

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: **Technische Universität Darmstadt**

Projektleitung: **Prof. Dr. Thorsten Kröll (Projektleiter)**
Prof. Dr. Dr. h.c. mult Norbert Pietralla

Verbund: **05P2021 – ISOLDE**

Thema: **Kernstrukturuntersuchungen mit MINIBALL bei ISOLDE**

Zusammenfassung

Im Teilprojekt 1 wurden u.a. die ISOLDE/MINIBALL-Experimente IS546, IS596 und IS748 bearbeitet und insbesondere quadrupol-kollektive isoskalare und isovektorielle Anregungen der $N=80$ Isotone erforscht. Die eindeutige Identifikation des ersten gemischt-symmetrischen $2_{1,m.s}^+$ Zustands von ^{142}Sm konnte auf Basis seiner vergleichsweise großen magnetischen Dipolzerfallstärke erreicht werden. Dabei wurde keine Fragmentierung festgestellt. Ebenso wurden die Daten zum ersten gemischt-symmetrischen $2_{1,m.s}^+$ Zustand von ^{132}Te präzisiert. Das Bild über ^{132}Te wurde mit der Analyse des ersten angeregten 4_1^+ Zustands ergänzt. Die Ergebnisse des $2_{1,m.s}^+$ Zustand von ^{132}Te wurden bei Phys. Rev. C zur Veröffentlichung eingereicht. Manuskripte zu den beiden anderen Analysen sind in Vorbereitung. Zwei Experimentvorschläge zur Untersuchung, inwiefern sich diese physikalischen Phänomene wegen der erwarteten Teilchen-Loch-Symmetrie auf der anderen Seite des Neutronenschalenabschlusses $N=82$ fortsetzen, wurden am IFIN-HH und an ISOLDE eingereicht und zur Durchführung angenommen. Die Analyse des Kerns ^{212}Ra aus dem Experiment IS748 wurde aufgenommen, welcher analog zu ^{132}Te zwei Neutronen vom Schalenabschluss entfernt liegt.

Im Teilprojekt 2 wurden die Eigenschaften von exotischen Kernen über Coulombanregungs- und Nukleontransferexperimente untersucht. Experimenteller Aufbau ist dabei das HPGe-Gammaspektrometer Miniball in Kombination mit Silizium-Teilchendetektoren wie z.B. C-REX/T-REX. Vor dem Long Shutdown 2 (LS2) am CERN konnte im Berichtszeitraum 2019 noch eine Meßkamagne mit Miniball und T-REX durchgeführt werden. Während des LS2 standen keine Strahlen zur Verfügung. Die Analysen mehrerer Experimente wurden vorangetrieben bzw. abgeschlossen und die Ergebnisse veröffentlicht. Es wurden umfangreiche Upgrades an Miniball durchgeführt, insbesondere wurden die Detektoren mit neuen Kryostaten ausgestattet und eine neue DAQ in Betrieb genommen. Weiterhin wurde die Weiterentwicklung einer ASIC-basierten Ausleseelektronik für C-REX/T-REX vorangetrieben und ein Prototyp im Strahlbetrieb getestet. Nach LS2 wurde Miniball wieder bei HIE-ISOLDE aufgebaut und in Betrieb genommen und ist seither im vollen Strahlzeitbetrieb. Es wurden pro Jahr mehrere Experimente erfolgreich durchgeführt, bei deren Vorbereitung, Durchführung und Analyse die Arbeitsgruppe stark involviert ist.

Bericht

1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Teilprojekt 1 (Pietralla)

Das Hauptziel des Teilprojekts umfasst die Untersuchung der Evolution isovektorieller Ein-Quadrupolphonon-Anregungen der $N=80$ und $N=84$ Isotonen von ^{132}Te bis ^{142}Sm und von ^{136}Te bis ^{146}Sm . Insbesondere die Identifizierung der ersten gemischt-symmetrischen $2_{1,ms}^+$ Zustände der Isotope ^{138}Xe und ^{146}Sm ist von Interesse, um die Fragmentierung dieser Anregungsmoden in Bezug auf Schaleneffekte zu untersuchen. Die HIE-ISOLDE Anlage am CERN bietet die idealen Voraussetzungen zur Durchführung von Experimenten mit Coulomb-Anregungsreaktionen an diesen Isotopen. Auch zur Untersuchung von Störungen der Balance zwischen Protonen- und Neutronenanteil in der Valenzraumanregung, wie bei ^{136}Te vermutet, wird die HIE-ISOLDE Anlage benötigt. Komplementäre Untersuchungen finden im Bereich anderer Schalenabschlüsse, insbesondere um ^{208}Pb , statt.

