

 Arbeitsnotiz	Nr.: SIS17023.HF
Maschinenexperimente zur Hochfrequenz-Gymnastik mit zwei Harmonischen (18./19. Dezember 2002)	Name: H. Damerau, G. Schreiber, P. Spiller
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 Hochfrequenz-Gymnastik mit zwei Harmonischen (18./19. Dezember 2002)

H. Damerau, G. Schreiber, P. Spiller

17. Februar 2003

1 Einleitung

Damit das SIS18 mit optimaler Effizienz als Booster-Synchrotron für das GSI-Zukunftsprojekt betrieben werden kann, müssen auch die Hochfrequenzsysteme neue Aufgaben erfüllen. Die Hochfrequenzanlagen ermöglichen nämlich neben der Beschleunigung auch die Einstellung der longitudinalen Strahlparameter wie Bunchlänge sowie Anzahl und Profil der Bunche.

Insbesondere der Betrieb des SIS18 mit seinen zwei Hochfrequenzanlagen auf verschiedenen Umlaufharmonischen, wobei eine Kavität mit der doppelten Frequenz im Vergleich zur zweiten betrieben wird, ist für zukünftige Booster-Anwendungen interessant. Zum einen kann durch den Einsatz eines Doppelharmonischen-Systems der Peakstrom der Ionenbunche herabgesetzt und der Bunchingfaktor, das Verhältnis aus mittlerem und maximalem Teilchenstrom, erhöht werden. Dies ist insbesondere bei niedrigen Energien wichtig, da das SIS18 dann durch direkte Raumladung dominiert wird. Nach Erfahrungen an Protonensynchrotrons [1] kann damit die Teilchenintensität um etwa 25 bis 40% gesteigert werden. Zum anderen ermöglicht der gleichzeitige Betrieb von zwei Hochfrequenzanlagen ein nahezu emittanzerhaltendes Zusammenführen oder Aufsplitten von Ionenbunchen, so daß der aus dem SIS18 extrahierte Strahl optimal an die nachfolgenden Beschleuniger angepaßt werden kann. Natürlich kann eine bestimmte Anzahl von Bunchen im SIS auch durch De- und Rebunchen erzeugt werden. Während solche De- und Rebunchprozesse aber bei niedriger Intensität meist problemlos beherrschbar sind, können sie bei hohen Teilchenintensitäten zu schwer kontrollierbaren Problemen führen [2, 3].

Daher wurde während der Maschinenexperimente im Dezember 2002 eine Maschinenschicht mit Versuchen zum gleichzeitigen Betrieb des SIS mit einer Hochfrequenzanlage auf der 4. Umlaufharmonischen und einer weiteren auf der 8. Harmonischen durchgeführt. Da es sich um erste Experimente mit verhältnismäßig aufwendiger Zusatzhardware handelt, sollte zunächst geprüft werden, inwiefern die einzelnen Komponenten zusammenarbeiten und ob Bunchmerging sowie Bunchsplitting ohne größere Strahlverluste möglich sind. In einem weiteren Experiment sollte die Absenkung des Peakstromes der Ionenbunche und die Veränderung der Bunchform zu längeren Bunchen hin systematisch untersucht werden.

Während der einfachere Prozeß, das Zusammenführen beider Bunche leicht zu beobachten ist, erfordert das Aufteilen eines Bunches in zwei symmetrische Hälften eine präzise Einstellung des Phasenkomparators zwischen beiden Hochfrequenzkavitäten. Aufgrund eines vorher unerkannten Problems mit der Phasenregelschleife, sind bei beiden Prozessen starke kohärente Bunchschwingungen zu beobachten. Sobald aber der Strahl nur gebuncht mit zwei

Harmonischen gehalten wird, funktioniert die Regelung erwartungsgemäß und es lassen sich Bunchlänge, Bunchform und Peakstrom beeinflussen. Leider war die zur Verfügung stehende Strahlzeit für eine genauere Untersuchung eines gesamten Beschleunigungsprozesses mit zwei Harmonischen nicht mehr ausreichend.

2 Randbedingungen

Aufgrund der den Maschinenexperimenten vorangegangenen Therapie-Strahlzeit war, im Gegensatz zu früheren Maschinenexperimenten mit $^{238}\text{U}^{73+}$, nur ein $^{12}\text{C}^{6+}$ -Strahl verfügbar. Bei niedrigen Strahlintensitäten ist das aber für die durchgeführten Versuche unerheblich, da lediglich entsprechende Skalierungsfaktoren für das Masse zu Ladungsverhältnis zu beachten sind, alles weitere aber unverändert bleibt. Tab. 1 gibt einen Übersicht der relevanten Strahlparameter. Da der Injektor mit Kohlenstoff-Strahlen aus der ECR-Quelle stabiler als mit Uran aus der MEVVA-Quelle arbeitet, war der Kohlenstoff-Strahl für die Experimente sogar von Vorteil.

Ionenspezies		$^{12}\text{C}^{6+}$ Kohlenstoff
Ionenquelle		ECR
Extraktionsenergie des SIS	[MeV/u]	100
Teilchenzahl im SIS		$\lesssim 5 \cdot 10^9$
Strahlstrom (bei Injektionsenergie)	[mA]	$\lesssim 1$
Länge des Extraktionsplateau	s	10

Tab. 1: Allgemeine Maschinenparameter während der Messungen.

3 $2 \rightarrow 1$ -Bunchmerging und $1 \rightarrow 2$ -Bunchsplitting

Da das $2 \rightarrow 1$ -Bunchmerging aufgrund der speziellen HF-Amplitudenrampen beider Kavitäten nicht vom Kontrollsystem durchgeführt werden konnte, wurden die gewünschten Rampen mit programmierbaren Generatoren für arbiträre Funktionen erzeugt. Da insbesondere auch das Timing dieser Zusatzschaltung für zukünftige Maschinenexperimente interessant ist, wird zunächst kurz auf den Aufbau eingegangen. Es folgen die Ergebnisse der Messungen von Merging und Splitting.

3.1 Versuchsaufbau für Bunchmerging und Bunchsplitting

Während die Phasen der HF-Kavitäten mit Hilfe einer lokalen Regelschleife gesetzt werden, müssen für jede der zwei Anlagen sowohl Frequenz- als auch Amplitudenrampen zur Verfügung gestellt werden.

Die Versorgung beider Kavitäten mit um einen Faktor Zwei unterschiedlichen Frequenzen konnte direkt durch das Kontrollsystem des SIS erfolgen, da bereits dort auf der gesamten Rampe feste Frequenzverhältnisse vorgesehen sind. Um jedoch die für die gewünschte Hochfrequenzgymnastik erforderlichen Amplitudenrampen am Kontrollsystem vorbei zu schleusen, wurde die für vorhergehende Maschinenexperimente geschaffene Möglichkeit zur additiven Einspeisung einer zweiten Amplitudenrampe genutzt.

