

Development of the Timing System for the Bunch-to-Bucket Transfer between the FAIR Accelerators

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Naturwissenschaften

vorgelegt beim Fachbereich Physik
der Goethe-Universität
in Frankfurt am Main

von
Jiaoni Bai
aus Taiyuan, Shanxi, China

Frankfurt am Main 2017
(D 30)

vom Fachbereich Physik der

Goethe-Universität als Dissertation angenommen.

Dekan:

Prof. Dr. Owe Philipsen

Gutachter:

Prof. Dr. Oliver Kester

Prof. Dr. Ulrich Ratzinger

Datum der Disputation:

I would like to dedicate this dissertation to my dear parents,
loving husband and good friends ...

Kurzfassung

Die *Facility for Antiproton and Ion Research* (FAIR) ist eine im Bau befindliche, internationale Teilchenbeschleunigeranlage, die unter der Leitung der GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH errichtet wird. Sie hat zum Ziel, hochenergetische Ionenstrahlen zu erzeugen. FAIR wird in der Lage sein Strahlen höchster Intensität für Elemente vom leichten Wasserstoff bis zum schweren Uran zur Verfügung zu stellen und darüber hinaus Antiprotonen und exotische Nuklide zu erzeugen. Die existierende Beschleunigeranlage der GSI wird der Injektor der FAIR-Beschleuniger sein und umfasst den Linearbeschleuniger UNILAC und das Schwerionen-Synchrotron SIS18. Desweiteren umfasst die GSI Beschleunigeranlage zwei Speicherringe, den Experimentierspeicherring (ESR) und den CRYRING. Der FAIR-Beschleunigerkomplex besteht in seiner Startversion aus drei Ringbeschleunigern mit unterschiedlichen Funktionalitäten und Aufgaben. Der Primärstrahltrieb ist das supraleitende Schwerionen-Synchrotron SIS100, das die Beschleunigung von stabilen Elementen mit höchster Intensität erlaubt. Der Primärstrahl wird dazu genutzt Sekundärteilchen zu produzieren, die dem *Collector Ring* (CR) über Hochenergieseparatoren zugeführt werden. Für die Präparation der Sekundärstrahlen und gleichzeitig auch für Experimente dienen der CR und der *High Energy Storage Ring* (HESR). Der CR dient zur Sekundärstrahl-Akkumulation und verbessert die Strahlqualität durch stochastisches Kühlen. Die Ringbeschleuniger der GSI und von FAIR haben sehr unterschiedliche Verhältnisse ihrer Umfänge. Zum Beispiel ist das Umfangsverhältnis zwischen dem SIS18 und dem SIS100 ganzzahlig, zwischen dem SIS18 und dem ESR annähernd ganzzahlig und zwischen dem CR und dem HESR ist es weit weg von einem ganzzahligen Verhältnis. Alle FAIR-Ringbeschleuniger sind über Strahltransportlinien, die Targets zur Produktion von Sekundärteilchen und den zugehörigen Hochenergieseparatoren verbunden. Für FAIR ist es nicht nur erforderlich Primärstrahlen vom einen zum anderen Ring zu transferieren, sondern auch Sekundärstrahlen, wie Antiprotonen oder exotische Nuklide, die im Antiprotonen-Target, im Fragmentseparator oder im Superfragmentseparator erzeugt werden, wieder in Speicherringen einzufangen. Zudem muss ein *Bunch* von einem Ring in das *Bucket* eines anderen Rings innerhalb einer bestimmten Zeit (z.B. unter 10 ms in fast allen FAIR-Anwendungsfällen) und mit einem akzeptablen *Bunch-to-Bucket*-Injektions-Mittensversatz (weniger als $\pm 1^\circ$ in den meisten FAIR-Anwendungsfällen) transferiert werden. Daher ist ein flexibles *FAIR Bunch-to-Bucket (B2B) Transfer System* erforderlich, um die verschiedenen und komplexen B2B-Transfers zwischen den zukünftigen FAIR-Ringen realisieren zu können. Im Fokus dieser Arbeit ist natürlich der Teilchentransfer vom SIS18 zum SIS100, welcher am Beispiel des Transfers zwischen SIS18 zum ESR und vom ESR zum CRYRING an der GSI getestet werden kann. Das System wird auf Basis der für FAIR vorgesehen, technischen Infrastruktur entwickelt. Dazu zählen das FAIR-Low-Level-Radio-Frequency

