BESSY VSR

HZB Helmholtz Zentrum Berlin

Diagnose- und Feedback-Systeme

Peter Kuske, Helmholtz-Zentrum Berlin and Humboldt-Innovation GmbH

26./27. April, 2018, **KFB-Perspektiven-Workshop Strahlungsquellen**, Karlsruhe

Inhalt

I. Diagnose
- Standard Diagnose
- Stand und Zukunft von Forschung und Entwicklung

II. Feedback-Systeme
- Strahllage
- Stabilisierung von gekoppelten Schwingungen der Bunche mit Bunch-by-Bunch Feedback
- Stabilisierung bunchinterner Oszillationen mit intrabunch Feedbacksystem

III. Zusammenfassung

Beam Instrumentation in 15...20 years; H.Schmickler (CERN), February 2017

Forum Beschleunigerphysik: Perspectives for Accelerator Physics and Technology

With slides from Rhodri Jones, Manfred Wendt, Thibault Lefevre

Standard oder „Bread and Butter“ Diagnose

Messung von Lage, Querschnitt, Strom, Verlusten, Energie, ... des Strahls

Jeder Beschleuniger, jede Nutzung stellt spezielle Anforderungen an die Diagnose und Stabilität gewisser Parameter

Aufbau, Erhalt und Optimierung **der entsprechenden Diagnoseeinrichtungen ist auch zukünftig die größte Aufgabe**

Zugrunde liegenden *Messprinzipien sind bekannt*

Entwicklung von *Elektronik wird dem Markt folgen* – ein zweischneidiges Schwert: bessere Schaltkreise stehen zur Verfügung, verbaute Elemente sind nicht mehr lieferbar

Diagnose folgt dem Markt

"BUNCHVIEW"
A FAST AND ACCURATE BUNCH-BY-BUNCH CURRENT MONITOR

F. Falkenstern, F. Hoffmann, P. Kuske, J. Kuszynski,
Helmholtz Zentrum Berlin, Germany

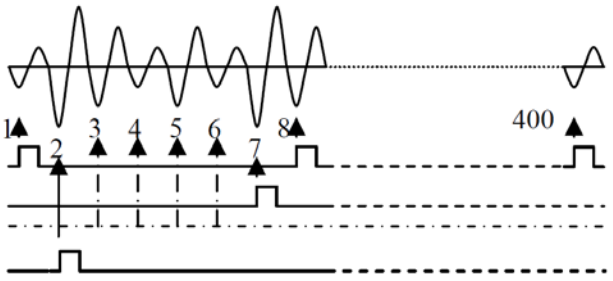


Figure 3: If every 7th bunch is sampled it takes 7 revolution times to acquire the information from each bunch once.

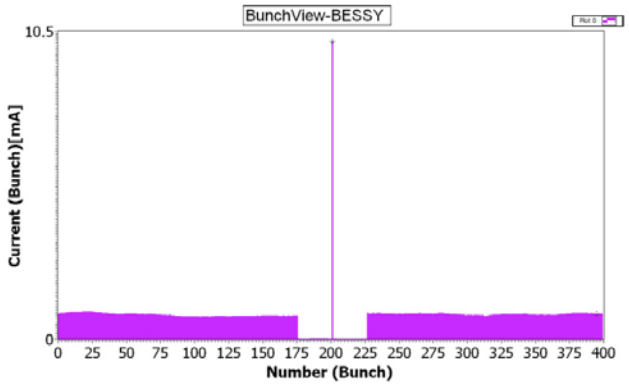
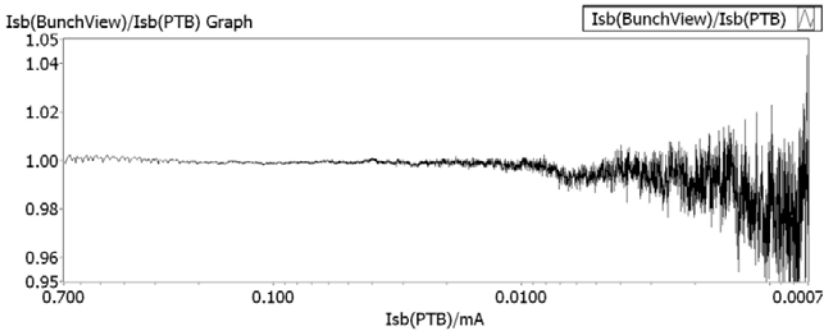


Figure 8: Typical Hybrid fill-pattern at BESSY measured with the BunchView system.



Figures 9: Confirmation of the very good linearity and high sensitivity of the BunchView system between 0.7 mA and 700 nA.

- **damals nur 14/16-bit ADCs mit BW>500 MHz und Sample-Raten von <130 MHz verfügbar**
- **heutige Digitalisierer arbeiten mit >500 MHz und ähnlicher Auflösung**

Beschleunigung des Messprozesses könnte man für kleine Verschiebung des Sample-Zeitpunkts nutzen, um Phasenverschiebungen entlang des Bunchzuges zu kompensieren

Gegenbeispiel: BPM-Elektronik NSLS-II

- **muss nach wenigen Jahren Betrieb ersetzt werden, da wichtige Bausteine nicht mehr verfügbar sind**

Standard oder „Bread and Butter“ Diagnose

Messung von Lage, Querschnitt, Strom, Verlusten, Energie, ... des Strahls

Jeder Beschleuniger, jede Nutzung stellt spezielle Anforderungen an die Diagnose und Stabilität gewisser Parameter

Aufbau, Erhalt und Optimierung **der entsprechenden Diagnoseeinrichtungen ist auch zukünftig die größte Aufgabe**

Zugrunde liegenden *Messprinzipien sind bekannt*

Entwicklung von *Elektronik wird dem Markt folgen* – ein zweischneidiges Schwert: bessere Schaltkreise stehen zur Verfügung, verbaute Elemente sind nicht mehr lieferbar

Kostendruck und Personalknappheit **lassen sich nur kompensieren durch Kooperation über Grenzen von Arbeitsgruppen, Instituten oder Länder hinweg**

Knappe Resourcen

Digitalelektronik, DSP, FPGA-Programmierung ... gibt es in verschiedenen Gruppen (LLRF, Orbit- oder bunch-by-bunch-Feedback ... und nicht zuletzt in der Diagnose)

ATP
KIT Accelerator Technology Platform

- Institute for Beam Physics and Technology (IBPT)
- Laboratory for Applications of Synchrotron Radiation (LAS)
- Institute for Photon Science and Synchrotron Radiation (IPS)
- Institute for Data Processing and Electronics (IPE)
- Institute of Micro- und Nanoelectronic Systems (IMS)

17/04/18 Edmund Blomley - Status of Diagnostics Activities at KARA

BPM setup

BPM types

- Button for different beam pipe diameter
- Low Q cavity BPMs with 2 beam pipe diameters
- Reentrant Cavity BPM (30% of cold LINAC)

Collaboration (institutes and tasks)

- CEA Saclay: re-entrant cavity BPM for cold modules including front end electronics
- DESY: button and cavity BPM mechanics
- PSI: front end electronics (button and cavity BPM) and digital back end (all)

