



# **Institut für Angewandte Physik**

## **Jahresbericht 2021/2022**



Cover: Foto des Herznebels, aufgenommen mit einem 11" Rowe-Ackermann-Schmidt Astrograph. Insgesamt wurde 22 Stunden mit Schmalbandfiltern (Ha, OIII, SII) und einem UHC-Breitbandfilter belichtet. Die Rohdaten werden in einem neuen Versuch des Laborpraktikums am IAP zur Bildbearbeitung verwendet.

Liebe Mitglieder und Freunde des Instituts für Angewandte Physik,

die letzten zwei Jahre waren stark von der Pandemie geprägt. Trotz dieser Widrigkeiten war es möglich, sowohl den Lehr- als auch den Forschungsbetrieb weitestgehend am Laufen zu halten. Dies wäre nicht ohne den unermüdlichen Einsatz unserer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter möglich gewesen. Wir möchten uns dafür bei allen bedanken, insbesondere auch bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern in den technisch-administrativen Bereichen. Durch den vorbildlichen Einsatz konnten in vielen wissenschaftlichen Bereichen wesentliche Fortschritte erzielt werden. Nach größeren Schwierigkeiten beim FRANZ-Projekt konnten in den letzten zwei Jahren hier Ergebnisse erreicht werden, die Anlass zur begründeten Hoffnung geben, in den nächsten 18 Monaten den geforderten 2 MeV Protonenstrahl am Target abliefern zu können.

Personell gab es in unserem Institut einige Veränderungen. Wir konnten zum Beginn des Sommersemesters 2022 Prof. Dr. Camilla Hansen als neue Professorin für beobachtende Astronomie begrüßen. Zum 30. September 2022 wurde Prof. Dr. Ulrich Ratzinger in den Ruhestand verabschiedet. Für seine Verdienste um das Institut und sein Forschungsgebiet möchten wir ihm herzlich danken.

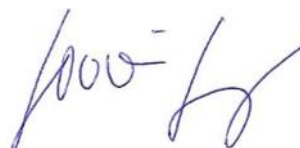
Auch in Zukunft werden große Herausforderungen auf uns zukommen. Beispielhaft möchten wir die Energiekrise nennen, die auch nicht spurlos an uns vorübergehen wird. Wir sind uns aber sicher, dass wir auch das mit gemeinsamem Einsatz meistern werden.

Wir wünschen Ihnen und Ihren Familien für die Weihnachtszeit und für das neue Jahr alles Gute.

Frankfurt am Main, Dezember 2022



Prof. Dr. Holger Podlech  
Geschäftsführender Direktor



Prof. Dr. Joachim Jacoby  
Stv. Geschäftsführender Direktor

## Inhaltsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Inhaltsverzeichnis .....   | 4  |
| 1 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter .....   | 6  |
| 1.1 Geschäftsführender Direktor.....   | 6  |
| 1.2 Emeritierte und pensionierte Professoren .....   | 6  |
| 1.3 Professoren .....  | 6  |
| 1.4 Honorarprofessoren, außerplanmäßige Professoren, Privatdozenten .....  | 6  |
| 1.5 Gastwissenschaftler.....   | 6  |
| 1.6 Ständige Wiss. Mitarbeiter, Wiss. Assistenten, Lehrbeauftragte, Doktoranden.....   | 6  |
| 1.7 Technische Angestellte und Verwaltungsangestellte.....   | 7  |
| 1.8 Werkstatt.....   | 7  |
| 1.9 Kandidatinnen und Kandidaten für Diplom, Bachelor, Master und Staatsexamen .....   | 7  |
| 2 Professor Dr. Gerhard Lander-Stiftung .....  | 9  |
| 3 Projektbeschreibungen.....   | 9  |
| 3.1 Experimentelle Astrophysik (AG Prof. Dr. R. Reifarth) .....  | 9  |
| 3.1.1 Kurzbeschreibung der Arbeitsgruppe .....   | 9  |
| 3.1.2 Aktivitäten am Van de Graaff Beschleuniger des IKF .....   | 9  |
| 3.1.3 Aktivitäten am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung .....   | 10 |
| 3.2 Beobachtende Astronomie (AG Prof. Dr. C. Hansen).....  | 11 |
| 3.2.1 Kurzbeschreibung der Arbeitsgruppe .....   | 11 |
| 3.2.2 Neue Einrichtungen für Beobachtungen – Teleskope und Spektrographen .....  | 12 |
| 3.2.3 Weitere Forschungsvorhaben .....   | 13 |
| 3.3 Beschleunigerphysik an FRANZ.....  | 13 |
| 3.3.1 Frankfurter Neutronenquelle FRANZ – Schrittweise Inbetriebnahme und Strahlbetrieb .....  | 13 |
| 3.4 Beschleunigerphysik (AG Prof. Dr. H. Podlech) .....  | 15 |
| 3.4.1 Kurzbeschreibung der Arbeitsgruppe .....   | 15 |
| 3.4.2 Test des 175 MHz cw RFQ Prototyps .....  | 15 |
| 3.4.3 High Brilliance Neutron Source HBS .....   | 16 |
| 3.4.4 Entwicklung des supraleitenden Schwerionenlinacs der GSI .....   | 17 |
| 3.4.5 Präparation von supraleitenden CH-Strukturen .....   | 18 |
| 3.5 Beschleunigerphysik (AG Prof. Dr. U. Ratzinger).....   | 20 |
| 3.5.1 Kurzbeschreibung der Arbeitsgruppe .....   | 20 |
| 3.5.2 Strahldynamische Entwicklungen.....  | 20 |
| 3.5.3 Beschleunigerstrukturentwicklung .....   | 21 |
| 3.6 Plasmaphysik (AG Prof. Dr. J. Jacoby) .....  | 29 |
| 3.6.1 Kurzbeschreibung der Arbeitsgruppe .....   | 29 |
| 3.6.2 Untersuchung der Wechselwirkung eines Ionenstrahls höchster Intensität mit einem dichten und hochionisierten Plasmastraffer sowie Optimierung des Strippers für FAIR ..... | 29 |
| 3.6.3 Konstruktion, Untersuchung und Einsatz eines Plasmafensters einer UNILAC Strahlzeit an der GSI .....   | 31 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.6.4 | PRIOR (Proton Microscope for FAIR): Aufbau und Untersuchung von Unterwasser explodierenden Drähten mittel PRIOR..... | 32 |
| 3.6.5 | Aufbau und Untersuchung einer Plasmalinse zur Fokussierung eines Protonenstrahls bei LIGHT @ FAIR .....              | 33 |
| 3.6.6 | Optische Ionenstrahldiagnostik bei APPA.....   | 34 |
| 4     | Feinmechanische Institutswerkstatt .....   | 35 |
| 5     | Lehrveranstaltungen (SoSe 2021 bis WiSe 2022/23) .....   | 39 |
| 5.1   | Vorlesungen und Übungen.....   | 39 |
| 5.1.1 | Sommersemester 2021 .....  | 39 |
| 5.1.2 | Wintersemester 2021/2022.....  | 39 |
| 5.1.3 | Sommersemester 2022 .....  | 39 |
| 5.1.4 | Wintersemester 2022/2023.....  | 40 |
| 5.2   | Praktika.....  | 40 |
| 5.2.1 | Sommersemester 2021 .....  | 40 |
| 5.2.2 | Wintersemester 2021/2022.....  | 40 |
| 5.2.3 | Sommersemester 2022 .....  | 41 |
| 5.2.4 | Wintersemester 2022/2023.....  | 41 |
| 5.3   | Seminare .....   | 41 |
| 5.3.1 | Sommersemester 2021 .....  | 41 |
| 5.3.2 | Wintersemester 2021/2022.....  | 41 |
| 5.3.3 | Sommersemester 2022 .....  | 42 |
| 5.3.4 | Wintersemester 2022/2023.....  | 42 |
| 6     | Abgeschlossene Examensarbeiten.....  | 43 |
| 6.1   | Dissertationen.....  | 43 |
| 6.2   | Masterarbeiten.....  | 43 |
| 6.3   | Bachelorarbeiten.....  | 44 |
| 7     | Geförderte Forschungsprojekte und Kooperationen .....  | 47 |
| 8     | Mitarbeit in Fachausschüssen, Fachgruppen und Gremien.....   | 48 |
| 9     | Mitarbeit in Konferenzgremien .....  | 49 |
| 10    | Besondere Ereignisse.....  | 49 |
| 11    | Publikationen.....   | 50 |
| 11.1  | Astrophysik .....  | 50 |
| 11.2  | Beschleunigerphysik.....   | 53 |
| 11.3  | Plasmaphysik.....  | 56 |

# 1 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter

## 1.1 Geschäftsführender Direktor

Prof. Dr. H. Podlech

stellvertretend: Prof. Dr. J. Jacoby

## 1.2 Emeritierte und pensionierte Professoren

Prof. Dr. A. Lacroix

Prof. Dr. U. Ratzinger

Prof. Dr. A. Schempp

## 1.3 Professoren

Prof. Dr. C. Hansen

Prof. Dr. H. Podlech

Prof. Dr. R. Reifarth

Prof. Dr. J. Jacoby

Prof. Dr. U. Ratzinger

## 1.4 Honorarprofessoren, außerplanmäßige Professoren, Privatdozenten

Prof. Dr. T. Haberer, Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum (HIT)

Prof. Dr. H. Reiningger, ATIP GmbH, Frankfurt am Main

Apl. Prof. Dr. O. Rosmej, GSI Darmstadt

Apl. Prof. Dr. G. Franchetti, GSI Darmstadt

PD Dr. P. Hülsmann, DESY

PD Dr. P. Neumeyer, GSI Darmstadt

PD Dr. M. Röllig

PD Dr. K. Schnell

PD Dr. C. Zhang

## 1.5 Gastwissenschaftler

Dr. Ali Almomani

## 1.6 Ständige Wiss. Mitarbeiter, Wiss. Assistenten, Lehrbeauftragte, Doktoranden

Dr. A. Ates

Dr. B. Bohlender

Dr. M. Droba

Dr. E. Fol

Dr. H. Hähnel

Dr. M. Iberler

Dr. C. Langer

Dr. Arthur A. Puls

Dr. K. Schulte-Urlichs

Dr. M. Schwarz

Dr. B. Thomas

Dr. K. Volk

Dr. M. Weigand

T. Ackermann

M. Bennedikt

P. Britten

P. Christ

T. Conrad

M. Dehmer

A. Engeda

M. Gyrdymov

J. D. Kaiser

S. Lamprecht

Dr. S. Artikova

Dr. M. Busch

Dr. P. Erbacher

Dr. K. Göbel

Dr. T. Heftrich

Dr. K. Kümpel

Dr. O. Meusel

Dr. S. Reimann

Dr. M. Schütt

Dr. M. Syha

Dr. R. Tiede

Dr. M. Volknandt

Dr. S. Zähler

K. Al-Khasawneh

L. Bott

B. Brückner

K. Cistakov

B. Dedic

A. J. Dimoff

B. Fathinejad

C. Hock

D. Kurtulgil

E. Lorenz

|                    |              |
|--------------------|--------------|
| M. Margraf         | R. de Melo   |
| A. Michel          | P. Müller    |
| A. Müller-Münster  | N. Petry     |
| M. Reich           | A. Schichtel |
| H. Schulte         | E. Sunar     |
| P. Mahmoodi Tavana | K. Thoma     |
| D. Vescovi         | S. Wagner    |
| H. Wang            |              |

## 1.7 Technische Angestellte und Verwaltungsangestellte

|            |            |
|------------|------------|
| D. Bänsch  | N. Fischer |
| A. Hergt   | J. Jasic   |
| T. Metz    | L. Quist   |
| S. Rodrian | K. Schäfer |
| M. Scholz  | C. Wagner  |

## 1.8 Werkstatt

|             |            |
|-------------|------------|
| W. Billjött | E. Binner  |
| R. Gössling | S. Reploeg |
| V. Hammer   | P. Hartner |
| R. Klein    |            |

## 1.9 Kandidatinnen und Kandidaten für Diplom, Bachelor, Master und Staatsexamen

|                |                |
|----------------|----------------|
| T. Abdul       | E. Ademi       |
| H. Arda        | P. Arnold      |
| P. Beloiu      | M. Benedik     |
| G. Blank       | Y. Bonilla     |
| E. Boos        | D. Born        |
| E. Borris      | L. Brandenburg |
| P. Braun       | L. C. Braun    |
| M. Breidt      | V. Britten     |
| A. Budovska    | S. Busch       |
| R. Busch       | A. Curic       |
| S. Dellmann    | I. Deuter      |
| T. Dönges      | M. Dragun      |
| L. Düster      | A. Elbe        |
| M. Fröhlich    | M. Gail        |
| L. Geiger      | F. Gellien     |
| V. Gerasimov   | F. Ghaznavi    |
| N. Gimbel      | A. Glock       |
| A. Görtz       | A. Grein       |
| B. Gutsche     | M. Gyrymov     |
| M. Häfner      | M. Händler     |
| A. Härth       | M. Hashemi     |
| S. Heil        | A. Heine       |
| J. Henkmann    | F. Heppner     |
| B. Heybeck     | A. Ho          |
| Ch. Hübinger   | A. Huhn        |
| B. Kammerbauer | T. Kausch      |
| T. Kisselbach  | J. Klein       |
| T. Knautz      | S. Krasilovska |
| T. Kuttner     | L. Laghchioua  |
| A. Lauterbach  | D. M. Leber    |
| L. Manganelli  | D. Mann        |

K. Manneberger  
A. el Mard  
S. Milejski  
T. Olsen  
T. Pfeiffer  
J. Rausch  
J. Richter  
J. Schinke  
M. Schleifenbaum  
T. Schusser  
A. Sherjan  
T. Staab  
J. Strahl  
S. Tavoosli  
M. Werle  
C. Wirth

M. März  
M. Margraf  
R. Mourad  
N. Pashnina  
S. Popp  
B. Reetz  
A. Ruffer  
J. Schirmbeck  
G. Schmidt  
S. Sheriff  
A. Schichtel  
J. Storch  
D. Strecker  
T. Waesch  
F. Winter



## 2 Professor Dr. Gerhard Lander-Stiftung

Seit 2011 fördert die Professor Dr. Gerhard Lander-Stiftung Wissenschaft und Lehre im Institut für Angewandte Physik. In den beiden Berichtsjahren gab es keine Förderung. Der Hauptgrund lag in der Neubestellung des Stiftungsvorstands, die aufgrund der Pandemie deutlich länger dauerte als zu erwarten war. Der neue Vorstand besteht aus folgenden Personen:

Edith Christoffer (Vorsitz)

Tobias Pfeil

Prof. Dr. Holger Podlech

Die Stiftung beabsichtigt, im Jahr 2023 ihre Fördertätigkeit und damit die Zweckerfüllung wiederaufzunehmen und damit die vertrauensvolle Zusammenarbeit der Stiftung mit dem Institut für Angewandte Physik wieder aufleben zu lassen. In diesem Zusammenhang wird 2023 wieder ein Lander-Tag stattfinden, bei dem die Projekte vorgestellt werden sollen, welche eine Förderung aus der Stiftung beantragen.

## 3 Projektbeschreibungen

### 3.1 Experimentelle Astrophysik (AG Prof. Dr. R. Reifarth)

#### 3.1.1 Kurzbeschreibung der Arbeitsgruppe

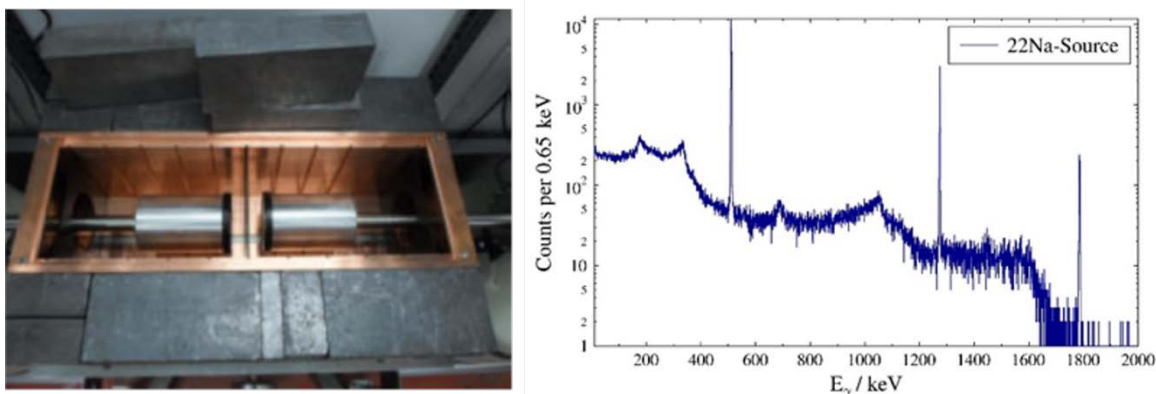
Die Schwerpunkte der Forschungstätigkeiten der Arbeitsgruppe Experimentelle Astrophysik sind Experimente im Rahmen der nuklearen Astrophysik, insbesondere die Frage nach dem Ursprung der Elemente. Die meisten Elemente wurden und werden während der verschiedenen Stadien der Sternentwicklung produziert. Ein genaues Verständnis dieser Syntheseprozesse erlaubt daher tiefe Einblicke in die Abläufe im Inneren von Sternen, die anderweitig nicht zugänglich sind. Hierfür ist es nötig, eine Reihe von Kernreaktionen unter stellaren Bedingungen im Labor zu bestimmen. Wir interessieren uns hierbei sowohl für Teilchen-induzierte (Neutronen, Protonen,  $\alpha$ -Teilchen), als auch für Photonen-induzierte Reaktionen in verschiedenen Energiebereichen. Daher führen wir kernphysikalische Experimente an einer Vielzahl von Anlagen durch. Zu den Großforschungseinrichtungen gehören hierbei das GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Darmstadt, mit dem LAND/R3B-Aufbau und den Ionenspeicherringen ESR und CRYRING, das CERN, Genf, Schweiz, mit der n\_TOF-Anlage und das Los Alamos National Laboratory, New Mexico, U.S.A., mit der LANSCE-Einrichtung. In den vergangenen Jahren wurden regelmäßig auch einige kleinere Anlagen in das experimentelle Programm aufgenommen, so z.B. der Forschungsreaktor TRIGA der Johannes Gutenberg-Universität.

#### 3.1.2 Aktivitäten am Van de Graaff Beschleuniger des IKF

Die Aktivitäten an den Anlagen der Goethe Universität werden stark von der Deutschen Forschungsgemeinschaft und der German-Israeli Foundation for Scientific Research and Development gefördert.

Der Van de Graaff Beschleuniger am Institut für Kernphysik Frankfurt des Fachbereichs Physik eignet sich hervorragend zur Entwicklung neuer experimenteller Methoden im Bereich der Niederenergiekernphysik. Insbesondere neue Methoden zur Emulation stellarer Neutronenspektren lassen sich hier dank der großartigen Unterstützung der Betriebsmannschaft testen. Am häufigsten verwenden wir die Aktivierungsmethode, bei der (meist) stabile Isotope mit Neutronen bestrahlt werden. Die dabei entstehenden instabilen Isotope können anschließend mit hochempfindlichen Detektoren nachgewiesen werden,

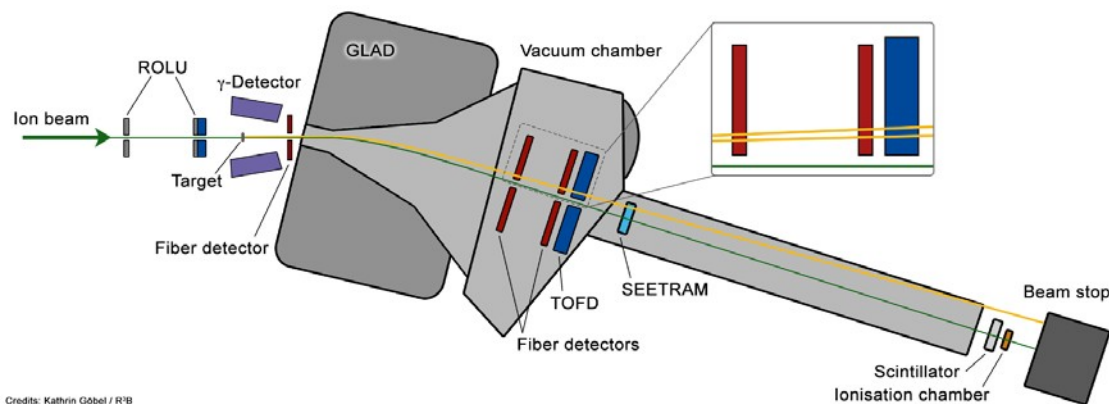
Die Aktivitäten eignen sich insbesondere zur Ausbildung herangehender Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Deshalb wurden hochmoderne Germanium Detektoren, sogenannte „Boad Energy Germanium Detectors“, angeschafft, mit deren Hilfe nun am Van de Graaff erzeugte Aktivitäten routinemäßig nachgewiesen werden können (Abb. 1).



**Abb. 1:** Links ist ein Foto des neuen, flexiblen Aufbaus zu Gamma-Detektion gezeigt. Mit hervorragender Unterstützung unserer Werkstatt wurden die Detektoren beweglich innerhalb einer Abschirmung aus Blei und Kupfer montiert. Das rechte Bild zeigt ein Spektrum für einen der Detektoren. Die x-Achse entspricht der deponierten Energie in keV, die y-Achse der Anzahl der Ereignisse. Die deutlich sichtbaren Linien bei 511 keV hat ihren Ursprung in der Positronenannihilation. Die Linie bei 1275 keV entspricht der Energie des aus der Quelle emittierten Gammas. Die Linie mit Summe 1786 keV stammt von Ereignissen, bei denen beide genannten Gammas vollständig nachgewiesen wurden.

### 3.1.3 Aktivitäten am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung

Sämtliche Aktivitäten am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung werden stark vom BMBF (Verbundforschung) und dem Land Hessen (HIC for FAIR, HFHF) gefördert. Das R3B Experiment (Reactions with Relativistic Radioactive Beams), das an der internationalen Beschleunigeranlage FAIR in Darmstadt aufgebaut wird, ist ein vielseitiger Aufbau mit hoher Effizienz, Akzeptanz und Auflösung zur kinematisch vollständigen Messung von hochenergetischen radioaktiven Strahlen. Das Messprogramm umfasst Reaktionen mit sehr kurzlebigen Isotopen, die für Kernstruktur und -dynamik, Astrophysik und technische Anwendungen hochrelevant sind.

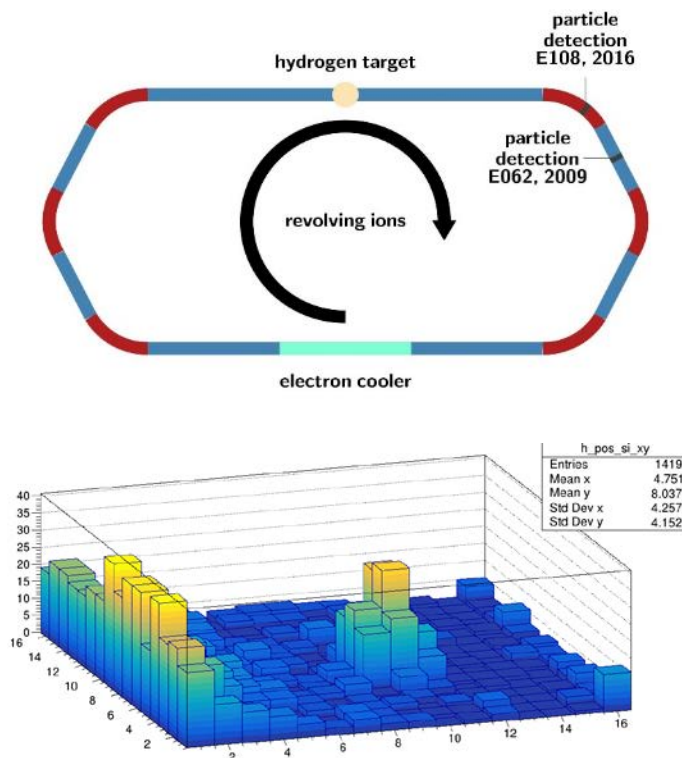


Credits: Kathrin Göbel / R<sup>3</sup>B

**Abb. 2:** Schematische Darstellung des R<sup>3</sup>B Aufbaus am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung. Im Jahr 2021 wurde mit diesem Aufbau der Coulombaufruch von <sup>16</sup>O untersucht.

