

Maschinenexperimente am SIS 12/18:
Impedanzmessungen an den SIS18-Kavitäten
Messungen zum 1- und 2-Kavitätenbetrieb
Gezielte Anregung von Quadrupolschwingungen

16. und 17. August 1006

K.P. Ningel, M. Mehler, B. Zipfel, G. Schreiber, U. Laier

Gliederung:

1. Einleitung und Zusammenfassung
2. Randbedingungen
3. Beschreibung der Experimente
 - 3.1 Experimenteller Aufbau
 - 3.2 Impedanzmessung an den SIS18-Kavitäten
 - 3.3 Messungen zum 1- und 2-Kavitätenbetrieb
 - 3.4 Gezielte Anregung von Quadrupolschwingungen
4. Referenzen

1. Einleitung und Zusammenfassung

Am 16. und 17. August 2006 wurde ein längerer Zeitraum für die HF-Gruppe zur Durchführung von Maschinenexperimenten am SIS18 reserviert. Die zugestandene Meßzeit von 9 Stunden erlaubte es, einige aufwendige Experimente und ihre systematische Durchführung zu planen. Hierbei handelte es sich um:

- Impedanzmessung an den SIS18-Kavitäten
- Messungen zum 1- und 2-Kavitätenbetrieb
- Gezielte Anregung von Quadrupolschwingungen

Trotz nicht ganz unproblematischer Randbedingungen während der Meßschicht konnten verlässliche Werte für die Impedanz der SIS18-Kavitäten gemessen werden. Die ermittelten Werte liegen bei 1160Ω im A-Betrieb der Kavitätenendstufe, bzw. bei 2360Ω im B-Betrieb und bei 1800Ω im AB-Betrieb.

Ein präziser Test der kürzlich in Betrieb genommenen Kavitäten-Synchronisation und eine genaue Untersuchung der Anregungen von Quadrupoloszillationen waren nur mit Einschränkungen möglich, da die Strahlverhältnisse am SIS18 während dieser Messschicht starken Schwankungen unterlagen. Zusätzlich gab es viele Ausfälle, die die tatsächlich nutzbare Zeit stark reduzierten. Es ließen sich zu den beiden letztgenannten Punkten nur einige qualitative Ergebnisse erzielen, die die grundsätzlichen Ansätze für die Experimente und Vorgehensweise untermauern.

Die Versuche zum 1- und 2-Kavitätenbetrieb bestätigten die Experimente vom Juni 2006, die die Genauigkeit der Synchronisation der HF-Phase zwischen den beiden Kavitäten auf $\pm 2^\circ$ bestimmten [2]. Die Bestimmung der Einflüsse auf die Strahleigenschaften und einer eventuellen Emmitanzaufweitung war aufgrund der schwierigen Strahlverhältnisse nicht möglich, da einerseits die Intensitätsschwankungen reproduzierbare Bedingungen verhinderten und andererseits die beim Strahleinfang verursachten starken Dipolschwingungen des Ionenstrahls eine Unterscheidung zwischen problematischem Einfang oder Störungen durch den 2-Kavitätenbetrieb nicht möglich war.

Für die gezielte Anregung von Quadrupolschwingungen konnte gezeigt werden, dass es prinzipiell möglich ist, mit dem von uns gewählten Verfahren Oszillationen anzuregen. Eine quantitative Bewertung von Anregungs- und Dämpfungsmechanismen war nicht möglich.

Daher wurde auf eine detaillierte Ausarbeitung an dieser Stelle verzichtet, da zwischenzeitlich erfolgreich Experimente durchgeführt werden konnten, die in einer späteren Ausarbeitung beschrieben werden.

2. Randbedingungen der Messungen:

Für die Maschinenexperimente stand eine MEVVA-Ionenquelle zur Verfügung. Der Ionenstrahl ($^{12}\text{Mg}^{8+}$) wurde mit einer Energie von 11,4 MeV/u ins SIS injiziert und ohne Kühlung beschleunigt. Die zur Verfügung gestellten Ionenströme schwankten innerhalb einer Größenordnung und lagen bei einem durch den Strahltrafo gemittelten Wert von maximal 13 mA (\sim einige 10^9 Ionen per Bunch). Aufgrund der instabilen Ionenströme war eine Einstellung der Meßgeräte außerordentlich problematisch und nach jeder Einzelmessung mussten die Ergebnisse auf Verwertbarkeit geprüft und gegebenenfalls wiederholt werden, bevor andere Experiment-Einstellungen gewählt werden konnten. Das geplante systematische Vorgehen war nur schwierig umzusetzen.

Ionenquelle		MEVVA
Ionenspezies		$^{12}\text{Mg}^{8+}$
Injektionsenergie ins SIS	[MeV/u]	11,4
Teilchenzahl per Bunch		einige 10^9
Strahlstrom	[mA]	13 max.