Stand und Zukunft von Forschung und Entwicklung

1. ***Anforderung höherer Präzision*** **– Bestimmung der Strahllage im nm-Bereich: Cavity-BPMs oder BESSY Tune Monitor**

nm-Auflösung – der BESSY Tune Monitor

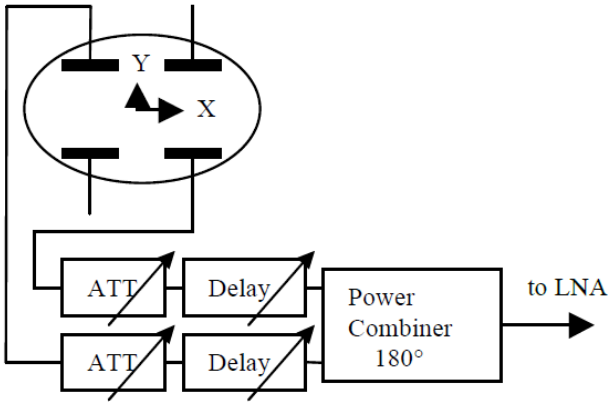


Figure 3: Voltage signals from two striplines are adjusted (in amplitude and phase) for suppression of the common mode with the power combiner.

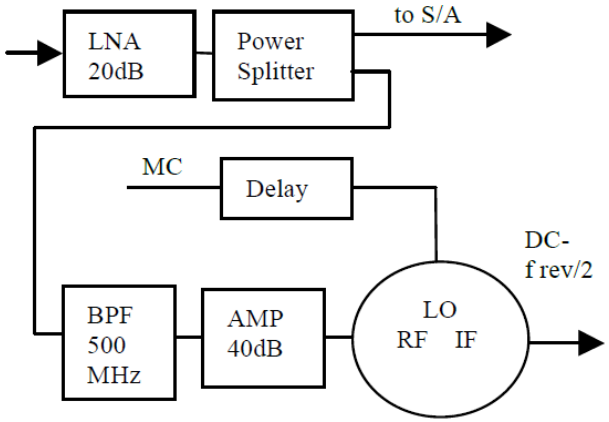


Figure 4: The filtering, amplification and down mixing of the resulting RF signal with the 500 MHz-master clock.

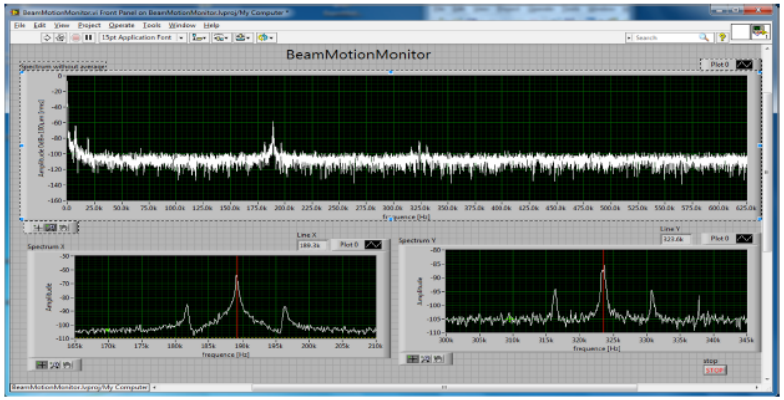


Figure 6: Top - beam motion from 0 to $f_{rev}/2$. Bottom - averaged spectra showing the betatron tunes. A sharp betatron line at the center, and two synchrotron satellites are clearly visible.

nm-Auflösung und Arbeitspunkt-bestimmung ohne externe Anregung

Ansatz ähnlich wie bei Detektion für Bunch-by-Bunch Feedbacks

Stand und Zukunft von Forschung und Entwicklung

1. ***Anforderung höherer Präzision*** **– Bestimmung der Strahllage im nm-Bereich: Cavity-BPMs oder BESSY Tune Monitor**

2. ***Immense Erhöhung der Datenraten*** **– durch mehr Sensoren, die simultane Messung von mehreren Parametern aller Bunche über längere Zeiten, und Archivierung von relevanten Daten für eine „post mortem“ Analyse**

Erhöhte Datenraten

KALYPSO

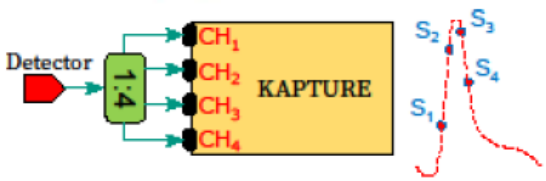
KArlsruhe Linear arraY detector for MHz-rePetition rate SpectrOscopy

- Ultra-fast 1D camera
  - Frame rate up to 2.7 MHz, continuous acquisition
  - InGaAs/Si sensors for near-IR/visible light
  - 256 pixel, 50 um pitch
  - Front-end chip: GOTTHARD [1] (A. Mozzanica, PSI)

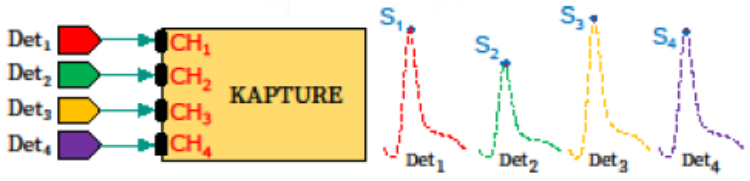
KAPTURE

KArlsruhe Pulse Taking Ultra-fast Readout Electronics

- Minimum sampling time: 3 ps
- Maximum pulse rate: up to 550 MHz



Configuration 1



Configuration 2

Stand und Zukunft von Forschung und Entwicklung

1. ***Anforderung höherer Präzision*** **– Bestimmung der Strahllage im nm-Bereich: Cavity-BPMs oder BESSY Tune Monitor**

2. ***Immense Erhöhung der Datenraten*** **– durch mehr Sensoren, die simultane Messung von mehreren Parametern aller Bunche über längere Zeiten, und Archivierung von relevanten Daten für eine „post mortem“ Analyse**

3. ***Höhere Strahlleistung/Strahlströme*** **– zerstörungsfreie Diagnose: Synchrotronstrahlung, Protonen bei höherer Energie (FCC), oder bei Elektronen mit kleiner Energie (bERLinPro), Halo-Monitor; – Sicherheitsinterlocks basierend auf Orbitdaten, Verlustmonitoren, Strahlaufweitungen**

