

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Schlussbericht

Verbund: nein

Zuwendungsempfänger: Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main

Projektleitung: Prof. Dr. Oliver Kester

E-Mail: o.kester@gsi.de

Förderkennzeichen: 05P12RFRBT

Förderzeitraum: 01.07.2012 - 30.06.2015

Thema: R&D BESCHLEUNIGER: Brillanzoptimierung von intensiven Schwerionenstrahlen aus Ionenquellen

Zuwendung: 106.200,00 €

Projektträger: Projektträger DESY

Zusätzlicher Kontakt: geyer@iap.uni-frankfurt.de

Zusätzlicher Name: Sabrina Geyer

Genutzte Großgeräte:	Labor	Gerät	Experiment
	Hadronen- und Kernphysik		Beschleunigerphysik

Diplomarbeiten:

Dissertationen:

Habilitationen:

Publikationen: 5

Konferenzbeiträge: 2

Patente:

Bachelorarbeiten: 1

Masterarbeiten:

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 03.01.2016 03:56 für eine Veröffentlichung freigegeben.

Schlussbericht

R&D BESCHLEUNIGER: Brillanzoptimierung von intensiven Schwerionenstrahlen aus Ionenquellen

Zuwendungsempfänger: Johann Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt am Main

Projektleitung: Prof. Dr. Oliver Kester

Zusammenfassung

Die GSI-Beschleunigeranlage liefert Schwerionenstrahlen von Elementen des gesamten Periodensystems bis zu Uran bei relativistischen Energien mit weltweit einmaligen Intensitäten. Das FAIR Projekt (Facility for Ion and Antiproton Research) erfordert Entwicklungen zu höchsten Strahlintensitäten und Strahlleistungen. Um die hohen Intensitäten der Primärstrahlen zu erreichen, sind die Teilchenzahlen in den Maschinen der GSI Beschleunigeranlage deutlich zu erhöhen, ohne die transversale Strahlqualität – die transversale Emittanz – zu vergrößern. Daher muß die Strahlqualität schon beim Niederenergiestrahtransport (LEBT) optimiert werden.

Das Ziel des geförderten Projektes waren Untersuchungen zur Optimierung des Strahltransportes von intensiven Schwerionenstrahlen aus Ionenquellen mit starken Solenoidfeldern, beispielsweise einer Elektron Zyklotron Resonanz Ionenquelle (EZR), mit Hinblick auf die Brillanz der Strahlen. Ursprünglich war dazu die Entwicklung und der Aufbau einer Strahltransportstrecke geplant, welche den Strahl kollimieren und einer Emittanzkorrektur unterwerfen sollte, um das Grundprinzip der Phasenraumkopplung und die Optimierung des Strahls bezüglich der Brillanz experimentell demonstrieren zu können. Aufgrund der Mittelkürzungen bei diesem Projekt, wurden die Schwerpunkte auf numerische Simulationen und Prinzip-Untersuchungen zur Emittanzkorrektur und zur Kopplung, bzw. Entkopplung von Phasenräumen von extrahierten Strahlen aus Ionenquellen verlegt. Aus Boardmitteln und im Rahmen der Entwicklung eines transversalen Elektronentargets, konnte am Institut für Angewandte Physik (IAP) Frankfurt eine Teststrahllinie für Untersuchungen zu diesem Thema modifiziert werden. Ergänzt wurden diese Untersuchungen durch Studien zum Emittanzaustausch an der GSI in Darmstadt im Rahmen des EMTEX Projektes.

