

Bachelorthesis

**Aufbau einer Reflektionsmessung für
die Spiegel des CBM RICH-Detektors**

**Development of a reflection
measurement for the mirrors of the
CBM RICH detector**

Cornelius Riesen

September 2016

Justus-Liebig-Universität Gießen

Fachbereich 07: Mathematik und Informatik, Physik, Geographie

Autor: Cornelius Riesen

Matrikelnummer: 5002383

Betreuung: Frau Prof. Dr. Claudia Höhne

Abgabe: September 2016

Motivation

Schon die antiken Griechen beschäftigten sich, wie viele andere Kulturen auch, mit dem Ursprung der Welt und den Dingen, aus denen sie besteht. Zu der Zeit, in der eleatische Philosophen, insbesondere Parmenides, zu zeigen versuchten, dass Bewegung, Veränderung, Entstehung und Vergehen nicht denkbar seien, wenn man den völlig leeren Raum als existierend annehme, ging auch Demokrit (etwa 470 bis 360 v.Chr.), ein griechischer Philosoph, zumindest teilweise davon aus, dass ein „absolutes Entstehen aus dem Nichts undenkbar“ sei [1]. Dahingegen spricht die Bibel von „creatio ex nihilo“, der „Schöpfung aus dem Nichts“ [2]. Heutzutage ist das Urknallmodell eine weithin etablierte Theorie, mit der der Beginn von Raum und Zeit erklärt wird. Was jedoch vor dem Urknall gewesen ist, vermag heute keiner zu sagen.

Aber nicht nur für den Beginn, sondern auch für den Aufbau der Materie interessierten sich die griechischen Philosophen. Von seinem Lehrer Leukipp übernahm Demokrit die Lehre über die Körperchen, die den nichtleeren Raum ausfüllten, den sogenannten *Atomismus*:

„Das den Raum füllende Volle ist nun aber nicht Eines. Es besteht aus zahllosen winzigen, wegen ihrer Kleinheit nicht wahrnehmbaren Körperchen. Diese selbst haben kein Leeres in sich, sondern füllen ihren Raum vollständig aus. Sie sind auch nicht teilbar, weshalb sie „Atome“, das heißt Unteilbare, genannt werden [1].“

Mittlerweile weiß man, dass die Teilchen, die wir heutzutage mit „Atom“ bezeichnen, sehr wohl in kleinere Teilchen, nämlich die Elektronen und Nukleonen (Protonen und Neutronen), teilbar sind. Und selbst die Nukleonen sind wiederum aus kleineren Partikeln, den Quarks, aufgebaut.

Wenn auch der aktuelle technische Fortschritt viel weiter ist als zur Zeit der griechischen Philosophen und man viele ihrer Annahmen wissenschaftlich be- oder widerlegen kann, so gibt es dennoch Bereiche, die noch unerforscht sind und für die man großen Aufwand betreiben muss, um Licht in deren Dunkel zu bringen. So weiß man beispielsweise nicht, ob die heute als „Elementarteilchen“ bezeichneten Teilchen wirklich elementar sind oder ob sie vielleicht wiederum aus kleineren Teilchen aufgebaut sind.

In der aktuellen Forschung gibt es zum Beispiel Experimente, die Zustände erzeugen und untersuchen, wie sie in der Frühzeit des Universums, d.h. Bruchteile von Sekunden nach dem Urknall, geherrscht haben sollen. Um diese Forschungen zu ermöglichen, werden große Beschleuniger gebaut, in denen schwere Kerne beschleunigt und zur Kollision gebracht und deren Fragmente mittels Detektoren untersucht werden.

Das Compressed Baryonic Matter-Experiment (CBM) ist eines dieser großen Experimente. Es beschäftigt sich mit der Untersuchung von Hadronen (Teilchen, die aus zwei oder drei Quarks bestehen) bei hohen Teilchendichten und moderaten Temperaturen, die Aufschluss über einen noch weitestgehend unerforschten „Aggregatzustand“ der Teilchenphysik, dem Quark-Gluonen-Plasma bei hohen Dichten, geben soll. An der zukünftigen Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR) bei Darmstadt wird dafür zurzeit ein

Teilchenbeschleuniger mit 1100 Metern Umfang gebaut, in dem Schwerionen beschleunigt und zur Kollision gebracht werden sollen [3]. Um die Bruchstücke, die nach der Kollision entstehen, untersuchen zu können, wurde ein Detektorkonzept entwickelt, das aus mehreren Detektoren besteht. Das Projekt, in dessen Rahmen diese Arbeit angefertigt wurde, beschäftigt sich mit der Entwicklung und dem Aufbau des Ring Imaging Cherenkov-Detektors (RICH), welcher einer der Detektoren in diesem Detektorkonzept ist.

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	6
1.1	Standardmodell der Teilchenphysik	6
1.1.1	Überblick	6
1.1.2	Fermionen	6
1.1.3	Bosonen	8
1.1.4	Hadronen	8
1.1.5	Herausforderung	9
1.2	Quark-Gluon-Plasma	9
2	Compressed Baryonic Matter-Experiment (CBM)	12
2.1	Experimente mit Schwerionenkollisionen	12
2.2	Das CBM-Experiment	14
2.3	RICH-Detektor	14
2.3.1	Cherenkov-Strahlung	14
2.3.2	CBM RICH-Detektor	15
3	Entwicklung einer Messvorrichtung für Reflektivitätsmessungen der CBM	
	RICH-Spiegel	18
3.1	Spiegel	18
3.2	Ausstattung des Messaufbaus	18
3.3	Vorbereitende Messungen	21
3.4	Reflektivitätsmessungen	24
3.5	Probleme und deren Lösungen	35
3.5.1	Abstands- und Winkelabhängigkeit des Intensitätsverlaufs	35
3.5.2	Weitere Einflussgrößen	36
4	Zusammenfassung	37
5	Anhang	38

1 Theorie

1.1 Standardmodell der Teilchenphysik

1.1.1 Überblick

Die wesentlichen Zusammenhänge rund um die kleinsten Teilchen, aus denen unsere sichtbare Welt aufgebaut ist, werden im Standardmodell der Teilchenphysik zusammengefasst [4-7]. Dieses Modell umfasst die vorhandenen Arten der Partikel, aus denen die Materie aufgebaut ist, sowie deren Wechselwirkungen, die durch Austauschteilchen übertragen werden. Diese beiden Sorten von Teilchen unterscheiden sich vor allem durch ihren Spin: während die Materieteilchen einen halbzahligen Spin besitzen, also Fermionen sind, haben Wechselwirkungsteilchen einen ganzzahligen Spin und sind somit Bosonen. Von allen vier bekannten Grundkräften umfasst das Standardmodell nur die starke, die schwache und die elektromagnetische Kraft. Ein Fermion unterliegt zwar, wie alle Teilchen mit Masse, auch der Gravitationskraft, jedoch ist diese gegenüber den anderen Kräften um Größenordnungen kleiner. Die Gravitation lässt sich noch nicht in die Theorie einbauen. Dies ist jedoch Gegenstand aktueller Forschung.

Fermionen werden in Quarks und Leptonen unterteilt. Quarks existieren unter normalen Verhältnissen nur in gebundenen Zuständen, sodass sie sich zu Hadronen, bestehend aus zwei bzw. drei Quarks, zusammenschließen. Nur bei sehr hohen Temperaturen (weit über 100 MeV auf $k_B T$ -Skala) und kleinen chemischen Potentialen, wie sie kurz nach dem Urknall geherrscht haben sollen, können sie als freie Teilchen existieren.

Alle uns umgebende sichtbare Materie besteht aus drei unterschiedlichen Fermionen, nämlich dem up-Quark (u-Quark), dem down-Quark (d-Quark) und dem Elektron (Lepton). Es gibt noch eine Vielzahl weiterer, schwererer Quarks und Leptonen, die jedoch nach sehr kurzer Zeit (Bruchteile von Sekunden) in die eben genannten zerfallen. Nach dem Urknallmodell gab es in der Frühzeit des Universums jede Menge dieser kurzlebigen Teilchen, die im Laufe seiner Expansion jedoch in ihre leichteren Konkurrenten zerfielen. Durch Kollisionen von Hadronen miteinander, wie sie beispielsweise in der auf die Erde niedergehenden kosmischen Strahlung geschehen, können diese schwereren Teilchen allerdings wieder erzeugt werden. Diese Erkenntnis führte dazu, dass, vor allem ab der Mitte des letzten Jahrhunderts, Beschleuniger mit immer höheren Energien, sowie Detektoren gebaut wurden, mit denen man Kollisionen künstlich herbeiführen und die so entstandenen Teilchen entdecken konnte. Infolgedessen entstand, überwiegend in den Jahren 1961 bis 1973, das Standardmodell der Teilchenphysik.

1.1.2 Fermionen

Betrachten wir zunächst die Fermionen. Dazu gehören einerseits die Quarks, die der starken, der schwachen sowie der elektromagnetischen Wechselwirkung unterliegen und andererseits die Leptonen (von griech. „klein“), welche nur der schwachen bzw. elektromagnetischen Wechselwirkung unterliegen. Die Ladung der starken Wechselwirkung wird als Farbe bezeichnet. Davon gibt es drei unterschiedliche, die sich zusammen zu „Weiß“ oder „Null“ aufheben. Sowohl Quarks als auch Leptonen werden jeweils in drei Generationen

oder Familien mit je einem Paar unterteilt, wobei die Teilchen mit steigender Generation zunehmend deutlich größere Massen besitzen. Die Teilchen der zweiten und dritten Generation sind instabil und zerfallen, wie oben schon erwähnt, nach kurzer Zeit in Teilchen der ersten Generation, wobei Teilchen der dritten Generation meist zuerst in Teilchen der zweiten Generation zerfallen, die dann wiederum in Teilchen erster Generation zerfallen. Zur ersten Generation der Quarks gehören das u- und d-Quark, welche eine Masse von einigen wenigen MeV/c^2 besitzen. Die zweite Familie bilden das c- und s-Quark, die dritte Familie das t- und b-Quark. Jedes Quark (q) besitzt ein Antiteilchen (\bar{q}) das die gleiche Masse, jedoch entgegengesetzte elektrische Ladung gleichen Betrags besitzt und Antifarbe trägt. Farbe und Antifarbe heben sich ebenso wie positive und negative elektromagnetische Ladung auf. Fasst man alle Quarksorten zusammen, kommt man auf eine Anzahl von 36 unterschiedlichen Quarks.

Zur ersten Generation der Leptonen gehören das Elektron und das Elektron-Neutrino. In den beiden weiteren Generationen folgen das Myon sowie das Tau mit ihren jeweiligen Neutrinos. Die Neutrinos besitzen keine elektrische Ladung, während ihre jeweiligen Partner ganzzahlige negative Ladung tragen. Neutrinos unterliegen nur der schwachen Wechselwirkung. Das Elektron, das Myon und das Tau wechselwirken indes über die schwache und die elektromagnetische Kraft. Auch zu den Leptonen gibt es jeweils ein Antiteilchen, dessen Ladung, äquivalent zu den Quarks, entgegengesetzt der des „natürlichen“ Teilchens ist. Für die Antineutrinos bedeutet dies demzufolge, dass auch sie ungeladen sind. Zusammen zählt man also zwölf Leptonen bzw. Antileptonen, wobei noch unklar ist, ob das Neutrino nicht eventuell sein eigenes Antiteilchen ist. Zur Übersicht sind die Fermionen und einige ihrer Eigenschaften in Tabelle 1.1 aufgeführt.

Fermion	Bezeichnung	Masse [MeV/c ²]	elektrische Ladung [Elementarladung]
Quarks	up (u)	2,3	$\frac{2}{3}$
	down (d)	4,8	$-\frac{1}{3}$
	charm (c)	1275	$\frac{2}{3}$
	strange (s)	95	$-\frac{1}{3}$
	top (t)	173070	$\frac{2}{3}$
	bottom (b)	4180	$-\frac{1}{3}$
Leptonen	Elektron (e)	0,511	-1
	Myon (μ)	105,7	-1
	Tau (τ)	1777	-1
	Elektronneutrino (ν_e)	$< 2 \times 10^{-3}$	0
	Myonneutrino (ν_μ)	$< 0,19$	0
	Tauneutrino (ν_τ)	$< 18,2$	0

Tabelle 1.1: Die Fermionen und ihre Massen und Ladungen [5].

1.1.3 Bosonen

Wechselwirkungen zwischen den Fermionen werden durch Bosonen übertragen. Dabei ist die Reichweite der Wechselwirkung von der Masse und der Selbstwechselwirkung der Bosonen abhängig. Obwohl sie für die Übertragung von Kräften zuständig sind, können diese Wechselwirkungsteilchen auch als eigenständige Teilchen existieren. Das wohl bekannteste Beispiel hierfür ist das Photon, das die elektromagnetische Wechselwirkung überträgt. Die Kraftwirkung mit den Materiefeldern wird im Rahmen von Eichtheorien beschrieben.

Für die Übertragung der drei vom Standardmodell erklärten Grundkräfte, also die elektromagnetische, die starke und die schwache Kraft, sind vier Sorten von Bosonen zuständig. Sie alle besitzen den Spin $S=1$ und werden daher auch Vektorbosonen genannt. Da ist zunächst das Photon, welches, wie oben schon erwähnt, die elektromagnetische Wechselwirkung vermittelt. Da es masselos ist, ist die Reichweite seiner Wirkung unendlich. Es folgen weiterhin die Gluonen, welche die starke Kraft übermitteln. Von ihnen gibt es acht verschiedene, die, wie die Quarks, Farbladung tragen. Die Gluonen sind zwar masselos, koppeln aber wegen ihrer Farbladung sehr stark untereinander. Daher ist die Reichweite der von ihnen übertragenen Kräfte auf einige wenige Femtometer beschränkt. Bei größeren Abständen wird die Kraft und somit die Energie des Farbfelds so groß, dass reelle Quark-Antiquark-Paare erzeugt werden können. Die schwache Kraft schließlich wird von den schweren Z^0 - und W^\pm -Bosonen übertragen. Durch ihre hohe Masse (siehe Tabelle 1.2) bedingt ist die Reichweite der schwachen Kraft noch kleiner als diejenige der starken Wechselwirkung. Als weiteres Boson sei hier das Higgs erwähnt, das kein Austauscheteilchen ist, sondern vielmehr dem Z^0 -Boson und den W^\pm -Bosonen sowie allen Fermionen Masse verleiht. Erst im Juli 2012 wurde innerhalb eines Seminars am CERN bekanntgegeben, dass bei Versuchen am LHC ein Boson mit den Eigenschaften des von der Theorie vorhergesagten Higgs-Bosons entdeckt wurde.

Boson	Masse [GeV/c ²]	elektrische Ladung [Elementarladung]	Wechselwirkung
Photon (γ)	0	0	elektromagnetisch
Gluon (g)	0	0	stark
Z^0	91,2	0	schwach
W^\pm	80,4	± 1	schwach
Higgs (H)	125,9	0	

Tabelle 1.2: Übersicht über die Bosonen [5].

1.1.4 Hadronen

Wie schon erwähnt, sind Hadronen aus zwei oder drei Quarks bestehende Teilchen. Sie werden in Mesonen (bestehend aus zwei Quarks) und Baryonen (bestehend aus drei Quarks) unterteilt.

Es existiert zwar eine Vielzahl unterschiedlicher Quarks, jedoch unterliegt deren Konstellation zu einem Hadron einer festen Regel (wodurch die Anzahl der möglichen

Kombinationen eingeschränkt wird): Freie Hadronen müssen immer farbneutral sein. Man nennt diese Beschränkung auch *Confinement* (von engl.: *to confine* = einsperren). Daraus folgt, dass Mesonen nur aus Quark-Antiquark-Paaren und Baryonen nur aus Quarks bzw. nur aus Antiquarks mit drei unterschiedlichen, sich neutralisierenden Farben bestehen. Dieses Phänomen erklärt auch, warum Quarks bislang noch nicht als freie Teilchen beobachtet wurden.

Die wohl bekanntesten Hadronen sind das Proton (uud) und das Neutron (udd), beides Baryonen, aus denen die Atomkerne aufgebaut sind.

