

Elektro-optische Methoden zur Messung des zeitlichen Profils von Elektronenpaketen bei FLASH

Disputationsvortrag
Bernd Steffen
3. Juli 2007

FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



Übersicht

- Motivation
- Grundlagen
 - EO Effekt
 - EO Messprinzip
 - Detektionsverfahren
- Messmethoden und Ergebnisse
 - Abtastung mit variabler Verzögerung
 - Spektral kodierte Messungen
 - Zeitlich kodierte Messungen
- Anwendungen
- Zusammenfassung

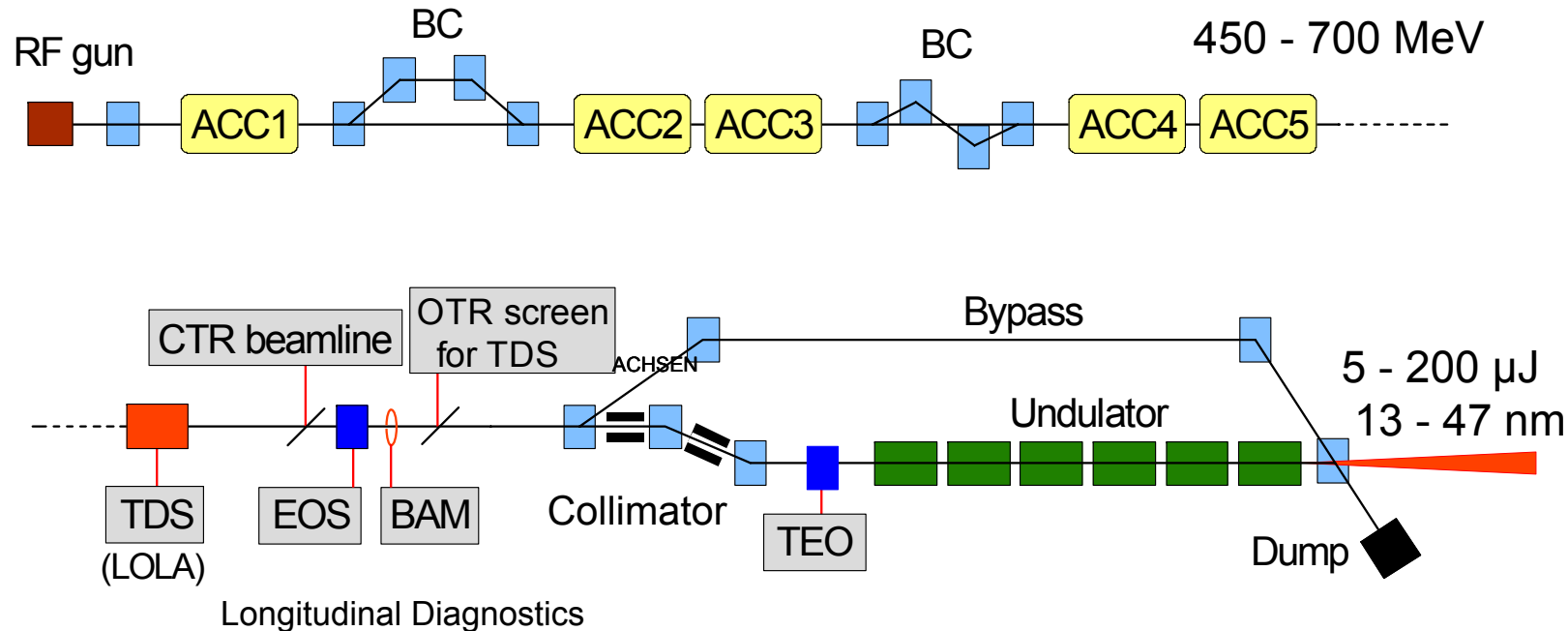
FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



