

 –Arbeitsnotiz	Nr.: 08022017-RRF
Ring-HF-Datenversorgung durch das zentrale Kontrollsystem, Vers. 2.2	Name: H. Klingbeil, U. Laier
Verteiler: R. Balß, R. Bär, G. Fleischmann, M. Frey, P. Hülsmann, H. G. König, U. Krause, D. Lens, H. Liebermann, K.-P. Ningel, D. Ondreka, S. Schäfer, P. Schütt, P. Spiller, M. Thieme, B. Zipfel	

1. Einleitung

Die vorliegende Arbeitsnotiz ist eine Aktualisierung der Notiz Nr. 190609-HF [11].

Seit der Verteilung der alten Version [11] liegen zahlreiche neue Erkenntnisse vor:

- Die neue Datenversorgung über LSA wurde (vor allem in Maschinenexperimenten) erfolgreich eingesetzt.
- In zahlreichen Maschinenexperimenten wurden Erfahrungen mit komplexen longitudinalen Strahlmanipulationen (auch mehrharmonisch) gesammelt.
- Erfahrungen mit der SCU und FESA wurden gesammelt.
- Die neuen SIS18-h=2-Kavitätensysteme wurden realisiert und erfolgreich in Maschinenexperimenten benutzt.
- Am CRYRING wurde eine neue SCU-basierte DDS installiert.
- Der CR-Debuncher und der SIS100-Bunchkompressor befinden sich in der Systemintegrationsphase, und die Systemintegration des SIS100-Beschleunigungssystems beginnt in Kürze.

Die Überlegungen in dieser Notiz gehen über die derzeitig verfügbare Funktionalität der SIS18-Anlagen hinaus, um die physikalische Beschreibung der Datenversorgung im Hinblick auf FAIR so allgemein wie möglich zu machen. Es ist allerdings noch nicht Ziel dieser Notiz, alle FAIR-Anforderungen im Detail zu beschreiben, so dass spätere Erweiterungen nötig sein werden (allerdings ohne grundsätzliche Konzeptänderungen). Eine detaillierte Beschreibung der technischen HF-Subsysteme, die für FAIR benötigt werden, ist in [9,13,14,15] zu finden.

2. Technische und Physikalische Sicht

In diesem Abschnitt wird dargelegt, wie die Ring-HF-Anlagen aus Sicht der Datenversorgung anzusteuern sind.

Die Steuer- und Regelungssysteme der Ring-HF-Kavitäten sind modular aufgebaut und stellen ein verteiltes System dar. Dies spielt für die Datenversorgung jedoch keine wesentliche Rolle. Wichtiger ist die Tatsache, dass sich die Datenversorgung logisch in drei Kategorien einteilen lässt:

- Datenversorgung für eine bestimmte Kavität – dies wird in Kapitel 4 beschrieben.
- Datenversorgung, die das Zusammenspiel mehrerer Kavitäten im selben Synchrotron definiert – dies wird in Kapitel 5 beschrieben.
- Datenversorgung, die das Zusammenspiel mehrerer Synchrotrone (z.B. für einen Bunch-to-Bucket-Transfer) definiert – dies wird in dieser Arbeitsnotiz noch ausgeklammert.

Die in den genannten Kapiteln 4 und 5 beschriebene Datenversorgung wird so definiert, dass damit das Systemverhalten aus physikalischer Sicht unmittelbar einleuchtend sein sollte. Seitens der Datenversorgung sollen also keine detaillierten Kenntnisse der technischen Subsysteme (z.B. in welchem Register eines bestimmten Moduls welches Bitmuster eingestellt werden muss, um eine bestimmte Harmonischenzahl zu realisieren) nötig sein. Natürlich müssen solche physikalisch verständlichen Vorgaben in konkrete technische Aktionen (wie Registerzugriffe, Schaltbefehle, Telegramme oder Ähnliches) umgewandelt werden. Diese Umwandlung soll in FESA-Klassen stattfinden, die von der Abteilung Ring RF gepflegt werden [12]. Dies hat den Vorteil, dass Änderungen an der konkreten technischen Implementierung (z.B. welche Ein- und Ausgänge einer bestimmten Switch-Matrix welchem konkreten Signal entsprechen) sich nicht auf die Datenversorgung auswirken. Die FESA-Klassen spielen eine ähnliche Rolle wie in der PC-Welt die Geräte-Treiber: Diese übersetzen allgemeinverständliche Befehle in hardware-spezifische Aktionen.

Das Rücklesen von Istwerten, Statusmeldungen und Interlocks wird als selbstverständlich erachtet und daher nicht in diesem Dokument diskutiert.

3. Datentypen

In den folgenden Kapiteln wird für verschiedene HF-Subsysteme definiert, welche physikalischen Daten an diese zu senden sind. Dabei werden die folgenden Datentypen benutzt:

Tabelle 1: Datentypen

Datentyp		Beschreibung	
Rampe		kontinuierliche, interpolierte Sollwertrampe ¹	
Wertzuweisung	Wert (incl. Eventkopplung)	Statisch	Daten, die sich nicht von Zyklus zu Zyklus ändern.
		Beschleunigerabhängig	Daten, die sich nicht innerhalb eines Zyklus ändern.
		Dynamisch	Daten, die sich von Zyklus zu Zyklus oder auch innerhalb eines Zyklus ändern können.
	Logiksignal (incl. Eventkopplung)	Statisch	Wie "statischer Wert", jedoch nur zwei Zustände
		Beschleunigerabhängig	Wie "beschleunigerabhängiger Wert", jedoch nur zwei Zustände
		Dynamisch	Wie "dynamischer Wert", jedoch nur zwei Zustände
Event		Beschleuniger-Event (Timing-System, White-Rabbit)	

Die Ausführungen in den folgenden Kapiteln zeigen, dass eine sehr kleine Anzahl komplett unterschiedlicher Informationen benötigt wird:

- Rampendaten
- Events
- Wertzuweisungen: Logiksignale und andere Werte

Bei den Werten und Logiksignalen wird in diesem Dokument unterschieden, ob sie statisch, beschleunigerabhängig oder dynamisch sind. Diese Unterscheidung dient jedoch nur dazu, den jeweiligen Anwendungsfall verständlicher zu machen. Wenn ein Wert oder ein Logiksignal „beschleunigerabhängig“ oder „dynamisch“ ist, dann ist die Aktivierung an ein Event gekoppelt. Ist der Wert bzw. das Logiksignal „statisch“, dann ist keine Event-Kopplung nötig, sondern die Aktivierung kann zum nächstmöglichen Zeitpunkt erfolgen. Für die Übertragung von Werten und Logiksignalen sollte ein einheitlicher Mechanismus benutzt werden, der die Eventkopplung enthält. Im Allgemeinen ist eine Wertzuweisung deshalb wie in Tabelle 2 beschrieben aufgebaut. Man erkennt, dass der Overhead einer Wertzuweisung relativ groß ist. Dies wird aber als unkritisch angesehen, da die zu erwartende Anzahl der Wertzuweisungen überschaubar ist, wie man in den restlichen Abschnitten dieser Notiz sehen wird.

