

---

# **Aufbau und Charakterisierung von miniaturisierten und Mikrokanalplatten basierten Einzelteilchendetektoren**

Wissenschaftliche Hausarbeit im Rahmen der Ersten  
Staatsprüfung für das Lehramt an Gymnasien im Fach Physik,  
eingereicht der Hessischen Lehrkräfteakademie  
- Prüfungsstelle Kassel-

**vorgelegt von:** Nils Kiefer  
Finkenweg 5  
34327 Körle

**Gutachter:** Dr. André Knie

Kassel, 29. November 2018

---



# Inhaltsverzeichnis

---

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 Einleitung</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2 Grundlegender physikalischer Hintergrund</b>  | <b>3</b>  |
| 2.1 Synchrotronstrahlungsquellen der dritten Generation . . . . .                                  | 3         |
| 2.2 Interaktion von Licht und Materie . . . . .  | 4         |
| <b>3 Miniaturisierter Einzelteilchendetektor</b>   | <b>7</b>  |
| 3.1 Grundlegende Funktionsprinzipien . . . . .   | 7         |
| 3.1.1 Mikrokanalplattensysteme und Signalverarbeitung  | 7         |
| 3.2 Entwicklung und Aufbau . . . . .   | 10        |
| 3.2.1 Aufbau des existierenden VUV Detektors mit<br>ortsauflösender Anode . . . . .                | 11        |
| 3.2.2 Erste Ideen und Prototypen . . . . .   | 14        |
| 3.2.3 Aufbau des 1" <i>Open Face Detektors</i> . . . . .   | 15        |
| 3.3 Charakterisierung der Photonendetektion im vakuumul-<br>travioletten Spektralbereich . . . . . | 28        |
| 3.4 Anwendungsbereiche des Detektors . . . . .   | 39        |
| <b>4 Modularisierte Strahldiagnostik</b>   | <b>43</b> |
| 4.1 Funktionsweise der Sensorelemente . . . . .  | 43        |
| 4.1.1 Faraday Cup . . . . .  | 43        |
| 4.1.2 Yttrium-Aluminium-Granat (YAG) . . . . .   | 44        |
| 4.1.3 Photodioden . . . . .  | 45        |
| 4.2 Entwicklung und Aufbau . . . . .   | 46        |
| 4.2.1 Aufbau der modularisierten Strahldiagnostik . . . . .  | 47        |
| 4.3 Mögliche Anwendung der modularisierten Strahldia-<br>gnostik . . . . .                         | 59        |
| <b>5 Zusammenfassung</b>   | <b>63</b> |
| <b>Literaturverzeichnis</b>  | <b>65</b> |



# Einleitung 1

---

Die aktuelle Forschung der Arbeitsgruppe von Prof. Arno Ehresmann an der Universität Kassel erfordert für eine Vielzahl von Experimenten eine Auswahl von präzisen und effizienten Messinstrumenten. Damit ein Messverfahren mithilfe solch präzisen Messinstrumenten möglich ist, muss eine exakte Positionierung aller relevanten Sensoren und Signalquellen vorgenommen werden. Viele der durchgeführten Experimente der Atom- und Molekülphysik werden an Synchrotronstrahlungsanlagen durchgeführt, die eine durchstimmbare Photonenergie mit einer sehr schmalen Bandbreite zur Anregung von Atomen und Molekülen bieten. Besonders bei der Interaktion von diesem Licht mit einzelnen Atomen können verschiedene Prozesse unter Emission von einzelnen Teilchen ablaufen. Daher ist es für die Untersuchung dieser Prozesse essentiell, Einzelteilchen detektieren zu können. Gleichzeitig ist es unerlässlich, den Strahl, welcher diese Prozesse anregt, nachzuweisen und untersuchen zu können. Für die Detektion von einzelnen Photonen im Wellenlängenbereich von vakuumultraviolettem Licht (VUV,  $\lambda < 120 \text{ nm}$  [fN84]) besitzt die Arbeitsgruppe Ehresmann bereits einen Detektor, welcher in der Lage ist, positionsauflöse Spektren zu messen. Der Detektor ist für die Messung von dispergierten Photonen optimiert, wodurch er unter anderem zu groß für den direkten Anbau an das Wechselwirkungsvolumen ist. Der neue Detektor ist aber genau für diesen Einsatz optimiert, was beispielsweise dadurch erreicht wurde, dass er nur die für diese Aufgabe notwendigen Funktionen hat. Des Weiteren wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Detektor speziell für die direkte Messung von Photonemission entwickelt, indem der existierende Detektor miniaturisiert wird. Anschließend wird dieser charakterisiert, verschiedene Betriebsparameter des Detektors

erarbeitet und der Einfluss der Betriebsparameter auf die Signalqualität untersucht. Für die Verwendung des Detektors muss das Experiment auf den Synchrotronstrahl und die Probe ausgerichtet werden und während der Messung mit einem Detektor muss auch die Strahlungsquelle charakterisiert werden können. Dies wurde in den Jahren zuvor durch einen in der Arbeitsgruppe existierenden *Faraday-Cup* umgesetzt. Im dem zweiten Teil dieser Arbeit wird ein weiteres Instrument zur Strahldiagnostik entwickelt, welches als *Faraday-Cup*, zur Ausrichtung des Experiments und zur Messung von Absorptionsspektren eingesetzt werden kann. Allerdings wird dieses Instrument platzsparender sein, als der bereits existierende *Faraday-Cup*, durch eine modulare Bauweise eine Vielzahl von verschiedenen Sensoren tragen können und automatisiert elektrisch verstellbar sein. Die Strahldiagnostik und Ausrichtung des Experiments kann dadurch vielseitiger und schneller umgesetzt werden. Die zu dem Verständnis dieser Arbeit notwendigen physikalischen Grundlagen werden im ersten Kapitel dieser Arbeit beschrieben. Anschließend wird im zweiten Kapitel die Entwicklung des Detektors mit der dazugehörigen Charakterisierung und die mögliche Anwendung in einem Beispiel beschrieben. Im nachfolgenden Kapitel wird die Entwicklung des Instruments zur Strahldiagnostik und Beispiele für die Anwendung der Sensorelemente erläutert. Zum Abschluss der Arbeit werden die Ergebnisse und Erkenntnisse in dem letzten Kapitel zusammengefasst.

# **Grundlegender physikalischer Hintergrund 2**

---

In diesem Kapitel wird die Funktionsweise von Synchrotronstrahlungsanlagen grundlegend dargelegt, da diese für Experimente an Atomen und Molekülen eingesetzt werden. Des Weiteren werden im Rahmen der Anwendung eines Einzelteilchendetektors Prozesse beschrieben, welche durch die Interaktion von Licht und Materie ausgelöst werden. Dafür werden in diesem Abschnitt beispielhaft zwei Prozesse bei der Interaktion von Licht und Materie grundlegend erläutert.

## **2.1 Synchrotronstrahlungsquellen der dritten Generation**

Synchrotronstrahlungsquellen sind Einrichtungen, in welchen in Speicherringen geladene Teilchen wie Elektronen oder Positronen auf einer Kreisbahn gehalten werden. In diesem Fall wird von Elektronen innerhalb des Ringes ausgegangen, wobei die Vorgehensweise bei Positronen analog ist. Die Elektronen werden mithilfe von starken Magneten um die Kurven geleitet. Auf geraden Passagen können die Elektronen erneut minimal beschleunigt werden oder durchlaufen mit beinahe Lichtgeschwindigkeit sogenannte *Wiggler* oder *Undulatoren*. Im Inneren eines solchen werden die Elektronen auf eine sinusförmige Bahn gezwungen, wodurch die Elektronen Photonen abstrahlen [Sch18b].

Die Wellenlänge und weitere Merkmale des Lichts kann durch die Eigenschaften der Undulatoren und Wiggler genau eingestellt werden. Demnach ist es möglich die Energie der Photonen, welche den Undulator oder Wiggler verlassen sehr schmalbandig und genau einzustellen. Sobald das Licht den Speicherring verlässt, durchläuft dieses einen Monochromator, welcher das ausgehende Licht erneut auf einen sehr schmalen Energiebereich filtert. Dies führt dazu, dass am Ende des Strahlrohrs Licht mit einer Energie von wenigen Elektronenvolt bis zu mehreren tausend Elektronenvolt innerhalb eines sehr kleinen Energiebereichs gewählt werden kann. Für einige Experimente ist dies besonders wichtig und notwendig, da hier die Photonenergie schrittweise erhöht und die Reaktion des Systems gemessen wird.

## 2.2 Interaktion von Licht und Materie

Bei der Interaktion von Licht und Materie gibt es verschiedene Prozesse, wobei für die in der Arbeitsgruppe durchgeführte Forschung zwei Anregungsmechanismen essentiell sind und sich auf diese beschränkt wird. Trifft ein Photon mit einer definierten Energie auf ein Atom, so kann das Atom das Photon absorbieren und ein Elektron kann in einen energetisch höheren Zustand gebracht werden. Wenn die Energie des Photons größer ist, als die Bindungsenergie des Elektrons, befindet sich dieses nach der Absorption nicht mehr in einem gebundenen Zustand des Atoms. Folglich wurde das Atom ionisiert, sodass dieser Prozess Photoionisation genannt wird [Dem16].

Wenn die Energie des Photons kleiner ist, als die Ionisationsschwelle, kann es zu einem Weiteren Effekten kommen. Die Elektronen innerhalb des Atoms können nur diskrete Energieniveaus einnehmen. Sobald das Atom ein Photon mit einer bestimmten Energie absorbiert, kann ein Elektron in einen höheren energetischen Zustand gehoben werden. Dieser Prozess wird resonante Anregung genannt und passiert nur genau dann, wenn die Photonenergie zu der benötigten Energie für den Übergang passt und das Elektron sich in einem gebundenen Zustand mit dem Atom befindet. Das Energieniveau, auf welchem sich

das Elektron zuvor befunden hat, bleibt zunächst leer. Dieser leere Platz kann durch andere Elektronen aus einem höheren Energieniveau oder dem ursprünglichen Elektron wieder aufgefüllt werden. Die Energie-differenz zwischen dem Elektron, welches den Platz auffüllt und dem Energieniveau, welches aufgefüllt wird, wird als ein Photon mit genau dieser Energie freigesetzt oder es kann ein Elektron emittiert werden [Dem16]. Die emittierten Photonen und Elektronen können Aufschluss über die abgelaufenen Prozesse geben. Aus diesem Grund müssen die emittierten Teilchen möglichst effektiv detektiert werden, sodass die Prozesse untersucht werden können.



# **Miniaturisierter Einzelteilchendetektor 3**

---

In diesem Kapitel der Arbeit wird die Entwicklung eines Einzelteilchen-detektors, dessen Charakterisierung und Anwendung beschrieben und mit einem bereits existierenden Detektor verglichen. Zum Verständnis der Funktionsweise eines Einzelteilchendetektors wird im folgenden Abschnitt beschrieben, wie ein Signal erzeugt wird und dieses für eine digitale Aufnahme weiterverarbeitet wird.

## **3.1 Grundlegende Funktionsprinzipien**

### **3.1.1 Mikrokanalplattensysteme und Signalverarbeitung**

Zur Detektion von Photonen im vakuumultravioletten Spektralbereich (VUV) eignet sich die Verwendung eines auf Mikrokanalplatten basier-ten Detektorsystems, da Mikrokanalplatten in diesem Spektralbereich sensitiv sind. Mithilfe von Messsystemen, welche zur Signalverstär-krungen Mikrokanalplatten (engl. Micro channel plates, MCP) verwen-den, ist es möglich einzelne Photonen zu detektieren. Zudem ist es mög-lich auch Prozesse mit einer sehr geringen Photonenausbeute zu beobachten. Im Fall von Photonen mit Wellenlängen  $< 120 \text{ nm}$  können die Mikrokanalplatten ohne eine spezielle Photokathode zur Elektronenerzeugung über den photoelektrischen Effekt verwendet werden, da die Energie oberhalb der Austrittsarbeit der verwendeten Halblei-ter liegt. Diese Art von Photonendetektoren wird daher oft auch als

„Open Face“ Detektor bezeichnet. Solche Systeme bestehen aus mindestens einer Mikrokanalplatte und einer Anode. Mikrokanalplatten sind aus einer Keramik bestehende Platten, welche Kanäle besitzen, die  $8^\circ$  zur Oberflächensenkrechten geneigt sind und einem Durchmesser zwischen  $10\ \mu\text{m}$  und  $100\ \mu\text{m}$  haben. Die Kanäle sind an der Innenseite halbleiterbeschichtet und die Ober- und Unterseite der Scheibenfläche ist metallisch beschichtet, sodass diese leitend ist. In dieser Arbeit werden MCPs mit einem Durchmesser von einem Zoll (25.4 mm) und einer Dicke von etwa 0.24 mm verwendet. Diese weisen einen elektrischen Widerstand von  $120\ \text{M}\Omega$  bis  $130\ \text{M}\Omega$  auf. Die MCPs werden innerhalb eines elektrischen Feldes betrieben, sodass ein Elektron, welches durch ein VUV-Photon oder ein anderes Teilchen ausgelöst wurde, in dem elektrischen Feld von der Vorderseite zur Rückseite des MCP beschleunigt wird. Durch den Winkel der Kanäle zu dem elektrischen Feld kollidieren die beschleunigten Elektronen wieder mit dem Kanalrand und lösen durch ihre im elektrischen Feld gewonnene kinetische Energie mehrere sekundäre Elektronen aus. Diese Elektronen werden beim Durchqueren des Kanals noch weitere Male vermehrt, sodass der Prozess eine Art Elektronenlawine auslöst. Nach einem solchen Prozess hat ein Kanal eine Totzeit von etwa 20 ms [W79], jedoch ist es durch die hohe Kanaldichte auf der MCP-Oberfläche sehr unwahrscheinlich einen Kanal zu treffen, welcher sich in der Totzeit befindet. Unter Verwendung eines einzelnen MCPs kann die Zahl der verstärkten Elektronen trotz eines Verstärkungsfaktors von  $10^4$  zu klein sein, um sie zu messen. Um die Verstärkung zu erhöhen, lassen sich mehrere MCPs hintereinander benutzen, wie in Abbildung 3.1 zu sehen ist. Das Signal wird dadurch allerdings auf eine größere Fläche verteilt, wodurch sich die Ortsauflösung verschlechtert. Bei zwei MCPs, welche so ausgerichtet werden, dass in einer Seitenansicht die Kanäle an ein „V“ erinnern, wird diese Konfiguration *Chevron Stack* genannt und erreicht einen Verstärkungsfaktor von bis zu  $10^7$ . Wird noch ein drittes MCP hinzugefügt, sodass in einer Seitenansicht die Kanäle an eine „Z“-Form erinnern, wird diese Konfiguration *Z-Stack* genannt und erreicht einen Verstärkungsfaktor von bis zu  $10^8$  [Han13].

Nach der Erzeugung einer großen Elektronenwolke durch das Auftreffen eines einzelnen Photons, muss dieses Signal verarbeitet werden

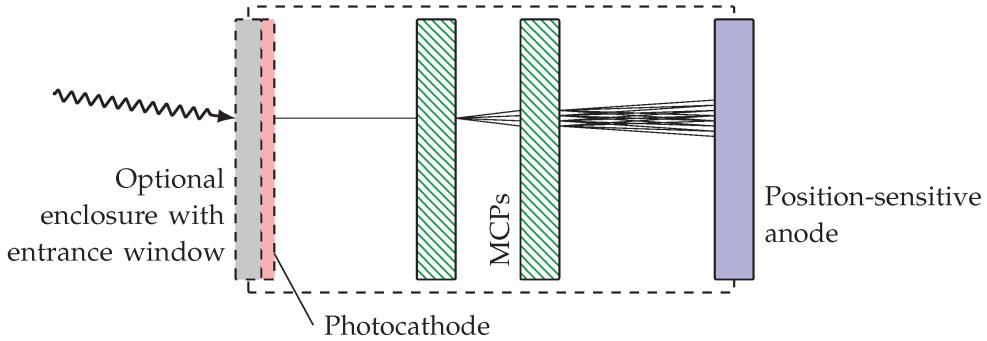


Abb. 3.1: Eine schematische Darstellung eines Chevron Stack mit einer einfach Metallplatte als Anode und schematischen verlauf der Elektronenla-wine [HSO18].

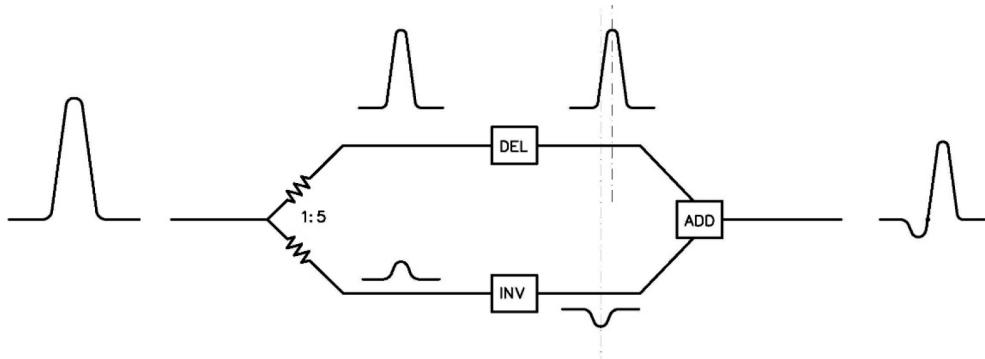


Abb. 3.2: Eine schematische Darstellung der Signalverarbeitung innerhalb eines Pulses [Roe18].

können. Dazu wird eine Anode genutzt, welche sich, wie in Abbildung 3.1 unten zu sehen ist, kurz hinter dem MCP oder *Stack* befindet. Im einfachsten Fall ist die Anode eine Metallplatte, auf welche die Elektronenwolke auftrifft. Es lassen sich aber auch ortsauflösende Anoden verwenden, mit welchen die Position der auftreffenden Elektronenwolke ermittelt werden kann. Im Falle der Metallplatte als Anode wird diese auf ein festes Potential gesetzt. Das Auftreffen einer Elektronenwolke ist dann durch einen Spannungseinbruch an der Anode messbar. Dieser wird mit Hilfe eines Verstärkers so verstärkt, dass er mithilfe eines CFDs (Constant Fraction Discriminator) gemessen werden kann. Er misst Pulse, welche eine bestimmte Höhe überschreiten und gibt diese in Form eines digitalen Signals aus.

Dazu teilt dieser zunächst das Signal, wobei zwischen den beiden Signalen ein Spannungsverhältnis von 1 : 5 hergestellt wird. Dieses

Verhältnis kann allerdings geringfügig verändert werden. Die Abbildung 3.2 zeigt den Fall für positive Pulse, jedoch werden im Rahmen dieser Arbeit nur negative Pulse verarbeitet, somit verhalten sich die Ausschläge genau invertiert. Weiter ist zu sehen, dass das ein Signal durch ein *Delay-Kabel* (dargestellt durch „*del*“) geleitet wird, wodurch der Puls zeitlich verzögert wird. In dieser Zeit wird das nicht verzögerte Signal invertiert und anschließend werden beide Signale addiert. Das resultierende Signal wird dahingehend überprüft, ob ein Registrierungsschwellenwert überschritten wird und danach ein Nulldurchgang folgt, denn genau dann wird dies als ein valides Signal aufgenommen. Der Registrierungsschwellenwert beträgt durch die Aufteilung der Signale gerade ein fünfel der eigentlich vorliegenden Pulshöhe. Für jedes valide Signal wird ein sogenannter digitaler *NIM-Puls* ausgegeben, welcher von einem Computer als ein Rechtecksignal gezählt werden kann. Die Pulshöhe des Signals ist für die Registrierung unerheblich, solange dieser höher als die Registrierungsschwelle ist. Für das Zählen und Festhalten der Pulse wird das innerhalb der Arbeitsgruppe Ehresmann entwickelte Programm  $\mu\epsilon\tau\rho$  (Metro) benutzt [Sch18a].

