

# Optische Synchronisation verteilter Lasersysteme bei FLASH.

S. Schulz<sup>1</sup>, V. Arsov<sup>2</sup>, M. K. Bock<sup>2</sup>, M. Felber<sup>2</sup>, K. Hacker<sup>2</sup>,  
P. Gessler<sup>2</sup>, F. Loehl<sup>2</sup>, F. Ludwig<sup>2</sup>, K.-H. Matthiesen<sup>2</sup>, H. Schlarb<sup>2</sup>,  
B. Schmidt<sup>2</sup>, A. Winter<sup>2</sup>, L. Wissmann<sup>1</sup>, J. Zemella<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut für Experimentalphysik  
Universität Hamburg

<sup>2</sup>Deutsches Elektronen-Synchrotron, Hamburg

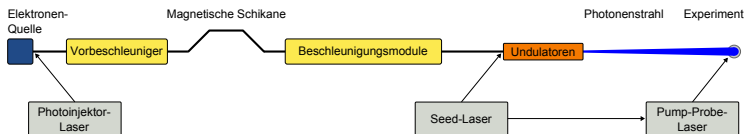
DPG Frühjahrstagung München, 9. – 13. März 2009

# Inhalt.

- 1 Einleitung und Motivation
- 2 Das optische Synchronisationssystem bei FLASH
  - Master-Laser-Oszillator
  - Stabilisierte Faser-Links
- 3 Synchronisation zweier Lasersysteme
  - RF-Synchronisation
  - Balancierter optischer Kreuzkorrelator
  - Erste Implementierung
  - Vorläufige Ergebnisse
- 4 Zusammenfassung und Ausblick

# Einleitung und Motivation.

## Zeitjitter in einem Freie-Elektronen-Laser



## Hauptquellen von Zeitjitter

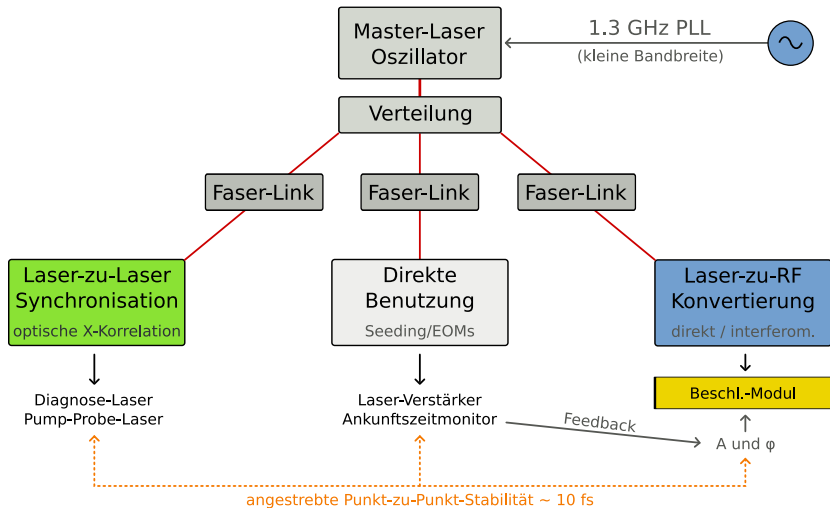
- Ankunftszeit der Photoinjektor-Laserpulse
- Stabilität der Phase der Elektronenquelle
- Amplituden- und Phasenstabilität des Vorbeschleunigers
- Ankunftszeit der Seed-Laserpulse

