

 Arbeitsnotiz	Nr.: SIS13092.HF
Maschinenexperimente zum Hochfrequenz- einfang im SIS vom 13.-15. August 2002	Name: H. Damerau, M. Kirk, Y. Liu G. Schreiber
Verteiler: Angert, Bär, Barth, Blasche, Blell, Boine, Breitenberger, Damerau, Dolinski, Eickhoff, Emmerling, Forck, Franchetti, Franczak, Franzke, 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 zum Hochfrequenzeinfang im SIS vom 13.-15. August 2002

H. Damerau, M. Kirk, Y. Liu, G. Schreiber

13. September 2002

1 Einleitung

Nachdem bereits während des letzten Strahlzeitblocks (Juni 2002) Daten zum longitudinalen Hochfrequenzeinfang im Schwerionen-Synchrotron SIS genommen wurden [1], konnten diese Messungen in zwei Nachtschichten vom 13. bis 15. August vervollständigt und erweitert werden. Die Ergebnisse dieser Messungen werden im Folgenden kurz zusammengefaßt.

Bis auf die Messung der Emittanzaufweitung über gesamte SIS-Rampen wurde sämtliche Messungen unter Umgehung des Kontrollsystems auf einem langen Injektionsplateau durchgeführt. Zur zeitlichen Anbindung der Messgeräte und Hochfrequenz-Amplitudensteuerung wurde der Injektionsevent der Pulszentrale verwendet. Für die Schottky-Messungen wurde, im Gegensatz zur gewöhnlichen Vorgehensweise, weder über mehrere Maschinenzyklen gemittelt, noch wurden paarweise durchgeführte Messungen an unterschiedlichen Maschinenzyklen aufgezeichnet. Für die Hochfrequenzanlagen wurde eine Spezielschaltung eingerichtet, die es erlaubt hat, beliebige Spannungsformen zu der vom Kontrollsystem gegebenen Rampe zu addieren. Während der ersten Nacht wirkte diese Schaltung nur auf eine der beiden verfügbaren Hochfrequenzkavitäten, so daß die Amplitude auf etwa 10kV beschränkt war. In der zweiten Nacht vom 14. auf den 15. August konnte zusätzlich die zweite Hochfrequenzanlage phasenrichtig zugeschaltet werden, so daß für die Experimente ungefähr 20kV zur Verfügung gestanden haben. Die Meßprozedur war im wesentlichen ähnlichen zu vorhergegangenen Versuchen: Injektion des Strahls und erste longitudinale Schottkymessung zur Bestimmung von mittlerer Umlauffrequenz und Impulsbreite des UNILAC-Strahls. Isoadiabatisches Bunchen mit verschiedenen Adiabaticitätskonstanten, Halten des Strahls über mehrere hundert Millisekunden und anschließendes Debunchen symmetrisch zum Bunchvorgang. Zweite longitudinale Schottkymessung, um die Strahleigenschaften nach der Einfangprozedur abermals zu vermessen. Nach der zweiten Schottkymessung folgt die gewöhnliche Hochfrequenzrampe.

Auf Beschleunigung konnte also außer für die letzte Messung vollständig verzichtet werden. Wie gezeigt werden wird, ist es auf diese Weise möglich, den alleinigen Einfluß einer Fehlanpassung zwischen der Umlauffrequenz des Strahls und Einfangfrequenz systematisch zu bestimmen.

2 Randbedingungen und longitudinale Strahlqualität

Die Randbedingungen der Messungen waren denjenigen während des vorangegangenen Strahlzeitblocks äußerst ähnlich. Hauptunterschied war die um etwa zwei Größenordnungen gesteigerte Strahlintensität, da der $^{238}\text{U}^{73+}$ -Strahl in diesem Fall von der MEVVA-Quelle geliefert

wurde. Dies hat jedoch auch zur Folge, daß die Strahlintensität von Zyklus zu Zyklus sehr stark schwanken kann. Tabelle 1 faßt die für die Messungen relevanten Randbedingungen

Ionenspezies		$^{238}\text{U}^{73+}$
Ionenquelle		MEVVA
Injektionsenergie ins SIS	[MeV/u]	11.2
Injektionsart		Multiturn
Teilchenzahl im SIS		$\simeq 1 \cdot 10^9$
Strahlstrom	[mA]	$\simeq 2.5$
Länge des Injektionsplateau	s	> 0.5

Tab. 1: Maschinenkonfiguration während der Messungen.

zusammen.