## 3.2 Entwicklung und Aufbau

In der Arbeitsgruppe von Prof. Arno Ehresmann ist bereits ein Detektor ortsauf lösend für VUV-Photonen im Einsatz. Er wird in den meisten Fällen zur Messung von dispergierten Spektren an einem Spektrometer verwendet. In einigen Situationen wird er, um die totale Photonenausbeute zu detektieren, direkt an der Wechselwirkungskammer angebracht. Dieser Detektor stellte in den letzten Jahren die einzige Möglichkeit dar, die totale Photonenausbeute im VUV-Wellenlängenbereich aufzunehmen. Neben der dispergierten Messung sollte auch immer zusätzlich die totale Photonenausbeute gemessen werden, um die Intensitäten hinterher vergleichen zu können. Dies ist allerdings mit nur einem weiteren Detektor, welcher für diesen Spektralbereich sensitiv ist, möglich. Der Aufbau des VUV Detektors wird in dem folgenden Abschnitt genauer beschrieben, da sich der miniaturisierte Detektor

an den baulichen Eigenheiten und Funktionsweise stark an dem bereits existierenden orientiert. Anschließend werden die Grundideen des miniaturisierten Detektor beschrieben und der Aufbau detailliert dargestellt.

#### **3.2.1 Aufbau des existierenden VUV Detektors mit ortsauf lösender Anode**

Der VUV Detektor, welcher derzeit für die Aufnahme von Spektren im VUV Wellenlängenbereich und Messungen der totalen Photonausbeute benutzt wird, wurde in der Arbeitsgruppe Ehresmann 2012 aufgebaut und in Betrieb genommen. Die Beschreibung des Detektors ist eine Darstellung des bereits im Vorfeld der Arbeit existierenden Detektor [Han18]. Der Detektor wurde in der *Open Face* Bauweise modular für den Betrieb mit zwei Mikroanalplatten konstruiert. Hierdurch ist das Austauschen von Teilen und die Änderung der Abstände zwischen den Modulen möglich.

In der Abbildung 3.3 ist eine Explosionsdarstellung des VUV Detektors zu sehen. Der Detektor besteht aus mehreren Scheiben mit verschiedenen Formen und Funktionen, M4 Gewindestangen und Muttern. Die Gewindestangen und Muttern verbinden die Scheiben miteinander und halten den Detektor zusammen. Die Gewindestangen und Muttern, um die Scheiben isoliert zu montieren, bestehen aus einem Kunststoff.

Die Grundbauweise der Scheiben ist ähnlich. Der Außendurchmesser von 78 mm und Innendurchmesser von 44 mm bleibt für alle Scheiben gleich. Die einzigen Ausnahmen sind die Grundplatte und die Kunststoffeinfassung der Mikroanalplatten, welche einen kleineren Innendurchmesser haben. Die Grundplatte ist eine massive Aluminiumscheibe mit einer Stärke von 5 mm und ist zusätzlich mit einer M8 Gewindebohrung versehen. Diese dient der Aufhängung des Detektors in einem Gehäuse. Die Anode, bei welcher es sich um eine ortsauf lösende Anode handelt, wird zwischen zwei Scheibenringen aus Aluminium gehalten und durch Scheibenringe aus Kaptonfolie isoliert. Die vordere



Abb. 3.3: Eine detaillierte und beschriftete seitliche Explosionsdarstellung des Detektors [Han13].

und hintere Anodenhalterung wird mithilfe einer Kunststoffschraube gegeneinander geschraubt und somit fixiert. Dazu ist die vordere Anodenhaltung neben den M4 Durchgangslöchern ebenfalls mit drei M3 Gewindebohrungen versehen. Die Anodenhalterungen unterscheiden sich nur in der Stärke der Scheiben. Die vordere ist 3 und die hintere 2 mm stark, sodass die Gewindebohrungen realisiert werden können.

Um die Anode von dem starken elektrischen Feld der Mikrokanalplatten abzuschirmen, befindet sich direkt über der vorderen Anodenhalterung eine Kunststoffplatte mit einer Stärke von 2 mm. Für die Fixierung und Kontaktierung der Mikrokanalplatten wurde eine spezielle Halterung konstruiert, welche in Abbildung 3.4 vergrößert dargestellt ist. Die Mikrokanalplatte wird auf einen Aluminiumring platziert, welcher über eine Nut für die Mikrokanalplatte verfügt. Die Nut ist an die Maße der Mikrokanalplatte angepasst und hat einen Außendurchmesser von 50 mm. Zusätzlich wird die Mikrokanalplatte von zwei an deren Dimensionen angepasste Kunststoffeinfassungen fixiert.

Wie in der Abbildung 3.4 zu sehen ist, werden auf die Mikrokanalplatte zwei Kontaktierungsringe gelegt, welche für die Kontaktierung der Mikrokanalplatte sorgen. Der Ring, welcher auf der Mikrokanalplatte aufliegt, ist ein dünner Ring mit einer Stärke von 0.6 mm und einem Innendurchmesser von 44 mm. Direkt über diesem Metallring liegt ein

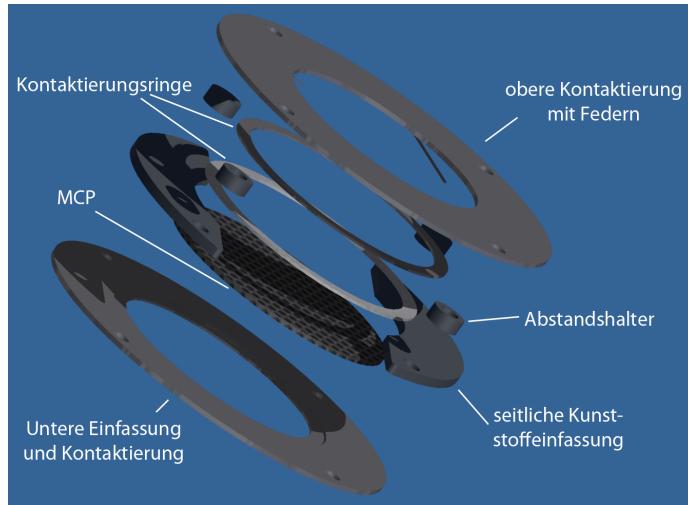


Abb. 3.4: Eine beschriftete Explosionsdarstellung von der Halterung und Kontaktierung der Mikrokanalplatten [Han13].

weiterer Ring, welcher von außen kontaktiert werden kann. Der oberste Ring ist  $SI0,5\text{mm}$  stark. Zur finalen Fixierung der Mikrokanalplatte auf der Halterung, wird mithilfe von vier Abstandshaltern auf den Gewindestangen ein weiter Ring platziert. Dieser verfügt über vier an der Unterseite kreisförmig angeordnete Blattfedern. Diese pressen die Kontaktierungsringe auf die Mikrokanalplatte und stellen eine gleichmäßige Spannungsverteilung sicher. Die Abstandshalter verhindern ein Aufliegen des oberen Kontaktrings auf den Kontaktierungsringen.

Jede Mikrokanalplatte ist in einer eigens konstruierten Fassung gehalten, welche in Abbildung 3.4 gezeigt ist. Diese Fixierung und eine Isolierung der Mikrokanalplatten erlaubt eine getrennte Kontaktierung der Mikrokanalplatten und das Anlegen separater Spannungen. Mit der Anode und den Mikrokanalplatten ist der Detektor vollständig und kann zur Detektion von Photonen im VUV-Energiebereich benutzt werden. Das vorderste MCP ist im Betrieb auf einer negativen Hochspannung. Dadurch können Photonen und Ionen detektiert werden. Um die Detektion von Ionen zu verhindern, wird vor dem Detektor ein feinmaschiges Metallgitter positiv geladen.

Durch die offene Bauweise des Detektors und den großen Abständen zwischen den MCPs kann der Detektor nur im Hochvakuum bis Ultra-hochvakuum bei Drücken unter  $5 \cdot 10^{-6} \text{ mbar}$  betrieben werden. Um

bestenfalls das Ultrahochvakuum um den Detektor sicherstellen zu können, wird der Detektor in einem Gehäuse aus CF-100 Flanschen und CF-100 Rohren mithilfe der M8 Gewindebohrung auf der Grundplatte befestigt, wodurch der Detektor äußerst große Ausmaße annimmt. Für die Nutzung an der Wechselwirkungskammer muss zusätzlich ein CF-100 Kreuz angebracht werden, da der Detektor eine eigene Vakuumpumpe benötigt. Durch diesen Detektor und seine ortsauflösende Anode können Photonen, welche auf den Detektor treffen, gemessen und ermittelt werden, an welchem Ort das Teilchen aufgetroffen ist.

#### 3.2.2 Erste Ideen und Prototypen

Für die Detektion von einzelnen Photonen, ohne die Verwendung eines Spektrometers im VUV-Energiebereich, ist der Detektor aus dem Abschnitt 3.2.1 zu gut ausgestattet, da hier die ortsaufgelösende Anode im Fall von nicht abbildenden Messung keinen Informationsgewinn darstellt. Bei diesen Messungen wird der Detektor so an der Wechselwirkungskammer montiert, dass dieser direkt auf das Interaktionsvolumen ausgerichtet ist. Hierbei ist es nicht möglich den Detektor an jedem beliebigen Flansch der verwendeten Wechselwirkungskammer zu montieren. Durch die Ausbreitungsrichtung der anregenden Strahlen, des verwendeten Probenstrahls und die Tatsache, dass das CF-100 Gehäuse zu viel Platz einnimmt, können nur wenige ausgewählte Flansche benutzt werden. Außerdem muss der Druck in der Wechselwirkungskammer berücksichtigt werden, da der Detektor nur bei einem Druck von  $5 \cdot 10^{-6}$  mbar oder niedriger zu betreiben ist. Andernfalls kann es zu Überschlägen der Spannung und damit zu Schäden an dem Detektor kommen. Bei Experimenten in der Wechselwirkungskammer, welche zu hohen Drücken führen, ist es nötig eine Apertur zwischen den Detektor und die Wechselwirkungskammer zu bringen. Dadurch verkleinert sich der Raumwinkel und damit die Ausbeute der gemessenen Photonen massiv. Die Wechselwirkungskammer ist in dieser Abbildung transparent dargestellt, sodass ein Einblick in die Kammer möglich ist. Innerhalb der Wechselwirkungskammer ist die Druckblende zu sehen, welche im folgenden Abschnitt noch weiter beschrieben wird.

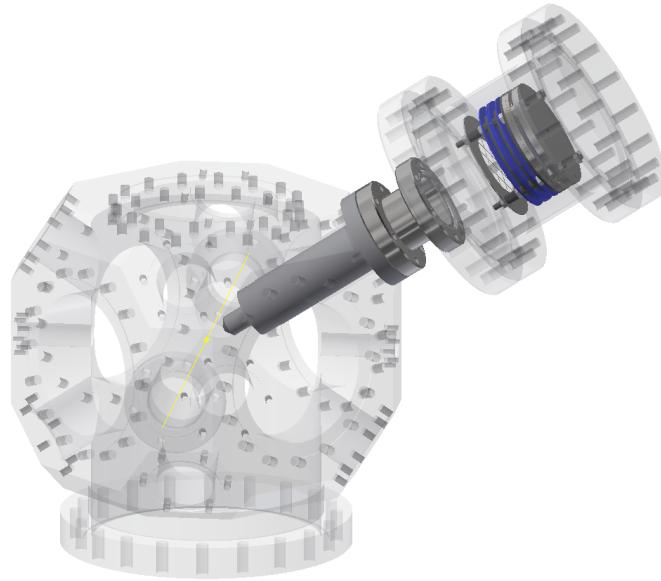


Abb. 3.5: Der VUV-Detektor an einer Wechselwirkungskammer angebaut mit den zugehörigen Druckblenden und Halterungen und dem Gehäuse, welches transparent dargestellt ist. In der Wechselwirkungskammer ist des Weiteren eine gelbe Achse und ein Punkt zu sehen. Die Achse stellt den Synchrotronstrahl schematisch dar, wobei der Punkt den erwarteten Wechselwirkungspunkt markiert.

An der Außenseite der Kammer befindet sich ein kurzes Rohr, welches es ermöglicht, einen Detektor anzubringen. In der rechten oberen Ecke der Abbildung 3.5 ist der *VUV-Detektor* zu sehen. Erst durch einen CF-100 auf CF-40 Adapter ist es möglich, den Detektor mit dem CF-40 Rohr an der Wechselwirkungskammer zu verbinden. Das Gehäuse ist ebenfalls transparent dargestellt, sodass der *VUV-Detektor* im Inneren zu sehen ist. Die Mikrokanalplatten des Detektors sind für eine besser Sichtbarkeit blau eingefärbt. Um den Raumwinkel zu vergrößern und den Detektor mit allen nötigen Bauteilen kompakter zu gestalten, wurde ein Konzept entwickelt, bei welchem sich die Mikrokanalplatten noch in der Wechselwirkungskammer befinden.

### 3.2.3 Aufbau des 1" *Open Face Detektors*

Eine Darstellung des *VUV-Detektors* an der Wechselwirkungskammer ist in der Abbildung 3.5 zu sehen. Der 1" *Open Face Detektor* wurde aus dem Prototypen, welcher in dem Abschnitt 3.2.2 beschrieben wurde,

entwickelt und zeichnet sich durch die Kompaktheit und den großen Raumwinkel aus. Der Raumwinkel, welcher durch den VUV Detektor abgedeckt werden kann, wurde anhand von Zeichnungen mit den benötigten Aperturen berechnet. Der Öffnungswinkel des VUV Detektors von  $3.38^\circ$  ergibt einen maximalen Raumwinkel von 0,022. Dieser erreichte Raumwinkel ist sehr klein und führt dazu, dass sehr viel Zeit für ausreichende Statistik aufgewendet werden muss. Bei der Entwicklung des 1" *Open Face Detektors* wurde der Raumwinkel angepasst und kann durch das Austauschen der Aperturen noch adaptiert werden. Durch die Druckblende mit einem 3 mm Lochdurchmesser und Lochlänge kann ein Raumwinkel von 0,13 erreicht werden, wodurch sich der Raumwinkel um das sechsfache verbessert. Durch die Vakuumpumpe auf der Rückseite können auch andere Druckblenden verwendet werden, solange der Druck in dem Wechselwirkungsvolumen den Druck der Detektorsektion um weniger als zwei Größenordnungen übersteigt. Für eine Druckblende mit einem Lochdurchmesser von 5 mm und einer Lochlänge von 2 mm kann der Raumwinkel auf einen Wert von 1,39 weiter verbessert werden, was einen um einen Faktor 63 höheren Raumwinkel entspricht.

Der Aufbau des Detektors lässt sich in drei Komponenten unterteilen, bei denen es sich um die Halterung, den Stack und die Druckblende handelt. Die Detektorhalterung und die Druckblende ermöglichen die Aufhängung und die Druckregulierung des *Stacks*, während der Stack die eigentlich aktive Einheit des Detektors ist. Dieser befindet sich zwischen der Druckblende und der Halterung. Bei der Entwicklung der Detektorhalterung wurde als Vorlage ein bereits bestehender Blendeneinschub mit anschraubbaren Blenden genutzt, welcher zuvor dazu verwendet wurde. Dieser Halter wurde ebenfalls dazu verwendet, den ortsaufgelösten VUV-Detektor ohne die Verwendung eines Spektrometers an der Wechselwirkungskammer anzubringen, weshalb die Bauteile genauer beschrieben werden. Dies sollte durch die *Druckblende* für einen angemessenen Druck für den Detektor sorgen. In der Abbildung 3.6 ist die zuvor verwendete Halterung für den ortsaufgelösten VUV-Detektor dargestellt.

Bei dem hier gezeigten Halter handelt es sich um einen aus Aluminium

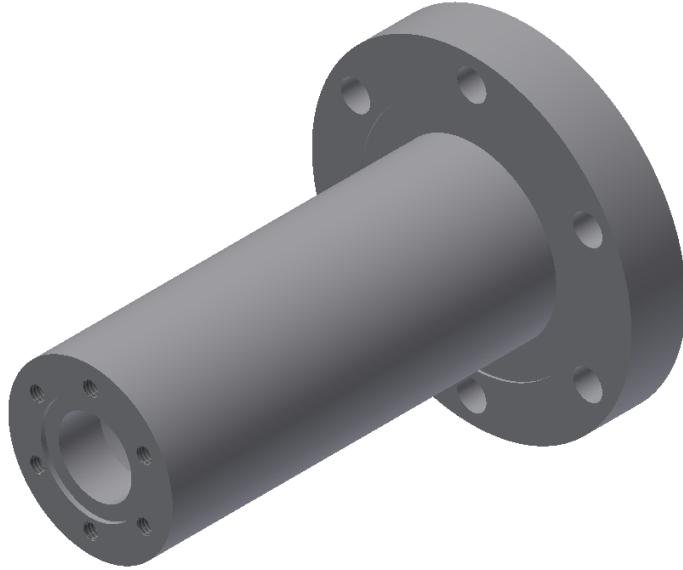


Abb. 3.6: Der Blendeneinschub mit anschraubbaren Blenden, welcher ebenfalls für den VUV Detektor benutzt wurde.

gefertigtes Rohrstück, welches an einem Ende einen beidseitig mit Dichtflächen versehenen CF-40 Flansch besitzt. Dieser dient dazu, die Halterung an der Wechselwirkungskammer zu montieren. Auf der vorderen Seite befindet sich eine Dichtfläche, mithilfe dieser an einer Wechselwirkungskammer befestigt werden kann. Die Vorderseite des Bauteils ragt in die Wechselwirkungskammer. Am Ende des Halters befindet sich eine CF-16 Verbindung mit Dichtfläche, an welcher die Druckblenden befestigt werden.

Diese ist mit unterschiedlichen Lochdurchmessern verfügbar. In der Abbildung 3.7 ist exemplarisch eine Druckblende mit einem Durchmesser von 3 mm zu sehen. Die Bohrung sitzt mittig auf der kegelförmigen Spitze der Druckblende und ist 2,1 mm. Mithilfe dieser wird verhindert, dass sich ein höherer Druck in der Wechselwirkungskammer auf den Druck in dem Detektor negativ auswirkt. Hierdurch wird aber auch der einsehbare Raumwinkel des Detektors stark verringert.

In der Abbildung 3.8 sind alle Bestandteile des *1" Open Face Detektor* zu sehen. Der *Stack* des Detektors, welcher sich aus mehreren Bestandteilen zusammensetzt und für den *1" Open Face Detektor* entwickelt

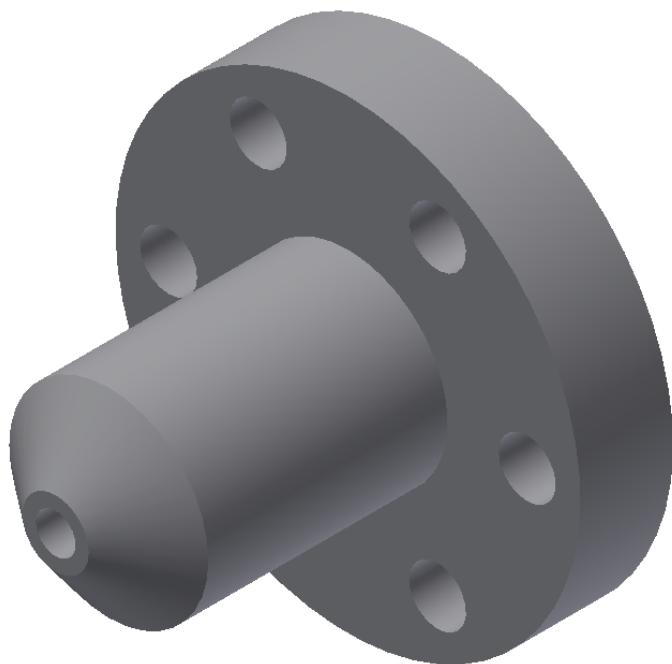


Abb. 3.7: Die Druckblende für eine Druckregulation innerhalb der Detektorhalterung.