Tab.1 Für alle Experimente gemeinsame Einstellungen der virtuellen Beschleuniger, die für die Messungen verwendet wurden.

3. Beschreibung der Experimente

3.1 Meßaufbau

Zeitaufgelöste Bunchprofil- und Phasen-Messungen:

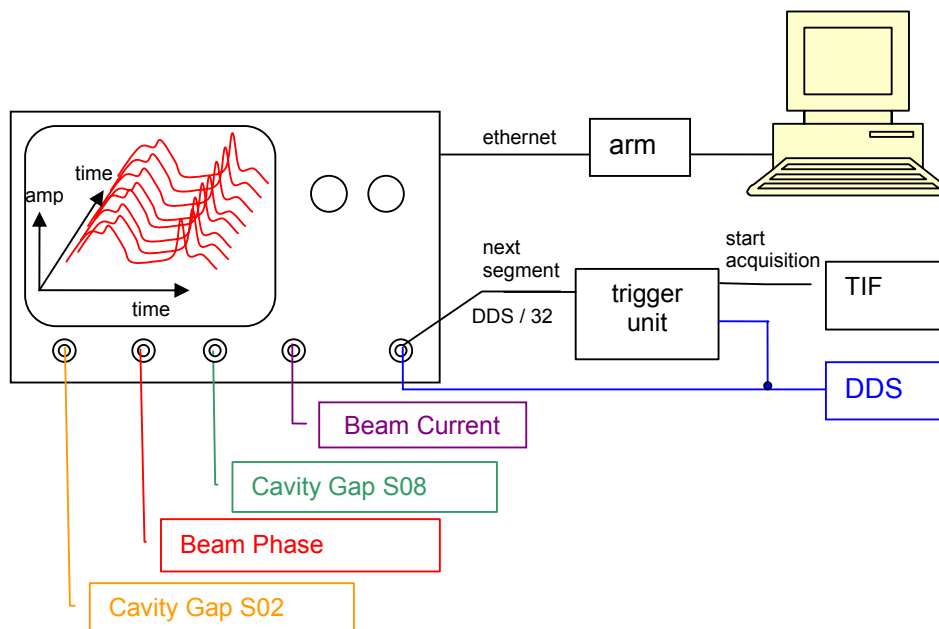


Abb. 1 Blockbild der verwendeten Messeinrichtung für zeitaufgelöste Bunchprofil- und Phasen-Messungen [3], je nach Experiment wurden an den 4 Eingangskanälen des Speicheroszilloskops Gap-Spannung, Strahlphasensonden-Signale, Frequenzreferenzen (DDS) oder Ionenstromsignale vom Strahltrafo aufgezeichnet.

In Abb.1 ist der verwendete Aufbau für zeitaufgelöste Bunchprofil- und Strahlphasenmessungen dargestellt. Der verwendete Speicheroszillograph (LeCroy Waverunner 44xi) bietet eine sequenzielle Triggerung, die es ermöglicht, bis zu 10000 kurze Messungen nacheinander aufzunehmen, um die zeitliche Entwicklung eines schnellen Signals über einen längeren Verlauf aufzuzeichnen. Die Darstellung erfolgt in Waterfall Plots, die eine schnelle Bewertung der Messungen ermöglicht. Für eine weitere Quantifizierung der Ergebnisse wurde auf die Rohdaten des Oszillographen zurückgegriffen, die mit dem Software-Paketen *Origin*, *Mathematica* und eigener Software weiter bearbeitet und ausgewertet wurden.

Strahlphasenmessungen mit DSP-System

Für Strahlphasenmessungen wurde das in der HF-Gruppe entwickelte DSP-Meß- und Regelsystem [1] verwendet, das auch für die Kavitätsynchronisation eingesetzt wird. In Abb. 2 ist die prinzipielle Funktionsweise erläutert.