Die wesentlichen Ergebnisse des Projektes sind das Design einer Strahllinie zur Optimierung des Strahltransport von Schwerionen aus einer EZR zur ersten Beschleunigungsstufe. Die Brillanz eines Strahls aus der 14 GHz EZR der GSI kann mit diesem Strahl liniendesign um einen Faktor 10 gesteigert werden, bei 47% Transmission. Desweiteren wurde eine Strahllinie am IAP Frankfurt so modifiziert, dass Untersuchungen zu 4D-Emittanzmessungen und zur Phasenraumkopplung möglich wurden. Ein Volumenquelle in der Teststrahllinie liefert Strahlen leichter Ionen. Diese Quelle konnte durch Untersuchungen mittels des Impulsspektrometers der Strahllinie optimiert werden. Die Quelle kann mit und ohne Magnetfeld betrieben werden, wodurch Emittanzen mit und ohne transversaler Phasenraumkopplung erzeugt werden können. Messungen mit einer Pepper Pot Emittanzmeßanlage konnten durchgeführt werden, jedoch nicht mit einer dedizierten Schlitz-Punkt Abbildung. Das Prinzip der Phasenraumkopplung und –entkopplung konnte im Rahmen des EMTEX-Projektes an der GSI erfolgreich durchgeführt und damit auch die Machbarkeit der Brillanzoptimierung demonstriert werden.

Bericht

Intensive Ionenstrahlen mit kleiner Phasenraumbelugung sind erforderlich, um den Anforderungen der FAIR Beschleunigeranlage in Zukunft gerecht zu werden. Dies erfordert die Optimierung der Strahlformierung, des Strahltransportes und der Strahlbeschleunigung entlang der gesamten Beschleunigungskette. Die Optimierung startet dabei schon bei den Ionenquellen und erfordert daher eine Emittanzoptimierung bei der Extraktion der Ionen aus der Ionenquelle und beim Strahltransport zur RFQ. Die Optimierung der Quellenparameter und der Extraktion kann am besten mit einem Kollimationskanal erzielt werden, dessen Akzeptanz so eingestellt werden kann, dass ein Strahlhalo oder ein Hohlstrahl, wie er vor allem bei Elektron Zyklotron Resonanz Ionenquellen (EZR) entstehen kann, vermieden wird. Mittels des Kollimationskanals kann der Strahlstrom optimiert werden, ohne dass aufwendige Emittanzmessungen vorgenommen werden müssen. Im Falle von Plasmaionenquellen mit magnetischem Einschluss der Plasmen sind die transversalen Phasenräume der Ionenstrahlen gekoppelt. Dies führt im nachfolgenden Strahltransport zu größeren transversalen 2D-Emittanzen und damit einer Reduktion der Strahlbrillanz auch wenn die 4D-Emittanz konstant bleibt. Um dieses zu umgehen ist eine Entkopplung der transversalen Phasenräume erforderlich.

Entsprechend der Zuwendung zu diesem Projekt wurden die Arbeiten angepasst und Komponenten des Instituts genutzt, so daß ein Teil der Meilensteine der ursprünglichen Planung erreicht werden konnten. Außerdem wurden Arbeiten eines Postdoktoranden der AG Kester zum Phasenraumtransfer an der GSI mit in das Projekt aufgenommen. Die Meilensteine, welche erreicht werden konnten sind nachfolgend beschrieben:

- 1) Die Designparameter der Strahllinie sind aus den numerischen Simulationen gewonnen worden:

Die teilchenoptische Auslegung der Strahltransportstrecke wurde abgeschlossen und ein endgültiges und optimiertes Design konnte festgelegt werden (s. Abb.1). Der Aufbau umfasst die A/q -Selektion, die Strahlanpassung an den Kollimationskanal, die Kollimation und die Entkopplungssektion mit skew-Quadrupolen (um 45° gedrehte Quadrupollinsen). Die numerischen Simulationen der Strahloptik ergaben, dass eine Entkopplung der Phasenräume vor dem Kollimationskanal nicht erhalten bleibt. Daher ist die Entkopplung der Phasenräume über ein skew-Triplett nach der Kollimation die richtige Wahl. Da diese Strahlmanipulation nach der Separation durch einen Dipol erfolgen kann, ist die Wahl von elektrostatischen Linsen möglich, was auch den Vorteil einer nicht vorhandenen chromatischen Aberration in sich birgt.