Teilprojekt 2 (Kröll)

Ziel des Teilprojekts war die Untersuchung der Kernstruktur exotischer Kerne über direkte Reaktionen. Insbesondere die Gegend des ersten „Island of Inversion“ um ^{32}Mg , die Entwicklung von Quadrupol- und Oktupolkollektivität um ^{132}Sn sowie Oktupolkorrelationen in der Bariumgegend um $Z = 56$ und $N = 88$ und in Aktinidenkernen sind dabei die Hauptinteressen. Der Betrieb und die Weiterentwicklung der eingesetzten Detektoren, Miniball und Silizium-Detektoren (CD/C-REX/T-REX/Hi-TREX), sowie der Analysemethodik sind dafür unabdingbare Voraussetzungen.

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Teilprojekt 1 (Pietralla)

Bei der Untersuchung der gemischt-symmetrischen Quadrupolanregungen der $N=84$ Isotone ^{138}Xe und ^{146}Sm kann auf Kenntnisse bis zu ^{138}Ce aus Vorarbeiten unserer Arbeitsgruppe zurückgegriffen werden. Diese kollektiven Anregungen basieren in der Theorie auf dem Interacting-Boson-Model (IBM), sind jedoch auch in mikroskopischen Modellen wie dem Schalenmodell oder Quasi-Teilchen Phonon Modell zugänglich. Die isovektorielle Ein-Quadrupolphonon-Anregung stellt für schwere vibrationelle Kerne die energetisch günstigste gemischt-symmetrische Konfiguration dar. Zur Untersuchung solcher Zustände bieten sich Niederenergie-Coulomb-Anregungsexperimente an. Dafür ist hochauflösende Gamma-Spektroskopie notwendig, wie sie am HPGe-Miniball-Spektrometer bereits gut erprobt ist und langjährig erfolgreich genutzt wird. Nach der Weiterentwicklung von REX- zu HIE-ISOLDE ist nun zudem die bereitgestellte Strahlenergie ausreichend hoch, um die Untersuchung der radioaktiven Isotope ^{138}Xe und ^{146}Sm voranzutreiben. Ebenfalls zur Untersuchung von ^{136}Te ist die HIE-ISOLDE Anlage derzeit einzigartig. Bei diesem Isotop wird aufgrund vorhandener Daten und im Vergleich zu Kernen der $A=90$ Massenregion eine Anomalie des 2_1^+ Zustands beobachtet, welche durch „Configurational Isospin Polarization“ (CIP), einer starke Differenz der Amplitude der Proton-Neutronwellenfunktionen verursacht werden könnte. Dieses Phänomen wurde bereits in der Vergangenheit von Mitgliedern unserer Arbeitsgruppe untersucht – sowohl im Bereich der $N=82$ Neutronenschale, wie auch in ersten Experimenten um ^{208}Pb .

Teilprojekt 2 (Kröll)

Das HPGe-Spektrometer Miniball wird seit 20 Jahren bei ISOLDE betrieben und ist der Hauptnutzer von nachbeschleunigten Strahlen exotischer Kerne von REX-ISOLDE und seit 2015 HIE-ISOLDE. Hinsichtlich der Vielfalt an verfügbaren Strahlen ist ISOLDE die weltweit führende ISOL-Anlage. Nach 20 Jahren Einsatz waren verschiedene Upgrades unvermeidlich, um die Miniball-Detektoren weiter nutzen zu können, die während des Long Shutdowns 2 (LS2) am CERN, als keine Strahlen

zur Verfügung standen, durchgeführt wurden. Neben neuen Kryostaten ist eine neue DAQ zu nennen. Darüber hinaus wird das verwendete Instrumentarium und die angewandte Methodik ständig angepasst und weiterentwickelt, um insbesondere seit dem Übergang von REX- zu HIE-ISOLDE die sich neu ergebenden wissenschaftlichen Möglichkeiten nutzen zu können. Nach dem Ende von LS2 wird seit 2022 wieder der volle Experimentierbetrieb durchgeführt. Neben eigenen und der Beteiligung an Experimenten, die federführend von anderen Miniball-Kollaborateuren durchgeführt werden, ist TP2 an diesen innerhalb der Kollaboration durchgeführten Entwicklungsarbeiten intensiv beteiligt.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

Teilprojekt 1 (Pietralla)

Die Untersuchung der ersten gemischtsymmetrischen $2_{1,m.s}^+$ Zustände von $N = 80$ Isotonen ^{132}Te und ^{142}Sm wurde mit dem Experiment IS546 und den begleitenden Experimenten an der HIL, Warschau, und am IFIN-HH, Bukarest, abgeschlossen und publiziert. Der Fokus liegt nun auf der Untersuchung dieser Zustände in der $N=84$ Isotonenreihe. Dafür wurde ein Experiment an ISOLDE vorgeschlagen. Strahlen des Nuklids ^{138}Xe sollen an ISOLDE erzeugt und mit Hilfe von Coulomb-anregungsreaktionen mit dem Miniball-Aufbau untersucht werden. Das vorgeschlagene Experiment wurde bereits vom INTC akzeptiert. Ergänzend dazu soll das Isoton ^{146}Sm in Zwei-Neutronen-Transfer Reaktionen studiert werden. Ein Experiment hierzu wurde am IFIN-HH in Bukarest vorgeschlagen und angenommen. Die Strahlzeit ist momentan für November 2025 angesetzt.