(LLRF)-System und das Kontrollsystem für FAIR. Das *FAIR B2B Transfer System* hat eine Schnittstelle zum FAIR-Maschinenschutzsystem (*Machine Protection System*), welches das SIS100 und die nachgeschalteten Beschleuniger und Experimente vor Schaden durch Fehlfunktionen und dadurch bedingten Primärstrahlverlust bei hohen Intensitäten bewahrt. Außerdem werden der Status des Strahls und der Zeitpunkt der Strahlinjektion vom *FAIR B2B Transfer System* an die Geräte der Strahldiagnose gemeldet.

Diese Doktorarbeit stellt vor allem die Grundidee, das grundlegende Verfahren und die konzeptionelle Realisierung des *FAIR B2B Transfer System* vor. Darüber hinaus werden die Anforderungen an das Timing analytisch ermittelt und vorgestellt. Für das *FAIR B2B Transfer System* wurde ein zweistufiger Synchronisationsprozess erarbeitet, welcher den exakten Kickzeitpunkt bestimmt. In der ersten Stufe, der „Grobsynchronisation“ gibt ein Synchronisationsfenster ein Zeitintervall vor, in dem der B2B-Injektions-Mittenversatz zwischen *Bunch* und *Bucket* innerhalb der ermittelten Toleranzgrenze bleibt. Innerhalb dieses Synchronisationsfensters müssen die Kicker zum richtigen Zeitpunkt ausgelöst werden, um einen *Bunch* in das richtige, leere *Bucket* der Zielmaschine zu schießen. Das übernimmt die sogenannte „Feinsynchronisation“. Die „Feinsynchronisation“ ist das *Bucket Indication Signal*, welches über ein festes Delay verzögert wird. Das *Bucket Indication Signal* wird von den Hochfrequenzsignalen (HF-Signalen) der Umlauffrequenzen abgeleitet und kennzeichnet immer das erste *Bucket*. Ein weiteres Delay wird dazu benutzt, um die folgenden, zu befüllenden *Buckets* zu kennzeichnen.

Für die Grobsynchronisation wird die Phasendifferenz zwischen den HF-Signalen der Quell- und Zielmaschine gemessen. Die Phasendifferenz erhält man, indem man die Phasenabweichung der HF-Signalen beider Ringe gegen ein campusweit verteiltes *Synchronization Reference Signal* vermisst. Wenn das Umfangsverhältnis beider Ringe ganzzahlig ist, bleibt die Phasendifferenz der beiden HF-Signale während des Transfers konstant. Um die richtige Phasendifferenz zu erreichen, muss die Phase eines (oder beider) HF-Systeme mithilfe einer Frequenzmodulation verschoben werden. Das nennen wir die *Phase Shift Method*. Nach der exakten Ausrichtung der Phasen bleibt die gewünschte Phasendifferenz konstant und ermöglicht theoretisch ein unendlich langes Synchronisationsfenster. Wenn das Umfangsverhältnis beider Ringe nicht ganzzahlig ist, verändert sich die Phasendifferenz periodisch. Innerhalb einer Periode gibt es dann nur einen Zeitpunkt, zu dem die Zielphase erreicht wird. Davor und danach kommt es zu einem B2B-Injektions-Mittenversatz zwischen *Bunch* und *Bucket*. Das nennen wir die *Frequency Beating Method*. Diese ist auch anwendbar, wenn das Umfangsverhältnis beider Ringe ganzzahlig ist. In diesem Fall wird die HF-Frequenz eines (oder beider) HF-Systeme am Ende der Beschleunigungsrampe leicht verstimmt, sodass sich eine Schwebungsfrequenz zwischen den HF-Systemen der Quell- und Zielmaschine ergibt. Für FAIR wird die *Frequency Beating Method* präferiert, weil diese Methode für sämtliche Transferszenarien bei FAIR anwendbar ist. Außerdem kann mit dieser Methode Zeit gespart werden, weil die Frequenzverstimmung während der Beschleunigungsrampe durchgeführt wird. Zur Erinnerung: Bei der *Phase Shift Method* muss die Frequenzmodulation auf *rf flattop* entsprechend der Ergebnisse dieser Arbeit langsam genug ausgeführt werden, damit der Strahl stabil bleibt. Der Beschleunigungszyklus der Quellmaschine verlängert sich dadurch entsprechend. Dennoch gibt es auch Vorteile, die für die *Phase Shift Method* sprechen. Das Synchronisationsfenster ist theoretisch unend-