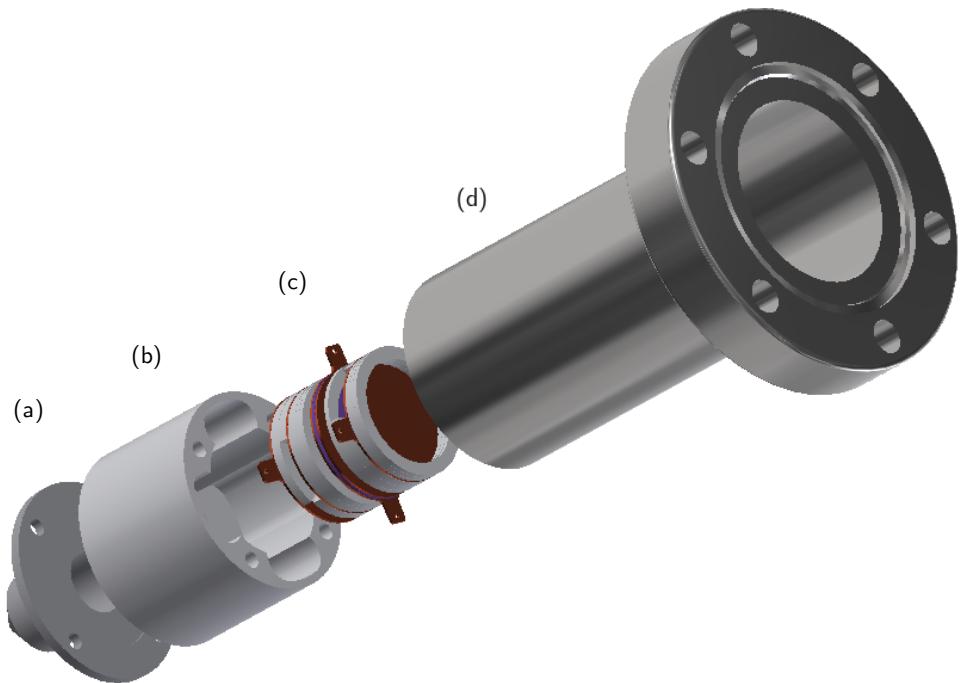


Abb. 3.8: Die Explosionsdarstellung des 1" Open Face Detektors, wobei hier die der Detektorhalterung (a), schematisch zusammengesetzter Stack(b), die Hülse (c) und die Druckblende(d) zu sehen ist.

wurde, befindet sich in einem Gehäuse. Dieses fungiert gleichzeitig als Halterung des *Stacks*. Für die Anpassung des 1" *Open Face Detektors* für die genutzte Wechselwirkungskammer wurde die Detektorhalterung verkürzt. Des Weiteren wurde am Ende der Halterung der CF-16 Flansch entfernt. Statt dessen endet die Vorderseite der Detektorhalterung mit vier M3 Gewindebohrungen. Der doppelte CF-40 Flansch ist im Vergleich zu dem Blendeneinschub mit anschraubbaren Blenden gleich geblieben. Der Außendurchmesser von 38 mm der Detektorhalterung ist größer geworden. Hierdurch lässt sich der Detektor durch die meisten CF-40 Flansche hindurchführen und bietet im Gegenzug mehr Raum im Inneren der Halterung.

Bei dem Innendurchmesser und der Realisierung der Gewindebohrungen unterscheiden sich die Detektorhalterung und der Blendeneinschub mit anschraubbaren Blenden sehr stark. In Abbildung 3.6 ist zu sehen, dass sich der Innendurchmesser an der Vorderseite durch den CF-16 Flansch extrem verkleinert. Dieser verringert sich von 30 mm auf 16 mm. Dies ergibt eine Wandstärke von 3 mm und trägt damit zur Stabilität bei. An der Vorderseite befindet sich durch die 10 mm lange Verjüngung mit den sechs M3 Gewindebohrungen sehr viel Material. Durch die Verjüngung kann des Weiteren weniger Gas strömen, wodurch weniger Gas zu der Vakuumpumpe gelangen kann und der Druck möglicherweise höher wird.



Abb. 3.9: Die Detektorhalterung für den 1" Open Face Detektor.

Die neu konstruierte Detektorhalterung hat einen Innendurchmesser von 35 mm und besitzt an der Vorderseite 15 mm hohe Verstrebungen, welche die Stabilität sicherstellen, aber reduzieren den effektiven Innendurchmesser auf 21 mm. Wie in der Abbildung 3.9 zu sehen ist, befinden sich auf dem Verstrebungen M3 Gewindebohrungen. Dies dient zur Fixierung des *Stacks*, sowie ausreichend Raum für die Verkabelung. Auf die M3 Gewindebohrungen an der Vorderseite der Halterung werden das Gehäuse des *Stacks* und die Druckblende befestigt. Das Konzept des Detektors zeichnet sich dadurch aus, dass der *Stack*, welcher die aktiven Elemente des Detektors enthält, sehr nah am Wechselwirkungszentrum ist. Dies kann umgesetzt werden, indem der *Stack* in der hier sogenannten Hülse direkt an der Vorderseite des Detektorhalters platziert wird.

Die Hülse hat den gleichen Außendurchmesser, wie die Detektorhalterung und die Druckblende, sodass die Konstruktion eine geschlossene Einheit bildet und ist 28 mm hoch. Der Detektor kann dadurch einfacher aus einem Flansch an der Wechselwirkungskammer gezogen werden und verhakt sich nicht an möglichen Kanten.

Die Hülse besteht aus dem Kunststoff PEEK (Polyetheretherketon), wel-

cher mechanisch so stabil ist, dass er sich gut bearbeiten und mit den anderen, aus Aluminium gefertigten Bauteilen, verschrauben lässt. Des Weiteren ist das Material für Anwendungen im Hochvakuum geeignet. Innerhalb der Hülse herrscht im Betrieb ein elektrisches Feld, welches die Hülse abschirmen muss. Die Hülse aus PEEK ist zudem in der Lage, ohne eine gesonderte Dichtfläche an der Hinterseite, bis zu einem Druck von  $10^{-7}$  mbar zu dichten. Für den Fall, dass bessere Vakuumbedingungen erfüllt werden müssen, verfügt die Hülse über eine 0.5 mm tiefe Nut, welche in Abbildung 3.12 auf der rechten Seite zu sehen ist. Der Lochkreis mit den M3 Bohrungen stimmt mit dem der Druckblende und des Rohres überein und wird zur Verschraubung des Detektors. Die Öffnung an der Vorderseite der Hülse, welche einen Durchmesser von 20 mm hat, ist das Eintrittsloch für die zu detektierenden Teilchen.

In der Abbildung 3.12 ist die Hülse von der Seite zu sehen. Im Inneren der Hülse ist die Öffnung des Eintrittslochs (rechts in der Abbildung) und die Aufnahmen für die Bestandteile des *Stacks* (links in der Abbildung) zu sehen. Dafür wurde die Hülse mit einem Durchmesser von 25 mm von der Rückseite aus 23 mm tief aufgebohrt. Zwischen den Durchgangslöcher befinden sich, wie bei der Detektorhalterung, Aussparungen. Diese stellen sicher, dass Gase abgepumpt werden können, damit sich innerhalb des *Stacks* ein Hoch- oder Ultrahochvakuum ausbilden kann. Diese Aussparungen verbessern nicht nur die Pumpieigenschaften des Detektors massiv, sondern bieten auch Platz für die elektrische Verkabelung des Detektors.

Die Verstrebungen in der Hülse und dessen Außenmaße passen genau auf diese der Detektorhalterung, wobei die Verstrebungen der Hülse kürzer sind, als diese der Detektorhalterung. Dies führt dazu, dass der *Stack* von der Detektorhalterung in die Hülse gepresst wird, was in Abbildung 3.10 dargestellt ist. An den rot markierten Stellen liegen die Verstrebungen an der Detektorhalterung auf der Rückseite des *Stacks* auf.

Der *Stack* selbst besteht, wie bei dem VUV-Detektor, aus mehreren Teilen und wird in der Hülse übereinandergestapelt. In der Abbildung 3.11 ist der *Stack* in einer Explosionszeichnung zu sehen. In grau sind die

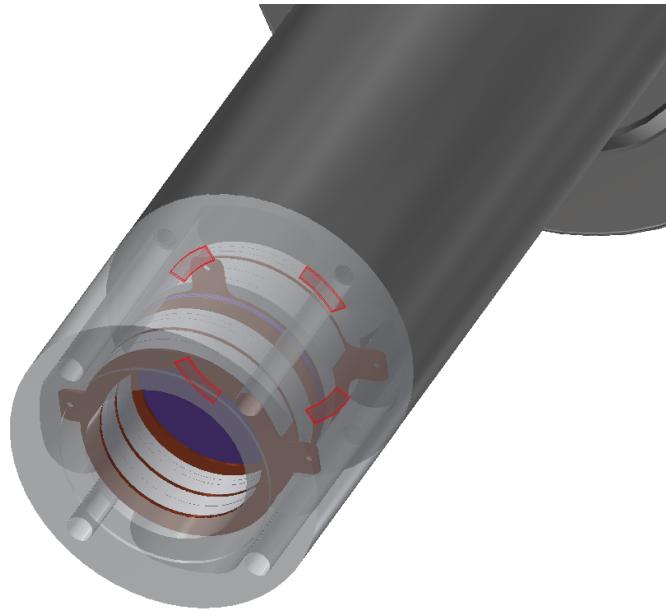


Abb. 3.10: *Die Verbindung der Detektorhalterung mit der Hülse mit dem Stack im Inneren, sodass der Stack fixiert wird.*

Isolatoren dargestellt, welche sich in geschlossene und offene Isolatoren unterteilen lassen. Die Isolatoren dienen neben der elektrischen Isolation auch als Abstandshalter und stellen einen Gasdurchfluss zwischen den Bauteilen sicher.

Alle Isolatoren haben einen Außendurchmesser von 24,9 mm und einen Innendurchmesser von 20 mm. Diese passgenaue Fertigung sorgt dafür, dass diese nur geringfügig verrutschen können. Speziell die offenen Isolatoren werden als Abstandshalter und zur Belüftung eingesetzt. Die Isolatoren sind in den Stärken 1 mm, 1,5 mm und 2 mm gefertigt worden, sodass der durch die Isolatoren erzeugte Abstand bis auf einen halben Millimeter variabel ist. Die Öffnung an einer Stelle des Isolator entspricht einem Öffnungswinkel von 60°. Für eine optimale Belüftung werden die Öffnungen so ausgerichtet, dass sich deren Aussparungen auf einer Achse befindet.

Bei diesen Detektoraufbau wurden drei Mikrokanalplatten in der sogenannten Z-Stack Konfiguration verwendet, welche in Abbildung 3.11 als violette Scheiben dargestellt sind. Diese befinden sich zwischen zwei hier in kupferfarben dargestellten Kontaktringen, deren Maße

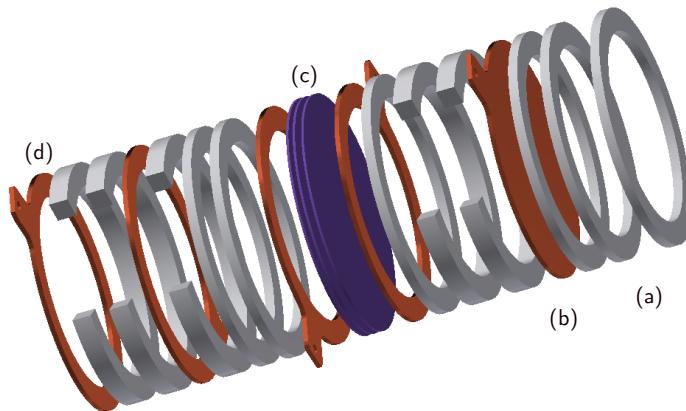


Abb. 3.11: *Der Stack in einer Explosionsdarstellung ohne die verwendeten O-Ringe und Metallnetze. Dargestellt sind die Isolatoren (a), Anode (b), MCPs (c) und die Kontaktringe (d).*

mit den zuvor beschriebenen Isolatoren vergleichbar sind. Für eine elektrische Kontaktierung besitzen diese Ringe an den Seiten gelochte Laschen mit einem Lochdurchmesser von 1 mm, an denen die Kabel angelötet werden können.

Da die Laschen etwa 4.5 mm herausstehen, müssen diese innerhalb der Aussparungen der Hülse platziert werden. Wenn die Laschen in der gegenüberliegenden oder benachbarten Aussparungen platziert werden, sind die Lötstellen der Kabel und der Laschen voneinander isoliert und es können Überschläge bei hohen Spannungen vorgebeugt werden. Auf die beiden Kontaktringe an der Vorderseite des *Stacks*, welche in der Abbildung 3.11 auf der linken Seite zu sehen sind, wird ein feinmaschiges Metallnetz aufgelegt und mit einem Isolator darüber befestigt. Die Kontaktringe an den Mikrokanalplatten werden durch jeweils einen geschlossenen Isolator und einen O-Ring aus Viton, welcher nicht in der Abbildung 3.11 zu sehen ist, fixiert. Der O-Ring sorgt dafür, dass mögliche Stöße auf den *Stack* nicht auf die Mikrokanalplatten übertragen wird.

Zur Fixierung des *Stacks* ist dieser circa 0.3 mm höher als die hintere Außenkante der Hülse. Durch das Anschrauben der Hülse an die Detektorhalterung werden die beiden O-Ringe zusammengedrückt und verhindern, dass der *Stack* sich innerhalb der Hülse verschieben kann

und die Mikrokanalplatten dennoch geschützt sind. Durch den leichten Druck der Kontaktringe auf die Mikrokanalplatten, liegen diese mit maximaler Fläche auf den Mikrokanalplatten auf. Auch die Mikrokanalplatten selbst werden leicht aufeinander gedrückt, wodurch diese sich an jedem Punkt berühren und ein Potential gleichmäßiger angelegt werden kann. Für eine Kraftübertragung zwischen den Kontaktringen, den Isolatoren und der Detektorhalterung, werden die geschlossenen Isolatoren mit einer Stärke von 1 mm verwendet. Die kupferfarbene Scheibe am Ende des *Stacks* ist die Anode des Detektors, welche aus einer massiven Kupferscheibe mit Außenmaßen eines Kontaktrings besteht.

Die Druckblende besteht aus einer Scheibe, welche zur Befestigung dient. Darauf befindet sich ein Hohlzylinder, welcher mit einer Spitze in der Form eines Kegelstumpfes endet. Am Ende des Kegels befindet sich ein ein Loch. In der Abbildung 3.13 ist ein Modell der Druckblende zu sehen. Der zylindrische Teil der Druckblende ist 14 mm hoch und hat einen Durchmesser von 15 mm. Der Innendurchmesser des Zylinders beträgt 12 mm. Daran anschließend befindet sich die Kegelförmige Spitze, welche eine Höhe von 6 mm hat. Das Eintrittsloch am Ende der Spitze ist 3 mm im Durchmesser. In der Abbildung 3.13 ist weiterhin zu erkennen, dass der Durchmesser des Eintrittsloches für eine 3 mm lange Strecke beibehalten ,um ein optimales Verhältnis von Durchmesser, Lochlänge und der Position des *Stacks* zu gewährleisten. Im Vergleich zu der Druckblende des Blendeneinschubs in der Abbildung 3.7 ist zu erkennen, dass das Loch an der Vorderseite keinen Rand hat und die Scheibe an der Rückseite wesentlich flacher ist. Bei der Druckblende, welche für den 1" *Open Face Detektor* verwendet wird, ist der Flansch 2 mm dick und hat einen Außendurchmesser von 38 mm. Dies macht die Blende wesentlich kompakter und ermöglicht es, die Blende näher an dem Interaktionsvolumen zu platzieren, ohne die sich dort kreuzenden Strahlen negativ zu blockieren. In der Abbildung 3.13 ist zu sehen, dass die Druckblende über eine CF-16 konforme Dichtfläche verfügt. Wie zuvor beschrieben sorgt, die aus PEEK gefertigte Hülse aber für ausreichend gute Vakuumbedingungen, sodass diese Dichtfläche nur bei Bedarf notwendig ist.

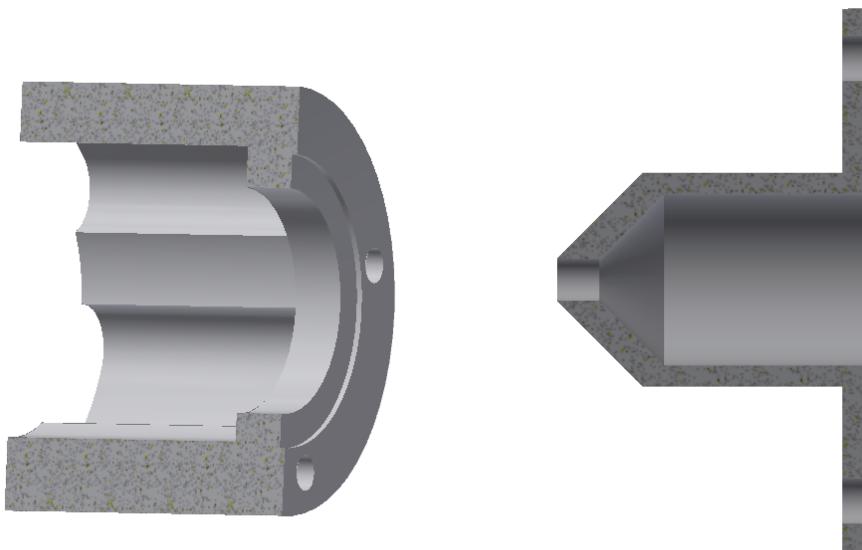


Abb. 3.12: Eine der Hülse in einem Halbschnitt.

Abb. 3.13: Die Druckblende in einer Seitenansicht mit einem Halbschnitt.

Die Teile des 1'' *Open Face Detektors* werden zusammengesetzt und als eine gesamte Einheit verwendet. An der Rückseite der Detektorhalterung ist ein 10 cm langes CF-40 Rohr angebracht, an welches ein CF-40 Würfel angeschraubt ist. An diesem Würfel sind BNC- und SHV-Durchführungen befestigt. Diese ermöglichen es, die Kontaktringe unter Vakuum von außen mit dem entsprechenden Kabel zu kontaktieren. Das Vakuum kann durch eine am Ende des Würfels angebrachte Turbomolekularpumpe sichergestellt werden. Der Druck innerhalb des Detektors kann durch einen Druckmesskopf kontrolliert werden, welcher ebenfalls an den Würfel angebaut werden kann. Bei der ersten Inbetriebnahme des Detektors ist aufgefallen, dass der Anbau zwischen der Detektorhalterung, der Wechselwirkungskammer und dem CF-40 Rohr an der Detektorhalterung schwer umzusetzen ist.

Die Wechselwirkungskammer verfügt über einen Lochkreis mit Sacklöchern, wobei die Detektorhalterung und das CF-40 Rohr nur über Durchgangslöcher verfügen. Dadurch musste das CF-40 Rohr mit allen Anbauteilen gleichzeitig mit der Detektorhalterung auf Gewindestangen an der Wechselwirkungskammer montiert und vakuumdicht verschraubt werden. Hierdurch kann es durch äußerst geringe Unge-



Abb. 3.14: Die Darstellung der aktualisierten Detektorhalterung des 1" Open Face Detektors.

nauigkeiten bei dem Anbau dazu kommen, dass diese Verbindung nicht vakuumdicht ist. Des Weiteren ist es sehr schwer eine Viton-Dichtung über die Detektorhalterung zu streifen, da der Außendurchmesser der Detektorhalterung etwas größer (genauso groß) wie der Innendurchmesser der standardisierten CF40 Vitondichtungen ist.