Wir benutzen einem optimierten Aufbau wird zur Untersuchung der astrophysikalisch wichtigen Fusionsreaktion von 4He und 12C nach 16O (Abb. 2). Dafür werden 16O Ionen (Ion beam) auf etwa ein Viertel der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und von links in den Aufbau geschossen. Bei hinreichend hoher Anregung in einer Blei-Folie (Target) kann ein Aufbruch nach 4He und 12C erfolgen. Aus dieser zeitlichen Umkehr der Fusionsreaktion können wichtige Informationen über die Fusionsreaktion selbst geschlossen werden. Zur Detektion des Aufbruchs müssen 4He und 12C gleichzeitig mit hoher Präzision nachgewiesen werden. Ein erstes Experiment dazu fand im Frühjahr 2019 statt. Die dabei gewonnenen Erfahrungen führten zu einem optimierten Experiment im Sommer 2021. Die Daten werden derzeit ausgewertet

Der zweite Aktivitätsschwerpunkt bei GSI/FAIR ist die Untersuchung von Protoneneinfängen in umgekehrter Kinematik. Etwa seit dem Jahr 2007 treiben wir federführend ein Programm voran, um schlussendlich radioaktive Kerne im astrophysikalisch interessanten Energiebereich zu untersuchen. Diese Technik ist weltweit einmalig und im Jahr 2019 konnten die Früchte der Arbeit in einer vielbeachteten Veröffentlichung dokumentiert werden. Dabei konnten wir zeigen, dass die Fusion von Protonen mit stabilem  $^{124}\text{Xe}$  am Experimentierspeicherring der GSI in umgekehrter Kinematik untersucht werden kann. Diese Reaktion ist relevant während Supernova-Explosionen. Im Jahr 2021 konnten wir erstmalig mit einem noch weiter verbesserten Aufbau, eine Messung an einem radioaktiven Kern ( $^{118}\text{Te}$ ) vornehmen. Hier konnte die neu entwickelte Technik erstmal ihr volles Potenzial entfalten. (Abb. 3).



**Abb. 3:** Schematische Darstellung der Experimente zum Protoneneinfang in umgekehrter Kinematik am Experimentierspeicherring (ESR) am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung. Die potenziell radioaktiven Ionen werden bei niedrigen Energien im Ring gespeichert und können dort mit einem Wasserstoffgas-Target wechselwirken. Falls dabei der Einfang eines Protons erfolgt, ändert sich die Flugbahn im nächsten Dipol und das Reaktionsprodukt kann nachgewiesen werden. Im Jahr 2021 konnte erstmals ein radioaktiver Kern mit dieser Methode untersucht werden – Protoneneinfang an  $^{118}\text{Te}$  bei astrophysikalisch relevanten Energien.

## 3.2 Beobachtende Astronomie (AG Prof. Dr. C. Hansen)

### 3.2.1 Kurzbeschreibung der Arbeitsgruppe

Der Schwerpunkt dieser Gruppe liegt auf dem Verständnis des Ursprungs der Elemente, insbesondere der schweren Elemente ( $Z > 30$ ), unter Verwendung von astronomischen Beobachtungen. Die meisten schweren Elemente (Isotope) werden durch Neutroneneinfang und anschließenden Beta-Zerfall zu (hauptsächlich) stabilen Isotopen gebildet, die wir in Sternen beobachten können. Der schnelle Neutroneneinfang (r-)Prozess kann direkt bei der Verschmelzung von z.B. zwei Neutronensternen (den sogenannten Kilonovae) beobachtet werden, während der langsame Neutroneneinfang (s-)Prozess bei sehr weit entwickelten asymptotischen Riesensternen (AGB) zu beobachten ist. AGB-Sterne sind schwierig zu beobachten und zu analysieren, und Kilonovae sind selten und erfordern eine ganze Reihe von Multi-Messenger-Beobachtungen, um überhaupt entdeckt zu werden. Wir verfolgen daher hauptsächlich einen anderen indirekten Ansatz, bei dem wir alte, metallarme Sterne untersuchen, die durch Kilonovae, Supernovae, AGB und massereiche, schnell rotierende Sterne angereichert wurden - alles Objekte, die zur Bildung schwerer Elemente beitragen können. Die chemische Anreicherung durch jedes dieser Ereignisse hinterlässt spezifische chemische Häufigkeitsverhältnisse, die wir in langlebigen, massearmen Sternen nachweisen können. Diese Sterne bewahren die chemische Zusammensetzung, aus der sie entstanden sind, und eignen

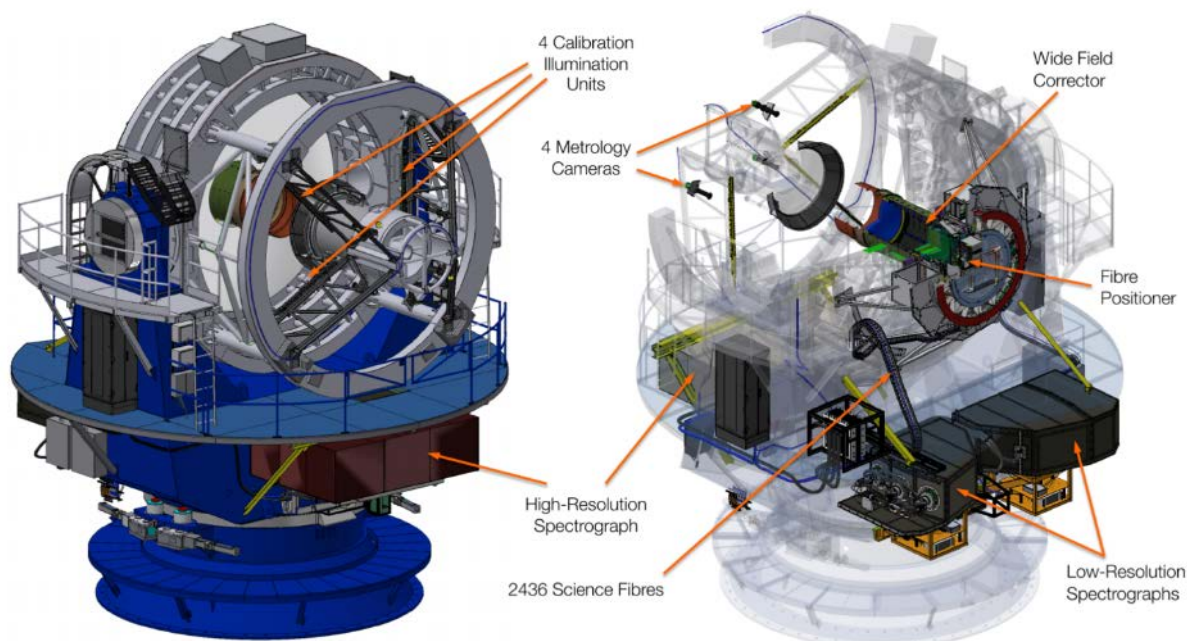
sich daher hervorragend als Prüfstand für Kernbildungsprozesse und galaktische chemische Indikatoren, da sie auch den Ort aufspüren, an dem der Neutroneneinfangsprozess stattgefunden hat. Die Häufigkeitsverhältnisse schwerer Elementpaare in metallarmen, alten Sternen ermöglichen es uns daher, indirekt zu erforschen, wo sich die schweren Elemente gebildet haben (z. B. Supernovae vs. AGB-Sterne), und wir können nachverfolgen, wie die Galaxis vom Urknall (~13,7 Gyr) an allmählich als Funktion der Zeit bis heute chemisch angereichert wurde (galaktische Archäologie). Dies ist ein wichtiger Teil von ELEMENTS und steht im Mittelpunkt der Forschung der Gruppe.

### 3.2.2 Neue Einrichtungen für Beobachtungen – Teleskope und Spektrographen

(C. J. Hansen, A. Alencastro Puls, IAP Frankfurt)

#### **4MOST - 4-Meter-Multi-Objekt-Spektroskopie-Teleskop**

Das Auffinden und Beobachten von metallarmen Sternen ist durch die Beobachtungsleistung der Teleskope und Instrumente stark eingeschränkt, da die meisten metallarmen Sterne in der Regel weit entfernt und daher leuchtschwach sind. Um die richtige Qualität für eine spektroskopische Analyse dieser metallarmen Sterne zu erhalten, benötigen wir ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis und vorzugsweise auch eine hohe Auflösung. Aktuelle und künftige Himmelsdurchmusterungen zielen darauf ab, den Himmel systematisch bis zu einer bestimmten Größenklasse abzusuchen, mit dem Ziel, bis zu dieser Größenklasse vollständig zu sein. Um an der Spitze zu bleiben, ist es wichtig, sich an diesen Durchmusterungen zu beteiligen, die sowohl verschiedene Komponenten der Milchstraße als auch kleinere Zwerggalaxien umfassen. Jedes System trägt einzigartige Fingerabdrücke der nuklearen Anreicherung. Um diese aufzuspüren, müssen wir zunächst simulieren, wozu das Instrument in der Lage sein wird und wie wir die Datenflut, die solche Durchmusterungen mit sich bringen werden, reduzieren, analysieren und in ihrer Qualität bewerten können. Mit 2400 Fasern wird das 4MOST-Instrument in einem Jahr Millionen von Sternspektren liefern. 4MOST wird voraussichtlich im Jahr 2024 starten - und bis dahin müssen alle Tests abgeschlossen und die Datenreduktionssoftware und die nachfolgenden Analysewerkzeuge eingerichtet sein.



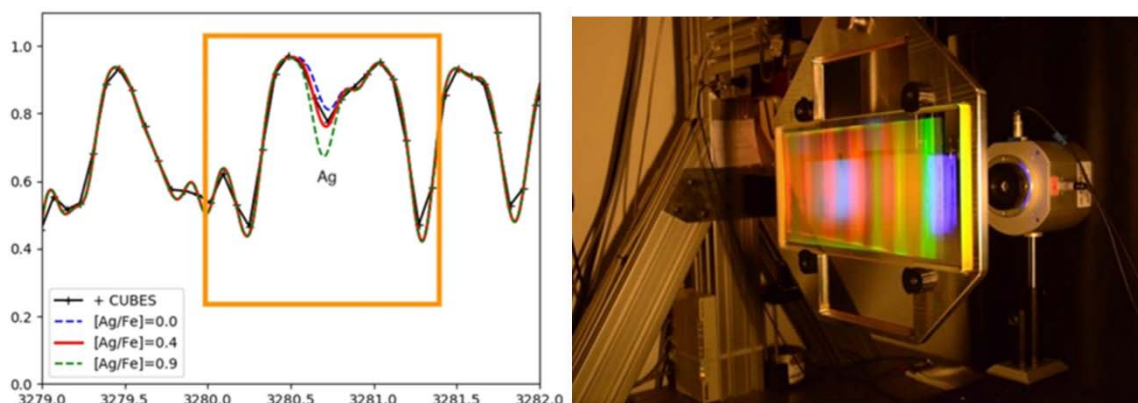
**Abb. 4:** Das 4MOST Teleskop wird in den nächsten Jahren in Betrieb genommen (voraussichtlich 2024). Es wird in Chile (ESO Paranal) and der VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy) Teleskop montiert. Mit seinem 2400 Fasern kann 4MOST innerhalb 4.2 grad<sup>2</sup> Galaktische und Extragalaktische Objekte beobachten.

#### **CUBES: Cassegrain U-Band Efficient Spectrograph**

Die meisten schweren Elemente zeigen ihre Hauptabsorptionsmerkmale im blauen und nahen UV-Bereich des elektromagnetischen Spektrums. Fasergespeiste Durchmusterungen liefern in der Regel keine guten Spektren aus diesem Bereich, da die Fasern in diesem Bereich aufgrund eines geringen Durchsatzes ineffizient sind. Eine neue Initiative, die auf das U-Band (~300-400nm) abzielt, befindet sich in der Produktionsphase. Es ist eine Herausforderung, den Wellenlängenbereich und die Auflösung gleichzeitig zu optimieren. Das Instrument wird auf dem Very Large Telescope in Chile montiert werden und in der Lage sein, ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis für Sterne mit V-mag unter 16 in wenigen Sekunden zu erreichen. Diese Effizienz wird zu einer Verkürzung der Beobachtungszeit und damit zu erheblichen Einsparungen bei den



Betriebs- und Integrationskosten führen. Das Instrument soll im Jahr 2027/2028 in Betrieb gehen.



**Abb. 5:** Links: Simulierte CUBES Spektren (Wellenlänge [Å] vs Fluss) rund um das schwere Element Silber (Ag,  $Z=47$ ; Hansen 2022). Rechts: Gitter Prototyp für CUBES (<https://cubes.inaf.it/home>).

### 3.2.3 Weitere Forschungsvorhaben

(A. J. Dimoff, R. Fernandes de Melo, C. J. Hansen, IAP Frankfurt)

Um die Entstehung schwerer Elemente von den frühesten Stadien bis heute zu verfolgen, haben wir auch eine eigene Durchmusterung (CERES - Chemical Evolution of R-process Enhanced Stars) eingerichtet, um die früheste Anreicherung durch den R-Prozess im Universum zu ermitteln. Die Ziele sind die ältesten, metallärmsten Sterne, die mit dem UVES-Spektrographen am VLT beobachtet wurden. Dies ist derzeit einer der leistungsfähigsten Nah-UV-Spektrographen. Um die chemische Entwicklung und Anreicherung in späteren Stadien zu verfolgen, beteiligen wir uns auch an der Gemeinschaftsinitiative, bei der wir alle n-Einfangstellen anhand von Spektren massearmer Sterne aus verschiedenen kleineren internationalen Einrichtungen (z. B. Spanien, Tschechische Republik, Litauen, Chile,...) verfolgen. Beide Initiativen wurden im Rahmen des EU-Netzwerks ChETEC gestartet und in ChETEC-INFRA fortgesetzt. Darüber hinaus läuft seit einem Jahr ein Projekt, das sich mit dem s-Prozess in AGB-Sternen und Doppelsternsystemen befasst, als EU-Initiative im Rahmen von ChETEC-INFRA zur Radialgeschwindigkeitsüberwachung verschiedener Arten von Doppelsternsystemen und zur chemischen Kartierung des s-Prozesses in AGB-Sternen.

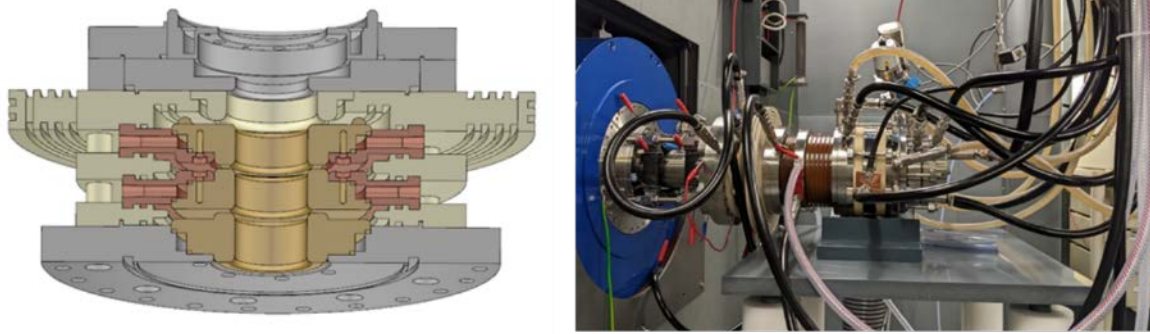
## 3.3 Beschleunigerphysik an FRANZ

(AGs Prof. Dr. H. Podlech, Prof. Dr. U. Ratzinger)

### 3.3.1 Frankfurter Neutronenquelle FRANZ – Schrittweise Inbetriebnahme und Strahlbetrieb

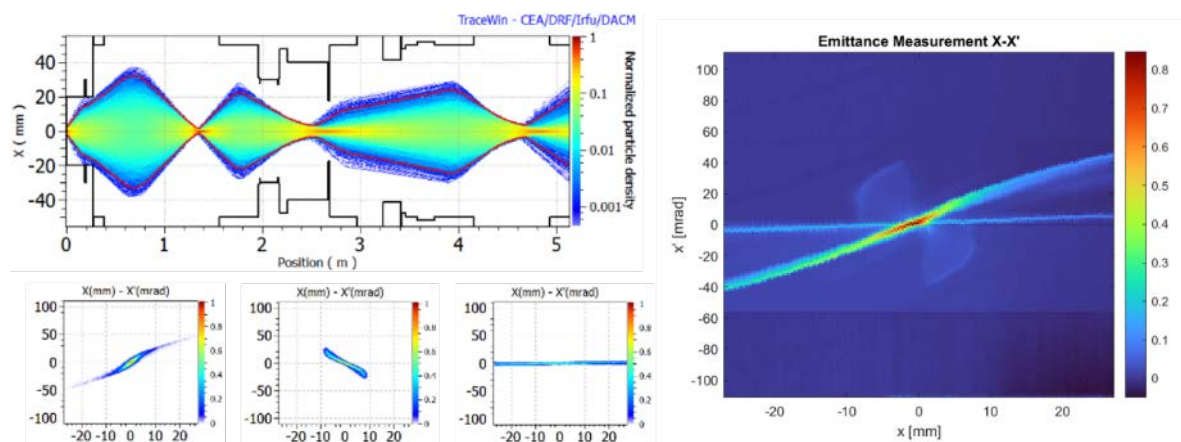
(A. Ateş, D. Bänsch, M. Breidt, G. Blank, R. Gössling, H. Hähnel, T. Metz, H. Podlech, U. Ratzinger, A. Rüffer, K. Volk, C. Wagner, C. Zhang)

Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme der CHORDIS Ionenquelle am FRANZ Terminal mit einer Protonen-Extraktionsenergie von 35 keV in 2020 wurde in 2021 die Anhebung der Protonenenergie auf 60 keV in Angriff genommen. Zu diesem Zweck wurde ein elektrostatisches Nachbeschleunigungssystem am IAP entwickelt und in der Feinmechanischen Werkstatt hergestellt (Abb. 6). Die Inbetriebnahme des Nachbeschleunigungssystems in 2021 verlief ohne große Probleme und so wurde die Sollenergie von 60 keV bereits im Oktober 2021 erreicht.



**Abb. 6:** CAD Modell des 60 keV Nachbeschleunigers (links), Foto der CHORDIS Ionenquelle am FRANZ Terminal mit am IAP entwickelter Nachbeschleunigung und XY-Steerern (rechts).

In der Zwischenzeit wurden noch weitere Arbeiten an der Strahltransportstrecke in den Bunker (LEBT) durchgeführt und u.a. zwei XY-Steerer Paare installiert, um einen zuverlässigen Einschuss in den RFQ gewährleisten zu können. Daraufhin wurde der 60 keV Protonenstrahl bis zum RFQ-Einschusspunkt im Bunker transportiert und dort vermessen. Mit Hilfe einer Schlitz-Gitter-Emittanzmessanlage wurde der Strahl im Bunker charakterisiert und die Einschussparameter für den RFQ verifiziert. Mit Hilfe der optischen Strahldiagnose in der LEBT und den Emittanzmessungen wurde ein zuverlässiges Strahldynamikmodell für die RFQ-Injektion erstellt (Abb. 7).



**Abb. 7:** Strahldynamiksimulation der FRANZ LEBT (links), Emittanzmessung des Strahls im Bunker bei gleicher Solenoideinstellung (rechts).

Nach dem erfolgreichen Erreichen der Sollenergie von 60 keV wurde Anfang 2022 ein neues Strahldynamikdesign für den RFQ finalisiert. Daraufhin wurde die Fertigung der neuen RFQ - Elektroden (Abb. 8) bei der Firma NTG GmbH beauftragt. Eine Auslieferung des RFQ mit den neuen Elektroden wird Anfang 2023 erwartet.



**Abb. 8:** RFQ-Elektrodenfertigung bei der Firma NTG GmbH.

**Ausblick:**

Im kommenden Jahr ist die Inbetriebnahme des FRANZ RFQ geplant. Zunächst wird der RFQ konditioniert und mit voller Leistung im Dauerbetrieb getestet. Daraufhin wird der Protonenstrahl in den RFQ injiziert und es werden erste Strahltests mit einer Endenergie von 700 keV durchgeführt. Danach wird die Kopplung mit der IH-Kavität durchgeführt, um schlussendlich auf eine Endenergie von 2 MeV zu kommen. Diese wird für die Erzeugung von Neutronen über die  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$  Reaktion benötigt.

### 3.4 Beschleunigerphysik (AG Prof. Dr. H. Podlech)

#### 3.4.1 Kurzbeschreibung der Arbeitsgruppe

Die Arbeitsgruppe Beschleunigerphysik – LINAC AG besteht aus drei Untergruppen, supraleitende Kavitäten-Entwicklung, normalleitende Kavitätenentwicklung und Strahldynamik sowie Nicht-Neutrale Plasmen. Die Bereiche Kavitätenentwicklungen beschäftigen sich schwerpunktmäßig mit der Entwicklung von Hochleistungs-Linearbeschleunigern zur effizienten Beschleunigung von Protonen und Ionen. Dies schließt sowohl die Entwicklung von RFQ-Beschleunigern als auch von normal- und supraleitenden CH-Kavitäten sowie die strahldynamischen Auslegungen ein. Die Gruppe Nicht-Neutrale-Plasmen beschäftigt sich vorwiegend mit den Themen Niederenergie-Strahltransport, Plasma- und Elektronenlinsen sowie Strahldiagnose.

Die Arbeitsgruppe arbeitet maßgeblich an verschiedenen Projekten wie GSI HLI-Upgrade, GSI cw-Linac, MYRRHA, FRANZ, High Brilliance Neutron Source, ARIES und FCC.

#### 3.4.2 Test des 175 MHz cw RFQ Prototyps

Um die thermischen Grenzen des am IAP sowohl für das FRANZ- als auch für das MYRRHA-Projekt weiterentwickelten 4-Rod-RFQ-Konzeptes zu erforschen, wurde ein hierfür bereits in früheren Jahren gebauter Prototyp erneut untersucht.

Der Resonator wurde ausführlichen Low-Level-Messungen unterzogen und anschließend in einen Versuchsaufbau im IAP-Bunker integriert. Die folgenden High-Power-Tests wurden zudem genutzt um eine am IAP entwickelte Software zur automatisierten Konditionierung und Datenerfassung zu Testen und weiterzuentwickeln. Während dieser Tests konnte die eingekoppelte Leistung bis auf 60 kW erhöht werden, wobei sich schließlich die Einkoppelschleife als Schwachstelle herausstellte, nach deren Ausfall der Test beendet wurde.

Die erreichte Leistungsdichte unter Berücksichtigung der Elektrodenlänge betrug maximal 158.5 kW/m und übertrifft damit die geforderten Leistungsdichten aktueller RFQ-Projekte um ein Vielfaches. Die Abbildung 9 zeigt den Versuchsaufbau innerhalb des Bunkers, sowie eine Detailaufnahme der Resonatorstruktur, die während der abschließenden Inspektion des RFQ nach Beendigung des Tests aufgenommen wurde.





**Abb. 9:** Teststand des RFQ Prototyps im FRANZ-Bunker.

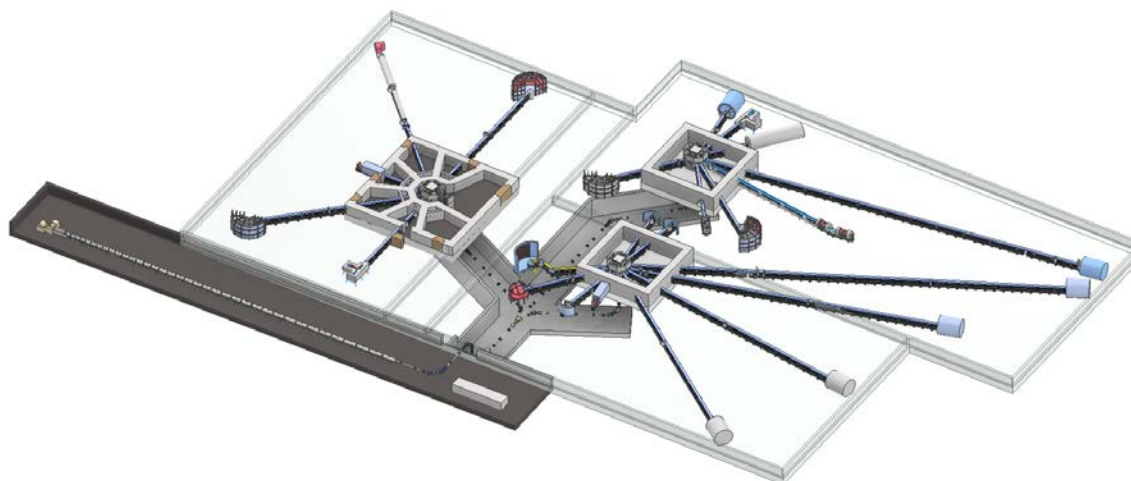
### 3.4.3 High Brilliance Neutron Source HBS

Neutronen sind für Wissenschaft und Industrie ein unverzichtbares Instrument zur Untersuchung der Struktur und Dynamik von Materie von der Meso- bis zur Pikoskala und von Sekunden bis Femtosekunden. In Europa profitieren Forschung, Industrie und Gesellschaft von einem weltweit einzigartigen Umfeld verschiedener Neutronenquellen. Zwei Drittel aller in Betrieb befindlichen Neutronenquellen in Europa wurden in den 1960er und 1970er Jahren gebaut. Mehrere sind bereits stillgelegt worden, und die meisten der verbleibenden Quellen werden innerhalb des nächsten Jahrzehnts geschlossen. Bis 2025 werden in Europa bestenfalls noch 4 oder 5 Quellen in Betrieb sein. Bis Anfang der 2030er Jahre wird sich die Situation weiter dramatisch verschlechtern, wenn keine Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Europa und insbesondere Deutschland wird seinen unangefochtenen Vorsprung in vielen wichtigen Bereichen der Wissenschaft, die Neutronen nutzen, verlieren.

