellen Konfiguration kompatibel zu werden. Hierzu werden sämtliche eigenen Potentiale einfach um 500 V reduziert, sodass die Potentiale an H1 und H2 negativ werden. Lediglich die Potentialverhältnisse sind relevant für das homogene elektrische Feld. Mit großer Wahrscheinlichkeit wird es zu keinem Strahlabbild kommen, da das Potentialgefälle zwischen H1 und dem MCP nun entgegengesetzt ist zu dem zwischen H4 bis H1. Die Ionen müssten eine sehr hohe kinetische Energie aufweisen, um das ihnen entgegengesetzte Gefälle zu überwinden.

Hierbei werden nun auch die MCP und Schirmspannungen angegeben, da sie bei den verschiedenen Tests divergieren. Die MCP-Spannung bestimmt die Verstärkung. Der Hersteller empfiehlt eine Potentialdifferenz von 2'000 V für optimale Verstärkung. Die Differenz zwischen MCP Out und Schirm darf / sollte maximal 3'000 V laut Hersteller betragen.

Praxistest P4 1 - Randbedingungen (Potentiale):

- |   |                   |
|---|-------------------|
| <b>a)</b> Gehäuse bzw. Randbereich:         | + 0 V             |
| <b>b)</b> Stützstellenebene H4:             | + 300 V           |
| <b>c)</b> Stützstellenebene H3:             | + 51 V            |
| <b>d)</b> Stützstellenebene H2:             | - 49 V            |
| <b>e)</b> Stützstellenebene H1:             | - 300 V           |
| <b>f)</b> Mikrokanalplatten (Input/Output): | + 0 V / + 2'000 V |
| <b>g)</b> Phosphorschirm                    | + 5'000 V         |

Aus früheren Aufzeichnungen, die erst zu einem späten Zeitpunkt der Themenbearbeitung zur Verfügung standen, gingen unkommentierte Potentialkombinationen hervor. Hiervon wollen wir zwei testen. Nachfolgende zwei Randbedingungskombinationen werden hierzu verwendet.

Praxistest P4 2 - Randbedingungen (Potentiale):

<b>a)</b> Gehäuse bzw. Randbereich:	+ 0 V
<b>b)</b> Stützstellenebene H4:	+ 5'000 V
<b>c)</b> Stützstellenebene H3:	+ 3'125 V
<b>d)</b> Stützstellenebene H2:	+ 1'875 V
<b>e)</b> Stützstellenebene H1:	+ 0 V
<b>f)</b> Mikrokanalplatten (Input/Output):	+ 109V / + 1'200 V
<b>g)</b> Phosphorschirm	+ 4'200 V

Praxistest P4 3 - Randbedingungen (Potentiale):

<b>a)</b> Gehäuse bzw. Randbereich:	+ 0 V
<b>b)</b> Stützstellenebene H4:	+ 3'700 V
<b>c)</b> Stützstellenebene H3:	+ 925 V
<b>d)</b> Stützstellenebene H2:	- 925V
<b>e)</b> Stützstellenebene H1:	- 3'700 V
<b>f)</b> Mikrokanalplatten (Input/Output):	- 3'600 V / - 2'400 V
<b>g)</b> Phosphorschirm	+ 600 V

Für den dritten Praxistest werden die eigenen Potentiale aus DP 32 verwendet. Dafür müssen vier Stecker umgesteckt werden (siehe Abbildung 33). Nachfolgendes Schema zeigt die neue Stecker-Konfiguration, die es auch ermöglicht, positive Spannungen an den oberen beiden Potentialstützstellen bereit zu stellen.

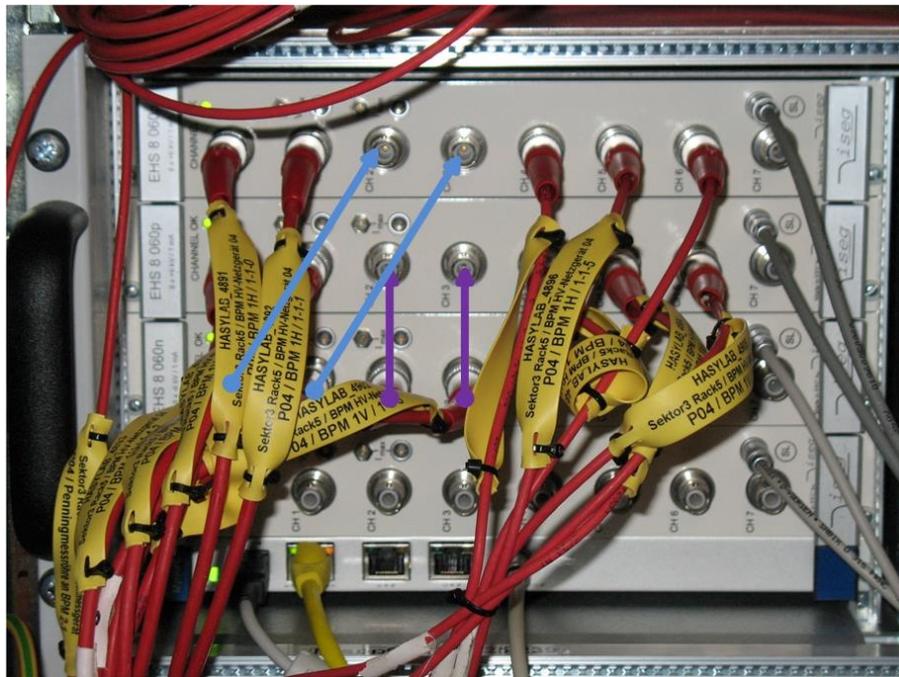
### Pinbelegung des MpodC crate für den RGXBPM an P4 in PETRAIII

**Tabelle 8: Pinbelegung des MpodC crate für den RGXBPM an P4 in PETRAIII**

	<b>BPM Vertikal</b>	<b>BPM Horizontal</b>
Beschreibung	Elektrode Unten	Elektrode Unten
TANGO Nummer	17	25
Übersichtsnummer	200	300
empfohlene Spannung	800 V	800 V
<b> </b>		
Beschreibung	Elektrode Oben-Mitte	Elektrode Oben-Mitte
TANGO Nummer	18	26
Übersichtsnummer	201	301
empfohlene Spannung	559 V	559 V
<b> </b>		
Beschreibung	Elektrode Unten-Mitte	Elektrode Unten-Mitte
TANGO Nummer	19	27
Übersichtsnummer	202	302
empfohlene Spannung	449 V	449 V
<b> </b>		
Beschreibung	Elektrode Unten	Elektrode Unten
TANGO Nummer	20	28
Übersichtsnummer	203	303
empfohlene Spannung	200 V	200 V
<b> </b>		
Beschreibung	MCP-In	MCP-In
TANGO Nummer	21	29
Übersichtsnummer	204	304
empfohlene Spannung	0	0
<b> </b>		
Beschreibung	MCP-Out	MCP-Out
TANGO Nummer	22	30
Übersichtsnummer	205	305
empfohlene Spannung	1800-2000 V	1800-2000 V
<b> </b>		
Beschreibung	Phosphorscreen	Phosphorscreen
TANGO Nummer	23	31
Übersichtsnummer	206	306
empfohlene Spannung	5000 V	5000 V

Diese Vorlage ist so ausgerichtet, dass die Schrift genauso ausgerichtet ist, wie die schriftlichen Bezeichnungen auf den ISEG-Hochspannungsmodulen, welche an Strahlführung P4 im Einsatz sind (siehe Abbildung 33).

Die Spannung am MCP-Out kann im angegebenen Bereich variiert werden. Dieser Wert regelt die Signalverstärkung (Vervielfachung der Elektronen). Treffen zu viele Elektronen auf den Schirm, so wird er beschädigt und letzten Endes zerstört. Bei einer hohen Strahlintensität muss somit eine niedrigere Spannung (z.B. 1'800 V) angelegt werden, als bei einer niedrigen Intensität (z.B. 2'000 V).



**Abbildung 33: Steckerkonfiguration des Hochspannungsmoduls**

Praxistest P4 4 - Randbedingungen (Potentiale):

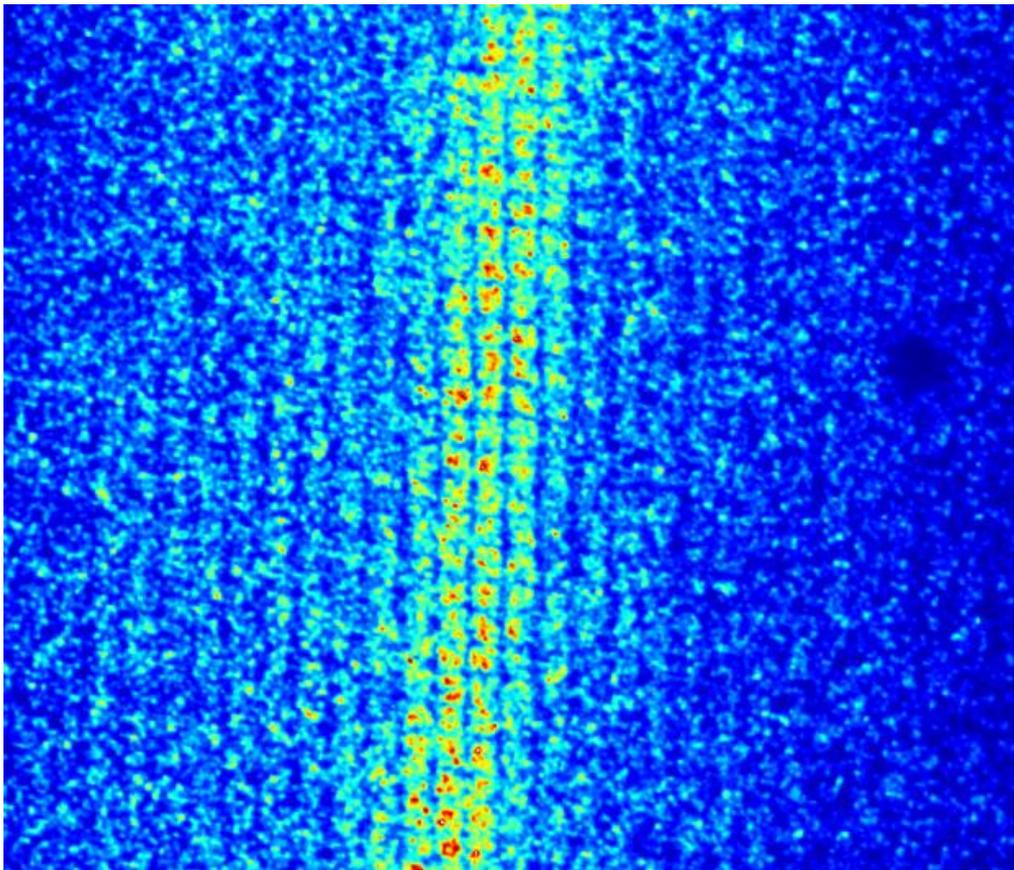
- |   |                   |
|---|-------------------|
| <b>a)</b> Gehäuse bzw. Randbereich:         | + 0V              |
| <b>b)</b> Stützstellenebene H4:             | + 800V            |
| <b>c)</b> Stützstellenebene H3:             | + 551V            |
| <b>d)</b> Stützstellenebene H2:             | + 449V            |
| <b>e)</b> Stützstellenebene H1:             | + 200V            |
| <b>f)</b> Mikrokanalplatten (Input/Output): | + 0 V / + 2'000 V |
| <b>g)</b> Phosphorschirm                    | + 5'000 V         |

## 9.2 Praxistest P4 1, P4 2, P4 3

Erwartungsgemäß führte die Anwendung der Potentiale zu keiner Abbildung des Strahls. Lediglich ein Rauschen war zu erkennen. Eine Abbildung des Bildes ist daher hier nicht sinnvoll.

