

Maschinenexperimente zur transversalen Strahlanregung und Inbetriebnahme des TFS am SIS

M. Kirk, U. Blell, O. Boine-Frankenheim

Einleitung

Dieses Maschinenexperiment wurde aus zwei Gründen durchgeführt. Erstens sollte die Inbetriebnahme des Transversalen Feedbacksystems (TFS) fortgesetzt werden. Die hierzu erforderlichen kohärenten Betatronschwingungen wurden mit dem Q-Kicker erzeugt und mit dem TFS bedämpft. Der Q-Kicker ist ein schnell gepulster Magnet („Window Frame Type“) der den Strahl gleichzeitig horizontal und vertikal mit einem δ -Puls anregen kann. Der zweite Schwerpunkt dieses Maschinenexperiment war, aus der Analyse der zeitabhängigen transversalen Ablage des Strahls den Betatron Tune und die Chromatizität zu ermitteln. Eine daraus folgende langfristige Zielsetzung ist es, aus dem Zeitsignal des angeregten Strahls quantitative Aussagen über die Koppelimpedanzen zu gewinnen. Bisher gibt es hierzu wenige Informationen am SIS, jedoch ist die Kenntnis der transversalen – und longitudinaler Koppelimpedanz von essentieller Bedeutung, wenn das SIS 18 als Boosterring für das geplante SIS100/300 eingesetzt werden soll. Die hohen Phasenraumdichten des Strahls erfordern eine detaillierte Kenntnis der Koppelimpedanzen sowie der natürlichen Dämpfung um drohende Instabilitäten zu vermeiden bzw. mit dem TFS zu bekämpfen.

Die natürliche Dämpfung kohärenter transversaler Schwingungen ist nicht nur allein von der Größe der Koppelimpedanz abhängig, sondern wird auch von der Strahlintensität, Chromatizität und Impulsunschärfe bestimmt. Insbesondere die Impulsunschärfe diente bei diesem Maschinenexperiment als Parameter zur Variation der Schwingungsdauer eines zuvor mit dem Q-Kicker angeregten DC-Strahls.

Theorie

Prinzipielle Funktion des TFS

Zur Detektion einer auftretenden transversalen kohärenter Betatronschwingung wird das Differenzsignal einer Positionssonde in der horizontalen bzw. vertikalen Ebene gebildet. Das daraus resultierende Signal ist ein Maß der transversalen Ablage und dient als Regelgröße dem TFS. Dieses Signal wird verstärkt und einem Exciter zur Strahlkorrektur (Winkelkorrektur) rückgekoppelt. Das gemessene Differenzsignal wird mit einer geeigneten Elektronik so verzögert, dass genau der Teil des Strahls im Exciter korrigiert wird, der zuvor in der Positionssonde gemessen wurde. Der Strahl wird durch diese der Strahlablage proportionaler Rückkopplung exponentiell gedämpft. Das TFS ist folglich eine aktive Maßnahme zur Bekämpfung von transversalen Instabilitäten. Die Bandbreite des TFS ist 40 MHz, somit ist dieses System in der Lage auftretende Instabilitäten in diesem Frequenzbereich zu bedämpfen.

Landau Dämpfung

Die Grundlagen der Landau Dämpfung sollen im Folgenden in Kurzform dargelegt werden. Die Theorie geht davon aus, dass die Strahlbewegungen in horizontaler und vertikaler Ebene entkoppelt sind. Die Betatronfrequenz wird unabhängig von der Amplitude der Betatronschwingung betrachtet. Der Strahl wird als eine Summe von harmonischen Oszillatoren aufgefasst. Jeder dieser Oszillatoren hat seine eigene Resonanzfrequenz (Betatronfrequenz) mit einer charakteristischen Breite. Wobei die chromatischen Abweichungen der Quadrupole und der Dipole die Hauptursache dieser Verbreitung in den Betatronfrequenzen sind. Die Chromatizität ist definiert als