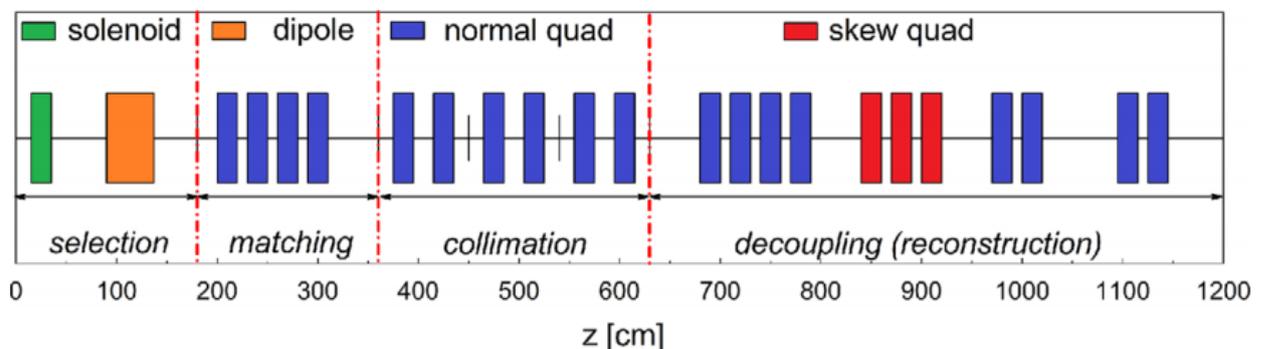


Abb. 1: Neues Design des Strahltransportkanals zur Brillanzoptimierung eines O^{3+} -Strahls aus der 14 GHz EZR Quelle der GSI.

Bei der Auslegung wurde berücksichtigt, dass auch ein intensiver Strahl einer 28 GHz EZR durch die Strahllinie optimal präpariert werden soll und damit die Aperturen des Solenoiden und des Dipolmagneten entsprechend groß gewählt werden mussten. Aufgrund der Extraktion aus einem starken Solenoidfeld treten große Strahlemittanzen auf, so daß die Separation der Ladungszustände nur in Magneten großer Apertur effizient möglich ist. Die Feldstärken und Längen der zwei auf den Dipol folgenden Quadrupol-Dubletts wurden so gewählt, dass sie den Strahl möglichst gut für die Übergabe an den Kollimationskanal anpassen. Im Kollimationskanal werden Teilchen, die große Strahlablagen haben, auf den Kollimatoren aufgefangen, so daß nur der intensive Kern des Strahl hindurchläuft. Der Abschnitt besteht aus drei identischen Quadrupoldubletts und vier Blenden mit variabler Breite und Höhe. Jede Dublette verursacht eine Phasendrehung von 45° und nach jeder Drehung erfolgt die Kollimation durch eine weitere Blende. Die Schlitzbreite und Höhe sind für alle Kollimatoren gleich gewählt und beträgt 4 cm. Werden die Blenden variabel angelegt, so könnten auch Anpassungsfehler ausgeglichen werden. Die Strahllinie in Abb.1 erhöht die Brillanz um eine Größenordnung bei 47% Transmission (siehe Abb.2). Dabei wurden gemessene Emittanzen aus der GSI-EZR als Startverteilungen genutzt.