Einen schematischen Überblick des Versuchsaufbaus für Bunchmerging und Splitting gibt Fig. 1. Während die Triggersignale für Messungen und Rampen im Hauptkontrollraum er-

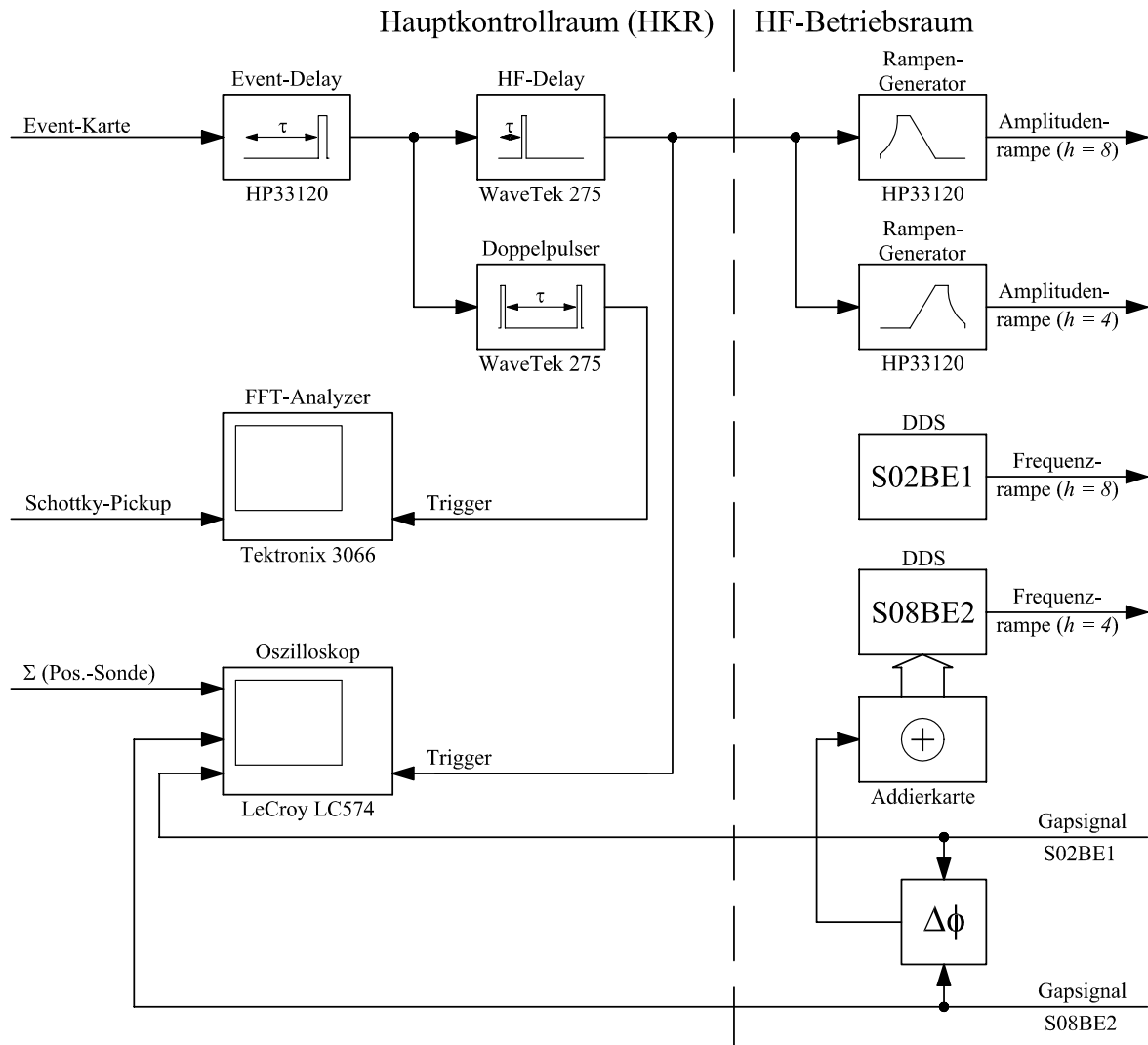


Fig. 1: Dargestellt ist der Versuchsaufbau für Bunchmerging und Bunchsplitting. Die Triggergeneratoren waren im Hauptkontrollraum untergebracht, während die Amplitudenrampen für die Kavitäten lokal mit ferngesteuerten Generatoren erzeugt wurden. Der Aufbau ist sehr flexibel und der Wechsel zwischen Merging und Splitting kann durch einfaches Austauschen der Rampen beider HP33120-Generatoren erfolgen.

zeugt wurden (linke Bildhälfte), erfolgte die Generierung der Rampen selbst lokal im Betriebsraum der SIS-Hochfrequenzanlagen (rechte Bildhälfte). Dort wurden auch die Phasen beider Kavitäten verkoppelt. Diese Verteilung der Versuchsanordnung war notwendig, da nur wenige direkte, abgeschirmte Leitungen zwischen Hauptkontrollraum und HF-Betriebsraum zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund wurden die zwei Rampengeneratoren und die Einstellung des Phasenkomparators über Ethernet ferngesteuert. Dieses hat sich als äußerst zuverlässig und komfortabel herausgestellt, da auch der Steuerungsrechner lediglich an einem beliebigen Ort mit dem Ethernet verbunden zu sein braucht.

3.2 2 → 1-Bunchmerging

Für die Tests zum Bunchmerging im SIS wurde auf einem langen Extraktionsplateau folgender Ablauf für den Versuch gewählt: Zunächst wurde der Strahl mit der gewöhnlichen HF-Amplitudenrampe mit einer Kavität auf der 4. Harmonischen beschleunigt und debuncht. Nach einigen 100ms wurde der dann als Coasting Beam umlaufende Strahl mit der zweiten Kavität auf der 8. Harmonischen isoadiabatisch gebuncht und dort für 40ms unverändert gehalten, um das Bunchmerging aus einem Gleichgewichtszustand heraus zu starten. Innerhalb weiterer 40ms erfolgte das Bunchmerging; lineares Herunterfahren der HF-Amplitude auf der 8. Harmonischen und gleichzeitiges Erhöhen der Amplitude der Kavität auf der 4. Harmonischen. Danach wurden die Bunche wiederum für 40ms gehalten, um für weitere Messungen der Impulsbreite wieder isoadiabatisch in einen Coasting Beam überführt zu werden. Den zeitlichen Ablauf der Triggersignale und Amplitudenverläufe zeigt Fig. 2.