lich lang und der B2B-Injektions-Mittenversatz ist nahezu Null. Außerdem ist die Dauer der Frequenzmodulation vorab bekannt und der Transfer-Zeitpunkt ist exakt bestimmbar. Vorteilhaft ist auch, dass die gewünschte Phase des HF-Systems sprungartig eingestellt werden kann, wenn sich kein *Bunch* im Zielbeschleuniger befindet.

Im Rahmen dieser Doktorarbeit wurde eine systematische Untersuchung der strahldynamischen Aspekte, der zeitlichen Anforderungen an den B2B-Transfer-Prozess und der Trigger-Szenarien für die Kicker-Auslösung durchgeführt. Die Timing-Betrachtungen berücksichtigen die erforderliche Genauigkeit für den Beginn des Synchronisationsfensters, die Charakterisierung des *White Rabbit* Netzwerks, das Flussdiagramm mit Timing-Bedingungen für das *FAIR B2B Transfer System*. Ein Messaufbau zur Untersuchung des Timings unter Verwendung der *Frequency Beating Method* wurde entwickelt und vorgestellt, der dazu verwendet wird die Firmware, die auf einer *soft CPU* ausgeführt wird, hinsichtlich der Einhaltung der Timing- und Funktionsanforderungen zu überprüfen. Im Rahmen der Untersuchungen wurden sämtliche FAIR-Anwendungsfälle, bei denen die *Frequency Beating Method* verwendet wird, erörtert.

Diese Doktorarbeit spielt eine wichtige Rolle bei der Realisierung des *FAIR B2B Transfer System* und der weiteren praktischen Anwendung des Systems für alle FAIR-Transferszenarien.

Zusammenfassung

FAIR hat zum Ziel, hochenergetische Ionenstrahlen für Elemente von Wasserstoff bis Uran, Antiprotonen und exotische Nuklide mit höchsten Intensitäten zu erzeugen. Die existierende Beschleunigeranlage der GSI, wie auch die zukünftige FAIR-Anlage nutzen unterschiedliche Ringbeschleuniger wie beispielsweise Schwerionensynchrotrons (das SIS18 und das SIS100) und auch Speicherringe (den ESR, den CRYRING, den CR und den HESR) zur Präparation der Sekundärstrahlen und auch für Experimente. Ein stabiler Transfer von *Bunches* in *Buckets* zwischen allen GSI- und FAIR-Ringbeschleunigern ist aus verschiedenen Gründen erforderlich. Bei einem nicht ordnungsgemäßen Strahltransfer besteht die Gefahr, dass es zu einer Degeneration der Strahlqualität (z.B. einer Emittanzerhöhung) bis hin zum Strahlverlust kommt. Ein stabiler *Bunch-to-Bucket (B2B) Transfer* zwischen zwei Ringen ist daher sehr wichtig für FAIR und ist das Thema, welches im Rahmen dieser Doktorarbeit untersucht wurde. Obwohl bereits zwischen dem SIS18 und dem ESR ein B2B-Transfer realisiert wurde, so ist diese Lösung aufgrund verschiedener Einschränkungen nicht nutzbar für FAIR. Es legt das alte GSI-Kontrollsystem zu Grunde, ein eventbasiertes System, welches in Zukunft vollständig durch das neue FAIR-Kontrollsystem ersetzt werden wird. Das FAIR-Kontrollsystem basiert auf dem White-Rabbit-Netzwerk, das eine Synchronisation im Sub-Nanosekundenbereich erlaubt. Des Weiteren unterstützt das alte System nicht die *Phase Shift Method* und ermöglicht auch keine komplexen Bucket-Füllmuster. Die Entwicklung eines *FAIR B2B Transfer Systems*, basierend auf der für FAIR geplanten technischen Infrastruktur, dazu zählen das FAIR Timing- und Kontrollsystem und das FAIR-LLRF-System, ist daher unbedingt erforderlich.

