

1 Organisation

1.1 Anreise

Ich habe mich für eine Anreise mit der Bahn nach Genf entschieden, auch da ich so für die Mobilität vor Ort mein Fahrrad mitnehmen konnte. Bei einer Buchung von etwa drei Monaten im Voraus unter Ausnutzung des BahnCard 25 Rabatts und des Sparpreises Europa, habe ich etwa 150 € für die Hin- und Rückfahrt inklusive Fahrrad gezahlt. Da in Fernverkehrszügen Fahrradplätze reserviert werden müssen, ist eine Buchung nur am Schalter möglich. Die Anreise von Erlangen aus dauerte etwa 10 Stunden und funktionierte problemlos. Ohne Fahrrad sind auch schnellere Verbindungen nach Genf möglich. In Genf konnte ich mein Fahrrad in der Straßenbahn und im Bus mitnehmen um meine Wohnung zu erreichen.

1.2 Unterkunft

Die Mietpreise in Genf befinden sich grundsätzlich auf einem hohen Niveau. Außerhalb der Stadt, insbesondere auf französischer Seite der Grenze, sind günstigere Unterkünfte zu finden. Ich habe mich für ein privates Zimmer entschieden, das ich über das Portal "RoomLaLa" gefunden habe. Dieses befand sich etwa 7 km vom CERN Campus entfernt in der französischen Gemeinde Thoiry, die Monatsmiete betrug 500 €, hinzu kam eine einmalige Servicegebühr des Portals von 100 €.

1.3 Sprachkenntnisse

In Vorbereitung auf den Aufenthalt habe ich einen Französisch A1 Kurs belegt. Auch wenn französische Sprachkenntnisse für die Arbeit am CERN nicht unbedingt erforderlich sind, sind grundlegende Französischkenntnisse im Alltag, zum Beispiel beim Einkaufen oder für die Benutzung des Nahverkehrs sehr hilfreich.

1.4 Registrierung am CERN

Die formale Registrierung am CERN gestaltete sich recht aufwendig, da es bisher keinen Assoziationsvertrag zwischen dem CERN und meiner Universität, der FAU, bestand. Eine meiner Professorinnen erklärte sich bereit die benötigte Rolle eines Teamleaders an der Heimatuniversität für mich zu übernehmen, wofür sich diese ebenfalls beim CERN registrieren musste. Dazu mussten eine Erklärung ihrer Zugehörigkeit zur Universität, ein Registrierungsformular und Kopie des Personalausweises, sowie ein Assoziationsvertrag ans CERN übermittelt werden. Nach einer Bearbeitung durch das User's Office des CERNs, konnte ein Online Account erstellt werden, in dem die Professorin meine Registrierung freischalten konnte. Für diese musste ich ebenfalls ein Registrierungsformular, sowie ein Formular, das bestätigt, dass ich an der FAU immatrikuliert bin, einreichen. Weiterhin benötigte ich ein Formular des Strahlenschutzbeauftragten der Heimatuniversität, in dem bestätigt wurde, dass ich geeignet bin, um im Kontrollbereich zu arbeiten, sowie die jährliche Höchstdosis festgelegt wird. Zur Ausstellung dieses Formulars an meiner Universität waren eine Strahlenschutzschulung, sowie die Beantragung eines Strahlenpasses

notwendig. Nach meiner Ankunft am CERN, habe ich dort eine weitere Strahlenschutzbelehrung und diverse andere Sicherheitsbelehrungen erhalten und konnte danach mein persönliches Dosimeter abholen, durch das ich Zugang zu den Laboren erhalten habe.

2 Projekt

2.1 ISOLDE

Die ISOLDE Anlage (kurz für **I**sotope **S**eperator **O**n **L**ine **D**evice) ist eine seit 1967 betriebene Ionenquelle am CERN, der europäischen Organisation für Kernforschung. Während ihrer mehr als fünfzigjährigen Laufzeit, haben die von der Quelle gespeisten Experimente entscheidend zum Verständnis der Atom- und Kernstruktur beigetragen, beispielsweise durch erhebliche Erweiterung der Nuklidkarte. Auch heute noch wird an dieser Anlage Kernforschung betrieben, beispielsweise mit dem Ziel das Schalenmodell der Atomkerne zu verfeinern und die Mechanismen hinter diesem zu verstehen. Daneben werden auch zahlreiche Experimente aus der nuklearen Astrophysik, Festkörperphysik und Strahlenmedizin durchgeführt. An der Anlage arbeiten derzeit etwa 450 Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen.