$$\xi = -\Delta v / (\Delta p / p),$$

wobei Δp die longitudinale Impulsabweichung von dem synchronen Impuls des Sollteilchens und Δv die entsprechende Verschiebung im Betatronstune sind. Eine zunehmende Impulsverbreitung führt zwangsläufig zu einer erhöhten Phasenmischung in (x, x') und (y, y') des Strahls. Ein um seinen Schwerpunkt transversal oszillierender Strahl wird durch diese Eigenschaften gedämpft. Die Art der Dämpfung wird durch die longitudinale Impulsverteilung und der Verteilung im transversalen Phasenraum vor der Anregung bestimmt. Für eine Gaußsche longitudinale Impulsverteilung kann gezeigt werden, dass die Einhüllende der Strahlschwingung die Form

$$E(t) = A \exp(-\sigma_\omega^2 t^2 / 2) \quad (1)$$

hat. Wobei σ_ω die Standardabweichung von $f(\omega_\beta)$ ist. Für eine Lorentz – Verteilung von $f(\omega_\beta)$ ergibt sich

$$E(t) = A \exp(-bt), \quad (2)$$

wobei $b = FWHM / 2$ von $f(\omega_\beta)$ ist.

Bei diesen beiden Gleichungen wurde angenommen, dass die Breite der Betatronschwingungen im Vergleich zur Mittenfrequenz gering ist.

Unter der Annahme, dass b bzw. σ_ω bekannt sind, erhält man den mathematischen Ausdruck

$$\tau = \Delta f_\beta^{-1} \quad (3)$$

wobei τ die charakteristische Dämpfungszeit darstellt.

Die Funktion

$$\Delta f_\beta = f_0 \xi \delta \quad (4)$$

wird durch die Größen f_0 (Umlauffrequenz), ξ (Chromatizität) und $\delta = \Delta p / p_0$ beschrieben. Für eine Lorentz-Verteilung bedeutet τ die Zeit bis $E(t)$ 37 % seines Ausgangswertes erreicht hat, und δ entspricht "der Hälfte des FWHM".

Experiment

Durchgeführt wurden die Experimente an einem U^{73+} bzw. Xe^{43+} DC - Strahl bei Injektionsenergie (11,4 MeV / u). Die Intensität variierte bei Uran von $5 \cdot 10^8$ bis $1 \cdot 10^9$ und bei Xenon von $1 \cdot 10^7$ bis. Zur Reduzierung der longitudinalen Impulsunschärfe wurde der Strahl wahlweise mit dem Elektronenkühler gekühlt. Dadurch bedingt konnte die Dämpfungszeit variiert werden. Die Dauer der Strahlanregung mit dem Q-Kicker betrug $3 \mu s$, dies entspricht ca. 60 % der Umlaufzeit. Die Strahlanregung erfolgte unmittelbar nach der Injektion bzw. nach einer einstellbaren Kühlzeit.

Das TFS konnte synchron mit dem Q-Kicker aktiviert und nach einer bestimmten Zeit wieder deaktiviert werden, so dass eine zeitlich gezielte Bedämpfung des Strahls möglich war.

Messergebnisse

Die Betatronschwingungen wurden mit einem Strahlpositionsmonitor gemessen.

Abbildung 1 zeigt eine typische horizontale Betatronschwingung nach der Q-Kicker Anregung im Zeitbereich.