Um das Anbringen des Detektors zu vereinfachen, wurde die Detektorhalterung weiter überarbeitet. An dem CF-40 Flansch am Ende der Detektorhalterung wurde jedes zweite Durchgangsloch durch Gewindebohrungen ersetzt. Dies konnte auch noch nachträglich durch zusätzliche Gewindebohrungen umgesetzt werden, indem weitere Gewindebohrungen zwischen den Gewindebohrungen hinzugefügt wurden.

Eine Änderung, welche nicht nachträglich möglich war sondern erst bei der Fertigung eines Weiteren Detektorhalters, war die Verringerung des Innendurchmessers auf 30 mm. Hierdurch war es möglich, den Außendurchmesser der Halterung im Bereich des CF40-Flansches zu verjüngen, wodurch es vereinfacht wird, die Vitondichtungen auf der Dichtfläche zu platzieren. Der Außendurchmesser im Bereich, an welchem die Halterung auf die Detektorhülse stößt wurde hierbei nicht verjüngt um die Kontaktfläche der beiden Teile flächendeckend zu be-

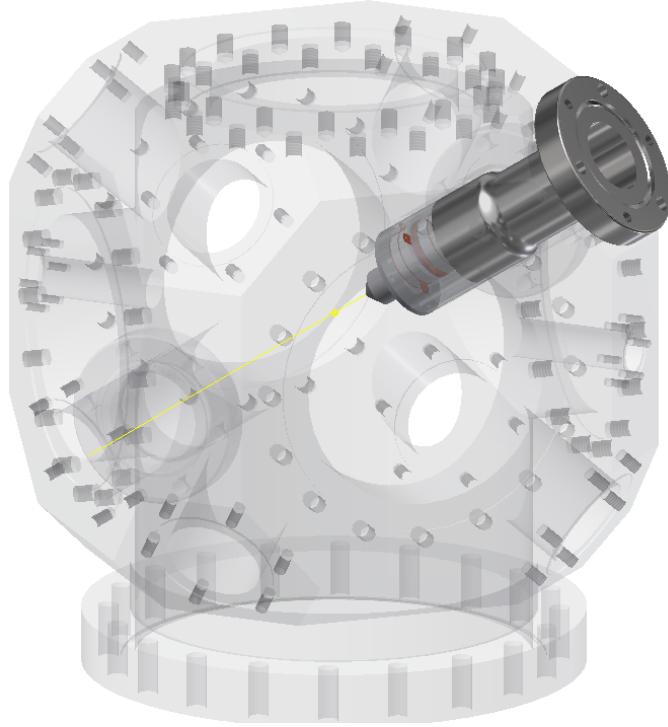


Abb. 3.15: Eine Darstellung des 1" Open Face Detektors angebaut an einem CF-40 Flansch der Wechselwirkungskammer.

lassen. In der Abbildung 3.14 ist die überarbeitete Detektorhalterung zu sehen.

In Abbildung 3.5 ist der *VUV-Detektor* in einem angebautem Zustand an der Wechselwirkungskammer zu sehen. Im Vergleich dazu ist in Abbildung 3.15 der 1" *Open Face Detektor* mit den aktualisierten Bauteilen ohne den CF-40 Würfel zusammen mit der Wechselwirkungskammer transparent dargestellt, sodass die relevanten Bauteile zu sehen sind. In dieser Darstellung sind die Mikrokanalplatten violett eingefärbt. Durch den Betrachtungswinkel und die geringe Größe der Mikrokanalplatten im Vergleich zu der Wechselwirkungskammer, sind diese kaum zu sehen. Aus diesem Grund ist in der Abbildung 3.10 eine vergrößerte Darstellung ohne eine Druckblende zu finden. Damit die Veränderungen und Unterschiede zwischen den beiden Detektor deutlicher werden, ist in der Abbildung 3.16 eine Vergleichsdarstellung zu finden.

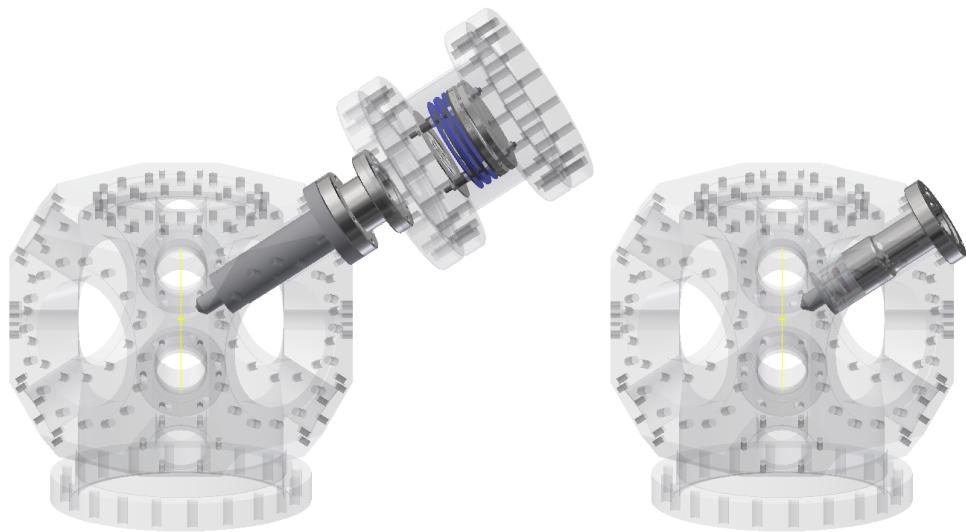


Abb. 3.16: *Der VUV-Detektor an der Wechselwirkungskammer ist auf der linken Seite dargestellt und auf der rechten Seite der 1'' Open Face Detektor.*

Auf der linken Seite ist der *VUV-Detektor* mit Druckblende, Gehäuse und dem CF-40 Verbindungsstück zu sehen. Da der Detektor nur unter Vakuum betrieben werden kann, müsste dieser zusätzlich an eine Vakuumpumpe angeschlossen sein. Dies kann durch einfügen eines CF-40 Kreuz an Stelle des kurzen CF-40 Rohrs realisiert werden. Allerdings würde dies den Detektor noch weiter von dem Interaktionsvolumen entfernen. Auf der rechten Seite ist der *1'' Open Face Detektor* ohne die Anbauteile am hinteren Ende dargestellt, da diese die Funktion des Detektors nicht einschränken. Es ist in der Abbildung 3.16 besonders zu sehen, dass der *1'' Open Face Detektor* wesentlich kompakter ist. Des Weiteren hat sich die Entfernung des vordersten MCP zu dem Interaktionsvolumen von 260 mm auf eine Strecke von 56.5 mm verkürzt, was zu einem wesentlich größeren Raumwinkel führt.

### 3.3 Charakterisierung der Photonendetektion im vakuumultravioletten Spektralbereich

Nach dem Aufbau des Detektors und der ersten Inbetriebnahme muss dieser für die Nutzung und richtige Interpretation der Daten charakte-

### 3.3 Charakterisierung der Photonendetektion im vakuumultravioletten Spektralbereich

risiert werden. Es zeigte sich, dass es für die Messung von einzelnen Photonen notwendig ist, drei Mikrokanalplatten in der sogenannten Z-Stack Geometrie zu verwenden. Nur dann ist die Verstärkung der MCPs ausreichend, um die Ereignisse zuverlässig auszukoppeln und so zu detektieren. Im folgenden werden zunächst die elektrischen Widerstände und Spannungscharakteristiken des Detektors an den Mikrokanalplatten und der Anode bestimmt. Zusätzlich wird die Verarbeitung der Detektorsignale anhand von Messdaten analysiert und nötige Eigenschaften der Signalverarbeitung erarbeitet.

Für eine zuverlässige Detektion der Einzelphotonen ist es notwendig, die angelegten Spannungen an den Mikrokanalplatten und der Anode so zu optimieren, dass eine ausreichend hohe Verstärkung der Signale erreicht wird und die Lebensdauer der Komponenten dabei möglichst wenig negativ zu beeinflussen. Um die Potentialdifferenz zwischen der vordersten und der hintersten Mikrokanalplatte zu regulieren, wird an der vordersten eine Spannungsquelle und der hintersten eine Widerstandskaskade angeschlossen. Die Widerstandskaskade ermöglicht einen Widerstand zwischen  $5\text{ M}\Omega$  und  $35\text{ M}\Omega$  gegen Erdpotential einzustellen, sodass durch den Gesamtwiderstand der drei Mikrokanalplatten von  $400\text{ M}\Omega$  ein Spannungsabfall von 98.75 % – 91.3 % einstellbar ist. Dies ist gerade der Anteil des Widerstandes der Widerstandskaskade im Vergleich zu dem Gesamtwiderstand der in Reihe geschalteten Mikrokanalplatten. Anhand der Höhe der Pulse und dessen Zählrate hat sich gezeigt, dass ein Abfall der Spannung um 95 % gute Ergebnisse liefert, sodass für die weitere Charakterisierung des Detektors dieses Verhältnis der Spannungen konstant ist.

Um einen störungsfreien Betrieb der Detektoren sicherzustellen, wurde für die Spannungsversorgung der Mikrokanalplatten ein ORTEC *Bias Supply 0-5KV*(ORTEC) genutzt. Das ORTEC besitzt zwei verschiedene Ausgänge, welche sich durch die erreichbare Maximalspannungen von 500 V und 5000 V unterscheiden. Die Mikrokanalplatte benötigen eine Hochspannung, wodurch hier der  $-5000\text{ V}$ -Ausgang gewählt wird. Die Anode wird ebenfalls mit einer ORTEC Spannungsquelle in einer positiven Polarität auf das benötigte Potential gebracht, wobei hier der 500 V-Ausgang benutzt wird, da in diesem Spannungsbereich die Span-

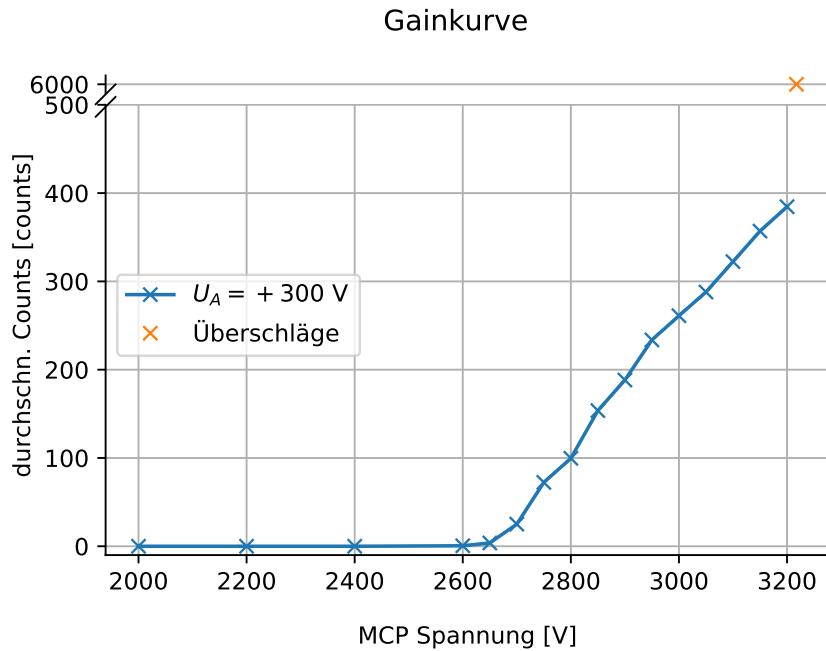


Abb. 3.17: Die Gainkurve des 1'' Open Face Detektors für eine Anodenspannung von 300 V, dargestellt als Funktion von der gemittelten Zählrate in Abhängigkeit von der anliegenden MCP-Spannung bei einer Registrierungsschwelle des CFD von 103.63 mV

nung genauer einstellbar ist und nur Spannungen bis 500 V verwendet werden. Zwischen Anode und Spannungsquelle befindet sich zusätzlich eine kapazitive Kopplung, welche die statische Hochspannung von dem hochfrequenten Ausgangssignal durch einen Kondensator trennt.

Dadurch können die Detektorpulse in Form von Spannungseinbrüchen an einem gesondertem Signalausgang gemessen werden. Die Benutzung eines feinmaschigen Metallnetz zur Ionen-Abwehr ist abhängig von der Art des Aufbaus. In diesem Fall wurde der Detektor an einem Spektrometer angebaut und der Detektor mit der nicht dispergierten Reflexion des Gitters belichtet. Da das Spektrometer durch Aperturen und einen Spiegel von der Wechselwirkungskammer getrennt ist, kann davon ausgegangen werden, dass sich sehr wenige Ionen in der Kammer befinden. So ist die Nutzung der feinmaschigen Metallgitter nicht notwendig und wird in der Charakterisierung nicht berücksichtigt [Sch18a, Han18]. Das ausgetaktete Anodensignal kann nach einer nachträglichen Verstärkung sehr gut weiterverarbeitet und analysiert werden. Dazu wird ein *RoentDek FAMP*-Verstärker benutzt, welcher das

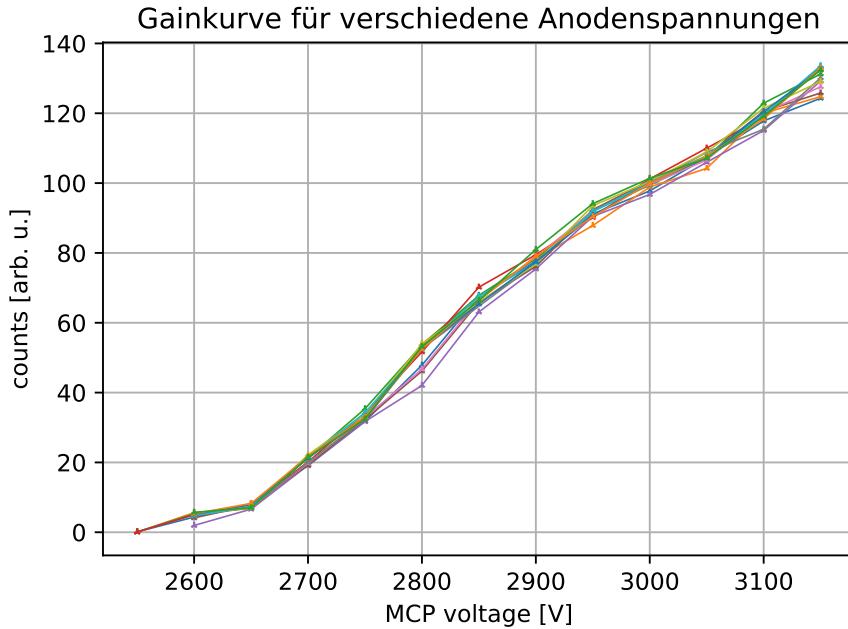


Abb. 3.18: Die Gainkurven in einer Darstellung der gemittelten Zählrate als Funktion von der Spannung der vorderen Mikrokanalplatte für Anodenspannungen im Bereich von 100 V – 400 V in 25 V-Schritten und einer Registrierungsschwelle des CFD von 70 mV.

Eingangssignal verstärkt und über zwei separate Ausgänge die Möglichkeit gibt, dieses invertiert oder nicht invertiert weiterzugeben. Im Weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die Ausgänge auf die Gleichheit ihrer Signale überprüft. Dadurch können zwei Untersuchungen des Signals gleichzeitig umgesetzt werden. Um die Zählrate des Detektor zu ermitteln, wird das verstärkte Signal mit Hilfe eines CFD, ADC (Übersetzer der CFD Signale für den Computer) und Metro [Sch18a] inzählbare Pulse umgewandelt und gemessen. Der Ausgang des invertierten Signals wurde an ein Oszilloskop (*LeCroy (Teledyne LeCroy) HDO6054*) angeschlossen werden, sodass die Art des Pulses dargestellt wird. Zusätzlich kann mithilfe des Oszilloskops jeder von dem CFD gezählte Puls nach der maximalen Pulshöhe sortiert in einem Histogramm dargestellt werden. Neben der eingestellten MCP Spannung kann auch die Anodenspannung zu der Höhe und Form der Pulse beitragen, sodass diese ebenfalls untersucht werden müssen.

In der Abbildung 3.17 ist die Zählrate des Detektors bei einem konstanten Signal und konstanter Anodenspannung zu sehen. Die Spannung

an dem vorderen Mikrokanalplatte wird variiert, wobei bei konstantem prozentualen Spannungsabfall nur die Spannung an der vorderen Mikrokanalplatte (MCP-Spannung) angegeben wird. Es wurde bei einer Spannung von  $-2000\text{ V}$  begonnen und in  $200\text{ V}$  Schritten vergrößert, da in diesem Bereich keine Detektion stattfindet. Ab einer Spannung von  $-2600\text{ V}$  ist ein Anstieg der Zählrate zu sehen, weshalb die Schrittweite für eine genauere Darstellung verkleinert wurde. Ab einer Spannung von etwa  $-3200\text{ V}$  steigt die am CFD gemessene Zählrate schlagartig auf mehr als  $6000\text{ Hz}$  an, wodurch davon auszugehen ist, dass dies kein echtes Signal mehr ist, sondern eine Störung, welche Kurzschlüsse innerhalb des Detektors sein können. Die Messung musste daher vor dieser Spannung beendet werden, da es sonst zu Schäden kommen kann. Eine Sättigung der Zählrate bei einer hohen Betriebsspannung konnte also nicht erreicht werden. Dennoch reicht der dargestellte Bereich aus die *Gainkurve* des  $1''$  *Open Face Detektors* bei einer Detektion von Photonen und einer konstanten Anodenspannung von  $300\text{ V}$  ausreichend zu beschreiben, da sich die Betriebsspannung etwa in der Mitte der steigenden Flanke der *Gainkurve* befinden sollte. Diese liegt hier bei  $-2900\text{ V}$  bis  $-3000\text{ V}$ . Die *Gainkurve* beschreibt die Anzahl der detektierten Pulse in Abhängigkeit der Betriebsspannung bei einem gleichbleibendem Signal, welches auf dem Detektor trifft.

Da die *Gainkurve* nur für eine Anodenspannung gemessen wurde, ist zunächst unklar, wie sich eine Variation der Anodenspannung auf den Verlauf der Gainkurve auswirkt. Um dies zu überprüfen, wurden weitere Messreihen mit verschiedenen Anodenspannungen aufgenommen. Die MCP-Spannung wurde dabei zwischen  $-2600\text{ V}$  und  $-3200\text{ V}$  in  $100\text{ V}$  Schritten variiert. Die Anodenspannungen wurden zwischen  $100\text{ V}$  und  $500\text{ V}$  in  $25\text{ V}$  Schritten variiert. Die Ergebnisse dieser Messreihe sind in Abbildung 3.18 dargestellt und zeigen, dass die Zählrate des Detektors nicht von der Wahl der Anodenspannung abhängig ist. Die verschiedenen *Gainkurven* für die jeweiligen Anodenspannungen zeigen keinen systematischen Einfluss auf die gemessenen *Gainkurven*, sodass für die Zählrate nur die Spannung zwischen den Mikrokanalplatten entscheidend ist. Bei der Wahl einer anderen Registrierungsschwelle des CFD ist jedoch die Pulshöhe entscheidend für die Zählrate und den Anteil von Störsignal innerhalb der Messung. Aus diesem Grund wurde

### 3.3 Charakterisierung der Photonendetektion im vakuumultravioletten Spektralbereich

der invertierte Ausgang des Verstärkers dazu benutzt, die Pulshöhen der gezählten Pulse zu untersuchen. Dadurch können die gezählten Pulse auf dem Oszilloskop betrachtet und weiterverarbeitet ohne die eigentlichen Messungen zu beeinträchtigen.