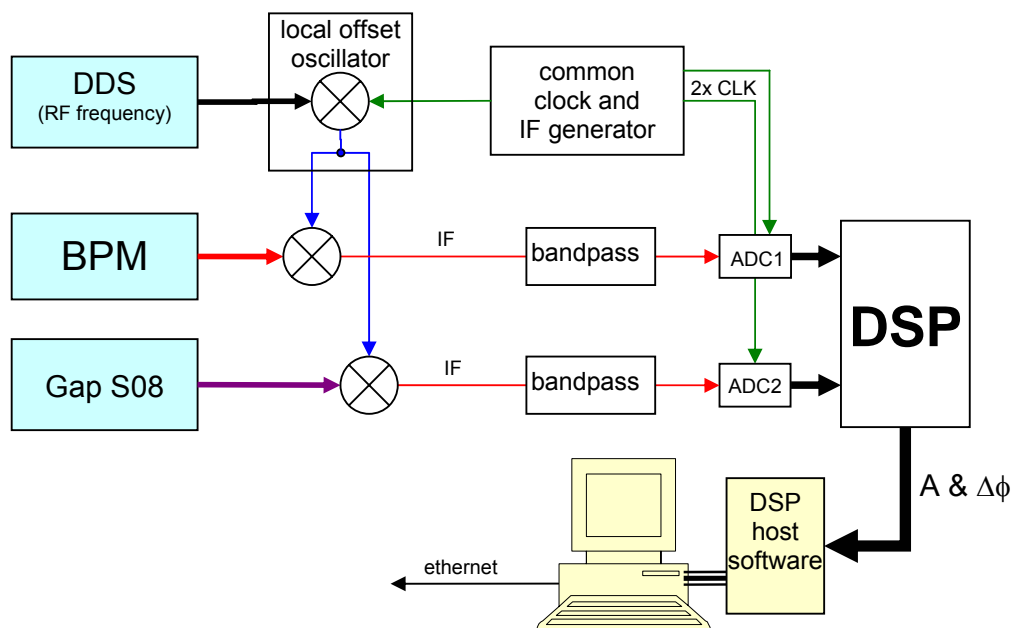


Abb. 2 Blockbild des DSP-Systems für Strahlphasenmessungen [3], das auch zur Kavitätsynchronisation eingesetzt wird; ausführlichere Informationen in [1], an den beiden Eingangskanälen wurden je nach Experiment Gap-Spannungen der beiden Kavitäten oder Signale der Strahlphasensonde aufgezeichnet.

Die Erfassung diverser Betriebsparameter (Rampen-Sollwerte, Ionenstrom) erfolgte mit Hilfe des von der HF-Gruppe entwickelten Datenquisitionssystems, das mittlerweile für die routinemäßige Überwachung der Kavitätensysteme eingesetzt wird [4], [<http://www-win.gsi.de/hf%2Dmonitoring/RollEvent.htm>].

3.2 Bestimmung der Kavitätenimpedanz am SIS18

Für die Bestimmung der Kavitätenimpedanz wurde die an der nicht zur Beschleunigung eingesetzten Slave-Kavität (S08BE2) durch den Ionenstrom induzierte Spannung bei offenem Gapschalter gemessen (Beamloading an der Kavitätenimpedanz). Hierzu wurden die Resonanzkurven der Kavität für verschiedene Vormagnetisierungen von 60 bis 300A aufgezeichnet. Als Anregung diente der Ionenstrahl in einem Beschleunigungszyklus von 11,4 MeV/u auf ca. 600MeV/u (dies entspricht einem Frequenzhub der Hochfrequenzspannung von ca. 859 kHz bis 4,2 MHz).

In Abb. 3 ist exemplarisch die FFT-Analyse einer derartigen Messung dargestellt. Für eine Vormagnetisierung von 294A ergibt sich eine Resonanzfrequenz der Kavität von 3,835 MHz. Die Kavität zeigt eine einzelne ausgeprägte Resonanz ohne erkennbare parasitäre Komponenten in anderen Frequenzbereichen. Die Signale bei niedrigeren Frequenzen folgen aus einer Anregung der Kavität durch oberharmonische Frequenzkomponenten im Ionenstrahlsignal während der Beschleunigungsrampe. Die Messungen wurden für 3 Arbeitspunkte der Kavitätenendstufe durchgeführt (systematische Untersuchung im A- und B-Betrieb, punktuelle Messungen im AB-Betrieb). Zu allen genannten Einstellungen erfolgten mindestens 3 Messungen, um Vergleichsmessungen für die Auswertung zu haben. Die Betriebsparameter der Endstufenröhre sind in Tabelle 2 aufgelistet.