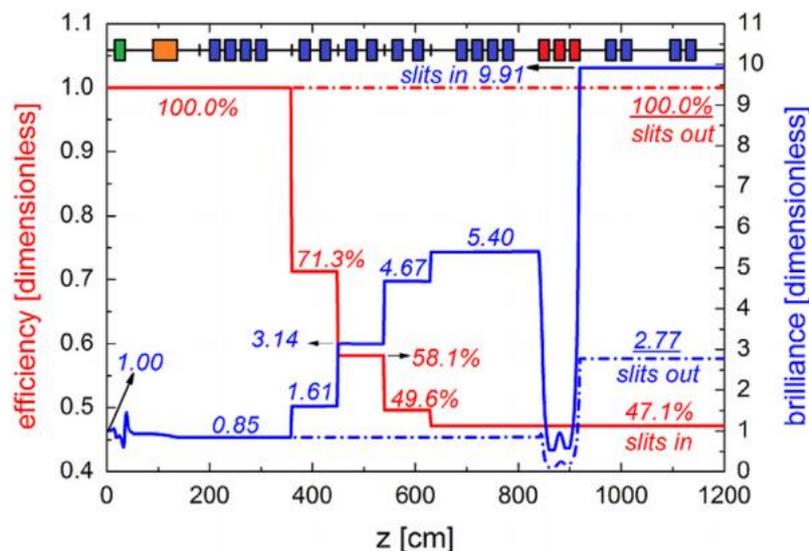


Abb. 2: Transmission und relative Brillanz entlang des Strahlkanals mit (durchgehende Linie) und ohne (gestrichelte Linie) die vier Kollimatoren. Die Schlitzbreite und Höhe beträgt 4 cm.

Am Ausgang des Kollimationskanals sind die transversalen Phasenräume immer noch gekoppelt. In der letzten Sektion entkoppelt eine Kombination aus zwei normalen Quadrupoldubletts und einem Skew-Quadrupoltripllett die horizontale und vertikale Ebene. Die Gradienten wurden in einer numerischen Routine zur Minimierung des Produktes aus horizontaler und vertikaler RMS-Emittanz (Maximierung der Brillanz) bestimmt. Abb.2 zeigt die Transmission und die Brillanz entlang der Transportstrecke. Prinzipiell kann eine solche Strahllinie nun bei GSI aufgebaut werden, was im Rahmen des 28 GHz EZR-Projektes für FAIR geplant ist.

2) Die Inbetriebnahme der Strahllinie:

Da die Mittel für die Strahllinie aus Abb.1 nicht zur Verfügung standen wurde am Institut für Angewandte Physik (IAP) eine Strahllinie zum Tests eines transversalen Elektronentargets so angepasst, dass Prinzipuntersuchungen durchgeführt werden konnten. Diese Strahllinie ist in Abb.3 dargestellt. Ein Ziel der Arbeiten mit dieser Teststrahllinie war es, Methoden zur Messung der 4D-Phasenraumverteilung von Ionenstrahlen zu untersuchen, sowie den Strahltransport mittels elektrostatischer Quadrupollinsen zu explorieren. Das IAP besitzt eine Pepperpot-Emittanzmessanlage, die für Messungen zur Verfügung stand. Nimmt man als

Basis die 4D-Phasenraumverteilung der 14 GHz CAPRICE EZR der GSI, stellt sich jedoch heraus, dass bei der gegebenen Driftstrecke und den Lochabständen in der Pepperpot-Anlage, die Auflösung nach der kurzen Drift in der Anlage nicht ausreicht. Aus diesem Grund wurde eine Schlitz-Punkt-Emittanzmessanlage untersucht und als sinnvolle Alternative identifiziert. Dabei werden alle Teilchen, die nicht auf einer bestimmten Linie liegen, weggeschnitten und die verbleibenden auf einen Schirm bzw. Detektor abgebildet.