Ein attraktiver Weg, um in Zukunft die dringend benötigten Neutronen bereitzustellen, ist die Entwicklung kompakter beschleunigerbasierter Neutronenquellen mit gepulsten Hochstrom-Protonenstrahlen. Das technische und betriebliche Konzept für eine solche neue Neutroneninfrastruktur wird derzeit im Rahmen des Projekts High Brilliance Neutron Source (HBS) entwickelt. Es wird eine revolutionäre Möglichkeit bieten, Neutronen mit hoher Brillanz auf flexible und kosteneffektive Weise bereitzustellen, um den Bedürfnissen von Wissenschaft, Industrie und Gesellschaft gerecht zu werden. Die HBS-Quelle wird mit modernster Beschleunigertechnologie in Verbindung mit einzigartigen Targetmoderator-Konzepten ausgestattet sein. Die Basisparameter des HBS-Linac sind ein Strahlstrom von 100 mA und eine Energie von 70 MeV, womit der HBS-Linac an die Spitze dieser Art von Beschleunigersystemen rückt. Zusammen mit einem optimierten komplexen Pulsschema können mehrere Targets gleichzeitig mit einer mittleren Gesamtstrahlleistung von bis zu 1 MW beschickt werden. Obwohl HBS als spezifische Anlage feste Betriebsparameter wie Strahlstrom oder Energie hat, ist das HBS-Konzept äußerst flexibel und skalierbar, von der Größe eines großen Labors für den lokalen Einsatz an Universitäten und Industrieunternehmen bis hin zu einer vollwertigen und äußerst wettbewerbsfähigen Nutzeranlage.

Das Institut für Angewandte Physik ist federführend in der Auslegung des Treiberbeschleunigers. Um das technologische Risiko und den Entwicklungsaufwand zu minimieren, soll möglichst auf erprobte state-of-the-art Technologie zurückgegriffen werden. Das hohe Tastverhältnis (bis 25%) sowie Protonen als Teilchensorte legten es nahe, wesentliche Komponenten des MYRRHA Injektors abgewandelt in Abhängigkeit der Strahlenergie und des Strahlstroms zu verwenden. So können die für den cw-Betrieb entwickelten Kavitäten (RFQ, CH-DTL) ohne großen Aufwand hinsichtlich Kühlung und Mechanik für HBS entwickelt werden. Die jeweiligen Komponenten müssen aber insbesondere der Strahldynamik angepasst werden. Die Abbildung 10 zeigt einen Überblick der High Brilliance Neutron Source. Der etwa 95 m lange Treiberbeschleuniger liefert den Strahl über Hochenergiestrahlführungen parallel zu den verschiedenen Targetstationen.





**Abb. 10:** Übersicht über die geplante Neutronenquelle HBS am Forschungszentrum Jülich.

### 3.4.4 Entwicklung des supraleitenden Schwerionenlinacs der GSI

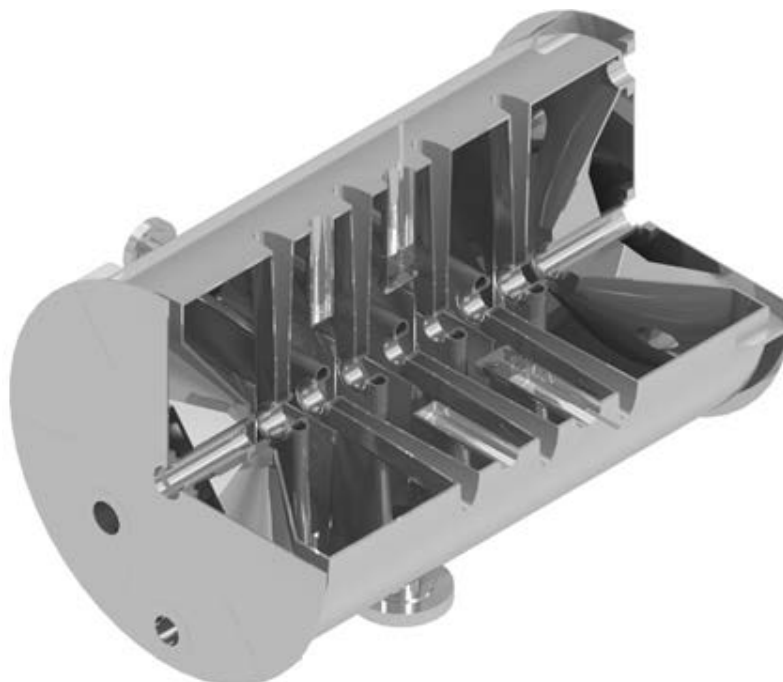
*(T. Conrad, P. Müller, H. Podlech, M. Schwarz, IAP Frankfurt)*

Um in Zukunft den Nutzern der GSI auch Schwerionenstrahlen mit hohem Tastverhältnis bis zum cw-Betrieb bereitstellen zu können, wird in Zusammenarbeit mit der GSI und dem Helmholtz-Institut Mainz ein dezidierter supraleitender Schwerionenlinac, den sogenannten HELIAC, geplant.

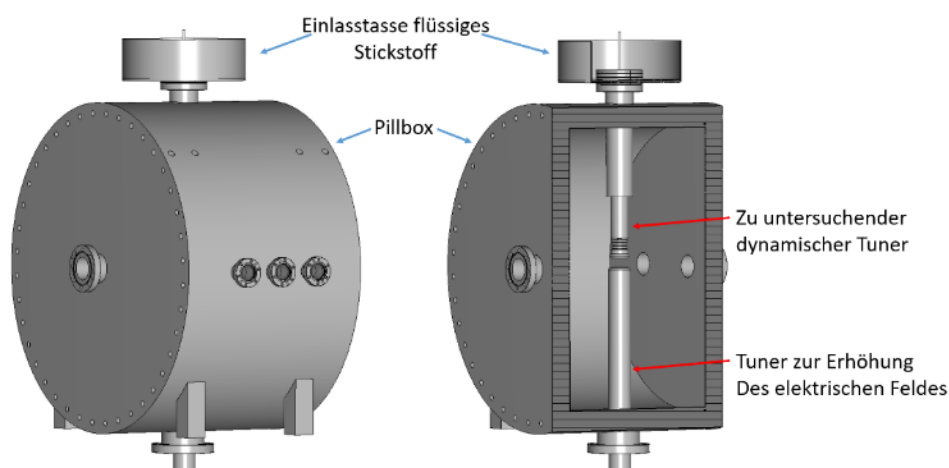
Supraleitende Schwerionenbeschleuniger im Nieder- und Mittelenergiebereich verwenden weltweit nahezu ausschließlich Quarter-Wave- (QWR) und Half-Wave-Resonatoren (HWR) als Hauptbeschleunigertypen. Zwar bieten diese den Vorteil, bereits umfangreich erforscht zu sein und flexibel eingesetzt werden zu können, unter anderem mangelt es ihnen jedoch mit in der Regel lediglich zwei Beschleunigungsspalten an Effizienz in Bezug auf den erreichbaren Energiegewinn pro Meter. Um dem zu begegnen, wurde am IAP der Goethe-Universität Frankfurt die Erfahrung in der Entwicklung von H-Moden-Strukturen genutzt um die weltweit erste supraleitende 15-spaltige CH-Struktur zu entwickeln. Diese konnte bereits am GSI erfolgreich mit Strahl getestet werden.

Nach diesen erfolgreichen Tests wurden am IAP zwei weitere supraleitende CH-Kavitäten entwickelt, gebaut und erfolgreich auf ihre HF-Eigenschaften untersucht. So wurde im Frühjahr 2021 die Kavität CH2 im vertikalen Kryostaten des IAP durch flüssiges Helium auf ungefähr 4 K heruntergekühlt und konnte die vom HELIAC geforderten Beschleunigungsgradienten in zwei Messungen erreichen. Des Weiteren wurden die restlichen neun supraleitenden CH-Kavitäten des HELIAC am IAP mit einem eigens für diese Kavitäten entwickelten modularen Kavitätendesign entworfen. Dieses modulare Design sieht vor, eine Vielzahl der Baukomponenten der Kavitäten mit einer einheitlichen Geometrie zu entwerfen und dann die Kavitäten iterativ nach den Vorgaben der Strahldynamik zusammen zu setzen. Durch dieses Design konnte sowohl die für die Entwürfe der Kavitäten benötigte Zeit, als auch die Produktionskosten deutlich gesenkt werden. Durch individuelle Optimierung der einzelnen Kavitäten konnte zudem die zu erwartende Beschleunigungseffizienz der Kavitäten gesteigert und durch Simulationen bestätigt werden. Sechs der auf diese Weise entworfenen Kavitäten befinden sich zu Zeit in der Bauphase.

Zugleich wurde das am IAP entwickelte Referenz-Strahldynamikdesign für den HELIAC auf mögliche Änderungen hinsichtlich einer kürzeren Gesamtlänge untersucht und parallel das Matching und die Integration in die nachfolgende Strahlführungsstruktur der GSI entwickelt.



**Abb. 11:** Zeichnung der supraleitenden CH-Kavität CH3 des supraleitenden HELIAC der GSI. Zusätzlich zur Entwicklung der neun supraleitenden CH-Kavitäten wurde ein Konzept für die Untersuchung und Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der aus reinem Niob bestehenden dynamischen Balgtuner entwickelt und dessen Tauglichkeit durch Simulationen bestätigt.



**Abb. 12:** Schematischer Aufbau des Tuner-Teststands zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften der dynamischen Balgtuner im kalten Zustand.

### 3.4.5 Präparation von supraleitenden CH-Strukturen

(P. Müller, H. Podlech, IAP Frankfurt)

Die Präparation von supraleitenden Beschleunigern hat das Ziel, die Performance des Beschleunigers zu erhöhen. Diese lässt sich über zwei Parameter quantifizieren: Die intrinsische Güte und das elektrische Feld. Eine Erhöhung der Güte führt zu weniger Kryoverlusts während des Betriebs, eine Erhöhung des maximalen elektrischen Feldes führt zu einer größeren Teilchenenergie und somit zur Vergrößerung der Anwendungsmöglichkeiten und Flexibilität des Projektes. Etablierte Präparationsverfahren wurden nahezu ausschließlich an elliptischen Kavitäten entwickelt und für diese optimiert. Für das HELIAC Projekt und die zugehörigen supraleitenden CH-Strukturen werden daher Präparationsmethoden an zwei CH-Strukturen getestet. Für den 360 MHz CH-Prototypen musste aufgrund zu stark gemessener Einkopplung ein neuer Koppler entwickelt, gemessen und getestet werden. Im Anschluss wurde die Struktur im IAP bei 120 °C für 48 h ausgebacken und getestet. Dies führte zu einer Senkung der intrinsischen Güte, bei einer geringen Zunahme des maximalen elektrischen Feldes. In Kooperation mit dem Helmholtz-Institut Mainz wurde erstmalig eine Hochdruckspülung mit Reinstwasser (HPR) einer CH-Struktur im Reinraum in Mainz vorbereitet und erfolgreich

durchgeführt. Dies umfasste die Auslegung von optimierten Düsengeometrien eines CH-Spülprototyps und der Reinraumhalterung für die 360 MHz CH-Struktur. Die Düsengeometrie wurden mittels CST-Analysen im IAP optimiert und vom HIM ausgeschrieben und bestellt. Der Spülprototyp verfügt über die gleiche Apertur von 25 mm wie die 360 MHz Struktur und diente zur Übung mit dem Umgang der HPR. Die im IAP entwickelte und bearbeitete Reinraumhalterung der 360 MHz Struktur ermöglichte die Aufnahme und Übergabe der Struktur mittels mobiler Lifter und die präzise Ausrichtung innerhalb der HPR-Anlage. Die 360 MHz Struktur leckgetestet und bereit für den anstehenden Kalttest im Januar 2023. Die geplante BCP der 360 MHz Struktur muss an einer 325 MHz Struktur durchgeführt werden, da nur diese Struktur von Research Instruments behandelt werden kann. Die 325 MHz CH-Struktur wurde im November 2022 zur Ermittlung der aktuellen Performance einem Kalttest unterzogen. Der Abkühlvorgang der Kavität musste wegen eines Pumpproblems des Isoliervakuums abgebrochen werden. Hierdurch hat sich die Kavität ca. 12 h innerhalb des Temperaturbereiches der Niobhybridbildung aufgehalten. Die Kavität wurde anschließend gemessen und zeigte eine gefallene intrinsische Güte von  $8.5E8$  im Vergleich zu früher gemessenen  $1.8E9$ . Das maximale elektrische Feld betrug nur  $1.57$  MV/m im Vergleich zu früher gemessenen  $8.5$  MV/m. Die Kavität wird aktuell für den Transport zu RI vorbereitet.



**Abb. 13:** Vorbereitung des 360 MHz CH-Prototyps für das High-Pressure Rinsing am Helmholtz Institut Mainz.

### 3.5 Beschleunigerphysik (AG Prof. Dr. U. Ratzinger)

#### 3.5.1 Kurzbeschreibung der Arbeitsgruppe

Die Arbeitsgruppe entwickelt Ionenbeschleuniger hinsichtlich der Komponenten "Ionenquelle", "Transportelemente", "Strahldiagnose", "Beschleunigerkavitäten" weiter. Es werden strahldynamische Vielteilchensimulationen und elektromagnetische Feldsimulationen durchgeführt. Technisch werden miniaturisierte Quadrupol- und HF-Beschleunigerstrukturen entwickelt und Prototypen gebaut und getestet.

Gegenwärtig liegt ein Schwerpunkt der Laboraktivität auf der Fertigstellung und Protonenstrahlentwicklung an der Frankfurter Neutronenquelle FRANZ. Außerdem wird das relativ junge Gebiet von kryogen betriebenen Kupferresonatoren experimentell und theoretisch untersucht.

#### 3.5.2 Strahldynamische Entwicklungen

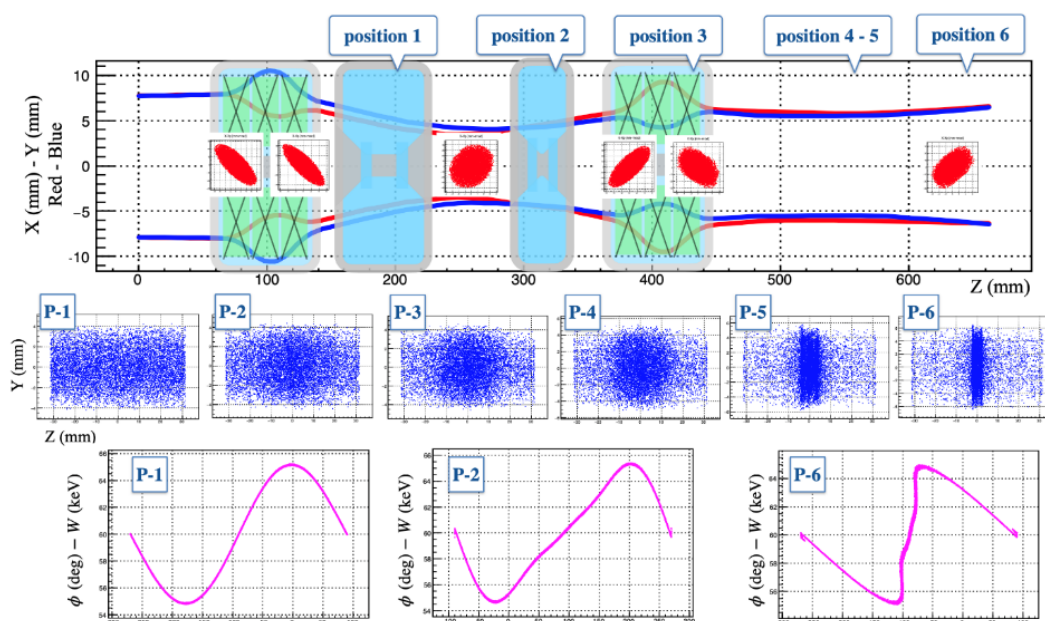
##### Kompakte Harmonische Buncherstrukturen

(E. Sunar, R. Tiede, u. Ratzinger, IAP Frankfurt)

Driftröhren-Hochfrequenzbeschleuniger haben eine begrenzte Eingangs-Phasenakzeptanz und benötigen deshalb einen longitudinal gebündelten Strahl am Einschuss. Dies kann am einfachsten mit einer einzelnen Buncherkavität erreicht werden. Die Sinusform der Anregung führt jedoch zu einer Vergrößerung der longitudinalen Emittanz und einer begrenzten Akzeptanz. Zurzeit ist der RFQ die Standardlösung für eine effiziente Strahlformierung und Vorbeschleunigung vor dem Einschuss in die erste Driftröhrenstruktur. Jedoch tendiert auch der RFQ aufgrund der sinusförmigen Anregung zu einer longitudinalen „Aufwicklung“ des Strahls und somit zu höheren Emittanzen, insbesondere bei Nullstrom.

Eine ideale Alternative wäre eine sägezahnförmige Hochfrequenz-Anregung einer einzelnen Buncherkavität. Diese ist aber für die in der Beschleunigerphysik benötigten Leistungspegel (im kV-Bereich) technisch noch nicht realisierbar.

Eine Lösung dieses Problems liegt in der räumlichen Trennung der sinusförmigen Anregung mit der Grundfrequenz und der höheren Harmonischen. In der Regel rechen zwei Harmonische mit den Frequenzen  $f$  und  $2f$  aus, um den Sägezahn sehr gut anzunähern. Das Konzept heißt „Doppeldrift -Harmonischer Buncher (DDHB)“ und wird aktuell in unserer Arbeitsgruppe als Alternative für den direkten Einschuss in die erste Driftröhren-Struktur eines Linacs oder in Zyklotrons untersucht, sowie als Vorbuncher für einen verkürzten RFQ. Die Hauptkomponenten eines DDHB sind eine Buncherkavität bei der Grundfrequenz  $f$  mit der Sollphase  $-90$  deg und der Gesamtspannung  $V_1$ , gefolgt von einer Driftstrecke  $L_1$ , einer zweiten Buncherkavität bei der Harmonischen  $2f$  mit der Sollphase  $+90$  deg und der Gesamtspannung  $V_2$  und schließlich einer zweiten Drift  $L_2$ , an deren Ende der longitudinale Strahlfokus liegen sollte.



**Abb. 14:** Ein Beispiel für ein mit dem BCDC-Code simuliertes DDHB-Design. Im oberen Teil sieht man die transversalen Strahlumhüllungen, in der Bildmitte kann man die Bunchformation verfolgen und die unteren Graphen zeigen die longitudinale Phasenraumverteilungen an den relevanten Stellen.



In der Abbildung 14 sieht man ein nach diesem Konzept entwickeltes Design. Es ist deutlich erkennbar, dass der  $2f$  Buncher die zunächst sinusförmige Energiemodulation des Strahls über einen großen Phasenbereich fast ideal zu einer Sägezahnform ergänzt. Dies führt zu einer vergleichsweise kleinen Emittanz am Einschuss in den nachfolgenden Hochfrequenzbeschleuniger. Die gezeigte Simulation wurde mit dem eigens dafür entwickelten Strahldynamik-Programm „Bunch Creation from a DC beam – BCDC“ durchgeführt.

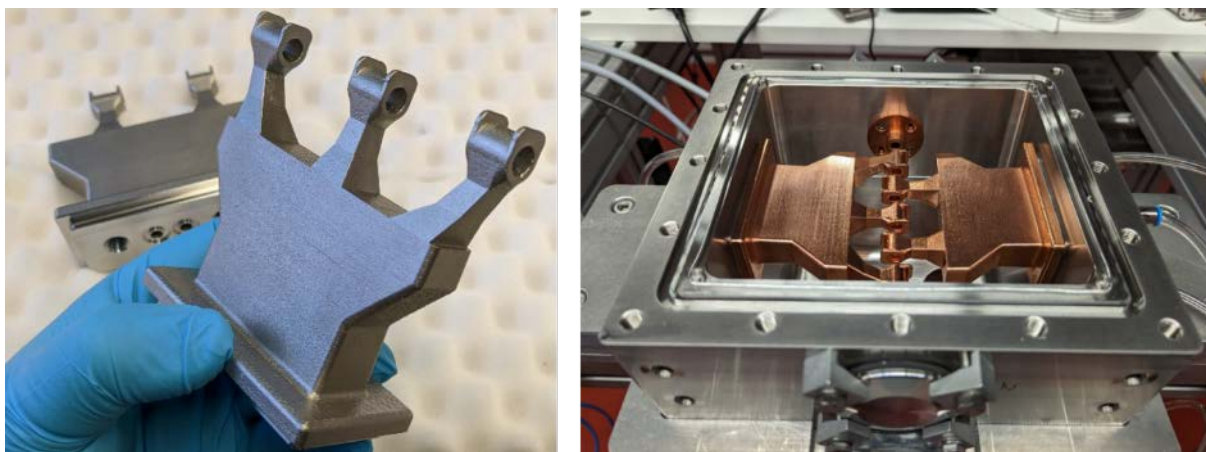
Die Motivation für die Entwicklung eines für diese Untersuchungen dedizierten Multiparticle-Tracking Programms lag darin, dass man alle bei der niederenergetischen Strahlformierung relevanten Aspekte abbilden wollte: Das Programm verfügt z.B. über eine Raumladungsroutine, welche den Einfluss der benachbarten Bunche berücksichtigt. Der Raumladungs-Kompensationsgrad kann abschnittsweise festgelegt werden, was in Niederenergetransportstrecken mit vorhandenen elektrischen Feldern wesentlich ist.

### 3.5.3 Beschleunigerstrukturentwicklung

#### **Miniaturisierte Beschleunigerstrukturen mit 3D – Druckverfahren**

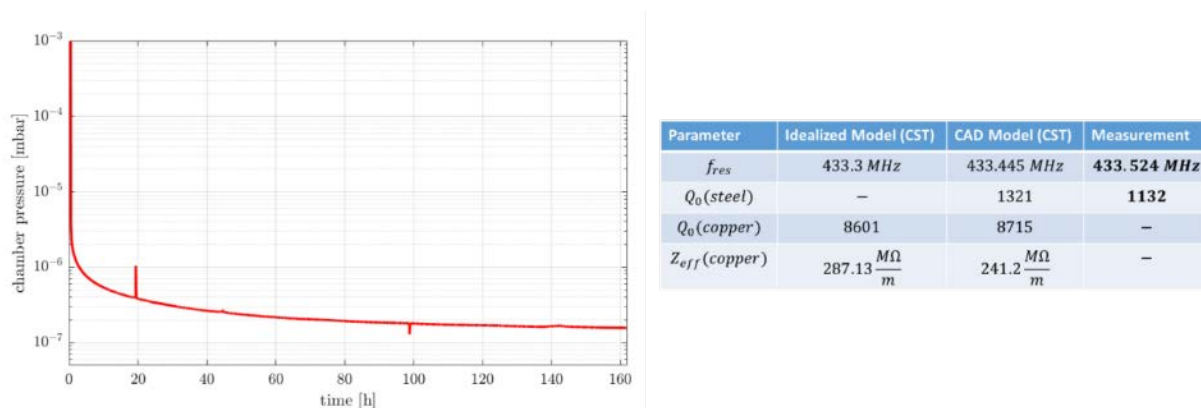
(H. Hähnel, A. Ates, B. Dedic, U. Ratzinger, IAP Frankfurt)

Die Additive Fertigung („3D-Druck“) von Beschleunigerkomponenten stellt eine attraktive Alternative zu konventionellen Herstellungsmethoden dar. Die Herstellung von Komponenten mit komplexen Geometrien und inneren Strukturen (z.B. Kühlkanäle) gehört zu den Stärken dieser Technologie. Um die Tauglichkeit additiv gefertigter Bauteile für die Konstruktion von Teilchenbeschleunigern zu evaluieren wurde eine Prototypkavität für kompakte Beschleuniger konzipiert und aufgebaut (433.6 MHz; 1 MV, siehe Abb. 15). Die innere IH-Struktur wird additiv gefertigt und auf Vakuumtauglichkeit, HF-Eigenschaften und thermische Eigenschaften untersucht. Die IH-Struktur verfügt über ein Kühlkanalsystem bis an die Driftröhren heran. Zum Projektende soll ein HF-Leistungstest bei 30 kW gepulst demonstriert werden, was einer Beschleunigungsspannung von 1 MV und somit einem mittleren Beschleunigungsgradienten von 6 MV/m entspricht. Die Shunt-Impedanz der Struktur liegt bei 240 M $\Omega$ /m. Der benötigte 433.6 MHz, 30 kW gepulste HF Verstärker wird Anfang 2023 geliefert.



**Abb. 15:** 3D gedruckte IH-Struktur (links), Zusammenbau der Prototyp-Kavität mit verkupferter 3D-Druck Struktur (rechts).

Die Vakuumtauglichkeit der Prototyp Kavität wurde erfolgreich demonstriert (Abb. 16, links). Hierbei ist erwähnenswert, dass die gedruckten IH-Strukturen der Kavität über Vakuum-Dichtflächen verfügen, die diesen Test ebenfalls bestanden haben. Die Abdichtung der Kavität am Rippen-Fuß erfolgt über eine Aluminiumdraht-Dichtung zwischen dem Rahmen aus Vollmaterial und der gedruckten IH-Struktur. Anfang 2022 wurde mit dem Prototyp ein Druck von  $1.4 \times 10^{-7}$  mbar erreicht. Erste Messungen der Resonanzfrequenz und Güte mit der noch nicht verkupferten Struktur zeigen gute Übereinstimmung mit den Simulationsergebnissen.