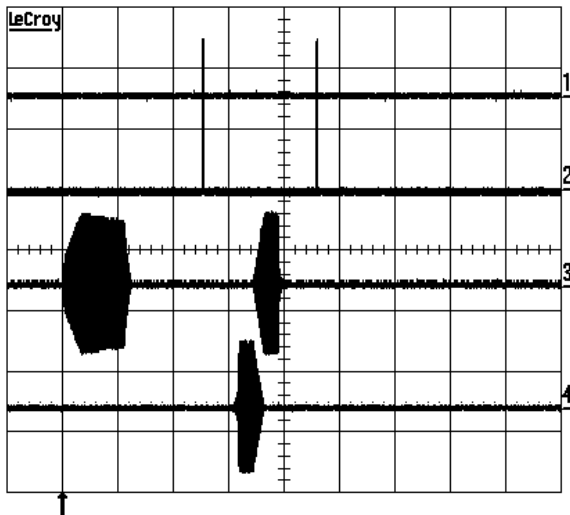


Fig. 2: Zeitstruktur der Trigger- und Rampensignale während des Bunchmergings. Die Skalierung der Zeitachse beträgt 0.2s/DIV. Dargestellt sind (von oben nach unten) das Startsignal für die Generatoren der Amplitudenrampen (das kurze Triggersignal wird durch das Raster verdeckt, vgl. Fig. 8), die Triggersignale für Schottkymessungen des ungebunchten Strahls vor und nach HF-Gymnastik und die Gapsignale der Kavitäten auch der 4. (S08BE2) und 8. Umlaufharmonischen (S02BE1).

Das dazugehörige Bunchsignal während der 40ms des Bunchmerging-Prozesses ist in Fig. 3 dargestellt. Da sich alle vier oder acht Bunche in der Maschine gleich verhalten und keine kohärenten Moden der Bunche relativ zueinander zu beobachten sind, ist es ausreichend, lediglich den halben Umfang des Beschleunigers und damit zwei der insgesamt vier Bunche zu betrachten.

Zunächst führen die Bunche starke kohärente Phasenschwingungen mit einer Modulationsfrequenz von ungefähr 300Hz aus. Diese verschwinden erst, wenn die Teilchenpakete von den HF-Buckets auf der 8. Harmonischen übernommen werden. Betrachtet man dazu die Gapspannung der Kavität auf der 4. Harmonischen (Fig. 7) wird offensichtlich, daß es sich bei den kohärenten Phasenschwingungen nicht um Strahlinstabilitäten sondern um eine Phasenschwingung des HF-Signals handelt. Da die Kavität auf der 4. Harmonischen über die Phasenregelung fest mit der HF-Anlage auf der 8. Harmonischen verkoppelt sein sollte, ist davon auszugehen, daß die Regelung bei veränderlichen Amplituden nicht korrekt gearbeitet hat. Der Strahl versucht lediglich der Phasenmodulation zu folgen. Weiterhin erkennt man, daß die HF-Frequenz nach dem Splitting-Prozeß um etwa 430Hz unterhalb des eigentlichen Sollwertes liegt. Da der Phasenregelung nach dem Mergen kein Signal mehr auf der 8. Harmonischen zur Verfügung steht, regelt diese die Frequenz an die untere Frequenzgrenze der Regelung. Dadurch ergibt sich eine geringfügige transversale Ablage des Strahls, die aber nicht zu massiven Strahlverlusten geführt hat (vgl. Absch. 3.3).

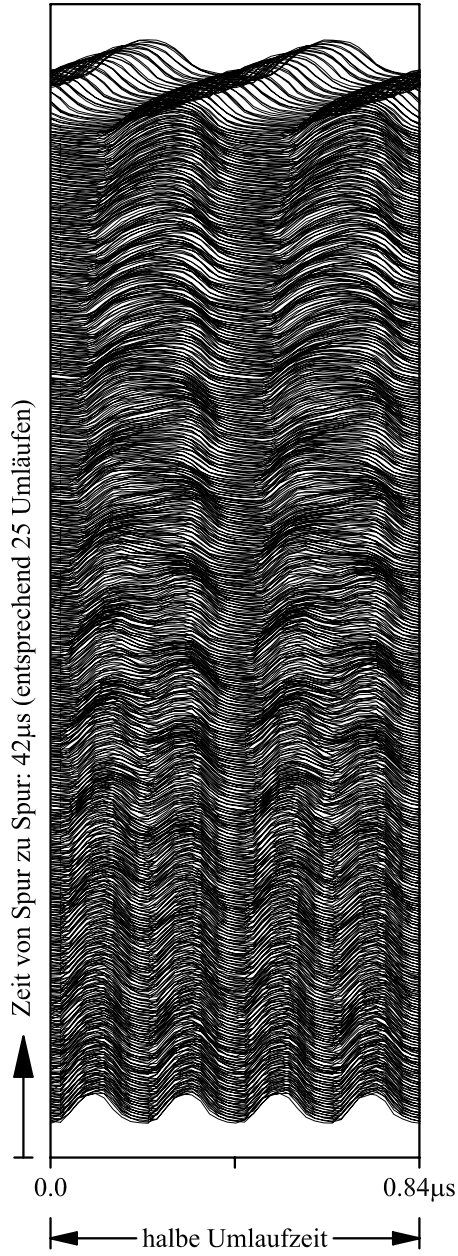


Fig. 3: Bunchsignal während des Übergangs von acht auf vier Bunche im SIS18. Dargestellt ist lediglich die halbe Umlaufzeit, da sich die weiteren zwei Bunche gleich verhalten. Die Bunche führen beim Mergen starke kohärente Dipolschwingungen aus.

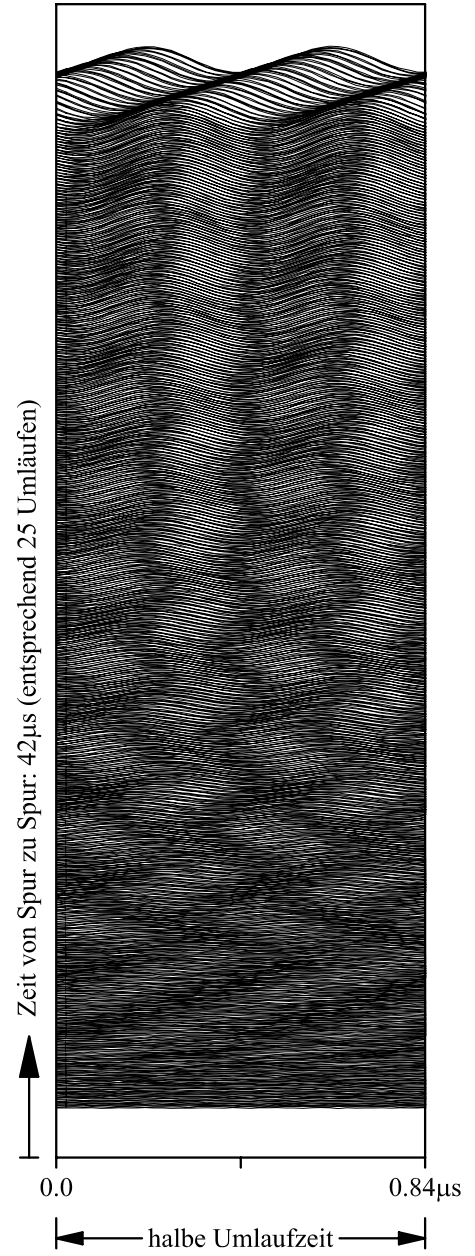


Fig. 4: Die Gapspannung der Kavität auf der vierten Harmonischen erklärt die kohärenten Bunchschwingungen in Fig. 3: Offensichtlich arbeitet die Phasenregelung nicht korrekt, so daß bereits das HF-Signal phasenmoduliert ist. Die Teilchenbunche versuchen lediglich der HF-Spannung zu folgen.