## Ziel eines (optischen) Synchronisationssystems

- Synchronisation des Pump-Probe-Lasers und der FEL-Pulse  $< 30$  fs

# Optische Synchronisationssysteme.

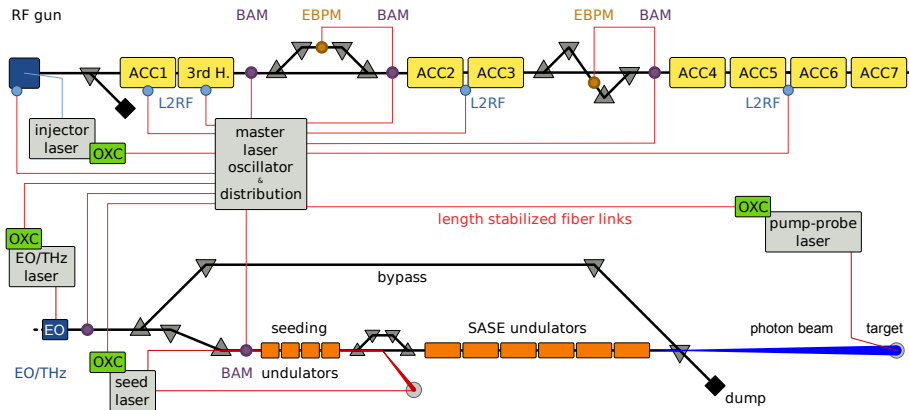
## Übersicht der wichtigsten Komponenten



Augenmerk auf Robustheit, Stabilität und Wartungsfähigkeit

# Das optische Synchronisationssystem bei FLASH.

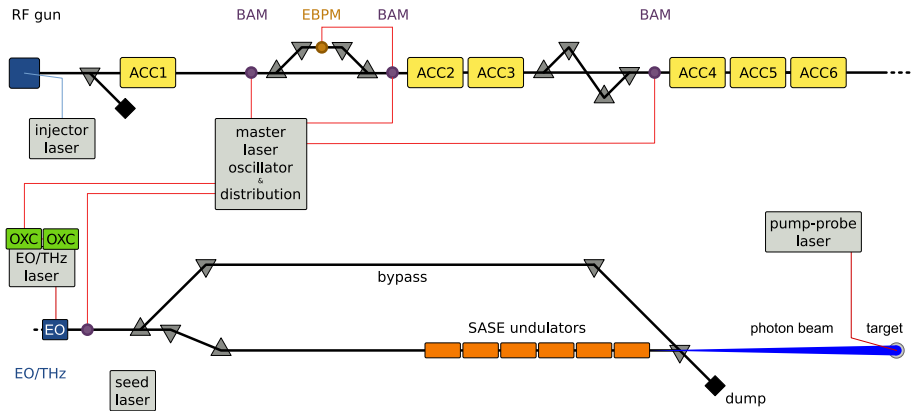
Prototyp-Entwicklung für den Europäischen XFEL



- Kompletter Ausbau während/nach dem Shutdown 2009/2010

# Das optische Synchronisationssystem bei FLASH.

## Prototyp-Entwicklung für den Europäischen XFEL

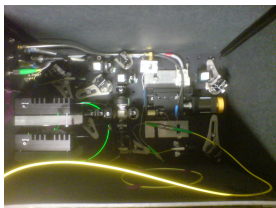
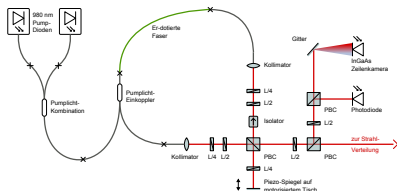


- Kompletter Ausbau während/nach dem Shutdown 2009/2010
- **Stufe 1:** 5...6 Links, 2 optische X-Korrelatoren, 4 BAMs, 1 EBPM

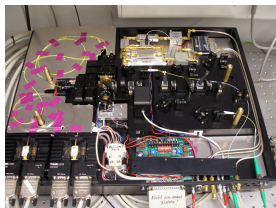
# Master-Laser-Oszillator.

## Spezifikationen der Zeitreferenz für das gesamte Synchronisationssystem

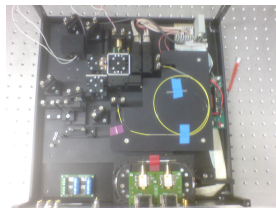
- modengekoppelter Erbium-Faserlaser
- Repetitionsrate 216.66 MHz
- mittlere Leistung > 100 mW
- Pulslänge < 100 fs
- integrierter Zeitjitter < 10 fs
- Amplitudenstabilität <  $2 \cdot 10^{-4}$



