

 Arbeitsnotiz	Nr.: SIS19112.HF
Maschinenexperimente zur longitudinalen Emittanzentwicklung im SIS (31. Oktober/1. November 2002)	Name: H. Damerau, G. Schreiber
Verteiler: Angert, Bär, Barth, Blasche, Blell, Boine, Breitenberger, Damerau, Dolinski, Eickhoff, Emmerling, Forck, Franchetti, Franczak, Franzke, Gröning, Gutowski, Hofmann, Hülsmann, Hutter, Kaspar, Kirk, Klingbeil, König, Liu, G. Moritz, P. Moritz, Mühle, Peters, Reich, Richter, Scheeler, Schreiber, Schütt, Spiller, Steck, Steiner, Vinzenz, Walter, Wilms, Sekretariate Ditter, Pfaff	

Maschinenexperimente zur longitudinalen Emittanzentwicklung im SIS vom 31. Oktober/1. November 2002

H. Damerau, G. Schreiber

19. November 2002

1 Einleitung

Longitudinale Schottky-Messungen bieten einen ausgezeichneten Zugang zur Energieverteilung eines im Schwerionensynchrotron SIS umlaufenden Teilchenstrahls. Da sich Messungen im Frequenzraum mit extrem hoher Genauigkeit ausführen lassen, kann so die relative Energieauflösung von Schottky-Messungen abhängig von der Strahlqualität nahezu beliebig gesteigert werden. Nachdem während der vorangegangenen Strahlzeitblöcke Experimente zum longitudinalen Strahlverhalten durchgeführt worden sind [1, 6], deren Auflösung aber wesentlich durch die unzureichende Strahlqualität des Vorbeschleunigers UNILAC beschränkt gewesen sind, konnten nun während einer Maschinenschicht Meßdaten mit verbesserter Strahlqualität aufgenommen werden. Die Ergebnisse werden im Folgenden kurz dargestellt.

2 Strahlqualität und Energiestabilität des UNILAC

Wie in den vorangegangenen Experimenten stand wiederum $^{238}\text{U}^{73+}$ als Teilchensorte zur Verfügung. Damit können die neuen Experimente direkt mit den bereits gemessenen Daten verglichen werden. Die für die Messungen wichtigen Maschineneinstellungen zeigt Tab. 1.

Ionenspezies		$^{238}\text{U}^{73+}$
Ionenquelle		MEVVA
Injektionsenergie ins SIS	[MeV/u]	11.255
Injektionsart		Multiturn
Teilchenzahl im SIS		$\lesssim 1 \cdot 10^8$
Strahlstrom (bei Injektionsenergie)	[mA]	$\lesssim 0.25$
Länge des Injektionsplateau	s	> 0.5

Tab. 1: Allgemeine Maschinenparameter während der Messungen.

Die Teilchenintensität wurde durch gezieltes transversales Aufweiten des Strahls im UNILAC unter 10^8 Teilchen im Synchrotron gehalten, um das kürzlich ausgetauschte Extraktionsseptum nicht unnötig zu gefährden [2].

Als Grundvoraussetzung wurde die Energieverteilung des vom UNILAC in das SIS eingeschossenen Strahls auf Injektionsniveau untersucht. Ein typisches Schottky-Spektrum, aufgenommen auf der 96. Umlaufharmonischen, ist in Fig. 1 dargestellt. Harmonische im Bereich der 100. Umlauffrequenz haben sich als sinnvoll erwiesen, da einerseits die Auflösung der

Schottky-Signale brauchbar ist, andererseits aber auch noch genügend Spielraum für Strahlaufweitungen gegeben ist, bevor die Schottky-Bänder überlappen. Wie sich bereits aus Messun-

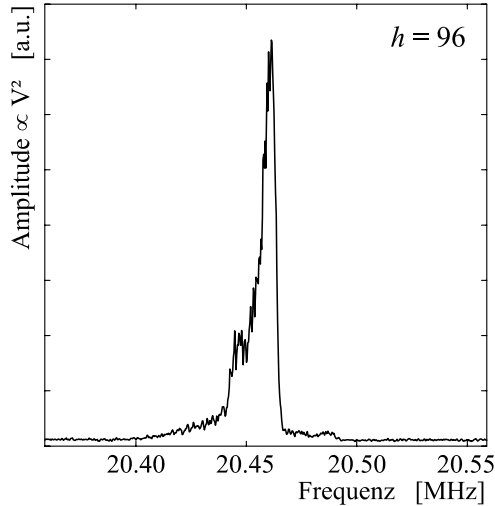


Fig. 1: Beispiel einer longitudinalen Schottky-Messung während des Injektionsplateaus. Das Spektrum wurde innerhalb eines einzelnen Maschinenzyklus aufgenommen. Es wurde aber über 250 Einzelspektren gemittelt. Das entspricht einer Meßzeit von insgesamt 100ms.