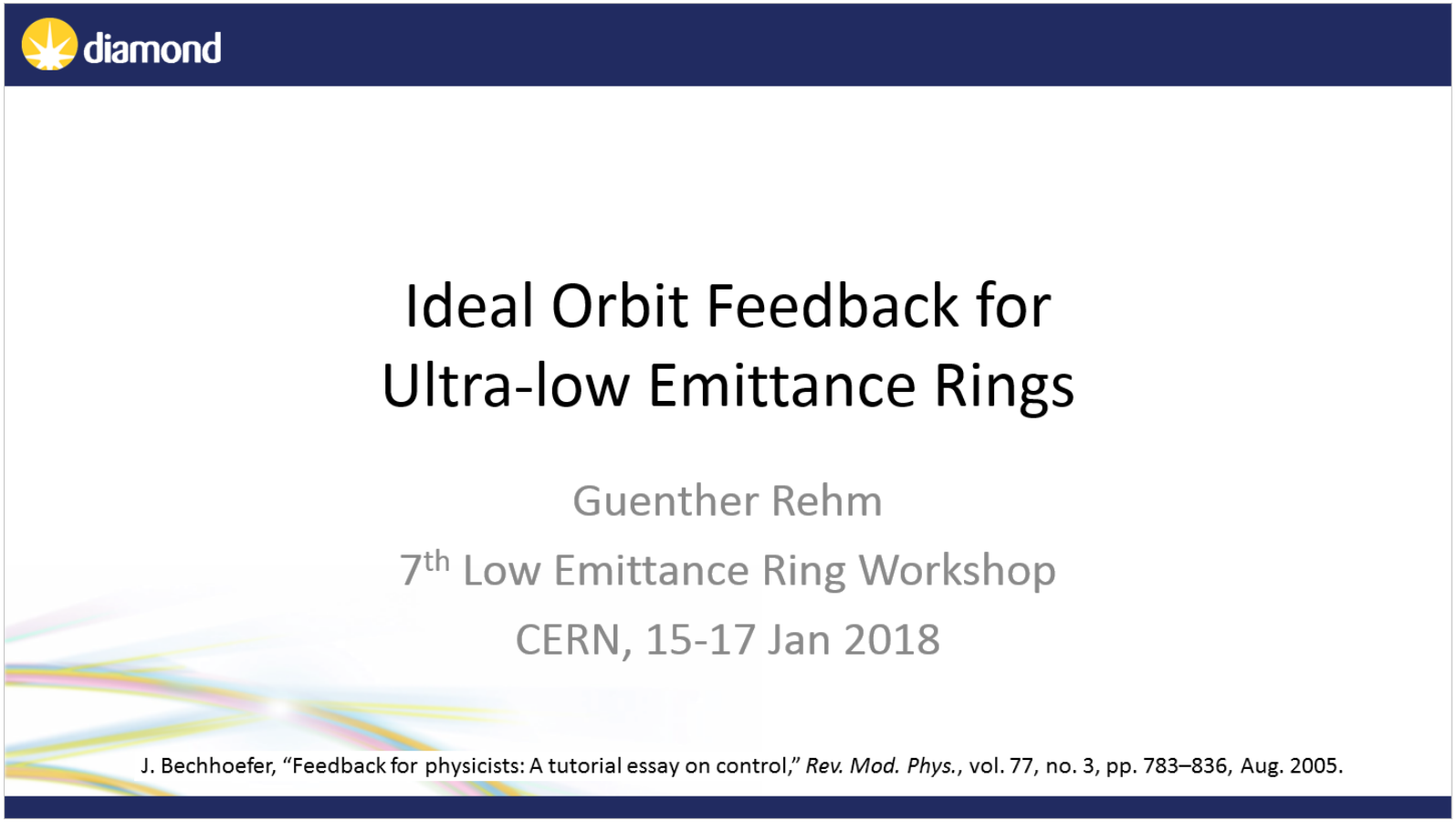
4. ***Forderung nach höherer zeitlicher Auflösung*** **für Parameteroptimierung, Timing und Synchronisation – z.B. liefern transversal ablenkende Resonatoren ~10 fs-Auflösung (in „single pass“ Geräten wie LINACs) oder modernste „Streak“ Kameras mit 100 fs-Auflösung für BESSY VSR mit ps-langen Bunchen oder ERLs**

5. ***Messung kleinster Ströme*** **– z.B. Mit cryogenem Strom Komparator (CCC) bei speziellen Beschleunigern für exotische Teilchen oder medizinische Anwendungen**

6. ***Messung spezieller Parameter*** **bei neuen Teilchenquellen**

Feedbacksysteme

***Strahlungsquellen sind ohne Regelsysteme nicht sinnvoll zu betreiben*:**
Regelschleifen in Netzteilen, Temperaturstabilisierung von Luft und Kühlwasser, Regelung der Hochfrequenzanlagen (LLRF), Strahllage- und Quellgrößenstabilisierung, Konstanthalten des Arbeitspunktes, der Füllstruktur, des Strahlstroms, der Energie ....



Bahnänderung durch kleine Dipolstörung

$$\frac{\Delta_{x.y}(i)}{\theta_{x,y}(j)} = \sqrt{\beta_{x,y}(i)\cdot\beta_{x,y}\,(j)}\,\frac{\cos\left(\left|\mu_{x,y}(i)-\mu_{x,y}(j)\right|-\pi Q_{x,y}\right)}{2\cdot\sin\left(\pi Q_{x,y}\right)} + \frac{D_{x,y}(i)\cdot D_{x,y}(j)}{\alpha\cdot circumference}$$

$$R_{ij} = \frac{\Delta_{x.y}(i)}{\theta_{x,y}(j)} \qquad \overrightarrow{\Delta_{x,y}} = R_{ij}\cdot\overrightarrow{\theta_{x,y}}$$

Inversion der Orbit Response Matrix, ORM, $R_{i,j}$, mit „Singular Value Decomposition“, SVD:

$$\overrightarrow{\theta_{x,y}} = R_{i,j}^{-1}\cdot\overrightarrow{\Delta_{x,y}} = (U\cdot\Sigma\cdot V^{T})^{-1}\cdot\overrightarrow{\Delta_{x,y}} = V\cdot\Sigma^{-1}\cdot U^{T}\cdot\overrightarrow{\Delta_{x,y}}$$

Matrix Σ enthält nur Elemente auf der Hauptdiagonalen und deren Inverses ergibt die inverse Matrix Σ^{-1}. Kleine Elemente werden dabei ignoriert.

Wird bei langsamen und schnellen Orbitstabilisierungen mit großem Erfolg eingesetzt. Sub-Micron Stabilitäten können erreicht werden.

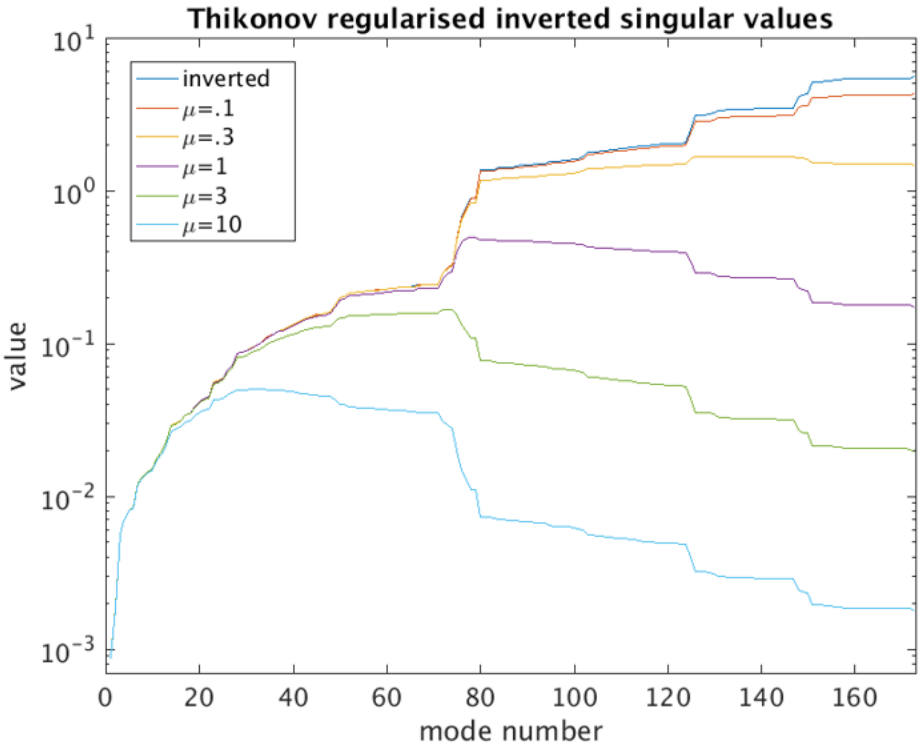
Manchmal (bei Optik-, Energie-Änderungen oder bei Fehlverhalten von Komponenten) ist eine Inversion mit diskreter FT, DFT, und eine harmonische Zerlegung vorteilhafter .

