

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Schlussbericht

Verbund: nein

Zuwendungsempfänger: Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main
Projektleitung: Dr. Kurt Ernst Stiebing
E-Mail: stiebing@em.uni-frankfurt.de
Förderkennzeichen: 05P12RFFAH
Förderzeitraum: 01.07.2012 - 31.10.2015
Zuwendung: 106.200,00 €
Projektträger: Projektträger DESY

Zusätzlicher Kontakt:
Zusätzlicher Name:

Genutzte Großgeräte:	Labor FAIR	Gerät FAIR	Experiment APPA
Diplomarbeiten:	0		
Dissertationen:	0		
Habilitationen:	0		
Publikationen:	4		
Konferenzbeiträge:	3		
Patente:	0		
Bachelorarbeiten:	0		
Masterarbeiten:	0		

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 30.04.2016 10:07 für eine Veröffentlichung freigegeben.

Schlussbericht

Ein Leptonenspektrometer für die Untersuchung der Dynamik atomarer Fundamentalprozesse im Speicherring HESR und im APPA-Cave

Zuwendungsempfänger: *Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main*

Projektleitung: Dr. Kurt Ernst Stiebing

Zusammenfassung

Ziel des Projekts war die Entwicklung eines bildgebenden Leptonen Spektrometers für Experimente am HESR ($\gamma_{\max} = 6$ für gespeicherte Ionen) und am Hochenergie-APPA-Cave zur Spektroskopie von Elektronen/Positronen, die aus dem Projektil unter einem Laborwinkel von etwa $0^\circ \pm 6^\circ$ emittiert werden. Ein besonderes Augenmerk lag auf der Option, in koinzidenten Messungen von schnellen, aus dem Projektil emittierten Elektronen mit anderen, im Stoß erzeugten Elektronen und mit emittierten Photonen, die Streuebene zu rekonstruieren, so dass mehrfach differenzielle Wirkungsquerschnitte der jeweiligen atomaren Fundamentalprozesse in sehr starken, transienten Feldern für stringente Tests der Theorie zur Verfügung stehen.

In der vorliegenden Studie wurde gezeigt, dass die Kombination eines eisenfreien, magnetischen Quadrupol Singulets (Q1) (vertikale Fokussierung) mit zwei magnetischen 60° -Dipolmagneten (D) (dispersiver Teil des Spektrometers) gefolgt von einem weiteren Q1 (zur Diskriminierung gegen den Leptonenuntergrund aus anderen Prozessen) geeignet ist, die oben definierte Aufgabe zu erfüllen. Zu diesem Q1-2D-Q1 Spektrometer wurden im Rahmen der Studie Simulationen mit einem 3-D Finite-Elemente (FE) Programm (CST[®]) durchgeführt um die Einflüsse der Rand- und Streufelder auf die Abbildungseigenschaften des Gesamtsystems zu untersuchen und Informationen für eine optimierte Konstruktion des Spektrometers zu erarbeiten.

Die Optimierung des Spektrometers wurde speziell zur Untersuchung des Prozesses der *dielektronischen Rekombination* aus dem *negativen Kontinuum* (NCDR) durchgeführt, der von theoretischer Seite postuliert wurde, bisher dem Experiment aber nicht zugänglich ist und damit als ein „*Experiment der ersten Stunde*“ am HESR angesehen wird. Durch die generell starke Vorwärtsfokussierung der Projektilereignisse in Stößen relativistischer Schwerionen, $\gamma_{\max} = 6$ für gespeicherte Ionen im HESR, deckt das Spektrometer einen großen Bereich des CM-Raumwinkels ab und ist somit auch ideal geeignet zur Untersuchung anderer Prozesse der Erzeugung von dynamischen Positronen und Elektronen in diesen sehr starken transienten Feldern.