Die Planung, Durchführung und Auswertung aller an HIE-ISOLDE aufgenommenen Daten findet in enger Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Rainovski an der St. Kliment Universität in Sofia statt. Ebenfalls in Kollaboration mit der Universität Sofia sowie der Universität zu Köln wurden komplementäre Untersuchungen zu den kollektiven symmetrischen und gemischtsymmetrischen Zuständen um ^{208}Pb durchgeführt. Das Experiment zu ^{146}Sm wird in Zusammenarbeit mit Gruppen des IFIN-HH in Bukarest durchgeführt.

Teilprojekt 2 (Kröll)

Die innerhalb der verlängerten Laufzeit der vorherigen Förderperiode Ende 2021 beschafften 2 neuen Miniball-Kryostate wurden im Berichtszeitraum unter Mitwirkung der Arbeitsgruppe des Teilprojektleiters, allerdings pandemiebedingt nicht im ursprünglich geplanten Maße, an der Universität zu Köln in Betrieb genommen und die Qualitätssicherung durchgeführt. Zu Nukleontransferreaktionen mit Miniball und T-REX komplementäre Ergebnisse im Bereich der „Island of Inversion“ wurden unter Beteiligung der Arbeitsgruppe bei HIE-ISOLDE mit ISS („ISOLDE Solenoid Spectrometer“) erzielt. Diese sind bei der Planung und Vorbereitung neuer Experimente mit Miniball und HI-TREX (neues T-REX), z.B. dem bereits vom INTC genehmigten Experiment IS654 zur Untersuchung von ^{135}Sn über die $^{134}\text{Sn}(d,p)$ -Reaktion, sehr hilfreich. Aufgrund der allgemein schwierigen Verfügbarkeit von Elektronikkomponenten wird der an der TU München aufgebaute HI-TREX-Detektor erst nach dem Long Shutdown 3 (LS3) für Experimente zur Verfügung stehen.

Im Q1/2022 wurde dann Miniball wieder bei ISOLDE am CERN aufgebaut und ab Ende Q2/2022 wurde das Experimentierprogramm wieder aufgenommen. In 2022 wurden mit Miniball drei Experimente bei HIE-ISOLDE durchgeführt. Dabei kamen die Miniball-Detektoren nach dem Upgrade mit der neuen DAQ erstmals zum Einsatz. In Experiment IS702 (Ko-Sprecher ist der Teilprojektleiter) wurden die Coulombanregungsstudien um den doppelt-magischen Schalenabschluss bei ^{132}Sn herum mit der Untersuchung von ^{130}Sn fortgesetzt. In Experiment IS563 wurden protonenreiche Hg-Isotope aus dem Gebiet der Formkoexistenz in Coulombanregung untersucht. Zum ersten Mal wurde mit Miniball in Koinzidenz auch mit SPEDE, einem Spektrometer für Konversionselektronen, verwendet. Dies erweitert die mit Miniball und Zusatzdetektoren zugänglichen Observablen und eröffnet wieder neue Perspektiven für die Wissenschaft.

Trotz der in 2023 verkürzten Verfügbarkeit von Protonen am CERN konnten mit Miniball 8 Experimente durchgeführt werden. Mit 64% der verfügbaren Strahlzeit mit nachbeschleunigten Strahlen bei HIE-ISOLDE war Miniball der größte Nutzer. Damit ist Miniball nach seinem während

LS2 erfolgten Upgrade wieder der Hauptabnehmer dieser Strahlen. Miniball wurde mit verschiedenen Zusatzdetektoren - CD-Siliziumdetektor (auch in der Konfiguration als dE-E-Teleskop zur Identifikation leichter Teilchen, gleicher Aufbau wie in der Vorwärts-CD von T-REX), SPEDE-Konversionselektronenspektrometer und/oder Plunger - betrieben. Neben Coulombanregung wurde die unvollständige Fusion erstmals als neuer Reaktionsmechanismus eingesetzt. Die Gruppe des Teilprojektleiters war an allen Experimenten in Vorbereitung (inkl. Auf- und Umbau) und Durchführung beteiligt. Für die Fortsetzung von IS702 mit dem Isotop ^{134}Sn , für das der "physics case bereits vom INTC angenommen wurde, aber noch keine Strahlzeit bewilligt wurde, wurde ein Clarification Letter beim INTC eingereicht.

Die auf dem SKIROC2-ASIC basierte Si-Detektor-Frontend-Elektronik und die TRB3-Auslese, beides kompatibel mit HI-TREX, wurde mit einem vollständigen Aufbau im Rahmen einer Master-Arbeit mit einem 12+24-segmentierten DSSSD, ein Quadrant des CD-Detektors, wie er in C-REX sowohl in Vorwärts- als auch Rückwärtsrichtung verwendet wird, untersucht. Die bisher erzielten Energieauflösungen sind aber noch unbefriedigend.