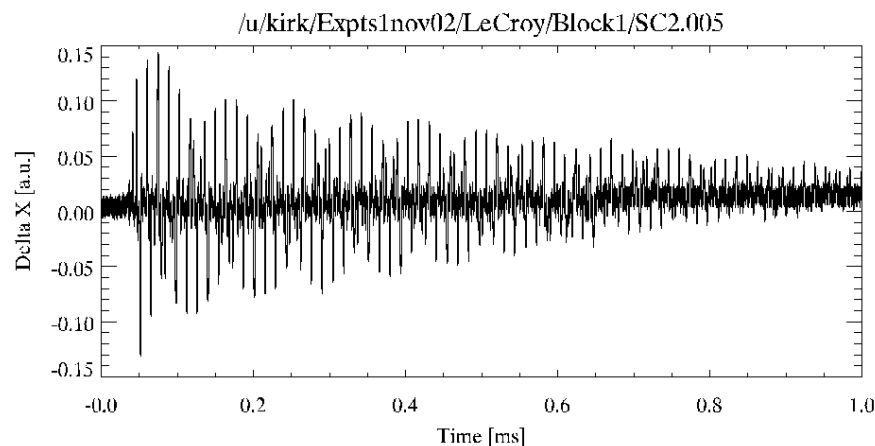


Abbildung 1: Gemessenes Differenzsignal eines Strahls nach der Q-Kicker Anregung

Die Messdaten wurden mit einem speziell für diese Zwecke geschriebenen IDL Programm ausgewertet. Anhand der Messdaten kann hiermit die Umhüllende der abklingenden Schwingung und somit die Dämpfungsrate bestimmt werden. Eine FFT des Signals ermittelt die Umlauffrequenz mit den entsprechenden Harmonischen und den fraktionalen Anteil des Tune aus den Seitenbändern. Weiterhin lässt sich nach der Bestimmung der longitudinalen Impulsschärfe mit Hilfe eines Spektrumanalysators die Chromatizität in der entsprechenden Schwingungsebene bestimmen (siehe Gleichung 4).

Abbildung 2 verdeutlicht die Einhüllende der abklingenden Schwingung für einen gekühlten und nicht gekühlten Strahl. Nach einer Kühlzeit von 300 ms war die longitudinale Impulsunschärfe im Vergleich zu einem ungekühlten Strahl deutlich reduziert. Dadurch erhöhte sich die Dämpfungszeit von 0,84 ms auf 2,32 ms wie dies aus den beiden Gleichungen 3 und 4 zu erwarten war.

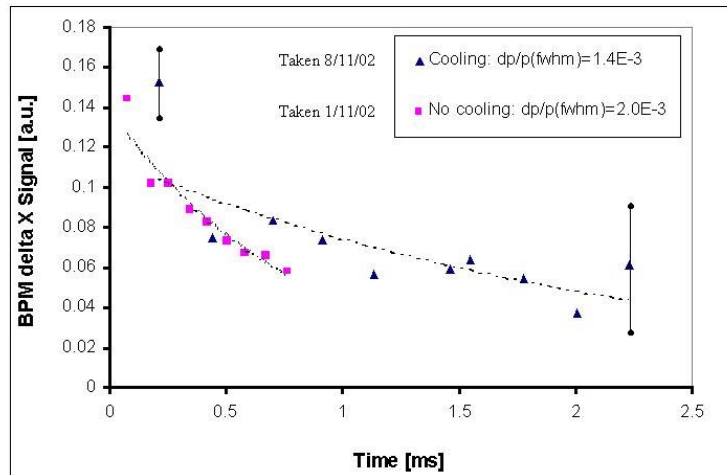


Abbildung 2: Der Vergleich der Dämpfungseigenschaften eines gekühlten und ungekühlten Strahls

Eine FFT Auswertung der Betatronschwingung führt zu einem horizontalen Q-Wert von 4,3. Im Vergleich hierzu lag der Sollwert für den horizontalen Q-Wert bei 4,29.

Eine Auswertung der horizontalen Chromatizität ergibt einen Wert von $-5,4$. Der Sollwert der horizontalen Chromatizität war $-4,0$, so dass hier eine nicht so gute Übereinstimmung zwischen der Messung und Sollwertvorgabe vorhanden ist. Die Unterschiede lassen sich dadurch erklären, dass die Auswertung von einer Gaußförmigen longitudinaler Impulsverteilung ausgeht. Weiterhin hat man bei der Bestimmung der Einhüllenden eine statistische Unsicherheit.