## 9.3 Praxistest P4 4

Die eigens entwickelten Potentialverhältnisse P4 4 führen zu einer guten und sauberen Abbildung des Strahls (siehe Abbildung 34). Der prophezeite sehr breite Strahl aufgrund der starken Energieunterschiede im Strahl konnte nicht wahrgenommen werden. Ein dünner Strahl ist zu erkennen. Es wurde viel kalibriert und verändert an P4 seit dem Zeitpunkt der letzten Aufnahme, wodurch das Problem offenbar beseitigt wurde. Nähere Angaben konnten allerdings nicht ermittelt werden. Die Strahlbreite beträgt in etwa 2mm. Die exakte Parameterbestimmung folgt im nachfolgenden Kapitel 10. Die Belichtungszeit beträgt 50 ms und die Verstärkung 4 db.



**Abbildung 34: Strahlabbild mit BPM Potentialen +800V, +551V, +449V, +200V, +0V, +2000V, +5000V,**

Gut erkennbar ist das grobmaschige Gitter.

## 10 Bestimmung des Strahlprofil

In diesem Kapitel werden die Strahlparameter bestimmt. Es wird nur der horizontal ausgerichtete BPM ausgewertet, da die Kamera des vertikalen zum einen nicht zur Mitte des Strahlrohrs ausgerichtet ist und zum anderen auch der Kamerafokus nicht auf den Schirm gelegt wurde, was wiederum zu einem unscharfen Bild führt.

In nachfolgender Abbildung 35 sind die statistischen Werte und Verteilungen mit abgebildet. Zur optimalen Bestimmung der Standardabweichung und der Strahlmittelpunklage wurde der markierte Bereich ausgewählt und dort die jeweiligen Werte bestimmt. Dies ist notwendig, da die Kamera etwas schief ausgerichtet ist, aber in diesem kleinen Bereich sich diese Schiefelage weniger bemerkbar macht. Die Auswahl ist auch in der Intensitätsverteilung an den Seitenrändern erkennbar. Es wird angenommen, dass die Kamera auf die Mitte des Strahlrohres ausgerichtet ist. Somit entspricht die Mitte des Bilde, auch der Mitte des Rohres. Die Mitte wird als Koordinatenursprung angenommen um absolute Werte zum Strahlversatz zu erhalten. Die Intensität des Strahls ist durch die Lichtstärke des Phosphorschirms ableitbar. Eine Kalibrierung würde zu absoluten Werten führen.

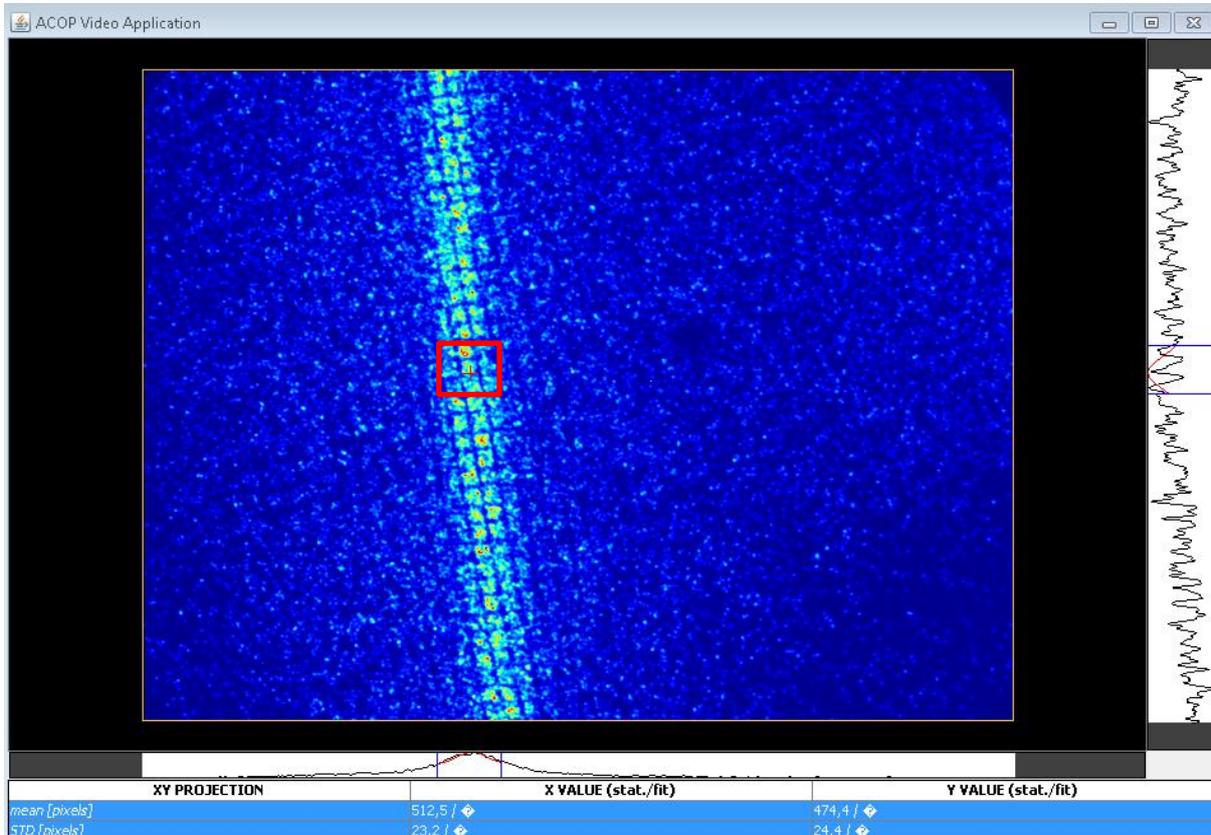


Abbildung 35: Bild mit statischen Werten zur Strahlparameterbestimmung

Nachfolgend werden diese Werte nochmals aufbereitet. Es ist für exakte Werte künftig zu prüfen, wie die Kameras ausgerichtet sind und der Fokus eingestellt ist. Bei der nächsten Wartungsperiode von PETRAIII wird eine Justierung durchgeführt werden.

**Tabelle 9: Bestimmung der Strahlparameter**

**RGXBPM Horizontal**

Breite des Bildes	1'360.00	Pixel
Strahlmittelpunktlage	512.50	Pixel
Standardabweichung (im gewählten Bereich)	23.20	Pixel
Bildmittelpunkt (angenommener Strahlrohrmittelpunkt)	680.00	Pixel
Strahlmittelpunktlage	-167.50	Pixel
Maschenbreite [ $\mu\text{m}$ ]	478.00	$\mu\text{m}$
Drahtdurchmesser [ $\mu\text{m}$ ]	30.00	$\mu\text{m}$
Breite Masche + an jeder Seite Hälfte des Drahtes [ $\mu\text{m}$ ]	508.00	$\mu\text{m}$
[Pixel]	24.00	Pixel
1 Pixel entspricht	21.17	$\mu\text{m}$
<b>Strahlmittelpunktlage</b>	3'545.42	$\mu\text{m}$ <b>-3.55 mm</b>
<b>Standardabweichung</b>	491.07	$\mu\text{m}$ <b>0.49 mm</b>
<b>Strahlbreite</b>	rund	2.50 Maschen 60.00 Pixel 1'270.00 $\mu\text{m}$ <b>1.27 mm</b>

## 11 Ergebnisse

Durch Verwendung der folgenden Potentiale konnte eine Abbildung des Photonenstrahls an Strahlführung P4 erzielt werden.

<b>a)</b> Stützstellenebene H4:	+ 800V
<b>b)</b> Stützstellenebene H3:	+ 551V
<b>c)</b> Stützstellenebene H2:	+ 449V
<b>d)</b> Stützstellenebene H1:	+ 200V
<b>e)</b> Mikrokanalplatten (Input/Output):	+ 0 V / + 2'000 V
<b>f)</b> Phosphorschirm	+ 5'000 V

Nachfolgende Strahlparameter konnten am RGXBPM Horizontal bestimmt werden.

- Strahlmittelpunktlage: - 3.55 mm
- Standardabweichung: + 0.49 mm
- Strahlbreite: + 1.27 mm

## 12 Auswertung & Ausblick

Die gestellte Aufgabenstellung wurde im vollen Umfang erfüllt. Ein voll funktionstüchtiger Teststand wurde aufgebaut und für den Betrieb an PETRAIII eine FEM-Simulation durchgeführt, um optimale Potentiale herauszufinden und so eine gute Abbildung des Photonenstrahls zu erlangen. Vom Entwickler vorgegebene Werte stellten sich als unbrauchbar heraus. Mit durch Simulationsrechnungen optimierten Potentialen wurde die Funktionstüchtigkeit der RGXBPM vollständig wiederhergestellt. Die Position des Photonenstrahls an P4 kann nun live nachverfolgt werden, was für Experimente von unschätzbarem Wert ist. Die Ergebnisse der Strahlmittelpunktbestimmung sind mit Vorsicht zu betrachten, da die Kamera nicht gerade zum Strahl ausgerichtet ist. Die Simulation des Elektronenstrahls zeigt anschaulich den grundsätzlichen Unterschied von einem Photonenstrahl zu einem Elektronenstrahl. Eine Anleitung zum einfachen Konfigurieren des BPMs und der Kameras wurde erstellt und bereitgestellt.