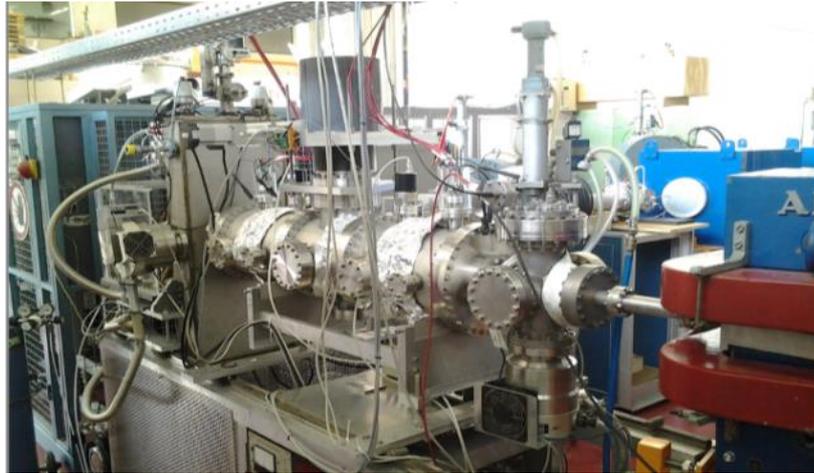
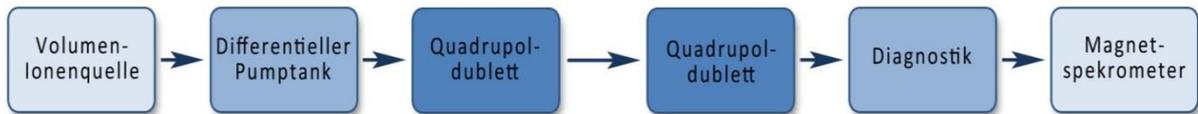


Abb. 3: Experimentelles Setup zum Test einer Emittanzmeßanlage zu Untersuchungen von transversalen Phasenraumkopplungen.

Die Leistungsfähigkeit der Schlitz-Punkt-Methode wurde vor dem Bau der Anlage für den Einsatz an einer EZR Quelle durch Simulationen evaluiert. Vor allem muss ein Strahl, dessen transversale Phasenräume gekoppelt sind, von einem ohne Kopplung unterschieden werden können. Die Ionenquelle der Teststrahllinie lässt sich sowohl mit als auch ohne Magnetfeld betreiben. Es ist also möglich wahlweise einen gekoppelten oder nicht gekoppelten Ionenstrahl in die Strahllinie zu injizieren. Für dieses Szenario wurde eine Reihe von Strahldynamiksimulationen mit COSY Infinity 8 (Transportberechnung mittels Matrizen, ohne Raumladung) und TraceWin (PIC-Simulation, mit Raumladung) durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Kombinationen von Quadrupolfeldstärken bei ausgeschaltetem Dipolfeld getestet, um zu erreichen, dass der Strahl in beiden Ebenen konvergent und die Brillanz möglichst gut ist.

3) Betrieb der Kollimation und der Quellenoptimierung:

Die in 1) vorgeschlagene Kollimation konnte in der Teststrahllinie nicht direkt umgesetzt werden. Die Ionenquelle wurde hinsichtlich der Startverteilung und der Strahlzusammensetzung optimiert, bevor Emittanzmessungen überhaupt erfolgen konnten. In Abb.4 sieht man die zugehörigen Messungen und erkennt die Produktion von ein- und zweifach geladenen Heliumionen. Beispielsweise erkennt man, dass sich die Produktion von zweifach geladenem Helium bei höherem Gasdruck in der Quelle zu höheren Entladungsspannungen verschiebt, da sich die freie Weglänge der Elektronen in der Plasmakammer mit höherem Druck reduziert. Zum Strahltransport wurden Strahltransmissionsmessungen vorgenommen, um die Optik anzupassen. Dazu wurden die Potentiale der Quadrupollinsen variiert, um die maximale Transmission zu erzielen. Die Strahlenergie wurde zu 6 keV/q gewählt. Die maximale Transmission ist durch die Apertur der Quadrupole begrenzt, welche den Strahl

der Teststrahlquelle kollimieren, was aber die Korrelation der transversalen Phasenräume nicht tangiert. Eines der Ergebnisse der Studien ist eine dringend erforderliche Modifikation der Optik zur Anpassung des Strahls von der Quelle an die Teststrahllinie.