Vor Beginn der eigentlichen Messungen zur Emittanzaufweitung wurde die relative Impulsbreite des vom UNILAC injizierten Strahls bestimmt. Die FWHM-Breite des Strahls beträgt $\Delta p/p \simeq \pm 1.4 \cdot 10^{-3}$, was einer vollen Impulsbreite von ungefähr $\pm 3 \cdot 10^{-3}$ entspricht. Damit sind die Meßbedingungen mit denen bei vorangegangenen Messungen gut vergleichbar.

Um die Energiestabilität des UNILAC im Verlauf der Messungen zu kontrollieren, betrachtet man die Abhängigkeit der Frequenz des Schottkypeaks vom Zeitpunkt der Messung. Ein solche Reihe von Messungen zeigt Fig. 1. Da keine Tendenz der Verteilung erkennbar

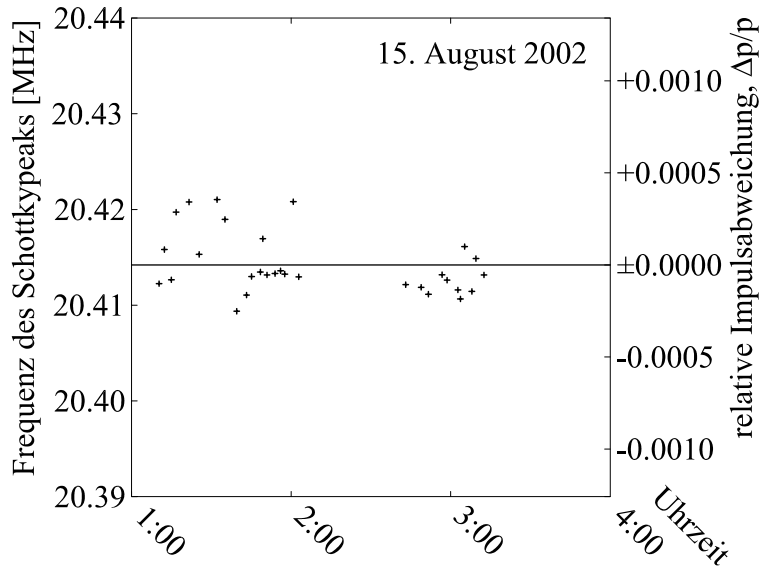


Fig. 1: Dargestellt ist die zeitliche Abhängigkeit des Schottkypeaks für eine Meßreihe, die am 15. August 2002 aufgenommen wurde. Die rechte Skala zeigt die Abweichungen in relativen Impulseinheiten.

ist, kann man davon ausgehen, daß die Ausgangsenergie des UNILAC in einem Bereich unter $\pm 3 \cdot 10^{-4}$ konstant geblieben ist. Die statistische Verteilung der Datenpunkte ist lediglich auf Ungenauigkeiten bei der Maximumbestimmung an den verrauschten Schottky-Spektren zurückzuführen.

Es sollte angemerkt werden, daß die Genauigkeit dieser relativen Energiemessung nur durch die vom Impulsbreite des injizierten Strahls, nicht aber durch das Meßverfahren selbst

eingeschränkt wird. Es ist daher zu erwarten, daß bei verbesserter Strahlqualität des UNILAC eine höhere relative Energieauflösung erreicht werden kann.