Diese Doktorarbeit stellt erstmals die konzeptionelle Realisierung des *FAIR B2B Transfer System* vor. Die Konzeptentwicklung für das System, findet hauptsächlich aus dem Blickwinkel des Timing- und LLRF-Systems statt. In der vorliegenden Doktorarbeit werden die Beiträge aus der Sicht des Timing-Systems präsentiert. Darüber hinaus, galt mein Engagement auch der Entwicklung des technischen Konzepts für das FAIR B2B Transfer Systems, welches für das FAIR-Projekt ausgearbeitet wurde. Zusammenfassend erreicht das FAIR B2B Transfer System folgende technischen Eigenschaften:

- In den meisten Fällen wird der B2B-Transfer mit einem B2B-Injektions-Mit-tenversatz von unter $\pm 1^\circ$ innerhalb der oberen Zeitgrenze von 10 ms erreicht.
- Das *FAIR B2B Transfer System* unterstützt die *Phase Shift Method*, wie auch die *Frequency Beating Method* und ist anpassungsfähig genug, um einen Transfer zwischen zwei Ringen mit beliebigem Verhältnis ihrer Umfänge zu ermöglichen.

- Es ist möglich, verschiedene B2B-Transfers zur gleichen Zeit auszuführen. Beispielsweise kann der B2B-Transfer vom SIS18 zum SIS100 zur gleichen Zeit stattfinden, wie der B2B-Transfer vom ESR zum CRYRING.
- Auch können verschiedene Ionensorten von einem Maschinenzyklus zum anderen transferiert werden.
- Das *FAIR B2B Transfer System* ist in der Lage, einen Transfer zwischen zwei Ringen auch über das Antiprotonen-Target, den Fragmentseparator oder den Superfragmentseparator durchzuführen.
- Es können verschiedene komplexe Bucket-Füllmuster berücksichtigt werden.
- Außerdem hat das *FAIR B2B Transfer System* eine Schnittstelle zum FAIR-Maschinenschutzsystem, welches das SIS100 und die nachgeschalteten Beschleuniger und Experimente vor Schaden durch Primärstrahlen bei Fehlerfunktionen bewahrt.

Es wurde eine Liste von Kriterien vorgestellt, die für die HF-Frequenzmodulation bei der *Phase Shift Method* die Erhaltung der Strahlqualität ermöglicht. Dazu wurde für den SIS18 Strahl das Strahlverhalten auf drei verschiedene HF-Frequenzmodulationsmuster hin analysiert. Entsprechend der strahldynamischen Analysen wird der Maximalwert für die HF-Frequenzmodulation durch die Randbedingungen, die durch den *momentum shift* gegeben sind, eingeschränkt. Die erste Ableitung der HF-Frequenzmodulation muss stetig und klein genug sein, um eine ausreichende Größe der umlaufenden *Buckets* zu garantieren. Ein kleiner Wert der zweiten Ableitung garantiert, dass sich die synchrone Phase langsam genug ändert, damit der Strahl folgen kann. Das spiegelt sich auch im adiabatischen Parameter wieder. Um eine Bucket-Fläche von größer 80% und einen adiabatischen Parameter von kleiner 10^{-4} für den SIS18 200 MeV/u U^{28+} Strahl garantieren zu können, muss $|\Delta f_{rf}|$ kleiner als 8.137 kHz sein und $|\frac{d\Delta f_{rf}}{dt}|$ muss stetig und kleiner als 95 Hz/ms sein. $|\frac{d^2\Delta f_{rf}}{dt^2}|$ muss kleiner als 70 Hz/ms² sein. Für den SIS18 4 GeV/u H^+ Strahl, muss $|\Delta f_{rf}|$ kleiner als 283 Hz sein und $|\frac{d\Delta f_{rf}}{dt}|$ muss stetig und kleiner als 1.9 Hz/ms sein. $|\frac{d^2\Delta f_{rf}}{dt^2}|$ muss kleiner als 0.2 Hz/ms² sein. Nach diesen Anforderungen wurden ein sinusförmiges und parabelförmiges HF-Frequenzmodulationsprofil mit einer bestimmten Zeitdauer für den SIS18 U^{28+} Strahl überprüft. Beide Modulationsprofile erfüllen die Anforderungen und halten den Strahl stabil. Dennoch ist der adiabatische Parameter bei der sinusförmigen Modulation kleiner als bei der parabelförmigen Modulation. Folglich sollte die sinusförmige Modulation bei der *Phase Shift Method* präferiert werden. Die sinusförmige HF-Frequenzmodulation im SIS18 für 200 MeV/u bei U^{28+} benötigt 7 ms und die sinusförmige HF-Frequenzmodulation im SIS18 für 4 GeV/u bei H^+ benötigt circa 50 ms für eine Phasenverschiebung jeweils um π .