gen von S. Richter [3] zu Beginn der Strahlzeit abgezeichnet hat, sind weitaus energieschärfere Strahlen als bei vorangegangenen Messungen zu erwarten gewesen. Zusätzlich ist die Impulsbreite bei nur 10^8 Teilchen im SIS um etwa 50% geringer als bei 10^9 eingeschossenen Ionen. Aus den kurz nach dem Einschuss des Strahls aufgezeichneten Schottky-Spektren läßt sich eine FWHM-Impulsbreite des Hauptmaximums von $\Delta p/p = \pm 2.0 \dots 2.5 \cdot 10^{-4}$ bestimmen. Leider hatte der Strahl jedoch zusätzlich zum Hauptmaximum bei kleineren Energien eine störende Stufe in der Energieverteilung, so daß die gesamte Strahlbreite lediglich im Bereich von $\Delta p/p \simeq \pm 8 \cdot 10^{-4}$ gewesen ist.

Neben der Energiebreite selbst bietet ein solcher Strahl mit scharfem Maximum die Möglichkeit, vernünftige Aussagen über die relative Energiestabilität des UNILAC zu machen. Fig. 2 zeigt die Maximumfrequenz des Schottky-Spektrums aufgetragen für diverse Messungen, die bei vergleichbaren Maschineneinstellungen innerhalb von 1.5h aufgenommen worden sind. Ein Trend ist offensichtlich nicht erkennbar. Die relative Energiestabilität des UNILAC ist also auf dieser Zeitskala besser als $\Delta p/p \lesssim 5 \cdot 10^{-5}$. Damit konnte die Auflösung der Aussage bezüglich der Energiestabilität gegenüber den alten Messungen um etwa Faktor Sechs verbessert werden. Noch präzisere Messungen wären aber mit diesem Meßverfahren bei energieschärferen Strahlen durchaus möglich. Weiterhin scheinen die Messungen nämlich nicht durch den wahren Energiedrift des UNILAC, sondern durch die statistische Ungenauigkeiten bei der Maximumsauswertung dominiert zu sein.

Es sollte angemerkt werden, daß dieses Ergebnis offensichtlich kompatibel zu älteren Messungen ist, die 1988 bei Inbetriebnahme des Transferkanals zwischen UNILAC und SIS durchgeführt worden sind [4].

3 Untersuchung des Hochfrequenzeinfangs bei optimierter Einstellung des UNILAC

Durch die optimierte Einstellung des UNILAC ist eine höhere Empfindlichkeit des Strahls gegenüber Fehleinstellungen der Frequenz beim HF-Einfang zu erwarten. Dies sollte durch

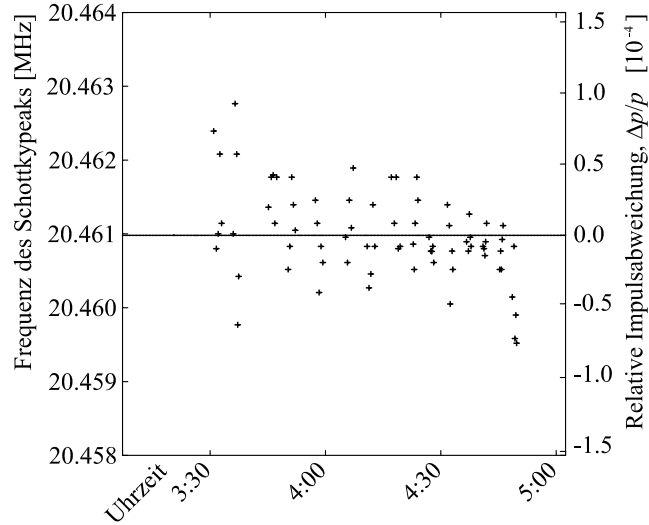


Fig. 2: Frequenz des Maximums der Schottky-Spektren in Abhängigkeit von der Uhrzeit der Datennahme. Bei der erreichbaren Auflösung der Messung ist kein systematisches Driften der UNILAC-Energie zu beobachten. Die relative Impulsstabilität ist daher im Bereich $\Delta p/p \lesssim 5 \cdot 10^{-5}$.