Erste Generation



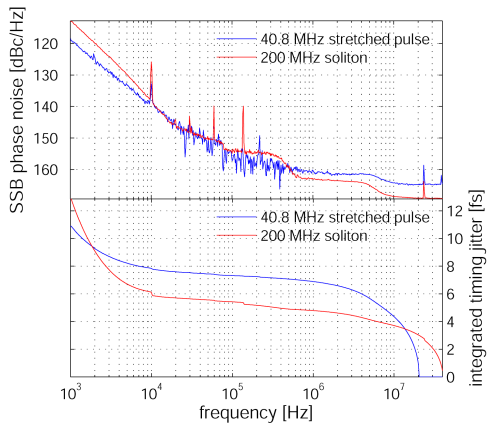
Zweite Generation



Dritte Generation

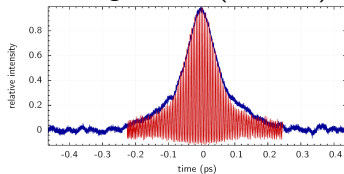
# Master-Laser-Oszillator.

## Charakterisierung der ersten Generation

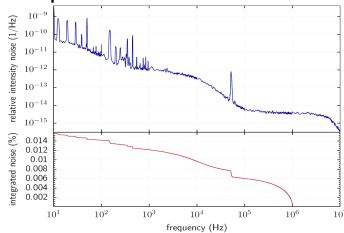


Integrierter Zeitjitter  $< 6$  fs  
 im Intervall [10 Hz, 40 MHz]  
 (limitiert durch Messtechnik)

## Pulselänge: 75 fs (FWHM)



## Amplitudenstabilität 0.016 %

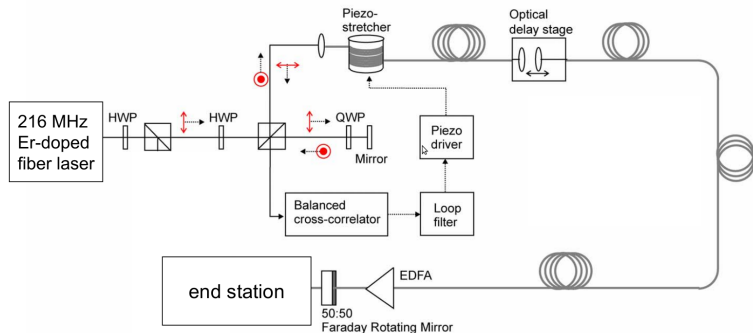


Messungen: F. Lühl



# Stabilisierte Faser-Links.

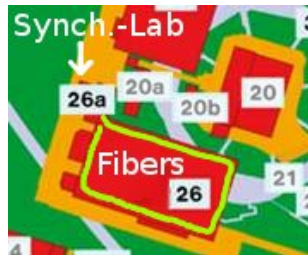
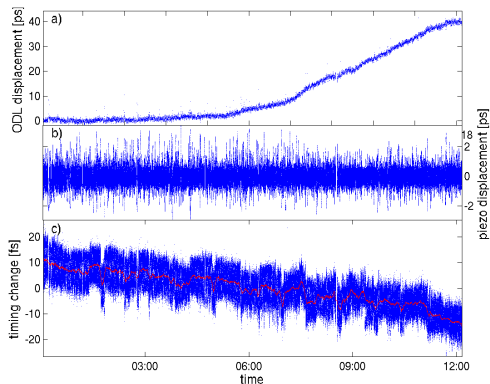
## Verteilung der Zeitinformation mit Femtosekundengenauigkeit



- Faserlängen-Stabilisierung mittels Piezo-Dehner und Translationstisch
- Grundlage: optische Kreuzkorrelation (gleicher Pulszug)
- Driftmessungen in Beschleunigerumgebung mit zweitem Kreuzkorrelator

# Stabilisierte Faser-Links.

Driftmessungen in Beschleunigerumgebung: 300 m Faser-Link in Experimentierhalle



- Zeitjitter über 2 Minuten:  
4.4 fs  $\pm$  1.1 fs (rms)
- In-Loop-Jitter < 1 fs
- Drift über 12 Stunden:  
25 fs (Polarisation)