Lagestabilisierung von “späten“ Bunchen in einem Bunchtrain (FELs).

diamond

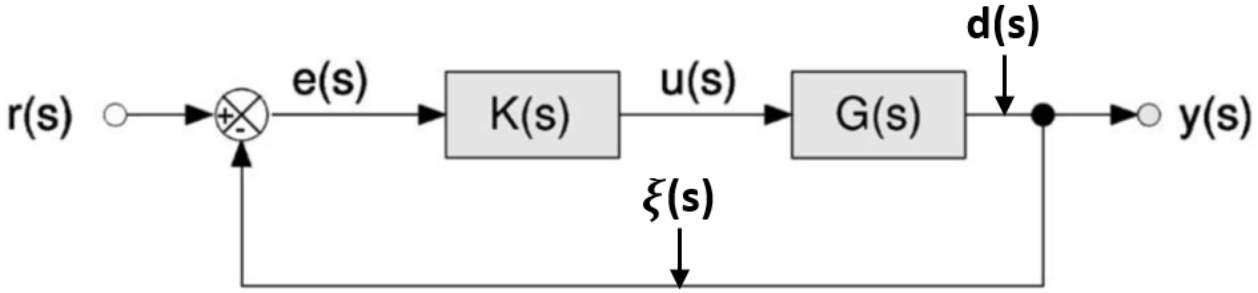
Tikhonov regularisation

- Deals with inversion of poorly conditioned matrix, less severe than culling
- Replaces inversion of singular values with $\tilde{\sigma}_{nn} = \frac{\sigma_{nn}}{\sigma_{nn}^2+\mu^2}$
- $\tilde{R} = V\tilde{\Sigma}U^T$
- Regularisation parameter μ will chose strength of 'calming' high modes, but they are not eliminated
- After multiple applications, the result will still be a fully corrected orbit
- With IMC controller, μ will cause lower gain for high modes
- Requires only adaptation of ORM inversion, reduces pickup of electronic noise from BPMs



diamond

A simple feedback loop

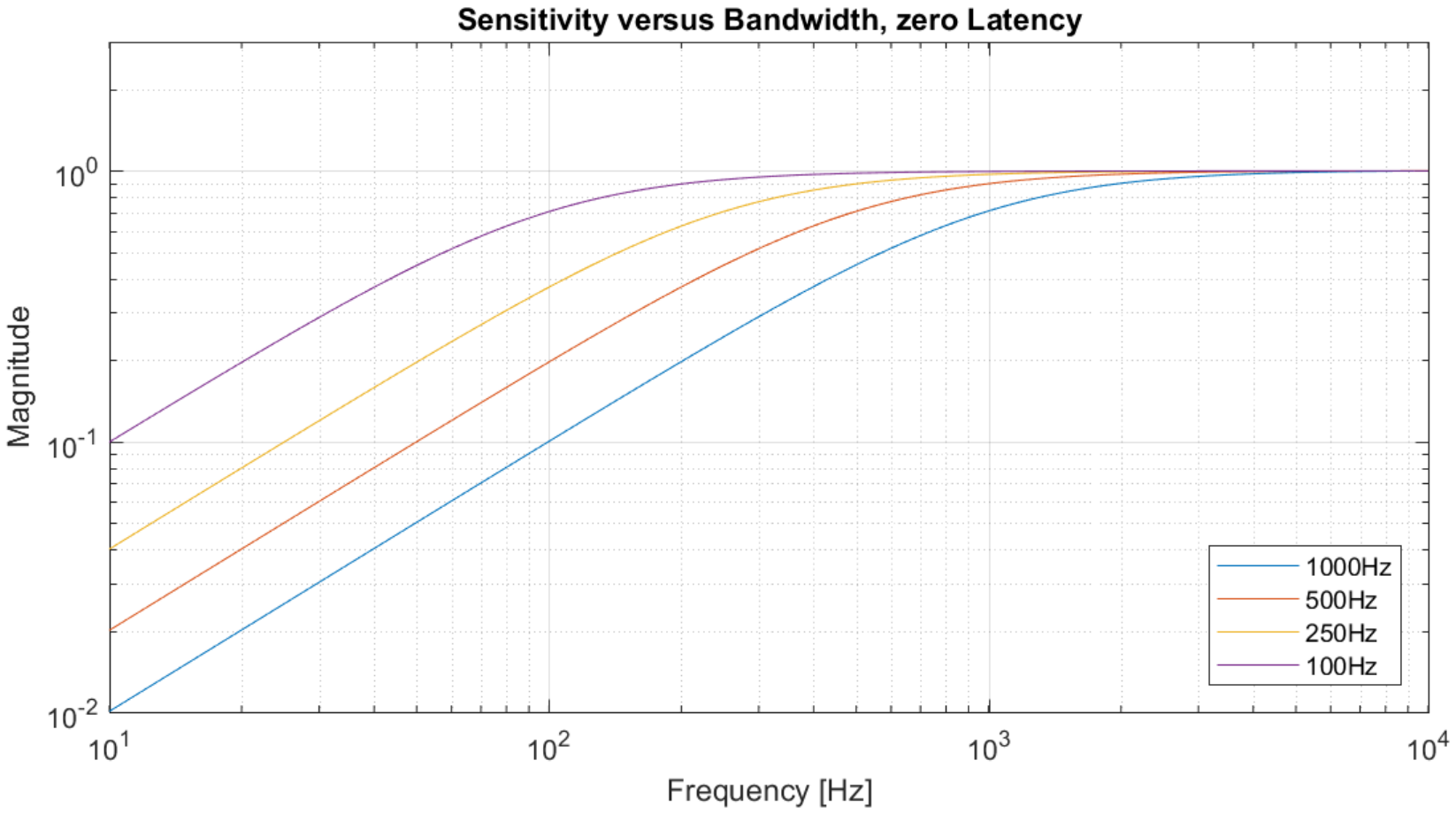


$$y(s) = \frac{K(s)G(s)}{1 + K(s)G(s)} r(s) \qquad y(s) = \frac{KG}{1 + KG}[r(s) - \xi(s)] + \frac{1}{1 + KG} d(s)$$

From [1]