¹ Diskrete Daten, die von einem Funktionsgenerator auf den SCU-Slave-Modulen in eine kontinuierlich interpolierte Rampe mit einstellbarer Sampling-Rate konvertiert werden.

Tabelle 2: Wertzuweisung

Ziel	Kavitätensystem oder übergeordnetes HF-Steuerungsgerät
Variablen-ID	Diese ID definiert, welcher Wert (im Sinne eines Variablennamens) gemeint ist.
Wert	Dies ist der Wert, der der zuvor genannten Variablen zugewiesen werden soll. Je nach Variablen-ID kann es sich z.B. um Integers, Floating Point Values, Booleans oder komplexere Strukturen handeln.
Event	Hierüber wird die Eventkopplung spezifiziert, also das Event, bei dessen Eintreffen die Wertzuweisung tatsächlich umgesetzt werden soll. Als Spezialfall soll der Fall „keine Event-Kopplung, sondern frühestmögliche Ausführung“ enthalten sein.

Alle Daten vom Typ „Rampe“ benötigen natürlich in ähnlicher Weise wie die Wertzuweisungen eine abgestimmte Event-Versorgung.

4. Einzel-Kavitäten

4.1. Abstimmbare Beschleunigungskavitäten (Beispiele: S02BE1, S08BE2)

Bis dato wurden die SIS18-HF-Kavitätensysteme mit einer Rampe versorgt, die der gewünschten Betriebsfrequenz entspricht. In Zukunft sollte anstelle der Betriebsfrequenz die Umlauffrequenz im Synchrotron in Verbindung mit der gewünschten Harmonischenzahl an das jeweilige Kavitätensystem geschickt werden. Dies hat - insbesondere in Verbindung mit den neuen, nicht mehr linear interpolierenden Funktionsgeneratoren – den Vorteil, dass keine rundungsfehlerbedingten Abweichungen mehr zwischen der Betriebsfrequenz und der vervielfachten Umlauffrequenz mehr auftreten können; die präzise Vervielfachung der Umlauffrequenz erfolgt erst in der DDS.

Wie bisher ist außerdem eine Amplitudenrampe nötig sowie eine Rampe für die gewünschte HF-Phase.

Die folgenden Daten wurden bislang nicht angeboten, sollten jedoch vorgesehen werden, um die Ansteuerung zukunftssicher zu machen (in Zukunft werden Ferritkavitätensysteme mit einem neuen, digitalen Regelkreis für die Resonanzfrequenzabstimmung ausgestattet):

- Insbesondere unter Beam-Loading-Bedingungen ist es nützlich, zwei Rampen für die Abstimmung der Kavität zur Verfügung zu haben:
 - Resonanzfrequenzrampe: Diese Resonanzfrequenzrampe wird dazu benutzt, den Vormagnetisierungsstrom so zu steuern, dass die Kavität ungefähr die gewünschte Resonanzfrequenz hat. Dies funktioniert selbst dann, wenn keine Gapspannung anliegt. Die Resonanzfrequenzrampe ist u.a. nützlich, damit die Kavität beim Hochfahren der Gapspannung ihren Resonanzpunkt findet. Ist die Eigenfrequenzregelung eingeschaltet, übernimmt die Regelung die Resonanzfrequenzabstimmung, sobald hinreichend Gapspannung anliegt. Bei aktiver Eigenfrequenzregelung wird die Resonanzfrequenzrampe lediglich zur Vorsteuerung benutzt. Die Resonanzfrequenzrampe kann auch dazu genutzt werden, um bei ausgeschalteter Eigenfrequenzregelung und einer Amplitudenvorgabe von 0 V die Kavität in eine "Parkposition" (z.B. zwischen zwei Harmonischen) zu fahren.
 - Verstimmungsphasenrampe: Bei eingeschalteter Eigenfrequenzregelung kann die Kavität gezielt mittels dieser Rampe während des Zyklus kapazitiv oder induktiv verstimmt werden (z.B. zwecks Beamloading-Kompensation). Macht man von dieser Möglichkeit Gebrauch, dann ist die volle Gapspannungsamplitude nicht mehr möglich.
- Um zu bestimmen, wie die Eigenfrequenz kontrolliert werden soll, wird ein entsprechender Modus-Wert benötigt.
- Auch für die Amplitudenregelung kann ein Ein- und Ausschalten unter Beam-Loading-Bedingungen nützlich sein.

Natürlich führt das Hinzufügen von Daten für die Kavitätenabstimmung zu Restriktionen, die bei der Datenversorgung zu berücksichtigen sind. So darf die geforderte HF-Amplitude beispielsweise nur entsprechend niedrig sein, wenn die Resonanzfrequenz nicht der Betriebsfrequenz entspricht oder wenn eine Verstimmungsphase ungleich null vorgegeben wird. Die Amplitude darf nicht zu niedrig² sein, wenn die Amplituden- oder Eigenfrequenz-Regelung eingeschaltet ist. Restriktionen dieser Art, auf die hier nicht weiter eingegangen wird, sind aber physikalisch problemlos nachvollziehbar, weshalb diese Art der Datenversorgung einer Einzelkavität für sinnvoll erachtet wird.

Anstelle der Resonanzfrequenz hätte man auch den Vormagnetisierungsstrom als Rampe definieren können. Dies geschah hier jedoch nicht, da man HF-seitig eine Kennlinie zur Umrechnung nutzen kann und die Resonanzfrequenz die physikalisch verständlichere Größe ist, während der Vormagnetisierungsstrom bereits detaillierte Technik-System-Kenntnisse verlangt.

Alle diese Überlegungen führen zu der in Tabelle 3 aufgelisteten Beschreibung.

Tabelle 3: Datenversorgung einer einzelnen abstimmbaren Beschleunigungskavität

physikalische Größe	Datentyp	Beschreibung
Umlauffrequenz	Rampe	Frequenzvorgabe für die lokale DDS, die die Kavität ansteuert („Kavitäten-DDS“)
Harmonischnzahl	dynamischer Wert	Natürliche Zahl, mit der die Umlauffrequenz multipliziert wird, um die Betriebsfrequenz zu erhalten
Amplitude	Rampe	Amplitude der Gapspannung
Phase	Rampe	Phase bezüglich HF-Referenz-Signal
Resonanzfrequenz	Rampe	Abstimmfrequenz
Verstimmungsphase	Rampe	Phase zwischen Anodenstrom und Gapspannung zwecks kapazitiver oder induktiver Verstimmung der Kavität
Modus Eigenfrequenzregelung	dynamisches Logiksignal	ein (default): geregelter Betrieb mit aktiver Vorsteuerung, Vorgabe der Verstimmungsphase und der Resonanzfrequenz zur Vorsteuerung aus: gesteuerter Betrieb, Vorgabe der Resonanzfrequenz
Modus Amplitudenregelung	dynamisches Logiksignal	ein (default): geregelter Betrieb aus: gesteuerter Betrieb
Modus HF-Phasensynchronisation	dynamisches Logiksignal	ein (default): geregelt (synchronisiert) aus: unsynchronisiert (z.B. bei Einkavitäten-Betrieb)
Systemzustand	statisches Logiksignal	Ein- oder Ausschalten der Anlage, öffnet bzw. schließt die Gap-Relais
Reset	Logiksignal	Setzt Interlocks zurück

² Typischerweise liegen die Regler-Einsatzschwellen bei einer Gapspannung von 100...200 V.

4.2. Bunchkompressions-Systeme

Obwohl ein Bunchkompressions-System während eines Maschinenzyklus in der Regel nur bei einer festen Frequenz betrieben wird, wird bei der SIS18-Implementierung trotzdem eine Frequenzrampe angeliefert. Dies soll auch bei zukünftigen Bunchkompressions-Systemen so beibehalten werden.

Es mag zunächst verwundern, dass eine Frequenzrampe vorgesehen wird, obwohl in jedem Zyklus nur ein Frequenzwert relevant ist. Ein Grund hierfür ist, dass der Funktionsgenerator in der DDS die "time slots" für die Übernahmen von Frequenz- und Phasenkorrekturen im gesamten Synchrotron präzise festlegt. Dies garantiert die Synchronizität aller Kavitätensysteme einschließlich der Bunchkompressoren. Außerdem wird auf diese Weise eine Vereinheitlichung zwischen Bunchkompressor-Systemen und Beschleunigungs-Systemen erreicht.

Eine Eigenfrequenzregelung existiert bei den geplanten Bunchkompressor-Systemen nicht. Es ist lediglich möglich, die Abstimmfrequenz gesteuert vorzugeben. Dies wird wegen träger Drehkondensatoren auch nicht von Zyklus zu Zyklus änderbar sein. Deshalb ist hier ein statischer Wert vorzusehen. Die Umrechnung zwischen Abstimmfrequenz und Schrittmotor-Position für den Drehkondensator soll wieder HF-seitig über eine Kennlinie erfolgen, um die physikalische Abstraktion beizubehalten.

Gepulste Systeme wie der Bunchkompressor erzeugen ihre Pulsform selbst (aus heutiger Sicht genügt eine lokale manuelle Vorgabe der Pulsform), so dass keine Amplitudenrampe nötig ist. Der Puls wird über ein Event ausgelöst. Das Start-Event löst den HF-Puls erst nach einem vordefinierten Delay aus, da der Arbeitspunkt der Tetroden zunächst geändert werden muss. Das Hoch- und Herunterfahren der Pulsamplitude erfolgt gemäß manuellen Einstellungen und ist nicht seitens Datenversorgung beeinflussbar. Es ist jedoch möglich, die Maximalamplitude sowie ihre Dauer seitens der Datenversorgung vorzugeben.

Der CR-Debuncher gestattet es, alternativ zum Pulsbetrieb auch CW-Rampen kleinerer Amplitude zu generieren. Deshalb ist im allgemeinsten Fall auch eine Amplitudenrampe vorzusehen. Die Gesamt-Amplitude ergibt sich aus der Addition der Amplitudenrampe und der lokal generierten Pulsform. Im CW-Betrieb wird man in Maßen auch die Frequenz variieren wollen, was bekräftigt, dass die Betriebsfrequenz im Allgemeinen eine Rampe sein sollte. Deshalb sollen Bunchkompressions-Systeme im Allgemeinen genau wie Beschleunigungssysteme eine Umlauffrequenzrampe in Verbindung mit der gewünschten Harmonischenzahl erhalten.

Tabelle 4: Datenversorgung einer einzelnen Bunchkompressorkavität

physikalische Größe	Datentyp	Beschreibung
Umlauffrequenz	Rampe	Frequenzvorgabe für die lokale DDS, die die Kavität ansteuert
Harmonischenzahl	dynamischer Wert	Natürliche Zahl, mit der die Umlauffrequenz multipliziert wird, um die Betriebsfrequenz zu erhalten
Start-Trigger des Pulses	Event	Dieses Event steuert den Start des Pulses für die Bunchrotation
Pulsdauer	Beschleuniger-abhängiger Wert	Dieser Wert bestimmt die Pulsdauer
Puls-Amplitude	Beschleuniger-abhängiger Wert	Maximalwert des Gapspannungspulses für die Bunchrotation
Amplitude	Rampe	Amplitude der Gapspannung im CW-Betrieb
Phase	Rampe	Sollphase bezüglich HF-Referenz-Signal. Eigentlich wird nur ein beschleunigerabhängiger Wert benötigt, aber aus Vereinheitlichungsgründen ist eine Rampe sinnvoll.
Modus HF-Phasensynchronisation	dynamisches Logiksignal	ein (default): geregelt (synchronisiert) aus: unsynchronisiert (z.B. bei Einkavitäten-Betrieb)
Abstimmfrequenz	statischer Wert	Abstimmfrequenz (z.B. für Drehkondensator-Stellung benötigt)
Modus Amplitudenregelung	dynamisches Logiksignal	ein (default): geregelter Betrieb aus: gesteuerter Betrieb
Systemzustand	statisches Logiksignal	Ein- oder Ausschalten der Anlage, öffnet bzw. schließt die Gap-Relais
Reset	Logiksignal	Setzt Interlocks zurück

4.3. SIS18-h=2-Beschleunigungssystem (S07BE3, BE4, BE5)

Das SIS18-h=2-Beschleunigungssystem besitzt keine Eigenfrequenzabstimmung. Es wird prinzipiell möglich sein, auch Bunchrotations-Pulse mit diesem System zu erzeugen. Die Datenversorgung ist somit eine Mischung aus Tabelle 3 und Tabelle 4.

Tabelle 5: Datenversorgung einer h=2-Beschleunigungskavität

physikalische Größe	Datentyp	Beschreibung
Umlauffrequenz	Rampe	Frequenzvorgabe für die lokale DDS, die die Kavität ansteuert
Harmonischnzahl	dynamischer Wert	Natürliche Zahl, mit der die Umlauffrequenz multipliziert wird, um die Betriebsfrequenz zu erhalten
Start-Trigger des Pulses	Event	Dieses Event steuert den Start des Pulses für die Bunchrotation
Pulsdauer	Beschleuniger-abhängiger Wert	Dieser Wert bestimmt die Pulsdauer
Puls-Amplitude	Beschleuniger-abhängiger Wert	Maximalwert des Gapspannungs-Pulses für die Bunchrotation
Amplitude	Rampe	Amplitude der Gapspannung (CW-Betrieb)
Modus Amplitudenregelung	dynamisches Logiksignal	ein (default): geregelter Betrieb aus: gesteuerter Betrieb
Phase	Rampe	Phase bezüglich HF-Referenz-Signal
Modus HF-Phasen-synchronisation	dynamisches Logiksignal	ein (default): geregelt (synchronisiert) aus: unsynchronisiert (z.B. bei Einkavitäten-Betrieb)
Systemzustand	statisches Logiksignal	Ein- oder Ausschalten der Anlage, öffnet bzw. schließt die Gap-Relais
Reset	Logiksignal	Setzt Interlocks zurück

4.4. Barrier-Bucket-Systeme

Ein Barrier-Bucket-System hat in der Regel keine Amplituden- und Eigenfrequenzregelung. Im Allgemeinen muss es möglich sein, zwei Single-Sinus-Pulse (oder auch Pulse anderer Form) zeitlich gegeneinander zu verschieben. Der Bezug hierfür ist natürlich die Umlauffrequenz der Teilchen. Deshalb wird in Tabelle 6 eine Phasenrampe bezüglich des Umlaufsignals definiert, um den Single-Sinus-Puls anzutriggern. Diese Phasenvorgabe muss eine Rampe sein, um "Moving Barriers" zu ermöglichen. Die hier getroffene Festlegung gestattet nur einen Puls pro Umlaufperiode und Barrier-Bucket-System, was aus heutiger Sicht ausreicht, da zwei Barrierpulse im selben Umlauf von zwei unterschiedlichen Kavitäten generiert werden.

Tabelle 6: Datenversorgung einer einzelnen Barrier-Bucket-Kavität

physikalische Größe	Datentyp	Beschreibung
Umlauffrequenz	Rampe	
Pulsdauer	Beschleuniger-abhängiger Wert	Dauer einer einzelnen Single-Sinus-Schwingung
Amplitude	Rampe	Maximalwert des Barrier-Gapspannungs-Pulses
Phase	Rampe	Phase für den Start des Single-Sinus-Pulses in Bezug auf den positiven Nulldurchgang des Umlauffrequenzsignals
Systemzustand	statisches Logiksignal	Ein- oder Ausschalten der Anlage, öffnet bzw. schließt die Gap-Relais
Reset	Logiksignal	Setzt Interlocks zurück

4.5. Vereinheitlichung des Gerätemodells

Es ist sinnvoll, für alle oben beschriebenen Ring-HF-Systeme ein einheitliches Gerätemodell zu definieren. Dieses beinhaltet dann sowohl die Resonanzfrequenzabstimmung als auch Bunchrotationspulse. Je nachdem, ob das spezielle System diese Möglichkeiten unterstützt oder nicht, würden die entsprechenden Daten dann ausgewertet, mit einer Fehlermeldung quittiert oder einfach ignoriert. Man kann also alle Einträge, die in Tabelle 3 bis Tabelle 6 enthalten sind, zu einem „Maximal-Gerätemodell“ für Ring-HF-Anlagen zusammenfassen.

Jedes Kavitätensystem soll durch eine übergeordnete FESA-Software („FESA RF Cavity Class“) repräsentiert werden. Alle diese Software-Komponenten würden dann auf demselben Code basieren – allerdings so konfiguriert (hier können natürlich Vererbungsmechanismen benutzt werden), dass die Spezifika des jeweiligen Kavitätensystems korrekt abgebildet sind.

5. Übergeordnetes HF-Steuerungsgerät zur Synchronisierung von Kavitäten

In Kapitel 4 wurde für die wichtigsten Kavitätensysteme festgelegt, welche Daten sich direkt auf das jeweilige System beziehen und somit (im logischen Sinne) direkt an dieses geschickt werden sollten.

Damit ist noch nicht festgelegt, in welcher Weise diese Systeme zusammenarbeiten. Somit ist ein übergeordnetes Steuerungs-System nötig, das diese Aufgabe übernimmt.

Ein Beispiel für eine Information, die sich keiner einzelnen Kavität zuordnen lässt, ist die Festlegung, ob die Strahlphasenregelung ein- oder ausgeschaltet sein soll. Ein weiteres Beispiel ist die Festlegung, welche Kavität welchem HF-Referenzsignal (=Gruppen-DDS-Signal) zugeordnet werden soll.

Während für die SIS18-HF-Anlagen nur ein Versorgungsraum vorhanden ist, wird es im SIS100 mehrere HF-Versorgungsräume geben. Die in diesem Abschnitt definierten übergeordneten Daten sind als Informationen anzusehen, die den HF-Zustand des jeweiligen Synchrotrons beschreiben. Deshalb müssen identische Kopien dieser Daten in alle Versorgungsräume geschickt werden. Tabelle 7 zeigt die Daten, die an das übergeordnete HF-Steuerungsgerät geschickt werden müssen, um die Grundfunktion der Ring-HF-Anlagen sicherzustellen.

Im Falle des SIS18 entspricht das übergeordnete HF-Steuerungsgerät dem bereits implementierten Gerät RFSYNC (Modulbusgerät gemäß BLOB-Gerätmodell). In Zukunft soll das übergeordnete HF-Steuerungsgerät durch eine FESA-Software („FESA RF Synchrotron Class“) repräsentiert werden. Diese FESA-Software gehört aus logischer Sicht zum jeweiligen Ringbeschleuniger – sie ist den zuvor erwähnten FESA-Software-Komponenten, die für die Kavitätensysteme zuständig sind („FESA RF Cavity Class“), logisch übergeordnet.

Das Grundprinzip bei der Versorgung von Kavitäten mit Referenzsignalen ist das folgende: Zunächst legt man fest, welche Kavitätengruppen existieren und bei welchen Harmonischenzahlen sie zu betreiben sind (Beispiel SIS18: $h=2$ für die drei $h=2$ -Systeme (Kavitätengruppe A) und $h=4$ für die beiden Ferritkavitäten (Kavitätengruppe B)). Entsprechend weist man einer Gruppen-DDS die Harmonischenzahl $h=2$ und einer anderen die Harmonischenzahl $h=4$ zu. Es wird insgesamt 4 Gruppen-DDS-Module³ geben, von denen das erste jedoch fest auf $h=1$ konfiguriert sein wird. Den übrigen drei Gruppen-DDS-Modulen kann seitens Datenversorgung/Kontrollsystem eine beliebige Harmonischenzahl zugeordnet werden.

Dann wird jedem Kavitätensystem über Switch-Matrix-Schaltbefehle das Referenzsignal zugeordnet (im Beispiel wird jeder $h=2$ -Kavität das Referenzsignal A und jeder Ferritkavität das Referenzsignal B zugeordnet). Zu beachten ist, dass trotz dieser zentralen Datenversorgung auch den Einzelkavitäten (Kavitäten-DDS) die

³ Tatsächlich gibt es in jedem HF-Versorgungsraum mindestens ein Crate mit 4 Gruppen-DDS-Modulen. Diese werden jedoch so betrieben, dass das i -te Modul (im Crate) in jedem Versorgungsraum dasselbe Signal generiert.

korrekte Frequenz (in Form der Umlauffrequenzrampe zusammen mit der separat übertragenen Harmonischnzahl) geschickt werden muss. Die übergeordneten Daten sorgen lediglich für eine korrekte Erzeugung der Referenzsignale.

Tabelle 7: Synchrotron-HF-Daten

physikalische Größe	Datentyp	Beschreibung
Zeitpunkt Zyklus-Start	Event	Alle DDS-Einheiten werden auf eine Preset-Phase und eine bestimmte Harmonischnzahl gesetzt
Harmonischnzahl für jede Gruppen-DDS (eventgekoppelt)	dynamischer Wert	Hier werden beispielsweise die drei $h=2$ -Units als eine Gruppe angesehen, die bei $h=2$ arbeitet, während die beiden Ferritkavitäten eine andere Gruppe formen, die bei $h=4$ betrieben wird. In diesem Fall muss eine Gruppen-DDS bei $h=2$, eine andere bei $h=4$ arbeiten.
Preset-Phase für jede Gruppen-DDS (eventgekoppelt)	dynamischer Wert	Vorgabe der Phase für jede Gruppen-DDS
Umlauffrequenz	Rampe	Gemeinsame Umlauffrequenzrampe für alle Gruppen-DDS-Module
Synchrotronfrequenz-Rampe	Rampe	Nutzung für die Strahlphasenregelung
Modus der Strahlphasenregelung (eventgekoppelt)	dynamisches Logiksignal	ein oder aus
Schaltbefehl für die Switch-Matrizen (eventgekoppelt)	dynamischer Wert	Mit den Switch-Matrizen wird festgelegt, welches Referenzsignal zur jeweiligen Kavität geführt wird. Über den Schaltzustand von Switch-Matrizen kann ggf. auch festgelegt werden, welches Gapsignal für die übergeordnete Strahlphasenregelung benutzt wird (die Harmonischnzahl der gewählten Kavität muss der Anzahl der HF-Buckets entsprechen).

5.1. Switch-Matrix-Ansteuerung

Auf technischer Ebene sind in den verschiedenen Versorgungsräumen mehrere Switch-Matrizen vorhanden. Für die Datenversorgung des übergeordneten HF-Steuerungsgeräts über die „FESA RF Synchrotron Class“ soll es jedoch keine Rolle spielen, wo welche Switch-Matrix lokalisiert ist und welche Signale an eine bestimmte Switch-Matrix angeschlossen sind. Die Datenversorgung soll auf physikalischer Ebene erfolgen. Ein einzelner Schaltbefehl für eine Switch-Matrix soll daher wie folgt aussehen:

- ID des Ziels für das HF-Referenz-Signal
- ID der Quelle des HF-Referenz-Signals

Diese beiden Informationen zusammengefasst ergeben den „Wert“ „Schaltbefehl“, der wie alle Wertzuweisungen in der Regel an ein Event gekoppelt ist.

Mögliche Ziel-IDs wären z.B. die folgenden:

- Bestimmte Kavität (Standardfall)
- Timing-Generator im Elektronikraum
- DSP-System für Strahlphasenregelung
- ...

Mögliche Quell-IDs wären z.B. die folgenden:

- Bestimmte Gruppen-DDS (Standardfall)
- Gapsignal einer bestimmten Kavität
- FCT-Signal

Jeder Ziel-ID kann zu einem Zeitpunkt nur eine Quell-ID zugeordnet werden. Besitzen also zwei aufeinanderfolgende Wertzuweisungen für dieselbe Ziel-ID eine andere Quell-ID, so wird der Schaltzustand durch den nachfolgenden Befehl überschrieben. Umgekehrt können natürlich beliebig viele Ziel-IDs derselben Quell-ID zugewiesen werden (damit zum Beispiel alle SIS18-h=2-Kavitäten derselben Gruppen-DDS zugeordnet sind).

Im einfachsten Fall wird zum Beispiel als ID des Ziels die Kavität S07BE4 ausgewählt und als ID der Quelle die dritte Gruppen-DDS (in allen Versorgungsräumen desselben Synchrotrons wird die i-te Gruppen-DDS dasselbe Signal erzeugen wie die i-te Gruppen-DDS in den anderen Versorgungsräumen – vgl. Fußnote 3).

In der FESA-Software wird eine Tabelle hinterlegt sein, aus der hervorgeht, welche konkrete Switch-Matrix für welche IDs zuständig ist. Natürlich kann es (in wenigen Ausnahmefällen) vorkommen, dass eine bestimmte Zuordnung wegen der konkreten technischen Konfiguration gar nicht möglich ist. Dies wird dann durch aussagekräftige Fehlermeldungen verfolgbar sein.

5.2. Harmonischnzahl und Preset-Phase

Die Wertzuweisungen für das Umschalten der Harmonischnzahl bzw. für die Festlegung der Preset-Phase einer Gruppen-DDS sind wie folgt definiert:

Harmonischnzahl:

- ID der Gruppen-DDS (A, B oder C)
- Harmonischnzahl

Preset-Phase:

- ID der Gruppen-DDS (A, B oder C)
- Preset-Phase

Wie bei allen Wertzuweisungen ist auch in diesen Fällen eine Eventkopplung enthalten.

5.3. Bunch-to-Bucket-Transfer und K.O.-Shift-Funktionalität

In Tabelle 8 und Tabelle 9 sind Daten zusammengefasst, die möglicherweise für den Bunch-to-Bucket-Transfer und die K.O.-Shift-Funktionalität sinnvoll sein könnten (aus [11] übernommen). Diese Vorschläge können zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht detailliert oder gar abgeschlossen werden.

Tabelle 8: Mögliche Daten für den Bunch-to-Bucket-Transfer

physikalische Größe	Datentyp	Beschreibung
Vorankündigung Bunch-to-Bucket- Transfer	Event	Mit geeigneten Delays werden Arbeitspunktumschaltungen vorgenommen, Schalter umgeschaltet, etc. Auch eine Messung des Füllmusters ist daran gekoppelt.
Start-Transfer-Zeitpunkt	Event	Kickeransteuerung/Timing-Generator/Phasenvergleich zwischen den HF-Phasen zweier Synchrotrons. Hieraus kann auch ein Preset der DDS-Phasen im Zielsynchrotron resultieren.
Delays	beschleunigerabhängige Werte	Mehrere Delays, die für den Bunch-to-Bucket-Transfer nötig sind.

Tabelle 9: Mögliche Daten für die K.O.-Shift-Funktionalität

physikalische Größe	Datentyp	Beschreibung
K.O.-Shift	dynamisches Logiksignal	Die Frequenz der relevanten Kavität(en) wird um einen vordefinierten Wert verändert.
K.O.-Shift-Frequenz-Offset	beschleunigerabhängiger Wert	Offset-Frequenz

6. Sonderfunktionen

In diesem Kapitel werden Sonderfunktionen beschrieben, die auch aus Sicht der Datenversorgung und des Kontrollsystems wichtig sind.

6.1. Inbetriebnahmedaten

Nach einem Shutdown müssen Ring-HF-Anlagen nach einer vordefinierten Prozedur in Betrieb genommen werden. Dafür müssen seitens der Datenversorgung vordefinierte Rampen und Grundeinstellungen verfügbar sein, die sich bewährt haben. Insbesondere müssen die kompletten Frequenz- und Amplitudenbereiche der HF-Systeme abgedeckt sein.

Bei der Inbetriebnahme werden auch manuelle Einstellungen vorgenommen (z.B. Arbeitspunkt-, Poti- oder Trimmer-Einstellungen oder gar Komponenten-Austausch), die Einfluss auf eine spätere Kalibrierung des Systems haben. Deshalb ist es wichtig, dass die Inbetriebnahme ordnungsgemäß abgeschlossen wird, bevor eine Kalibrierung nach Abschnitt 6.2 erfolgt.

6.2. Kalibrierung der HF-Systeme

Bislang wurden die HF-Systeme manuell kalibriert. Dies sollte in Zukunft automatisiert erfolgen. Eine Kalibrierung eines Kavitätensystems läuft wie folgt ab:

- Das betroffene Kavitätensystem und das übergeordnete HF-Steuerungsgerät werden mit vordefinierten (relativ langsamen) Rampen und auch mit weiteren Grundeinstellungen versorgt.
- Dann wird Ring-RF-seitig eine Mess-Software gestartet, die die Messwerte erfasst und daraus neue Kalibrierdaten generiert. Dieser Prozess ist relativ zeitaufwendig (typischerweise 20 Minuten pro System).
- Die neuen Kalibrierkurven werden in den Flash-Speicher des jeweiligen Moduls (CEL) geschrieben. Außerdem sollten diese Files vom Kontrollsystem archiviert werden, um einen getesteten Zustand wiederherstellen zu können, falls unerwartete Probleme auftreten.

Dieser gesamte Ablauf sollte von der übergeordneten FESA-Software gesteuert werden. In der Anfangsphase des SIS100-Betriebs werden solche Kalibrierungen natürlich manuell durch die Abteilung Ring RF (RRF) durchgeführt werden. Es muss jedoch in Zukunft möglich sein, solche Kalibrierungen vom Hauptkontrollraum aus anzustoßen, so dass schon jetzt entsprechende Datenversorgungstelegramme vorgesehen werden sollten.

Während eine Kalibrierung läuft, ist natürlich kein Strahlbetrieb möglich. Die Kalibrierungen sollten standardmäßig vor Beginn jeder Strahlzeit (nach Abschluss der Ring-HF-Inbetriebnahmen) durchgeführt werden.

6.3. Mini-Kontrollsystem

Für spezielle HF-Inbetriebnahmen ist es erforderlich, lokale Varianten des Kontrollsystems zur Verfügung zu haben, die vom echten Kontrollsystem unabhängig sind. Ein solches Mini-Kontrollsystem kann (seitens Ring RF) ein spezielles GUI zur

Bedienung haben, sollte aber auf dieselben FESA-Schnittstellen zugreifen wie das echte Kontrollsystem.

7. Wichtige Absprachen zwischen Datenversorgung, Controls und HF

7.1. Übersetzung zwischen Datenversorgung und "BLOB"

Wie in dieser Notiz dargelegt wurde, soll es zwei unterschiedliche Arten von FESA-Klassen geben:

- „FESA RF Cavity Class“ (für jedes Kavitätensystem eine Instanz)
- „FESA RF Synchrotron Class“ (für jedes Synchrotron eine Instanz)

Da die Datenversorgung nur allgemeinverständliche Daten an diese FESA-Klassen liefern soll, muss die Übersetzung (in Technikersystem-spezifische Registerzugriffe) und Weiterverteilung der Daten durch die FESA-Implementierung sichergestellt werden. Wie in der Vergangenheit müssen sogenannte BLOBs (Binary Large Objects) generiert werden, die alle nötigen Registerzugriffe beinhalten.

Die Software, die für die korrekte Übersetzung und Weiterverteilung sorgt, soll im Verantwortungsbereich der Abteilung Ring RF (RRF) liegen. Wichtig ist jedoch, dass das von Controls bereitgestellte Framework alle hierfür benötigten Features bietet. Insbesondere ist hervorzuheben, dass es sich bereits bei einem einzigen HF-Kavitätensystem um ein verteiltes System handelt. Eine einzige Wertzuweisung auf physikalischer Ebene kann beispielsweise dazu führen, dass die übergeordnete FESA-Klasse „FESA RF Cavity Class“ Daten an mehrere andere SCUs, an eine SPS und an weitere Subsysteme, die beispielsweise über SCU-Slave-Karten wie das FIB erreichbar sind, schicken muss.

Wie in dieser Notiz beschrieben, werden seitens Datenversorgung alle Wertzuweisungen einzeln (also unabhängig voneinander) übertragen – auch dann, wenn sie sich auf dasselbe Event beziehen oder gar für dasselbe Sub-Device bestimmt sind. Die o.g. FESA-Klassen müssen solche Wertzuweisungen nach den Events und nach den Sub-Devices sortieren, um eine gleichzeitige Ausführung mehrerer Wertzuweisungen, die an dasselbe Event gekoppelt sind, zu realisieren.

7.2. Sequentielle Amplitudenrampen

Aus Sicht der HF-Abteilung ist ein sequentielles Hochrampen der Amplituden in Zukunft unverzichtbar – s. [7] Abschnitt 3.1. Dies wurde bereits erfolgreich in LSA umgesetzt.

7.3. Funktionsgenerator und BuTiS-Anbindung

Durch die bestehenden Absprachen [10] ist sichergestellt, dass Kontrollsystemtelegramme im BuTiS-Zeitraaster T_0 verschickt werden, so dass eine Resynchronisierung prinzipiell möglich ist.

7.4. Echtzeitanforderungen

Es ist sicherzustellen, dass Wertzuweisungen, die an ein bestimmtes Event gekoppelt sind, tatsächlich in Echtzeit zu diesem Event ausgeführt werden. Typischerweise wird dies wie folgt realisiert:

- Die Wertzuweisungen werden von der zuständigen FESA-Klasse gebündelt und (wie in der Vergangenheit als BLOB) an das jeweilige Sub-Device geschickt. Dies muss rechtzeitig vor dem Auftreten des Events abgeschlossen sein, ist aber ansonsten zeitunkritisch.
- Die ECA-Unit auf der SCU wird so konfiguriert, dass sie ein Start-Tag an das jeweilige Sub-Device schickt.
- Wenn das Sub-Device das Start-Tag erhält, arbeitet es die Registerzugriffe ohne weitere Datenanalysen ab. Die tatsächliche Ausführung erfolgt natürlich je nach Ziel-Device eine gewisse Zeit später, die aber reproduzierbar ist.

Das Sicherstellen der Echtzeitausführung ist damit auf das Endgerät verlagert.

Um einen kompletten Anlagenzustand zu übertragen, sind relativ viele Wertzuweisungen nötig. Deshalb muss noch diskutiert werden, wann genau welche Wertzuweisungen erfolgen sollen:

- Ein kompletter Anlagenzustand sollte nur übertragen werden, wenn gerade keine Maschinenzyklen laufen.
- Übertragungen in der kurzen Pause zwischen zwei Maschinenzyklen sollten auf ein Minimum reduziert werden.
- Je nachdem, wie viele virtuelle Beschleuniger in einem Makrozyklus enthalten sein werden, sollten die zugehörigen Daten vorgeladen werden.

7.5. Rücklesen von Statusinformationen

Wie in Kapitel 2 erwähnt wurde, ist das Rücklesen von Daten als selbstverständlich anzusehen. Durch die verteilten HF-Subsysteme entsteht allerdings eine Komplikation. Möchte das Kontrollsystem wissen, ob ein bestimmtes HF-System funktionsfähig ist, so liegt die Antwort nicht instantan vor, sondern es müssen HF-intern mehrere Telegramme an die Subsysteme gesandt und auf die Antworten gewartet werden. Alle diese Antworten zusammen können dann der Datenversorgung gegenüber als "funktionsfähig" oder "nicht funktionsfähig" gewertet werden. Ggf. ist ein regelmäßiges Polling durch die jeweilige FESA-Klasse sinnvoll.

8. Zusammenfassung

In der vorliegenden Notiz wird ein Vorschlag unterbreitet, wie die Datenversorgung der Ring-HF-Systeme zukünftig in physikalisch sinnvoller Weise definiert werden kann. Die Vorschläge weichen nur moderat von denen in der Vorgängerversion [11] ab.

Der Vorschlag ist nach wie vor nicht als endgültig anzusehen. Es wird davon ausgegangen, dass die internen und abteilungsübergreifenden Diskussionen weitere Aspekte aufwerfen, die Änderungen erforderlich machen. An den in dieser Notiz dargelegten Grundprinzipien dürfte dies aber nichts ändern.

9. Anhang

In diesem Anhang werden Überlegungen zusammengefasst, die nicht für das Verständnis der Notiz nötig sind, in Zukunft aber Einfluss auf die Entwicklungen haben können.

9.1. Gleichberechtigung der Kavitäten

Das Konzept, eine Kavität als Masterkavität zu definieren, wird nicht mehr weiterverfolgt. Alle Kavitäten sind prinzipiell gleichberechtigt. Dieses Konzept ist deutlich allgemeiner und flexibler.

9.2. Absolut-Phasen und Phasendifferenzen

Im Gegensatz zur Vorgängerversion [11] ist es nicht mehr geplant, die Einbauposition einer Kavität im Synchrotron-Ring als im HF-System fest einprogrammiertem Phasenoffset abzubilden. Die Kavitätenposition wird von der neuen Datenversorgung bei der Berechnung der Phasenrampe berücksichtigt.

9.3. KO-Shift

Die Frequenzverschiebung bei der K.O.-Extraktion (sog. K.O.-Shift) hat derzeit einen trapezförmigen Verlauf, der nur lokal vorgegeben wird. Falls es in Zukunft nötig sein sollte, diesen Verlauf kontrollsystemseitig zu modifizieren, ist dies seitens Datenversorgung ebenfalls vorzusehen.

In der Vergangenheit wurde der K.O.-Shift durch ein dediziertes Logiksignal ausgelöst. Da die HF-Systeme in Zukunft über mehrere Versorgungsräume verteilt sind, ist diese Lösung nicht mehr praktikabel. Das Auslösen sollte in digitaler Form über das Kontrollsystem erfolgen. Da die Zeitpunkte nicht vorab planbar sind, ist dafür ein Rückkanal nötig, bevor die Weiterleitung in Echtzeit an die Ring-HF-Systeme erfolgen kann.

9.4. Ansteuerung schneller Gapschalter

Die Ansteuerung von Gapschaltern wurde in dieser Notiz nicht bei der Datenversorgung berücksichtigt, da diese aus heutiger Sicht HF-seitig wie folgt automatisiert werden kann:

1. Vakuum-Gaprelais werden wie bisher automatisch kurzgeschlossen, wenn das jeweilige Kavitätensystem ausgeschaltet wird.
2. Schnelle Halbleiterschalter kann man bei CW-Systemen in Zukunft automatisch kurzschließen, wenn die Soll-Amplitude unter einen bestimmten Minimalwert fällt. Bei Bunchkompressor-Systemen kann die Ansteuerung ebenfalls HF-intern generiert werden, indem entsprechende Pulse vom Start-Event abgeleitet werden.

9.5. Zukünftige Themen

Die folgenden Themen, die zukünftig relevant werden, sind derzeit nicht in dieser Notiz berücksichtigt worden:

- Synchronisierung von Synchrotrons/Bunch-to-Bucket-Transfer: Vorgabe und Messung des Füllmusters, Koordination mit Kicker-Ansteuerung
- Steuerung des Longitudinal Feedback-Systems
- Feedback Around the Amplifier (hier genügt u.U. ein dynamisches Logiksignal, um diese Regelung ein und auszuschalten)
- Batch-Compression (sollte ähnlich wie Bunch-Merging und Bunch-Splitting realisierbar sein)
- Barrier-Bucket- und Longitudinal-Feedback: Es ist zu prüfen, ob Maßnahmen zur temporären Impedanzreduktion HF-intern ausgelöst werden können oder ob dafür eine explizite Ansteuerung nötig ist.

10. Referenzen

- [1] H. Klingbeil: "SIS18-Kavitätensynchronisation", GSI-Arbeitsnotiz Nr. 131205.
- [2] M. Kumm et al.: "Kontrollsystemintegration Digitale Regelungen", Vers. 1.0, 27.11.2007.
- [3] Protokoll der Besprechung vom 09.06.2004 zur Kontrollsystemanbindung der HF-Kavitätensynchronisation, Nr. 090604
- [4] Protokoll der Besprechung vom 11.05.2006 zur Kontrollsystemanbindung der HF-Kavitätensynchronisation, Nr. 11052006
- [5] Protokoll der Besprechung vom 23.03.2007 zur Kontrollsystemintegration digitaler Regelungen, Nr. 23032007
- [6] Protokoll der Besprechung vom 26.04.2007 zur Kontrollsystemintegration digitaler Regelungen, Nr. 26042007
- [7] H. Klingbeil, P. Hülsmann, H. G. König, M. Kumm: "SIS18-HF-Ansteuerung durch das zentrale Kontrollsystem, Vers. 2", GSI-Arbeitsnotiz 110608-HF
- [8] P. Schütt: "GSI-Besprechungsprotokoll: Status Entwicklungen für den Betrieb", 28.05.2009.
- [9] U. Laier: "FAIR Beam Transfer Concept", Rev. 1.00, 04.02.2009.
- [10] T. Fleck: "Meeting on Integration and Linking between FAIR Timing System and BuTiS on 6th of May 2009", Protokoll Nr. 20090506.
- [11] H. Klingbeil, U. Laier: „Ring-HF-Datenversorgung durch das zentrale Kontrollsystem, Vers. 1“, GSI-Arbeitsnotiz 190609-HF, 19.06.2009.
- [12] G. Fleischmann: „Ansteuerungskonzept für Ring-RF-LLRF-Systeme“, Vers. 0.3, 18.01.2017.
- [13] U. Laier: „Common Specification on FAIR LLRF Cavity Control Systems for Ring RF Systems“,
F-CS-RF-01e_LLRF_Cavity_Control_Systems_for_Ring_RF_Systems_v1.60
- [14] H. Klingbeil: „Common Specification on LLRF for FAIR Ring RF Systems“,
F-CS-RF-10e_LLRF-System v0.60
- [15] H. Klingbeil, U. Laier, K.-P. Ningel, S. Schäfer, C. Thielmann, and B. Zipfel: „New digital low-level rf system for heavy-ion synchrotrons“, PHYSICAL REVIEW SPECIAL TOPICS - ACCELERATORS AND BEAMS 14, 102802 (2011).