Variation der Einfangfrequenz gezeigt werden.

Dazu wurde nach Injektion des Strahls zunächst eine longitudinale Schottky-Messung der ungebunchten Teilchen als Referenz durchgeführt. Darauf wurde der Coasting Beam innerhalb von 40ms mit insgesamt 20kV HF-Amplitude isoadiabatisch gebuncht und in diesem Zustand 300ms lang gebuncht gehalten. Es folgt das isoadiabatische Debunchen exakt symmetrisch zum Bunchingvorgang. Bunch- und Debunchzeit wurden derart gewählt, daß der Vorgang in jedem Fall adiabatisch abläuft und Emittanzaufweitungen durch zu schnelle Spannungsrampen auszuschliessen waren. Wiederum wurde eine Schottky-Messung des Coasting Beam aufgenommen, um die Impulsverteilung nach dem Vorgang zu bestimmen. Gleichzeitig wurden die Daten des SIS-Stromtransformators ausgewertet, die Aufschlüsse über die Teilchenverluste beim Eingang geben.

Im Fig. 3 sind Einfangeffizienz (oben), Schottky-Spektrum (Mitte) und Impulsbreite (unten) nach dem Bunchen dargestellt. Es ist zu beachten, daß im Gegensatz zu früheren Messungen das Dipolfeld beim Verändern der Einfangfrequenz mitvariiert wurde. Es wurde also eine Einstellung verwendet, die auch standardmäßig bei der Optimierung des SIS benutzt wird.

Während das Maximum des Schottky-Spektrums sehr gut mit dem Emittanzminimum korrespondiert, ergibt sich bei der Einfangeffizienz ein verhältnismäßig breites Plateau. Daher ist die Einfangeffizienz als Kriterium zur Einfangoptimierung nur schlecht geeignet. Weitaus besser ist eine Einstellung der Einfangfrequenz nach einer longitudinalen Schottky-Messung. Impulsbreitenmessungen wie in Fig. 3 (unten) sind für den Normalbetrieb wenig praktikabel, da der Aufwand an Meß- und Auswertungszeit beträchtlich ist.

Leider konnte im Gegensatz zu Messungen mit größerer Impulsbreite vom UNILAC kein optimales Bunchen und Debunchen mehr erreicht werden. Selbst bei günstiger Einstellung der Einfangfrequenz ist immer noch eine Aufweitung auf etwa die doppelte Anfangsemittanz zu beobachten. Dies könnte aber auf die stark asymmetrische Energieverteilung der Teilchen vom UNILAC zurückzuführen sein.

