

# **Ring-HF-Anlagen**

**Harald Klingbeil, Abteilung Ring RF (RRF)**

# Schulung für Operateure – Ring-HF-Anlagen

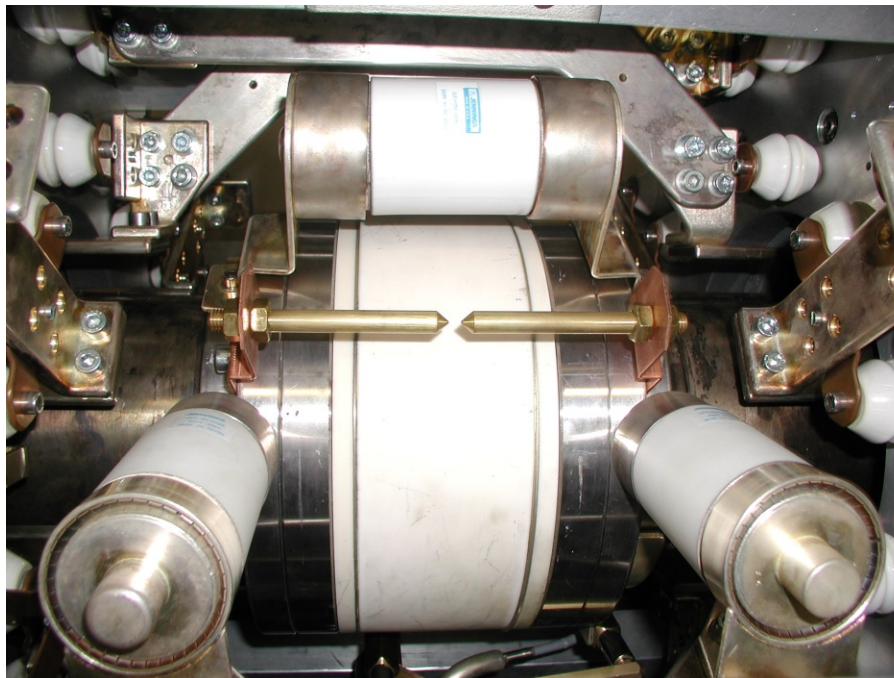
## Übersicht

- Generelles zu Synchrotron- und Speicherring-HF
- Hauptkomponenten eines Ring-HF-Systems
- SIS18-h=2-Kavitäten und Ferritkavitäten
- Schlüsselkomponenten einer HF-Anlage
- Steuer- und Regelungs-System (sogenannte Low-Level RF, LLRF)
- Betriebsaspekte

# Schulung für Operateure – Ring-HF-Anlagen

## Vorüberlegungen

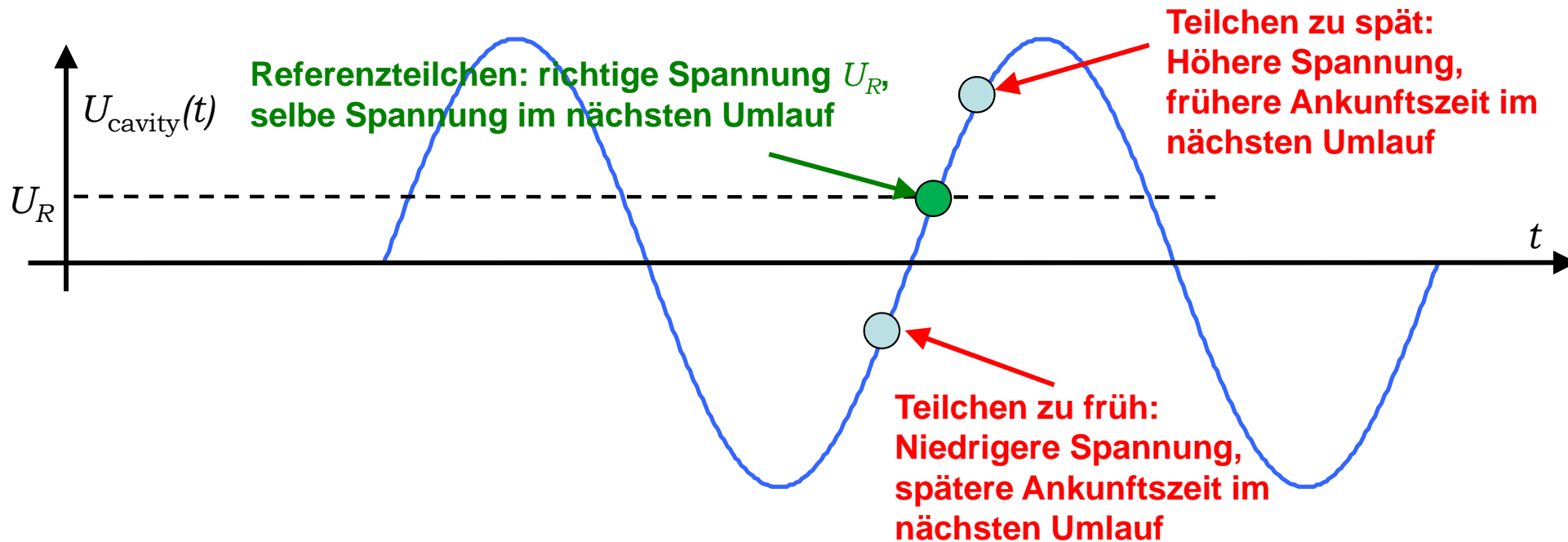
- Erhöhung der Teilchenenergien → immer längere LINACs
- Oftmals effizienter: Umlenken des Strahls und mehrfaches Beschleunigen in derselben Kavität oder in wenigen Kavitäten → z. B. im Synchrotron
- In den Synchrotron-Kavitäten wird die HF-Spannung am sogenannten Gap erzeugt (keramischer Zylinder, der metallisches Strahlrohr unterbricht, um dort eine Spannung zu ermöglichen, der aber Vakuum im Innern ermöglicht)



