

Messung von Q_h bei HF-KO Extraktion im SIS 18

M. Kirk, D. Ondreka, T. Harberer, P. Schütt, B. Franczak, A. Redelbach

Datum des Experiments	24 Nov. 2005
Ionen	$^{12}\text{C}^{6+}$
Intensität	$\sim 10^6$
Extraktionsenergie	126 / 316 MeV/u

Einleitung

Die Optimierung der Spillstruktur aus dem SIS18 ist ein wichtiges Thema bei der GSI-Darmstadt, nicht nur für Experimente in der Kernphysik, sondern auch für das HICAT-Projekt in Heidelberg. Der makroskopische Spillverlauf sollte idealer Weise eine rechteckförmige Zeitstruktur aufweisen. Bei der Betrachtung der Mikrostruktur ist eine möglichst homogene Zeitstruktur wünschenswert. Um die ideale Zeitstruktur zu erreichen ist eine Spillregelung erforderlich. Hierzu wird die Ausgangsleistung eines Stellgliedes als Funktion des gewünschten Zeitverlaufs geregelt, bei der Resonanzextraktion wäre das Netzgerät der schnellen Quadrupole das Stellglied. Bei der Anwendung der Resonanzextraktion ist aber dieser Regelkreis, zur Beeinflussung der Mikrostruktur, nicht geeignet. Diese wird im Wesentlichen durch die Welligkeit der an der Extraktion beteiligten Netzgeräte beeinflusst. Insbesondere die schnellen Quadrupolmagnete, die den Tune in eine Resonanz der dritten Ordnung verschieben, haben auf die Mikrostruktur des Strahls einen großen Einfluss.

Deswegen ist es vorteilhaft den Tune in der Nähe der Extraktionsrezonanz konstant zu halten und durch einer Art Diffusionsprozess die Teilchen langsam zu extrahieren. Die negativen Einflüsse der Welligkeit der Netzgeräte auf die Mikrostruktur werden dadurch vermieden. Diese Art der Extraktion wird als K.O. Extraktion bezeichnet. Mit diesem Verfahren lässt sich gleichzeitig die Spillstruktur im mikroskopischen und im makroskopischen Zeitbereich beeinflussen. Das Grundprinzip ist, dass ein bandbegrenztetes Rauschsignal auf die Betatronoszillation des Strahls moduliert wird. Zur Übertragung des Impulses auf den Strahl wird ein "Stripline Exciter" verwendet. Die Leistung zu diesem Exciter kann weiterhin geregelt werden um eine rechteckförmigere makroskopische Spillverlauf zu beschaffen. Dazu wird das Spill von einer Ionisationskammer gemessen und dient als Rückkopplung zum Exciter. Der Feedbackelektronik erzeugt einer negative proportionale Beziehung zwischen Exciterleistung und das Spillsignal. Diese Extraktionsverfahren ist bereits im Einsatz im medizinischen Bestrahlungsprogramm bei der GSI, aber es ist noch kein Standardverfahren für den Experimentierbetrieb. Darum ist die Optimierung der Spillqualität ein gegenwärtiges Forschungsthema bei der GSI. Zur Weiterentwicklung dieses Verfahrens wurden die folgenden Messungen am 24. November 2005 ausgeführt:

1. Messung der Strahlbreite
2. Tune-Messung unter Extraktionsbedingungen
3. Homogenitätsmessung
4. Programmierte Spillpause

Bei der ersten Messung wurde die transversale Strahlbreite am Target in Abhängigkeit des Spillverlaufs bestimmt. Die Sollwerte für die Tunes, die in der Kontrollsoftware SISMED

eingetragen sind, haben immer einen systematischen Fehler bzgl. des Ist - Tune. Wichtiger als den systematischen Fehler ist jedoch die zeitliche Variation des Tunes während des Spills. Die Spillstruktur ist ziemlich empfindlich auf solchen Schwankungen, insbesondere der horizontale Tune. Aus diesem Grund wurde dann der Ist - Tune unter Extraktionsbedingungen in horizontaler Ebene bestimmt. Bei der dritten Messung wurde die Homogenität der Teilchenverteilung auf einem Film bestimmt, wo normalerweise der Patient oder das Target platziert ist. Im Folgenden sollen nur die Ergebnisse der zweiten Messung dargelegt werden.

Bestimmung des horizontalen Tunes

Die Verteilung des Betatronunes lässt sich aus dem Schottky - Rauschen eines Strahls bestimmen. Mit Hilfe eines Spektrumanalysators wird das Δ -Signal von einer Schottky-Sonde aufgezeichnet. Zu diesem Zweck wurde ein Spektrumanalysator des Typs Sony Tektronix 3066 verwendet. Dieses Gerät erfasst in Echtzeit eine Reihe von Spektren. Dabei ermöglicht dieser Analysator, dass der Tuneverlauf während der Extraktion kontinuierlich gemessen werden kann. Die Information des Tunes ist in jedem der oberen und unteren Seitenbänder des Schottky Rauschens enthalten, wobei der Abstand der Seitenbänder von der Harmonischen m mit der Umlauffrequenz f_0 , $\pm Q_f f_0$ beträgt. Hierbei steht das positive Vorzeichen für das rechte (obere) Seitenband und das negative für das linke (untere) Seitenband. Im Falle $Q_f > 0.5$ gilt das Umgekehrte.

Zu nächst wurde der mittlere Tune über eine Dauer von 1 Sekunde bestimmt, hierbei wurden 1000 Messungen also "Frames", mit einem Abstand zwischen Frames von 1 ms und einer FFT-Auflösung von 78 Hz, ausgeführt und anschließend gemittelt. Zwei gemittelte Seitenbänder sind in Abb. 1 dargestellt. Die Abnahme in der Intensität, bedingt durch die langsame Extraktion, hat einen vernachlässigbaren Beitrag am Spektrum des Δ -Signals, da die Dauer des Spills von ca. 2 Sekunden viel länger ist als die Länge einer Messung (12.8ms). Da die Betatronverteilung nicht bekannt ist, wird die Mittelfrequenz der Verteilung als Messpunkt definiert.

Bei der vorhandenen Intensität von $\sim 10^6$ $^{12}\text{C}^{6+}$ -Ionen, mit Mittelenergien von 126 MeV/u und 316 MeV/u, ist das Signal / Rauschverhältnis für einen DC - Strahl sehr ungünstig. Deshalb wurden nur transversale Schottkyspektren für gebündelte Strahlen aufgenommen, wie in der Abb. 1 dargestellt. Hier ist das Signal / Rauschverhältnis wesentlich günstiger. Alle Messungen, die in diesem Bericht dargestellt werden, gelten für eine HF Amplitude der Kavität auf dem Extraktionsniveau von 2 kV und für ein bandbegrenztes Rausch des Exciter. Dieses Rauschband sitzt auf dem Seitenband bei der niedrigsten Frequenz also bei $Q_f f_0$.

Das Bunchen eines Strahls führt zu einer Modulation im Tune mit der Synchrotronfrequenz f_s . Somit wird eine Reihe von Satteliten über ein Seitenband erzeugt, deren Abstand zwischen den Satteliten f_s beträgt. So was sieht man am besten in dem breiteren unteren Seitenband ohne Sextupolfelder (Abb. 1). Hieraus ergibt sich eine Synchrotronfrequenz von 660 ± 30 Hz, die mit dem theoretischen Wert von 714 Hz gut übereinstimmt. Die Abweichung ist vermutlich auf Grund der endlichen Breite der Bunche zurückzuführen, wobei die Frequenz eines Teilchens von seiner Synchrotronamplitude abhängt. Weiterhin lässt sich auch die Chromatizität aus dieser Messung bestimmen [SIE], dies ist aber nicht Bestandteil dieser Arbeit.

Wie bereits erwähnt, hat die Welligkeit der Magnetströme $\delta I/I$ einen erheblichen Einfluss auf dem Verlauf des Tunes und somit auf dem Qualitätsfaktor I_{\max}/\bar{I} der Spillmikrostruktur¹. Der mittlere Tune während der KO – Extraktion ist als Funktion der Zeit in der Abbildung 2 dargestellt, wobei der Fehlerbalken aus der $2\sigma/\sqrt{N}$ Genauigkeit bestimmt wurde. N sind hier 5 hintereinander liegende Frames. In den ersten 32 ms ist der ausgewertete Tune noch sehr fehlerhaft, da noch kein Rauschsignal vom Exciter vorhanden ist.

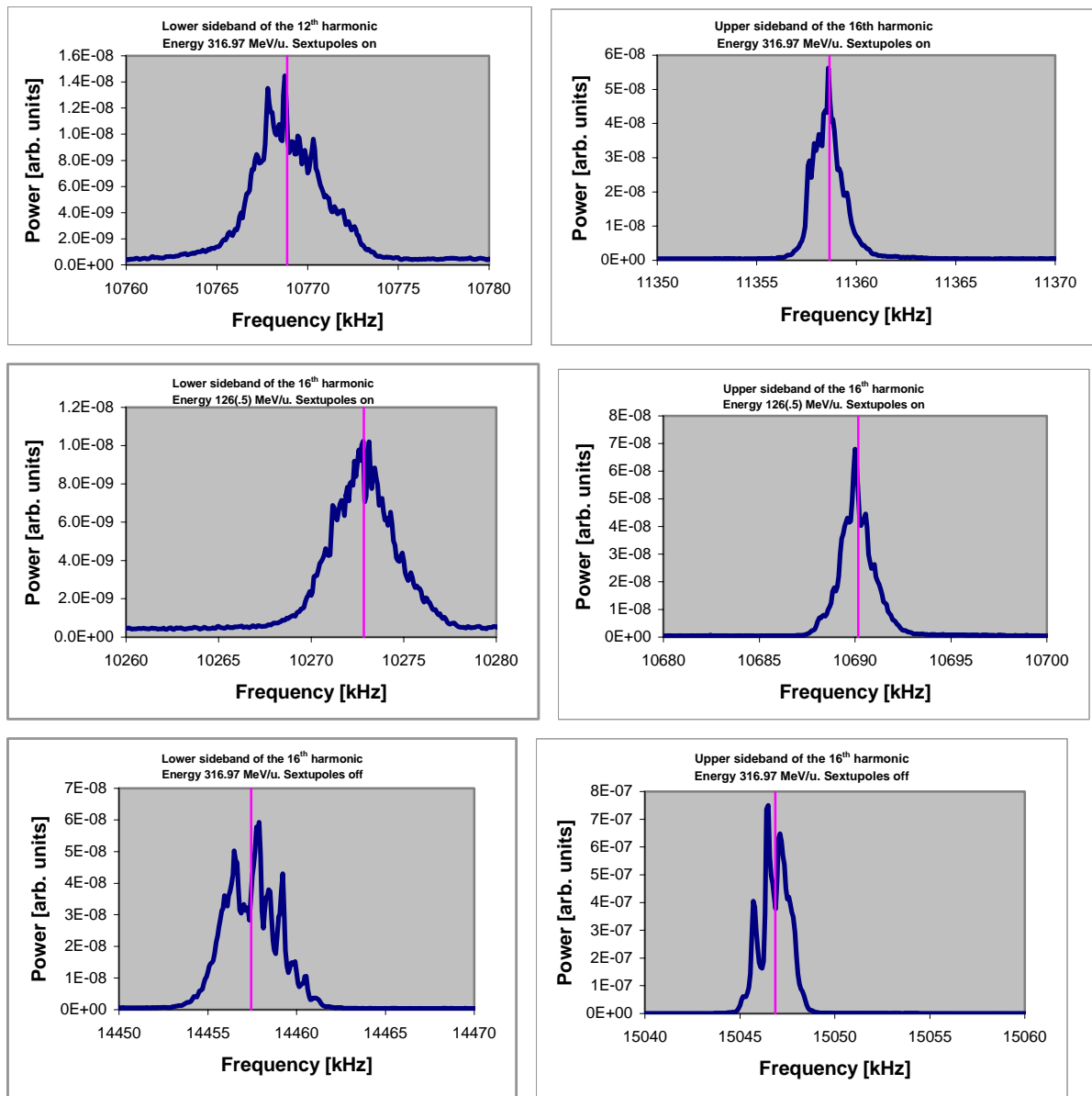


Abbildung 1. Untere (linke Reihe) und obere Seitenbänder (rechte Reihe) für verschiedene Einstellungen. Variiert wurde hierbei die Energie, sowie die Sextupole (An /Aus). Die vertikale Linie zeigt jeweils die Mittelfrequenz der Betatron - Tuneverteilung.

¹ Man rechnet üblicherweise I_{\max}/\bar{I} für ein Zeitintervall von 10 ms, mit einer zeitlichen Auflösung im Spillhistogramm von 10 μ s also für einige Umläufe.

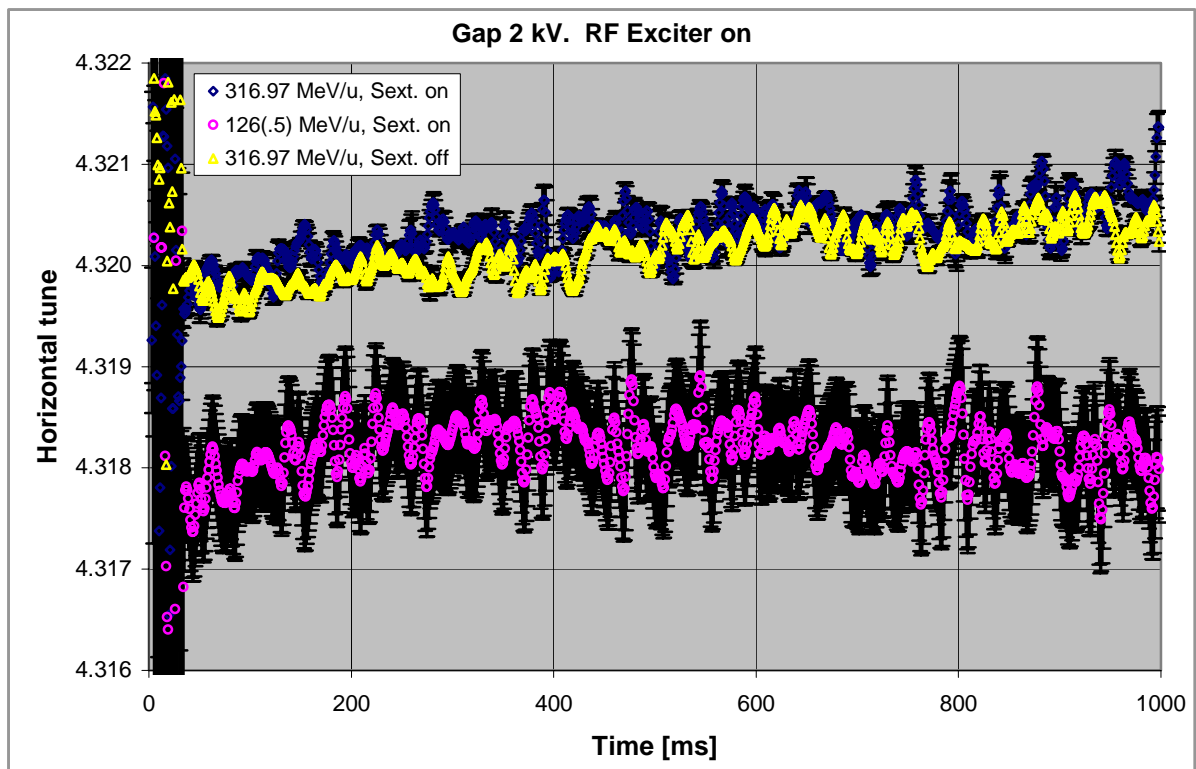


Abbildung 2. Tuneverlauf während der KO-Extraktion für verschiedene Einstellungen. Variiert wurde hierbei die Energie, sowie die Sextupole (An /Aus).

Es lässt sich zeigen, dass die Schwankungen δA von der transversalen Phasenraumfläche A innerhalb des Separatricks durch

$$\frac{\delta A}{A} \approx 2 \frac{\delta Q_0}{|Q_0 - Q_{res}|} \quad \dots(1)$$

gegeben ist, wobei Q_{res} und δQ_0 genau die Resonanz und die Änderung im Tune sind. Die Teilchen werden aus dem SIS auf Grund der Resonanz bei $Q_{res} = 4\frac{1}{3}$ extrahiert. Bei der Herleitung der Gl. 1 geht man davon aus, dass die Betafunktion in der horizontalen Ebene sehr schwach von dem Tune und damit von $\delta I/I$ abhängt. Weiterhin gilt diese Gleichung für den idealen Fall von schwachen Sextupolen und einem einzelnen Tune Q_0 , mit einer Null Strahlbreite in der vertikalen Ebene. Die Anwendung von Gl. 1 auf die Daten in Abb. 2 ergibt eine obere Abschätzung von $\delta A/A < 8\%$. Der theoretische Wert, berechnet mit dem MAD Code, ergibt hierzu im Vergleich einen Wert von 2%.

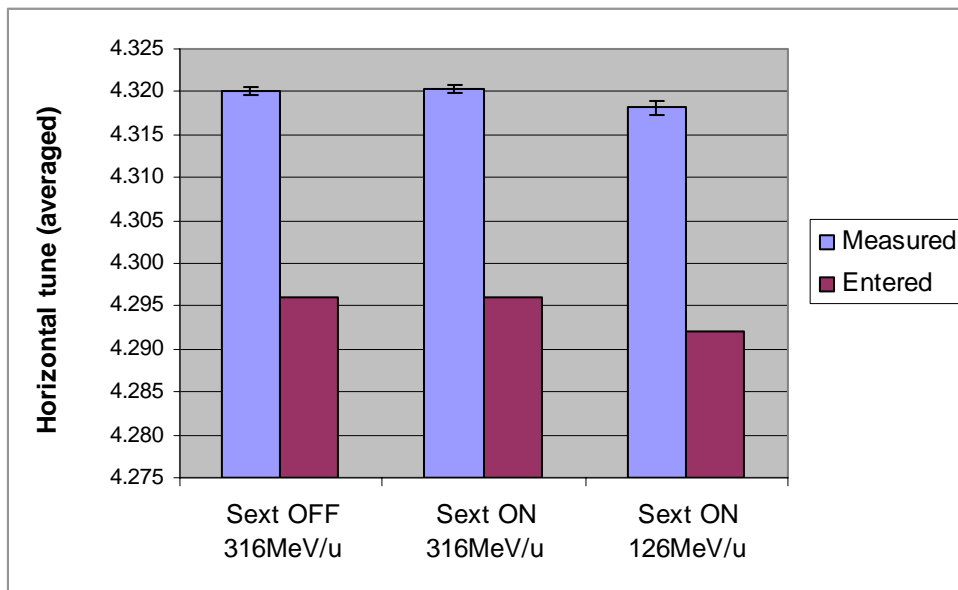


Abbildung 3. Die Abhängigkeit des Tunes von der Extraktionsenergie und Extraktionssextupolen (aus/ein). Dargestellt ist der gemittelte Ist – Tune mit einer Messzeit von 1 Sekunde und der dazugehörige Soll – Tune.

Die Ergebnisse zeigen eine relativ gute Übereinstimmung zwischen den Soll- und Istwerten des Tune, wenn man berücksichtigt, dass es einen systematischen Fehler von etwa 0.025 im Tune zwischen eingegebenen Sollwert in das SIS Kontrollsystem und Istwert gibt.

Einstellung	Q_h
Sextupole eingeschaltet, 126(.5) MeV/u	4.3182 ± 0.0008
Sextupole eingeschaltet, 316.97 MeV/u	4.3203 ± 0.0005
Sextupole ausgeschaltet, 316.97 MeV/u	4.3201 ± 0.0004

Tabelle 1. Ist - Tune für die 3 Einstellungen in Abbildung 3.

Zusammenfassung

Der horizontale Ist - Tune wurde während der KO - Extraktion im SIS18 gemessen. Die tatsächliche Welligkeit im Tune ist schwer zu messen, da man nicht genau weiß ob die Variationen im Tune von dem Strahl selbst oder einer anderen Quelle stammen. Die Variationen des Tune in der Separatricksfläche ist unter $\pm 8\%$, was so zunächst nicht tolerabel ist. Hierzu müssen weiter Messungen und Maßnahmen erfolgen.

Es sollte darauf hingewiesen werden, dass dynamische Tunemessungen bei der GSI [MOR] schon durchgeführt wurden. Das Meßsystem funktioniert wie bei unseren Messungen mit einer Rauschanregung und kann dabei die Tunevariation gleichzeitig in beiden transversalen Ebenen während der Beschleunigung bestimmen. Dies war mit dem hier verwendeten Aufbau nicht möglich gewesen. Es wurden bei den vorhergehenden Messungen Genauigkeiten besser als $\delta Q_h = \pm 0.01$ und $\delta Q_v = \pm 0.005$ erreicht. Es wäre deshalb wünschenswert dieses Meßsystem als Standarddiagnose im Hauptkontrollraum zur Verfügung zu haben.

Literatur

- [SIE] Siemann R. H., Bunched Beam Diagnostics, Conf. Proc., Physics of Particle Accelerators, p. 456, (1987)
- [PUL] Pullia M., Doctoral Thesis, Detailed dynamics of slow extraction and its influence on transfer line design, CERN, p. 25
- [MOR] Moritz P., GSI mbH, Darmstadt, Private communication