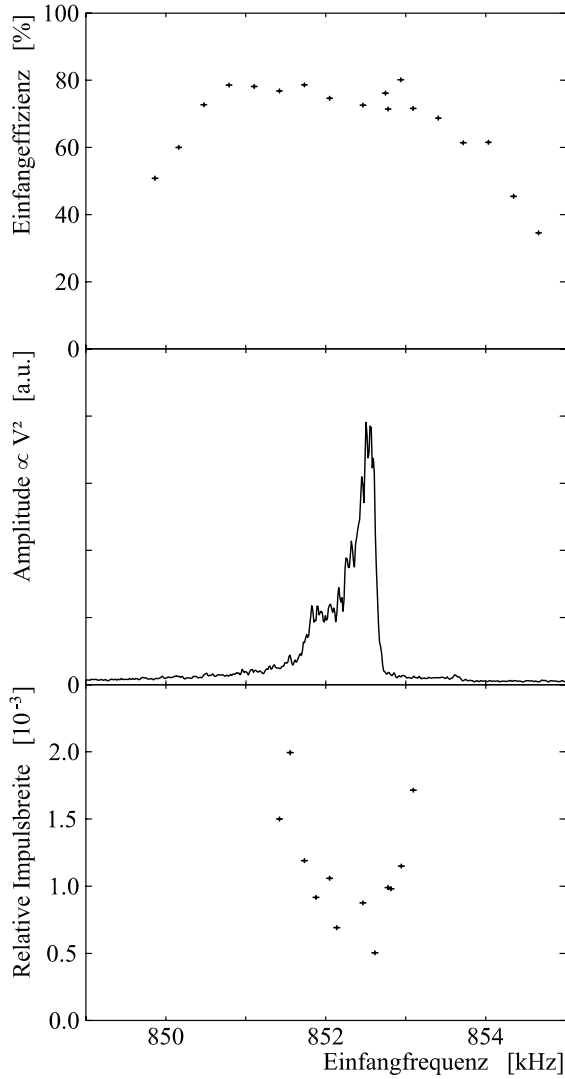


Fig. 3: Einfangeffizienz, Schottky-Spektrum und Impulsbreite (von oben nach unten) des $^{238}\text{U}^{73+}$ -Strahls jeweils aufgetragen gegen die Frequenz der HF-Anlagen. Die Schottky-Messung wurde auf der 96. Umlaufharmonischen gemessen und entsprechend auf die 4. Harmonische umskaliert.

4 Longitudinale Emittanzaufweitung in Abhängigkeit von der Endenergie

Ein weiteres Problem ist die longitudinale Aufweitung des Strahls während der Beschleunigung [5]. Dazu wird die Aufheizung über komplette Beschleunigungszyklen untersucht, indem man die Endenergie der Beschleunigungsrampe variiert. Die Impulsbreite wird jeweils zum einen auf dem Injektionsplateau gemessen und zum anderen auf Extraktionsniveau. Bei idealem Rampendurchlauf sollten die auf die Energie normierten Impulsbreiten $\beta\gamma \Delta p/p$ erhalten bleiben. Wie jedoch bereits im vorhergegangenen Abschnitt erwähnt, ist dies bei der hohen Strahlqualität selbst für den Einfang alleine nicht der Fall. Insgesamt wurden von Injektions- zu Extraktionsmessung teilweise Aufweitungen von etwa einer Größenordnung gemessen.

Trotzdem lassen sich die Ergebnisse der Messungen auf Extraktionsenergie relativ zueinander vergleichen, da auch hier immer die gleiche normierte Strahlbreite zu erwarten ist. Dadurch werden weitere, energieunabhängige Beiträge zunächst nicht berücksichtigt. Fig. 4 zeigt die normierte relative Impulsbreite des Coasting Beam nach der Beschleunigung bei ver-

schiedenen Endenergien von 250MeV/u bis 1GeV/u. Um eine bessere Statistik zu erhalten,

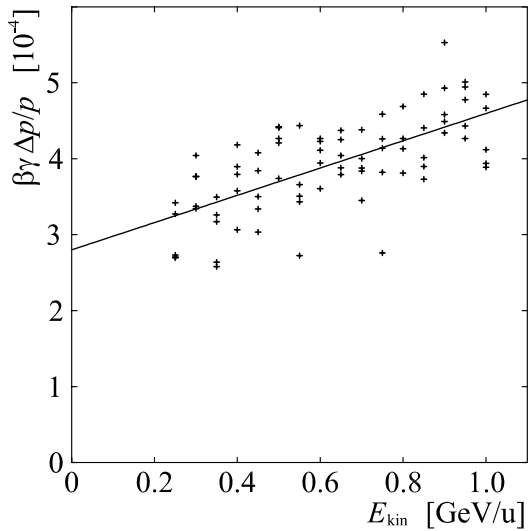


Fig. 4: Dargestellt ist die normierte longitudinale Impulsbreite (FWHM) $\beta\gamma \Delta p/p$ eines $^{238}\text{U}^{73+}$ -Strahls auf dem Extraktionsplateau aufgetragen gegen die Extraktionsenergie des SIS. Die zusätzlich eingezeichnete Ausgleichsgerade macht deutlich, daß die Ausgangsstrahlbreite mit steigender Teilchenenergie leicht anwächst. Die auf eine Anfangsimpulsbreite von Eins normierte Steigung der Ausgleichsgeraden gibt die Emittanzaufweitung bezogen auf die Endenergie an. Sie beträgt $6.4 \pm 0.8 \cdot 10^{-4} \text{MeV/u}^{-1}$.

wurden pro Endenergie fünf Schottky-Spektren bei Injektions- und Extraktionsniveau aufgenommen. Die Messungen von niedrigen zu hohen Energien wurden nicht in zeitlicher Abfolge durchgeführt, sondern zuerst in groben Schritten bis zu 1GeV/u Endenergie und darauf die Zwischenschritte von hohen zu niedrigen Extraktionsenergien. Trotzdem wird ersichtlich, daß die normierte Strahlbreite in etwa proportional zur Endenergie des Beschleunigers anwächst, wie bereits bei vorläufigen Messungen mit nur drei Extraktionsenergien vermutet wurde [6].