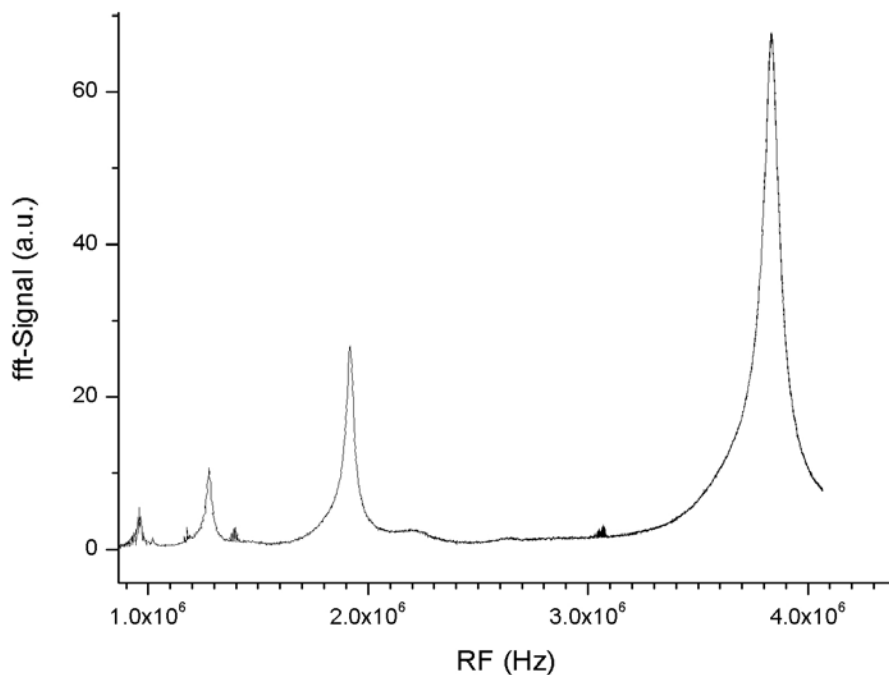


Abb.3: FFT-Analyse der durch den Strahl induzierten Spannung an der nicht zur Beschleunigung eingesetzten Kavität (offener Gapschalter) für eine komplette Beschleunigungsrampe; bei einer Vormagnetisierung der Kavität von 294A liegt die Resonanz der Kavität bei 3,835MHz; die Peaks bei niedrigeren Frequenzen entstehen durch Anregung der Kavität durch oberharmonische Komponenten im Ionenstrahlsignal während der Beschleunigungsrampe.

Modus	Anodenstrom I_A [A]	Anodenspannung U_A [kV]
A-Betrieb	4,6	13,1
AB-Betrieb	2,0	13,6
B-Betrieb	0,19	14

Tab.2 Betriebsparameter der Röhre

Für jede der eingestellten Vormagnetisierungen wurde die Resonanzfrequenz (Frequenz bei maximaler Amplitude der Gapspannung) ermittelt. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 4 dargestellt.

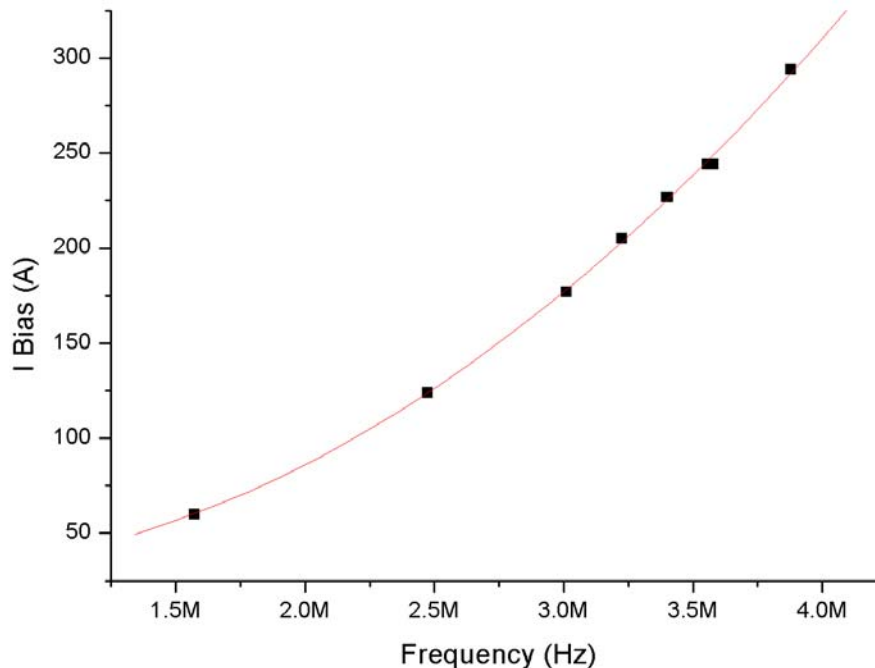


Abb.4: Darstellung der ermittelten Resonanzfrequenzen des Ionenstrahlsignals für die verschiedenen Vormagnetisierungen (I_{Bias})

Die Kavitätenimpedanz $|Z|$ wurde an jeder Resonanzstelle aus der induzierten Gap-Spannung und dem Ionenstrom ermittelt. Die Bestimmung des Ionenstroms erfolgte aus dem Signal der Strahlphasensonde und dem kalibrierten Wert des Strahltrafosignals. Exemplarische Vergleiche der Werte durch Berechnung des Ionenstroms über Teilchenzahl, Ladung, Frequenz und Bunchingfaktor (typ. 0,20) ergaben eine gute Übereinstimmung zwischen den Methoden (Die genaue Bunchform ist nicht berücksichtigt).

In Tab. 3 sind die Impedanzwerte zu den jeweiligen Resonanzfrequenzen im A-Betrieb der Verstärkerröhre aufgelistet. Es ergibt sich ein mittlerer Wert von **1150 Ω**

bei einer Standardabweichung von ca. 80Ω . Dies entspricht einem relativen Fehler von etwa 7%. Die Ergebnisse sind in Abb. 5 graphisch dargestellt.