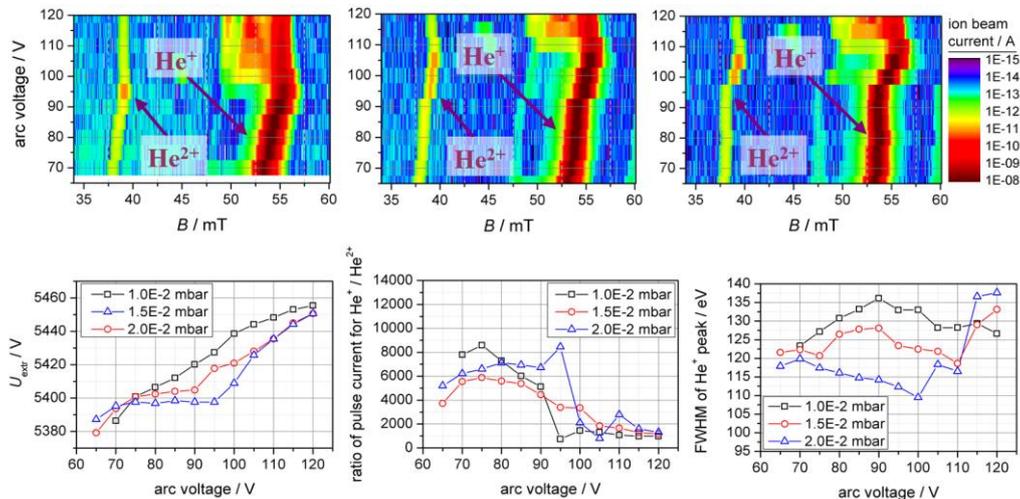


Abb. 4: Messungen mit dem Impulsspektrometer zur Optimierung der Ionenquelle bei verschiedenen Arbeitsgasdrücken und Bogenspannungen und Einfluss auf den extrahierten Helium-Strahl bei 6 keV/q.

Im Projektzeitraum konnte nur die Pepper-Pot-Emittanzmessanlage am IAP aufgebaut werden. Für die Emittanzen der Ionenstrahlen der Teststrahllinie ist die Auflösung ausreichend. Um die Anlage für die 4D-Emittanzmessungen zu kalibrieren wurden die Messungen der Pepper-Pot-Emittanzmessanlage mit einer Messung nach der Schlitz-Gitter Methode und Simulationsrechnungen mittels eines PIC Codes verglichen. Damit kann nun die Kopplung der transversalen Phasenräume unter verschiedenen Einstellungen der Quelle untersucht werden. Leider konnten die Messungen zu Kopplung und Entkopplung der Phasenräume an der Teststrahllinie nicht mehr im Projektzeitraum durchgeführt werden. Ebenso wurde die Meßanlage zur Schlitz-Punkt Methode nicht mehr rechtzeitig fertig, um für Messungen einsatzbereit zu sein. Diese Messungen sollen allerdings im Rahmen eines weitere Projektes im Anschluss noch durchgeführt werden.

4) Test des Emittanztransferverfahrens an der GSI durch Phasenraumkopplung – EMTEX:

Um Strahl aus dem UNILAC optimal in das Synchrotron injizieren zu können, muß der Strahl an die Akzeptanz des Synchrotrons angepasst werden. Bei der Injektion in das SIS18 wird die „Multiturn-Injektion“ angewandt, daher sind die Akzeptanzen in die beiden transversalen Richtungen unterschiedlich. Der Strahl aus dem UNILAC ist jedoch in beiden transversalen Richtungen identisch. Ein Anpassung ist nur durch Phasenraumkopplung in einem Ladungsstripper und durch eine Entkopplung nach der Ladungsseparation mit einem skew-Quadrupoltriplett möglich. Dieses Verfahren ist bei Elektronenmaschinen als „round-to-flat emittance transfer“ bekannt. Daher wurde an der GSI ein Testsystem für den Emittanztransfer im Rahmen des EMTEX Projektes aufgebaut und erfolgreich getestet. Dabei wird der Ladungsstripper in der Transfersektion zwischen dem Linearbeschleuniger UNILAC und dem Synchrotron SIS18 genutzt, um die Phasenräume zu koppeln und damit Emittanz zwischen den beiden transversalen Strahlebenen zu transferieren. Die Messungen der transversalen Emittanzen sind in Abb.5. zu sehen und zeigen, dass durch Kopplung der Phasenräume am Ladungsstripper und geschickte Entkopplung, die Emittanz von einer Ebene in die andere transferiert und damit der Strahl für die Injektion optimiert werden kann.