Die Systemanalyse zeigte weiteres Optimierungspotential. Zum einen kann ein schnellerer Phosphorschirm verwendet werden, um das Rauschen zu verringern. Er ist bereits bestellt und wird in Kürze Tests unterzogen. Zum anderen sollten Versuche unternommen werden, die Auslese von analog zu digital umzurüsten. Halbleiterdetektoren sind Stand der Technik und hausintern ist das KnowHow vorhanden, um diese einzusetzen. Hierzu sind erste Vorbereitungen im Gange. Naheliegend ist vorerst der Austausch des Phosphorschirms. Weiterhin zeigt die Systemanalyse in einfacher Art und Weise den Aufbau des BPM. Auch Außenstehende können so leicht und unkompliziert den Aufbau und die Funktionsweise verstehen.

## 13 Literatur- & Quellenverzeichnis

[1] Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 3, S. 1000

- Bergmann/Schaefer
- ISBN 3-11-017081-7

[2] Beschreibung des DESY

- [http://www.desy.de/ueber\\_desy/index\\_ger.html](http://www.desy.de/ueber_desy/index_ger.html)
- Download vom 04.12.2012

[3] Luftfoto DESY Standort Hamburg

- [http://www.desy.de/sites2009/site\\_www-desy/content/e421/e55046/e55047/e66543/2009-06-17\\_Luftfoto-DESY-009\\_mit\\_Lichtquellen\\_ger.jpg](http://www.desy.de/sites2009/site_www-desy/content/e421/e55046/e55047/e66543/2009-06-17_Luftfoto-DESY-009_mit_Lichtquellen_ger.jpg)
- Download vom 26.02.2013

[4] Funktionsweise eines Ablenkmagnetes

- [http://www.psi.ch/media/ImageBoard/igp\\_1024x640%3e\\_Synchrotronlicht.jpg](http://www.psi.ch/media/ImageBoard/igp_1024x640%3e_Synchrotronlicht.jpg)
- Download vom 26.02.2013

[5] Beschreibung PETRAIII

- <http://petra3.desy.de/>
- Download vom 26.02.2013

[6] Beschreibung der Funktionsweise einer mehrstufigen Röntgenstrahlungsquelle

- <http://www.psi.ch/media/die-synchrotron-lichtquelle-schweiz-sls>
- Download vom 26.02.2013

[7] Definition Röntgenstrahlung

- Brockhaus Enzyklopädie
- 19. Auflage, Band 18, Seite 549-550

[8] Abbildung der linken Hand

- [http://bbstphysik12.files.wordpress.com/2010/12/linke\\_hand\\_regel\\_schema.jpg](http://bbstphysik12.files.wordpress.com/2010/12/linke_hand_regel_schema.jpg)
- Download vom 28.02.2013

[9] Funktionsweise eines Undulators

- [http://www.spring8.or.jp/en/facilities/bl/light\\_source\\_optics/sources/insertion\\_device/1undprinciple.png](http://www.spring8.or.jp/en/facilities/bl/light_source_optics/sources/insertion_device/1undprinciple.png)
- Download vom 28.02.2013

- [10] Bau, Entwicklung und Erprobung eines Restgasionendetektors zur Bestimmung der Strahlparameter an einem Freien Elektronen Laser (FLASH)
- Diplomarbeit von André Hofmann zur Erlangung des akademischen Grades Diplom-Physiker
  - 2006
- [11] Abbildungen und Erläuterungen zur Mikrokanalplatte
- PROXITRONIC Funk GmbH & Co.KG  
Robert Bosch Straße 34  
64625 Bensheim
- [12] Brockhaus Enzyklopädie
- 19. Auflage, Band 23, Seite 30
- [13] Vacuum Technology Know How - Pfeiffer-Vacuum
- <http://homepages.thm.de/~hg8831/vakuumschule/pfeiffer-vacuum-tech-d.pdf>
  - Download vom 23.11.2012
- [14] Datenblatt MACOR Glaskeramik
- <http://www.industrie-keramik.de/index1.htm>
  - Download vom 03.12.2012
- [15] Formelsammlung
- [http://www.formel-sammlung.de/physik/wertetabellen/permittivitaetszahl\\_permeabilitaetszahl.htm](http://www.formel-sammlung.de/physik/wertetabellen/permittivitaetszahl_permeabilitaetszahl.htm)
  - Download vom 03.12.2012
- [16] Beschreibung von FLASH
- [http://www.desy.de/forschung/anlagen/flash/index\\_ger.html](http://www.desy.de/forschung/anlagen/flash/index_ger.html)
  - Download vom 04.12.2012
- [17] Brockhaus Enzyklopädie
- 19. Auflage, Band 07, Seite 31
- [18] Präsentation von Horst Schulte-Schrepping zum RGBPM
- 2010
  - Nicht Öffentlich zugänglich
- [19] Vorlesungsunterlagen zum Studienfach Mechanik Design 2
- Prof. Wolfram Runge
  - Sommersemester 2010
- [20] VDI 2222, Bl. 1

- [21] P04 Variable Polarization XUV Beamline Parameter
- [http://photon-science.desy.de/facilities/petra\\_iii/beamlines/p04\\_xuv\\_beamline/index\\_eng.html](http://photon-science.desy.de/facilities/petra_iii/beamlines/p04_xuv_beamline/index_eng.html)
  - Download vom 06.05.2013
- [22] Polarisationsmodi
- <http://scienceblogs.de/astrodicticum-simplex/wp-content/blogs.dir/28/files/2012/06/i-897a5d594e065d9046b61bb92a8d3d02-polarisation.png>
  - Download vom 06.05.2013
- [23] Definition Polarisierung
- Brockhaus Enzyklopädie
  - 19. Auflage, Band 17, Seite 280-281
- [24] Definition FEM
- Brockhaus Enzyklopädie
  - 19. Auflage, Band 07, Seite 31
- [25] Vacuum Technology Know How - Pfeiffer-Vacuum
- <http://homepages.thm.de/~hg8831/vakuumschule/pfeiffer-vacuum-tech-d.pdf>
  - Download vom 23.11.2012
- [26] Brockhaus Enzyklopädie
- 19. Auflage, Band 23, Seite 30
- [27] Datenblatt MACOR Glaskeramik
- <http://www.industrie-keramik.de/index1.htm>
  - Download vom 03.12.2012
- [28] Formelsammlung
- [http://www.formelsammlung.de/physik/wertetabellen/permittivitaetszahl\\_permeabilitaetszahl.htm](http://www.formelsammlung.de/physik/wertetabellen/permittivitaetszahl_permeabilitaetszahl.htm)
  - Download vom 03.12.2012
- [29] Photoionisation
- VUV AND SOFT X-RAY PHOTOIONIZATION
  - ISBN 9781461379935
  - Seite 142
- [30] Halbleiterdetektor
- Detektoren für Teilchenstrahlung

- ISBN 3-8351-0058-0
- Seite 95

[31] Brockhaus Enzyklopädie

- 19. Auflage, Band 24, Seite 252

## 14 Anhang

### Anhangverzeichnis

Anhang A:	Abkürzungsverzeichnis .....	81
Anhang B:	Verzeichnis der Verwendeten Formelzeichen .....	82
Anhang C:	Abbildungsverzeichnis .....	83
Anhang D:	Tabellenverzeichnis.....	84
Anhang E:	Formelverzeichnis .....	85
Anhang F:	Quelltext für Bestimmung der Partikelflugbahn .....	86
Anhang G:	DESY-Werksnormen.....	90
Anhang H:	Allgemeine Normen .....	93

## Anhang A: Abkürzungsverzeichnis

DP = Datenparametersatz

RGXBPM = BPM = IPM = Ionisationsprofilmonitor = Restgasdetektor

FEL = Freier Elektronen Laser

MCP = Mikrokanalplatte

Partikel = Teilchen = geladene Atome d.h. Ionen und zusätzlich Elektronen

Elektron = e

Stickstoff 2+ =  $N^{2+}$  = zweifach positiv geladenes Stickstoffion

UHV = Ultrahochvakuum

CAD-Modell = computer-aided design-modell

FEM = Finite Elemente Methode

## **Anhang B: Verzeichnis der Verwendeten Formelzeichen**

p: Druck

s: Weg (der Partikelflugbahn)

B: Brillianz

t: Zeit

$d\Omega$ : Raumwinkel

$\sigma$ : Wirkungsquerschnitt

E: Energie

m: kg

v: Geschwindigkeit

q: Ladung

a: Beschleunigung

## Anhang C: Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anlagen zur Erzeugung von Röntgenstrahlung am DESY-Standort Hamburg (nach [3]).....	4
Abbildung 2: Schematischer Ablauf der Entstehung, Führung & Nutzung der Röntgenstrahlung.....	7
Abbildung 3: Lorentz-Kraft (nach [4], [8], [9]).....	9
Abbildung 4: Entstehung der Röntgenstrahlung (nach [9]).....	10
Abbildung 5: Polarisationsmodi [nach 22].....	14
Abbildung 6: Wirkungsquerschnitt von Helium bei unterschiedlichen Wellenlängen [29] .....	16
Abbildung 7: Aufbau und Funktionsweise des RGXBPM .....	18
Abbildung 8: Vorderansicht des BPM-Einsatzes .....	19
Abbildung 9: Seitenansicht des BPM-Einsatzes .....	19
Abbildung 10: Funktionsweise eines MCP [15] .....	20
Abbildung 11: Aufbau eines MCP [14] .....	20
Abbildung 12: Strahlabbild auf dem Phosphorschirm [18] .....	21
Abbildung 13: Abstrakte Darstellung des BPM.....	25
Abbildung 14: Gesamtfunktion des BPM .....	26
Abbildung 15: Funktionsstruktur des BPM.....	27
Abbildung 16: Silizium Streifendetektor [30] .....	30
Abbildung 17: Struktur des Teststandes .....	33
Abbildung 18: Foto des Teststandes.....	34
Abbildung 19: Potentialverteilung im Schnitt durch XY-Ebene, Partikelflugrichtung in positive Y-Achse (1).....	37
Abbildung 20: Potentialverteilung im Schnitt durch XY-Ebene, Partikelflugrichtung in positive Y-Achse (2).....	38
Abbildung 21: Elektrische Feldstärke im Schnitt durch XY-Ebene, Partikelflugrichtung in Richtung positiver Y-Achse .....	40
Abbildung 22: Strahlbild bei 0V – 250V – 350V – 600V .....	45
Abbildung 23: Strahlbild bei 200 V – 449 V – 551 V – 800 V.....	50
Abbildung 24: 200 V – 500 V – 800 V – 500 V .....	51
Abbildung 25: Randbedingungen für Partikelflug .....	54
Abbildung 26: Startpunkte der Partikel - räumliche Darstellung .....	56
Abbildung 27: Elektronenstrahl DP 32 .....	57
Abbildung 28: Elektronenstrahl .....	58
Abbildung 29: Partikelflug eines Stickstoffion - Position.....	59
Abbildung 30: Partikelflug eines Stickstoffions – Geschwindigkeit.....	60
Abbildung 31: manuelle Berechnungen zum Stickstoffion .....	62
Abbildung 32: BPM an P4 in PETRAIII .....	64
Abbildung 33: Steckerkonfiguration des Hochspannungsmoduls .....	70
Abbildung 34: +800V +551V +449V +200V +0V +1900V +5000V .....	71
Abbildung 35: Bild mit Statischen Werten zur Strahlparameterbestimmung .....	72