Messungen: F. Lühl

# Synchronisation zweier Lasersysteme.

Ziel: Synchronisation mit Sub-10-Femtosekunden Genauigkeit

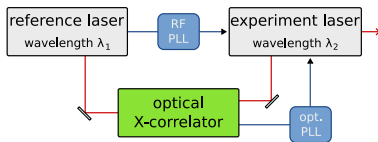


## RF-Synchronisation

- Grundlage: Phasendifferenz-Messung
- Zeitjitter  $\approx 65$  fs

# Synchronisation zweier Lasersysteme.

Ziel: Synchronisation mit Sub-10-Femtosekunden Genauigkeit



## RF-Synchronisation

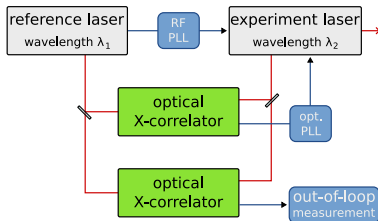
- Grundlage: Phasendifferenz-Messung
- Zeitjitter  $\approx 65$  fs

## Optische Synchronisation

- Grundlage: nicht-lineare Optik  
 $\Rightarrow$  präzisere Messung möglich  
 $\Rightarrow$  Zeitjitter  $< 10$  fs
- Probleme:
  - $\rightarrow$  verschiedene Repetitionsraten
  - $\rightarrow$  verschiedene Wellenlängen

# Synchronisation zweier Lasersysteme.

Ziel: Synchronisation mit Sub-10-Femtosekunden Genauigkeit



## RF-Synchronisation

- Grundlage: Phasendifferenz-Messung
- Zeitjitter  $\approx 65$  fs

## Optische Synchronisation

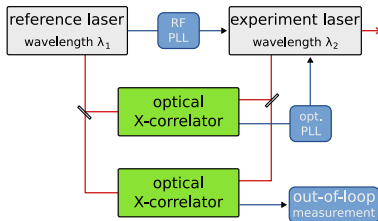
- Grundlage: nicht-lineare Optik  
 $\Rightarrow$  präzisere Messung möglich  
 $\Rightarrow$  Zeitjitter  $< 10$  fs
- Probleme:
  - $\rightarrow$  verschiedene Repetitionsraten
  - $\rightarrow$  verschiedene Wellenlängen

## Charakterisierung & Langzeitstabilität

- nur mit *out-of-loop*-Messung möglich  
 $\Rightarrow$  zweiter X-Korrelator nötig

# Synchronisation zweier Lasersysteme.

Ziel: Synchronisation mit Sub-10-Femtosekunden Genauigkeit



## Referenzlaser

Erbium-Faserlaser (Eigenbau)

- $\lambda_1 = 1550 \text{ nm}$ ,  $\Delta\lambda_1 = 100 \text{ nm}$
- $\tau_{\text{FWHM},1} = 120 \text{ fs}$
- $f_{\text{rep},1} = 40.625 \text{ MHz}$

## Diagnoselaser

Ti:Sa-Oszillator (Coherent Micra-5)

- $\lambda_1 = 800 \text{ nm}$ ,  $\Delta\lambda_1 = 65 \text{ nm}$
- $\tau_{\text{FWHM},1} = 70 \text{ fs}$
- $f_{\text{rep},2} = 81.25 \text{ MHz}$

## RF-Synchronisation

- Grundlage: Phasendifferenz-Messung
- Zeitjitter  $\approx 65 \text{ fs}$

## Optische Synchronisation

- Grundlage: nicht-lineare Optik  
 $\Rightarrow$  präzisere Messung möglich  
 $\Rightarrow$  Zeitjitter  $< 10 \text{ fs}$

- Probleme:  
 $\rightarrow$  verschiedene Repetitionsraten  
 $\rightarrow$  verschiedene Wellenlängen

## Charakterisierung & Langzeitstabilität

- nur mit *out-of-loop*-Messung möglich  
 $\Rightarrow$  zweiter X-Korrelator nötig