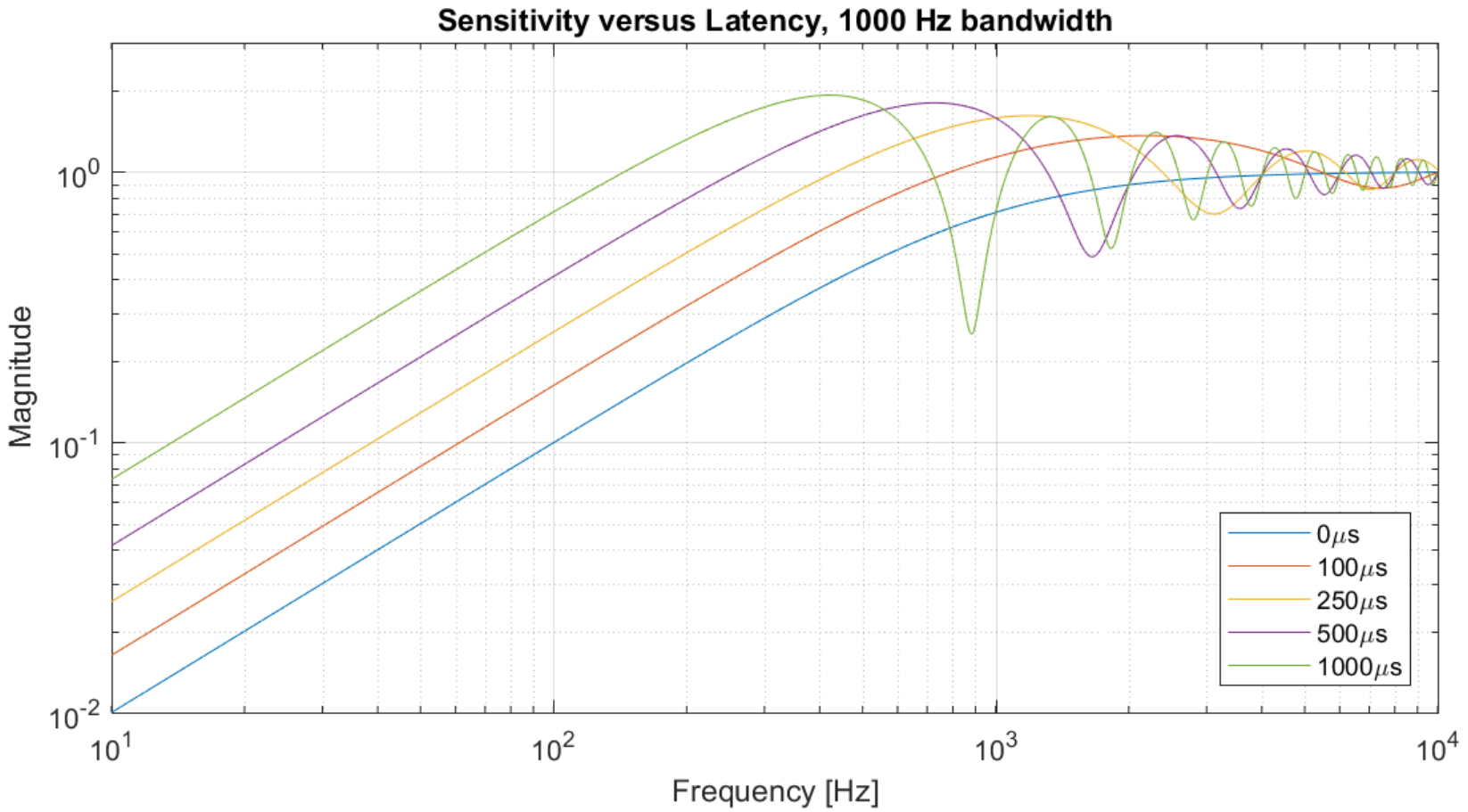
- G(s): Transfer function of the plant, including actuator and monitor dynamics (beam orbit including corrector and BPM dynamics)
- K(s): Transfer function of the controller
- e(s): feedback error
- r(s): set point
- u(s): actuator values (corrector magnet values)
- y(s): monitor values (BPM values)
- d(s): disturbance (here shown on the orbit, could equally be shown adding to u(s)
- ξ(s): BPM uncertainties/noise

Ideales Feedback ohne Latenzzeiten



Taken from 7th Low Emittance Workshop, CERN, 15-17 Jan 2018: Ideal Orbit Feedback for Low Emittance Rings, G. Rehm

Reales Feedback mit Latenzzeiten



Taken from 7th Low Emittance Workshop, CERN, 15-17 Jan 2018: Ideal Orbit Feedback for Low Emittance Rings, G. Rehm

Bunch-by-Bunch Feedback

Zur Unterdrückung gekoppelter transversaler oder longitudinaler Schwingungsmoden der Bunche, die durch Resonanzen angeregt werden können.

Feedback basiert auf der harmonischen Ablage der Schwerpunkte der Bunche von der gewünschten Solllage. Die Abweichung vom Gleichgewicht wird gemessen und die Bunchbewegung etwas später entsprechen korrigiert.

Bei Elektronenspeicherringen werden Dämpfungsraten etwa zehnmal größer als durch die Synchrotronstrahlung erreicht. Diese Feedbacks sind standard bei heutigen Speicherringen und werden zukünftig auch für Synchrotrons erforderlich sein.

Unter bestimmten Bedingungen – BESSY VSR mit vielen supraleitenden Beschleunigungsresonatoren, oder beim „Future Circular Collider“, FCC, sind stärkere oder mehrere Feedbacksystem in jeder Ebene erforderlich (A. Drago, TUT3AH9, Proc. of eeFACT2016, Daresbury, UK).

Eine Stärke dieser digitalen Systeme sind ihre diagnostischen Möglichkeiten. Im gedämpften Zustand wird der Feedbackloop unterbrochen und das Enstehen der Instabilität kann beobachtet werden (grow-damp-Messungen).

Bunch-by-Bunch FB

Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark THPVA028

MULTI-BUNCH INSTABILITIES MEASUREMENT AND ANALYSIS AT THE DIAMOND LIGHT SOURCE

R. Bartolini[1], R. Fielder, E. Koukovini-Platia, G. Rehm, Diamond Light Source, Oxfordshire, UK
[1]also at John Adams Institute, University of Oxford, UK