Mithilfe des Oszilloskops wird die maximale Höhe eines registrierten Pulse gemessen. Wird ein positiver Puls gemessen, stellt die maximal gemessene Spannung während eines Pulses die Pulshöhe dar, da das Signal aus dem invertierten Ausgang des Verstärkers bezogen wird. Die Maxima der Pulse werden gespeichert und können als ein Histogramm über die Anzahl der Pulse innerhalb eines Spannungsbereichs dargestellt werden. Um sicherzustellen, dass die Signale aus beiden Verstärkerausgängen im Bezug auf die Pulshöhen im Betrag gleich sind, wurde dies in einer Weiteren Messreihe untersucht. Dazu wurde nacheinander ein Histogramm der Pulshöhen von beiden Ausgängen gemessen, wobei der Detektor bei gleichen Spannungen betrieben wurde. Auf den Pulshöhenverteilungen in Abbildung 3.19 sind beide Verstärkerausgänge zu sehen. Bei beiden Messungen wurde insgesamt 1000 Pulse aufgenommen.

Bei beiden Signalen ist ein sehr großer Ausschlag bei 50 mV zu sehen, welcher durch eine zu niedrige Registrierungsschwelle des CFD zu erklären ist. Bei dem regulären verstärkten Ausgang ist bei 1.5 V ein weiterer Ausschlag zu sehen, welcher durch die Fenstereinstellung des Oszilloskops erklärt werden kann. Das Oszilloskop betrachtet nur die in der Fenstereinstellung sichtbare Spannungsskala. Solche Messwerte, welche den Messbereich verlassen, werden zu dem höchst möglichen Spannungsbereich gezählt und bilden einen hohen und scharfen Ausschlag am Ende des Messbereichs. Wenn diese Artefakte außer Acht gelassen werden, da sie auf Fehleinstellung des Oszilloskops und des CFD zurückzuführen sind, sind die Spektren beinahe identisch. So kann im folgenden der Einfluss der MCP-Spannung und der Anodenspannung auf die Pulshöhenverteilungen untersucht werden.

Da für alle Messpunkte in der Abbildung 3.18 eine Pulshöhenverteilung gemessen wurde, können diese nach Anodenspannung sortiert und als eine Gesamtpulshöhenverteilung für eine der *Gainkurven* zusam-

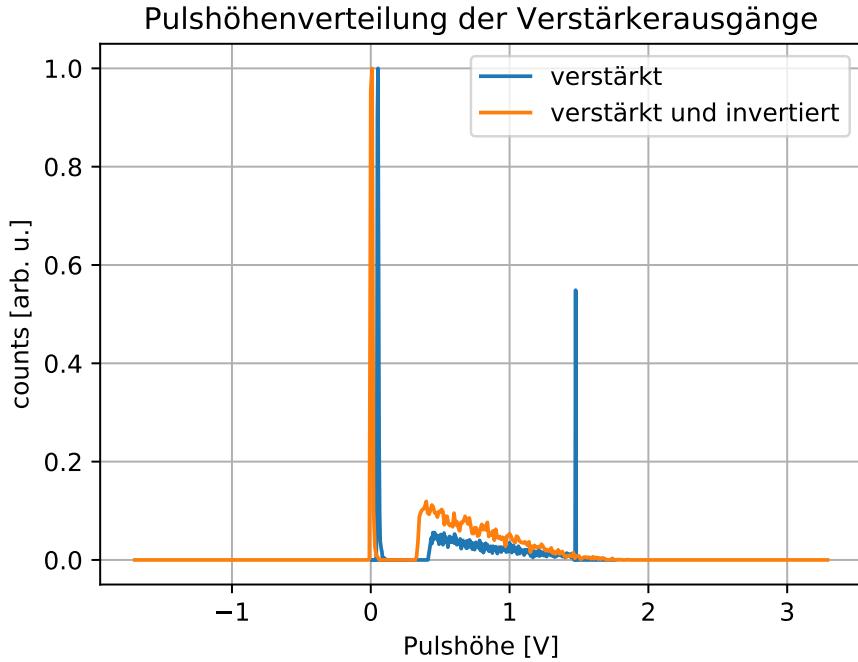


Abb. 3.19: Die Pulshöhenverteilung des 1'' Open Face Detektors des regulären und invertierten Verstärkerausgangs bei konstantem Signal und Registrierungsschwelle des CFD.

mengefasst werden. Dadurch entsteht eine Darstellung entsprechend der Abbildung 3.20 unten, in welcher die Anzahl der gemessenen Pulshöhen als Funktion der Pulshöhe und der MCP-Spannungen in einer Falschfarbendarstellung aufgetragen sind. Die eingetragenen Linien zeigen anhand der Helligkeit der Farbe, wie viele Ereignisse bei diesen Randbedingungen zu messen waren. Diese Darstellung wird im folgenden Pulshöhenkarte genannt. In dem oberen Teil der Abbildung 3.20 ist eine kubische Interpolation über die Pulshöhenverteilung einer ausgewählten MCP-Spannung zu sehen. In diesem Fall ist hier die Pulshöhenkarte für eine Anodenspannung von 350 V zu sehen. Auffällig sind die schwachen Linien bis zu einer MCP-Spannung von  $-2850 \text{ V}$  und einer Pulshöhe bis  $0.1 \text{ V}$ . Diese Linien sind durch einen zu niedrigen Registrierungsschwelle des CFD zu erklären, wie es auch in der Referenzmessung in der Abbildung 3.19 zu sehen ist.

Weiter ist in der Abbildung 3.21 bei einer MCP-Spannung von  $-2700 \text{ V}$  eine sehr hohe Zählrate bei einer Pulshöhe von  $0.5 \text{ V}$  zu sehen. Eine hohe Zählrate von niedrigen Pulsen ist bei dem Betrieb des Detektors zu

### 3.3 Charakterisierung der Photonendetektion im vakuumultravioletten Spektralbereich

Anodenspannung:  $U_{Anode} = 300\text{V}$  MCP Spannung:  $U_{MCP} = 2925 \text{ V}$

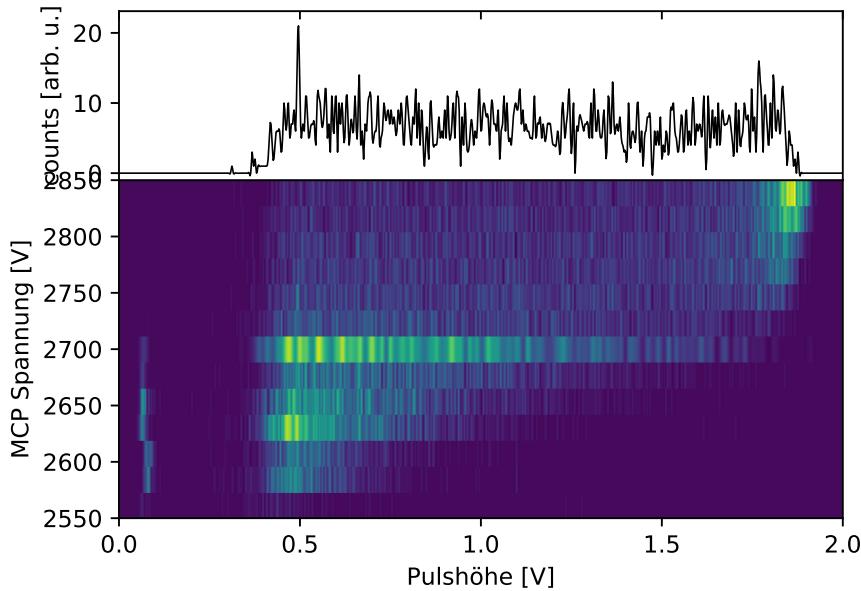


Abb. 3.20: Die Pulshöhenkarte des 1" Open Face Detektors bei einer Registrierungsschwelle des CFD von 70 mV bei einer Anodenspannung von 300 V in dem unteren Teil der Abbildung und die Pulshöhenverteilung bei einer MCP-Spannung von -2825 V.

Anodenspannung:  $U_{Anode} = 400\text{V}$  MCP Spannung:  $U_{MCP} = 2975 \text{ V}$

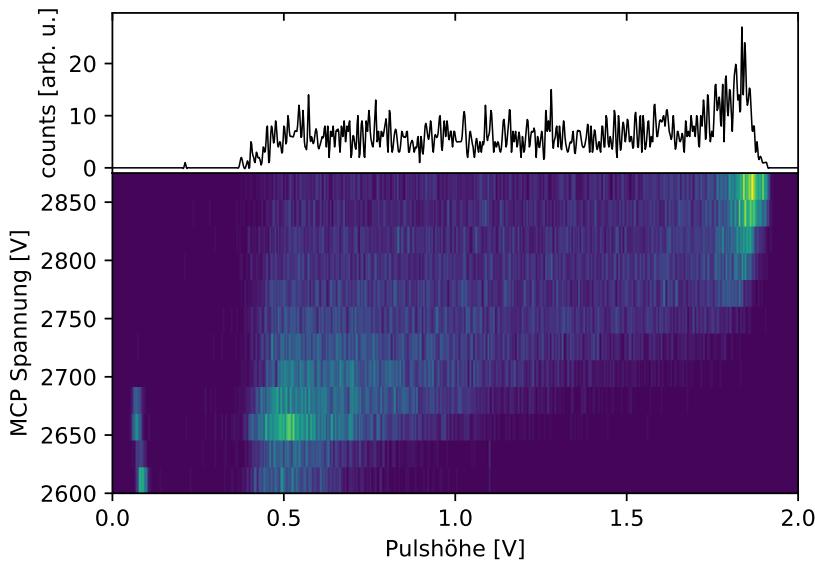


Abb. 3.21: Die Pulshöhenkarte bei dem Betrieb des Detektors innerhalb der bevorzugten Betriebsparameter im unteren Teil der Abbildung und eine Pulshöhenverteilung für eine MCP-Spannung innerhalb der bevorzugten Betriebsparameter.

vermeiden, da diese durch eine falsche Registrierungsschwelle des CFD nicht gezählt werden können. Ab einer MCP-Spannung von  $-3000\text{ V}$  sind in der Pulshöhenkarte hohe Zählraten bei einer Pulshöhe von etwa  $2\text{ V}$  zu sehen. Diese können bei einer zu hohen MCP-Spannung auf Störungen hinweisen, falls der Ausschlag am Rand des Messbereichs des Oszilloskops ist. Sollten sich die Pulse noch innerhalb des Messbereichs befinden, sind diese durch den CFD leicht messbar. In der Abbildung 3.20 oben ist eine Pulshöhenverteilung für eine MCP-Spannung von  $-2875\text{ V}$  zu sehen, welche eine hohe Zählrate von niedrigen Pulsen und ein beinahe konstante Anzahl von Pulsen mit einer Höhe von  $0.75\text{ V}$  bis  $1.75\text{ V}$  zeigt. Im einem optimalen Fall sollte die Mehrzahl der Pulse höher sein als  $1\text{ V}$ , sodass der CFD weniger anfällig für Störungen eingestellt werden kann. Ein Beispiel für eine Betriebsspannung bei einer festen Anodenspannung von  $400\text{ V}$  ist die MCP-Spannung von  $-3000\text{ V}$ .

Der Einfluss der Registrierungsschwelle des CFD wurde bei der Wahl der Betriebsspannung bereits einbezogen und bei kleinen Pulsen als Problem genannt. Bei einer zu niedrigen Registrierungsschwelle könnte der CFD durch Störsignale ausgelöst werden und diese weiterverarbeiten. Diese werden dann als ein Ereignis gemessen, obwohl diese von keinem realen Ereignis stammen. Diese Signale sollten nicht durch den Detektor gezählt werden. Wird aber die Registrierungsschwelle des CFD zu hoch gewählt, können niedrige und reale Pulse nicht aufgenommen werden. Die Betriebsspannungen sollten nach den Pulshöhenkarten so gewählt werden, dass die Pulse in der Mehrheit über  $1\text{ V}$  betragen. Bei der Wahl der Registrierungsschwelle des CFD sollten die Störungen (Pulse unter  $0.4\text{ V}$ ) nicht mehr zu sehen sein.

Ein Beispiel für die Auswirkungen von verschiedenen Registrierungsschwellen sind in der Abbildung 3.22 zu sehen. Hier sind drei verschiedene Registrierungsschwellen ( $U_T$ ) des CFD zu sehen. Bei einer Registrierungsschwelle wurde zusätzlich die Dunkelrate gemessen, diese zeigte eine durchschnittliche Zählrate unter  $1\text{ Hz}$ . In den vier Messungen wurden bei einer MCP-Spannung von  $-2800\text{ V}$  und einer Anodenspannung von  $300\text{ V}$  jeweils 20000 Pulse aufgenommen. Die Linie der Dunkelrate ist durch die niedrige Zählrate so niedrig, dass diese nur in den Messda-

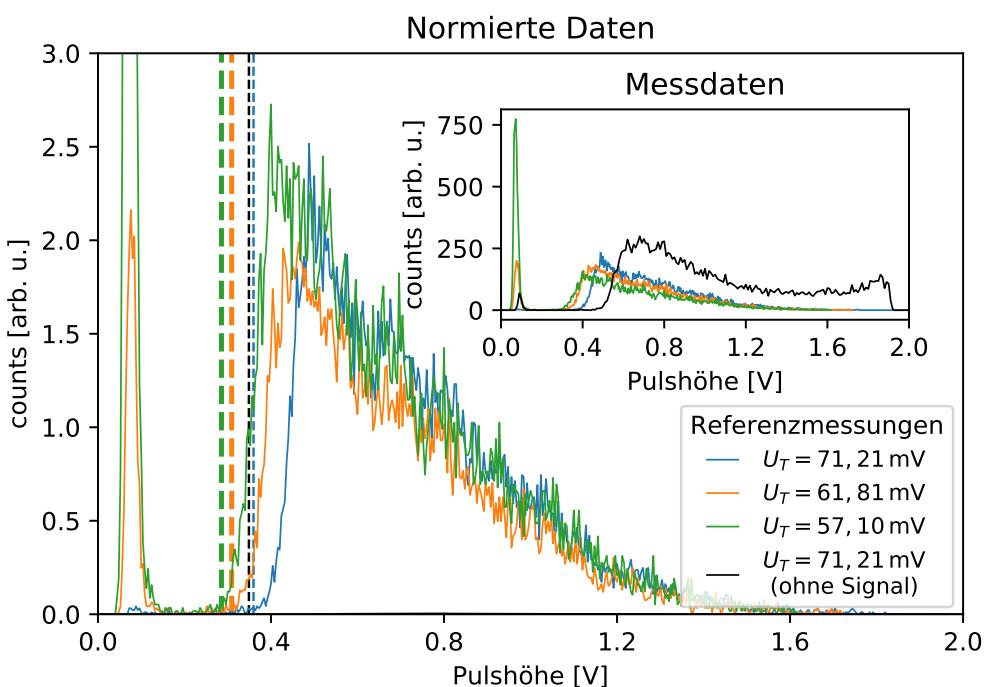


Abb. 3.22: Die Pulshöhenverteilung der Referenzmessungen bei verschiedenen Registrierungsschwellen des CFD im oberen rechten Teil der Abbildung sind die Messdaten zu sehen. In dem linken unteren Teil sind die Daten auf ihre durchschnittliche Zählrate pro Gesamtpulse normiert. Zusätzlich sind Umrechnungen der Registrierungsschwellen auf die Pulshöhe als eine gestrichelte vertikale Linie in der jeweiligen Farbe gezeigt. In dem kleinen Einsatz in der Darstellung sind die aufgenommenen Messdaten zu sehen.

Tab. 3.1: Übersicht der bevorzugten Betriebsparameter des 1" Open Face Detektor, welche während des Betriebes aufeinander abgestimmt werden müssen.

| Betriebsparameter              | optimaler Betriebsbereich         |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| Widerstandskaskade             | $20\text{ M}\Omega$               |
| MCP-Spannungen:                |                                   |
| vordere Mikrokanalplatte       | $-2900\text{ V} - -3100\text{ V}$ |
| hintere Mikrokanalplatte       | $-145\text{ V} - -155\text{ V}$   |
| Effektivspannung               | $-2755\text{ V} - -2945\text{ V}$ |
| Anodenspannung                 | $350\text{ V} - 400\text{ V}$     |
| Registrierungsschwelle des CFD | $69\text{ mV} - 72\text{ mV}$     |

ten zu sehen ist. Für die Darstellung der normierten Daten, welche bei einer Registrierungsschwelle des CFD von  $57.10\text{ mV}$  gemessen wurden, ragt der Ausschlag über die Grenzen der Abbildung, sodass die anderen Messreihen besser sichtbar sind. Die genaue Höhe des Ausschlags ist hierbei unerheblich, da es sich hierbei um das Störsignal handelt. Bei der Messung ohne Signal und einer Registrierungsschwelle von  $71.21\text{ mV}$  entsteht ein sehr breites Spektrum ab einer Pulshöhe von  $0.5\text{ V}$ . Der meisten Pulse haben eine Höhe von  $0.75\text{ V}$  und höher, sodass das Signal sich sehr gut zur Messung mit dem CFD eignet. Allerdings ist bei der Pulshöhenverteilung dieser Registrierungsschwelle ein Ausschlag bei einer Pulshöhe von  $0.1\text{ V}$  vorhanden, welcher den Anteil von Störsignal anzeigt. Bezogen auf die insgesamt gemessenen Pulse betragen die nicht realen Pulse bis zu einer Pulshöhe von  $0.3\text{ V}$  einem Anteil von  $0.8\%$ .

Bei der gleichen Registrierungsschwelle mit einem Signal sind nur  $0.18\%$  der Pulse durch Störungen (Störpulse) hervorgerufen. Des Weiteren sind die meisten Pulse bei einer Pulshöhe von  $0.5\text{ V}$  registriert worden und die Verteilung der Pulshöhen ist im Vergleich zu den andern, sehr schmal und erinnert eher an einen Zerfall, als eine Gleichverteilung. Die Pulshöhenverteilung bei einer Registrierungsschwelle von  $61.81\text{ mV}$  ist ähnlich zu der Verteilung bei einer Registrierungsschwelle von  $71.21\text{ mV}$ , wobei diese zu niedrigen Pulsen verschoben ist und der Anteil der Störpulse hier  $7.4\%$  erreicht. Für eine noch niedrige-

re Registrierungsschwelle von 57.1 mV wird die Verteilung sehr breit und besitzt einen Anteil der Störpulse von 25 %. Wie groß der Einfluss der Störpulse auf die regulären Pulse ist und wie sie im Verhältnis zueinander stehen, ist in der unteren Darstellung der Abbildung 3.22 zu sehen.

Zusammenfassen ist es für den Betrieb des Detektors und eine aussagekräftige Aufnahme der Detektorsignale nötig, die richtige MCP-, und Anodenspannung zu wählen, wobei die Anodenspannung in den meisten Fällen nur wenig Einfluss auf die Qualität des Signals hat. Wichtiger ist die Wahl der richtigen Registrierungsschwelle des CFD, welche keine Störpulse zulassen und keine Pulse unter einer Pulshöhe von 0.4 V abschneiden sollte. Für den optimalen Betrieb des Detektors gibt es keine bestimmten und festen Betriebsparameter sondern bestimmte Bereiche, in welchen der Detektor besonders hohe Zählrate bei minimalen Störpulsen ausgibt. Beispiele für diese Werte sind in der Tabelle 3.1 genannt. In der Abbildung 3.21 ist eine Pulshöhenkarte mit der Pulshöhenverteilung mit einer der bevorzugten Betriebsparametern zu sehen. In der Pulshöhenkarte sind bei niedrigen MCP-Spannungen die Störpulse zu sehen, welche ab einer MCP-Spannung von  $-2800\text{ V}$  verschwinden. Bei MCP-Spannungen über  $3100\text{ V}$  ist die Gefahr von Schäden und Störungen zu hoch, sodass, wie in der Tabelle 3.1 genannt ist, eine MCP-Spannung zwischen  $-2900\text{ V}$  und  $-3100\text{ V}$  zu wählen ist. Die Pulshöhenverteilung in der Abbildung 3.21 zeigt, dass in diesem Spannungsbereich keine Störpulse zu messen sind und die Pulse für eine Detektion durch den CFD über  $0.5\text{ V}$  sind. Die Karte zeigt allerdings nicht den Einfluss der Registrationsschwelle des CFD an, sodass diese noch optimiert werden muss. Zusätzlich sind die dargestellten Daten in den Karten nicht auf die Messzeit normiert, sodass die Höhe der Ausschläge nicht vergleichbar sind.