Bericht

Technische Entwicklungsziele des Vorhabens

Das Konzept des im Rahmen dieser Projektstudie konzipierten Projektilektronen Spektrometers für den Laborwinkelbereich $0^\circ \pm 6^\circ$ für Experimente am HESR und am Hochenergie APPA-Cave baut direkt auf der Erfahrung mit dem magnetischen Vorwärtselektronenspektrometer am ESR der Gesellschaft für Scherionenforschung (GSI), Darmstadt auf [1-4]. Ziel ist es, Elektronen/Positronen zu detektieren, die in Stößen hochgeladener Projektilionen mit Atomen des Gastargets in Vorwärtsrichtung im Laborsystem emittiert werden. Diese werden zunächst in einem eisenfreien magnetischen Quadrupol vertikal fokussiert, dann in einem 60° -Dipolmagneten vom Projekttilstrahl getrennt und impulsselektiert. Durch einen weiteren, baugleichen 60° -Dipolmagneten, gefolgt von einem weiteren vertikal fokussierenden Quadrupol, werden die Elektronen/Positronen vom Untergrund gestreuter Positronen/Elektronen getrennt und auf einen positionsempfindlichen Detektor fokussiert. Je nach der Polung der beiden Dipolmagnete ($+60^\circ/+60^\circ$ -Konfiguration oder $+60^\circ/-60^\circ$ -Konfiguration) wird dabei entweder eine achromatische oder eine dispersive Optik realisiert. So werden alle Positronen innerhalb der Energieakzeptanz von $\Delta E/E \pm 4\%$ auf den gleichen Punkt auf dem Detektor fokussiert oder als energieabhängiges horizontales Band auf den Detektor abgebildet. Das Prinzip ist in Abb. 1 für den Fall des Positronen Nachweises anhand einer Simulation mit dem Programm MIRKO dargestellt.

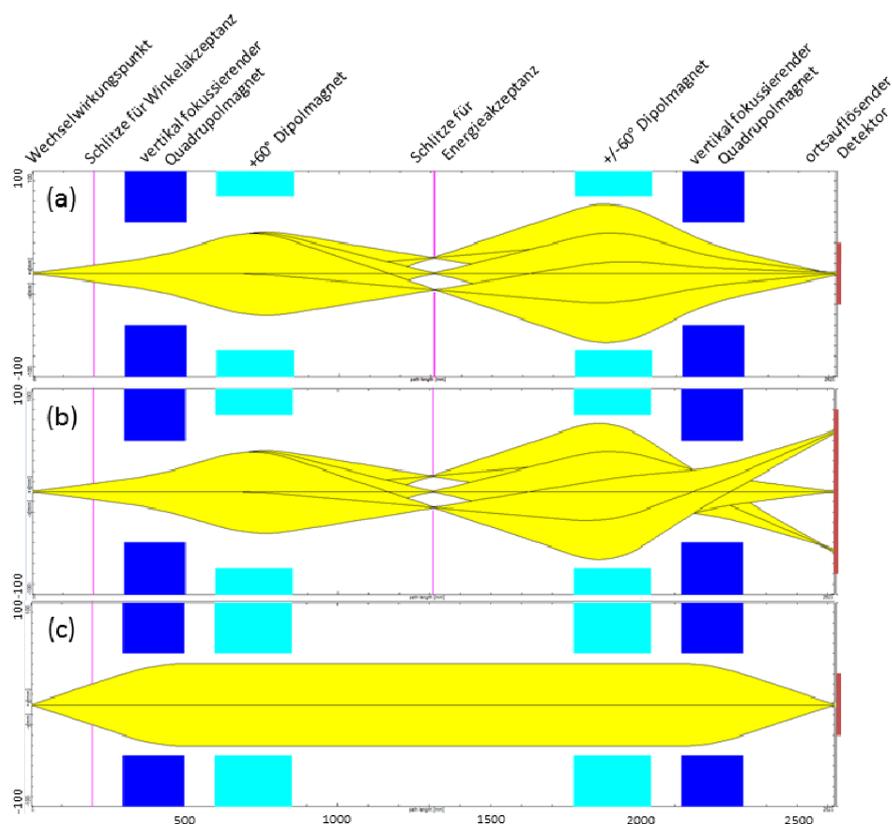


Abb. 1: (a) horizontale Optik in achromatischer $+60^\circ/+60^\circ$ -Konfiguration, (b) horizontale Optik in dispersiver $+60^\circ/-60^\circ$ -Konfiguration, (c) vertikale Optik