Gap einer SIS18-Ferritkavität

## Prinzip der Phasenfokussierung

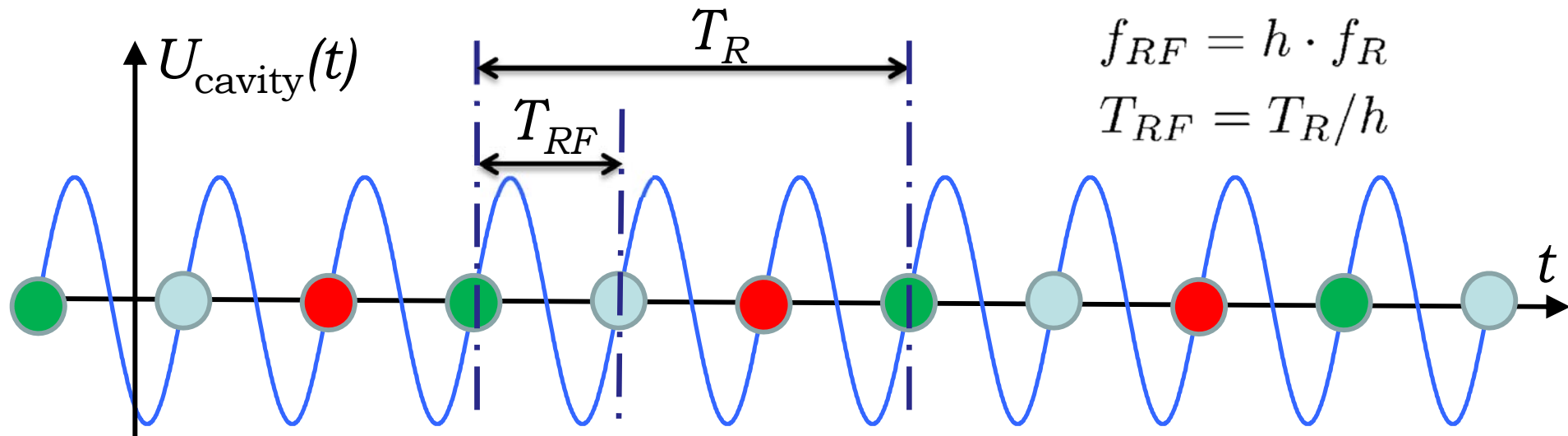
- Idealerweise sollen alle Teilchen dieselbe Spannung "sehen"
- Realität: Teilchen haben unterschiedliche Energie und treffen zu unterschiedlichen Zeiten am Gap ein.



- Teilchenbunche (bündel) sammeln sich um positive Sinusflanke herum (gilt für positiv geladene Ionen nur unterhalb der Transitionsenergie, da dann höhere Energie zu kürzeren Umlaufzeiten führt)
- Die Einzelteilchen führen Synchrotronschwingungen aus, die Bunche schwingen idealerweise nicht

## Harmonischnzahl

- Jede steigende Flanke von  $U_{\text{cavity}}(t)$  ist ein stabiler Bereich für Bunche:



- SIS18-Synchrotronumfang = 216 m  
→ Umlaufzeit >720 ns (Umlauffrequenz <1.4 MHz)
- Wenn nur wenige Bunche umlaufen sollen, muss die Harmonischnzahl  $h$  klein sein, so dass die HF-Frequenz maximal wenige MHz beträgt
- Gegenbeispiel LHC:  $f_{RF}=400$  MHz,  $h \approx 35600$

## Notwendigkeit von Ferrit- bzw. MA-Kavitäten

- Betriebsfrequenz der Beschleunigungskavitäten maximal wenige MHz  
→ Kavitäten auf Basis von Hohlraumresonatoren sind nicht möglich/zu groß  
→ Kavitäten werden mit magnetischen Materialien (Ferrit- oder Magnetic Alloy (MA)-Ringkernen) „gefüllt“ (quasi um Wellenlänge zu vermindern)
- Synchrotron-Kavitäten auf Basis magnetischer Materialien sind quasi RLC-Schwingkreise aus konzentrierten Bauelementen
- Transformatorprinzip zur Übertragung der Anodenspannung (Röhrenverstärker) auf das Gap
- Das Gap und diskrete Gapkondensatoren bilden den Hauptteil der Kapazität im Schwingkreis

## Unterschiede zur LINAC-HF

- Deutlich geringere Spannungen (z.B. 16 kV pro SIS18-Ferritkavität)
- Deutlich geringere Güte (Ferritkavitäten: nur 1...10, aber trotzdem Resonanz deutlich sichtbar, MA-Kavitäten:  $Q < 1$ )
- Betriebsfrequenz deutlich niedriger als bei LINAC-HF  
(z.B. SIS18,  $h=2$ : 0.4 MHz...2.7 MHz,  $h=4$ : 0.8 MHz...5.4 MHz )
- Umlauffrequenz der Teilchen ändert sich
- Betriebsfrequenz der Kavitäten muss sich ändern
  - Ferritkavitäten besitzen Eigenfrequenzregelung (wirkt auf Vormagnetisierung der Ringkerne)
  - Notwendigkeit von Rampen, d.h. Zeitfunktionen