In 2024 konnten von ISOLDE fünf Experimente mit Miniball im Strahlzeitplan berücksichtigt werden. Der zweite Teil von IS702 mit der Coulombanregung von ^{134}Sn wurde allerdings abgesagt, weil der Strahl von ISOLDE nicht bereitgestellt werden konnte. Ein neuer Versuch wird für 2025 angestrebt. Auch für IS706, dass die Oktupolkollektivität von ^{146}Ce untersuchen wollte, und zwar von Störungen der Balance zwischen Protonen- und Neutronen-anteil in der Valenzraumanregung, sowohl in Coulombanregung mit Miniball + Si-Detektor als auch mit ISS in inelastischer Deuteronenstreuung in inverser Kinematik, konnte der gewünschte Strahl nicht produziert werden. Stattdessen wurde noch genehmigte Strahlzeit für ^{144}Ba (IS553, der Sprecher Prof. Dr. Marcus Scheck (jetzt University of the West of Scotland (UWS), Vereinigtes Königreich) war bei der Einreichung des Proposals als Mitarbeiter der Gruppe des Teilprojektleiters tätig), mit $Z = 56$ und $N = 88$ ein Kern von besonderem Interesse, verwendet. Für Untersuchung der Einteilchenstruktur um ^{132}Sn (IS654, Sprecher ist der Teilprojektleiter) ist von Bedeutung, dass $^{132}\text{Sn}(d,p)$ erfolgreich an ISS gemessen wurde. Die Komplementarität der experimentellen Ansätze, Miniball + HI-TREX mit Teilchen- und Gammaspektroskopie bzw. ISS mit reiner Teilchenspektroskopie, wurde dabei klar ersichtlich. Für das Forschungsinteresse der Gruppe des Teilprojektleiters ist weiterhin die Beobachtung eines Kandidaten für den ersten 3^- -Zustand in ^{212}Ra (IS748), siehe TP1, von Interesse.

4 Verwendung der Zuwendung (wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises, z. B. Investitionen, Personalmittel)

Teilprojekt 1 (Pietralla)

Die Personalmittel wurden für die Anstellung des am Projekt arbeitenden Doktoranden verwendet. Reisemittel wurden zur Teilnahme an den Experimenten an ISOLDE sowie an komplementären Beschleunigeranlagen, zur Teilnahme an Konferenzen wie der Frühjahrstagung der DPG und dem International Symposium on Nuclear Science, sowie zur Teilnahme an Fortbildungen, z.B. an der „Euroschool on Exotic Beams“ in Jyväskylä, Finnland eingesetzt.

Teilprojekt 2 (Kröll)

Die Personalmittel wurden wie bewilligt zur Finanzierung der Postdoktorandin (bis 04/2024) und des Doktoranden (Q3/2023-Q2/2024) im Projekt eingesetzt.

Die Reisemittel wurden wie bewilligt hauptsächlich für Reisen zum CERN eingesetzt. Zur Vorbereitung, z.B. auch der Inbetriebnahme von Miniball am Strahlplatz XT01 nach den Upgrades der vorhergegangenen Förderperiode während LS2, und zur Durchführung von Experimenten mit Miniball und Si-Detektoren bei ISOLDE war eine häufige Vor-Ort-Präsenz unabdingbar.

Weiterhin wurde an den DPG-Frühjahrstagungen sowie Workshops und User Meetings teilgenommen. Der HIE-ISOLDE-Workshop am Institute of Physics (IoP) in London (Vereinigtes Königreich) in 2023 wurde vom Teilprojektleiter mit organisiert. Der Doktorand hat an einer Sommerschule am TRIUMF (Vancouver, Kanada) teilgenommen.

Die Investmittel wurden wie bewilligt zur Beschaffung von Elektronik- und Mechanikkomponenten zum zukünftigen Einsatz von C-REX mit der ASIC-basierten, zu HI-TREX kompatiblen, Frontend-Elektronik eingesetzt.

Die Miniball-Kollaborationsbeiträge 2021-2023 für die an Miniball beteiligten deutschen Universitäten wurden wie bewilligt gezahlt.

5 Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele

TP1:

- Die ^{142}Sm Daten des ISOLDE-Experiments IS546 wurden final evaluiert.
- Die Analyse des komplementären Winkelverteilungsexperiments zu ^{142}Sm am HIL wurde abgeschlossen.
- Die Veröffentlichung der zusammengefassten Ergebnisse der ^{142}Sm Daten ist in Vorbereitung.
- Die Auswertung der ^{132}Te Daten und Identifizierung des $2_{1,ms}^+$ wurde abgeschlossen.
- Die Ergebnisse der ^{132}Te Auswertung wurden bei Phys. Rev. C eingereicht.
- Die Analyse des ersten 4^+ Zustands von ^{132}Te ist abgeschlossen und ein Manuskript zur Veröffentlichung ist in Arbeit.
- Die Analyse des Datensatzes aus dem ISOLDE-Experiments IS748 wurde begonnen und ist in Arbeit.