# RF-Synchronisation.

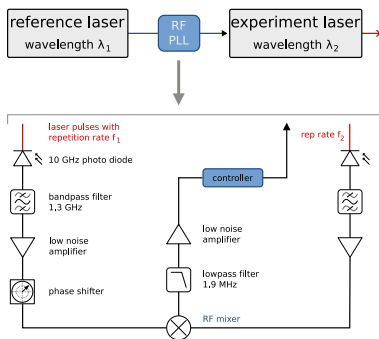
Aktuell angewendete Technik und Voraussetzung für optische Synchronisation

## Phasendifferenzmessung

- Laserpulszüge auf Photodiode (hohe Bandbreite, gesättigt)
- Filterung einer hohen Harmonischen der Repetitionsrate  
 $\rightarrow u_1 = A_1 \cos(\omega_1 t)$   
 $\rightarrow u_2 = A_2 \cos((\omega_1 + \Delta\omega) t)$
- Mischung von  $u_1$  und  $u_2$ :

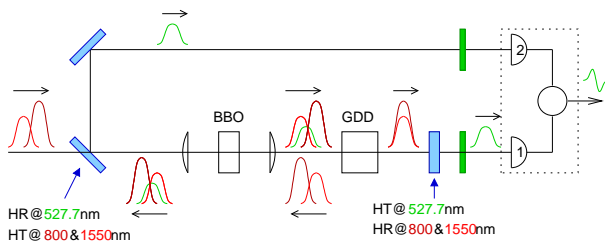
$$u_1 \cdot u_2 = \frac{1}{2} A_1 A_2 \left( \underbrace{\cos((\omega_1 - \omega_1 + \Delta\omega) t) + \cos((\omega_1 + \omega_1 + \Delta\omega) t)}_{\text{herausgefiltert mit LPF}} \right)$$

- Fehlersignal mit der Differenzfrequenz  $\Delta\omega \Rightarrow$  Eingang für PLL



# Balancierter optischer Kreuzkorrelator.

## Schematische Darstellung des Funktionsprinzips



- Summenfrequenzerzeugung in einem BBO-Kristall (Typ- $I^{(-)}$ , ooe)
- Gruppengeschwindigkeitsanpassung der rückreflektierten Pulse
- Messung beider SFG-Intensitäten
  - ⇒ Differenzsignal höchstempfindlich auf Zeitänderungen
  - ⇒ unabhängig von Amplitudenschwankungen der Laser (balanciert)
  - ⇒ Eingangssignal für Regelkreis



# Balancierter optischer Kreuzkorrelator.

## Grundlagen und Auswahl einiger vorhergehender Betrachtungen

Korrelationsfunktion höchst sensitiv auf Zeitänderungen  $\Delta t$ :

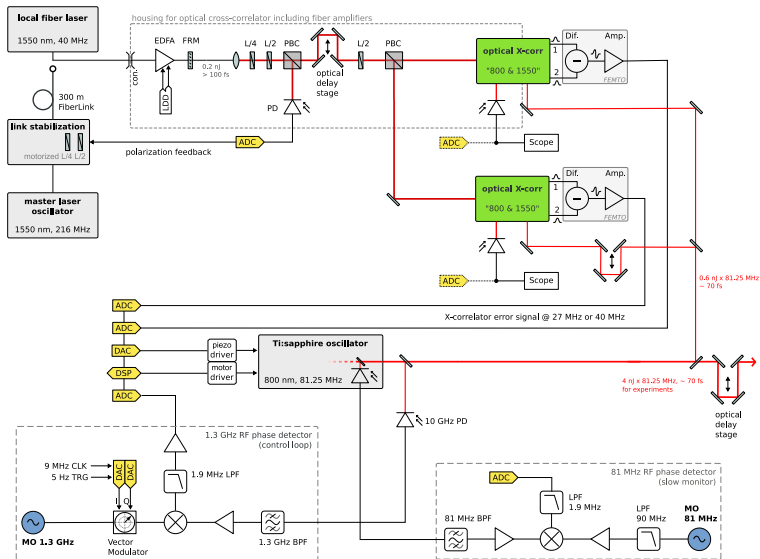
$$I_{\text{SFG}}(t) \propto \int_{-\infty}^{\infty} I_1(\tau) I_2(t - \tau) d\tau = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}} \exp\left\{-\frac{(t - \Delta t)^2}{2(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}\right\}$$