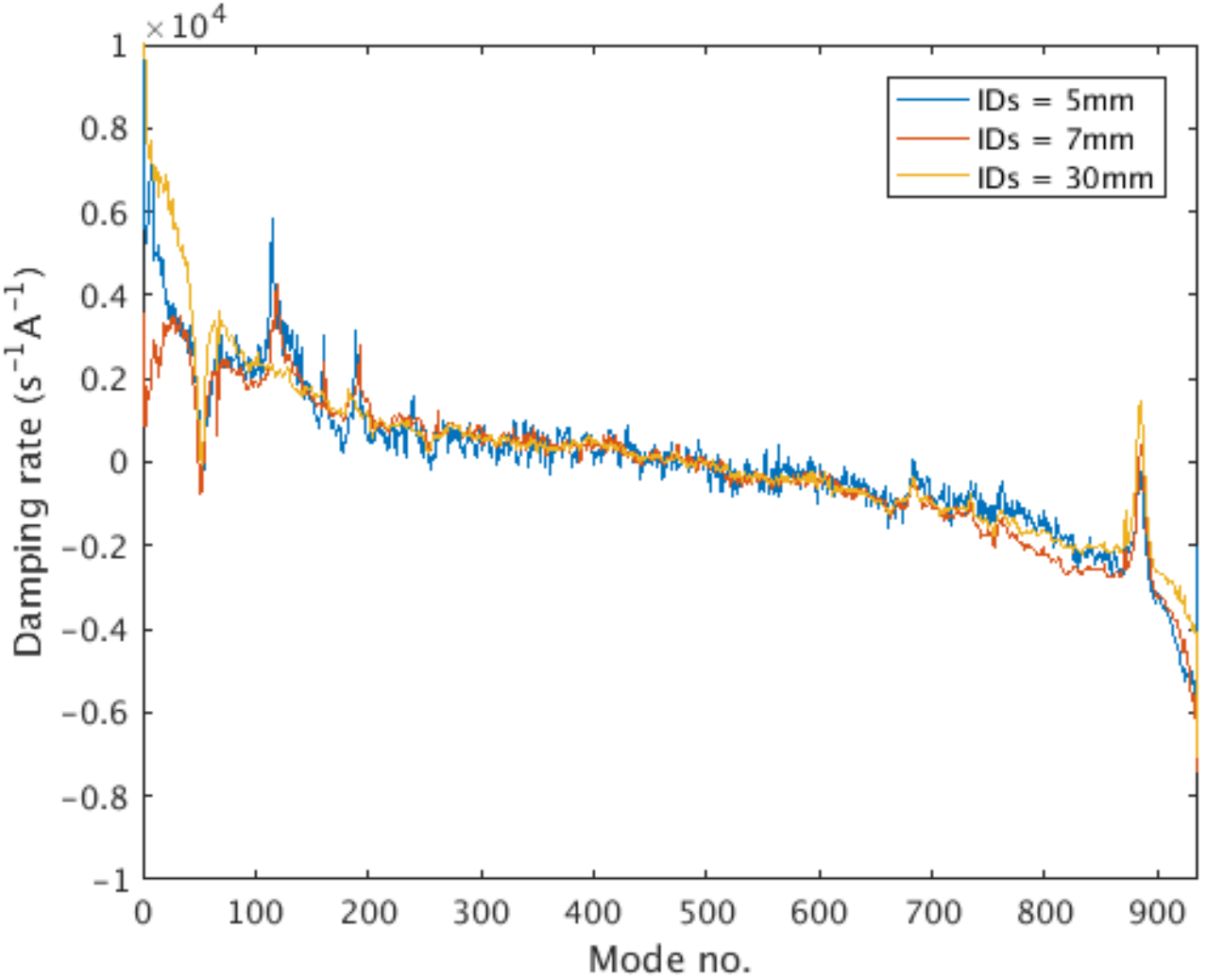


Figure 5: Vertical damping rates for all modes vs. in-vacuum ID gap at 30 mm (fully open), 7 mm (gap used during injection) and 5 mm (minimum gap).

Bunch-by-Bunch FB

Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark THPVA028

MULTI-BUNCH INSTABILITIES MEASUREMENT AND ANALYSIS AT THE DIAMOND LIGHT SOURCE

R. Bartolini[1], R. Fielder, E. Koukovini-Platia, G. Rehm, Diamond Light Source, Oxfordshire, UK
[1]also at John Adams Institute, University of Oxford, UK

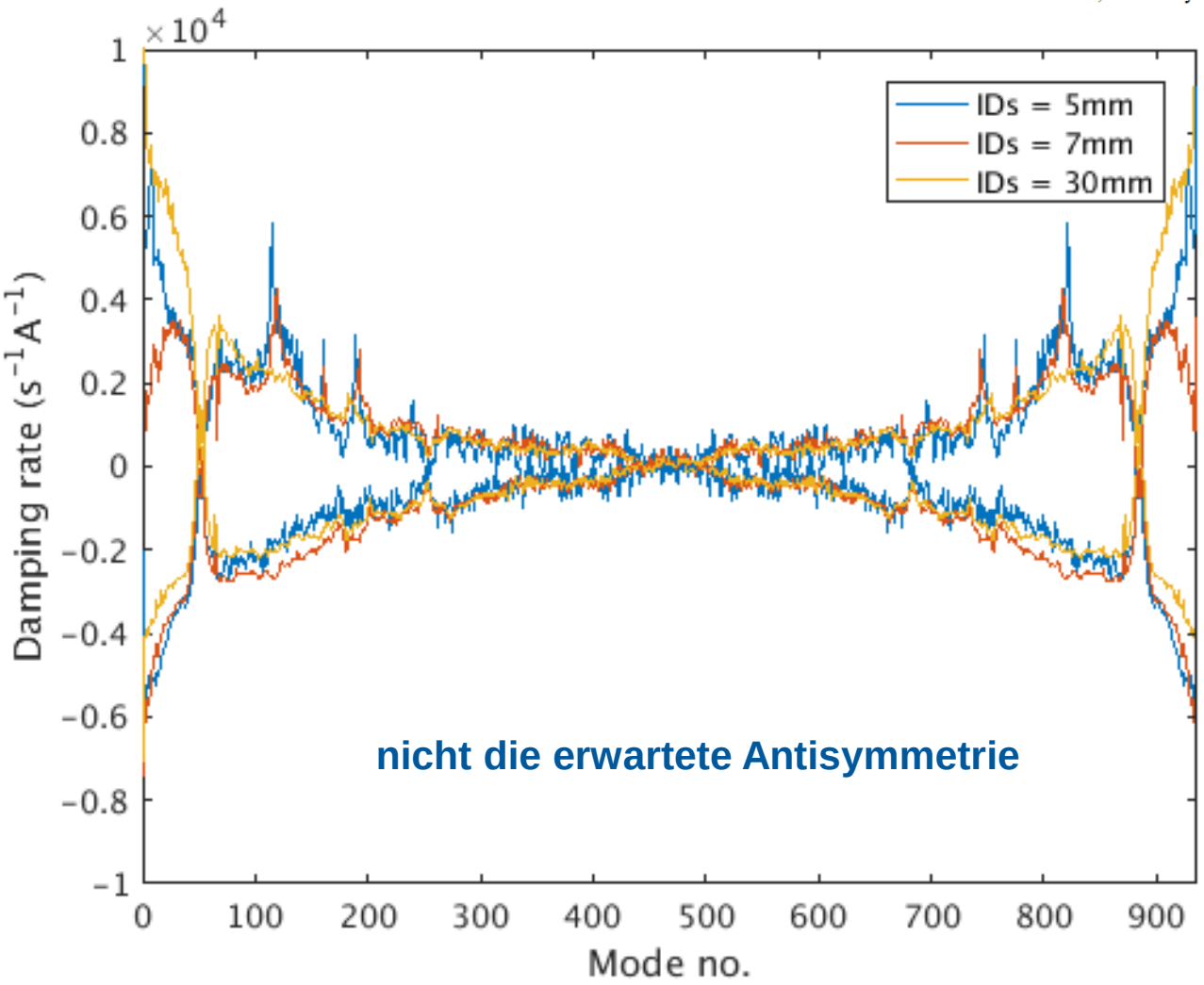


Figure 5: Vertical damping rates for all modes vs. in-vacuum ID gap at 30 mm (fully open), 7 mm (gap used during injection) and 5 mm (minimum gap).

“Intra-Bunch“ Feedback

ISBN 978-3-95450-180-9 Proceedings of NAPAC2016, Chicago, IL, USA WEA3CO04

IMPEDANCE CHARACTERIZATION AND COLLECTIVE EFFECTS IN THE MAX IV 3 GeV RING*

F. J. Cullinan†, R. Nagaoka, Synchrotron SOLEIL, 91192 Gif-sur-Yvette, France
G. Skripka, Å. Andersson, P. F. Tavares,
MAX IV Laboratory, Lund University, SE-221 00 Lund, Sweden

z.B. gegen head-tail- / transverse mode-coupling Instabilität, TMCI

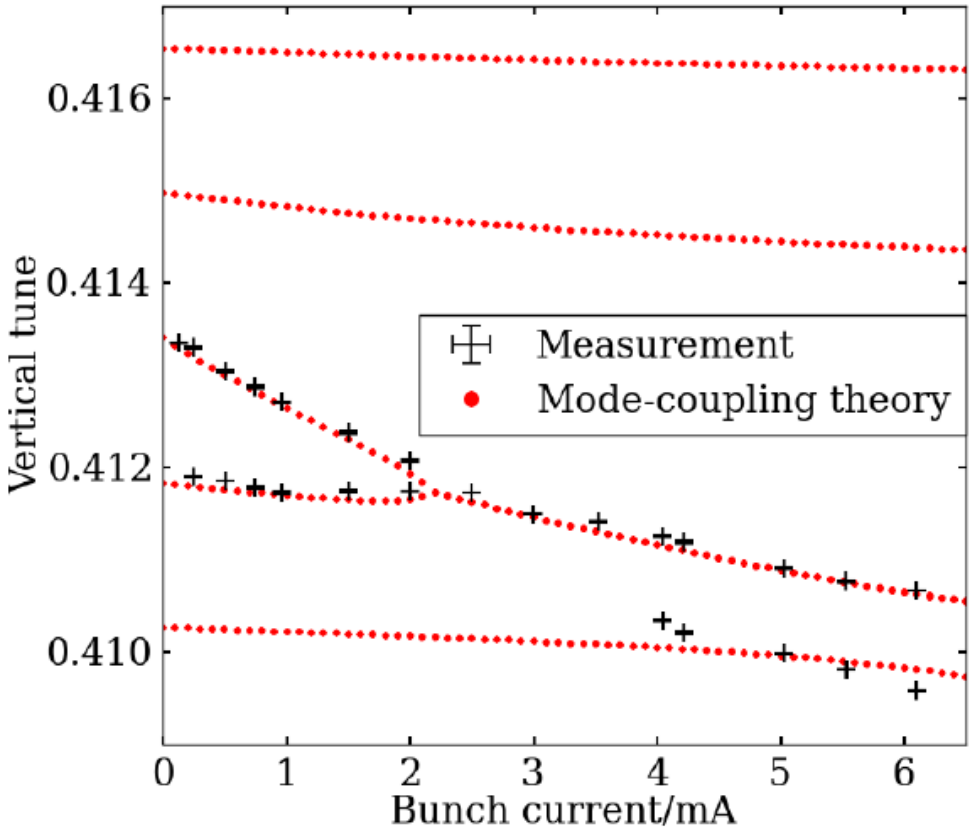


Figure 3: Peak frequencies as measured using an excitation around the betatron frequency for different bunch currents at a vertical chromaticity of 0.7.

“Intra-Bunch“ Feedback

Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark THPVA029

STUDY OF SINGLE BUNCH INSTABILITIES WITH TRANSVERSE FEEDBACK AT DIAMOND

E. Koukovini-Platia, A.F.D. Morgan, G. Rehm, R. Bartolini[1], Diamond Light Source, Oxfordshire, UK
[1]also at John Adams Institute, University of Oxford, UK

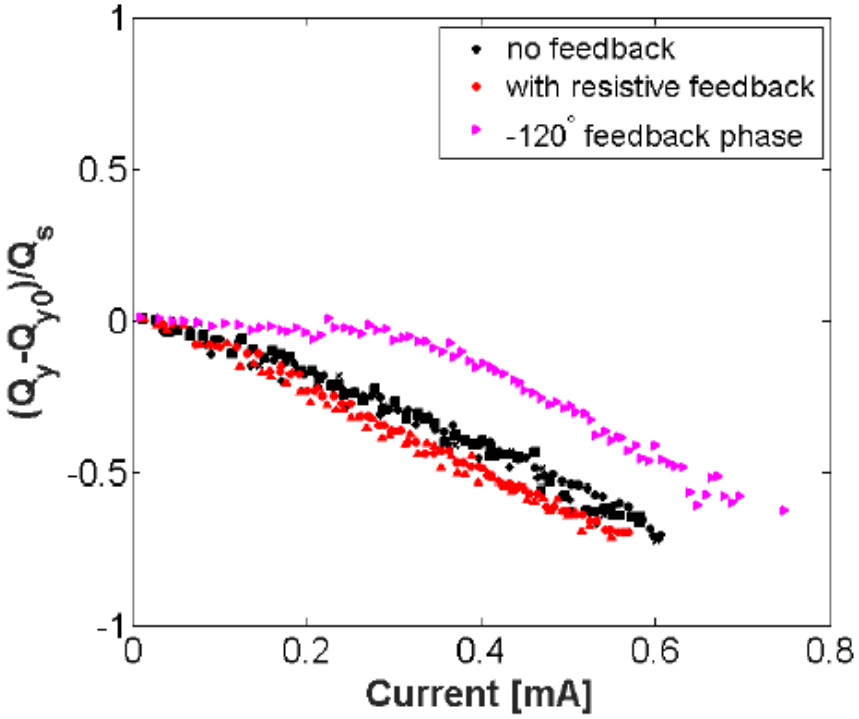


Figure 5: Normalised vertical tune shift versus single bunch current without (black) and with resistive TMBF with a phase of -180° (red). A comparison is shown with an intermediate feedback phase of -120° (magenta).

nur m=0-Mode gedämpft; reicht aus,
Modenkopplung zw. m=0 und m=-1
etwas zu stabilisieren
mehr hilft mehr
kleinere Chromatizität wünschenswert