Für die beobachtete Abhängigkeit gibt es zwei verschiedene Erklärungsmöglichkeiten. Entweder es handelt sich um Aufweitungen, die wirklich während der Beschleunigung selbst stattfinden, oder der Debunching-Prozeß am Ende der Rampe funktioniert mit steigender Endenergie im schlechter. Die erste Option könnte ihre Ursache im weiten Abstand der Rampenstützpunkte und darauf zurückzuführende Steuerungsungenauigkeiten oder auch im Rauschen der Hochfrequenzanlagen haben.

Es sollte daher versucht werden, zunächst zu klären, wann die Aufheizung des Strahls genau zustande kommt, um dann mit weiteren Messungen die Ursachen zu beleuchten. Daher wird im folgenden Absatz eine mögliche Meßprozedur vorgeschlagen, um die Rampe auf longitudinale Emittanzaufweitungen hin zu überprüfen.

5 Vorschlag eines Experimentes zur Verifikation des Emittanzwachstums während der Beschleunigung

Aus den bisherigen Messungen zum Emittanzwachstum in Abhängigkeit von der Extraktionsenergie des SIS wird nicht klar, ob die Emittanzaufweitung während der Beschleunigung selbst oder erst beim Debunchen des Strahls auf der Endenergie stattfindet. Das sollte sich aber mit folgendem Maschinenexperiment überprüfen lassen, dessen prinzipielles Verfahren bereits in [7] beschrieben ist, so daß hier lediglich auf die technische Umsetzung eingegangen werden wird.

Wird die Hochfrequenzamplitude während der Beschleunigung kontinuierlich herabgeregelt bis der gesamte Strahl verloren gegangen ist, sollte aus den Stromprofilen gemeinsam mit dem Amplitudenrampen auf die Emittanz des gebunchten Strahls zurückgerechnet werden

können. Damit der Strahl aber gezielt abgestreift werden kann, sind zeitliche Funktionen der HF-Amplitude notwendig, die derzeit nicht vom Kontrollsystem generiert werden können. Da aber die genau HF-Spannung während der Beschleunigung selbst unerheblich ist, solange ausreichend davon zur Verfügung steht, könnte der Beschleuniger während der Messungen komplett mit einer HF-Amplitudenrampe aus einem flexiblen Funktionsgenerator betrieben werden.

Um zeitliche Synchronisationsprobleme zu vermeiden wird der Strahl nach einer Schottky-Messung als Coasting Beam schon auf dem Injektionsplateau isoadiabatisch gebuncht; also zeitlich vor dem eigentlich vom Kontrollsystem vorgesehen Bunching-Vorgang. Die HF-Amplitude wird nun bis zur Beschleunigung auf Maximalwert gehalten. Bei der für die Emittanzmessung gewünschten Energie beginnt man dann das Zurückregeln der Hochfrequenzanlagen mit einer quadratischen Funktion bis alle Teilchen an der inneren Kammerwand abgestreift worden sind. Gleichzeitig wird während des Herunterfahrens der mittlere Strom im Synchrotron aufgezeichnet. Eine typische Amplitudenfunktion und der Ablauf der Messung sind in Fig. 5 dargestellt. Außer der speziell erzeugten Amplitude für die HF-Anlagen werden alle übrigen Geräte des Beschleunigers mit standardmäßigen Rampen des Kontrollsystems betrieben.

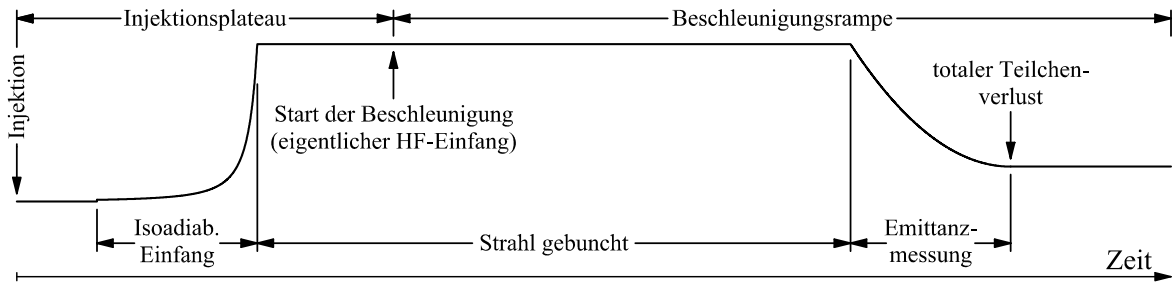


Fig. 5: Zeitlicher Verlauf der Amplitudenrampe. Um Synchronisationsprobleme zu vermeiden soll der Strahl bereits während des Injektionsplateaus gebuncht werden. Abhängig von der gewünschten Energie kann die Emittanzmessung zu verschiedenen Zeiten auf der Rampe gestartet werden.