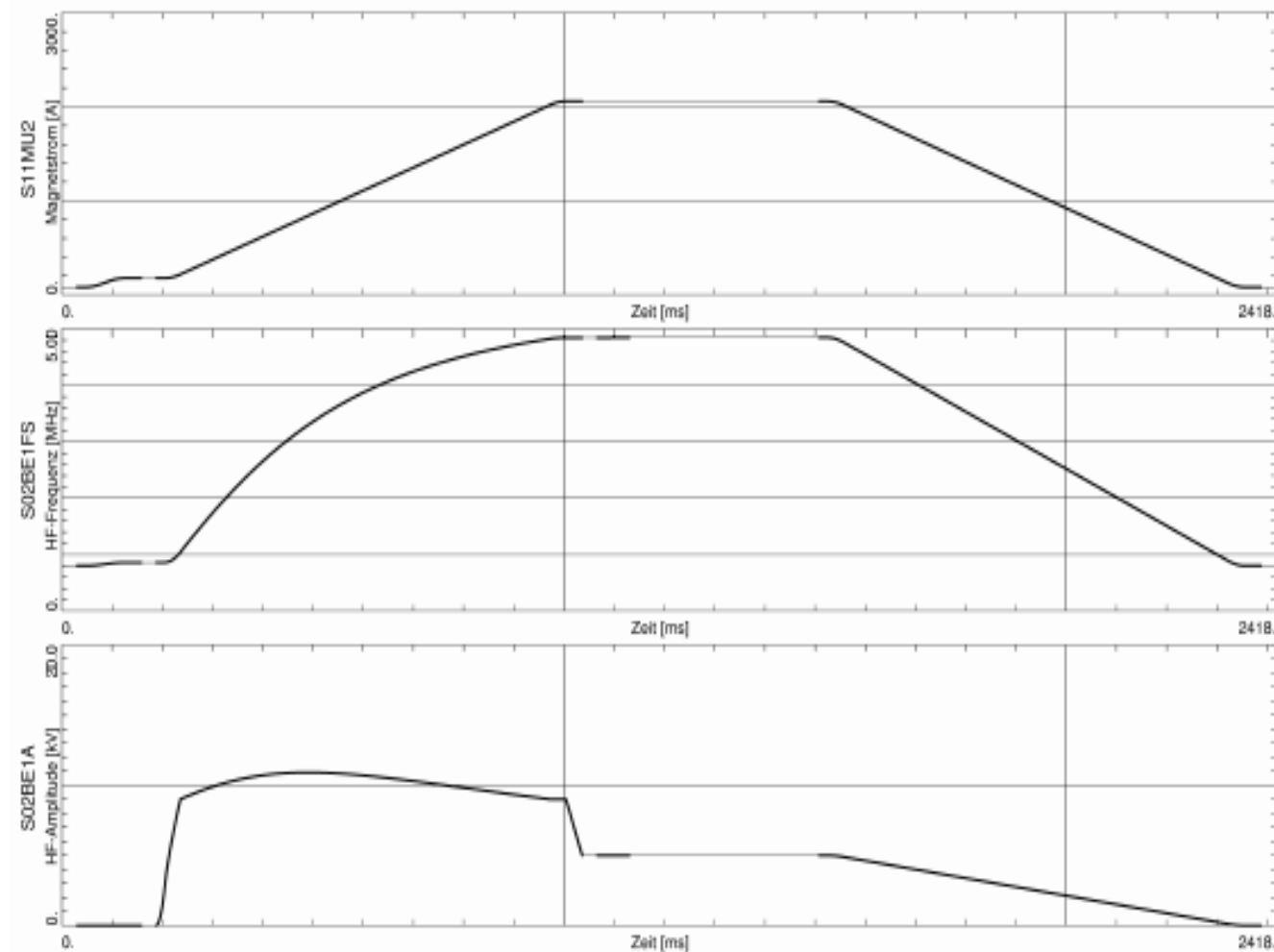
# Schulung für Operateure – Ring-HF-Anlagen

## Rampen

- Magnetfeld

- HF-Frequenz

- HF-Amplitude





## Rampen

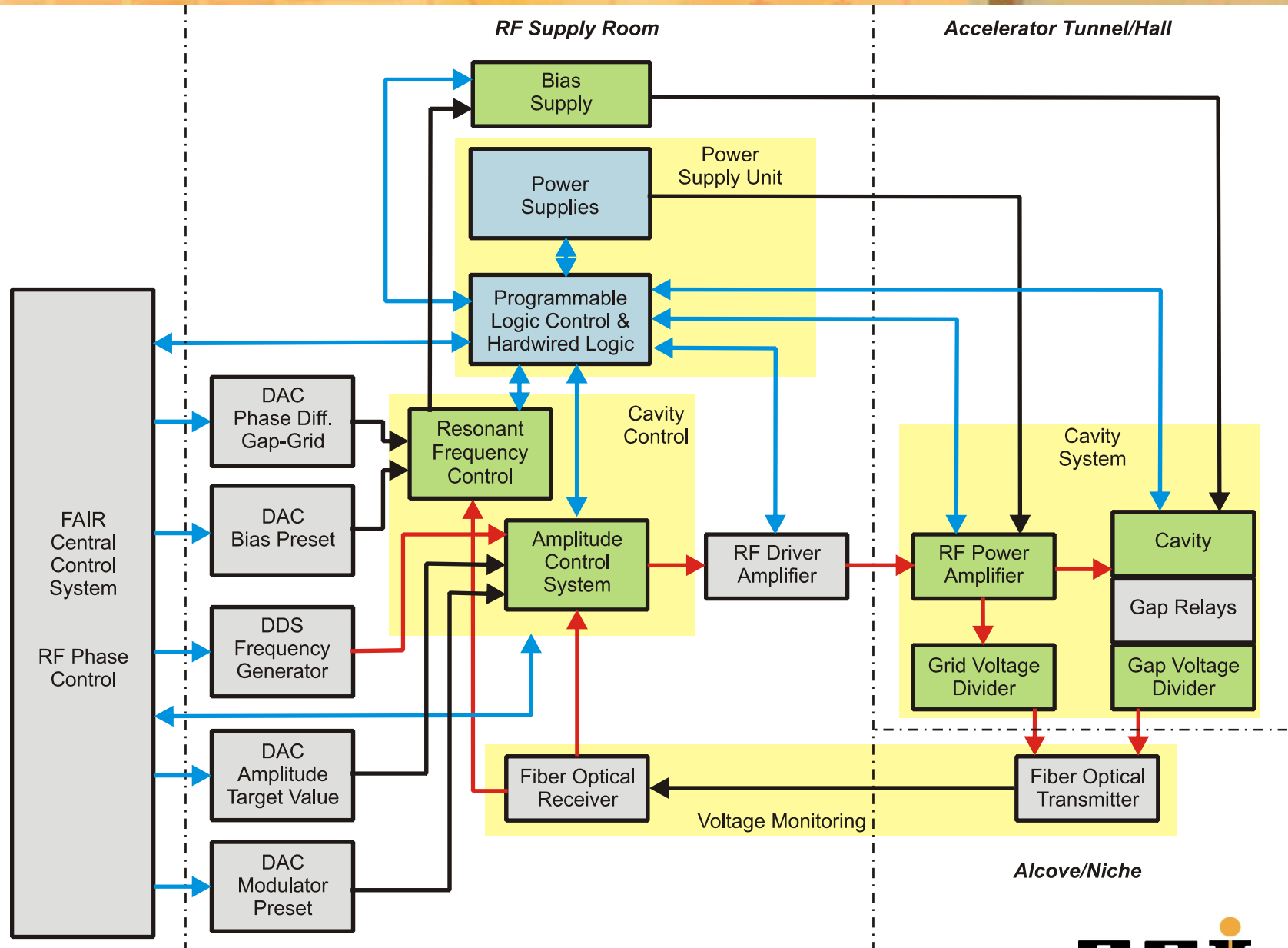
- Wichtigste Rampen:
  - Pro Ferrit-Kavität (GS02BE1, GS08BE2) bzw.  $h=2$ -Kavität (GS07BE3...5):
    - Amplitudenrampe
    - Frequenzrampe (dies ist ab 2018 die Umlauffrequenz, nicht mehr die HF-Frequenz! Die Multiplikation mit  $h$  findet im HF-System statt)
    - Phasenrampe (um mehrere Kavitäten synchronisieren zu können)
  - Übergeordnetes Synchronisationsgerät (GS00BE):
    - Umlauffrequenzrampe (zur Erzeugung von Referenzsignalen, die für die Synchronisation der Kavitäten herangezogen werden)