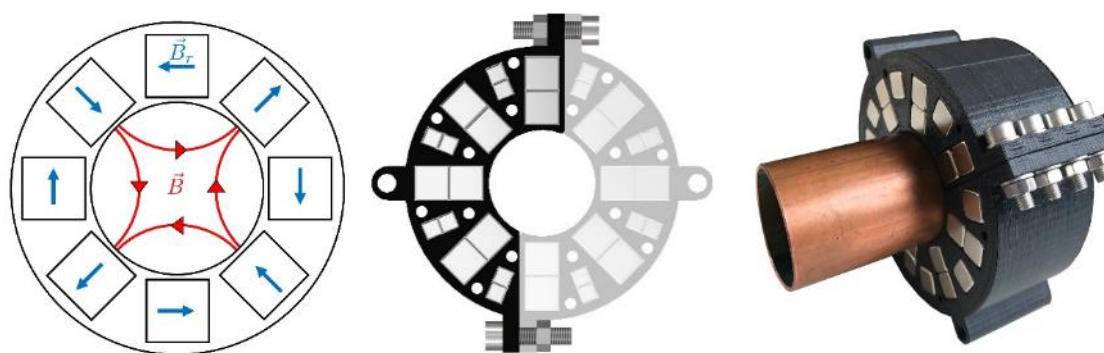
**Abb. 16:** Abpumpkurve der Prototypkavität mit einem erreichten Druck von  $1.4 \times 10^{-7}$  mbar (links), Tabelle der HF Messungen (rechts). Das Driftröhrenprofil entspricht  $W = 7.9 \text{ A MeV}$ ,  $\beta = 0.13$ .

Durch das Verkupfern der gedruckten IH-Strukturen wurde die Güte auf einen Wert von 2600 angehoben. Der Rahmen und die Deckel der Kavität befinden sich aktuell bei der Firma Galvano-T und werden verkupfert. In Kooperation mit der THM Friedberg wird im Rahmen des Projektes außerdem an der Optimierung des Druckprozesses zur Verbesserung der Bauteilgenauigkeit gearbeitet.

### Kompakte Permanentmagnetische Quadrupollinsen

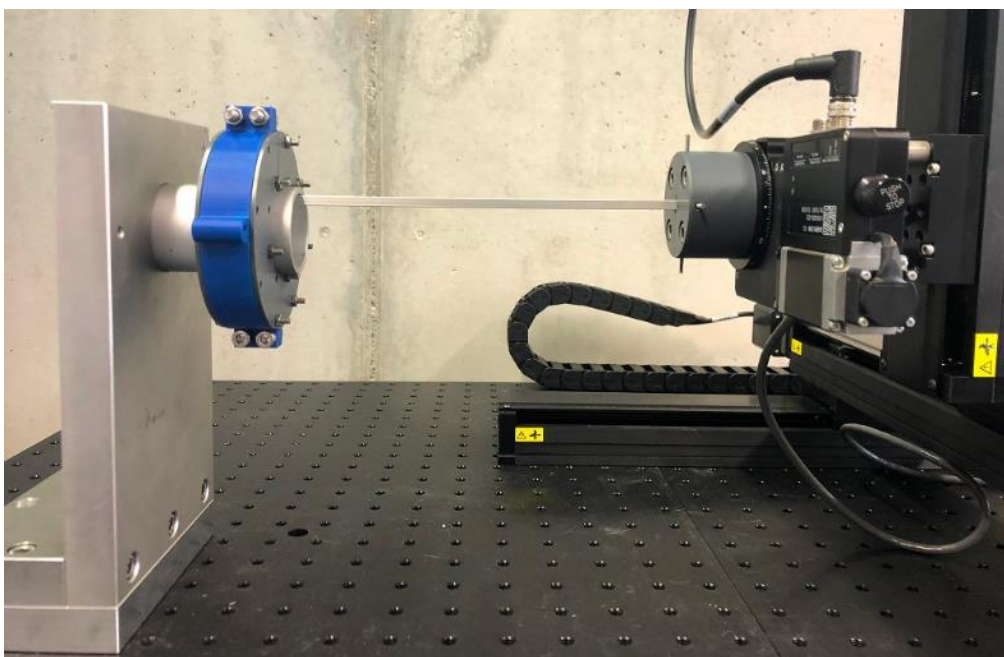
(J. Kaiser, N. Fischer, H. Hähnel, U. Ratzinger, IAP Frankfurt)

Auf Basis von quaderförmigen Permanentmagneten können kompakte Quadrupollinsen realisiert werden. Diese bestehen im einfachsten Fall aus 8 Einzelmagneten und können zur Maximierung des Gradienten um zusätzliche Magnete erweitert werden, vgl. Abb. 17. Für eine Befestigung um ein Strahlrohr wurde eine Magnethalterung aus zwei identischen Halbschalen entwickelt, welche 3D-gedrukt werden. Die Magnete wurden in Standardgeometrien (10 mm x 10 mm Querschnittsfläche) erworben, was eine preisgünstige Alternative zu individuell hergestellten Magneten darstellt.



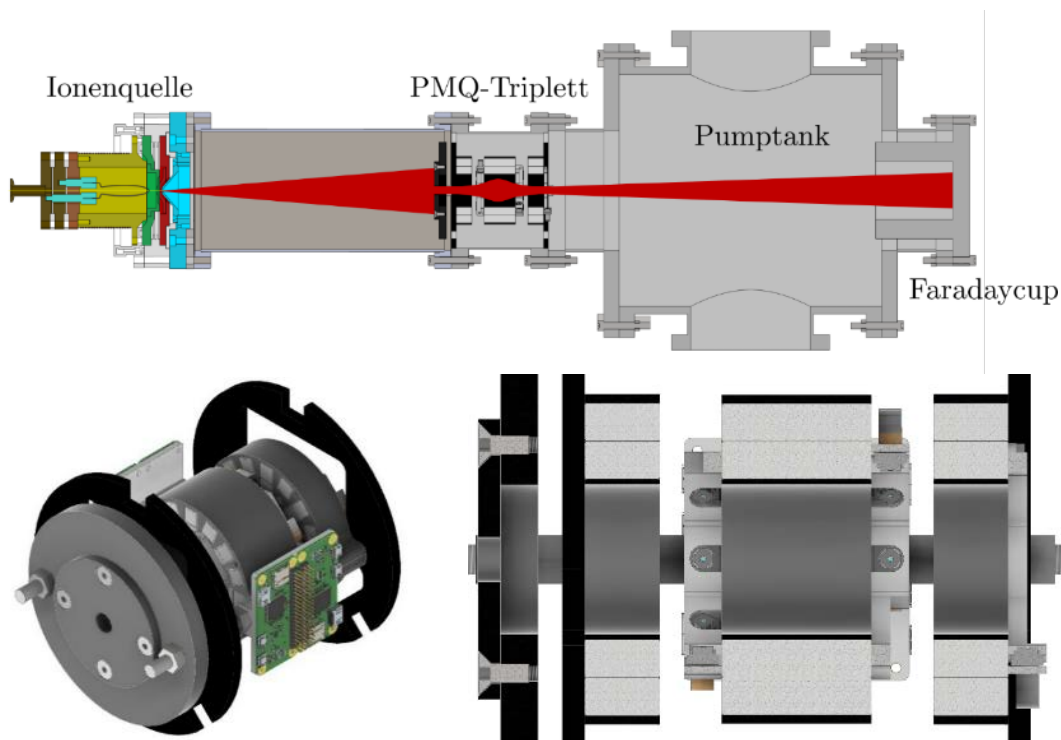
**Abb. 17:** Magnetkonfiguration (links), welche um zusätzliche Magnete erweitert wurde (Mitte) sowie ein Prototyp befestigt um ein Rohrstück (rechts).

Für eine Verifizierung der magnetostatischen Feldsimulationen, anhand welcher der Einfluss der geometrischen Parameter auf die Feldhomogenität untersucht wird, ist ein numerisch gesteuerter Magnetmesstisch im Aufbau (Abb. 18). Dieser besteht aus drei 300 mm langen Linearschienen, sowie einem um 360° drehbaren Motor. Dies ermöglicht eine Ausmessung der dreidimensionalen Feldverteilung nach den gängigen Methoden.



**Abb. 18:** Neu entwickelter xyz - Magnetmesstisch mit drehbarer Hallsonde: Der zu vermessende permanent-magnetische Quadrupol (links mit Halterung) sowie das Messsystem (rechts).

Durch die Kompaktheit der Linsen und der flexiblen Herstellung der Magnethüllen konnte erstmals ein in ein Strahlrohr integriertes Quadrupol-Triplett entwickelt und mit Raspberry Pi Kameras ausgestattet werden (Abb. 19). Mit diesem System kann die Strahlenvolpe im Inneren der Linse diagnostiziert werden. Der Prototyp wurde mit einem 7keV He-Strahl getestet.



**Abb. 19:** Gesamtaufbau mit Strahlengang (oben) und Modell bzw. Querschnitt eines Quadrupoltriplets (unten), ausgestattet mit Kameras für eine nicht-invasive Strahlendiagnose des Ionenstrahls.

**Kryogen betriebene, normaleitende Kupferresonatoren**

(H. Wang, U. Ratzinger, IAP Frankfurt)

Bei tiefen Temperaturen erhöht sich der Leitwert von reinem Kupfer deutlich - entsprechend dem sogenannten RRR-Wert. Untersuchungen insbesondere am CERN, Genf und am SLAC, Stanford haben außerdem gezeigt, dass auch die Spannungsfestigkeit deutlich verbessert werden kann. Allerdings haben die letztgenannten Labors nur Elektronenstrukturen im GHz-Bereich im Hinblick

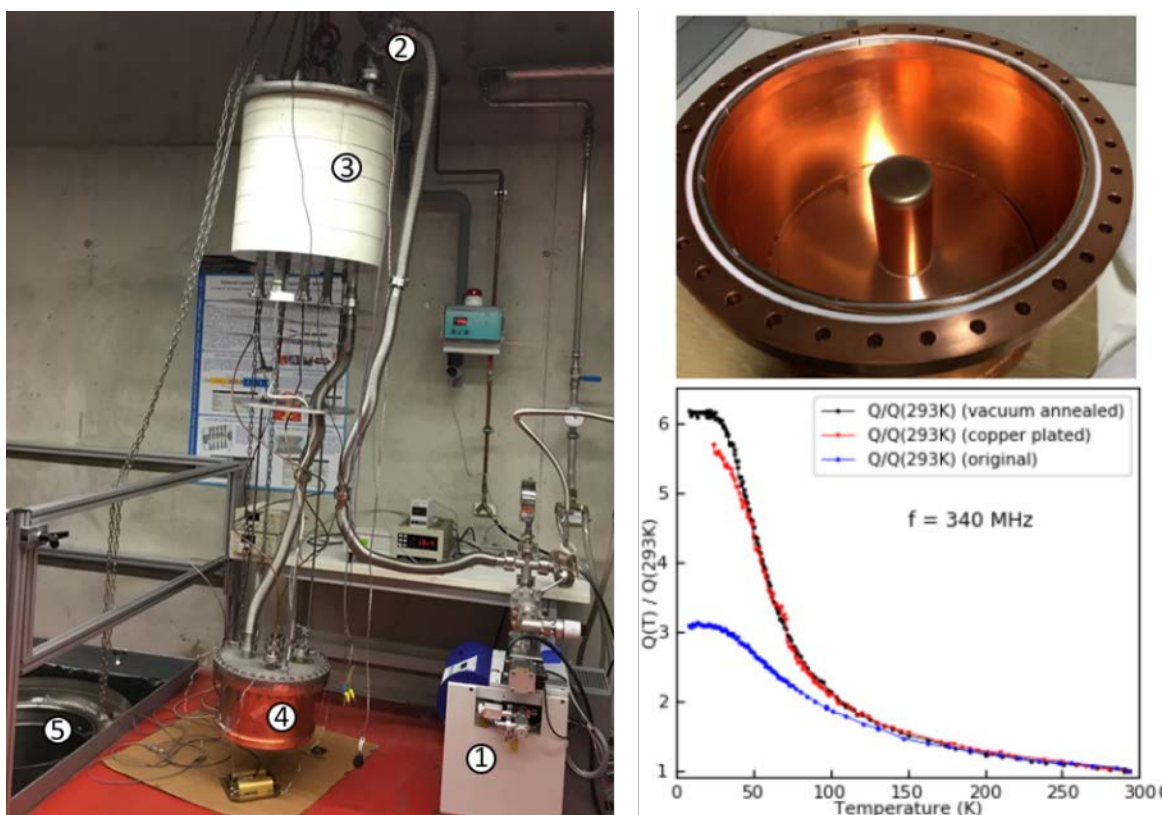


auf die Entwicklung kompakter, linearer Elektronen-Collider untersucht. Die Untersuchungen am IAP hingegen beziehen sich auf die Entwicklung von kurz gepulsten Ionenlinearbeschleunigern - z. B. für die Synchrotroninjektion. Bei den hier gebräuchlichen Frequenzen unterhalb von 1 GHz scheinen die Vorteile des kryogenen Resonatorbetriebs noch vorteilhafter - wegen der geringeren Wirkung des anomalen Skineffekts. Experimentell wurde eine koaxiale Lambda-Viertel-Kavität aufgebaut und in drei Zuständen wurden unter Vakuum bei Temperaturen zwischen 10 K und 293 K die Güterwerte bestimmt (Abb. 20):

- Zunächst die unbehandelte Kavität aus massivem SF-Kupfer. Hierbei stellte sich heraus, dass der RRR-Wert bei nur etwa 20 lag. Dabei kommt man kaum in den anomalen Bereich
- Die Kavität wurde nun bei Fa. Galvano-T, Windeck, matt verkupfert und wieder vermessen, mit deutlich gestiegenen Güterwerten
- Schließlich wurde die Kavität bei GSI, Darmstadt, noch bei 400°C vakuumgeglüht für eine Stunde

Für den letzteren Fall ergaben sich recht vielversprechende Ergebnisse. So könnte man bei Betriebstemperaturen um 40-50 K Hochfrequenzleistungseinsparungen um Faktoren 5 bis 6 erreichen (Abb. 20, rechts unten). Umgekehrt könnte man bei gleicher Verstärkerleistung deutlich höhere Feldpegel erreichen, bis hin zu den Grenzfeldstärken bei diesen Betriebstemperaturen. 20 MV/m gemittelte effektive Beschleunigungsfeldstärke erscheinen machbar.

Es wurde ein theoretisches Modell zum anomalen Skineffekt entwickelt, welches experimentelle Daten von verschiedenen Gruppen sehr gut beschreibt. Schließlich wurden auch thermodynamische Berechnungen zur Wärmeabfuhr aus der Skinschicht in die Resonatorwand aus massivem Kupfer durchgeführt. Hier ergaben sich ermutigende Resultate für Pulslängen bis in den Millisekunden – Bereich hinein.



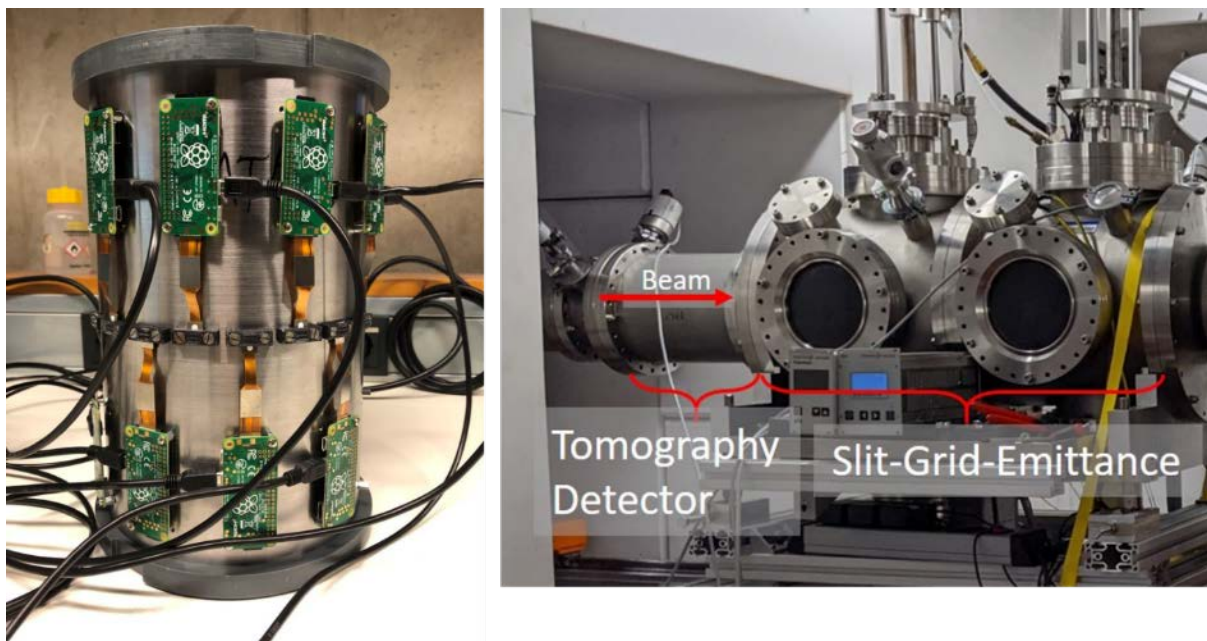
**Abb. 20:** Experimenteller Aufbau vor der Einbringung in den Kryostaten (links); 1= Turbomolekularpumpe, 2= Ionengetterpumpe, 3= Deckel des Kryostaten, 4= Resonator, 5= offener Kryostat. Blick in den geöffneten Resonator (oben rechts) und gemessene Güterwerte (unten rechts).



### Strahldiagnoseentwicklungen

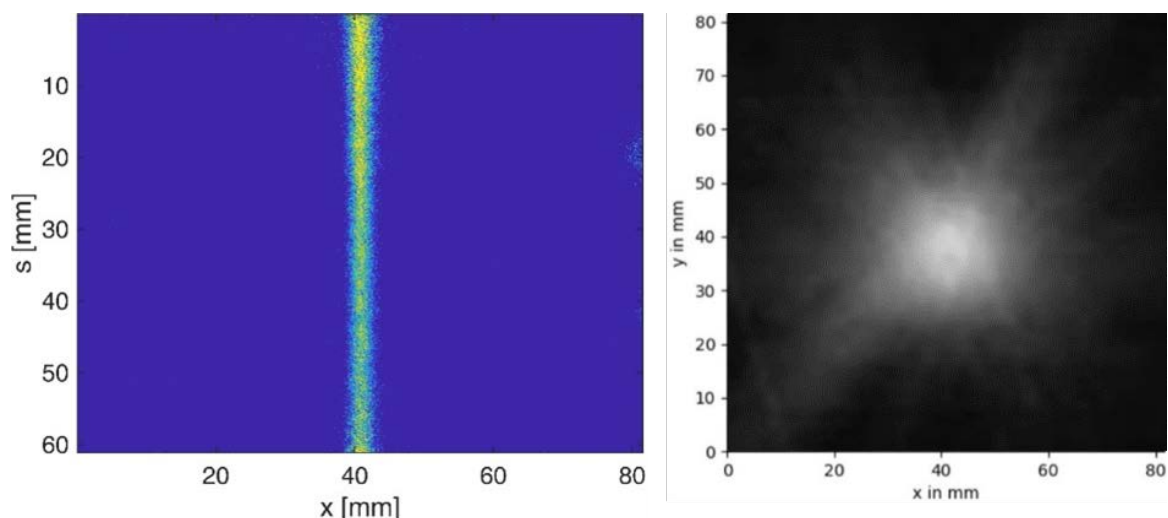
(A. Ates, G. Blank, H. Hähnel, U. Ratzinger, K. Volk, C. Wagner, IAP Frankfurt)

Raspberry-Pi-Kameras als nicht-invasive Strahlendiagnostik haben weitere experimentelle Anwendungsbereiche erschlossen. Mit diesen kompakten, kostengünstigen Einplatinenkameras können nun tomographische Untersuchungen an Ionenstrahlen durchgeführt werden. Der am IAP entwickelte Tomographiedetektor besteht aus 10 Raspberry Pi Kameras, die radial um den Ionenstrahl im Vakuum angeordnet sind. Dies ermöglicht es, Profile des Ionenstrahls aus 10 verschiedenen Winkeln an derselben z-Position aufzunehmen (siehe Abbildung 21 links).



**Abb. 21:** Links ist ein Edelstahlzylinder zu sehen, der mit 10 Raspberry Pis und der dazugehörigen Kamera ausgestattet ist. Dieser Detektor ist in einen Vakuumflansch von 200 mm Durchmesser und 300 mm Länge integriert, um tomographische Untersuchungen des Ionenstrahls durchzuführen. Rechts ist der Detektor am Ende der FRANZ LEBT-Sektion installiert.

In ihrer Bachelorarbeit konnte Frau G. Blank den Tomographiedetektor an der FRANZ LEBT-Sektion am RFQ-Startpunkt testen. Die zweidimensionalen Transversalprofile des Strahls konnten mit dem ART-Algorithmus (Algebraic reconstruction technique) tomographisch ausgewertet werden (siehe Abbildung 22).

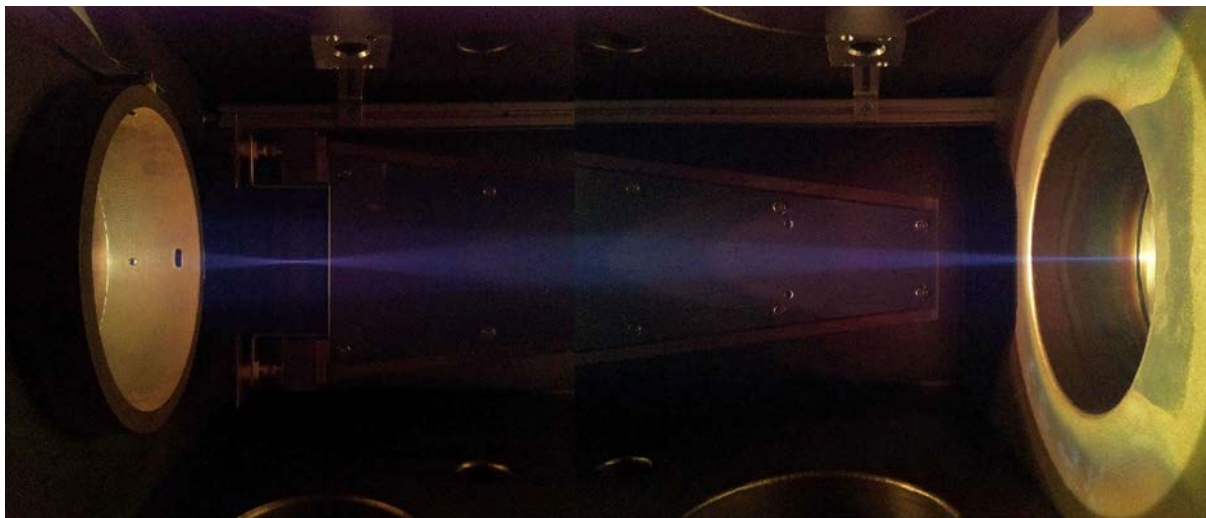


**Abb. 22:** Links ist ein Falschfarbenbild eines Profils des Strahls, wie es von einer einzelnen Kamera aus gesehen wird. Rechts ist die tomographische Rekonstruktion des Strahlquerschnitts zu sehen. Dargestellt ist ein Schnitt durch die Transversalebene,  $\pm 6 \text{ mm}$  in  $x, y$ .

Bei der Entwicklung des Detektors konnten sowohl die Steuerung als auch die Elektronik der bereits am IAP erfolgreich etablierten Minikameras weiter optimiert werden. Die Kameras werden nun über eine im Vakuum integrierte WLAN-Antenne gesteuert. Damit ist es möglich, über eine USB-Vakuumdurchführung innerhalb des Vakuums mit beliebig vielen Kameras zu kommunizieren. Lediglich zwei zusätzliche Pins werden für die 5V-Stromversorgung benötigt.

Überschläge an der Quelle führten zum Ausfall der Elektronik zur Steuerung der Kameras. Mit Hilfe von Herrn C. Wagner wurde die Schaltung der Adapterplatine an der Vakuumdurchführung optimiert, und die Elektronik ist nun zuverlässig gegen die Überschläge geschützt.

In der FRANZ-LEBT-Sektion wurden 6 Kameras in die Diagnosekammer 1 hinter dem Solenoid 1 integriert. Mit Hilfe dieser Anordnung von Kameras konnte der Ionenstrahl über eine Distanz von 500 mm aufgenommen werden. Es hat sich gezeigt, dass die Beobachtung des Strahls über eine so große Strecke viele Vorteile hat. Die wertvollste Information war die direkte Vergleichbarkeit mit Simulationen der Strahldynamik in Tracewin. Dadurch konnten die Parameter in der Simulation optimiert und nach den experimentellen optischen Auswertungen verifiziert werden. Abbildung 23 zeigt das Originalbild des Strahls beim Eintritt und Austritt aus dem Diagnosetank. Es sind zwei Fokuspunkte zu erkennen, die als Fokuspunkte der Wasserstoffspezies  $H_2^+$  und  $H_3^+$  in der Interaktion mit der Strahldynamiksimulation identifiziert wurden.