3.3 1 → 2-Bunchsplitting

Das Bunchsplitting ist der zum im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Merging zeitlich reverse Vorgang. Man startet mit vier Bunchen, von denen jedes in zwei möglichst symmetrisch verteilte Bunche aufgetrennt wird. Der Prozeß ist sehr empfindlich gegenüber Phasenfehlern zwischen den zwei HF-Systemen, da diese sofort zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Teilchen in die zwei aufgesplitteten Bunche führen.

Die zeitlichen Verläufe der Trigger und Gapsignale sind analog zu Fig. 2 in Fig. 5 dargestellt. Nach Beschleunigung und Debunchen wurde der Strahl wieder auf der 4. Harmonischen

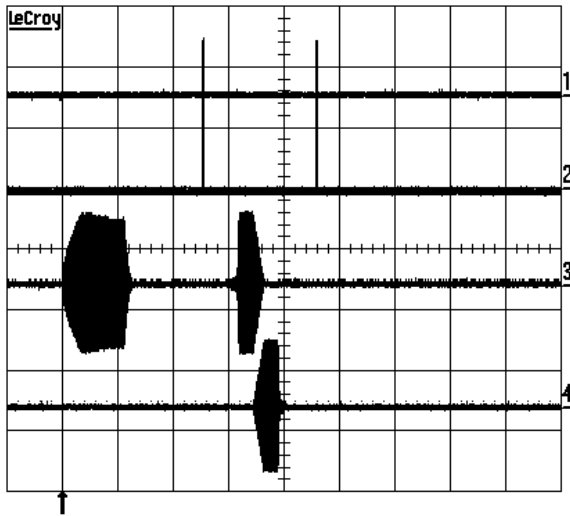


Fig. 5: Gleiche Darstellung wie Fig. 2, nur in diesem Fall für den Bunchsplitting-Prozeß. Wie man am Gapsignal der Kavität auf der 4. Harmonischen erkennen kann, wird der Strahl weiterhin mit $h = 4$ beschleunigt. Das Debunchen und Rebunchen ist zum einen notwendig, um die Amplitudenrampe des Kontrollsystems mit den zusätzlichen Rampen zu synchronisieren und läßt zum anderen einen Zeitschlitz für eine Schottkymessung der Impulsbreite des unbunchten Strahls.

schen gebuncht. Darauf folgte lineares Herab- und Heraufregeln der Kavitäten auf der 4. und 8. Harmonischen. Für weitere Schottkymessungen wurde der nun auf der 8. Harmonischen umlaufende Strahl wieder isoadiabatisch debuncht.

Fig. 6 zeigt das Bunchsignal während des Bunchmergings. Innerhalb der ersten 5ms ist die Spannung des HF-Systems auf der achten Umlaufharmonischen noch nicht ausreichend, um dem HF-System mit der halben Frequenz als Phasenreferenz zu dienen (vgl. Fig. 1). Daher weicht die Frequenz des Systems wiederum um etwa -430Hz von der theoretisch vorgegebenen Frequenz von 2.376861MHz ab. Diese Frequenzabweichung führt zwar nur zu einer kleinen transversalen Ablage des Strahls von etwa 2mm nach innen. Diese unerwünschte Verschiebung der Bunche könnte aber durchaus den Verlust von rund 10% der Teilchen beim Rebunchen erklären.

Sobald die Spannung des HF-Systems auf der achten Harmonischen eigentlich für eine zuverlässige Funktion der Phasenverkopplung beider Kavitäten ausreicht, sind weiterhin starke kohärente Dipolschwingungen der Bunche zu beobachten. Offensichtlich stimmt die mittlere Frequenz der HF-Systeme zwar mit dem vorgegebenen Wert überein, trotzdem scheint das für die Momentanfrequenz nicht der Fall zu sein. Dadurch ergibt sich eine Phasenmodulation mit einem da ein Hub von etwa $\pm 80^\circ$. Es ist jedoch wiederum davon auszugehen, daß es sich analog zum Bunchmerging nicht um ein strahldynamisches Problem handelt, sondern um eine Modulation durch das Gapsignal der Kavität, dessen Phasenfehler synchron zur Bewegung der Bunche ist. Erst wenn das HF-System auf der 8. Harmonischen die Bunche vollständig übernommen hat, sind auch die kohärenten Dipolschwingungen verschwunden.

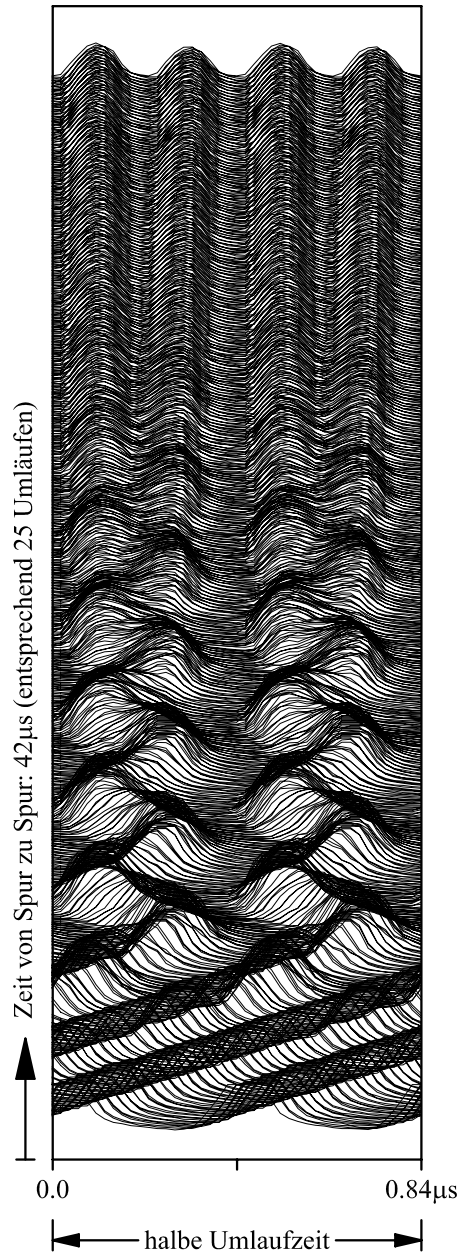


Fig. 6: Bunchsignal beim Bunchsplitting mit symmetrischer Aufteilung der Ausgangsbunche. Abgesehen von den starken kohärenten Bunchschwingungen, die durch die mangelhafte Phasenverkopplung hervorgerufen werden, sind die mittleren Phasen beider HF-Systeme korrekt abgeglichen.