## Einige Betrachtungen

- Konversionseffizienz und Fokussierung
  - $\eta \approx 2\%$  für  $50\ \mu\text{m}$  Strahltaile
  - $\eta \approx 0.25\%$  für  $160\ \mu\text{m}$  Strahltaile
- kollineare Phasen Anpassung ("ooe" oder "Typ- $I^{(-)}$ ")
  - $k_3^e(\theta) = k_1^o + k_2^o \rightarrow \theta_{\text{pm}}^{\text{ooe}} = 22.2^\circ$
  - walk-off der Summenfrequenz  $54.7\ \text{mrad}$
- Mix-Akzeptanzbandbreite  $65\ \text{nm}$
- Problem: Reflexion und Reflexionsverluste

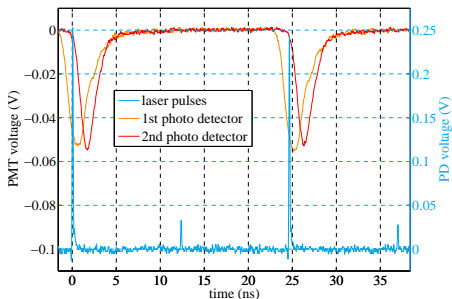
# Erste Implementierung.

## Aufbau von zwei optischen Kreuzkorrelatoren im EO-Labor bei FLASH

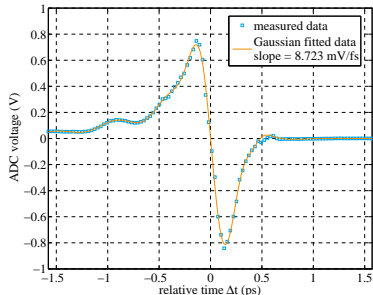


# Regelsignal.

Differenz der Summenfrequenzintensitäten ersetzt RF-Mixer-Signal



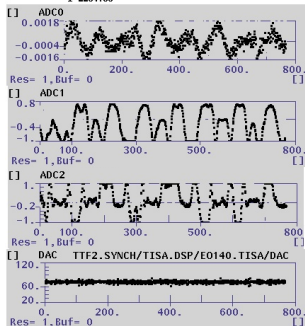
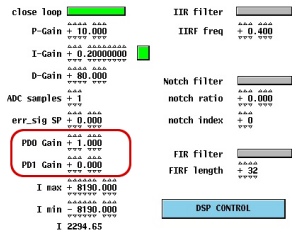
- SFG-Signale bei festem  $\Delta t$
- gleiche SFG-Amplitude  
⇒ balancierter Zustand
- Amplitudenänderung  
⇔ zeitlichen Änderung



- Vektormodulator-Scan
- Steigung  $\approx 8.7 \text{ mV/fs}$ ,  
ADC-Rauschen  $\ll 1 \text{ mV}$
- ausreichend als Regelsignal
- Peak-Abstand  $\approx 280 \text{ fs}$

# Optische Synchronisation.

Aktueller Status: Manuelles Umstellen auf optischen Lock



## DOOCS-Panel des Lock-Servers

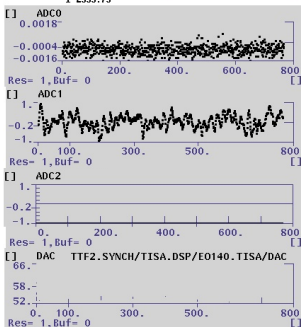
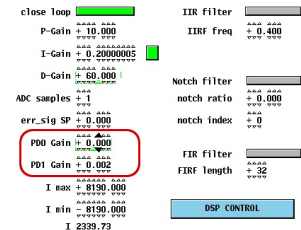
- PID-Werte und Filter einstellbar
- ADC-Auslese und DAC-Rücklese
- Implementation auf einem DSP
- Integration ins Kontrollsystem