**Abb. 23:** Bild des Ionenstrahls entlang der Diagnosekammer 1 der LEBT-Sektion von FRANZ.

Die Kameras konnten im Mai und April 2022 während der UNILAC-Strahlzeit von der Plasmaphysikgruppe des IAPs getestet werden. Ein  $^{48}\text{Ca}^{10+}$ -Strahl mit der UNILAC-Energie von 4.8 MeV/a und einer Frequenz von 5 Hz bei 5 ms Pulslänge wurde erfolgreich detektiert. Damit wurde die Anwendung der Kameras auf hochenergetische Strahlabschnitte erweitert. Eine ausführlichere Beschreibung des Experiments findet sich in der Sektion der Plasmaphysikgruppe von Andre Michel.

### **p- Linac - RFQ**

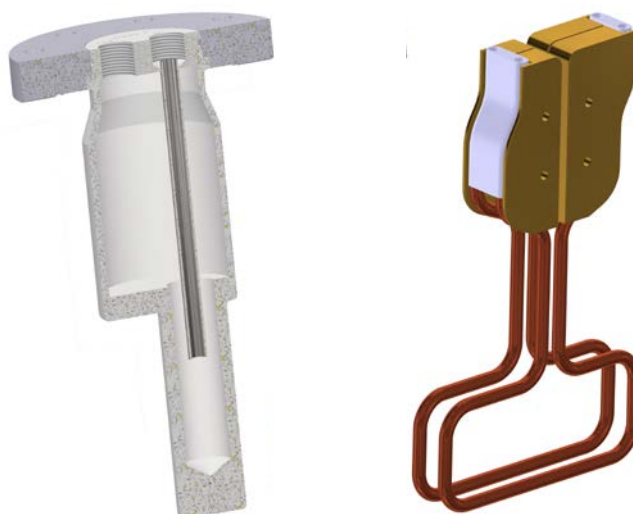
(M. Schütt IAP/GSI, U. Ratzinger, IAP Frankfurt)

Nach der Lieferung des Leiter RFQs (LRFQ, siehe Abb. 24) vom Hersteller Kress GmbH ans IAP in 2020 wurde der RFQ für die ersten HF Leistungstests vorbereitet. Die externen Wasserleitungen wurden mit Hilfe von Kupferleitungen und Swagelok - Fittingen montiert. Spezielle 3D - gedruckte Winkel sorgen für eine zusätzliche mechanische Stabilität und Stoßsicherheit der Kupferrohre. In einem finalen Test des gesamten Kühlkreislaufs wurden undichte Stellen durch Materialfehler des Stahls im Bereich des Einlasses der Tieflochbohrungen festgestellt. Nach erfolglosen Schweißarbeiten konnte der Tank mit tieferen Stopfen gedichtet werden. Das Vakuumsystem bestehend aus einer TMP und diversen Vorvakuumkreisläufen wurde installiert. Der finale Druck betrug nach mehrtägigem Pumpen  $6 \cdot 10^{-9} \text{ hPa}$ . Des Weiteren wurden 10 statische Plunger und 2 motorbetriebene Tuner installiert (s. Abb. 25, links). Die Plunger (verkupfert von der Fa. Galvano-T) sind verkupfert sowie vollständig wassergekühlt. Zur Steigerung der Effektivität ist der untere Zylinder exzentrisch zum oberen Zylinder gefräst. Die final gemessene Frequenz des LRFQs beträgt 325.13 MHz, d.h. ca. 100 kHz unter der Betriebsfrequenz, wobei die motorbetriebenen Tuner die Frequenz um 400 kHz nach oben regeln können.



**Abb. 24:** Leiter-RFQ nach finaler Montage der Vakuumkomponenten, statischer und motorbetriebener Tuner, sowie des Kühlsystems.

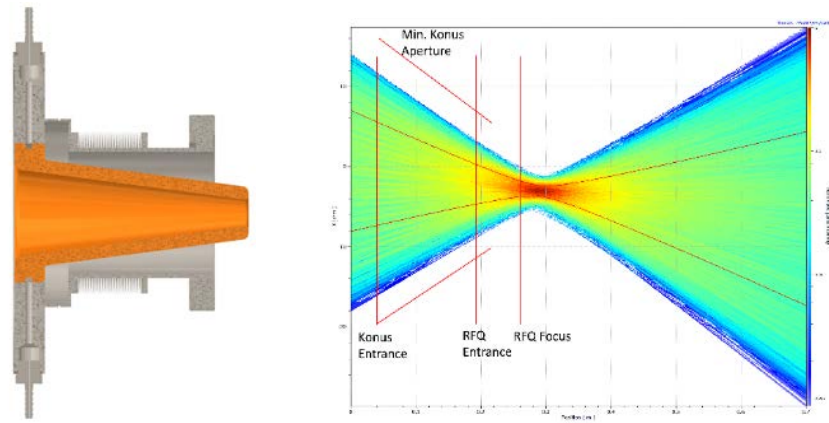
Aufgrund der Geometrie des Einkopplensflansches war es nötig, die Einkoppelschleife insoweit anzupassen, dass die Leiter einen 50 Ohm Anschluss bis ins Innere des RFQs darstellen. Diese erfolgte durch an die Leiterform angepasste Kupfer Brackets und ein Zusammenführen der Schleife (siehe Abb. 25 rechts). Mit Hilfe eines zusätzlichen Adapterflansches kann die Stärke der Ankopplung eingestellt werden. Für das Einkoppelfenster wurde eine GSI-Standard - Keramikdurchführung gefertigt (CF160 auf Tankseite und 9-3/16" Koaxleitung auf HF Seite). Nach Fertigstellung der Schleife und Verlotung mit dem Vakuumfenster konnte sehr gute Anpassung (-40 dB) erreicht werden.



**Abb. 25:** Links: Schnitt durch die statischen Frequenz Plunger. Rechts: HF Einkoppelschleife.

Zusätzlich wurde ein Konus / Beamcatcher designt und gebaut (Fa. NTG). Der Konus (siehe Abb. 26 links) dient zum einen als kontinuierlicher Übergang vom Beamchopper in der LEBT (CF200) zum LRFQ (CF100) und rückt durch seine kompakte Bauform den Strahlfokus optimal in den Bereich des Radial Matchers am RFQ - Eingangsbereich (s. Strahldynamik Simulation in 26 rechts). Dank seines Wellbalgs kann der Abstand auf verschiedene Fokallängen des Solenoids angepasst werden. Die mittlere thermische Strahlbelastung des Konus beträgt 230 Watt (im Fehlerfall 12 kW). Der Konus besteht daher aus Wolfram-Kupfer (70/30), welcher aktiv gekühlt wird.

Nach der finalen Montage und Einstellung der Einkoppelschleife wird mit der HF Konditionierung am IAP begonnen. Anschließend kann der RFQ am 3 MW Klystron der GSI mit seiner vollen Leistung von 1 MW betrieben werden und zusammen mit Quelle + LEBT erstmalig Strahltests unterzogen werden.



**Abb. 26:** Links: „Konus“ - gekühlter Strahlfänger zwischen LEBT-Chopper und RFQ. Rechts: Strahldynamik-Simulation im Bereich von „Konus“ und RFQ Eingang - basierend auf Messungen des angelieferten Strahls von der davorliegenden LEBT-Strecke.



## 3.6 Plasmaphysik (AG Prof. Dr. J. Jacoby)

### 3.6.1 Kurzbeschreibung der Arbeitsgruppe

Forschungsschwerpunkte der Arbeitsgruppe Plasmaphysik unter Leitung von Herrn Prof. J. Jacoby liegen in den Untersuchungen von gepulsten Niederdruck Gasentladungen und atmosphärischen Entladungen hinsichtlich von Anwendungen in Beschleunigeranlagen und Wasserstoffherzeugung durch Methan oder Biogas. Weitere Aufgabengebiete der Arbeitsgruppe umfassen die Untersuchung der Wechselwirkung von Ionenstrahlen bzw. Protonen und Lasern mit warmer dichter Materie (WDM) und quantenmechanische Aspekte supersymmetrischer Streuung.

Ein Teil dieser Forschung wird durch die Zusammenarbeit und die Nutzung der Großgeräte des Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GSI in Darmstadt ermöglicht. Dabei können intensive hochenergetische Schwerionenstrahlen tief in einem Festkörper extreme Zustände erzeugen, wie sie sonst nur im Kern der Erde oder innerhalb von großen Planeten auftreten. Darüber hinaus wird die Wechselwirkung von Laserstrahlen mit Materie zur Erzeugung von energetischen Teilchen (Protonen, Elektronen) und Röntgen- und Gammastrahlen untersucht. Die Forschungsarbeiten konzentrieren sich hierbei mit den Aufbauten und die Untersuchungen von Systemen zur Unterstützung moderner Schwerionenbeschleunigeranlagen sowie der Entwicklung und dem Aufbau von Diagnostiken zur Untersuchung von Ionenstrahl und Laser geheizten Plasmen.

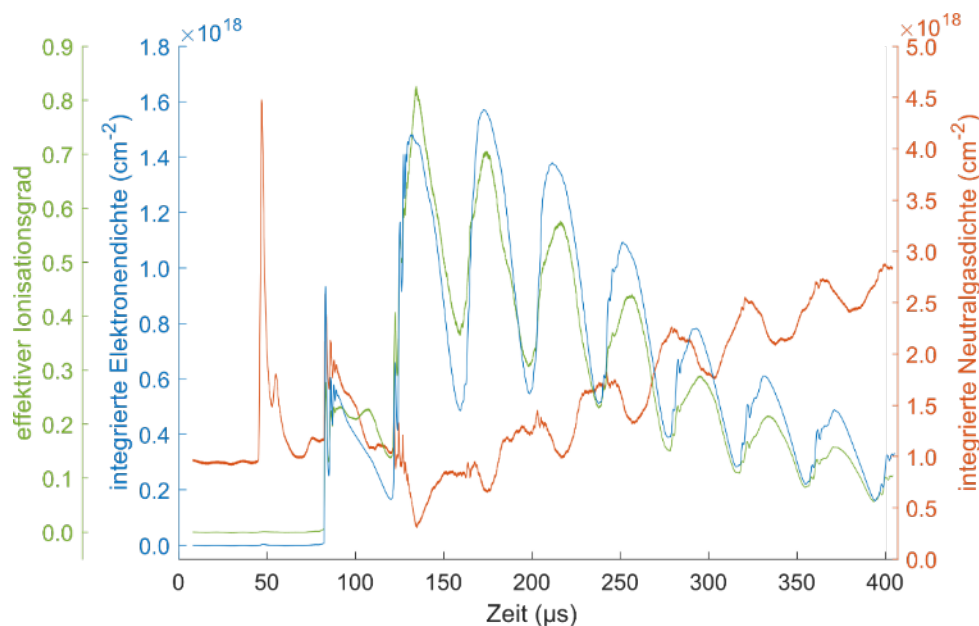
Des Weiteren beschäftigt sich die Arbeitsgruppe mit der Entwicklung von kalten atmosphärischen Plasmen erzeugt durch dielektrischen Barriere Entladungen (DBE). Die Bekämpfung von antibiotikaresistenten Bakterien in Wunden ist eine der größten Herausforderungen in der Medizin. Hierzu werden alternative Behandlungsmöglichkeiten benötigt. Für eine solche Behandlungsmethode könnte die Verwendung eines kalten atmosphärischen Plasmas erzeugt durch eine DBE zur Wundheilung verwendet werden.

### 3.6.2 Untersuchung der Wechselwirkung eines Ionenstrahls höchster Intensität mit einem dichten und hochionisierten Plasmastripper sowie Optimierung des Strippers für FAIR

*(Ph. Christ, K. Cistakov, M. Fröhlich, F. Heppner, M. Iberler, L. Laghchioua, D. Mann, J. Jacoby)*

Im Rahmen dieses Projektes konnte ein neu entwickelter Plasmastripper mit einer verbesserten rein zylindrischen Entladungsspule entwickelt werden. Die Messungen bei einer Strahlzeit an der GSI zeigen eine Erhöhung des Ladungszustands eines Au-Ionenstrahls von +26 auf +33.

Trotz schwieriger Arbeitsbedingungen durch die Corona-Pandemie konnten 2021 mehrere Arbeitspakete aus dem Projektplan bearbeitet und erfolgreich abgeschlossen werden. Zum einen wurde in einem ersten Setup die interferometrische Diagnostik mit einer Wellenlänge fertiggestellt und Messungen bezüglich der Elektronendichte durchgeführt. Dadurch konnten erstmals Einblicke in die Liniendichte des für das Ionenstrahlstrippen vorgesehenen Plasma der sphärischen Theta-Pinch Spule gewonnen werden. Dabei wurden Liniendichten der freien Elektronen von über  $10^{18} \text{ cm}^{-2}$  registriert, was in der Literatur als ein Wert angesehen wird, mit dem ein Strippen möglich ist. Außerdem zeigte sich, dass das zeitliche Verhalten der Liniendichte nicht mit dem Verlauf der spektroskopisch ermittelnden Volumendichte übereinstimmt. Die Maximalwerte beider Messgrößen besitzen einen zeitlichen Versatz von ca.  $10 \mu\text{s}$ , wobei das Maximum der Liniendichte verspätet erfolgt. Aus diesen Daten lässt sich daher erstmals präzise ableiten, zu welchem Entladungszeitpunkt das Plasma den optimalen Arbeitspunkt für die Ionenstrahl-Wechselwirkung besitzt. Die Stimmigkeit der Daten wurde dabei durch zeitaufgelöste CCD-Aufnahmen der Plasmadynamik sichergestellt. In diesem Arbeitsschritt wurde auch die spektroskopische Diagnostik verbessert, indem neben der standardmäßigen Bestimmung der Breite der H-beta Linie auch deren zentrale Struktur (peak separation) zur Diagnostik verwendet wurde. Hieraus ergibt sich eine Vergleichsmöglichkeit der beiden spektroskopischen Ansätze und es lassen sich Rückschlüsse auf die optische Dichte des Plasmas ziehen.



**Abb. 27:** Liniendichte der freien Elektronen und des Neutralgases, sowie der effektive Ionisationsgrad entlang der Achse bei 20 Pa und 16 kV bei Verwendung der zylindrischen Spule.

In einem nächsten Arbeitsschritt ist die interferometrische Diagnostik um einen zweiten Laser erweitert worden. Dies hatte das Ziel, sowohl die Liniendichte der freien Elektronen als auch die des neutralen Wasserstoffgases entlang der Experimentachse zu bestimmen. Aus diesen beiden Größen lassen sich die Ratenkoeffizienten für die Ionisation und Rekombination bei der Plasma-Ionenstrahl-Wechselwirkung und damit die Eignung des Plasmas als Plasmastripper ableiten. Hinsichtlich des Aufbaus wurden dabei zwei unterschiedliche Versionen untersucht, wobei bei einer Version die sphärische Spule und bei der anderen Version die zylindrische Spule eingesetzt wurde. Die interferometrische Diagnostik wurde an diesen beiden Experimentversionen in Abhängigkeit des Arbeitsdrucks und der Ladespannung durchgeführt und erfolgreich abgeschlossen. Damit steht eine effektive Diagnostik zur Verfügung, mit der die Eigenschaften des Plasmas hinsichtlich seiner Eignung als Plasmastripper direkt im Labor bewertet werden kann. Somit könnte in Zukunft zielgerichtet auf einen Aufbau hingearbeitet werden, der die nötigen Zielparameter erreicht, ohne vorher aufwendige Tests direkt im Strahlbetrieb durchführen zu müssen.

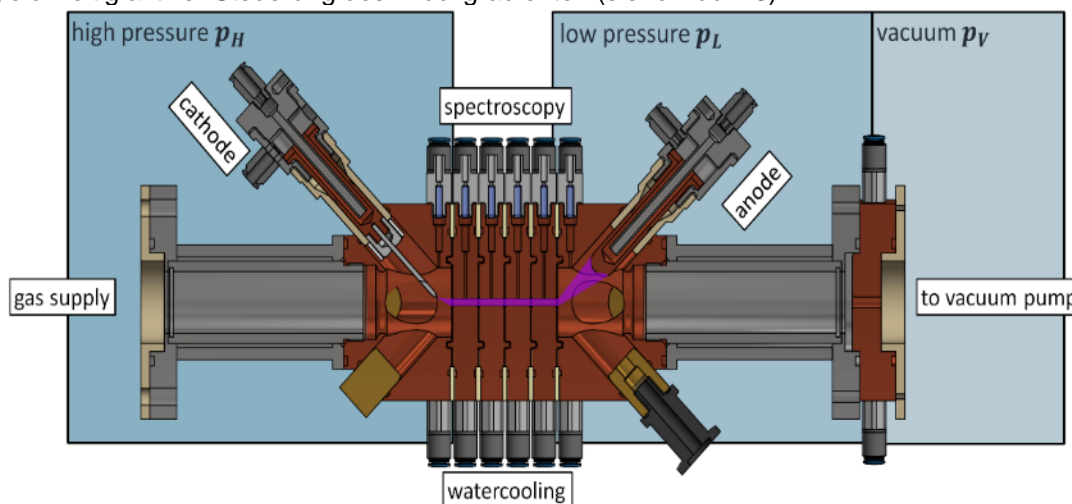
Des Weiteren wurde ein pulsformendes Netzwerk entwickelt, mit dem die Entladung erheblich verlängert werden soll, was ein wichtiger Baustein für die Wechselwirkung mit langgebunchten Ionenstrahlen ist. Die technische Implementierung konnte erfolgreich abgeschlossen werden und erste Messungen mit einer Plasmaentladung sind bereits durchgeführt worden.

Neben diesen Arbeiten wurde im Rahmen einer Doktor- und Masterarbeit ein lasergestütztes Messsystem entwickelt, mit dem das Magnetfeld der Theta-Pinch Spulen entlang der Achse zeit- und orts aufgelöst bestimmt und mit Simulationen verglichen werden kann. Dies stellt eine Verbesserung dar, da übliche Ansätze mit Hall-Sonden aufgrund der hohen elektromagnetischen Störungen gescheitert sind. Diese Arbeiten sind vorbereitend für eine zukünftige Magnetfeldmessung direkt im Plasma anzusehen, da die magnetische Abschirmwirkung des Plasmas noch unzureichend untersucht worden ist. Während des letzten Quartals wurden neben den zuvor erwähnten Messungen sämtliche Ergebnisse ausgewertet und dokumentiert. Zusätzlich wurde eine wie in der Meilensteinplanung beschrieben eine Publikation angefertigt und eine zweite zur Begutachtung eingereicht.

### 3.6.3 Konstruktion, Untersuchung und Einsatz eines Plasmafensters einer UNILAC Strahlzeit an der GSI

(A. Michel, M. Händler, F. Ghaznavi, M. Iberler, J. Jacoby, IAP Frankfurt)

Die Auskopplung intensiver Ionenstrahlen vom Beschleunigervakuum in Bereiche hohen Gasdruckes erfordert eine zuverlässige Trennung der jeweils vorliegenden Umgebungsdrücke. Dort wo konventionelle Methoden an ihre räumlichen oder zeitlichen Betriebsgrenzen kommen, bietet ein Plasmafenster eine membranfreie, kompakte Transmissionsstufe für Ionenstrahlen bei gleichzeitig aktiver Steuerung des Druckgradienten (siehe Abb. 28).



**Abb. 28:** Querschnitt des Plasmafensters inkl. Druckbereiche.

Der in der Arbeitsgruppe Plasmaphysik entwickelte Prototyp des Plasmafensters erlaubt eine aktive Drucktrennung über weite Bereiche, die sich je nach Kanaldurchmesser, gewähltem Volumenfluss sowie Bogenstrom variieren lassen. Im Zuge der Weiterentwicklung dieses ausführlich untersuchten Prototyps wurde das Plasmafenster bei der diesjährigen 2022 UNILAC Beamtime als weltweit erstes Plasmafenster erfolgreich eingesetzt um die Transmission schwerer Ionenstrahlen ( $^{48}\text{Ca}^{10+}$ ) in Bereiche hoher Targetdrücke ( $>100\text{mbar}$ ) nachzuweisen. Neben den reinen Transmissionsmessungen konnten zudem optische Aufnahmen des Ionenstrahls in der Restgasumgebung des getesteten Setups sowie Emittanzmessungen durchgeführt werden, um den Einfluss des Gasflusses mit und ohne Plasma auf die Veränderung des Strahls zu ermitteln (siehe Abb. 29).

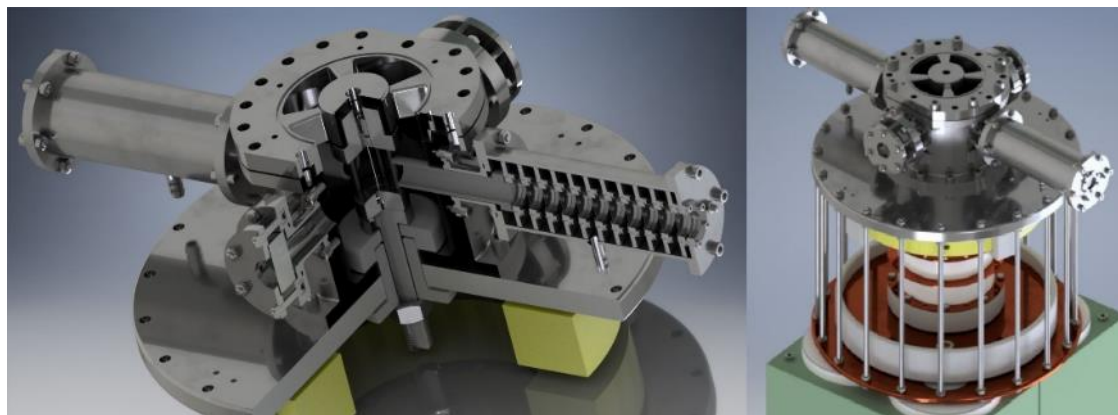


**Abb. 29:** Optische Aufnahme des transmittierenden Ionenstrahls (Aufnahme von Dr. Adem Ates).

### 3.6.4 PRIOR (Proton Microscope for FAIR): Aufbau und Untersuchung von Unterwasser explodierenden Drähten mittel PRIOR

(A. Müller-Münster<sup>1</sup>, C. Hock<sup>1</sup>, M. Iberler<sup>1</sup>, J. Jacoby<sup>1</sup>, G. Schmidt<sup>1</sup>, D. Varentsov<sup>2</sup>, IAP Frankfurt<sup>1</sup>, GSI Darmstadt<sup>2</sup>)

Protonenradiographie stellt eine einzigartige Methode dar um sowohl statische Objekte, als auch dynamische Prozesse hoher Dichte (WDM oder HEDM) zu untersuchen. Sie setzt dort ein wo herkömmliche Analysen keine Ergebnisse mehr liefern. Hierzu wird ein GeV Protonenstrahl genutzt mit dem sich die Flächendichte im Bereich einiger  $\mu\text{m}$  Ortsauflösung und ns Zeitauflösung mit hoher Genauigkeit bestimmen lässt. Nicht ideale dynamische Plasmen (Kopplungsparameter  $\Gamma > 1$ ) sind nach wie vor von großer Interesse in der Grundlagenforschung, um Erkenntnisse über Zustandsgleichung für Materie unter extremen Bedingungen zu erhalten.



**Abb. 30:** Schnitt durch die Target-Kammer (links), Gesamtaufbau (rechts).

Die Unterwasserexplosion von dünnen Drähten (Underwater Electrical Wire Explosion kurz UEWE) ist eine gut geeignete Methode, um Warme Dichte Materie (WDM) im Labor zu erzeugen. Während der Projektphase wurde ein „pulsed power UEWE setup“ (siehe Abbildung 30), für Drahtexplosionen im Mikrosekunden Bereich konzipiert und aufgebaut. Der kompakt gehaltene Aufbau, mit einer Gesamtkapazität von  $10 \mu\text{F}$  zeichnet sich durch seine geringe Induktivität von circa  $150 \text{ nH}$ , eine zylindrische Stripline und einem Thyatron, mit geringem Jitter, als Schaltelement aus. Basis des Experimentellen Aufbaus sind zwei parallel geschaltete Puls-Kondensatoren, werden diese mit bis zu  $40 \text{ kV}$  geladen, folgt daraus eine gespeicherte Energie von  $8 \text{ kJ}$ . Die Konstruktion der Explosionskammer ist Abbildung 30 zu entnehmen. Ein Draht befindet sich in der Mitte der Kammer, welche mit deionisiertem Wasser gefüllt ist. Zwei Strahlachsen ermöglichen die Untersuchung des expandierenden Drahtes. Hier kann auf einer Achse der Protonenstrahl das Experiment passieren, während auf der anderen Achse optische Untersuchungen durch CCD oder Streak-Kameras mit Hilfe von Backlightern ( $5 \text{ W}$ ,  $450 \text{ nm}$  Laserdiode) möglich sind. Nach ausführlichen „off-line“ Tests, kam der Aufbau Anfang 2021 und 2022 bei Strahlzeiten an der GSI im HHT Bereich zum Einsatz (Abb. 31). Neben den optischen Diagnostiken konnte der expandierende Draht erstmals mittels  $2 \text{ GeV}$  und  $4 \text{ GeV}$  Protonendiagnostik untersucht werden. Mit dem Protonenmikroskop PRIOR-II war es möglich eine räumliche Auflösung von  $10 \mu\text{m}$  bei  $10 \text{ ns}$  Zeitauflösung zu erreichen.