Bei der fortgesetzten Inbetriebnahme des TFS wurde versucht, die durch den Q-Kicker erzeugten kohärenten Strahlschwingungen zu bedämpfen. Bei diesem Verfahren überlagern sich zwei Arten von Dämpfung. Zum einen ist es die hier bereits ausführlich beschriebene natürliche Dämpfung des angeregten Strahls und zum anderen die Dämpfung des TFS als ein additiver Effekt. In der Abbildung 3 ist die Einhüllende der Betatronschwingung für den Fall mit und ohne TFS dargestellt.

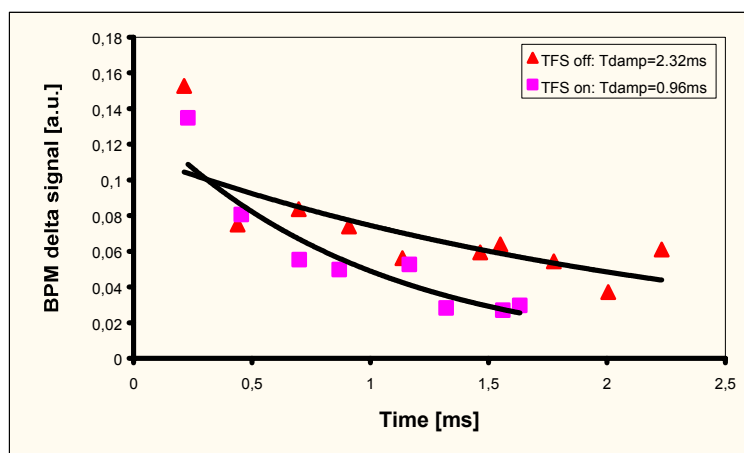


Abbildung 3 Einhüllende der gedämpften Betatronschwingung mit und ohne TFS

Deutlich ist eine zusätzliche bedämpfende Wirkung des TFS zu erkennen. Die Dämpfungs-konstante konnte bei dieser Messung von 2,32 ms auf 0,96 ms reduziert werden.

In der Abbildung 4 ist jeweils das zeitlich aufgelöste Zeitsignal der Betatronschwingung zu erkennen.

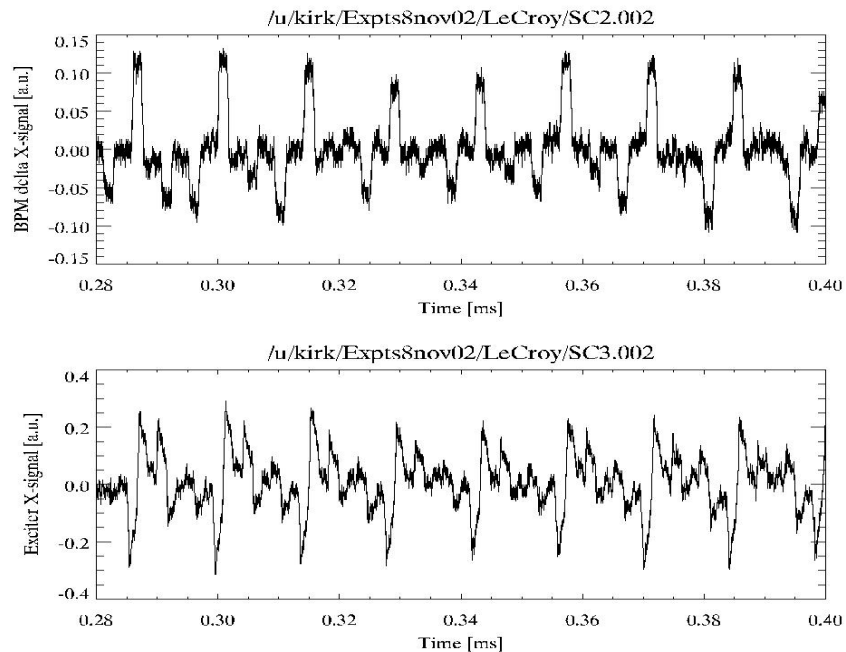


Abbildung 4 Eingangs- und Korrektursignal des TFS

Das obere Bild in der Abbildung 4 zeigt das Eingangssignal des TFS (Deltasignal eines Strahlpositionsmonitors) und das dazugehörige untere Bild das Korrektursignal am Exciter. Beide Signale sind im Idealfall identisch. Die hier auftretenden Unterschiede sind noch nicht vollständig geklärt. Unterschiede in diesen beiden Signalen verringern den Wirkungsgrad eines TFS und müssen deshalb noch genau untersucht werden.