TP2:

- 2 neue MINIBALL-Kryostate wurden beschafft und in Betrieb genommen.
- Daten zu ^{142}Xe (IS548) sind vollständig ausgewertet und Publikation ist in Vorbereitung.
- Prototyp für neues T-REX (HI-TREX) wurde aufgebaut und Detektor mit ASIC-Elektronik in Strahlexperiment getestet.
- Analyse von Daten aus verschiedenen Experimenten mit MINIBALL, teils unter Verwendung von C-REX, wurden abgeschlossen und die Ergebnisse veröffentlicht.
- Miniball und Si-Detektoren seit 2022 nach LS2 wieder im vollen Experimentierbetrieb bei HIE-ISOLDE.

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Teilprojekt 1 (Pietralla)

Die geleistete Arbeit war zur Durchführung der Forschungsziele notwendig und entspricht dem Stand der Methodik. Die Identifikation gemischt-symmetrischer Zustände der $N=80$ und $N=84$ Isotone ist wissenschaftlich wünschenswert, um die zugrundeliegende Kernstruktur nahe von Schalenabschlüssen zu verstehen, insbesondere den Einfluss der Teilchen-Loch-Symmetrie auf die Formierung kollektiver Anregungen durch die dominante Proton-Neutron Wechselwirkung. Die Auswertung der durchgeführten Experimente lieferte bereits wichtige Ergebnisse zu den $M1$ -Übergangsstärken zwischen höher gelegenen 2^+ Zuständen und dem 2_1^+ Zustand. Mithilfe der Ergebnisse aus den bereits durchgeführten und noch geplanten Experimenten können einschlägige Kernstrukturmodelle getestet und weiterentwickelt werden.

Teilprojekt 2 (Kröll)

Für die Vorbereitung und Durchführung von Experimenten mit Miniball und Si-Detektoren ist die Präsenz von sachkundigem Personal vor Ort und der damit verbundene Einsatz von Reisemitteln notwendig.

Die durchgeführten Arbeiten insbesondere bei der Wiederinbetriebnahme nach LS2, während dessen viel erfahrenes Personal aufgrund abgelaufener Zeitverträge das Forschungsgebiet verlassen hat, erforderten die Expertise der erfahrenen Postdoktorandin. Der Doktorand erwarb im Rahmen seiner Master-Arbeit Expertise auf dem Gebiet der Si-Detektoren, die er nun auch in seiner Doktorarbeit bei ISOLDE zum Einsatz bringen wird.

Die vorhandenen Si-Detektoren aus T-REX/C-REX lassen sich nicht mehr mit der neuen Miniball-DAQ betreiben. Im Sinne einer nachhaltigen weiteren Nutzung der Investitionen vergangener Förderperioden in Si-Detektoren und Infrastruktur, z.B. Vakuumkammer, ist die Entwicklung und Implementierung einer modernen, ASIC-basierten Frontend-Elektronik ein angemessener Schritt, der auch die Anpassung an die veränderten Bedingungen bei den höheren Strahlenergien bei HIE-ISOLDE berücksichtigt.

7 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse

Teilprojekt 1 (Pietralla)

Die Formierung von quadrupolkollektiven Anregungen nahe Schalenabschlüssen ist ein aktueller Gegenstand der Kernstrukturforschung. Wegen der dominanten Proton-Neutron-Restwechselwirkung im Valenzraum erlaubt erst die Beachtung des Proton-Neutron Freiheitsgrad ein Verständnis der kollektiven Phänomene. Zur experimentellen Charakterisierung der Beiträge von Valenzprotonen und -neutronen ist das Studium von isovektorielle Moden wie gemischtsymmetrischen Zustände, zusätzlich zu den niedrig-liegenden Proton-Neutron symmetrischen Zuständen notwendig. Nur so können Parameter der Proton-Neutron Wechselwirkung zuverlässig bestimmt, und die Entstehung von Kollektivität aus Wenig-Teilchen Anregungen verstanden werden. Die HIE-ISOLDE Anlage mit dem MINIBALL-Spektrometer bieten für diese Forschung herausragende Bedingungen. Die Ergebnisse finden hohe internationale Beachtung.

Teilprojekt 2 (Kröll)

Miniball wird seit über 20 Jahren bei ISOLDE betrieben und vom BMBF gefördert. Stetige Weiterentwicklungen des Aufbaus aus HPGE-Detektoren und Siliziumdetektoren ermöglichen die Wettbewerbsfähigkeit, welche durch die hohe Nachfrage nach Strahlzeiten beim INTC dokumentiert ist, unter Nutzung der bei ISOLDE gebotenen Möglichkeiten für die Zukunft.