Bei den gegebenen Leptonenergien im MeV-Bereich sind zum Nachweis der minimal ionisierenden Positronen/Elektronen Plastik-Szintillationszähler gut geeignet, die nur eine geringe Nachweiswahrscheinlichkeit für Photonen haben und geometrischen Anforderungen

leicht angepasst werden können. Hierbei bietet sich die Verwendung eines ΔE -E Teleskopes an, das den Untergrund noch einmal deutlich reduziert. Dabei kann die notwendige Ortsauflösung des Detektorsystems sehr leicht z. B. dadurch erreicht werden, dass der ΔE Detektor aus zwei keilförmigen Szintillationszählern besteht (siehe Abb. 2). Für den Positronennachweis müssen die Positronen im nachfolgenden E-Detektor (Plastikszintillator) zuverlässig gestoppt werden, um die Photonen der Vernichtungsstrahlung in den ober- und unterhalb des ΔE -E Teleskopes angeordneten NaJ(Ti)-Szintillationsdetektoren nachweisen zu können. Für den Elektronennachweis ist ein identisches System vorgesehen, wobei auf die NaJ Detektoren verzichtet werden kann. Die Dicke der Plastikdetektoren ist auch hierbei auf die nachzuweisenden Leptonenenergien einzustellen.

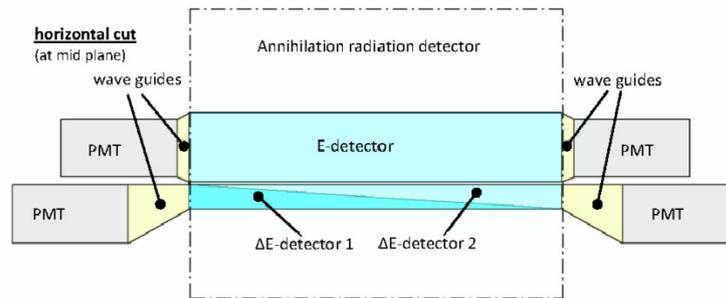


Abb. 2: Ausführung des Positronendetektorsystems als ΔE -E Teleskop aus Plastikszintillatoren (Schnitt durch die horizontale Mittelebene). Der gestrichelt umrandete Bereich deutet die, ober- und unterhalb der Plastikdetektoren angeordneten, NaJ Detektoren zum Nachweis der Vernichtungsstrahlung an.

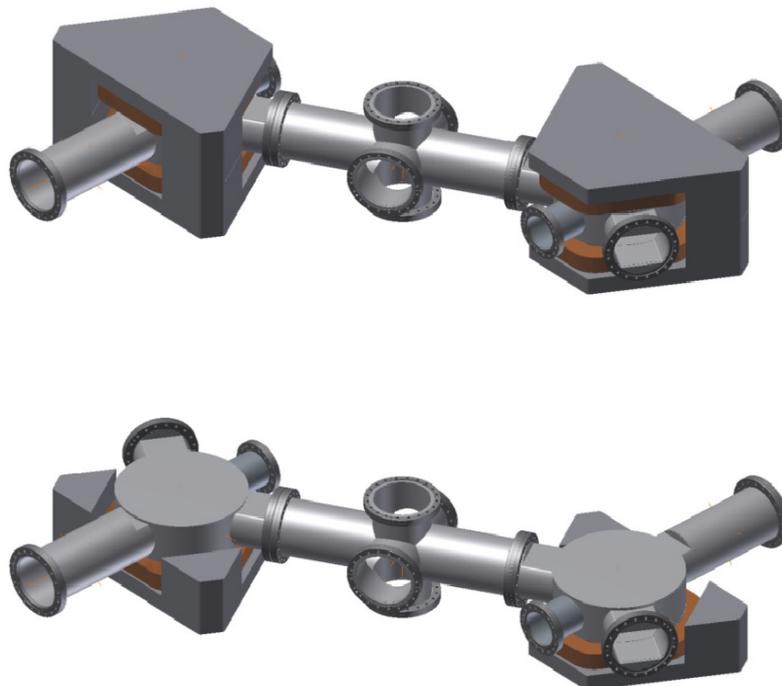


Abb. 3: Isometrische Darstellung der 3-D Konstruktion des Spektrometers.

Ein Problem stellen die Randfelder der Dipolsysteme dar, die, um die oben beschriebenen Abbildungseigenschaften zu erreichen, eine Spalthöhe von ca. 120 mm haben müssen (unter Berücksichtigung der noch in das System zu integrierenden Vakuumkammern). Aberrationen durch diese Randfelder können nur durch eine ausreichende Größe der Polschuhe sowie durch geeignete Formgebung der Polschuhkanten kompensiert werden. Um hier frühzeitig Aussagen zu gewinnen, wurde eine 3-D Version des Spektrometers erstellt, das Basis für Finite-Elemente (FE) Rechnungen mit dem Programmpaket CST® [5] ist. In Abb. 3 sind isometrische Darstellungen dieser Konstruktion dargestellt. Im oberen Teilbild ist das vollständige Spektrometer dargestellt (nicht gezeigt sind die Quadrupol Systeme, die über die beiden langen CF-150 Rohrstücke am Ein- und Ausgang des Spektrometers gelegt werden). Im unteren Teilbild wurde, zur besseren Darstellung des Vakuumsystems die obere Hälfte der Magnetsysteme entfernt. Die CF-150 Stützen des mittleren Doppelkreuzes dienen zur Aufnahme der Schlitze, des internen Pumpsystems sowie der Vakuummessung.