Bei Messungen mit gekühltem Strahl wurde beobachtet, dass bei einer kurzen Aktivierung des TFS eine Bedämpfung der Betatronschwingung nicht erreicht wurde. Die Aktivierungszeit des TFS war hierbei deutlich kleiner als die natürliche Schwingungsdauer des Strahls. Jedoch nach der Deaktivierung des TFS wurde eine deutliche Bedämpfung der Betatronschwingung sichtbar. Vermutlich wurde der Strahl durch das TFS nicht bedämpft, sondern longitudinal aufgeheizt. Die Vergrößerung der longitudinalen Impulsunschärfe führt zu einer Reduzierung der Dämpfungs-konstanten. Die Ursache liegt vermutlich in einer nicht korrekten Einstellung der TFS - Parameter.

Zusammenfassung

Mit der δ Puls Anregung eines DC-Strahls bei Injektionsenergie (11,4 MeV / u) wurde eine kohärente Betatronschwingung erzeugt. Eine Auswertung dieser Schwingungen ergab die folgenden Ergebnisse:

- Es konnte gezeigt werden, dass die Abklingzeit der Strahlschwingung durch eine Reduzierung der longitudinalen Impulsunschärfe vergrößert werden konnte. Dies ist, wie erwartet, konsistent mit der Theorie der Landau Dämpfung.
- Die Bestimmung des horizontalen Q-Wertes ergibt einen Wert von 4,3 und entspricht mit einer geringen Abweichung (0.01) der Sollwertvorgabe.
- Die Auswertung der kohärenten Betatronschwingung ergibt einen Wert von $-5,4$ für die horizontale Chromatizität und stimmt damit nicht so gut zwischen Messung und Sollwertvorgabe ($-4,0$) überein.
- Mit dem TFS konnten kohärente Strahlschwingungen bedämpft werden, d.h. die durch das TFS verursachte 'Dämpfung' war stärker als die natürliche Dämpfung durch die Chromatizität.
- Abweichungen der Signalform zwischen dem gemessenen Differenzsignal des Strahls und dem Korrektursignal müssen noch geklärt werden.

Diese grundlegenden Anregungsexperimente mit dem Q-Kicker sind die Ausgangsbasis für weitere Untersuchungen zum TFS und zu den generellen Dämpfungseigenschaften intensiver Strahlen.

Es hat sich gezeigt, dass für weitere TFS Experimente eine minimale Ionenzahl * Ladungszahl von $1E10$ nötig ist. Ab diesem Wert ergibt sich ein brauchbarer Signal – Rauschabstand. Ist der Wert zu klein, reduziert sich die Auflösung der digitalen Signale und / oder der Strahl wird mit einem zu hohen Rauschanteil korrigiert und heizt damit, wie hier gezeigt, den Strahl auf.

Weiterhin hat es sich als notwendig herausgestellt, die natürlichen Dämpfungszeiten durch Kühlung zu verlängern. Es macht wenig Sinn das TFS an 'heissen' Strahlen zu testen, die ausreichend natürliche Dämpfung besitzen und daher auch kein TFS benötigen. Alternativ kann die natürliche Dämpfungszeit auch durch Kompensation der Chromatizität verlängert werden. Die zuverlässige Kontrolle der SIS Chromatizität durch die Sextupole ist daher entscheidend für die weiteren Experimente zum TFS und zur geplanten Identifikation von Strahlintensitätseffekten und Ringimpedanzen aus den Dämpfungseigenschaften.