In ihrem heutigen Aufbau werden für ISOLDE Protonen des Proton Synchrotron Boosters (PSB) verwendet, der auch als einer der Vorbeschleuniger für das LHC dient. Die Protonen mit einer Energie von 1,4 GeV werden auf massive Targets, zum Beispiel aus Urancarbid gerichtet und erzeugen dort durch Kernspaltung, Spallation und Fragmentierung verschiedenste Radionuklide. Insgesamt können beinahe 1100 Radionuklide von mehr als 70 Elementen erzeugt werden. Die erzeugten Nuklide werden nun ionisiert, beschleunigt und nach Masse und Element selektiert. Anschließend werden die Ionen zu den verschiedenen festen oder mobilen Experimenten in der Experimentierhalle transportiert, wo verschiedenste Messungen durchgeführt werden. Eines der Experimente, das nach dem langen LHC Shutdown 2021 an der Ionenquelle in Betrieb gehen soll, ist MIRACLS, an dem ich während meinem Forschungsprojekt gearbeitet habe.

2.2 MIRACLS

Das Experiment MIRACLS (**M**ulti **I**on **R**eflection **A**pparatus for **C**LS) soll die Sensitivität herkömmlicher kollinearer Laserspektroskopie (CLS) erhöhen. Bei der CLS wird ein schmalbandiger Laser mit einem Ionenstrahl überlappt. Entspricht die Frequenz des Lasers im Ruhesystem des vorbeifliegenden Ions, der Frequenz eines elektronischen Übergang des Ions, wird dieses Ion durch den Laser angeregt. Geht das Ion anschließend in einen energetisch tiefer liegenden Zustand über wird ein Photon emittiert. Dieses wird von Photomultiplier Tubes (PMT) detektiert. Wird die Laserfrequenz durchgestimmt und die Anzahl der Photonen in Abhängigkeit dieser gemessen, kann die elektronische Struktur, insbesondere auch die Hyperfeinstruktur (HFS), die durch Interaktion des Kerns mit den Elektronen entsteht, dieses Ions bestimmt werden. Aus der HFS lassen sich der Kernspin, die elektromagnetischen Momente und der mittlere quadratische Ladungsradius des Ions mit hoher Genauigkeit bestimmen.

Die Genauigkeit der Daten für exotische Nuklide ist durch deren geringe Produktionsraten im ISOLDE Experiment begrenzt. Der Ansatz des MIRACLS Experiment ist

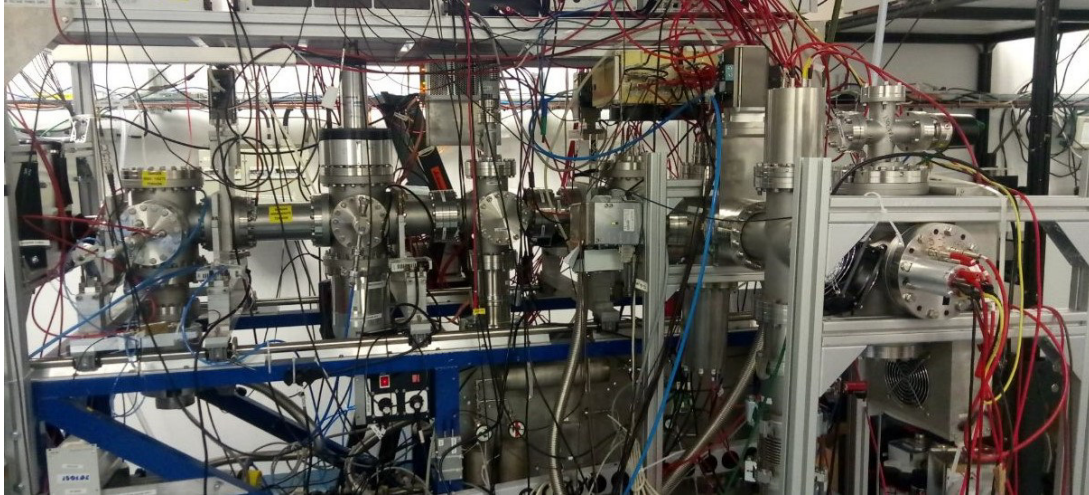


Figure 1: Foto des Aufbaus des MIRACLS Experiments. Rechts im Vordergrund befindet sich die Ionenquelle. Im linken Teil des Bildes befindet sich das MR-ToF.

daher, die Ionen nicht nur im einmaligen Durchflug zu vermessen, sondern die Ionen vielfach zu reflektieren und damit die Interaktionszeit zwischen Laser und Ionenstrahl bis zur Lebensdauer des Ions auszudehnen. Die Reflexion der Ionen findet in einem Multi-Reflection Time of Flight (MR-ToF) Gerät statt. In diesem reflektieren elektrostatische Spiegel die Ionen bis zu mehreren tausend Malen.