In Ergänzung zu den strahldynamischen Analysen wurden zwei Messaufbauten errichtet. Der erste Messaufbau diente dazu, das WR-Netzwerk für den B2B-Transfer zu charakterisieren. Nach diesem Messergebnis ist die zulässige Anzahl von WR-Switch-Layern für den B2B-Transfer nicht nur von der Obergrenze der Latenzzeit abhängig (z.B. 400 ms), sondern auch von der tolerierbaren Frame-Error-Rate (FER) des *B2B Transfer Systems*. Wenn keine Vorwärtsfehlerkorrektur für das B2B-Netzwerk verwendet wird, ist die Anzahl der zulässigen WR-Switches hauptsächlich durch

die FER bestimmt. Unter der Annahme, dass der Verlust von einem Frame innerhalb von zwei Monaten noch akzeptable ist, sind maximal 38 WR-Switche zulässig zwischen Data Master (DM) und den zugehörigen SCUs und maximal 8 WR-Switche direkt zwischen den SCUs, die dem B2B-Transfer-System zugeordnet sind. Wird eine Vorwärtsfehlerkorrektur für das B2B-Netzwerk verwendet, so ist die Anzahl der zulässigen WR-Switches durch die noch tolerierbare Latenzzeit bestimmt. In diesem Fall sind dann 67 WR-Switches zwischen den für das *B2B Transfer System* zugehörigen SCUs und DM erlaubt und 13 WR-Switches direkt zwischen den SCUs, die dem B2B-Transfer-System zugeordnet sind. Der zweite Messaufbau diente dazu, die Firmware, die auf einer *soft CPU (LatticeMico32)* in der SCU ausgeführt wird, für das *B2B Transfer System* zu evaluieren. Gemessen wurden die Laufzeiten für die einzelnen Tasks in der Firmware. Es wurde nachgewiesen, dass die Firmware auf dem LatticeMico32 in der SCU die Anforderungen an die Timing-Bedingungen erfüllt, wenn der zugehörige *System-on-Chip bus* nicht zur gleichen Zeit mit anderen Anwendung, die parallel zur B2B-Firmware ausgeführt werden belegt ist.

Des Weiteren wurde die Auswirkung der Fehlerfortpflanzung durch die Messunsicherheit (z.B. die Phasenmessgenauigkeit von $\pm 0.1^\circ$, der BuTiS C2-Clock-Stabilität von die 100 ps und die Messgenauigkeit für den Zeitstempel von 1 ns) für die Zeit bis zum *phase alignment* in allen FAIR-Anwendungsfällen im Rahmen dieser Doktorarbeit überprüft. Der B2B Mittenversatz bei Injektion verschlechtert sich durch die Unsicherheiten bei der Bestimmung des Zeitpunkts des *phase alignment* auf unterschiedliche Art und Weise. In einigen Anwendungsfällen verschlechtert sich der B2B Mittenversatz bei Injektion sehr deutlich. Beispielsweise verschlechtert sich der Mittenversatz um 37% für den Transfer von U^{28+} vom SIS18 in den SIS100, was in allen FAIR-Anwendungsfällen den Worst-Case darstellt. Trotz dieser Verschlechterung wird die Anforderung von kleiner $\pm 1^\circ$ eingehalten. Daher ist die Messunsicherheit noch akzeptable für das *FAIR B2B Transfer System*. Zusätzlich wurden im Rahmen dieser Doktorarbeit auch die Genauigkeitsanforderungen an den Start des Synchronisationsfensters für alle FAIR-Anwendungsfälle überprüft. Der $h=1$ B2B-Transfer vom SIS18 zum ESR stellt mit ca. 500 ns die strengsten Genauigkeitsanforderungen an den Beginn des Synchronisationsfensters.