## 3.4 Anwendungsbereiche des Detektors

Der  $1''$  Open Face Detektor eignet sich in verschiedenen Konfigurationen zur Detektion von VUV-Photonen, Ionen und Elektronen und kann

deshalb in einer Vielzahl von Experimenten verwendet werden. Für ein Beispiel der Verwendung des Detektors wird im folgenden ein Experiment beschrieben, welches bereits in der Arbeitsgruppe von Prof. Arno Ehresmann mit den vorhandenen Detektoren durchgeführt wurde. Bei diesem Experiment wurde ein spezieller Übergangsprozess in einem Edelgas-Cluster beobachtet. Cluster sind bei Edelgasen durch Van-der-Waals-Kräfte schwach gebundene Systeme. Diese entstehen, wenn ein Edelgas unter hohem Druck in ein Hochvakuum entlassen wird und die Gasatome sich durch Stöße in ihrer Geschwindigkeit in Flugrichtung untereinander annähern und schließlich binden. Solche Cluster können in Größen von zwei bis mehrere tausend Teilchen entstehen, jedoch müssen für große Cluster noch andere Prozesse berücksichtigt werden. Diese Cluster stellen das Bindeglied zwischen der Atom-, Fluid- und Festkörperphysik dar. Das Experiment sollte gezielt einen Prozess innerhalb des Clusters zwischen zwei Edelgasatomen zeigen und wurde an Neon-Clustern durchgeführt. Der Versuchsaufbau besteht aus einer Clusterquelle, einer Wechselwirkungskammer, einem Spektrometer und verschiedenen Detektoren. Der Clusterstrahl kreuzt den Synchrotronstrahl in der Mitte der Wechselwirkungskammer. Unterhalb des Wechselwirkungsvolumen befindet sich der Eingang zu dem Spektrometer, oberhalb der VUV-Detektor und ein sensibler Detektor für Ionen. Nachdem die Neon-Cluster durch einen Synchrotronstrahl angeregt wurden, können die angeregten Zustände auf verschiedene Weisen wieder zerfallen und emittieren je nach Zerfallsprozess VUV-Photonen, Photonen im sichtbaren Wellenlängenbereich und Elektronen. Durch den Synchrotronstrahl kann die Energie der anregenden Photonen in sehr kleinen Schritten verändert werden. Nach jedem Schritt werden mithilfe der verwendeten Detektoren die emittierten Teilchen analysiert. Anstelle der Elektronen werden allerdings die Anzahl der Ionen gemessen, da diese bei diesem Prozess im gleichen Verhältnis vorliegen und hier einfacher zu detektieren sind.

Das Ergebnis dieser Messung ist in der Abbildung 3.23 zu sehen, wobei allerdings nur die Ionen und VUV-Photonen Signale gezeigt werden. In der oberen Teilabbildung ist das Ionensignal zu sehen, welches mit Intensität als Funktion der Energie der anregenden Photonen aufgetragen ist. Durch vertikale Linien sind die diskreten Anregungsenergien

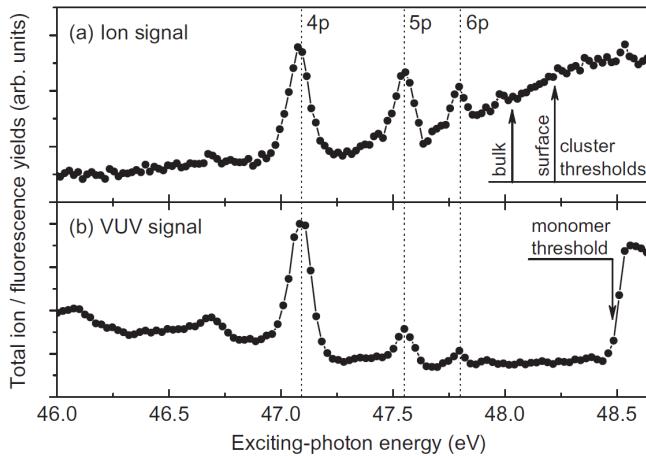


Abb. 3.23: Im Abschnitt (a) ist die Zählrate der Neon-Ionen der Neon-Cluster über die Anregungsenergie des Synchrotronstrahls aufgetragen und zeigt Ausschläge bei definierten Bereichen, welche durch gestrichelte Linien gekennzeichnet sind. Im Abschnitt (b) ist die Zählrate der VUV-Photonen mit der gleichen x-Achse gezeigt [HLF17].

für die resonante Anregung verschiedener np Zustände angezeigt. Die Achsen gelten ebenfalls für die untere Teilabbildung, welche die Intensität der VUV-Photonen zeigt. Am Ende des Spektrums ist jene Schwelle angezeigt, bei welcher Neon ionisiert wird. Es zeigt sich, dass die Emission von VUV-Photonen genau mit dieser der Ionen übereinstimmt, sodass sie aus dem gleichen Prozessen stammen müssen. Des Weiteren werden Elektronen emittiert, obwohl die Anregungsenergie noch unterhalb der Ionisationsschwelle von Neon ist. Dies kann durch den folgenden Prozess passieren. Nach der Anregung eines Neon-Atoms befindet sich eines der Elektronen auf einem viel höheren Energieniveau, als die anderen, wobei nahe am Atomkern ein Elektron fehlt. Füllt nun ein nahegelegenes Elektron diesen Platz auf, wird ein Photon mit der überwundenen Energiedifferenz emittiert und das Neon-Atom ist immer noch in einem angeregten Zustand. Das emittierte Photon kann, durch die im Cluster sehr naheliegenden Atome, ein anderes Neon-Atom ionisieren. Anschließend füllt das als erstes angeregte Elektron die neue freie Stelle in 2 Schritten auf und emittiert dadurch ein Photon im sichtbaren Spektralbereich und ein VUV-Photon. Mit zwei 1" Open Face Detektoren ist es möglich die VUV-Photonen und die Ionen zu messen, welche direkt vor dem Wechselwirkungsvolumen montiert werden können. Zur Detektion der Photonen im sichtbaren

### 3 Miniaturisierter Einzelteilchendetektor

---

Spektralbereich ist weiterhin ein anderer Detektor notwendig.

# **Modularisierte Strahldiagnostik 4**

---

In diesem Kapitel der Arbeit wird ein modularisiertes Instrument zu Diagnostik von Synchrotronstrahlen und Ausrichtung von Sensorelementen entwickelt. Zunächst wird die Funktionsweise der benutzten Sensorelemente beschrieben und anschließend folgt die Beschreibung des Aufbaus und der Entwicklung des Instruments und dessen möglichen Anwendungen.

## **4.1 Funktionsweise der Sensorelemente**

In diesem Abschnitt wird die Funktionsweise der Sensorelemente zur Strahldiagnostik beschrieben. Der *Faraday-Cup* und die Photodiode sind jeweils Sensoren zur Messung der Strahlungsintensität. Szintillatoren werden zum Nachweis von Licht unter einer bestimmten Wellenlänge benutzt, sodass ein Lichtstahl lokalisiert werden kann. Anhand der Position können anderen Sensoren ausgerichtet werden.

### **4.1.1 Faraday Cup**

Der *Faraday Cup* ist ein Sensor zur Strahldiagnostik, welcher zu Bestimmung der Intensität eines Teilchenstrahls benutzt wird. Dazu wird der Strahl mit dem *Faraday Cup* vollständig gestoppt. In dieser Arbeit wird der *Faraday Cup* ausschließlich zur Messung der Strahlungsintensität

an einer Synchrotronstrahlungsanlage eingesetzt, sodass die Funktionsweise anhand eines Photonenstrahls beschrieben wird [Str06].

Der *Faraday Cup* besteht aus dem Becher, optionalem Dorn und Blenden. Der Becher bildet zusammen mit dem Dorn ein Volumen, welches verhindert, dass einfallende Strahlen aus dem Becher entweichen können. Der Strahl wird demnach vollständig gestoppt und es entsteht kein Streulicht. Becher und Dorn bestehen aus Kupfer, sodass schon bei Energien von 4.65 eV Elektronen durch den photoelektrischen Effekt ausgelöst werden [Dem13]. Die ausgelösten freien Elektronen werden von einer auf einem positiven Potential liegenden Blende in einem kurzen Abstand vor dem Becher absorbiert. Die Ladungsverschiebung kann durch ein Amperemeter als ein Strom gemessen werden. Der gemessene Strom ist dann unter bestimmten Rahmenbedingungen proportional zur Intensität des Synchrotronstrahls. Ein ähnlicher Effekt tritt bei der Bestrahlung durch einen Elektronenstrahl auf und es kann ein Strom am *Faraday Cup* gemessen werden, welcher proportional zur Intensität ist.

### 4.1.2 Yttrium-Aluminium-Granat (YAG)

Der YAG ist eine künstlich hergestellter Kristall, welcher zusammen mit deiner Cer-Dotierung unter die Klasse der Szintillatoren fällt. Demnach fungiert der YAG als ein Detektor für hochenergetische Strahlung und liegt dafür meist in der Form einer Scheibe vor. Wenn ein solcher YAG mit Licht von einer Wellenlänge von 450 nm und unterhalb dieser Wellenlänge belichtet wird, können verschiedene höhere Zustände angeregt werden, welche in drei Kanälen mit einer Emissionswellenlänge zwischen 530 nm und 525 nm zerfallen können [YTI05].

Die Emissionsintensität ist hierbei, wie in der Abbildung 4.1 zu sehen ist, von der Konzentration des Cer abhängig. Das emittierte Licht des YAG hat einen Reflexions- und einen Transmissionsanteil, welche durch Oberflächenbearbeitung verstärkt werden können. Durch das Polieren der Oberfläche wird der Transmissionsanteil stark erhöht, sodass die

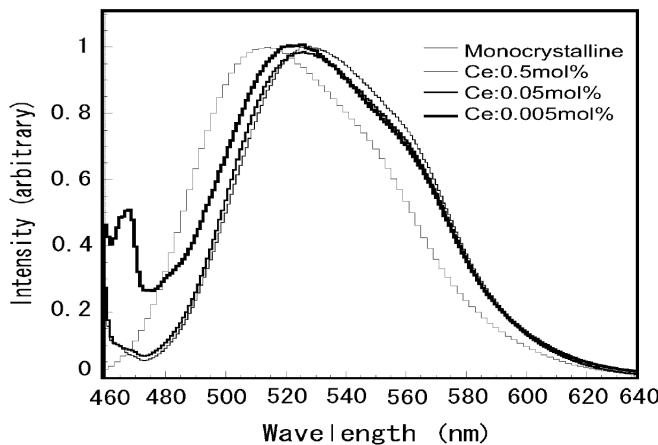


Abb. 4.1: Das Emissionsspektrum eines YAG für verschiedene Cerium Konzentrationen.

Fluoreszenz des YAG auch auf der Rückseite des Kristalls zu sehen ist. In einer zweiten Variante kann die Oberfläche des YAG *frosted* vorliegen. Dabei ist diese Matt und der Reflexionsanteil ist dominant, sodass die Fluoreszenz an der Vorderseite der Scheibe zu sehen ist.

### 4.1.3 Photodioden

Eine Photodiode ist ein photoelektrisches Bauteil, welches auf dem photoelektrischen Effekt basiert [Dem16]. Wird die Photodiode mit Licht bestrahlt, können Elektronen aus der Photodiode ausgelöst werden. Hierzu muss die Photonenergie über einem materialabhängigen Wert liegen, da diese sonst nicht ausreicht, um die Bindungsenergie der Elektronen zu überwinden. Wird eine Spannung an die Photodiode angelegt, entsteht ein elektrischer Strom sobald die Photodiode von Licht mit ausreichend Energie getroffen wird. Durch verschiedene behandelte Oberflächen der Photodiode kann die kleinste ausreichende Photonenergie variiert werden. Des Weiteren ist die Photodiode ein kompaktes Bauteil, welches vielseitig verbaut und unter Vakuum betrieben werden kann.

## 4.2 Entwicklung und Aufbau

Die bisher zur Strahldiagnostik benutzte Methode war ein *Beamdump*, welcher aus einem Manipulator, einem Gestänge und einem *Faraday-Cup* bestand. Der Manipulator war an einem CF-63 T-Rohr so befestigt, dass er den *Faraday-Cup* an dem Gestänge entlang des senkrechten Teils des T-Stücks verfahren konnte. So war es möglich den *Faraday-Cup* in das Durchgangsrohr des T-Rohrs zu fahren. Durch diesen Teil des T-Rohrs verließ der aus dem Experiment kommende Synchrotronstrahl.

Dabei ist der aktive Bereich des *Faraday-Cup* im Durchmesser etwa einen Zentimeter groß. Der *Faraday-Cup* war weiterhin aus mehreren Blechen mit einem Loch in der Mitte zusammengesetzt und verschraubt, wodurch die Ausmaße des *Faraday-Cups* mit dem Gehäuse sehr groß wurden. Der Dorn hatte eine Gewindebohrung auf der Rückseite, durch welche er an der Bodenplatte befestigt werden konnte. Außerdem war der Dorn kegelförmig und wurde durch eine Schraube von der Rückseite kontaktiert. Entsprechend muss auch der *Faraday-Cup* von der Halterung isoliert werden. Allein durch die Größe des *Faraday-Cup* musste ein CF-63 T-Rohr verwendet werden. Dieses beansprucht am hinteren Ende des Experiments sehr viel Platz und schränkt die Möglichkeit für weitere Apparaturen an der Rückseite des Experiments stark ein.

Für eine kompaktere Bauweise des *Beamumps* und mehr Funktionalität wurde das Konzept überarbeitet. Dafür wurde ein modularer Ansatz gewählt, welcher in der Lage ist, eine variable Auswahl von Messinstrumenten zu tragen und dennoch sehr platzsparend ist. Das Grundkonzept besteht aus einem Manipulator, welcher eine Aufhängung aus Gewindestangen verfahren kann. An der Aufhängung sind die Module, welche ein Messinstrument tragen, befestigt. Durch den Manipulator werden alle Module gleichzeitig verfahren und können in dem Synchrotronstrahl platziert werden. Da der *Faraday-Cup* das wichtigste Instrument für die Strahldiagnostik ist, wurde dieser in einer miniaturisierten Form neu entwickelt, sodass dieser durch ein CF-40 Rohr passt.



Abb. 4.2: Eine Darstellung des gesamten Aufbau des MADLoQs zusammen mit zwei CF-40 Kreuzen.

### 4.2.1 Aufbau der modularisierten Strahldiagnostik

Bei der Konstruktion des *modular adaptive diagnostic-system for beam localisation and quantification* (MADBLoQ) wurde das Hauptaugenmerk auf die Kompaktheit und eine hohe Funktionalität gelegt. In der Abbildung 4.2 ist der gesamte Aufbau in zwei CF-40 Kreuzen zu sehen und durch die gelbe Linie im Innern der rechten CF-40 Kreuz ist der Strahlengang angezeigt. Beginnend mit der Aufhängung werden im folgenden die Bestandteile beschrieben.

Die Aufhängung trägt den *Faraday-Cup* und die weiteren angebrachten Sensorelemente. Der MADLoQ wird so ausgerichtet, dass die Aufhängung immer zum Laborboden hin zeigt und nur auf dieser Achse kann die Aufhängung verfahren werden. Dadurch wirkt die Gravitationskraft in Richtung der Gewindestangen, welche in diese Richtung einer großen Belastung standhalten. Die Aufhängung besteht aus einer Halterung, vier M4 Gewindestangen und den sogenannten Knotenblechen.

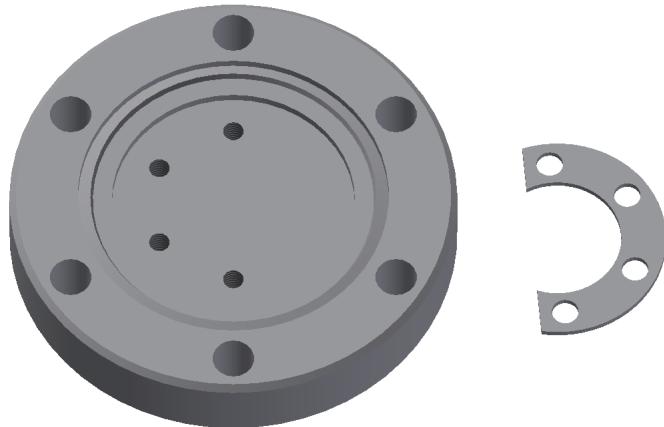


Abb. 4.3: Darstellung des Halters der Aufhängung auf der linken Seite und ein Knotenblech auf der rechten Seite

Die Halterung ist ein CF-40 Blindflansch, welcher mit vier M4 Gewindebohrungen ausgestattet ist. Die vier Gewindebohrungen, in welche die Gewindestange geschraubt werden, sind auf einem Halbkreis angeordnet und haben einen Abstand zum Flanschmittelpunkt von 13.35 mm. In der Abbildung 4.3 ist ferner auf der rechten Seite ein Knotenblech zu Stabilisierung der Aufhängung zu sehen.

Die eingeschraubten M4 Gewindestangen, welche in der Abbildung 4.10 zu sehen sind, sind etwa 30 cm lang und werden in regelmäßigen Abständen durch Kontenbleche fixiert. Durch die Länge der Stangen können diese sehr leicht schwingen und vibrieren. Die Knotenbleche, welche einen Millimeter dick sind, schwächen diese Vibrationen ab. Dieses besitzt dazu die passenden Durchgangslöcher für die vier Gewindestangen und wird durch Muttern auf dem Gestänge fixiert.

Auf den Gewindestangen finden die einzelnen Module Platz, welche auf einem Basisträger, welcher in Abbildung 4.4 zu sehen ist, fixiert werden können. Der Basisträger ist 33 mm breit, 10 mm tief und 22 mm hoch. Die Kanten entlang der Höhe sind abgerundet, sodass der Träger besser in ein CF-40 Rohr passt. Am äußeren Rand befinden sich zwei 4 mm Durchgangslöcher über die gesamte Höhe mit einem Abstand der Mittelpunkte von 26.7 mm. Diese Durchgangslöcher werden über einen 12 mm langen und 2 mm breiten Schlitz mit abgerundeten Ecken

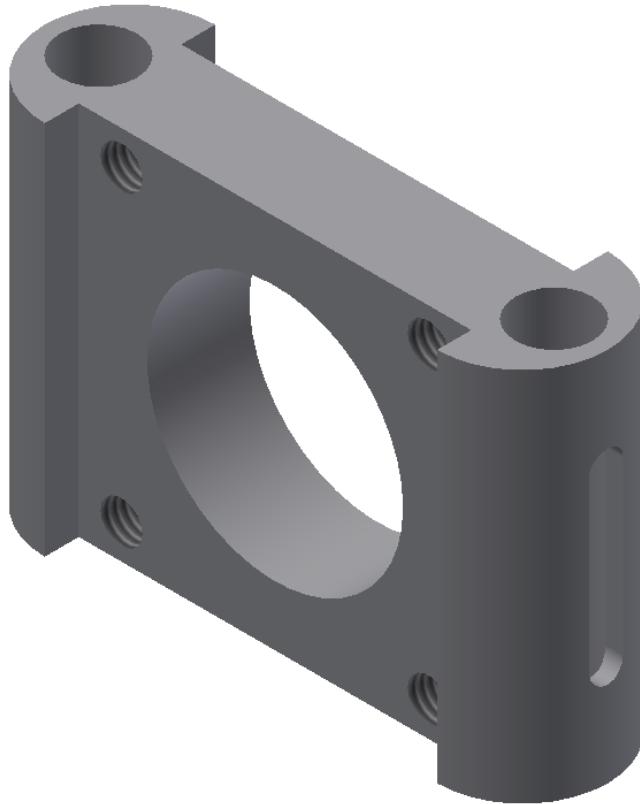


Abb. 4.4: Die Basisträger für weitere Sensoren oder als Durchlass für den Synchrotronstrahl.

entlüftet. Die Rundungen vereinfachen das Einbringen der Module in das CF-40 Rohr. Zusätzlich besitzt der Basisträger im Zentrum ein Durchgangsloch mit einem Durchmesser von 15 mm. Auf der Vorder- und Rückseite ist der Basisträger in einer Rechteckform mit den Seitenlängen von 23 mm in einer Tiefe von 2 mm ausgeschnitten, sodass die Materialstärke im mittleren Bereich auf 6 mm verringert wurde. Die rechteckig um die zentrale Bohrung angeordneten Gewindebohrungen haben zu den benachbarten Gewindebohrung einen Abstand von 18 mm [Sch18a]. Diese Form der Anordnung existiert in der AG Ehresmann schon bei anderen Bauteilen und ermöglicht es, falls es nötig ist, bereits vorhandene Bauteile auf der Trägerplatte zu montieren oder kann auch leer gelassen werden, sodass es möglich ist an einer Stelle den MADLoQ störfrei zu durchschießen.