## Anhang D: Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Strahlparameter .....	12
Tabelle 2: Anforderungsliste [nach 19, 20] .....	22
Tabelle 3: Erläuterungen zur Funktionsstruktur .....	28
Tabelle 4: Komponenten der elektrischen Feldstärke 1 .....	42
Tabelle 5: Komponenten der elektrischen Feldstärke 2 .....	47
Tabelle 6: Massen und Ladungen berücksichtigter Partikel .....	55
Tabelle 7: Koordinaten der Partikelstartpunkte.....	55
Tabelle 8: Pinbelegung des MPOD für den RGXBPM an P4 in PETRAIII.....	69
Tabelle 9: Bestimmung der Strahlparameter .....	73

## Anhang E: Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung des Betrags / Vergleichswertes.....	41
Formel 2: Berechnung der Elektronengeschwindigkeit .....	55
Formel 3: Betrag der elektrischen Feldstärke .....	62
Formel 4: Betrag der elektrischen Kraft .....	62
Formel 5: Beschleunigung des Ions.....	62
Formel 6: Flugzeit .....	62
Formel 7: Endgeschwindigkeit .....	62

## Anhang F: Quelltext für Bestimmung der Partikelflugbahn

!FILE,file,RTH !file.rth öffnen und als \*.rst erkennen

set,last !den letzten lastschritt nutzen, alternativ 1,2,3,...

/UNITS,umks

LOCAL, 99, 0, 0, -6.7968e-018, -0.111, 0, 90, 180,,

csys,25

!	X[ $\mu\text{m}$ ]	Y[ $\mu\text{m}$ ]	Z[ $\mu\text{m}$ ]	VX[ $\mu\text{m/s}$ ]	VY[ $\mu\text{m/s}$ ]	VZ[ $\mu\text{m/s}$ ]	CHRG[pC]	MASS[kg]	
---	--------------------	--------------------	--------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	----------	----------	--

!Stickstoff 2+

!XY-Verschiebung

TRPOIN,	+0.5e4,	-0.5e4,	+0.0e4,	0,	-0.981e6,	0,	3.204E-07,	2.32587E-26	!5mm
---------	---------	---------	---------	----	-----------	----	------------	-------------	------

!Z-Verschiebung

TRPOIN,	0.0e4,	0.0e4,	+0.5e4,	0,	-0.981e6,	0,	3.204E-07,	2.32587E-26	!5mm
---------	--------	--------	---------	----	-----------	----	------------	-------------	------

TRPOIN,	0.0e4,	0.0e4,	+1.0e4,	0,	-0.981e6,	0,	3.204E-07,	2.32587E-26	!10mm
---------	--------	--------	---------	----	-----------	----	------------	-------------	-------

TRPOIN,	0.0e4,	0.0e4,	+1.4e4,	0,	-0.981e6,	0,	3.204E-07,	2.32587E-26	!14mm
---------	--------	--------	---------	----	-----------	----	------------	-------------	-------

!Elektronenstrahl

TRPOIN,	0.0e4,	0.0e4,	+5.5e4,	0,	4.19369E+13,	0,	-1.602E-07,	9.11E-31	!0mm
---------	--------	--------	---------	----	--------------	----	-------------	----------	------

PLTRAC, ELEC, VOLT,,,,,,,,,

TRTIME,,, 0, 1.0e3, 1e4



PATH,N-Z-10,npts,9,1  
PAPUT,TRACPOIN,POINTS  
PAPUT,TRACDATA,TABLES  
PAPUT,TRACLABL,LABELS  
!PRPATH,S,T\_TRACE,VX\_TRACE,VY\_TRACE,VZ\_TRACE,VS\_TRACE

PLTRAC, ELEC, VOLT, , 4, , , , , ,

\*get,npts,PARM,TRACPOIN,DIM,x

PATH,N-Z-14,npts,9,1  
PAPUT,TRACPOIN,POINTS  
PAPUT,TRACDATA,TABLES  
PAPUT,TRACLABL,LABELS  
!PRPATH,S,T\_TRACE,VX\_TRACE,VY\_TRACE,VZ\_TRACE,VS\_TRACE

PLTRAC, ELEC, VOLT, , 5, , , , , ,

\*get,npts,PARM,TRACPOIN,DIM,x

PATH,E-beam,npts,9,1  
PAPUT,TRACPOIN,POINTS  
PAPUT,TRACDATA,TABLES  
PAPUT,TRACLABL,LABELS

PASAVE, all, PLTRAC, PATH,

!PRPATH,S,T\_TRACE,VX\_TRACE,VY\_TRACE,VZ\_TRACE,VS\_TRACE  
!TRPOIN, -5.0e-2, 0.0e-2, 0.0e-2, 1e5, 1e5, 0, 1.602E-07, 9.11E-31  
!PLTRAC, ELEC, VOLT, , , , , , , ,

/out,liste,txt

trplis,,loc

/out

!-> über \*.parm paramter übergeben und ausgeben

## Anhang G: DESY-Werksnormen

### Vakuum 005 DESY UHV Richtlinien 1-5 final stamp

## 1 Allgemeine Informationen

### 1.1 Einleitung

Ein effektiver und fehlerfreier Betrieb von Strahlführungssystemen an Beschleunigern und deren Experimenten ist eng verbunden mit dem Einhalten der Bedingungen für Ultrahochvakuum (UHV). Das vorliegende Merkblatt enthält Richtlinien, Regeln und wichtige Hinweise für die Konstruktion, den Bau, die Reinigung, notwendige Abnahmetests und die Handhabung von UHV-Komponenten, die in die Vakuumsysteme der Strahlführungen für Teilchen und Photonen sowie die Schnittstellen zu den Experimenten bei DESY eingebaut werden sollen.

Abweichungen von den hier aufgeführten Richtlinien sind vor Durchführung der entsprechenden Schritte mit den DESY Fachgruppen MVS bzw. FS-BT abzustimmen.

### 1.2 Materialien

Für die Fertigung der Vakuumbauteile dürfen nur UHV-gerechte Ausgangsmaterialien verwendet werden. Eine Auswahl geeigneter und nicht geeigneter Werkstoffe für Anwendungen im UHV ist in der Tabelle 1 zusammengestellt. Bei Komponenten aus austenitischem Stahl, im Folgenden als Edelstahl bezeichnet, für Teilchen-Strahlführungen ist auf den Ni-Gehalt bzw. die Permeabilität zu achten. Eine abweichende Materialauswahl ist nur mit Zustimmung mit den DESY Fachgruppen MVS bzw. FS-BT vor Fertigungsbeginn zulässig.

	Geeignete UHV-Materialien	Ungeeignete UHV-Materialien
reine Materialien	Aluminium Indium Kupfer Molybdän Silizium Tantal Titan Wolfram	Zink Kadmium Blei
Edelstahl	<i>bevorzugte Typen sind:</i> 1.4429 1.4435 1.4404 (siehe auch DESY Material Spezifikationen Vakuum 002/2008, Vakuum 003/2008 und Vakuum 006/2009)	
Legierungen	Geeignete Aluminiumlegierungen AMPCO® 18 Kupfer-Beryllium DENSIMET® INCONEL® 600 oder 718 Mu-Metal Zinn-Bronze (z. B. CuSn 8) GLIDCOP®	Legierungen mit: Zink (z.B. Messing) Blei
Isolatoren	<i>bevorzugte Typen sind:</i> Aluminium Keramik Macor* Saphir	Organische Materialien (mit einigen Ausnahmen)

Tabelle 1: Auswahl von geeigneten und ungeeigneten UHV-Materialien.

\* für Anwendungen in Beschleunigern nur nach Rücksprache mit der DESY Fachgruppe MVS

## 2.2 UHV-gerechte Reinigung

- Vorreinigung z.B. mit einem Hochdruckreiniger zur Beseitigung grober Verschmutzungen.
- Reinigung im Ultraschall (US) Bad: Durchfließendes Heißwasserbad mit deionisiertem Wasser unter Zusatz eines Reinigungsmittels für rückstandsfreie Entfettung. Das verwendete Reinigungsmittel muss dem zu reinigenden Werkstoff angepasst werden.
- Schallzeit z.B. 3 bis 6 Mal 5 min unterbrochen durch kurze Spülungen (min. 1 Minute)
- Beispiele für Reinigungsmittel:
  - Edelstahl / Kupfer: 1% Tickopur R33 bei 50°C und 1.5% Elma Clean 115c bei 65°C;
  - Aluminium: 2-5% P3 Almeco 18 bei 65°C (Oxidentfernung).
- Gründliches Spülen mit heißem (50°C) deionisiertem Wasser.
- Zügige Trocknung in staubarmer und kohlenwasserstofffreier Atmosphäre (z.B. trockene Luft).
- Alternativ kann für kleinere Teile eine Laborwaschmaschine verwendet werden.
- Nach der Reinigung:
  - ist vakuumseitig jegliche Kontamination z.B. durch Schmieren, Einölen und/oder Einfetten, auch zum Lecksuchen, verboten.
  - Ist zum Abwischen z.B. der Flansche nur Isopropanol zu verwenden.
- Gereinigte Teile vakuumseitig nur noch mit sauberen, fusselreifen Handschuhen anfassen.