Verstärkerröhre im A-Betrieb

I_{Bias} [A]	Resonanzfrequenz [Hz]	Impedanz [Ω]
60	1.715E+06	988.47
124	2.455E+06	1134.85
124	2.455E+06	1192.59
177	2.985E+06	1251.14
205	3.220E+06	1134.60
227	3.395E+06	1111.43
227	3.395E+06	1122.54
244	3.515E+06	1259.23
244	3.515E+06	1105.92
294	3.835E+06	1199.45
	Mittelwert	1150.02
	Standardabweichung	79.70
	rel. Fehler [%]	6.93

Tab.3: Kavitäten-Impedanzwerte für verschiedene Vormagnetisierungen; Röhre im A-Betrieb

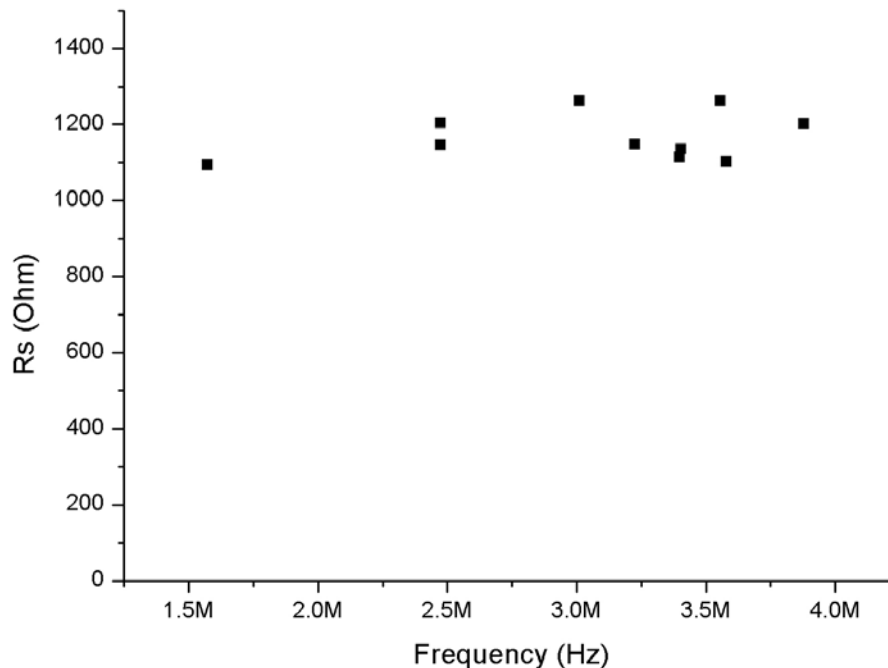


Abb.5: Abhängigkeit der Kavitätenimpedanz von der Resonanzfrequenz

In den Tabellen 4 und 5 sind die Impedanzwerte für die Arbeitspunkte B (2360Ω) und die punktuell bestimmten Werte für den AB-Betrieb (1800Ω) aufgelistet.

Eine Ursache für die schlechtere Statistik dieser Messungen ließ sich nicht zweifelsfrei klären. Eine Auswertung der Vergleichsmessungen lieferte keine Verbesserung.

Verstärkerröhre im B-Betrieb

I_{Bias} [A]	Resonanzfrequenz [Hz]	Impedanz [Ω]
57	1.675E+06	2980.15
57	1.675E+06	1948.90
122	2.475E+06	2299.64
144	2.710E+06	2598.92
144	2.710E+06	1942.69
144	2.697E+06	2701.15
224	3.390E+06	1956.31
253	3.585E+06	2451.31
	Mittelwert	2359.88
	Standardabweichung	392.09
	rel. Fehler [%]	16.61

Tab.4: Kavitäten-Impedanz für verschiedene Vormagnetisierungen; Röhre im B-Betrieb

Verstärkerröhre im AB-Betrieb

I_{Bias} [A]	Resonanzfrequenz (Hz)	Impedanz [Ω]
123	2.470E+06	1636.02
262	3.640E+06	1962.58
	Mittelwert	1799.30
	Standardabweichung	230.91
	rel. Fehler [%]	12.83

Tab.5: Kavitäten-Impedanz für 2 exemplarische Vormagnetisierungen; Röhre im AB-Betrieb

Die Bestimmung der Güte erfolgte für die verschiedenen Resonanzfrequenzen aus einer FFT-Analyse [4] der Beamloading-Spannung bei 50% Signalhöhe. Die Ergebnisse sind in Abb. 6 dargestellt.