Außerdem wurden die Randbedingungen für die verschiedene Trigger-Szenarien für die SIS18 Extraktions- und die SIS100 Injektions-Kicker-Magnete untersucht. Die neun Extraktions-Kicker-Magnete des SIS18, sind auf zwei Tanks aufgeteilt. Für die SIS18 bzw. SIS100 Kicker gibt es folgende technische Einschränkungen:

- Die SIS18-Kicker-Magnete jedes Tanks können gleichzeitig gezündet werden, wenn die Bunchlücke mindestens 25% der Kavitäten-HF-Periode beträgt.
- Die vier SIS18-Kicker-Magnete in dem zweiten Tank können über eine feste Verzögerungszeit nach dem Auslösen der fünf SIS18-Kicker-Magnete im ersten Tank für alle Ionensorten ausgelöst werden, wenn die Bunchlücke mindestens 25% der Kavitäten-HF-Periode beträgt.
- Die sechs SIS100 Injektions-Kicker-Magnete sind gleichmäßig in einem Tank verteilt. Sie können für alle Ionensorten ausgelöst werden, wenn die Bunchlücke mindestens 35% der Kavitäten-HF-Periode beträgt.

Zum Abschluß wurde das *FAIR B2B Transfer System* unter Anwendung der *Frequency Beating Method* für alle FAIR-Anwendungsfälle veranschaulicht, siehe

Tab. I.

Tabelle I: FAIR-Anwendungsfälle unter Anwendung der *Frequency Beating Method*

Nr.	FAIR-Anwendungsfälle	B2B-Injektions-Mittenversatz	Bemerkung
1	U^{28+} B2B Transfer vom SIS18 zum SIS100	$\pm 0.4^\circ$	In den FAIR-Anwendungsfällen 1-5 ist der B2B-Injektions-Mittenversatz innerhalb der Spezifikationsgrenze von $\pm 1^\circ$. Der Grund hierfür ist, dass das Umfangsverhältnis beider Ringe ganzzahlig oder nahezu ganzzahlig ist.
2	H^+ B2B Transfer vom SIS18 zum SIS100	$\pm 0.4^\circ$	
3	$h=4$ B2B Transfer vom SIS18 zum ESR	$\pm 0.5^\circ$	
4	$h=1$ B2B Transfer vom SIS18 zum ESR	$\pm 0.5^\circ$	
5	B2B Transfer vom ESR zum CRYRING	$\pm 0.5^\circ$	
6	B2B Transfer vom CR zum HESR	$\pm 1.2^\circ$	Der B2B-Injektions-Mittenversatz ist knapp außerhalb der Spezifikation, kann aber noch akzeptiert werden, obwohl das Umfangsverhältnis beider Ringe weit weg von einem ganzzahligen Verhältnis ist.
7	H^+ B2B Transfer vom SIS100 zum CR über den Antiprotonen-Target	$\pm 41.5^\circ$	Der B2B-Injektions-Mittenversatz ist weit außerhalb der Spezifikation. Die Ursache hierfür liegt, im zufälligen Verhältnis der Energien vor und nach den Targets. (Der FAIR-Anwendungsfall Nr. 8 liegt nur zufällig in der Nähe der Spezifikationsgrenze und kann ebenfalls noch akzeptiert werden.)
8	RIB B2B Transfer vom SIS100 zum CR über den Superfragmentseparator	$\pm 2.1^\circ$	
9	RIB B2B Transfer vom SIS18 zum ESR über den Fragmentseparator	$\pm 31.2^\circ$	