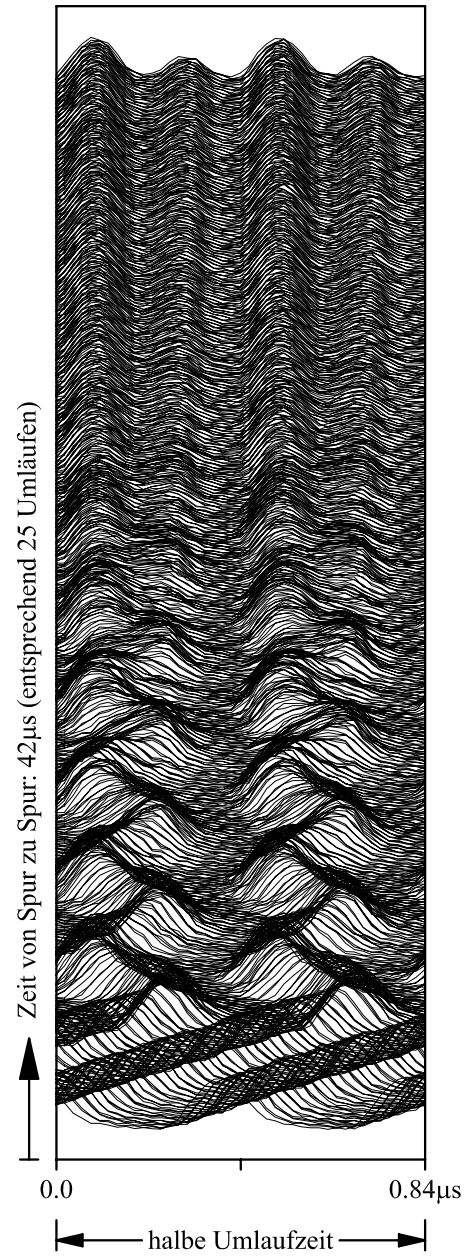


Fig. 7: Wird die Phasenrelation zwischen den zwei HF-Kavitäten im Vergleich zur Phasenlage in Fig. 6 verstimmt, erkennt man sofort die paarweise unsymmetrische Aufteilung der Ausgangsbunche. Das Aufteilen von Bunchen ist daher viel empfindlicher gegenüber Phasenfehlern als das Bunchmerging.

Bei korrektem Abgleich des durch eine Zusatzspannung gesteuerten Phasenkomparators, ist trotz der starken Schwingungen zum Beginn des Prozesses ein symmetrisches Aufsplitten der Teilchenpakete möglich. Ist der Komparator nicht richtig abgeglichen, ergibt sich das in Fig. 7 gezeigte Wasserfalldiagramm. Die resultierenden Bunche auf der 8. Harmonischen sind dann paarweise ungleichmäßig gefüllt.

Auch wenn die Phasenregelschleife bei schnell veränderlicher Amplituden, wie sie während des Bunchmergings und Bunchsplittings notwendig sind, offensichtlich nicht korrekt funktioniert und zu starken kohärenten Dipolschwingungen geführt hat, konnte trotzdem gezeigt werden, daß ein Zusammenführen und Auftrennen von Bunchen im SIS18 prinzipiell möglich ist. Damit werden frühere Experimente bestätigt [4]. Gleichzeitig wurden die Bunche aber durch die Störungen der Phasenregelung derart aufgeweitet, daß eine systematische Auswertung der Messungen von Impulsbreiten und damit longitudinalen Emittanzen nicht sinnvoll ist. Wie man nämlich an den Wasserfalldarstellungen erkennen kann, sind die Buckets durch die Bunche nahezu ausgefüllt, so daß für die eigentlich zu beobachtende Emitanzaufweitung kaum noch Phasenraumfläche zur Verfügung steht.

4 Bunchen und Debunchen mit zwei Harmonischen

Das Bunchen mit zwei Harmonischen ohne Beschleunigung konnte mit dem selben Aufbau wie für Bunchmerging und -splitting erfolgen, nur daß nun beide Kavitäten ein bis auf einen konstanten Faktor unterschiedliche Amplitudenrampe erhalten. Zunächst sollte gezeigt werden, daß sich die Bunche durch Einsatz eines Harmonischen HF-Systems gezielt bei verringertem Spitzenstrom verlängern lassen. Der zeitliche Ablauf ist in Fig. 8 dargestellt. Die Phase

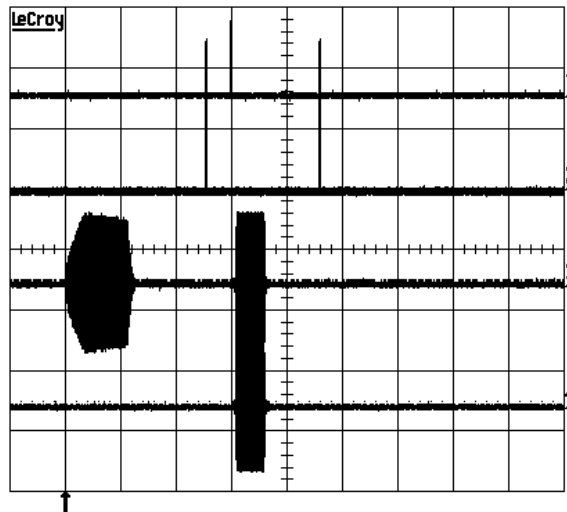


Fig. 8: Zeitlicher Ablauf der Messungen für Bunchen mit einem Zweiharmonischen-System. Beide HF-Kavitäten erhalten die gleiche Rampen, die sich lediglich um einen Skalierungsfaktor unterscheiden.

zwischen beiden Kavitäten wurde so eingestellt, daß sich ohne Beschleunigung symmetrische Bunche ergeben.