In Abb. 4 ist ein typisches Ergebnis der FE-Simulation für den Transport von Elektronen mit drei festgelegten Energien von 4.7, 4.9, und 5.1 MeV ($\approx 4,9 \text{ MeV} \pm 4\%$). Der Einschusswinkel wurde in einem Bereich von $\Delta\theta_{\text{lab}} = 0^\circ - 2.5^\circ$ variiert. Die Koordinaten der Treffer auf zwei Ebenen parallel zur Austrittsebene aus dem Spektrometer, in Abb. 4 als graue Rechtecke gekennzeichnet, wurden registriert und Ihre Ortsverteilungen sind auf den mit „scatter plot“ gekennzeichneten Grafiken dargestellt.

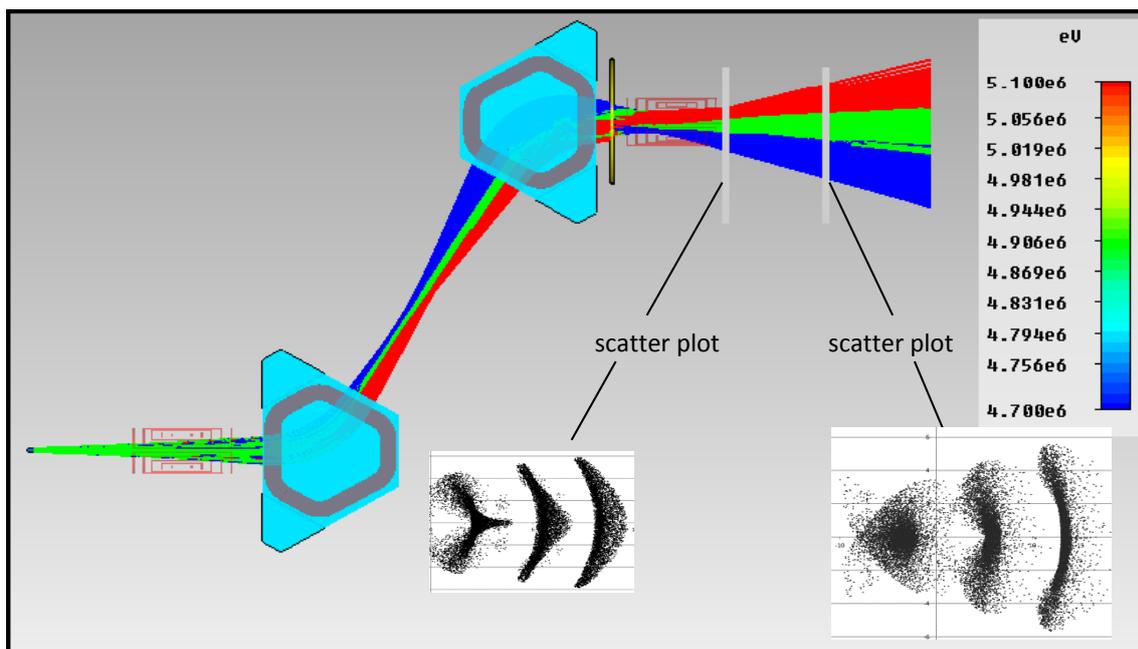


Abb. 4: Typisches Ergebnis der FE-Simulation für den Transport von Elektronen mit drei festgelegten Energien von 4.7 MeV, 4.9 MeV, und 5.1 MeV, ($4,9 \text{ MeV} \pm 4\%$), bei einer Divergenz des Emissionswinkels von $\Delta\theta_{\text{lab}} = 2.5^\circ$

In Abb. 5 ist die Projektion der Ereignisse auf die Abszisse der „Scatterplots“ aus Abb. 4 dargestellt. Hieraus kann eine Energieauflösung $\Delta E/E \approx 0.1\%$ bei zweidimensionaler Ortsauflösung der Leptonendetektoren von $\Delta s = 1\text{mm}$ abgeschätzt werden. Bei eindimensionaler Auflösung beträgt die Energieauflösung $\Delta E/E \approx 0.8\%$