## 2.3 Vakuumprüfungen

Alle Vakuumprüfungen sind UHV-seitig nur kohlenwasserstofffrei auszuführen.

### 2.3.1 Leckprüfung

- Die integrale Leckrate (Summe aller Lecks) muss  $\leq 1 \cdot 10^{-10}$  mbar·l·sec<sup>-1</sup> sein.
- Nach der Montage nicht mehr zugängliche Baugruppen und Schweißnähte sind vor der Montage auf Lecks zu prüfen.
- Die Lecksuche kann mit einem Lecksucher oder Massenspektrometer erfolgen. Die geforderte Empfindlichkeit und die ordnungsgemäße Funktion des Lecksuchers sind mit einem Testleck vor der Lecksuche sicherzustellen.
- Bei Baugruppen, die entgasungsgeglüht (siehe Abschnitt 4) und/oder ausgeheizt werden, müssen vor dem Heizzyklus und nach dem Erkalten Lecktests durchgeführt werden.
- Die Endprüfung von Behältern muss mit Metaldichtungen durchgeführt werden.

### 2.3.2 Kohlenwasserstofffreiheit und Desorptionsrate

Grundsätzlich müssen alle UHV-Komponenten kohlenwasserstofffrei sein. Ein entsprechender Nachweis ist mit einem ausreichend empfindlichen Massenspektrometer, in der Regel mit SEV (Sekundär-Elektronen-Vervielfacher) zu führen. Komponenten werden als kohlenwasserstofffrei betrachtet, wenn in einem leckfreien System bei einem Totaldruck  $\leq 10^{-7}$  mbar die Summe der Partialdrücke von Massen ab der Masse 45 bis mindestens Masse 100 kleiner als  $10^{-3}$  des Totaldrucks ist. Beispiele für typische Massenspektren bis Masse 100, die diese Anforderung erfüllen bzw. nicht erfüllen zeigen Abb. 1 und 2. Zur Dokumentation sind sowohl ein Massenspektrum (mindestens Masse 0-100 amu) jeder Komponente als auch ein Referenzspektrum des Pumpsystems alleine notwendig.

Für ausgeheizte Vakuumkomponenten soll die integrale spezifische Abgasrate kleiner gleich  $5 \cdot 10^{-12}$  mbar·l·sec<sup>-1</sup>·cm<sup>-2</sup> sein. Die Durchführung des gegebenenfalls erforderlichen Nachweises ist mit den DESY Fachgruppen MVS bzw. FS-BT abzusprechen.

## 2.4 Verpackung

- Vakuumbehälter mit trockenem Stickstoff füllen und blind flanschen oder Behälterflansche mit PE-Kunststoffolie verschließen und mit Abdeckkappen die Dichtschneiden und Dichtflächen schützen.
- Alternativ: evakuierten Vakuumbehälter in PE-Kunststoffolie einpacken.
- Sonstige UHV-Bauteile in PE-Kunststoffolie einschweißen.
- Bewegliche Teile wie z.B. Bälge, Drehflansche, etc. sind für den Transport zu fixieren.

### 3 Partikelfreie UHV-Komponenten

Um partikelfreie UHV-Komponenten zu erhalten, müssen folgende Regeln eingehalten werden:

#### 3.1 Konstruktion

Es sind Konstruktionen zu wählen, die eine Reinigung in Bädern wie unter 3.2. beschrieben ermöglichen. So sind z.B. unzugängliche Bereiche zu vermeiden, aus denen Reinigungsflüssigkeiten nicht vollständig herausgespült werden können.

#### 3.2 Reinigung und Montage

- Im Anschluss an die UHV-Reinigung (siehe Abschnitt 2.2) müssen folgende **zusätzliche** Reinigungsschritte erfolgen:
  - US Bad mit Reinstwasser und geeignetem Reiniger (z.B. Tickopur s. Abschnitt 2.2) im Reinraum Klasse ISO 6 oder besser.
  - Schallzeit: z.B. 3 bis 6 Mal 5 min unterbrochen durch kurze Spülungen (min. 1 Minute)
  - Beispiele für Reinigungsmittel:
    - Edelstahl / Kupfer: 1% Tickopur R33 bei 50°C und 1.5% Elma Clean 115c bei 65°C;
    - Aluminium: 2-5% P3 Almeco 18 bei 65°C (Oxidentfernung).
  - Leitwertspülung mit Reinstwasser bis zu einem Restwiderstand  $> 12 \text{ M}\Omega/\text{m}$ .
  - Trocknen mit partikelfreier Luft (besser als Reinraumklasse ISO 5).
  - Alternativ für die drei vorangehenden Arbeitsgänge: Laborwaschmaschine mit Reinstwasser und entsprechenden Reinigungsmitteln; Entnahme im Reinraum Klasse ISO 5 oder besser.
- Bauteile, die nicht gewaschen werden können (z.B. Spiegel, Detektoren usw.) müssen mehrere Stunden vor der Montage im Reinraum im partikelfreien Luftstrom (besser als Reinraumklasse ISO 5) liegen.
- Die Partikelfreiheit wird im Reinraum besser Klasse 5 kontrolliert. Dazu werden die Bauteile mit ionisiertem Stickstoff abgeblasen. Bei einem Gasdurchsatz von 28 l/min dürfen nach 5 Minuten mit einem Partikelzähler maximal 10 Partikel/Minute  $\geq 0,3 \mu\text{m}$  nachgewiesen werden. Aufgrund der großen Vielzahl von zu untersuchenden Komponenten und deren verschiedener Geometrien gibt es keine genormte Prüfanordnung und Vorschrift. Daher ist für die zu untersuchenden Komponenten eine geeignete Anordnung des Partikelzählers sowie der Abblasprozedur zu wählen und mit den DESY Fachgruppen MVS bzw. FS-BT abzustimmen.
- Die Montage der Bauteile und die Verbindung von Vakuumbaugruppen erfolgt immer in einer Reinraumumgebung entsprechend der spezifizierten Reinraumklasse.
- Es dürfen nur ungeschmierte und unbeschichtete nicht kalt verschweißende Schrauben (wie z. B. Ti Schrauben in Edelstahlbauteilen) bei der Reinraummontage verwendet werden.
- Vakuumbauteile müssen nach der Dichtigkeitsprüfung immer mit partikelgefiltertem Gas (Stickstoff) geflutet werden und zur Lagerung staubdicht verpackt werden (siehe Abschnitt 3.3.).
- Flanschverbindungen außen mit reinraumtauglichem Klebeband abkleben.

#### 3.3 Verpackung

- Vakuumbehälter mit partikelgefiltertem Stickstoff füllen und blind flanschen oder Behälterflansche mit antistatischer PE-Kunststoffolie verschließen und mit partikelgereinigten Abdeckkappen die Dichtschneiden und Dichtflächen schützen.
- Alle UHV-Bauteile doppelt in antistatische PE-Kunststoffolie einschweißen.
- Die Verwendung von Aluminiumfolie ist nicht zugelassen.
- Bewegliche Teile wie z.B. Bälge, Drehflansche sind für den Transport zu fixieren.

# Anhang H: Allgemeine Normen

## Anhang H1: VDI 2222 Blatt 2

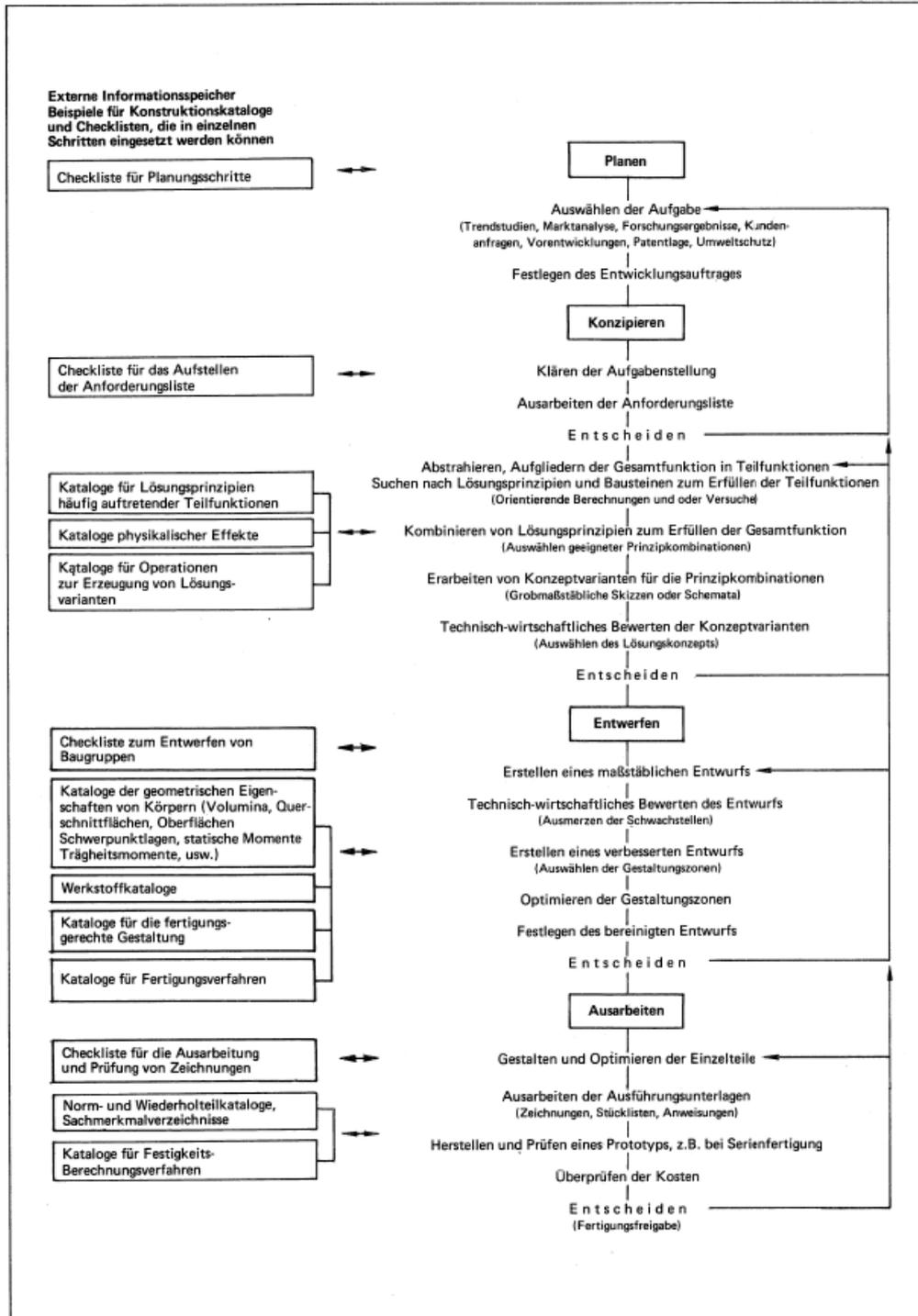


Bild 1. Kataloge im Rahmen des Vorgehensplans der Konstruktionsmethodik

Zwei- oder mehrdimensionale Anordnungen von Lösungen, Objekten und Operationen können auch dann von Vorteil sein, wenn die Menge der Lösungen, Objekte und Operationen sich mittels zweier oder mehr Gliederungsgesichtspunkte derart aufspannen läßt, daß man ein Bildungsgesetz erkennen kann. Bild 10 zeigt das am Beispiel eines Objektkataloges für „Ebene kinematische Ketten mit vier Gliedern und Freiheitsgraden von -1 bis +2“.