6 Zusammenfassung

Nachdem in den vorangegangenen Strahlzeitblöcken bereits Maschinenexperimente zum Hochfrequenzeinfang und zur Entwicklung der longitudinalen Emittanz im Schwerionensynchrotron SIS durchgeführt wurden, konnte die Meßauflösung nunmehr weitgehend verbessert werden.

Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, daß die Impulsbreite des UNILAC-Strahls durch Optimierung [3] und Intensitätsreduktion in den Bereich $\Delta p/p = \pm 2 \dots 2.5 \cdot 10^{-4}$ gebracht werden konnte.

Dadurch konnte die Untersuchung der Energiestabilität des UNILAC gegenüber alten Messungen um Faktor Sechs auf eine relative Impulsabweichung von $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ herabgesetzt werden. Ein systematisches Driften der Energie ist weiterhin nicht zu beobachten.

Desweiteren ist durch die Messungen von Einfangeffizienz und Impulsbreite gezeigt, daß sich die Einfangeffizienz durch Optimierung des Stromes im SIS nur schlecht als Kriterium für die Verbesserung des HF-Einfangs eignet. Sie bildet nämlich ein relativ breites Maximumplateau aus, während die longitudinale Emittanz ein scharfes Minimum an der Stelle der aus

Schottky-Messungen gemessenen Umlauffrequenz des injizierten Strahls hat. Daher sind longitudinale Schottky-Messungen bestens geeignet, um die Einfangfrequenz im SIS einzustellen.

Die Messungen des Emittanzwachstums über ganze Rampen lassen ein systematisches Ansteigen der normierten Impulsbreite zu höheren Energien hin erkennen. Diese Tendenz konnte bei vorherigen Messungen nur vermutet werden. Der relative Emittanzanstieg bezogen auf eine Anfangsemittanz von Eins beträgt $6.4 \pm 0.8 \cdot 10^{-4} \text{MeV/u}^{-1}$. Leider zeigen alle Messungen eine große Emittanzaufweitung zwischen Injektions- und Extraktionsniveau. Dies ist wahrscheinlich auf die extrem empfindlichen Einstellungen bei guter longitudinaler Strahlqualität zurückzuführen. Da unklar ist, ob der energieabhängige Anteil des Emittanzwachstums während der Beschleunigung auftritt, wird ein weitergehendes Maschinenexperiment vorgeschlagen, das diesen Sachverhalt erklären wird.

Wir danken Herrn Dr. W. Barth, Dr. L. Gröning und Herrn D. Wilms für die freundliche Unterstützung der Experimente von Seiten des UNILAC.

Literatur

- [1] H. Damerau, M. Kirk, Y. Liu, *Maschinenexperimente zum longitudinalen Strahlverhalten während des Hochfrequenzeinfangs*. GSI Arbeitsnotiz SIS28062.HF, 2002
- [2] U. Blell, *Schaden am Elektrostatischen Extraktionsseptum - Planung der Reparatur*. GSI Interne Notiz, September 2002
- [3] S. Richter, *Einstellung des Uran-Strahls Anfang 4. Block*. GSI Arbeitsnotiz, Oktober 2002
- [4] D. Böhne, *SIS/ESR Statusreport*. GSI Nachrichten 12-88 (Accelerator Issue), 1988, p. 3
- [5] Y. Liu et al., *A Measurement of Momentum Spread Variation in SIS Capture-Acceleration-Debunching Process*. GSI internal report, 2000
- [6] H. Damerau, M. Kirk, Y. Liu, G. Schreiber, *Maschinenexperimente zum Hochfrequenzeinfang im SIS vom 13.-15. August 2002*. GSI Arbeitsnotiz SIS13092.HF, 2002
- [7] H. Damerau, M. Emmerling, *Vorschlag zur langsamen Messung von longitudinaler Gleichgewichtsemittanz und Bunchprofil*. GSI Arbeitsnotiz SIS22072.HF, 2002