3 Direkte Messung der Emittanzaufweitung durch Abweichungen der Einfangfrequenz

Während bei den Messungen am Ende des ersten Strahlzeitblocks aufgrund eines Meßgerätefehlers keine systematischen Emittanzdaten aufgenommen werden konnten, wurden die Emittanzmessungen in Abhängigkeit von der Einfangfrequenz nun nach einer verbesserten Meßmethode erneut bestimmt. Nachdem sich gezeigt hat, daß sauberes Bunchen und Debunchen des Strahls möglich ist, solange nur die Einfangfrequenz angepaßt ist, wurde der Strahl mit variabler Einfangfrequenz gebuncht und wieder debuncht. Man erhält dabei jeweils zwei Schottkymessungen des gleichen Strahls (Fig. 2) aus denen Mittenfrequenz und Impulsbreite direkt bestimmt werden können.

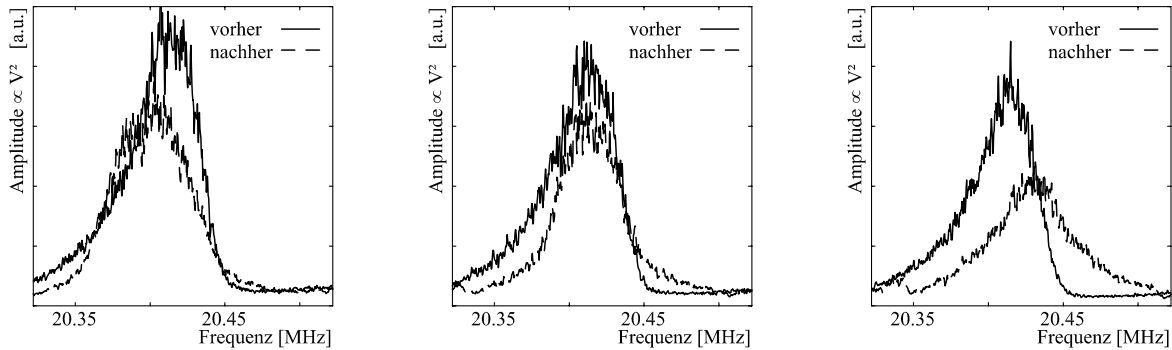


Fig. 2: Typische Schottkymessungen vor und nach einer Bunch-Debunch-Prozedur. Im linken Bild ist die Einfangfrequenz einige hundert Hertz zu niedrig gewählt. Man erkennt deutlich die Verschiebung der Verteilung nach links. Die mittige Darstellung zeigt einen Einfang mit gut angepaßter Einfangfrequenz, während diese rechts um einige hundert Hertz zu hoch gewesen ist. Aufgrund von Teilchenverlusten beim Einfang sind die Schottky-Signale der zweiten Messung etwas schwächer. Messung bei $h = 96$.

Ein Vergleich der Impulsbreitenmessung vor und nach dieser Prozedur erlaubt so Rückschlüsse auf die Emittanzaufweitung. Zusätzlich hat dieses Verfahren den Vorteil, daß keine weiteren Emittanzaufweitungen durch den Start der Frequenzrampe oder sonstige Effekte hinzukommen können, da keine Beschleunigung stattfindet. Diese Emittanzuntersuchungen wurden in am 13./14. August mit 10kV Hochfrequenzamplitude durchgeführt und am 14./15. August mit zwei Kavitäten, die zusammen 20kV liefern konnten, wiederholt. Die gemessenen Impulsbreiten bezogen auf die halbe FWHM-Breite sind in Fig. 3 und Fig. 4 dargestellt. Da keine Beschleunigung zwischen den Messungen vor und nach dem Bunchen stattgefunden hat, ist die Impulsbreite direkt proportional zur longitudinalen Emittanz des Teilchenstrahls. Wie aus den Messungen ersichtlich wird, ist die Aufweitung der Impulsbreite erwartungsgemäß nahezu unabhängig von der Hochfrequenzamplitude mit der gebuncht wird. Lediglich bei den Messungen mit großer Frequenzablage zeigt sich, daß Buckets mit größer Energieakzeptanz mehr Strahl einfangen können.