**Abb. 31:** PRIOR-II mit dem UEWE-Setup in Beam Position im HHT Bereich der GSI.



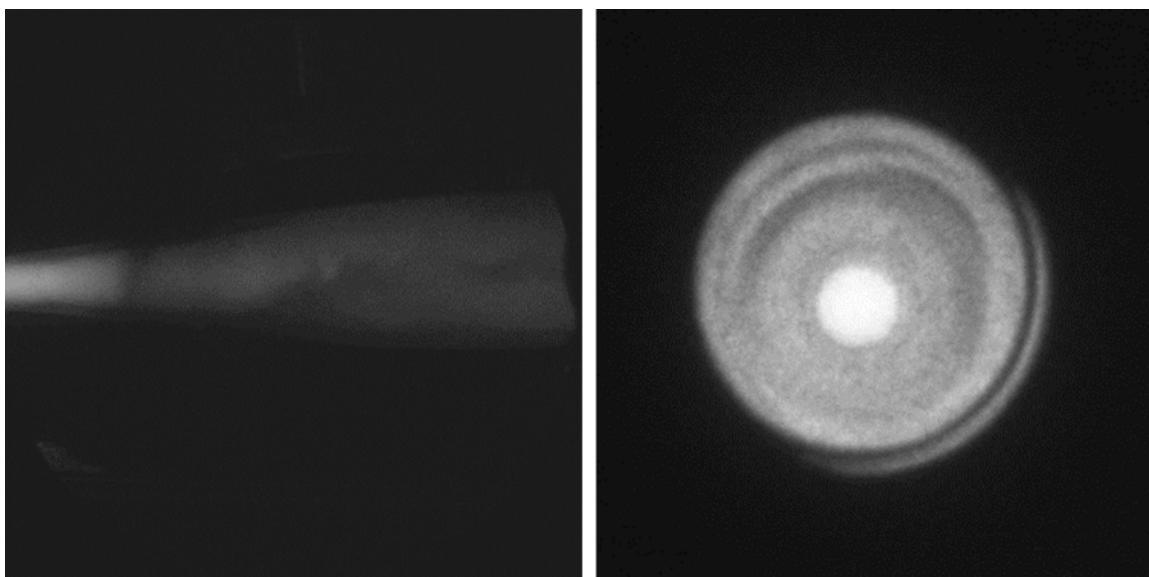
### 3.6.5 Aufbau und Untersuchung einer Plasmalinse zur Fokussierung eines Protonenstrahls bei LIGHT @ FAIR

(M. Dehmer, J. Jacoby, M. Iberler, A. Müller-Münster, A. Michel, T. Ackermann, S. Popp, H. Arda)

Im Hinblick auf die bevorstehende Fertigstellung des Beschleunigerzentrums FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research in Europe GmbH) im Jahr 2026 macht sich der Zusammenschluss der Universitäten Universität Hansestadt Hamburg, Technische Universität Darmstadt und Goethe-Universität Frankfurt zur Aufgabe, die Nutzung von Plasmaquellen als Anwendung in der Teilchenphysik etablieren.

In diesem Zusammenhang interessiert sich die Goethe-Universität insbesondere für das Experiment LIGHT (Laser Ion Generation, Handling and Transport). Die LIGHT-Kollaboration wurde gegründet, um durch Laserstrahl-Target-Wechselwirkung erzeugte Ionenstrahlen mit herkömmlicher Beschleunigertechnologie zu kombinieren. Dazu wird der TNSA-Mechanismus (Target Normal Sheath Acceleration) verwendet. Trifft der Hochleistungslaser PHELIX (Petawatt High Energy Laser for Heavy Ion Experiments) auf das Target, werden Atome ionisiert und durch das entstehende, hohe elektrische Feld in einer Plasmawolke aus dem Target herausbeschleunigt. Die TSNA-Quelle zeigt ein stark divergentes Protonenspektrum mit Energien bis 28 MeV und einer Strahlintensität von mehr als  $10^{19}$  W/cm<sup>2</sup>. Herkömmliche Fokussierelemente wie Quadrupole oder Solenoide eignen sich durch ihre vergleichsweise geringen Magnetfeldgradienten nur bedingt für die Kollimierung dieses Protonenspektrums. Durch den Aufbau einer aktiven Plasmalinse mit großen Magnetfeldgradienten und kleinen Abmessungen wird eine zukunftssträchtige Alternative für LIGHT erforscht.

Um die Geometrie und die Zündparameter des Aufbaus festzulegen, wurde im ersten Schritt der Protonenstrahl in verschiedenen Linsenkonstruktionen simuliert, wodurch außerdem die Ansprüche des Pulsformendes festgelegt werden konnten. Sowohl das Pulsformende Netzwerk als auch die Plasmazellen wurden im Laufe des Jahres fertiggestellt und arbeiten zuverlässig bei den gewünschten Parametern. Bei homogenen Stromdichten führt dies zu einer Protonentransmission von >50%, welche die Transmissionsrate des aktuell verwendeten Solenoids übersteigt. Um die Annahmen der Simulation zu verifizieren, werden Messungen der Stromdichte und des Magnetfeldes durchgeführt. Diese erfolgen über eine spektroskopische Analyse der Leitfähigkeit des Plasmas, welche sich aus Elektronendichte und Elektronentemperatur ergibt, über die Intensitätsverteilung der Strahlung sowie über die induzierte Spannung in Leiterschleifen, welche radial um das Entladungsrohr platziert werden.



**Abb. 32:** Zündung der Plasmalinse bei einer Entladungsspannung von 10 kV und einem Delay von 9  $\mu$ s (links: Senkrecht der Strahlachse, rechts: Entlang der Strahlachse).

### 3.6.6 Optische Ionenstrahldiagnostik bei APPA

*(A. Michel, P. Beloiu, M. Iberler, J. Jacoby, IAP Frankfurt)*

Ionenstrahldiagnostik in Bezug auf zeitliche Struktur und räumliche Verteilung ist unverzichtbar sowohl für den Betrieb eines Beschleunigers, als auch die Durchführung der Experimente. Während die Strahlpositionierung im Beschleunigerbereich an Positionen durchgeführt werden kann, bei denen die Strahlstromdichte relativ gering ist, ist es für HED-Experimente zwingend notwendig, die Strahlposition und Strahlstromdichte sowohl in zeitlicher (Strahltrafo), als auch in x- (links-rechts), y- (auf-ab) und z- (vorne-hinten) Richtung am Ort des Targets, und somit am Ort höchster Intensität mit hoher Präzision zu bestimmen. Bei bisherigen Strahlstromdichten konnten hierfür z.B. Festkörper-Szintillationsmonitore verwendet werden. Dies ist bei den nun geplanten Experimenten nicht mehr möglich, da die Festkörper durch die hohen Strahlintensitäten zerstört würden. Im Folgenden wird daher vorgeschlagen, ein Gastarget als Szintillationsmaterial zu verwenden und einen darauf basierenden Strahlprofil-Monitor aufzubauen. Da der Strahlprofilmonitor unverzichtbar zum Betrieb der HED-Experimente ist, muss dieser unverzüglich, und angepasst an die Strahlintensitäten, aufgebaut, in Betrieb genommen, und validiert werden. Dies wird im Rahmen einer Dr.-Arbeit erfolgen. Aufgrund der Bedeutung des Strahlprofilmonitors für alle anderen Experimente soll, um eine möglichst zeitnahe Umsetzung zu ermöglichen, anfangs auch Unterstützung durch Unterauftragnehmer erfolgen. Sämtliche Entwicklungsarbeiten werden in enger Zusammenarbeit mit den Kollaborationspartnern TU-Darmstadt und FSU-Jena durchgeführt. Ein Strahlprofil-Monitor, basierend auf Restgas in der Targetkammer, wurde aufgebaut und im Rahmen einer Strahlzeit in Verbindung mit dem Plasma-Window untersucht.

Die höchste Lichtausbeute (emission quantum efficiency) aller bisher untersuchten Gase (N<sub>2</sub>, He, Ne, Ar, Kr, Xe) besitzt der B-X Übergang bei 391 nm im ionischen Stickstoff-Molekül. Dieser Übergang wäre somit die erste Wahl bei BIF-Monitoren (Beam Induced Fluorescence). Jedoch besitzt dieser Übergang eine Lebensdauer von 66 ns, was eine Verbreiterung des gemessenen Strahlprofils von mehr als 60 µm allein durch die thermische Bewegung bewirkt. Für einen intensiven Ionenstrahl, bei welchem aufgrund von Raumladungseffekten radiale Feldstärken im Bereich 10<sup>5</sup> V/m auftreten, ergeben sich sogar effektive Dislokationen von bis zu >1mm. Ionische Stickstoffübergänge scheiden aufgrund der zu langen Lebensdauer somit als BIF-Monitor aus.

## 4 Feinmechanische Institutswerkstatt

Die feinmechanische Institutswerkstatt hat ihren Schwerpunkt in der Unterstützung der Wissenschaftler bei der Planung, der Konstruktion und in der mechanischen Herstellung von Komponenten. Dabei bietet die Werkstatt mit ganzheitlichem Werkzeug- und Fertigungs-Knowhow im Bereich der Forschung und Entwicklung eine Fertigung von individuellen Apparaturen und Bauteilen. Dabei setzt man bewusst auf eine schlanke Struktur.

Doch hat eine schlanke Struktur Vor- und Nachteile: Der Vorteil liegt u.a. darin, dass die Bürokratie auf ein Minimum beschränkt ist: der Auftraggeber bespricht direkt mit dem Werkstattleiter seine Ideen und Entwürfe – hierbei unterstützt er in der Konstruktionsphase, übernimmt die Arbeitsvorbereitung und leitet die einzelnen Aufträge an die Mitarbeiter weiter, je nach Qualifikation. Nachteil der verschlankten Belegschaft ist, dass immer wieder Engpässe in der Ausführung der Aufträge entstehen. Das wird für die Werkstatt in Zukunft eine Herausforderung bleiben, denn in der Werkstatt hat es im Jahr 2021 große Veränderungen gegeben:



**Abb. 33:** Herr Hartner beim Bearbeiten eines Edelstahl Kreuztanks.

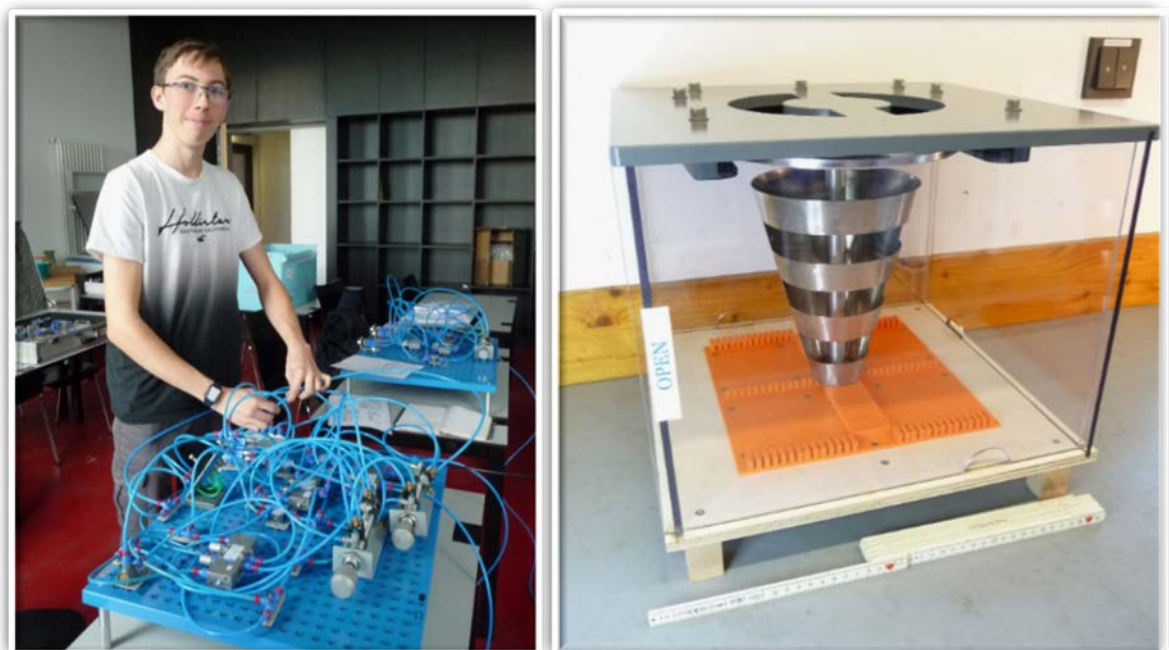
**Edgar Binner** und **Wolfgang Billjött** sind in den wohlverdienten Ruhestand getreten. Dafür konnten wir **Pascal Hartner** gewinnen, der seit Februar 2021 das Team ergänzt und nach dem Motto: „Everything is fine“ an unseren beiden NC-Drehmaschinen komplexe Werkstücke fertigt. Auch **Ralf Gössling** hat die Abteilung gewechselt. Er unterstützt uns zeitweise aber, nach wie vor, bei speziellen Fertigungsarbeiten. **Viktor Hammer** ist für das 5-Achs-Fräsen und die Ausbildung von Lehrlingen zuständig: So konnten wir im August 2021 auch noch die Ausbildungsstelle erfolgreich mit **Robin Klein** besetzen.

**Sven Reploeg** ist als Werkstattleiter für den reibungslosen Ablauf verantwortlich, betreut Schülerpraktikanten und fertigt mit den hauseigenen 3D-Druckern Werkstücke. Dank der Unterstützung des Instituts, konnte Mitte 2021 mit einem neuen 3D-Drucker die additive Fertigung professionalisieren. Mit diesem Drucker ist es uns nun möglich diverse Kunststoffe, bis hin zu carbonfaser-verstärktem Polyamid zu drucken (Abb. 34).

Bei dem Thema Schülerpraktika konnten wir leider im Jahr 2021, Corona bedingt, keinen Praktikumsplatz anbieten. Aber im November 2022 war **Vincent Görs** bei uns. Auch hatten wir die Möglichkeit **Alina Bachmann** bei ihrem Jugend-Forscht Projekt zu unterstützen (Abb. 35).



**Abb. 34:** Druck von einem Segment eines dreifachen Teleskopes mit den Maßen:  $\varnothing 230 \times 285\text{mm}$ .



**Abb. 35:** Robin Klein beim Pneumatik-Lehrgang (links), Unterstützung für ein Jugend-Forscht-Projekt (rechts).





**Abb. 36:** Vom Praktikanten Vincent Görs hergestellt: Weintraubenpresse mit einem 3D gedruckten Bottich.

Zusätzlich plant Herr Reploeg mit einem kleinen Team, bestehend aus L. Quist, A. Hergt, D. Bänsch und V. Hammer die Betriebsausflüge des Instituts.

Der Betriebsausflug im Jahr 2021 führte uns mit einer Wanderung vom Bahnhof Saalburg über die Saalburg zum Herzbergturm und zurück.

Der Betriebsausflug 2022 ging nach Fulda. Dort starteten wir mit einer kleinen Stadtbesichtigung. Anschließend ging es in das Planetarium. Den Abschluss genossen wir im Brauhaus Wiesenmühle wo man die Möglichkeit hatte sich Europas größtes Mühlenrad anzusehen.



**Abb. 37:** Betriebsausflug 2021.



**Abb. 38:** Betriebsausflug 2022.

## 5 Lehrveranstaltungen (SoSe 2021 bis WiSe 2022/23)

### 5.1 Vorlesungen und Übungen

#### 5.1.1 Sommersemester 2021

|   |   |
|---|---|
| Anfängerpraktikum 2 für Studierende der Physik, Meteorologie und Lehramt L3, Ergänzungen dazu           | M. Iberler, J. Jacoby                                 |
| Blockpraktikum AP 2 für Studierende der Physik und Meteorologie, Ergänzungen dazu                       | M. Iberler  |
| Data Analysis   | M. Röllig   |
| Elektronik und Sensorik II  | R. Tiede  |
| Anwendung der Supraleitung in Beschleuniger- und Fusionstechnologien (V+Ü)                              | M. Busch  |
| Atomphysik für Lehramt Haupt- und Realschulen, L2, L5 (V+Ü)   | O. Meusel   |
| Einführung in die Physik B2 für Nebenfachstudierende (V+Ü)  | H. Podlech  |
| Einführung in die Plasmaphysik (V+Ü)  | J. Jacoby   |
| Erzeugung von Materie hoher Energiedichte, relativistische Teilchen und Gamma-Strahlen in Laser-Materie | O. Rosmej, M. Günther                                 |
| Wechselwirkung II (V+Ü)   |   |
| Experimentalphysik 2: Elektrodynamik (V+Ü)  | U. Ratzinger  |
| Physik und Anwendungen der Hochspannungstechnik (V+Ü)   | M. Iberler  |
| Linearbeschleuniger (V+Ü)   | U. Ratzinger  |
| Höhere Experimentalphysik 2 (V+Ü)   | O. Meusel, H. Podlech, K. Schulte-Urlichs, P. Britten |

#### 5.1.2 Wintersemester 2021/2022

|   |                         |
|---|-------------------------|
| Einführung in die Beschleunigerphysik mit Exkursion (V+Ü)   | U. Ratzinger            |
| Beschleunigerinstrumentierung und Strahldiagnostik  | P. Forck, P. Kowina     |
| Einführung in die Physik B1 für Nebenfachstudierende (V+Ü)  | J. Jacoby               |
| Elektronik und Sensorik I (V+Ü)   | R. Tiede                |
| High Intensity Linacs and their Applications (V+Ü)  | H. Podlech, C. Zhang    |
| Höhere Experimentalphysik 1 (V+Ü)   | O. Meusel, H. Podlech   |
| Anfängerpraktikum 2 für Studierende der Physik, Meteorologie, Informatik und Lehramt L3, Ergänzungen dazu | M. Iberler              |
| Experimente zur nuklearen Astrophysik   | T. Heftrich, M. Weigand |
| Thermodynamik im Alltag   | R. Reifarth             |
| Vakuumphysik 2: Vakuumphysik an Beschleunigern  | G. Franchetti           |
| Laseranwendungen in Teilchenbeschleunigern  | H. Hähnel               |
| Physik der Energiegewinnung (V+Ü)   | H. Podlech              |
| Plasmen hoher Energiedichte und Röntgenstrahlung im Universum und Labor, Teil I (V+Ü)                     | P. Neumayer             |

#### 5.1.3 Sommersemester 2022

|   |   |
|---|---|
| Anfängerpraktikum 2 für Studierende der Physik, Meteorologie und Lehramt L3, Ergänzungen dazu           | M. Iberler, J. Jacoby                                 |
| Data Analysis   | M. Röllig   |
| Elektronik und Sensorik II  | R. Tiede  |
| Experimentelle Tests der Relativitätstheorie  | R. Reifarth   |
| Anwendung der Supraleitung in Beschleuniger- und Fusionstechnologien (V+Ü)                              | M. Schwarz, T. Conrad                                 |
| Atomphysik für Studierende des Lehramtes an Haupt- und Realschulen, L2, L5 (V+Ü)                        | O. Meusel   |
| Einführung in die Physik B2 für Nebenfachstudierende (V+Ü)  | H. Podlech  |
| Einführung in die Plasmaphysik (V+Ü)  | J. Jacoby   |
| Erzeugung von Materie hoher Energiedichte, relativistische Teilchen und Gamma-Strahlen in Laser-Materie | O. Rosmej, M. Günther                                 |
| Wechselwirkung II (V+Ü)   |   |
| Höhere Experimentalphysik 2 (V+Ü)   | O. Meusel, H. Podlech, K. Schulte-Urlichs, P. Britten |
| Linearbeschleuniger (V+Ü)   | U. Ratzinger  |
| Physik und Anwendungen der Hochspannungstechnik (V+Ü)   | M. Iberler  |

Ringbeschleuniger und Speicherringe (V+Ü)  
Vakuumphysik 1 (V+Ü)

G. Franchetti  
G. Franchetti

### 5.1.4 Wintersemester 2022/2023

Anfängerpraktikum 2 für Studierende der Physik,  
Meteorologie, Informatik, Ergänzungen dazu  
Beschleunigerinstrumentierung und Strahldiagnostik

M. Iberler

Experimente zur nuklearen Astrophysik  
Blockpraktikum AP2 für Studierende der Physik und  
Meteorologie, Ergänzungen dazu  
Kernphysikalische Methoden in Forschung und Industrie  
Laseranwendungen in Teilchenbeschleunigern  
Vakuumphysik 2: Vakuumphysik an Beschleunigern  
Astronomische Beobachtungstechniken (V+Ü)  
Einführung in die Beschleunigerphysik mit Exkursion (V+Ü)  
Einführung in die Physik B1 für Nebenfachstudierende (V+Ü)  
Elektronik und Sensorik I (V+Ü)  
High Intensity Linacs and their Applications (V+Ü)

H. Podlech, P. Forck,  
P. Kowina  
T. Heftrich  
M. Iberler

Höhere Experimentalphysik 1 (V+Ü)

R. Reifarh  
H. Hähnel  
G. Franchetti  
C. Hansen  
H. Hähnel  
J. Jacoby  
R. Tiede  
H. Podlech, K. Kümpel,  
C. Zhang  
O. Meusel, H. Podlech,  
K. Thoma  
H. Podlech  
P. Neumayer  
C. Hansen

Physik der Energiegewinnung (V+Ü)  
Plasmen hoher Energiedichte und Röntgenstrahlung im  
Astronomische Beobachtungstechniken

## 5.2 Praktika

### 5.2.1 Sommersemester 2021

Anfängerpraktikum 2 für Studierende der Physik  
Anfängerpraktikum 2 für Studierende der Physik,  
Meteorologie und Lehramt L3  
Elektronik-Praktikum für Studierende der Physik  
Fortgeschrittenenpraktikum vom Institut für Angewandte  
Physik, Kurs für Studierende des Lehramts  
Fortgeschrittenenpraktikum vom Institut für Angewandte  
Physik, Kurs für Studierende Physik  
Physikalisches Praktikum A2 für Studierende der Informatik  
Physikalisches Praktikum B2 für Studierende der  
Biowissenschaften  
Physikalisches Praktikum C für Studierende der Biochemie  
Physikalisches Praktikum C für Studierende der Chemie  
Physikalisches Praktikum C für Studierende der  
Geowissenschaften  
Physikalisches Praktikum für Studierende der Pharmazie  
Astrophysikalisches Praktikum (Blockveranstaltung)  
Blockpraktikum AP 2 für Studierende der Physik und  
Meteorologie  
Labor- und Forschungspraktikum

M. Iberler  
M. Iberler, J. Jacoby, C. Krellner  
  
R. Tiede, I. Fröhlich  
H. Podlech, M. Busch  
  
H. Podlech, M. Busch  
  
M. Iberler, J. Jacoby  
K. Volk  
  
M. Iberler, C. Krellner  
M. Iberler, C. Krellner  
M. Iberler, C. Krellner  
  
R. Tiede, C. Krellner, A. Kraiker  
T. Heftrich, M. Weigand  
M. Iberler  
  
H. Podlech, M. Busch

### 5.2.2 Wintersemester 2021/2022

Anfängerpraktikum 2 für Studierende der Physik,  
Meteorologie, Informatik und Lehramt L3  
Anfängerpraktikum für Studierende der Biophysik  
Physikalisches Praktikum B2 für Studierende der  
Biowissenschaften  
Physikalisches Praktikum C für Studierende der Chemie,  
Biochemie und Geowissenschaften  
Physikalisches Praktikum für Studierende der Pharmazie  
Blockpraktikum AP 2 für Studierende der Physik und Meteorologie

M. Iberler, J. Jacoby, C. Krellner  
  
M. Iberler, C. Krellner  
K. Volk  
  
M. Iberler, C. Krellner  
  
R. Tiede, C. Krellner, A. Kraiker  
M. Iberler



Fortgeschrittenenpraktikum für Studierende des Lehramts  
 Fortgeschrittenenpraktikum für Studierende Physik  
 Labor- und Forschungspraktikum

O. Meusel, H. Podlech  
 O. Meusel, H. Podlech  
 H. Podlech, M. Busch, O. Meusel

### 5.2.3 Sommersemester 2022

Anfängerpraktikum 2 für Studierende der Physik  
 Anfängerpraktikum 2 für Studierende der Physik,  
 Meteorologie und Lehramt L3  
 Elektronik-Praktikum für Studierende der Physik  
 Physikalisches Praktikum A2 für Studierende der Informatik  
 Physikalisches Praktikum B2 für Studierende der  
 Biowissenschaften  
 Physikalisches Praktikum C für Studierende der Biochemie  
 Physikalisches Praktikum C für Studierende der Chemie  
 Physikalisches Praktikum C für Studierende der  
 Geowissenschaften  
 Physikalisches Praktikum für Studierende der Pharmazie  
 Astrophysikalisches Praktikum (Blockveranstaltung)  
 Blockpraktikum AP 2 für Studierende der Physik und Meteorologie  
 Fortgeschrittenenpraktikum für Studierende des Lehramts  
  
 Fortgeschrittenenpraktikum für Studierende Physik  
  
 Labor- und Forschungspraktikum

M. Iberler  
 M. Iberler, J. Jacoby, C. Krellner  
  
 R. Tiede, I. Fröhlich  
 M. Iberler, J. Jacoby  
 K. Volk  
  
 M. Iberler, C. Krellner  
 M. Iberler, C. Krellner  
 M. Iberler, C. Krellner  
  
 R. Tiede, C. Krellner, A. Kraiker  
 T. Heftrich, M. Weigand  
 M. Iberler  
 O. Meusel, H. Podlech,  
 M. Schwarz  
 H. Podlech, O. Meusel,  
 M. Schwarz  
 M. Schwarz  
 H. Podlech, O. Meusel,  
 M. Schwarz