**3.3.3 Möglichkeiten zum Finden von Zugriffs- und Gliederungsmerkmalen**

Entsprechend Abschn. 3.3.2 sind grundsätzlich zwei Arten von Merkmalen zu unterscheiden, die sogenannten Zugriffsmerkmale, mit deren Hilfe eine Charakterisierung der im Katalog enthaltenen Lösungen, Objekte oder Operationen vorgenommen wird, und Gliederungsmerkmale, die durch die Gliederungsgesichtspunkte des Gliederungs- teils in verschiedene, voneinander abgrenzbare Klassen

unterteilt werden, wodurch das angebotene Lösungs- (bzw. Objekt- oder Operations-) spektrum möglichst wider- spruchsfrei eingeteilt und zusätzlich eine überschlägige Kontrolle der Vollständigkeit des Hauptteiles erreicht werden kann. Merkmale die dem Konstrukteur eine gezielte Auswahl einer oder mehrerer Lösungen aus einem meist recht großen Lösungsspektrum ermöglichen sollen, sind in der Regel zum überwiegenen Teil technischer Natur, d.h. sie beschreiben technische Eigenschaften des Lösungsangebots. Um die Vielzahl möglicher Katalog- merkmale in überschaubarer Form darzustellen, wurde eine Assoziationsliste in Katalogform erstellt [12], die es ermöglicht, durch gezielte Auswahlsschritte nur die jeweils für eine Merkmalsermittlung relevanten Fachgebiete (aus einem großen Angebot) auszufiltern. Zu diesem Zweck wurden zwei zusammenhängende Konstruktionskataloge (Übersichtskatalog und Detailkatalog) erarbeitet, die durch eine zweidimensionale Gliederung eine schnelle, gezielte Merkmalsauswahl ermöglichen. Bild 11 zeigt

Teilgebiete der Physik	Merkmals- charakter	Technisch-Physikalisch											Tech- nisch- Che- misch	Mensch- bezo- gen/ Ergo- nisch	Wirtschaflich		Nach- rich- ten- tech- nisch
		Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			11	12	
Mechanik	Fest- körper- mechanik	1	1.1 Geometrie Länge Fläche Volumen Winkel Linien-/Flä- chenmoment Form/Gestalt	1.2 Kinematik Zeit Weg Geschwindigkeit Beschleunigung	1.3 Dynamik Kraft Masse Druck Impuls Moment Arbeit	1.4 Festig- keit Span- nung Formän- derung	1.5	1.6 Güte/ Sicher- heit	1.7 Stoff- größen	1.8	1.9	1.10 Aus der Sicht des Herstellers Kauf/ Verkauf Fertigung/ Montage 1)	1.11 Aus der Sicht des Anwenders Betrieb Instandhalt. Liquidation/ Verschrot- tung 1)	1.12			
		2	2.1 Geometrie Länge Fläche Volumen Winkel Form/Gestalt	2.2 Kinematik Zeit Weg Grenzschichtdicke Geschwindigkeit Beschleunigung Volumenstrom	2.3 Dynamik Kraft Masse Druck Impuls Moment Arbeit	2.4 Span- nung	2.5 Ähnlich- keits- kenn- größen	2.6 Güte/ Sicher- heit	2.7 Stoff- größen	2.8	2.9	2.10 Aus der Sicht des Herstellers Kauf/ Verkauf Fertigung/ Montage 1)	2.11 Aus der Sicht des Anwenders Betrieb Instandhalt. Liquidation/ Verschrot- tung 1)	2.12			
Optik		3	3.1 Geometrie Länge Fläche Volumen Winkel Form/Gestalt	3.2 Wellenoptik geometr. Photometrie Interferenz/ Beugung	3.3 Wärmestrahlung	3.4	3.5	3.6 Güte/ Sicher- heit	3.7 Stoff- größen	3.8	3.9	3.10 Aus der Sicht des Herstellers Kauf/Verk. Fertigung/ Montage 1)	3.11 Aus d. Sicht d. Anwender Betrieb Instandhalt. Liquidation/ Verschrot- tung 1)	3.12			
Akustik		4	4.1 Geometrie Länge Fläche Volumen Winkel Form/Gestalt	4.2 Schall Grundlagen Ausbreitung Feld Sender/ Empfänger	4.3	4.4	4.5	4.6 Güte/ Sicher- heit	4.7 Stoff- größen	4.8	4.9	4.10 Aus der Sicht des Herstellers Kauf/Verk. Fertigung/ Montage 1)	4.11 Aus d. Sicht d. Anwender Betrieb Instandhalt. Liquidation/ Verschrot- tung 1)	4.12			
Wärmelehre		5	5.1 Geometrie Länge Fläche Volumen Winkel Form/Gestalt	5.2 Kinematik Zeit Weg Geschwindigkeit Beschleunigung	5.3 Wärmetechnik Temperatur Druck Arbeit Wärme Prozßbeschreibg.	5.4	5.5 Ähnlich- keits- kenn- größen	5.6 Güte/ Sicher- heit	5.7 Stoff- größen	5.8	5.9	5.10 Aus der Sicht des Herstellers Kauf/Verk. Fertigung/ Montage 1)	5.11 Aus d. Sicht d. Anwender Betrieb Instandhalt. Liquidation/ Verschrot- tung 1)	5.12			
Elektrotechnik		6	6.1 Geometrie Länge Fläche Volumen Winkel Form/Gestalt	6.2 Kinematik 1)	6.3 Elektrotechnik Strom Spannung Arbeit elektr. Feld Impedanz Schwingung/Freq.	6.4	6.5	6.6 Güte/ Sicher- heit	6.7 Stoff- größen	6.8	6.9	6.10 Aus der Sicht des Herstellers Kauf/ Verkauf Fertigung/ Montage 1)	6.11 Aus der Sicht des Anwenders Betrieb Instandhalt. Liquidation/ Verschrot- tung 1)	6.12			

1) In diesen Feldern wurde auf die Verwendung konkretisierender Oberbegriffe verzichtet.

Bild 11. Übersichtskatalog „Zugriffs- und Gliederungsmerkmale für Konstruktionskataloge“

aus allgemeinen Sicherheitserwägungen, kommt die übliche Antriebsart für das geplante Bolzensetzwerkzeug mittels Sprengladung nicht in Frage. Daher soll untersucht werden, welche Antriebssysteme ausgewählt werden könnten. Diese Aufgabe läßt sich durch die Black Box nach Bild 13 charakterisieren. Eine ähnliche Aufgabe ist beispielsweise bei der Entwicklung von Impulsantrieben für Hochspannungsschalter zu lösen [10].

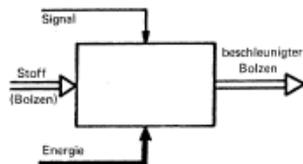


Bild 13. Black box für die Aufgabe „Bolzen setzen“

Die Vorüberlegungen ergeben, daß aus Sicherheitsgründen die Austrittsgeschwindigkeit des Bolzens niedriger sein sollte als bei professionellen Geräten, bei denen sie ca. 300 bis 500 m/s beträgt. Versuche zeigen, daß Geschwindigkeiten von etwa 100 m/s bei geeigneter Ausbildung des Bolzens für die meisten Heimwerkeranwendung noch ein brauchbares Eindringverhalten ergeben. Tafel 2 zeigt auszugsweise einige Anforderungen, die für diese Entwicklungsaufgabe gestellt werden.

Tafel 2. Auszug aus der Anforderungsliste für ein Heimwerker-Bolzensetzgerät

1.	Eignung für Setzbolzen aus verschiedenen Metallen von 2 bis 15 g Masse, 20 bis 90 mm Länge und 3 bis 8 mm Durchmesser.
2.	Begrenzte Rückstoßwirkung.
3.	Austrittsgeschwindigkeit des Bolzens 100 bis 150 m/s.
4.	Handliche Abmessungen und geringes Gewicht des Gerätes; Länge ≈ 300 mm, Masse ≈ 2 kg.
5.	Antriebsenergie möglichst von Hand, elektrisch (220 V-Netz) oder pneumatisch (Tankstellen-Druckluftnetz, Treibgaspatronen) bereitstellen.

#### 4.1.2.1 Entwickeln der Funktionsstruktur

Das Funktionsprinzip bekannter Bolzensetzgeräte läßt sich folgendermaßen beschreiben: Kartuschen (Sprengladungen), deren Stärke abhängig von der Masse der zu setzenden Bolzen und der Art der Wand gewählt wird, werden in ein Magazin geladen. Durch einen Schlagbolzen wird die Kartusche gezündet, der sich entwickelnde Gasdruck treibt den Setzbolzen entweder direkt – wie bei einer Patrone – oder über einen zwischengeschalteten Kolben.

Dieses Funktionsprinzip läßt sich zu einer Funktionsstruktur abstrahieren:

Ein dosierbar auf- oder entladbarer Energiespeicher gibt auf Befehl (Signal) Arbeit in geeigneter Form ab, um den

Bolzen, der vorher gegebenenfalls aus einem Magazin in die Abschußposition gebracht wurde, zu beschleunigen.