Die Messungen ergeben ein klares Minimum bei optimal angepaßter Frequenzeinstellung. Ein Vergleich mit den im vorangegangenen Strahlzeitblock gewonnenen Daten zur Einfangeffizi-

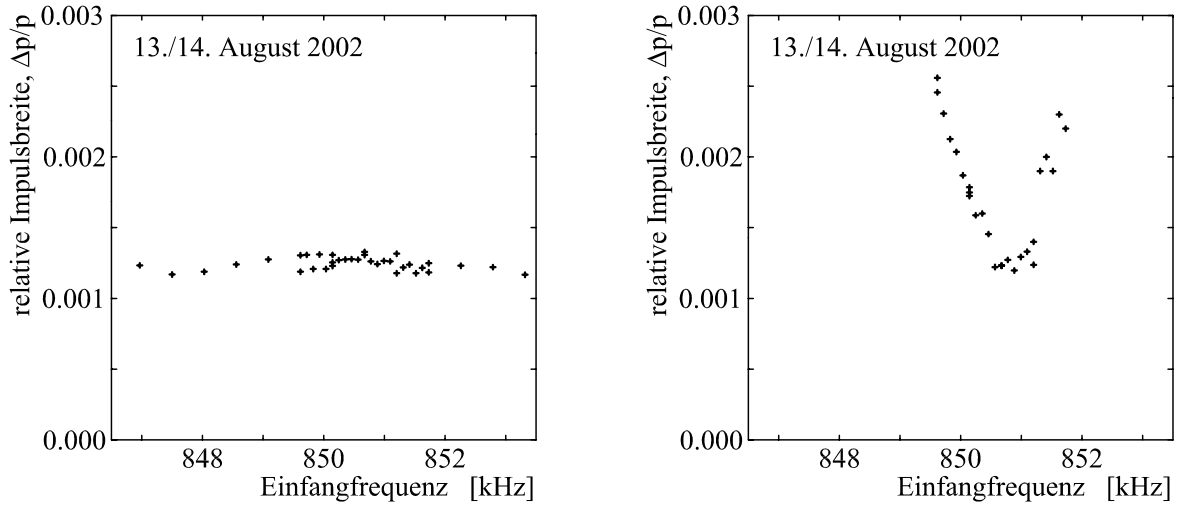


Fig. 3: FWHM-Impulsbreiten eines $^{238}\text{U}^{73+}$ -Strahls vor (links) und nach (rechts) Bunch-Debunch-Prozedur sowie variierender Einfangfrequenz. Das Bunchen und Debunchen erfolgte jeweils mit einer 40ms langen iso-adiabatischen Rampe. Dazwischen wurde der Strahl etwa 300ms mit 10kV Hochfrequenzamplitude gebuncht gehalten. Aufweitungen aufgrund zu schnellen Bunchens oder Debunchens können also ausgeschlossen werden.