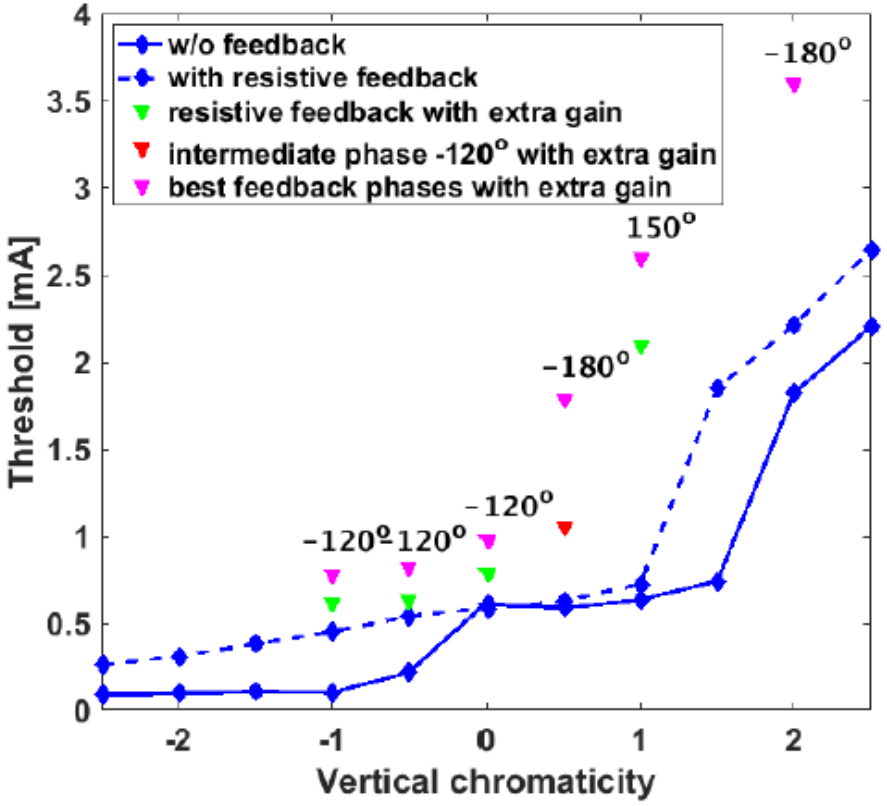


Figure 6: Vertical single bunch thresholds without TMBF (solid blue) and with nominal settings of the TMBF operating in resistive mode (dashed blue) as a function of chromaticity.

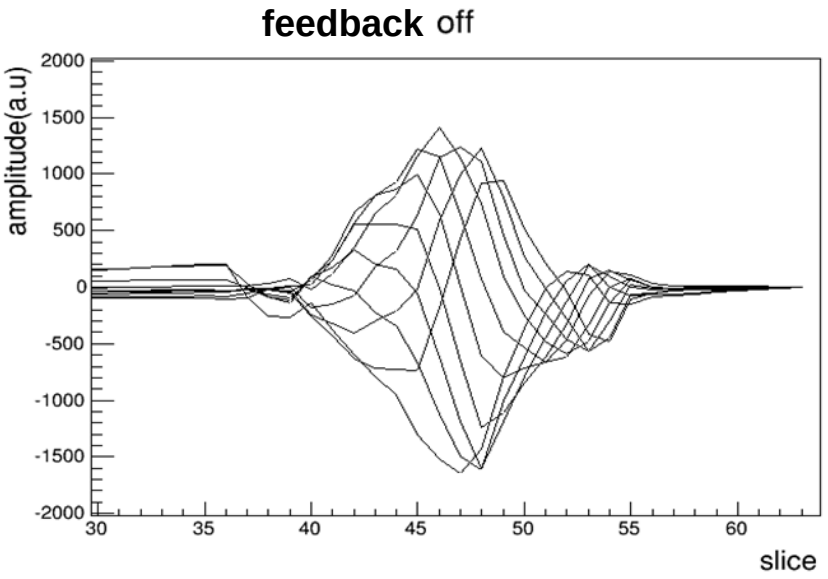
Intra-Bunch Feedback

Status of the Intra-bunch Feedback at J-PARC Main Ring

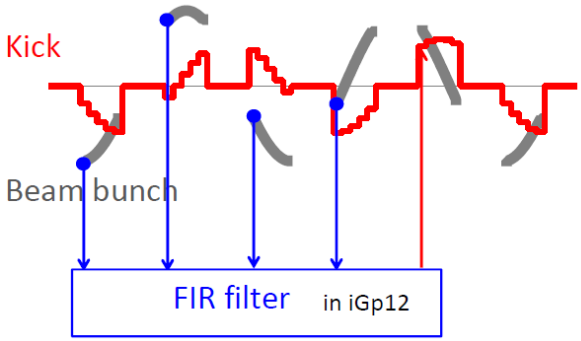
Takeshi Toyama
KEK / J-PARC

IBIC2015, Sep 12-17 2015, Melbourne Australia

Intra-bunch feedback



Intra-bunch feedback
slice ~ 10 nsec



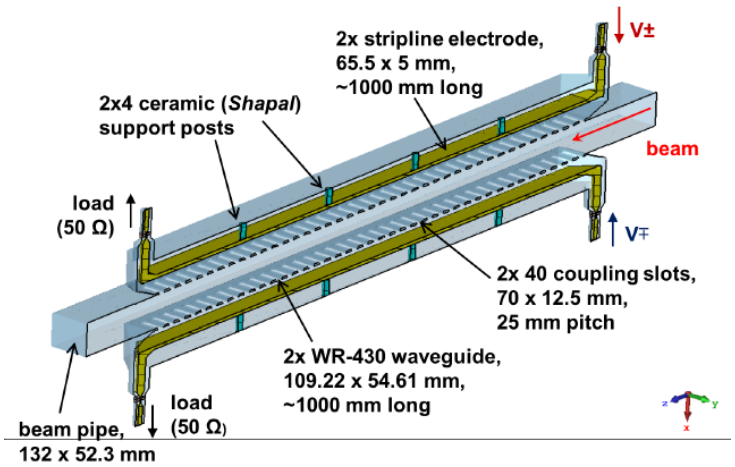


Figure 1: *Faltin*-type kicker structure.

M. Wendt, et al., TUPIK053, Proc. of IPAC2017

Bei langen Bunchen lassen sich mit Feedback der BW ~ 1GHz „electron cloud“ und TMC-Instabilität dämpfen.

Zusammenfassung

Standard Diagnose:

- **mehr, mit höherer Präzision**
- **Digitalisierung an der Signalquelle**
- **Normung, gemeinsame Standard (µTCA) und Kooperationen**
- **Zusammenarbeit mit Industrie**

Spezielle Diagnose, R&D:

- **hängt vom Beschleuniger und seinem Zweck ab**
- **heute speziell, morgen standard – Bunch-by-Bunch-Diagnose, resonante Spindepolarisation, ...“**

Diagnose steht am Anfang jeder Optimierung oder Regelung. Z. B. “Arrival Time Monitor“ als Teil von “Synchronisation und Timing“.

Feedbacksysteme – essentiell für das Erreichen und Halten der Zielparameter

- **besser durch genauere Messung der Abweichungen, schnellere digitale Datenverarbeitung und stärkere Wirkung auf den Strahl**
- **höhere Verarbeitungsgeschwindigkeit wird zu besseren “Intra Bunch“-Feedbacks führen, bleibt auch zukünftig auf längere Bunche beschränkt**
- **in Zukunft Bedarf an longitudinalem “Intra Bunch“-FB - flaches RF-Potential durch harmonische Kavitäten zur Bunchverlängerung kann zur Anregung von Quadrupolmoden führen**

R&D an neuen Beschleunigern sind wichtig, um die Kontrollparameter zu finden - den Rest könnten Feedbacks übernehmen.