Eines der wichtigsten Module ist der *Faraday-Cup*, welcher in einer sehr platzsparenden Form konstruiert werden musste, damit dieser in

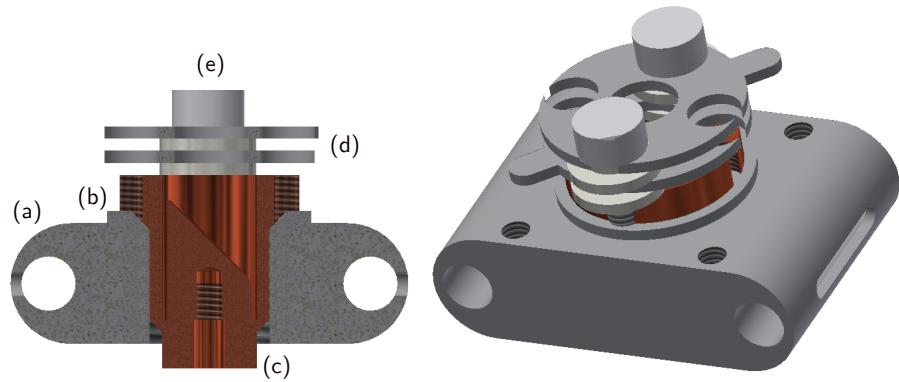


Abb. 4.5: Der Faraday-Cup als eine Darstellung als Halbschnitt in einem zusammengebauten Zustand mit Trägerplatte (a), Isolator (b), Becher und Dorn (c), den Elektronenblenden (d) und angedeuteten Muttern und Schrauben (e) und einer normalen Darstellung.

dem CF-40 Kreuz Platz findet. Der *Faraday-Cup* ist zusammen mit der Halterung in der Abbildung 4.5 zu sehen. Des Weiteren ist zu sehen, dass der *Faraday-Cup* auf einem modifizierten Basisträger sitzt, welcher weiter Trägerplatte genannt wird. Für die Halterung des *Faraday-Cups* entfällt die Aussparung der rechteckigen Fläche des Basisträgers und das 15 mm Durchgangsloch wurde durch eine M15 Gewindebohrung ersetzt, welche über eine Fase von 1.5 mm verfügt und damit das Einschrauben des Isolators vereinfacht. Diese Trägerplatte ist in der Abbildung 4.6 zu sehen.

Der Isolator ist 11 mm lang und besitzt ein M15 Außengewinde. An der Außenseite befindet sich auf einer Länge von 8 mm ein M15 Gewinde, welches dazu benutzt wird, den Isolator mit dem Becher und Trägerplatte zu verschrauben. Da die Module unter Vakuum eingesetzt werden, sollte zwischen einem Gewinde eine Öffnung zum Vakuum vorhanden sein. Dies dient dazu, dass das Restgas aus dem Inneren des Gewindes entweichen kann. Aus diesem Grund ist der Isolator an einer Stelle um 2 mm eingeschnitten. Wie in der Abbildung 4.7 gezeigt, befindet sich an der Rückseite der Wulst eine Fase. Die Wulst ist einen Millimeter stark und hat einen Außendurchmesser von 17 mm und dient der Begrenzung des Isolators, sodass dieser nur bis zu der Wulst in die Trägerplatte geschraubt werden kann. An der Innenseite befindet sich ein M10 Gewinde und eine Fase von 1.5 mm, sodass der

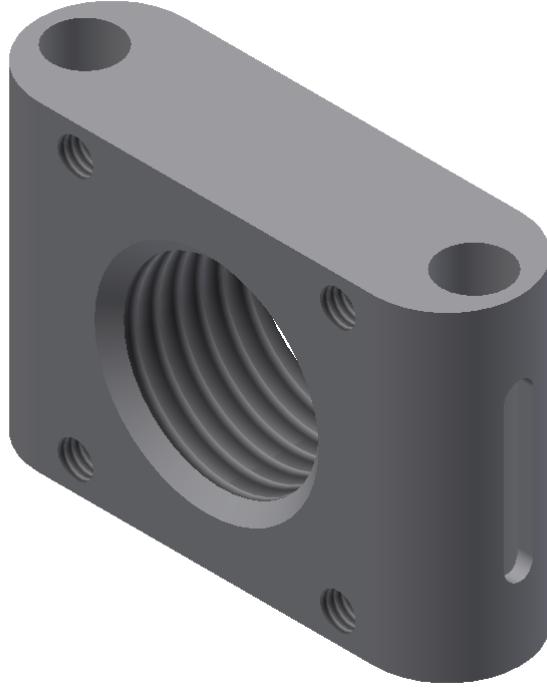


Abb. 4.6: Der Trägerplatte, welche mit dem Isolator verschraubt wird und als Modul an der Aufhängung befestigt ist.

Becher einfacher mit dem Isolator verschraubt werden kann und der Becher mithilfe einer passenden Fase an der Außenseite in dem Isolator versenkt werden kann. Dies reduziert die Gesamthöhe des *Faraday-Cup* Moduls.

Der Becher ist 16 mm lang und misst an der Vorderseite einen Außen-durchmesser von 15 mm. Das Innere des Bechers hat eine Tiefe 12 mm und einen Innendurchmesser von 8 mm. An dieser Vorderseite befinden sich vier M3 Gewindebohrungen, welche 3 mm tief sind und zur Befestigung der Elektronenblenden benutzt werden. Diese Gewindebohrung ist auf der linken Seite der Abbildung 4.8 zu sehen. Im mittleren Teil des Bechers befindet sich ein M15 Gewinde, welches 10 mm lang ist und zur Verschraubung mit dem Isolator benötigt wird. Diese Verjüngung wurde mithilfe einer Fase von 1.5 mm realisiert, welche gleichzeitig in die Fase des Isolators passt. Am hinteren Ende wird mithilfe einer weiteren Fase zu einem Außendurchmesser von 8 mm übergeleitet. In diesem Teil befindet sich eine M3 Durchgangsbohrung, welche zur

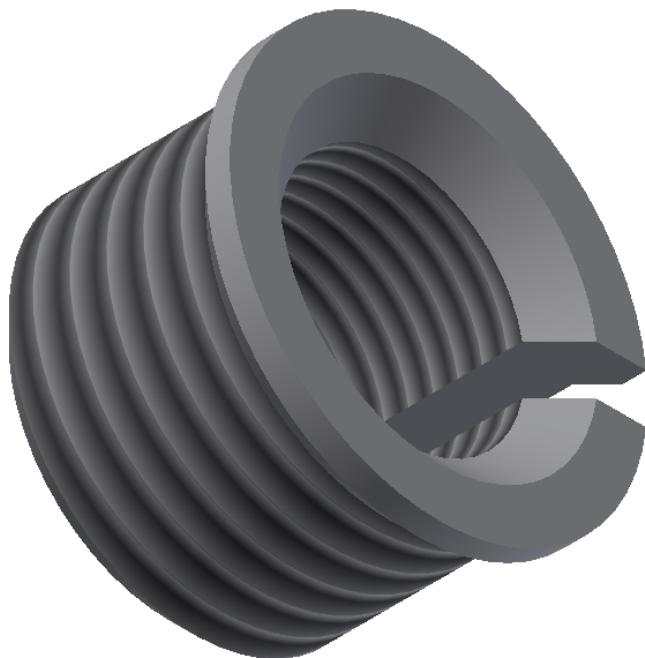


Abb. 4.7: Der Isolator, welcher den Becher von der Trägerplatte isoliert.

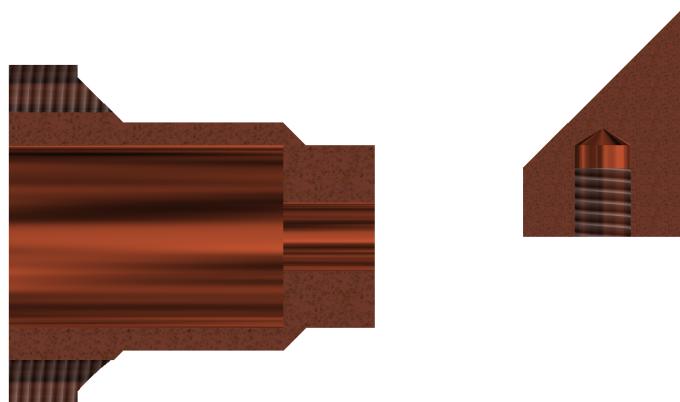


Abb. 4.8: Der Kupferbecher des Faraday-Cup auf der linken Seite zusammen mit dem Dorn auf der rechten Seite dargestellt mit einem Halbschnitt.

Befestigung des Dorns benutzt wird, welcher in der Abbildung 4.8 auf der rechten Seite zu sehen ist. Dieser befindet sich in einem montierten Zustand im Inneren des Bechers.

Der Dorn ist 10 mm hoch und hat einen Durchmesser von 7 mm. Um die Funktion des Dorns zu gewährleisten, ist der Zylinder um  $45^\circ$  abgeflacht. Ein Kegel hätte nicht zentrisch in dem Becher platziert werden können, da der Synchrotronstrahl gerade auf die Schräge fallen soll. Bei dem hier gewählten Design passiert dies per Definition, sodass durch Grundformen eine Zylindersymmetrie erreicht wird und der abgeflachte Zylinder auch zentrisch platziert werden kann. Damit der Dorn ausreichend befestigt werden kann, ist eine Gewindebohrung nötig, welche mindestens 4 mm tief sein muss. Dies kann mit einem kegelförmigen Dorn und einem 16 mm Becher nicht umgesetzt werden. Der abgeflachte Dorn hat ausgehend von der Mitte der abgeflachten Ebene eine Höhe von 6 mm, sodass dieser mit der Gewindebohrung versehen in dem Becher untergebracht werden kann.

Die Elektronenblende ist in der Abbildung 4.9 dargestellt und hat einen Außendurchmesser von 17.5 mm. Zudem befindet sich in der Mitte der Blende ein Loch mit einem Durchmesser von 6 mm, welcher um 2 mm kleiner ist als der Innendurchmesser des Bechers. Die Löcher für die Fixierung sind in einem passenden Lochkreis um das Loch in der Mitte angeordnet und ragen leicht über den Rand der Blende hinaus. Die Blende ist einen Millimeter stark und besitzt, wie in Abbildung 4.9 zu sehen, zwischen zwei der Befestigungslöchern eine Lasche, welche 3 mm breit und etwa 3.6 mm lang ist. Die Lasche ermöglicht eine Kontaktierung der Blende. Zur Befestigung werden Schrauben, Unterlegscheiben und Muttern aus Kunststoff verwendet, sodass die Elektronenblenden voneinander isoliert sind und unabhängig von einander auf unterschiedliche elektrische Potentiale gesetzt werden können.

Die genannten Bauteile werden, wie in Abbildung 4.5 zu sehen, zu dem gesamten *Faraday-Cup-Modul* zusammengebaut. Dieses Modul ist 23 mm hoch und passt, wie auf der Abbildung 4.10 auf der linken Seite zu sehen ist, mit Platz an den Rändern in ein CF-40 Rohr. Ein spezielles

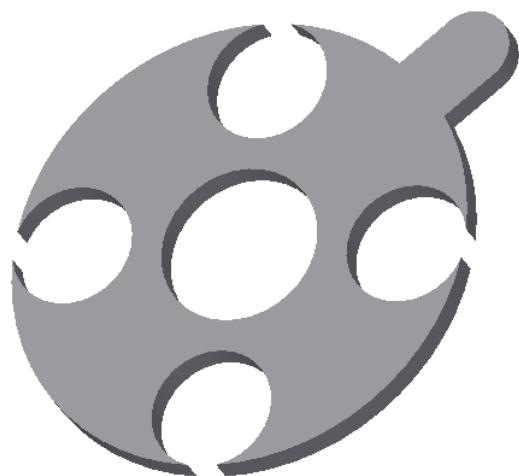


Abb. 4.9: Eine Elektronenblende an der Vorderseite des Bechers.

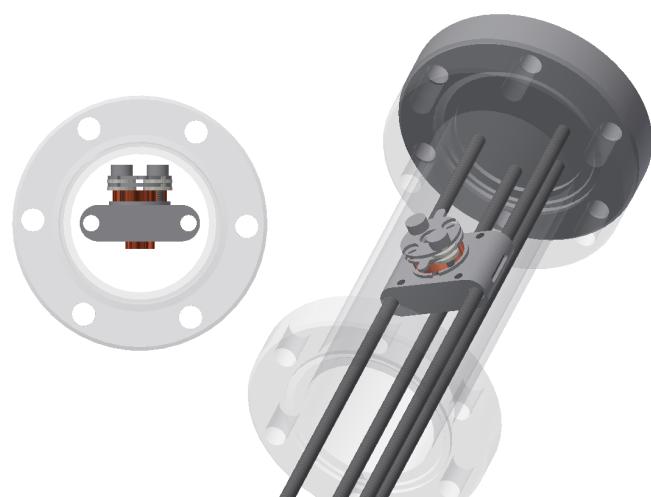


Abb. 4.10: Der Faraday-Cup in einer Darstellung mit einem transparenten CF-40 Rohr auf der linken Seite und auf der rechten Seite der Faraday-Cup mit der Aufhängung in einem CF-40 Rohr



Abb. 4.11: Die Darstellung des YAG-Träger und der zugehörige  $45^\circ$ -Halter für den YAG auf der linken Seite von der Rück- und auf der rechten Seite von der Vorderseite zu sehen.

Sensorelement, welches eine besondere Halterung benötigt, ist der YAG. Dieser kann benutzt werden, falls das Experiment und Strahl nicht richtig zueinander ausgerichtet sind, sodass der Synchrotronstrahl den *Faraday-Cup* nicht richtig trifft. Für die Ausrichtung muss bekannt sein, wo der Synchrotronstrahl am Ausgang der Wechselwirkungskammer verläuft. Hierzu kann ein YAG-Kristall verwendet werden, welcher in den Strahl gebracht wird.

Der YAG wird dazu in einer Halterung fixiert und kann so zur Ausrichtung genutzt werden. Die Halterung besteht weiter aus einer Trägerplatte für den YAG-Haltern und der Halterung für den YAG selbst. Damit der dieser von zwei verschiedenen Positionen abgelesen werden kann, stehen zwei Varianten der Halterung zur Verfügung. Diese ist die  $45^\circ$ - und die  $90^\circ$ -Halterung.

Der YAG-Träger hat die gleichen Außenmaße, wie die Trägerplatte des *Faraday-Cups*. Die Form und Bauweise sind in der Abbildung 4.11 zu sehen. Die Durchgangslöcher an den Seiten mit den entsprechenden Rundungen sind mit der Trägerplatte aus dem Abschnitt 4.2.1 identisch. Allerdings befindet sich in der Mitte keine Gewindebohrung, sondern eine quadratische Aussparung mit den Seitenlängen von 14 mm. Wie in der Abbildung 4.11 auf der linken Seite zu sehen ist, befinden sich auf der Rückseite an drei Seiten weitere abgewinkelte Flächen. Die Flächen verlaufen parallel zu dem quadratischen Loch in der Mitte des YAG-Trägers und haben einen Winkel von  $45^\circ$  zu der Fläche der Rückseite. In den abgewinkelten Flächen befinden sich jeweils zwei M3

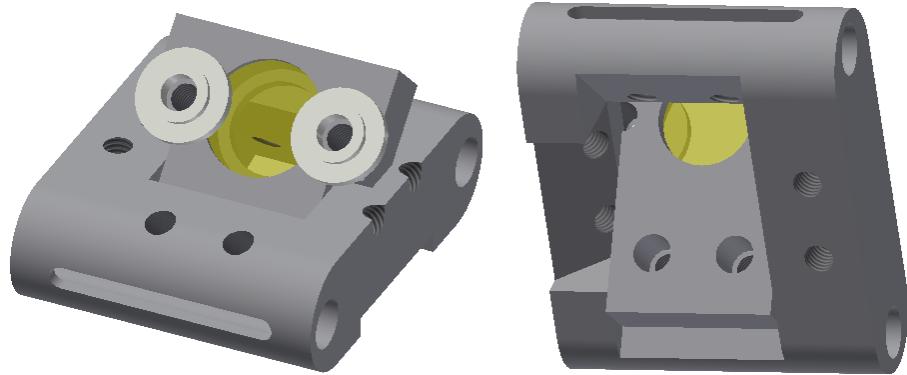


Abb. 4.12: Der YAG-Sensor in einem zusammengebauten Zustand mit einer Ausrichtung des YAG im  $45^\circ$  Winkel zu dem Synchrotronstrahl.

Gewindebohrungen. Zusätzlich befinden sich auch an der einzelnen nicht abgewinkelten Fläche zwei M3 Gewindebohrungen. An diesen Bohrungen kann die YAG-Halterung befestigt werden, welche in der Abbildung 4.11 jeweils rechts neben dem Träger abgebildet ist. Die  $45^\circ$ -Halterung ist 23 mm lang, 5 mm tief und 14 mm breit. An den Verbreiterungen am Ende misst die  $45^\circ$ -Halterung eine Breite von 20 mm. Am unteren Ende der Halterung befinden sich zwei M3 Durchgangslöcher, welche dazu dienen, dass die Halterung in vier Positionen mit dem Träger verschraubt werden kann. Dabei sind drei Positionen im Winkel von  $45^\circ$  zum Einfall des Synchrotronstrahls und eine genau senkrecht dazu auswählbar. Damit die Halterung in der  $45^\circ$ -Position auf den Träger passt, befindet sich eine Fase von etwa 3.8 mm an beiden Seiten der Verbreiterung. In einem Abstand von 6.6 mm vom anderen Ende der Halterung befindet sich der Mittelpunkt eines Loches mit einem Durchmesser von 8 mm. Zusätzlich befindet sich dort ein 3.6 mm tiefes Loch, welches einen Durchmesser von 10 mm hat, sodass innerhalb des Loches ein Ablagerand entsteht. In diese Vertiefung wird der YAG eingesetzt. Neben der Vertiefung liegen zwei weitere M3 Gewindebohrungen. Durch diese kann der YAG mithilfe von zwei Unterlegscheiben, einem O-Ring und zwei M3 Schrauben in der Halterung fixiert werden.

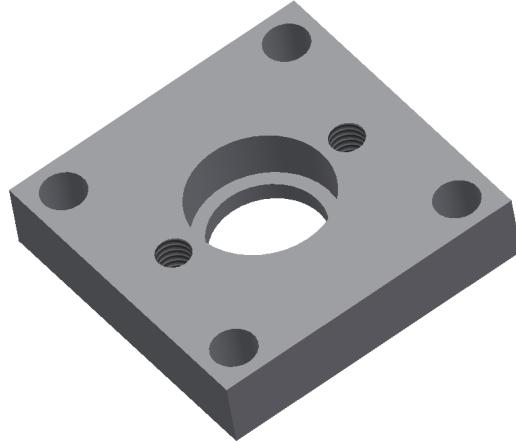


Abb. 4.13: Die 90°-Halterung für den YAG.