## Hauptkomponenten eines Ring-HF-Systems

- Kavität incl. Tetroden-Endstufe
- Medienversorgung (Kühlwasser, Kühlluft)
- Versorgungseinheit = Netzgeräte+SPS
- Treiberverstärker
- Regel- und Steuersystem (Low-Level RF, LLRF)

# Schulung für Operateure – Ring-HF-Anlagen

## Typische Struktur eines einzelnen Kavitäten-Systems



## Neuestes SIS18-HF-System: SIS18-h=2-System (3 MA-Kavitäten)

Projektleiter: PD Dr. P. Hülsmann, R. Balß

**Ziel:** Dual-Harmonic-Betrieb in Kombination mit den existierenden Ferritkavitäten

**Parameter** (für eine von 3 HF-Einheiten):

Frequency (MHz)	0.43 to 2.8
Gap voltage (kV)	14
Duty cycle	CW
Aperture of the beam pipe, circular diameter (mm)	150 (CF160)
Installation length, flange to flange (m)	1.34
Maximum power consumption (kW)	600
Cooling water for power amplifier	300 l/min
Cooling oil for cavity	36 m <sup>3</sup> /h=600 l/min

# Schulung für Operateure – Ring-HF-Anlagen

## SIS18-h=2-System: 3 Standorte



SIS18-Tunnel: h=2-Kavität mit darüber montiertem Tetrodenverstärker (Foto: G. Otto)  
(nur eine Einheit, inzwischen sind alle 3 Einheiten eingebaut)

# Schulung für Operateure – Ring-HF-Anlagen

## SIS18-h=2-System: 3 Standorte



Ölkühlsystem für alle 3 Units  
(unterste Ebene der Plattform)

Dreistöckige Plattform für Energieversorgung, Supply Unit und Ölkühlung

# Schulung für Operateure – Ring-HF-Anlagen

## SIS18-h=2-System: 3 Standorte



Ring-HF-Versorgungsraum im BG1.016: LLRF-System der SIS18-h=2-Kavität  
(Rackreihe für eine der drei Einheiten)