## RF-Lock, (PD0 = 1)

- Zeitjitter  $\approx 65$  fs (in-loop)
- Kreuzkorrelator-Regelsignale messbar (ADC1, ADC2)

# Optische Synchronisation.

Aktueller Status: Manuelles Umstellen auf optischen Lock



## DOOCS-Panel des Lock-Servers

- PID-Werte und Filter einstellbar
- ADC-Auslese und DAC-Rücklese
- Implementation auf einem DSP
- Integration ins Kontrollsystem

## RF-Lock, (PD0 = 1)

- Zeitjitter  $\approx 65$  fs (in-loop)
- Kreuzkorrelator-Regelsignale messbar (ADC1, ADC2)

## Optischer Lock, (PD0 = 0)

- stabil für Minuten
- Zeitjitter  $\approx 45$  fs (in-loop)

## Zusammenfassung und Ausblick.

- Aufbau eines optischen Synchronisationssystems bei FLASH
  - Infrastruktur fertig gestellt
  - Inbetriebnahme optischer Komponenten ab sofort (Stufe 1)
- Zwei Kreuzkorrelatoren aufgebaut und Regelsignale gemessen
- optischer Lock konnte kurzzeitig etabliert werden (Messung!?)

### Nächste Schritte

- Untersuchung der Langzeitstabilität
- Entwicklung eines intelligenten Regel-Algorithmus' (VME vs.  $\mu$ TCA)
- Elektro-optische Diagnosemessungen bei FLASH
- Konstruktion eines Gehäuses (integrierte Optik und Elektronik)
- Aufbau und Inbetriebnahme weiterer Kreuzkorrelatoren
  - Seed- und Pump-Probe-Laser
- Adaption des Schemas auf Injektorlaser (bereits gestartet)

## Danksagung.

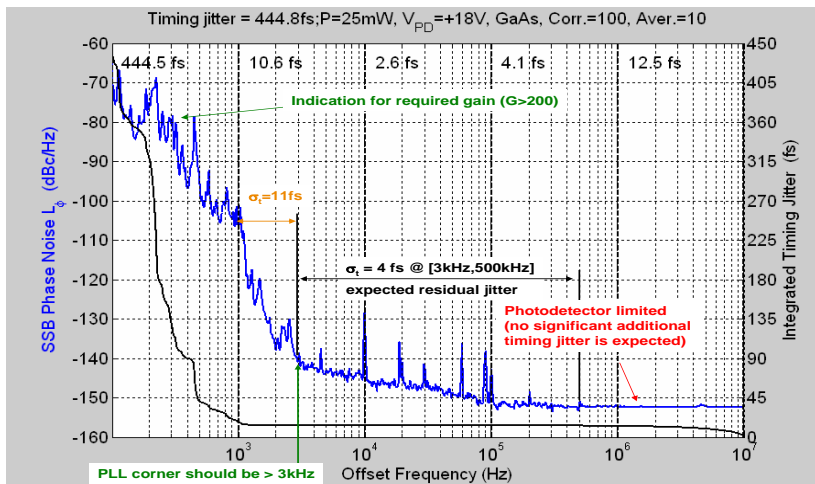
Im Namen des gesamten LbSyn-Teams und DESY-FLA/MPY

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**



# Phasenrauschmessungen.

Anhaltspunkt für die zu erwartende Genauigkeit eines optischen Locks



Messung: H. Scharb



# Infrastruktur.

Fast ausschließlich am DESY gefertigt und nicht zu vernachlässigen!

- ca. 300 Kabel zum optischen Tisch, davon 120 Signalkabel
- Einhausung und Vibrationsdämpfung für optischen Tisch
- 58 Motoren
- 20... 24 Pump-Laserdioden für MLOs und EDFAs
- 16... 20 Faserdehner (*fiber stretcher*)
- 4 VME-Crates mit Option auf uTCA
- optische Fasern zu allen Endpunkten
- 42 Temperatursensoren, 2 aktive Regelungen, Stabilität  $\delta T = 0.02^\circ\text{C}$
- Option auf Wasserkühlung vorhanden