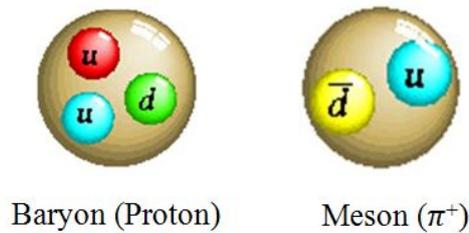


Abbildung 1.1: Beispiele für ein Baryon (links) und ein Meson (rechts), bestehend aus drei bzw. zwei Quarks [8].

1.1.5 Herausforderung

Das Standardmodell erklärt sehr gut die Physik der kleinsten Teilchen der sichtbaren Materie. Viele Voraussagen sind durch experimentelle Versuche bestätigt worden, wie zum Beispiel die Existenz des Higgs-Bosons. Es konnten auch die elektromagnetische sowie die schwache Kraft auf eine einzige, nämlich die elektroschwache Wechselwirkung, zurückgeführt werden. Es bestehen auch Ansätze, die starke Kraft mit der elektroschwachen zu vereinigen. Dennoch gibt es viele Phänomene, die dieses Modell nicht beschreibt. Zum Beispiel macht es keine Aussagen über die Gravitation. Die Frage bleibt offen, ob auch diese Wechselwirkung mit den drei anderen vereint werden kann. Auch werden die Dunkle Materie und die Dunkle Energie, die den Großteil unseres Universums ausmachen, nicht vom Standardmodell beschrieben. Außerdem gibt es mindestens 18 freie Parameter, zum Beispiel die Kopplungskonstanten der Wechselwirkungen, die nicht aus theoretischen Überlegungen hervorgehen, sondern durch Experimente bestimmt werden müssen.

1.2 Quark-Gluon-Plasma

Die Starke Wechselwirkung zwischen den Quarks wird durch Gluonen übertragen. Diese sind jedoch, im Gegensatz zu ihrem Äquivalent der elektromagnetischen Wechselwirkung, dem Photon, nicht neutral, sondern geladen. Sie besitzen gleichzeitig Farbe und Antifarbe (anderen Farbtyps) und da sie diese Ladung tragen, wechselwirken sie auch untereinander. Die Beschreibung der Starken Wechselwirkung erfolgt durch die Quantenchromodynamik

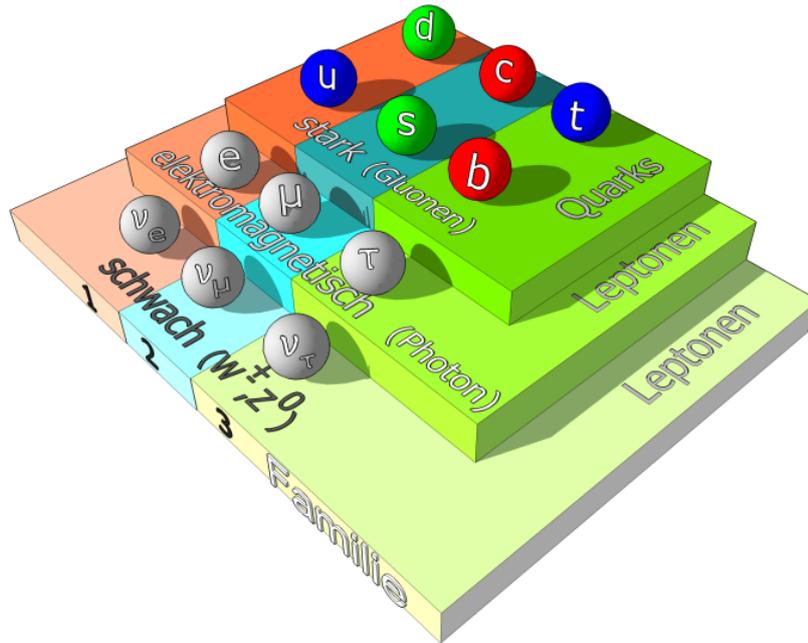


Abbildung 1.2: Elementarteilchen mit ihren Familien und Wechselwirkungen [9].

(QCD). „Chromo“-Dynamik deswegen, weil die unterschiedlichen Ladungen durch unterschiedliche Farben ausgedrückt werden [10].

Das Coulomb-Potential zweier Punktladungen fällt bekanntlich mit dem Abstand mit $V_{coul} \sim -r^{-1}$ ab. Anders verhält es sich mit dem QCD-Potential:

$$V_{QCD} = -\frac{A\alpha_s}{r} + Br, \quad (1.1)$$

wobei A und B Konstanten sind und α_s die Kopplungskonstante der Starke Wechselwirkung, welche ein Maß für deren Stärke ist. Es ist zu sehen, dass sich für kleine Abstände r das QCD-Potential ähnlich dem des Coulombpotentials verhält, es jedoch bei großen Abständen unendlich ansteigen kann. Dies führt zu einem Einschluss der Quarks, dem *Confinement*. Man spricht hier auch von „asymptotischer Freiheit“. Ab einem bestimmten Abstand ist es energetisch günstiger, ein neues Quark-Antiquark-Paar zu erzeugen, als den Abstand weiter zu erhöhen. Bei einer für Hadronen typischen Energie von 1 GeV ergeben sich Längen von etwa einem Femtometer, was der Größe eines Hadrons entspricht [11].

Seit einigen Jahrzehnten gibt es jedoch Hinweise darauf, dass das Confinement nur für „moderate“ Temperaturen und Drücke gilt, so wie wir sie etwa aus unserem Sonnensystem kennen (selbst die Temperatur und der Druck im Inneren der Sonne kann hier noch als „moderat“ angesehen werden), es jedoch aufgehoben wird, wenn die genannten Parameter deutlich größer werden. So sollen nach dem Urknallmodell innerhalb der ersten Mikrosekunde so hohe Temperaturen im damals noch sehr kleinen Universum geherrscht haben, dass die Quarks und Gluonen als freie Teilchen vorlagen. Dieser Zustand wird

mit Quark-Gluon-Plasma benannt.

In den Sechzigerjahren des vorigen Jahrhunderts errechnete Rolf Hagedorn, ein theoretischer Physiker, nach detaillierten Untersuchungen eine Temperaturgrenze von etwa 140 MeV (was ca. $1,6 \times 10^{12}$ Kelvin entspricht) für das Eingesperrtsein der Quarks. Durch weitere Berechnungen erhielt man, vor allem durch Gitter-QCD-Rechnungen, Übergangstemperaturen von 173 MeV bzw. 190 MeV. Aktuell wird eine Übergangstemperatur von 160 MeV angegeben. Die unterschiedlichen Werte ergeben sich aus unterschiedlichen Normierungsgrößen. Wurde zu Anfang die Masse des ρ -Mesons als Normierungsgröße verwendet, kam mit fortschreitender Erkenntnis auch die Masse der schweren Bottom-Quarks mit in die Berechnungen hinein [13].

Jedoch nicht nur hohe Temperaturen heben das Confinement auf, sondern auch hohe

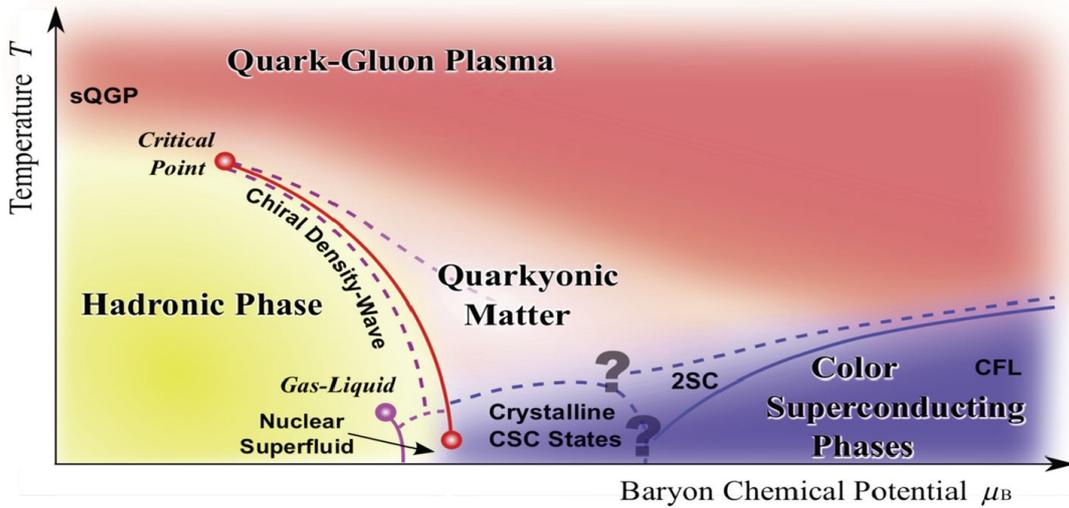


Abbildung 1.3: Phasendiagramm für stark wechselwirkende Materie [12]. Oberhalb einer Temperatur von 160 MeV und eines hohen Drucks (möglicherweise zehnfacher Kerndichte) wird die Aufhebung des Confinements vermutet.

Drücke. Werden Kerne auf etwa das zehnfache der normalen Kerndichte zusammengedrückt, so nehmen sie anstatt des linear ansteigenden Potentials nur noch den $1/r$ -Term wahr, und die Hadronisierung ist trotz geringer Temperaturen aufgehoben. Dieser Zustand wird beispielsweise in Neutronensternen vermutet, in deren Innerem zwar relativ geringe Temperaturen, jedoch so hohe Drücke herrschen, dass Quarks und Gluonen als freie Teilchen existieren könnten [14]. In Abbildung 1.3 ist ein mögliches Phasendiagramm für stark wechselwirkende Materie zu sehen. Hierin sind die Kerndichten durch das baryochemische Potential μ_B ausgedrückt. Aus Gitter-QCD-Extrapolationen für Bereiche mit endlicher Netto-Baryondichte und nicht-perturbativen Modellen ergaben sich starke Hinweise auf einen kritischen Endpunkt der hadronischen Phase bei sehr hohen Baryondichten bzw. chemischen Potentialen und geringen Temperaturen. Jenseits dieses Punkts wird ein Übergang erster Ordnung zur sogenannten partonischen Materie erwartet [16].

2 Compressed Baryonic Matter-Experiment (CBM)

2.1 Experimente mit Schwerionenkollisionen

Das Quark-Gluon-Plasma, wie es innerhalb der ersten Mikrosekunde im Universum herrschte, kann über Teilchenkollisionen wieder erzeugt werden. So wurde in den 1980er Jahren begonnen Experimente aufzubauen, bei denen schwere Atomkerne beschleunigt werden und frontal zur Kollision kommen, um Temperaturen und Dichten der Frühzeit des Universums zu untersuchen.

Um überhaupt über thermodynamische Größen wie Temperatur, Druck, Phasenübergänge und weitere Aussagen machen zu können, muss sich das untersuchte System wie Materie verhalten und nicht wie einzelne Teilchen. Das heißt, dass das System einerseits eine Vielzahl an Teilchen beinhalten muss (mind. 10^3 bis 10^4) und es außerdem zumindest annähernd einen lokalen Gleichgewichtszustand erreichen sollte. Das heißt auch, dass die Dauer dieses Zustandes sehr viel größer sein muss als die inverse Rate von Wechselwirkungen, sodass jede Teilchenart eine ausreichende Anzahl an Wechselwirkungen (ca. 10^5) erfährt. Wie schon angeführt, war das Universum nach dem Urknallmodell bereits eine Mikrosekunde nach seiner Entstehung soweit abgekühlt, dass sich Hadronen bildeten. Die Energien, die in einem Beschleuniger erzielt werden können, sind jedoch viel kleiner als die Gesamtenergie, die zu Beginn des Universums (und heute noch) vorhanden war, sodass der durch die Kollision entstandene Feuerball nach bereits etwa 10^{-22} Sekunden soweit abkühlt, dass es zur Hadronisierung kommt.

Um nun diese großen Teilchenzahlen zu erhalten, genügt es nicht, nur beispielsweise Protonen zur Kollision zu bringen, vielmehr werden größere Teilchenzahlen benötigt. Daher beschäftigen sich Experimente wie der Large Hadron Collider (LHC) am CERN oder der Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) am Brookhaven National Laboratory (BNL) auf Long Island (USA) seit etwa 1986 damit, schwere Kerne aufeinanderprallen zu lassen. Begannen die Experimente mit Kernen wie Silizium und Schwefel (Massenzahlen $A=28$ bzw. $A=32$), so wurde in den Folgejahren mit immer schwereren Kernen wie Gold ($A=197$) und dem Blei-Isotop ^{208}Pb experimentiert [13].

Auch ermöglichten technische Fortschritte, dass Beschleuniger mit immer höheren Energien betrieben werden konnten. So werden am LHC mittlerweile Energien von 1150 TeV für Schwerionenstrahlen erreicht [15].

Ein zukünftiges Experiment, das zur Untersuchung des Quark-Gluon-Plasmas gebaut wird und in dessen Rahmen diese Arbeit geschrieben wurde, ist das Compressed Baryonic Matter-Experiment, das an der Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR) bei Darmstadt aufgebaut wird. Während sich die Experimente am LHC und RHIC mit der Untersuchung des Quark-Gluon-Plasmas bei hohen Temperaturen und geringen Drücken beschäftigen, liegt der Schwerpunkt des CBM-Experiments auf der Erforschung des Quark-Gluon-Plasmas bei relativ geringen Temperaturen, jedoch sehr hohen Baryonendichten.

Kollidieren zwei Schwerionen, so werden sie für sehr kurze Zeit extrem stark aufgeheizt und komprimiert. Zunächst werden die Nukleonen (Protonen und Neutronen) zu sehr kurzlebigen Zuständen (Baryonen-Resonanzen) angeregt, die durch Emission von Meso-

nen wieder zerfallen. Bei höheren Temperaturen werden auch Baryon-Antibaryon-Paare erzeugt. Diese Hadronen zerschmelzen bei noch höheren Temperaturen und formen das oben beschriebene Quark-Gluon-Plasma. Es wird vermutet, dass bei geringen Temperaturen und hohen Dichten korrelierende Quark-Antiquark-Paare eine supraleitende Phase bilden.

Die Schwerpunkte des CBM-Experiments sind zum einen die Untersuchung des Phasendiagramms stark wechselwirkender Materie bei hohen Netto-Baryondichten. Dabei bestehen noch offene Fragen bezüglich neuer Phasen (z.B. quarkyonic matter) und Strukturen im Phasendiagramm wie Phasenübergänge erster Ordnung und der kritische Endpunkt. Außerdem sollen die Eigenschaften dichter Kernmaterie wie etwa die Änderung hadronischer Eigenschaften wie Masse und Lebensdauer im dichten Medium untersucht werden.

Die Entdeckung des kritischen Endpunktes an der Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR) an der GSI wäre ein großer Durchbruch der Hochenergie- und Schwerionenforschung, da sie erstmals eine Bestätigung für den Phasenübergang zum Deconfinement liefern würde. Die Untersuchung der Eigenschaften des entstandenen Feuerballs erfolgt

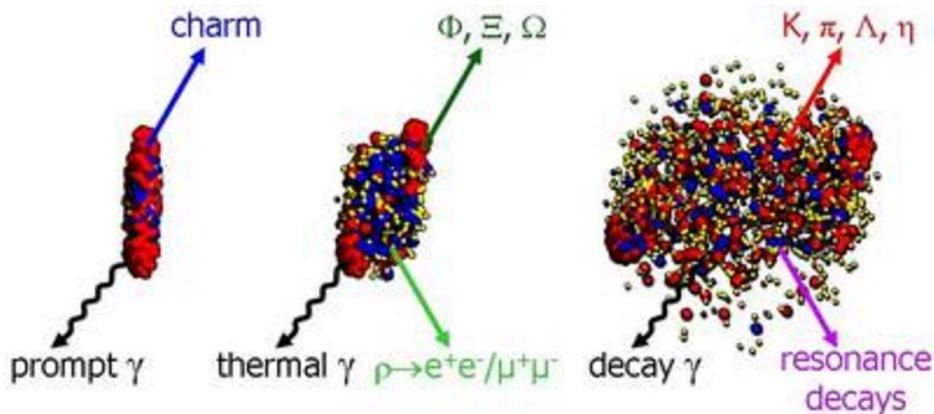


Abbildung 2.1: Skizze der Abfolge eines Kollisionsvorgangs zweier Urankerne bei einer Energie von 23 GeV/Nukleon: Aufeinanderprallen der durch hohe Geschwindigkeiten lorentzkontrahierten Kerne (links), Phase hoher Dichte (mittig), Phase der Hadronenbildung (rechts). Nucleonen sind rot dargestellt, angeregte Baryonen blau, Mesonen gelb. Unterschiedliche Teilchen werden in unterschiedlichen Phasen erzeugt. Bei einer Kollision wie dieser werden annähernd 1000 geladene Teilchen produziert, größtenteils Pionen [16].

durch die Messung der emittierten Teilchen. Eine gründliche Analyse der Korrelationen und Fluktuationen dieser Teilchen gibt Aufschluss über die Eigenschaften des Feuerballs. So kann zum Beispiel aus dem kollektiven Verhalten der emittierten Partikel auf die Kompressibilität der Materie geschlossen werden [16].

2.2 Das CBM-Experiment

In Abbildung 2.2 ist das Detektorkonzept des geplanten CBM-Experiments zu sehen, mit dem die bei der Reaktion entstandenen Teilchenarten und deren Parameter ermittelt werden sollen. Der Aufbau besteht aus einem Silizium-Tracking-System (STS) mit hoher Auflösung, dem Ring-Imaging-Cherenkov-Detektor (RICH), drei Übergangsstrahlungsdetektoren (TRD), einem Flugzeitdetektor (TOF) und einem elektromagnetischen Kalorimeter zur Identifikation von Elektronen und Photonen.

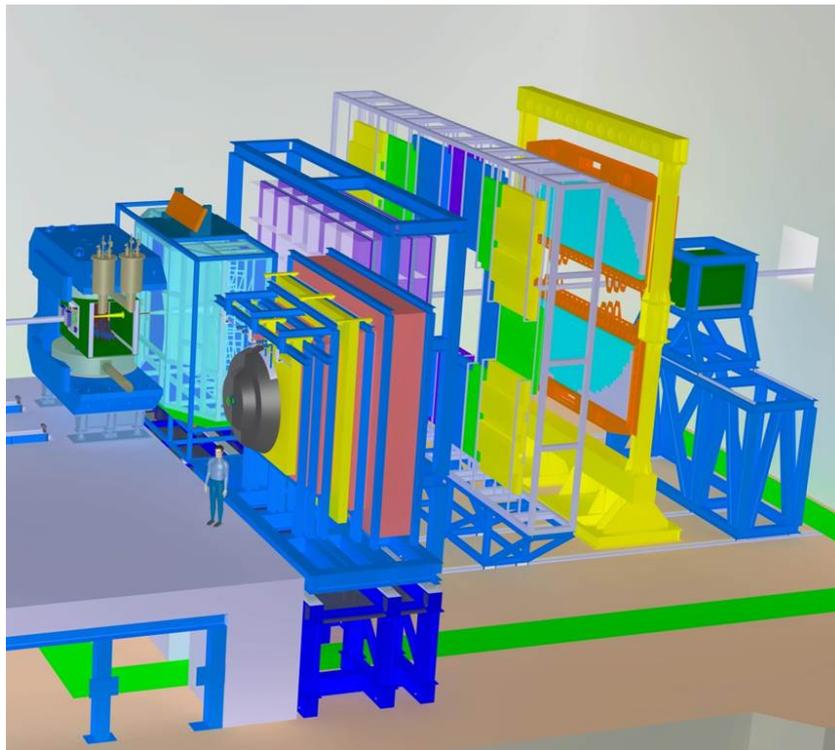


Abbildung 2.2: Detektorkonzept des am FAIR im Bau befindlichen CBM-Experiments [17].

2.3 RICH-Detektor

2.3.1 Cherenkov-Strahlung

Um die Funktionsweise eines RICH-Detektors zu verstehen muss man den Cherenkov-Effekt kennen. Cherenkov-Strahlung tritt auf, wenn ein geladenes Teilchen ein elektrisch isolierendes Medium (Radiator) wie etwa Glas oder Gas mit einer Geschwindigkeit v durchfliegt, die größer ist als die Lichtgeschwindigkeit $c' = \frac{c}{n}$ (mit n der Brechzahl des Mediums) in diesem Medium. Fliegt dieses geladene Teilchen an einem Atom vorbei, so induziert es an diesem durch Polarisation kurzzeitig ein zeitlich veränderliches Dipolmoment, sodass elektromagnetische Wellen emittiert werden. Wäre die Geschwindigkeit

2 Compressed Baryonic Matter-Experiment (CBM)

v des geladenen Teilchens kleiner als die Lichtgeschwindigkeit in diesem Medium, so löschen sich die Wellen benachbarter Atome aus. Ist aber v größer als c' , so interferieren die Wellen konstruktiv und bilden, analog zu dem aus der Akustik bekannten Machschen Kegel, eine kegelförmige Wellenfront, deren Winkel Θ mit zunehmender Geschwindigkeit größer wird (siehe Abb. 2.3). Zwischen dem Winkel Θ des Kegels und der Geschwindigkeit v des geladenen Teilchens besteht die Beziehung

$$\sin \Theta = \frac{1}{\beta n}, \quad (2.1)$$

wobei $\beta = \frac{v}{c}$ ist. Diese Strahlung wird Cherenkov-Strahlung genannt [18].

Oft wird nicht die Geschwindigkeit, sondern der Impuls p eines Teilchens angegeben. Der relativistische Impuls ist mit der Geschwindigkeit über

$$p = mv\gamma, \quad \text{mit } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (2.2)$$

verknüpft.

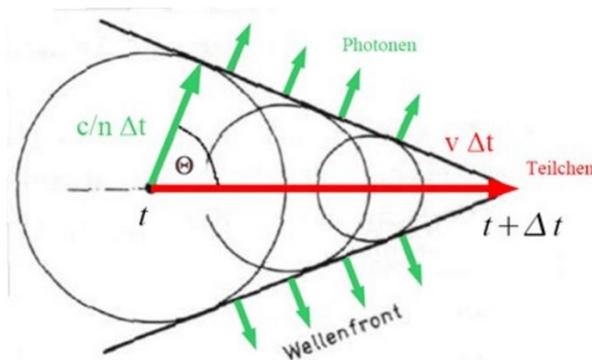


Abbildung 2.3: Prinzip der Cherenkovstrahlung [19].

2.3.2 CBM RICH-Detektor

Aufgabe des CBM RICH-Detektors ist es, in einem Impulsbereich bis zu 8-10 GeV/ c Elektronen zu identifizieren und insbesondere von den Pionen zu trennen. Als Radiator dient hier CO_2 -Gas, das bei einer Temperatur von 0°C einen Brechungsindex von $n = 1,00045$ besitzt. Die Funktionsweise des Detektors ist in Abbildung 2.4 skizziert. Wie hierin zu erkennen besteht der Detektor im Wesentlichen aus dem Radiator (radiator gas), zwei Ebenen konkaver Spiegel sowie zwei Ebenen von Photomultipliern (photon detector). Die im Radiator erzeugte Cherenkov-Strahlung wird durch die Spiegel auf die Photomultiplier reflektiert. Hier bilden die Cherenkov-Photonen Ringe, aus deren Radius auf den Impuls der Elektronen geschlossen werden kann.

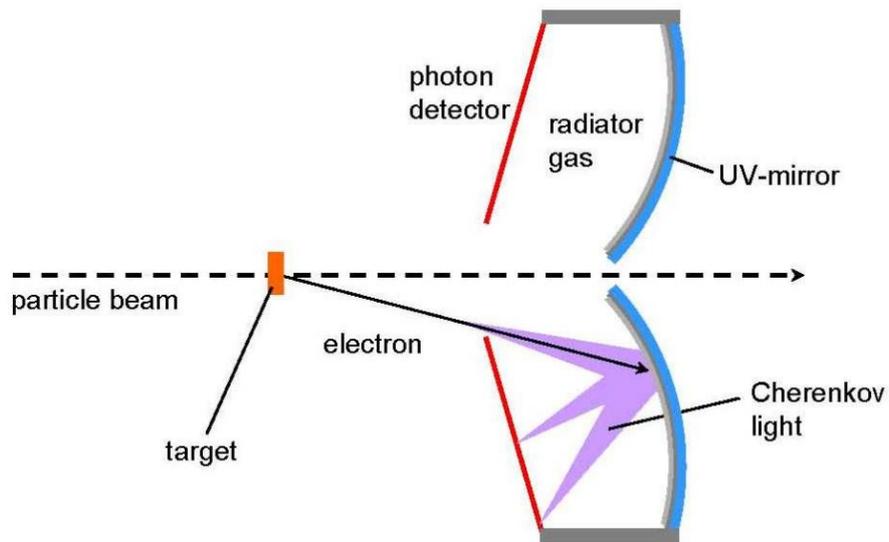


Abbildung 2.4: Prinzip des RICH-Detektors [21].

Um eine Vorstellung für die Größe des geplanten CBM-Detektors zu haben, seien hier noch einige Längen gegeben: Der Radiator hat eine Länge von 1,7 m. Die quadratischen Spiegel, die in zwei Sektionen von jeweils 5x8 Spiegeln angeordnet sind, besitzen eine Kantenlänge von etwa 400 mm sowie einen Radius von 3000 mm. Der mechanische Aufbau ist in Abbildung 2.5 zu sehen. Die bunten gerasterten Flächen stellen hierbei die Spiegel dar, die gelben Teile sind die Photomultiplier-Ebenen [20].

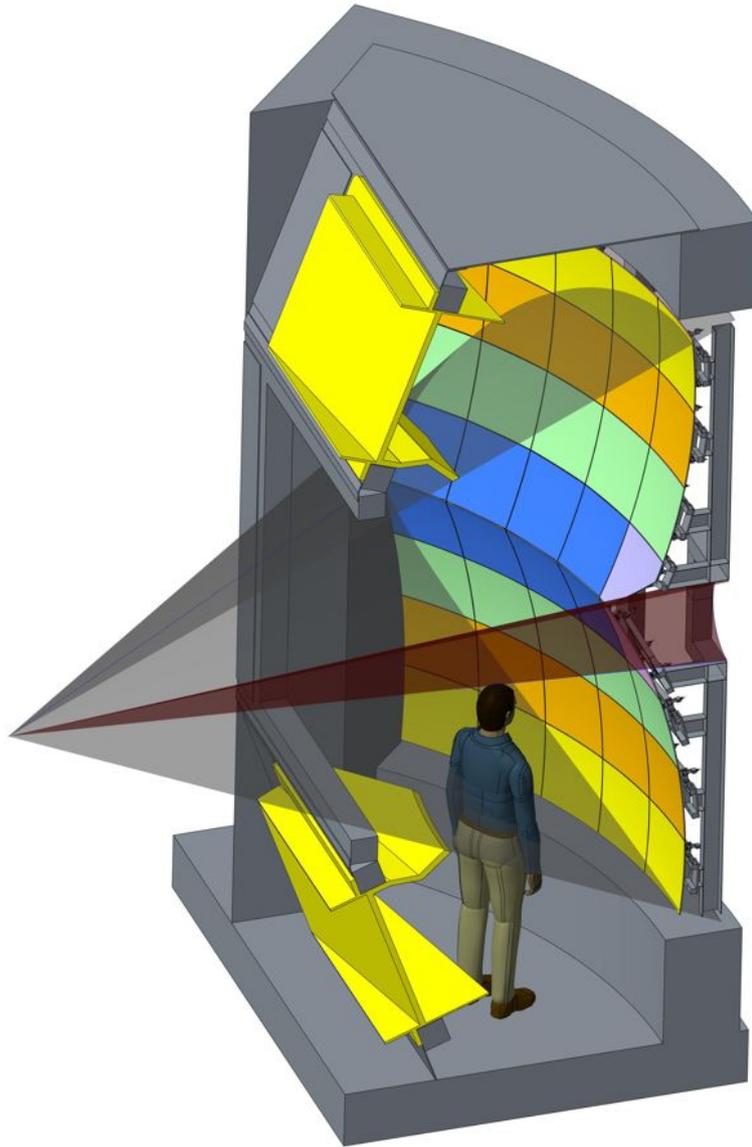


Abbildung 2.5: Mechanischer Aufbau des RICH-Detektors [22].

3 Entwicklung einer Messvorrichtung für Reflektivitätsmessungen der CBM RICH-Spiegel

Das Ziel der Arbeit bestand darin, eine Messvorrichtung aufzubauen, mit der Reflektivitätsmessungen an den für den RICH-Detektor benötigten Spiegeln vorgenommen werden können. Diese werden von der tschechischen Firma JLO-Olomouc hergestellt. Da die Reflektivität innerhalb eines Spiegels nicht konstant ist, ist es vonnöten, jeden einzelnen von ihnen an mehreren Stellen zu vermessen und so eine hohe Güte zu garantieren, um später im Experiment möglichst präzise Aussagen über die detektierten Teilchen machen zu können.

3.1 Spiegel

Im Vorfeld des Projekts gab es drei Hersteller, die für die Produktion der für den RICH-Detektor benötigten Spiegel in Frage kamen. Nach einer Analyse von Testspiegeln der drei Hersteller wurde entschieden, diese von der tschechischen Firma Olomouc herstellen zu lassen.

Die konkaven, quadratisch zugeschnittenen Spiegel besitzen eine Kantenlänge von etwa 400 mm und einen Radius von 3000 mm. Sie bestehen aus einer auf einem Glassubstrat aufgedampften Aluminiumschicht, welche als Reflektor dient. Darüber ist eine Schutzschicht aus MgF_2 aufgebracht [21]. Es soll jedoch noch ein Test für eine optimierte Beschichtung durchgeführt werden, da MgF_2 sehr empfindlich gegenüber Kratzern und Fingerabdrücken ist.

Außer der Reflektivität müssen die Spiegel noch andere Anforderungen erfüllen, wie etwa ein über die gesamte Fläche konstanter Radius oder eine nur sehr geringe Rauheit der Oberfläche. Diese Faktoren werden im Rahmen anderer Arbeiten untersucht.

3.2 Ausstattung des Messaufbaus

Die Ausstattung des Messaufbaus bestand im Wesentlichen aus einer Lichtquelle, einem Spektrometer, zwei Lichtleiterfasern, einem Referenzspiegel und dem zu vermessenden Musterspiegel. Die Datenaufnahme erfolgte durch OceanView, einer dem Spektrometer mitgelieferten Software, die der Aufnahme und Auswertung von Lichtspektren in einem Wellenlängenbereich von 180-600 nm dient. Die von der Firma Ocean Optics gelieferte Lichtquelle (DH-2000-BAL) besitzt eine Halogen- und eine Deuteriumlampe. Diese emittieren bei unterschiedlichen Wellenlängen unterschiedlich viel Licht (siehe dazu Abbildung 3.2), weswegen während der späteren Messungen beide gleichzeitig eingesetzt wurden. Vor allem bei Wellenlängen unterhalb von 350 nm, die für die Cherenkovstrahlung von großer Bedeutung sind, emittiert die Halogenlampe kaum Licht. Insgesamt erzielt sie aber deutlich höhere Intensitäten. Der scharfe Peak der Deuteriumlampe bei 486 nm stammt von der D_β -Linie (Balmerreihe) [23].

Das nun von der genannten Lichtquelle emittierte Licht gelangt, nachdem es den Lichtleiter (emittierende Faser) durchquert, auf den Spiegel und wird hier reflektiert. Der

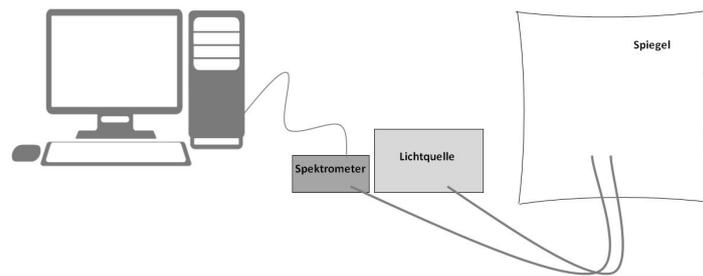


Abbildung 3.1: Schematischer Messaufbau

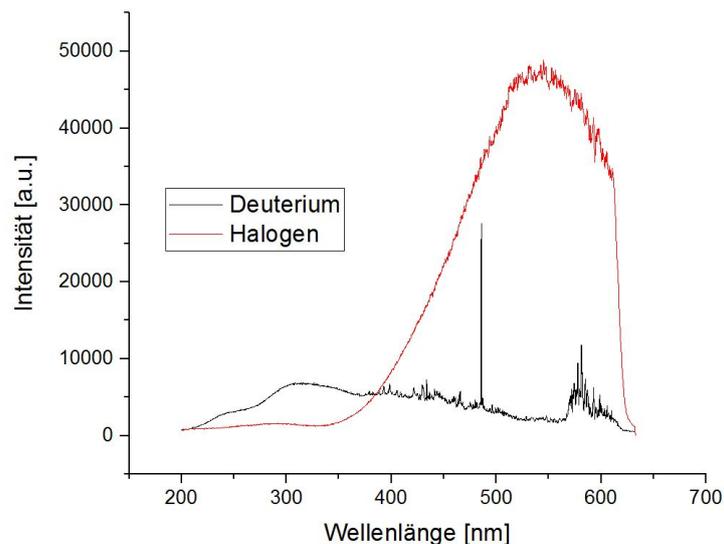


Abbildung 3.2: Vergleich der Intensitätsspektren der Halogen- und Deuteriumlampe.

reflektierte Strahl wird von der mit dem Spektrometer (Maya2000PRO, Ocean Optics) verbundenen Lichtfaser (kollektierende Faser) aufgenommen und hierin durch Dispersion am Gitter aufgefächert. Die so separierten Teilstrahlen unterschiedlicher Wellenlänge treffen auf eine CCD-Kamera, welche die Daten über ein USB-Kabel an die Software weiterleitet [24].

Außer dem bislang Genannten war noch eine Feinjustierung vorzunehmen: Der aus der emittierenden Faser austretende Strahl hat einen Öffnungswinkel von ca. 25° [25]. Um diesen Winkel zu korrigieren, wurde der Strahl mithilfe einer Kollimatorlinse (74-UV) möglichst parallel ausgerichtet. Jedoch ist der Strahl auch nach dieser Maßnahme nicht ganz parallel, sondern besitzt immer noch einen Öffnungswinkel von etwa $1,5^\circ$. Dieser Winkel ist klein genug, sodass die Messungen stabil durchgeführt werden können. Dadurch erhält man jedoch wieder eine abstandsabhängige Intensität, die bei den Messungen berücksichtigt werden muss.

Um die Fasern befestigen und justieren zu können wurden geeignete, in zwei Achsen

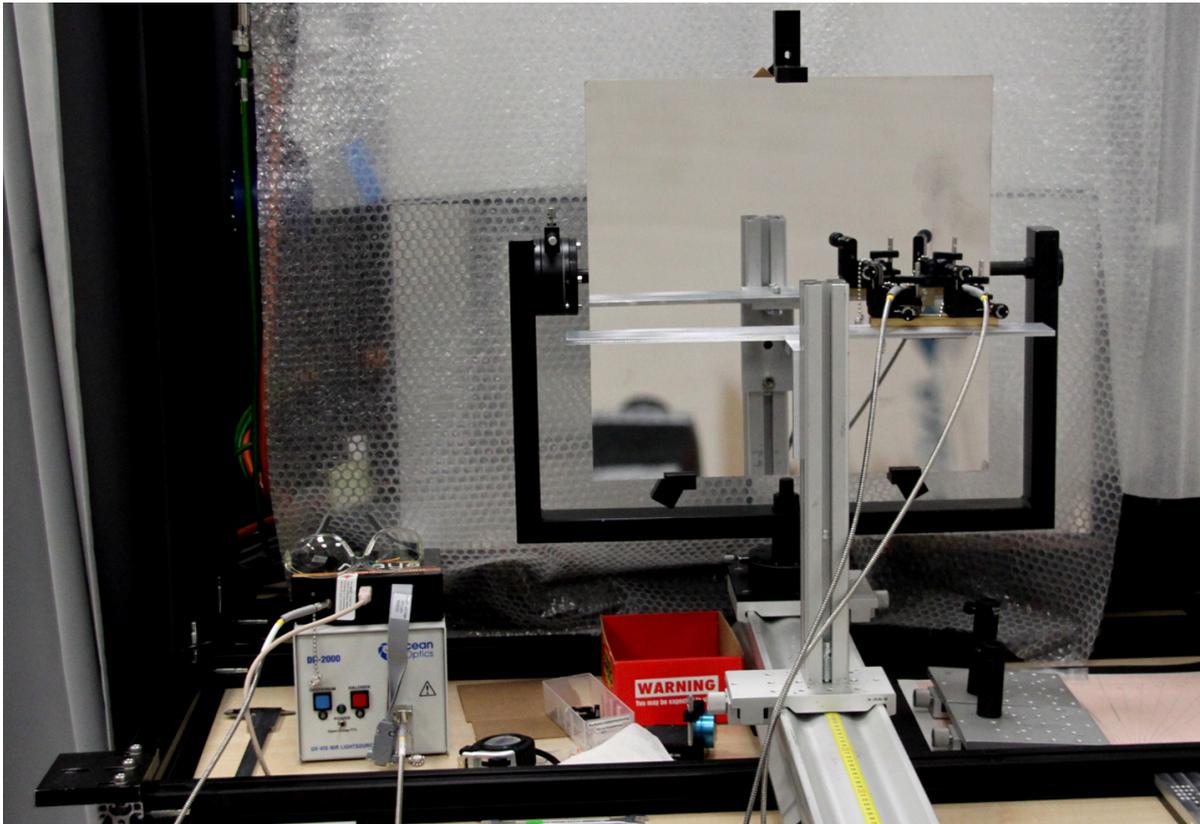


Abbildung 3.3: Der Versuchsaufbau: In der Mitte hinten befindet sich der Testspiegel, davor die Säule mit dem Aufbau, auf dem die Lichtleiterenden befestigt sind. Sowohl der Testspiegel als auch die Säule mit Lichtfaseraufbau sind auf eine Schiene montiert, an der ein Maßband angebracht ist, um Abstände zu vermessen. Links unten befinden sich die Lichtquelle und darauf das Spektrometer (schwarz).

verstellbare V-Klemmen von Thorlabs bestellt. Außerdem wurde eine Grundplatte in Auftrag gegeben, auf der die Klemmen direkt oder auf Stelzen befestigt werden können. Der ganze Aufbau mit Musterspiegel, Lichtleitern und Klemmen ist auf einer Schiene montiert, wobei der Musterspiegel fest steht und die Fasern parallel zu seiner optischen Achse verfahrbar sind.

Die ersten Messungen wurden nur an einem Punkt des Spiegels vorgenommen (in der Mitte des Spiegels). Da aber letztlich die Spiegel an mehreren Punkten (hier 16) vermessen werden, musste noch ein geeigneter Aufbau entwickelt werden, mit dem diese 16 Punkte angefahren werden konnten. Es stand zuerst die Frage im Raum, ob es notwendig ist, mit den Fasern dem Verlauf der Spiegelkrümmung zu folgen. Wäre dies nicht erforderlich, so würde es den Aufwand des Aufbaus erheblich verringern. Um dies zu testen, wurde eine Messreihe von einigen Punkten zwischen Spiegelmitte und unterem Spiegelrand durchgeführt, und die Veränderung der Intensität und des Spektrums beobachtet und analysiert. Dafür wurden die Fasern in der Mitte des Spiegels so zueinander eingestellt,

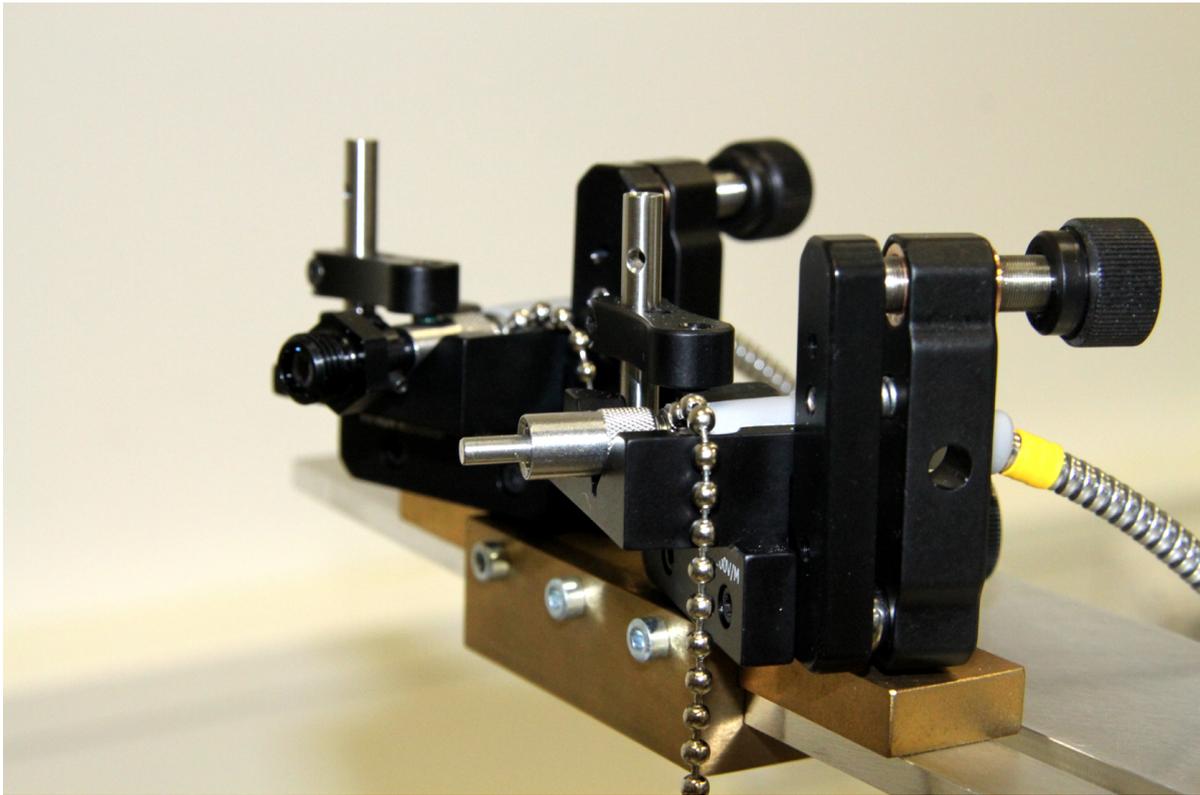


Abbildung 3.4: Die in V-Klemmen befestigten Lichtleiterenden. Die vordere ist die kollektierende, die hintere die emittierende Faser. Zu sehen ist die auf letztere montierte Kollimationslinse (schwarz).

dass das Intensitätsmaximum erreicht war. Dann wurde der Aufbau nach unten verfahren, ohne der Krümmung zu folgen. Schon nach halbem Verfahrensweg zwischen Spiegelmitte und -rand traf der Lichtkegel die kollektierende Faser nicht mehr. Somit war gezeigt, dass der Krümmung der Spiegel unbedingt gefolgt werden muss. Es wurden daher technische Zeichnungen für einen Aufbau angefertigt (Abb. 3.5) und der hauseigenen Werkstatt in Auftrag gegeben, auf dem die Fasern samt Klemmen befestigt werden und in beiden Richtungen dem Spiegelradius folgen können.

3.3 Vorbereitende Messungen

Da der kollimierte Strahl, wie oben erwähnt, nicht ganz parallel verläuft, erhält man eine abstandsabhängige Intensität. Die später durchgeführten unterschiedlichen Messungen wurden bei verschieden großen Abständen zwischen emittierender und kollimierender Faser gemacht. Um die Messwerte miteinander vergleichen zu können, müssen sie auf den Abstand normiert werden. Man erwartet hier eine $1/r^2$ -Abhängigkeit. Um dies zu überprüfen, wurde eine Messreihe durchgeführt, in deren Verlauf die Intensität bei einer Wellenlänge von 550 nm für jeden neuen Abstand gemessen wurde. Die so erhaltenen Daten zeigen die erwartete $1/r^2$ -Abhängigkeit (siehe gefittete Kurve in Abb. 3.6 a)). Des

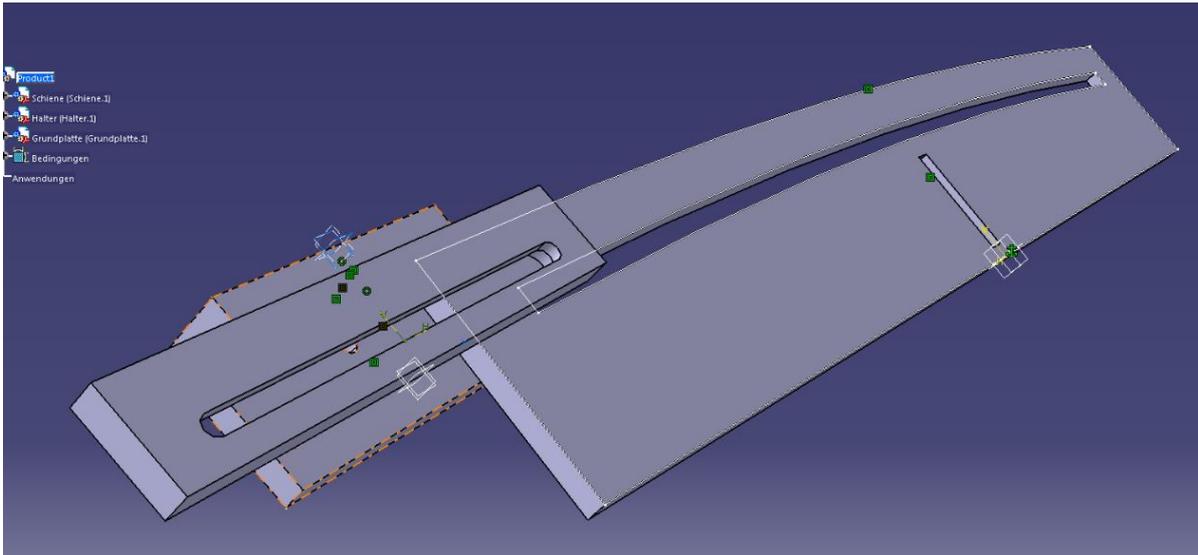


Abbildung 3.5: Technische Zeichnung der Schiene (mit gekrümmter Flanke) und der Grundplatte, auf der die Faserhalter befestigt werden, sowie eines Verbindungsstücks.

Weiteren wurde auch die lineare Abhängigkeit der Intensität von der Integrationszeit verifiziert (Abb. 3.6 b)), da für unterschiedliche Intensitäten die Integrationszeit jeweils angepasst wurde, um eine möglichst hohe Lichtausbeute zu erhalten. Somit konnten alle späteren Messungen unabhängig von den Abständen der Fasern und Integrationszeiten miteinander verglichen werden.

Da Streulicht und Rauschen des Sensors die Messdaten beeinflussen können, wurde bei jeder Messung mindestens eine „Dunkelmessung“ aufgenommen, die bei der Auswertung von den Messwerten subtrahiert wurde. Um das Labor nicht vollkommen abdunkeln zu müssen und so besser arbeiten zu können, wurde der Einfluss der Deckenbeleuchtung auf die Messung überprüft. Dafür wurden drei Messungen aufgenommen: eine mit ausgeschalteter Deckenbeleuchtung und jeweils eine bei minimaler und maximaler Deckenbeleuchtung. Die emittierende Faser war währenddessen ausgeschaltet. In Abbildung ?? ist deutlich der starke Anstieg der Intensität bei maximaler Beleuchtung zu sehen, wohingegen sich die Intensitäten des Rauschens bei ausgeschalteter und minimaler Beleuchtung nicht sichtbar unterscheiden. Daher konnten die Deckenlampen bei den weiteren Messungen auf minimaler Stufe betrieben werden.

Bei ersten Messungen fiel weiterhin auf, dass die Intensität des Strahls bei kleinen Abständen (< 40 mm) mit zunehmendem Abstand größer wurde und dann ab einer bestimmten Distanz wieder abfiel. Dies ließ darauf schließen, dass der aus der Kollimatorlinse austretende Strahl leicht gebündelt wird, in einem bestimmten Punkt einen minimalen Durchmesser erreicht und ab dort divergent verläuft. Laut Entwicklern bei Ocean Optics kann es durchaus sein, dass der Strahl nicht einwandfrei parallel verläuft [26]. Um die Lage des Punkts minimalen Strahldurchmessers zu ermitteln, wurde die Intensität in Abhängigkeit des Abstandes beider Fasern aufgenommen. Bei einer Distanz

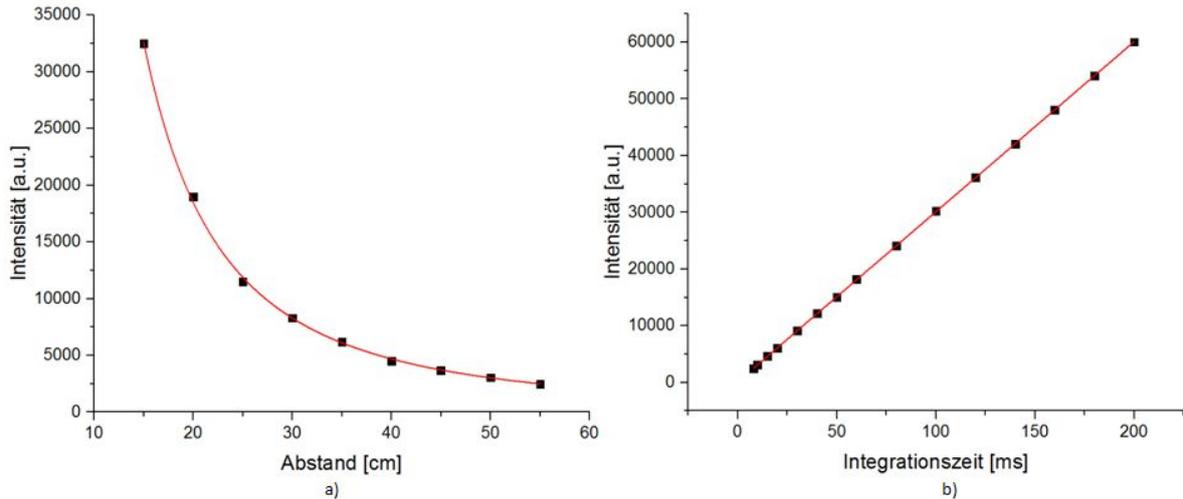


Abbildung 3.6: a) Intensität bei 550 nm in Abhängigkeit des Abstandes zwischen emittierender und kollektierender Faser. Die mit einer Funktion $y = ax^b$ gefitteten Messpunkte bestätigen das quadratische Abfallen ($b = -1,977$) der Intensität mit zunehmendem Abstand; b) Abhängigkeit der Intensität von Integrationszeit. Die Messpunkte zeigen einen linearen Zusammenhang.

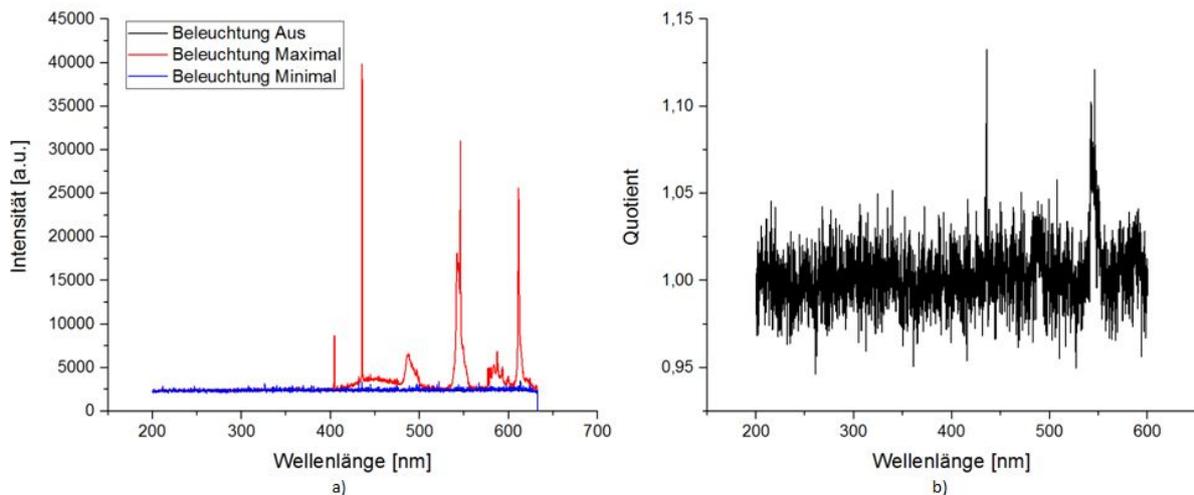


Abbildung 3.7: a) Vergleich des Streulichtes und Rauschens bei maximaler, minimaler und ausgeschalteter Deckenbeleuchtung; b) Verhältnis der Intensitäten von minimaler zu ausgeschalteter Deckenbeleuchtung.

von 40 mm war das Maximum erreicht.

Ein weiterer Parameter, den es zu beachten gilt, ist die Intensität in Abhängigkeit der Brenndauer der Lampen. In der Bedienungsanleitung von Ocean Optics wird empfohlen, die Glühlampen 15 bis 25 Minuten vor den Messungen warmlaufen zu lassen [27]. Um die

Veränderung der Leistung über einen längeren Zeitraum zu erfassen, wurde eine Messreihe durchgeführt, in deren Verlauf in verschiedenen Zeitabständen das Emissionsspektrum der Deuteriumlampe gemessen und über alle Wellenlängen integriert wurde. Wie in Abbildung 3.8 zu sehen, beträgt der Unterschied zwischen der Messung nach 30 und nach 75 Minuten noch 2,5%. Daher wurde entschieden, die Vorheizzeit auf mindestens 75 Minuten zu erhöhen. Die Schwankung zwischen der 75. und der 180. Minute (hier lokales Minimum) beträgt etwa 0,7%.

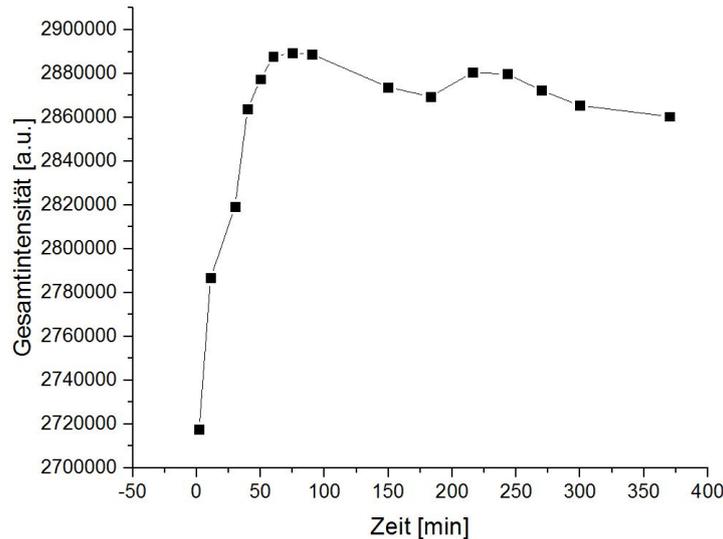


Abbildung 3.8: Verlauf des über alle Wellenlängen integrierten Emissionsspektrums mit Brenndauer der Deuteriumlampe.

3.4 Reflektivitätsmessungen

Um die absolute Reflektivität der Detektorspiegel zu ermitteln, muss die Intensität I_{Det} des an diesem Spiegel reflektierten Lichtstrahls mit der Intensität I_{dir} des direkt aus der Faser austretenden Strahls verglichen werden. Das Problem hierbei ist, dass der Messaufbau für beide Messtypen umgebaut und neu justiert werden muss, da sich bei der direkten Messung beide Fasern gegenüberstehen, während sie sich bei der Messung über den Detektorspiegel nebeneinander befinden.

Ein weiterer Ansatz ist, die über den Detektorspiegel reflektierte Intensität mit der über einen Referenzspiegel (hier STAN-SSH von Ocean Optics) gemessenen Intensität I_{Ref} , dessen Reflektionswerte bekannt sind, zu vergleichen und dadurch auf die absolute Reflektivität zu schließen. Hierbei muss der Aufbau nicht neu justiert, sondern nur in der Höhe verstellt werden, was den Messvorgang erheblich erleichtert. Um nun Aussagen über die Zuverlässigkeit der Reflektivitätsmessungen machen zu können, wurde die über den Referenzspiegel gemessene Intensität mit der direkt gemessenen verglichen und die so ermittelte Reflektivität mit den Daten des Herstellers verglichen. Die folgenden Messreihen bestanden somit sowohl aus den Messungen über den Detektor- als auch den

Referenzspiegel sowie aus der direkten Messung.

Für die Messungen wurden, um eine möglichst hohe Intensität für alle Wellenlängen zu erhalten, sowohl die Deuterium- als auch die Halogenlampe eingeschaltet. Es stellte sich zu Beginn heraus, dass das Intensitätsspektrum im Bereich kleiner Abstände von der emittierenden Faser (< 50 mm) sehr empfindlich auf Abstandsänderungen reagiert (Näheres in Abschnitt 3.5), und zusätzlich das Spektrometer in diesem Bereich in Sättigung lief (minimale Integrationszeit von 7,2 ms erreicht). Bei einer effektiven Strahllänge von etwa 160 mm hingegen beeinflussen Messfehler, die beim Ermitteln der Strahllänge entstehen, das Ergebnis kaum. Außerdem ist das Spektrometer bei diesem Abstand genügend weit von der Sättigung entfernt und die Justierung kann für die verschiedenen Messoptionen stabil durchgeführt werden.

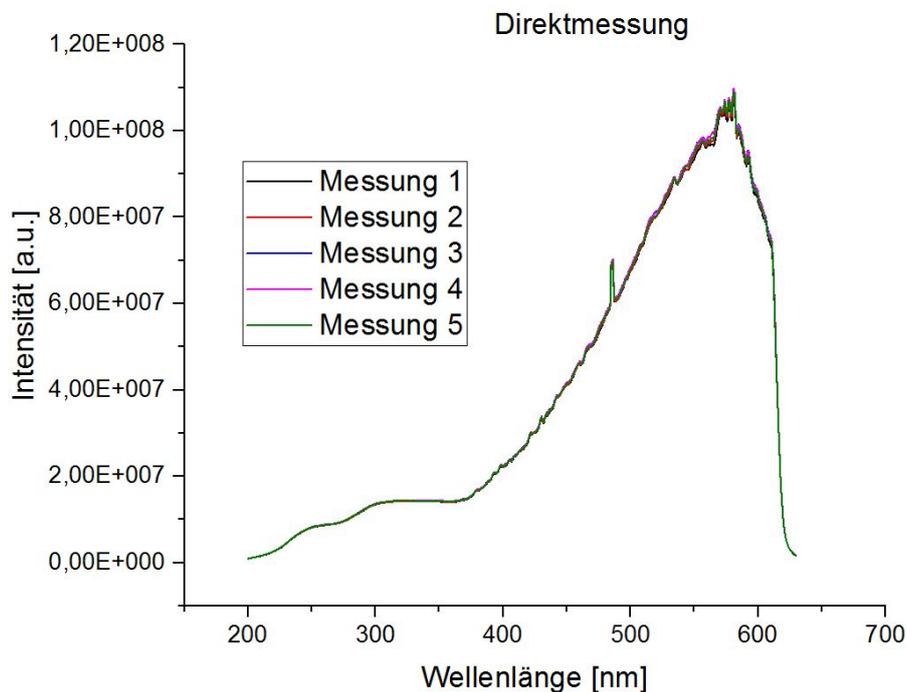


Abbildung 3.9: Die fünf Einzelmessungen der ersten Messreihe. Gemessen wurde direkt von emittierender zu kollektierender Faser bei einem Abstand von etwa 160 mm.

Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, wurden mehrere (fünf) Messreihen durchgeführt (jeweils für die direkte Messung als auch für die Reflektionsmessungen beider Spiegel), zwischen denen der komplette Messaufbau ab- und wieder aufgebaut wurde. Jede der fünf Messreihen bestand aus fünf Einzelmessungen, zwischen denen der Faser-Faser- bzw. Faser-Spiegel-Abstand neu eingestellt und die Fasern über die Justierschrauben jeweils so zueinander ausgerichtet wurden, dass das Intensitätsmaximum erreicht war und das Spektrum der nächsten Messung aufgenommen werden konnte. Der Mittelwert jeder Messreihe bestand aus diesen fünf Einzelmessungen. Das Endergebnis besteht aus

den Mittelwerten dieser fünf Messreihen.

Wie schon erwähnt, sollte die effektive Strahllänge etwa 160 mm betragen. Auf der Schiene, auf der die Schlitten mit den Fasern verfahren, ist eine Millimeterskala angebracht, wodurch die Abstände in Strahlrichtung gut vermessen werden können. Bei Reflektivitätsmessungen über die Spiegel musste zusätzlich der Faserabstand mit einem Messschieber vermessen werden. Dieser betrug etwa 45 bis 50 mm, der Abstand zwischen Fasern und Spiegel etwa 75 mm. Eine Messreihe wurde immer mit der Direktmessung begonnen, da das Intensitätsmaximum bei dieser Messung am einfachsten einzustellen ist. Nach diesem Intensitätsspektrum konnte sich dann bei den Spiegelmessungen gerichtet werden.

Beispielhaft ist in Abbildung 3.9 die erste Messreihe der Direktmessung, bestehend aus fünf Einzelmessungen, zu sehen. Sehr ähnlich sehen auch die Ergebnisse der Messungen über den Referenz- sowie den Detektorspiegel aus. Interessant ist die Abweichung der einzelnen Messwerte vom Mittelwert. In den Abbildungen 3.10 bis 3.12 ist die relative Abweichung der Messwerte vom Mittelwert zu sehen. Diese Ergebnisse beziehen sich alle auf die erste Messreihe. Die relativen Abweichungen der vier weiteren Messreihen gleichen der der ersten. Die systematische Unsicherheit in der exakten Justierung beläuft sich also auf etwa $\pm 1\%$.

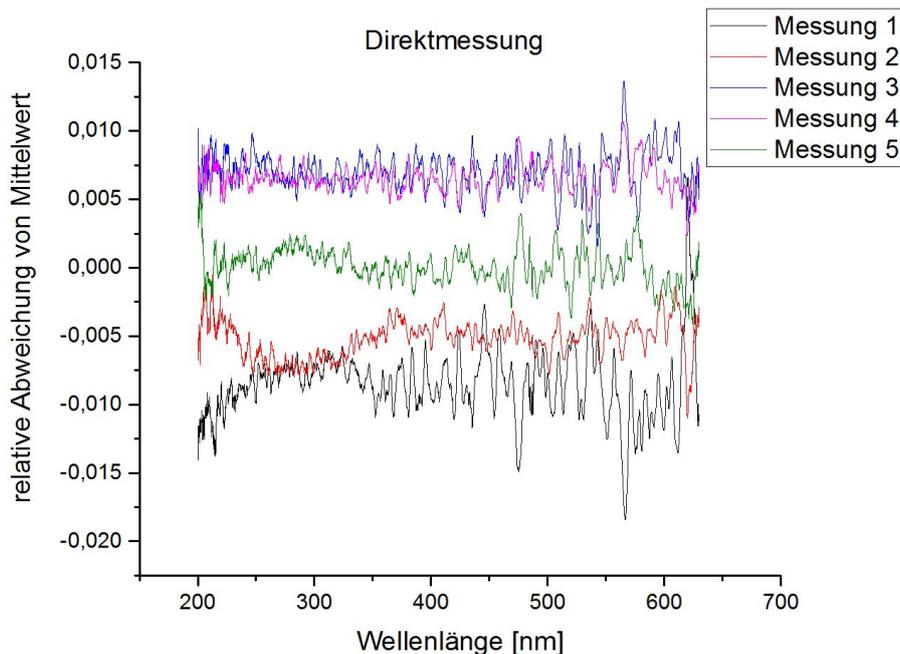


Abbildung 3.10: Relative Abweichung der Einzelmessungen vom Mittelwert der fünf Messungen. Gemessen wurde direkt von emittierender zu kollektierender Faser bei einem Abstand von etwa 160 mm.

3 Entwicklung einer Messvorrichtung für Reflektivitätsmessungen der CBM RICH-Spiegel

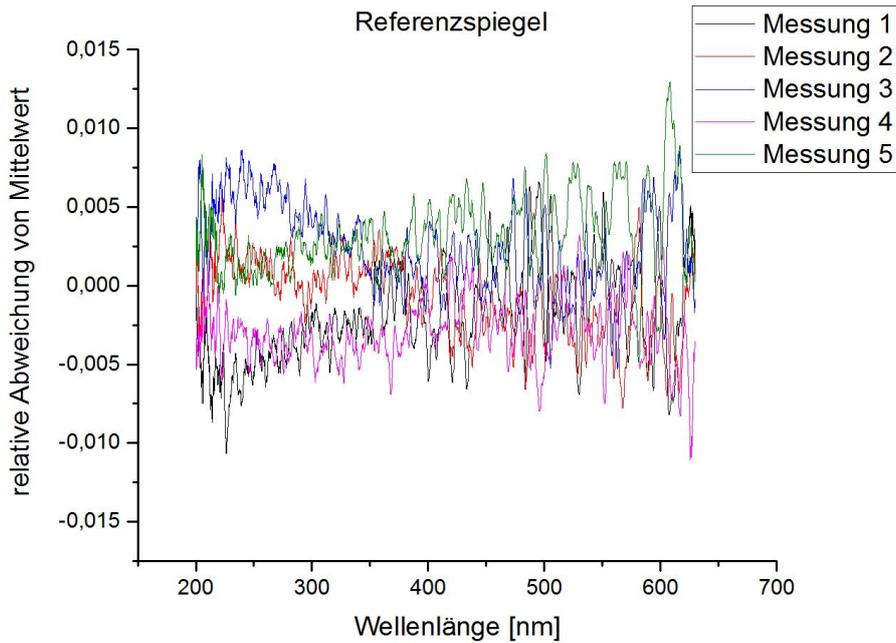


Abbildung 3.11: Relative Abweichung der Einzelmessungen vom Mittelwert der fünf Messungen am Referenzspiegel bei einer effektiven Strahllänge von etwa 160 mm.

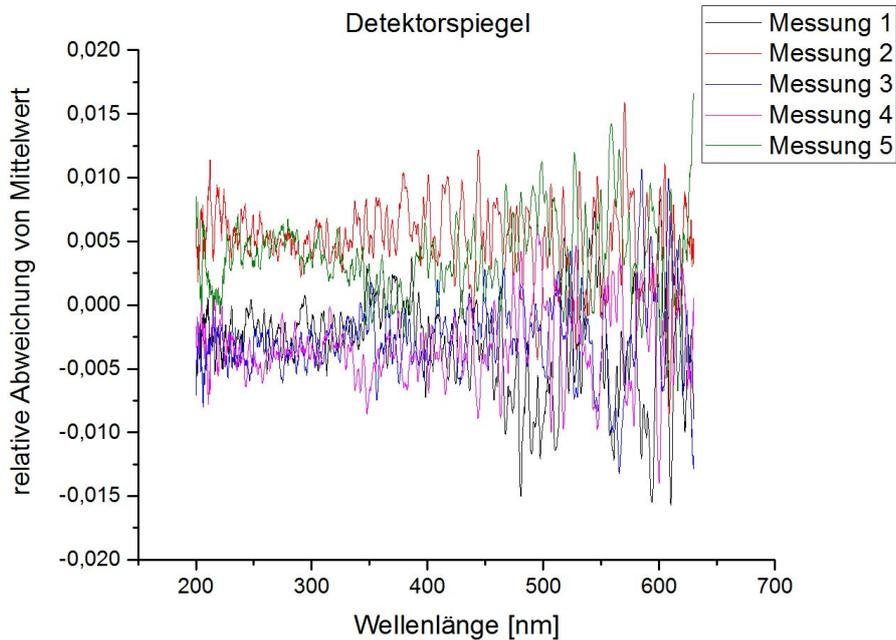


Abbildung 3.12: Relative Abweichung der Einzelmessungen vom Mittelwert der fünf Messungen am Detektorspiegel bei einer effektiven Strahllänge von etwa 160 mm.

Wie bei den einzelnen Messreihen wurde der Mittelwert aller fünf Messreihen auch errechnet. Die relativen Abweichungen der verschiedenen Messreihen sind dabei in den Abbildungen 3.13 bis 3.15 zu sehen. Hierbei weichen die Ergebnisse der Messreihen je nach Wellenlängenbereich zwischen $\pm 2\%$ und $\pm 6\%$ vom gesamten Mittelwert ab. Es fällt dabei auf, dass die größten Abweichungen von $\pm 6\%$ im Bereich von 200 - 250 nm zu finden sind. Der durch die Einstellung des Lichtwegs und Justierung der Messung entstehende Fehler muss also wellenlängenabhängig berücksichtigt werden.

Das Ergebnis der Mittelwerte der Verhältnisse, die sich aus den einzelnen Messreihen ergeben, ist in Abbildung 3.16 zu sehen. Dabei steht beispielsweise die Kurve " I_{Ref}/I_{dir} " für das Verhältnis der Intensitäten gemessen über der Reflektion am Referenzspiegel zur Intensität aus der Direktmessung. Analog gilt dies für die anderen Verhältnisse.

Um abzuschätzen, wie groß der Fehler dieser Relationen ist, wurden die Verhältnisse jeder einzelnen Messreihe berechnet und diese Werte hernach wieder gemittelt. Aus der Abweichung der unterschiedlichen Verhältnisse vom Mittelwert wurden die Fehler bestimmt. Die eben beschriebenen Abweichungen sind in den Abbildungen 3.17 bis 3.19 zu sehen und betragen etwa $\pm 3\%$ ohne starke Wellenlängenabhängigkeit.

Abbildung 3.20 zeigt den Vergleich der gemessenen Reflektivität des Referenzspiegels (mit $\pm 3\%$ -Fehlerbalken) mit den von Ocean Optics bereitgestellten Daten. Leider gibt Ocean Optics erst Werte ab 250 nm an, obwohl der Spiegel bis 200 nm spezifiziert ist. Die Übereinstimmung zu den Werten von Ocean Optics ist sehr gut und alle Abweichungen liegen innerhalb der Fehlerbalken. Diese Messung verifiziert damit den Aufbau und die etablierte Messprozedur.

Abbildung 3.21 zeigt die gemessene Reflektivität des Detektorspiegels im Vergleich zu der mit den von Ocean Optics bereitgestellten Werten gewichteten Reflektivität. Um die letztendliche Reflektivität des Detektorspiegels zu erhalten wurde wie folgt gewichtet:

$$R_{Det} = \frac{R_{Ref,OceanOptics}}{R_{Ref,gemessen}} R_{Det,gemessen}.$$

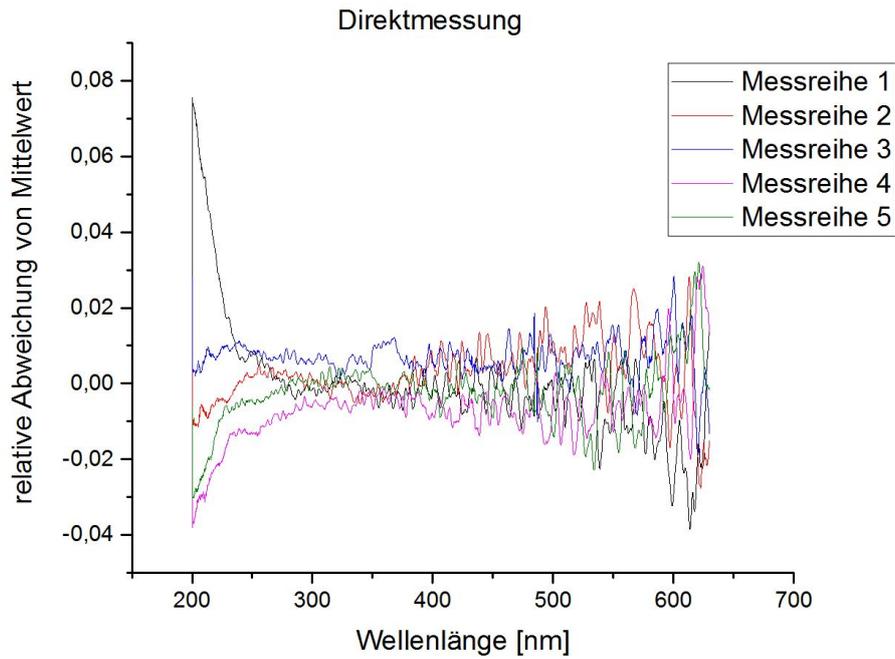


Abbildung 3.13: Relative Abweichung der Messreihen vom Mittelwert für die Direktmessung.

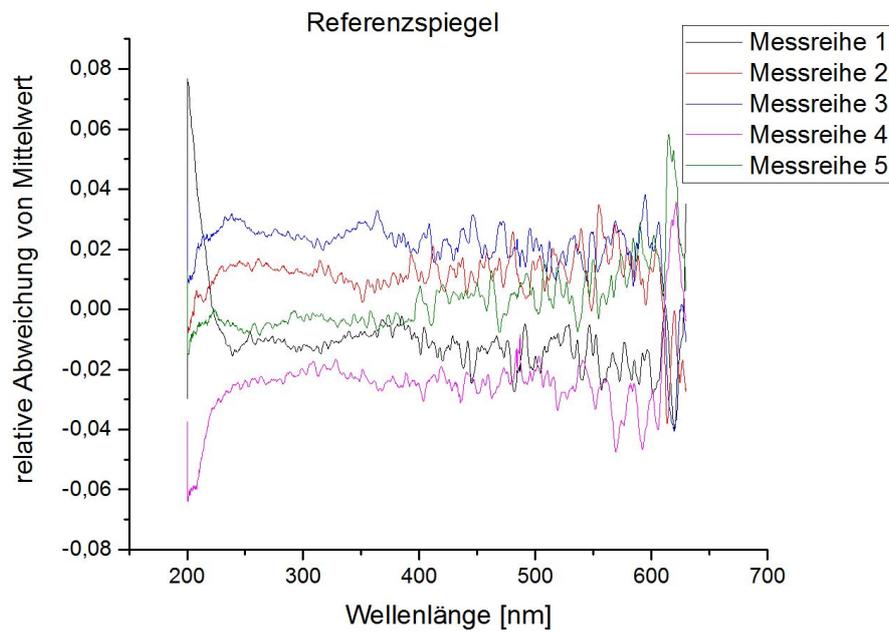


Abbildung 3.14: Relative Abweichung der Messreihen vom Mittelwert für den Referenzspiegel.

3 Entwicklung einer Messvorrichtung für Reflektivitätsmessungen der CBM RICH-Spiegel

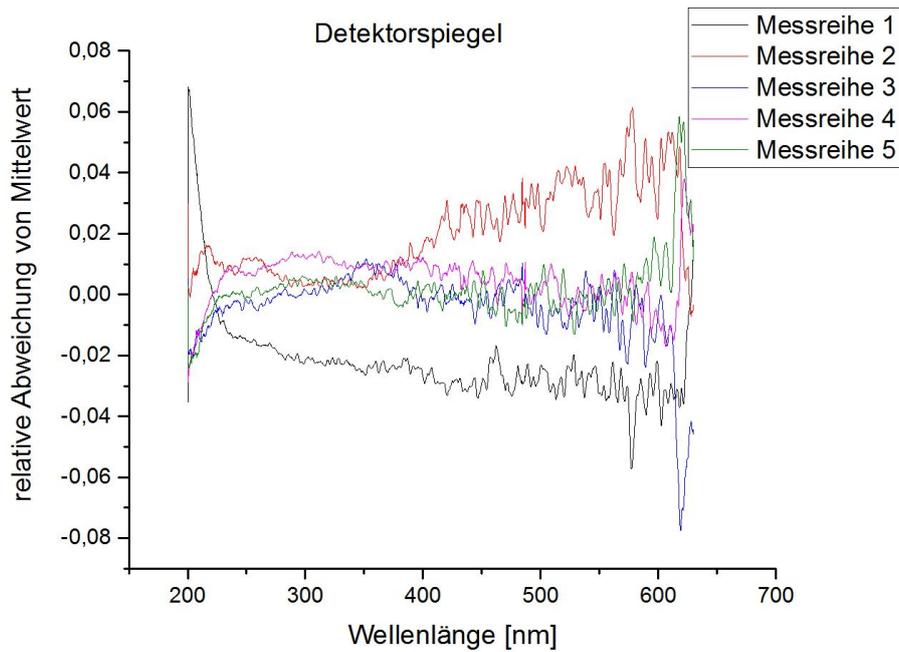


Abbildung 3.15: Relative Abweichung der Messreihen vom Mittelwert für den Detektorspiegel.

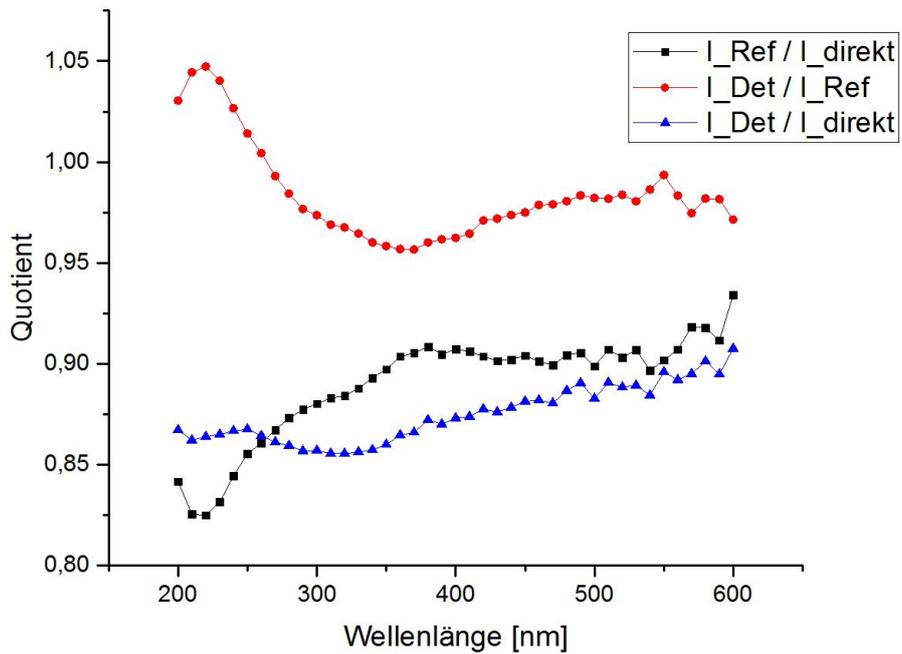


Abbildung 3.16: Aus den Mittelwerten der Messreihen berechnete Verhältnisse.

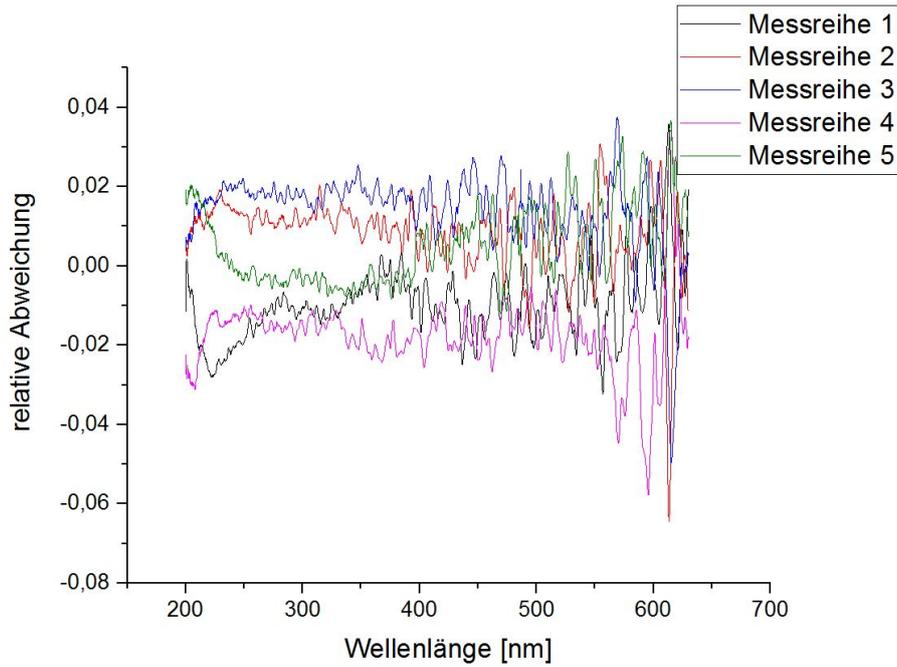


Abbildung 3.17: Relative Abweichung des Verhältnisses der Intensität gemessen über den Referenzspiegel zur Intensität aus der Direktmessung (I_{Ref}/I_{dir}) aus den fünf Messreihen.

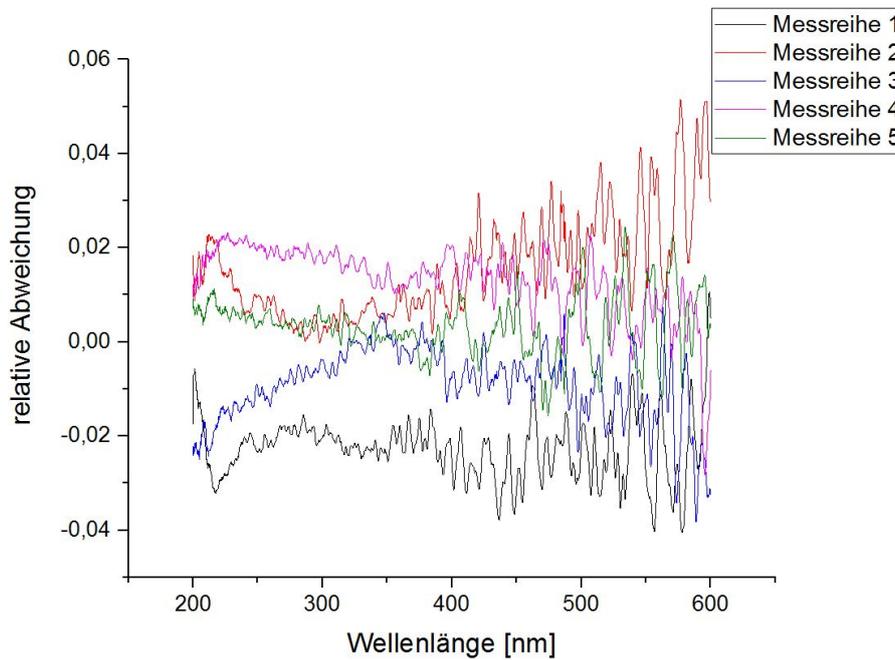


Abbildung 3.18: Relative Abweichung des Verhältnisses der Intensität gemessen über den Detektorspiegel zur Intensität aus der Direktmessung (I_{Det}/I_{dir}) aus den fünf Messreihen.

3 Entwicklung einer Messvorrichtung für Reflektivitätsmessungen der CBM RICH-Spiegel

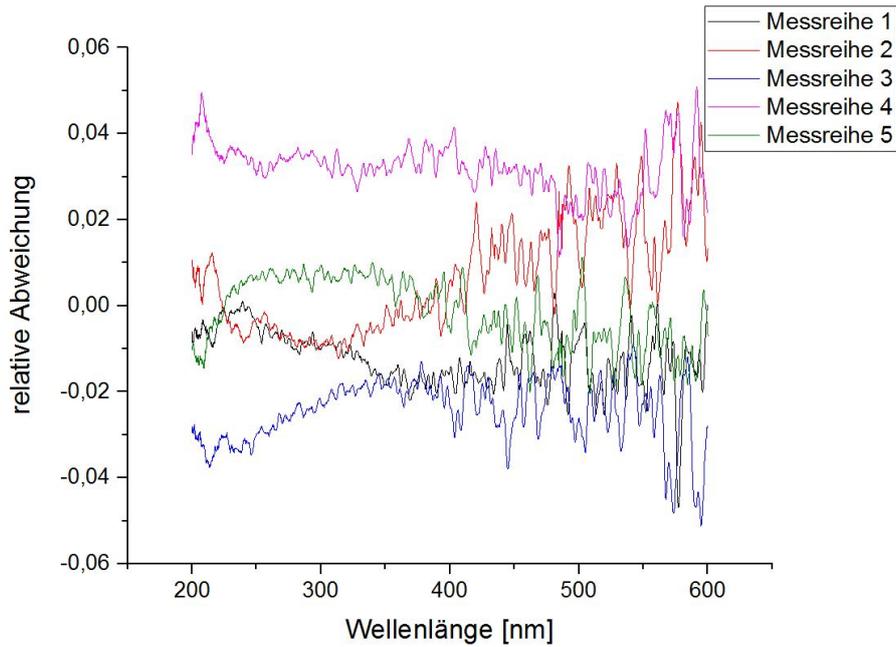


Abbildung 3.19: Relative Abweichung des Verhältnisses der Intensität des Detektor- zur Intensität des Referenzspiegels.

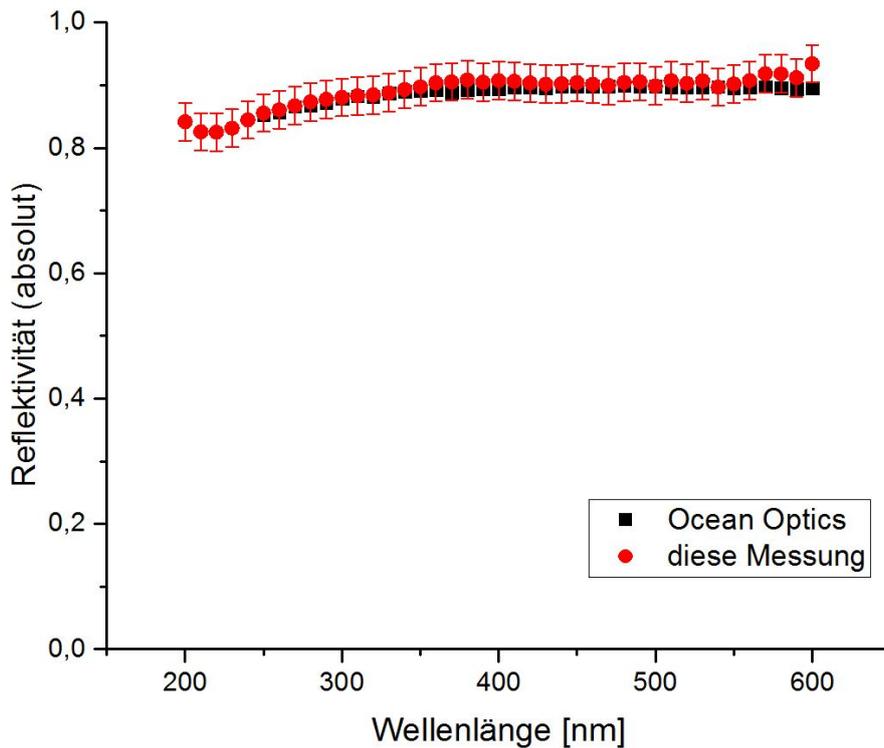


Abbildung 3.20: Vergleich der gemessenen Reflektivität des Referenzspiegels mit den Reflektivitätswerten von Ocean Optics ab 250 nm [28].

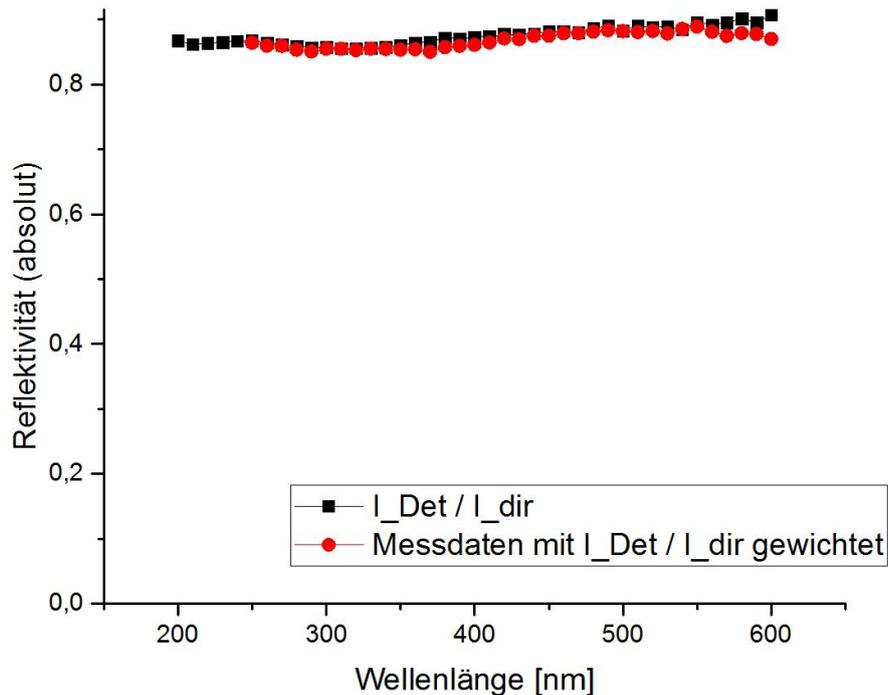


Abbildung 3.21: Gemessene Reflektivität des Testspiegels mit Gewichtung aus vorigem Graphen im Vergleich zur ungewichteten Reflektivität. Da Ocean Optics die Reflektivitätswerte erst ab 250 nm angibt, erfolgt der Vergleich hier auch erst ab 250 nm.

Ein Vergleich mit vorliegenden Daten früherer Reflektivitätsmessungen der Universität Wuppertal ist in Abbildung 3.22 zu sehen. Dabei ist eine große Übereinstimmung beider Ergebnisse erkennbar.

Nachdem nun die beschriebenen Ergebnisse vorlagen, konnten erstmals Messungen an mehreren Stellen des Testspiegels durchgeführt werden. Bis zur Fertigstellung dieser Arbeit war der mechanische Aufbau für die später durchzuführenden Messungen noch nicht vollständig gefertigt. Die Konstruktion mit den Lichtleitern konnte bis zu diesem Zeitpunkt lediglich horizontal verfahren werden und somit war es nur möglich, vier der sechzehn Punkte anzufahren. Die Rastpunkte wurden hierbei von links nach rechts mit Position 1 bis 4 benannt. Es wurden drei Messreihen aufgenommen, bei denen jeweils alle Positionen nacheinander angefahren und deren Intensität vermessen wurde. Die gemittelten Ergebnisse sind in Abbildung 3.23 zu sehen. Die Abweichungen vom Mittelwert der Intensitäten pro Messposition betragen etwa $\pm 1,5\%$.

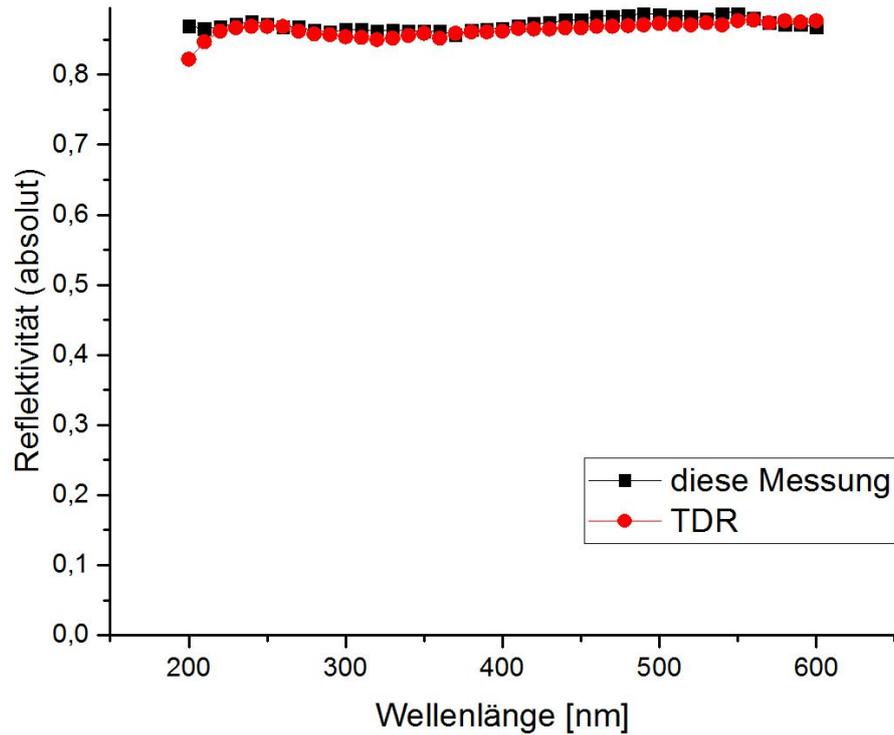


Abbildung 3.22: Vergleich der Reflektivitätswerte gemessen an der Universität Wuppertal mit dem gewichteten Ergebnis der in dieser Arbeit entstandenen Werte [29]. Die Werte unterhalb von 250 nm sind nicht gewichtet, da von Ocean Optics in diesem Bereich keine Daten zur Verfügung stehen.

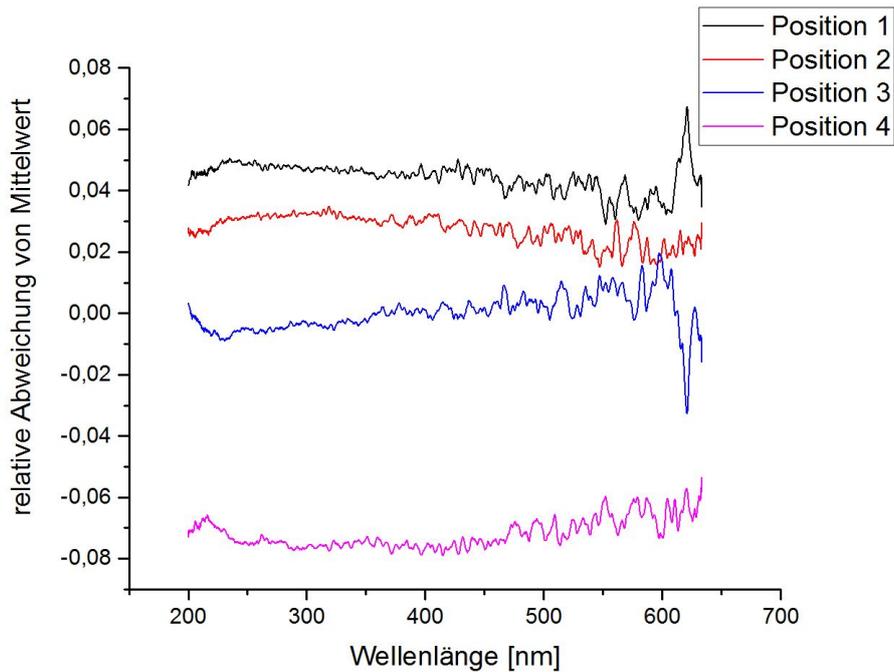


Abbildung 3.23: Relative Abweichung der Intensitäten vom Mittelwert für alle vier Messpunkte.

3.5 Probleme und deren Lösungen

3.5.1 Abstands- und Winkelabhängigkeit des Intensitätsverlaufs

Die ersten Messungen, die zum Erforschen der Strahleigenschaften gemacht wurden, geschahen bei kleinen Distanzen (bis etwa 40 mm Abstand) zwischen beiden sich direkt gegenüber befindlichen Fasern. Beabsichtigt war hierbei, eine möglichst hohe Intensität zu erlangen. Es zeichnete sich jedoch sehr schnell ab, dass das Spektrum bei geringen Abständen sehr empfindlich auf Längenänderungen reagierte. Das eigentliche Problem dabei ist, dass sich nicht nur die Intensität ändert (dies hätte durch Abstandsnormierung korrigiert werden können), sondern insbesondere die Wellenlängenabhängigkeit der Intensität. Weiterhin wurde festgestellt, dass der Intensitätsverlauf bei kleinen Abständen auch vom Winkel der Fasern zueinander abhängig ist. In Abbildung 3.24 ist der Unterschied der Intensitätsverteilung für die Abstände 35 und 40 mm zu sehen. In letzterem Fall ist bei etwa 300 nm eine „Schulter“ zu sehen, die bei einem Abstand von 35 mm noch nicht auftaucht. Unter diesen Umständen ist es fast unmöglich, Reflektivitätseigenschaften zu untersuchen.

In Abschnitt 3.3 wurde schon erwähnt, dass der Strahl nach der Kollimatorlinse nicht exakt parallel verläuft, sondern einen Öffnungswinkel von ca. $1,5^\circ$ besitzt. Dabei verläuft er nach dem Kollimator nicht divergent sondern leicht gebündelt und weitet sich erst nach einem Punkt minimalen Strahldurchmessers auf. Der minimale Strahldurchmesser wurde bei einem Abstand von 40 mm gemessen. In diesem Bereich läuft das Spektrometer in Sättigung (die Mindestintegrationszeit von 7,2 ms ist für diese Intensität immer noch

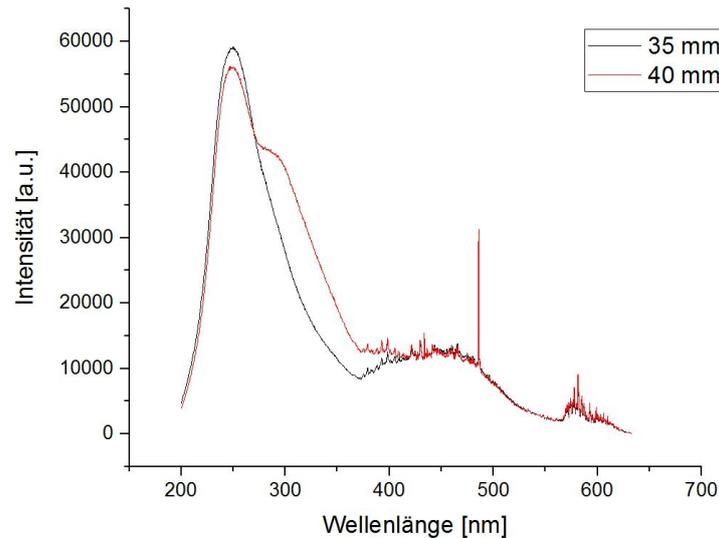


Abbildung 3.24: Abhängigkeit des Spektrums vom Abstand beider Fasern zueinander.

zu groß).

Es zeigte sich, dass der Intensitätsverlauf umso stabiler wurde, je größer der Abstand der Fasern war. Außerdem gilt bei Abständen ab ca. 80 mm die $1/r^2$ -Abhängigkeit sehr gut und kleine Abstandsänderungen lassen sich gut korrigieren. Eine Distanz von etwa 160 mm scheint optimal zu sein, sodass für die Messungen dieser Abstand eingestellt wurde.

3.5.2 Weitere Einflussgrößen

Desweiteren ist bei den Messungen auf weitere Einflussgrößen zu achten:

Das Pendeln der Lichtfasern nach Verschieben dieser beeinflusst die Intensität besonders im Bereich von etwa 500 bis 600 nm. Dies macht sich durch ein „Schwanken“ des Intensitätsverlaufs in diesem Bereich bemerkbar. Um möglichst präzise und reproduzierbare Aussagen machen zu können, ist daher bei Messungen darauf zu achten, die Fasern zuerst zum Stillstand kommen zu lassen.

Wie bereits erwähnt, ist es wichtig, eine Vorheizzeit von 75 Minuten einzuhalten. Die verwendete Lichtquelle besitzt einen Hauptschalter sowie jeweils einen Schalter für die Halogen- und die Deuteriumlampe. Bei den ersten Messungen wurde fälschlicherweise angenommen, dass bei Betätigen des Hauptschalters die Lampen automatisch gezündet würden (da das Lüftergeräusch zu hören war) und man mit den weiteren Schaltern nur einen Shutter öffnete, der das Licht durchließe. Somit wurde zum Vorheizen nur der Hauptschalter betätigt. Diese Annahme ist jedoch nicht richtig. Der Hauptschalter stellt nur die Spannungsversorgung her und erst das Betätigen der für jede Quelle eigenen Schalter zündet diese Lampen. Wie aus Abbildung 3.8 zu errechnen, unterscheidet sich die Gesamtintensität zwischen zweiter und 75. Minute um 9,4%. Es war also bei der ersten Messreihe effektiv keine Vorheizzeit gegeben und die dort auftretenden großen Fehler (siehe unten) lassen sich größtenteils hierauf zurückführen.

Bei Durchführung der einzelnen Messreihen wurde als erste Messung die Direktmessung gewählt. Der Grund dafür ist, dass das Finden des Intensitätsmaximums bei diesem Aufbau viel einfacher ist als bei den Spiegelmessungen. Bei letzteren kann es vorkommen, dass nur ein lokales Maximum gefunden wird. Im schlimmsten Fall fällt dies nicht auf, bis bei der folgenden Auswertung der Vergleich der Intensitäten diesen Irrtum zum Vorschein bringt. Daher ist es eine Hilfe, den Intensitätsverlauf der Messungen über den Spiegel direkt mit der der Direktmessung zu vergleichen. Die verwendete Software *OceanView* erlaubt es, frühere Messungen aufzurufen und gleichzeitig die aktuelle Intensität anzeigen zu lassen.

Schließlich gibt es noch einen Punkt zu beachten: Die Einstellung der Fasern zueinander, bei der das Intensitätsmaximum erreicht ist, unterscheidet sich für kleine und große Wellenlängen minimal. Das heißt, dass z.B. für die Faserstellung, in der der UV-Bereich im Maximum ist, nicht auch der rote Bereich im Maximum liegt. Daher benötigt man zum Einstellen der Intensität einen Referenzpunkt, also das Maximum für eine bestimmte Wellenlänge. Für diese wurde 380 nm gewählt, da in diesem Bereich ein großer Überlapp von Deuterium- und Halogenlampe besteht.

Bei den vor Nichtbeachtung der in diesem Unterkapitel beschriebenen Einflüsse durchgeführten ersten Messungen ergaben sich Unterschiede von teils $\pm 10\%$. Diese konnten, vor allem nach Beachten der Vorheizzeit der Lichtquelle, deutlich reduziert werden.

4 Zusammenfassung

Im Zuge der Arbeit entstand der beschriebene Messaufbau für Reflektivitätsmessungen der Spiegel des CBM RICH-Detektors. Gab es zu Beginn noch einige Schwierigkeiten, insbesondere mit fast willkürlich erscheinenden Ergebnissen, so hatte sich im Verlauf der Arbeit und mit zunehmender Erfahrung sowie einer detaillierten Analyse der systematischen Fehler doch eine Messprozedur etabliert, die es ermöglicht, zuverlässige und reproduzierbare Ergebnisse mit kleinem Fehler zu erhalten. Auch die Ergebnisse, die aus dem Vergleich der gemessenen Werte für die Reflektivität des Referenzspiegels mit den von Ocean Optics gelieferten Werten stammen, zeigen die Zuverlässigkeit des Messaufbaus. Eventuell könnte ein Referenzspiegel eines anderen Herstellers bestellt werden, für den Reflektivitätswerte bis 200 nm zur Verfügung stehen.

Dadurch, dass ein Teil des in Auftrag gegebenen Aufbaus schon vor Abschluss der Arbeit fertiggestellt war, konnten erste Messungen an verschiedenen Punkten des Testspiegels durchgeführt und unterschiedliche Reflektivitäten innerhalb des Spiegels sichtbar gemacht werden.

Für den späteren Aufbau des CBM RICH-Detektors werden alle 80 Spiegel vermessen werden. Dabei steht die Frage im Raum, ob sich eine Automatisierung lohnt. Nimmt man pro Spiegel eine realistische Messzeit von etwa einer Stunde an, so scheint der Aufwand für eine Automatisierung zu groß zu sein, um es für diese kleine Anzahl an Spiegeln umzusetzen.

Dem Anhang ist eine stichwortartige Anleitung zur Reflektivitätsmessung beigefügt. Diese dient vor allem als Hilfe, um die systematischen Fehler möglichst gering zu halten.

5 Anhang

Anleitung zur Reflektivitätsmessung

1. PC und Lichtquelle einschalten (sowohl Hauptschalter als auch Schalter für beide Lichtquellen!! Sicherheitshinweise für DH-2000-BAL-Lichtquelle beachten!!)
2. Spiegel mithilfe des Lasers ausrichten (Sicherheitshinweise für Laser beachten!!)
3. Sicherstellen, dass Kollimatorlinse in richtigem Abstand auf die Faser geschraubt ist (dies ist der Fall, wenn der Lichtkreis einen scharfen Rand aufweist)
4. Beide Lichtfasern in etwa 160 mm Entfernung und in gleicher Höhe auf Schlitten positionieren. Der Abstand kann von Messung zu Messung variieren, muss aber für jede Messung genau bekannt sein, um eine genaue Normierung zu erhalten
5. *OceanView* starten und Werte für „Boxcarwidth“, „Integrationszeit“ (15 ms) und Anzahl der gemittelten Messungen (hier 15, da dies das Ablesen der Intensität erleichtert) sowie Zielordner für zu speichernde Dateien einstellen
6. Ist die Vorheizzeit von 75 Minuten erreicht, kann über die Verstellerschrauben der V-Klemmen die Position eingestellt werden, bei der das Maximum der Intensität bei 380 nm erreicht ist. Zur Erleichterung kann mit der Maus in diesen Bereich geklickt werden: eine rosafarbene Linie erscheint sodann bei 380 nm und die Intensität für diese Wellenlänge kann im unteren Bereich abgelesen werden
7. Labor abdunkeln; sicherstellen, dass Lichtfasern zum Stillstand gekommen sind; Justierung notfalls nachkorrigieren und Messung abspeichern
8. Beide Fasern inklusive V-Klemmen auf Messaufbau schrauben. Die Enden der Fasern sollten einen Abstand von etwa 40-50 mm haben und sowohl vertikal als auch horizontal auf gleicher Höhe sein. Dann vorsichtig bis an Detektorspiegel heran-, und von hier aus etwa 75 mm zurückfahren. Die Abstände können, wie unter Punkt 4, variieren, müssen aber genau bekannt sein (am besten im Dateinamen mit angeben)
9. Intensitätsspektrum aus Direktmessung aufrufen und beim Einstellen des Maximums am Detektorspiegel als Referenz nehmen
10. Messungen an den 16 Punkten durchführen, dabei Fasern zum Stillstand kommen lassen
11. Für Vergleich mit Referenzspiegel diesen in dafür vorgesehene Klemme einspannen und ausrichten, dann Vorgänge ab Punkt 8 wiederholen

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle herzlich bei meiner Arbeitsgruppe bedanken, die mir diese Bachelorarbeit ermöglicht hat. Ganz besonders danke ich Frau Prof. Dr. Claudia Höhne, die mit ihrem sehr motivierten Auftreten viel zu meiner eigenen Motivation im Rahmen dieser Arbeit, aber auch schon in der Vorlesung zur Teilchenphysik, beigetragen hat. Ich danke ihr auch, dass sie sich für meine Fragen immer Zeit genommen und mich durch gute Ideen unterstützt hat.

Auch danke ich meinem Betreuer Herrn Dr. Tariq Mahmoud, der von Beginn an für Fragen offen war und mit guten Ratschlägen und ausführlichen Erklärungen zu diesem Projekt beigetragen hat.

Weiterhin danke ich meiner Familie, die immer für mich da ist und mir einen Rückzugsort bietet, wenn ich eine Auszeit brauche.

Schließlich bin ich Gott dankbar, der mir geholfen hat, meine zerstreuten Gedanken zu sammeln und strukturiert zu Papier zu bringen, sodass diese Thesis zustande kommen konnte.

Literatur

- [1] H.J. Störig: *Kleine Weltgeschichte der Philosophie*; 1987, 13. Auflage, Fischer Taschenbuch Verlag Frankfurt am Main; S. 139-141
- [2] Genfer Studienbibel, 2014, 2. Auflage, SCM-Verlag Witten; Genesis 1 Vers 1 mit Kommentar
- [3] https://de.wikipedia.org/wiki/Facility_for_Antiproton_and_Ion_Research
- [4] B. Povh, K. Rith, C. Scholz, F. Zetsche: *Teilchen und Kerne*; 2009, 8. Auflage, Springer-Verlag
- [5] <https://de.wikipedia.org/wiki/Standardmodell>
- [6] http://www.weltmaschine.de/physik/standardmodell_der_teilchenphysik/
- [7] [https://de.wikipedia.org/wiki/Quark_\(Physik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Quark_(Physik))
- [8] Vorlesung *Kern- und Teilchenphysik*, Kapitel „Zusammenfassung“, Folie S. 22; WS 14/15; Prof. Dr. Claudia Höhne
- [9] <http://psi.physik.kit.edu/97.php>
- [10] H. Frauenfelder, E. Henley: *Teilchen und Kerne*; 1999, 4. Auflage, Oldenbourg-Verlag; Kap. 14
- [11] Vorlesung *Kern- und Teilchenphysik*, Kapitel „QCD“, Folie S. 22ff; WS 14/15; Prof. Dr. Claudia Höhne
- [12] K. Fukushima, T. Hatsuda, Rept. Prog. Phys.74:014001,2011
- [13] P. Braun-Munzinger, J. Stachel: *The quest for the quark-gluon-plasma*; NATURE-magazine, Vol 448, 19 July 2007; S. 302-303
- [14] B. Povh, K. Rith, C. Scholz, F. Zetsche: *Teilchen und Kerne*; 2009, 8. Auflage, Springer-Verlag, S. 338-340
- [15] Vorlesung *Kern- und Teilchenphysik*, Kapitel „Beschleuniger“, Folie S. 22; WS 14/15; Prof. Dr. Claudia Höhne
- [16] Nuclear Physics News: *The Compressed Baryonic Matter Experiment at FAIR*; Vol 16, No 1, 2006, S. 19-23
- [17] CBM Webpage
- [18] W. Demtröder: *Experimentalphysik 4*; 2010, 3. Auflage, Springer-Verlag, S. 107

Literatur

- [19] http://images.slideplayer.org/1/666219/slides/slide_6.jpg
- [20] CBM Experiment: *Technical Design Report for the CBM, RICH Detector*; Kapitel 2
- [21] CBM Experiment: *Technical Design Report for the CBM, RICH Detector*; Seite 65-68
- [22] Yuriy Riabov, PNPI, private communication
- [23] https://en.wikipedia.org/wiki/Deuterium_arc_lamp
- [24] Ocean Optics: *Maya2000PRO Installation and Operation Manual*; Seiten 18ff
- [25] Ocean Optics: *74-UV, 74-VIS Collimating Lenses Instructions*
- [26] E-Mail-Kontakt vom 22.06.2016 mit Frau Dr. Isabel Thome von Ocean Optics
- [27] Ocean Optics: *DH-2000: Installation and Operation Manual*, Seiten 9-10
- [28] <https://downloads.oceanoptics.com/accessories/standards/Nominal-STAN-SSH.Standard.txt>
- [29] CBM Experiment: *Technical Design Report for the CBM, RICH Detector*; Seite 68

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, die vorgelegte Thesis selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit den Hilfen angefertigt zu haben, die ich in der Thesis angegeben habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Thesis erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der ‚Satzung der Justus-Liebig-Universität zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis‘ niedergelegt sind, eingehalten. Gemäß § 25 Abs. 6 der Allgemeinen Bestimmungen für modularisierte Studiengänge dulde ich eine Überprüfung der Thesis mittels Anti-Plagiatssoftware.

Unterschrift, Ort, Datum