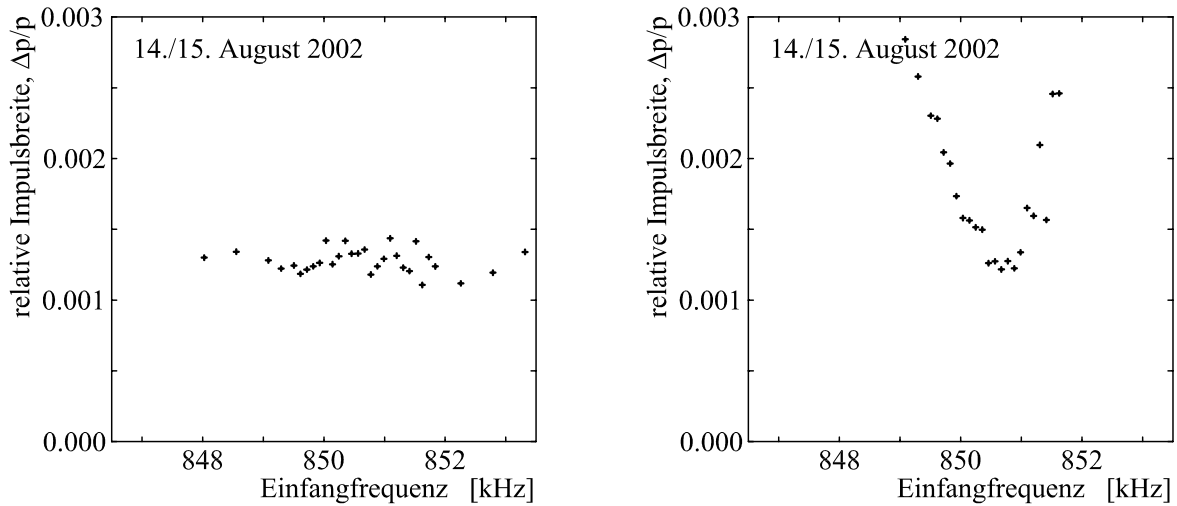


Fig. 4: Impulsbreitenmessungen unter den gleichen Randbedingungen, wie die in Fig. 3 gezeigten Ergebnisse. Nun wurde der Strahl jedoch mit 20kV gebuncht. Da zwischen den beiden Messungen beim Bunchen ein Teil des Strahls verloren gegangen ist, kann die Impulsbreite bei optimaler Einstellung nach dem Bunchen teilweise kleiner sein als davor. Dies ändert aber nichts an den Frequenzabhängigkeiten.

enz zeigt, daß das Maximum der Injektionseffizienz nur geringfügig breiter als das Minimum der hier dargestellten Impulsbreitenmessungen ist. Dies gilt allerdings nur, solange man einen stark aufgeheizten UNILAC Strahl mit relativen Impulsbreiten im Bereich von $\pm 2 \cdot 10^{-3}$ betrachtet. Nimmt man nämlich einen Teilchenstrahl mit nominaler Impulsbreite von unter $\Delta p/p \simeq 5 \cdot 10^{-4}$ an, so ist zu erwarten, daß eine Injektionseffizienzmessung ein Maximumplateau von einigen hundert Hertz Breite ergibt. Die Messung der Impulsbreiten nach einem

Hochfrequenzeinfang sollte jedoch weiterhin ein scharfes, eindeutiges Minimum liefern. Daher ist dieses Messverfahren bei hohen Anforderungen an die Strahlqualität der reinen Optimierung nach Einfangeffizienz und Teilchenstrom vorzuziehen. Es sollte aber bei verbesserter Ausgangsimpulsbreite des UNILAC nochmals experimentell überprüft werden.

4 Minimaler Zeitbedarf für den Hochfrequenzeinfang

Der minimale Zeitbedarf für den Hochfrequenzeinfang ist im Hinblick auf den Betrieb des SIS18 als Booster-Synchrotron für die zukünftigen Synchrotrone der GSI von großem Interesse, da dann jeder Rampzyklus nicht mehr als rund 250ms dauern sollte. Weil bei den bisherigen Experimenten mit unterschiedlichen Formen und Adiabatizitätskonstanten der Amplitudenrampe keine signifikante Aufweitung der Impulsbreite des Strahls zu beobachten war, wurden die Experimente nunmehr zu sehr kurzen Bunch- und Debunchzeiten erweitert.

Die Impulsbreiten des Strahls vor und nach der Bunch- und Debunchprozedur sind in Fig. 5 gezeigt. Zur Kontrolle wurden auch Messungen bis zu einer Rampenlänge von 100ms

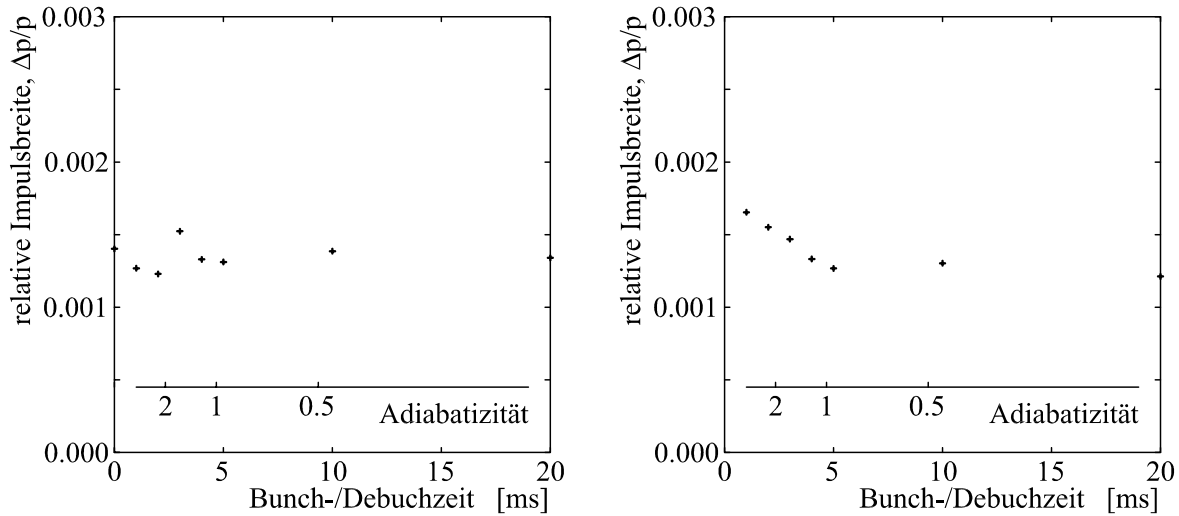


Fig. 5: Impulsbreite eines $^{238}\text{U}^{28+}$ -Strahls vor und nach einem isoadiabatischen Bunchen und Debunchen mit der angegebenen Bunch-/Debunchzeit. Dazwischen wurde die Teilchen etwa 100ms mit einer Hochfrequenzamplitude von 20kV gebuncht gehalten. Die Messungen wurden paarweise während eines Maschinenzyklus aufgenommen und brauchten somit nicht über mehrere Durchläufe gemittelt werden.

durchgeführt. Es sind aber keine signifikanten Unterschiede zu den kürzeren Bunchzeiten zu beobachten. Während die Impulsbreiten vor dem Hochfrequenzeinfang nur durch den Meßfehler bedingt statistisch verteilt sind (Fig. 5), ist nach dem Bunchen und Debunchen bei Amplitudenrampen unter 5ms ein Anwachsen der Impulsbreite zu beobachten. Der adiabatische Einfang nähert sich erwartungsgemäß für Adiabatizitäten $\alpha > 1$ immer mehr einer schnellen Bunchrotation an und verursacht dadurch die beobachtete Aufweitung der longitudinalen Emittanz.

Trotzdem ist es offensichtlich möglich, einen Teilchenstrahl mit einer FWHM-Impulsbreite von $\Delta p/p \simeq \pm 1.3 \cdot 10^{-3}$ innerhalb von 5ms zu bunchen, ohne daß es dabei zu einer signifikanten Aufweitung der longitudinalen Emittanz kommt.

5 Erste Messungen zur longitudinalen Emittanzaufweitung in Abhängigkeit von der Endenergie

Da sich bei vorangegangenen Messungen gezeigt hat, daß sauberer Hochfrequenzeinfang im SIS bei angepaßter Einfangfrequenz ohne Schwierigkeiten möglich ist, sollte nun nochmals die von Liu et al. [2] erstmals gemessene Aufweitung während ganzer Maschinentzyklen beobachtet werden. Blicke die longitudinale Emittanz eines Strahls vollständig erhalten, so würde die Impulsbreite mit $1/\beta\gamma$ ($\gamma = E/m_0c^2$, $\beta = \sqrt{1 - 1/\gamma^2}$) skalieren.

Im Gegensatz zu den ersten Messungen, die mit einem gewöhnlichen Spektrumanalyzer aufgenommen worden waren, konnte nun der Tektronix FFT-Analyzer verwendet werden. Dadurch ist eine Mittelung über viele Maschinentzyklen nicht mehr notwendig, um ein ausreichendes Signal-Rausch-Verhältnis zu erhalten, da der FFT-Analyzer während ungefähr 200ms auf Injektions- und Extraktionsniveau genügend Daten für ein sauberes Schottkyspektrum sammeln kann. Zusätzlich kann durch automatisches Umprogrammieren des FFT-Analyzers während eines einzelnen Maschinentdurchlaufs eine Messung auf Injektionsniveau und eine zweite Messung mit den gleichen Teilchen auf dem Extraktionsplateau erfolgen. Beeinflussungen durch unterschiedliche Teilchenintensitäten bei den Messungen können also ausgeschlossen werden. Dies ist insofern interessant, da die Teilchenintensität der MEVVA-Quelle wie bereits erwähnt von Puls zu Puls sehr stark variieren kann.

Die folgenden Messungen sind nur als erster Test für die Funktionstüchtigkeit des Meßverfahrens und insbesondere der automatischen Programmierung des FFT-Analyzers anzusehen. Weitere, vollständigere Messungen sollten für eine der kommenden Maschinenexperiment-Blöcke eingeplant werden.

Bei einer standardmäßig durchlaufenden Uranmaschine mit gut angepaßter Einfangfrequenz wurde jeweils eine Schottkymessung des Coasting Beam vor der Beschleunigung und eine weitere Messung auf dem Extraktionsplateau aufgenommen. Zusätzlich wurde die Endenergie der Maschine auf 300, 600 und 900MeV/u eingestellt und die Messung einige Male wiederholt.

Fig. 6 zeigt die relative Emittanzaufweitung während des gesamten Maschinentzyklus für die drei verschiedenen Endenergien. Zwischen den zwei Endenergien 300 und 600MeV/u

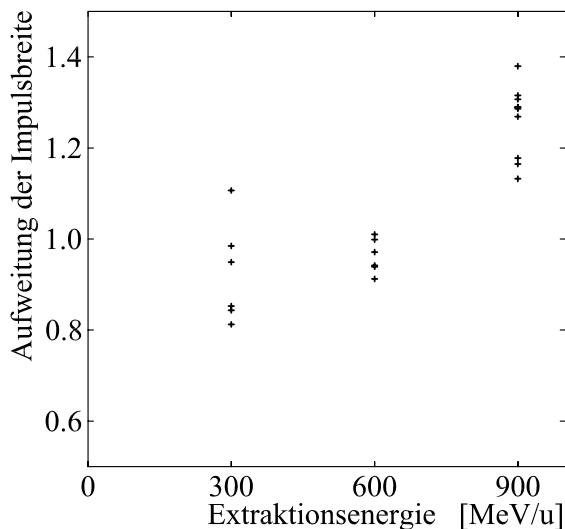


Fig. 6: Relative Emittanzaufweitung während kompletter Beschleunigungszyklen von 11.2 auf 300, 600 und 900MeV/u. Es ist zu beachten, das beim Einfang und Start der Beschleunigung etwa 50% der Teilchen verloren gegangen sind, was die geringe Aufweitung erklären dürfte.

ist keine Tendenz in Bezug auf die longitudinale Emittanzaufweitung zu erkennen. Die Messungen für eine Rampe von 11.2 auf 900MeV/u zeigen jedoch eine im Mittel um etwa 20% größere Aufweitung. Daraus kann gefolgert werden, daß es offensichtlich auch während der Beschleunigung selbst zu Verwirbelungen im longitudinalen Phasenraum kommen kann.

Trotzdem sind die Messungen noch als vorläufig anzusehen, da insbesondere im Steuerungsprogramm für den FFT-Analyser noch Änderungen zu implementieren sind. Damit sollte dann eine weitreichendere Analyse mit einer großen Zahl von Endenergien innerhalb vertretbarer Meßzeit möglich sein.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Maschinenschichten am Ende des letzten Strahlzeitsblocks konnten wiederum zur Aufnahme vieler Meßdaten für ein besseres Verständnis der longitudinalen Emittanzentwicklung im SIS genutzt werden. Trotzdem erreicht der vom UNILAC injizierte Strahl noch nicht den in Bezug auf Impulsbreite für den Betrieb des SIS als schnellem Booster im Rahmen des Zukunftsprojekts angesetzten Nominalwert von etwa $\Delta p/p = \pm 5 \cdot 10^{-4}$ (volle Strahlbreite).

Die bereits während der vorangegangenen Strahlexperimente getesteten Spezialschaltungen zur Umgehung des Kontrollsystems haben sich wiederum als äußerst nützlich erwiesen. Neben der genauen Untersuchung der Auswirkung einer Fehlanpassung der Einfangfrequenz auf die Impulsbreite konnten zusätzlich erste Experimente zur Emittanzaufweitung während gesamter Rampzyklen durchgeführt werden. Dabei kann die Messung soweit automatisiert werden, daß systematische Untersuchungen der longitudinalen Emittanzentwicklung gegen die Endenergie des Synchrotrons in vertretbarer Meßzeit ermöglicht werden sollten. Weitere Experimente unter Hochstrombedingungen mußten aufgrund der begrenzten Meßzeit zunächst zurückgestellt werden.

Die Untersuchung des Einfangverhaltens im Bezug auf die longitudinale Emittanz hat gezeigt, daß Fehlanpassungen der Einfangfrequenz an das ganzzahlige Vielfache der Umlauffrequenz erwartungsgemäß zur Aufheizung des Strahls führen. Bei der während der Messungen verfügbaren Strahlqualität liefert die Emittanzauswertung ein Minimum, dessen Breite derjenigen des Maximums der Injektionseffizienz vergleichbar ist. Es wird jedoch erwartet, daß bei besserer Strahlqualität des injizierten Strahls, eine Auswertung der Emittanz klare Vorteile bieten sollte, da das Emittanzminimum weiterhin schmal bleiben sollte, während die Messung der Injektionseffizienz lediglich zu einem breiten Maximumplateau führen kann.

Die Versuche zur minimalen Einfangzeit zeigen konsistent mit theoretischen Rechnungen, daß der Einfang bis zu einer Adiabaticitätskonstante von etwa Eins ohne signifikante longitudinale Emittanzaufweitung vollzogen werden kann. Das bedeutet, daß die Hochfrequenzamplitude mit einer isoadiabatischen Spannungsrampe innerhalb von 5ms auf ihren Maximalwert gefahren werden kann. Ob das auch noch für einen Strahl mit nominaler Impulsbreite der Fall ist, sollte durch ein weiteres Maschinenexperiment geprüft werden.

Messungen zur Aufweitung der Emittanz während der Beschleunigungsrampe zeigen eine steigende Tendenz bei höheren Endenergien, was darauf hinweisen könnte, daß es auch während der Beschleunigung zu unerwünschten Aufweitungen kommt. Die Messungen sind jedoch lediglich als erster Test zu werten und sollten nochmals bei einer größeren Zahl von Endenergien wiederholt werden.

Offensichtlich ist die Strahlqualität des injizierten Uran-Strahl weiterhin ein wichtiger Punkt für den erfolgreichen Betrieb des SIS als Booster-Synchrotron, da die maximal zu

beschleunigende Phasenraumfläche durch die Hochfrequenzanlagen im Synchrotron limitiert wird. Auch die Energiestabilität des UNILAC in einem Bereich unter $\pm 3 \cdot 10^{-4}$ sollte genauer untersucht werden. Daher soll nun während des regulären Maschinenbetriebs versucht werden, schnelle Schottky-Spektren jeweils innerhalb eines Maschinenzyklus automatisch aufzunehmen und zu protokollieren. Zusätzlich dürfte die Möglichkeit einer Online-Schottky-Messung, ohne Mittelung über mehrere Rampzyklen, die Optimierung der UNILAC-Einstellungen erleichtern.

Desweiteren sollte der Wiederholung der bisher durchgeführten Experiment zum longitudinalen Phasenraum unter Hochstrombedingungen während der kommenden Maschinenexperimente mehr Strahlzeit gewidmet werden.

Literatur

- [1] H. Damerau, M. Kirk, Y. Liu, *Maschinenexperimente zum longitudinalen Strahlverhalten während des Hochfrequenzeinfangs*. GSI Arbeitsnotiz SIS28062.HF, 2002
- [2] Y. Liu et al., *A Measurement of Momentum Spread Variation in SIS Capture-Acceleration-Debunching Process*. GSI internal report, 2000