Die Bunchsignale für drei verschiedene Skalierungsfaktoren $U_{h=8} = 0$, $U_{h=4}/2$, $U_{h=4}$ sind in Fig. 9 in Form von Wasserfallplots visualisiert. Insbesondere im Fall $U_{h=8} = U_{h=4}/2$

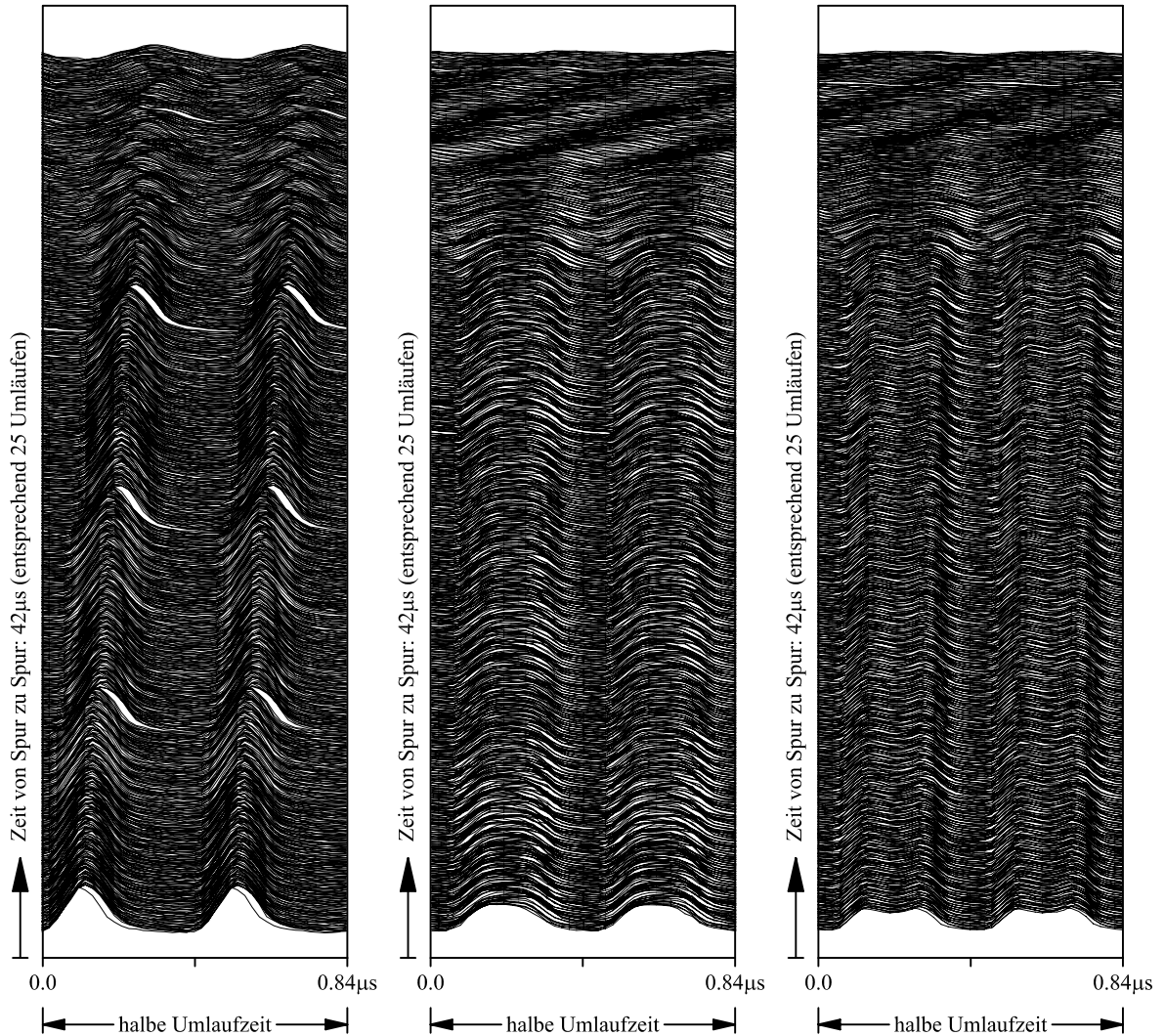


Fig. 9: Bunchformen für stationäre Bunche. Die Spannung des $h = 4$ -Systems ist in allen drei Fällen 10kV. Die Amplitude der höherharmonischen Kavität wurde variiert und beträgt $U_{h=8} = 0$ (links), $U_{h=8} = U_{h=4}/2$ (Mitte), $U_{h=8} = U_{h=4}$ (rechts). Durch den Einsatz von zwei HF-Systemen kann der Peakstrom um etwa 30% gesenkt werden.

(Fig. 9) ist eine deutliche Absenkung des Spitzenstromes um etwa 30% zu erkennen. Wird die Spannung der höherharmonischen Kavität weiter gesteigert, erkennt man deutlich eine Bunchstruktur mit zwei Maxima. Würde diese Spannung weiter gesteigert, würden die Bunche unter Umständen aufsplitten und damit der Peakstrom wieder ansteigen.

5 Versuch der Beschleunigung mit zwei Harmonischen

Kurz vor Ende der Maschinenentwicklungsschicht wurden noch Versuche zur Beschleunigung mit dem Doppelharmonischen-System unternommen. Dazu wurden die Amplitudenfunktionen beider Kavitäten weiterhin von den HP33120 erzeugt. Es wurde aber lediglich die Kontrollsystem-Amplitudenrampe ausgelesen, skaliert und in ein für die Generatoren zugäng-

liches Format konvertiert. Um die korrekte Synchronisation dieser Zusatzschaltung mit dem Beschleuniger sicherzustellen, wurde der sogenannte Sync-Event nach dem Ramp_Start-Event mit einer speziellen Triggerschaltung ausgewertet. Somit konnten die Funktionsgeneratoren für die Amplitudenrampen im Bereich weniger Mikrosekunden mit dem Beschleuniger synchronisiert werden. Für die Versuche ist das absolut ausreichend.

Bei den ersten Experimenten mit zwei Harmonischen stellte sich schnell heraus, daß der Strahl die Beschleunigung trotz der Probleme der Phasenregelschleife in diesem Modus grundsätzlich problemlos überlebt. Fig. 10 zeigt die Bunchform innerhalb der ersten 100ms nach Start der Rampe. Der Abstand von Spur zu Spur beträgt etwa 7ms. Um die Bunchform auch während der Beschleunigung symmetrisch zu halten, müßte die höherharmonischen Kavität mit einer Phasenrampe betrieben werden, so daß der negative Nulldurchgang der Spannung immer symmetrisch zur Bunchmitte bliebe [5]. Da die Phasen während der Experimente aber lediglich für stationäres Bunchen mit zwei Harmonischen optimiert waren, ergeben sich beim Beschleunigen, wie in Fig. 10 gezeigt, unsymmetrische Bunchverteilungen.

Fig. 11 zeigt einen Versuch, den $^{12}\text{C}^{6+}$ -Strahl mit zwei Harmonischen auf Injektionsniveau $E_{\text{kin}} = 11.5\text{MeV/u}$ isoadiabatisch zu bunchen. Auch hier wird die Entwicklung der Bunche erheblich durch die Phasenschwingungen der Regelung gestört. Trotzdem entstehen abgeflachte Bunche zwischen denen eindeutige Zwischenräume zu erkennen sind. Offensichtlich ist die Akzeptanz der des kombinierten HF-Systems ausreichend, um die Bunchemittanz vollständig zu umfassen.

Leider mußten die Versuche zur Beschleunigung mit zwei Harmonischen abgebrochen werden, da im SIS kurz nach der Messung des Einfangs kein Strahlstrom mehr zur Verfügung gestanden hat. Daher sind keine Daten verfügbar, die den direkten Vergleich zwischen Beschleunigung mit einer und Beschleunigung mit zwei Harmonischen zulassen.