Diese verbale Formulierung läßt sich bildlich als Funktionsstruktur darstellen, Bild 14. Die dargestellte Funktionsstruktur ließe sich durch weitere Abstraktion noch verfeinern und könnte dann variiert werden. Da hier im wesentlichen die Kataloganwendung gezeigt werden soll, wird darauf verzichtet.

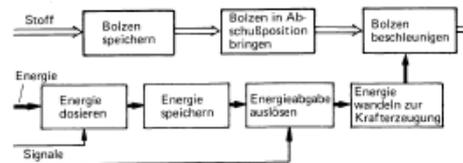


Bild 14. Funktionsstruktur eines Bolzensetzgerätes

Aus der Funktionsstruktur wird die Teilfunktion „Bolzen beschleunigen“ herausgegriffen. Um diese Teilfunktion erfüllen zu können, muß Energie gewandelt werden, um eine Kraft zur Verfügung zu stellen. Als Hilfsmittel bei der Lösungssuche wird der Lösungskatalog „Kraft erzeugen“ (s. Abschn. 5.1) benutzt.

#### 4.1.2.2 Vorgehensschritte zur Lösungsauswahl

Um von vornherein nur Lösungen zu verfolgen, die ein gewisses Mindestmaß an Erfolg versprechen, ist es wichtig, nach Merkmalen zu suchen, die einerseits Anforderungen an das konkrete Produkt sind, Tafel 2, und andererseits unter den Gliederungsgesichtspunkten und beschreibenden Merkmalen des Lösungskataloges zu finden sind. Das weitere Vorgehen orientiert sich an den in Tafel 1 aufgeführten Vorgehensschritten:

##### 1. Schritt: „Beschreibende Merkmale aus Anforderungen gewinnen“

Im vorliegenden Fall lassen sich aus den Anforderungen 1, 3, 4 und 5 der Tafel 2 vier beschreibende Merkmale ableiten, Tafel 3. Diese vier Merkmale sollen genügen, da eine exakte Beurteilung der Lösungen auf der Abstraktionsebene des Kataloges „Kraft erzeugen“ ohnehin nicht möglich ist. Daher werden der

Tafel 3. Aufgabenbezogene beschreibende Merkmale

1.	Es ist eine hinreichend große Arbeit ( $W = \int F \cdot ds$ ) zur Bereitstellung der kinetischen Energie erforderlich $\left( E = \frac{m}{2} \cdot v^2 \right); (E \geq 250 \text{ Nm})$
2.	Der Bolzen muß auf relativ kurzer Strecke ( $s < 200 \text{ mm}$ ) auf 150 m/s beschleunigt werden, daher ist eine große Kraft ( $F \geq 1000 \text{ N}$ ) erforderlich. $\left( F = m \cdot a; a = \frac{v^2}{2s} \right)$ .
3.	Die Anwendung einzelner Lösungen ist durch Anforderung 4 (handliche Maße, geringes Gewicht) eingeschränkt.
4.	Eine mechanisch, pneumatisch oder elektrisch erzeugte Kraft ist zu bevorzugen.

**3.11**

**Ausrüstungen**

Einrichtungen, die eine sicherheitstechnische Funktion hinsichtlich des Druckeinschlusses oder der Überwachung haben (z. B. Schutz- oder Begrenzungseinrichtungen, Regel- und Überwachungseinrichtungen, Armaturen, Anzeigeeinrichtungen)

**3.12**

**Hersteller des ortsfesten Kryo-Behälters**

Firma, die den Endzusammenbau und die Prüfung des ortsfesten Kryo-Behälters vornimmt

**3.13**

**Fassungsraum des Innenbehälters**

Volumen des Mantels ohne Stützen, Rohren usw., bestimmt bei der Mindestbemessungstemperatur und bei Atmosphärendruck

**3.14**

**Druck**

Druck relativ zum Atmosphärendruck, d. h. dem vom Manometer angezeigten Druck. Folglich wird ein Vakuum durch einen negativen Wert bezeichnet. Der Dampfdruck wird immer als absoluter Druck angegeben

**3.15**

**zulässiger Druck ( $p_s$ )**

vom Hersteller angegebener höchster Druck, für den das Druckgerät ausgelegt ist, an einer vom Hersteller vorgegebenen Stelle; es ist dies die Anschlussstelle der Ausrüstungsteile mit Sicherheitsfunktion oder der höchste Punkt des Druckgerätes

ANMERKUNG  $p_s$  entspricht PS von 2.3 in Artikel 1 der Druckgeräte-Richtlinie (PED).

**3.16**

**Herstelljahr**

Datum der Endabnahmenprüfung des beim Hersteller gefertigten Behälters

## 4 Allgemeine Anforderungen

Der ortsfeste Kryo-Behälter muss den mechanischen und thermischen Belastungen und den chemischen Wirkungen, denen er während der Druckprüfung und des bestimmungsgemäßen Betriebes ausgesetzt ist, sicher standhalten. Diese Anforderungen gelten als erfüllt, wenn die Abschnitte 5 bis 9 eingehalten werden. Der Behälter muss entsprechend Abschnitt 10 gekennzeichnet, entsprechend Abschnitt 11 und 12 geprüft und entsprechend prEN 13458-3 betrieben werden.

## 5 Mechanische Belastungen

ANMERKUNG In dieser Europäischen Norm entspricht  $p_s$  dem PS von 2.3 in Artikel 1 und  $p_T$  entspricht PT von Anhang I der Druckgeräte-Richtlinie (PED).

Der ortsfeste Kryo-Behälter muss den in Abschnitt 4 erwähnten mechanischen Belastungen ohne eine Verformung standhalten, die die Sicherheit beeinflussen und zur Undichtigkeit führen könnten.

Die zu berücksichtigen mechanischen Belastungen sind:

— die während der Druckprüfung eintretenden Belastungen:

$$p_T \geq 1,43 (p_s + 1)$$

dabei sind:

$p_T$  = Prüfdruck (in bar),

$p_s$  = zulässiger Druck (= Einstelldruck der Entlastungseinrichtung) (in bar),

+ 1 = Zuschlag für äußeres Vakuum (in bar).

## EN 13458-1:2002 (D)

- Belastungen, hervorgerufen durch die Aufstellung und das Entfernen des Behälters;
- dynamische Belastungen während des Transportes des Behälters.

Die folgenden Belastungen müssen, gegebenenfalls gleichzeitig wirkend, berücksichtigt werden:

- ein Druck gleich dem höchstzulässigen Druck im Innenbehälter und in den Rohrleitungen;
- der Druck, der von der Flüssigkeit bei vollem Fassungsvermögen ausgeübt wird;
- Belastungen, die durch thermische Ausdehnung oder Schrumpfung des Innenbehälters, des Außenmantels und der Rohrleitungen im Zwischenraum hervorgerufen werden;
- das volle Vakuum im Außenmantel;
- ein Druck im Außenmantel, der gleich dem Einstelldruck der Entlastungseinrichtung zum Schutz des Außenmantels ist;
- Wind-Belastungen und andere Bedingungen (z. B. Belastungen infolge von Erdstößen, thermische Belastungen) des Behälters beim Befüllen.

## 6 Chemische Einwirkungen

Aufgrund der tiefkalten Fluide, ihrer Temperaturen und der verwendeten metallischen Konstruktionswerkstoffe kann die Möglichkeit einer chemischen Wirkung auf die Innenflächen, die in Berührung mit den tiefkalten Fluiden stehen, vernachlässigt werden.

Da sich der Innenbehälter in einem evakuierten Außenmantel befindet, wird weder äußere Korrosion des Innenbehälters noch Korrosion an den inneren Oberflächen des Außenmantels auftreten. Deshalb sind Überwachungsöffnungen im Innenbehälter oder Außenmantel nicht erforderlich.

Ein Korrosionszuschlag an den Oberflächen, die mit dem Betriebsfluid in Berührung stehen oder dem Vakuumzwischenraum zwischen Innenbehälter und Außenmantel ausgesetzt sind, ist ebenfalls nicht erforderlich.

## 7 Thermische Bedingungen

Die nachstehenden thermischen Bedingungen müssen berücksichtigt werden:

- a) für den Innenbehälter und seine zugehörigen Ausrüstungen der gesamte zu erwartende Temperaturbereich;
- b) für den Außenmantel und dessen Ausrüstungen (andere Ausrüstungen als die in a) erfassten):
  - die niedrigste vorgesehene Arbeitstemperatur;
  - eine höchste Arbeitstemperatur von 50 °C.

## 8 Werkstoff

Für die zur Fertigung des ortsfesten tiefkalten Behälters eingesetzten Werkstoffe müssen die folgenden Anforderungen gelten.

### 8.1 Auswahl der Werkstoffe

8.1.1 Werkstoffe, die mit tiefkalten Fluiden in Berührung sind oder kommen könnten, müssen so ausgewählt werden, dass sie mit denen in EN 1797 verträglich sind.

EN 13458-2:2002 (D)

### 3 Begriffe und Symbole

#### 3.1 Begriffe

Für die Anwendung dieser Norm gelten die folgenden Begriffe.

##### 3.1.1

###### ortsfester Behälter

Behälter an einem festen Standort zum Füllen, Lagern (unter Druck) und Verteilen tiefkalter Fluide. Der ortsfeste Behälter ist nicht für den Transport flüssiger Produkte vorgesehen

##### 3.1.2

###### Innenbehälter

Behälter, der für die Aufnahme des tiefkalten Fluids vorgesehen ist

##### 3.1.3

###### Außenmantel

gasdichte Umhüllung, die den Innenbehälter umfasst und sicherstellt, so dass das Vakuum aufrechterhalten bleibt

##### 3.1.4

###### automatisches Schweißen

Schweißen, bei dem die Parameter automatisch überwacht sind. Einige dieser Parameter können für einen Grenzbereich fest eingestellt sein — bei Hand oder automatisch —, damit während des Schweißens die festgelegten Schweißbedingungen beibehalten werden.

##### 3.1.5

###### höchstzulässiger Druck, $p_s$

maximaler vom Hersteller festgelegte Druck, für den die Ausrüstung bemessen ist, vom Hersteller für einen bestimmten Ort definiert, normalerweise die Lage der Schutz- und Sicherheitseinrichtungen am oberen Teil der Ausrüstung

ANMERKUNG  $p_s$  ist äquivalent  $PS$ , das im Artikel 1, 2.3 der PED angewendet wird.