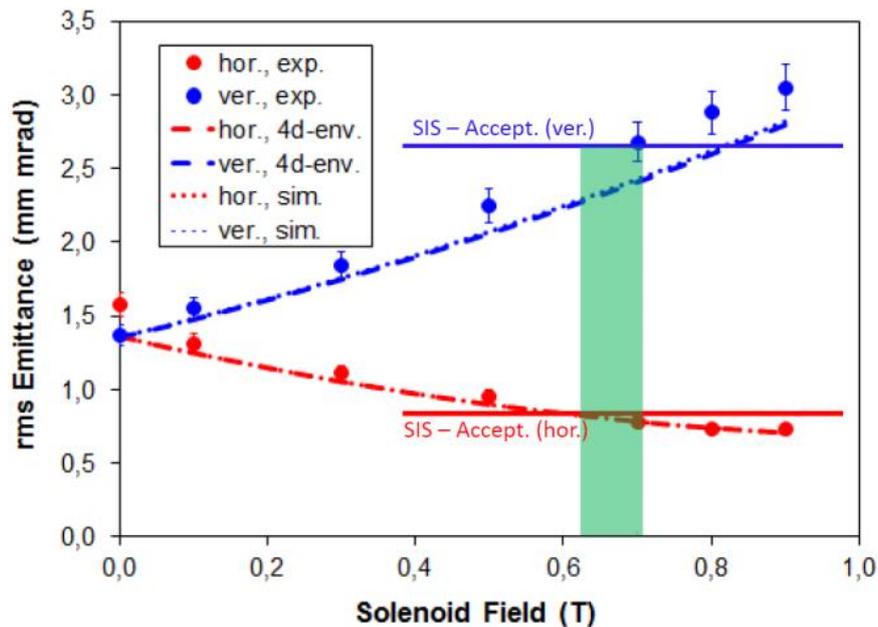


Abb. 5: Transversale Emittanzen des Strahls vor der Injektion in das SIS18 in Abhängigkeit der Magnetfeldstärke an der Position des Ladungsstrippers, welches für die Kopplung der transversalen Phasenräume sorgt.

Damit ist das Prinzip der Phasenraummanipulation durch Kopplung und Entkopplung der transversalen Phasenräume demonstriert, was die Leistungsfähigkeit der Strahllinie, die in 1) erklärt wurde, massiv entsprechend.

Publikationen

1. S. Geyer, O. Meusel, O. Kester, "A transverse Electron Target for Heavy Ion Storage Rings", AIP conference proceedings 1640, 94 (2015)
2. C. Xiao, O.K. Kester and L. Groening, Nucl. Instrum. And Meth. A738 (2014) 167
3. L. Groening, X. Chen, M. Maier, O. K. Kester, „Emittance Transfer in LINACs, Proc. of the HB2014, Monterey, East-Lansing, MI, USA, WEO3LR04
4. L. Groening, M. Maier, C. Xiao, L. Dahl, P. Gerhard, O. K. Kester, S. Mickat, H. Vormann, M. Vossberg, M. Chung, Phys. Rev. Letters 113 (2014) 264802
5. A. Langbein, D. Ries, S. Geyer and O. Kester, Phys. Scr. T156 (2013) 014094
6. C. Xiao, O.K. Kester, L. Groening, H. Leibrock, M. Maier, P. Rottlander, Phys. Rev. Special Topics-Accelerators and Beams 16, issue 4 (2013) 044201
7. C. Xiao, O. Kester, L. Groening, M. Maier, "Decoupling capabilities study of the transverse emittance transfer section", Proc. of the IPAC2013, Shanghai, China, TUPWO009