# Schulung für Operateure – Ring-HF-Anlagen

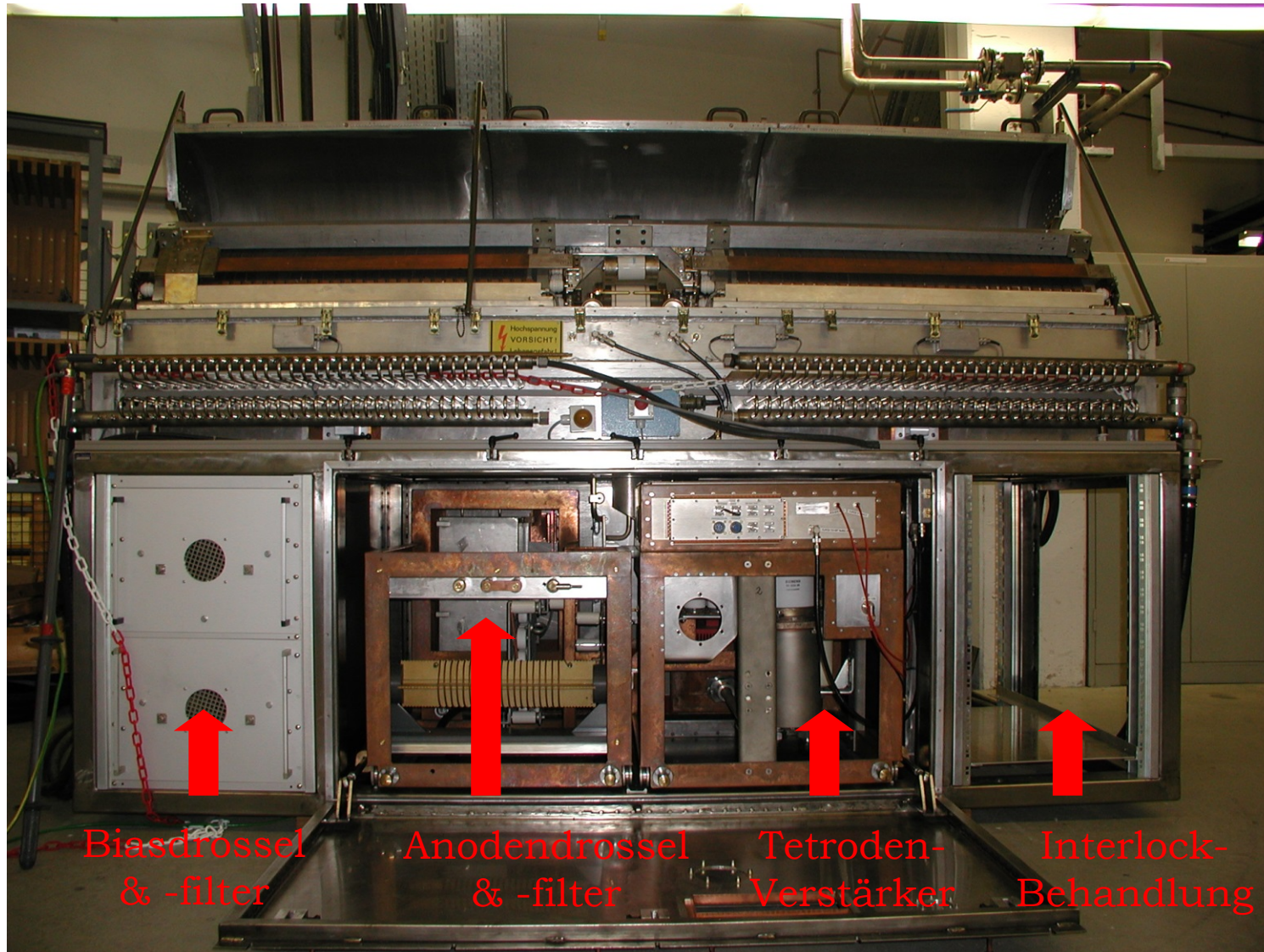
## SIS18-Ferritkavitäten





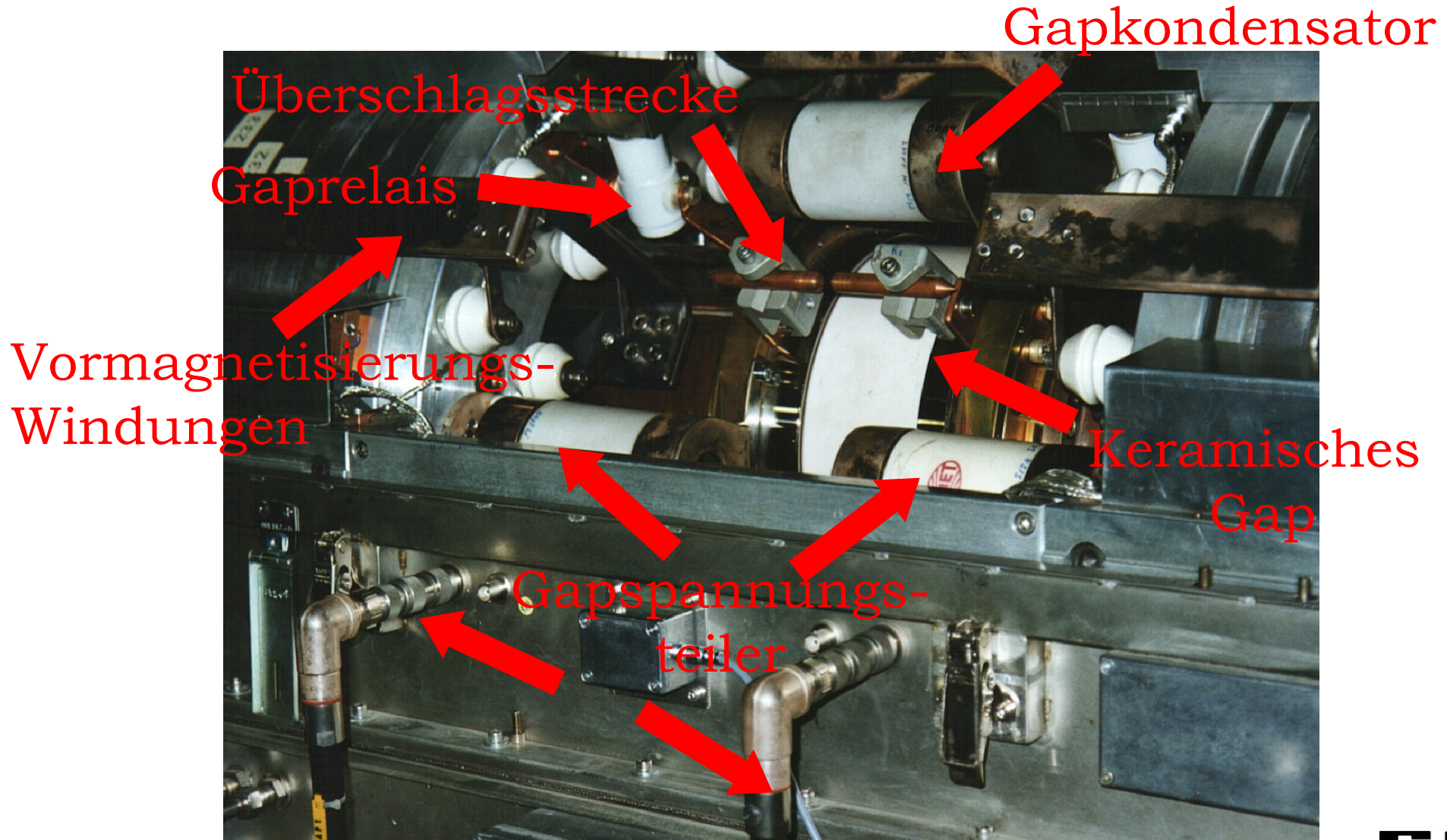
# Schulung für Operateure – Ring-HF-Anlagen

## SIS18-Ferritkavitäten



# Schulung für Operateure – Ring-HF-Anlagen

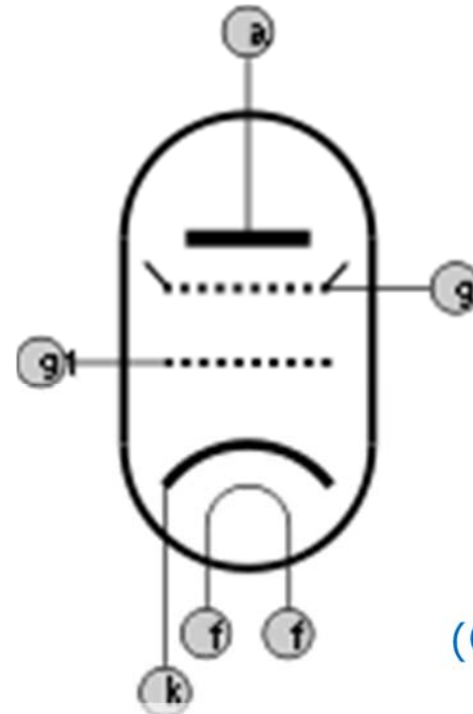
## SIS18-Ferritkavitäten: Gap-Bereich



## Tetroden (Elektronenstrahlröhre)



Tetrode RS2054  
(THALES ELECTRON DEVICES)



Schaltsymbol  
(Quelle: Wikipedia)

Tetrodeneigenschaften:

- Hohe Leistung  
(~100 kW Anodendissipation)
- Hohe Strahlungsfestigkeit

Klystrons werden für höhere Frequenzen benutzt (typischerweise ab 300 MHz).

# Schulung für Operateure – Ring-HF-Anlagen

## Versorgungseinheit



Netzgeräte für Tetroden:

- Anodenspannung
- Schirmgitter-Spannung
- Steuergitter-Spannung
- Heizung

Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)

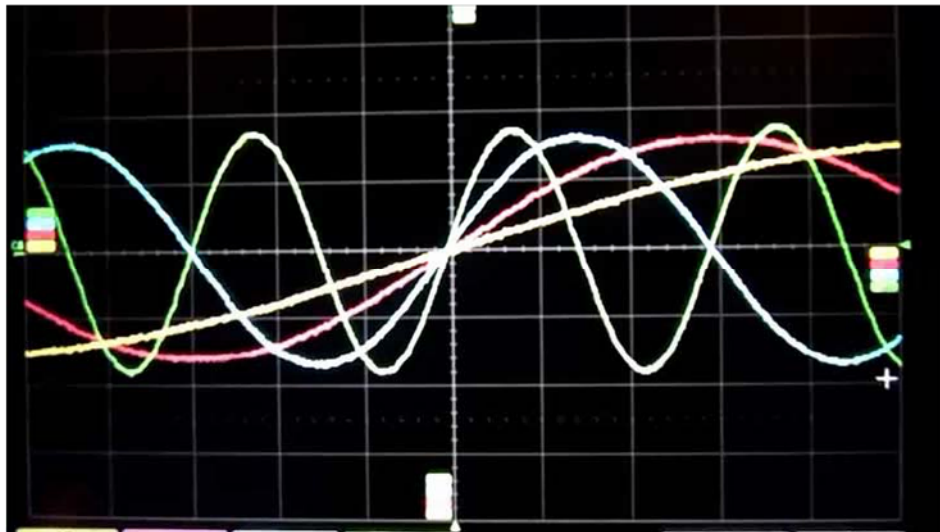
– zusammen mit fester Logik:

- Korrekte Reihenfolge der Spannungen ("Ablaufsteuerung")
- Interlockverarbeitung
- Sonstige Warn-, Fehler- oder Status-Meldungen

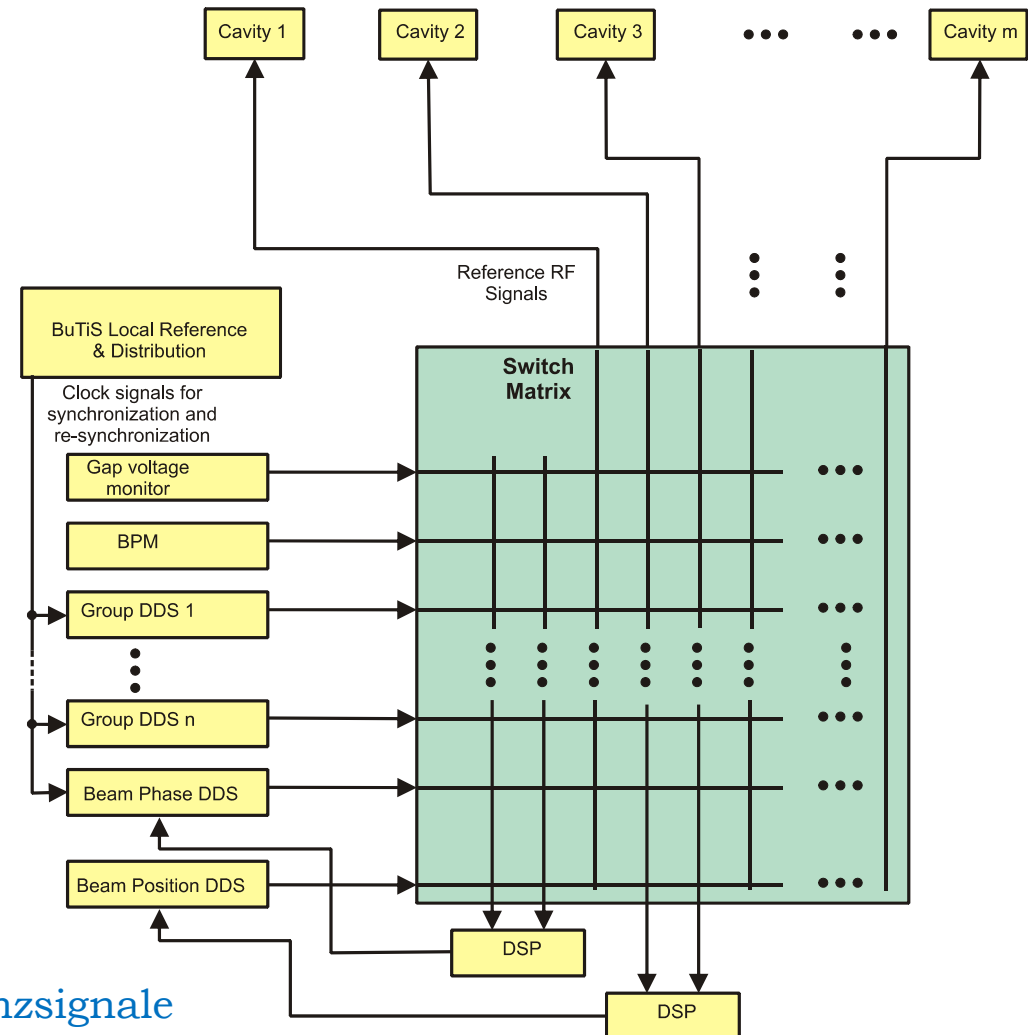
Versorgungseinheit des SIS18-Bunchkompressors

# Schulung für Operateure – Ring-HF-Anlagen

## LLRF-System: Kavitätensynchronisation



Synchrone Erzeugung von HF-Referenzsignalen bei  $h=1,2,4,8$  durch kalibrierte Gruppen-DDS-Module



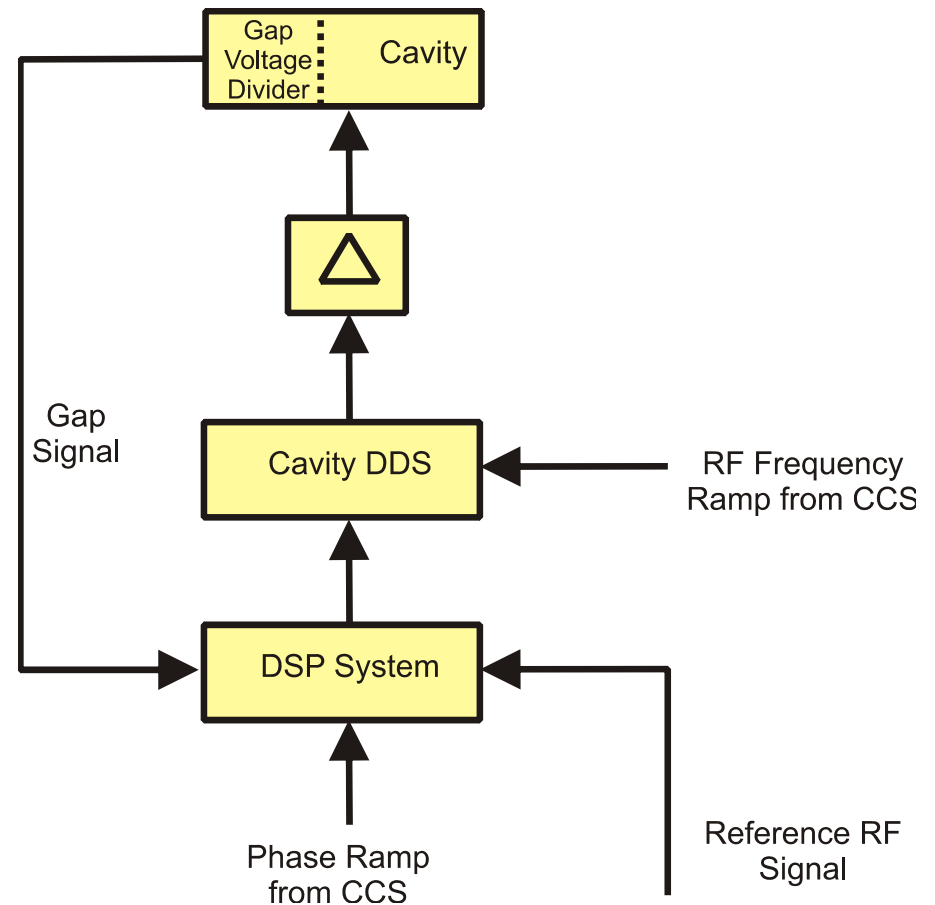
Flexible Verteilung der HF-Referenzsignale an die Kavitäten mittels Switch-Matrix

# Schulung für Operateure – Ring-HF-Anlagen

## LLRF-System: Kavitätensynchronisation

- Die Gruppen-DDS-Module erzeugen alle benötigten HF-Referenzsignale
- Über die Switch-Matrix wird das für die jeweilige Kavität passende HF-Referenzsignal ausgewählt
- Der lokale Regelkreis sorgt dafür, dass das Gapsignal synchron zum Referenzsignal ist

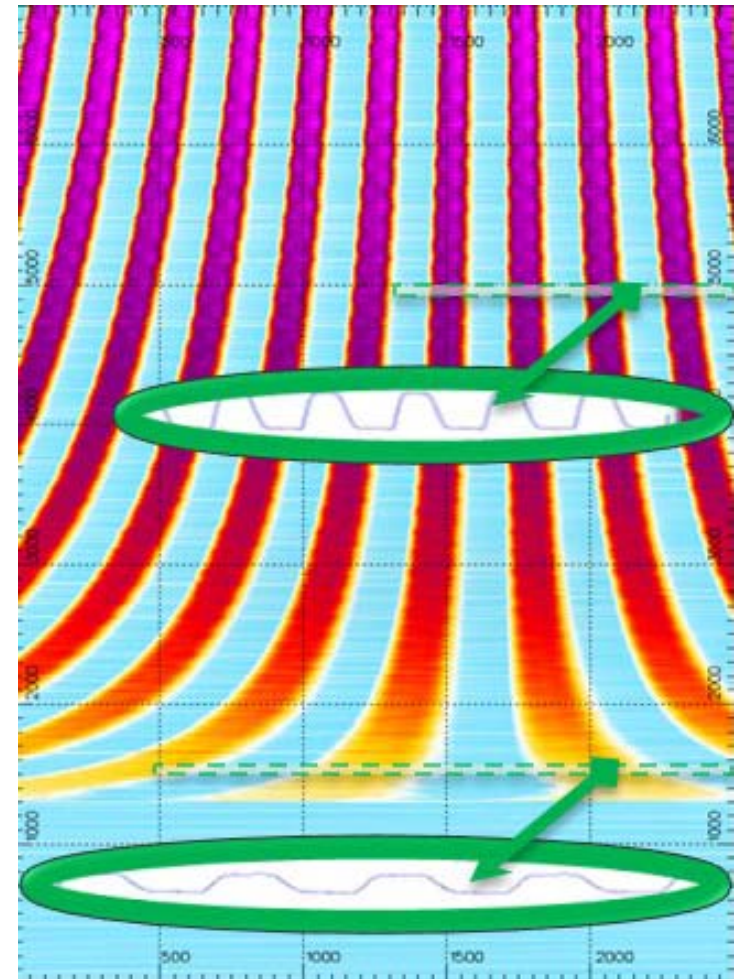
- Das Gesamt-LLRF-System erlaubt die Synchronisation mehrerer Kavitäten bei unterschiedlichen Harmonischen
- Anwendungsbeispiele: Dual-Harmonic-Beschleunigung und Bunch Merging...



Lokaler Regelkreis für die Kavitätensynchronisation

## Dual-Harmonic-Betrieb

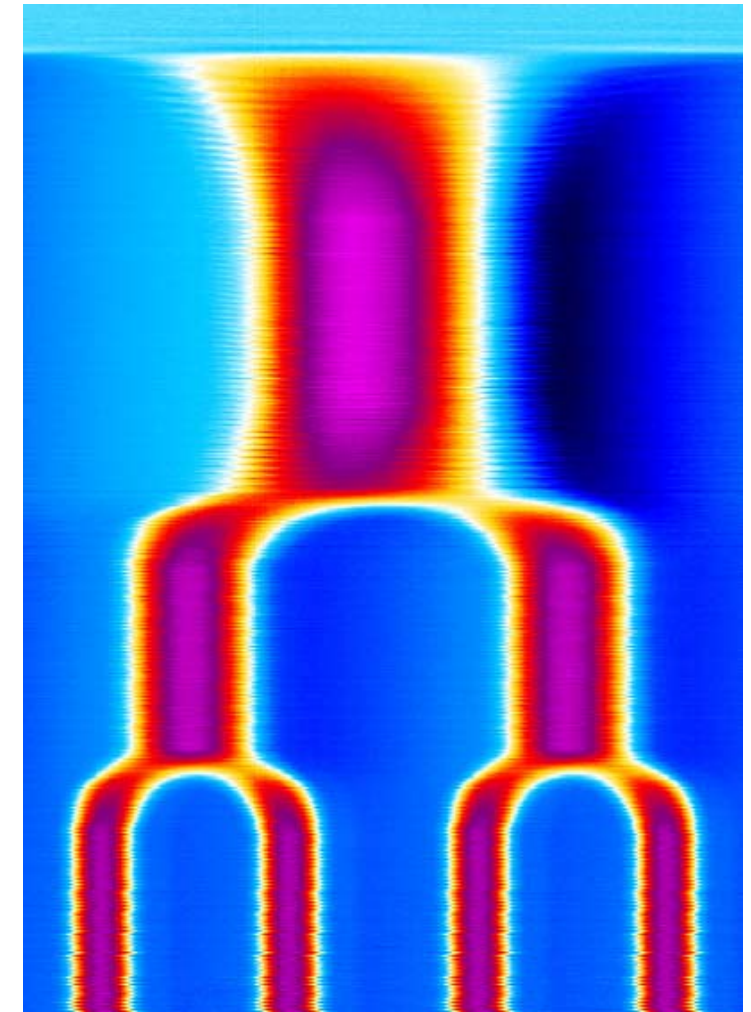
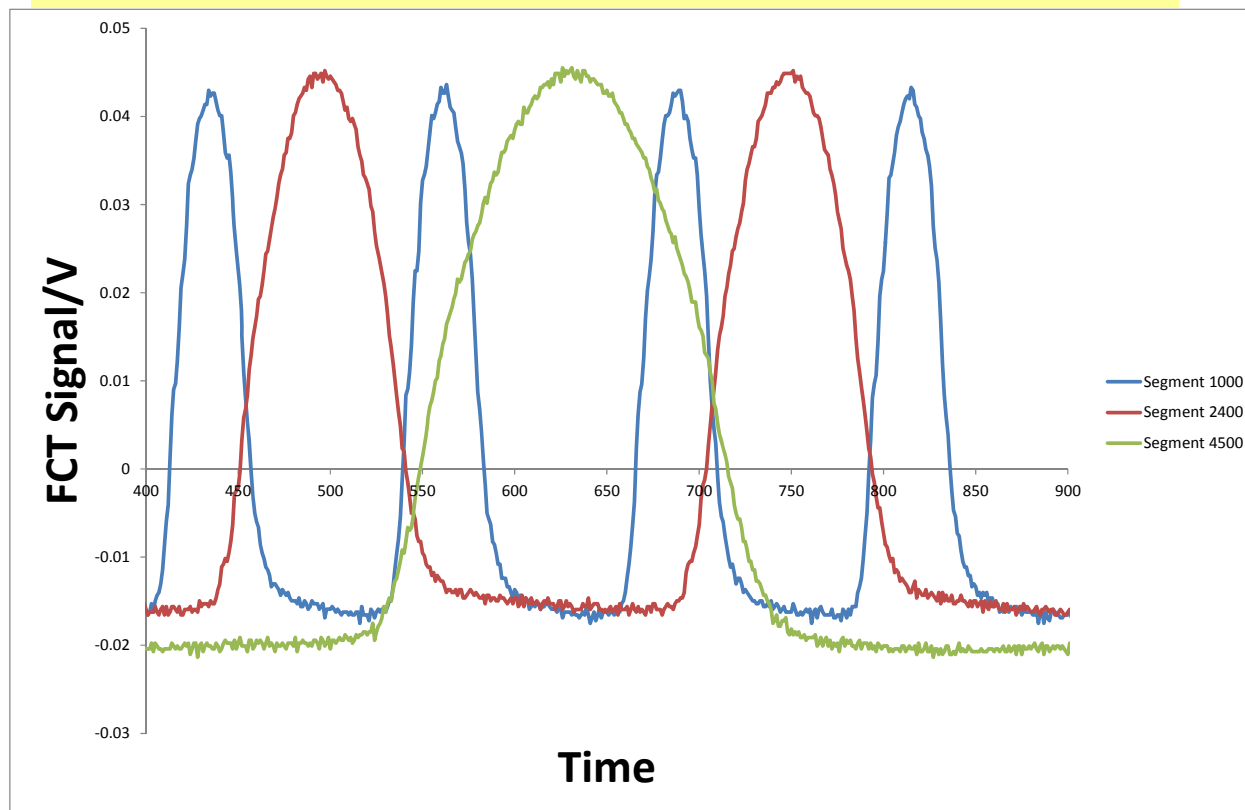
- Machine Development Experiment (MDE)  
02.04.2014
- Eine  $h=2$ -(MA)-Kavität wurde synchronisiert mit Ferrit-Kavität ( $h=4$ ) betrieben.
- Synchronisation sogar während der Beschleunigung (erfordert sorgfältige Kalibrierung der HF-Systeme)
- Dual-Harmonic-Betrieb führt zu flacheren Bunchen



Waterfallplot für Dual-Harmonic-Betrieb

## Bunch-Merging

- Machine Development Experiment (MDE)  
30./31.03.2012
- Zwei Ferrit-Kavitäten wurden betrieben  
(4:2:1-Bunch-Merging)



Waterfallplot für Bunch-Merging



## Betriebsaspekte

- Gaprelais werden derzeit nur kurzgeschlossen, wenn die Anlage komplett ausgeschaltet ist (in Zukunft sollten die Gaprelais auch im „Standby“-Modus geschlossen sein).
- Hochfahren der Endstufe bzw. des Netzgeräts benötigt viel Zeit (ca. 3-5 Minuten für Ferritkavitäten und ca. 10 Minuten für h=2-Kavitäten). In Zukunft sollte der Einschaltprozess mit kleinerer Granularität visualisiert werden.
- Beim Hochfahren einer Anlage sollte die Datenversorgung der Amplitude weggenommen werden.
- Frequenzrampen sollten immer laufen, auch wenn keine Amplitude angefordert wird.
- Zu schnelles Herunterfahren der Gapspannung wird u.U. als Überschlag interpretiert (z.B. bei Bunchrotations-Puls).
- Überschlag schaltet Treiber aus, mit Reset wieder einschaltbar.

# **Schulung für Operateure – Ring-HF-Anlagen**

**Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!**