In Testmessungen hat sich die Idee des MIRACLS Experiment als erfolgreich herausgestellt. In diesen wurde ein aus anderen Experimenten vorhandenes, niederenergetisches MR-ToF Gerät in ein CLS Experiment integriert und die grundsätzliche Eignung für die Vermessung der Hyperfeinstruktur von Ionen, am Beispiel von $^{24}\text{Mg}^+$, $^{25}\text{Mg}^+$ und $^{26}\text{Mg}^+$ Ionen, demonstriert.

Für eine genaue Auflösung der Linienbreite der Übergänge, ist es vorteilhaft, die Experimente bei hohen Ionengeschwindigkeiten und damit hohen Ionenenergien durchzuführen, da die Dopplerverbreiterung der Linien eine Proportionalität von $\frac{1}{\sqrt{E}}$ aufweist. Daher ist es Ziel der MIRACLS Gruppe ein MR-ToF Gerät zu entwickeln, das Ionenenergien von bis zu 30keV erlaubt.

2.3 Messkampagnen der MIRACLS Gruppe

Derzeitiges Ziel der Gruppe ist es, die Präzision des Aufbaus zur Vermessung der Spektrallinien anhand von bekannten Ionen zu bestimmen, sowie zu optimieren. Dazu werden wiederholt Messkampagnen durchgeführt, in dem eine oder mehrere Parameter untersucht werden, bevor wieder Umbauarbeiten an Teilen des Set-Ups oder Veränderungen der Einstellungen von Komponenten vorgenommen werden. Während dieser Messkampagnen, habe ich eine Kurzanalyse der aufgenommenen Daten durchgeführt, um die Eignung der aktuellen Einstellungen festzustellen, sowie Entscheidungen zu treffen, ob Messreihen fortgesetzt werden sollen. Dazu habe ich sowohl Software verwendet, die die Arbeitsgruppe geschrieben hat, als auch kleinere Skripte selbst in Python programmiert.

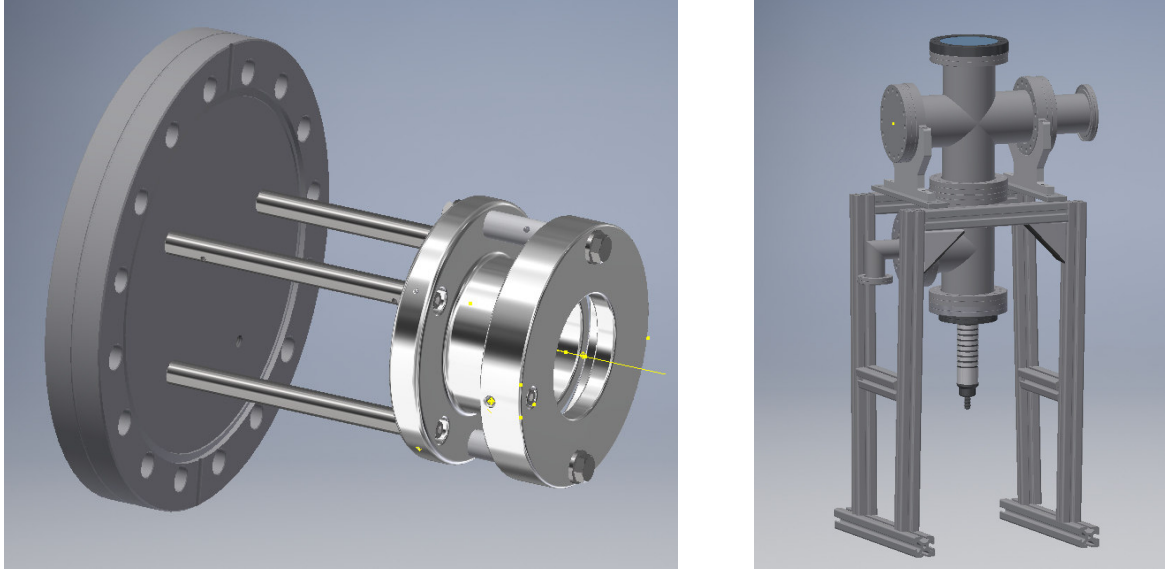


Figure 2: Zeichnungen des experimentellen Aufbaus. Links der Flange mit dem Elektrodenpaar und zwei Isolatoren als Abstandshalter, rechts der Teststand, bestehend aus einem Vakuumkreuz, an dem sich oben ein Sichtfenster, links der Flange mit den Elektroden, rechts die Vakuumpumpe und unten die Hochspannungsdurchführung befindet.

2.4 Eigenes Projekt

Das Ziel meines Projektes war es, Elektroden für die Ionenspiegel des 30 keV MR-ToFs zu testen. Für diese hohen Ionenenergien sind auch hohe Spannungen an den Elektroden bei gleichzeitig kleinen Abständen zwischen den Elektroden notwendig, so dass es leicht zu Überschlägen kommen kann. Daher war es das Ziel, zwei, der aktuell zehn pro Spiegel geplanten Elektroden, in einer separaten Vakuumkammer zu montieren, ein Konditionierungsverfahren auf die Elektroden anwenden, das die Fähigkeit Spannungen zu halten signifikant erhöhen soll, und die Durchschlagfestigkeit zu vermessen. Durch diese Messungen kann festgestellt werden, ob das aktuelle Design der Ionenspiegel umsetzbar ist.

In einem ersten Schritt habe ich die Vakuumkomponenten des Set-Ups gereinigt und zusammengesetzt. Die Elektroden bestehen aus zwei elektropolierten Edelstahlzylindern, die durch Isolatoren auf Abstand gehalten werden. Die Elektroden sind an einem Flange befestigt und in einem Vakuumkreuz platziert. Oben auf dem Kreuz befand sich ein Sichtfenster durch das die entstehenden Funken mit einer Webcam gefilmt wurden, an das Kreuz wurde nach unten ein weiteres T-Stück angeschlossen, an das mit einem Winkelstück ein Sensor zur Messung des Drucks im Ultrahochvakuum angeschlossen wurde, sowie die Durchführung für die Hochspannungsanschlüsse. An den verbleibenden Eingang des Kreuzes wurde die Turbomolekularpumpe angeschlossen. Diese kann erst ab einem Druck von etwa 10^{-2} mbar arbeiten und benötigt daher eine weitere Pumpe, die Vorvakuumpumpe. An die Vorvakuumpumpe wurde ein Drucksensor für höhere Drücke angeschlossen, ein Ventil zum Öffnen und Schließen der Verbindung zur Turbomolekularpumpe sowie ein Ventil zum Fluten der Kammer mit Stickstoff. Um den eigentlichen Aufbau wurde als Hochspannungsschutz ein geerdeter Faraday-Käfig errichtet.

Zum Testen der Elektroden, wurde die angelegte Spannung schrittweise erhöht, bis Durchschläge beobachtet wurden. Dabei wurden Spannung und Strom der Spannungsquelle

kontinuierlich am Computer aufgezeichnet. Der erste Durchschlag wurde bei 29kV festgestellt. Diese Spannung konnte durch sogenanntes Stromkonditionieren gesteigert werden. Dazu wird die Spannung in kleinen Schritten erhöht, bis es zu einem Durchschlag kommt. Handelt es sich um einen einzelnen Durchschlag, wird die Spannung weiter in kleineren Schritten erhöht. Kommt es zu mehreren Durchschlägen wird die Spannung reduziert und mehrere Minuten angelegt gelassen. Anschließend wird erneut die Spannung erhöht. Durch dieses Prozedere konnte innerhalb eines Tages die Durchschlagsspannung auf 40,5kV erhöht werden. Eine Spannung von 40kV konnte anschließend auch ohne schrittweises Erhöhen, sondern durch eine Spannungsrampe mit einer Steigung von 250V/s ohne Überschläge erreicht werden. In einer Auswertung der aufgezeichneten Videos stellte sich heraus, dass ein Großteil der Überschläge am Kabel, das die Elektroden mit der Spannungsdurchführung verbindet, auftreten, insbesondere an Punkten, wo dieses die geerdete Innenwand der Vakuumkammer berührt. Dies sollte bei einem zukünftigen Elektrodendesign daher vermieden werden.

3 Fazit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ich ein Forschungsprojekt am CERN nur empfehlen kann. Nicht nur war die Arbeit in der MIRACLS Gruppe sehr interessant und ich konnte viele neue Methoden erlernen, ich hatte auch die Gelegenheit zahlreiche weitere Experimente am CERN kennen zu lernen, sowie spannende Vorträge und Diskussionen zu besuchen. Die Zusammenarbeit von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus über 100 Nationen weltweit machen das CERN zu einer ganz besonderen Forschungsumgebung. Ein weiteres persönliches Highlight waren die CERN Open Days, bei den ich als ehrenamtlicher Helfer der Öffentlichkeit von der spannenden Forschung erzählen durfte, die am CERN passiert.