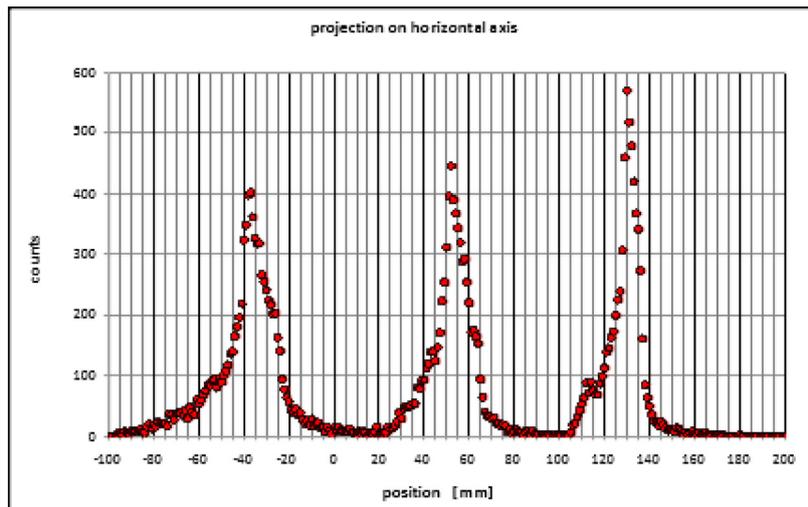


Abb.5: Projektion der Ereignisse des rechten „Scatterplots“ aus Abb.4 auf die horizontale Achse.

Literatur:

- [1] Nofal, M., et al., 2007, Phys. Rev. Lett. 99, p 163201 (2007)
- [2] Hillenbrand, P.-M., „Elektronenspektroskopie im Fundamentalprozess der Elektron-Kern-Bremsstrahlung“; Dissertation, Universität Giessen (2013)
- [3] Hillenbrand, P.-M., et al., Phys. Rev. A 90, 022707 (2014)
- [4] Hillenbrand, P.-M., et al., Phys. Rev. A 90, 042713 (2014)
- [5] Die 3D-Finite Elemente Simulationen wurden durchgeführt mit Programmpaket: CST®; CST-Computer Simulation Technology AG, 64289 Darmstadt, Germany; www.cst.com

Publikationen

1. P. M. Hillenbrand, S. Hagmann, Th. Stöhlker, Yu. Litvinov, C. Kozhuharov, U. Spillmann, V. Shabaev, K.E. Stiebing, M. Lestinsky, A. Surzhykov, A. Voitkiv, B. Franzke, D. Fischer, D. Schneider, D. Jakubassa, A. Artiomov, E. De Filippo, X. Ma, R. Dörner and H. Rothard; “Future experiments using forward electron spectroscopy to study the quantum dynamics of high-Z ions at the ESR/CRYRING storage rings”; **Phys. Scr. T156 (2013) 014087.**
2. S. Hagmann, Th. Stöhlker, Yu. Litvinov, C. Kozhuharov, P. M. Hillenbrand, U. Spillmann, V. Shabaev, K.E. Stiebing, M. Lestinsky, A. Surzhykov, A. Voitkiv, B. Franzke, D. Fischer, C. Brandau, S. Schippers, A. Mueller, D. Schneider, D. Jakubassa, A. Artiomov, E. De Filippo, X. Ma, R. Dörner and H. Rothard; “Few-body quantum dynamics of high-Z ions studied at the future relativistic high-energy storage ring”; **Phys. Scr. T156 (2013) 014086.**
4. K.E. Stiebing; Vortrag zum Thema „Lepton Spectroscopy“; 11th Topical Workshop of the SPARC Collaboration; **16.-17. Oktober 2014**, Worms.
3. Technical Design Report (TDR) als integraler Bestandteil in: Technical Design Report „SPARC@HESR: Instrumentation“, Facility for Antiproton and Ion Research, **Feb 2015.**
5. K. E. Stiebing, F. King, P.-M. Hillenbrand, S. Hagmann, Yu. A. Litvinov, S. Schippers, and Th. Stöhlker; “A lepton spectrometer for studies of fundamental atomic processes at HESR at FAIR“; proceedings zu XXIX International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collision. **22. - 28. Juli 2015**, Toledo, Spanien.