8 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Teilprojekt 1 (Pietralla)

Kürzlich wurde das Isotop ^{136}Te in relativistischer Coulomb-Anregung am RIKEN-RIBF in Japan untersucht. Jedoch wurden hier keine zuverlässigen Daten zur Lokalisierung und Quantifizierung von gemischt-symmetrischen Zuständen erhalten. Für dieses Ziel sind die im Experiment IS596 geplanten Untersuchungen mittels Niederenergie-Coulomb-Anregung wegen höherer Energieauflösung vermutlich geeigneter.

Teilprojekt 2 (Kröll)

Die Forschung mit Strahlen nachbeschleunigter exotischer Kerne bei Strahlenergien bis zu 10 MeV/u wird auch an wenigen anderen Anlagen betrieben, z.B. ISAC2 (TRIUMF, Kanada) oder CARIBU (ANL, USA). Neue Anlagen wie ReA (FRIB, USA) stehen erst vor der Inbetriebnahme. Auch das Abbremsen schneller Fragmentstrahlen, z.B. OEDO (RIKEN, Japan), verbleibt bei 50 MeV/u, also weit oberhalb der Domäne von HIE-ISOLDE. Hinsichtlich der Vielfalt an verfügbaren Isotopen und (meist) auch der erhältlichen Intensitäten ist HIE-ISOLDE diesen allerdings weit überlegen. Die Forschung mit schnelleren Ionen, z.B. an GSI/FAIR, RIBF (RIKEN, Japan) oder FRIB (USA),

ist dazu komplementär, da andere Reaktionsmechanismen vorliegen, die andere Observablen zugänglich machen.

Ein Ziel von Experiment IS654 war Messung der Anregungsenergie des ersten angeregten Zustandes ($I^\pi = 3/2^-$) in ^{135}Sn , dessen Wert einen ersten Rückschluss zulässt, ob bei $N = 90$ ein neuer Schalenabschluß auftritt oder nicht. Dieser Wert wurde inzwischen am RIKEN gemessen (A. Jungclaus et al., Phys. Lett. B 851 (2024) 138561). Wirkliche Klarheit über die Natur dieses Zustandes wird aber erst von IS654 kommen, wenn der spektroskopische Faktor in einer (d,p)-Reaktion gemessen werden wird.

9 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

9.1 Referierte Publikationen (z. B. in Fachzeitschriften oder -büchern und referierte Konferenzproceedings)

Determination of the spins and parities for the 0_4^+ and 0_5^+ states in ^{100}Zr

J. Wu, M.P. Carpenter, F.G. Kondev, R.V.F. Janssens, S. Zhu, E.A. McCutchan, A.D. Ayangeakaa, J. Chen, J. Clark, D.J. Hartley, T. Lauritsen, N. Pietralla, G. Savard, D. Seweryniak, and V. Werner
Phys. Rev. C **109**, 024314 (2024). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.109.024314>

Isolated one-phonon mixed-symmetry 2^+ state of the radioactive neutron-rich nuclide ^{132}Te

T. Stetz, H. Mayr, V. Werner, N. Pietralla, Y. Tsunoda, T. Otsuka, G. Rainovski, T. Beck, R. Borcea, S. Calinescu, C. Costache, I. E. Dinescu, K. E. Ide, A. N. Ionescu, P. Koseoglou, R. Lica, N. Mărginean, R. E. Mihai, C. M. Nickel, C. R. Nita, L. Stan, S. Toma, and R. Zidarova
Submitted to Phys. Rev. C, <https://arxiv.org/abs/2501.01436>

Evolution of single-particle structure near the $N = 20$ island of inversion

P. T. MacGregor, D. K. Sharp, S. J. Freeman, C. R. Hoffman, B. P. Kay, T. L. Tang, L. P. Gaffney, E. F. Baader, M. J. G. Borge, P. A. Butler, W. N. Catford, B. D. Cropper, G. de Angelis, J. Konki, Th. Kröll, M. Labiche, I. H. Lazarus, R. S. Lubna, I. Martel, D. G. McNeel, R. D. Page, O. Poleshchuk, R. Raabe, F. Recchia, and J. Yang
PHYSICAL REVIEW C 104, L051301 (2021)
<https://doi.org/10.1103/PhysRevC.104.L051301>

Microscopic structure of the one-phonon 2^+ states of ^{208}Po

D. Kalaydjieva, D. Kocheva, G. Rainovski, V. Karayonchev, J. Jolie, N. Pietralla, M. Beckers, A. Blazhev, A. Dewald, M. Djongolov, A. Esmaylzadeh, C. Fransen, K. A. Gladnishki, A. Goldkuhle, C. Henrich, I. Homm, K. E. Ide, P. R. John, R. Kern, J. Kleemann, Th. Kröll, C. Müller-Gatermann, M. Scheck, P. Spagnoletti, M. Stoyanova, K. Stoychev, V. Werner, A. Yaneva, S. S. Dimitrova, G. De Gregorio, H. Naïdja, and A. Gargano
Physical Review C 104, 024311 (2021)
<https://doi.org/10.1103/PhysRevC.104.024311>