### 5.2.4 Wintersemester 2022/2023

Anfängerpraktikum 2 für Studierende der Physik,  
 Meteorologie, Informatik und Lehramt L3  
 Anfängerpraktikum für Studierende der Biophysik  
 Physikalisches Praktikum B2 für Studierende der  
 Biowissenschaften  
 Physikalisches Praktikum C für Studierende der Chemie,  
 Biochemie und Geowissenschaften  
 Physikalisches Praktikum für Studierende der Pharmazie  
 Blockpraktikum AP 2 für Studierende der Physik und Meteorologie  
 Fortgeschrittenenpraktikum für Studierende des Lehramts  
 Fortgeschrittenenpraktikum für Studierende Physik  
 Labor- und Forschungspraktikum  
 Astronomische Beobachtungstechniken

M. Iberler, J. Jacoby, C. Krellner  
  
 M. Iberler, C. Krellner  
 K. Volk  
  
 M. Iberler, C. Krellner  
  
 R. Tiede, C. Krellner, A. Kraiker  
 M. Iberler  
 O. Meusel, H. Podlech  
 O. Meusel, H. Podlech  
 H. Podlech, O. Meusel  
 C. Hansen

## 5.3 Seminare

### 5.3.1 Sommersemester 2021

Hochleistungsbeschleuniger und deren Anwendungen  
 Aktuelle Themen der Angewandten Physik  
  
 Beschleuniger-Seminar  
 Interstellare Materie im Fokus

H. Podlech, C. Zhang  
 J. Jacoby, H. Podlech, U.  
 Ratzinger, A. Schempp, T.  
 Haberer, R. Reifarh  
 H. Podlech, U. Ratzinger  
 B. Deiss, T. Heftrich,  
 M. Weigand

### 5.3.2 Wintersemester 2021/2022

Beschleuniger-Seminar  
 Aktuelle Probleme der Astronomie  
 Aktuelle Themen der Angewandten Physik

H. Podlech, U. Ratzinger  
 B. Deiss, T. Heftrich, M. Weigand  
 J. Jacoby, H. Podlech,  
 U. Ratzinger, A. Schempp  
 R. Reifarh, G. Franchetti

### 5.3.3 Sommersemester 2022

|   |  |
|---|--|
| Hochleistungsbeschleuniger und deren Anwendungen        | H. Podlech, K. Kümpel,<br>C. Zhang   |
| Aktuelle Themen der Angewandten Physik                  | C. Hansen, J. Jacoby,<br>H. Podlech, U. Ratzinger,<br>R. Reifarth, A. Schempp,<br>T. Haberer |
| Beschleuniger-Seminar<br>Interstellare Materie im Fokus | H. Podlech, U. Ratzinger<br>B. Deiss, T. Heftrich,<br>M. Weigand                             |
| Schülerveranstaltung                                    | U. Ratzinger   |

### 5.3.4 Wintersemester 2022/2023

|   |  |
|---|--|
| Beschleuniger-Seminar<br>Aktuelle Probleme der Astronomie | H. Podlech, H. Hähnel<br>B. Deiss, T. Heftrich,<br>M. Weigand  |
| Aktuelle Themen der Angewandten Physik                    | J. Jacoby, H. Podlech,<br>U. Ratzinger, T. Haberer,<br>G. Franchetti, C. Hansen,<br>R. Reifarth, A. Schempp,<br>T. Haberer |
| Arbeitsgruppenseminar: Experimentelle Astrophysik         | R. Reifarth  |
| Arbeitsgruppenseminar Plasmaphysik                        | M. Iberler, J. Jacoby  |
| Arbeitsgruppenseminar Professor Podlech                   | H. Podlech   |
| Arbeitsgruppenseminar Professor Ratzinger                 | U. Ratzinger   |
| Astro-Seminar für Fortgeschrittene                        | C. Hansen  |
| EXPLORE: Messengers from the Extreme & Ancient Universe   | C. Hansen  |
| Arbeitsgruppenseminar: Sterne und Galaxien                | C. Hansen  |

## 6 Abgeschlossene Examensarbeiten

### 6.1 Dissertationen

Stephan Reimann

Investigations of the automatic design and optimisation of beam transport lines in particle accelerators with dedicated imaging properties

doi: 10.21248/gups.65241

Malte Schwarz

Beam dynamics design of an energy-variable superconducting heavy ion accelerator

doi: 10.21248/gups.64448

Klaus Kümpel

Untersuchungen am MYRRHA Injektor

doi 10.21248/gups.68892

Elena Fol

Applications of Machine Learning in Beam Optics Measurements and Corrections

Sajjad Mirza

Closed Orbit Feedback System for the fast Ramping Hadron Synchrotrons

Marc Syha

Beam Dynamics Design of the FAIR Proton-Linac RFQ and Design Study of a Compact 325 MHz RFQ

Markus Reich

Radiative capture cross sections for nuclear astrophysics in activation experiments

Cem Deniz Kurtulgil

Neutron capture on gallium in the astrophysical s process using time of flight

Benjamin Sebastian Brückner

${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$  neutron fields and their application for astrophysics

Meiko Niklas Volkandt

Neutroneneinfangsreaktionen kurzlebiger Isotope

Anna-Lena Ernst

Untersuchungen zur radioaktiven Belastung von Maronenröhrlingen (*Imleria badia*) und Steinpilzen (*Boletus edulis*) mit Cäsium-137

Alexander Müller-Münster

Untersuchung von explodierenden Drähten im Wasserbad mittels Protonenmikroskopie

Philipp Christ

Zeitaufgelöste Bestimmung der integrierten Elektronen- und Neutralgasdichte in einem Wasserstoff-Theta-Pinch-Plasma mittels Zweifarben-Interferometrie

### 6.2 Masterarbeiten

Stephan Wagner

Mechanische Schwingungsuntersuchungen und Konditionierung eines neuen HLI-RFQ Prototypen

Maximilian März

Automatisierte Konditionierung von normalleitenden Beschleunigerstrukturen mithilfe von LabVIEW

Luca Charlotte Braun

Advanced Numerical Thermal Simulations of continuous wave operated CH-Cavities

Anna-Luisa Glock  
Energiespektroskopie von Restgasionen zur Bestimmung intensiver Zustandsgrößen eines Nicht-Neutralen Plasmas

Annemarie Lauterbach  
Behavior of Beam Emittance Driven by Transverse Noise Excitation

Benedikt Gutsche  
Entwicklung eines Systems zur Oberflächendarstellung mit Hilfe von Rückstreuelektronen in Anlagen zur Turbinenschaufelbeschichtung

Tabea Marie Kuttner  
Stellare Neutroneneinfangquerschnitte von  $^{69,71}\text{Ga}$ ,  $^{23}\text{Na}$  und  $^{37}\text{Cl}$

Sabina Krasilovskaja  
Bau einer ToF-Wand zur Z-Bestimmung

Anton Goertz  
Poleward Moving Auroral Forms and Dayside Flow Channels

Benedict Heybeck  
Optimization of a digital data acquisition system

Sophia Florence Dellmann  
Bestimmung des  $^{179}\text{Ta}(n,\gamma)$  Wirkungsquerschnitts

Mikhail Gyrdymov  
Charakterisierung der Energie- und Winkelverteilung der laserbeschleunigten ultra-relativistischen Elektronen

Lorenzo Manganelli  
Measurement and analysis of relativistic particles generated by short pulse laser interaction with matter

Felix Heppner  
Entwicklung einer lasergestützten Messmethode zur Bestimmung des orts- und zeitaufgelösten Magnetfeldverlaufs einer Theta-Pinch Spule mithilfe des magnetooptischen Faraday-Effekts

Tobias Pfeiffer  
Feldemission von Kohlenstoffnanoröhren

Marcel Margraf  
Aufbau und Optimierung eines (Mikro-)Hohlkathodenaufbaus hinsichtlich Wasserstoffherzeugung mit Methan

Layla Laghchioua  
Einfluss einer Crowbar-Schaltung auf die Elektronendichte eines Wasserstoff-Theta-Pinch-Plasmas

Tatjana Schusser  
Interferometrische Bestimmung der integrierten Elektronendichte eines Theta-Pinch-Plasmas

Christian Hübinger  
Entwicklung einer zerstörungsfreien Analysemethode elektromagnetischer Felder von hochintensiven Ionenstrahlen

### 6.3 Bachelorarbeiten

Greta Blank  
Optische Tomographie an intensiven Ionenstrahlen mit einem Multikamerasystem

Janis Richter  
Potentialabschätzung zur flächendeckenden Einführung von Mehrwegsystemen für Glasverpackungen



Alexander Ruffer  
Thermische Untersuchungen an einer MYRRHA-CH

Julius Storch  
Thermische Analyse des RFQ-Prototypen für den Hochladungsinjektor (HLI) der GSI

Thomas Dönges  
Entwicklung eines Kontrollsystems für den manuellen und automatisierten Betrieb von Raumladungslinsen

Julian Rausch  
Development, Design and Construction of a measurement station for momentum spectrometry of low energy particle sources

Jannik Henkmann  
Thermische Untersuchungen an 4-Rod-RFQ Beschleunigerstrukturen in CST anhand des HLI-RFQ der GSI

Eduard Boos  
Methodenvergleich zur Bestimmung der Betriebsfrequenz von CH-Kavitäten

Marlon Till Leon Dragun  
Bestimmung der  $(n,\gamma)$ -Wirkungsquerschnitte von  $^{96,102,104}\text{Ru}$  für quasistellare Neutronenspektren zwischen 25 keV und 90 keV

Kai Mannberger  
Der  $(p,\gamma)$  – Wirkungsquerschnitt von  $^{96}\text{Ru}$  und  $^{96}\text{Ru}$  für Protonenenergien zwischen 2050 keV und 2352 keV

Vsevolod Gerasimov  
Multivariable interpolation and extrapolation methods in numerical KOSMA-T PDR models

Anastasiia Budovska  
Neutroneneinfangquerschnitte von Neodym-Isotopen bei 25 keV und 7 keV

Svenja Heil  
Die Bestimmung der Halbwertszeit von  $^{129}\text{I}$

Tom Staab  
Neutroneneinfangquerschnitte natürlichen Zinks für quasistellare Neutronenspektren von 25 keV bis 90 keV

Rim Mourad  
Neutroneneinfangquerschnitt von  $^{181}\text{Ta}$  bei  $k_B T \approx 7,75$  keV

Ernest Ademi  
Der  $(n,\gamma)$ -Wirkungsquerschnitt von Arsen für ein quasistellares 30-90 keV Neutronenspektrum

Alexander Huhn  
Aktivierungen von Goldfolien mit der  $^7\text{Li}(p,n)$ -Neutronenquelle

Alexandra Härth  
Neutroneneinfangquerschnitte von  $^{79,81}\text{Br}$  für quasistellare Spektren von 25 keV bis 90 keV

Janina Strahl  
 $(n,\gamma)$  Cross Sections of Natural Selenium for a Quasi-Stellar Spectrum of 25 keV - 90 keV

Diego Mederos Leber  
Emission of ionized carbon in the massive star forming region Mon R2

Johannes Schirmbeck  
Der  $(n,\gamma)$  -Wirkungsquerschnitt natürlichen Selens für ein quasistellares 25 keV Neutronenspektrum

Madeleine Margaux Gail  
Neutronenaktivierung von  $^{64}\text{Ni}$  bei  $k_B T = 7,75$  keV

Nicolai Merlin Gimbel

Der  ${}^7\text{Li}(p,\gamma)$ -Querschnitt gemessen am Van-de-Graaff-Beschleuniger des IKF

Marcel Bennedik

Neutroneneinfang natürlichen Germaniums für quasistellares Spektrum von 25 keV bis 90 keV

Roman Busch

Untersuchung der Kalibrierbarkeit eines Piezosensors zur Vermessung der Schockwellen am Underwater Electrical Wire Explosion Experiment

Sebastian Busch

Spektroskopische Untersuchung mit Schwerpunkt zeitaufgelöster Elektronendichtemessung am Plasmabeschleuniger

Michael Häfner

Numerical Optimization of the water phantom position inside the laser-driven relativistic electron beam for experiments on FLASH-effect

Luna-Fee Düster

Behandlung der Früchte von *Malus domestica* „Mairac“ mit nicht-thermischem Plasma und Heißwasser-Tauchverfahren zur Reduktion von Pilzen auf der Schale

Michael Händler

Untersuchung des Einflusses eines externen Helmholtzspulen-Magnetfeldes auf die Elektronendichte und –temperatur einer kaskadierenden Bogenentladung

Maurice Fröhlich

Bestimmung der Dichteverteilung eines Theta-Pinch-Plasmas mittels Lichtintensitätsmessung

## 7 Geförderte Forschungsprojekte und Kooperationen

| <b>Bereich - Astrophysik</b>  | <b>Förderer/Kooperationspartner</b> |
|---|-------------------------------------|
| Aufbau von APPA bei FAIR: Reaktionsstudien mit Ionenspeicherringen<br>R. Reifarth: 2021-2024                      | BMBF                                |
| Aufbau von NUSTAR bei FAIR: ( $\alpha, \gamma$ ) Reaktionen via Coulomb-Aufbruch an R3B<br>R. Reifarth: 2020-2023 | BMBF                                |
| New Methods and Measurements of Stellar Neutron-Induced Reaction Cross Sections<br>C. Langer: 2018-2021           | GIF                                 |
| PRECISE - Production of radioactive $^{32}\text{Si}$ in Stars and Stellar Explosion<br>R. Reifarth: 2018-2022     | DFG                                 |
| Reaktionsstudien mit Ionenspeicherringen<br>R. Reifarth: 2018-2021  | BMBF                                |
| Nukleare Astrophysik an R3B @ FAIR  | BMBF                                |
| ChETEC-INFRA (Co-I)<br>C. J. Hansen: 2021-2025  | EU                                  |
| <b>Bereich – Beschleunigerphysik</b>  |                                     |
| Verbund Hadronenlinacs<br>H. Podlech, U. Ratzinger, 2021-2024   | BMBF                                |
| FAIR-p-Linac, RFQ, seit 2015<br>U. Ratzinger  | BMBF, GSI                           |
| High Brilliance Neutron Source<br>H. Podlech, seit 2020   | FZJ                                 |
| Future Circular Collider<br>H. Podlech, seit 2022   | CERN                                |
| MYRRHA<br>H. Podlech, 2018-2025   | SCK•CEN                             |
| ARIES<br>K. Schulte-Urlichs   | EU                                  |
| <b>Bereich Plasmaphysik</b>   |                                     |
| APPA-Verbund  | BMBF                                |
| Plasmalinse für FAIR  | BMBF                                |
| <b>IAP insgesamt</b>  |                                     |
| Stipendien für Studierende und Doktoranden,<br>Sachmittel für FRANZ-Projekt                                       | Prof. Dr. Gerhard Lander - Stiftung |
| Helmholtz-Forschungsakademie Hessen für Fair  | HFHF                                |

## 8 Mitarbeit in Fachausschüssen, Fachgruppen und Gremien

|  |                           |   |
|--|---------------------------|---|
| Gutachter für internationale Fachzeitschriften |                           | R. Reifarth, K. Göbel,<br>M. Weigand,<br>U. Ratzinger, O. Meusel<br>H. Podlech, M. Schütt<br>M. Iberler |
| Gutachter                                      | DFG (DE)                  | R. Reifarth   |
| Gutachter                                      | ERC (EU)                  | R. Reifarth   |
| Gutachter                                      | STFC (UK)                 | R. Reifarth   |
| Chair Nucl. Phys. Div. Board                   | European Physical Society | R. Reifarth   |
| Ba/Ma – Prüfungsausschuss                      |                           | C.J. Hansen   |
| HFHF Direktor Beschleuniger                    |                           | H. Podlech  |
| Technical Integration Board FAIR (TI)          |                           | H. Podlech  |
| Verbandsprecher BMBF Hadronenlinacs            |                           | H. Podlech  |
| Vorstand Lander-Stiftung                       |                           | H. Podlech  |
| Gleichstellungsrat                             |                           | K. Göbel, S.F. Dellmann   |
| QSL Kommission                                 |                           | J. Jacoby   |
| Studienkommission                              |                           | H. Podlech, J. Jacoby   |
| Ba/Ma – Prüfungsausschuss Vorsitz              |                           | U. Ratzinger  |
| Fachbereichsrat FB Physik                      |                           | U. Ratzinger, J. Jacoby,<br>H. Podlech, R. Reifarth   |
| Preiskomitee Siedlerpreis                      |                           | H. Podlech  |
| Preiskomitee Horst-Klein-Preis                 |                           | H. Podlech  |



## 9 Mitarbeit in Konferenzgremien

|   |              |
|---|--------------|
| Opportunities with Neutron Induced Reaction Measurements  | R. Reifarth  |
| 1. Topical Meeting of IReNA - FA1   | R. Reifarth  |
| EPS Nuclear Physics Division Board meeting  | R. Reifarth  |
| Nuclear Physics in Astrophysics X   | R. Reifarth  |
| IPAC Scientific Advisory Board  | H. Podlech   |
| SRF Scientific Advisory Board   | H. Podlech   |
| Local Organizing Committee HIAT 2022  | H. Podlech   |
| LINAC Organizing Committee  | U. Ratzinger |
| 774. WE-Heraeus-Seminar– Kilonova: Multimessenger and Multiphysics<br>Organisatorin                           | C. J. Hansen |
| Nuclear Physics in Astrophysics (NPA-X) school<br>Scientific Advisory Committee, Scientific Program Committee | C. J. Hansen |
| Nuclear Physics in Astrophysics (NPA-X) school<br>Organisatorin, Scientific Program Committee                 | C. J. Hansen |

## 10 Besondere Ereignisse

Am 9.12.2020 verstarb unser Kollege Alois Schaarschmidt mit 91 Jahren. Er hat im Zusammenhang mit Gamma-Spektroskopie unter anderem Elektronik für gute Zeitauflösung untersucht und weiterentwickelt. Später gestaltete und leitete er viele Jahre mit großem Engagement das Anfängerpraktikum. Herr Schaarschmidt wohnte ab Kriegsende viele Jahrzehnte im Physikgebäude in Bockenheim und war sozusagen die gute Seele des Hauses, hat manches Unglück rechtzeitig kommen sehen und abgewandt (einmal war es sogar ein nächtlicher Kellerbrand im Labor, den er als Erster entdeckte.

Wir werden ihm ein ehrendes Andenken bewahren.

Unser geschätzter GSI – Kollege Giuliano Franchetti wurde Ende 2021 zum „Fellow of the American Physical Society“ gewählt. Dies ist eine sehr hoch geschätzte Anerkennung. Mit Beginn des Sommersemesters 2022 wurde Giuliano nach vielen Jahren als sehr aktiv tätiger Privatdozent am IAP nun zum außerplanmäßigen Professor an unserem Fachbereich ernannt. Wir gratulieren herzlich und wünschen weiterhin guten Erfolg in Forschung und Lehre!

Zum 01.01.2022 ist Edgar Binner in den wohl verdienten Ruhestand getreten. Er hat einschließlich Ausbildung sein gesamtes Arbeitsleben in der mechanischen Werkstatt des IAP verbracht. Seine sicheren und ruhigen Hände machten ihn zum Experten für besonders knifflige Dreh – und Lötarbeiten. Für den nächsten Lebensabschnitt wünschen wir ihm das Allerbeste.

Zum 01.07.2022 trat Stefan Rodrian den Ruhestand an. Er hatte zunächst in der Gruppe von Prof. Reinhard Becker als Techniker an der Entwicklung von EBIS – Quellen mitgewirkt. Später übernahm er übergreifende Aufgaben und kümmerte sich auch um Details wie Telefonliste, Bürobelegschilder, Gasflaschenhandel, Drucker, Post.... Wir danken ihm für seine Arbeit und wünschen weiterhin Alles Gute.

Zum 01.07.2022 verstärkte Frau Jasna Jasic das Team unserer administrativen Mitarbeiterinnen als Nachfolge von Frau Martina Scholz. Wir wünschen ihr für ihre Arbeit im Institut viel Erfolg und alles Gute.

Zum 30. September 2022 wurde unser geschätzter Kollege Prof. Dr. Ulrich Ratzinger pensioniert. Im Rahmen seiner Verabschiedung fand am 19.10 ein Festkolloquium im Fachbereich statt. Ulrich Ratzinger hat über viele Jahre unser Institut maßgeblich mitgeprägt. Er wird weiterhin seine noch laufenden Forschungsprojekte begleiten und die Studierenden betreuen. Für seinen Ruhestand wünschen wir ihm das Beste und danken herzlichst für seine Arbeit und sein Engagement.

## 11 Publikationen

### 11.1 Astrophysik

H. Schatz, A. D. Becerril Reyes, A. Best, E. F. Brown, K. Chatziioannou and 160 more  
Horizons: nuclear astrophysics in the 2020s and beyond  
Journal of Physics G Nuclear Physics 49, 110502 (2022)

Nan Liu, Thomas Stephan, Sergio Cristallo, Diego Vescovi, Roberto Gallino and 3 more  
Presolar silicon carbide grains of types Y and Z: their strontium and barium isotopic compositions and stellar origins, European Physical Journal A 58, 216 (2022)

Angelo Pidotella, David Mascali, Matteo Bezmalinovich, Giulia Emma, Maria Mazzaglia and 14 more  
Experimental and numerical investigation of magneto-plasma optical properties toward measurements of opacity relevant for compact binary objects  
Frontiers in Astronomy and Space Sciences 9, 931744 (2022)

Diego Vescovi, René Reifarth, Sergio Cristallo, Aaron Couture  
Neutron-capture measurement candidates for the r-process in neutron star mergers  
Frontiers in Astronomy and Space Sciences 9, 994980 (2022)

M. Mastromarco, S. Amaducci, N. Colonna, P. Finocchiaro, L. Cosentino and 117 more  
High accuracy, high resolution  $^{235}\text{U}(n,f)$  cross section from n\_TOF (CERN) from 18 meV to 10 keV  
European Physical Journal A 58, 147 (2022)

Lisa Ricci, Maurizio Petrelli, Francesco Frondini, Azzurra Zucchini, Paola Comodi and 3 more  
The Achievements of the RockStar Group (Perugia) on Astrophysical Modelling and Pallasite Geochemistry Universe 8, 156 (2022)

Nan Liu, Sergio Cristallo, Diego Vescovi  
Slow Neutron-Capture Process: Low-Mass Asymptotic Giant Branch Stars and Presolar Silicon Carbide Grains  
Universe 8, 362 (2022)

Simone Taioli, Diego Vescovi, Maurizio Busso, Sara Palmerini, Sergio Cristallo and 2 more  
Theoretical Estimate of the Half-life for the Radioactive  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{135}\text{Cs}$  in Astrophysical Scenarios  
ApJ 933, 158 (2022)

N. Nhu Le, S. Cristallo, D. Vescovi, L. Tan Phuc, N. Quang Hung  
Maxwellian-averaged cross section of  $^{181}\text{Ta}(n,\gamma)$  reaction and its astrophysical implications  
Nucl. Phys. A 1023, 122450 (2022)

David Mascali, Domenico Santonocito, Simone Amaducci, Lucio Andò, Vincenzo Antonuccio and 65 more  
A Novel Approach to  $\beta$ -Decay: PANDORA, a New Experimental Setup for Future In-Plasma Measurements  
Universe 8, 80 (2022)

G. Tagliente, S. Kopecky, J. Heyse, M. Krticka, C. Massimi and 114 more  
 $^{92}\text{Zr}(n,\gamma)$  and  $(n,\text{tot})$  measurements at the GELINA and n\_TOF facilities  
Phys. Rev. C 105, 25805 (2022)

Albino Perego, Diego Vescovi, Achille Fiore, Leonardo Chiesa, Christian Vogl and 8 more  
Production of Very Light Elements and Strontium in the Early Ejecta of Neutron Star Mergers  
ApJ 925, 22 (2022)

Diego Vescovi, Sergio Cristallo, Sara Palmerini, Carlos Abia, Maurizio Busso  
Fluorine nucleosynthesis and s-processing in AGB stars driven by magnetic-buoyancy mixing  
European Physical Journal Web of Conferences 260, 11009 (2022)

Sophia Dellmann, René Reifarth, Mario Weigand, Klaus Eberhardt, Ruchi Garg and 4 more  
Reactor activations to constrain astrophysically relevant cross sections  
European Physical Journal Web of Conferences 260, 11035 (2022)

- V. Babiano-Suarez, J. Balibrea-Correa, L. Caballero-Ontanaya, C. Domingo-Pardo, I. Ladarescu and 128 more  
First  $^{80}\text{Se}(n,\gamma)$  cross section measurement with high resolution in the full stellar energy range 1 eV - 100 keV and its astrophysical implications for the s-process  
European Physical Journal Web of Conferences 260, 11026 (2022)
- Tanja Heftrich, Mario Weigand, Kafa Al-Khasawleh, Benjamin Brückner, Sophia Dellmann and 13 more  
Activation measurements of neutron capture cross sections at various temperatures  
European Physical Journal Web of Conferences 260, 11012 (2022)
- Benjamin Brückner, Philipp Erbacher, Kathrin Göbel, Tanja Heftrich, Kafa Khasawneh and 9 more  
Investigation of the  $^7\text{Li}(p,n)$  neutron fields at high energies  
European Physical Journal Web of Conferences 260, 11005 (2022)
- J. Moreno-Soto, S. Valenta, E. Berthoumieux, A. Chebboubi, M. Diakaki and 127 more  
Constraints on the dipole photon strength for the odd uranium isotopes  
Phys. Rev. C 105, 024618 14 (2022)
- C. Lehr, F. Wamers, F. Aksouh, Yu. Aksyutina, H. Álvarez-Pol and 60 more  
Unveiling the two-proton halo character of  $^{17}\text{Ne}$ : Exclusive measurement of quasi-free proton-knockout reactions  
Physics Letters B 827, 136957 (2022)
- J. M. Boillos, D. Cortina-Gil, J. Benlliure, J. L. Rodríguez-Sánchez, H. Alvarez-Pol and 96 more  
Isotopic cross sections of fragmentation residues produced by light projectiles on carbon near 400 A MeV  
Phys. Rev. C 105, 14611 (2022)
- M Aliotta, R Buompane, M Couder, A Couture, R J deBoer and 20 more  
The status and future of direct nuclear reaction measurements for stellar burning  
Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics 49, 10501 (2022)
- Sara Palmerini, Maurizio Busso, Diego Vescovi, Eugenia Naselli, Angelo Pidotella and 6 more  
Presolar Grain Isotopic Ratios as Constraints to Nuclear and Stellar Parameters of Asymptotic Giant Branch Star Nucleosynthesis  
ApJ 921, 7 (2021)
- G. F. Ciani, L. Csedreki, D. Rapagnani, M. Aliotta, J. Balibrea-Correa and 45 more  
Direct Measurement of the C 13 ( $\alpha, n$ ) O 16 Cross Section into the s -Process Gamow Peak  
Phys. Rev. Lett. 127, 152701 (2021)
- Sara Palmerini, Sergio Cristallo, Luciano Piersanti, Diego Vescovi, Maurizio Busso  
Group II Oxide Grains: How Massive Are Their AGB Star Progenitors?  
Universe 7, 175 (2021)
- Angelo Pidotella, Sergio Cristallo, Alessio Galatà, Marco La Cognata, Maria Mazzaglia and 5 more  
In-plasma study of opacity relevant for compact binary ejecta  
Il Nuovo Cimento C 44, 65 (2021)
- D. Vescovi, S. Cristallo, S. Palmerini, C. Abia, M. Busso  
Magnetic-buoyancy-induced mixing in AGB stars: Fluorine nucleosynthesis at different metallicities  
A&A. 652 (2021)
- L. Magrini, D. Vescovi, G. Casali, S. Cristallo, C. Viscasillas Vázquez and 4 more  
Magnetic-buoyancy-induced mixing in AGB stars: a theoretical explanation of the non-universal relation of  $[\text{Y}/\text{Mg}]$  to age  
A&A. 646 (2021)
- C. Lederer-Woods, P. J. Woods, T. Davinson, A. Estrade, J. Heyse and 122 more  
Destruction of the cosmic  $\gamma$  -ray emitter  $^{26}\text{Al}$  in massive stars: Study of the key  $^{26}\text{Al}(n, \alpha)$  reaction  
Phys. Rev. C 104 (2021)

René Reifarth

2020 Lise Meitner Prize to Klaus Blaum, Björn Jonson, and Piet Van Duppen  
Nuclear Physics News 4 (2021)

A. Gawlik-Ramięga, C. Lederer-Woods, M. Krtika, S. Valenta, U. Battino and 128 more  
Measurement of the  $^{76}\text{Ge}(n,\gamma)$  cross section at the n\_TOF facility at CERN  
Phys. Rev. C 104, 044610 7 (2021)

A. Bhattacharyya, Ushasi Datta, A. Rahaman, S. Chakraborty, T. Aumann and 44 more  
Neutron capture cross sections of light neutron-rich nuclei relevant for r-process nucleosynthesis  
Phys. Rev. C 104, 045801 14 (2021)

C. Lederer-Woods, P. J. Woods, T. Davinson, D. Kahl, S. J. Lonsdale and 120 more  
Destruction of the cosmic  $\gamma$ -ray emitter  $^{26}\text{Al}$  in massive stars: Study of the key  $^{26}\text{Al}(n,p)$  reaction  
Phys. Rev. C 104 (2021)

Beatriz Jurado, René Reifarth, David Denis-Petit, Jan Glorius, Christoph Langer and 2 more  
Direct and Indirect Measurements of Neutron Induced Cross Sections at Storage Rings  
Proceedings of 10th International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings (STORI) 35,  
11001 (2021)

V. Babiano-Suárez, J. Lerendegui-Marco, J. Balibrea-Correa, L. Caballero, D. Calvo and 130 more  
Imaging neutron capture cross sections: i-TED proof-of-concept and future prospects based on  
Machine-Learning techniques  
European Physical Journal A 57, 197 (2021)

M. Tessler, J. Zappala, S. Cristallo, L. Roberti, M. Paul and 15 more  
Stellar s -process neutron capture cross sections on  $^{78,80,84,86}\text{Kr}$  determined via activation,  
atom trap trace analysis, and decay counting  
Phys. Rev. C 104, 15806 (2021)

Simone Amaducci, Nicola Colonna, Luigi Cosentino, Sergio Cristallo, Paolo Finocchiaro and 125 more  
First Results of the  $^{140}\text{Ce}(n,\gamma)^{141}\text{Ce}$  Cross-Section Measurement at n\_TOF  
Universe 7, 200 (2021)

K. Boretzky, I. Gašparić, M. Heil, J. Mayer, A. Heinz and 86 more  
NeuLAND: The high-resolution neutron time-of-flight spectrometer for R3B at FAIR  
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers,  
Detectors and Associated Equipment 1014, 165701 (2021)

Diego Vescovi, René Reifarth  
s-Processing in Asymptotic Giant Branch Stars in the Light of Revised Neutron-Capture Cross  
Sections  
Universe 7 (2021)

K. Al-Khasawneh, E. Borris, B. Brückner, P. Erbacher, S. Fiebiger and 12 more  
Determination of the  $^{209}\text{Bi}(n,\gamma)^{210}\text{gBi}$  cross section using the NICE detector  
Phys. Rev. C 103, 065805 10 (2021)

Simone Amaducci, Nicola Colonna, Luigi Cosentino, Sergio Cristallo, Paolo Finocchiaro and 125 more  
First Results of the  $^{140}\text{Ce}(n,\gamma)^{141}\text{Ce}$  Cross-Section Measurement at n\_TOF  
Universe 7 (2021)

A. Gawlik, C. Lederer-Woods, J. Andrzejewski, J. Perkowski, U. Battino and 128 more  
Radiative Neutron Capture Cross-Section Measurement of Ge Isotopes at n\_TOF CERN Facility  
and Its Importance for Stellar Nucleosynthesis  
Acta Physica Polonica A 139, 383-388 (2021)

M. Dietz, C. Lederer-Woods, A. Tattersall, U. Battino, F. Gunsing and 119 more  
Measurement of the  $^{72}\text{Ge}(n,\gamma)$  cross section over a wide neutron energy range at the CERN  
n\_TOF facility  
Phys. Rev. C 103, 045809 8 (2021)



Kathrin Göbel, Clemens Beinrucker, Benjamin Brückner, Philipp Erbacher, Stefan Fiebiger and 13 more

Neutron activation of  $^{69}\text{Ga}$  and  $^{71}\text{Ga}$  at  $k\text{BT} \approx 25 \text{ keV}$

Phys. Rev. C 103, 25802-25808 (2021)

Cescutti, G., Bonifacio, P., Caffau, E., Monaco, L., Franchini, M., and 18 colleagues

MINCE I. Presentation of the project and of the first year sample,

arXiv, arXiv:2211.06086 (2022)

Schatz, H., Becerril Reyes, A. D., Best, A., Brown, E. F., Chatziioannou, K., and 160 colleagues

Horizons: nuclear astrophysics in the 2020s and beyond,

JPhG, 49, 110502 (2022)

Evans, C., Cristiani, S., Opitom, C., Cescutti, G., D'Odorico, V., and 49 colleagues

The CUBES science case,

ExA...tmp, (2022)

Cristiani, S., Alcalá, J. M., Alencar, S. H. P., Avila, G., Balashev, S. A., and 75 colleagues

CUBES, the Cassegrain U-Band Efficient Spectrograph for the VLT,

Msngr, 188, 36-41 (2022)

Lombardo, L., Bonifacio, P., François, P., Hansen, C. J., Caffau, E., and 8 colleagues

Chemical Evolution of R-process Elements in Stars (CERES). I. Stellar parameters and chemical abundances from Na to Zr,

A&A, 665, A10 (2022)

Cristiani, S., Alcalá, J. M., Alencar, S. H. P., Balashev, S., Bastian, N., and 72 colleagues

CUBES: the Cassegrain U-band Efficient Spectrograph,

SPIE, 12184, 121840A (2022)

Psaltis, A., Arcones, A., Montes, F., Mohr, P., Hansen, C. J., and 2 colleagues

Constraining Nucleosynthesis in Neutrino-driven Winds: Observations, Simulations, and Nuclear Physics,

ApJ, 935, 27 (2022)

Prudil, Z., Koch-Hansen, A. J., Lemasle, B., Grebel, E. K., Marchetti, T., and 8 colleagues

Milky Way archaeology using RR Lyrae and type II Cepheids. II. High-velocity RR Lyrae stars and Milky Way mass,

A&A, 664, A148 (2022)

Hansen, C. J.

Heavy elements; They came out of the blue

ExA...tmp, (2022)

## 11.2 Beschleunigerphysik

H. Hähnel, U. Ratzinger

First 3D Printed IH-Type Linac Structure - Proof-of-Concept for Additive Manufacturing of Linac RF Cavities

Instruments, vol. 6, no. 1, p. 9, 2022.

doi:10.3390/instruments6010009

S. Lauber, K. Aulenbacher, W. Barth, M. Basten, C. Burandt, F. Dziuba, P. Forck, V. Gettmann, M. Heilmann, T. Kürzeder, J. List, M. Miski-Oglu, H. Podlech, A. Rubin, M. Schwarz, T. Sieber, S. Yaramyshev

A dynamic collimation and alignment system for the Helmholtz linear accelerator

Review of Scientific Instruments 92, 113306 (2021)

<https://doi.org/10.1063/5.0069824>

S. Lauber, S. Yaramyshev, M. Basten, K. Aulenbacher, W. Barth, C. Burandt, M. Droba, F. Dziuba, P. Forck, V. Gettmann, T. Kuerzeder, J. List, M. Miski-Oglu, H. Podlech, A. Rubin, M. Schwarz

An Alternating Phase Focusing injector for heavy ion acceleration

Nucl. Instr. And Methods in phys. Research, Volume 1040, 1 October 2022, 167099

<https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167099>

C. Zhang, H. Podlech,

Frequency jump using 704.4 MHz radio-frequency quadrupole and cross-bar H-type drift tube linear accelerators

Phys. Rev. Accel. Beams 24, 040101, 2021,

<https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.24.040101>

K.I. Thoma, M. Droba, T. Dönges, O. Meusel, H. Podlech, K. Schulte-Urlichs

Tungsten Electron Emitter (TE<sup>2</sup>) with Direct Heated Cathode by Plasma Stream

Proc. 13th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'22), Bangkok, Thailand, Jun. 2022, pp. 667-670

doi: 10.18429/JACoW-IPAC2022-MOPOMS018

K. Schulte-Urlichs, D. Ondreka, P.J. Spiller, K.I. Thoma, M. Droba, T. Dönges, O. Meusel, H. Podlech

Status of the Development of the Electron Lens for Space Charge Compensation at GSI

Proc. 13th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'22), Bangkok, Thailand, Jun. 2022, pp. 2027-2030

doi: 10.18429/JACoW-IPAC2022-WEPOTK003

N. F. Petry, K. Kümpel, S. Lamprecht, O. Meusel, H. Podlech, and M. Schwarz

Cavity R&D for HBS Accelerator

Proc. 31st Linear Accelerator Conf. (LINAC'22), Liverpool, UK, Aug.-Sep. 2022, pp. 174-176

doi: 10.18429/JACoW-LINAC2022-MOPOGE12

N. F. Petry, K. Kümpel, S. Lamprecht, O. Meusel, H. Podlech, and M. Schwarz

Cavity R&D for HBS Accelerator

Proc. 13th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'22), Bangkok, Thailand, Jun. 2022, pp. 1520-1522

doi: 10.18429/JACoW-IPAC2022-TUPOMS042

H. Hähnel, A. Ateş, G. Blank, M.S. Breidt, D. Bänsch, R. Gössling, T. Metz, H. Podlech, U. Ratzinger, A. Ruffer, K. Volk, C. Wagner, R.H. Hollinger, C. Zhang

Upgrade and Commissioning of the 60 keV Low Energy Beam Transport Line for the Frankfurt Neutron Source FRANZ

Proc. 31st Linear Accelerator Conf. (LINAC'22), Liverpool, UK, Aug.-Sep. 2022, pp. 352-355

doi: 10.18429/JACoW-LINAC2022-TUPOJO08

K. Kümpel, M. März, H. Podlech, A. Ruffer, C. Wagner, S.R. Wagner, H. Podlech

Development and Test of a Program for Automatic Conditioning of Room Temperature Cavities

Proc. 13th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'22), Bangkok, Thailand, Jun. 2022, pp. 2823-2825

doi: 10.18429/JACoW-IPAC2022-THPOTK026

S. R. Wagner, K. B. Bahrke-Rein, M. Basten, D. Koser, K. Kümpel, H. Podlech

High Power Tests of a New 4-Rod RFQ with Focus on its Mechanical Vibrations

Proc. 13th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'22), Bangkok, Thailand, Jun. 2022, pp. 1523-1525

doi: 10.18429/JACoW-IPAC2022-TUPOMS043

S. R. Wagner, M. Basten, D. Koser, H. Podlech

High Power Tests of a New 4-Rod RFQ with Focus on Thermal Stability

Proc. 15th International Conference on Heavy Ion Accelerator Technology (HIAT'22), Darmstadt, Germany, Jun.-Jul. 2022, pp. 93-95

doi: 10.18429/JACoW-HIAT2022-TUP10

T. Conrad, M. Busch, H. Podlech, M. Schwarz, M. Heilmann, A. Rubin, A. Schnase, S. Yaramyshev, W.A. Barth, M. Basten, F.D. Dziuba, V. Gettmann, T. Kuerzeder, M. Miski-Oglu, K. Aulenbacher, J. List, S. Lauber

Cavity Designs for the CH3 to CH11 of the Superconducting Heavy Ion Accelerator HELIAC

20th International Conference on RF Superconductivity (SRF'21), East Lansing, MI, USA, Jun.-Jul. 2021

doi: 10.18429/JACoW-SRF2021-SUPCAV006

M. Schwarz, K. Aulenbacher, W. A. Barth, M. Basten, C. Burandt, T. Conrad, F. D. Dziuba, V. Gettmann, M. Heilmann, T. Kürzeder, S. Lauber, J. List, M. Miski-Oglu, H. Podlech, A. Rubin, S. Yaramyshev

Beam Dynamics Simulations for the Superconducting HELIAC CW Linac at GSI  
Proc. 13th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'22), Bangkok, Thailand, Jun. 2022, pp. 86-89  
doi: 10.18429/JACoW-IPAC2022-MOPOST015

M. Schwarz, J. Baggemann, Th. Brückel, M. Droba, T. Gutberlet, K. Kümpel, S. Lamprecht, J. Li, E. Mauerhofer, O. Meusel, N. F. Petry, H. Podlech, U. Rucker, A. Schwab, P. Zakalek, C. Zhang  
Proton Linac Design for the High Brilliance Neutron Source HBS

Proc. 13th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'22), Bangkok, Thailand, Jun. 2022, pp. 90-93  
doi: 10.18429/JACoW-IPAC2022-MOPOST016

A. Ates, H. Hähnel, U. Ratzinger, K. Volk, and C. Wagner, "Development of a Multi-Camera System for Non-Invasive Intense Ion Beam Investigations", in Proc. IPAC'21, Campinas, Brazil, May 2021, pp. 895-897

doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-MOPAB282

A. Ateş, G. Blank, U. Ratzinger, and C. Wagner, "Development of a Multi-Camera System for Tomography in Beam Diagnostics", in Proc. IBIC'21, Pohang, Rep. of Korea, May 2021, pp. 201-204

H. Hähnel and U. Ratzinger, "First 3D Printed IH-Type Linac Structure - Proof-of-Concept for Additive Manufacturing of Linac rf Cavities", in Proc. IPAC'21, Campinas, Brazil, May 2021, pp. 654-657.

doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-MOPAB194

M. Schuett and U. Ratzinger, "Electron Beam Driven Cavities", in Proc. IPAC'21, Campinas, SP, Brazil, May 2021, pp. 2342-2345.

doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-TUPAB356

M.P. Sangroula, J.M. Conrad, M. Schuett, and D. Winklehner, "Design and Optimization of a Low Frequency RF-Input Coupler for the IsoDAR RFQ", in Proc. IPAC'21, Campinas, SP, Brazil, May 2021, pp. 3081-3084.

doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-WEPAB195

B. Koubek et al., "LILac Energy Upgrade to 13 MeV", in Proc. IPAC'21, Campinas, SP, Brazil, May 2021, pp. 651-653.

doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-MOPAB192

H. Wang, U. Ratzinger, and M. Schuett, "Operations of Copper Cavities at Cryogenic Temperatures", in Proc. IPAC'21, Campinas, SP, Brazil, May 2021, pp. 1020-1022.

doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-MOPAB329

H. Höltermann et al., "Technical Design of an RFQ Injector for the IsoDAR Cyclotron", in Proc. IPAC'21, Campinas, SP, Brazil, May 2021, pp. 4075-4077.

doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-THPAB167

D. Koser, J.M. Conrad, H. Podlech, U. Ratzinger, M. Schuett, and D. Winklehner, "Thermal Analysis of a Compact Split-Coaxial CW RFQ for the IsoDAR RFQ-DIP", in Proc. IPAC'21, Campinas, SP, Brazil, May 2021, pp. 3097-3099.

doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-WEPAB202

M. Schuett, C.M. Kleffner, K. Knie, and U. Ratzinger, "The 325 MHz FAIR pLinac Ladder RFQ - Final Assembly for Commissioning", in Proc. IPAC'22, Bangkok, Thailand, Jun. 2022, pp. 82-85.

doi:10.18429/JACoW-IPAC2022-MOPOST014

H. Podlech, H. Hähnel, H. Höltermann, B. Koubek, and U. Ratzinger, "Tuning and RF Measurements of the LILAC RFQ", in Proc. HIAT'22, Darmstadt, Germany, Jun.-Jul. 2022, pp. 90-92.

doi:10.18429/JACoW-HIAT2022-TUP09

H. Hähnel, A. Ates, and U. Ratzinger, "A 3D Printed IH-Type Linac Structure - Proof-of-Concept for Additive Manufacturing of Linac RF Cavities", in Proc. HIAT'22, Darmstadt, Germany, Jun.-Jul. 2022, pp. 41-45. doi:10.18429/JACoW-HIAT2022-TU1C4

E. Sunar, U. Ratzinger, M. Syha and R. Tiede, "Harmonic Bunch Formation and Optional RFQ Injection", in Proc. LINAC'22, Liverpool, UK, Aug.-Sep. 2022, pp. 559-561.

doi:10.18429/JACoW-LINAC2022-TUPORI06

H. Hähnel et al., "Upgrade and Commissioning of the 60 keV Low Energy Beam Transport Line for the Frankfurt Neutron Source FRANZ", in Proc. LINAC'22, Liverpool, UK, Aug.-Sep. 2022, pp. 352-355.

doi:10.18429/JACoW-LINAC2022-TUPOJO08

J. D. Kaiser, A. Ates, H. Hähnel, and U. Ratzinger, "Application of Permanent Magnets in Solenoid and Quadrupole Focusing", in Proc. LINAC'22, Liverpool, UK, Aug.-Sep. 2022, pp. 622-624.

doi:10.18429/JACoW-LINAC2022-TUPORI30

A. Seibel, M.S. Breidt, T. Dettinger, J. Egly, H. Hähnel, C.M. Kleffner, K. Knie, U. Ratzinger, C. Will, "Welding and Copper Plating Investigations on the FAIR Proton Linac", in Proc. LINAC'22, Liverpool, UK, Aug.-Sep. 2022, pp. 345-347.

doi:10.18429/JACoW-LINAC2022-TUPOJO05

A. Ates, G. Blank, H. Hähnel, and U. Ratzinger, "A Multi-Camera System for Tomographic Beam Diagnostics", in Proc. LINAC'22, Liverpool, UK, Aug.-Sep. 2022, pp. 215-218.

doi:10.18429/JACoW-LINAC2022-MOPORI01

H. Hähnel, A. Ates, and U. Ratzinger, "Update on the First 3D Printed IH-Type Linac Structure - Proof-of-Concept for Additive Manufacturing of Linac RF Cavities", in Proc. LINAC'22, Liverpool, UK, Aug.-Sep. 2022, pp. 170-173.

doi:10.18429/JACoW-LINAC2022-MOPOGE11

### 11.3 Plasmaphysik

Time-resolved measurement of the free electron and neutral gas line density in a hydrogen theta-pinch plasma target by two-color interferometry

Christ, P; Guzman, B; Cistakov, C; Iberler, M; Laghchioua, L; Jacoby, J.

JOURNAL OF PHYSICS D-APPLIED PHYSICS (2022)

Measurement of the free electron line density in a spherical theta-pinch plasma target by single wavelength interferometry

Christ, P; Cistakov, K; Iberler, M; Laghchioua, L; Mann, D; Rosmej, O; Savin, S; Jacoby, J.

JOURNAL OF PHYSICS D-APPLIED PHYSICS (2021)

Role of relativistic laser intensity on isochoric heating of metal wire targets

Martynenko, AS; Pikuz, SA; Antonelli, L; Barbato, F; Boutoux, G; Giuffrida, L; Honrubia, JJ;

Hume, E; Jacoby, J; Khaghani, D; Lancaster, K; Neumayer, P; Rosmej, ON; Santos, JJ;

Turianska, O; Batani, D

OPTICS EXPRESS (2021)

Statistical and quantum photoionization cross sections in plasmas: Analytical approaches for any configurations including inner shells

F. B. Rosmej, L. A. Vainshtein, V. A. Astapenko, and V. S. Lisitsa

Matter and Radiation at Extremes 5, 064202 (2020); <https://doi.org/10.1063/5.0022751>

High-current laser-driven beams of relativistic electrons for high energy density research

O N Rosmej, M Gyrdymov, M M Günther, N E Andreev, P Tavana, P Neumayer, S Zähler, N Zahn, V S Popov, et al

Plasma Physics and Controlled Fusion, Volume 62, Number 11 Citation O N Rosmej et al

2020 Plasma Phys. Control. Fusion 62 115024 DOI 10.1088/1361-6587/abb24e

New insights in laser-generated ultra-intense gamma-ray and neutron sources for nuclear applications and science

M. M. Günther, O. N. Rosmej, P. Tavana, M. Gyrdymov, A. Skobliakov, A. Kantsyrev, S. Zähler,

N. G. Borisenko, A. Pukhov, N. E. Andreev

arxiv physics, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2012.10752>

Bright betatron x-rays generation from picosecond laser interactions with long-scale near critical density plasmas

X. F. Shen, A. Pukhov, M. M. Günther, and O. N. Rosmej

Appl. Phys. Lett. 118, 134102 (2021); <https://doi.org/10.1063/5.0042997>

Transient electromagnetic fields generated in experiments at the PHELIX laser facility

M. Scisciò, F. Consoli, M. Salvadori, N. E. Andreev, N. G. Borisenko, S. Zähler and O. Rosmej

Published online by Cambridge University Press: 02 November 2021

Reflecting laser-driven shocks in diamond in the megabar pressure range

K. Jakubowska, D. Mancelli, R. Benocci, J. Trela, I. Errea, A. S. Martynenko P. Neumayer, O.

Rosmej, B. Borm and A. Moliner

Published online by Cambridge University Press: 08 January 2021

Forward-looking insights in laser-generated ultra-intense  $\gamma$ -ray and neutron sources for nuclear application and science

M. M. Günther, O. N. Rosmej, P. Tavana, M. Gyrdymov, A. Skobliakov, A. Kantsyrev, S. Zähler,

N. G. Borisenko, A. Pukhov & N. E. Andreev

Nature Communications volume 13, Article number: 170 (2022)

Laser energy absorption and x-ray generation in nanowire arrays irradiated by relativistically intense ultra-high contrast femtosecond laser pulses editors-pick

E. Eftekhari-Zadeh, M. S. Blümcke, Z. Samsonova, R. Loetzsch, I. Uschmann, M. Zapf, C. Ronning, O. N. Rosmej, D. Kartashov<sup>1,2</sup>, and C. Spielmann

Physics of Plasmas 29, 013301 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0064364>

Time-of-flight methodologies with large-area diamond detectors for ion characterization in laser-driven experiments

M. Salvadori, G. Di Giorgio, M. Cipriani, M. Scisciò, C. Verona, P. L. Andreoli, G. Cristofari, R. De Angelis, M. Pillon and N. E. Andreev

Part of: High Energy Density Physics and High Power Lasers 2021

Published online by Cambridge University Press: 10 January 2022