6 Zusammenfassung

Die im Rahmen der vergangenen Maschinenstrahlzeit am 18./19. Dezember 2002 durchgeführten Experimente sind Versuche zum Bunchmerging und Bunchsplitting [4] sowie erste Tests zum Bunchen und Beschleunigen mit zwei Harmonischen. Aus technischen Gründen, wurde mit den Harmonischenzahlen $h = 4$ und $h = 8$ gearbeitet, die Ergebnisse sind aber natürlich auch auf niedrigere Harmonische übertragbar.

Es konnte gezeigt werden, daß Bunchmerging und Bunchsplitting im SIS18 prinzipiell funktionieren. Die generelle Abhängigkeit beider Prozesse von der Phasenbeziehung zwischen den zwei HF-Systemen wurde insbesondere beim Versuch zum symmetrischen Aufteilen von Teilchenpaketen offensichtlich. Leider funktionierte die Phasenregelung bei veränderlichen Amplituden nicht wie gewünscht, so daß starke kohärente Bunchschwingungen angeregt wurden. Dadurch wird die quantitative Auswertung der Emittanzaufweitung bei Merging und Splitting erheblich gestört, so daß die Messungen lediglich qualitative Aussagen ermöglichen.

Da die Phasenschwingungen der Regelung nur bei variabler Amplitude aufgetreten sind, waren die Versuche zum Bunchen mit zwei Harmonischen erfolgreich, da die Teilchenpakete in diesem Fall bei konstanten HF-Amplituden beobachtet wurden. Es konnte der erwartete Einfluß der höherharmonischen Kavität nachgewiesen werden. Zunächst ergibt sich eine Verlängerung der Bunche und eine Abnahme des Spitzenstroms um etwa 30% und bei weiterem Erhöhen der Amplitude der höherharmonischen Kavität sind die typischen longitudinalen Verteilungen mit zwei Maxima zu beobachten.

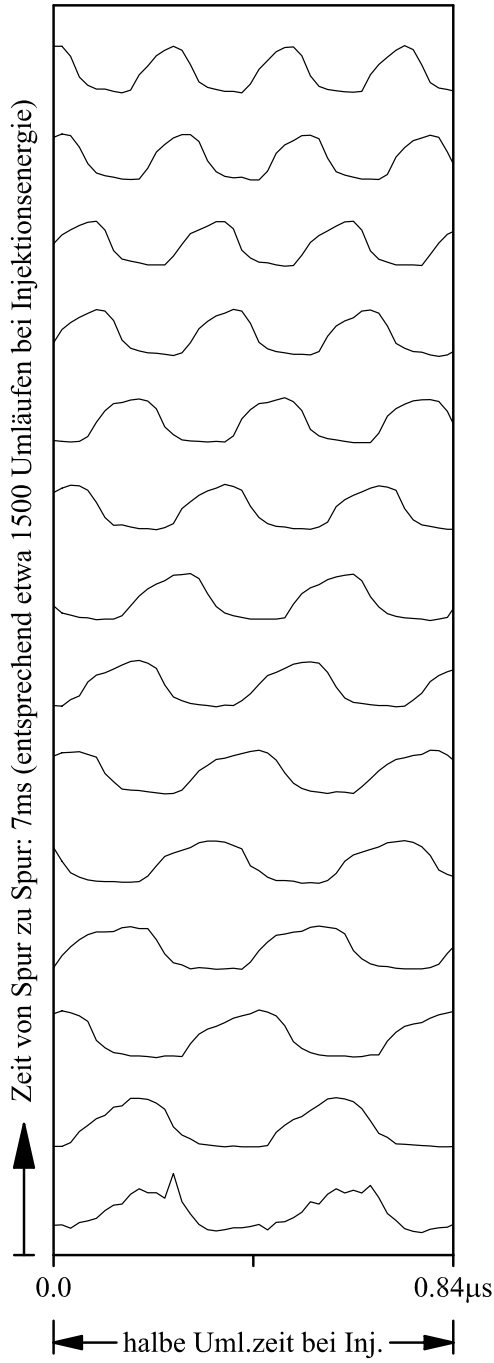


Fig. 10: Dargestellt ist die Entwicklung der Bunchform innerhalb der ersten 100ms nach Start der HF-Amplitudenrampe. Durch die Abnahme der Umlaufzeit der Teilchen sind auf den oberen Spuren mehr als zwei Bunche zu sehen. Man erkennt deutlich die flache unsymmetrische Verteilung der Teilchen in den Bunchen.

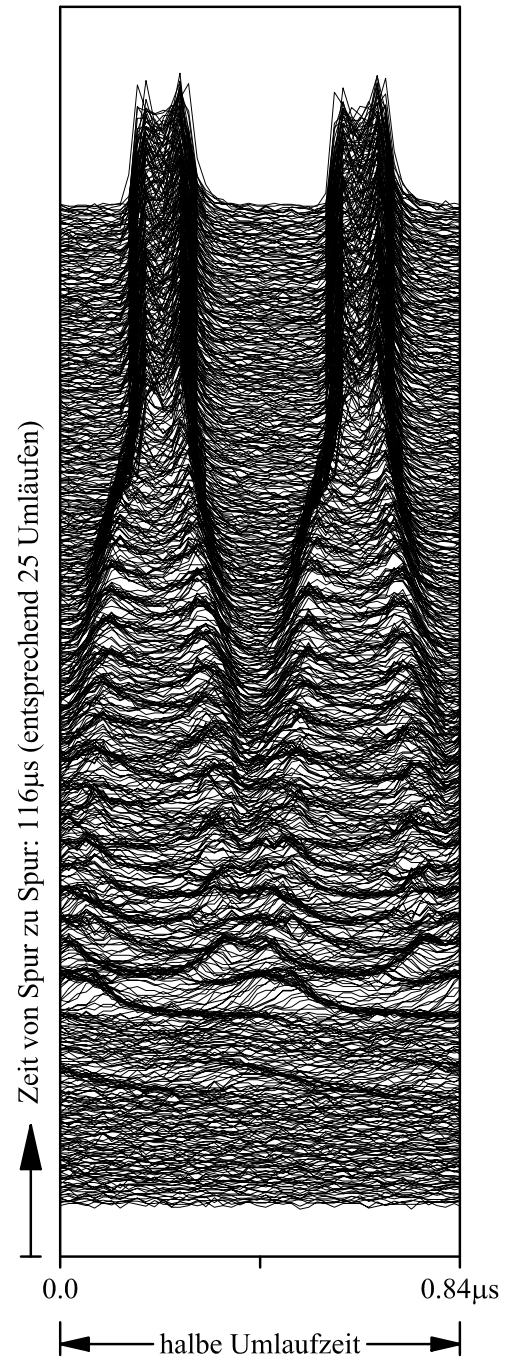


Fig. 11: Bunchform während eines isoadiabatischen Bunchenprozesses mit zwei Harmonischen. Die HF-Amplitude des $h = 4$ -Systems wurde innerhalb von 100ms von 0.1 auf 10kV erhöht. Für das $h = 8$ - System wurde die Bedingung $U_{h=8} = U_{h=4}/2$ eingehalten. Wie man sieht, ist die von der HF zur Verfügung gestellte Bucketfläche problemlos ausreichend.