Coulomb excitation of ^{222}Rn

P. Spagnoletti, P. A. Butler, L. P. Gaffney, K. Abrahams, M. Bowry, J. Cederkäll, T. Chupp, G. de Angelis, H. De Witte, P. E. Garrett, A. Goldkuhle, C. Henrich, A. Illana, K. Johnston, D. T. Joss, J. M. Keatings, N. A. Kelly, M. Komorowska, J. Konki, T. Kröll, M. Lozano, B. S. Nara Singh, D. O'Donnell, J. Ojala, R. D. Page, L. G. Pedersen, C. Raison, P. Reiter, J. A. Rodriguez, D. Rosiak, S. Rothe, M. Scheck, M. Seidlitz, T. M. Shneidman, B. Siebeck, J. Sinclair, J. F. Smith, M. Stryczyk, P. Van Duppen, S. Viñals, V. Virtanen, K. Wrzosek-Lipska, N. Warr, M. Zielińska
PHYSICAL REVIEW C 105, 024323 (2022)
<https://doi.org/10.1103/PhysRevC.105.024323>

Quadrupole and octupole collectivity in the semi-magic nucleus $^{206}_{80}\text{Hg}_{126}$

L. Morrison, K. Hadyńska-Klęk, Zs. Podolyák, L.P. Gaffney, M. Zielińska, B.A. Brown, H. Grawe, P.D. Stevenson, T. Berry, A. Boukhari, M. Brunet, R. Canavan, R. Catherall, J. Cederkäll, S.J. Colosimo, J.G. Cubiss, H. De Witte, D.T. Doherty, Ch. Fransen, G. Georgiev, E. Giannopoulos, M. Górska, H. Hess, L. Kaya, T. Kröll, N. Lalović, B. Marsh, Y. Martinez Palenzuela, G. O'Neill, J. Pakarinen, J.P. Ramos, P. Reiter, J.A. Rodriguez, D. Rosiak, S. Rothe, M. Rudigier, M. Siciliano, E.C. Simpson, J. Snall, P. Spagnoletti, S. Thiel, N. Warr, F. Wenander, R. Zidarova
Physics Letters B 838, 137675 (2023)
<https://doi.org/10.1103/PhysRevC.106.064305>

Axial and triaxial degrees of freedom in ^{72}Zn

S. Hellgartner, D. Mũcher, K. Wimmer, V. Bildstein, J.L. Egido, R. Gernhäuser, R. Krücken, A.K. Nowak, M. Zielińska, C. Bauer, M.L.L. Benito, S. Bottoni, H. De Witte, J. Elseviers, D. Fedorov, F. Flavigny, A. Illana, M.

Klintefjord, T. Kröll, R. Lutter, B. Marsh, R. Orlandi, J. Pakarinen, R. Raabe, E. Rapisarda, S. Reichert, P. Reiter, M. Scheck, M. Seidlitz, B. Siebeck, E. Siesling, T. Steinbach, T. Stora, M. Vermeulen, D. Voulot, N. Warr, F.J.C. Wenander

Physics Letters B 841, 137933 (2023)

<https://doi.org/10.1016/j.physletb.2023.137933>

Nuclear level density and γ -ray strength function of ^{67}Ni and the impact on the i process

V. W. Ingeberg, S. Siem, M. Wiedeking, A. Choplin, S. Goriely, L. Siess, K. J. Abrahams, K. Arnsward, F. Bello Garrote, D. L. Bleuel, J. Cederkäll, T. L. Christoffersen, D. M. Cox, H. De Witte, L. P. Gaffney, A. Görgen, C. Henrich, A. Illana, P. Jones, B. V. Kheswa, T. Kröll, S. N. T. Majola, K. L. Malatji, J. Ojala, J. Pakarinen, G. Rainovski, P. Reiter, M. von Schmid, M. Seidlitz, G. M. Tveten, N. War, and F. Zeiser (The ISOLDE Collaboration)

Physical Review C 111, 015803 (2025)

<https://doi.org/10.1103/PhysRevC.111.015803>

9.2 Andere Veröffentlichungen (z. B. Konferenzbeiträge wie Vorträge und Poster, unrefereierte Proceedings, Conference Notes)

Evolution of the first mixed-symmetry 2^+ state in the $N=80$ isotones

T. Stetz, R. Zidarova, R. Kern, V. Werner, N. Pietralla, T. Abraham, U. Ahmed, G. Colucci, K. Hadyńska-Klek, K. E. Ide, G. Jaworski, M. Kisieliński, M. Komorowska, M. Kowalczyk, M. L. Cortes, P. Napiorkowski, C. Nickel, M. Palacz, G. Rainovski, J. Samorajczyk-Pyśk, J. Srebrny, M. Stoyanova, A. Trzcińska, K. Wrzosek-Lipska, B. Zalewski