Es wurde gezeigt, dass für alle Primärstrahl-Transfers in den FAIR-Anwendungsfällen bei Injektion ein B2B Mittenversatz von besser $\pm 1^\circ$ innerhalb der erforderlichen Transferzeit von 10 ms erreicht wird, weil das Zahlenverhältnis der Umfänge der beiden Ringe ganzzahlig oder nahezu ganzzahlig ist. Entwicklungsbedarf besteht noch beim Iontentransfer von Sekundärstrahlen, wie sie vom Antiprotonen-Target, dem Fragmentseparator oder dem Superfragmentseparator erzeugt werden. Hier besteht das Problem, dass das Verhältnis der Energien zwischen Primär- und Sekundärstrahl sich stark unterscheiden. Für den Transfer von

exotischen Nukliden vom SIS100 zum CR über den Superfragmentseparator mit 1.5 GeV/u Primärstrahlenergie und 740 MeV/u Sekundärstrahlenergie, beträgt der B2B Injektions-Mittenversatz zwar zufällig nur $\pm 2.1^\circ$, für den Antiprotonen B2B-Transfer vom SIS100 zum CR über das Antiprotonen-Target und den Strahltransfer von exotischen Nukliden vom SIS18 zum ESR über den Fragmentseparator ist der B2B Mittenversatz aber schon größer als $\pm 40^\circ$ und damit weit außerhalb der Spezifikation.

Die vorliegende Doktorarbeit stellt die wesentlichen Untersuchungsergebnisse für das *FAIR B2B Transfer System*, aus Sicht der Strahldynamik, Timing-Anforderung und Kicker-Auslösung vor. Dennoch sind weitere Untersuchungsaufgaben erforderlich, um den finalen Anlagenbetrieb abzusichern. Dazu zählen:

- Die Synchronisation im Mikrosekundenbereich des Antiprotonenstrahls mit dem magnetischen Horn nach dem Antiprotonen-Target.
- Die Synchronisation zwischen dem SIS100 Bunchkompressor und der Strahl-extraktion.
- In einigen FAIR-Anwendungsfällen ist für den Transfer des Sekundärstrahls der B2B Injektions-Mittenversatz größer als $\pm 40^\circ$. Für diese Anwendungsfälle muss überprüft werden, ob der B2B-Transfer unter Zuhilfenahme von speziellen Strahlakkumulations-Methoden wie Beispielsweise die *barrier bucket method* oder die *unstable fixed point accumulation method* gelingt.

Das *FAIR B2B Transfer System* das in dieser Doktorarbeit vorgestellt wird, ist anwendbar für alle FAIR-Anwendungsfälle. Dennoch gibt es Verbesserungspotential. Für die *Phase Shift Method* muss die HF-Frequenzmodulation sehr langsam erfolgen, damit der Strahl der Frequenzänderung folgen kann (z.B. 7 ms/50 ms bei sinusförmiger Modulation für den SIS18 U^{28+}/H^+ Strahl). Um *Bunche* sobald wie möglich in *Buckets* transferieren zu können, kann mit der Phasenverschiebung bereits auf der Beschleunigungsrampe begonnen werden. Zu einem definierten Zeitpunkt während des Beschleunigungsprozesses wird die Phasendifferenz zwischen den beiden HF-Systemen der Quell- und Zielmaschine unter Zuhilfenahme eines *Synchronisation Reference Signal* ermittelt. Die Phasendifferenz auf dem *RF Flattop* wird über eine Look-Up-Table aus den Phasendifferenzen, die zu definierten Zeitpunkten auf der Rampe gewonnen wurden ermittelt. Daraus lässt sich die benötigte HF-Frequenzmodulation berechnen. Diese wird der ursprünglichen Frequenzrampe augenblicklich überlagert. Mit der so entstandenen Frequenzrampe wird die gewünschte Phasendifferenz dann automatisch erzielt, wenn die HF-Frequenz der Quellmaschine das *RF Flattop* erreicht.