Weiterhin konnte erstmals Strahl mit zwei Harmonischen beschleunigt werden. Auch wenn hier aus Zeitgründen nicht mehr alle Einstellungen optimiert werden konnten, hat der Strahl diese spezielle Variante der Beschleunigung problemlos überlebt. Während der Beschleunigung sind erwartungsgemäß unsymmetrische Bunche zu beobachten, die bis auf die Sollphasenkorrektur auf eine brauchbare Phasenbeziehung beider HF-Systeme schließen lassen.

Da der Aufwand an zusätzlicher Hardware zur erfolgreichen Durchführung der Versuche beträchtlich gewesen ist, sollten für weitere Versuche entsprechende Vereinfachungen angestrebt werden. So sind beispielsweise für das Bunchmerging und Splitting nur lineare Rampen notwendig, so daß die Erzeugung der erforderlichen Amplitudenrampen bei entsprechender Programmierung nur wenige Datenpunkte der Funktionsgeneratoren des Kontrollsystems in Anspruch nehmen würde. Desweiteren sind Verbesserungen an der Phasenregelung oder Umbau auf eine Schaltung mit einem Teiler anstelle der Regelschleife für eine zuverlässigere Funktion notwendig.

Wir danken Herrn M. Emmerling für die Unterstützung bei der Vorbereitung der Maschinenexperimente.

A HF Amplituden- und Phasenrampen zur Doppelharmonischen-Beschleunigung zu hohen Energien im SIS

Der Frequenzbereich der SIS-Kavitäten ist auf etwa 800kHz bis 5.6MHz beschränkt [6]. Er reicht daher in keinem Fall aus, um noch eine $h = 8$ -Komponente bei Teilchenbunche mit nahezu Lichtgeschwindigkeit $\beta = v/c = 1$ zu erzeugen. Daher wurde die Extraktionsenergie während der Maschinenexperimente auf $E_{\text{kin}} = 100\text{MeV/u}$ gesetzt. Für den normalen Beschleunigerbetrieb ist das aber natürlich nicht ausreichend.

Nimmt man 5.6MHz als obere Frequenzgrenze, so kann ein zusätzliches HF-Signal bis zu Teilchengeschwindigkeiten von $\beta = 0.506$ eingesetzt werden. Das entspricht einer kinetischen Energie von etwa $E_{\text{kin}} = 150\text{MeV/u}$.

Die klassische Arbeitspunktverschiebung durch direkte Raumladung wird durch

$$\Delta Q = -\frac{NZ^2 r_p}{2\pi A \epsilon_N \beta \gamma^2} \cdot \frac{1}{B_f} \propto \frac{1}{\beta \gamma^2}$$

beschrieben [7]. Dabei ist $B_f = I_{\text{mean}}/I_{\text{peak}}$ der Bunching-Faktor, N die Teilchenzahl, Z die Ladungszahl der Kerne, $r_p \simeq 1.53 \cdot 10^{-18}$ der klassische Protonenradius und ϵ_N die normierte transversale Emittanz. Die Verschiebung skaliert also proportional zu $1/\beta\gamma^2$. Bei einer kinetischen Energie von 150MeV/u ist die Arbeitspunktverschiebung daher um den Faktor

$$\frac{\beta\gamma^2|_{150\text{MeV/u}}}{\beta\gamma^2|_{11.5\text{MeV/u}}} \simeq 4.3$$

geringer als bei ungefähr 11.5MeV/u Injektionsenergie ins SIS. Das Zweiharmonischen-System ist daher bei kinetischen Energien über 100MeV/u nicht mehr notwendig.

Als HF-Amplitudenrampe für ein zusätzliches HF-System während des Einfangs und im Bereich niedriger Energien kann also im ersten Teil eine skalierte Amplitudenrampe des HF-Systems auf der 4. Harmonischen verwendet werden. Etwa 20 bis 30ms vor Erreichen einer kinetischen Energie von 150MeV/u sollte die Amplitude des höherharmonischen HF-Systems

wieder adiabatisch heruntergefahren werden. Damit ist die Amplitude wieder Null, wenn die Kavität an ihrer oberen Frequenzgrenze angelangt ist. Damit die Symmetrie der Bunche und Buckets auch während der Beschleunigung erhalten bleibt, muß die Kavität auf der höheren Harmonischen auch mit einer Phasenrampe versorgt werden, so daß der negative Nulldurchgang der Spannung symmetrisch zur Sollphase bleibt.

Aus obigen Abschätzungen wird klar, daß die verfügbaren HF-Anlagen für die Beschleunigung mit zwei Harmonischen zur Unterdrückung der Raumladungsgrenze geeignet sind. Lediglich im Bereich der Ansteuerung und der Signalaufbereitung bei niedriger Leistung sind teilweise aufwendige Änderungen notwendig.

Literatur

- [1] J. M. Balliod et al., *A Second Harmonic (6-16 MHz) RF System with Feedback-reduced Gap Impedance for Accelerating Flat-topped Bunches in the CERN PS Booster*. IEEE Trans. Nucl. Sci, Vol. NS-30, No. 4, 1983, pp. 3499-3451
- [2] R. Garoby, *Longitudinal limitations in the PS complex for the generation of the LHC proton Beam*. CERN-PS-97-010-RF, International LHC Workshop: High-brightness Beams for Large Hadron Colliders: LHC '96, Montreux, Switzerland, 1996, proc. unpublished
- [3] R. Garoby, *Status of the Nominal Proton Beam for LHC in the PS*. CERN-PS-99-013-RF, LEP-SPS Performance Workshop, Chamonix, France, 1999, pp. 94-98
- [4] K. Blasche, *SIS Status Report*. GSI Report 2000-1, 2000, pp. 187-188
- [5] A. Hofmann, F. Pedersen, *Bunches with Local Elliptical Distributions*. IEEE Trans. Nucl. Sci, Vol. NS-26, No. 3, 1979, pp. 3526-3528
- [6] K. Kaspar and M. Emmerling, *Development of the RF Accelerating System for the GSI Heavy Ion Synchrotron*. IEEE Trans. Nucl. Sci, Vol. NS-28, No. 3, 1981, pp. 3004-3006
- [7] K. Schindl, *Space Charge*. Proc. of the Joint US-CERN-Japan-Russia School on Part. Acc., Beam Measurement, Montreux and CERN, Switzerland, 1998, pp. 127-151