$$Q = \frac{f_{\text{Resonance}}}{f_2 - f_1} \text{ bei 50\% Signalhöhe}$$

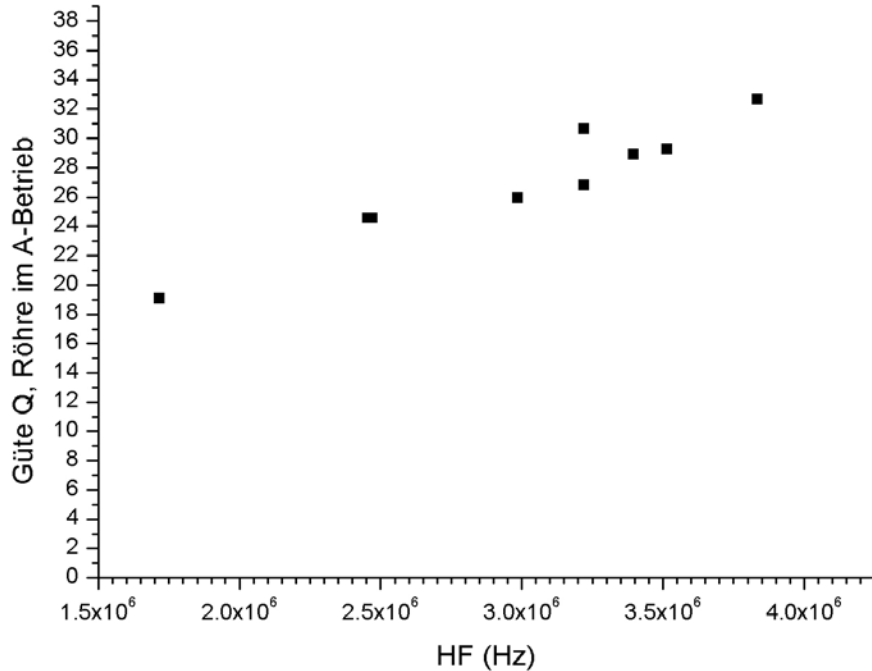


Abb.6: Güte der Kavität für die ermittelten Resonanzfrequenzen bei den jeweiligen Vormagnetisierungsströmen.

3.3 Messungen zum 1- und 2-Kavitätenbetrieb

Es wurden einige Versuche zum 1- und 2-Kavitätenbetrieb durchgeführt, die jedoch infolge der problematischen Strahlverhältnisse keine quantitativen Aussagen erlaubten. Als Vergleich diente eine Messung bei Beschleunigung mit nur einer Kavität; im 2-Kavitäten-Betrieb waren die HF-Amplituden so gewählt, dass sich die gleiche Summenspannung wie bei der Vergleichsmessung ergab. Folgende HF-Amplituden wurden eingestellt:

- Beschleunigung mit einer Kavität bei 12kV; Beschleunigung mit 2 Kavitäten bei je 6kV, gleichzeitig hochgefahren

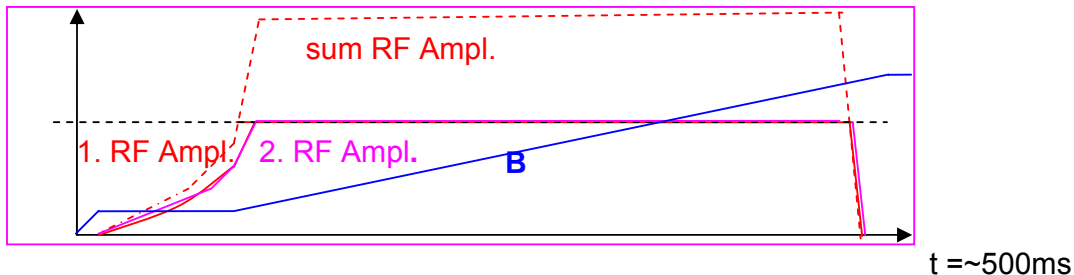


Abb. 7 Amplituden-Verlauf von HF-Spannung und B-Feld beim 1-/2-Kavitätenbetrieb, Kavitäten gleichzeitig hochgefahren

- Beide Kavitäten in Betrieb mit je 9 kV, gleichzeitig hochgefahren oder 1. Kavität bei 14kV und 2. bei 4kV; die 2. Kavität wird zu dem Zeitpunkt hochgefahren, wenn die erste Kavität ihren Maximalwert erreicht hat.