DPG-Frühjahrstagung der Sektion Materie und Kosmos 2023; Mazurian Lakes Conference on Physics 2023

The lowest-lying mixed-symmetry 2^+ state in the $N=80$ isotones

T. Stetz, H. Mayr, N. Pietralla, G. Rainovski, V. Werner, and R. Zidarova

DPG-Frühjahrstagung Gießen 2024

Lifetime measurement of the 4_1^+ state of ^{132}Te

H. Mayr, T. Stetz, V. Werner, M. Beckers, A. Blazhev, A. Esmaylzadeh, B. Falk, J. Fischer, R.-B. Gerst, K. Gladnishki, K.E. Ide, V. Karayonchev, E. Kleis, H. Kleis, L. Klöckner, P. Koch, D. Kocheva, C.M. Nickel, A. Pfeil, N. Pietralla, G. Rainovski, F. von Spee, M. Stoyanova, and R. Zidarova

DPG-Frühjahrstagung Gießen 2024

Evolution of the one-phonon mixed-symmetry 2^+ state in the $N=80$ isotones

T. Stetz, R. Zidarova, V. Werner, N. Pietralla, T. Abraham, U. Ahmed, T. Beck, R. Borcea, S. Calinescu, G. Colucci, M. L. Cortéz, C. Costache, I. E. Dinescu, K. Hadyńska-Klek, K. E. Ide, A. N. Ionescu, G. Jaworski, R. Kern, M. Kisieliński, M. Komorowska, P. Koseoglou, M. Kowalczyk, R. Lica, N. Mărginean, H. Mayr, R.-E. Mihai, P. Napiorkowski, C. M. Nickel, C. R. Nita, T. Otsuka, M. Palacz, G. Rainovski, J. Samorajczyk-Pyśk, J. Srebrny, L. Stan, M. Stoyanova, S. Toma, A. Trzcińska, Y. Tsunoda, K. Wrzosek-Lipska, and B. Zalewski

ISOLDE Workshop and Users meeting 2024

Lifetime measurement of the first 4^+ state of ^{132}Te

H. Mayr, T. Stetz, V. Werner, M. Beckers, A. Blazhev, A. Esmaylzadeh, J. Fischer, R.-B. Gerst, K. Gladnishki, K.E. Ide, V. Karayonchev, E. Kleis, H. Kleis, P. Koch, D. Kocheva, C.M. Nickel, A. Pfeil, N. Pietralla, G. Rainovski, F. von Spee, M. Stoyanova, R. Zidarova

International Symposium on Nuclear Science (ISNS-24); Euroschool on exotic beams 2024

Commissioning of Miniball@HIE-ISOLDE and first results from Coulomb excitation of ^{130}Sn

M. Droste, P. Reiter, and Th. Kröll for the MINIBALL IS702 collaboration

HK 59.1, DPG Frühjahrstagung Dresden (2023)

Performance investigation of a DSSSD coupled to SKIROC2 ASICs

S. Meyer, Th. Kröll, R. Gernhäuser, S. Golenev, C. Henrich, and H.-B. Rhee

HK 74.39, DPG Frühjahrstagung Dresden (2023)

Probing the doubly magic shell closure at ^{132}Sn by Coulomb excitation of neutron-rich ^{130}Sn

M. Droste, P. Reiter, and Th. Kröll for the MINIBALL IS702 collaboration

HK 65.3, DPG Frühjahrstagung Giessen (2024)

Implementation of a new ASIC-based data acquisition setup for the C-REX detector array

S. Meyer, C. Henrich, Th. Kröll, H.-B. Rhee, R. Gernhäuser, and S. Golenev

HK 72.19, DPG Frühjahrstagung Giessen (2024)

9.3 Abschlussarbeiten (Bachelor, Master, Diplom, Staatsexamen, Promotion, Habilitation)

Determination of the branching ratio of the $2_{m,s}^+$ state of ^{132}Te

R. Mayer (Bachelor thesis, TU Darmstadt, 2022)

Erste direkte Lebensdauerbestimmung des 2_1^+ -Zustandes von ^{210}Pb

C. Nickel (Bachelor thesis, TU Darmstadt, 2022)

Lifetime measurements of excited states of ^{132}Te

H. Mayr (Master thesis, TU Darmstadt, 2023)

Performance investigation of a DSSSD coupled to SKIROC2 ASICs

Steffen Josef Meyer (TU Darmstadt, Master Thesis, 2023)

First measurement of the lifetime of the 2_1^+ state of ^{200}Pt

C. Nickel (Master thesis, TU Darmstadt, 2024)

Evolution of isovector-quadrupole valence-shell excitations of heavy vibrational nuclei

Dr. Tim Stetz (Doktorarbeit, TU Darmstadt, 2025)