##### 3.1.6

###### Entlastungsplatte/-stopfen

Atmosphärendruck tragende(r) Platte/Stopfen, die/der nur die Entlastung infolge des inneren Überdruckes zulässt

##### 3.1.7

###### Berstscheibeneinrichtung

in sich schließende Einrichtung gegen Drucküberschreitung, die auf Differenzdruck anspricht und die so konstruiert ist, dass sie durch das Bersten der Berstscheiben ihre Funktion erfüllt. Sie umfasst die Gesamtheit der eingebauten Teile, gegebenenfalls einschließlich Berstscheibenhalter

#### 3.2 Symbole

ANMERKUNG Innerhalb dieser Norm ist  $p_s$  äquivalent  $PS$ , das im Artikel 1, 2.3 der PED, und  $p_T$  ist äquivalent  $PT$ , das im Anhang I der PED angewendet wird.

In den folgenden Formeln werden nachstehende Symbole und Einheiten benutzt:

$c$	Zuschlag für Korrosion	mm
$d_i$	Innendurchmesser der Öffnung	mm
$d_a$	Außendurchmesser des Rohres oder Stützens	mm

$f$	schmale Seite einer rechteckigen oder elliptischen Platte	mm
$l_b$	Beullänge	mm
$n$	Anzahl	–
$p$	Berechnungsdruck wie in 4.2.3.2 j) und 4.3.3.2 definiert	bar
$p_e$	zulässiger Außendruck, begrenzt durch elastisches Einbeulen	bar
$p_k$	Verstärkender Druck	bar
$p_D$	zulässiger Außendruck, begrenzt durch plastische Verformung	bar
$p_T$	Druckprüfung (siehe 4.2.3.2 g))	bar
$r$	Radius, z. B. innerer Krempenradius eines gewölbten Bodens und von Kegeln	mm
$s$	erforderliche Wanddicke einschließlich Zuschläge	mm
$s_e$	ausgeführte Wanddicke	mm
$v$	Faktor zur Berücksichtigung der Ausnutzung der zulässigen Bemessungsspannung in Fügeverbindungen oder Faktor zur Berücksichtigung von Verschwächungen	–
$x$	(Abklänglängenbereich) Entfernung, über die die vorherrschende Spannung entsprechend der Annahme wirkt	mm
$A$	Fläche	mm <sup>2</sup>
$A_S$	Bruchdehnung	–
$C$	Berechnungsbeiwerte	–
$D$	Durchmesser des Grundkörpers	mm
$D_s$	Außendurchmesser, z. B. einer Zylinderschale	mm
$D_i$	Innendurchmesser, z. B. einer Zylinderschale	mm
$E$	Elastizitätsmodul	N/mm <sup>2</sup>
$I$	Flächenträgheitsmoment	mm <sup>4</sup>
$K$	Festigkeitskennwert (siehe 4.3.2.3.1)	N/mm <sup>2</sup>
$K_{2\theta}$	Siehe 4.3.2.3.2	
$K_f$	Siehe 4.3.2.3.3	
$K_{Bemessung}$	ein vom Hersteller für einen bestimmten Anwendungsfall festgelegter Wert	
$R$	Krümmungsradius, z. B. innerer Scheitelradius einer Wölbung	mm
$S$	Sicherheitsbeiwert beim Bemessungsdruck	–
$S_e$	Sicherheitsbeiwert gegen elastisches Einbeulen beim Bemessungsdruck	–
$S_p$	Sicherheitsfaktor gegen plastische Verformung beim Bemessungsdruck	–
$S_T$	Sicherheitsfaktor gegen plastische Verformung beim Dehnungsdruck	–
$Z$	Hilfswert	–
$\nu$	Querkontraktionszahl	–
$u$	Unrundheit	–
$\sigma_k$	Wert für die Bemessungsspannung	N/mm <sup>2</sup>

## Anhang K (normativ)

### Grundwerkstoffe

Tabelle K.1 — Druckbehälter

Nummer der Norm/Festlegung	Werkstoffsorte	Werkstoffnummer	Bedingungen zur Wärmebehandlung
EN 10028-4	X8Ni9	1,5662	HT 640 & HT 680
EN 10222-3	X8Ni9	1,5662	
ASME SA 353/SA 353M	9 % Nickel	K81340	N + N + T
ASME SA 553/SA 553M	Type 1 (9 %) Nickel	K81340	Q & T
ASME SA 522/SA 522M	Type 1 (9 %) Nickel	K81340	N + N + T or Q + T
EN 10028-7	X2CrNi18-9	1,4307	
EN 10028-7	X2CrNi19-11	1,4306	
EN 10028-7	X2CrNiN18-10	1,4311	
EN 10028-7	X5CrNiN19-9	1,4315	
E EN 10028-7	X3CrNiMo17-12-2	1,4401	
EN 10028-7	X2CrNiMo17-12-2	1,4404	
EN 10028-7	X2CrNiMoN17-11-2	1,4406	
EN 10028-7	X2CrNiMoN17-13-3	1,4429	
EN 10222-5	X2CrNi18-9	1,4307	
EN 10222-5	X5CrNi18-10	1,4301	
EN 1022-5	X5CrNiMo17-12-2	1,4401	
EN 10222-5	X2CrNiMo17-12-2	1,4404	
EN 10088-3	X2CrNi19-11	1,4306	
EN 10088-3	X2CrNiN18-10	1,4311	
EN 10088-3	X5CrNi18-10	1,4301	
EN 10088-3	X5CrNiMo17-12-2	1,4401	
EN 10088-3	X2CrNiMo17-13-2	1,4404	
EN 10088-3	X2CrNiMoN17-12-2	1,4406	
EN 10088-3	X2CrNiMo17-13-3	1,4429	
prEN 10216-5	X2CrNi19-11	1,4306	
prEN 10216-5-prEN 10217-7	X5CrNi 18-10	1,4301	
prEN 10216-5-prEN 10217-7	X2CrNiN 18-10	1,4311	
prEN 10216-5-prEN 10217-7	X6CrNiTi 18-10	1,4541	
prEN 10216-5-prEN 10217-7	X6CrNiNb 18-10	1,4550	
prEN 10216-5-prEN 10217-7	X5CrNiMo 17-12-2	1,4401	

Tabelle K.1 (fortgesetzt)

Nummer der Norm/Festlegung	Werkstoffsorte	Werkstoffnummer	Bedingungen zur Wärmebehandlung
prEN 10216-5-prEN 10217-7	X2CrNiMo 17-13-2	1,4404	
prEN 10216-5-prEN 10217-7	X6CrNiMoTi 17-12-2	1,4571	
prEN 10216-5-prEN 10217-7	X2CrNiMoN 17-13-3	1,4429	
prEN 10216-5-prEN 10217-7	X2CrNiMo 18-14-3	1,4435	
prEN 10216-5-prEN 10217-7	X2CrNiMo 17-13-3	1,4436	
prEN 10216-5-prEN 10217-7	X2CrNiMoN 17-13-5	1,4439	
ASME SA 479/SA 479M	304L	S30403	
ASME SA 479/SA 479M	304	S30400	
ASME SA 479/SA 479M	316L	S31603	
ASME SA 479/SA 479M	316	S31600	

## 6 Aufstellung

### 6.1 Allgemeine Anforderungen

Die Behälter müssen so aufgestellt und betrieben werden, dass Beschäftigte oder dritte Personen nicht gefährdet sind. Die erforderlichen Sicherheitsabstände müssen eingehalten werden, siehe Anhang B (informativ).

Behälter müssen so aufgestellt werden, dass das Behälterschild gut erkennbar ist.

Die Aufstellung muss die Prüfung der Behälter allseitig ermöglichen. Alle Behälter-Überwachungssysteme müssen sicher betrieben werden können. Die Behälter müssen so aufgestellt werden, dass das Füllen sicher durchgeführt werden kann.

Die Behälter müssen so gegründet sein, dass keine unzulässigen Verlagerungen oder Neigungen auftreten können:

- bei der Gründung selbst;
- durch das Eigengewicht des Behälters einschließlich des Beschickungsgutes;
- durch äußere Kräfte.

Der Gasaustritt aus der Druckentlastungseinrichtung oder aus der Entlüftungsleitung muss gefahrlos abgeleitet werden können.

Auf die gefährlichen Eigenschaften der Produkte ist durch entsprechende Kennzeichnung z. B. der Räume, Bereiche, Behälter und in der Betriebsanweisung hinzuweisen.

Behälter müssen so aufgestellt sein, dass sie ausreichend umlüftet sind; dies ist der Fall, wenn die Bildung explosionsfähiger Gas-/Luft-Gemische oder eine Sauerstoffanreicherung der Atmosphäre vermieden wird.

Die Behälter müssen so aufgestellt sein, dass für Instandhaltung und Reinigung ausreichende Abstände vorhanden sind. Der ausreichende Abstand für Instandhaltung und Reinigung beträgt mindestens 0,5 m.

Behälter dürfen nicht in Durchgängen, Durchfahrten, allgemein zugänglichen Fluren, Treppenträumen oder Stufen aufgestellt sein. Auch in der Nähe der genannten Bereiche dürfen Behälter nicht aufgestellt werden, wenn Verkehrswege, Fluchtwege oder die Zugänglichkeit eingeschränkt ist.

Der Zutritt von unbefugten Personen sollte untersagt sein.

Der Boden unter lösbaren Anschlüssen und Armaturen in der flüssigen Phase von Behältern für oxidierende Gase im flüssigen Zustand muss aus nichtbrennbaren Werkstoffen bestehen und frei von Öl, Fett und anderen brennbaren Verunreinigungen sein.

Es muss die besondere Gefährdung bei der Aufstellung von Anlagen mit flüssigem Wasserstoff und Helium infolge von Luftverflüssigung im Bereich der nicht isolierten Ausrüstungsteile beachtet werden.

Für die in Fließrichtung zum Behälterauslass angebrachten Ausrüstungsteile müssen Druckentlastungseinrichtungen vorgesehen werden.

Wenn diese Einrichtungen nicht für tiefe Temperaturen ausgelegt sind, müssen Sicherheitseinrichtungen vorgesehen werden, um sie vor möglichen tiefen Betriebstemperaturen zu schützen.

### 6.2 Aufstellung in Räumen

Behälter sollten, wenn immer möglich, im Freien aufgestellt werden. Bei einer Aufstellung in Räumen müssen die folgenden Sicherheitsmaßnahmen ergriffen werden.

Der Eingang zu Räumen mit Behältern muss gekennzeichnet sein. Auf die jeweilige Gefährdung durch Gas ist hinzuweisen.