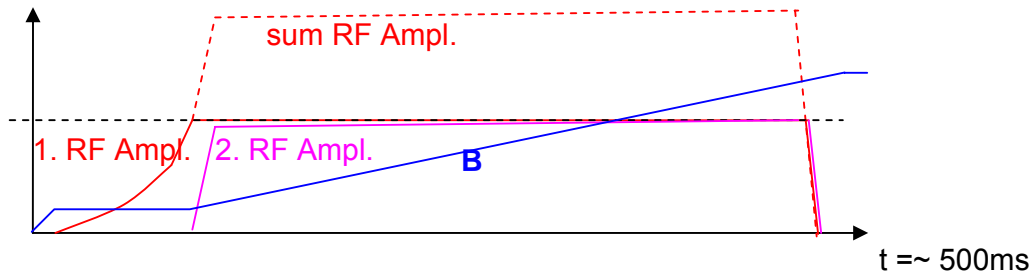


Abb. 8 Amplituden-Verlauf von HF-Spannung und B-Feld beim 1-/2-Kavitätenbetrieb, Kavitäten sequenziell hochgefahren

Die Auswertungen bestätigten die Versuche vom Juni 2006, die die Genauigkeit der Synchronisation der HF-Phase zwischen zwei Kavitäten auf $\pm 3^\circ$ bestimmten [2]. Die Einflüsse auf die Strahleigenschaften und eine Bestimmung einer eventuellen Emmitanzaufweitung war aufgrund der schwierigen Strahlverhältnisse nicht möglich, da einerseits die Intensitätsschwankungen reproduzierbare Bedingungen verhinderten und andererseits die beim Strahleinfang verursachten starken Dipolschwingungen des Ionenstrahls eine Unterscheidung zwischen problematischem Einfang oder Störungen durch den 2-Kavitätenbetrieb nicht möglich war. Daher wird an dieser Stelle auf eine detaillierte Auswertung verzichtet.

3.4 Gezielte Anregung von Quadrupolschwingungen

In der für dieses Experiment verbliebenen kurzen Restzeit konnte noch gezeigt werden, dass sich prinzipiell Quadrupoloszillationen im SIS 12/18 mit den von uns gewählten Methoden anregen lassen.

Die Anregung erfolgte auf zwei verschiedene Wege. Die dazugehörigen Rampen sind in den Abb. 9 und 10 prinzipiell dargestellt.

1. Nach Strahleinfang und Beschleunigung auf eine niedrige Flattop-Energie von ca. 80MeV/u erfolgt ein abruptes Hochreißen der HF-Amplitude (Abb. 9).
2. Zusätzlich zum Hochreißen der HF-Amplitude wird anschließend auf die HF-Amplitude eine Rechteckmodulation im Bereich der doppelten, theoretisch zu erwartenden, Synchrotronfrequenz aufmoduliert (3,8kHz, Abb. 10).

Mit Methode 1 ergibt sich eine Vergrößerung des Buckets in Richtung der Energie ΔE und der Bunch beginnt im Phasenraum mit der doppelten Synchrotronfrequenz zu rotieren [3]. Allerdings waren in diesem Fall keine Oszillationen zu beobachten. Die zweite Methode beinhaltet zusätzlich ein konstantes Treiben der Instabilität durch überlagerte Rechteckspannung, so dass theoretisch je nach Phasenlage eine Anregung oder Dämpfung von Quadrupoloszillationen erreicht werden kann. Im durchgeführten Experiment konnte lediglich gezeigt werden, dass eine kurzzeitige Anregung von Quadrupoloszillationen möglich war; eine genauere Untersuchung war nicht weiter möglich, da die zugestandene Meßzeit abgelaufen war. In der Abbildung 11 ist erkennbar, dass sich zu dem Zeitpunkt, an dem die Rechteckmodulation einsetzte, zusätzlich zur anfänglich vorhandenen Dipolschwingung eine Quadrupoloszillation überlagerte. Die dominierende Dipolschwingung des Bunches resultierte aus den während der gesamten Experimentzeit problematischen Strahlverhältnissen. Es ließen sich dennoch Frequenzwerte für die

Dipolschwingungen (1,7kHz) und für die Quadrupoloszillationen (3,4kHz) ermitteln. Die Dauer der Aufzeichnung betrug etwa 3msec.

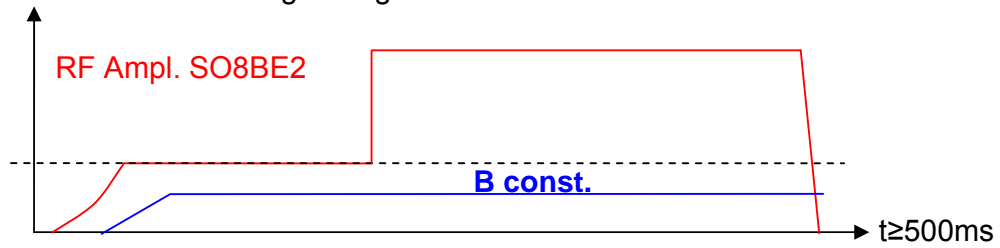


Abb. 9: Amplituden-Verlauf von HF-Spannung und B-Feld bei der Anregung von Quadrupolschwingungen

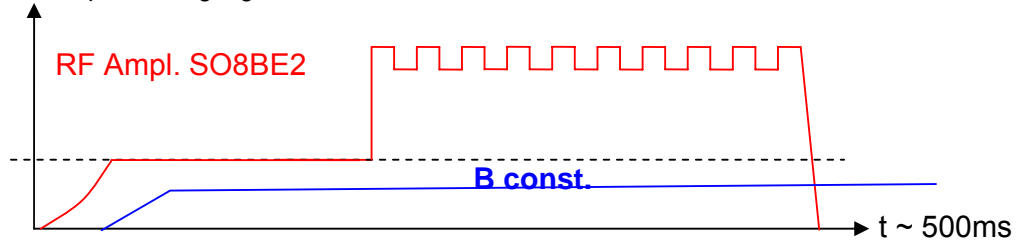


Abb.10 Amplituden-Verlauf von HF-Spannung und B-Feld bei der Anregung von Quadrupolschwingungen, die Frequenz der überlagerten Rechteckmodulation betrug 3,8kHz

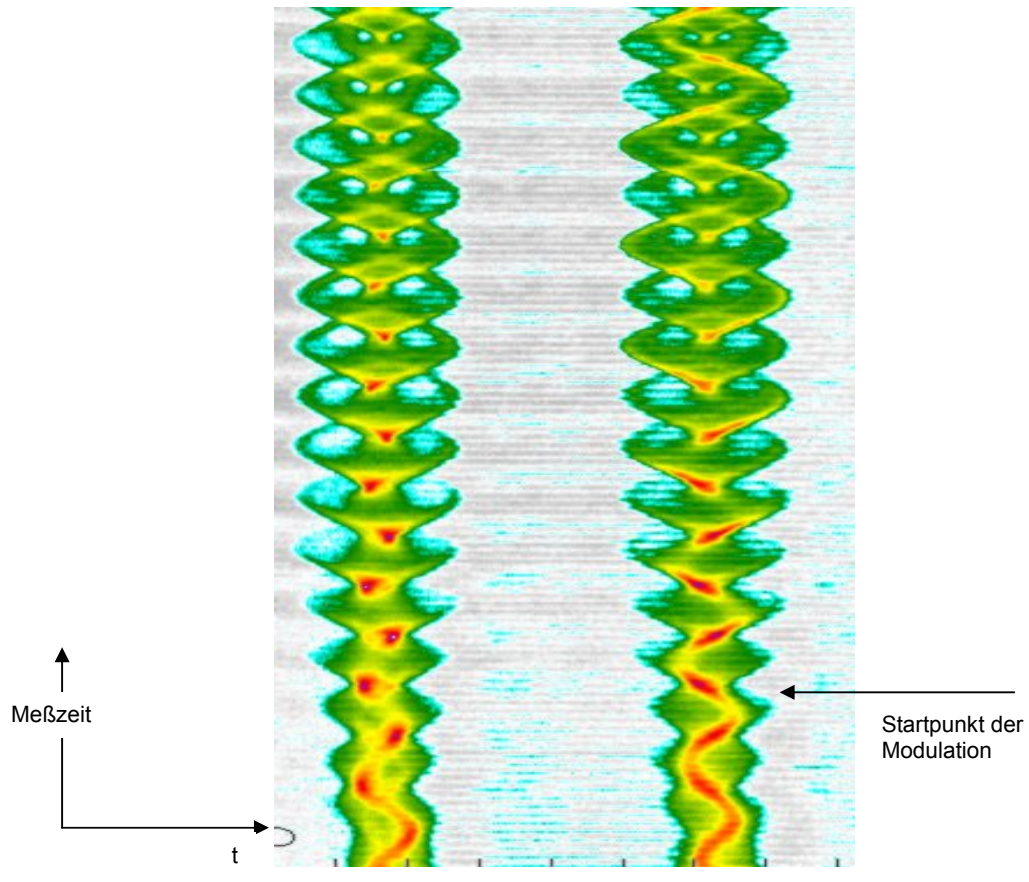


Abb.10 Waterfallplot-Darstellung von Bunchprofilmessung. Es ist deutlich erkennbar, dass zusätzlich zu der während der Experimentnacht permanent auftretenden Dipolschwingung nach dem Strahleinfang eine Quadrupolschwingung durch abruptes Hochfahren und Modulieren der HF-Amplitude angeregt wird. Die Dauer der dargestellten Aufzeichnung beträgt ca. 3msec.

4. Referenzen

- [1] H. Klingbeil, A Fast DSP-Based Phase-Detector for Closed-Loop RF Control in Synchrotrons, IEEE Transactions in Instrumentation and Measurements, Vol.54, No. 3, June 2005
- [2] H. Klingbeil et al. Commissioning of the SIS12/18 Cavity Synchronization System, GSI internal Note 2006
- [3] Longitudinal Feedback Systems for FAIR, U. Laier, M. Mehler, G. Schreiber, B. Zipfel, Strategiepapier, GSI, 03.11.2006;
- [4] P. Moritz, PCData acquisition system, private communication