In einem zusammengesetzten Zustand ist der Sensor in der Abbildung 4.12 zu sehen. Für die Positionierung des YAG senkrecht zu dem Synchrotronstrahl kann die 45°-Halterung verwendet werden oder es wird die dafür vorgesehene 90°-Halterung verwendet. In der Abbildung 4.13 ist die 90°-Halterung von der Vorderseite zu sehen. Diese verfügt ebenfalls über die genannte Vertiefung für den YAG und die zwei Gewindebohrungen für die Fixierung des YAG in der Halterung. Im Vergleich zu der 45°-Halterung ist die 90°-Halterung quadratisch mit einer Seitenlänge von 23 mm. An den Ecken befinden sich im Abstand von 18 mm M4 Durchgangsbohrungen. Im Abschnitt 4.2.1 wurden diese Maße bereits für die Trägerplatte genannt. Zutreffend sind diese Maße auch für den Basisträger, welcher in der Abbildung 4.4 zu sehen ist. Auf diesen Basisträger kann die 90°-Halterung befestigt werden. Für die 90°-Halterung wird ein YAG mit einer polierten Oberfläche benutzt, da an der Rückseite das Auftreffen des Synchrotronstrahls angezeigt werden soll. Bei der 45°-Halterung wird ein *frosted* YAG verwendet, da das Auftreffen des Synchrotronstrahls seitlich durch ein Fenster im CF-40 Kreuz sichtbar sein soll. Je nach Blickwinkel kann ebenso ein YAG mit polierter Oberfläche benutzt werden.

Durch den modularen Aufbau des gesamten MADLoQ können bis zu sechs Module auf der Aufhängung platziert werden. Durch die Verwendung eines elektrisch verfahrbaren Manipulators kann jedes

Modul automatisiert genau in den Synchrotronstrahl gefahren werden. Der MADLoQ findet in zwei aneinander geschraubten CF-40 Kreuzen Platz. In der Abbildung 4.2 ist der gesamte MADLoQ dargestellt. Die CF-40 Kreuze sind für die Sichtbarkeit transparent dargestellt und der Manipulator ist in der Stellung, in welcher er die größte mögliche Auslenkung hat. Innerhalb der CF-40 Kreuze ist eine mögliche Anordnung der Module zu sehen. Die gelbe Achse, welche das erste CF-40 Kreuz am Manipulator durchquert, ist die Richtung des Synchrotronstrahls. Das zweite CF-40 Kreuz ist für die Kontaktierung des *Faraday-Cups* oder anderer Sensoren, die eine Kontaktierung nach außen benötigen, wichtig. Des Weiteren bietet der zweite CF-40 Kreuz den nötigen Raum, sodass alle sechs Module in den Synchrotronstrahl bewegt werden können. Die in der Abbildung 4.2 gezeigten Basisträger ohne ein Sensorelement können beispielsweise durch eine Photodiode bestückt werden.

Nach der Montage und Ausrichtung der einzelnen Bauteile wurde der MADLoQ an die Wechselwirkungskammer angebaut und getestet. Dabei fiel auf, dass alle Sensorelemente des MADLoQs funktionieren und gut im Synchrotronstrahl positioniert werden können. Jedoch können einige Bauteile noch weiter optimiert werden. Beispielsweise kann die Steuerung und Bewegung der gesamten Aufhängung des MADLoQs verbessert werden, damit der MADLoQ schneller ausgerichtet werden kann. Durch den elektrisch verfahrbaren Manipulator sollte es möglich sein, eine bestimmte definierte Position anzufahren. Dies ist allerdings mit dem verwendeten Schrittmotor nicht möglich, sodass beispielsweise die Position des *Faraday Cup* unter Beobachtung des Signals ausgerichtet werden muss. Zusätzlich kann der Elektromotor ein starkes Störsignal induzieren, sodass es nicht möglich ist, die Position anhand des Signals zu optimieren. Bei der Betrachtung des Signals für verschiedene Positionen konnte Anhand der Veränderung des Signals keine Regelmäßigkeit erkannt werden. Dies weist darauf hin, dass die Aufhängung des MADLoQs beim Verfahren seine Position seitlich verändert. Demnach ist es nicht möglich den MADLoQ reproduzierbar auszurichten. Für weitere Änderungen am dem MADLoQ ist es nötig diesen auch seitlich (senkrecht zur Aufhängung und dem Synchrotronstrahl) zu verfahren. Zusätzlich ist es wichtig für den MADLoQ eine

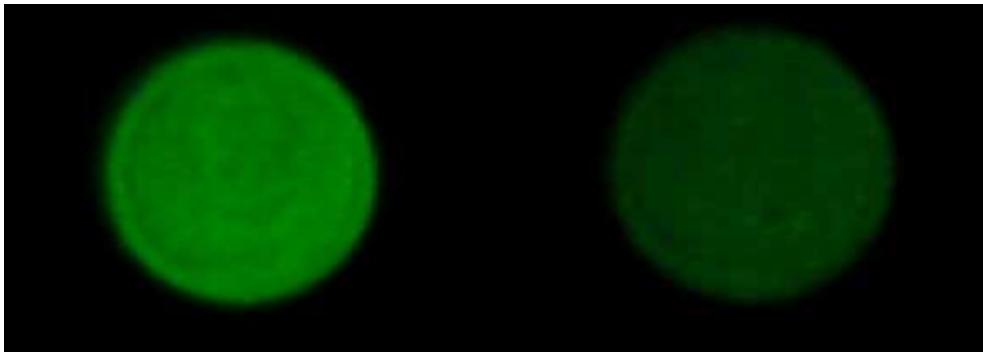


Abb. 4.14: Ein YAG bei der Ausrichtung eines Flüssigkeitsstahls in den Synchrotronstrahl mit zwei verschiedenen Zuständen [Han18].

Ausrichtungshilfe für die grobe Ausrichtung zu entwickeln, da die Position des gesamten MADLoQ durch die Montage mit Flanschen stark abweichen kann.

## 4.3 Mögliche Anwendung der modularisierten Strahldiagnostik

Der modularisierte MADLoQ kann mit verschiedenen Sensoren ausgestattet werden und somit mehrere Aufgaben übernehmen. Von dem Modul des YAG ausgehend werden im folgenden Beispiele für Anwendungen der Module beschrieben. Der YAG kann im Vorfeld der Messung für die Ausrichtung des Aufbaus benutzt werden. Der Aufbau wird dann so ausgerichtet, dass der Synchrotronstrahl das *Target* in der Wechselwirkungskammer und den MADLoQ optimal trifft. Für die letztere Ausrichtung wird ein Modul, welches einen YAG trägt, benutzt. Der YAG wird mithilfe des Manipulators in den Bereich gefahren, in welcher der Strahl verläuft. Wenn der Strahl den YAG noch nicht trifft, wird dieser keine Veränderung zeigen. In der Abbildung 4.14 ist auf der linken Seite der YAG vollständig belichtet zu sehen. Auf der rechten Seite der Abbildung wurde ein Flüssigkeitsstrahl so justiert, sodass er durch den Synchrotronstrahl verläuft. Dadurch ist dieser verdunkelt. Anhand der Verdunklung des YAG ist zu sehen, ob der Flüssigkeitsstrahl optimal ausgerichtet ist [Han18].

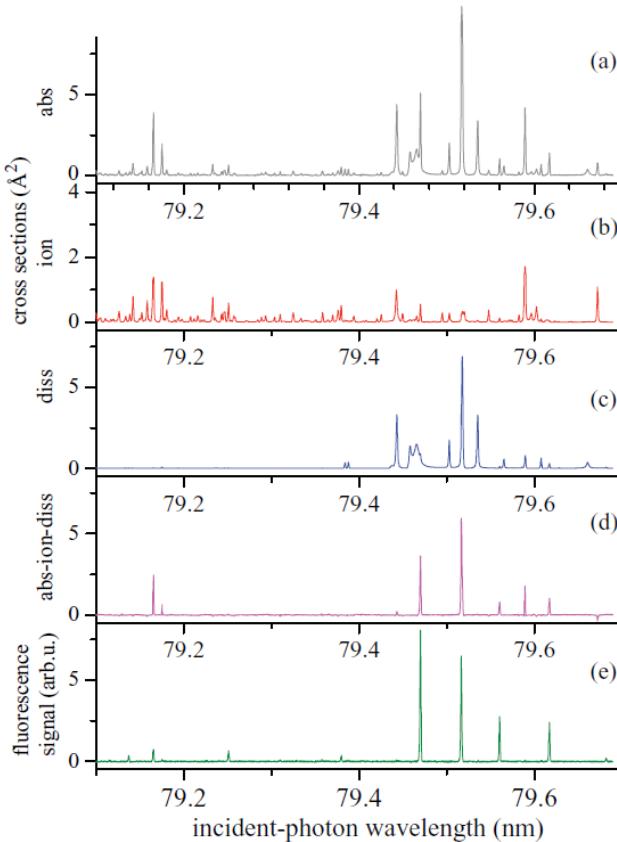


Abb. 4.15: Eine Übersicht der am Synchrotron gemessenen Spektren von dem Wasserstoffmolekül [GMJR10]

Sobald der Strahl optimal im Inneren des Aufbaus verläuft und das Target getroffen wird, können die weiteren Module verwendet werden. Der *Faraday Cup* kann zur Detektion von Elektronen- oder Photonenstrahlen eingesetzt werden, sodass das Einsatzgebiet und die Anwendungsmöglichkeiten vielseitig sind. Als ein Beispiel für den Einsatz des *Faraday Cup* wird im folgenden die Untersuchung von Fluoreszenz des  $H_2$  Moleküls beschrieben. Bei dem Versuchsaufbau handelt es sich um eine Wechselwirkungskammer an einem Strahlrohr einer Synchrotronstrahlungsanlage.

In der genannten Wechselwirkungskammer befindet sich eine *Targetzelle*, welche in Abwandlungen auch in der Arbeitsgruppe Ehresmann benutzt wird [Han13]. Diese ermöglicht es, dass die  $H_2$  Moleküle bei Raumtemperatur und in einem gasförmigen Zustand auf einem kleinen Volumen zu konzentrieren, sodass möglichst viele durch den Syn-

chrotronstrahl getroffen werden können. An einer Öffnung der Zelle ist senkrecht zu dem Synchrotronstrahl das Spektrometer mit einem Detektor angebracht, welcher die Detektion der Fluoreszenz sicherstellt. An der Stelle, an welcher der Synchrotronstrahl die Zelle verlässt, ist in diesem Aufbau ein Detektor angebracht, welcher die Intensität des einfallenden Strahls in Abhängigkeit von der Wellenlänge detektiert. Bei der Versuchsdurchführung werden die  $H_2$  Moleküle durch den Synchrotronstrahl bestrahlt. Dabei wird die Photonenenergie des Synchrotrons in einem Bereich durchgestimmt. Bei den Energien, bei welchen ein elektronischer Übergang für das  $H_2$  Molekül erlaubt ist, wird diese absorbiert. Das  $H_2$  Molekül wird sich danach in einem energetisch höheren Zustand befinden und relaxiert nach der Lebensdauer des Zustandes wieder in einen energetisch niedrigeren Zustand. Es kann außerdem passieren, dass das  $H_2$  Molekül ionisiert wird oder dissoziert. Mithilfe von verschiedenen Detektoren konnte in der Arbeit „Competing decay-channel fluorescence, dissociation, and ionization in superexcited levels of H<sub>2</sub>“[GMJR10] fünf Spektren aufgenommen werden. Hierbei ist auf der  $x$ -Achse der Abbildung 4.15 die Wellenlänge des einfallenden Lichts zu sehen.

In der Teilabbildung (a) 4.15 ist das Absorptionsspektrum von einem Wasserstoffmolekül zu sehen, wobei auf der  $y$ -Achse eine arbiträre Intensität aufgetragen ist. Dieses Spektrum ist invertiert, sodass die Peaks als ein Einbruch der Intensität des Synchrotronstrahls am Ausgang der *Targetzelle* zu interpretieren sind. Dieses Absorptionsspektrum kann ebenfalls mit dem *Faraday Cup*, welcher im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, aufgenommen werden. Durch die modularisierte Bauweise des MADLoQs kann auch eine Photodiode verbaut werden, welche das Spektrum genauer auflösen kann. Im Teilabschnitt (e) der Abbildung 4.15 ist das Spektrum der Intensität der emittierten Fluoreszenzphotonen zu sehen.



# Zusammenfassung 5

---

In der Arbeitsgruppe von Prof. Arno Ehresmann werden für aktuelle Forschungsthemen die Messinstrumente und Experimente immer weiter optimiert und erweitert. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein kompakter Einzelteilchendetektor und ein Instrument zur Strahldiagnostik entwickelt.

Für die Detektion von Photonen im VUV Wellenlängenbereich war bisher nur ein einzelner Detektor vorhanden. Dieser ist durch die ortsauflösende Anode in der Lage, an einem Spektrometer dispergierte Spektren aufzunehmen. Bei Messungen der totalen Photonenausbeute kann dieser allerdings nur mit Nachteilen eingesetzt werden, da er zu groß ist und einen maximalen Raumwinkel von 0.022 abdecken kann. Aus diesem Grund wurde ein weiterer Detektor benötigt, welcher sehr kompakt und in der Lage ist, einen größeren Raumwinkel abzudecken. Für den Einsatz direkt an der Wechselwirkungskammer wurde der 1" *Open Face Detektor* entwickelt, welcher bis zu 56.5 mm entfernt von dem Interaktionsvolumen platziert werden kann und dadurch einen Raumwinkel von bis zu 1,39 erreicht. Nach der Inbetriebnahme des Detektors wurde untersucht, unter welchen Betriebsparametern der Detektor ein zuverlässiges und gut zu verarbeitendes Signal ausgibt. Dazu konnten bestimmte Bereiche für alle Betriebsparameter gefunden werden unter denen die höchste Zählrate bei möglichst hoher Pulsqualität erreicht wird. Diese sind in der Tabelle 3.1 zu finden. Die Pulsqualität für verschiedene MCP-Spannungen konnte in Form von Pulskarten übersichtlich dargestellt werden. Allerdings wurde in diesen die Registrierungsschwelle des CFD nicht berücksichtigt. Die Untersuchungen in Abschnitt 3.3 zeigen, dass diese massiven Einfluss auf die

detektierten Pulse und deren Qualität hat. Aus diesem Grund wurden weitere Pulshöhenverteilungen für Referenzmessungen mit verschiedenen Registrierungsschwellen des CFD durchgeführt. Durch diese konnte ein Verhältnis von Störpulsen zu dem realen Signal bestimmt werden. Dies kann während einer Messung dazu benutzt werden, die Registrierungsschwellen des CFD so einzustellen, dass die Störsignale vernachlässigbar klein werden und die realen Pulse dennoch registriert werden. Nach der Charakterisierung des Detektors wurden erneut die Vorteile des 1" *Open Face Detektors* beleuchtet und ein Beispiel zur zukünftigen Anwendung des Detektors beschrieben.

Für die Messung der Intensität des Synchrotronstrahls nach der Wechselwirkung mit dem *Target* wurde im Vorfeld ein *Faraday-Cup* benutzt, welcher nur unpräzise in den Strahl gebracht werden konnte und nur in einem CF-63 T-Rohr benutzt werden konnte. Im Rahmen der Arbeit wurde der MADLoQ entwickelt, welcher in einer sehr kompakten Bauweise mehrere modulare Sensorelemente oder einen Strahldurchlass zu Verfügung stellt. Die Module des MADLoQs können durch Basisträger mit Photodioden und anderen Sensoren ausgestattet werden. Zusätzlich wurden spezielle Module für einen *Faraday-Cup* und einen YAG in zwei verschiedenen Ausrichtungen entwickelt. So kann der MADLoQ zur Feinausrichtung des Experiments, Freigabe des Strahls für ein dahinter liegendes Experiment, Messung von Strahlintensitäten und Absorptionsspektren benutzt werden. Eine im Vorfeld festgelegtes Ensemble von Sensorelementen kann, ohne den MADLoQ auszutauschen oder abzubauen, motorisiert in den Synchrotronstrahl gefahren werden.

# Literaturverzeichnis 5

---

- [Dem13] Demtröder, W. *Experimentalphysik 2*. Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin, Heidelberg, 6., überarb. u. akt. aufl. 2013 edition (2013). URL <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-29944-5>.
- [Dem16] Demtröder, W. *Atome, Moleküle und Festkörper*. Springer-Lehrbuch. Springer Spektrum, Berlin ; Heidelberg, 5., neu bearbeitete und aktualisierte auflage edition (2016).
- [fN84] für Normung, D. I. *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Benennung der Wellenlängenbereiche*. Deutsches Institut für Normung. [DIN 5031] (1984).
- [GMJR10] Glass-Maujean, M., C. Jungen, G. Reichardt, A. Balzer, H. Schmoranz, A. Ehresmann, I. Haar and P. Reiss. *Competing decay-channel fluorescence, dissociation, and ionization in superexcited levels of H<sub>2</sub>*. Physical Review A, 82(6), 062511 (2010).
- [Han13] Hans, A. *Zerfallsuntersuchungen an Edelgasclustern und Aufbau eines Detektors für Strahlung von 40 bis 120 nm und Charakterisierung durch Messung elektronenstoßangeregter Fluoreszenz*. Universität Kassel, Kassel, 2013 edition (2013).
- [Han18] Hans, A. *Fluoreszenzspektroskopie an Clustern & Flüssigkeiten - Untersuchung interatomarer und intermolekularer Prozesse in dichten Medien*. Dissertation, Kassel (2018). URL <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:hebis:34-2018061155650>.
- [HLF17] Hans, A., L. B. Ltaief, M. Förstel, P. Schmidt, C. Ozga, P. Reiß, X. Holzapfel, C. Küstner-Wetekam, F. Wiegandt, F. Trinter, U. Hergenhahn, T. Jahnke, R. Dörner, A. Ehresmann, P. V. Demekhin and A. Knie. *Fluorescence cascades evoked by resonant interatomic Coulombic decay of inner-valence excited neon clusters*. Chemical Physics, 482, 165 (2017). Electrons and nuclei in motion - correlation and dynamics in molecules (on the occasion of the

70th birthday of Lorenz S. Cederbaum).

- [HSO18] Hans, A., P. Schmidt, C. Ozga, G. Hartmann, X. Holzapfel, A. Ehresmann and A. Knie. *Extreme Ultraviolet to Visible Dispersed Single Photon Detection for Highly Sensitive Sensing of Fundamental Processes in Diverse Samples*. Materials (Basel, Switzerland), 11(6) (2018).
- [Roe18] RoentDek. *The RoentDek Constant Fraction Discriminators CFD8c, CFD7x, CFD4c, CFD1c, CFD1x* (2018).
- [Sch18a] Schmidt, P. *Visualizing the electronic structure of small molecules with rovibronic photon emission spectroscopy*. Dissertation, Kassel (2018).
- [Sch18b] Schütze, P. *Transversale Strahldynamik bei der Erzeugung kohärenter Synchrotronstrahlung* (2018). URL <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-20386-3>.
- [Str06] Strehl, P. *Beam instrumentation and diagnostics*, Volume 120. Springer (2006).
- [W79] Wiza, J. L. et al.. *Microchannel plate detectors*. Nucl. Instrum. Methods, 162(1-3), 587 (1979).
- [YTI05] Yanagida, T., H. Takahashi, T. Ito, D. Kasama, T. Enoto, M. Sato, S. Hirakuri, M. Kokubun, K. Makishima, T. Yanagitani et al.. *Evaluation of properties of YAG (Ce) ceramic scintillators*. IEEE transactions on nuclear science, 52(5), 1836 (2005).

# **Erklärung**

---

Hiermit erkläre Ich, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Ich versichere, dass Textstellen, deren Inhalt wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten bzw. unveröffentlichten Schriften entnommen ist, durch eine entsprechende Zitierung kenntlich gemacht wurden.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift