

Inaugural-Dissertation

zur
Erlangung der Doktorwürde
der
Naturwissenschaftlich-Mathematischen
Gesamtfakultät
der Ruprecht-Karls-Universität
Heidelberg

vorgelegt von Florian Fellenberger
aus Mainz

Tag der mündlichen Prüfung 31.10.2012

Aufbau und Charakterisierung der ersten
Ecke des kryogenen elektrostatischen
Speicherringes CSR

Gutachter: Prof. Dr. Klaus Blaum
PD. Dr. Wolfgang Quint

Aufbau und Charakterisierung der ersten Ecke des elektrostatischen kryogenen Speicherrings CSR:

Im Rahmen dieser Doktorarbeit wurde die erste Ecke des elektrostatischen kryogenen Speicherrings CSR entwickelt, aufgebaut und charakterisiert. Beginnend mit theoretischen Untersuchungen zu den verwendeten ionenoptischen Elementen und daraus resultierenden Betriebsparametern und der Simulation von Ionentrajektorien wurden wichtige Schritte bei der Planung und Fertigung begründet. Detaillierte Berechnungen zu den am CSR auftretenden Wärmetransportmechanismen wurden durchgeführt. Daraus resultierten Werte für die zu erwartenden Wärmeeinträge auf die verschiedenen Komponenten. Ebenso ermöglichten sie die Optimierung kritischer Baugruppen. Zusätzlich wurden die Komponenten des Hochspannungssystems intensiv getestet und optimiert, um die zur Speicherung der Ionen notwendigen Spannungen stabil zu halten. Während einer ersten Abkühlphase konnten Tests der ionenoptischen Komponenten bzgl. ihrer Position und Ausrichtung erfolgreich durchgeführt werden. Im Anschluss wurde die erste Ecke des CSR ein zweites mal abgekühlt, um die vorherigen Berechnungen und Abschätzungen bezüglich der erwarteten Wärmeeinträge und der erreichbaren Endtemperaturen zu überprüfen. Die aus den experimentellen Anforderungen resultierenden Vorgaben konnten fast alle direkt erfüllt werden. Nur wenige Vorgaben wurden knapp verfehlt, werden aber durch entsprechende Modifikationen zukünftig ebenfalls erreicht werden.

Setup and comissioning of the first corner of the electrostatic cryogenic storage ring CSR:

In the context of this thesis the first corner of the electrostatic cryogenic storage ring CSR was designed, built and characterized. Starting with the theoretical analysis of the utilized ion optical elements and hence resulting operational parameters and ion trajectorie simulations major steps in design and manufacturing were carried out. Detailed calculations concerning the possible heat transport mechanism at the CSR were performed. This resulted in values for the expected heat load of the various components. Furthermore this calculations enabled the optimization of critical assemblies. In addition the components of the high-voltage system were tested intensively and optimized to guarantee the high-voltage stability requiered for the ion beam storage. During a first cooldown process major tests of the ion optical elements concerning their positions and alignment stabilities could be successfully performed. After this the first corner of the CSR was cooled down a second time to check the prior calculations on the expected heat loads and the achievable low-end temperatures. Almost all demands resulting from the experimetal design parameters could be fullfilled directly during this thesis. The few exceptions missed the demands only close and will be fullfilled by appropriate modifications.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Motivation	1
1.1	Beiträge von Speicherringen zur Astrophysik	1
1.2	Der elektrostatische kryogene Speicherring CSR	3
1.3	Ergebnisse des Prototypen (CTF)	6
1.4	Mechanischer Grundaufbau des CSR	7
1.5	Vakuumkonzept des CSR	9
1.6	Überblick über den Aufbau dieser Arbeit	11
2	Theoretische Grundlagen und Ergebnisse zu den Strahlführungsrechnungen	13
2.1	FEM-Simulationen für den 6°-Ablenker	17
2.2	FEM-Simulationen für den 39°-Ablenker	26
2.3	FEM-Simulationen des Quadrupoldoublets	30
2.4	Bestimmung geeigneter Detektorpositionen	34
3	Grundlagen des Wärmetransports und Anwendung auf den CSR	42
3.1	Mechanismen des Wärmetransports	42
3.1.1	Wärmeleitung im Festkörper	42
3.1.2	Wärmestrahlung	43
3.2	Berechnungen zum Wärmeeintrag auf die CSR-Komponenten	44
3.2.1	Wärmeeintrag auf die 80 K-Strahlungsschilde	45
3.2.2	Wärmeeintrag auf die 40 K-Strahlungsschilde	49
3.2.3	Wärmeeintrag auf die Innenkammern	52
4	Experimentelle Ergebnisse und Bestimmung der Spezifikationen	65
4.1	Tests zur Hochspannungsfestigkeit	65
4.1.1	Thermische Verankerung der HV-Leitungen	67
4.1.2	Vakuumdurchführungen	71
4.1.3	Ionenoptische Elemente	72
4.2	Erstes Abkühlen der ersten Ecke des CSR	77
4.2.1	Überprüfung der Justage der 39°- und 6°-Ablenker sowie eines Quadrupoldoublets im kalten Zustand	77
4.2.2	Interpretation des Abkühlvorganges	93
4.3	Zweites Abkühlen einer Ecke des CSR	100
5	Zusammenfassung und Ausblick	110

A	Koordinaten Vermessung warm	113
B	Koordinaten Vermessung kalt	115
C	Technische Zeichnungen ausgewählter Targethalterungen für den ersten Kältetest	117

Tabellenverzeichnis

2.1	Fitparameter zur Strahlagekorrektur mit dem 6°-Deflektor	24
2.2	Parameter zu FEM-Simulation der 6°-Deflektoren	24
2.3	Parameter zu FEM-Simulation der 39°-Deflektoren	29
2.4	Fitparameter Deflektor in Optikzelle	34
3.1	Fitparameter zur Berechnung der Wärmeleitung ausgewählter am CSR verwendeter Materialien	48
3.2	Fitparameter zur Berechnung der Wärmeleitung Kupfer verschiede- ner Reinheiten	58
3.3	Oberflächen der inneren Vakuumkammern	61
4.1	Erforderliche Spannungen und getestete Spannungen der Komponen- ten des Hochspannungssystems im Vergleich	76
4.2	Fitparameter zur Berechnung des linearen thermischen Ausdehnungs- koeffizienten	79
4.3	Parameter zu den Koordinatentransformationen	83
4.4	Gemessene Winkel der Messpunkte auf den ionenitschen Elementen im Vergleich zu den theoretischen Werten	87
4.5	Gemessene Koordinaten der Messpunkte auf den ionenitschen Ele- menten im Vergleich zu den theoretischen Werten	87
4.6	Ergebnisse der Vermessung der ionenoptischen Elemente einer Ecke des CSR im kalten Zustand.	94
4.7	Gegenüberstellung der gemessenen Temperaturen und der Vorgaben auf den inneren Vakuumkammern und den Elektroden am Ende des zweiten Abkühlens	108
A.1	Rohdaten der Vermessung der CSR Ionenoptik im warmen Zustand unter Vakuum.	114
B.1	Rohdaten der Vermessung der CSR Ionenoptik im kalten Zustand . .	116

Abbildungsverzeichnis

1.1	Schwarzkörperspektrum von 300 K und 10 K	2
1.2	Übersicht über den CSR-Aufbau	5
1.3	Kuehlung von gespeicherten Al_4^- Molekülen	7
1.4	Ansicht der äußeren Vakuumkammern des CSR auf denen große Kräfte lasten	8
1.5	Betonfundamente des CSR und ihre Befestigung	8
1.6	NEG-Kammer zum Pumpen des inneren Vakuums bei Raumtemperatur	10
2.1	Realisierung der 90°-Ablenkung im CSR	14
2.2	Vergoldetes Quadrupoldublett	14
2.3	Deflektorspannungen in Abhängigkeit der kinetischen Energie der gespeicherten Ionen	17
2.4	Vereinfachtes CAD-Modell des 6°-Deflektors zur FEM-Simulation der elektrischen Felder	18
2.5	Definition des verwendeten Koordinatensystems, das bei den FEM-Simulationen der ionenoptischen Komponenten verwendet wurde	18
2.6	Elektrische Feldstärke zwischen den Elektroden der 6°-Deflektoren auf einem radialen Pfad	19
2.7	Elektrische Feldstärke zwischen den Elektroden der 6°-Deflektoren auf einem radialen Pfad, mit geänderten Elektrodenpotentialen zur Anpassung der Feldstärke auf der Sollbahn an den Sollwert	20
2.8	y-Komponente der elektrischen Feldstärke innerhalb eines 6°-Deflektors entlang eines vertikalen Pfades	21
2.9	Effektiver Ablenkwinkel eines 6°-Deflektors mit geometrischem Winkel von 5,58°	22
2.10	Ablenkwinkel eines 6°-Deflektors in Abhängigkeit der relativen Abweichung der Elektrodenpotentialen von den Sollwerten	23
2.11	Übersicht über die Bereiche, die bei der FEM-Simulation der 6°-Deflektoren verwendet wurden.	25
2.12	Vereinfachtes CAD-Modell des 39°-Deflektors zur FEM-Simulation der elektrischen Felder	26
2.13	Elektrische Feldstärke zwischen den Elektroden der 39°-Deflektoren auf einem radialen Pfad, mit geänderten Elektrodenpotentialen zur Anpassung der Feldstärke auf der Sollbahn an den Sollwert	27
2.14	y-Komponente der elektrischen Feldstärke innerhalb eines 39°-Deflektors entlang eines vertikalen Pfades	28

2.15	Effektiver Ablenkwinkel eines 6°-Deflektors mit geometrischem Winkel von 38,23°	29
2.16	Übersicht über die Einstellungen, die bei der FEM-Simulation der 39°-Deflektoren verwendet wurden.	30
2.17	Vereinfachtes CAD-Modell des Quadrupoldoublets zur FEM-Simulation der elektrischen Felder	31
2.18	Elektrischer Feldgradient in einem Quadrupol transversal zur Sollbahn	32
2.19	Elektrischer Feldgradient innerhalb eines Quadrupols entlang der Sollbahn	33
2.20	Ablenkwinkel der vertikalen Deflektors zwischen zwei Quadrupolen . .	34
2.21	Darstellung der Trajektorien der Strahlteilchen	35
2.22	Übersicht über die geeigneten Detektorpositionen für Reaktionsfragmente in den Ecken des CSR	37
2.23	Detektorposition: erster 6°-Deflektor in Strahlrichtung	38
2.24	Detektorposition: Erste Detektorkammer in Strahlrichtung	39
2.25	Detektorposition: Neutrale Fragmente in der ersten 39°-Deflektorkammer in Strahlrichtung	39
2.26	Detektorposition: Zweite Detektorkammer in Strahlrichtung	40
2.27	Detektorposition: Dritte Detektorkammer in Strahlrichtung	40
3.1	Querschnitt durch den CSR zu schematischen Darstellung des kryogenen Aufbaus	45
3.2	Stütze für die ionenoptischen Komponenten des CSR	47
3.3	Wärmeleitung von GFK	49
3.4	Titanstütze zur Befestigung des 40 K-Strahlungsschilds und der inneren Vakuumkammern	51
3.5	Wärmeleitung von Titan der Legierung Ti6Al4V	51
3.6	Positionen der 2K-Einheiten an den inneren Vakuumkammern	53
3.7	Wärmeleitung von Edelstahl der Legierung 316	55
3.8	Berechnung der maximalen Temperatur an einem Edelstahlstreifen, dem durch Wärmestrahlung Energie zugeführt wird	56
3.9	Temperaturverlauf eines Edelstahlstreifens, dem durch Wärmestrahlung Energie zugeführt wird	56
3.10	Wärmeleitung von Kupfer verschiedener Reinheitsgrade	57
3.11	Berechnung der maximalen Temperatur an einem Edelstahlstreifen, dem durch Wärmestrahlung Energie zugeführt wird	59
3.12	Temperaturverlauf eines Kupferstreifens, dem durch Wärmestrahlung Energie zugeführt wird	59
3.13	Ansichten einer 2 K-Einheit	62
3.14	Querschnitt einer 2 K-Einheit	63
3.15	FEM-Simulation einer 2 K-Einheit	64
4.1	Skizze des Messaufbaus für die Tests der Hochspannungsfestigkeit . .	66
4.2	Bildschirmfoto eines typischen Überschlags beim testen von HV-Komponenten im Vakuum	67
4.3	Thermische Verankerung der Hochspannungsleitungen auf dem 40 K-Strahlungsschild	68

4.4	Comsol-Simulation der geänderten thermischen Verankerung der HV-Leitungen auf dem 40 K-Strahlungsschild	69
4.5	Thermische Verankerung der Hochspannungsleitungen auf den inneren Vakuumkammern	69
4.6	Thermische Verankerung der Hochspannungsleitungen des Quadrupoldubletts	70
4.7	Änderungen an den Hochspannungsdurchführungen in das Isoliervakuumsystem	71
4.8	Änderungen an den Hochspannungsdurchführungen in das Experimentiervakuum	73
4.9	Keramikisolatoren des 39°-Deflektors und deren Überarbeitung	74
4.10	Hochspannungsisolatoren der 6°-Deflektoren	75
4.11	Elektrodensicherung gegen Absinken	75
4.12	Targethalterung zur Justage von 39°-Deflektoren	78
4.13	Targethalterung zur Vermessung von 39°- und 6°-Deflektoren	78
4.14	Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient von Aluminium EN AW 5083 von 4 K bis 300 K	80
4.15	Koordinatensysteme zur Vermessung und Justage des CSR	81
4.16	Targetpositionen auf einer der Bodenplatten des 40 K-Strahlungsschild während des ersten Abkühlens	84
4.17	Auswirkung der Dejustage der CSR Ionenoptik untersucht mit Cosy-Infinity	86
4.18	Abweichung der gemessenen Änderungen durch das Abkühlen von den berechneten Werten bei 39° und 6°-Deflektor in der xz-Ebene.	88
4.19	Targetpositionen auf Höhe der Strahlachse zur Justage der Quadrupoldupletts und anderer Komponenten	90
4.20	Blick durch ein Fernrohr auf ein eingebautes Target eines Quadrupoldubletts im kalten Zustand	91
4.21	Messprinzip zu Überprüfung eines Quadrupoldubletts im kalten Zustand	92
4.22	Erstes Abkühlen Temperatur und Vakuum im zeitlichen Verlauf	95
4.23	Temperatur auf den 40 K Schilden im zeitlichen Verlauf während des ersten Abkühlens	96
4.24	Temperaturen auf den Deflektoren im zeitlichen Verlauf während des ersten Abkühlens	97
4.25	Kühlung der Elektroden der 39°-Deflektoren während des ersten Abkühlens über Kupferlitze	98
4.26	erstes Abkühlen Temperatur eines Quadrupols im zeitlichen Verlauf	99
4.27	Temperaturverlauf der 80 K-Schilde beim zweites Abkühlen	101
4.28	Temperaturverlauf der 40 K Schilde beim zweites Abkühlen	102
4.29	Temperaturverlauf der inneren Vakuumkammern beim zweiten Abkühlen	103
4.30	Temperaturverlauf eines Quadrupoldubletts beim zweiten Abkühlen	105
4.31	Temperaturverlauf eines 39°-Deflektors beim zweiten Abkühlen	106
4.32	Positionen von Si-Diode-1 und RhFe-Sensor 2	106

4.33	Temperaturverlauf zweier RhFe-Sensoren auf einer Vakuumkammer und einer 2K-Einheit während des zweiten Abkühlens.	107
5.1	Aussenansicht des CSR Isoliervakuumsystems	110
C.1	Positionen der von MP-01 und MP-06 auf dem 40K-Strahlungsschild	118
C.2	Targethalterung für MP-01 auf dem 40K-Strahlungsschild	119
C.3	Targethalterung für MP-06 auf dem 40K-Strahlungsschild	120
C.4	Targethalterung für MP-02 bis MP-05 auf dem 6°-Deflektor	121
C.5	Targethalterung für MP-07 und MP-10 auf dem 39°-Deflektor	122
C.6	Targethalterung für MP-08 und MP-09 auf dem 39°-Deflektor	123

Kapitel 1

Einleitung und Motivation

1.1 Beiträge von Speicherringen zur Astrophysik

Die Zusammensetzung vieler Objekte im Weltraum, wie beispielsweise interstellare Nebel und Sterne, ist für die Wissenschaft von großem Interesse, da sie so z.B. Erkenntnisse über ihre Entstehung oder dort vorherrschende Umgebungsbedingungen ermöglichen. Sie sind aber von der Erde nur mit großem Aufwand zu bestimmen. Üblicherweise werden dazu spektroskopische Daten dieser Objekte interpretiert, die entweder auf der Erde oder in der Erdumlaufbahn erfasst und mit den Ergebnissen von Spektroskopie-Experimenten auf der Erde verglichen werden. Gleichzeitig ist auch die Entstehung der verschiedenen Moleküle von großem Interesse, bzw. die stattfindenden Reaktionen. Bisher wurden überwiegend positive Moleküle wie z.B. H_3O^+ , das eine wichtige Rolle bei der Entstehung von Wasser spielt, identifiziert und untersucht [1]. Bei positiven Ionen ist der Prozess der dissoziativen Rekombination (DR) von großer Bedeutung. Dabei werden positive Ionen durch Elektroneneinfang in einen angeregten Zustand überführt und zerfallen bei ausreichend großer interner Energie in mehrere Fragmente. Den Molekülen stehen oft mehrere Zerfallskanäle in unterschiedliche Endzustände zur Verfügung. Die Verzweungsverhältnisse solcher Reaktionen in die verschiedenen Zerfallskanäle sind von großer Bedeutung zum Verständnis von z.B. der Entstehung und Zusammensetzung instellarer Nebel. Zu diesem Zweck wurden in der Vergangenheit vor allem magnetische Speicherringe wie der Test-Speicher-Ring (TSR) in Heidelberg verwendet, um derartige Reaktionen auf der Erde möglichst realitätsnah durchzuführen und mit theoretischen Modellen zu vergleichen.

Dabei wurden die untersuchten Ionen in den Ionenquellen bei Temperaturen deutlich über der Raumtemperatur erzeugt. Diese Energie liegt in den Ionen als Vibrations- und Rotationsenergie vor. Aus experimenteller Sicht ist es erstrebenswert, die Ionen in klar definierten Quantenzuständen zur Verfügung zu haben, d.h. die Ionen müssen gekühlt werden, im Idealfall in die Grundzustände der Vibration und Rotation. Andernfalls hat man das große Problem, dass durch die Vielzahl der möglichen Anfangszustände der Vergleich mit der Theorie nur sehr schwer oder sogar unmöglich ist [2]. Hauptursache dafür ist, dass die stattfindenden DR-Reaktionen teilweise sehr stark durch die Rotationszustände der Ionen beeinflusst werden [3, 4]. Vibrationszustände sind zwar ebenso unerwünscht wie die Rotationen, aber innerhalb

einer Raumtemperatur-Umgebung thermalisieren viele relevante Ionen durch Strahlungsaustausch und kühlen damit effektiv die Vibrationsmoden [5]. Dies geschieht üblicherweise innerhalb weniger Millisekunden, sofern die Strahlteilchen nicht durch störende Prozesse, wie z.B. Restgaskollisionen oder Rekombination zu neutralen Teilchen, vorher verloren gehen.

Um auch die Rotationsmoden zu kühlen, sind Umgebungstemperaturen von etwa 10 K sowie Speicherzeiten von einigen Sekunden notwendig. Ein tieferes Verständnis liefert die Betrachtung der Abstrahlung eines schwarzen Körpers. Die elektromagnetische Strahlung, die ein schwarzer Körper emittiert, wird beschrieben durch das Plancksche Strahlungsgesetz

$$u(T, \lambda) d\lambda = \frac{8 \pi h c}{\lambda^5} \frac{1}{e^{-\frac{hc}{\lambda k T}} - 1} d\lambda, \quad (1.1)$$

das in der dargestellten Form die spektrale Energiedichte in Abhängigkeit der Temperatur T des Körpers liefert. Hierbei ist c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, h das Planck'sche Wirkungsquantum, k die Stefan-Boltzmann-Konstante und λ die Wellenlänge der emittierten Strahlung. Durch Integration von Gleichung (1.1) über das komplette Spektrum (siehe Abb. 1.1) erhält man die abgestrahlte Energiedichte.

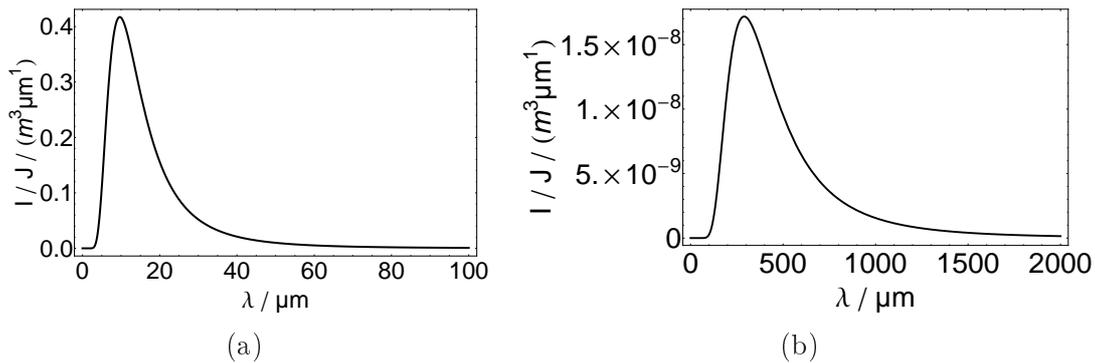


Abbildung 1.1: Das Spektrum eines schwarzen Körpers gemäß dem Planckschen Strahlungsgesetz (Gleichung (1.1)) bei einer Temperatur von $T = 300$ K (a) und $T = 10$ K (b).

Der Vergleich der Energiedichten bei Raumtemperatur ($T \approx 300$ K) und bei einer geeigneten Umgebungstemperatur zur Kühlung der Rotationsfreiheitsgrade ($T \leq 10$ K) zeigt, dass so die Energiedichte gegenüber Raumtemperatur um den Faktor $8,1 \times 10^5$ verringert werden kann. Das Wien'sche Verschiebungsgesetz

$$\lambda_{max}(T) = \frac{2897,8 \mu\text{m}}{T} \quad (1.2)$$

ermöglicht die Berechnung der Wellenlänge λ , bei der die Energiedichte bei gegebener Temperatur T ihr Maximum hat. Bei Raumtemperatur und 10 K Umgebungstemperatur liegen die Wellenlängen bei

$$\begin{aligned} \lambda_{max}(10 \text{ K}) &= 289,78 \mu\text{m} \hat{=} 4,3 \text{ meV} \\ \lambda_{max}(300 \text{ K}) &= 9,66 \mu\text{m} \hat{=} 130 \text{ meV}. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Für einen Speicherring der bei Raumtemperatur betrieben wird bedeutet dies, dass der dominierende Anteil der emittierten Strahlung im Infrarotbereich liegt, weit über dem Bereich molekularer Rotationen. Diese könne zwar auch bei Raumtemperatur durch spontane Emission in niedrigere Rotationszustände übergehen, durch die hohe Umgebungstemperatur werden aber gleichzeitig auch wieder Rotationszustände angeregt. Bei Raumtemperatur sind nach entsprechender Kühlung durch Speichern Ionenstrahls in einer 300 K-Umgebung oftmals ausschließlich der Vibrations-Grundzustand aber gleichzeitig eine Vielzahl von Rotationszuständen besetzt [6]. Durch eine niedrigere Umgebungstemperatur von 10 K wird der Anteil der Anregung von Rotationsmoden durch die Umgebungsstrahlung so stark unterdrückt, dass bei ausreichend langer Speicherung die Moleküle oft nur im Rotations-Grundzustand und auch nur in geringem Anteil in wenigen Niveaus darüber vorhanden sind. Zusätzlich entspricht eine 10 K-Umgebung auch relativ gut den Umgebungstemperaturen wie sie z.B. in interstellaren Nebeln durch die kosmische Hintergrundstrahlung zu finden sind [7]. Zu diesem Zweck wird derzeit mit dem elektrostatischen kryogenen Speicherring (CSR) am Max-Planck-Institut für Kernphysik ein neuartiger Speicherring aufgebaut. Dieser soll die Erforschung der elementaren Prozesse bei der Entstehung bzw. Entwicklung solcher interstellaren Nebel mit Hilfe gespeicherter Ionenstrahlen in kryogener Umgebung ($T \leq 10$ K) ermöglichen.

1.2 Der elektrostatische kryogene Speicherring CSR

Der CSR ist darauf ausgelegt, bei Umgebungstemperaturen von maximal 10 K einzigartige Bedingungen für zahlreiche Experimente zu ermöglichen. Zwar gibt es an der TMU in Japan [8] bereits einen betriebsbereiten kryogenen elektrostatischen Speicherring, dieser wird jedoch, anders als der CSR, nur auf 77 K abgekühlt und ist damit zur Kühlung der Rotationszustände der gespeicherten Ionen nur begrenzt geeignet. Der CSR ist wesentlich größer, hat einen Umfang von 35 m und ist darauf ausgelegt, Ionen bei Energien von 20 keV/q bis 300 keV/q bei Strahlströmen im Bereich von 1 nA bis 1 μ A zu speichern. Zusätzlich dient der CSR als technologischer Test für den geplanten niederenergetischen elektrosatischen Speicherring USR im Rahmen des FLAIR Projekts an der GSI in Darmstadt für Experimente mit gespeicherten Antiprotonen [9].

Er wird über eine an die Anforderungen des CSR angepasste Version einer kommerziellen Kälteanlage der Firma Linde gekühlt [10]. Zum Erreichen der kryogenen Umgebungsbedingungen besitzt der CSR ein zweites Vakuumsystem. Dieses Vakuumsystem ist von dem des gespeicherten Ionenstrahls getrennt und umschließt dessen Vakuummammern zur Minimierung des Wärmetransports (siehe Kapitel 3). Der CSR besteht aus vier Ecksektionen zur Ablenkung des Ionenstrahls um jeweils 90° sowie vier etwa 3 m langen geraden Sektionen zur Durchführung der Experimente (siehe Abb. 1.2). In einer Linear-sektion wird ein GaAs-Photokathoden-Elektronenkühler aufgebaut, der mit Elektronenenergien bis hinunter zu 1 eV die bereits am TSR genutzte Phasenraumkühlung des Ionenstrahls auch am CSR ermöglichen soll [11]. Dieser Elektronenkühler ist zusätzlich darauf ausgelegt, als Elektronentarget u.a. für DR-Experimente zu dienen. Damit grenzt sich der CSR auch gegen den in Stockholm im Aufbau befindlichen kryogenen Speicherring DESIREE ab, der ohne Elektronen-

kühlung auskommen muss und auf maximale Energien von 100 keV/q beschränkt ist [12, 13, 14]. Eine weitere Sektion dient dem Ziel der Strahldiagnose. Über induzierte Spiegelströme in Pickup-Elektroden werden Position und Strahlstrom für gepulste Ionenstrahlen bestimmt [15]. Über das vom Ionenstrahl erzeugte Magnetfeld kann die Strahlintensität auch bei DC-Strahlen durch einen SQUID bestimmt werden. Die dritte gerade Sektion wird aus einem Reaktionsmikroskop mit einem Gas-Jet-Target bestehen [16]. Diese gerade Sektion ermöglicht es, durch geeignete angelegte äußere magnetostatische Felder, die entstehende Reaktionsprodukte vom gespeicherten Ionenstrahl zu separieren und nachzuweisen. Alternativ kann hier der Ionenstrahl auch senkrecht zu seiner Trajektorie mit einem Laserstrahl reagieren. Somit können z.B. Moleküle durch die zugeführte Energie aufgebrochen werden. Die vierte Linear-sektion folgt direkt auf die Ionenstrahl-Injektion in den CSR (siehe Abb. 1.2). Sie ermöglicht es, den gespeicherten Ionenstrahl mit einem Laserstrahl oder neutralen Molekülstrahl entlang der Geraden zu überlagern. Diese Sektion bietet derzeit noch die Möglichkeit zur Installation weiterer, bisher nicht geplanter, Experimentaufbauten. Die Injektion in den CSR erfolgt wahlweise von einer 60 kV- oder 300 kV-Plattform, die auch bei niedrigeren Spannungen betrieben werden können. Darauf lassen sich flexibel, je nach Anforderung an die Molekülspezies für die Experimente verschiedenste Ionenquellen betreiben wie z.B.

- Sputterquelle für negative Ionen,
- EBIT für hochgeladene Ionen,
- 22-Pol-Falle zur Erzeugung kalter Ionen,
- Penningquelle zur Erzeugung positiver Ionen.

Neutrale Molekülstrahlen werden durch einfach negativ geladene Ionen, deren überschüssiges Elektron durch Wechselwirkung mit einem Laser entfernt wird, erzeugt. Eine detailliertere Beschreibung des Injektionssystems des CSR ist in [17] zu finden.

Der CSR besitzt keine magnetostatische Ionenoptik. Der Krümmungsradius einer Trajektorie eines Ions im Magnetfeld ist bei gegebener kinetischer Energie bestimmt durch die Masse und Ladung des Ions in der Form, dass für größere Massen immer stärkere magnetische Felder erforderlich sind, um den Krümmungsradius zu erhalten. Das bedeutet, dass eine magnetische Ionenoptik für die Realisierung eines kryogenen Speicherrings für ein großes Spektrum molekularer Ionen nicht geeignet ist. Zum einen könnten damit Ionen hoher Masse nicht mehr gespeichert werden, und zum anderen benötigt eine solche Ionenoptik relativ viel Platz, was zusammen mit der notwendigen kalten Umgebung technisch extrem aufwändig und damit teuer wäre. Anders sieht es aus für elektrostatische Ablenkelemente (siehe Kapitel 2). Dort ist im nichtrelativistischen Fall der Krümmungsradius vom Verhältnis aus kinetischer Energie zur Ladung des Ions bestimmt und fast unabhängig von der Masse. Damit ist der zugängliche Bereich an zu speichernden Ionen deutlich größer als im magnetischen Fall. Neben der Untersuchung von DR-Prozessen sind am CSR deshalb auch Untersuchungen an deutlich schwereren Molekülen wie Clustern und Biomolekülen geplant. Ein weiterer großer Vorteil ergibt sich für den späteren Betrieb, da bei

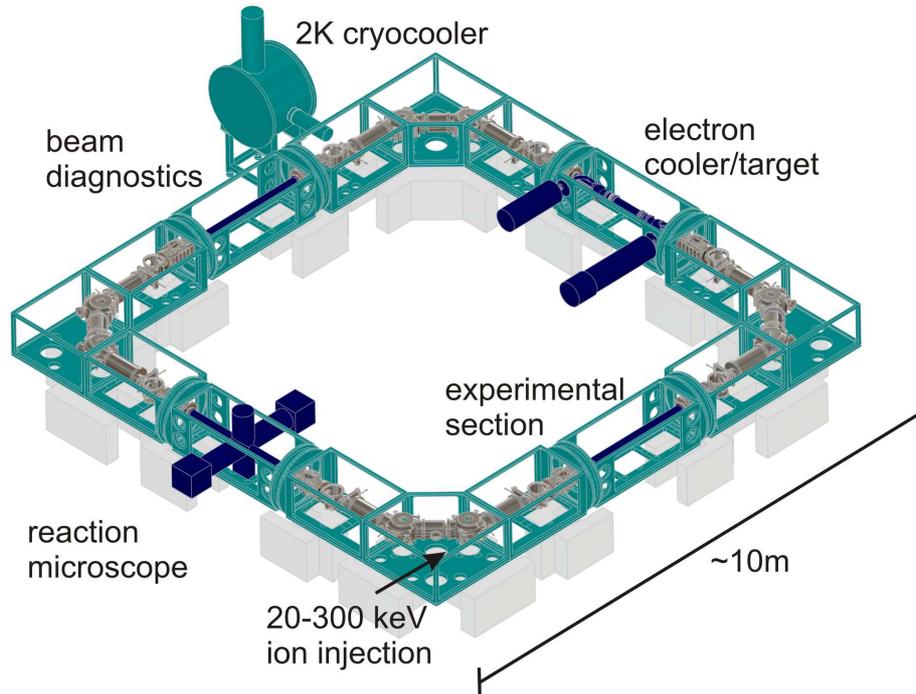


Abbildung 1.2: Übersicht über den CSR-Aufbau mit den Experimentiersektionen sowie der letzten Stufe der Kälteanlage. Die als Experimentiersektion bezeichnete gerade Strecke ist bisher vor allem für Experimente vorgesehen, bei denen der Ionenstrahl mit einem Laserstrahl oder neutralen Molekülstrahl überlagert wird. Dieser Bereich bietet somit bisher noch die Möglichkeit zur Installation weiterer Experimentaufbauten.

den verwendeten elektrostatischen Defektoren die verschiedenen Ionen bei gleichem Verhältnis von Energie zur Ladung, bei ansonsten identischen CSR-Einstellungen, gespeichert werden können. Limitiert wird man bei Verwendung elektrostatischer Defektoren allerdings durch die maximale technisch realisierbare Feldstärke, die die maximale Ionenenergie begrenzt. Das Design und die Optimierung dieser Elemente stellt ein wesentliches Thema dieser Arbeit dar.

Das Vakuumsystem des CSR ist ausgelegt, um möglichst lange Speicherzeiten für langsame Ionenstrahlen zu ermöglichen. Dies bietet für die Experimente mehrere Vorteile. Längere Speicherdauern bewirken, dass gespeicherte Moleküle mehr Zeit haben, durch spontane Emission ihre Rotationszustände zu kühlen. Während dies bei leichten Molekülen in der Regel auf einer Zeitskala von Minuten abläuft, benötigen schwere Moleküle dafür häufig sehr viel länger. Zusätzlich verringert ein niedriger Restdichte auch die Verluste insbesondere von langsamen Ionenstrahlen durch Wechselwirkung mit dem Restgas, so dass auch mit schweren und deshalb langsamen Moleküle ausreichend Zeit für Experimente zur Verfügung stehen sollte. Ein weiterer Vorteil ist, dass langsame Moleküle durch größere Strahllebensdauern auch mehr Zeit haben, mit dem Elektronenkühler gekühlt zu werden. Die Strahllebensdauer wird durch die Teilchendichte

$$n = \frac{N}{V} = \frac{p}{kT}, \quad (1.4)$$

mit dem Druck p , dem Volumen V , der Teilchenzahl N , der Stefan-Boltzmann Konstanten k und der Temperatur T bestimmt. Man erkennt, dass der Druck bei konstanter Teilchendichte N/V temperaturabhängig ist. Deshalb ist es notwendig, wenn der Druck als Maß für das Vakuum verwendet wird, die Referenztemperatur anzugeben. Zum besseren Vergleich ist deshalb der Bezug auf Raumtemperatur üblich und wird mit RTE (**R**aum**t**emperatur **E**quivalent) bezeichnet. Für den CSR ist geplant Restgasdichten von wenigen $1000/\text{cm}^3$ bzw. 10^{-13} mbar (RTE) zu erreichen. Der geforderte Druck wird durch Kühlung sämtlicher Wände der Vakuumkammern auf 10 K und zusätzlicher Kryokondensation bei 2 K erreicht. Die meisten Stoffe haben bei diesen Temperaturen einen verschwindenden Dampfdruck. Als dominierende Komponente mit relativ hohem Dampfdruck, die in relevanter Menge im Vakuumsystem zu erwarten ist, ist Wasserstoff zu kondensieren. Um Wasserstoff effektiv zu kondensieren (mehrere Monolagen übereinander) sind Temperaturen von 2 K, zumindest lokal, erforderlich, um die geplante Teilchendichte zu realisieren [18]. Aus diesem Grund werden am CSR ausgewählte Bereiche auf 2 K gekühlt (siehe Kapitel 3).

Bei der Speicherung von Antiprotonen in einem geschlossenen System wurde ein Vakuum von einigen 10^{-17} mbar (RTE) in [19] demonstriert. Jedoch war hier das effektive Speichervolumen von einigen cm^3 wesentlich kleiner als im Vergleich zu einem Volumen von einigen m^3 wie es beim CSR vorhanden ist. Im Gegensatz dazu ist der CSR durch die Injektion der Ionenstrahlen auch ein offenes System, so dass ein ständiger Nachschub an Restgasteilchen vorhanden ist. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Realisierung des geforderten Vakuums am CSR eine große technologische Herausforderung darstellt.

1.3 Ergebnisse des Prototypen (CTF)

Vor dem Beginn des Aufbaus des CSR wurden die geplanten Konzepte, insbesondere im Bereich der Kryotechnik und Vakuumtechnik, an einem Prototypen („Cryogenic Trap for Fast ion beams“ CTF) getestet [20, 21, 22]. Dieser Prototyp bestand, wie auch der CSR, aus zwei getrennten Vakuumsystemen, wobei die inneren Vakuumkammern auf Temperaturen von maximal 15 K abgekühlt wurden. Auch hier wurden lokal Temperaturen von maximal 2 K realisiert. Innerhalb dieses Vakuumsystems befand sich eine Ionenfalle aus zwei elektrostatischen Spiegeln. Über einen MCP-Detektor, der sich hinter einem der Spiegel befand, war es möglich neutrale Teilchen nachzuweisen. Zunächst wurde demonstriert, dass das für den CSR erforderliche Vakuum mit den vorgesehenen Mitteln erreicht werden kann. Ausgehend von der Speicherzeit eines N_2^+ -Strahls konnte eine Teilchendichte von $(2000 \pm 1000)/\text{cm}^3$ nachgewiesen werden [21, 22]. Ausgehend von einer Speicherzeit von 30 ms bei Raumtemperatur konnte eine Strahllebensdauer im kalten Zustand von 340 s gezeigt werden [21]. Dies stellte einen direkten Indikator für die geringeren Restgaskollisionen bei kleinen Teilchendichten dar. Nachdem durch die CTF diese wichtigen Vorgaben für den CSR demonstriert wurden, wurde der Aufbau für Experimente genutzt, die nicht mehr in Bezug zum Aufbau des CSR stehen. So wurden unter anderem SF_6^- [23] und verschieden große Aluminiumcluster Al_n^- untersucht [21, 24, 25]. Es

konnte dabei gezeigt werden, dass z.B. Al_4^- und Al_5^- durch die kalte Umgebung abkühlen. Zusätzlich konnte auch die Temperatur im zeitlichen Verlauf bestimmt werden (siehe Abb 1.3).

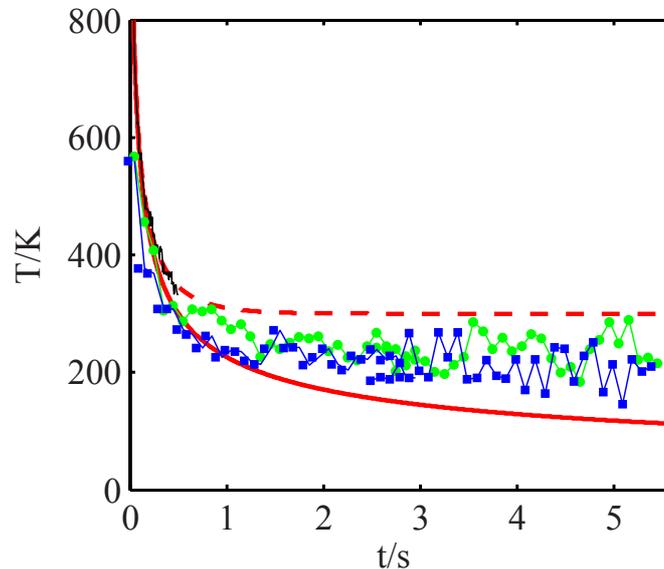


Abbildung 1.3: Dargestellt ist die Abkühlung von gespeicherten Al_4^- Molekülen in der CTF aus [24] bei Umgebungstemperaturen von etwa 15 K. In blau und grün sind jeweils die verschiedenen Messungen, in rot die theoretisch erwarteten Werte für Umgebungstemperaturen von 300 K (durchgezogen) und 15 K (gestrichelt) dargestellt.

1.4 Mechanischer Grundaufbau des CSR

Die äußeren Vakuumkammern für das Isoliervakuum müssen für den darin befindlichen kryogenen Aufbau mit etwa 1 m^2 Querschnittsfläche relativ groß sein. Durch den zu erwartenden Druckunterschied von 1 bar zwischen Innen- und Außenseite dieser Vakuumkammern entstehen große Kräfte, die auf den Kammern lasten. Die Vakuumkammern haben unterschiedlich große Oberflächen zwischen $0,96 \text{ m}^2$ und $3,63 \text{ m}^2$. Daraus resultieren Kräfte von $97,3 \text{ kN}$ bis $368,1 \text{ kN}$. Dies entspricht einer Masse von $9,9 \text{ t}$ bis $37,5 \text{ t}$, die auf den verschiedenen Platten der Vakuumkammern lasten. Aus diesem Grund bestehen die Vakuumkammern aus einem Edelstahlrahmen aus bis zu 60 mm dicken Edelstahlstreben, sowie Aluminiumplatten zwischen 30 mm und 80 mm Dicke (siehe Abb. 1.4).

Diese Konstruktion ermöglicht ein Leergewicht der Vakuumkammern von maximal 3 t bei gleichzeitiger mechanischer Stabilität unter diesen Extrembedingungen. Messungen bei der Abnahme der Vakuumkammern beim Hersteller bestätigten die Vorhersagen der Konstruktionsabteilung, dass sich die Aluminiumdeckel um weniger als $0,5 \text{ mm}$ durchbiegen, wenn sie evakuiert sind. Große Kräfte aufgrund der großen Vakuumkammern wirken jedoch nicht nur auf die äußeren Vakuumkammern. Auf die Eckkammern wirken auch Kräfte entlang der geraden Sektionen des CSR. Durch die



Abbildung 1.4: Ansicht einer Ecke des CSR. Zu sehen sind einige der inneren sowie äußeren Vakuummkammern mit demontierten Seitenplatten. Auf diese wirken im evakuierten Zustand Kräfte von bis zu 368 kN.

Querschnittsfläche der geraden Sektionen von $1,1 \text{ m}^2$ betragen diese im evakuierten Zustand $112,2 \text{ kN}$. Da diese Kraft von jeder Ecke in Richtung der beiden benachbarten Ecken gerichtet ist, ergibt sich in der Summe eine Kraft von $158,7 \text{ kN}$ (dies entspricht einer Masse von $16,2 \text{ t}$) in Richtung Ringmitte. Um trotz dieser Kräfte zu gewährleisten, dass die Vakuummkammern ihre Positionen einhalten, sind sie fest mit Halteprofilen verschraubt, die in den Betonfundamenten des CSR einbetoniert sind. Die Betonfundamente selbst sind mit dem Hallenboden vergossen. Zusätzlich sind sie mit dem 50 cm dicken Hallenboden über Gewindestangen (Gewindegröße M36), die an den Betonfundamenten und im Keller unter dem CSR verschraubt sind, befestigt (siehe Abb. 1.5). Im Vorfeld von einem Statiker durchgeführte Berechnungen zeigten, dass diese Maßnahmen die notwendige Stabilität gewährleisten.

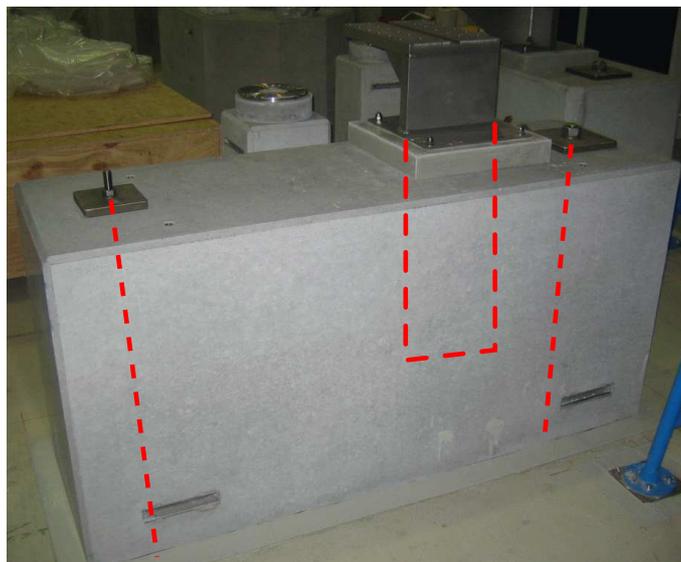


Abbildung 1.5: Gezeigt ist eines der etwa 2 m langen Betonfundamente der Eckkammern des CSR. In rot sind die Gewindestangen, mit denen sie im Hallenboden verschraubt sind sowie die Dimensionen der Aufnahme für die Eckkammer dargestellt.

1.5 Vakuumkonzept des CSR

Im inneren Vakuumsystem des CSR sind im kalten Zustand Drücke von unter 1×10^{-13} mbar angestrebt. Erreicht werden soll dies mit denselben Mitteln, mit denen dies am Prototyp realisiert wurde [20, 21, 22]. Die inneren Vakuumkammern werden bei Temperaturen von bis zu 250°C ausgeheizt, um in den inneren Vakuumkammern gebundene Restgaskomponenten zu lösen, die konventionell über Turbomolekularpumpen abgepumpt werden. Im kalten Zustand wird über Ganzmetallschieber-Ventile das innere Vakuumsystem, mit Ausnahme der Injektion des Ionenstrahls, abgeschlossen. Turbomolekularpumpen und Ionengetterpumpen sind für das angestrebte Vakuum in diesem Bereich hinderlich, da durch sie eine Rückströmung in den CSR zu erwarten wäre. Gepumpt wird daher mittels Kryokondensation auf den inneren Vakuumkammern, die sich auf Temperaturen von maximal 10 K befinden, sowie mit 2K-Einheiten (siehe Kapitel 3) und Kryopumpen. Letztere befinden sich im inneren Vakuumsystem und bestehen aus Kupferplatten, die mit Aktivkohle beschichtet sind. Im Isoliervakuum werden die Kryopumpen mit einer Heliumleitung bei 5 K kontaktiert. Eine derartige ausheizbare Kryopumpe auf Aktivkohlebasis wurde erstmals für die Verwendung am CSR und zum Testen am Prototypen entwickelt [26]. Sie befinden sich auf einer höheren Temperatur als die 2 K-Einheiten, jedoch sind sie durch ihre große Oberfläche ebenfalls zur Kryokondensation der Restgasbestandteile gut geeignet. Geplant ist der Einsatz von zwei dieser Kryopumpen auf jeder Linearsektion mit Ausnahme des Elektronenkühler, da der dort vorhandene Platz nicht ausreicht. Insbesondere die 2 K-Einheiten werden benötigt, um Wasserstoff als letzten Restgasbestandteil der beim Abkühlen kondensiert zu binden. Dies konnte am Prototypen durch Messungen mit einem Massenspektrometer im inneren Vakuumsystem bestätigt werden [21]. Beim Betrieb des CSR bei Raumtemperatur wird es nicht möglich sein, die 2 K-Einheiten zu benutzen, da es nicht möglich ist, sie auf unter 2 K zu kühlen, während die inneren Vakuumkammern auf Raumtemperatur sind. Deshalb wird es im warmen Zustand nicht möglich sein, ähnlich gute Vakuumbedingungen wie im kalten Zustand zu erreichen. Das Ziel ist daher bei Raumtemperaturbetrieb ein Vakuum von 5×10^{-11} mbar zu gewährleisten. Dafür ist es notwendig vor dem Betrieb bei Raumtemperatur die strahlführenden Vakuumkammern bei Temperaturen von bis zu $550 - 600$ K auszuheizen, d.h. alle inneren Komponenten des CSR müssen für Temperaturen von bis zu 600 K spezifiziert werden. Üblicherweise ist der Temperaturbereich, dem Speicherringe ausgesetzt sind, halb so groß, da nur für Raumtemperaturbetrieb ausgeheizt wird und für kalte Speicherringe nur abgekühlt wird. Dieser große Temperaturbereich schließt die Verwendung einiger Materialien aus, die in anderen Experimenten in kryogener Umgebung verwendet werden. Zusätzlich dazu soll durch den Betrieb der Kryopumpen auch im warmen Betriebszustand das geforderte Vakuum erzeugt werden. Die Kryopumpen sind zu diesem Zweck mit Strahlungsschilden versehen, um auch unter diesen Bedingungen die benötigten kalten Oberflächen zu gewährleisten. Außerdem werden anders als im kalten Zustand die Turbomolekularpumpen und Ionengetterpumpen bei Raumtemperatur verwendet. Zur Optimierung der Pumpleistung werden außerdem NEG Streifen vom Typ ST707 von SAES Getters verwendet. Diese binden Restgasmoleküle chemisch und erfordern eine bestimmte Reaktionsenergie, die im kalten Zustand

nicht zur Verfügung steht. Aus diesem Grund sind sie zwar auch im kalten Betrieb montiert, tragen jedoch zum Pumpen des inneren Vakuumsystems nicht bei. Diese NEG-Streifen werden in der in Abb. 1.6 dargestellten Form in jeweils vier Vakuumkammern pro Ecke zum Einsatz kommen. Zusätzlich dazu sind zwei etwa 1 m lange Vakuumkammern so ausgelegt, dass auch in ihnen NEG-Streifen verwendet werden können. NEG-Streifen müssen aktiviert werden, um optimale Pumpebeiträge zu liefern. Für den verwendeten Typ bedeutet dies, dass sie mehrfach für 45 min bei einer Temperatur von 450°C gehalten werden müssen. Dies ist notwendig, um die darin gebundenen Restgaskomponenten herauszulösen und konventionell abzupumpen, um die Kapazität dieser NEG-Streifen zu maximieren. Niedrigere Temperaturen zur Aktivierung sind zwar möglich, erhöhen aber gleichzeitig die dafür benötigte Zeit. Durch einen elektrischen Strom durch die NEG-Streifen werden die vom Hersteller empfohlenen Werte erreicht, während gleichzeitig die inneren Vakuumkammern beim Ausheizen nur auf Temperaturen bis 250°C erwärmt werden. Die Konstruktion dieser NEG-Kammern sowie die Erwärmung der ionenoptischen Elemente durch die 450°C warmen Streifen wurden getestet und optimiert [27].

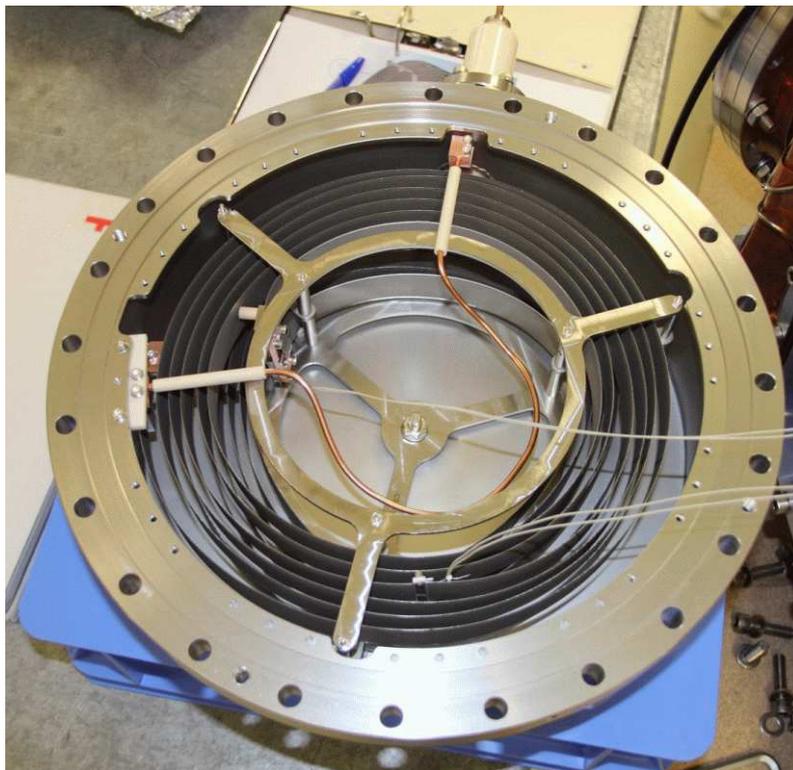


Abbildung 1.6: Gezeigt ist eine der NEG-Kammern zur Montage auf der Vakuumkammer eines 6°- oder 39°-Deflektors (aus [27]). Die NEG-Streifen sind in der Mitte der Kammer spiralförmig aufgewickelt und werden über die Kupferdrähte elektrisch geheizt. Der Durchmesser der dargestellten Vakuumkammer beträgt etwa 320 mm.

Bei Raumtemperatur wird ein Isoliervakuum in der Größenordnung von $10^{-5} - 10^{-6}$ mbar angestrebt. Dies wird durch den Einsatz von mindestens einer Turbomolekularpumpe pro Ecksektion und Linearsektion erreicht. Im kalten Zu-

stand dagegen wird durch die kalten Oberflächen insbesondere der inneren Vakuumkammern nicht nur das Experimentiervakuum gepumpt, sondern auch zusätzlich das Isoliervakuum. Zusätzlich werden Pakete mit Aktivkohle an mehreren ausgewählten kalten Stellen im Isoliervakuum angebracht um mit ihrer extrem großen effektiven Oberfläche eine noch größere Pumpkapazität zu bieten. Deshalb ist im kalten Zustand auch ein besseres Isoliervakuum zu erwarten als bei Raumtemperatur.

Das innere Vakuumsystem des CSR besteht aus mehreren miteinander verschraubten Vakuumkammern. An diesen Stellen und auch für die zahlreichen Blindflansche an diesem Vakuumsystem sind Dichtungen erforderlich, die sowohl den kryogenen Betrieb, als auch das Ausheizen unbeschadet überstehen und gleichzeitig möglichst niedrige Leckraten gewährleisten. Zur Auswahl stehen bei diesen Bedingungen zum einen das häufig verwendete System der Conflat (CF) Flansche und zum anderen Helicoflex-Dichtungen der Firma Garlock. Während für CF-Dichtungen bei den Flanschen ein technisch aufwändiges Profil und eine härtere und teurere Edelstahllegierung (DIN 1.4429 ESU/ANSI 316 LN) erforderlich sind, sind für Helicoflex-Dichtungen nur eine entsprechende Nut mit einer vom Hersteller vorgegebenen Oberflächenrauigkeit und eine weichere und günstigere Edelstahllegierung (DIN 1.4435 ESU/ANSI 316L) erforderlich. Eine Reparatur eines beschädigten Dichtprofils von CF-Flanschen ist an den großen Vakuumkammern nur schwer möglich, während dies bei der Verwendung einer Helicoflex-Dichtung deutlich einfacher ist. Helicoflex-Dichtungen sind zwar teurer als CF-Dichtungen, bei den Flanschen der Vakuumkammern ist die Situation jedoch umgekehrt. Aus diesem Grund werden für das innere Vakuumsystem des CSR Helicoflex-Dichtungen verwendet. Weitere Informationen dazu sind in [28] zu finden.

1.6 Überblick über den Aufbau dieser Arbeit

Zu Beginn dieser Arbeit stand an der Stelle des CSR noch der Prototyp CTF zur Bestätigung der Erreichbarkeit technischer Randbedingungen des CSR. Nach dem Umzug dieses Aufbaus in ein benachbartes Labor wurde mit dem Aufbau des CSR begonnen. Zuerst wurde das äußere Vakuumsystem des CSR aufgebaut und leckgetestet. Im Anschluss konnte der innere Aufbau einer Ecke des CSR erfolgreich durchgeführt und getestet werden.

In Kapitel 2 werden Berechnungen zu den ionenoptischen Komponenten des CSR durchgeführt. Dabei geht es zunächst um die Bestimmung der geometrischen Größen dieser Komponenten, so dass ihre Vorgaben an die Ablenkwinkel erfüllt werden. Zusätzlich werden geeignete Positionen für Detektoren zum Nachweis entstehender Reaktionsfragmente im Bereich der Experiment-Sektionen bestimmt.

Kapitel 3 beschreibt zunächst die Grundlagen der Wärmetransportmechanismen am CSR. Ausgehend davon wird das grundlegende kryogene Design des CSR motiviert. Desweiteren werden die Berechnungen des Wärmetransports kritischer Komponenten für den kryogenen Betrieb des CSR geliefert.

In Kapitel 4 werden Messergebnisse präsentiert, die unter Anderem während zwei Abkühlphasen der ersten Ecke des CSR gewonnen wurden. Dabei wurden technisch anspruchsvolle Messungen zur Positionsgenauigkeit der ionenoptischen Elemente durchgeführt. Außerdem werden die Messungen der Temperaturen innerer CSR-Komponenten während des Abkühlens untersucht und, sofern möglich, mit den theoretischen Vorhersagen aus Kapitel 3 verglichen. Zusätzlich werden die Ergebnisse der Tests aller Komponenten zur Hochspannungsversorgung der ionenoptischen Elemente sowie daraus resultierende notwendige Änderungen gezeigt.

Die Arbeit wird in Kapitel 5 mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf die nächsten Schritte abgeschlossen, die beim weiteren Aufbau des CSR anstehen.

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen und Ergebnisse zu den Strahlführungsrechnungen

Die Ablenkung der Teilchenstrahlen im CSR soll ausschließlich durch elektrostatische Deflektoren erfolgen. Dabei ist geplant, eine 90°-Ablenkung durch eine 6°, zwei 39°- und nochmals eine 6°-Ablenkung zu realisieren. Technisch wäre es möglich auch eine einzige 90°-Ablenkung zu konstruieren. Da für den späteren Experimentierbetrieb, insbesondere durch Experimentiersektion des Elektronenkühlers bzw. -targets, Experimente vorgesehen sind, bei denen der gespeicherte Ionenstrahl z.B. über den Prozess der Dissoziativen Rekombination, neutrale Reaktionsprodukte entstehen, ist eine einzige 90°-Ablenkung am CSR nicht möglich. Diese neutralen Teilchen sind von großer Bedeutung für diese Experimente und müssen deshalb detektiert werden. Da sie neutral sind, werden sie von der Ionenoptik nicht beeinflusst und fliegen vom Ort ihrer Entstehung aus geradeaus weiter. Es ist zu erwarten, dass dabei auch Impulskomponenten transversal zur ursprünglichen Ionentrajektorie auftreten. Aus diesem Grund wurde für den CSR das erwähnte Ablenkungsschema entwickelt. Mit der Wahl dieser Ablenkwinkel sowie dem Abstand gegenüberliegender Quadrupolelektroden von 10 cm, dem großen Elektrodenabstand in den 6°-Deflektoren von 12 cm und dem Abstand zwischen 6°- und 39°-Deflektor von über einem Meter soll der Nachweis neutraler Reaktionsprodukte ermöglicht werden. Diese Maßnahmen sorgen dafür, dass neutrale Teilchen, die in der Mitte einer der geraden Experimentsektionen entstehen, die ionenoptischen Komponenten passieren können, sofern sie sich innerhalb eines Kegels mit einem Öffnungswinkel von $\pm 1^\circ$ von ihrem Entstehungsort aus bewegen (siehe dazu auch Abb. 2.1 und 2.25).

Für die späteren Experimente sollte der Anteil der nachweisbaren Neutralteilchen möglichst groß sein, dies ist jedoch technisch sehr aufwändig. Die dafür benötigten, im Durchmesser größeren, Vakuumkammern wären unproblematisch, aber die Abstände der Elektroden der ionenoptischen Elemente müssten ebenfalls vergrößert werden. Um dann die Ablenkwinkel zu gewährleisten müssten entweder die Elektrodenspannungen deutlich erhöht werden, oder die Komponenten alle länger gebaut werden. Die Elektrodenspannungen wie sie aus den Berechnungen in diesem Kapitel resultieren sind bereits im Bereich dessen, was mit vertretbarem Aufwand

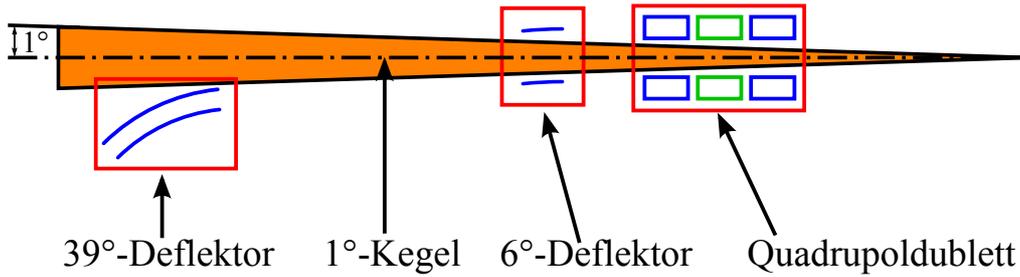


Abbildung 2.1: Dargestellt ist die gewählte Konstruktion der 90° -Ablenkung in der Draufsicht, die aus zwei aufeinanderfolgenden 45° -Ablenkungen, wie sie in dieser Abbildung dargestellt sind.

zu realisieren ist. Längere ionenoptische Komponenten werden dagegen ausgeschlossen durch den in der Halle zur Verfügung stehenden Platz und die benötigte Länge der Experimentsektionen. Damit ist die getroffene Wahl der Realisierung der 90° -Ablenkungen bereits die an die örtlichen und technischen Grenzen optimierte Lösung. Diese Lösung ermöglicht auch die Injektion der Strahlteilchen in den CSR, indem der Ionenstrahl entlang einer der Geraden in den CSR geschossen wird, während der dabei passierte 6° -Deflektor gerdet ist. Dieser Deflektor wird nach dem passieren des Ionenstrahls innerhalb von maximal $1\ \mu\text{s}$ auf die notwendige Ablenkspannung gefahren, und erreicht damit die notwendigen elektrostatischen Felder bevor der Ionenstrahl diese Position wieder erreicht. Die Ablenkung soll durch Deflektoren erfolgen, die aus zwei Elektroden bestehen, die sich auf verschiedenen elektrischen Potentialen befinden. Diese werden sich durch Aufbau- und Wartungsarbeiten auch eine gewisse Zeit an Luft befinden. Dabei kann es vorkommen, dass die Oberflächen dieser Komponenten oxydieren, oder durch andere Luftbestandteile eine elektrisch isolierende Schicht bilden, und damit verhindern, dass auf den kompletten Oberflächen dasselbe elektrische Potential erreicht wird. Da bei Gold an Luft keine derartige Oberflächenreaktionen zu erwarten sind, sind die ionenoptischen Komponenten des CSR galvanisch vergoldet, wie es in Abb. 2.2 am Beispiel eines Quadrupoldubletts gezeigt ist.

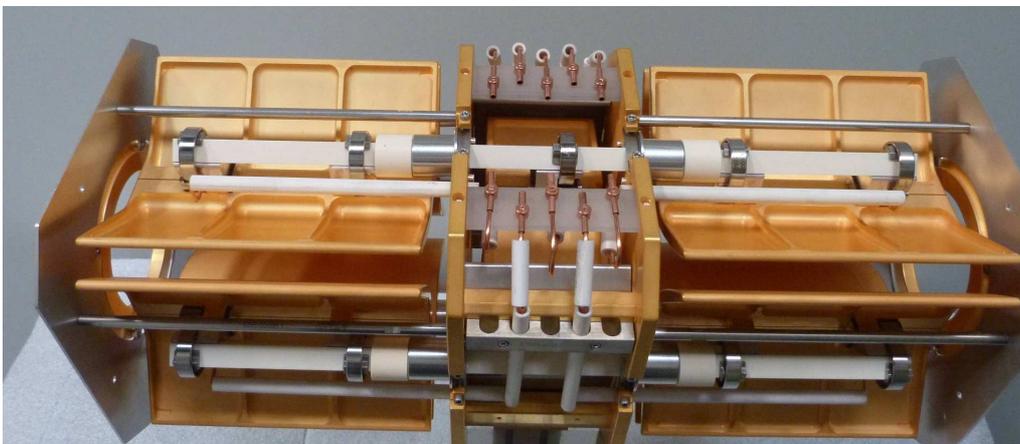


Abbildung 2.2: Gezeigt ein Quadrupoldublett, als Beispiel für die am CSR vergoldeten ionenoptischen Komponenten.

Da die elektrischen Felder am Ende der Elektroden Randfelder bilden, muss dies bei der Planung der geometrischen Größen der Deflektoren berücksichtigt werden. Da der CSR außerdem im kalten und im warmen Zustand betrieben werden soll, ist es aufgrund der thermischen Expansion nicht möglich, dass die Elektrodenmaße in beiden Zuständen die Vorgaben erfüllen. Der kalte Betriebsmodus hat jedoch Priorität. Deshalb sind die Deflektoren derart geplant, dass sie die Sollmaße im kalten Zustand erreichen, während im warmen Zustand die Abweichungen kompensiert werden müssen. Um die benötigten realen Längen der Deflektoren zu bestimmen, wurden CAD-Modelle davon mittels des Softwarepakets Opera3D Tosca¹ analysiert. Die Krümmungsradien für die 6°-Deflektoren wurden auf 2000 mm und die der 39°-Deflektoren auf 1000 mm festgelegt. Daraus und aus den effektiven Deflektorwinkeln resultieren dann die entsprechenden benötigten geometrischen Winkel. Die Analyse mit Opera3D Tosca erfolgt durch eine Finite Elemente Methode (FEM), bei der ein Körper zuerst mit einem Netz in kleine Flächen- bzw. Volumeneinheiten (Tetraeder) unterteilt wird. Anschließend werden die Differentialgleichungen der elektrischen Felder, unter Berücksichtigung der Randbedingungen durch z.B. fest definierte elektrische Potentiale, innerhalb dieser Objekte numerisch gelöst. Welche genaue Methode dabei zur Lösung verwendet wird wird vom Hersteller nicht angegeben. Die Lösung besteht dann in diesem Fall aus den drei elektrischen Feldkomponenten in jedem Punkt des Gitters in das der Körper zerlegt wurde. Damit lassen sich im Anschluss z.B. Trajektorien geladener Teilchen simulieren. Die genaue Einstellung, die zur Erstellung des Netzes der Deflektoren verwendet wurden, sind am Ende der jeweiligen Abschnitte zu finden. Für den Anwendungsfall, dass große Objekte (die Elektroden der 39°-Deflektoren sind ca. 700 mm lang) untersucht werden, und dabei die einzelnen Zellen teilweise weniger als 1 mm lang sind, zeigten sich Probleme bei den zuständigen Algorithmen zum Erzeugen des Netzes. In diesen Fällen war es notwendig, manuell zusätzliche Schnittebenen einzuführen, mit denen die Erzeugung des Netzes zuverlässig funktionierte. Diese Methode wird im Handbuch [29] für derartige Problemfälle empfohlen.

Die Elektroden der Deflektoren sind entsprechend der oben genannten Radien und Ablenkwinkel gekrümmt. Das Feld zwischen den Deflektorelektroden kann in erster Näherung durch das Feld eines Zylinderkondensators beschrieben werden. Dabei folgt das elektrische Feld E_f auf der Sollbahn aus dem Potential $U(r_r)$ einer Elektrode mit Radius r_e und dem Radius der Sollbahn R gemäß:

$$E_f(R) = \frac{U(r_e)}{R \ln(R/r_e)}. \quad (2.1)$$

Gleichzeitig folgt aus der Energieerhaltung im relativistischen Fall für ein Teilchen mit Masse m , Geschwindigkeit v und Ladung Q im elektrischen Feld E_f :

$$\frac{\gamma m v^2}{R} = Q E_f. \quad (2.2)$$

¹Opera3D ist ein FEM (Finite Elemente Methode)-Programm der Firma Vectorfields, das unter anderem die für uns interessante elektrostatische und magnetostatische Analyse von dreidimensionalen Modellen erlaubt.

Mit dem relativistischen γ -Faktor:

$$\gamma = \frac{T_{kin} + mc^2}{mc^2}, \quad (2.3)$$

mit der kinetischen Energie T_{kin} und der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c , folgt daraus direkt die Geschwindigkeit der Strahlteilchen zu:

$$v = c \sqrt{\frac{T_{kin}(T_{kin} + 2mc^2)}{(T_{kin} + mc^2)^2}}. \quad (2.4)$$

Einsetzen von Gleichung (2.2), (2.3) und (2.4) in Gleichung (2.1) liefert dann für die Elektrodenspannung $U(r_e)$:

$$U(r_e) = -mc^2 \frac{T_{kin}(1 + \frac{T_{kin}}{mc^2})(T_{kin} + 2mc^2)}{Q(T_{kin} + mc^2)^2} \ln(R/r_e). \quad (2.5)$$

In nichtrelativistischer Näherung, d.h. $\gamma = 1$, kann statt Gleichung (2.2)

$$\frac{2T_{kin}}{R} = E_f Q \quad (2.6)$$

verwendet werden. Daraus resultiert das im Vergleich zur relativistischen Rechnung einfachere Verhältnis

$$U = -\frac{2T_{kin} \ln(R/r_e)}{Q}. \quad (2.7)$$

Die maximale Energie der Teilchen, für die der CSR ausgelegt ist, beträgt 300 keV. Es ist relativ problemlos möglich, für die nichtrelativistische Näherung (Gleichung (2.7)) die benötigten Elektrodenspannungen für kleinere Teilchenenergien entsprechend zu skalieren. Die Berechnungen wurden für Protonen dieser Energie durchgeführt, da in Opera3D dafür bereits eine eigene Funktion zur Berechnung der Trajektorien implementiert ist. Protonen der genannten Energie sind die leichtesten Teilchen, d.h. alle anderen zu speichernden Teilchen haben aufgrund ihrer höheren Masse eine Geschwindigkeit, die kleiner als die der 300 keV Protonen ist. Selbst für diese werden bei diesen kinetischen Energien nur maximale Geschwindigkeiten in der Größenordnung von etwa 2% der Lichtgeschwindigkeit erreicht. Für die 6°-Deflektoren wurden die Krümmungsradien der Elektroden auf $r_{\text{innen}} = 1940$ mm und $r_{\text{außen}} = 2060$ mm festgelegt. Die Spannungen, die an den Elektroden angelegt sein müssen, um die Protonen auf der Sollbahn zu halten, folgen dann aus Gleichung (2.5) zu $U_{\text{innen}} = -18272,60$ V und $U_{\text{außen}} = 17732,45$ V. Für die 39°-Deflektoren erhält man dieselben Werte für die Spannungen für den Radius der Sollbahn 1000 mm bei den Krümmungsradien der Elektroden $r_{\text{innen}} = 970$ mm und $r_{\text{außen}} = 1030$ mm. Der Grund liegt darin, dass zwar der Radius der Sollbahn im Vergleich zum 6°-Deflektor halbiert wurde aber auch gleichzeitig der Abstand der beiden Elektroden von der Sollbahn halbiert wurde. In Abb. 2.3 sind die theoretischen Werte der Deflektorspannungen in Abhängigkeit der kinetischen Energie der gespeicherten Ionen aufgetragen. Da die theoretischen Berechnungen auf der Annahme eines idealen Zylinderkondensators beruhen, ist anzunehmen, dass die tatsächlich notwendigen Spannungen leicht von der Theorie abweichen.

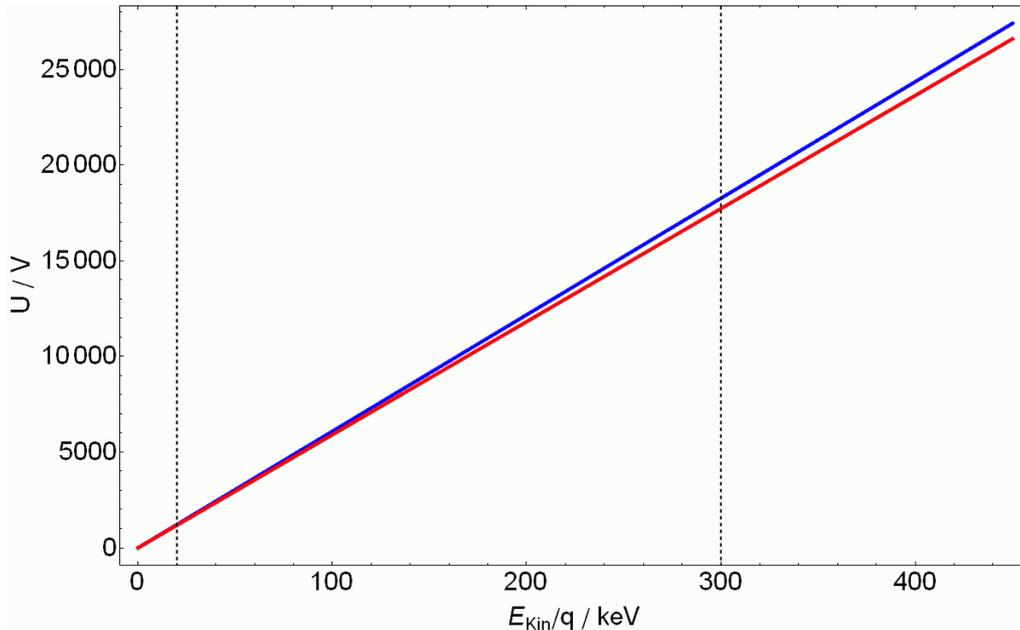


Abbildung 2.3: Gezeigt ist der Betrag der im Idealfall notwendigen Spannung auf der inneren (blau) und äußeren (rot) Elektrode in den 6°- und 39°-Deflektoren in Abhängigkeit von der kinetischen Energie der zu speichernden Ionen. Die gestrichelten Linien markieren dabei den Bereich von 20 keV bis 300 keV für den der CSR ausgelegt ist. Die Vorzeichen der Spannung ergeben sich aus dem Ladungszustand der zu speichernden Ionen.

2.1 FEM-Simulationen für den 6°-Ablenker

In einem einfachen Modell [30, 31] wurde bereits im Vorfeld zu dieser Arbeit die notwendige geometrische Länge des 6°-Deflektors zu 5,48° bestimmt. Ausgehend von diesem Wert konnten mit einem realistischeren Modell die anzulegenden Potentiale sowie die reale Elektrodenlänge überprüft werden. Das verwendete Modell bestand in diesem Fall aus den beiden Deflektorelektroden sowie einem Rahmen, an dem diese später befestigt werden (siehe Abb. 2.4). Die Vakuumkammer ist, abgesehen von den Flanschen, zylinderförmig und wurde deshalb durch einen Zylinder für den Kammerkörper sowie zwei Zylindern für die Flansche zu den anderen Kammern des Experimentiervakuum in der Simulation berücksichtigt.

Das im Folgenden verwendete Koordinatensystem (siehe dazu auch Abb. 2.5) ist ein karthesisches Koordinatensystem mit dem Ursprung in der Mitte eines Deflektors. Dabei definieren die x- und z-Achsen die Strahlebene, während die y-Achse darauf senkrecht steht. Die z-Achse ist so gewählt, dass sie im Ursprung mit der Sollbahn der Teilchen übereinstimmt. Die x-Achse zeigt vom Ursprung in Richtung des Mittelpunkts der gekrümmten Bahn.

Das elektrische Feld zwischen den beiden Elektroden stimmt in der Realität nur grob mit dem Feld überein, das man gemäß Gleichung (2.7) bzw. Gleichung (2.2) erwarten würde. Ursache dafür sind die Randfelder, die zwangsläufig vorhanden sind, da anders als im Modell des Zylinderkondensators zum einen kein komplett geschlossener Zylinder vorhanden ist, und zusätzlich auch die Ausdehnung der Elektroden

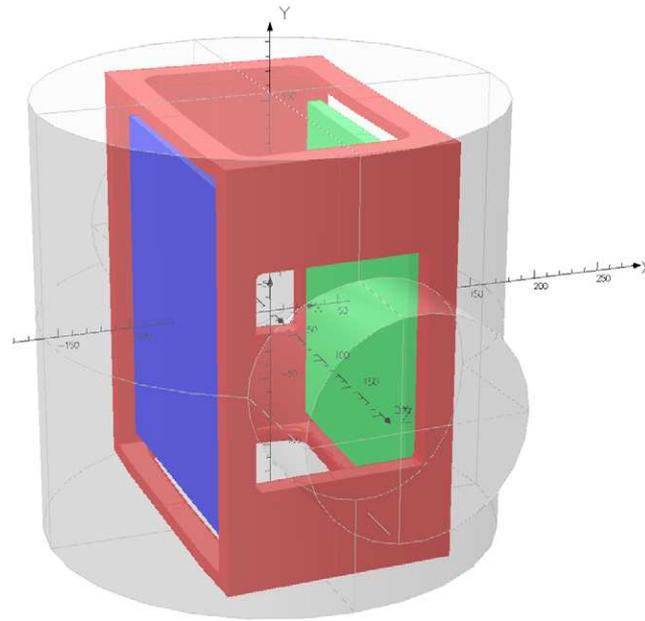


Abbildung 2.4: Dargestellt ist das Modell des 6° -Deflektors. Die Elektroden sind dabei in blau bzw. in grün dargestellt, der Rahmen in rot und die Kammer selbst transparent. Der Rahmen und die Kammer werden dabei auf Massepotential gehalten, während sich die Elektroden auf etwa ± 18 kV befinden. Das Vorzeichen ergibt sich hierbei direkt aus dem Ladungszustand der zu speichernden Teilchenspezies.

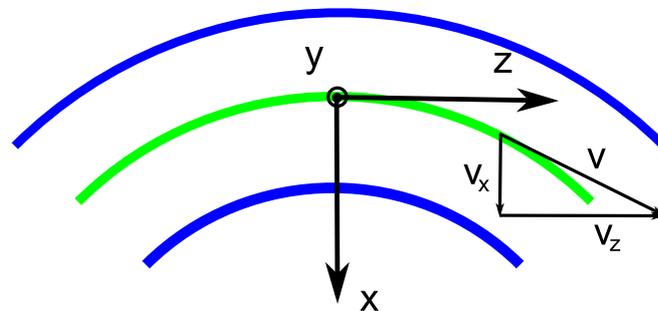


Abbildung 2.5: Gezeigt ist die Wahl des Koordinatensystems bzgl. der Elektroden eines Deflektors (blau) und der Sollbahn der Teilchen (grün). Als Koordinatensystem wurde ein kartesisches Koordinatensystem gewählt, dessen Ursprung jeweils in der Mitte des betrachteten Deflektors liegt. Dabei ist die y-Achse senkrecht zur Strahlebene ausgerichtet, die z-Achse in Strahlrichtung und die x-Achse entsprechend senkrecht dazu.

senkrecht zur Strahlebene endlich ist. In Abb. 2.6 ist exemplarisch das elektrische Feld, wie es aus der Simulation mit Opera3D folgt, aufgetragen. Zum Vergleich ist ebenfalls der Feldverlauf gemäß Gleichung (2.2) dargestellt. Um trotzdem die Teilchen auf ihrer Sollbahn halten zu können, wurden die Elektrodenspannungen so skaliert, dass das Feld in der Mitte des Deflektors auf der Sollbahn (im Modell entspricht dies den Koordinaten $(0,0,0)$) mit dem durch die Berechnung vorhergesagten

Wert übereinstimmt. Mit diesen Werten als neue Randbedingung wurden dann die elektrischen Felder erneut berechnet und mit Hilfe dieser Lösung Protonentrajektorien simuliert. Dabei wurde jeweils ein Proton mit 300 keV kinetischer Energie ausgehend von der Mitte des Deflektors in positive und negative z -Richtung geschickt. Um die Effekte der Randfelder zu berücksichtigen, mussten die Trajektorien auch im Bereich außerhalb der Elektroden berechnet werden. Die Summe der beiden Ablenkwinkel sollte dann im Idealfall mit dem Sollwert von 6° übereinstimmen. Aus der Simulation der Bahnen mit Opera3D entstanden dann jeweils eine Punktmenge aus den Ortskoordinaten x , y , z und den Geschwindigkeitskomponenten v_x , v_y und v_z . Aus diesen Geschwindigkeitskomponenten wurden dann über $\alpha = \arctan(v_x/v_z)$ der resultierende Ablenkwinkel bestimmt. Berechnungen mit den vereinfachten Modellen im Vorfeld [30, 31] zu den hier aufgeführten genaueren Untersuchungen hatten bereits die Abweichungen des radialen elektrischen Feldes vom Sollwert bei den 6°-Deflektoren gezeigt. Eine Berechnung des kompletten Rings zeigte dabei, dass dies jedoch keine negativen Auswirkungen auf die Akzeptanz des Ringes haben wird. Diese wird demnach allein durch den Elektrodenabstand der Quadrupole und die Größe des homogenen Feldgradienten transversal zur Strahlrichtung in den Quadrupolen bestimmt.

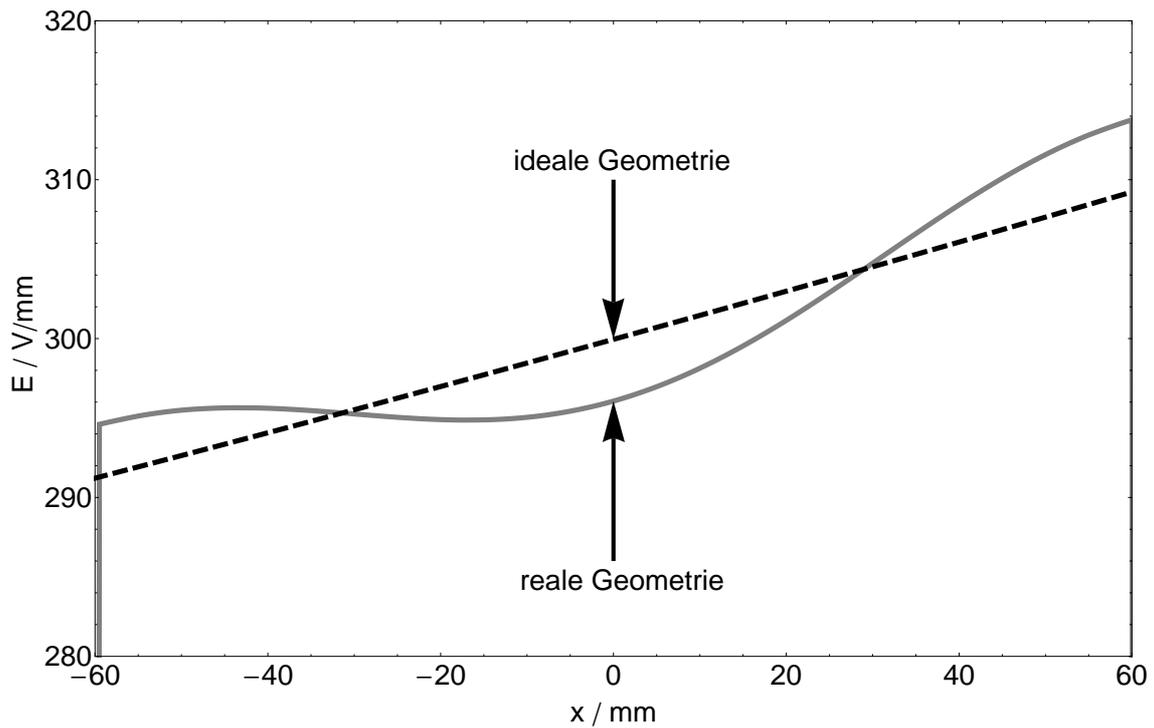


Abbildung 2.6: Dargestellt ist der Betrag der elektrischen Feldstärke innerhalb des 6°-Deflektors auf einem Pfad in radialer Richtung. Die gestrichelte Linie stellt den Verlauf für die idealisierte Annahme des Zylinderkondensators dar, die durchgezogene Linie für die Simulation der realen Geometrie mit Opera3D. Die Unterschiede resultieren aus den Randfeldern sowie der endlichen Höhe der Elektroden, die zusammen das Feld im Vergleich zum Zylinderkondensator verzerren. Der Bereich auf der x -Achse von -60 mm bis $+60$ mm entspricht dabei dem Bereich zwischen den beiden Elektroden in radialer Richtung.

Die Analyse des Modells mit einem Elektrodenwinkel von $5,48^\circ$ zeigte, dass die Spannungen ausgehend von $U_{\text{innen}} = -18272,60 \text{ V}$ und $U_{\text{außen}} = 17732,45 \text{ V}$ auf $-18507,86 \text{ V}$ und $17967,66 \text{ V}$ angepasst werden mussten. In Abb. 2.7 ist das korrigierte Feld im Vergleich mit den Sollwerten in radialer Richtung durch den Punkt $(0,0,0)$ aufgetragen. Durch diesen Punkt verläuft die Sollbahn der Teilchen. Deswegen war es die höchste Priorität, dass dort das Feld mit dem Sollwert möglichst gut übereinstimmt. Aufgrund der Geometrie ist es jedoch nicht ohne großen technischen Aufwand möglich, das Feld auch in anderen Bereichen dem Sollfeld anzupassen.

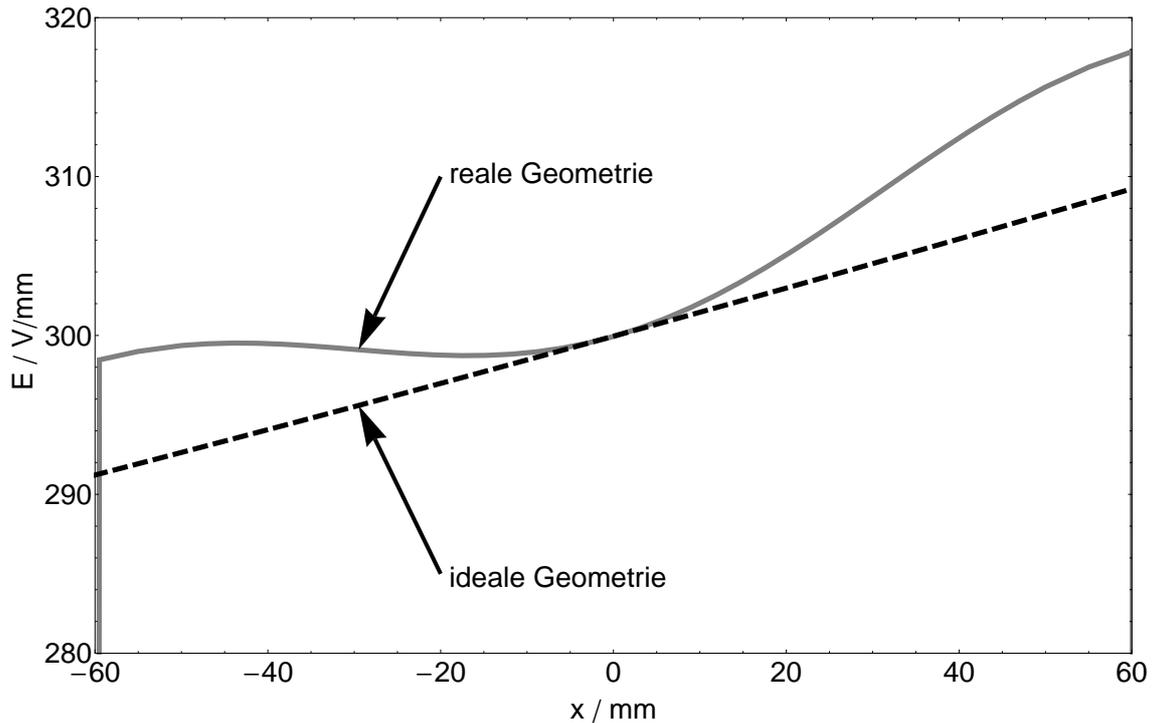


Abbildung 2.7: Wie in Abb. 2.6 wird auch hier der Betrag des elektrischen Felds in radialer Richtung aus der Analyse mit Opera3D mit dem theoretischen Wert (gestrichelt) verglichen. Hierbei wurden jedoch die Elektrodenspannungen dahingehend geändert, dass der Verlauf des elektrischen Felds unverändert bleibt, aber einen offset bekommt, so dass das Feld in der Mitte zwischen den beiden Elektroden, also auf der Sollbahn, mit dem Sollwert übereinstimmt.

Im Idealfall existiert zwischen den Elektroden keine Feldkomponente in y -Richtung, d.h. senkrecht zur Strahlebene. Aufgrund der Symmetrie des Modells sind auch in der Opera3D-Analyse in diesem Bereich keine Anteile des Felds in dieser Richtung zu erwarten. In Abb. 2.8 ist das Resultat aus Opera3D für den interessanten Bereich um die Sollbahn dargestellt. Da hier anders als zu erwarten ein Feld in y -Richtung von bis zu $3 \cdot 10^{-2} \text{ V/mm}$ zu erkennen ist, ist davon auszugehen, dass es sich dabei wahrscheinlich um die Grenzen der Rechengenauigkeit handelt. Die relative Genauigkeit der berechneten elektrischen Feldstärken der Deflektoren liegen in der Größenordnung von etwa 1×10^{-4} .

Aus der Analyse dieses Modells konnten dann die Ablenkwinkel für die oben genannten 300 keV Protonen bestimmt werden. Die Ablenkwinkel waren $2,962^\circ$ für

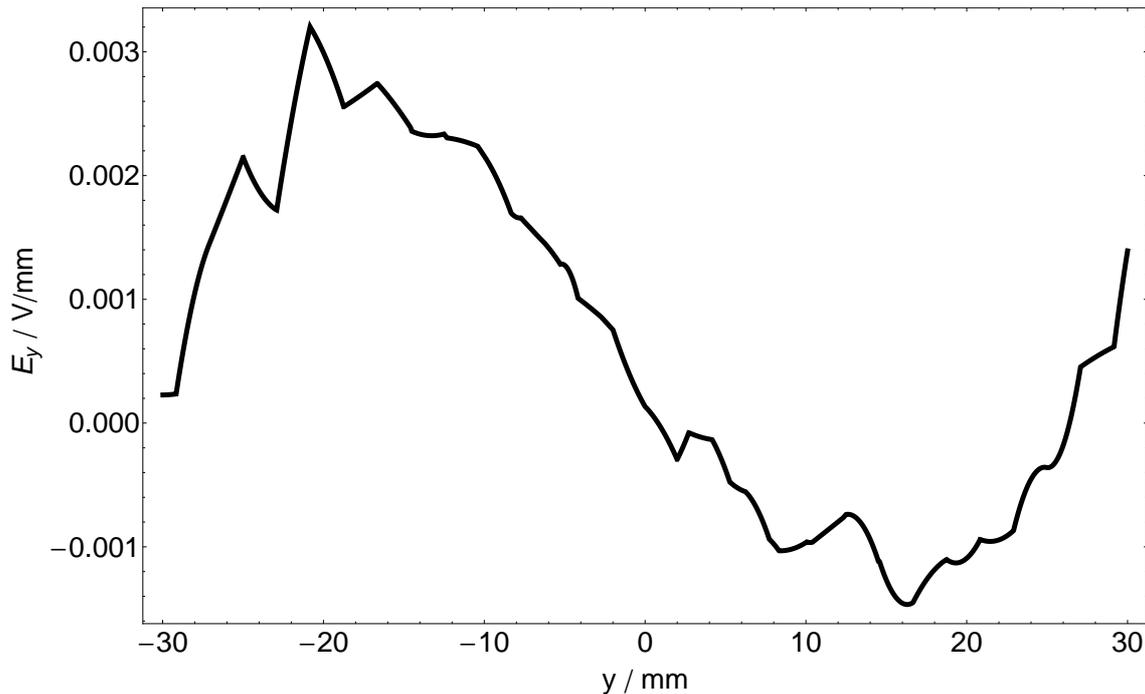


Abbildung 2.8: Dargestellt ist die elektrische Feldkomponente E_y senkrecht zur Strahlebene in der Mitte des 6°-Deflektors. Da dieser Anteil um etwa 5-6 Größenordnungen kleiner ist als die radiale Komponente in diesem Bereich, kann davon ausgegangen werden, dass die Auswirkungen auf die Trajektorien vernachlässigbar sind.

die positive und $2,931^\circ$ für die negative z-Richtung, was einen gesamten Ablenkwinkel von $5,893^\circ$ bedeutet. Unter der Annahme, dass der Beitrag Randfelder zum Ablenkwinkel beim ändern der Elektrodenlänge konstant bleiben, ergibt sich als neue Elektrodenlänge $5,58^\circ$. Diese Annahme ist angemessen, da für die Randfelder der Bereich zwischen den Deflektorelektroden und dem Elektrodenkäfig entscheidend ist, der bei der Anpassung des Elektrodenwinkels unverändert bleibt, d.h. der Elektrodenkäfig wird zusammen mit den Elektroden geändert, so dass alle Abstände dazwischen erhalten bleiben. Die Asymmetrie der Ablenkwinkel bei der Berechnung der Trajektorie entlang der positiven bzw. der negativen z-Achse ist aufgrund der Symmetrie des Modells nicht zu erklären und kann deshalb nur mit der limitierten Rechengenauigkeit erklärt werden. In dem neuen Modell mussten die Elektrodenspannungen leicht auf die Werte $U_{innen} = -18493,19 \text{ V}$ und $U_{außen} = 17953,03 \text{ V}$ erneut korrigiert werden. Die relative Abweichung des elektrischen Felds vom theoretischen Wert ist danach nur noch in der Größenordnung von $1 \cdot 10^{-6}$. Die resultierenden Ablenkwinkel für Protonen, die entlang der z-Achse starten, sind in Abb. 2.9 dargestellt. Sie betragen $3,0011^\circ$ für Protonen entlang der negativen z-Achse und $3,0006^\circ$ entsprechend entlang der positiven z-Achse. Insgesamt werden Protonen dabei also um $6,0017^\circ$ abgelenkt. Die $0,0017^\circ$ Abweichung vom Sollwert entsprechen bei dem verwendeten Bahnradius von 2000 mm einem Kreisbogen von 0,060 mm und sind damit im Vergleich mit den Fertigungstoleranzen zu vernachlässigen, so dass für die Elektrodenlänge der Winkel von $5,58^\circ$ verwendet wird.

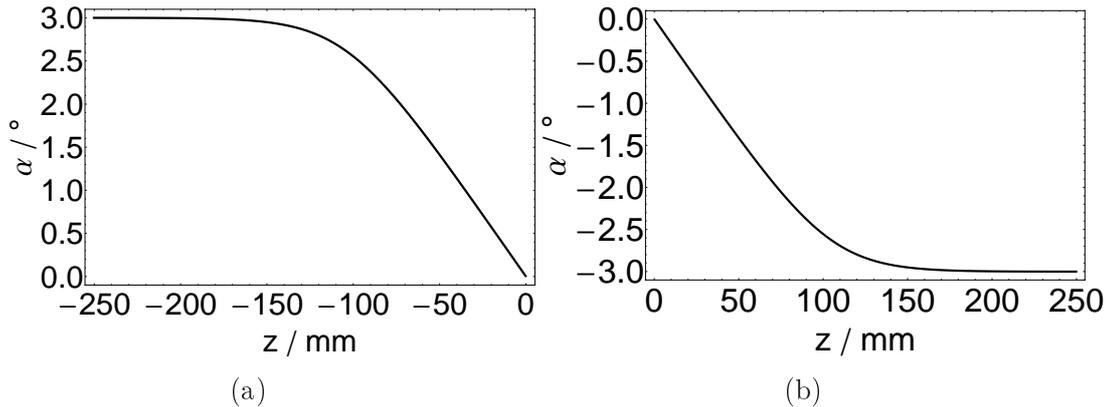


Abbildung 2.9: Ablenkungswinkel des 6° -Deflektors bei einer Elektrodenlänge von $5,58^\circ$. In (a) startet das Proton in negative z-Richtung und wird insgesamt um $3,0011^\circ$ abgelenkt. In (b) ist der andere Fall dargestellt, d.h. mit einem Proton, das in positive z-Richtung startet und dabei um $3,0006^\circ$ abgelenkt wird. Zusammen bedeutet das eine Ablenkung um $6,0017^\circ$.

Die Ausgangsspannung der Netzteile für die Einzelektroden soll später mit einer 16 bit-Auflösung zwischen 0 und 30 kV eingestellt werden können. Das bedeutet, dass die Spannungen nur auf $\pm 0,46$ V genau eingestellt werden können. Aus diesem Grund wurde zusätzlich mit Elektrodenspannungen die um diesen Wert vom Sollwert abweichen die Auswirkung auf die Ionenbahn mit Opera3D für den 6° -Deflektor untersucht. Die Abweichungen vom Ablenkungswinkel für den exakten Fall waren in der Größenordnung von $0,0002^\circ$ und stellen damit kein Problem dar. Ein zweites mögliches Problem könnte auftreten, wenn sich beim Abkühlen des Systems die Vakuumkammer relativ zu den ortsfesten Elektroden verschiebt. Bei den Dimensionen des CSR sind Längskontraktionen bei den Elektroden im Bereich von wenigen Millimetern zu erwarten. Aus diesem Grund wurde eine weitere Analyse durchgeführt, bei der die Vakuumkammern entlang der x- und z-Achse um jeweils 5 mm von der Sollposition verschoben wurden. Obwohl die Seitenflächen der Elektroden nach außen hin zur Vakuumkammer nicht abgeschirmt sind, zeigten die Ergebnisse dieser Untersuchung nur eine Abweichung von $0,002^\circ$. Damit sind diese Auswirkungen zwar um eine Größenordnung größer als die Auswirkungen der maximalen Genauigkeit der Spannungseinstellung, liegen aber in der gleichen Größenordnung wie die Auswirkungen der zu erwartenden Fertigungstoleranzen. Aus diesem Grund es werden keine Probleme erwartet.

Für den Betrieb des CSR ist vorgesehen, mit Hilfe der 6° -Deflektoren Strahlagekorrekturen durchzuführen, sofern diese sich als notwendig erweisen sollten. Diese Notwendigkeit kann erst im Betrieb selbst festgestellt werden. Dabei werden Softwarepakete wie z.B. MAD² [32] zur Beschreibung und Optimierung der Abbildungseigenschaften ionenoptischer Elemente mit Hilfe des in der Beschleunigerphysik üblichen Matrixformalismus [33] verwendet. Mit ihnen lässt sich im Falle einer Abweichung der Ionentrajektorien dann ein Korrekturwinkel errechnen. Den Deflektorwin-

²Methodical Accelerator Design: Ein Softwarepaket zum Design und Entwurfsprogramm für Speicherringe, entwickelt vom CERN

kel kann man später nur durch die Elektrodenspannung ändern, da es nicht möglich sein wird die Elektrodenlänge zu variieren. Um deshalb Elektrodenspannungen in Ablenkwinkel umrechnen zu können, wurden mit Opera3D Simulationen bei gleicher Geometrie, aber unterschiedlichen Elektrodenspannungen durchgeführt. Da es sich im vorliegenden Fall nicht um einen einfachen Plattenkondensator handelt, sind die Spannungen an den beiden Elektroden nicht bis auf das Vorzeichen identisch. Aus diesem Grund ist nicht die Elektrodenspannung selbst sondern deren relative Abweichung $\Delta U/U_0$ vom Idealfall U_0 mit Ablenkwinkel $\alpha = 6,0017^\circ$ untersucht worden. In Abb. 2.10 ist dieser Zusammenhang dargestellt.

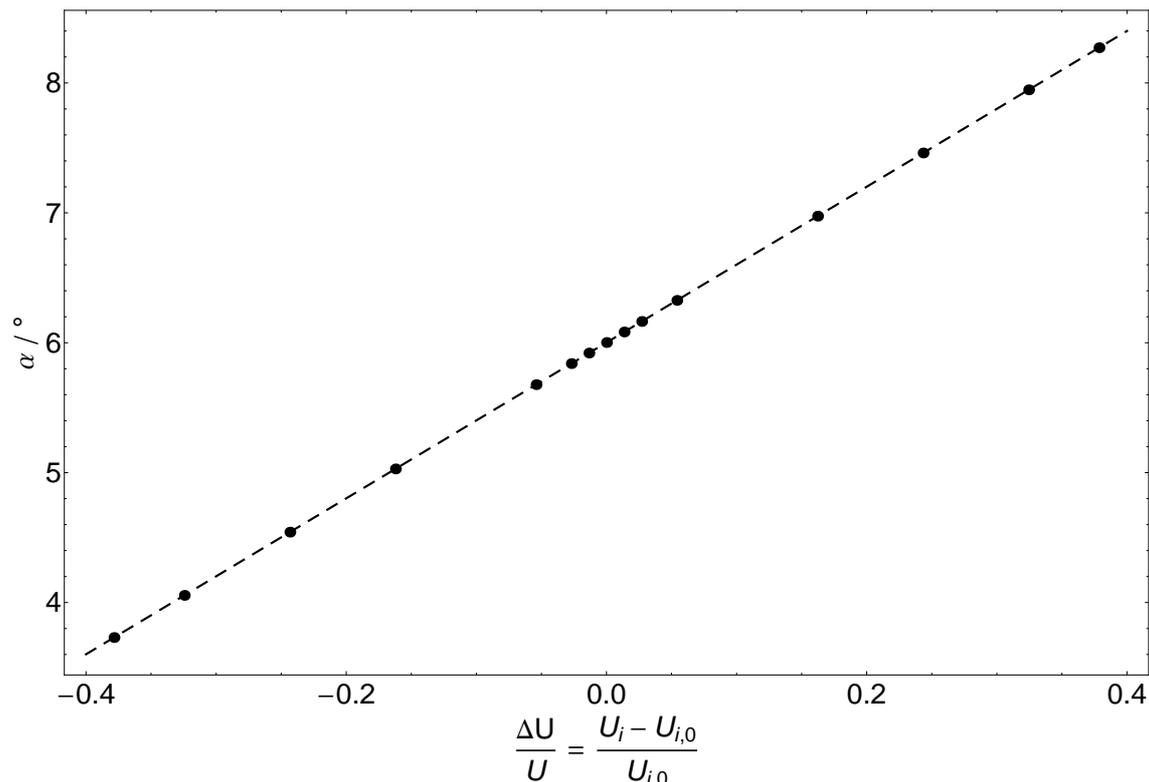


Abbildung 2.10: Der Ablenkwinkel des 6°-Deflektors ist in Abhängigkeit von der relativen Abweichung der Elektrodenspannungen vom Sollwert dargestellt. Dabei steht U_i für die Spannung der äußeren bzw. inneren Elektrode, und U_i^0 für den entsprechenden Sollwert. Die gestrichelte Linie zeigt zusätzlich den Verlauf des Fits (die entsprechenden Fitparameter stehen in Tabelle 2.1). Mit diesen Werten können notwendige horizontale Strahlkorrekturen durchgeführt werden.

In erster Näherung besteht ein linearer Zusammenhang zwischen Ablenkwinkel und relativer Spannungsänderung. Um später die nötigen Spannungen möglichst genau einstellen zu können, wurden die Punkte mit der Funktion $\alpha = au^2 + bu + c$ mit $u = \Delta U/U$ angepasst. Die resultierenden Fitparameter sind in Tabelle 2.1 dargestellt.

Bei der Simulation mit Opera3D war es erforderlich, die Netzgröße für die verschiedenen Komponenten des Deflektors anzugeben. Dabei bedeutet ein feineres Netz zwar eine höhere Genauigkeit, aber gleichzeitig auch einen deutlich größeren Rechenaufwand. Es stellte sich heraus, dass es von von der Genauigkeit her ausreicht,

Tabelle 2.1: Aufgelistet sind die Fitparameter der Funktion $\alpha(u) = au^2 + bu + c$ mit der die Abhängigkeit des Ablenkwinkels von der angelegten Elektrodenspannung am 6° -Deflektor beschrieben werden kann.

Parameter	Wert / $^\circ$	Fehler (aus Fit) / $^\circ$
a	$-5,566 \cdot 10^{-3}$	$\pm 1,176 \cdot 10^{-3}$
b	5,99824	$< 3 \cdot 10^{-5}$
c	6,00173	$< 1 \cdot 10^{-6}$

in einem begrenzten Volumen um die Sollbahn herum mit einem feinen Netz zu arbeiten und in anderen Bereichen ein groberes Netz zu verwenden. Dies wird durch den Parameter „Meshsize“ beschrieben. Ein weiterer wichtiger Parameter für die Simulationen ist der sog. „Data storage level“, der beschreibt, welche Eigenschaften Priorität haben, wenn sich z.B. zwei Körper mit verschiedenen Netzeinstellungen berühren oder überlappen. Zusätzlich wurde über den Parameter „Boundary condition“ die anzulegende Spannung festgelegt. Abb. 2.11 zeigt die verschiedenen Bereiche der 6° -Deflektoren, die jeweils mit unterschiedlichen Parametern berücksichtigt wurden. In Tabelle 2.11 sind die für die Berechnungen zum 6° -Deflektor verwendeten Parameter aufgelistet.

Tabelle 2.2: Aufgelistet sind die gewählten Parameter bei den FEM-Simulationen der 6° -Deflektoren. Der Parameter „Meshsize“ gibt die maximale Kantenlänge der Tetraeder an, in die das 3D-Objekt zerlegt wird.

Bereich	Meshsize / mm	Data Storage Level	Boundary Condition
Vakuumkammer	4	31	0 V
Elektrodenkäfig	5	35	0 V
Elektroden	4	50	-18,493 kV +17,953 kV
Sollbahn	2	70	keine

Der 6° -Deflektor benötigt für 300 keV Strahlenergie maximale Spannungen von ± 25 kV, bei denen eine gleichzeitige horizontale Strahllagekorrektur von bis zu 1° möglich ist. Dies wird als ausreichend für den späteren regulären Betrieb betrachtet, da dieser Wert für jeden einzelnen 6° -Deflektor separat möglich ist und damit insgesamt die effektiv möglichen Korrekturen deutlich größer sind.

Aufgrund der Komplexität des Deflektors mit feinem Netz und gleichzeitig großem Volumen war es zusätzlich notwendig, Schnittebenen im Modell einzuführen, um kleinere zusammenhängende Unterabschnitte zu generieren. Andernfalls brach der Algorithmus zur Erstellung des Netzes ab. Mehr Hauptspeicher in dem verwendeten Computer schafft zwar Abhilfe, ist aber durch den derzeitigen Stand der Technik sowie den Speicherpreis zum Zeitpunkt der Simulationen auf 32 GB begrenzt gewesen.

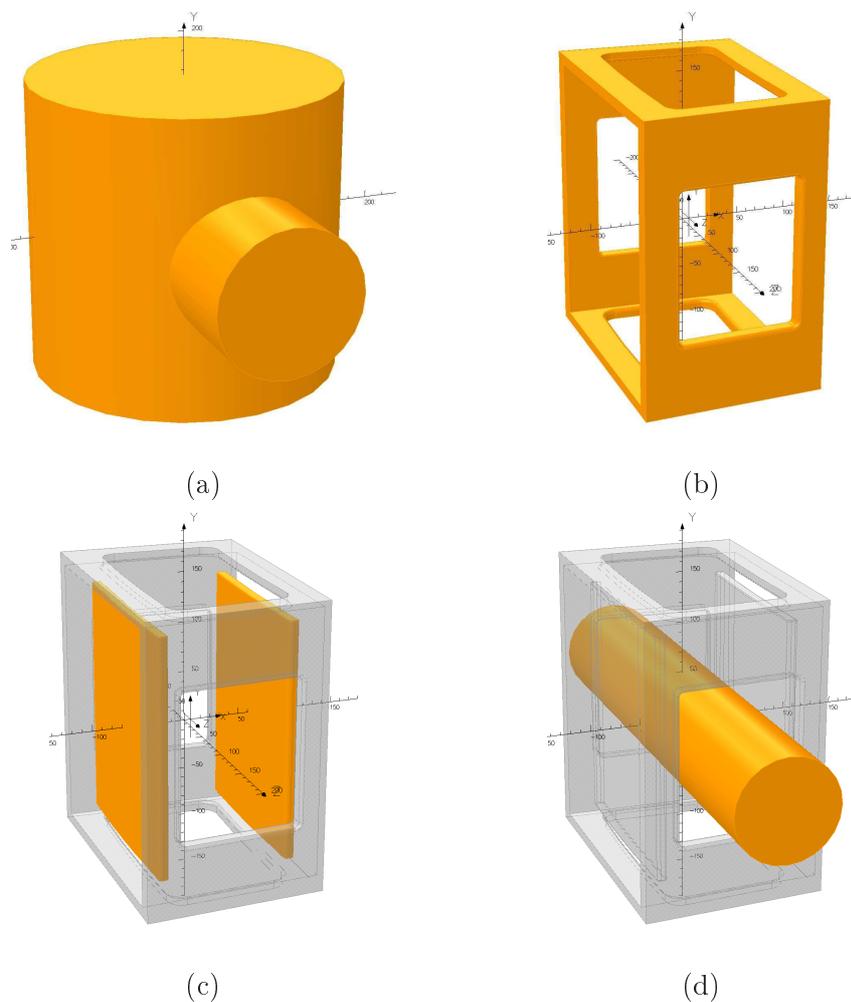


Abbildung 2.11: Übersicht über die Bereiche, die bei der FEM-Simulation der 6°-Deflektoren verwendet wurden. Bei den verschiedenen Komponenten Vakuummkammer (a), Elektrodenkäfig (b), Elektroden (c) und der direkte Bereich um die Sollbahn des Ionenstrahls (d) wurden unterschiedlichen Parameter bei den Berechnungen verwendet (siehe Tabelle 2.2).

Mit weniger Hauptspeicher war es nötig, deutlich mehr zusätzliche Schnittebenen zu verwenden, wobei deren räumliche Lage nicht beliebig war und auch erst aufwändig durch Probieren herausgefunden werden musste.

Um Spannungsüberschläge während des Betriebs zu verhindern, musste bei der Planung der Deflektoren darauf geachtet werden, dass die Abstände benachbarter Bauteile ausreichend groß gewählt und zusätzlich alle Ecken mit angemessenem Radius abgerundet werden. Im Fall der 6°-Deflektoren wurden deshalb die Abstände zwischen den Elektroden und dem Elektrodenkäfig auf mindestens 15 mm und die Radien zum Verrunden der Ecken und Kanten der Elektroden auf 3 mm festgelegt. Bei den für 300 keV-Protonen bestimmten Elektrodenspannungen resultieren damit dann Feldstärken an den Elektrodenkanten von maximal $3,8 \cdot 10^6 \text{ V/m}$ und $1,1 \cdot 10^6 \text{ V/m}$ an den Kanten, die den Elektroden gegenüberliegen.

2.2 FEM-Simulationen für den 39°-Ablenker

Die 39°-Deflektoren bestehen in dem untersuchten Modell wie auch die 6°-Deflektoren aus den beiden Deflektorelektroden, die auf einem Potential von etwa ± 18 kV liegen, einem Rahmen, an dem diese befestigt sind sowie der Vakuumkammer. Anders als beim 6°-Deflektor sind die Elektroden hier fast vollständig durch den Rahmen auf Massepotential abgeschirmt (siehe Abb. 2.12), d.h. die umgebende Vakuumkammer hat keinen Einfluss auf den Ablenkwinkel des 39°-Deflektors. Deshalb war es in diesem Fall nicht notwendig, die Vakuumkammer realitätsnah bei der Simulation zu berücksichtigen. Auch die 39°-Deflektoren wurden im Vorfeld [30, 31] bereits an einem vereinfachten Modell analysiert. Dabei ergab sich eine Länge der Elektroden von $38,04^\circ$. Der Entwurf der Elektroden wurde seitdem aber geändert, so dass auch hier eine genauere Untersuchung notwendig war. Wie im Fall des 6°-Deflektors sind hier ebenfalls Korrekturen an den Elektrodenspannungen notwendig gewesen. Ausgehend von den theoretischen Werten für 300 keV-Protonen mit $U_{\text{innen}} = -18272,60$ V und $U_{\text{außen}} = 17732,45$ V mussten diese auf $-18274,58$ V und $17734,43$ V geändert werden. Für negative Ionen sind die Vorzeichen zu vertauschen.

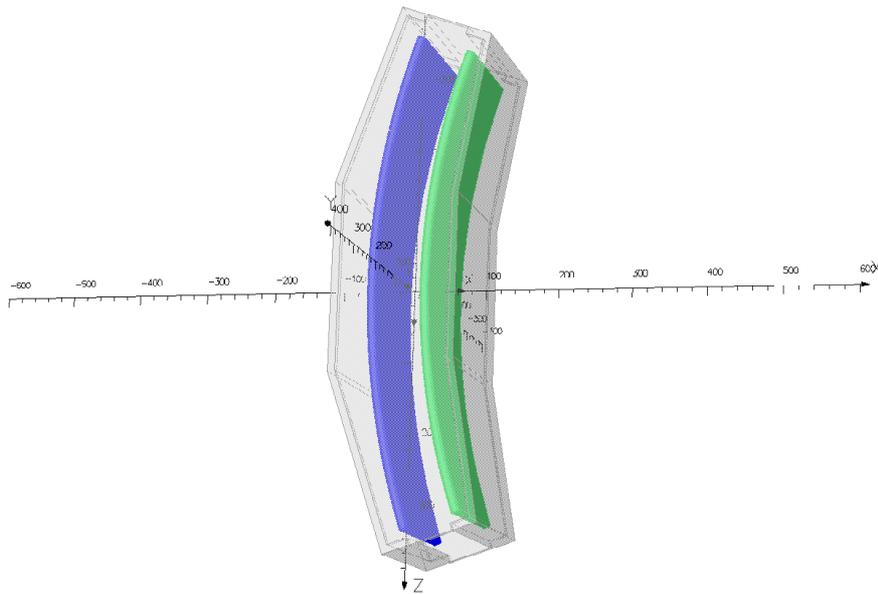


Abbildung 2.12: Dargestellt ist das Modell des 39°-Deflektors wie er in Opera3D verwendet wird mit Maßen in Millimetern. Die Elektroden sind dabei in blau bzw. grün dargestellt, der Rahmen ist transparent. Da der Rahmen die Randfelder der Elektroden beschränkt, ist die Geometrie der Kammer unwichtig und hier nicht dargestellt. Der Rahmen und die Kammer werden auf Massepotential gehalten, während sich die Elektroden auf etwa ± 18 kV befinden. Das Vorzeichen ergibt sich hierbei direkt aus dem Ladungszustand der zu speichernden Teilchenspezies.

In Abbildung 2.13 ist das elektrische Feld in radialer Richtung dargestellt. Die Daten stammen bereits aus dem endgültigen Modell mit den geometrischen Maßen, die für die Fertigung verwendet wurden. Wie man erkennt, ist der Verlauf des elektrischen Felds sehr viel besser in Übereinstimmung mit dem Sollwert als beim 6°-Deflektor. Ursache hierfür, und für die im Vergleich zum 6°-Deflektor geringeren Korrekturen an den benötigten Elektrodenpotentialen, ist das günstigere Elektrodenabstand zu -höhe Verhältnis, das bei den 39°-Deflektoren bei 3 : 1 liegt.

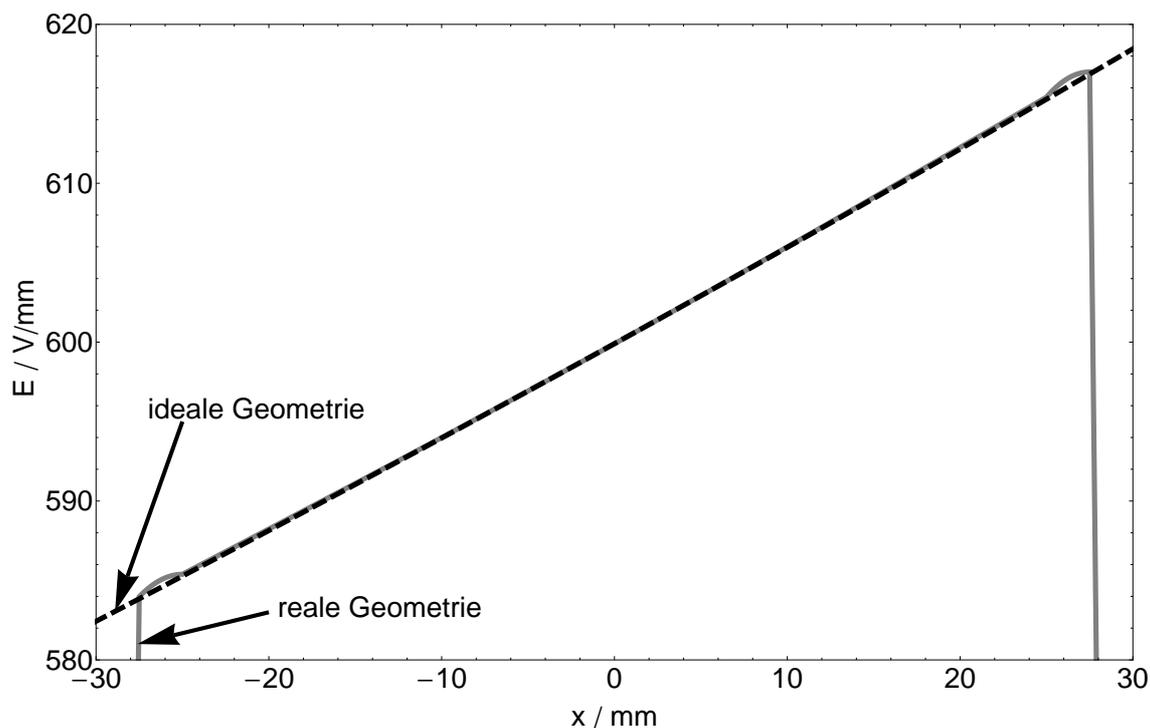


Abbildung 2.13: Theoretischer und aus der Opera3D-Analyse bestimmter radialer Verlauf des elektrischen Felds im 39°-Deflektor bei einer Elektrodenlänge von 38,23°. Die gestrichelte Linie entspricht dem theoretischen, die durchgezogene dem aus der Simulation ermittelten Wert.

Auch bei der FEM-Simulation der 39°-Deflektoren war abweichend von der Theorie eine vertikale Komponente des elektrischen Felds in der Mitte zwischen den beiden Deflektorelektroden zu erkennen (siehe Abb. 2.14). Anders als im Fall der 6°-Deflektoren ist hier jedoch der Verlauf deutlich gleichmäßiger. Der Betrag dieser Feldkomponente steigt stetig mit dem Abstand zur Mitte des Deflektors an und ist am Ende mit bis zu 0,08 V/mm größer als beim 6°-Deflektor.

Der Ablenkwinkel bei einer Elektrodenlänge von 38,04° wurde zu 38,85° bestimmt. Die nötige Korrektur hätte eine Elektrodenlänge von 38,185° bedeutet, dieser Wert allein reichte jedoch noch nicht aus, da zusätzlich zur geänderten Elektrodenlänge auch die Randfelder geändert wurden. Dies war nötig geworden, da die Elektroden an den Kanten stärker abgerundet werden mussten, um die lokalen Feldstärken nicht zu groß werden zu lassen. Dementsprechend wurde danach nochmals die Elektrodenlänge auf 38,23° korrigiert. An den Elektrodenpotentialen waren dabei keine

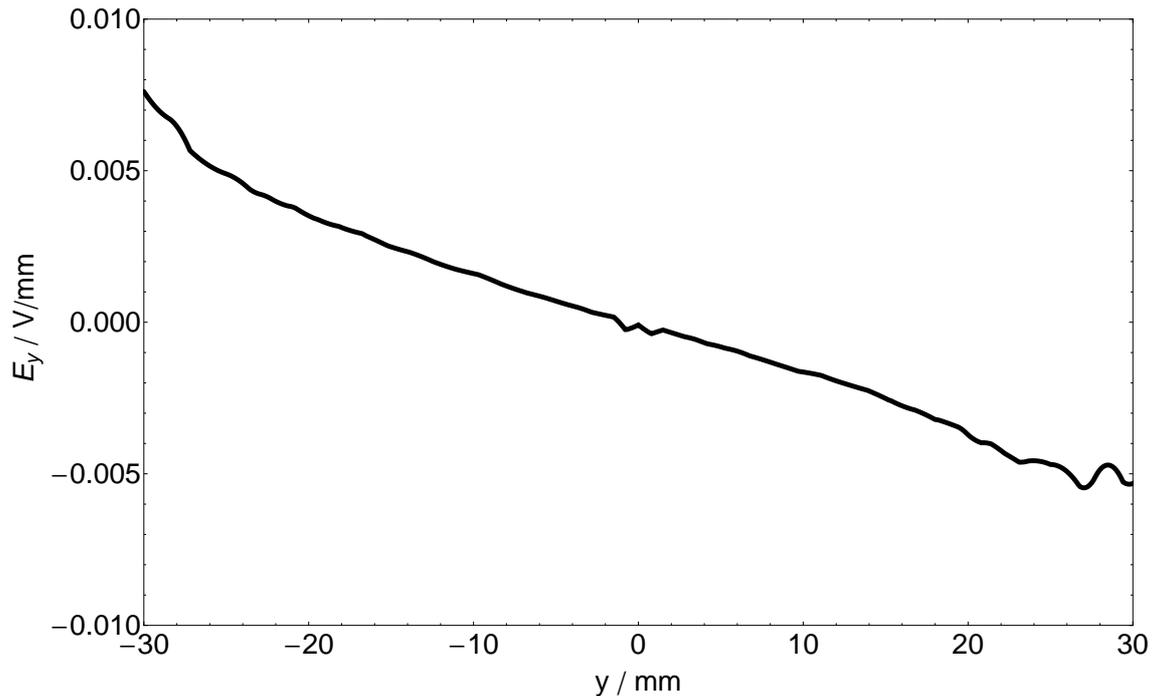


Abbildung 2.14: Dargestellt ist die elektrische Feldkomponente E_y senkrecht zur Strahlebene in der Mitte des 39°-Deflektors. Da dieser Anteil um etwa 5-6 Größenordnungen kleiner ist als die radiale Komponente in diesem Bereich, kann davon ausgegangen werden, dass die Auswirkungen auf die Trajektorien vernachlässigbar sind.

Änderungen nötig, da das radiale elektrische Feld auch hier nur eine relative Abweichung von $4 \cdot 10^{-6}$ vom Sollwert hat. Die resultierenden Ablenkwinkel sind in Abbildung 2.15 in Abhängigkeit von der z-Richtung dargestellt. Sie betragen in beide Richtungen $19,499^\circ$ und der gesamte Ablenkwinkel beträgt somit $38,998^\circ$. Auch hier ist die verbleibende Abweichung vom Sollwert mit umgerechnet 0,035 mm vernachlässigbar klein.

Die 39°-Deflektoren sind, anders als die 6°-Deflektoren, nicht dafür vorgesehen die Strahllage zu korrigieren. Deshalb wurde hier darauf verzichtet, die Abhängigkeit des Ablenkwinkels von der Elektrodenspannung zu bestimmen. Für den späteren Betrieb werden zur Speicherung von 300 keV/q-Ionen somit Spannungen von maximal ± 20 kV benötigt.

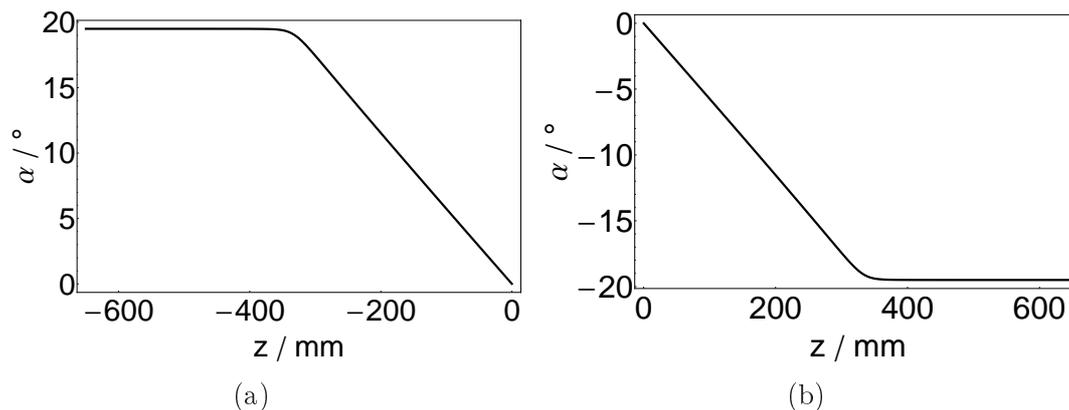


Abbildung 2.15: Berechnung des Ablenkwinkels des 39°-Deflektors bei einer Elektrodenlänge von 38,23°. In (a) startet das Proton in negative z-Richtung und wird insgesamt um 19,499° abgelenkt. In (b) ist der andere Fall dargestellt mit einem Proton, das in positive z-Richtung startet und dabei ebenfalls um 19,499° abgelenkt wird.

Die Simulation verlief analog zum 6°-Deflektor. Dabei ist zu beachten, dass im Vergleich zum 6°-Deflektor mit etwa 210 mm langen Elektroden in diesem Fall die Elektroden fast 700 mm lang sind. Zusätzlich werden die 39°-Deflektoren fast komplett in einem Rahmen aus Masseblechen eingeschlossen. Dementsprechend war noch mehr Aufwand nötig, um die Simulationsparameter mit möglichst feinem Netz zu finden, damit man entsprechend genaue Lösungen zu erhält. In Abb. 2.16 sind die verschiedenen Bereiche der 39°-Deflektoren dargestellt, die jeweils mit unterschiedlichen Parametern berücksichtigt wurden. Aufgrund des deutlich größeren Modells sind im Vergleich zum 6°-Deflektor auch deutlich mehr der zusätzlichen Schnittebenen verwendet worden. Die letztlich verwendeten Einstellungen für die einzelnen Komponenten des Deflektors sind in Tabelle 2.3 aufgelistet.

Tabelle 2.3: Aufgelistet sind die gewählten Parameter bei der FEM-Simulation der 39°-Deflektoren. Der Parameter „Meshsize“ gibt die maximale Kantenlänge der Tetraeder an, in die das 3D-Objekt zerlegt wird.

Bereich	Meshsize / mm	Data Storage Level	Boundary Condition
Vakuumkammer	4	31	0 V
Elektrodenkäftig	5	35	0 V
Elektroden	4	50	-18,493 kV +17,953 kV
Sollbahn	2	70	keine

Die Feldstärken bei den in diesem Fall für 300 keV Protonen verwendeten Elektroden-Spannungen sind an den Kanten mit $2,97 \cdot 10^6$ V/m am größten, aber immer noch klein genug, um Spannungsüberschläge auszuschließen. An den Kanten der Elektroden gegenüberliegenden Stellen der Massebleche werden lokal Feldstärken von

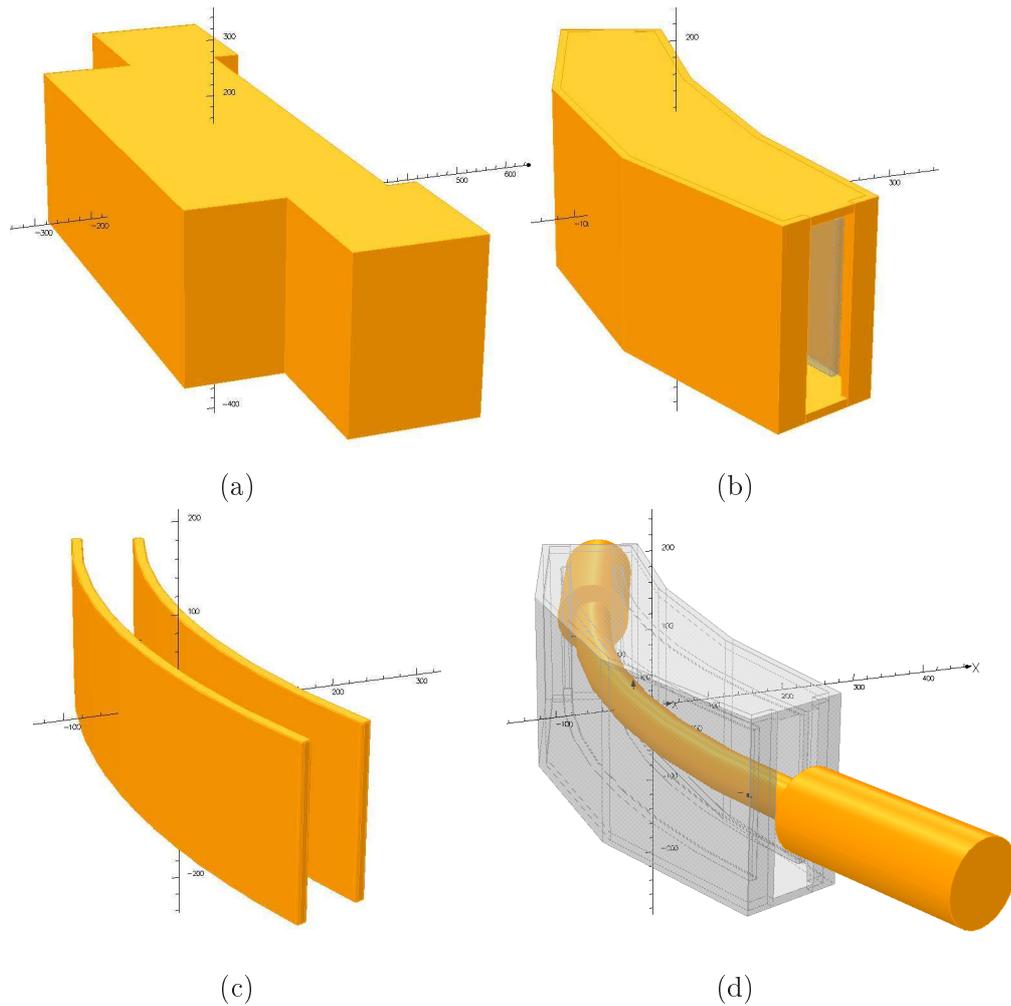


Abbildung 2.16: Übersicht über die Einstellungen, die bei der FEM-Simulation der 39°-Deflektoren verwendet wurden. Die verschiedenen Komponenten Vakuummutter (a), Elektrodenkäfig (b), Elektroden (c) und der direkte Bereich um die Sollbahn des Ionenstrahls (d) wurden dabei mit jeweils unterschiedlichen Einstellungen berücksichtigt (siehe Tabelle 2.3).

$1,03 \times 10^6 \text{ V/m}$ erreicht, die aber geringer sind als an den Kanten der Elektroden selbst und somit keine Probleme bereiten. Die Feldstärke liegt i.A. in der Größenordnung von etwa $5,0 \cdot 10^5 \text{ V/m}$ und erreicht nur an wenigen Stellen die erwähnten hohen Werte.

2.3 FEM-Simulationen des Quadrupoldubletts

Zur Fokussierung des Ionenstrahls ist sowohl vor als auch hinter jeder 90°-Ablenkung eine Optikeinheit vorgesehen. Diese besteht aus zwei elektrostatischen Quadrupolen sowie einem elektrischen Dipoldeflektor zur vertikalen Strahllagekorrektur. Dabei besitzen die Quadrupolelektroden eine Hyperbelform, sind jeweils 200 mm lang und werden durch Bleche auf Erdpotential in ihren Randfeldern begrenzt. In Abb. 2.17 ist der Aufbau dieser ionenoptischen Einheit dargestellt. Für die folgenden Unter-

suchungen wurde ähnlich der 6°- bzw. 39°-Deflektoren das Koordinatensystem in die Mitte zwischen den Elektroden auf der Sollbahn gewählt. Bei den Quadrupolen reicht es aus nur einen zu betrachten, da der zweite dazu lediglich um 90° um die Strahlachse gedreht ist, aber ansonsten identische Eigenschaften besitzt.

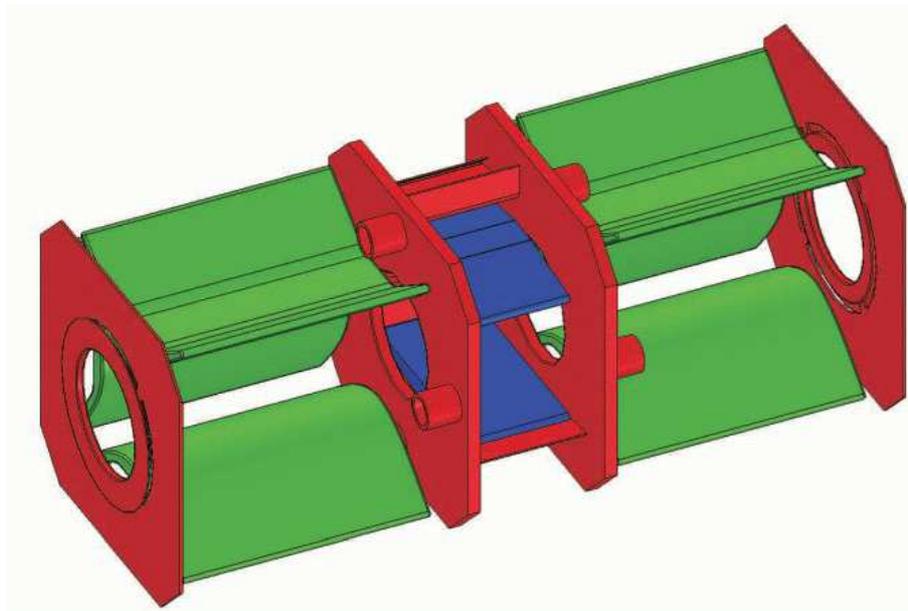


Abbildung 2.17: Dargestellt ist die ionenoptische Einheit zur Fokussierung eines Ionenstrahls. In grün sind die Quadrupolelektroden dargestellt, in rot der Rahmen sowie die Massebleche, die sich zur Abschirmung alle auf Erdpotential befinden. In blau sind die Elektroden des Deflektors zur vertikalen Strahlagekorrektur gezeigt. Zur besseren Übersicht wurde in beiden Quadrupolen eine der Elektroden ausgeblendet.

Frühere Untersuchungen [30] hatten gezeigt, dass die Akzeptanz des CSR durch den Abstand der Quadrupolelektroden bestimmt wird. Dieser legt den Bereich fest, in dem der elektrische Feldgradient konstant angenommen werden kann. Weicht der Feldgradient zu stark von der Idealform des konstanten Gradienten ab, ist es nicht möglich, Teilchen zu speichern, die eine entsprechende räumliche Abweichung zur Sollbahn aufweisen. Aufgrund von Änderungen am Modell war es nötig, den Verlauf des Gradienten mit dem aktuellen Modell zu untersuchen. Da die Quadrupole selbst symmetrisch sind, reicht es aus, den elektrischen Feldgradienten in x-Richtung E_x in Abhängigkeit der Ortsabweichung in x-Richtung von der Sollbahn zu betrachten. Aus den mit Opera3D bestimmten Werten von E_x entlang der x-Achse wurde der Gradient $G(x)$ über $\partial E_x(x)/\partial x$ bzw. da diskrete Punkte vorlagen aus $G^i(x) = (E_x^i(x) - E_x^{i+1})/\Delta x$ bestimmt. Zur Normierung wurde dieser dann in die relative Abweichung vom Wert des Gradienten in der Mitte des Quadrupols G_0 umgerechnet. In Abb. 2.18 ist dieser Verlauf dargestellt. In den früheren Untersuchungen wurde festgestellt, dass Teilchen gespeichert werden können sofern die Abweichung des Gradienten bei maximal etwa $\pm 0,1\%$ liegt. Das bedeutet in diesem Fall eine maximale Strahlgröße von etwa ± 40 mm am Ort des Quadrupols.

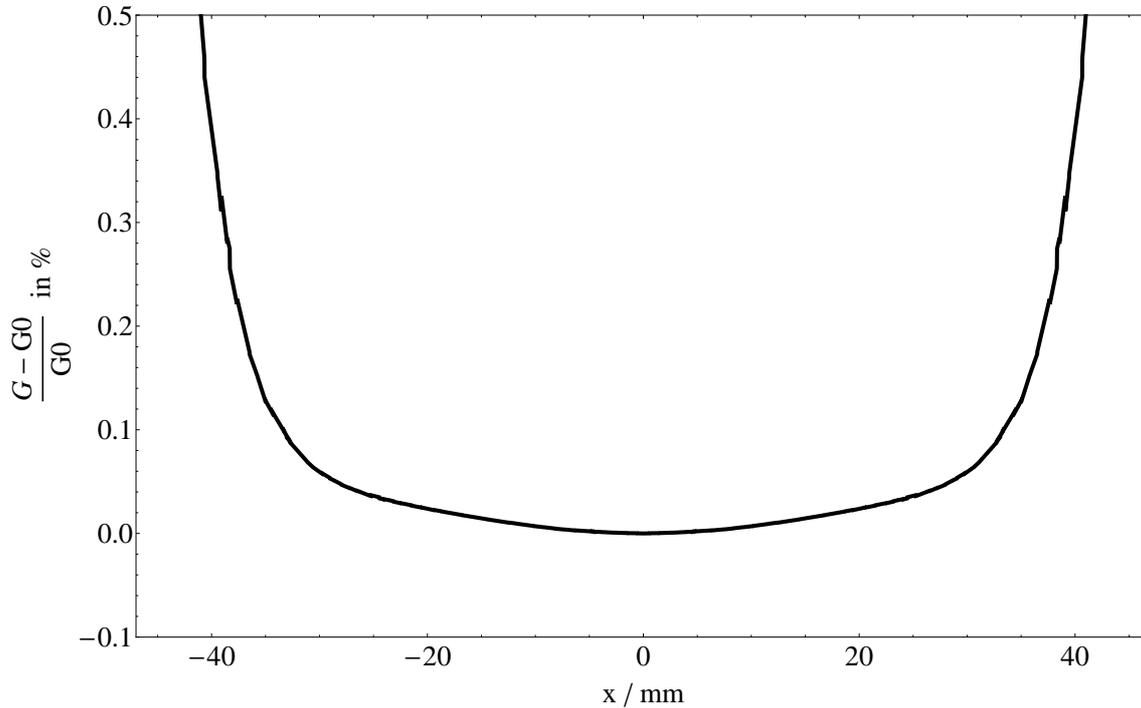


Abbildung 2.18: Gezeigt ist der elektrische Feldgradient entlang der x-Achse als relative Abweichung vom Wert G_0 auf der Sollbahn. Im Bereich bis etwa ± 40 mm liegen diese Abweichungen unter 0,1 % und damit sind Ionen nach den Erkenntnissen früherer Untersuchungen noch speicherbar.

Zur Berechnung der ionenoptischen Eigenschaften des CSR werden die Quadrupoldoublets vereinfacht in MAD mit einem elektrostatischen Rechteckpotential der Stärke G_0 und effektiven Länge L_{eff} beschrieben. Die effektive Länge ergibt sich dabei aus dem elektrischen Feldgradienten senkrecht zur Strahlrichtung $G_x(s) = \partial E_x(s)/\partial x$ aus den Resultaten der FEM-Simulationen gemäß:

$$L_{\text{eff}} = \frac{1}{G_x^0} \int_{-\infty}^{+\infty} G_x(s) ds \quad (2.8)$$

bzw. für den vorliegenden Fall diskreter äquidistanter Punkte:

$$L_{\text{eff}} = \frac{1}{G_x^0} \sum_i \frac{G_x(s_i) + G_x(s_{i+1})}{2} \Delta s. \quad (2.9)$$

Hierbei steht G_x^0 für den Gradienten $G_x(s)$ in der Mitte des Quadrupols entlang der Strahlrichtung. Aufgrund der Symmetrie kann anstelle des Gradienten in x-Richtung $G_x(s)$ auch der Gradient in y-Richtung $G_y(s) = \partial E_y(s)/\partial y$ verwendet werden. Die dafür nötigen Daten wurden wie schon bei den Deflektoren durch eine FEM-Analyse eines 3D-Modells gewonnen. Dabei wurden Elektrodenspannungen von ± 10 kV angenommen, die auch für den späteren Betrieb vorgesehen sind. Der resultierende Verlauf des elektrischen Feldgradienten ist in Abb. 2.19 dargestellt. Aus Gleichung (2.9)

folgt direkt die effektive Länge der Quadrupole zu $L_{\text{eff}} = 211,077$ mm. Der entsprechende Bereich ist in Abbildung 2.19 durch die schwarzen Linien zusammen mit den Positionen anderer Bauteile dargestellt.

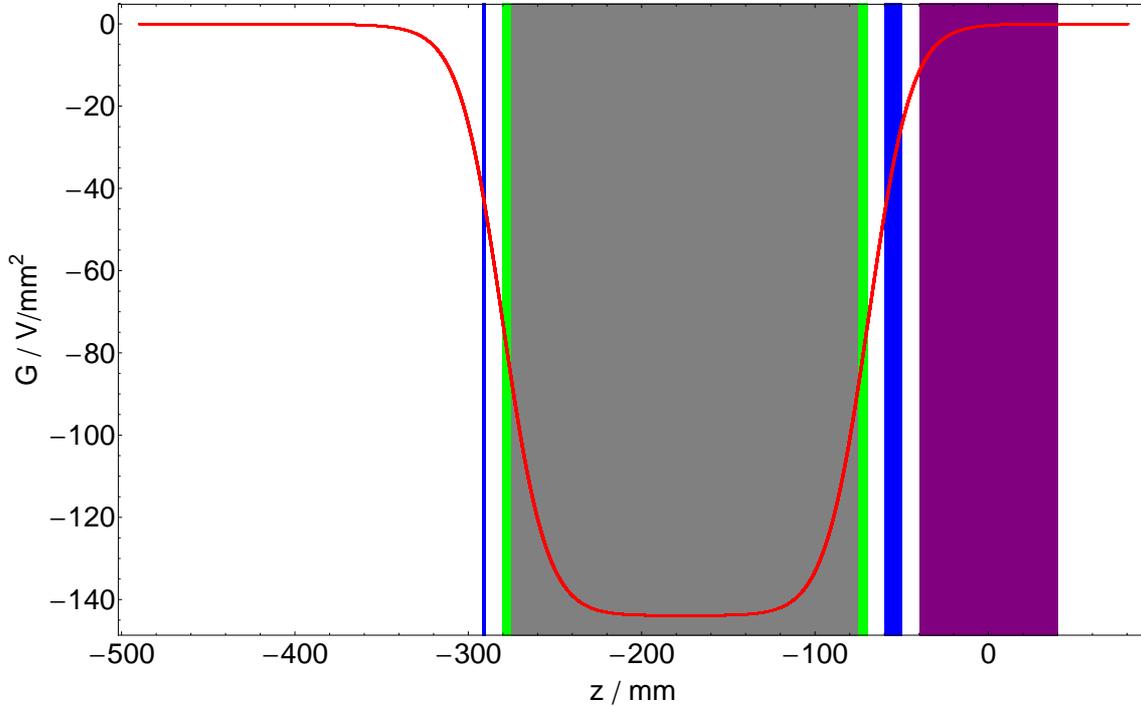


Abbildung 2.19: Gezeigt ist der elektrische Feldgradient $\partial E_x(z)/\partial x$ einer Quadrupolelektrode des Dubletts in rot sowie die Positionen anderer Bauteile entlang der Strahlachse. Der Nullpunkt entlang der Strahlachse wurde dabei in die Mitte der Deflektorelektroden gesetzt. In blau sind die Massebleche (dünne Linie) sowie der Elektrodenkäfig (dicke Linie) dargestellt, die die Ausdehnung der Randfelder begrenzen, in grün die effektive Länge, in grau die geometrische Länge der Elektroden und in magenta die Deflektoreinheit zwischen den beiden Quadrupoleinheiten.

Für den Deflektor zwischen den beiden Quadrupolen sind Spannungen von jeweils ± 5000 V vorgesehen. Um damit spätere Strahlagekorrekturen vornehmen zu können, war es erforderlich, den Ablenkwinkel eines Teilchenstrahls in Abhängigkeit der Deflektorenspannung zu bestimmen. In Abb. 2.20 sind die entsprechenden Daten zusammen mit dem dazugehörigen Fit dargestellt. Als Fitfunktion wurde $\alpha(U) = aU^2 + bU + c$ gewählt, da der Verlauf in diesem Spannungsbereich noch linear scheint, aber gleichzeitig die geringen Abweichungen vom linearen Verlauf nicht verloren gehen sollten.

Die Ergebnisse der Anpassung sind in Tabelle 2.4 aufgeführt.

Mit diesem funktionalen Zusammenhang ist es dann möglich, ausgehend von Korrekturwinkeln, die separat über Software wie z.B. MAD ermittelt wurden, die benötigten Elektrodenspannungen einzustellen und die vertikale Strahlage den Anforderungen anzupassen.

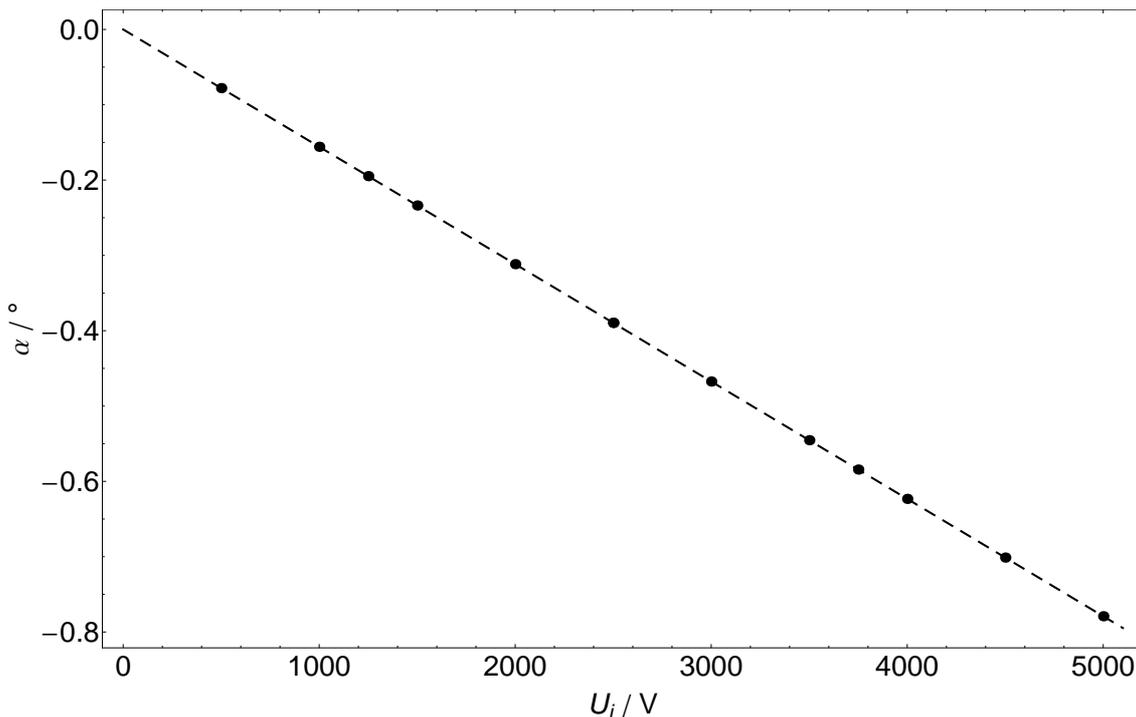


Abbildung 2.20: Der Ablenkwinkel des Korrekturdeflektors zwischen den beiden Quadrupolen ist in Abhängigkeit von der angelegten Elektrodenspannung gezeigt. Dabei ist zu beachten, dass die Spannungswerte nicht die Potentialdifferenz zwischen den beiden Elektroden beschreiben sondern relativ zum Massepotential. Das bedeutet: bei einem Wert von 5000 V liegen an der einen Elektroden +5000 V und an der anderen Elektrode -5000 V an. Aus dem Ladungszustand der zu speichernden Molekül-/Ionenspezies und der angestrebten Ablenkrichtung resultiert dann jeweils das Vorzeichen der anzulegenden Spannungen.

Tabelle 2.4: Aufgelistet sind die Fitparameter der Funktion $\alpha(U) = aU^2 + bU + c$ mit der die Abhängigkeit des Ablenkwinkels von der Elektrodenspannung des Dipols zur vertikalen Strahlagekorrektur beschrieben werden kann.

Parameter	Wert	Fehler (aus Fit)
a	$1,7707 \cdot 10^{-13} \text{ } ^\circ/\text{V}^2$	$\pm 0,7074 \cdot 10^{-13} \text{ } ^\circ/\text{V}^2$
b	$-1,5582 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{V}$	$\pm 3,96 \cdot 10^{-10} \text{ } ^\circ/\text{V}$
c	$1,7600 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ$	$\pm 4,7821 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ$

2.4 Bestimmung geeigneter Detektorpositionen

In den geraden Sektionen des CSR sind unter anderem eine Elektronenkühlung und ein Reaktionsmikroskop vorgesehen. Durch die Elektronenkühlung wird es zwangsläufig auch zu Stößen zwischen den Strahlteilchen und den Elektronen kommen. Bei Benutzung des Reaktionsmikroskops wird der gespeicherte Teilchenstrahl senkrecht zu seinem Impuls mit einem kollimierten Gasstrahl beschossen, so dass auch hier Kollisionen zu erwarten sind. Wenn dabei Moleküle als Strahlteilchen verwendet

werden, so kommt es in den meisten Fällen zur Aufspaltung in mehrere Fragmente. In den Fällen, in denen sich dabei der Ladungszustand ändert, ist es unmöglich diese Fragmente zu speichern, sie werden auf die ionenoptischen Komponenten oder die strahlführende innere Vakuumkammer auftreffen und gehen dabei verloren. Bei Fragmenten, bei denen der Ladungszustand bei der Aufspaltung nicht geändert wird, tritt entweder derselbe Fall ein wie bei den Fragmenten mit Änderung des Ladungszustands, oder, wenn das Verhältnis q/m aus Ladung q und Masse m des Fragments günstig ist, wird das Fragment weiterhin im Ring gespeichert. Sofern die Trajektorien der entstehenden Fragmente bekannt sind, ist es möglich, sinnvolle Positionen zur Platzierung von geeigneten Detektoren zu finden, um bei späteren Experimenten möglichst viele Informationen über die physikalischen Eigenschaften der Fragmente zu gewinnen.

Die Trajektorien können wieder über die Simulation eines Modells mit Opera3D gewonnen werden. Diese wurden dann in Solid Edge³ importiert und zusammen mit einem Modell der Innenkammern einer Ecke des CSR dargestellt. Dabei ist es aufgrund der im Ring vorhandenen Symmetrien nur nötig, 1/8 des Rings zu simulieren. Da die Wechselwirkungen jeweils in der Mitte einer der geraden Sektionen des Rings stattfinden, werden Trajektorien simuliert, die jeweils an diesem Ort starten. Aus den Trajektorien für verschiedene Ladungen, Massen und kinetische Energien der Teilchen können somit die Informationen gewonnen werden, die für die Planung späterer Experimente dringend benötigt werden. Weiterhin werden kritische Engstellen in der Strahlführung erkannt, die zusätzliche Einschränkungen an mögliche Experimente darstellen.

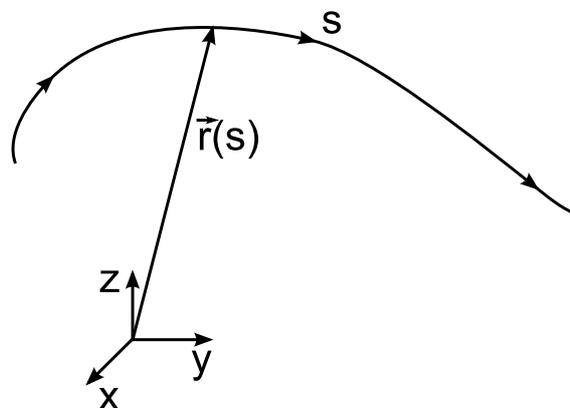


Abbildung 2.21: Die Bahnkurve der Strahlteilchen kann in Abhängigkeit der Zeit t durch $\vec{r}(t)$ dargestellt werden. Üblicher ist jedoch die Darstellung in einem entlang der Bahn s mitbewegten Koordinatensystem, also $\vec{r}(s)$. Dabei ist die Geschwindigkeit des Strahlteilchens nicht konstant (siehe Gleichung (2.13)).

³Solid Edge ist ein CAD-Programm der Firma Siemens, mit dem auch detaillierte dreidimensionale Modelle erstellt werden können

Aus dem elektrostatischen Kraftgesetz erhält man

$$m \ddot{\vec{r}}(t) = \vec{E}(\vec{r}) Q, \quad (2.10)$$

woraus mit $\dot{s} = v$ und unter Verwendung von

$$\begin{aligned} \ddot{\vec{r}}(t) &= \frac{d}{dt} \frac{d\vec{r}}{dt} \\ &= \dot{s}^2 \frac{d^2\vec{r}}{ds^2} + \dot{s} \frac{d\vec{r}}{ds} \frac{ds}{ds} \end{aligned} \quad (2.11)$$

der folgende Zusammenhang im hier vorliegenden nichtrelativistischen Fall resultiert:

$$m \left(v^2 \frac{d^2\vec{r}}{ds^2} + v \frac{d\vec{r}}{ds} \frac{dv}{ds} \right) = Q \vec{E}. \quad (2.12)$$

Aus der klassischen Energieerhaltung folgt direkt für dv/ds :

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} m v^2 + Q \Phi(s) &= E_0 \\ \Rightarrow \frac{d}{ds} \left(\frac{1}{2} m v^2 + Q \Phi(s) \right) &= 0 \\ \Rightarrow -\frac{Q}{m v} \frac{d\Phi(s)}{ds} &= \frac{dv}{ds}. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Einsetzen in Gleichung (2.12) unter Verwendung von $m v^2 = 2(E_0 - Q \Phi(s))$, liefert dann die Bewegungsgleichung:

$$2 \left(\frac{E_0}{Q} - \Phi(s) \right) \left(\frac{d^2\vec{r}}{ds^2} - \frac{d\vec{r}}{ds} \frac{1}{2 \left(\frac{E_0}{Q} - \Phi(s) \right)} \frac{d\Phi(s)}{ds} \right) = \vec{E}. \quad (2.14)$$

Das bedeutet, dass für nichtrelativistische Teilchen, und dies wird später in den Experimenten der Fall sein, für gleiche Verhältnisse von kinetischer Energie zu Ladung ($E_0/Q = \text{const.}$) identische Bewegungsgleichungen resultieren. Sind zusätzlich die Anfangsbedingungen $\vec{r}(s_0)$ und $\dot{\vec{r}}(s_0)$ identisch, bedeutet dies auch gleiche Bahnen. Die Masse hat dabei keinen Einfluss auf die Teilchenbahn, zumindest solange nichtrelativistische Strahlteilchen verwendet werden. Beim Aufbrechen der Teilchen konstanter Geschwindigkeit wird die kinetische Energie entsprechend der Massen der Fragmente verteilt, d.h. $m_1/m_0 = E_1/E_0$. Beispielsweise wird die longitudinale kinetische Energie beim Aufbrechen eines Teilchens in zwei Fragmente mit 70 % und 30 % der Ruhemasse des Strahlteilchens zu 70 % an das schwerere und zu 30 % an das leichtere Fragment verteilt. Es wurde für die folgenden Untersuchungen ausgehend von einem 300 keV Protonstrahl die kinetische Energie variiert. Dies entspricht dann den verschiedenen Massen, die als Fragmente vorkommen können. Eine Änderung der Ladung eines Teilchens lässt sich gemäß Gleichung (2.14) auch äquivalent als Änderung der kinetischen Energie bei unveränderter Ladung darstellen, was im

Folgende relative Massenänderung von > 1 erklärt. Damit ist es möglich, allein durch die Änderung der kinetischen Energie eines Teilchens, sowohl verschiedene Massen als auch Ladungszustände der entstehenden Fragmente zu simulieren und zu untersuchen.

Fragmente entstehen hauptsächlich in den geraden Sektionen des CSR und bekommen in den meisten Fällen nur einen kleinen zusätzlichen Impuls transversal zur Sollbahn. Deshalb werden Separationen bzgl. der Masse und der Ladung der Fragmente erst durch die elektrostatischen Dipole, also dem 6° - und dem 39° -Deflektor, möglich. Geeignete Detektorpositionen liegen dementsprechend in den Ecken des CSR zwischen den beiden 6° -Deflektoren. In Abbildung 2.22 sind die dafür in Frage kommenden Vakuumkammern dargestellt.

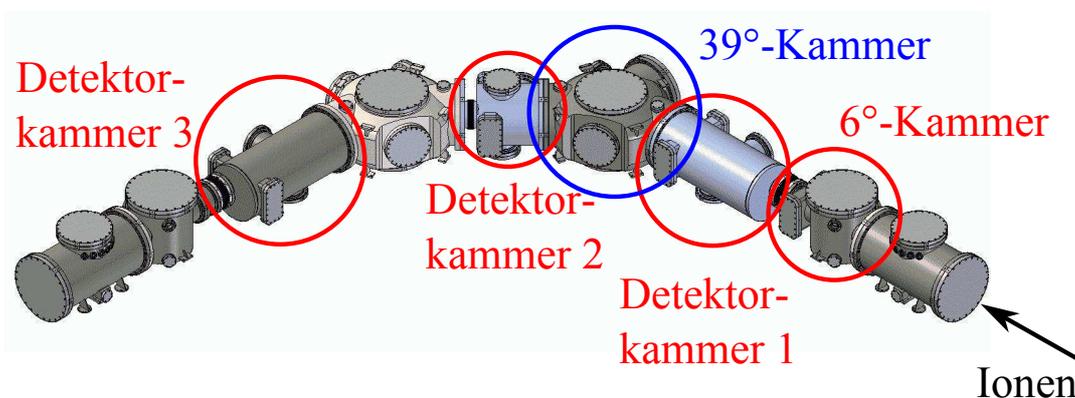


Abbildung 2.22: In den rot markierten Kammern können Detektoren für geladene Teilchen positioniert werden, in der blau markierten 39° -Kammer kann zusätzlich ein Neutralteilchendetektor angebracht werden. Die anderen Kammern bieten nicht genügend Platz für Detektoren.

Wenn man annimmt, dass alle Fragmente in der Mitte einer Experimentiersektion entstehen, und dabei nur eine vernachlässigbare Impulskomponente transversal zur ursprünglichen Ausbreitungsrichtung erhalten, dann werden die geladenen Fragmente erst durch den 6° -Deflektor auf verschiedene Trajektorien gelenkt. Da die Energie des Fragments proportional zum relativen Masseanteil des ursprünglichen Ions ist, sind diese Trajektorien masseabhängig. In Abb. 2.23 ist der Bereich direkt hinter dem 6° -Deflektor dargestellt, zusammen mit den Trajektorien zu verschiedenen Fragmentmassen und -ladungen. Dabei wird angenommen, dass die gespeicherten Molekülionen mit einer kinetischen Energie von $300 \text{ keV}/q$ positiv geladen sind. Man erkennt, dass negative Fragmente ab einer relativen Fragmentmasse von 0,4 in der vorhandenen Detektoröffnung nachgewiesen werden können. Positive Fragmente können ab einer relativen Fragmentmasse von 0,2 nachgewiesen werden. Abhängig vom nötigen Abstand des Detektors zur Sollbahn der Strahlteilchen und der Größe der für einen Nachweis inaktiven Randfläche, wird die obere Grenze der an diesem Ort nachweisbaren positiven Fragmente bestimmt. Alle Fragmente, die unter den genannten Grenzen liegen, treffen bevor sie nachgewiesen werden können auf die Vakuumkammer und gehen damit verloren.

Nicht alle Fragmente lassen sich an dieser ersten Detektorposition nachweisen. Deshalb sind nach dem 6° -Deflektor zusätzliche Detektorkammern geplant, in denen

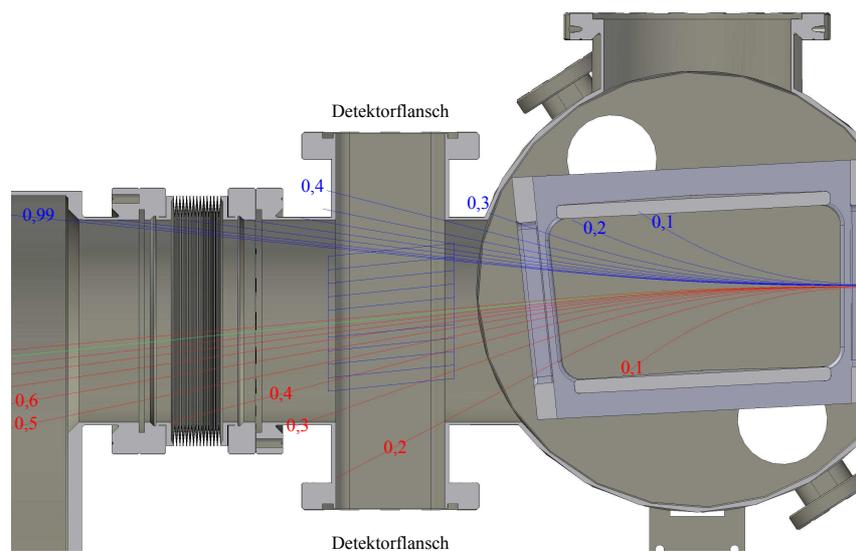


Abbildung 2.23: Dargestellt ist der Bereich direkt hinter dem 6° -Deflektor. In blau sind Trajektorien negativer Fragmente und in rot positiver Fragmente dargestellt. Grün stellt dabei die Sollbahn der ursprünglichen Strahlteilchen dar. Das blaue Gitter dient zur Bestimmung des Abstandes einer Trajektorie zur Sollbahn. Die Linien sind jeweils im Abstand von 10 mm gewählt.

auch schwerere Fragmente nachgewiesen werden können, deren Trajektorien vorher zu nah an der Sollbahn lagen. Direkt vor dem ersten 39° -Deflektor einer Ecke des CSR ist dafür eine weitere Detektorposition vorgesehen. Hierbei wird es nur möglich sein, Fragmente der gleichen Ladung wie die ursprünglichen Strahlteilchen zu detektieren. In Abb. 2.24 ist diese Detektorposition gezeigt, zusammen mit den Spuren der Fragmente die dort noch ankommen. Ab einer relativen Fragmentmasse von 0,5 lassen sich in dieser Position Teilchen nachweisen. Auch hier wird durch die Wahl des Detektors bzw. dessen Dimensionen der Bereich an nachweisbaren Fragmenten begrenzt.

Bei den Experimenten entstehen auch neutrale Teilchen, für die auch ein Detektor vorhanden sein muss. Die geeignetste Position dafür ist in der Vakuumkammer des 39° -Deflektors, siehe dazu Abb. 2.25, da nur hier ausreichend Platz zur Verfügung steht, um einen großen Detektor (z.B. Delay-Line Detektoren mit Hexanode) unterzubringen. Wenn man wie bisher annimmt, dass die betrachteten Teilchen alle auf der Sollbahn in der Mitte einer der Experimentiersektionen entstehen, lassen sich Neutralteilchen nachweisen, deren Trajektorien um maximal 1° relativ zur Strahlachse aufgestreut sind. Für größere Streuwinkel treffen die Teilchen schon vorher auf die Vakuumkammern auf, ohne nachgewiesen zu werden.

Für Fragmentmassen, die noch näher an der Masse der ursprünglichen Strahlteilchen liegen, steht auch der Bereich zwischen den beiden 39° -Deflektoren zur Verfügung. Dort sind nur noch relative Fragmentmassen im Bereich 0,92 bis 1,08 nachweisbar, da zusätzlich zu den vorherigen Positionen hier durch die Öffnung des 39° -Deflektors weitere Fragmente aufgehalten werden. In Abbildung 2.26 ist diese Detektorposition

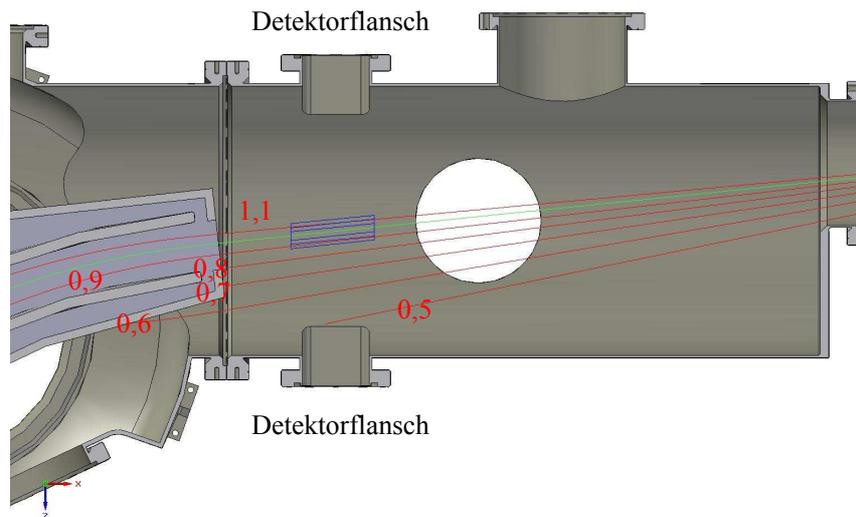


Abbildung 2.24: Dargestellt ist die Detektorkammer direkt vor dem ersten 39° -Deflektor. In rot sind die Trajektorien der Fragmente und in grün die Sollbahn der ursprünglichen Teilchen dargestellt. Das blaue Gitter zeigt die Abstände 5, 10 und 15 mm von der Sollbahn an, um die Grenze der noch nachweisbaren Teilchen zu bestimmen.

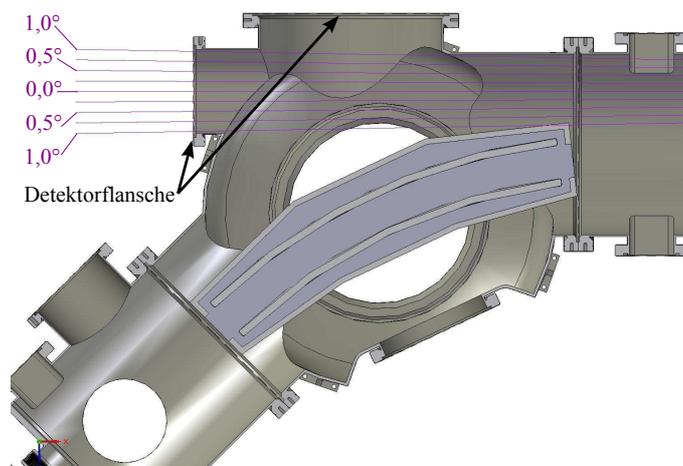


Abbildung 2.25: In der gezeigten Vakuumkammer des 39° -Deflektors sollen neutrale Spaltfragmente nachgewiesen werden. In violett sind die Trajektorien von Neutralteilchen dargestellt, die in der Mitte einer Experimentiersektion auf der Sollbahn entstanden sind. Die Winkel zur Strahlachse sind dabei $\pm 1,00^\circ$ in $0,25^\circ$ Schritten. Ein Detektor kann wahlweise je nach Anforderungen durch beide in dieser Abbildung zu erkennenden Flansche montiert werden.

zusammen mit den Trajektorien der nachweisbaren Fragmente dargestellt. Nach dem zweiten 39° -Deflektor einer Ecke des CSR gibt es eine letzte Detektorkammer zum Nachweis geladener Fragmente, deren Masse sich nur minimal von der der ursprünglichen Strahlteilchen unterscheidet. Diesen Bereich erreichen nur noch Fragmente mit einer relativen Masse von 0,97 bis 1,03. Auch hier ist darauf zu ach-

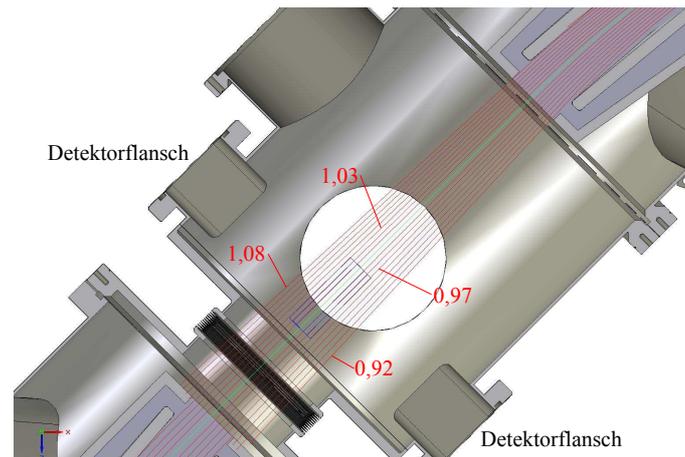


Abbildung 2.26: Im Bereich der Vakuumkammer können zwischen den beiden 39° -Deflektoren Fragmente mit relativer Masse größer als 0,92 und kleiner als 1,08 nachgewiesen werden. Wie dicht dabei die Fragmentmasse an der Masse des ursprünglichen Strahlteilchens liegen darf, wird durch die Detektorgröße und damit dem Abstand zur Sollbahn bestimmt. Die verschiedenen Massen sind dabei in 0,01 Schritten dargestellt. Das blaue Gitter dient auch hier wieder als Maßstab für den Abstand zur Sollbahn (grün), wobei die Abstände 5 mm, 10 mm und 15 mm betragen.

ten, dass Detektoren verwendet werden, die einen möglichst kleinen Rand haben, um auch die Fragmente nachzuweisen, deren Energie- zu Ladungs-Verhältnis sehr nahe bei dem der Strahlteilchen liegt.

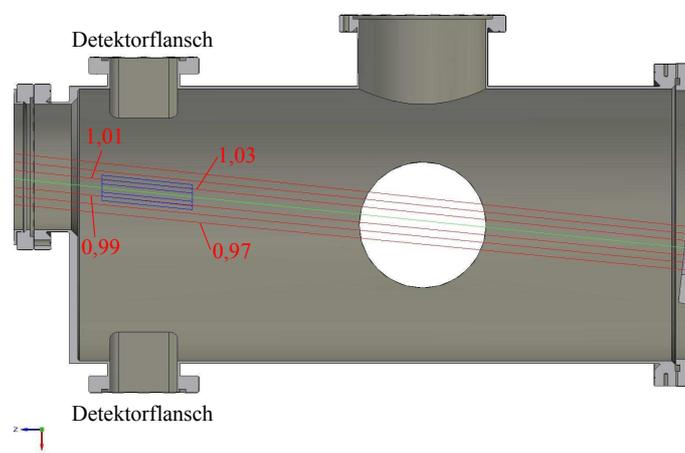


Abbildung 2.27: Die letzte Detektorposition einer Ecke des CSR ist die Vakuumkammer direkt vor dem 6° -Deflektor. Hier sind nur noch Fragmente nachzuweisen, die in ihrer Masse nur minimal von der Masse der ursprünglichen Strahlteilchen abweichen. In blau ist hierbei der Abstand von 5 mm, 10 mm und 15 mm zur Sollbahn (grün) der Strahlteilchen dargestellt.

Insgesamt ist durch diese Wahl der Detektorpositionen der Nachweis neutraler Fragmente möglich, sofern sie um nicht mehr als 1° zur Strahlachse aufgestreut werden. Im Fall positiver Strahlteilchen sind negative Fragmente ab 0,4 Ruhemassen der

Strahlteilchen nachweisbar. Positive Fragmente können, je nachdem wie weit die Detektoren an die Sollbahn der Strahlteilchen gefahren werden, im Idealfall den kompletten Bereich ab 0,2 Ruhemassen der Strahlteilchen nachgewiesen werden. Dazu ist es allerdings erforderlich, dass die Detektoren möglichst keinen für den Nachweis inaktiven Randbereich haben und auf weniger als 10 mm Abstand zur Sollbahn positioniert werden können. Für den Fall negativer Strahlteilchen müssen die Aussagen über negative und positive Fragmente getauscht werden, es gibt jedoch keine weiteren Einschränkungen.

Kapitel 3

Grundlagen des Wärmetransports und Anwendung auf den CSR

Dieses Kapitel beschreibt zunächst die Grundlagen des Wärmetransports, wie er am CSR auftreten wird, und stellt die später verwendeten Formeln bereit. Im Anschluss daran werden mit diesen Grundlagen Wärmetransport-berechnungen zur Optimierung der CSR-Komponenten durchgeführt. So sollen die strahlführenden Vakuumkammern gut gekühlt, aber gleichzeitig durch ihre Umgebung nur minimal aufgewärmt werden. Erreicht wird die Kühlung dabei durch eine kommerzielle Kälteanlage der Firma Linde, basierend auf einem Verflüssiger vom Typ L140, die für unsere Anwendungsfälle modifiziert wurde. Diese Kälteanlage stellt in zwei Kühlkreisen Helium bei etwa 2 K (2 K-Kreis) und 5 K (5 K-Kreis) zur Verfügung. Diese Anlage liefert laut Spezifikation eine Kühlleistung von 10 W bei 1,8 K oder 21 W bei 2,0 K [34]. Der zweite Kühlkreis besitzt bei 5 K – 80 K eine Kühlleistung von 600 W. Diese Grenzen galt es bei der Planung der CSR-Komponenten einzuhalten, da eine Aufrüstung der Kälteanlage zwar möglich aber teuer ist. Eine detailliertere Beschreibung der Kälteanlage ist in [20] zu finden.

3.1 Mechanismen des Wärmetransports

Mechanismen des Wärmetransports sind die Wärmeleitung durch einen Festkörper sowie die Wärmestrahlung. Der dritte mögliche Mechanismus des Wärmeübertrags, die Konvektion, beruht auf dem Energietransport durch Gasströmungen in einem Medium zwischen den beteiligten Körpern. Dieser Wärmeübertrag entfällt beim CSR, da die relevanten Komponenten des CSR durch ein Isoliervakuumsystem von besser als 10^{-5} mbar getrennt sind. Unter einem Druck von $10^{-4} - 10^{-5}$ mbar ist der Wärmeübertrag durch Konvektion gegenüber den anderen Mechanismen vernachlässigbar [35].

3.1.1 Wärmeleitung im Festkörper

Der Energieübertrag durch die Wärmeleitung von einer warmen zu einer kalten Position auf einem Körper wird in diversen Lehrbüchern (siehe z.B. [36]) analog wie die elektrische Leitung beschrieben. An die Stelle der Potentialdifferenz tritt die

Temperaturdifferenz, und anstelle des elektrischen Stroms steht die Wärmemenge in Form der Energie, die in einem Zeitintervall übertragen wird. Für den Fall eines Körpers der Querschnittsfläche A und der Länge l ergibt sich der entsprechende Zusammenhang, wenn die spezifische elektrische Leitfähigkeit σ in

$$I = \frac{A}{l} \sigma \Delta U \quad (3.1)$$

mit der mittleren thermischen Leitfähigkeit $\bar{\lambda}$ ersetzt wird:

$$\dot{Q}_l = \frac{A}{l} \bar{\lambda} \Delta T. \quad (3.2)$$

Die elektrische Leitfähigkeit ist unabhängig von ihrer treibenden Kraft, der elektrischen Potentialdifferenz. Für die thermische Leitfähigkeit gilt dies nicht. Bei einigen Materialien sind in bestimmten Temperaturbereichen große Unterschiede möglich, so dass bei größeren Temperaturdifferenzen die mittlere thermische Leitfähigkeit $\bar{\lambda}$ durch die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit $\lambda(T)$ ersetzt werden muss. Damit muss Gleichung (3.2) modifiziert werden:

$$\dot{Q}_l = \frac{A}{l} \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) dT. \quad (3.3)$$

Die Integrationsgrenzen (T_1 und T_2) sind dabei die Temperaturen des kalten und des warmen Endes des Körpers. Beim CSR werden im kalten Betriebszustand die höchsten Temperaturen bei 300 K und die niedrigsten Temperaturen bei etwa 2 K liegen. Für verschiedene Werkstoffe wurden vom NIST¹ die Werte der Wärmeleitfähigkeit zusammengetragen. Die zugehörigen Fitfunktionen und Parameter sind im Internet aufgelistet [37]. Die im Folgenden verwendeten Berechnungen zur Wärmeleitfähigkeit der CSR-Komponenten basieren alle auf diesen Daten.

3.1.2 Wärmestrahlung

Zusätzlich zur Wärmeleitung kommt es im CSR auch zum Wärmeübertrag durch Strahlung. Aus dem Stefan-Boltzmann-Gesetz folgt durch die zeitliche Ableitung der abgestrahlten Gesamtenergie die von einem idealen schwarzen Körper abgestrahlte Leistung. In der Realität wird kein idealer schwarzer Körper erreicht. Dies wird durch die einheitenlose Größe der Emissivität berücksichtigt, die die Abweichung des betrachteten Körpers vom ideal schwarzen Körper beschreibt. Dementsprechend liegen die Werte für die Emissivität eines Materials zwischen 0 und 1. Für zwei sich gegenüberstehende Flächen unterschiedlicher Temperatur stellt sich ein Gleichgewichtszustand zwischen emittierter und absorbierter Leistung ein. Im einfachsten Fall zweier gleich großer Körper gleichen Materials, die sich parallel gegenüberstehen und verschiedene Temperaturen haben, wird der Energieübertrag durch Wärmestrahlung durch

$$\dot{Q}_s = \sigma \epsilon A_k (T_w^4 - T_k^4) \quad (3.4)$$

¹National Institute for Standards and Technology

beschrieben. Dabei verwendet werden die Stefan-Boltzmann-Konstante $\sigma = 5,67 \times 10^8 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$, die Emissivität ϵ und die Temperaturen der kalten Kammer T_k und der wärmeren Umgebung T_w . Für den Fall, dass sich die Oberflächen der beteiligten Körper deutlich unterscheiden, lässt sich die effektive Emissivität aus den Oberflächen und den einzelnen Werten für die Emissivität ϵ_k der kälteren Oberfläche und ϵ_w der wärmeren Fläche berechnen. Für die späteren Berechnungen der inneren Vakuumkammern wird als Näherung eine Formel für den Fall zweier langer coaxialer Zylinder aus [38] verwendet:

$$\epsilon = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_k} + \frac{A_k}{A_w} \left(\frac{1}{\epsilon_w} - 1 \right)}. \quad (3.5)$$

Ein bewährtes Mittel zur Reduzierung der Wärmestrahlung ist die sog. Superisolierung. Dabei handelt es sich um mehrere Lagen einer dünnen Folie mit hoher Reflektivität, die durch eine zweite Foliensorte aus thermisch schlecht leitendem Material voneinander getrennt sind. Diese Folien sind - wenn überhaupt - nur an wenigen Stellen fest miteinander verbunden, um die Form zu halten, und liegen ansonsten nur locker aufeinander. Zum Einsatz kommt Superisolierung wie am CSR innerhalb eines Isoliervakuum, da andernfalls die Wirkung der Isolierung durch Konvektion stark verringert wird. Insgesamt reduziert sich der Wärmeübertrag durch Strahlung durch N Lagen Material, die ausschließlich über Wärmestrahlung Energie austauschen können nach [38, 39] um den Faktor $1/(N + 1)$.

3.2 Berechnungen zum Wärmeeintrag auf die CSR-Komponenten

Der kryotechnische Aufbau des CSR ist darauf ausgelegt, die Vakuumkammern für den Ionenstrahl auf Temperaturen unter 10 K zu kühlen. Zusätzlich ist es erforderlich, an einigen ausgewählten Stellen (fünf pro Ecke und zwei pro Linearsektion) innerhalb der Vakuumkammern Temperaturen von maximal 2 K zu erreichen, um möglichst effektiv noch vorhandene Restgaskomponenten, vor allem Wasserstoff, über Kryokondensation zu binden. Aus diesem Grund wurde ähnlich dem Aufbau des Prototypen CTF [21, 20] ein System verwendet, das ein zusätzliches Isoliervakuumssystem um das Experimentiervakuum herum verwendet. Dadurch wird Wärmeübertrag durch Konvektion ausgeschlossen (siehe Abb. 3.1). Des Weiteren kommen zwei aktiv gekühlte Strahlungsschilde bei etwa 80 K und 40 K zum Einsatz, die letztlich die Wärmestrahlung auf die inneren Vakuumkammern reduzieren. Die Kühlung der Schilde erfolgt dabei über Heliumleitungen, die das durch andere kältere Komponenten im CSR verdampfte wärmere Helium zurück in die Kälteanlage transportieren. Diese Strahlungsschilde sind aus Aluminiumblech hergestellt, da dieses eine hohe mechanische Stabilität bei gleichzeitig geringer Masse und gute Wärmeleitung besitzt. Dies ist zum Erreichen gleichmäßiger Temperaturen auf den Strahlungsschilden notwendig. Das äußere Strahlungsschild selbst ist gegen Raumtemperatur noch durch Superisolierung vor zu starker Wärmestrahlung geschützt. Innerhalb des 40 K-Strahlungsschildes befinden sich die inneren Vakuumkammern

für den Ionenstrahl, daran befestigt sind die 2 K-Einheiten. Die zur Kühlung der inneren Komponenten (z.B. erste Verstärkerstufe der Strahldiagnose [15]) verwendeten zwei Umläufe der 5 K-Leitung sowie die 2 K-Leitungen befinden sich innerhalb des 40 K-Strahlungsschildes. Dieser Aufbau ist zum besseren Verständnis in Abb. 3.1 schematisch dargestellt. Im Folgenden werden die Wärmeeinträge auf die beiden Strahlungsschilde sowie der Wärmeeintrag auf die inneren Vakuumkammern abgeschätzt.

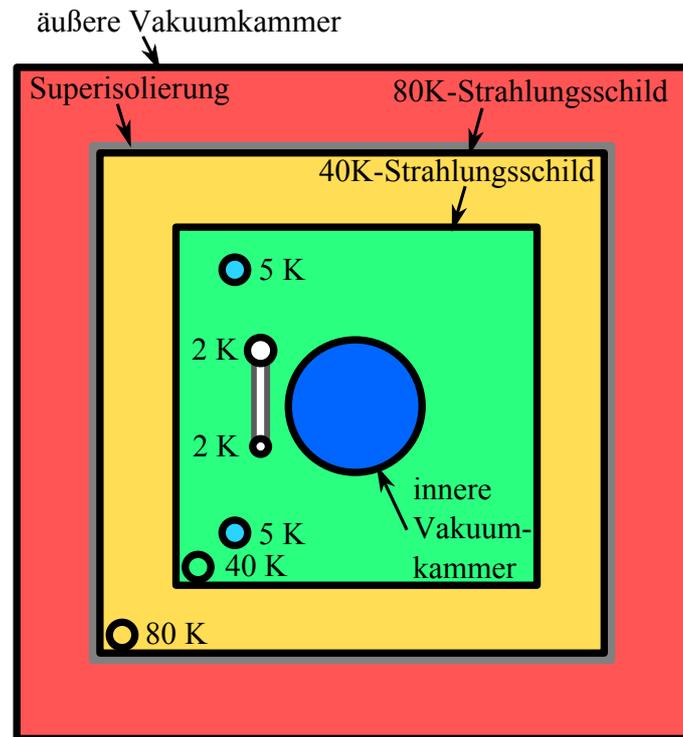


Abbildung 3.1: Dargestellt ist ein vereinfachter Querschnitt durch den CSR zur Darstellung des kryogenen Aufbaus. Dieser besteht aus aktiv gekühlten Strahlungsschilden bei 80 K und 40 K, wobei die äußeren Schilde gegen Raumtemperatur zusätzlich noch mit Superisolierung abgeschirmt sind. Innerhalb des inneren Strahlungsschildes verlaufen dann die zur Kühlung der inneren Vakuumkammern verwendeten Heliumleitungen. Die beiden 2 K-Heliumleitungen sind nur an den Positionen der 2 K-Einheiten miteinander verbunden (grau), um das durch die zugeführte Wärme verdampfte Helium abzupumpen.

3.2.1 Wärmeeintrag auf die 80 K-Strahlungsschilde

Die 80 K-Strahlungsschilde haben keinen mechanischen Kontakt zu den äußeren Vakuumkammern bei Raumtemperatur. Stattdessen hängen die Bodenbleche des 80 K-Strahlungsschildes an Drähten aus Inconel unten an den Bodenplatten des 40 K-Strahlungsschildes. Die Decken und Seitenteile sind ohne Kontakt zu anderen Komponenten an den 80 K-Bodenteilen befestigt. Deshalb kann das 80 K-Strahlungsschild fast ausschließlich durch Wärmestrahlung von außen, d.h. von den äußeren Vakuumkammern, Energie zugeführt bekommen. In erster Näherung kann man die beteilig-

ten Flächen des Strahlungsschildes und der Vakuumkammern als gleich groß annehmen. Dies ist möglich, da beide in Strahlrichtung einen rechteckigen Querschnitt haben, und die Ausmaße des Strahlungsschildes nur unwesentlich kleiner sind, als die der äußeren Vakuumkammern. Um den Wärmeeintrag durch Strahlung zu minimieren, wurde Superisolierung zwischen den äußeren Vakuumkammern und den 80 K-Strahlungsschilden verwendet. Zum Einsatz kommt dabei Superisolierung vom Typ COOLCAT 2 NW der RUAG Holding AG. Bei den Seiten- und Deckenteilen wurden 30 Lagen, bei den Bodensegmenten 40 Lagen verwendet. Dies hat den Grund, dass an den Bodenteilen eine spätere Erhöhung der Lagenzahl extrem aufwändig wäre. An den anderen Stellen dagegen ist die Nachrüstung - falls notwendig - mit geringem Aufwand möglich. Da die inneren Vakuumkammern des CSR zumindest für den Raumtemperaturbetrieb ausgeheizt werden sollen, ist zu erwarten, dass die Komponenten des 80 K-Strahlungsschildes dabei Temperaturen von 400 K deutlich überschreiten. Die verwendete Superisolierung ist für solche Temperaturen nicht ausgelegt, so dass die 80 K-Strahlungsschilde mit einer Wasserkühlung versehen sind um die Temperatur entsprechend niedrig zu halten. Diese Lösung ist ein Kompromiss, da es zwar auch temperaturbeständigere Superisolierung gibt, diese aber entweder deutlich schwieriger zu verarbeiten oder sehr viel teurer als die Wasserkühlung ist.

Die Fläche der Bodensegmente zusammen beträgt pro Ecke $7,89 \text{ m}^2$, die der Decken und Seitenteile zusammen $19,87 \text{ m}^2$. In dem Datenblatt der verwendeten Superisolierung [40] sind die durchgelassenen Strahlungsleistungen bei Verwendung zweier Komponenten bei 300 K und 77 K für 20 und 40 Lagen angegeben. Es wurde angenommen, dass der Fall mit 30 Lagen in der Mitte zwischen diesen beiden Werten liegt. Die Angaben sind vermutlich auf wenige Prozent genau (eine Herstellerangabe zur Genauigkeit liegt nicht vor), so dass die zu berechnenden Leistungen eine ähnliche Genauigkeit haben werden. Mit diesen Werten für 40 und 30 Lagen Superisolierung von $0,65 \text{ W/m}^2$ bzw. $0,72 \text{ W/m}^2$ lässt sich der Energieübertrag durch Strahlung für eine Ecke des CSR zu $19,44 \text{ W}$ auf dem 80 K-Strahlungsschild bestimmen. Für alle vier Ecken des CSR zusammen folgen damit $77,75 \text{ W}$ Leistung. Die analoge Berechnung einer Linearsektion mit $3,10 \text{ m}^2$ Bodenfläche und einer Fläche der Decken und Seitenteile von $9,10 \text{ m}^2$ liefert entsprechend eine Leistung von $8,57 \text{ W}$ je Linearsektion, bzw. $34,27 \text{ W}$ für alle vier Linearsektionen zusammen. Insgesamt resultiert daraus eine Strahlungsleistung der äußeren Vakuumkammern auf das 80 K-Strahlungsschild von 112 W .

Die weiteren thermischen Verbindungen zwischen dem 80 K-Strahlungsschild und den wärmeren Komponenten liefern einen deutlich geringeren Wärmeeintrag als die Wärmestrahlung. Dies sind zum einen Signalleitungen für die Temperatursensoren, Hochspannungsleitungen und die elektrischen Heizleitungen der inneren Vakuumkammern, die aufgrund der geringen Durchmesser verglichen mit der Wärmestrahlung vernachlässigbar sind. Einen im Vergleich zur Wärmestrahlung ebenfalls geringen aber nicht vernachlässigbaren Wärmeeintrag verursachen die Halterungen der ionenoptischen Komponenten. Diese werden durch spezielle Stützen derart befestigt, dass ihre Position sowohl im warmen, als auch im kalten Betriebszustand identisch ist. Erreicht wird dies dadurch, dass diese Stützen bei Raumtemperatur auf den Betonfundamenten der äußeren Vakuumkammern befestigt und von dort

über Bälge mechanisch von allen anderen Komponenten entkoppelt sind. Die Stützen reichen bis in die inneren Vakuumkammern (siehe Abb. 3.2). Um die Wärmeleitung durch die Stützen auf die ionenoptischen Elemente zu verringern, sind sie mit dem 80 K-Strahlungsschild über jeweils eine Kupferlitze mit 16 mm^2 Querschnittsfläche verbunden. Das bedeutet, Wärmeenergie von 300 K wird direkt über die 80 K-Strahlungsschilde abgeführt, so dass nur noch Energie der 80 K-Umgebung auf die weiter innen liegenden Komponenten gebracht werden kann. Zur Minimierung der daraus resultierenden thermischen Energie von Außen (300 K) auf den 80 K-Strahlungsschild besteht der Bereich aus einem GFK-Rohr², das im Vergleich zu Metallen ein schlechter Wärmeleiter ist. Dieses Material ist leicht, sehr stabil und hat in den Tests am MPIK gezeigt, dass auch nach mehreren thermischen Zyklen zwischen 77 K und 600 K (Ausheiztemperatur) keine irreversiblen Deformationen zu erkennen waren.

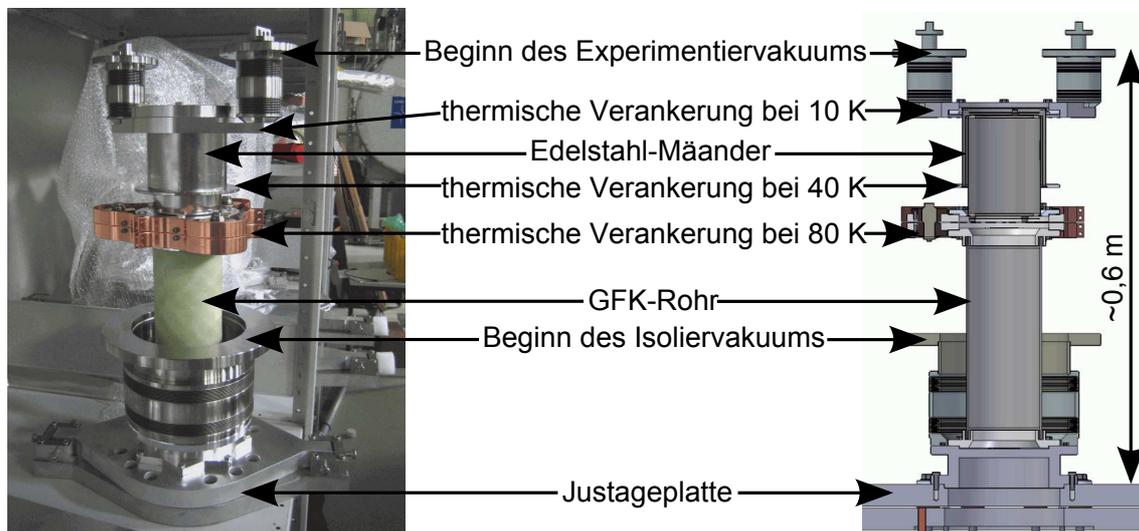


Abbildung 3.2: Gezeigt ist eine Elektrodenhalterung des CSR. Diese Halterungen sind auf den Betonfundamenten befestigt und werden über einen Balg an das Isoliervakuumssystem angekoppelt. Dort werden sie jeweils auf den 80 K- und 40 K-Strahlungsschilden thermisch verankert und anschließend wieder über Bälge mit dem Experimentivakuum verbunden. Der für die Kühlung der Vakuumkammern des Experimentivakuums interessante Beitrag ist die Wärmeleitung von der thermischen Verankerung auf dem 40 K-Schild zur Vakuumkammer.

²GFK Komponenten bestehen aus **G**lasfaserverstärktem **K**unststoff, einem leichten aber gleichzeitig stabilen Werkstoff. Dabei werden Glasfaserplatten in verschiedenen Orientierungen miteinander durch den Kunststoff verklebt und bewirken damit die hohe mechanische Stabilität.

Die Wärmeleitung von G10 lässt sich nach [37, 41] über

$$\log_{10}(\lambda) = a + b(\log_{10}T) + c(\log_{10}T)^2 + d(\log_{10}T)^3 + e(\log_{10}T)^4 + f(\log_{10}T)^5 + g(\log_{10}T)^6 + h(\log_{10}T)^7 + i(\log_{10}T)^8 \quad (3.6)$$

temperaturabhängig bestimmen. Die dabei verwendeten Fitparameter sind in Tabelle 3.1, zusammen mit denen für weitere Materialien, die später in diesem Kapitel noch benötigt werden, aufgeführt. Die dabei errechneten Werte für die Wärmeleitfähigkeiten stimmen bis auf maximal 5% mit den Messwerten [41, 42, 43, 44, 45] überein. Man kann deshalb davon ausgehen, dass auch die Unsicherheiten der Berechnungen in dieser Größenordnung liegen werden.

Tabelle 3.1: Fitparameter für die Wärmeleitung von verschiedenen am CSR verwendeten Materialien zu Gleichung (3.6) in $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ für den Temperaturbereich von 4 K bzw. 20 K (Titan) bis 300 K (aus [37, 41, 42, 43, 44, 45]). Die resultierenden Funktionen beschreiben die Messwerte auf mindestens 5% genau [37].

Parameter	Edelstahl 316	Titan Ti6Al4V	GFK	GFK _⊥
<i>a</i>	-1,4087	-5107,8774	-2,64827	-4,1236
<i>b</i>	1,3982	19240,422	8,80228	13,788
<i>c</i>	0,2543	-30789,064	-24,8998	-26,068
<i>d</i>	-0,6260	27134,756	41,1625	26,272
<i>e</i>	0,2334	-14226,379	-39,8754	-14,663
<i>f</i>	0,4256	4438,2154	23,1778	4,4954
<i>g</i>	-0,4658	-763,07767	-7,95635	-0,6905
<i>h</i>	0,1650	55,796592	1,48806	0,0397
<i>i</i>	-0,0199	0	-0,11701	0

Die Daten sind für zwei verschiedene Richtungen in Bezug auf die Ausrichtung der Fasern im GFK beschrieben, entlang derer die Wärmeleitung gemessen wurde. Da die in unserem Fall verwendeten GFK-Rohre die Fasern jeder Lage um 90° zur vorherigen verkippt ausgerichtet haben, liegt keiner der beiden Fälle vor. Deshalb, und weil die beiden Varianten sich deutlich unterscheiden (siehe Abb. 3.3), wurden im Folgenden die Werte verwendet, die eine größere resultierende Wärmeleitung (GFK_{||}) bedeuten, um die transportierte Leistung im ungünstigsten Fall zu überschätzen, aber sicher nicht zu unterschätzen.

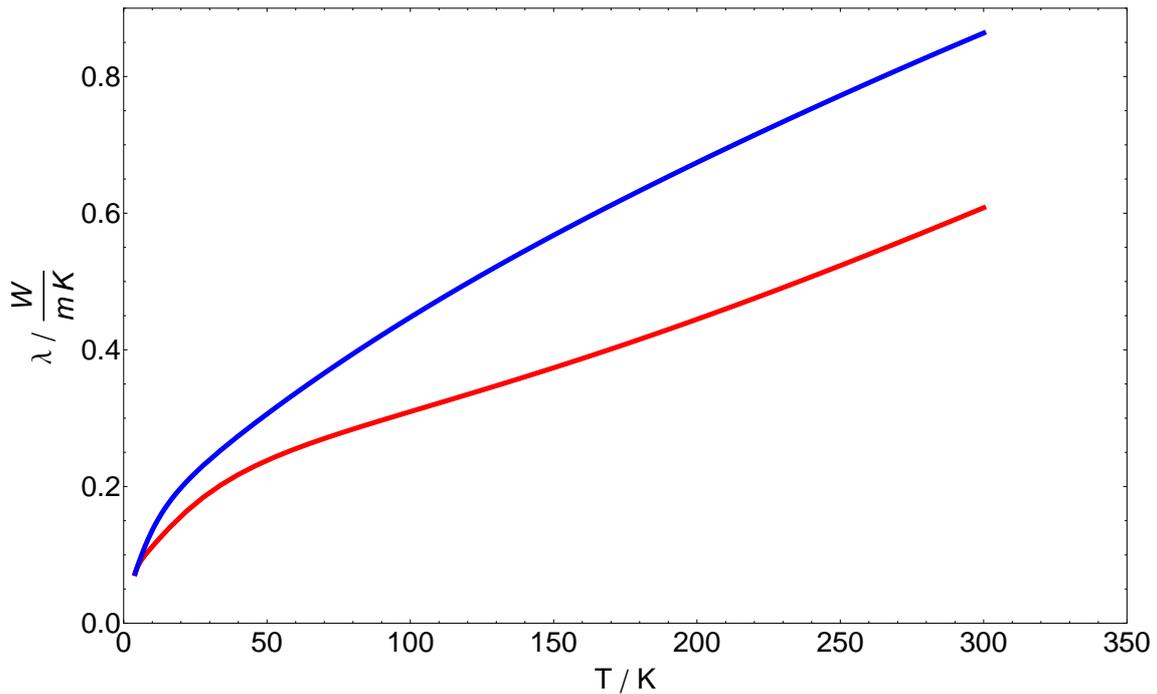


Abbildung 3.3: Wärmeleitung von GFK für den Temperaturbereich von 10 K bis 300 K nach Gleichung (3.6) und Tabelle 3.1. In blau ist der Fall dargestellt, dass die Wärmeleitung entlang der Faserrichtung gemessen wird und in rot für den Fall senkrecht dazu.

Die verwendeten GFK-Rohre haben eine Länge von $l = 274$ mm, einen Außendurchmesser von $d = 100$ mm und eine Wandstärke von $b = 2,5$ mm. Damit resultiert bei einem Temperaturgradienten entlang des GFK-Rohrs von 300 K auf 80 K ein Wärmeeintrag auf den 80 K-Strahlungsschild von 0,40 W pro Elektrodenstütze. Insgesamt werden davon sechs pro Ecke verwendet. Dementsprechend verursachen diese Stützen pro Ecke zusätzlich eine Wärmelast von 2,4 W und für den Ring zusätzliche 9,6 W, die abgeführt werden müssen.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass vom 80 K-Strahlungsschild eine Leistung von etwa 130 W abgeführt werden muss. Die Kälteanlage ist dazu jedoch mit einer Kühlleistung von 600 W im 5 K-Kreis problemlos in der Lage.

3.2.2 Wärmeeintrag auf die 40 K-Strahlungsschilde

Von außen nach innen folgt nach dem 80 K- das 40 K-Strahlungsschild. Dieses ist nicht mit Superisolierung in Richtung der wärmeren 80 K-Umgebung abgeschirmt, da zum einen zwischen den beiden Strahlungsschilden nur wenig Platz zur Verfügung steht und zum anderen der Beitrag der Wärmestrahlung ohne Superisolierung von 80 K auf 40 K mehr als 200 mal geringer ist als von 300 K auf 80 K. Für die zur Wärmestrahlung beitragende Fläche wird angenommen, dass die Fläche der beiden Strahlungsschilde identisch ist. Diese stehen parallel gegenüber, so dass sich der Beitrag der Wärmestrahlung über Gleichung (3.4) direkt aus der Größe der beteiligten

Flächen von insgesamt jeweils $27,76 \text{ m}^2$ pro Ecke und $12,20 \text{ m}^2$ je Linearsection und der Emissivität der Strahlungsschilde berechnen lässt. Werte für die Emissivität verschiedener Materialien bei kryogenen Bedingungen sind nur schwer zu finden. Bei Raumtemperatur sind diese Werte leichter zugänglich, so wird in [38] $\epsilon = 0,03$ für poliertes Aluminium angegeben. Aus dem Drude-Modell für den Ladungstransport in Metallen lässt sich eine Formel zur Berechnung der Emissivität auch bei niedrigen Temperaturen herleiten [38]:

$$\epsilon = 365 \times \sqrt{\frac{\rho}{\lambda}}. \quad (3.7)$$

Dabei wird der spezifische elektrische Widerstand ρ in Ω/m und die Wellenlänge der Wärmestrahlung λ in μm angegeben. Für die Wellenlänge der Wärmestrahlung wurde das Maximum im Spektrum der Wärmestrahlung nach Gleichung (1.2) für $T = 80 \text{ K}$ verwendet, also $36,22 \mu\text{m}$. Daraus resultiert für Aluminium-ENAW-5083 bei 80 K eine Emissivität von $0,011$. Der Wert für 40 K ist mit $\epsilon = 0,008$ kleiner, deshalb wird zur Bestimmung der oberen Grenze der Wärmestrahlung auf das 40 K -Strahlungsschild der Wert der Emissivität von 80 K verwendet. Daraus ergibt sich eine Wärmestrahlung vom 80 K - auf das 40 K -Strahlungsschild von $0,669 \text{ W}$ je Ecke und $0,294 \text{ W}$ je Linearsection. Für den kompletten CSR sind dies $3,9 \text{ W}$.

Das 40 K -Strahlungsschild besteht aus 15 mm dicken Aluminiumplatten, an denen die Seiten- und daran die Deckenteile befestigt sind. Letztere haben keinen mechanischen Kontakt zu den anderen CSR-Komponenten. Die Bodenplatten dagegen sind über ihre Stützen mit den Vakuumkammern des Isoliervakuumsystems auf Raumtemperatur verbunden (siehe Abb. 3.4). Diese bestehen aus einem Titanblech, das in einer Zickzack-Form gefaltet wurde und senkrecht zur Ebene dieses Profils belastet werden soll. Diese Form ermöglicht es, bei einer extrem kleinen Querschnittsfläche, eine hohe mechanische Stabilität zu erreichen. Der geringe Querschnitt begünstigt nach Gleichung (3.3) die thermische Isolierung, die in diesem Fall möglichst gut sein soll.

Für die Berechnung der Wärmeleitung des verwendeten Materials Ti6Al4V wurden die Fitparameter aus Tabelle 3.1 und Gleichung (3.6) mit den Daten aus [45] verwendet. Diese Daten sind nur für Temperaturen bis 20 K gültig, für den Bereich darunter wurden keine geeigneten Daten gefunden. Dies stellt für die Berechnungen des Wärmeeintrags auf das 40 K -Strahlungsschild kein Problem dar, für die entsprechenden Berechnungen zu den inneren Vakuumkammern bei Temperaturen von maximal 10 K jedoch schon. Da es für den Verlauf der Wärmeleitung unterhalb von 20 K keine Werte gab, wurde für die Wärmeleitung unter 20 K der Wert bei 20 K für die Abschätzung des Wärmetransports verwendet. Damit liefert die Rechnung eine obere Grenze für den Wärmeeintrag. Der Verlauf der Wärmeleitung in Abb. 3.5 impliziert, dass die Verwendung der Wärmeleitung bei 20 K für den Temperaturbereich darunter zur Abschätzung einer oberen Grenze geeignet ist.

Jede dieser Stützen hat bei einer Länge von 165 mm lediglich eine Querschnittsfläche von $36,1 \text{ mm}^2$. Daraus resultiert ein Wärmeeintrag von 288 mW je Stütze, und damit $5,2 \text{ W}$ je Ecke. Da sich die Linearsectionen zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit noch in der Detailplanung befinden, kann die Anzahl der dort benötigten

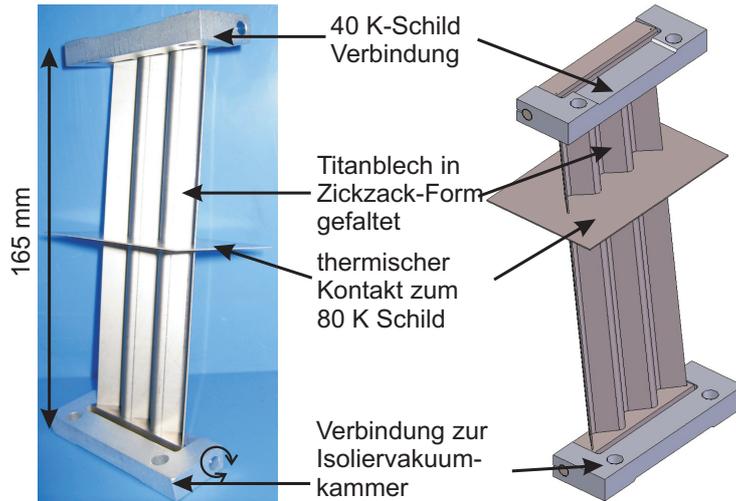


Abbildung 3.4: Gezeigt ist eine der Titanstützen zur Befestigung des 40 K-Strahlungsschildes auf den äußeren Vakuumkammern. Ähnliche Stützen werden auch verwendet, um die inneren Vakuumkammern auf dem 40 K-Strahlungsschild zu befestigen.

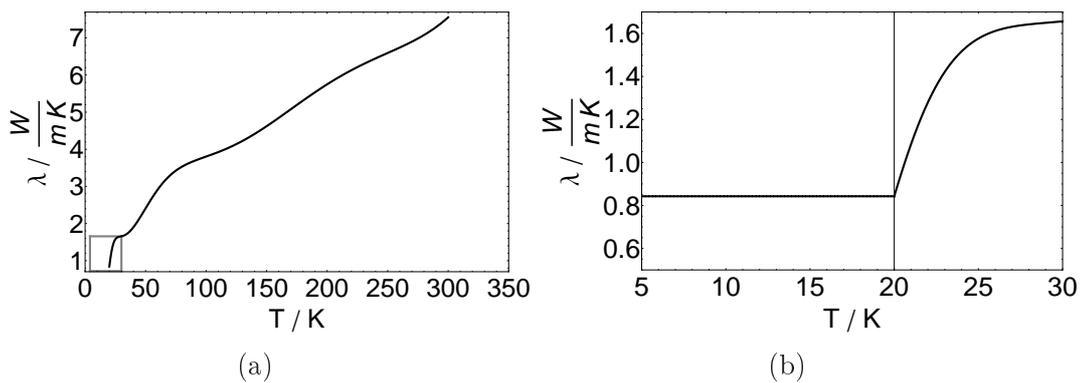


Abbildung 3.5: Dargestellt ist in (a) die Wärmeleitung von Titan der Legierung Ti6Al4V für den Temperaturbereich von 20 K bis 300 K. Unterhalb von 20 K sind die Fitparameter aus [37] ungültig, der Verlauf der Wärmeleitung deutet jedoch darauf hin, dass wenn man die Wärmeleitung von 20 K auch für Temperaturen darunter verwendet die Wärmeleitung eher überschätzt (b). Deshalb wurde sofern erforderlich dieser Wert als Abschätzung verwendet.

Stützen für die 40 K-Strahlungsschilde nur mit 12 Stück abgeschätzt werden. Damit erhält man für den kompletten CSR einen Wärmeeintrag durch die Stützen des 40 K-Strahlungsschildes von 35 W. Diese Stützen haben an beiden Enden keinen perfekten thermischen Kontakt. Übergänge verschiedener Materialien sind selbst bei auftretenden Kräften wie dem Verschrauben der Komponenten miteinander nicht perfekt und leiten die Wärme schlechter, als wenn es sich um ein einzelnes Teil handeln würde. Die Berechnungen sind deshalb als obere Grenze des Wärmeeintrags zu betrachten.

Eine weitere Wärmequelle für den 40 K-Strahlungsschild stellen später möglicher-

weise die Elektrodenstützen dar. Wie in Abb. 3.2 dargestellt ist eine thermische Verbindung mit den 40 K-Bodenplatten vorgesehen. Diese ist optional, d.h. sie wird für die ersten Tests nicht installiert, kann aber nachgerüstet werden, sofern es die Ergebnisse erforderlich machen. Dies kann notwendig sein, wenn die ionenoptischen Elemente beim Abkühlen nicht die geforderten Endtemperaturen erreichen sollten. Für diesen Fall tritt Wärmeleitung durch den mäanderförmigen Edelstahlkörper vom 80 K- zum 40 K-Strahlungsschild auf. Die effektive Länge dieser Komponente beträgt 220 mm bei einem Durchmesser von 102 mm und einer Wandstärke von 0,3 mm. Es können also weitere 115 mW je Elektrodenstütze, d.h. 2,7 W für den kompletten CSR, zu den bisherigen Wärmeeinträgen auf das 40 K-Strahlungsschild hinzukommen.

Einen weiteren Beitrag liefern die Messleitungen der Temperatursensoren, die Hochspannungsleitungen der ionenoptischen Elemente und die Leitungen für das Ausheizsystem der inneren Vakuumkammern. Die Leitungen der Temperatursensoren sind bevor sie mit dem 40 K-Strahlungsschild in Kontakt kommen mindestens 1 m von der Durchführung in das Isoliervakuum bei 300 K entfernt. Da diese Leitungen zusätzlich einen sehr kleinen Durchmesser von etwa 0,2 mm haben, ist der durch diese Leitungen verursachte Beitrag vernachlässigbar. Die Leitungen für die Hochspannung und Heizung sind ähnlich weit von ihrer warmen Kontaktstelle entfernt, haben aber einen deutlich größeren Durchmesser von 1 mm. Da es bei beiden nicht erforderlich ist, dass sie die elektrische Leitfähigkeit von den Kupferleitungen erreichen, wurden Edelstahldrähte verwendet. Edelstahl hat eine um zwei bis drei Größenordnung kleinere Wärmeleitfähigkeit als Kupfer (siehe dazu Abb. 3.7 und 3.10), so dass auch der Beitrag dieser Leitungen vernachlässigbar gering ist.

In der Summe ist für den kompletten CSR mit einer Wärmelast von 42 W auf dem 40 K-Strahlungsschild zu rechnen. Diese Leistung wird wie auch die des 80 K-Strahlungsschildes über das 5 K-Leitungssystem abgeführt. Zusammen mit der ebenfalls über dieses Leitungssystem abgeführten Leistung des 80 K-Strahlungsschildes sind 172 W abzuführen. Die zur Verfügung stehenden 600 W sind dafür ausreichend. Zu beachten ist, dass in diesen Rechnungen nur das grundlegende kryogene Konzept der Linearsektionen berücksichtigt wurde. Es kann also sein, dass in den Linearsektionen durch die dort geplanten Experimente weitere Wärmequellen, wenn auch in geringerem Umfang, hinzukommen werden.

3.2.3 Wärmeeintrag auf die Innenkammern

Für die Kammern des Experimentiervakuums werden Temperaturen von unter 10 K gefordert. Die Kammern selbst können aber nicht durch ein Bad aus flüssigem Helium gekühlt werden, stattdessen werden von den 2 K-Einheiten (siehe Abb. 3.6) Verbindungen über Bänder aus hochreinem Kupfer (99,997%) zur Kühlung verwendet. Dieses System wurde schon am kryogenen Prototypen CTF erfolgreich getestet. Diese Methode sorgt aber dafür, dass die Kammern nur lokal an einzelnen Stellen gekühlt werden. Um trotzdem eine möglichst homogene Temperaturverteilung und gleichzeitig niedrige Temperaturen zu erreichen, wurden im Folgenden sowohl die Wärmebilanz der Kammern selbst, als auch die Wärmeleitung entlang der Kam-

merwände untersucht.

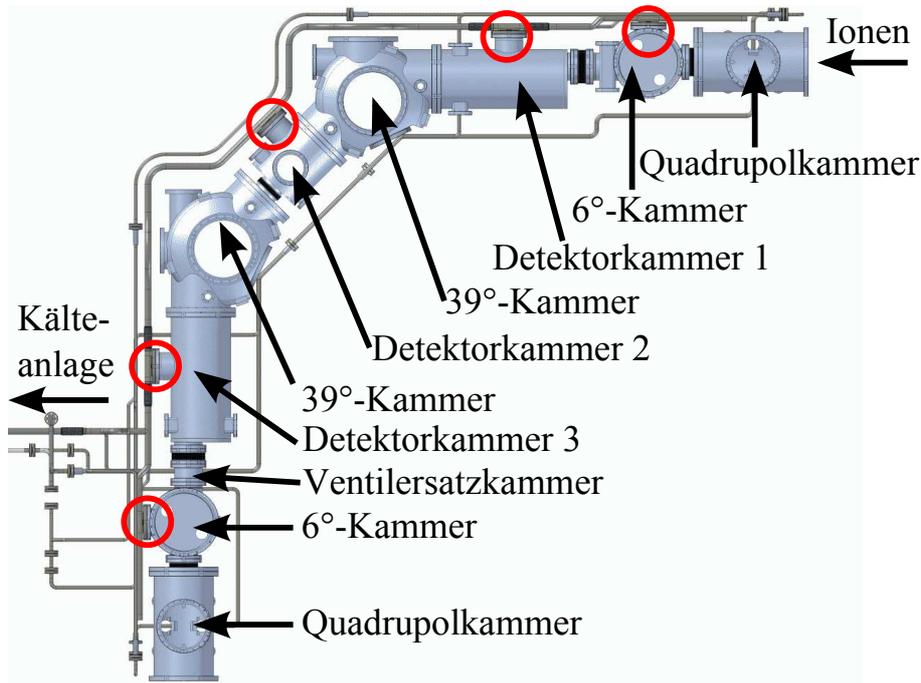


Abbildung 3.6: Dargestellt ist die Draufsicht auf die inneren Vakuummokammern der ersten Ecke des CSR. Die später in diesem Abschnitt verwendeten Bezeichnungen dieser Vakuummokammern sind zusammen mit den Positionen der 2 K-Einheiten (rot markiert) dargestellt.

Zunächst wurde angenommen, dass die Heliumleitung über Kupferbänder lokal die Vakuummokammern kühlt. Das heißt, dass die Wärmeenergie allein durch die Wärmeleitung zu den gekühlten Kontakten transportiert werden muss. Dies wurde vereinfacht, indem angenommen wurde, dass ein Streifen Edelstahl der Länge L einseitig von einer wärmeren Umgebung bestrahlt und an einem Ende gekühlt wird. Dabei wird angenommen, dass an dem kalten Ende eine konstante Temperatur von 4 K gewährleistet ist. Durch die Distanz zu den 2 K-Einheiten wäre es unrealistisch für die kalten Kontakte Temperaturen von 2 K anzunehmen. Es wird angenommen, dass sich ein Gleichgewicht einstellt zwischen der zugeführten Leistung auf die Kammern und der durch die Kühlung abgeführten Leistung. Im Folgenden wird ein Streifen der Dicke d , Breite b und Länge l betrachtet. Wenn man vereinfacht annimmt, dass die zugeführte Leistung allein auf der Wärmestrahlung basiert, erhält man aus der Gleichgewichtsbedingung $\dot{Q}_l = \dot{Q}_s$ und unter Verwendung von Gleichung (3.3) und (3.4) die Differentialgleichung:

$$d \frac{\partial}{\partial x} \lambda(T(x)) \frac{\partial}{\partial x} T(x) = \sigma \epsilon [T^4(x) - T_0^4]. \quad (3.8)$$

Die Randbedingungen zum Lösen dieser Differentialgleichung sind zum einen, dass der Streifen an dem Ende, an dem er gekühlt wird, sich auf einer festen Temperatur T_0 befindet, d.h.

$$T(0) = T_0, \quad (3.9)$$

und zum anderen, dass kein zusätzlicher Wärmeeintrag am ungekühlten Ende des Streifens vorhanden ist, also

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=l} = 0. \quad (3.10)$$

Mit den Abkürzungen $C = \frac{\sigma \epsilon}{d}$ und $\lambda^*(x) = \frac{\partial \lambda(x)}{\partial x} / \lambda(x)$ folgt dann die Differentialgleichung für die Temperaturverteilung entlang des Streifens zu

$$T''(x) + T'(x) \lambda^*(x) - \frac{C}{\lambda(x)} (T^4(x) - T_0^4) = 0. \quad (3.11)$$

Diese Differentialgleichung wird iterativ gelöst, indem zuerst eine über den relevanten Temperaturbereich konstante Wärmeleitung λ angenommen und ausgehend davon die Temperaturverteilung entlang des Streifens berechnet wird. Danach kann iterativ die Wärmeleitung in Abhängigkeit des Ortes auf dem Streifen bestimmt und ausgehend davon die Temperaturverteilung berechnet werden. Die Wärmeleitung von Edelstahl wird hierbei durch ein Polynom zweiter Ordnung $\lambda(x) = Ax^2 + Bx + C$ angenähert. Die Verwendung eines Polynoms höherer Ordnung bewirkt keine wesentliche Änderung der Ergebnisse, da die entsprechenden Koeffizienten im Vergleich zum Polynom zweiter Ordnung verschwinden. Daraus resultiert die Ableitung der Wärmeleitung $\frac{\partial \lambda}{\partial x}$, wie sie in Gleichung (3.8) benötigt wird, über

$$\begin{aligned} C &= T_1 \\ B &= \frac{4T_2 - T_3 - 3T_1}{L} \\ A &= \frac{T_3 - BL - T_1}{L^2} \end{aligned} \quad (3.12)$$

bestimmen lässt. Dabei stehen T_1 , T_2 und T_3 für Werte der Temperatur am kalten Ende, in der Mitte und am ungekühlten Ende des Edelstahlstreifens. Verwendet wurde für diese Berechnung die Fitfunktion aus Gleichung (3.6) und die Parameter aus Tabelle 3.1 für die Wärmeleitung von Edelstahl aus [42, 37, 44]. Der entsprechende Verlauf für die Wärmeleitung ist in Abb. 3.7 dargestellt.

Da in diesem Fall Wärmestrahlung zwischen zwei Körpern verschiedener Materialien und damit verschiedener Emissivitäten erforderlich waren, wurde über (aus [38])

$$\epsilon = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_1 \epsilon_2} \quad (3.13)$$

der Wert für ein effektives ϵ in Gleichung (3.4) berechnet. Verwendet wurden dabei die Werte für Aluminium (siehe Abschnitt 3.2.2) von $\epsilon = 0,008$ und der Wert für

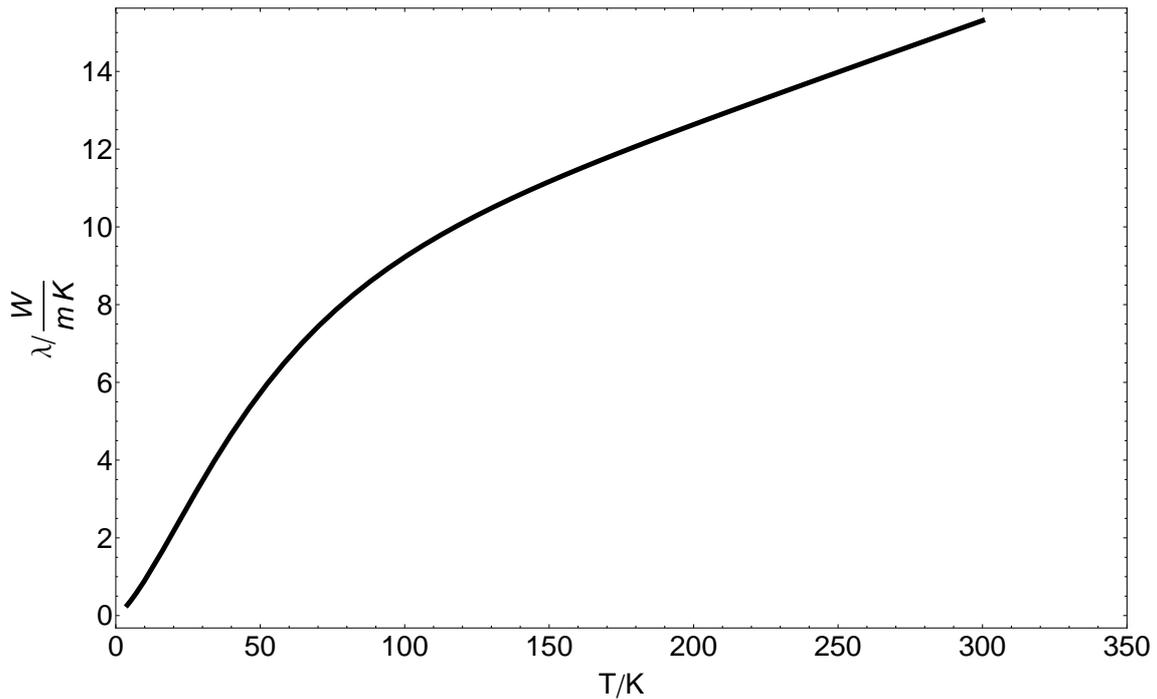


Abbildung 3.7: Gezeigt ist die Wärmeleitung von Edelstahl der Legierung 316 für den Temperaturbereich von 1 K bis 300 K.

Edelstahl von $\epsilon = 0,07$ aus [38].

Die Berechnungen der Temperatur auf dem Edelstahlstreifen wurden mehrfach für jeweils unterschiedlich viele Iterationsschritte durchgeführt. Als Ergebnis dieser Rechnungen ist in Abb. 3.8 die Temperatur am warmen Ende des Streifens in Abhängigkeit der Anzahl der Iterationsschritte dargestellt. Bereits nach 6 Iterationen waren die Temperaturunterschiede am warmen Ende unter 1 K.

Die für diese Lösung resultierende Temperaturverteilung entlang des Streifens ist in Abb. 3.9 für Wärmestrahlung einer 40 K-Umgebung und einer 80 K-Umgebung dargestellt. Wenn die Umgebung auf 40 K ist, ergibt sich eine Streifentemperatur von 7,3 K bei einer Entfernung von 0,5 m vom gekühlten Ende. Bei Wärmestrahlung einer 80 K-Umgebung in einem Abstand vom gekühlten Ende von $x = 0,5$ m ergibt sich eine Temperatur von 21,9 K, was deutlich über dem angestrebten Bereich von unter 10 K liegt. Im späteren CSR-Aufbau wird es nicht auszuschließen sein, dass auch solche Bereiche mit $T > 40$ K die Vakuumkammern bestrahlen, da es Lücken für Messleitungen, Hochspannung und Heizung sowie Öffnungen zum Abpumpen dieses inneren Bereichs in den Strahlungsschilden gibt. Das bedeutet, dass entweder die Abstände der gekühlten Punkte auf den Kammern im Bereich von etwa 2–3 cm liegen müssen (diese haben bei Bestrahlung von 80 K die geforderte Temperatur) oder eine andere Lösung zur Kühlung verwendet werden muss.

Eine mögliche Lösung ist, die Vakuumkammern mit Kupfer zu beschichten. Dabei wird die schlechte Wärmeleitung des Edelstahls durch die deutlich bessere Wärmeleitung des Kupfers ausgeglichen (siehe Abb. 3.10). Anders als die ionenoptischen Elemente ist eine galvanische Beschichtung der Oberflächen in diesem Fall zu auf-

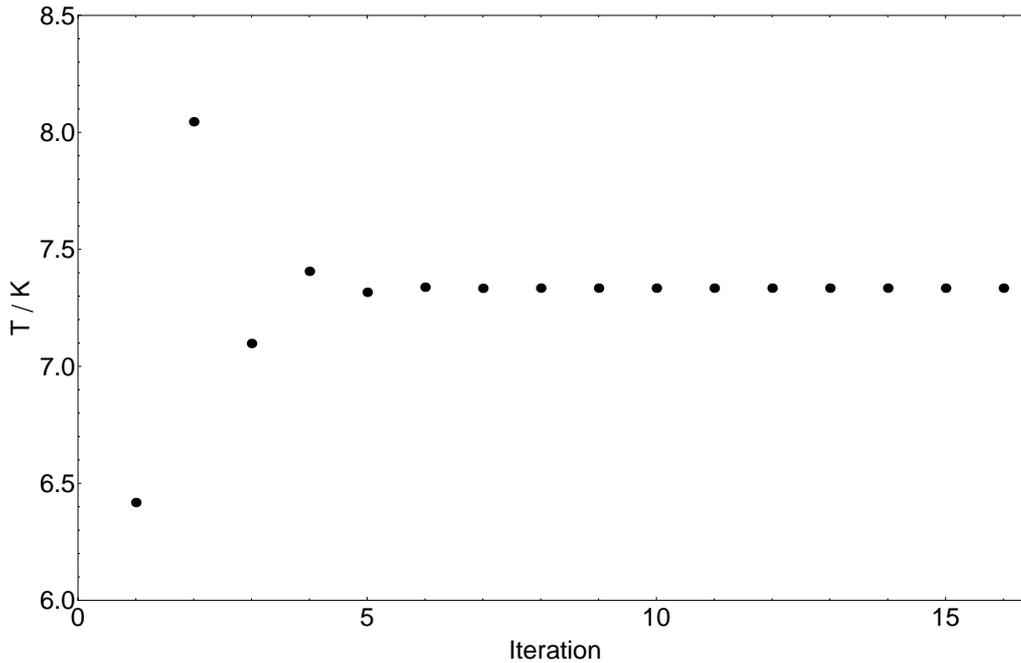


Abbildung 3.8: Dargestellt ist die Temperatur am Ende des Streifens aus Stahl mit einer Länge von 0,5 m, der an einem Ende auf 4 K gekühlt und von einer Seite durch Wärmestrahlung einer 80 K-Fläche aufgeheizt wird, in Abhängigkeit der Anzahl an Iterationen, die zur Berechnung durchgeführt wurden. Nach 6 Iterationen sind bereits keine Schwankungen größer als 1 K zu erkennen.

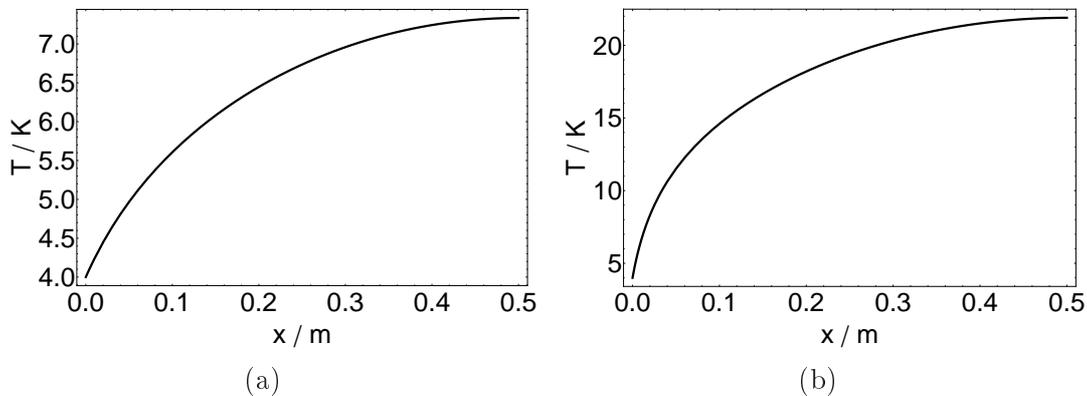


Abbildung 3.9: Gezeigt ist die Temperatur entlang eines Edelstahlstreifens der, der von einer Seite von Wärmestrahlung einer 40 K-Umgebung (a) bzw. einer 80 K-Umgebung (b) aufgeheizt und der anderen Seite auf konstant 4 K gehalten wird. Der Abstand von dieser kalten Verbindung wird durch die Größe x beschrieben.

wändig und zu teuer. Alternativ können die Vakuummkammern aber mit Kupferfolie eingepackt werden.

Damit bekommen die inneren Vakuummkammern im Prinzip einen zusätzlichen Strahlungsschild bei Temperaturen unter 10 K. Analoge Rechnungen zu denen mit dem Edelstahlstreifen wurden deshalb mit einem Kupferstreifen durchgeführt, allerdings wurde hier eine Dicke von 0,25 mm gewählt, was für Kupferfolie realistisch ist. Dabei

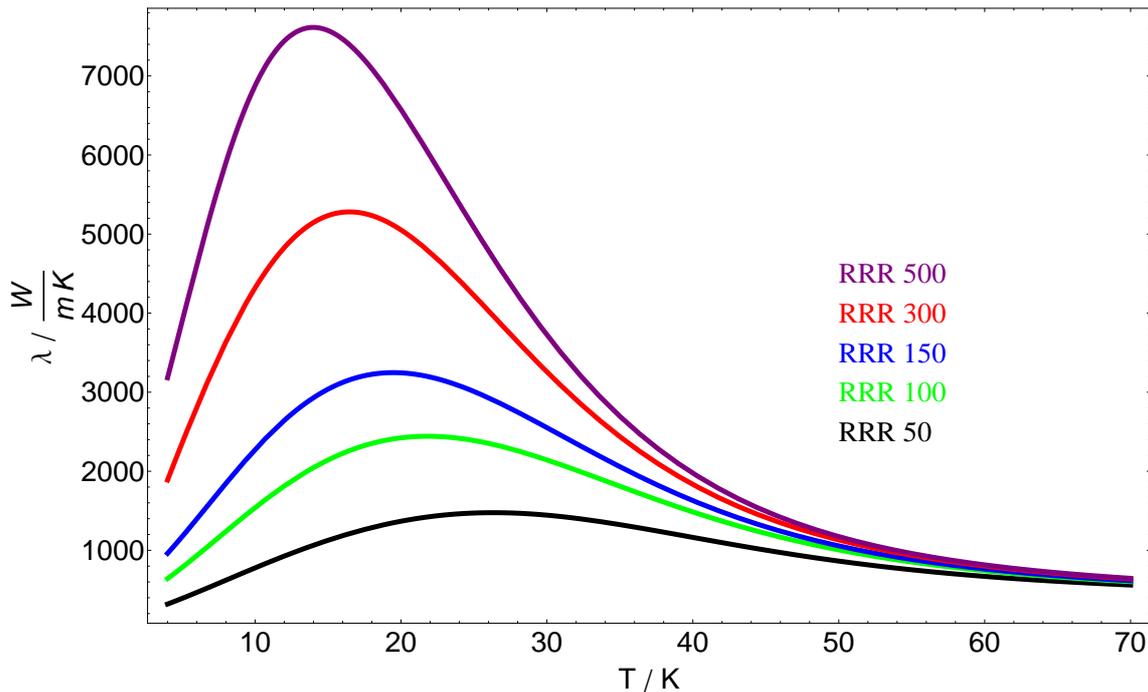


Abbildung 3.10: Gezeigt ist die Wärmeleitfähigkeit von Kupfer verschiedener Reinheitsgrade als Funktion der Temperatur. Die Bedeutung der Größe RRR als Maß für die Reinheit des Kupfers ist im Text erläutert.

wurde vereinfachend die Ableitung $\frac{\partial \lambda}{\partial x}$ durch den Differenzenquotient

$$\frac{\lambda(x + \Delta x) - \lambda(x)}{\Delta x} \quad (3.14)$$

ersetzt, da eine analytische Berechnung der Ableitung die Rechenzeit extrem verlängert hätte. Die temperaturabhängige Wärmeleitung von Kupfer wurde durch die analytische Formel

$$\log_{10}(\lambda) = \frac{a + cT^{0,5} + eT + gT^{1,5} + iT^2}{1 + bT^{0,5} + dT + fT^{1,5} + hT^2} \quad (3.15)$$

mit den in Tabelle 3.2 dargestellten Fitparametern für verschiedene Reinheitsgrade von Kupfer beschrieben [37]. Die Angabe der Reinheit geschieht dabei über den sog. RRR-Wert, dem Verhältnis des elektrischen Widerstands bei Raumtemperatur und bei etwa 4 K. Je reiner das Material, desto größer der RRR-Wert. Beispiele für den RRR-Wert von Kupfer und Aluminium verschiedener Reinheiten in % können in [38] nachgeschlagen werden.

Tabelle 3.2: Aufgelistet sind die Fitparameter zu Gleichung 3.15 für die Wärmeleitung von Kupfer in $\text{W}/(\text{m K})$ für verschiedene Reinheiten für den Bereich von 4 K bis 300 K (aus [42, 37, 46, 47, 48]). Da in [37] keine Unsicherheiten für die Ergebnisse angegeben sind, wird angenommen, dass die Messwerte ähnlich gut beschrieben werden wie im Fall der anderen Materialien in Tab. 3.1.

Parameter	RRR 50	RRR 100	RRR 150	RRR 300	RRR 500
a	1,8743	2,2154	2,3797	1,3570	2,8075
b	-0,41538	-0,47461	-0,49180	0,39810	-0,54074
c	-0,6018	-0,88068	-0,98615	2,669	-1,2777
d	0,13294	0,13871	0,13942	-0,13460	0,15362
e	0,26426	0,29505	0,30475	-0,66830	0,36444
f	-0,02190	-0,02043	-0,019713	0,01342	-0,2105
g	-0,051276	-0,04831	-0,046897	0,05773	-0,051727
h	0,0014871	0,001281	0,0011969	0,0002147	0,0012226
i	0,003723	0,003207	0,0029988	0	0,0030964

Die verwendete Wärmeleitfähigkeit des Kupfers basiert hierbei auf Kupferdaten mit einem RRR-Wert von 50, wobei diese Werte zur Sicherheit zusätzlich um den Faktor drei verkleinert wurden. In diesem Fall konvergierte die Lösung ähnlich schnell wie bei den Rechnungen mit Edelstahl, so dass man mit 10 – 15 Iterationen eine Lösung erhält, wie sie in Abb. 3.11 dargestellt ist.

Die Temperatur entlang des Kupferstreifens steigt dabei selbst bei einem Abstand von 0,5 m nicht über 5 K an (siehe Abb. 3.12), sofern sich die Temperatur der abstrahlenden Umgebung auf 40 K befindet. Damit sind mit dieser Methode deutlich weniger Kontakte zur Heliumleitung notwendig als bei der Verwendung von Edelstahl, und zusätzlich wird eine bessere Homogenität der Temperatur erreicht. Im Fall einer 80 K-Umgebung erwärmt sich das Kupfer in demselben Abstand zum kalten Ende auf maximal 4,7 K und erfüllt damit ebenfalls die Anforderungen.

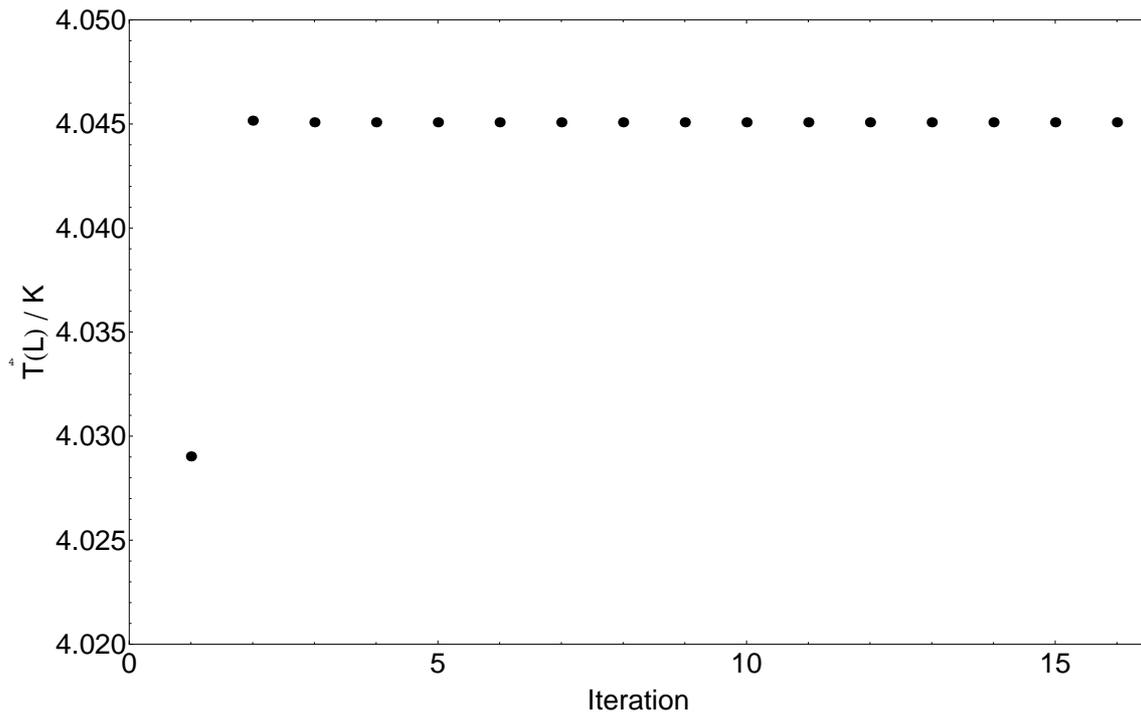


Abbildung 3.11: Dargestellt ist die Temperatur am Ende des Streifens aus Kupfer mit einer Länge von 0,5 m, der an einem Ende auf 4 K gekühlt und von einer Seite durch Wärmestrahlung einer 40 K-Fläche aufgeheizt wird, in Abhängigkeit der Anzahl an Iterationen, die zur Berechnung durchgeführt wurden. Nach 2 Iterationen sind bereits keine Schwankungen größer als 0,1 K zu erkennen.

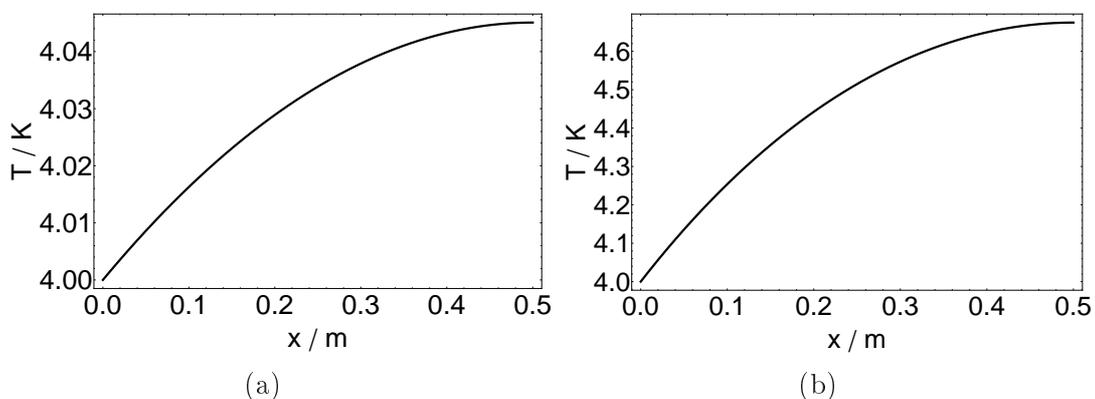


Abbildung 3.12: Gezeigt ist die Temperatur entlang eines Kupferstreifens, der von einer Seite von Wärmestrahlung einer 40 K-Umgebung (a) bzw. einer 80 K-Umgebung (b) aufgeheizt wird und die andere Seite auf konstant 4 K gehalten wird. Der Abstand von dieser kalten Verbindung wird durch die Größe x beschrieben.

Die berechneten Temperaturen an Punkten auf den Vakuumkammern, die nicht direkt an die Heliumleitungen angeschlossen sind, zeigen, dass es sinnvoll ist, die Kammern des Experimentiervakuums mit einer Kupferfolie einzupacken. Damit soll eine homogenere Temperaturverteilung auf der Kammeroberfläche und niedrigere Maximaltemperaturen erreicht werden, als es ohne Kupferfolie der Fall wäre. Für die

Temperaturverteilung beim Ausheizen der Kammern wird die Folie keinen wichtigen Beitrag leisten, da die Wärmeleitfähigkeiten von Stahl und Kupfer sich bei diesen Temperaturen nicht mehr so stark unterscheiden wie bei Temperaturen um 4 K. Zur Bestimmung der Art und Anzahl der Anschlüsse der Vakuumkanern an die Heliumleitung ist es notwendig, die Wärmeleistung zu kennen, die den Kammern zugeführt wird. Wärmeeinträge auf die Kammern werden verursacht durch:

- Wärmeleitung durch elektrische Leitungen (Hochspannung, Temperatursensoren und Heizung)
- Wärmeleitung durch die Befestigungen der Kammern auf den 40 K-Schilden
- Elektrodenhalterungen, da diese sowohl Kontakt zu den 80 K- bzw. 40 K-Strahlungsschilden, als auch zu den Vakuumkanern haben
- Wärmestrahlung von den 40 K-Strahlungsschilden.

Wärmeleitung durch Signal- und Hochspannungsleitungen liefert dabei keinen großen Wärmeeintrag, da die Leitungen auf den 40 K-Schilden thermisch verankert sein werden und die Leitungen selbst aus Edelstahl gefertigt sind. Mit Gleichung 3.3 und der Fitfunktion für die Wärmeleitung von Stahl aus [37], die auf den Daten von [42, 44] basiert, kann der Beitrag einer Leitung abgeschätzt werden. Der ungünstigste Fall, d.h. der maximale Wärmeeintrag auf die Kammern, tritt ein, wenn die Kammern auf 2 K gekühlt sind, die Schilde sich auf 40 K befinden, und ein relativ dicker, kurzer Draht verwendet wird. Für einen Draht mit 2 mm Durchmesser und 0,3 m Länge ergibt sich ein Wärmeeintrag von 0,9 mW. Längere bzw. dünnere Leitungen, wie es insbesondere bei den Signalleitungen der Fall sein wird, liefern einen deutlich geringeren Wärmeeintrag. Insgesamt ist also der Wärmeeintrag durch Wärmeleitung der Kabelverbindungen zwischen den 40 K-Strahlungsschild und den Innenkammern vernachlässigbar.

Die inneren Vakuumkanern sind mit ähnlichen Stützen auf den 40 K-Strahlungsschilden befestigt, wie diese auf den äußeren Vakuumkanern abgestützt sind (siehe Abb. 3.4). Der einzige Unterschied ist die Länge der Bleche zwischen den beiden Befestigungen, sie beträgt 144,0 mm im Vergleich zu 165 mm. Damit kann über Gleichung (3.3) der Wärmeeintrag pro Halterung der Vakuumkanern berechnet werden. Für das verwendete Titan (Ti6Al4V) ergibt sich nach [37, 43, 45] im ungünstigsten Fall, d.h. Vakuunkammer auf 10 K und Schild auf 40 K, ein Wärmeeintrag von 10,5 mW pro Halterung. Die 39°- und die 6°-Deflektorkammer sowie die Quadrupolkammer werden mit je vier Stützen auf den 40 K-Schildplatten befestigt. Die beiden großen Detektorkammern (Detektorkammer 1 und 3 in Abb. 3.6) zwischen den Vakuumkanern für die 6°- und 39°-Deflektoren werden mit jeweils einer dieser Stützen befestigt. Die Detektorkammer zwischen den beiden 39°-Deflektoren wird nur über die Vakuumkanern der 39°-Deflektoren gehalten. Damit ergibt sich pro Ecke eine Wärmelast von 273,0 mW. Wie im Fall der 40 K-Strahlungsschilde ist es auch bei den Stützen der inneren Vakuumkanern bisher noch nicht festgelegt, wie viele dieser Stützen in den Linearabschnitten benötigt werden. Diese sind etwa 3 m lang, so dass es recht wahrscheinlich ist, dass auf diesen Strecken jeweils bis zu

12 Stützen für die Vakuumkammern verwendet werden. Für den kompletten CSR würde daraus eine Wärmelast von maximal 1,6 W resultieren.

Der Beitrag der Elektrodenhalterungen ist durch mehrere Übergänge verschiedener Materialien und die komplexe Geometrie für den Fall, dass die Elektrodenstützen nur auf dem 80 K-Strahlungsschild thermisch verankert sind, nicht abzuschätzen. Sollte es sich bei den Messungen zeigen, dass der Wärmeeintrag auf die ionenoptischen Elemente zu groß ist, ist vorgesehen zusätzlich zur Option mit dem Kontakt auf dem 40 K-Strahlungsschild auch eine Verbindung mit einer der 5 K-Leitungen zu nutzen, um das obere Ende der Elektrodenstützen auf 10 K zu kühlen. Dabei würde keine zusätzliche Wärmelast auf den 2 K-Kreis anfallen.

Ausgehend von 3D-Modellen der Vakuumkammern des Experimentiervakuum und der umgebenden 40 K-Schilde konnten die Oberflächen der Kammern und die Schildflächen bestimmt werden, die zur Berechnung der Wärmestrahlung und damit der benötigten Kühlleistung notwendig sind. Dabei wurde die Fläche der 40 K-Strahlungsschilde jeweils durch die der äußeren Vakuumkammern abgeschätzt, analog der Berechnungen zum 40 K-Strahlungsschild. Die Oberflächen der inneren Vakuumkammern wurden direkt aus den Konstruktionsmodellen ermittelt und sind in Tabelle 3.3 dargestellt.

Tabelle 3.3: Aufgelistet sind die Oberflächen der Vakuumkammern (Experimentiervakuum) und deren Längen entlang der Sollbahn der Ionen.

Kammer	Oberfläche/ m^2	Länge/ m
39°-Kammer 1	1,552	0,985
39°-Kammer 2	1,485	0,985
6°-Kammer 1	0,945	0,530
6°-Kammer 2	0,734	0,430
Quadrupolkammer	0,930	0,610
Detektorkammer 2	0,429	0,455
Detektorkammer 1 und 3	1,098	0,760
Ventilersatz	0,820	0,101
Balg Quadrupolkammer	0,273	0,070
Balg 6°-Deflektor	0,316	0,090

Aus den Oberflächen der Vakuumkammern, die in erster Näherung zylindrisch sind (6°, Quadrupol- und die Detektorkammern 1 und 3), und deren Länge kann eine gemittelte Oberfläche pro Meter Länge von $1,55 m^2/m$ berechnet werden. Damit wurden die Oberflächen der jeweils etwa 3 m langen Linear-sektionen zu jeweils etwa $5 m^2$ abgeschätzt. Die Emissivität von Aluminum des 40 K-Strahlungsschildes von $\epsilon_{Al} = 0,08$ ist dieselbe wie sie in Abschnitt 3.2.2 genannt wurde. Für die Kupferfolie um die inneren Vakuumkammern bei 10 K wird über die Gleichungen (1.2) und (3.7) und dem Wert des spezifischen elektrischen Widerstands von Kupfer von

$0,030 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ aus [38] der Wert $\epsilon = 3,71 \times 10^{-3}$ berechnet. Damit ergibt sich unter Verwendung von Gleichung (3.5) für eine Ecke ein Wärmeeintrag von 0,6 mW und für eine Linearsektion 0,3 mW. Der Beitrag der Wärmestrahlung zur Energiebilanz der inneren Vakuumkammern beträgt für den CSR also 3,6 mW und ist damit gegenüber der Wärmeleitung durch die Stützen der Vakuumkammern vernachlässigbar.

Durch die Wärmeleitung der Stützen der inneren Vakuumkammern und die Wärmestrahlung der 40 K-Strahlungsschilde ergeben sich somit 274 mW je Ecke des CSR und 1,6 W für den kompletten Speicherring als Wärmelast auf dem 2 K-Kühlkreis. Da die Kälteanlage bei diesen Temperaturen eine Kühlleistung von mindestens 20 W zur Verfügung stellt, ist diese Wärmelast problemlos abzuführen.

Zum effektiven Pumpen von Wasserstoff im kalten Anwendungsfall sind die sog. 2 K-Einheiten vorgesehen. Diese werden über den 2 K-Kreis mit superfluidem Helium bei 1,5 K bis 2,0 K versorgt. In jeder Ecke des CSR werden fünf dieser 2 K-Einheiten zum Einsatz kommen (siehe Abb. 3.6), in den Linearsektionen sind jeweils zwei vorgesehen. Die 2 K-Einheiten bestehen im inneren Vakuumsystem aus einem Kupferkörper, der so bearbeitet wurde, dass er bei moderatem Arbeitsaufwand eine möglichst große Oberfläche zur Kryokondensation von Wasserstoff bietet (siehe Abb. 3.13).

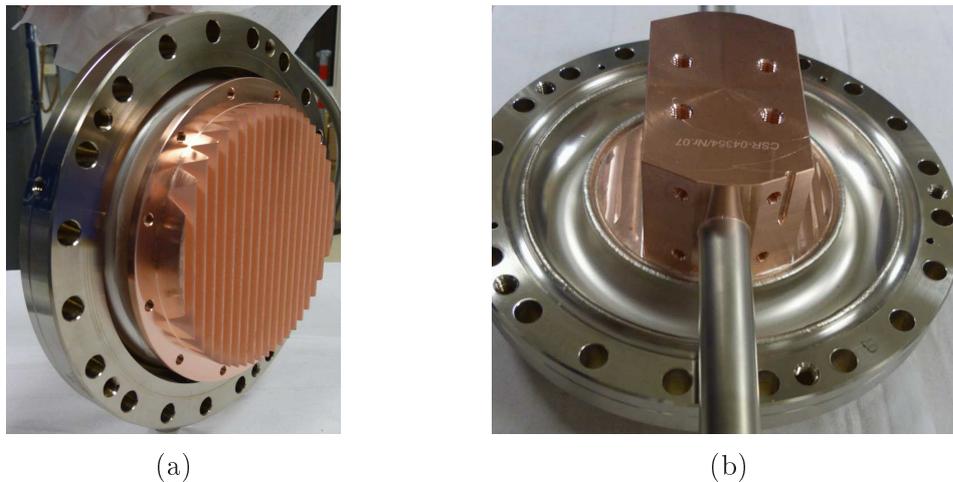


Abbildung 3.13: Ansicht der Experimentierseite (a) und Isolierseite (b) einer 2 K-Einheit. Die Gewinde auf der Isolierseite dienen der Befestigung der Kupferstreifen zur Kühlung der inneren Vakuumkammern.

Der Kupferkörper ist mit den Heliumleitungen verlötet, die innerhalb des Kupferkörpers Löcher besitzen, so dass das Helium einen direkten Kontakt mit dem Kupfer hat (siehe Abb. 3.14). Damit wird verhindert, dass durch den Übergang Helium-Edelstahl und Edelstahl-Kupfer die Temperatur des Kupfers nicht mehr unter 2 K gehalten werden kann. Die 2 K-Einheiten müssen mit den inneren Vakuumkammern mechanisch verbunden sein und dementsprechend die gleichen Extremwerte der Temperaturen von 2 K bis 600 K schadlos überstehen. Durch den Kontakt mit den 10 K warmen Vakuumkammern könnten die 2 K-Einheiten durch Wärmeleitung

so stark erwärmt werden, dass ihre Temperatur auf über 2 K ansteigt. Aus diesem Grund ist zwischen dem Flansch zur Verbindung mit der Vakuumkammer und dem Kupferkörper der Weg durch eine „Rinne“ möglichst lang gewählt (siehe Abb. 3.13). Diese ist aus 1 mm dickem Edelstahl und minimiert damit nach Gleichung (3.3) die Wärmeleitung von den Vakuumkammern. In den 2 K-Einheiten sind die beiden Leitungen für die flüssige und gasförmige Phase des Heliums durch Steigrohre miteinander verbunden. In diesen steht das flüssige Helium bis zu einer bestimmten Höhe, die bestimmt wird durch die aktuelle Leistung der Kälteanlage und den Wärmeeintrag auf diesen Kühlkreis. Durch die Verwendung von superfluidem Helium wird gewährleistet, dass an allen Kalteinheiten dasselbe Heliumlevel und dieselbe Temperatur vorliegen. Über die obere Leitung wird das durch den Wärmeeintrag verdampfte Helium von einer Pumpe in der Kälteanlage abgepumpt und dort wieder abgekühlt. Die Kälteanlage ist dafür ausgelegt, in diesen Leitungen einen Absolutdruck von 16 mbar aufrechtzuerhalten und damit die gewünschten Helium-Temperaturen zu erreichen.

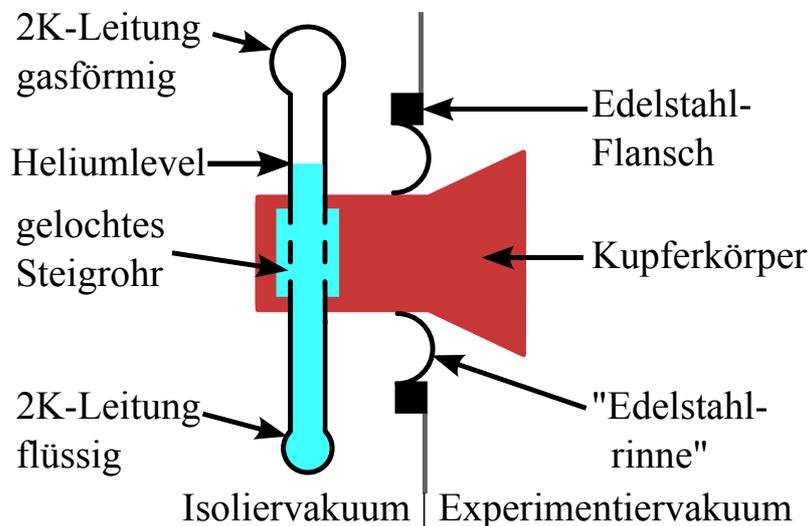


Abbildung 3.14: Gezeigt ist der Querschnitt einer 2 K-Einheit. Das superfluide Helium kommt in direktem Kontakt mit dem Kupferkörper durch ein Steigrohr an jeder dieser Kalteinheiten, das die Leitungen für die flüssige und gasförmige Phase verbindet.

Um zu überprüfen, ob die 2 K-Einheiten bei Kontaktierung an den inneren Vakuumkammern bei einer Temperatur von 10 K die geplante Maximaltemperatur von 2 K nicht übersteigen, wurde ein CAD-Modell dieser Kalteinheiten mit dem Softwarepaket Comsol-Multiphysics untersucht. Dieses Softwarepaket arbeitet ebenso wie Opera3D (siehe Kapitel 2) mit einer Finite-Elemente-Methode zum Lösen von Differentialgleichungen. Die Verwendung einer anderen Software war notwendig, da für ein entsprechendes Thermodynamik-Modul für Opera3D am MPIK keine Lizenz vorhanden war, eine kostenfreie Testversion von Comsol Multiphysics beinhaltete ein solches Programmpaket zur Berechnung des Wärmetransports. Bei der durchgeführten Simulation wurden dieselben Werte aus [37, 42, 44, 46, 47] der Wärmeleitung für Kupfer und Edelstahl wie schon zuvor in diesem Kapitel verwendet. Die Temperatur der Kontaktfläche zwischen Helium und Kupfer wurde auf 1,9 K

und die Kontaktfläche des Flanschs mit der Vakuumkammer auf 10,0 K eingestellt. Die Kupferoberfläche im inneren Vakuum erreicht dabei eine maximale Temperatur von 1,9002 K, also effektiv dieselbe Temperatur wie an einem Heliumkontakt (siehe Abb. 3.15). Die Wärmeleitung der wärmeren Vakuumkammer reicht durch die gewählte Konstruktion nicht aus, um die Kupferoberfläche im inneren Vakuum auf über 2 K zu erwärmen. Mit dieser Simulation konnte zusätzlich die Wärmeleitung von der warmen Kammer direkt über die Kalteinheit zum Helium zu 10,8 mW bestimmt werden. Durch die Verbindung einer 2 K-Einheiten mit einer Vakuumkammer kann also bereits die komplette Wärmelast aller vier Stützen einer Vakuumkammer auf dem 40 K-Strahlungsschild abgeführt werden. Dementsprechend müssen über die Kupferstreifen zwischen den Vakuumkammern und der Isoliervakuumseite des Kupferblocks einer 2 K-Einheit nur noch etwa 45 mW zu jeder 2 K-Einheit transportiert werden.

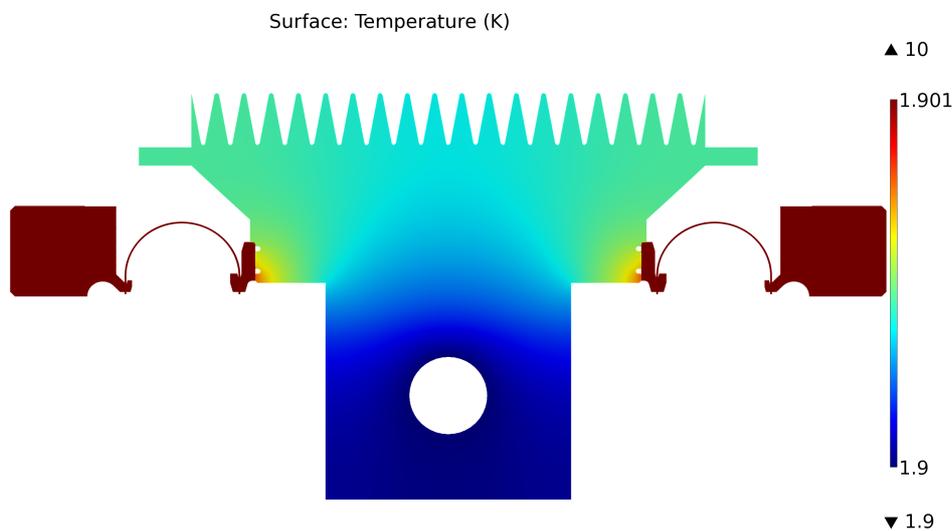


Abbildung 3.15: Ergebnis der Simulation mit der Finite-Elemente-Methode einer 2 K-Einheit mit Comsol Multiphysics. Dargestellt ist ein Querschnitt durch eine 2 K-Einheit. Die Farbkodierung zeigt die Temperatur in K, die absichtlich so gewählt wurde, um die leichte Temperaturerhöhung innerhalb des Kupferkörpers darzustellen, die durch die Wärmeleitung vom 10 K warmen Verbindungsflansch verursacht wird.

Kapitel 4

Experimentelle Ergebnisse und Bestimmung der Spezifikationen

In diesem Kapitel werden die an der ersten¹ Ecke des CSR durchgeführten Messungen beschrieben. Angefangen wird mit der Charakterisierung des Hochspannungssystems zur Versorgung aller ionenoptischen Elemente. Dabei wurde das HV-System bzgl. seiner Stabilität mit angelegter Spannung geprüft sowie die maximale anzulegende Spannung ermittelt. Zur Überprüfung der Justage der ionenoptischen Elemente wurden diese im kalten Zustand vermessen und mit den theoretisch erwarteten Werten verglichen. Damit wurde überprüft, ob die geforderten Genauigkeiten bzgl. Fehljustierungen eingehalten wurden. Bei diesem Abkühlen wurden zusätzlich erste Temperaturverläufe wichtiger CSR-Komponenten überwacht und ausgewertet, um diese für zukünftige Abkühlvorgänge zu optimieren. Zusätzlich wurde die erste Ecke des CSR ein zweites Mal abgekühlt, um zum Einen zu zeigen, dass die Temperaturen der inneren Vakuumkammern und der ionenoptischen Elemente die geforderten 10 K nicht übersteigen, und zum Anderen, um aus den Temperaturverteilungen und den Daten der Kälteanlage weiterführende Erkenntnisse über das Abkühlen des CSR zu gewinnen.

4.1 Tests zur Hochspannungsfestigkeit

Mit den Ergebnissen aus Kapitel 2 können die maximalen Spannungen der einzelnen Komponenten des HV-Systems innerhalb des CSR bestimmt werden. So müssen alle Quadrupol-Komponenten maximal ± 10 kV, die der 39° -Deflektoren maximal ± 20 kV und die der 6° -Deflektoren alle maximal ± 25 kV Spannung halten. Als stabil werden die Komponenten betrachtet, wenn sie die entsprechende Spannung mindestens 24 h ohne Überschlüge halten. Bei diesem Test wurden insgesamt drei verschiedenen HV-Netzteile der Firma FUG verwendet (HCN 140-35000, HCN 350-35000 und HCP 350-35000), die alle bis zu 35 kV Spannung liefern können. Bei fast allen durchgeführten Tests zeigte sich, dass eine Konditionierung der zu testenden Baugruppe von Vorteil ist, bei der die Spannung langsam erhöht wird, bis der Ausgangsstrom eines Netzteils ansteigt. Wenn dies geschah, wurde die Spannung so lange

¹Mit „erster“ Ecke ist dabei die dritte Ecke nach der Injektion gemeint, die aber als erste Ecke des CSR aufgebaut wurde.

nicht erhöht, bis sich der Strom wieder verringerte. Die Netzteile HCN 140-35000 und HCN 350-35000 können den Ausgangsstrom auf $10\ \mu\text{A}$ und HCP 350-35000 auf $1\ \mu\text{A}$ genau anzeigen, deshalb wurde letzteres beim Konditionieren bevorzugt. Alle im Folgenden beschriebenen Tests fanden dabei in Vakuumkammern bei einem Druck von maximal 5×10^{-6} mbar statt, um möglichst CSR ähnliche Testbedingungen zu erreichen.

Die getesteten Komponenten wurden vor den Tests alle mit Ethanol und Aceton und sofern möglich auch im Ultraschallbad gereinigt, um Überschlüge aufgrund von Verunreinigungen auszuschließen. Die Überschlüge konnten am Anfang der Tests noch durch Sichtfenster in den Vakuumkammern direkt beobachtet werden, da die getesteten Komponenten am Anfang alle nicht die notwendige Spannungsstabilität erreichten. Im Laufe der Optimierungsschritte wurden die Überschlüge jedoch immer seltener, so dass es notwendig wurde, einen automatisierten Nachweis zu finden. Gelöst wurde dies durch eine Antenne im Inneren der Vakuumkammern, die Spannungssignale bei einem Überschlag gegen die geerdete Vakuumkammer registrierte und auf einem Oszilloskop (LeCroy WaveSurfer XS) darstellen konnte (siehe Abb. 4.1). Zum Schutz der verwendeten Bauteile wurde zusätzlich ein Widerstand R von $R = 300\ \text{M}\Omega$ verwendet um den Strom zu begrenzen, der bei den Überschlägen fließen kann.

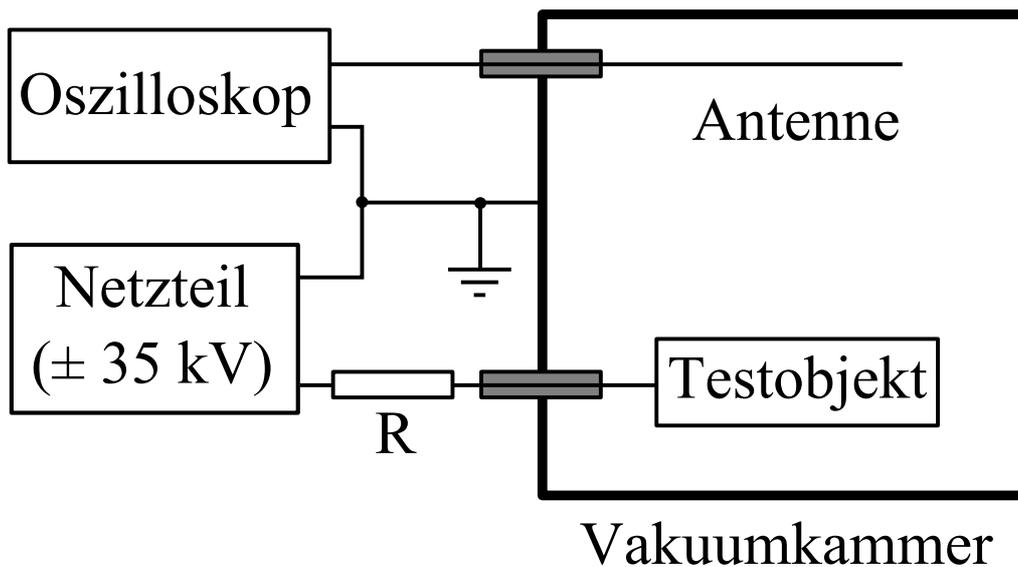


Abbildung 4.1: Skizze des Messaufbaus für die Tests der Hochspannungsfestigkeit. Getestet wird dabei innerhalb einer Vakuumkammer bei einem Druck von maximal 5×10^{-6} mbar und Spannungen von bis zu $\pm 35\ \text{kV}$. Gemessen werden dabei über Spannungssignale (siehe Abb.: 4.2), die über eine Antenne im Inneren der Vakuumkammer gegen die geerdete Vakuumkammer bei einem Überschlag entstehen. Der Widerstand R von bis zu $300\ \text{M}\Omega$ diente dabei als Strombegrenzung.

Am Ende der Optimierung musste gezeigt werden, dass die Testobjekte einen ganzen Tag die angelegte Spannung überschlügsfrei halten können. Dazu wurden mit einem Oszilloskop automatisch Bildschirmfotos gespeichert (siehe dazu als Beispiel Abb. 4.2), wenn ein Überschlag stattfand. Da diese zusammen mit einem Zeitstempel gespeichert wurden, war eine schnelle Auswertung dieser Tests möglich.



Abbildung 4.2: Bildschirmfoto eines typischen Überschlags beim Testen von HV-Komponenten im Vakuum, aufgenommen beim Testen eines 39°-Deflektors. Im oberen Teil ist dabei das 2 μ s lange Spannungssignal des Überschlags zu sehen mit einer Spannungsamplitude von ± 800 mV. Für die Tests bei Potentialdifferenzen von deutlich über 30 kV wurde zum Schutz des Oszilloskops zusätzlich noch das Spannungssignal um 3 dB gedämpft. Im unteren Teil dieser Abbildung ist eine Detailansicht der ersten 100 ns des aufgezeichneten Überschlags dargestellt.

4.1.1 Thermische Verankerung der HV-Leitungen

Um den Wärmeeintrag auf die kalten inneren Vakuumkammern möglichst gering zu halten, sind die Hochspannungsleitungen auf der Bodenplatte des 40 K-Strahlungsschildes thermisch verankert. Diese thermische Verankerung muss gleichzeitig elektrisch isolierend sein, so dass mittels Saphirisolatoren das in Abb. 4.3 a) dargestellte Design entstand. Die Tests zeigten, dass im Vakuum bereits bei einer Spannung von etwa ± 15 kV Überschläge über die Oberfläche des Saphirisolators stattfinden. An Luft hielt diese Baugruppe problemlos bei Spannungen von deutlich über 20 kV. Dieser Effekt der Überschläge über die Oberfläche eines Isolators bei gleichzeitig ausreichend großem räumlichen Abstand der beiden relevanten elektrischen Potentiale ist in der Fachliteratur [49, 50, 51] bereits beschrieben. Als mögliche Lösung dieses Problems wird in [51], u.a. eine Änderung der Form des Isolators vorgeschlagen. Diese Lösung ist in diesem Fall nicht anwendbar, da die Saphirisolatoren mit den am MPIK vorhandenen technischen Möglichkeiten nicht nachträglich bearbeitet werden können. Stattdessen wurde eine andere Lösung verwendet, bei der das elektrische Feld am Isolator durch zusätzliche Elektroden manipuliert wird (siehe Abb. 4.3 b)).

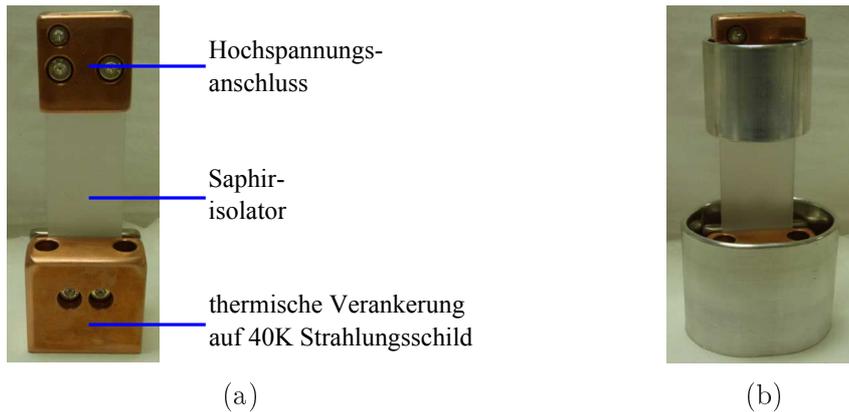


Abbildung 4.3: Gezeigt ist die thermische Verankerung der Hochspannungsversorgung auf dem 40 K-Strahlungsschild, (a) im ursprünglichen und (b) im optimierten Design. Die in (b) zusätzlich installierten Aluminiumrohre dienen dabei der Abschwächung der elektrischen Feldstärke in unmittelbarer Nähe des Saphirisolators. Diese Baugruppe wird mit der Unterseite auf dem 40 K-Strahlungsschild verschraubt (Massepotential) und am oberen Ende werden die Leitungen von der Durchführung ins Isoliervakuumssystem und zur Durchführung ins Experimentiervakuumssystem angeschlossen.

Diese zusätzlichen Elektroden formen das elektrische Feld so, dass an den Punkten an denen Vakuum, Isolator und Leiter aufeinandertreffen die Feldstärke verringert wird. Dadurch wird automatisch die Feldstärke zwischen den neuen Elektroden an den Enden des Saphirs erhöht, bleibt aber deutlich unter der Spannungsfestigkeit eines Vakuumpaltes. Eine Simulation dieser geänderten Baugruppe zeigt die in Abb. 4.4 gezeigten Feldstärken und den Verlauf der elektrischen Feldlinien. Dabei konnte die elektrische Feldstärke an diesem Übergang von $10,5 \times 10^6$ V/m durch die zusätzlichen Elektroden auf $3,9 \times 10^6$ V/m verringert werden.

Dadurch war es letztlich möglich, die thermischen Verankerungen auf dem 40 K-Strahlungsschild 24 h bei ± 30 kV angelegter Spannung stabil zu betreiben. Die maximale Betriebsspannung dieser Baugruppe, die im ursprünglichen Fall bei ± 15 kV keine Minute ohne Überschlag betrieben werden konnte, wurde damit mehr als verdoppelt.

Die Hochspannungsleitungen werden nach der thermischen Verankerung auf dem 40 K-Strahlungsschild zusätzlich auf den inneren Vakuumkammern kontaktiert. Damit wird die Energie des 40 K-Strahlungsschildes über die inneren Vakuumkammern abgeführt. Zusätzlich wird die Kühlung der Elektroden idealerweise auf unter 10 K ermöglicht. Im Fall der 6°- und 39°-Deflektoren waren thermischen Verankerungen basierend auf Saphirisolatoren geplant. Dementsprechend konnten leicht modifizierte Versionen der zusätzlichen Abschirm-Elektroden verwendet werden (siehe Abb. 4.5), so dass auch diese Baugruppen für 24 h eine Spannungsfestigkeit von ± 30 kV aufwies.

Die thermische Verankerung der Quadrupoldubletts muss zwar nur eine Spannung von ± 10 kV gegen Masse halten, jedoch entstehen zwischen den Hochspannungsleitungen der verschiedenen Quadrupolelektroden Potentialdifferenzen von bis zu

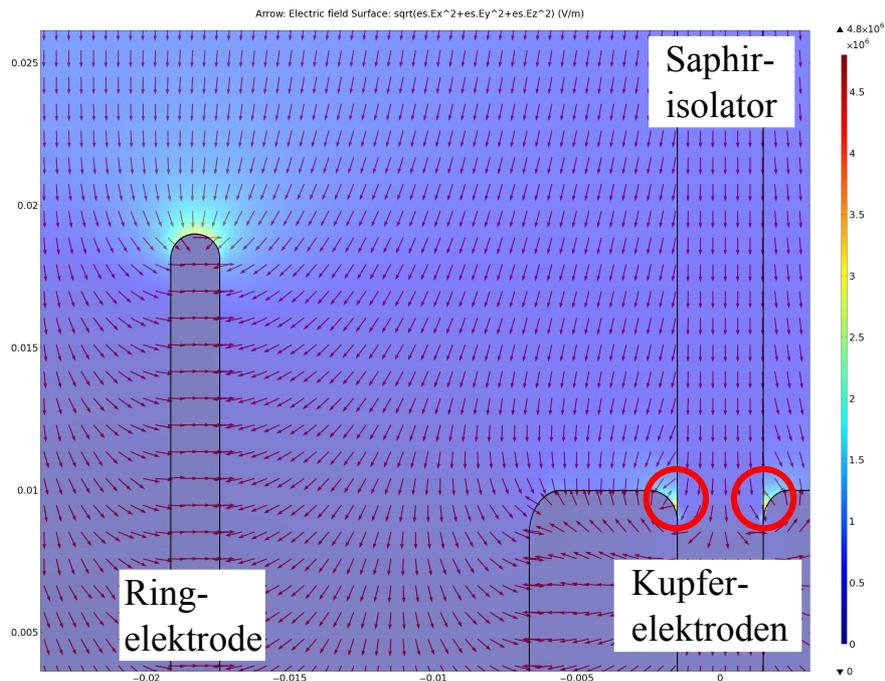


Abbildung 4.4: Gezeigt ist das Ergebnis einer FEM Simulation mit Comsol-Multiphysics der geänderten thermischen Verankerung der HV-Leitungen auf dem 40 K-Strahlungsschild. Die Pfeile illustrieren den Verlauf der elektrischen Feldlinien, die von dem Übergang Vakuum, Isolator und Leiter (rote eingekreist) durch die zusätzlichen Ringelektroden weggezogen werden. Die maximale Feldstärke in diesem Punkt konnte damit auf $3,9 \times 10^6$ V/m von ursprünglich $10,5 \times 10^6$ V/m reduziert werden.

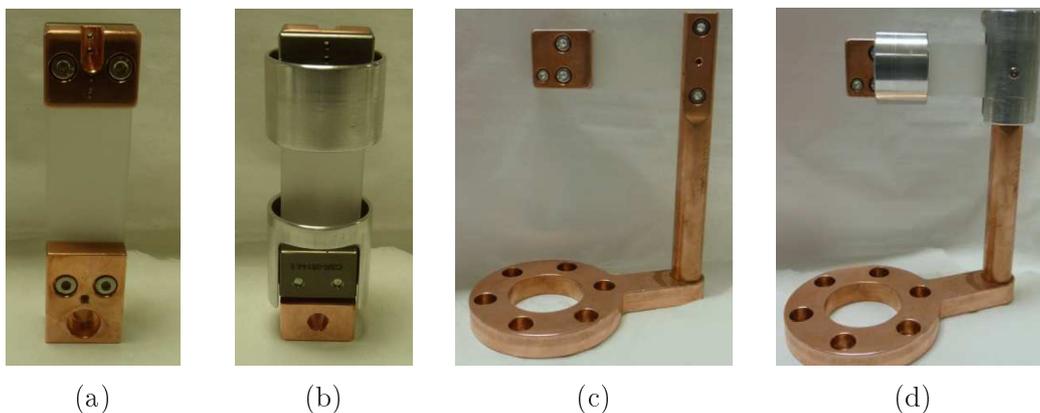


Abbildung 4.5: Gezeigt sind die thermischen Verankerungen der Hochspannungsleitungen für den 6°-Deflektor vor (a) und nach der Optimierung (b), sowie die Lösung für den 39°-Deflektor (c) und d). Analog zu der Version auf dem 40 K-Strahlungsschild ist dabei das untere Ende mit der Vakuumkammer verbunden, während an dem Kupferkörper am oberen Ende die Hochspannungsleitung befestigt wird.

20 kV. Aus diesem Grund war es ebenfalls notwendig, die thermische Veranke-

zung der Hochspannungsversorgung der Quadrupoldubletts auf der inneren Vakuumkammer zu testen. Zum Einsatz kommen auch hier Saphirplatten. Die verschiedenen elektrischen Potentiale liegen jedoch sehr viel enger zusammen (ca. 13 mm), als es bei den vorherigen Anwendungen (ca. 50 mm) der Fall war (siehe Abb. 4.6 a)). Da der Abstand zwischen den Kontakten der Hochspannungsleitungen nur unwesentlich größer ist als der zur Masse, war es nicht nötig, die Stabilität von ± 10 kV gegen Masse zu testen, da dies im Test der Kontakte mit 20 kV untereinander abgedeckt ist. So wurde nur an einem dieser HV-Kontakte eine Spannung von ± 20 kV angelegt, während einer der beiden benachbarten geerdet wurde. Der Abstand der verschiedenen Potentiale ist aber in diesem Fall immer noch ausreichend groß, um Hochspannungsüberschläge über den Vakuumpalt zu verhindern. Es konnte während der Tests kein Überschlag festgestellt werden, es waren also keine Änderungen an dieser Baugruppe notwendig.

Zur Optimierung der Kühlung des zentralen Elektrodenkäfigs der Quadrupoldubletts werden die Hochspannungsleitungen dort zusätzlich mit Saphirplatten kontaktiert (siehe Abb. 4.6 b)). Dabei waren dieselben Grenzen wie auch bei der thermischen Verankerung auf der inneren Vakuumkammer einzuhalten. Für diese Baugruppe zeigte sich, dass Hochspannungsüberschläge auf der unteren Seite des Saphirs zwischen den beiden Befestigungsschrauben der Kupferkontakte auftreten. Durch spezielle Scheiben zwischen Schraubenkopf und Saphir war es möglich die elektrischen Felder so zu deformieren, dass die Feldstärke am Übergang von Saphir, Kupfer und Vakuum verringert wird.

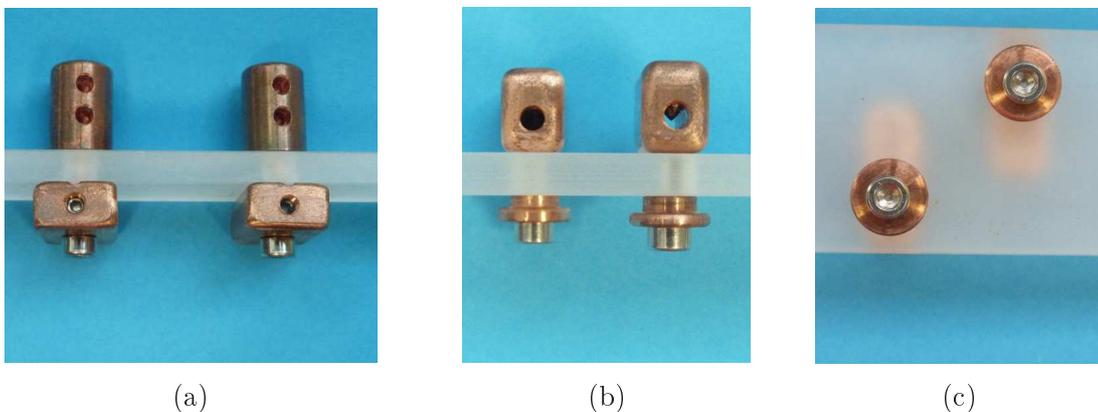


Abbildung 4.6: Gezeigt ist in (a) die thermische Verankerung der Hochspannungsleitungen des Quadrupoldubletts auf der Vakuumkammer. Diese Baugruppe hielt in den gezeigten Design eine Spannungsdifferenz von 20 kV zwischen den beiden Kontakten für 24 h. In (b) und (c) ist die Saphirplatte gezeigt, wie sie zur Kühlung des zentralen Elektrodenkäfigs des Quadrupoldubletts über die Hochspannungsleitungen von der Baugruppe in (a) verwendet wird. Die auf der Unterseite gezeigten Scheiben in (c) wurden dabei nachträglich eingefügt, um die Stabilität der Hochspannung zu gewährleisten.

4.1.2 Vakuumdurchführungen

Elektrische Hochspannungsdurchführungen kommen am CSR sowohl beim Übergang von Luft in das Isoliervakuum als auch beim Übergang des Isoliervakuum zu dem inneren Experimentiervakuum zum Einsatz. An dem ersten Übergang an Luft kommen dabei kommerzielle Durchführungen der Firma Fischer zum Einsatz. Auf der Luftseite besitzen diese eine einfache Steckverbindung, während der Kontakt auf der Vakuumseite gelötet wird. Für die Hochspannungsleitungen des 6°- und 39°-Deflektors kommen dabei 25 kV Durchführungen vom Typ DEE 105 Z049 der Firma Fischer Connectors zum Einsatz. Diese Durchführungen wurden ebenfalls bei den Hochspannungstests der anderen Komponenten verwendet. Diese Tests zeigten, dass die Durchführungen bei diesen Spannungen und großen elektrischen Kapazitäten, wie sie z.B. beim 39°-Deflektor auftreten, durch Überschläge mechanisch beschädigt werden können. Die Durchführungen wurden zwar nicht undicht, aber sie hielten die angelegte Hochspannung nicht mehr und teilweise wurde auch der Isolator auf der Luftseite beschädigt. Die in der Durchführung vorhandenen Kanäle, durch die die Überschläge stattfinden können, ließen sich bei den Tests durch einen Silikon O-Ring soweit beheben, dass auch ein Betrieb dieser Durchführungen bei dauerhaften ± 30 kV bzw. für einige Minuten bei ± 35 kV möglich war. Zusätzlich dazu musste auch der elektrische Anschluss im Stecker mit Hochspannungssilikon vergossen werden, um diese Spannungen zu halten. Diese beiden Modifikationen sind in Abb. 4.7 dargestellt.

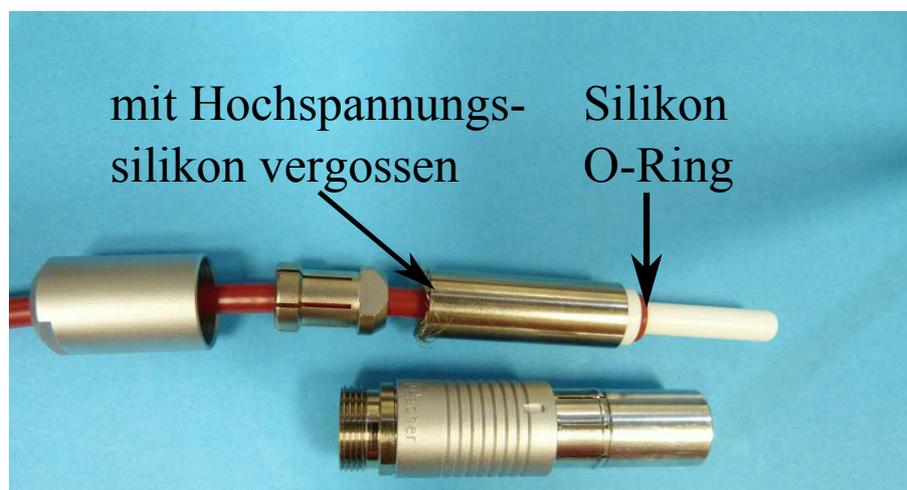


Abbildung 4.7: Gezeigt sind die notwendigen Änderungen an den Hochspannungssteckern der Durchführungen in das Isoliervakuumssystem, um die notwendige Spannungsstabilität zu gewährleisten. Dargestellt ist der zerlegte Stecker mit dem zusätzlichen Silikon O-Ring und die mit Hochspannungssilikon vergossene Kontaktierung der HV-Leitung mit dem Stecker.

An den 10 kV-Durchführungen für die Quadrupoldubletts zeigten die durchgeführten Tests, dass keine Modifikationen notwendig sind. Da der Aufwand jedoch relativ gering ist, werden sicherheitshalber auch hier dieselben Änderungen wie bei den 25 kV Durchführungen vorgenommen.

Im CSR sind die Hochspannungsleitungen zwischen den Durchführungen in das Isoliervakuumsystem und der thermischen Verankerung auf dem 40 K-Strahlungsschild mit Teflonschläuchen elektrisch isoliert verlegt. Da Teflon den zu erwartenden Temperaturen beim Ausheizbetrieb nicht standhält, sind die Hochspannungsleitungen zwischen dem 40 K-Strahlungsschild und den inneren Vakuumkammern mit Keramik und Glasröhrchen isoliert. Insbesondere die Teflonschläuche sollten dabei in der Nähe der Durchführungen Öffnungen bieten, die zum Abpumpen des in den Teflonschläuchen eingeschlossenen Gasvolumens dienen. Diese sind notwendig, da andernfalls das vorhandene Restgas Überschläge begünstigen können, so dass Überschläge je nach lokalem Druck schon bei unter 15 kV auftreten würden.

Die Durchführungen vom Isoliervakuum in das Experimentiervakuum wurden extra von der Firma Friatec für den CSR angefertigt. Bei diesen wurde ein Keramikisolator (Al_2O_3) verwendet. Der Abstand zwischen Flansch auf Erdpotential und dem Leiter der Durchführung beträgt jeweils mehrere Zentimeter, wäre also für einen Vakuumspalt mehr als ausreichend dimensioniert. Es wurden drei Versionen, eine für mindestens 10 kV für die Quadrupoldubletts, sowie jeweils eine für mindestens 30 kV für die 6°- und 39°-Deflektoren hergestellt. Wie schon bei den thermischen Verankerungen traten auch hier Überschläge auf. Bei den 30 kV-Durchführungen begannen diese bei etwa ± 15 kV, während bei den Quadrupoldurchführungen bereits bei ± 10 kV kein dauerhafter Betrieb möglich war. Verschiedene Optimierungsversuche mit zusätzlichen Elektroden zur Deformation der elektrischen Felder konnten die Stabilität zwar verbessern, die für den regulären Betrieb notwendigen Spannungen waren jedoch für einen stabilen Betrieb nicht erreichbar. Deshalb mussten die Isolatoren modifiziert werden. Verschiedene Formen von Keramikisolatoren wurden getestet [51], jedoch haben die meisten den Nachteil, dass sie asymmetrisch geformt sind, da die Kathoden- und Anodenseite in deren Tests festgelegt war. Für die Anwendung am CSR ist eine symmetrische Lösung notwendig, da abhängig vom Ladungszustand der zu speichernden Ionenspezies die Rolle von Anode und Kathode wechselt. Die einzige Version mit symmetrischer Form war eine Rillenstruktur (Breite 2 mm und Tiefe 1 mm), die gleichmäßig über die komplette Länge des Isolators verläuft. Allein mit dieser Änderung war ein stabiler Betrieb bei etwa 20 kV möglich. Zusammen mit den zuvor schon getesteten zusätzlichen Elektroden (siehe Abb. 4.8) war es aber möglich, einen stabilen Betrieb über 24 h bei ± 30 kV zu erreichen und damit die Vorgaben zu erfüllen.

Bei den Quadrupoldurchführungen reichte es dagegen bereits aus, den Keramikisolator zu überarbeiten. Die getesteten Änderungen ermöglichten den stabilen Betrieb bei den geforderten Spannungen für beide Polaritäten für jeweils mindestens 24 h. Sie erfordern nur eine Überarbeitung der vorhandenen Durchführungen und keine komplette Neuanfertigung.

4.1.3 Ionenoptische Elemente

Zur Sicherheit wurden ebenfalls auch die Deflektoren bezüglich ihrer Hochspannungsstabilität getestet. Ausgehend von den vorherigen Tests der thermischen Verankerungen und Durchführungen war zu erwarten, dass auch bei den Deflektoren

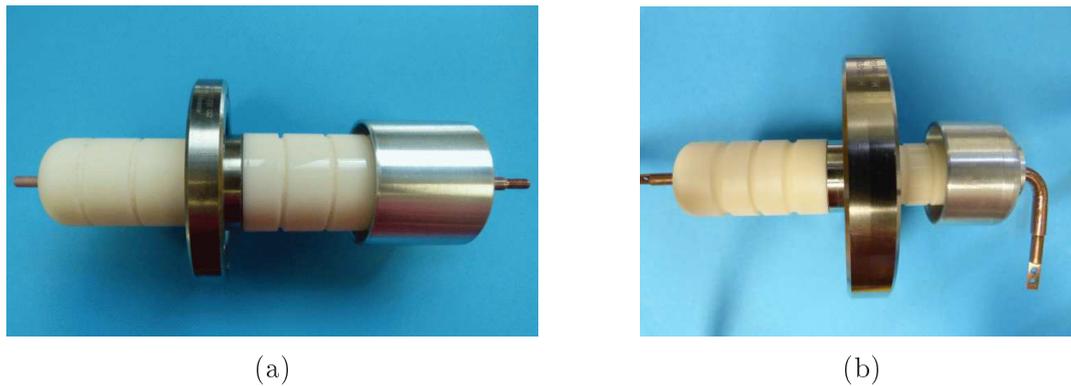


Abbildung 4.8: Gezeigt sind die notwendigen Änderungen an den Durchführungen der Hochspannung in das Experimentiervakuumsystem für die 6°-Deflektoren (a) und die 39°-Deflektoren (b), um die notwendige Spannungsstabilität zu gewährleisten. Das Prinzip ist in beiden Fällen identisch, lediglich die Größen unterscheiden sich etwas voneinander.

an genau den Positionen der Isolatoren die Schwachstellen liegen. Bei diesen Tests konnte beim Konditionieren neben dem Ausgangsstrom der Netzteile ein weiterer Indikator genutzt werden, um zu entscheiden, wann die Deflektorspannungen erhöht werden können. Ab einer Potentialdifferenz von ca. 50 kV zwischen den beiden Deflektorelektroden des 6°- und 39°-Deflektors war auch durch die Aluminiumflansch der Testkammer eine deutliche Erhöhung der Röntgenstrahlung von bis zu 100 $\mu\text{Sv/h}$ zu messen, sobald der Netzteilstrom anstieg. Die Röntgenstrahlung war dabei der bessere Indikator, da diese früher und deutlich stärker anstieg. Dieser Indikator fällt aber für den späteren regulären Betrieb aus, da dann Edelstahlflansch verwendet werden, die die Röntgenstrahlung absorbieren.

Der geprüfte 39°-Deflektor bestätigte die Erwartungen, dass auch in diesem Fall die Überschlüge über die Oberfläche der Keramikisolatoren (siehe Abb. 4.9 a) und b)) bei Spannungen von etwa $\pm 15\text{ kV}$ beginnen. Im Gegensatz zu den Durchführungen in das innere Vakuumsystem ist bei den 39°-Deflektoren sehr wenig Platz vorhanden, um diese Probleme zu lösen. Die Lösungen sind wie bei den Durchführungen eine Kombination aus Abschirmung der Kontaktpunkte durch eine gezielte Verformung der elektrischen Felder und eine Überarbeitung der Form der elektrischen Isolatoren. Diese mussten in diesem Fall jedoch sehr platzsparend ausgeführt werden. Die Manipulation der elektrischen Felder geschieht dabei durch eine zusätzliche Elektrode, die mit dem Elektrodenkäfig auf Erdpotential verbunden ist. Eine Änderung an den Elektroden war nicht möglich, da diese bereits vergoldet waren und zusätzlich eine Überarbeitung große Fertigungsprobleme verursacht hätte. Wie schon bei den Durchführungen muss auch bei den Isolatoren der 39°-Deflektoren beachtet werden, dass im regulären Betrieb beide Polaritäten bei maximaler Spannung auftreten können. Deshalb wurde auch hier eine Rillenstruktur (Breite 2 mm und Tiefe 1 mm) gewählt, wie sie in Abb. 4.9 c) und d) dargestellt ist.

Zur Sicherheit wurden zusätzlich zu den bereits erwähnten Modifikationen die Ecken der Elektroden nachträglich mit noch größeren als den bereits vorhandenen Radien verrundet. Mit dieser Überarbeitung war es möglich, den 39°-Deflektor jeweils 24 h

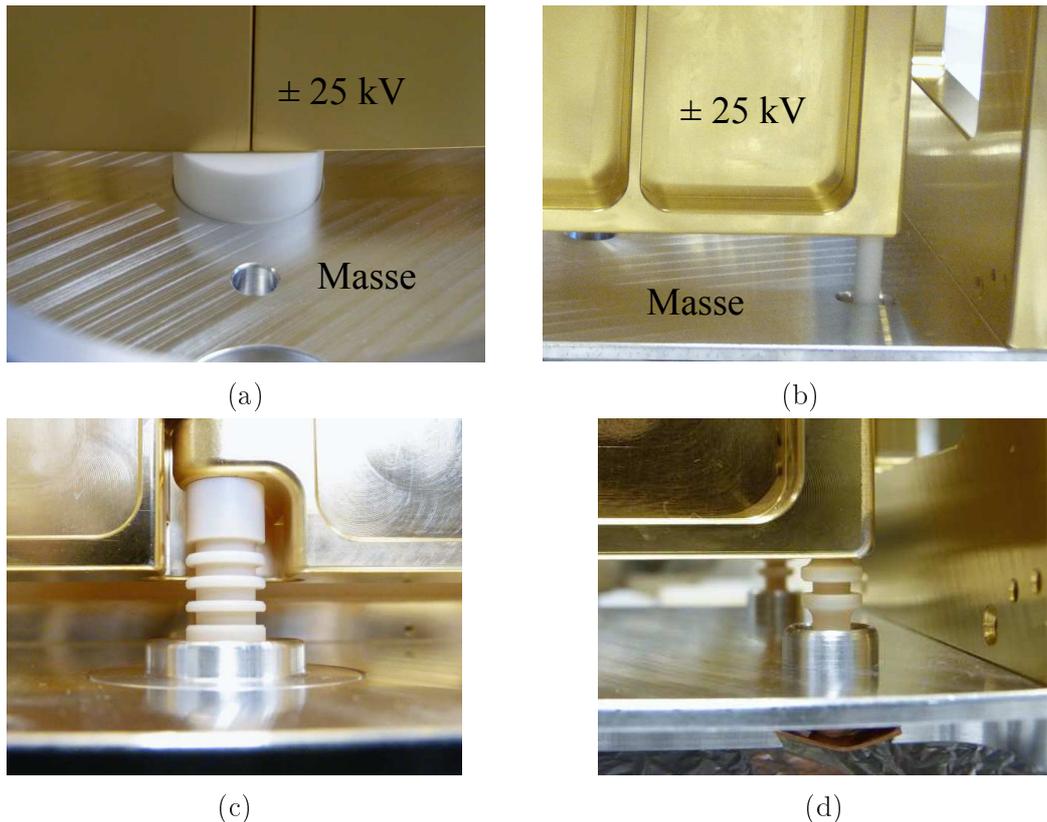


Abbildung 4.9: Gezeigt sind die Keramikisolatoren im ursprünglichen Design in (a) und (b), an denen die Hochspannungsüberschläge ab Spannungen von etwa ± 15 kV auftraten. Die überarbeiteten Varianten dieser Isolatoren sind in (c) und (d) dargestellt. Mit diesen war der Betrieb bei ± 25 kV für 24 h möglich.

bei ± 25 kV und ∓ 25 kV ohne Überschlag zu betreiben. Die Ergebnisse aus Kapitel 2 erforderten für 300 keV/q Ionen einen stabilen Betrieb von etwas weniger als ± 20 kV. Die Anforderung wurde damit erfüllt.

Für die elektrisch isolierte Befestigung der Elektroden des 6° -Deflektors wurde dasselbe System verwendet wie bei den Quadrupoldoublets, bei denen die Elektroden durch einen Edelstahl bzw. Titanring an einem Vierkant-Keramikisolator verklemmt werden (siehe Abb. 4.11). Diese Aufhängung ist für die 10 kV Quadrupolspannung unkritisch, für die deutliche höheren Spannungen des 6° -Deflektors jedoch nicht stabil. Anders als bei den Isolatoren des 39° -Deflektors ist in diesem Fall der Isolator nicht rund, und damit eine Rillenstruktur nur mit deutlich größerem Aufwand umzusetzen. Da jedoch die Befestigung auf der Rückseite der Elektroden liegt, steht mehr Platz zur Verfügung, so dass zusätzliche Elektroden angebracht werden konnten, um die Spannungsstabilität von weniger als ± 15 kV auf ± 28 kV bzw. ∓ 28 kV zu erhöhen.

Im ursprünglichen Design sollte ein Keramikrohr genutzt werden, um für den Fall, dass die geklemmte Elektrodenhalterung im Laufe der Zeit nicht mehr ausreicht, die Elektroden am Absinken zu hindern. Die durchgeführten Tests zeigten, dass dieses Keramikrohr nicht mit den Hochspannungsanforderungen vereinbar ist und

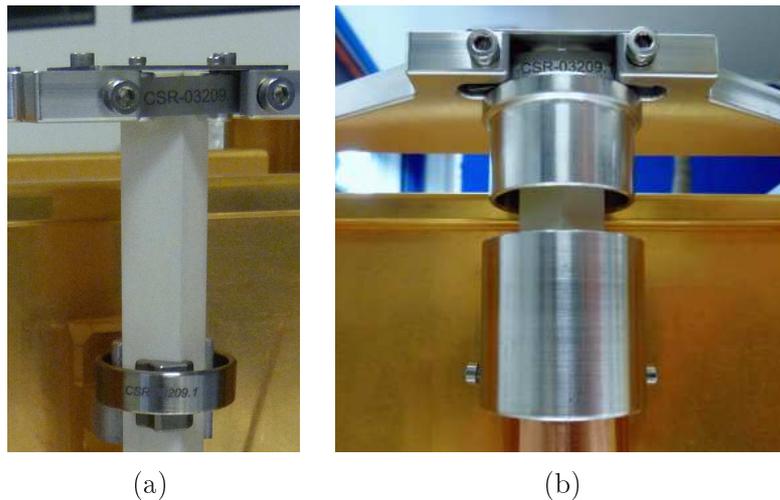


Abbildung 4.10: Abgebildet sind die Hochspannungsisolatoren der 6°-Deflektoren vor (a) und nach (b) den notwendigen Änderungen zur Gewährleistung der Stabilität bei Spannungen von ± 27 kV.

deshalb nicht eingesetzt werden kann. Deshalb wurde ein Loch (Durchmesser 3 mm Tiefe 3 mm) in den Vierkant Keramikstab gebohrt, und daran ein Aluminiumring befestigt, der ein Absinken der Elektroden verhindern soll (siehe Abb. 4.11). Dieser Ring verschwindet vollständig unter den zusätzlichen Ringelektroden und beeinträchtigt somit nicht die HV-Stabilität.

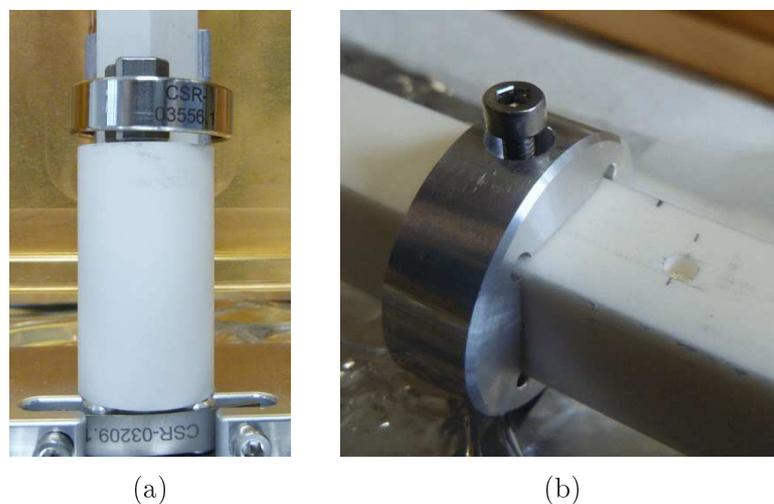


Abbildung 4.11: Gezeigt ist die neue Sicherung der Elektroden des 6°-Deflektors gegen Absinken für den Fall, dass die Klemmung der Elektroden im Laufe der Zeit nicht mehr ausreicht. Ursprünglich war vorgesehen, ein Keramikrohr als Anschlag zu verwenden (a). Dieser Versuch war ungeeignet, so dass eine Überarbeitung notwendig war (b). Dazu wurde ein Loch (Durchmesser 3 mm, Tiefe 3 mm) in den Keramikkörper gebohrt, das als Anschlag für den Aluminiumring und damit die Elektroden dient.

Bei allen Komponenten des Hochspannungssystems war es möglich die in Tabelle 4.1

aufgelisteten Anforderungen zu erfüllen. Die einzige Ausnahme hierbei bilden die Quadrupoldoublets, diese konnten aufgrund ihrer Größe nicht komplett außerhalb des CSR im Vakuum getestet werden. Die kritischsten Stellen sind dabei die Baugruppen, an denen sich Hochspannungsleitungen mit einer Potentialdifferenz von bis zu 20 kV nahe kommen. An allen anderen Stellen liegen im Extremfall nur ± 10 kV gegen Masse an, was unproblematisch sein sollte. Die Stellen mit 20 kV Potentialdifferenz wurden separat getestet und erfolgreich optimiert. Ein abschließender Test des kompletten HV-Systems aller ionenoptischen Komponenten war aus Zeitgründen im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr möglich, wird aber, sobald alle Komponenten entsprechend modifiziert wurden, durchgeführt. Die Durchführungen der 6°-Deflektoren in das Isoliervakuumssystem erfüllen die Vorgaben knapp. Durchführungen ähnlicher Bauart desselben Herstellers mit zulässigen Betriebsspannungen von bis zu ± 40 kV sind aber mit geringem Aufwand aufrüstbar.

Tabelle 4.1: Aufgelistet sind die geforderten maximalen Spannungen, die zum Speichern von 300 keV/q Ionenstrahlen notwendig sind sowie die maximalen Spannungen, bei denen ein Betrieb von 24 h ohne Überschlag möglich war.

Baugruppe	V _{Soll}	V _{Ist}
thermische Verankerung auf 40 K 6°-Deflektor	25 kV	30 kV
thermische Verankerung auf 40 K 39°-Deflektor	20 kV	30 kV
thermische Verankerung auf 40 K Quadrupoldublett	10 kV	30 kV
thermische Verankerung auf 10 K 6°-Deflektor	25 kV	30 kV
thermische Verankerung auf 10 K 39°-Deflektor	20 kV	30 kV
thermische Verankerung auf 10 K Quadrupoldublett	10 kV	15 kV
Durchführungen Isoliervakuum 6°-Deflektor	25 kV	25 kV
Durchführungen Isoliervakuum 39°-Deflektor	20 kV	25 kV
Durchführungen Isoliervakuum Quadrupoldublett	10 kV	10 kV
Durchführungen Experimentiervakuum 6°-Deflektor	25 kV	30 kV
Durchführungen Experimentiervakuum 39°-Deflektor	20 kV	30 kV
Durchführungen Experimentiervakuum Quadrupoldoublets	10 kV	20 kV
6°-Deflektor	25 kV	28 kV
39°-Deflektor	20 kV	25 kV

4.2 Erstes Abkühlen der ersten Ecke des CSR

Im Juli 2011 wurde die erste Ecke des CSR erstmals abgekühlt. Wichtigstes Ziel dabei war es, die ionenoptischen Elemente 6°-Deflektoren, 39°-Deflektoren und Quadrupoldoublets im kalten Zustand bzw. während des Abkühlvorgangs auf mögliche Dejustage bzw. anisotrope Schrumpfung zu überprüfen. Beim Abkühlen schrumpfen die überwiegend aus Aluminium gefertigten Komponenten, so dass sich im Vergleich zum Zustand bei Raumtemperatur Deformationen ergeben, die bei gleichen Elektrodenpotentialen zu unterschiedlichen Feldern und somit zu unterschiedlichen Ionentrajektorien führen. Sie sind zwar so hergestellt, dass eine Dejustage oder Verformung eingeplant ist, um im kalten Zustand die in Kapitel 2 genannten Größen zu erhalten, jedoch haben diese Komponenten und ihre Justage so große Auswirkungen auf die Strahlqualität beim späteren Experimentierbetrieb des CSR [52]. Aus diesem Grund erschien eine Überprüfung notwendig, ob die messbaren Änderungen mit den theoretischen Vorhersagen übereinstimmen. Zusätzlich wurden Positionen auf einer Bodenplatte des 40 K-Schildes vermessen. Damit wurde die Möglichkeit überprüft, auf diesen Bodenplatten andere Komponenten mit der geforderten Justiergenauigkeit von $\pm 0,5$ mm zu befestigen, wie z.B. das Pickup-System [15] der Strahldiagnose. Eine erste Messung und Interpretation des Abkühlvorgangs sowie den Temperaturverteilungen auf ausgewählten Komponenten waren durch die installierten ca. 40 Temperatursensoren möglich.

4.2.1 Überprüfung der Justage der 39°- und 6°-Ablenker sowie eines Quadrupoldoublets im kalten Zustand

Zur Justage der 39°- und 6°-Deflektoren wurde ein Lasertrackersystem verwendet. Lasertracker bieten für den CSR mehrere Vorteile gegenüber anderen Methoden wie z.B. Theodoliten. Der Lasertracker selbst kann in einem vorher vermessenen Netz aus Referenzpunkten an jedem beliebigen Ort plaziert werden. Durch Messung der Koordinaten dieser Referenzpunkte im internen Koordinatensystem des Lasertrackers kann dann die Position des Lasertrackers im Koordinatensystem des CSR bestimmt und mit Hilfe einer Auswertesoftware direkt die Koordinaten aller weiteren Messpunkte zur Justage der Deflektoren im CSR-System angezeigt werden. Zusätzlich ist eine Anzeige der Koordinaten des aktuell vermessenen Punkts quasi in Echtzeit möglich, d.h. Verzögerungen lagen deutlich unter 1 s, was die Justage von Komponenten beschleunigt und erleichtert. Um eine möglichst hohe Genauigkeit der Messungen zu erzielen, wurden die Targets für das Lasertracker-System nicht direkt auf den Deflektoreinheiten angebracht, sondern an kreuzförmigen Targethalterungen mit relativ großem Abstand untereinander (siehe Abb.: 4.12), die jeweils vier Targetpositionen besitzen. Somit sind auch sehr kleine Verkippungen der Komponenten zu erkennen. Um die Genauigkeit der Justage weiter zu erhöhen, wurden vor der eigentlichen Justage der Deflektoren in den Innenkammern des CSR Transfermessungen zwischen den Deflektoren selbst und den darauf befestigten Targethalterungen durchgeführt. Die Umrechnung von den Targetpositionen auf den Targethaltern bzgl. Ausrichtung und Position der Deflektoren wäre zwar auch mittels CAD-Daten allein möglich gewesen, um jedoch Fertigungstoleranzen zu kompensieren, wurde

mittels eines taktilen Messarms die Targetpositionen auf der Halterung in Relation zu den Deflektoren selbst vermessen.



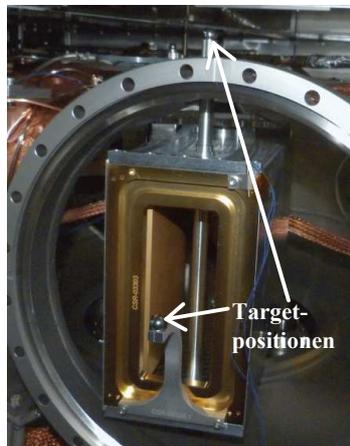
(a)



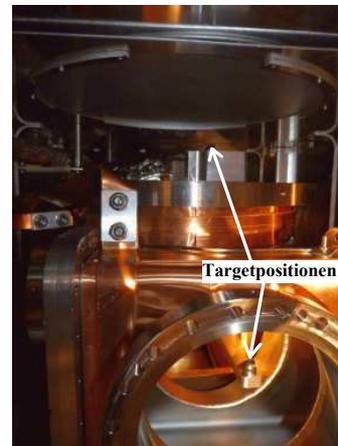
(b)

Abbildung 4.12: Gezeigt ist die Targethalterung zur Justage der 39° -Deflektoren vor (a) und nach (b) dem Einbau in die innere Vakuumkammer, die zuvor über eine Transfermessung in Relation zu dem jeweiligen Deflektor vermessen wurde. Für die 6° -Deflektoren wurde ähnlich verfahren, die Targethalterung war dabei nur leicht konstruktiv geändert im Vergleich zum 39° -Deflektor.

Ähnliche Targethalterungen wurden benutzt, um für einen 39° -Deflektor und einen 6° -Deflektor gleichzeitig vier kleine Targets für den Lasertracker zu halten (siehe Abb.: 4.13).



(a)



(b)

Abbildung 4.13: Targethalterung zur Vermessung von 39° - a) und 6° -Deflektoren b) im warmen und kalten Zustand.

Diese Targets wurden in den Kryostaten eingebaut und mit abgekühlt. Es wurden jeweils die Positionen dieser Targets im warmen Zustand und bei evakuiertem Kryostaten, um Messungenauigkeiten durch mögliche Verformung der Glasfenster zu verringern, sowie im kalten Zustand gemessen [53, 54, 55]. Es wäre zwar technisch möglich gewesen nicht nur einen, sondern beide 39° - und 6° -Deflektoren der Ecke zu vermessen, worauf aus Kostengründen jedoch verzichtet wurde. Geplant war mit diesem

Messsystem direkt die Abweichungen der karthesischen Koordinaten der Messpunkte zu bestimmen und mit den theoretisch erwarteten Werten zu vergleichen. Diese theoretisch erwarteten Werte bzw. Änderungen beim Abkühlen resultieren direkt aus dem linearen thermischen Expansionskoeffizient der betrachteten Objekte. Der lineare thermische Expansionskoeffizient y beschreibt dabei die relative Längenänderung in Abhängigkeit der Temperatur gemäß

$$y(T) = \frac{L(T) - L_{293\text{ K}}}{L_{293\text{ K}}},$$

wobei $L_{293\text{ K}}$ für die Länge bei Raumtemperatur (293 K) steht. Basierend auf Daten aus [42] wurde vom NIST² [37] online die Fitfunktion

$$y(T) = (a + bT + cT^2 + dT^3) \times 10^{-5} \quad (4.1)$$

bereitgestellt, die für den Temperaturbereich von 4 K bis 300 K mit den in Tabelle 4.2 angegebenen Werten die Daten mit einem Fitfehler von maximal 4 % beschreibt.

Tabelle 4.2: Fitparameter zu Gleichung (4.1) für den linearen thermischen Ausdehnungskoeffizient $(L - L_{293})/L_{293} \times 10^5$ von Aluminium (EN AW 5083) für den Temperaturbereich von 4 K bis 300 K (aus [37, 42]). Die Abweichungen von den gemessenen Werten sind mit maximal 4 % angegeben [37].

a	b / K^{-1}	c / K^{-2}	d / K^{-3}
$-4,1277 \times 10^2$	$-3,0389 \times 10^{-1}$	$8,7696 \times 10^{-3}$	$-9,9821 \times 10^{-6}$

In Abb. 4.14 ist der entsprechende Verlauf des thermischen Ausdehnungskoeffizienten für das verwendete Aluminium der Legierung EN AW 5083 graphisch dargestellt. Man sieht dort, dass bei Temperaturen um ca. 80 K bereits 90 % der Schrumpfung stattgefunden hat. Dies gilt nicht nur für Aluminium dieser Legierung, sondern auch für alle anderen am CSR verwendeten Materialien. Aus diesem Grund war es bei dem ersten Abkühlen der Ecke des CSR ausreichend, einen Temperaturbereich von etwa 80 K bis 100 K zu erreichen, um bereits aussagekräftige Ergebnisse der kalten Positionsmessungen mit dem Lasertracker zu erhalten.

Mit den gemessenen Temperaturen und den berechenbaren Werten für den linearen thermischen Expansionskoeffizienten kann dann die Änderung eines Messpunktes durch Temperaturänderung bestimmt werden. Dabei ist zu beachten, zu welchem Punkt hin diese Schrumpfung stattfindet. Für den Fall der 39°- und 6°-Deflektoren war dies die vertikale Achse der Elektrodenstützen, deren Koordinaten aus CAD-Modellen bestimmt werden konnten. Die Position dieser Achse ist sowohl im warmen als auch im kalten Zustand gleich, da diese Stützen in dem relevanten Bereich radial-symmetrisch zur vertikalen Achse sind und auf den Betonfundamenten bei Raumtemperatur befestigt wurden (siehe Abb. 3.2). In [15] wurden die Anforderungen an die Positionsgenauigkeit des Messsystems mit $\pm 0,5$ mm angegeben, welche einzuhalten waren, um diese Befestigungsoption zu erhalten.

²National Institute for Standards and Technology

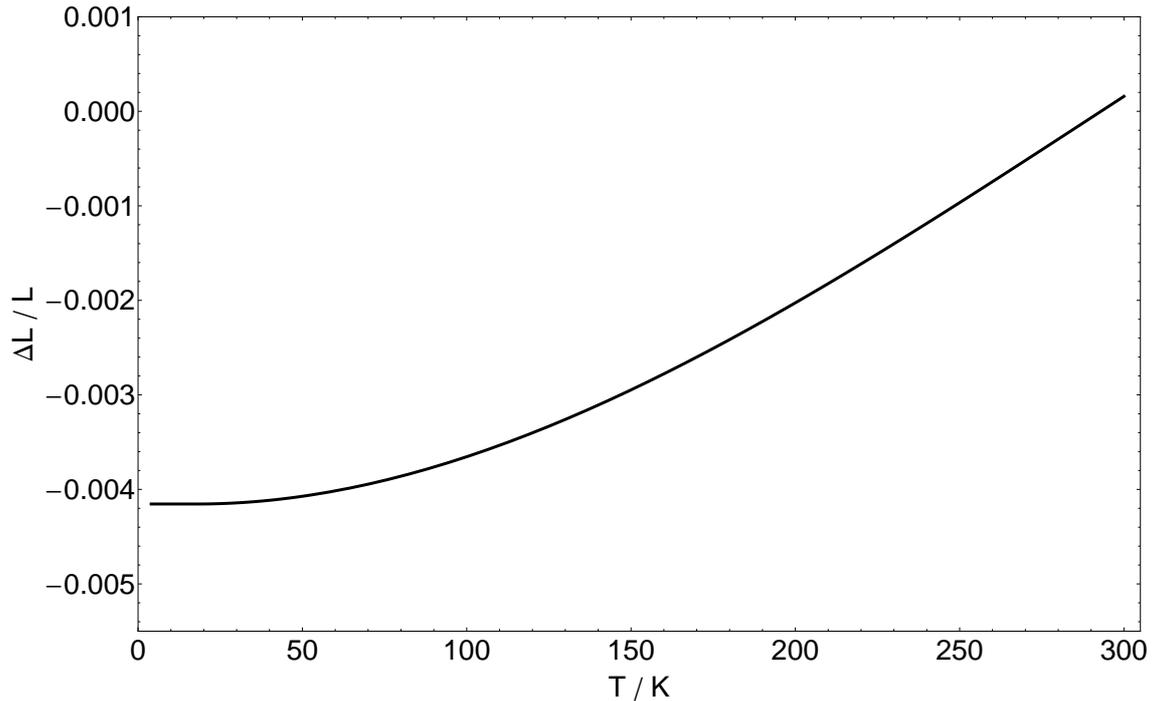


Abbildung 4.14: Gezeigt ist der temperaturabhängige lineare thermische Ausdehnungskoeffizient von Aluminium EN AW 5083 für den Temperaturbereich von 4 K bis 300 K gemäß Gleichung (4.1) und Daten von [37, 42]

Da die die Vermessung ausführende Firma Sigma 3D GmbH bis dahin noch nicht mit dem Lasertrackersystem durch Glasfenster gemessen hatte, wurde dies im Vorfeld erfolgreich getestet. Bei der Referenzmessung der zehn Messpunkte innerhalb der äußerenen CSR-Vakuumkammern zeigte sich jedoch, dass die Messungen für bestimmte Punkte nicht reproduzierbar schienen. So waren Abweichungen zwischen aufeinanderfolgenden Messungen von mehreren Zentimetern zu erkennen. Eine genauere Untersuchung zeigte dann, dass die Winkelmessungen des Lasertrackersystems reproduzierbar und mit der erwarteten Genauigkeit funktionierten, nur die Distanzmessungen waren betroffen. Dies fiel nicht sofort auf, da zuerst die resultierenden kartesischen Koordinaten betrachtet wurden, in denen die Distanz für verschiedene Messpunkte unterschiedlich stark in die drei Koordinaten eingeht. Die Distanzmessungen zeigten dabei für die betroffenen Messpunkte diskrete Werte, die um ganzzahlige Vielfache von etwa 52 mm um den richtigen Wert verteilt waren. Der in diesem Fall als richtig bezeichnete Wert war der Distanzwert, der aus der störungsfreien Messung ohne die Vakuumfenster resultierte. Die Nachfrage bei dem Hersteller des verwendeten Lasertrackers ergab, dass die Ursache für die verschiedenen Distanzwerte mit hoher Wahrscheinlichkeit Reflexionen an den Sichtfenstern des Vakuumsystems sind. Da sieben der zehn Messpunkte von diesem Effekt betroffen waren und auch der erwähnte Wert von etwa 52 mm für jeden betroffenen Messpunkt separat aus allen möglichen Differenzen der gemessenen Distanzwerte nur auf etwa 0,2 mm genau bestimmt werden konnte, war es nicht möglich, diesen Effekt nachträglich zu korrigieren.

Aus diesem Grund wurde beschlossen, für die entsprechenden Messpunkte nicht

direkt die kartesischen Koordinaten zu verwenden, die von der Messsoftware direkt errechnet wurden, sondern die Analyse ausgehend von den Rohdaten in sphärischen Polarkoordinaten im Koordinatensystem des Lasertrackers durchzuführen. Für den Fall der erfolgreichen Distanzmessungen werden zuerst die sphärischen Polarkoordinaten in das kartesische Koordinatensystem des Lasertrackers überführt (siehe Abb. 4.15 a)). Dieses ist zwischen Warm- und Kaltmessung nicht identisch positioniert in Bezug zum CSR-System, da zum Einen die Rotation des Lasertrackers zu seiner vertikalen Achse frei und damit der Azimuthwinkel nicht identisch ist, und zum Anderen eine leichte Verkipfung der vertikalen Achse zwischen den beiden Messungen nicht ausgeschlossen werden kann. Zusätzlich konnte nicht gewährleistet werden, dass die Umgebungstemperatur bei beiden Messungen identisch war. Daraus resultiert eine Veränderung der Laufzeit des Laserstrahls, die korrigiert werden muss. Ausgehend von dem kartesischen Koordinatensystem des Lasertrackers ist abschließend eine weitere Koordinatentransformation in das kartesische Koordinatensystem des CSR notwendig, dessen Ursprung sich in der Mitte des Speicherrings auf Höhe der geplanten Ionenbahn befindet (siehe Abb. 4.15 b)).

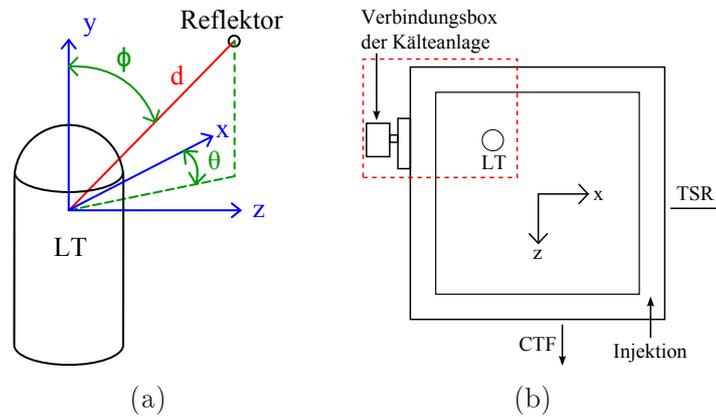


Abbildung 4.15: Koordinatensysteme zur Vermessung und Justage des CSR. a) Das sphärische Polarkoordinatensystem sowie das kartesische Koordinatensystem des Lasertrackers (LT) und b) das kartesische Koordinatensystem des CSR (Ansicht von oben auf das CSR-Gebiet). Die y-Achse in b) kommt aus der Ebene heraus, d.h. es handelt sich um ein rechtshändiges Koordinatensystem, zusätzlich ist mit LT die Position des Lasertrackers während der beiden Messungen skizziert. Ebenso ist die erste Ecke (rot) markiert und die Verbindung zur Kälteanlage eingezeichnet.

Die Transformation aus sphärischen Polarkoordinaten mit Distanz d , Azimuthwinkel θ und Zenitwinkel ϕ in kartesische Koordinaten im Lasertrackersystem ergibt sich aus:

$$\begin{aligned} x &= d \cos \theta \sin \phi \\ y &= d \sin \theta \sin \phi \\ z &= d \cos \phi. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Die Transformation zwischen den beiden kartesischen Koordinatensystemen wird mit Hilfe der sogenannten Helmert-Transformation durchgeführt. Diese setzt sich

zusammen aus Rotation R , Translation \vec{t} und Skalierung m des Ursprungsvektors \vec{x} . Letztere berücksichtigt die verschiedenen Laufzeiten des Lasers für verschiedene Temperaturen, u.a. verursacht durch Temperaturunterschiede:

$$\vec{x}' = \vec{t} + m * R(\alpha, \beta, \gamma) \vec{x}. \quad (4.3)$$

Dabei wird die Rotation selbst beschrieben durch die Drehmatrizen für die Rotationen um die jeweils aktuelle x, y und z-Achse gemäß:

$$\begin{aligned} R_x(\alpha) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \\ R_y(\beta) &= \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \\ R_z(\gamma) &= \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (4.4)$$

die in der richtigen Reihenfolge $x \rightarrow y \rightarrow z$ hintereinander ausgeführt werden:

$$R(\alpha, \beta, \gamma) = R_z(\gamma) \cdot R_y(\beta) \cdot R_x(\alpha). \quad (4.5)$$

Für die Umrechnung der Messwerte für den warmen Zustand des CSR wurden zur detaillierteren Analyse die karthesischen Koordinaten im Lasertrackersystem nicht direkt in die des CSR-Systems umgerechnet, sondern zuerst in das karthesische Lasertrackersystem während der kalten Messung transformiert. Die für die beiden Helmert-Transformationen benötigten Daten sind in Tabelle 4.3 aufgelistet. Dabei ist zu beachten, dass es für die Rotationswinkel mehrere Lösungen gibt, von denen jedoch nur eine aufgeführt ist.

Eingesetzt in Gleichung (4.3) ergibt dies für die Transformation des LT-Systems bei den warmen Messungen in das LT-System bei den kalten Messungen:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,193 \\ -0,058 \\ 0,042 \end{pmatrix} + 0,999909 \begin{pmatrix} 0,71585 & 0,69825 & 0,00233 \\ -0,69825 & 0,71583 & 0,00570 \\ 0,00231 & -0,00570 & 0,99998 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}. \quad (4.6)$$

Für die Transformation des LT-Systems in das CSR-System mit abgekühltem CSR folgt:

Tabelle 4.3: Parameter zu den Helmert-Transformation a) vom Lasertracker (LT)-System bei den warmen CSR-Messungen in das LT-System bei den kalten CSR-Messungen und b) vom LT-System im kalten Zustand in das CSR-System (aus [55]).

Transformation	LT _{warm} → LT _{kalt}	LT _{kalt} → CSR
t_x/mm	0,193	-2521,987
t_y/mm	-0,058	210,139
t_z/mm	0,042	-2522,375
$R_x/^\circ$	0,3267	89,6566
$R_y/^\circ$	0,1325	-139,1095
$R_z/^\circ$	44,2873	0,0395
m	0,999909	1,000081

$$\begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2521,987 \\ 210,139 \\ -2522,375 \end{pmatrix} + 1,000081 \begin{pmatrix} -0,75596 & 0,65460 & 0,00461 \\ 0,00052 & 0,00644 & 0,99998 \\ -0,65462 & 0,75595 & -0,00453 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}. \quad (4.7)$$

Mit diesen Hilfsmitteln könnten jetzt für die Messpunkte mit fehlerhafter Distanzmessung ausgehend aus den Winkelmessungen im kalten und dem Distanzwert aus der Messung im warmen Zustand die karthesischen Koordinaten im CSR-System im kalten Zustand bestimmt werden. Alle Ortsangaben beziehen sich im Folgenden auf das CSR-System.

Zwei der Messpunkte befanden sich auf einer der Bodenplatten des 40 K-Strahlungsschildes (Rohdaten in Anhang A und B zu MP-01 und MP-06) und waren dort mit den in Anhang C gezeigten Targethaltern befestigt. Die Temperaturmessungen, wenige Zentimeter entfernt von diesen Messpunkten, ergaben für den Zeitraum der Vermessung eine Temperatur von 39 K. Daraus resultiert nach Gleichung (4.1) und Tabelle 4.2 ein thermischer Ausdehnungskoeffizient von $-0,004$. Der Targethalter für MP-01 (siehe Abb. 4.16) schrumpft demnach um 0,66 mm in y-Richtung des CSR-Systems. Zusätzlich ist zu erwarten, dass die Stützen des 40 K-Strahlungsschildes schrumpfen und durch ihren geneigten Anstellwinkel zu einer nicht berechenbaren weiteren Absenkung der Platte führen. Da diese beiden Targethalter aus derselben Aluminiumlegierung gefertigt sind wie auch die zu untersuchende Schildplatte, reicht es aus, in der xz-Ebene nur den Abstand der Messpunkte von dem Punkt P_0 zu betrachten, der sich bei der Abkühlung nicht bewegen kann (siehe Abb. 4.16). Dieser Punkt wird daher als stabil betrachtet, da sich dort die Verbindungslinien zwischen den zwei in x-Richtung beweglichen Stützen und den zwei in z-Richtung verkippten Stützen kreuzen.

Für Messpunkt 1 (MP-01) resultiert somit eine Verschiebung beim Abkühlen in

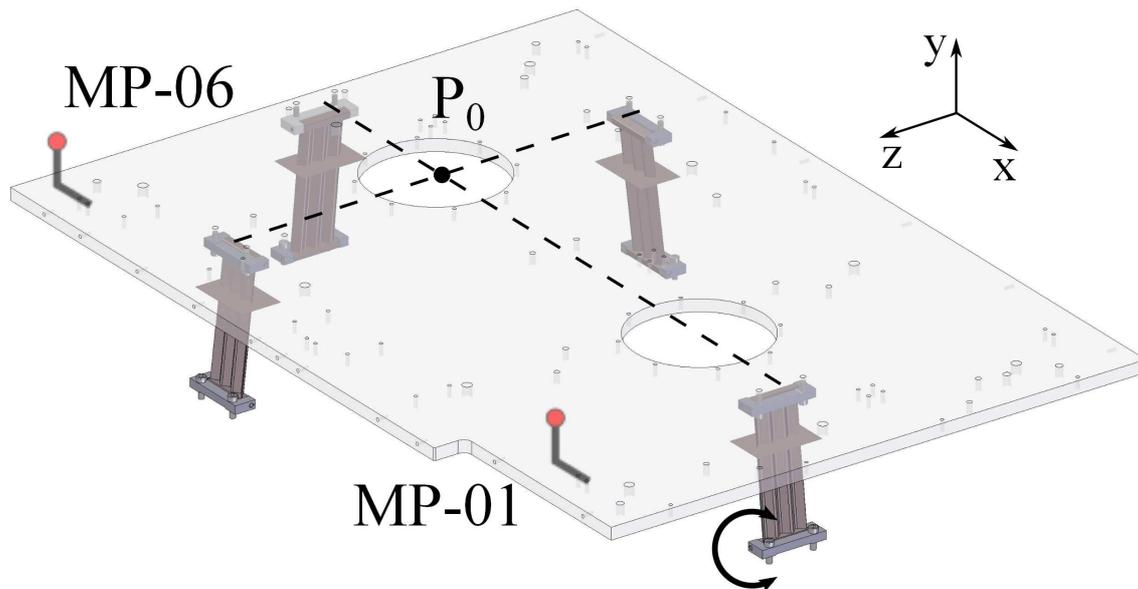


Abbildung 4.16: Targetpositionen (in rot) auf einer der Bodenplatten des 40 K-Strahlungsschildes während des ersten Abkühlens. Die Stützen sind unten auf der Bodenplatte der äußeren Vakuumkammer befestigt und damit auf Raumtemperatur, oben sind sie mit dem Strahlungsschild verbunden und damit auf 40 K. Wenn die Schildplatte abkühlt können die Stützen jeweils nur entlang einer Achse verkippt werden, wie in der Skizze angedeutet. Die zwei Stützen entlang der x-Achse verhindern eine Bewegung in z-Richtung und die entlang der z-Achse verhindern die Bewegung in x-Richtung. Damit wandern alle Punkte beim Abkühlen zum Schnittpunkt der Verbindungslinien der Stützen.

x-Richtung von $-2,185$ mm und für die z-Richtung von $-1,239$ mm. Die Abweichungen zwischen gemessenen (Anhang B) und berechneten Werten beträgt sowohl in x- als auch in z-Richtung lediglich $0,03$ mm, was im Rahmen der späteren Fehlerbetrachtung vernachlässigbar ist. In y-Richtung zeigt sich wie erwartet, dass sich die Schildplatte senkt. So beträgt die Abweichung von dem gemessenen zu dem errechneten Wert der y-Koordinate $-0,465$ mm. Dieser Wert ist im Vergleich zu den beiden anderen Richtungen deshalb so groß, weil in der Berechnung ausschließlich die Änderung aufgrund der Targethalterung berücksichtigt wurde. Diese Änderung ist also für den späteren Betrieb zu berücksichtigen, wenn für Experimente Aufbauten auf einer der Bodenplatten des 40 K-Strahlungsschildes befestigt werden sollen, bei denen die Position wichtig ist. Der zweite Messpunkt MP-06 gehört zu denen, bei denen eine fehlerfreie Distanzmessung nicht möglich war. Deshalb wurde ausgehend von dessen Koordinaten im warmen Zustand analog zu MP-01 berechnet, wie sich seine Koordinaten beim Abkühlen ändern. Dabei wurde auch die zusätzliche Absenkung der Schildplatte berücksichtigt. Diese berechneten Koordinaten wurden dann über die inverse Transformation zu Gleichungen (4.7) und (4.3) in die theoretischen sphärischen Polarkoordinaten im LT-System umgerechnet und mit den gemessenen Werten verglichen. Die Abweichungen zwischen vorhergesagtem und gemessenem Azimuth- und Zenitwinkel kann benutzt werden, um mit dem Distanzwert der warmen Messung eine maximale Abweichung in kartesischen Koordinaten im CSR-System zu

bestimmen. Da im kalten Zustand kein Distanzwert zu messen war, wurde der der warmen Messung verwendet, da dieser sich maximal um 2 – 3 mm geändert haben kann. Diese Näherung verursacht bei den Berechnung der Abweichungen in karthesischen Koordinaten einen Fehler in der Größenordnung von 1 – 2‰. Der Wert des Azimuthwinkels $\theta = -50,00106^\circ$ weicht nur um $0,00116^\circ$ vom gemessenen Wert ab. Dies entspricht bei dieser Distanz in karthesischen Koordinaten etwa 0,03 mm. Der Zenithwinkel $\phi = 99,9557^\circ$ stimmt bis auf $0,0007^\circ$ mit dem gemessenen Wert überein. Das entspricht in karthesischen Koordinaten 0,004 mm, und bestätigt damit die Annahme, dass sich die Schildplatte gleichmäßig um 0,465 mm senkt. Es sind keine weiteren Abweichungen von den berechneten Werten zu erkennen, so dass davon ausgegangen werden kann, dass sich die Bodenplatten des 40 K-Strahlungsschildes beim Abkühlen exakt so verhalten wie vorhersagt. Weiterhin kann festgehalten werden, dass die Konstruktion zur Befestigung dieser Schildplatten innerhalb der äußeren CSR-Vakuumkammern geeignet ist, um Komponenten dort zu befestigen, deren exakte Position bzw. die Kenntnis dieser Position wichtig ist.

Die ionenoptischen Elemente des CSR sind nicht beliebig genau justierbar, und auch beim Abkühlen kommt es zwangsläufig zu Abweichungen zu den berechenbaren Änderungen. Aus diesem Grund wurden schon früh in der Planungsphase Strahlführungssimulationen durchgeführt, um die erforderlichen Genauigkeiten zu bestimmen [52]. Abweichungen der Trajektorien von der Sollbahn der Ionen sorgen für eine kleinere Akzeptanz des CSR und bei zu großen Abweichungen für größere Ionenverluste an Vakuumkammern und anderen massiven Objekten in Strahlhöhe. Dazu wurden mit dem Programmpaket Cosy-Infinity der Michigan State University Strahlführungssimulationen durchgeführt, einmal für perfekt justierte Komponenten und zusätzlich für einzelne leicht dejustierte Komponenten. Aus den daraus resultierenden Unterschieden (siehe beispielsweise Abb. 4.17) wurden dann die Grenzwerte für die verschiedenen Möglichkeiten der Rotationen und Translationen bestimmt. Die Grenzwerte sind die Werte, bei denen die Dejustage einer einzigen Baugruppe, ohne Zuhilfenahme von vorhandenen Korrektur-elementen, zu einer maximalen Verschiebung der Trajektorien um 1,0 mm führt. Die daraus resultierenden Grenzwerte sind in Tabelle 4.6 zusammen mit den gemessenen Resultaten dargestellt.

Bei den 39° und 6° -Deflektoren war ein ähnliches Vorgehen wie bei den beiden Messpunkten auf der Bodenplatte des 40 K-Strahlungsschildes möglich. Auch hier wurde ausgehend von CAD-Daten die Sollpositionen der Fixpunkte P_0 bestimmt, in deren Richtung die Messpunkte beim Abkühlen schrumpfen (siehe Abb. 4.18). Für den 6° -Deflektor war dies $(-2254,672 \text{ mm}/0 \text{ mm}/ - 4819,774 \text{ mm})$ und für den 39° -Deflektor $(-3779,014 \text{ mm}/0 \text{ mm}/ - 4604,461 \text{ mm})$. Die y-Koordinate dieser Punkte ist irrelevant und wurde auf 0 mm gesetzt, da eine Berechnung der Schrumpfung der Elektrodenstützen aufgrund des unbekanntem Temperaturgradienten entlang der Elektrodenstützen und aufgrund der zahlreichen Übergänge verschiedener Materialien nicht möglich war. Da die Deflektoren zuvor ebenfalls mit Hilfe eines Lasertrackers justiert wurden, kann davon ausgegangen werden, dass die theoretischen Werte gut mit den realen Werten im experimentellen Aufbau übereinstimmen. Selbst kleine Abweichungen von etwa 1 mm wären in diesem Fall nicht kritisch, da der Ausdehnungskoeffizient, wie schon am Beispiel der ersten beiden diskutierten Messpunkte gezeigt, in der Größenordnung von etwa 0,004 liegt und damit eine

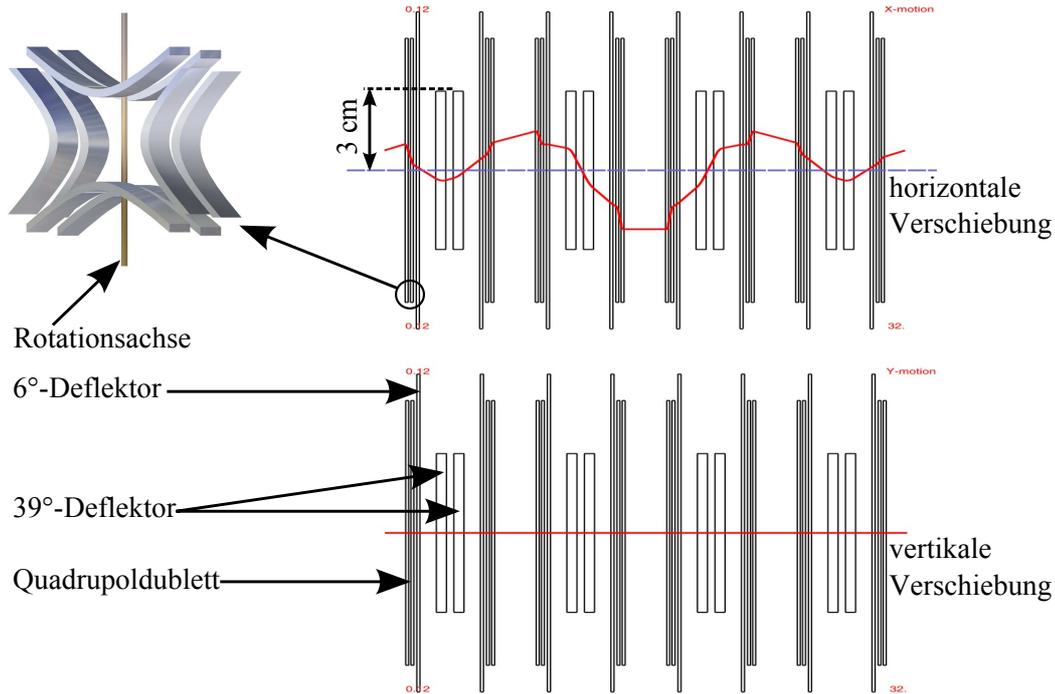


Abbildung 4.17: Cosy-Infinity-Simulation der Ionenbahn im CSR für den Fall eines um $0,5^\circ$ in der Strahlebene (gemäß Abb. 2.5) rotierten Quadrupoldubletts (siehe auch [52]). In rot ist die resultierende Sollbahn dargestellt. Die horizontale blaue Linie ist im Vergleich dazu die Sollbahn für eine fehlerfreie Justage. Die Komponenten entlang der Strahlachse repräsentieren die einzelnen ionenoptischen Elemente. In vertikaler Richtung ist keine Abweichung zur Sollbahn zu erkennen, die Sollbahn ist deshalb nicht eingezeichnet.

Abweichung von $4\ \mu\text{m}$ bedeuten würde, die mit unseren Mitteln nicht messbar ist. Technische Zeichnungen, aus denen die für die Berechnungen notwendigen Maße bei Raumtemperatur abzulesen sind, sind im Anhang C in den Abbildungen C.4 bis C.6 zu finden. Sowohl beim 39° - als auch beim 6° -Deflektor war nur bei jeweils einem der vier Messpunkte die Distanzmessung erfolgreich, d.h. es musste analog zu MP-06 auf dem 40 K-Strahlungsschild die theoretischen karthesischen Koordinaten im CSR-System in theoretische Polarkoordinaten im Koordinatensystem des Lasertrackers transformiert werden. Die resultierenden Werte sind in Tabelle 4.4 zu finden. Für die beiden Messpunkte, bei denen eine Distanzmessung möglich war (MP-02 und MP-07, siehe Abb.4.18), konnten wie bei MP-01 die karthesischen Koordinaten im CSR-System direkt verwendet werden. Die zugehörigen Zahlenwerte sind in Tabelle 4.5 aufgeführt.

Für die Berechnung der theoretischen Werte wurde im Fall des 39° -Deflektors die gemessene Temperatur von 117 K verwendet. Da der 6° -Deflektor relativ wenig freien Platz in der zugehörigen inneren Vakuumkammer lässt, war es nicht möglich, auf dem Deflektor selbst einen Temperatursensor zu montieren. Stattdessen wurde aus der Temperaturdifferenz zwischen Elektrode und innerer Vakuumkammer des 39° -Deflektors (Vakuumkammer 107 K, Elektrode 117 K) die Temperatur der Elektroden des 6° -Deflektors aus der Temperatur der zugehörigen Vakuumkammer von

Tabelle 4.4: Gegenüberstellung der gemessenen Winkel (aus [54, 55]) und der berechneten theoretischen Werte für den kalten Zustand. Letztere wurden aus den im warmen gemessenen (aus [53, 55]) Werten analog zu den Messpunkten auf dem 40 K-Strahlungsschild für den kalten Zustand berechnet. Die Positionen der Messpunkte sind in Abb. 4.18 dargestellt.

Messpunkt	$\theta_{\text{gemessen}} / ^\circ$	$\phi_{\text{gemessen}} / ^\circ$	$\theta_{\text{berechnet}} / ^\circ$	$\phi_{\text{berechnet}} / ^\circ$
MP-02	-61,8482	94,7887	-61,8412	94,7656
MP-03	-58,3285	89,7375	-58,3256	89,7173
MP-04	-53,4883	89,7690	-53,4856	89,7423
MP-05	-49,9874	95,0646	-49,9840	95,0373
MP-07	-27,5421	95,0007	-27,5436	94,9852
MP-08	-24,4942	89,7068	-24,4982	89,6928
MP-09	-11,4268	89,9993	-11,4324	89,9821
MP-10	-8,4177	94,9737	-8,4241	94,9534

Tabelle 4.5: Gegenüberstellung der gemessenen Werte (aus [54, 55]) für die Änderung der Koordinaten der Messpunkte, an denen eine Distanzmessung möglich war, mit den theoretisch vorhergesagten Änderungen aus den Messwerten im warmen Zustand (aus [53, 55]). Es wurde jeweils $\text{Wert}_{\text{kalt}} - \text{Wert}_{\text{warm}}$ berechnet. Die Messunsicherheiten betragen für jede Koordinate etwa 0,035 mm.

Koordinate	MP-02 _{gemessen}	MP-02 _{berechnet}	MP-07 _{gemessen}	MP-07 _{berechnet}
$\Delta x / \text{mm}$	-0,664	-0,891	-1,487	-1,420
$\Delta y / \text{mm}$	-0,941	0,008	-1,003	-0,584
$\Delta z / \text{mm}$	0,335	-0,056	0,374	0,363

100 K zu 110 K abgeschätzt. Die Kontaktierung der zur Kühlung genutzten Hochspannungsleitung war in beiden Fällen auf der Vakuumkammer, die Elektroden sind aber so groß, dass ihre Wärmekapazität es ausschließt, dass sie dieselbe Temperatur haben wie die umgebende Vakuumkammer. Die gemessenen Abweichungen der theoretischen von den gemessenen Koordinaten für 39°-Deflektor und 6°-Deflektor sind zur Übersicht in Abb. 4.18 dargestellt.

Die Interpretation der Werte für die y-Koordinate der Messpunkte des 6°-Deflektors deutet auf eine Verkipfung um die z-Achse des CSR-Koordinatensystems hin. Die Verkipfung beträgt 0,015° (Vergleich MP-02 und MP-05) bzw. 0,022° (Vergleich MP-03 und MP-04). Gefordert waren hier maximal 0,15°, die Vorgaben wurden also eingehalten. Für den 39°-Deflektor ergeben sich sowohl für den Vergleich von MP-07 mit MP-10 als auch für MP-08 mit MP-09 eine Verkipfung von 0,016°. Gefordert war eine maximale Verkipfung von 0,060°. Die gemessenen Werte deuten also auf vertikale Rotationen hin, die noch innerhalb der geforderten Grenzen liegen. Betrachtet man die Unterschiede der gemessenen zu den berechneten Winkeln

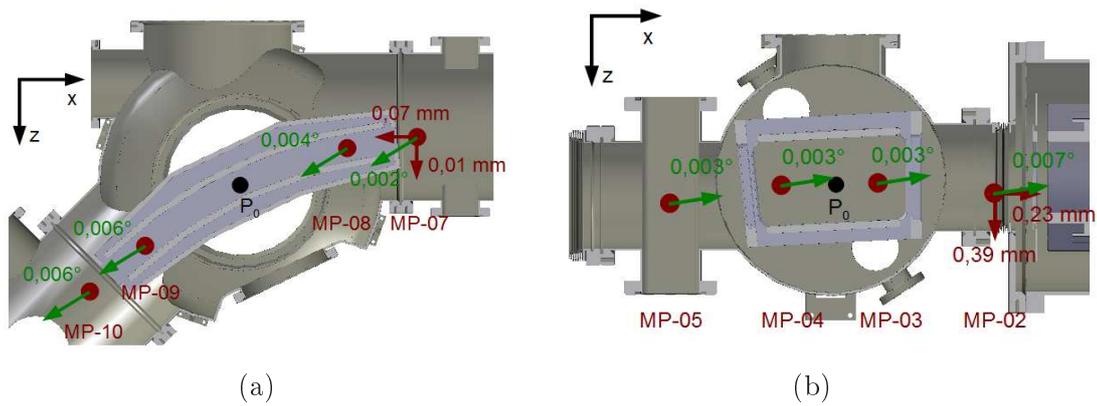


Abbildung 4.18: Gezeigt sind die Abweichungen der gemessenen Positionen von den vorhergesagten in der xz -Ebene für den 39° -Deflektor a) und den 6° -Deflektor b). Rot entspricht dabei den karthesischen Koordinaten und grün dem Azimutwinkel im Koordinatensystem des Lasertrackers. Eine Translation entlang bzw. parallel zu der Achse Lasertracker-Messpunkt kann bei nur einem Messpunkt mit Distanzmessung nicht gesehen werden.

der Messpunkte MP-02 bis MP-05, so sieht man in allen vier Messpunkten einen leicht größeren Azimutwinkel als erwartet. Da der 6° -Deflektor nur leicht gegenüber der x -Achse in der Strahlebene verkippt ist, kann man diesen Winkelunterschied als eine Translation entlang der x -Achse um $0,12\text{ mm}$ interpretieren. Da die erwartete Schrumpfung entlang der y -Achse durch die Elektrodenstützen nicht berechnet werden konnte, zeigen sich bei den Zenitwinkeln deutliche Unterschiede von $0,023^\circ$ bis $0,027^\circ$. Abgesehen von der erwähnten vertikalen Rotation bedeutet dies eine Translation entlang der y -Achse von $-0,80\text{ mm}$. Beide Translationen stellen in dieser Größenordnung kein Problem dar [52].

Eine horizontale Rotation ist bei Betrachtung der Winkelabweichung nicht zu erkennen. In diesem Fall müssten sich die Vorzeichen der Änderungen im Azimut von MP-02 und MP-03 zu MP-04 und MP-05 unterscheiden, was nicht der Fall ist. Betrachtet man die karthesischen Koordinaten für MP-02, so sieht man, dass dessen z -Koordinate um $0,39\text{ mm}$ von dem erwarteten Wert abweicht. Zusammen mit den Informationen aus den Winkelmessungen deutet dies auf eine horizontale Translation senkrecht zur Strahlachse hin, die nach [52] unter $1,0\text{ mm}$ bleiben sollte, was damit erreicht wurde. Der vermessene 6° -Deflektor zeigt somit keine problematische Abweichung von den erwarteten Änderungen durch das Abkühlen. Betrachtet man allein die Azimutwinkel des 39° -Deflektors, so erkennt man analog zum 6° -Deflektor, dass alle Abweichungen vom theoretischen Wert in dieselbe Richtung gehen. Deshalb wird diese Abweichung als Translation in Richtung des umlaufenden Ionenstrahls interpretiert. Die verschiedenen starken Abweichungen sind ein Ergebnis der erwähnten vertikalen Rotation des Deflektors. Ebenso wie im Fall des 6° -Deflektors ist auch hier keine horizontale Rotation zu erkennen, andernfalls müssten sich die Vorzeichen der Abweichungen von der Theorie für die Messpunkte MP-07 und MP-08 von der für MP-09 und MP-10 unterscheiden. Betrachtet man den einzigen Messpunkt mit verfügbaren karthesischen Koordinaten MP-07, so ergibt sich eine Translation in

x- und z-Richtung von $-0,07$ mm bzw. $0,01$ mm. Dies entspricht der Erklärung der Azimuthabweichungen durch eine Translation entlang der Ionenbahn. Für die horizontale Translation ist nur die Richtung senkrecht zum Ionenstrahl von Relevanz. Hier wird der vorgegebene Maximalwert von $0,50$ mm eingehalten. Auch für den im kalten Zustand vermessenen 39° -Deflektor erfüllen alle Messwerte die vorgegebenen Grenzwerte der tolerierbaren Abweichungen von der Theorie.

Die gemessenen Werte sind natürlich keine absolut exakten Werte. In den Messberichten der Vermessung mit dem Lasertracker [53, 54, 55] wird die Unsicherheit in den karthesischen Koordinaten mit $\pm(10 \mu\text{m} + 10 \mu\text{m}/m)$ angegeben, d.h. bei den durchgeführten Messungen mit Abständen zwischen $2,0$ m und $2,5$ m resultiert eine Messunsicherheit durch das Messverfahren von $30 \mu\text{m}$ bis $35 \mu\text{m}$. Dieser Wert ist auch bei den theoretischen Werten für die Koordinaten der Messpunkte im kalten Zustand zu berücksichtigen, da sie auf Messwerten im warmen Zustand basieren. Durch die Messung durch die Vakuumfenster entsteht zwar eine zusätzliche Unsicherheit, diese sollte jedoch vernachlässigbar sein, da auch die Messungen im warmen Zustand des CSR bereits mit diesen Fenstern und unter Vakuum durchgeführt wurden. Auch die errechneten theoretischen Werte sind nicht beliebig genau. Die Gründe und die zugehörigen Größen sind:

- Der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient wurde laut [42] mit einer Standardabweichung von $1,4 \times 10^{-5}$ bestimmt. Das bedeutet für einen Abstand l vom Messpunkt zur Achse der zugehörigen Elektrodenstütze eine Unsicherheit von $l \times 1,4 \times 10^{-5}$. Für MP-07 und MP-10 (maximaler Abstand für die Messungen am CSR) sind dies $0,006$ mm.
- Zusätzlich wurde ein Unterschied im Ausdehnungskoeffizienten von $1,6\%$ für die verschiedenen Walzrichtungen des Rohmaterials nachgewiesen [42]. Da die Walzrichtung des Rohmaterials in unserem Fall unbekannt ist, führt dies zu einer weiteren Unsicherheit. Wieder für die Messpunkte MP-07 und MP-10 bedeutet dies $0,024$ mm für einen linearen thermischen Ausdehnungskoeffizient von $3,6 \times 10^{-3}$.
- Die Temperaturmessungen der PT1000 Temperatursensoren sind in diesem Temperaturbereich auf 5 K genau. Dieser Wert wurde dem Datenblatt des Herstellers entnommen [56] und resultiert bei einer Temperatur im kalten Zustand von 100 K wieder für MP-07 und MP-10 in einer Unsicherheit von $0,024$ mm.
- Auf dem 6° -Deflektor selbst konnte kein Temperatursensor montiert werden. Die Temperatur wurde deshalb - ausgehend von der Temperaturdifferenz zwischen Vakuumkammer und Elektroden für den 39° -Deflektor und das überprüfte Quadrupoldublett - aus der Temperatur der Vakuumkammer des 6° -Deflektors bestimmt. Für die Messpunkte MP-02 bis MP-05 wurde dies durch eine zusätzliche Temperaturunsicherheit von 5 K berücksichtigt. Der größte auftretende Wert ist hier $0,014$ mm für die Messpunkte MP-02 und MP-05 (der Abstand zur Achse der Elektrodenstütze ist 249 mm).

In der Summe erhält man für die theoretisch berechneten Werte eine Unsicherheit von etwa $0,1$ mm für karthesische Koordinaten und entsprechend für die Winkel in Polarkoordinaten (Annahme: Abstand zum Messpunkt beträgt 2 m) etwa $0,003^\circ$.

Die Quadrupole der ersten Ecke des CSR wurden im Gegensatz zu den 6°- und 39°-Deflektoren nicht direkt mittels Lasertracker vermessen, sondern mit Taylor-Hobson-Fernrohren, die zuvor auf die Strahlachse ausgerichtet wurden. Die Justage der Fernrohre selbst geschah über zuvor von Sigma3D justierte Halterungen für Glastargets (Positionen siehe Abb. 4.19) auf den geraden Strecken des CSR. Eine Vermessung mittels Lasertracker wäre auch in diesem Fall möglich gewesen, hätte aber komplizierte Targethalterungen für die Reflektorkugeln des Lasertrackersystems erfordert. Ein weiterer entscheidender Vorteil dieser Methode ist, dass eine spätere Überprüfung oder Justage nach eventuellen Umbaumaßnahmen ohne externe Firmen möglich ist, und somit flexibler und günstiger durchgeführt werden kann.

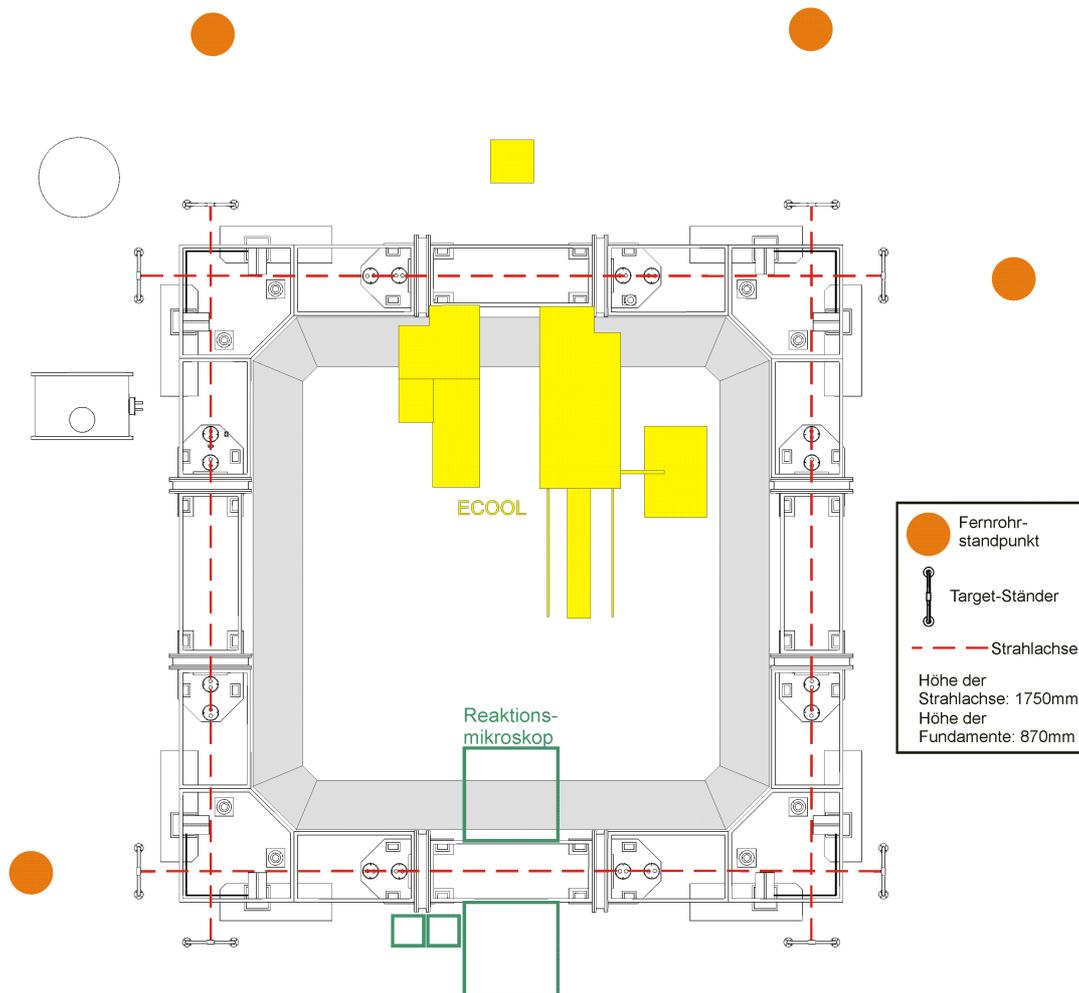


Abbildung 4.19: Ansicht von oben auf den CSR. Vermerkt sind Target und Fernrohrpositionen auf Höhe der Strahlachse zur Justage der Quadrupoldupletts und anderer Komponenten wie z.B. des Pickupsystems.

Für die Arbeit mit Taylor-Hobson-Fernrohren wird am MPIK üblicherweise mit Glastargets an der zu justierenden Baugruppe gearbeitet. Da jedoch eine Targethalterung dafür relativ schwer geworden wäre und damit möglicherweise schon zur Dejustage des Quadrupoldubletts geführt hätte, wurden präzise gefertigte Blechtargets

verwendet. Diese hatten senkrecht zur Strahlachse (in y -Richtung im CSR-System) einen Spalt und auf der Strahlachse selbst ein kleines Loch (siehe Abb. 4.20). Die Form wurde mittels Drahterodierverfahren gefertigt, um die geforderte Präzision zu erreichen. Mit Hilfe von Parallelität und Position der Spalte und Löcher und des in den Fernrohren integrierten Fadenkreuzes ist es damit möglich gewesen, ein Quadrupoldublett im kalten Zustand zu vermessen.

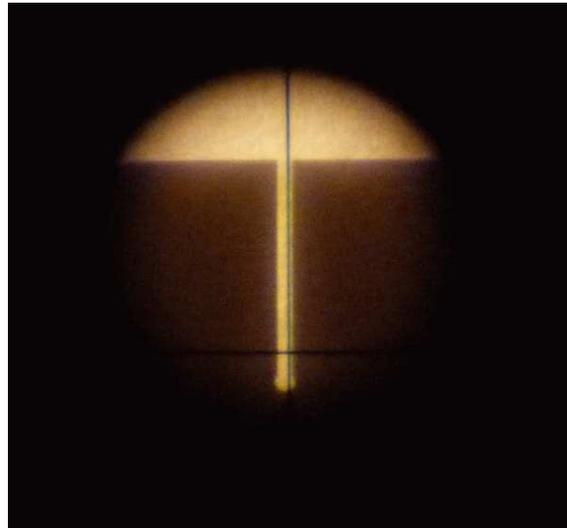


Abbildung 4.20: Blick durch das Fernrohr auf eines der Targets zur Vermessung eines Quadrupoldubletts im kalten Zustand. Das Target wurde entlang der Strahlachse von einer Lampe außerhalb des Vakuumsystems beleuchtet.

Ursprünglich war es vorgesehen, beide Quadrupoldubletts der ersten Ecke zu überprüfen. Es stellte sich jedoch heraus, dass sich über den Zeitraum des Abkühlens die Fernrohre leicht dejustierten. Eine nachträgliche Justage war über die in der Halle vorhandenen Targethalter nicht mehr möglich, da es dazu nötig gewesen wäre, eines der Targets durch zwei Vakuumfenster und die beiden engen Spalte der Quadrupoltargets zu betrachten. Dies war durch die auftretende Bildunschärfe durch die Beugungseffekte am Spalt nicht möglich. Das in Strahlrichtung gesehene erste Quadrupoldublett konnte über den Umweg eines zusätzlichen Targets, das in Blickrichtung durch das Fernrohr noch vor dem Vakuumfenster plaziert wurde, gelöst werden (die Position entspricht etwa der dem Beginn des Elektronenkühlers in Abb. 4.19). Dieses Target wurde im kalten Zustand plaziert, so dass mit dem entsprechenden Fernrohr waagrecht und mittig durch das erste Target gesehen werden konnte. Nach dem Aufwärmen und Entfernen der störenden Vakuumfenster und Quadrupoltargets wurde das neue Target mit dem ursprünglich vorgesehenen Target auf der Strahlachse überprüft.

Der direkte Vergleich der Spalte der beiden Targets zwischen warmem und kaltem Zustand zeigte direkt, dass beide Spalte in beiden Messungen parallel zur Senkrechten im Fadenkreuz des Fernrohrs waren und auch die in Abb. 4.21 mit x bezeichnete Größe in beiden Messungen links und rechts identisch waren. Das bedeutet, dass dieses Quadrupoldublett nicht messbar weder um die x - noch um die z -Achse rotierte.

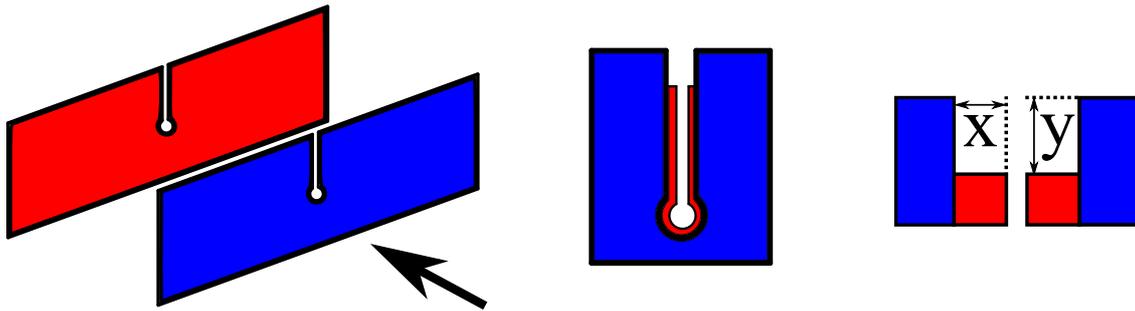


Abbildung 4.21: Gezeigt sind die Targets, wie sie bei der Überprüfung der Justage eines Quadrupoldubletts im kalten Zustand verwendet wurden. Je eines dieser Targets wurde an drei Quadrupolelektroden mit Passstiften befestigt und mit abgekühlt. Der Pfeil kennzeichnet die Blickrichtung durch das verwendete Taylor-Hobson-Fernrohr. Die anderen beiden Ansichten zeigen den Zustand beim Betrachten der Targets durch das Fernrohr sowie die beiden Größen x und y , die zur Bestimmung der vertikalen Rotation des Quadrupoldubletts ausgewertet wurden.

In der xz -Ebene konnte eine Parallelverschiebung von der warmen zur kalten Vermessung von 0,30 mm in z -Richtung festgestellt werden, die aber damit noch innerhalb der vorgegebenen Toleranzen lag. Der Freiheitsgrad der Rotation um die z -Achse war entgegen der Planung nicht so einfach über die Position der Löcher in den Targets zu vermessen, da das komplette Quadrupoldublett mit 0,69 mm stärker nach unten (negative y -Richtung) schrumpfte als erwartet, und sich damit aus dem Verstellbereich des Fernrohrs entfernte. Es war im kalten Zustand nur möglich die obere Kante der beiden Targets durch das Fernrohr zu erkennen. Aufgrund der Messung durch ein Vakuumfenster und eine Bildunschärfe durch die Beugung der Beleuchtung beim Betrachten des entfernteren Spalts durch den näheren, war es nicht möglich, die in Abb. 4.21 mit y bezeichnete Größe direkt zu messen. Es war nur möglich, das Verhältnis aus y zu x abzuschätzen, was dementsprechend mit einer relativ großen Unsicherheit berücksichtigt werden musste. Die Größe x selbst konnte ebenfalls nicht direkt bestimmt werden, konnte aber durch Beobachtung in beiden Fällen zu $0,5 \times \text{Spaltbreite}$ bestimmt werden. Im kalten Zustand ergab sich das Verhältnis von y zu x zu $1 : 2,5$ und wird deshalb im Folgenden mit $1 : 2$ bis $1 : 3$ berücksichtigt. Im warmen Zustand ergab sich das Verhältnis zu $1 : 2$. Zudem konnte dann über die Spaltbreite von 0,76 mm im Target die Größe x zu 0,38 mm und damit die Größe y zu 0,76 mm (warm) und 1,14 mm (kalt) berechnet werden. Mit dem Abstand zwischen den beiden Targets von 550 mm (aus dem CAD-Modell), ergibt sich damit eine Rotation um die z -Achse von maximal $+0,040^\circ$, die knapp über dem Grenzwert liegt, aber eine relativ große Unsicherheit in Richtung kleinerer Winkel besitzt.

In Anbetracht der schwierigen Messmethode, der symmetrischen Stützstruktur, die auch bei den 39° - und 6° -Deflektoren zum Einsatz kommen, und dort keine so große Verkippung erkennen lassen, kann man davon ausgehen, dass der Wert $0,040^\circ$ die obere Grenze der Dejustage darstellt. Die obere Kante des in Blickrichtung ersten Targets konnte mit dem Fadenkreuz des Fernrohrs gerade vermessen werden. Es zeigte sich dabei eine Verschiebung in y -Richtung von $-0,4$ mm. Da gleichzei-

tig aber die Verkippung derart war, dass dieses Target sich in die andere Richtung bewegen müsste, wurde die Schrumpfung der Elektrodenstütze für dieses Target teilweise kompensiert durch die Verkippung des Quadrupoldupletts. Eine obere Grenze der Schrumpfung entlang der y-Achse ergibt sich somit aus den direkt gemessenen $-0,40$ mm und den $0,29$ mm (dies entspricht der Verkippung um $+0,040^\circ$) zu $0,69$ mm.

Die Absenkung der ionenoptischen Elemente und damit die Verschiebung der Sollbahn war erwartet und muss bei der Injektion der Ionen in den kalten CSR berücksichtigt werden. Für die Abweichung von dieser „neuen“ Sollbahn galt es maximal $0,40$ mm einzuhalten. Als Abschätzung dafür wurden die Daten der ionenoptischen Elemente für die vertikale Rotation und die gemessene vertikale Translation der Messpunkte MP-02 und MP-07 verwendet, um die vertikale Translation der kompletten Baugruppe abzuschätzen. Als Ergebnis erhält man für den 6° -Deflektor einen Wert von $-0,85$ mm und für den 39° -Deflektor $-0,53$ mm, was zusammen mit dem Wert des Quadrupoldubletts von $-0,69$ mm darauf hinweist, dass die Elektrodenstützen beim Abkühlen um $0,69$ mm \pm $0,16$ mm schrumpfen. Damit ist die Vorgabe der vertikalen Translation des Quadrupoldubletts relativ zur Sollbahn im kalten Zustand von maximal $0,40$ mm erfüllt.

Zur Übersicht sind in Tabelle 4.6 die gemessenen und die Grenzwerte für die verschiedenen Freiheitsgrade der ionenoptischen Elemente des CSR beim Abkühlen dargestellt.

Trotz der großen Probleme, die die Überprüfung der Justage der ionenoptischen Elemente des CSR im kalten Zustand erschwerten, war es möglich, im Rahmen der Messgenauigkeiten und der vorhandenen theoretischen Grundlagen zu zeigen, dass die gewählte Konstruktion dieser Elemente und ihrer Stützstrukturen auf Betonfundamenten bei Raumtemperatur geeignet sind, die geforderten Grenzen einzuhalten. Nur die vertikale Rotation des Quadrupoldubletts fiel größer aus als erwartet, war aber gleichzeitig auch die ungenaueste der durchgeführten Messungen und weder der vermessene 6° -Deflektor noch der 39° -Deflektor zeigen eine vertikale Verkippung dieser Größe.

4.2.2 Interpretation des Abkühlvorganges

Das erste Abkühlen einer Ecke des CSR zur Überprüfung der Justage der ionenoptischen Elemente im kalten Zustand wurde mit ca. 40 installierten PT1000 Temperatursensoren überwacht. Diese wurden im Inneren des Kryostaten an den Positionen angebracht, die im Vorfeld zur Interpretation und Überwachung des Abkühlvorgangs als wichtig festgelegt wurden. Da die Strahlungsschilde nur an ihren Bodenteilen mit den Heliumleitungen verbunden sind, wurden die Temperatursensoren nicht nur an diesen sondern auch an den Seiten- und Deckenteilen befestigt. Mit dieser Sensoranordnung sollte festgestellt werden, ob auch die etwas entfernteren Positionen ausreichend gekühlt werden. Die Innenkammern selbst wurden alle mit mindestens einem Temperatursensor überwacht. Im Fall komplizierter Geometrien und daraus resultierender bekannter schlechterer Wärmeanbindung an die Heliumleitungen, wie es bei den Vakuumkammern der 39° -Deflektoren der Fall ist, wurden mehr als ein Sensor verwendet. Die Elektroden ausgewählter ionenoptischer Elemente wurden

Tabelle 4.6: Ergebnisse der Vermessung der ionenoptischen Elemente des CSR im warmen und im kalten Zustand. Aufgelistet ist die maximale Dejustage ionenoptischer Elemente für die verschiedenen Freiheitsgrade aus [52] im Vergleich zu den gemessenen Änderungen im Rahmen des ersten Abkühlens einer Ecke des CSR. Für die horizontale Rotation des 39°-Deflektors und des Quadrupoldubletts wurden im Rahmen der Messgenauigkeit keine Änderung festgestellt. Mit Ausnahme der vertikalen Verkippung des Quadrupoldubletts, die eine relative große Messunsicherheit besitzt, sind alle Werte innerhalb der vorgegebenen Grenzen. Die vertikale Verschiebung des Quadrupoldubletts war zu erwarten und kann nicht verhindert werden. Diese muss idealerweise schon bei der Injektion der Ionen in den CSR kompensiert werden. Die Translation wird für alle Komponenten gleich sein, hat aber bei den 6°- und 39°-Deflektoren in dieser Größenordnungen keinen negativen Einfluss auf die gespeicherten Ionen.

Bauteil	Freiheitsgrad	Sollwert	Istwert
6°-Deflektor	Rot. horiz.	$\leq 0,15^\circ$	$0,095^\circ \pm 0,058^\circ$
6°-Deflektor	Rot. vert.	$\leq 0,15^\circ$	$0,022^\circ \pm 0,001^\circ$
6°-Deflektor	Transl. horiz.	$\leq 1,0 \text{ mm}$	$0,40 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$
39°-Deflektor	Rot. horiz.	$\leq 0,03^\circ$	$0,000^\circ \pm 0,004^\circ$
39°-Deflektor	Rot. vert.	$\leq 0,06^\circ$	$0,016^\circ \pm 0,004^\circ$
39°-Deflektor	Transl. horiz.	$\leq 0,5 \text{ mm}$	$0,20 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$
Quadrupoldublett	Rot. horiz.	$\leq 0,015^\circ$	$0,000^\circ \pm 0,010^\circ$
Quadrupoldublett	Rot. vert.	$\leq 0,03^\circ$	$0,040^\circ \pm 0,016^\circ$
Quadrupoldublett	Transl. horiz.	$\leq 0,50 \text{ mm}$	$0,30 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$
Quadrupoldublett	Transl. vert.	$\leq 0,40 \text{ mm}$	$0,16 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$

ebenso wie auch zwei der Elektrodenstützen überwacht.

Die Interpretation des Abkühlens selbst war nicht der Hauptgrund für das erste Abkühlen der Ecke des CSR. Deshalb mussten zur Vermessung der ionenoptischen Elemente an einigen Stellen die Superisolierung, die im Normalfall den Wärmeeintrag von 300 K auf den 80 K-Strahlungsschild minimieren soll, weggelassen werden. Durch die notwendigen Öffnungen in den Strahlungsschilden, die zur Vermessung nötig waren, wurden zusätzlich auch weiter innen im Kryostaten befindliche Komponenten deutlich stärker erwärmt als es im späteren Betrieb der Fall sein wird. Insgesamt waren für die Vermessung 10 Öffnungen in den äußeren Vakuumkammern zu den Innenkammern und teilweise auch in diese hinein mit einer Größe von jeweils etwa 13 cm^2 (für die Lasertracker Vermessung), und vier mit einer Größe von etwa 80 cm^2 (auf der Strahlachse für die Quadrupoldubletts) vorhanden.

Das Abkühlen selbst wurde relativ langsam mit einer Geschwindigkeit von zeitweise nur etwa 1 K/h durchgeführt, damit festgestellt werden konnte, wie schnell die verschiedenen Komponenten abkühlen. Es sollten größere Temperaturgradienten innerhalb und auch zwischen den inneren Vakuumkammern verhindert werden, da zu

große Temperaturunterschiede zu mechanischen Spannungen führen und somit Komponenten beschädigen könnten. In Abb. 4.22 sind die Temperaturen ausgewählter Temperatursensoren auf den Strahlungsschilden dargestellt. Zusätzlich wurde der Druck im Kryostaten mitgemessen und mit dem Temperaturverlauf der Komponenten verglichen. Man erkennt, dass der größte Einfluss der Temperatur auf den Druck von den 40 K-Strahlungsschilden verursacht wird, wenn diese die Temperatur von flüssigem Stickstoff unterschreiten. Dies deckt sich mit den Erwartungen, dass die Oberflächen aller Komponenten innerhalb des Kryostaten als Kryopumpe funktionieren, sofern sie die entsprechenden Kondensationstemperaturen der Restgasbestandteile unterschreiten. Die Temperatur der 80 K-Strahlungsschilde blieb bei diesem Test zu hoch um Stickstoff zu kondensieren und konnte damit keinen relevanten Beitrag zur Kryokondensation leisten.

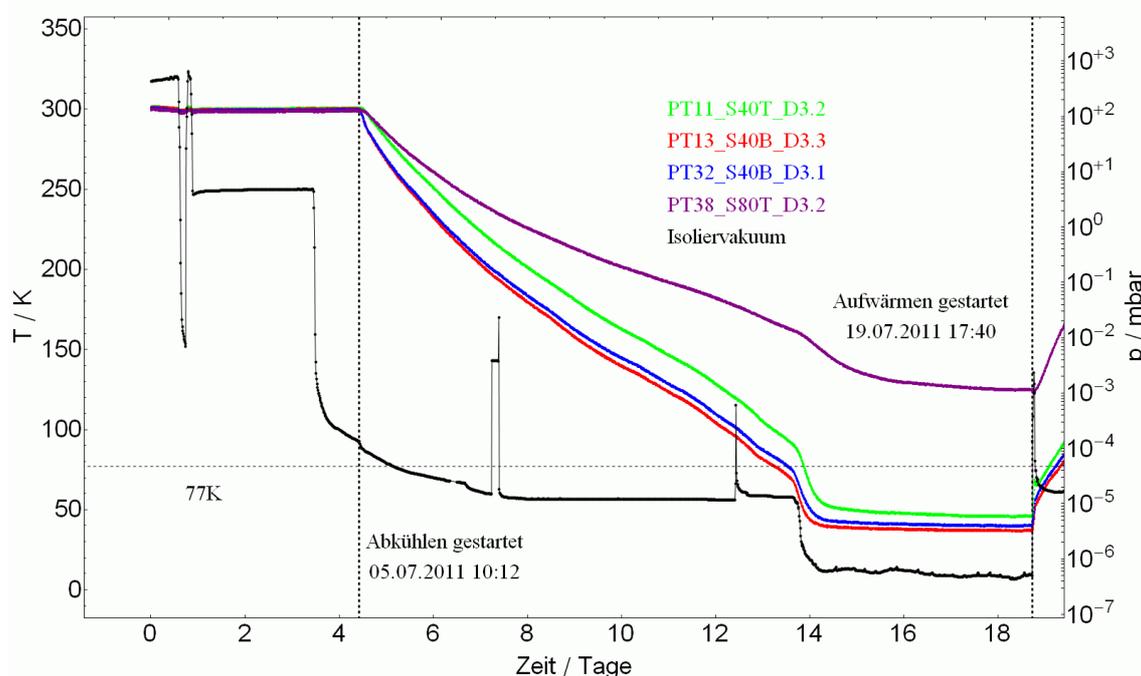


Abbildung 4.22: Dargestellt ist zum einen der Temperaturverlauf während des ersten Abkühlens der ersten Ecke des CSR für 4 der ca. 50 installierten Temperatursensoren, und zum anderen der gemessene Druck in der Vakuumkammer (schwarz). Die Temperatursensoren befanden sich dabei über der zweiten Detektorkammer in Strahlrichtung betrachtet auf einer Deckenplatte des 40 K-Schildes (grün), auf der Bodenplatte des 40 K-Strahlungsschildes unter der ersten und dritten Detektorkammer (blau und rot) sowie auf einer Deckelplatte des 80 K Schildes über der zweiten Detektorkammer (violett). Die sprunghaften Änderungen in der Vakuummessung bei Tag 7 und Tag 12 wurden durch Ausfälle der Vakuummessungen verursacht. Der Anstieg des Drucks direkt im Anschluss an das Ausschalten der Kälteanlage (Tag 19) resultiert aus der Desorption festgefrorener Restgasteilchen.

Die drei dargestellten Temperaturverläufe der Temperatursensoren auf dem 40 K-Strahlungsschild sind nur eine repräsentative Auswahl. Alle Sensoren auf diesem Schild sind in Abb. 4.23 dargestellt. Sie zeigen während des Abkühlens eine maxi-

male Temperaturdifferenz von 30 K, die sich bei Erreichen der Endtemperatur auf 15 – 20 K reduziert. Die Temperaturdifferenz zwischen der Heliumleitung und der Schildteile selbst ist während des Abkühlens mit bis zu 70 K ebenfalls deutlich größer als am Ende mit 5 K. Dieser Temperaturgradient liegt an den flexiblen Kupferlitzen zwischen dem 40 K-Strahlungsschild und der Heliumleitung und ermöglicht damit gemäß Gleichung (3.3) einen größeren Wärmetransport als bei einem kleineren Temperaturgradienten. Insgesamt zeigen alle installierten Temperatursensoren, dass die geplanten Temperaturen von etwa 40 K erreicht wurden.

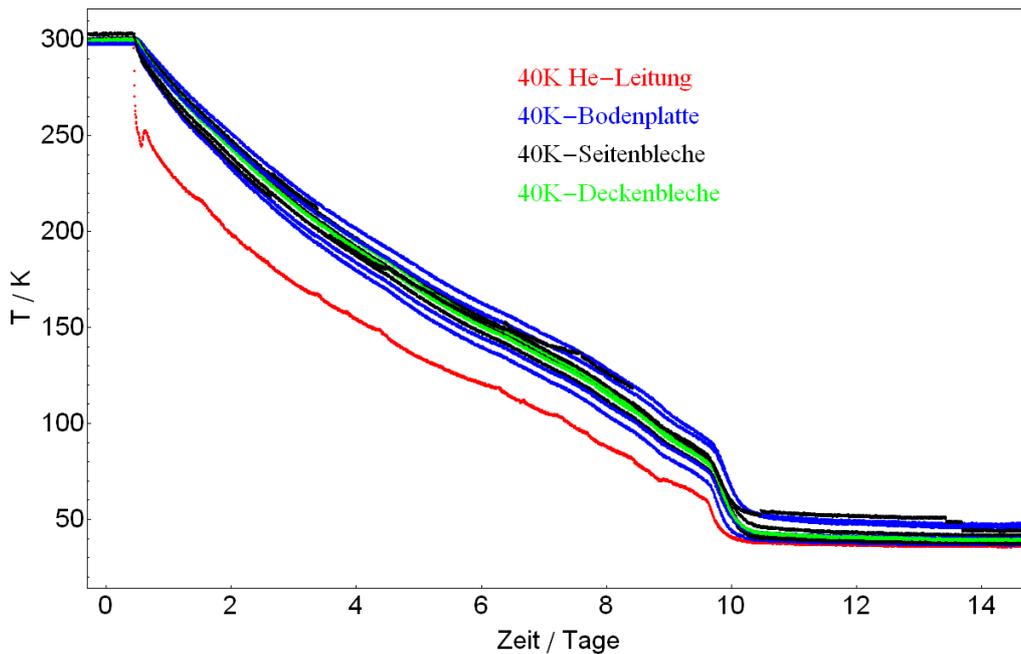


Abbildung 4.23: Temperaturen auf dem 40 K-Schild während des ersten Abkühlens. In rot die 40 K-Helium-Leitung, in blau die 15 mm dicke Aluminium Bodenplatte, in schwarz die Seitenbleche und in grün die Deckenbleche. Bei Tag 10 wurden die Einstellungen der Kälteanlage für eine höhere Kühlleistung geändert, um zur Vermessung der ionenoptischen Elemente im kalten Zustand möglichst niedrige Temperaturen zu erreichen.

Insgesamt waren vier Temperatursensoren direkt auf den ionenoptischen Elementen installiert, zwei davon an den Elektroden des in Strahlrichtung gesehenen ersten 39° -Deflektors und jeweils einer am ersten Quadrupoldublett und dem zweiten 39° -Deflektor. Die Temperaturverläufe während des Abkühlens (siehe Abb.: 4.24) zeigen, dass die beiden 39° -Deflektoren im Rahmen der Messgenauigkeit gleich abkühlen.

Dies deckt sich mit den Erwartungen, da beide auf dieselbe Art gekühlt wurden und auch nur etwa 1 m voneinander entfernt sind, womit die Heliumtemperatur zur Kühlung in beiden Fällen identisch sein sollte.

Die Kühlung des Quadrupoldubletts scheint insgesamt besser gelöst zu sein, da die Temperatur am Ende dieses Test etwa 25 K unter der Temperatur der beiden 39° -Deflektoren liegt. Die Ursache dafür ist die deutlich unterschiedliche Kühlungsanbindung der beiden verschiedenen Baugruppen. Die 39° -Deflektoren wurden für

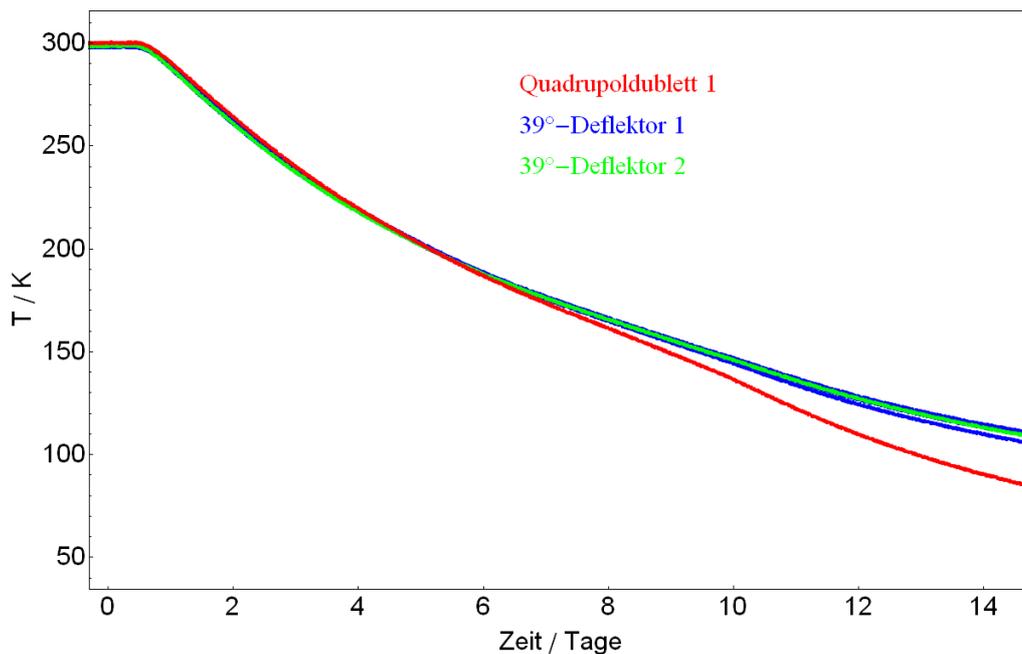


Abbildung 4.24: Gezeigt sind die gemessenen Temperaturen auf dem in Strahlrichtung ersten Quadrupoldublett (rot), dem ersten 39°-Deflektor (blau) und dem zweiten 39°-Deflektor (grün) auf der Oberfläche einer Elektrode während des ersten Abkühlens. Die Temperatur des Quadrupoldubletts liegt unter der der beiden 39°-Deflektoren. Das kommt zum Einen von der besseren thermischen Anbindung bei diesem Test und liegt zum Anderen daran, dass in diesem Bereich das Helium in den Leitungen noch kälter ist als bei den folgenden Deflektoren, da sich noch kein Gleichgewichtszustand eingestellt hat. Unterschiedlich große Wärmeeinträge sind nicht zu erwarten, da die Elektrodenstützen für beide Komponenten fast identisch sind.

diesen Test über Kupferlitzen mit den zugehörigen Innenkammern verbunden (siehe Abb. 4.25). Dies stellt eine deutlich schlechtere Wärmekontaktierung dar, als die für die Quadrupoldubletts verwendeten Aluminiumleisten an den inneren Vakuumkammern, in die die Hochspannungsleitungen geklemmt wurden. Möglicherweise ist auch die Temperatur in den Heliumleitungen an der Position des Quadrupoldubletts geringer als bei den ein paar Meter weiter entfernten 39°-Deflektoren. Mögliche Temperaturunterschiede in der Heliumleitung sollten jedoch nicht in der Größenordnung der beobachteten Temperaturunterschiede der Elektroden liegen. Vergleicht man die Temperaturen der Heliumleitung, die zur Kühlung der inneren Vakuumkammern benutzt wird mit der Temperatur des ersten Quadrupoldubletts sowie der zugehörigen Vakuumkammer (siehe Abb. 4.26), so sieht man, dass die Elektroden etwa drei Tage später als die Vakuumkammern die Temperatur von 100 K erreichen, wobei die Kammertemperatur immer parallel zu den Temperaturen der Heliumleitung verlaufen. Der deutlich erkennbare Unterschied der Absoluttemperaturen von innerer Vakuumkammer zur Heliumleitung liegt zum Einen an der Wärmestrahlung von Außen von Raumtemperatur auf die inneren Vakuumkammer mit dem eingebauten Quadrupoldublett, und zum Anderen an der verwendeten Kupferlitze zum Anschluss der Vakuumkammern an die Heliumleitungen, die auch schon zur Kühlung der Elektroden der 39°-Deflektoren verwendet wurden.

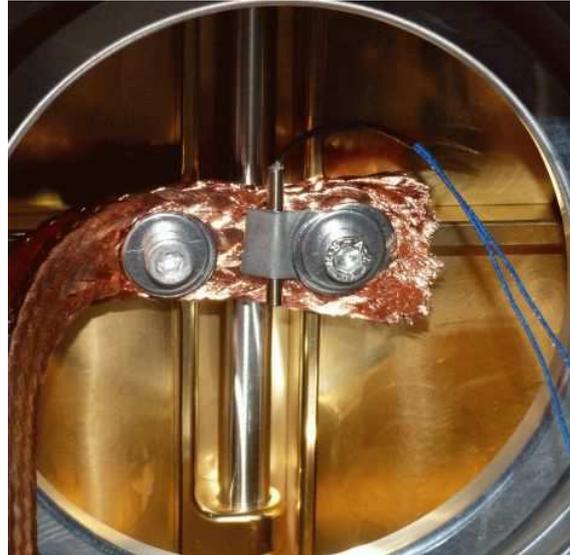


Abbildung 4.25: Kühlung der Elektroden der 39°-Deflektoren während des ersten Abkühlens über eine Kupferlitze (Querschnitt 16 mm^2), die an einem Flansch der inneren Vakuumkammer kontaktiert war.

Änderungen für den zukünftigen Betrieb

Im Rahmen des ersten Abkühlens zeigte sich, dass an einzelnen Stellen Änderungen vorgenommen werden mussten, um die gewünschten Betriebsparameter zu garantieren. Beim ersten Abkühlen war der komplette 2 K Heliumkreis noch nicht installiert, so dass die kältesten Stellen mit der 5 K Schildleitung gekühlt werden mussten. Das war für den ersten Test ausreichend, im zweiten Test wurde dieses Leitungssystem inklusive der 2 K-Einheiten nachgerüstet. Für das erste Abkühlen der ersten Ecke des CSR wurden aus Zeitgründen die Vakuumkammern für das Experimentiervakuum und die ionenoptischen Elemente nur provisorisch gekühlt. So wurden die Vakuumkammern mit einer flexiblen Kupferlitze mit einem Querschnitt von ca. 16 mm^2 an drei Flanschen der ersten Runde der 5 K Helium Leitung festgeschraubt, wobei der thermische Kontakt wie auch im Fall der 39°-Deflektoren nicht optimal war (siehe Abb. 4.25). Außerdem waren durch die Verwendung von nur drei Kontaktstellen auf der Heliumleitung einige dieser Verbindungen über 1 m lang, wodurch der Wärmetransport zusätzlich verschlechtert wurde. Dies führte wie erwartet zu keiner optimalen Kühlung der Innenkammern, da zum Einen keine guten thermischen Kontakte zwischen den Flanschen und der Kupferlitze und zwischen der Kupferlitze und den Vakuumkammern möglich waren, und zum Anderen auch nur wenige Lagen der Kupferlitze zu diesen Kontakten beitragen konnten. Die Kupferdrähte in der Kupferlitze sind nur locker verflochten, so dass der maximal mögliche Wärmeübertrag auch durch die Kontaktwiderstände der verschiedenen Lagen der Drähte in der Kupferlitze beschränkt wird.

Für das zweite Abkühlen der ersten Ecke des CSR wurde die Anbindung der Innenkammern an die Heliumleitungen dahingehend geändert, dass sie wie für den späteren regulären Betrieb geplant umgesetzt werden. D.h. die Kontaktierung an den Heliumleitungen wurde zu den fünf 2 K-Einheiten einer Ecke verlegt, wo die Vakuum-

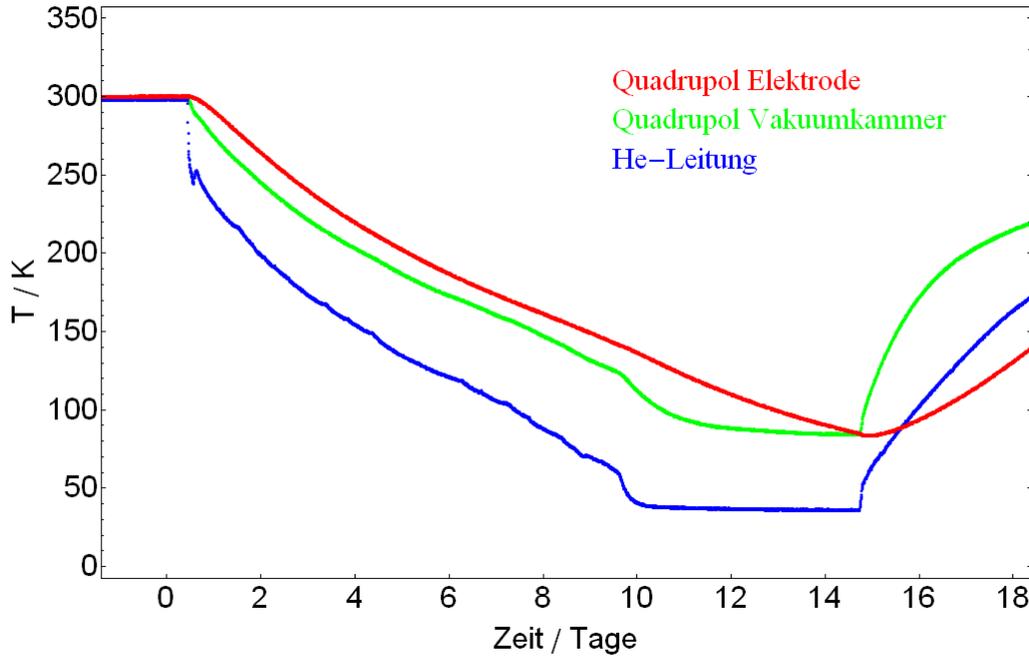


Abbildung 4.26: Gezeigt ist die während des ersten Abkühlens gemessene Temperatur an drei verschiedenen Punkten: an der 40 K-Heliumleitung, an der ersten Quadrupol-Innenkammer in Strahlrichtung und an einer der Elektroden des ersten Quadrupols. Die Elektroden können nur über die Innenkammern selbst gekühlt werden, deshalb folgt die Elektrodentemperatur der Temperatur der Kammer mit etwa 10 K Abstand, solange die Endtemperatur der Kammer noch nicht erreicht ist. Diese Endtemperatur der Kammer ging beim ersten Abkühlen nicht bis auf die für den späteren Betrieb vorgesehenen 10 K herunter, da in diesem Test die Überprüfung der Justage der Ionenoptik im Mittelpunkt stand.

kammern mit Kupferblechen von bis zu 1 m Länge bei einem Querschnitt von $30 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ mit den Kupferkörpern der 2 K-Einheiten verbunden wurden. Um einen möglichst hohen Wärmetransport durch die Kupferbleche zu gewährleisten, wurde wie schon beim CSR-Prototyp [20, 21] Kupfer der Reinheit 99,997 % verwendet. Eine noch höhere Reinheit würde zwar die Kühlung der Vakuunkammern weiter optimieren, allerdings ist Kupfer dieser Qualität wesentlich teurer. Da im Vergleich zum ersten Abkühlen die Anbindung der Vakuunkammern statt an drei an fünf Positionen der Ecke stattfand, konnten auch die Abstände zwischen Innenkammern und 2 K-Einheiten, also zwischen dem warmen und kalten Ende der Verbindungselemente, verkürzt werden. Damit steigt nach Gleichung (3.3) auch der mögliche Wärmeübertrag. Ebenso wurden die Hochspannungsleitungen für den zweiten Test verlegt, um wie beim späteren regulären Betrieb auch, die Kühlung der Elektroden selbst nur durch die Hochspannungsleitungen zu ermöglichen. Um realistische Wärmeinträge auf die Strahlungsschilde und Innenkammern zu erreichen, musste zusätzlich für das zweite Abkühlen die Superisolierung zwischen 80 K-Strahlungsschild und äußeren Vakuunkammern vervollständigt werden. Diese fehlte beim ersten Abkühlen noch an einigen Stellen und ermöglichte lokal die direkte Wärmebestrahlung (300 K) der Innenkammern und ionenoptischen Elemente. Für diese Tests wurden

auch die Öffnungen in den Strahlungsschilden zur Lasertracker-Vermessung der Elektroden verschlossen. Zusätzlich wurden an ausgewählten Positionen RhFe und Si-Temperatursensoren installiert, um auch bei den geplanten Temperaturen von unter 10 K realistische Ergebnisse zu erhalten.

4.3 Zweites Abkühlen einer Ecke des CSR

Beim ersten Abkühlen der Ecke des CSR konnten einige Größen nicht gemessen werden, da die dafür notwendige Komponenten wie z.B. der 2 K-Heliumkreislauf noch nicht installiert waren. Alle daran anzubindenden Baugruppen waren nur provisorisch verbunden. Aus diesem Grund wurde diese Ecke des CSR ein weiteres mal abgekühlt, wobei anders als beim ersten Abkühlen nicht bei Temperaturen auf den Innenkammern von etwa 90 K gestoppt wurde. Die wichtigsten Ziele waren:

- Bestimmung der erreichbaren Temperatur auf den inneren Vakuumkammern des CSR, diese sollten am Ende nicht über 10 K liegen.
- Überprüfung der Elektrodentemperaturen, diese sollten am Ende nicht über 10 K liegen.
- Temperaturverteilungen und -verläufe beim Abkühlen zur Optimierung des Abkühlvorganges.
- Bestimmung des Wärmeeintrags auf den 2 K-Kreislauf der Kälteanlage zur Überprüfung der Vorhersagen (siehe Kapitel: 3.2.3).

Im Gegensatz zum ersten Abkühlen war dieses Mal die komplette Superisolierung installiert, so dass keine Wärmestrahlung direkt auf den 80 K-Strahlungsschild treffen sollte. Es wurden also keine großen Temperaturunterschiede für die verschiedenen Positionen der Temperatursensoren erwartet. Die gemessenen Temperaturen (siehe Abb. 4.27) zeigen deutlich, dass die Erwartungen erfüllt wurden, da die maximalen Temperaturunterschiede bei nur 5 K lagen. Wie erwartet ist die Heliumleitung, an der die Bodenplatten des 80 K-Strahlungsschildes angeschlossen war, während des Abkühlens deutlich kälter als die Schildkomponenten selbst. Am Ende verschwindet diese Differenz jedoch und es stellt sich eine Schildtemperatur von etwa 40 K ein. Drei weitere Sensoren erreichten eine Endtemperatur von etwa 90 K, diese waren aber in einem Bereich angebracht, an dem beim Betrieb von nur einer Ecke des CSR die 80 K-Heliumleitung ungenutzt ist. Die Kühlung dieses Abschnitts erfolgte somit nur über Wärmestrahlung und Wärmeleitung durch die Aufhängung an der 40 K-Bodenplatte sowie aufliegende benachbarte 80 K-Schildsegmente. Die Endtemperatur der anderen Sensoren von 40 K liegt deutlich unter den 80 K, die die Bezeichnung dieses Schildes impliziert. Dabei muss man jedoch berücksichtigen, dass bei diesem Test nur eine Ecke des CSR, und damit weniger als 25% der Wärmelast des späteren Betriebszustandes, an der Kälteanlage hing. Alle im Folgenden gezeigten Temperaturverläufe, gemessen mit den PT1000-Sensoren, zeigen bei Tag 6 und Tag 8 des Abkühlens Sprünge auf. Diese sind darauf zurückzuführen, dass bei Tag 6 die Elektronikmodule für die Temperaturmessung wegen eines Firmware Updates

ausgetauscht wurden, und ab Tag 8 die Datenerfassung zusätzlich die Offsets der neuen Elektronikkomponenten kompensierte.

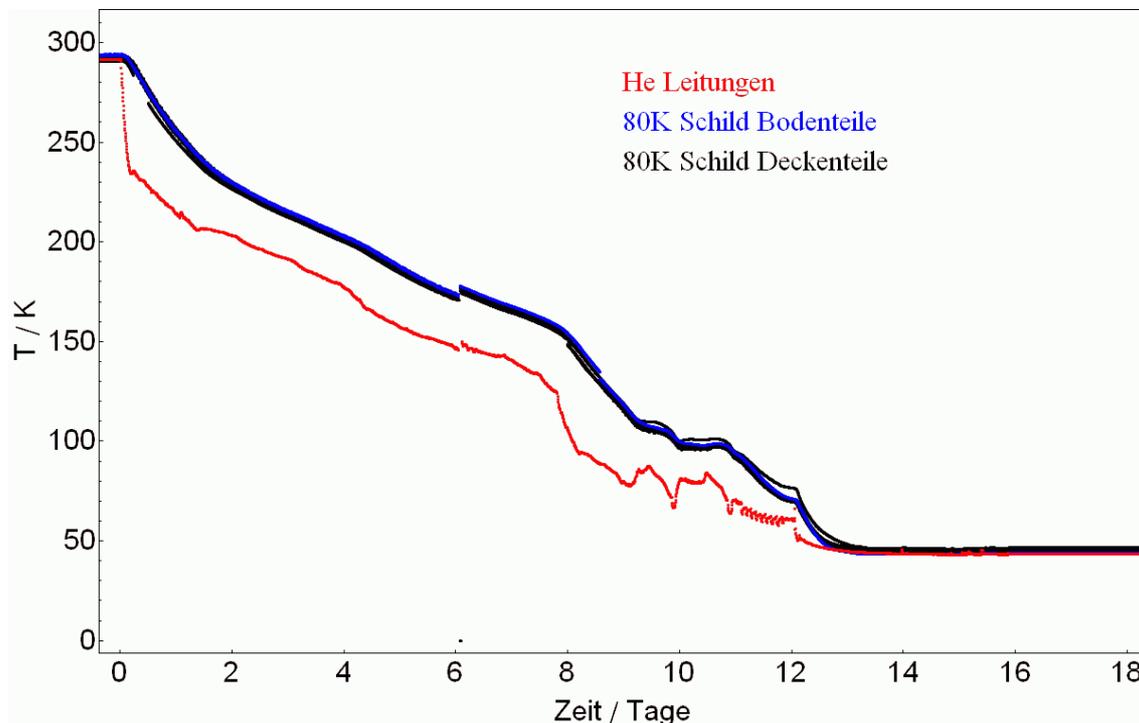


Abbildung 4.27: Dargestellt ist der Temperaturverlauf aller Sensoren auf dem 80 K-Strahlungsschild während des zweiten Abkühlens. Temperatursensoren waren dabei auf der Heliumleitung (rot), den damit verbundenen Bodenteilen des Schilds (blau) und den Deckenteilen (schwarz) installiert.

Die Temperaturmessungen auf dem 40 K-Strahlungsschild sind in Abb. 4.28 dargestellt. Sie erreichen mit im Mittel etwa 15 K ebenfalls deutlich niedrigere Temperaturen als es die Bezeichnung „40 K-Schild“ impliziert, dies wird beim regulären Betrieb mit der kompletten Wärmelast des CSR nicht mehr der Fall sein. Die Temperaturmessung wird über den elektrischen Widerstand der Sensoren durchgeführt, der bei Temperaturen unter etwa 30 K nur schwer zu messen ist bzw. kleiner wird als der Leitungswiderstand der Messleitungen selbst. Deshalb sind diese Temperaturwerte als obere Grenzen zu betrachten, die tatsächliche Temperatur liegt vermutlich darunter. Während des kompletten Abkühlvorgangs verlaufen die Temperaturen bei maximalen Temperaturdifferenzen von etwa 20 K parallel. Dies zeigt, dass die Verbindung der Segmente des Strahlungsschilds gut miteinander und die Bodenplatten gut mit der Heliumleitung verbunden sind. Die Endtemperaturen wurden nach weniger als 13 Tagen erreicht, also einen Tag schneller als die umgebenden 80 K-Strahlungsschilde. Die in den Temperaturverläufen erkennbaren Schwankungen der Temperaturen zwischen dem neunten und elften Tag des Abkühlens sind auf die automatische Regelung der Kälteanlage zurückzuführen. Der schnelle Temperaturabfall am zwölften Tag wird durch die Wärmeleitung der Kupferverbindung zwischen Heliumleitung und Schildplatte verursacht, die im Bereich von etwa 30 K maximal ist (siehe Abb. 3.10).

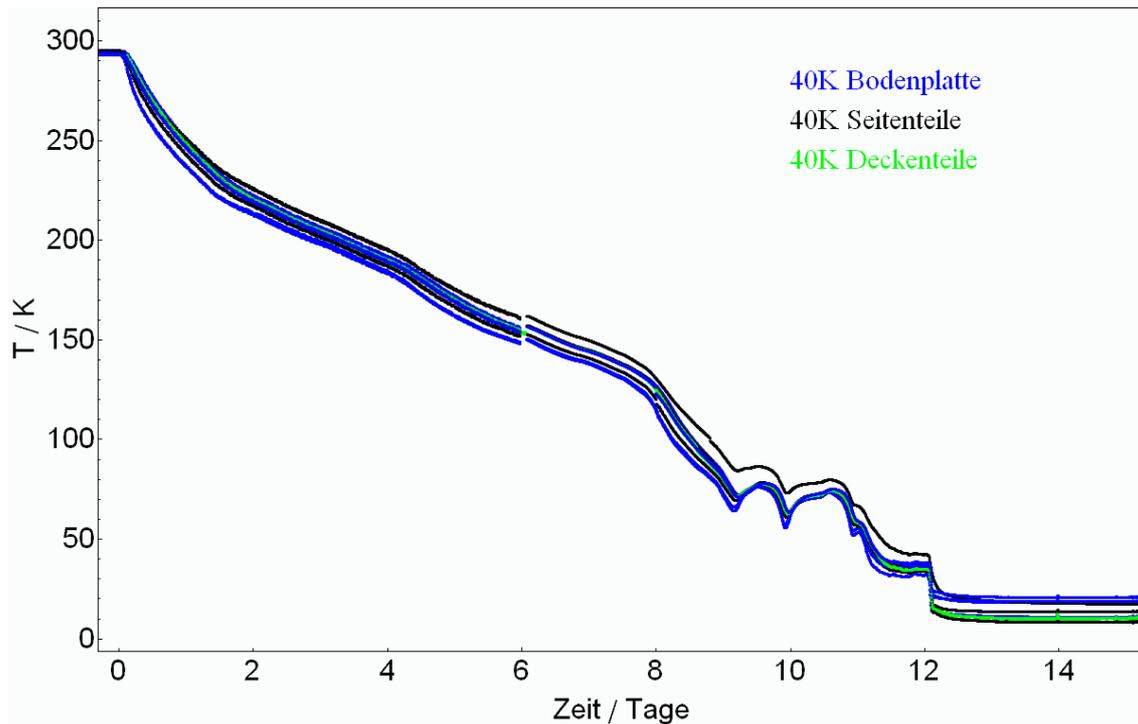


Abbildung 4.28: Dargestellt ist der Temperaturverlauf aller Sensoren auf dem 40 K-Strahlungsschild während der zweiten Abkühlphase des CSR. Die PT1000 Temperatursensoren waren dabei auf der Bodenplatte (blau), den Seitenblechen (schwarz) und den Deckenblechen (grün) montiert. Nur die Bodenplatten waren mit der Heliumleitung verbunden, auf der bei diesem Test jedoch kein Temperatursensor montiert war.

Die Strahlungsschilde sind, mit Ausnahme der 40 K-Bodenplatte, aus Aluminiumblechen von 2 mm Wandstärke gefertigt und damit flexibel genug, um beim Abkühlen auftretende mechanische Spannungen durch zu große Temperaturgradienten zu überstehen. Für die inneren Vakuumkammern gilt dies jedoch nicht. Deshalb wurde beim Abkühlen die Kälteanlage derart geregelt, dass die Temperaturunterschiede zwischen den inneren Vakuumkammern bei maximal ca. 30 K lagen (siehe Abb. 4.29). Dies bedeutet, dass am Ende des Abkühlprozesses die Vakuumkammern nach zwei Wochen alle innerhalb eines Tages ihre Endtemperatur von etwa 10 K erreicht haben. Die mit den PT1000-Sensoren gemessenen Werte liegen zwar alle bei bzw. knapp über 10 K, diese Werte sind jedoch als obere Grenze zu verstehen. Zusätzlich dazu waren auch zwei RhFe-Sensoren jeweils auf den in Strahlrichtung ersten 6° und 39°-Vakuumkammern installiert. Mit 3,8 K (6°-Innenkammer) und 7,3 K (39°-Innenkammer) liegen beide Messwerte unter denen der ebenfalls an diesen Kammern installierten PT1000-Sensoren. Beide liegen unter dem geforderten Maximalwert von 10 K. Die Unterschiede zwischen den beiden Messwerten der RhFe-Sensoren sind darauf zurückzuführen, dass die Vakuumkammer des 39°-Deflektors deutlich größer ist und damit der Schwarzkörperstrahlung eine größere Fläche bietet. Außerdem konnte sie aufgrund ihrer Form nicht so gut mit Kupferfolie eingepackt werden wie die anderen Vakuumkammern. Die zusätzlich an einem Blindflansch

einer Quadrupolkammer gemessenen Temperatur zeigt, dass dieser etwa zwei zusätzliche Tage zum Erreichen der Endtemperatur benötigt. Dieser Wert ist auch für den zukünftigen Betrieb mit geringerer Anzahl an installierten Temperatursensoren zu berücksichtigen.

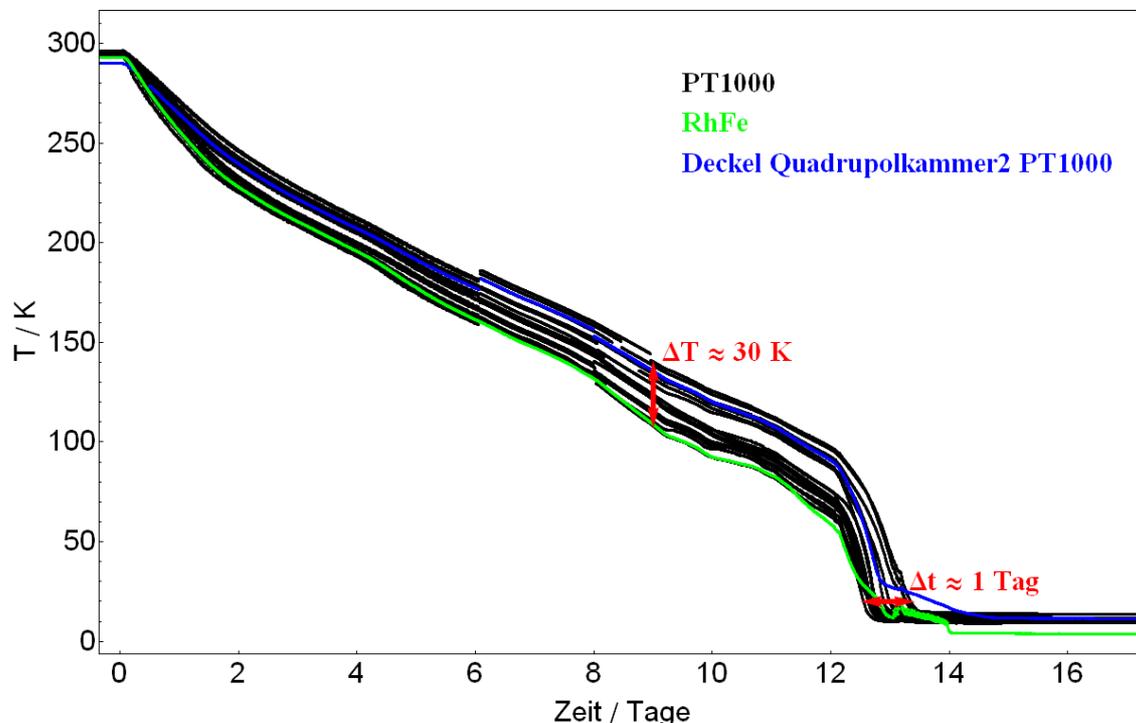


Abbildung 4.29: Gezeigt ist der Temperaturverlauf auf den inneren Vakuumkammern beim zweiten Abkühlen. Die Temperaturen wurden dabei an verschiedenen Stellen auf den Vakuumkammern mit PT1000-Sensoren (schwarz) und einem RhFe-Sensor (grün) gemessen. Zusätzlich wurde die Temperatur eines Blindflanschs auf einer der Quadrupolkammern (blau) mittels PT1000-Sensor gemessen und zeigt, dass Blindflansche etwa zwei Tage länger als die Vakuumkammern zum Erreichen ihrer Endtemperatur benötigen.

Zusätzlich galt es auch zu zeigen, dass die ionenoptischen Elemente eine Temperatur von maximal 10 K erreichen. Im komplett aufgebauten Zustand mit installierter Hochspannungsversorgung und getrennten Vakuumsystemen für das innere Experimentiervakuum und das äußere Isoliervakuum ist es nicht möglich, Temperatursensoren auf diesen Komponenten zu installieren. Deshalb mussten diese Temperaturen im Rahmen des zweiten Abkühlens gemessen werden. Für diesen Zweck wurden Si-Dioden anstelle von PT1000-Sensoren verwendet, die bei den angestrebten Temperaturen deutlich genauer sind. Gemessen wurden die Temperaturen einer Quadrupolelektrode und einer Elektrode eines 39° -Deflektors. Die Quadrupolelektrode wird dabei über die Hochspannungsleitung gekühlt, die mit der umgebenden Vakuumkammer mittels eines elektrisch isolierenden Saphirs verbunden ist. Um eine obere Grenze der Temperaturen der einzelnen Elektroden zu bekommen, wurde eine Elektrode verwendet, deren Hochspannungsleitung den längsten Weg zur Kontaktstelle mit der Vakuumkammer hatte. Es war zu erwarten, dass die Elektroden, da

sie nur über die inneren Vakuumkammern gekühlt wurden, langsamer als diese abkühlen und auch nicht ganz deren Endtemperatur erreichen. Der in Abb. 4.30 dargestellte Temperaturverlauf bestätigt diese Erwartungen. Die Elektrode braucht ca. einen Tag länger zum Abkühlen als die Vakuumkammer. Die mit der Si-Diode gemessene Endtemperatur von 9,96 K erfüllt die Anforderungen. Die Temperatur der Vakuumkammer wurde in diesem Fall nur über einen PT1000-Sensor gemessen. Die Temperaturen der Vakuumkammer des 6°-Deflektors wurden mit RhFe und PT1000-Sensoren gemessen. Der RhFe-Sensor lieferte für die Endtemperatur einen Wert von 3,8 K, während mit dem PT1000-Sensor eine Temperatur von 10 K gemessen wurde. In diesem Temperaturbereich liegt der Widerstand eines PT1000-Sensors im Bereich seiner Signalleitung im Vakuum (in diesem Bereich wurde eine Zwei-Draht-Messung zur Bestimmung des Widerstands verwendet) und arbeitet deshalb nicht mehr genau genug. Dies legt die Vermutung nahe, dass mit PT1000-Sensoren bei Temperaturen von unter 10 K Temperaturen gemessen werden, die um 6 K höher liegen. Legt man diese Vermutung zu Grunde, kann für die Temperaturdifferenz zwischen der Quadrupolelektrode und innerer Vakuumkammer ein Wert von 6 K abgeschätzt werden. Da am Ende des Abkühlens keine weitere Abkühlung der Elektrode zu erkennen war, bedeutet dies einen Wärmeeintrag auf das Quadrupoldublett, der nur durch die Elektrodenstütze selbst kommen kann. Die Elektrodenstützen aller Komponenten beim zweiten Abkühlen waren nur auf dem 80 K-Strahlungsschild (dessen Temperaturen lagen aber bei etwa 45 K) thermisch verankert. Zwei weitere thermische Kontakte, auf dem 40 K-Strahlungsschild und bei ca. 10 K, waren aber in der Planung bereits für so einen Fall vorgesehen und werden nachgerüstet. Es ist zu erwarten, dass die Temperaturen der Quadrupolelektroden im regulären Betrieb niedrigere Temperaturen erreichen als es in diesem Test der Fall war und damit die Spezifikationen noch deutlicher erfüllen.

Die Temperaturmessungen am 39°-Deflektor sind denen des Quadrupoldubletts recht ähnlich (siehe Abb. 4.31). Bei diesem waren je ein PT1000-Temperatursensor auf der Vakuumkammer, dem Elektrodenkäfig und auf einer der Elektroden befestigt. Vakuumkammer und Elektrodenkäfig kühlen dabei mit minimaler Temperaturdifferenz ab, die Elektroden haben am Ende zwei Tage Rückstand auf die Vakuumkammer und erreichen 14,66 K (Si-Diode). Insgesamt brauchte der 39°-Deflektor 16 Tage zum Abkühlen und ist damit von allen temperaturüberwachten Baugruppen die langsamste.

Auch in diesem Fall wird die Temperatur der Vakuumkammer vermutlich unter dem gemessenen Wert liegen. Analog zu der 6°-Vakuumkammer und Quadrupolelektrode ist auch die Elektrodentemperatur wahrscheinlich durch einen zu großen Wärmeeintrag durch die Elektrodenstütze verursacht. Zusätzlich dazu ist die thermische Anbindung der Elektrode an die Vakuumkammer nicht optimal gewesen. Die Si-Dioden zur Temperaturmessung sind mechanisch nicht sehr robust. Es gab nur einen Platz auf den Elektroden um sie zu befestigen, nämlich dieselbe Schraube, die auch für die thermische Verbindung zwischen HV-Leitung und Elektrode genutzt wird (siehe Abb. 4.32). Für den thermischen Kontakt ist ein großer Anpressdruck von Vorteil, gleichzeitig ist dies aber durch die Verwendung einer Si-Diode nicht realisierbar. Im späteren Betriebszustand wird kein Temperatursensor an dieser Stelle installiert sein, so dass die Elektrodenkühlung deutlich verbessert sein sollte.

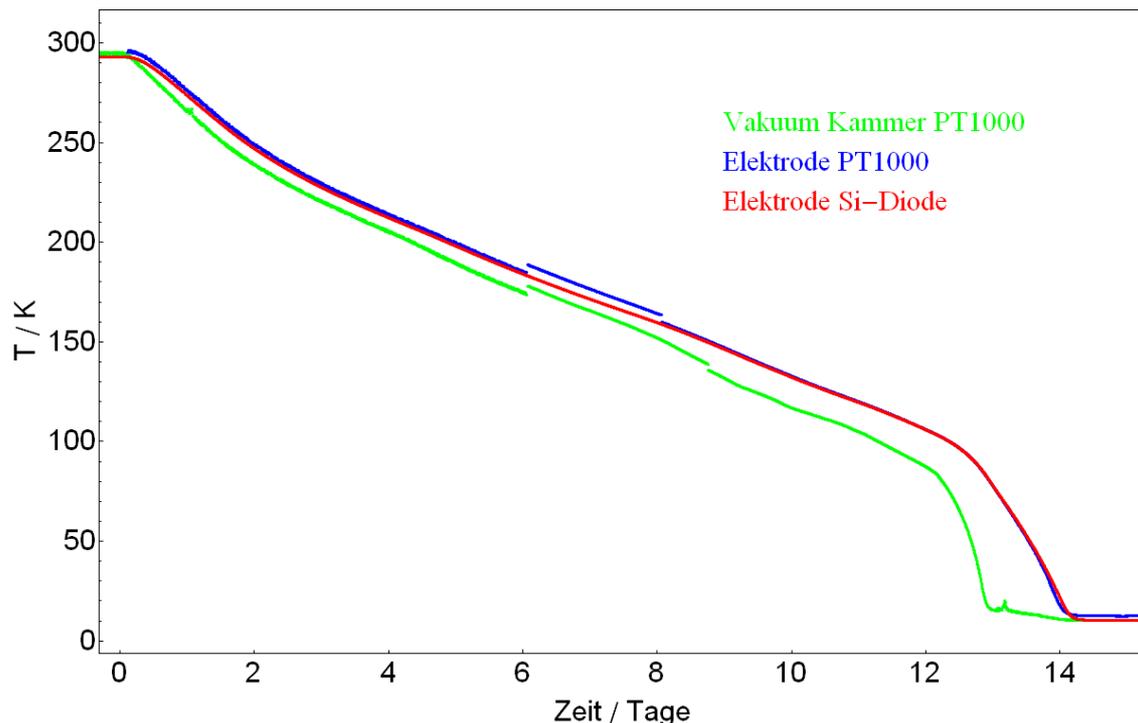


Abbildung 4.30: Temperaturverlauf eines Quadrupoldubletts beim zweiten Abkühlen. Gemessen wurden die Temperaturen der inneren Vakuumkammer (grün) und einer Elektrode (blau) mit einem PT1000-Sensor, sowie einer Si-Diode (rot) auf einer Elektrode. Die Elektrode erreicht dabei ihre Endtemperatur von 9,96 K etwa einen Tag später als die innere Vakuumkammer und braucht insgesamt etwas mehr als zwei Wochen dafür.

Zur Überprüfung der Simulationen in Kapitel 3 und zur Überwachung im späteren Betrieb wurden an zwei der 2 K-Einheiten RhFe-Sensoren montiert. Diese Sensoren wurden mit Silberfolie umwickelt und fest mit dem Kupferkörper verschraubt (siehe Abb. 4.32). Zu der theoretisch vorhergesagten Temperatur des Kupferkörpers muss zusätzlich noch berücksichtigt werden, dass zwischen dem Kupfer und dem tatsächlichen Sensor neben der Silberfolie noch am Sensor selbst Materialübergänge stattfinden und es somit nicht zu erwarten ist, genau die Temperatur der 2 K-Einheiten zu messen. Am Ende des Abkühlvorgangs wurden an der in Strahlrichtung ersten 2 K-Einheit an der Innenkammer des 6°-Deflektors $2,0 \text{ K} \pm 0,3 \text{ K}$ gemessen (RhFe-2), und an der dritten Detektorkammer $2,6 \text{ K} \pm 0,3 \text{ K}$ (RhFe-4). Beide Werte liegen unter dem an der 2 K-Einheit des Prototypen CTF gemessenen minimalen Temperatur von $3,1 \text{ K}$ [21, 57], was vermutlich auf die bessere Kontaktierung der Temperatursensoren am CSR zurückzuführen ist. Der erkennbare Unterschied zwischen den beiden Messungen am CSR wurde vermutlich durch eine größere Wärmelast an der inneren Vakuumkammer (mit RhFe-4) verursacht. Diese Vakuumkammer war Wärmestrahlung durch eine Öffnung von etwa 150 mm Durchmesser (für den Pumpstand des inneren Vakuumsystems) ausgesetzt. Die Temperatur am der Vakuumkammer gegenüberliegenden Ende ist unbekannt, da diese Baugruppe zu diesem Zeitpunkt noch nicht vollständig installiert war. Sie war nur auf Raum-

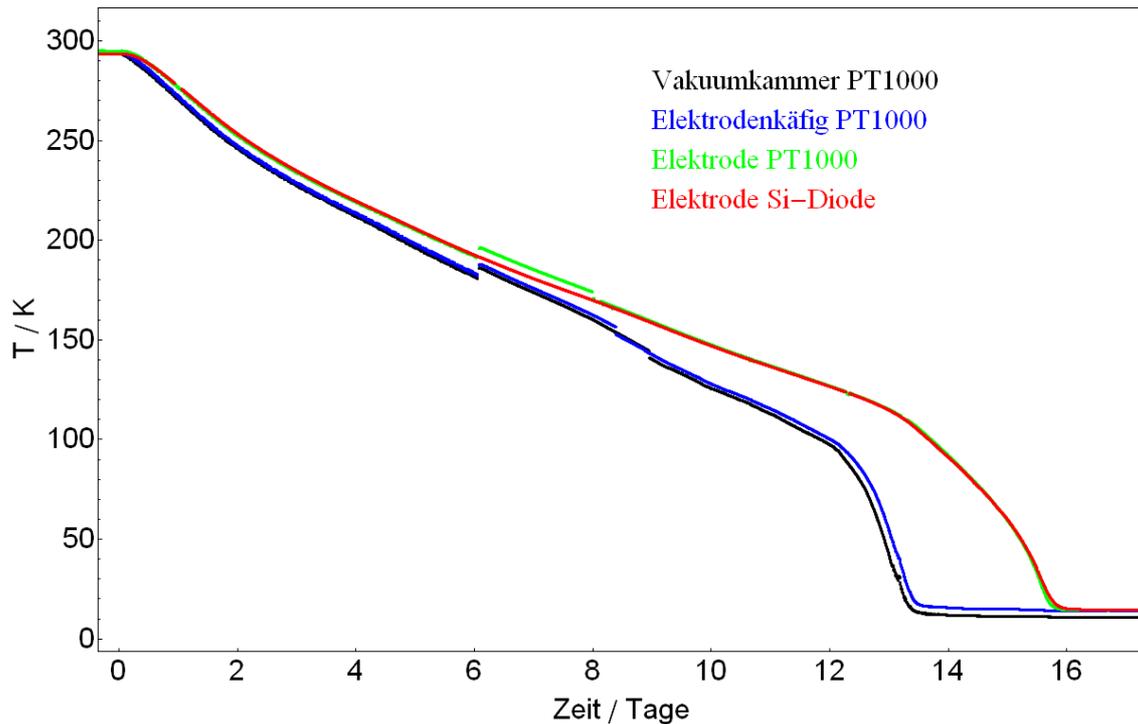


Abbildung 4.31: Temperaturverlauf eines 39° -Deflektors beim zweiten Abkühlen. Die Temperatur wurde dabei auf der inneren Vakuummkammer (schwarz), dem Elektrodenkäfig (blau) und einer Elektrode (grün) mit einem PT1000-Sensor und auf einer Elektrode (rot) mit einer Si-Diode gemessen. Die Endtemperatur von 14,66 K wird nach 16 Tagen und damit etwa zwei Tage später als bei der inneren Vakuummkammer erreicht.



(a)



(b)

Abbildung 4.32: Gezeigt sind in a) die Si-Diode zur Temperaturmessung auf einer der Elektroden des 39° -Deflektors und in b) RhFe-2 auf einer der 2 K-Einheiten, mit Silberfolie mit dem Kupferkörper thermisch kontaktiert.

temperaturseite kontaktiert, das andere Ende war noch nicht zur Kühlung mit der Bodenplatte des 40 K-Strahlungsschildes verbunden, wie es für den späteren Betrieb

vorgesehen ist. Die Verwendung von Wärmeleitpaste ist am CSR nicht möglich, da diese beim Ausheizen verdampfen oder zumindest dünnflüssig werden und das komplette Isoliervakuumssystem verunreinigen würde.

Die Temperaturverläufe am Ende des Abkühlprozesses der RhFe-Sensoren sind exemplarisch für einen Sensor auf einer der 2 K-Einheiten (RhFe-4) und einen auf einer der inneren Vakuummammern (RhFe-1) in Abb. 4.33 dargestellt. Beide erreichen ihre Endtemperatur nach zwei Wochen abkühlen. Man erkennt aufgrund der geringen Wärmekapazität von Kupfer bei niedrigen Temperaturen, dass sowohl an der 2 K-Einheit als auch auf der Vakuummammer selbst kleine Temperaturschwankungen, die die Regelung der Kälteanlage verursacht, sichtbar sind.

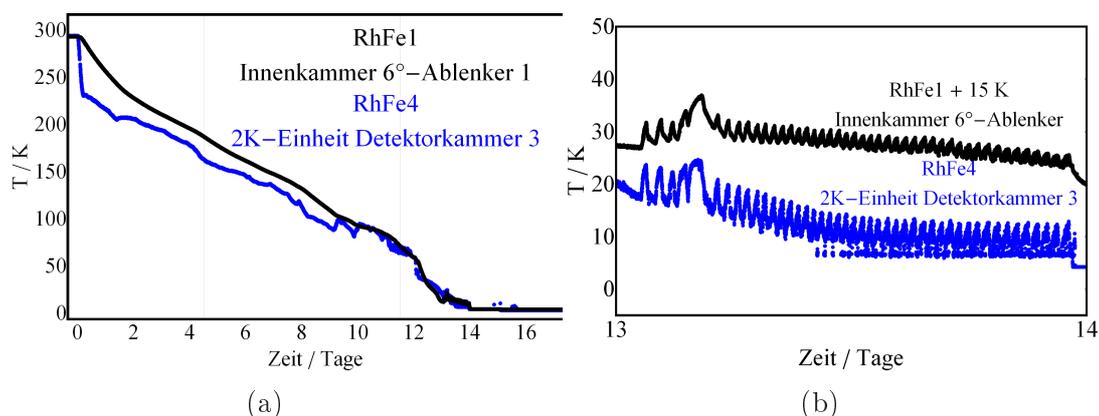


Abbildung 4.33: Gezeigt ist der Temperaturverlauf von zwei RhFe-Temperatursensoren während des zweiten Abkühlens. RhFe-1 (schwarz) war dabei auf einer der inneren Vakuummammern und RhFe-4 (blau) auf einer der 2 K-Einheiten montiert. In a) ist die komplette Abkühlphase gezeigt während in b) nur der Zeitraum von einem Tag genauer dargestellt ist. Dabei erkennt man deutlich auch kleine Temperaturschwankungen durch die Regelung der Kälteanlage, die durch die geringe Wärmekapazität von Kupfer bei diesen Temperaturen direkt zu sehen sind.

Eine Zusammenfassung der Temperaturmessungen ist zur besseren Übersicht in Tabelle 4.7 dargestellt. Die Messgenauigkeit der verwendeten Sensortypen ist aus den Datenblättern [58, 59, 56] entnommen bzw. für die Elektronik der PT1000-Sensoren in [60] gemessen worden. Die Vorgaben wurden mit Ausnahme der Elektrode des 39°-Deflektors erfüllt. Die notwendigen Änderungen zur weiteren Reduzierung der Elektrodentemperaturen für die Zukunft sind identifiziert und werden entsprechend umgesetzt. Auch die Temperatur an den zwei Messpunkten am 2 K-Heliumsystem sind zufriedenstellend und erfordern keine Änderungen im Design, sondern ausschließlich die komplette Montage des Vakuumpumpstands für das innere Vakuumssystem zur Verringerung des Strahlungseintrags.

Tabelle 4.7: Gegenüberstellung der gemessenen Temperaturen und der Vorgaben auf den inneren Vakuumkammern und den Elektroden am Ende des zweiten Abkühlens. Die Messunsicherheiten sind den jeweiligen Datenblättern [58, 59, 56] entnommen bzw. im Fall der PT1000 Sensoren beruhen zusätzlich auf Tests der Messelektronik [60].

Sensor	Position	$T_{\text{gemessen}} / \text{K}$	$T_{\text{Soll}} / \text{K}$
RhFe-1	6°-Innenkammer-1	$3,8 \pm 0,3$	10,0
RhFe-2	2 K-Einheit 6°-Kammer-1	$2,0 \pm 0,3$	2,0
RhFe-3	39°-Innenkammer-1	$7,3 \pm 0,3$	10,0
RhFe-4	2 K-Einheit Detektorkammer-3	$2,6 \pm 0,3$	2,0
Si-1	39°-Elektrode-1	$14,66 \pm 0,25$	10,0
Si-2	Quadrupolelektrode-1	$9,96 \pm 0,25$	10,0
PT1000	innere Vakuumkammern	$10 - 15 \pm 5$	10,0

Das zweite wichtige Ziel des zweiten Abkühlens war es, Erkenntnisse über den Wärmeeintrag auf den 2 K-Heliumkreis zu bekommen. In Kapitel 3 wurden dazu Rechnungen durchgeführt, um eine Abschätzung zu erhalten. Die Kälteanlage ist derart spezifiziert, dass sie bei 1,8 K eine Kühlleistung von 20 W liefern kann, die es vom kalkulierten Wärmeeintrag einzuhalten gilt. Die Bestimmung des Wärmeeintrags über einen Durchflussmesser in den Heliumleitungen zur Messung des Massenstroms war dafür ursprünglich vorgesehen, konnte aber wegen eines technischen Defekts während des zweiten kalten Messbetriebs nicht durchgeführt werden.

Deshalb wurden im kalten Zustand alle notwendigen Ventile in der Kälteanlage geschlossen, so dass der CSR vorübergehend ausschließlich über das in einem Dewar in der Kälteanlage vorhandene Helium gekühlt wurde. Dabei wurde über einen Zeitraum von etwa einer halben Stunde die Drehzahl und der Ansaugdruck in der Gasleitung des 2 K-Systems konstant gehalten. Aus der Drehzahl der Pumpe von 53,21/s während dieser Messung sowie dem Ansaugdruck von 5 mbar konnte die Saugleistung der Pumpe in diesem Fall abgeschätzt werden. Die Drehzahl dieser Pumpe ist zwischen 20 1/s und 60 1/s regelbar. In der Dokumentation zu der verwendeten Kälteanlage wird die Saugleistung der Pumpe (DS3010B) bei 60 1/s mit 1745 m³/h angegeben. Es war nicht möglich, während dieser Messung die Drehzahl der Pumpe bei 60 1/s und gleichzeitig den Druck in der Ansaugleitung konstant zu halten, da offensichtlich der Wärmeeintrag von nur einer Ecke des CSR dafür zu gering war. Deshalb war es nur möglich eine obere Grenze der Wärmeleistung auf dem 2 K-Kreislauf abzuschätzen. Das Gas hat Raumtemperatur wenn es die Pumpe erreicht, so dass über die Dichte von Helium bei Standardbedingungen ($T = 25^\circ\text{C}$ und $p = 1013,25 \text{ mbar}$) $\rho = 0,1649 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ (aus [61]) und über das ideale Gasgesetz die Heliumdichte zu $\rho = 0,814 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^3$ bei 5 mbar bestimmt werden konnte. Daraus lässt sich als obere Grenze ein Massenstrom von $I = 0,3944 \text{ g/s}$ bestimmen. In diesem Test sank die Temperatur im Vorratsbehälter in der Kälteanlage durch den geringen Wärmeeintrag des CSR auf 1,5 K. Aus der Verdampfungsenthalpie von

Helium von 89,35 J/mol und der Enthalpie des flüssigen Heliums von 1,020 J/mol bei diesen Temperaturen (beide aus [62]) ergibt sich mit dem Massenstrom durch die Pumpe eine Wärmelast von maximal 8,7 W auf dem 2 K-Kreislauf. Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine Abschätzung der Firma Linde zu dem Ergebnis kommt, dass die Kälteanlage allein durch Verrohrung, Messleitungen und Wärmestrahlung bereits 6 W Wärmelast am 2 K-Kreis anliegen. Das würde bedeuten, dass von der ersten Ecke des CSR 2,7 W resultieren, was deutlich über dem Wert von 273,6 mW aus Kapitel 3 liegt. Gleichzeitig ist zu beachten, dass dieser Wert aufgrund mangelnder Daten der verwendeten Pumpe nur als obere Grenze zu verstehen ist. Sollte dies wieder Erwarten trotzdem der Realität entsprechen, so ist die Kühlleistung - mit der Annahme, dass eine Ecke des CSR etwa 1/8 des Rings an Leistung benötigt - mit $8 \times 2,7 \text{ W} = 21,6 \text{ W}$ noch innerhalb der Leistungsfähigkeit der Kälteanlage, die zu etwa 27 W messtechnisch ermittelt wurde.

Zu Überprüfung der Ergebnisse dieser Messung wurde eine zweite Messung durchgeführt. Dabei wurde durch das elektrische Ausheizsystem der inneren Vakuumkammern gezielt eine Leistung von 9,7 W an den 2 K-Kreis angelegt. Mit dem Ergebnis aus der ersten Messung (Leistungseintrag von 2,7 W auf dem 2 K-Kreis durch die 40 K-Umgebung) würde dies bedeuten, dass in diesem Fall in der ersten Ecke 12,4 W Leistung anliegen. Bei dieser Messung war es aber nicht möglich, Ansaugdruck und Pumpendrehzahl konstant zu halten. Stattdessen war die anliegende Leistung so gering, dass die Pumpe auf minimale Drehzahl geregelt wurde (20 1/s) und der Druck in der Gasleitung weiter sank. Eine analoge Auswertung zur ersten Messung war damit nicht möglich.

Bei der Abnahme der Kälteanlage wurde über eine elektrische Heizung gezeigt, dass die Kälteanlage bei 2,0 K für den CSR mit 27 W sogar mehr Kühlleistung zur Verfügung stellen kann als spezifiziert. Dies deutet darauf hin, dass das Ergebnis aus der ersten Messung tatsächlich viel kleiner sein muss, da andernfalls nicht zu erklären wäre, wieso in der Kälteanlage bei 50 % der maximal möglichen Leistung (Messung 2) bei diesen Temperaturen, so wenig Helium verdampft, dass obwohl die Pumpe schon bei der niedrigsten möglichen Drehzahl betrieben wird der Druck in der Gasleitung weiter sinkt. Mit den zur Verfügung stehenden Mitteln ist es jedoch nicht möglich einen genaueren Zahlenwert für den Wärmeeintrag auf den 2 K-Kreis zu bestimmen. Durch Nachrüstung geeigneter Durchflussmesser zur Bestimmung des Massenstroms sollte es aber möglich sein, in späteren Messungen genauere Ergebnisse zu erhalten.

Kapitel 5

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde nach einigen grundlegenden Berechnungen zur Ionenoptik und dem Wärmetransport mit dem Aufbau des elektrostatischen kryogenen Speicherings CSR begonnen. Startend bei einer fast leeren Halle, in der nur die Kälteanlage vorhanden war, wurde beginnend mit den Beton-Fundamenten das Isoliervakuum des CSR zum Großteil aufgebaut (siehe Abb. 5.1) und auf Vakuumlecks getestet. Zusätzlich wurde die Ecke direkt an der Kälteanlage komplett montiert und unter Anderem während zweier Abkühlphasen intensiven Tests unterzogen, um eventuell erforderliche Änderungen für die anderen drei Ecken zu identifizieren. Diese ergaben, dass die Designvorgaben in hervorragender Weise erfüllt wurden, so dass entweder gar keine oder nur minimale Veränderungen notwendig sind, um die Anforderungen des dauerhaften Experimentierbetriebs zu erfüllen.



Abbildung 5.1: Gezeigt ist das im Rahmen dieser Arbeit aufgebaute Isoliervakuumsystem des CSR, sowie im oberen linken Bereich im Anschluss an die Linde Kälteanlage, die erste Ecke. Die Strahlungsschilde sind teilweise demontiert, so dass teilweise die inneren Vakuumkammern zu erkennen sind.

Mittels Simulationen mit der Finite-Elemente-Methode wurden die geometrischen

Größen der rein elektrostatischen Ionenoptik des CSR bestimmt. Da die Felder am Ende eines Deflektors nicht instantan verschwinden treten Randfelder auf, die für eine Ablenkung eines Ionenstrahls über den Bereich des Deflektors hinaus sorgen. Die so berechneten geometrischen Größen der Elektroden von $5,58^\circ$ für den 6° -Deflektor und $38,23^\circ$ für den 39° -Deflektor sorgen dann für die gewünschten realen Ablenkwinkel. Zusätzlich wurden mit dieser Methode die notwendigen elektrischen Spannungen bestimmt, die benötigt werden, um mit den 6° -Deflektoren eine horizontale Strahlagekorrektur zu ermöglichen. Die entsprechenden Untersuchungen an den Quadrupoldoublets lieferten die Größen der effektiven Quadrupollänge, die es ermöglicht mit Spezialsoftware zur Beschleunigerplanung die Quadrupoldoublets realistisch abzubilden. Die notwendigen Spannungen zur vertikalen Strahlagekorrektur über zwischen den Quadrupolen eines Doublets implementierte vertikale Deflektoren wurden ebenfalls bestimmt. Außerdem wurden geeignete Positionen für Teilchendetektoren festgelegt, um innerhalb einer Experimentiersektion entstehende Reaktionsfragmente, mit anderem Verhältnis aus Ladung zu Energie als der primäre Ionenstrahl, zu detektieren. Daraus resultierten Änderungen an den inneren Vakuumkammern, um entsprechende Detektoren unterzubringen.

Zum Erreichen der gewünschten Temperaturen der inneren Vakuumkammern von maximal 10 K war es notwendig, den Wärmeintrag auf kalte CSR-Komponenten zu minimieren und gleichzeitig deren Anbindung an die Kälteanlage bzw. deren Heli-umleitungen zu optimieren. Die Verwendung eines zusätzlichen Vakuumsystems zur Vermeidung des Wärmeübertrags durch Konvektion wurde ebenso motiviert wie auch die Verwendung von Superisolierung und aktiv gekühlten Strahlungsschilden bei etwa 40 K und etwa 80 K. Die Wärmeeinträge auf die zwei Kühlkreise der Kälteanlage bei 1,8 K und 5 – 80 K wurde berechnet und optimiert, um die geforderten Endtemperaturen mit der vorhandenen Kälteanlage sicher zu gewährleisten. Die zum Erreichen des geforderten Vakuums von besser als 1×10^{-13} mbar notwendigen Bereiche bei maximalen Temperaturen von 2 K sind nach den Ergebnissen von Simulationen mittels Finite-Elemente-Methode zu erreichen.

Die einzelnen Komponenten des Hochspannungssystems innerhalb des CSR wurden getestet. Dabei zeigte sich, dass diese überarbeitet werden müssen, um die erforderlichen Spannungen zur Ablenkung von Ionenstrahlen mit einer Energie von 300 keV/q stabil zu halten. Die notwendigen Änderungen wurden erfolgreich getestet und werden entsprechend umgesetzt. Ein aus Zeitgründen unmöglicher Test aller zusammengehöriger Hochspannungskomponenten wird zeitnah durchgeführt. Die Elektrodenstützen zur Gewährleistung der korrekten Position und Orientierung der ionenoptischen Elemente im kalten Zustand wurden durch Vergleichsmessungen zwischen Targetpositionen bei Raumtemperatur und bei etwa 100 K erfolgreich getestet, d.h. die gewählte Konstruktion kann auch für die anderen drei Ecken des CSR ohne Änderungen übernommen werden. Die während zwei Abkühlprozessen gewonnenen Temperaturmessungen auf verschiedenen Komponenten des CSR ermöglichten die Interpretation des Abkühlvorgangs und der erreichten Endtemperaturen. Die zur Erzeugung eines Vakuums von maximal 1×10^{-13} mbar notwendigen 2 K-Einheiten erreichten in einem Fall die geforderten 2 K, während die Temperaturen in einem

anderen Fall mit 2,6 K etwas darüber lagen. Diese zu hohe Temperatur wurde bei diesem Test durch noch nicht vollständig installierte Baugruppen verursacht, so dass davon ausgegangen werden kann, dass im Experimentierbetrieb die geforderte Temperatur erreicht wird. Die inneren Vakuumkammern erreichten Temperaturen von maximal $7,3 \pm 0,3$ K und erfüllen damit in hervorragender Weise die Vorgaben. Die an den temperaturüberwachten ionenoptischen Elementen gemessenen Temperaturen von $9,96 \pm 0,25$ K bis $14,66 \pm 0,25$ K lagen im Bereich der Vorgabe von 10 K oder etwas darüber. Die deshalb notwendigen Änderungen, der zusätzlichen thermischen Verankerung der Elektrodenstützen bei etwa 40 K und 10 K, wurden bereits bei der Planung dieser Komponenten für das eventuelle Eintreten dieses Falls vorgesehen und werden entsprechend umgesetzt.

Der nächste Schritt an der ersten Ecke des CSR ist, neben den schon genannten Modifikationen und dem Test der Hochspannungskomponenten, ein Test des Ausheizsystems für das innere Vakuumsystem, das auf dem des Prototypen CTF basiert. Parallel dazu werden die verbliebenen drei Ecken des CSR, mit den im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnissen und daraus resultierenden Modifikationen, aufgebaut. Die inneren Vakuumkammern sind bestellt und werden in den nächsten Monaten ausgeliefert. Ebenso sind die ionenoptischen Elemente sowie deren Stützen in der Fertigungsphase bzw. schon im Aufbau. Außerdem wird derzeit die Konstruktion der drei Linearabschnitte für Strahldiagnose, Elektronenkühler bzw. -target sowie Reaktionsmikroskop abgeschlossen und deren Aufbau begonnen. Die vierte Linearabschnitt wird zu Beginn des Experimentierbetriebs am CSR vermutlich nur aus Strahlrohren bestehen und entsprechend der sich entwickelnden Experimentanforderungen später erweitert. Zusätzlich sind die Hochspannungsplattformen für die verschiedenen Ionenquellen im Aufbau, die über die in der Phase der Detailplanung befindliche Injektionsstrahlführung mit dem CSR verbunden wird.

Nach der Fertigstellung des Aufbaus des CSR bis etwa Mitte 2013 werden erste Testexperimente durchgeführt. Mit ihnen wird die Leistungsfähigkeit des CSR anhand wichtiger Parameter für weitere Experimente wie z.B. Speicherdauer und damit indirekte Vakuumbestimmung, Temperatureverteilungen über den kompletten Speicherring und mit einfachen Ionenstrahlen durchgeführt. Vorzugsweise sind für die ersten Tests der kompletten Maschine Ionenstrahlen vorgesehen, die auch schon am TSR für die Bestimmung von Maschinenparametern verwendet wurden, wie z.B. H^+ oder C_{12}^+ . Darauf folgen einfache erste physikalische Messungen zur Demonstration der besseren Kühlung der Moleküle durch eine niedrigere Umgebundtemperatur, die vermutlich ähnlicher Natur sind wie die am Prototypen CTF durchgeführten Messungen zur Kühlung von Aluminiumclustern.

Anhang A

Koordinaten Vermessung warm

Punkt-ID	x / mm	y / mm	z / mm	Azimuth / °	Zenit / °	Distanz / mm
MP-01	-1730,30	-145,73	-4526,32	-26,196774	99,316023	2181,24
	-1730,29	-145,73	-4526,32	-26,196883	99,315986	2181,24
	-1730,29	-145,73	-4526,32	-26,196818	99,316026	2181,24
	-1730,29	-145,72	-4526,31	-26,196946	99,315880	2181,23
	-1730,29	-145,72	-4526,32	-26,196900	99,315793	2181,24
	-1730,29	-145,72	-4526,31	-26,196971	99,315842	2181,23
MP-02	-2006,28	2,33	-4804,19	-17,554797	94,991141	2348,47
	-2006,28	2,33	-4804,19	-17,554768	94,991129	2348,47
	-2006,28	2,33	-4804,19	-17,554781	94,991105	2348,47
	-2006,28	2,33	-4804,19	-17,554789	94,990970	2348,46
	-2006,27	2,34	-4804,19	-17,554848	94,990923	2348,47
	-2006,27	2,34	-4804,19	-17,554858	94,990845	2348,46
MP-03	-2134,75	210,43	-4906,56	-14,050844	89,903423	2415,30
	-2134,74	210,43	-4906,56	-14,050903	89,903280	2415,30
	-2134,74	210,43	-4906,56	-14,050974	89,903290	2415,30
	-2134,74	210,44	-4906,55	-14,050914	89,903208	2415,30
	-2134,74	210,44	-4906,55	-14,051067	89,903085	2415,30
	-2134,74	210,44	-4906,55	-14,051092	89,902975	2415,30
MP-04	-2352,59	210,04	-4739,95	-9,193451	89,907601	2223,90
	-2352,59	210,05	-4739,96	-9,193511	89,907479	2223,91
	-2352,59	210,05	-4739,95	-9,193475	89,907482	2223,90
	-2352,59	210,05	-4739,94	-9,193529	89,907341	2223,89
	-2352,59	210,05	-4739,93	-9,193700	89,907296	2223,88
	-2352,59	210,06	-4739,95	-9,193562	89,907236	2223,90

Punkt-ID	x / mm	y / mm	z / mm	Azimuth / °	Zenit / °	Distanz / mm
MP-05	-2487,90	-8,29	-4875,96	-5,649774	95,203779	2363,80
	-2487,90	-8,29	-4875,98	-5,649815	95,203707	2363,82
	-2487,90	-8,28	-4875,97	-5,649837	95,203561	2363,81
	-2487,90	-8,28	-4875,95	-5,649829	95,203540	2363,80
	-2487,90	-8,28	-4875,94	-5,649810	95,203424	2363,78
	-2487,90	-8,27	-4875,98	-5,649900	95,203291	2363,82
MP-06	-2491,71	-172,11	-4647,63	-5,632107	100,097726	2159,44
	-2491,71	-172,11	-4647,63	-5,632178	100,097757	2159,44
	-2491,71	-172,10	-4647,63	-5,632146	100,097529	2159,43
	-2491,71	-172,10	-4647,62	-5,632162	100,097512	2159,43
	-2490,96	-172,40	-4647,61	-5,632345	100,097617	2211,95
	-2491,71	-172,10	-4647,63	-5,632154	100,097489	2159,43
MP-07	-3384,61	-0,24	-4705,48	16,738441	95,011253	2356,59
	-3384,61	-0,23	-4705,49	16,738399	95,011075	2356,60
	-3384,60	-0,22	-4705,48	16,738363	95,010925	2356,59
	-3384,60	-0,22	-4705,48	16,738445	95,010883	2356,59
	-3384,60	-0,22	-4705,47	16,738357	95,010803	2356,58
	-3384,61	-0,21	-4705,49	16,738439	95,010636	2356,60
MP-08	-3579,39	219,41	-4833,49	19,762750	89,680099	2541,37
	-3579,41	219,41	-4833,51	19,762857	89,680101	2541,40
	-3579,40	219,41	-4833,48	19,762998	89,679930	2541,37
	-3579,40	219,41	-4833,47	19,763190	89,679928	2541,36
	-3579,40	219,42	-4833,46	19,763267	89,679860	2541,35
	-3579,44	219,42	-4833,52	19,763383	89,679811	2541,42
MP-09	-3948,89	210,15	-4368,52	32,879050	89,890768	2333,13
	-3948,75	210,16	-4326,94	32,879064	89,890617	2280,57
	-3948,90	210,17	-4368,53	32,879008	89,890486	2333,14
	-3948,91	210,16	-4368,54	32,879053	89,890596	2333,16
	-3948,90	210,17	-4368,54	32,878937	89,890405	2333,15
	-3948,74	210,17	-4326,93	32,879076	89,890317	2280,56
MP-10	-4175,10	-10,06	-4440,77	35,928242	94,862254	2541,78
	-4175,12	-10,06	-4440,79	35,928247	94,862174	2541,81
	-4140,92	-5,50	-4401,10	35,928305	94,862031	2489,22
	-4140,91	-5,49	-4401,09	35,928315	94,861976	2489,20
	-4140,93	-5,49	-4401,10	35,928395	94,861815	2489,23
	-4175,12	-10,05	-4440,79	35,928254	94,861890	2541,80

Tabelle A.1: Rohdaten der Vermessung der CSR Ionenoptik im warmen Zustand unter Vakuum.

Anhang B

Koordinaten Vermessung kalt

Punkt-ID	x / mm	y / mm	z / mm	Azimuth / °	Zenit / °	Distanz / mm
MP-01	-1739,45	-146,84	-4527,54	-70,452865	99,078784	2181,68
	-1739,45	-146,85	-4527,53	-70,453150	99,079021	2181,67
	-1739,44	-146,85	-4527,52	-70,453363	99,079026	2181,67
	-1739,45	-146,85	-4527,52	-70,453256	99,078912	2181,67
	-1739,45	-146,85	-4527,52	-70,453238	99,079082	2181,67
	-1739,44	-146,85	-4527,53	-70,453356	99,078952	2181,67
	-1739,45	-146,85	-4527,53	-70,453084	99,078859	2181,67
	-1739,45	-146,85	-4527,53	-70,453221	99,079029	2181,67
	-1739,44	-146,85	-4527,52	-70,453372	99,078851	2181,67
	-1739,44	-146,85	-4527,52	-70,453417	99,078936	2181,67
MP-02	-2006,95	1,40	-4803,85	-61,847917	94,788437	2348,00
	-2006,94	1,39	-4803,86	-61,848253	94,788809	2348,01
	-2006,94	1,39	-4803,86	-61,848201	94,788797	2348,01
	-2006,95	1,39	-4803,86	-61,848032	94,788764	2348,01
	-2006,94	1,39	-4803,85	-61,848302	94,788628	2348,00
	-2006,93	1,39	-4803,85	-61,848341	94,788775	2348,00
	-2006,93	1,39	-4803,85	-61,848347	94,788722	2348,00
	-2006,95	1,39	-4803,85	-61,848006	94,788702	2348,00
	-2006,94	1,39	-4803,85	-61,848250	94,788629	2348,00
	-2006,94	1,39	-4803,85	-61,848235	94,788725	2348,00
MP-03				-58,3285	89,7375	
MP-04				-53,4883	89,7690	

Punkt-ID	x / mm	y / mm	z / mm	Azimuth / °	Zenit / °	Distanz / mm
MP-05	-2489,25	5,22	-4719,33	-49,986841	95,064573	2206,56
	-2487,67	-4,55	-4824,08	-49,987373	95,064718	2311,77
	-2487,66	-4,55	-4824,07	-49,987501	95,064639	2311,76
	-2487,66	-4,55	-4824,06	-49,987571	95,064584	2311,74
	-2487,67	-4,54	-4824,03	-49,987449	95,064599	2311,71
	-2488,45	0,33	-4771,69	-49,987397	95,064688	2259,15
	-2487,67	-4,54	-4824,01	-49,987331	95,064630	2311,70
	-2487,67	-4,54	-4824,00	-49,987361	95,064698	2311,69
	-2487,67	-4,55	-4824,01	-49,987391	95,064680	2311,70
	-2487,66	-4,55	-4824,01	-49,987501	95,064684	2311,70
	-2486,87	-9,43	-4876,43	-49,987761	95,064676	2364,35
MP-06				-49,9999	99,9550	
MP-07	-3386,11	-1,25	-4705,14	-27,541943	95,001128	2356,89
	-3386,08	-1,23	-4705,10	-27,542167	95,000748	2356,85
	-3386,08	-1,23	-4705,09	-27,542122	95,000744	2356,84
	-3386,08	-1,22	-4705,10	-27,542099	95,000653	2356,85
	-3386,09	-1,22	-4705,11	-27,541973	95,000640	2356,86
	-3386,09	-1,22	-4705,11	-27,542091	95,000644	2356,86
	-3386,09	-1,22	-4705,11	-27,542032	95,000612	2356,86
	-3386,08	-1,22	-4705,12	-27,542247	95,000634	2356,86
	-3386,09	-1,22	-4705,10	-27,541972	95,000563	2356,86
	-3386,09	-1,22	-4705,11	-27,542021	95,000523	2356,86
MP-08				-24,4942	89,7068	
MP-09	-3948,33	208,38	-4368,99	-11,426762	89,999445	2333,14
	-3916,15	208,42	-4327,33	-11,426768	89,999381	2280,51
	-3916,15	208,42	-4327,32	-11,426629	89,999324	2280,50
	-3916,17	208,42	-4327,35	-11,426701	89,999325	2280,54
	-3948,33	208,37	-4368,99	-11,426687	89,999482	2333,14
	-3980,44	208,34	-4410,58	-11,426918	89,999313	2385,69
	-3948,33	208,38	-4369,00	-11,426870	89,999336	2333,16
	-3980,45	208,34	-4410,60	-11,427010	89,999305	2385,71
	-3948,31	208,38	-4368,98	-11,426855	89,999369	2333,13
	-3980,45	208,34	-4410,59	-11,426871	89,999280	2385,70
	-3883,97	208,47	-4285,69	-11,426894	89,999181	2227,89
MP-10				-8,4177	94,9737	

Tabelle B.1: Rohdaten der Vermessung der CSR Ionenoptik im kalten Zustand

Anhang C

Technische Zeichnungen
ausgewählter Targethalterungen für
den ersten Kältetest

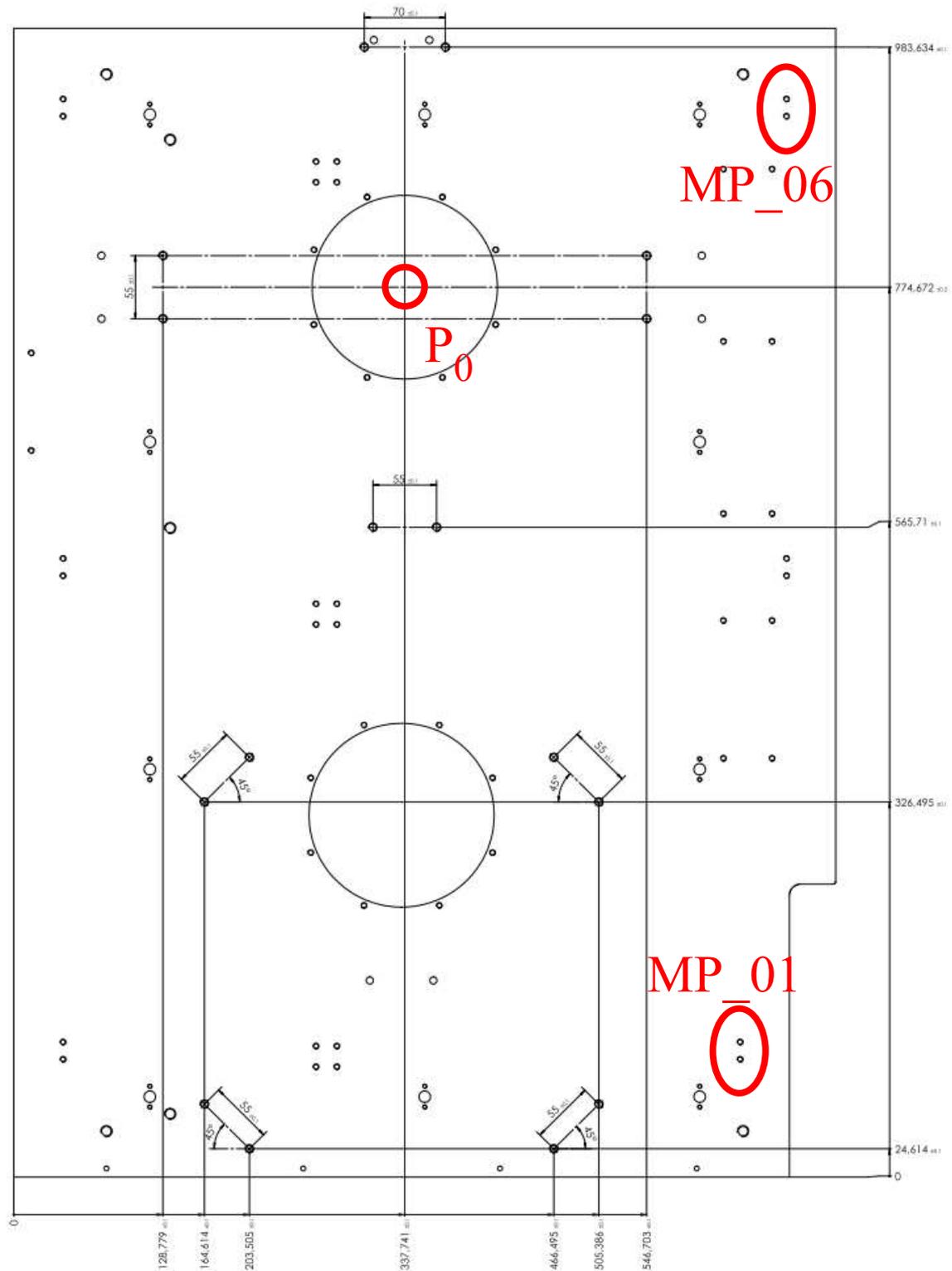


Abbildung C.1: Positionen Targethalterung für MP-01 und MP-06 auf dem 40K-Strahlungsschild

Abbildung C.2: Targethalterung für MP-01 auf dem 40K-Strahlungsschild

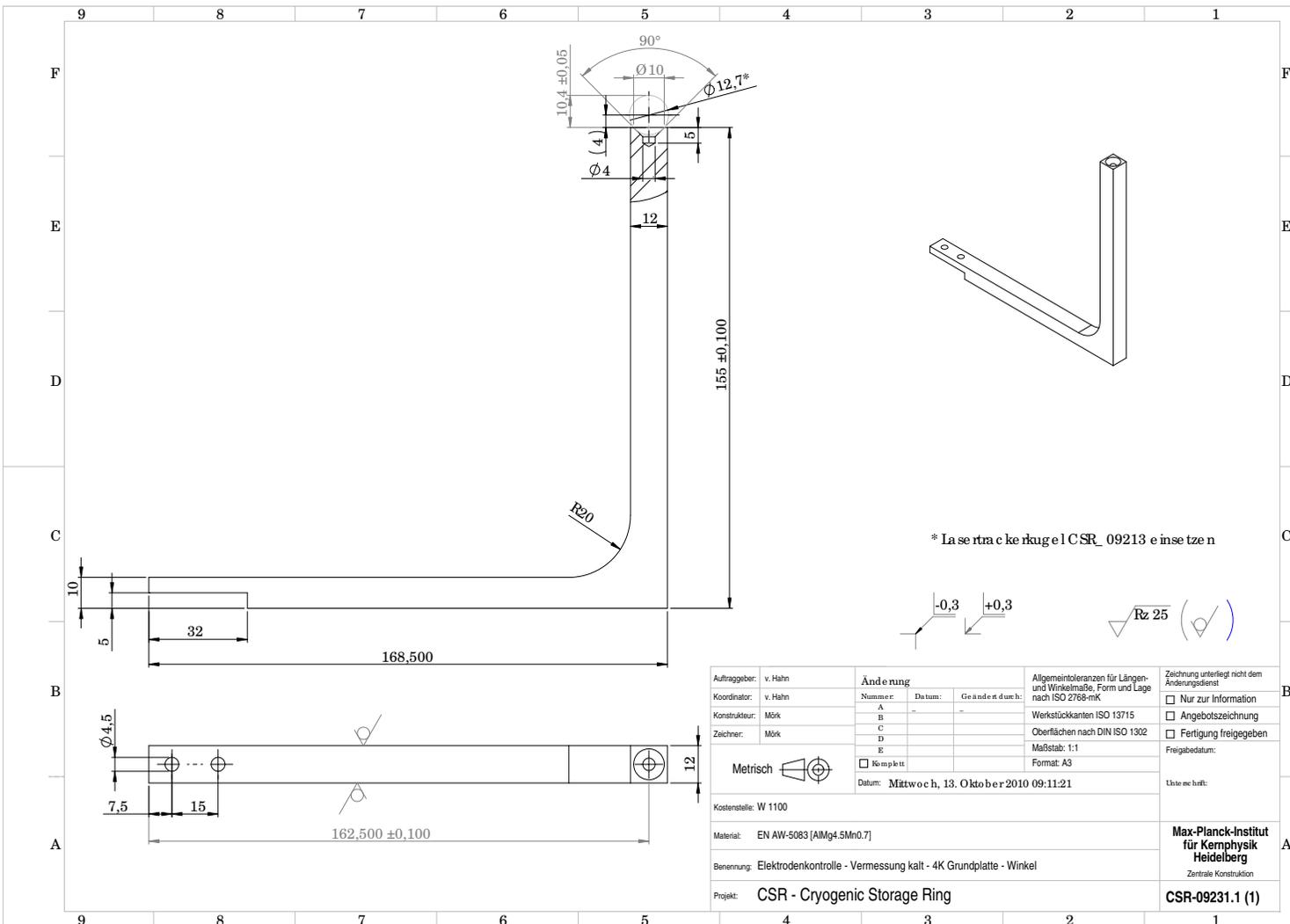


Abbildung C.3: Targethalterung für MP-06 auf dem 40K-Strahlungsschild

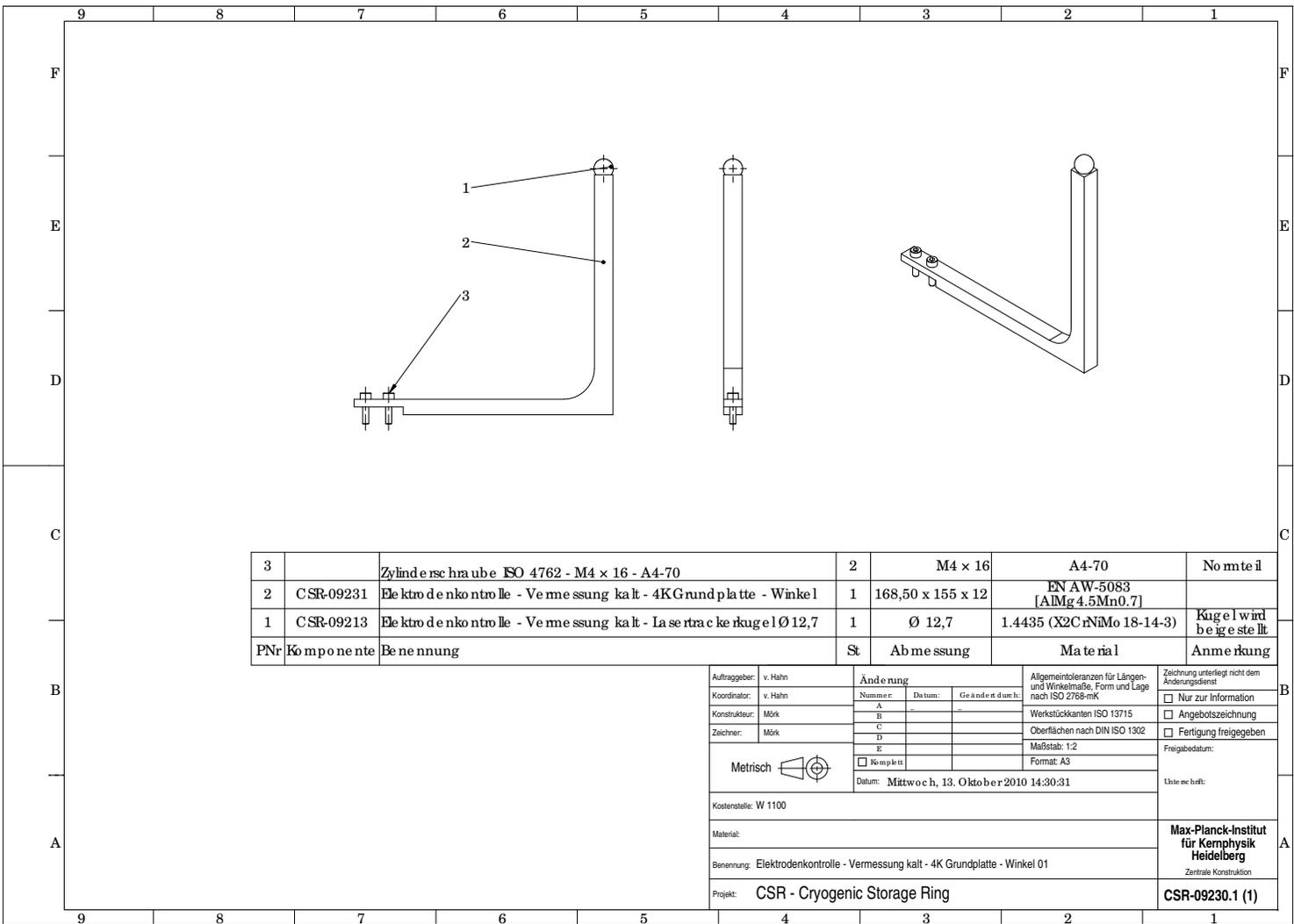


Abbildung C.4: Targethalterung für MP-02 bis MP-05 auf dem 6°-Deflektor

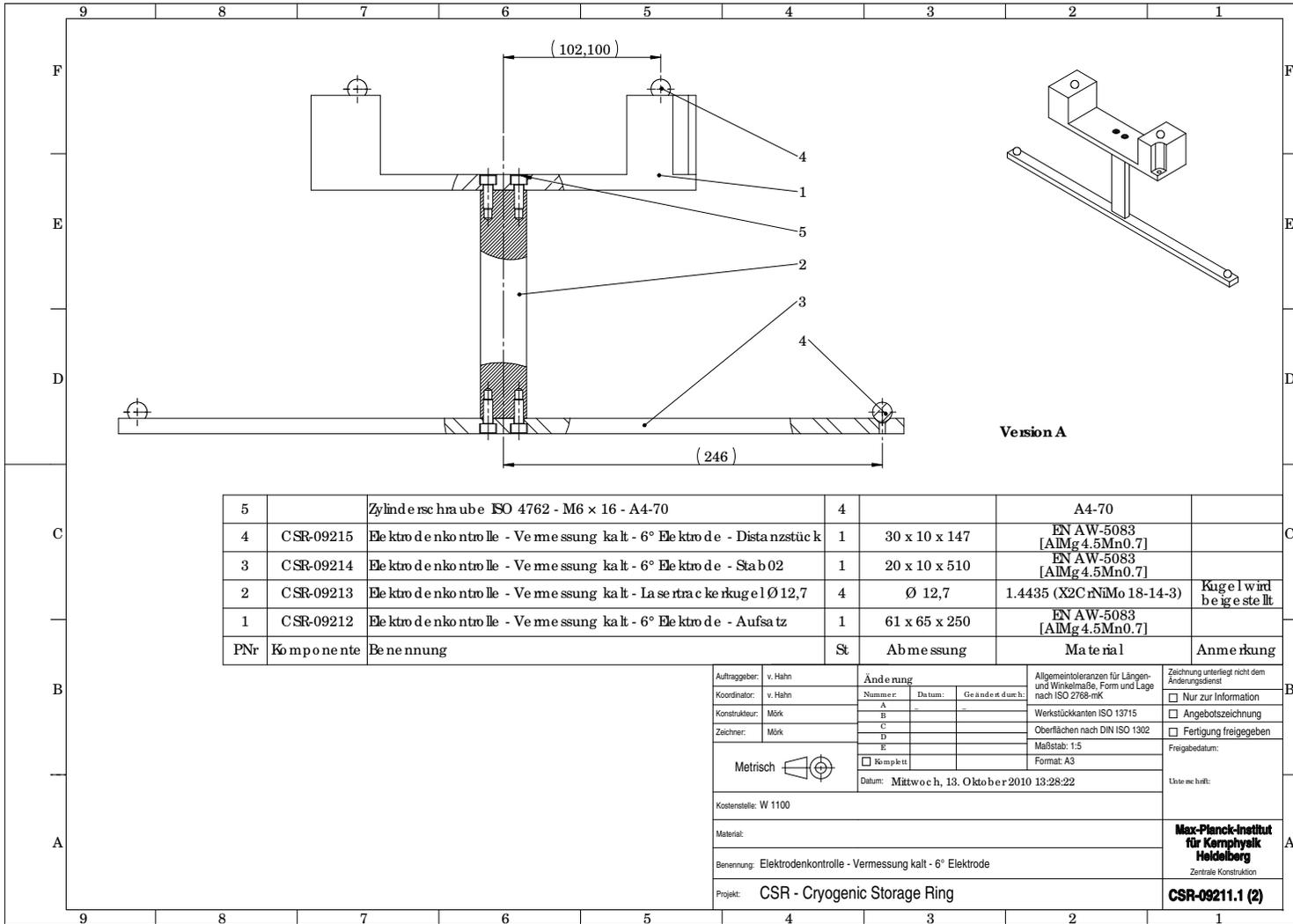


Abbildung C.5: Targethalterung für MP-07 und MP-10 auf dem 39°-Deflektor

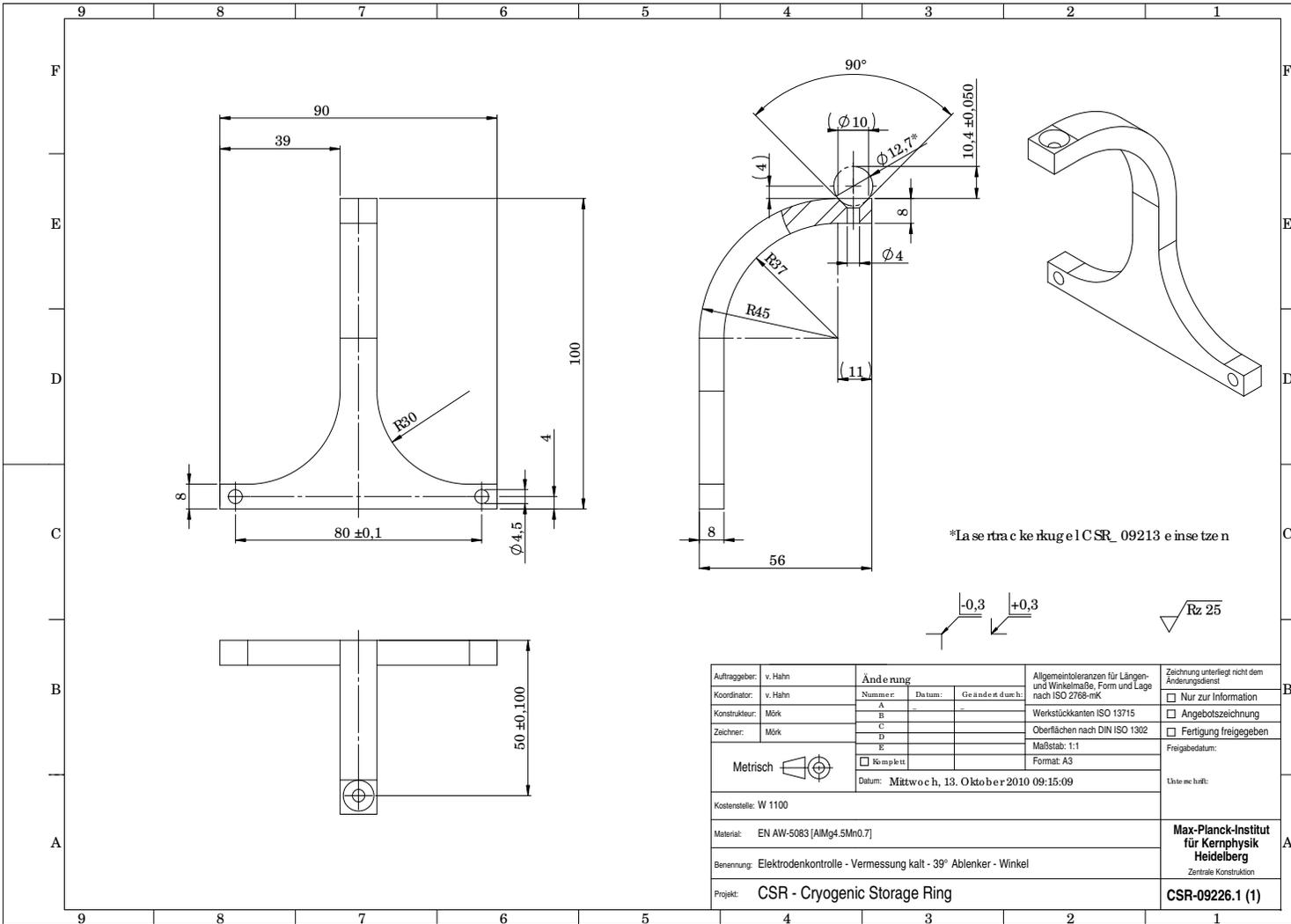
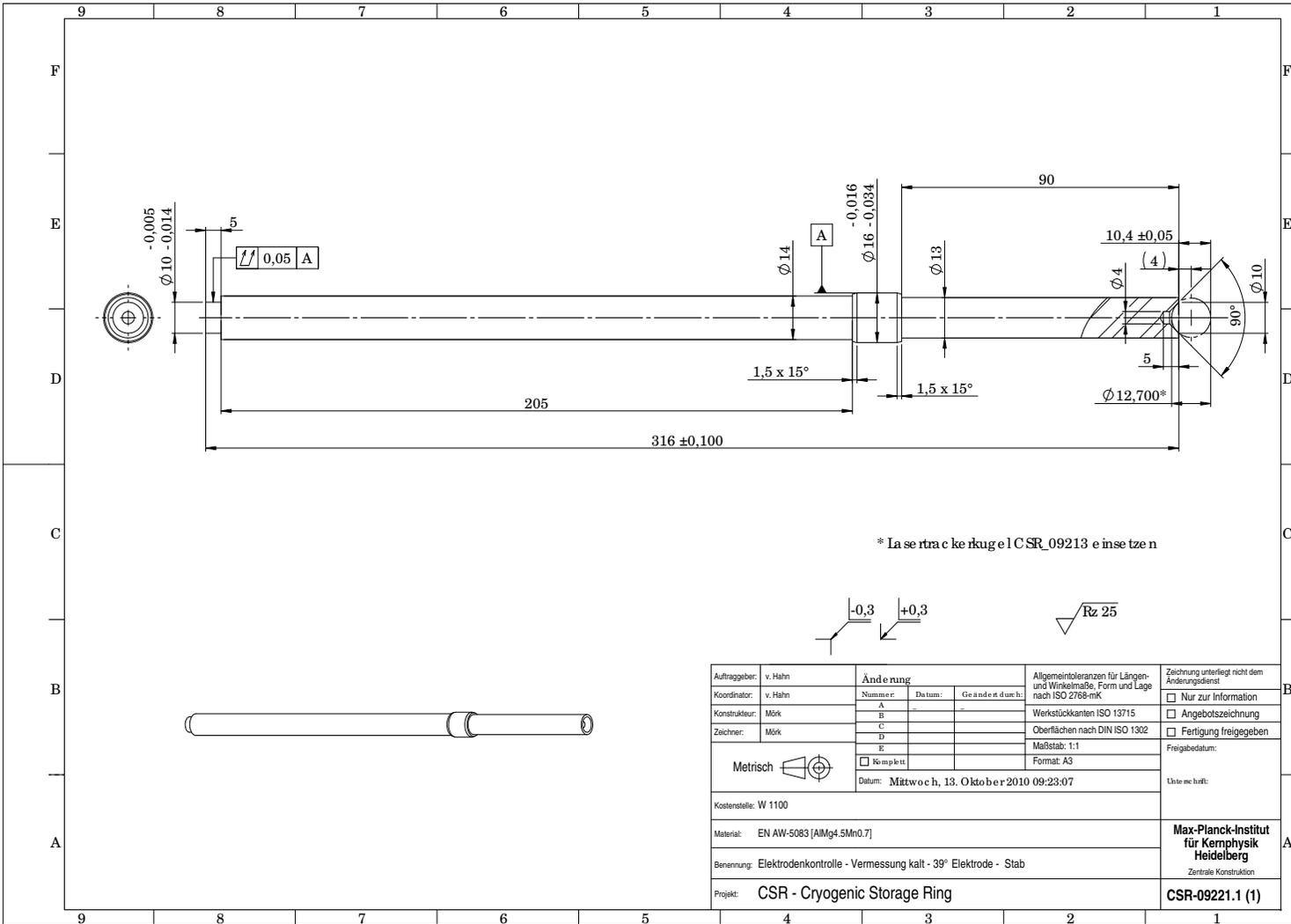


Abbildung C.6: Targethalterung für MP-08 und MP-09 auf dem 39°-Deflektor



Literaturverzeichnis

- [1] Kreckel, H. et al. (2007) Electron collisions and rovibrational action spectroscopy of cold H_3^+ molecules. *J. Phys. Conf. Ser.*, **88**.
- [2] Krohn, S. et al. (2000) Electron-induced vibrational deexcitation of H_2^+ . *Phys. Rev. A*, **62**.
- [3] Carata, L., Orel, A. E., and Suzor-Weiner, A. (1999) Dissociative recombination of He_2^+ molecular ions. *Phys. Rev. A*, **59**.
- [4] Kokoouline, V. and Greene, C. H. (2004) Photofragmentation of the h_3 molecule, including Jahn-Teller coupling effects. *Phys. Rev. A*, **69**.
- [5] Larsson, M. (1997) Dissociative recombination with ion storage rings. *Annu. Rev. Phys. Chem.*, **48**.
- [6] Andersen, L. H., Heber, O., and Zajfman, D. (2004) Physics with electrostatic rings and traps. *J. Phys. B.*, **37**.
- [7] Herbst, E. (2001) The chemistry of interstellar space. *Chem. Soc. Rev.*, **30**.
- [8] Jinno, S. et al. (2004) TMU electrostatic ion storage ring designed for operation at liquid nitrogen temperature. *Nucl. Instr. and Meth.*, **532**.
- [9] Welsch, C. P. et al. (2009) Present status of the USR project. *Hyperfine Interact.*, **194**.
- [10] von Hahn, R. et al. (2006) Cryogenic Concept for the Low-energy Electrostatic Cryogenic Storage Ring (CSR) at MPI-K in Heidelberg. *AIP Conf. Proc.*, **823**.
- [11] Shornikov, A. (2010) *An electron cooler for ultra-low energy cryogenic operation*. Doktorarbeit, Ruprecht-Karls Universität Heidelberg.
- [12] Rensfelt, K. G. et al. (2004) Desiree - a double electrostatic storage ring. *Proceedings of EPAC*.
- [13] Löfgren, P. et al. (2006) Design of the double electrostatic storage ring desiree. *Proceedings of EPAC*.
- [14] Thomas, R. D. et al. (2011) The double electrostatic ion ring experiment: A unique cryogenic electrostatic storage ring for merged ion-beam studies. *Rev. Sci. Instrum.*, **82**.

- [15] Laux, F. (2011) *Entwicklung von kapazitiven Positions-, Strom- und Schottkysignal-Messsystemen für den kryogenen Speicherring CSR*. Doktorarbeit, Ruprecht-Karls Universität Heidelberg.
- [16] Kühnel, K. U. et al. (2008) A novel beam profile monitor based on a supersonic gas jet. *Proceedings of EPAC*.
- [17] Berg, F. (2011) *Die Ionenoptik der Injektionsstrahlführungslinien des kryogenen Speicherrings CSR*. Diplomarbeit, Ruprecht-Karls Universität Heidelberg.
- [18] Day, C. (2006) Basics and applications of cryopumps. *Cern Accelerator School*.
- [19] Gabrielse, G. et al. (1990) Thousandfold improvement in the measured anti-proton mass. *Phys. Rev. Lett.*, **65**.
- [20] Menk, S. (2009) *A Cryogenic Trap for Fast Ion Beams*. Diplomarbeit, Ruprecht-Karls Universität Heidelberg.
- [21] Froese, M. (2010) *A cryogenic electrostatic ion trap and first experiments on delayed emission of aluminum anion clusters and self-bunching*. Doktorarbeit, Ruprecht-Karls Universität Heidelberg.
- [22] Lange, M. et al. (2010) A cryogenic electrostatic trap for long-time storage of keV ion beams. *Rev. Sci. Instrum.*, **81**.
- [23] Menk, S. et al. (2012) Lifetimes Measurements of SF_6^- . *in Vorbereitung*.
- [24] Lange, M. et al. (2012) Radiative cooling of Al_4^- and Al_5^- in a cryogenic environment. *New J. Phys.*, **14**.
- [25] Froese, M. W. et al. (2011) Thermionic power-law decay of excited aluminum-cluster anions and its dependence on storage-device temperature. *Phys. Rev. A*, **83**.
- [26] Orlov, D. et al. (2008) Cryogenic and vacuum technological aspects of the low-energy electrostatic cryogenic storage ring. *AIP Conference Proceedings*.
- [27] Menk, S. (2012), Temperaturverteilung eines 6°-Deflektors bei der Aktivierung des CSR-NEG-Moduls. interner Bericht.
- [28] von Hahn, R. et al. (2011) The electrostatic Cryogenic Storage Ring CSR - Mechanical concept and realization. *Nucl. Instr. Meth. B*, **269**.
- [29] Vectorfields (2008) *Opera3D Manual*.
- [30] Fadil, H. et al. (2006) Finite Elements Calculations of the lattice and ring acceptance of the Heidelberg CSR. *Proceedings of EPAC 2006*.
- [31] Grieser, M. (2009). Pers. Mitteilung.
- [32] Grothe, H. and Iselin, F. C. (2012), MAD 8 -Methodical Accelerator Design. Online, <http://hansg.web.cern.ch/hansg/mad/mad8/user/mad.html>.

- [33] Hinterberger, F. (2008) *Physik der Teilchenbeschleuniger und Ionenoptik*. Springer Verlag.
- [34] von Hahn, R. (2010) The Cryogenic Ring Project at Heidelberg. *Proceedings of EPAC 2008 Genoa*.
- [35] Karl Jousten (Hrsg.) (2010) *Handbuch der Vakuumtechnik 10. Auflage*. Vieweg + Teubner.
- [36] Demtröder, W. (2008) *Experimentalphysik 1: Mechanik und Wärme*. Springer Verlag.
- [37] Cryogenic material properties. Datensammlung, National Institute for Standards and Technology, <http://cryogenics.nist.gov/MPropsMAY/materialproperties.htm>.
- [38] Ekin, J. W. (2006) *Experimental Techniques for Low-temperature Measurements*. Oxford University Press.
- [39] Scott, R. B. (1988) *Cryogenics Engineering*. Met Chemical Research.
- [40] RUAG Space GmbH (Austria) (2012) *Datasheet Brochure for Vacuum Thermal Insulation*.
- [41] Hust, J. (1984) *Phase II: Thermal Conductivity Of Glass Fiber/Epoxy Composite Support Bands For Cryogenic Dewars*. NBS Boulder.
- [42] Mann, D. (ed.) (1977) *LNG Materials and Fluids*. National Bureau of Standards, Cryogenics Division.
- [43] Umezawa, O. and Ishikawa, K. (1992) Electrical and thermal conductivities and magnetization of some austenitic steels, titanium and titanium alloys at cryogenic temperatures. *Cryogenics*, **32**, 873–880.
- [44] Touloukian, Y. and Ho, C. (eds.) (1976) *Thermophysical Properties of Selected Aerospace Materials, Part II: Thermophysical Properties of Seven Materials*.
- [45] Ziegler, W., Mullins, J., and Hwa, S. (1963) Specific heat and thermal conductivity of four commercial titanium alloys from 20 to 300K. *Advances in Cryogenic Engineering*, **8**, 268–277.
- [46] (November 1974 (With November 1975 and January 1977 Supplements)) *Handbook on Materials for Superconducting Machinery Mechanical, Thermal Electrical, and Magnetic Properties of Structural Materials*. Metals and Ceramics Information Center, Battelle, Columbus Laboratories.
- [47] Johnson, V. J. (ed.) (1960) *A compendium of the properties of materials at low temperature (phase I)*. Wright Air Development Division.
- [48] Simon, J., Drexler, E., and Reed, R. P. (1992) *Properties of Copper and Copper Alloys at Cryogenic Temperatures*. NIST Monograph.

- [49] Chalmers, I. D., Lei, J. H., Yang, B., and Siew, W. H. (1995) Surface charging and flashover on insulators in vacuum. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **2**.
- [50] Pillai, A. S. and Hackam, R. (1985) Surface flashover of solid insulators in atmospheric air and in vacuum. *J. Appl. Phys.*, **58**.
- [51] Miller, C. H. (1989) Surface flashover of insulators. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, **24**.
- [52] Grieser, M. (2007), Misalignment of the electrostatic elements.
- [53] Azar, E. (2011), Prüfbericht 60873-CSR-Komponenten. Sigma3D GmbH.
- [54] Schumann, C. (2011), Prüfbericht 60873-CSR-Komponenten. Sigma3D GmbH.
- [55] Schumann, C. (2011), Prüfbericht 60873-CSR-Komponenten, Nachtrag vom September 2011. Sigma3D GmbH.
- [56] Gekon Trading GmbH (2012) *PT1000 Produktinformationen*.
- [57] Lange, M. et al. (2008) Commissioning of the Heidelberg Cryogenic Trap for Fast ion beams (CTF). Proceedings of EPAC 2008.
- [58] Oxford Instruments (2000) *27 Ω Rhodium Iron Resistance Sensor*. Produkt Information.
- [59] Lakeshore (2012) *Si Diode DT-670A-SD*. Produkt Katalog.
- [60] Schreiner, W. (2012). Private Kommunikation.
- [61] Haynes, W. M. (ed.) (2012) *CRC Handbook of Chemistry and Physics 92nd Edition (Internet Version 2012)*. CRC Press/Taylor and Francis.
- [62] Donnelly, R. J. and Barenghi, C. F. (1998) The observed properties of liquid helium at the saturated vapor pressure. *J. Phys. Chem. Ref Data*, **27**.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei denjenigen bedanken, die zu den bisherigen großen Fortschritten am CSR-Projekt und damit auch zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Insbesondere die Beiträge der im Folgenden aufgeführten Personen sind nicht zu vernachlässigen.

Ich danke Prof. Klaus Blaum, der mir die Durchführung dieser interessanten und herausfordernden Arbeit in seiner Abteilung ermöglicht und mit seiner hervorragenden Betreuung und hilfreichen Kommentaren geholfen hat.

Ebenso danke ich Prof. Andreas Wolf, in dessen Teilgruppe der Abteilung Blaum diese Arbeit durchgeführt wurde, für die Betreuung und Unterstützung bei der Durchführung dieses Projekts.

Dr. Robert von Hahn und Dr. Manfred Grieser danke ich für die sehr gute Betreuung und hilfreichen Diskussionen während dieser Arbeit. Ihre Verbesserungsvorschläge beim Schreiben dieser Arbeit haben mir sehr geholfen.

Ich danke meinen aktuellen und ehemaligen Büro- und CSR/CTF-Kollegen Felix Berg, Sebastian Menk, Dr. Michael Lange, Dr. Michael Kamp-Froese, Dr. Felix Laux und Robin Bastert für die angenehme Büroatmosphäre und zahlreichen fruchtbaren Diskussionen. Ihr wart eine große Hilfe beim Ertragen gewisser Rückschläge bei diesem Projekt.

Frank Müller danke ich für die Geduld, Organisation und schnelle Bearbeitung meiner Anfragen und Änderungswünsche zahlreicher CSR-Komponenten, die letztlich dazu beigetragen haben, dass dieses Projekt bisher und damit auch diese Arbeit erfolgreich verlaufen sind.

Außerdem danke ich dem ehemaligen Leiter der Werkstatt Volker Mallinger und seinem Nachfolger Thorsten Spranz sowie ihrem Stellvertreter Martin Beckmann, für die unbürokratische und schnelle Bearbeitung zahlreicher Sonderwünsche bei der Fertigung einzelner CSR-Komponenten und Beratung in Werkstoff- und Fertigungsfragen.

Ich danke den Mitarbeitern der Beschleunigerwerkstatt und des Kryolabors Karl Hahn, Rainer Fleckenstein, Steffen Vogel, Dirk Kaiser und Michael Frauenfeld für die tatkräftige Unterstützung beim bisher erfolgreichen Aufbau des CSR und ins-

besondere für die schnelle unproblematische Hilfe beim kurzfristigen Optimieren einiger CSR-Komponenten.

Oliver Koschorreck danke ich für die Unterstützung bei elektronischen Problemen und insbesondere für die Hilfe bei der Installation, den Tests und der Optimierung der Hochspannungskomponenten, die leider sehr viel länger gedauert haben als erwartet.

Besonderer Dank gilt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, die mir durch ihre Unterstützung das Physikstudium und damit letztlich auch diese Arbeit erst möglich haben.

Schließlich möchte ich mich bei meiner Freundin Julia für ihre Unterstützung abseits der Arbeit und Toleranz gegenüber ungewöhnlichen Arbeitszeiten und Prioritäten bedanken.