FLASH

Freie-Elektronen Laser in Hamburg



FLASH

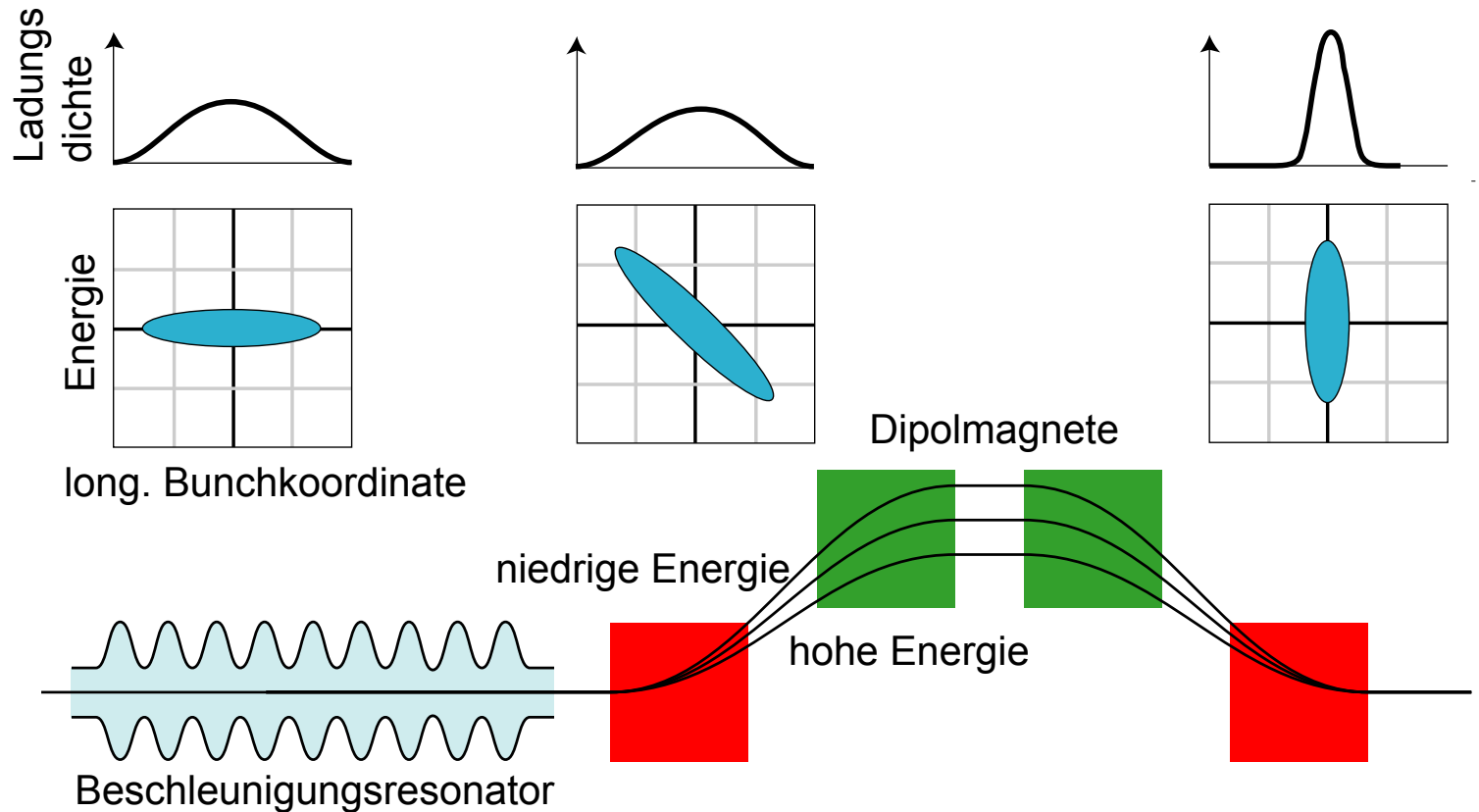
Free-Electron Laser
in Hamburg

- Elektronenbunche:
- 30 fs Länge
 - 700 MeV Elektronenenergie
 - 1 nC Ladung
 - 1 kA Spitzenstrom

Alle Pulslängen:
 σ eines angepassten
Gaußpulses



Bunch-Kompression

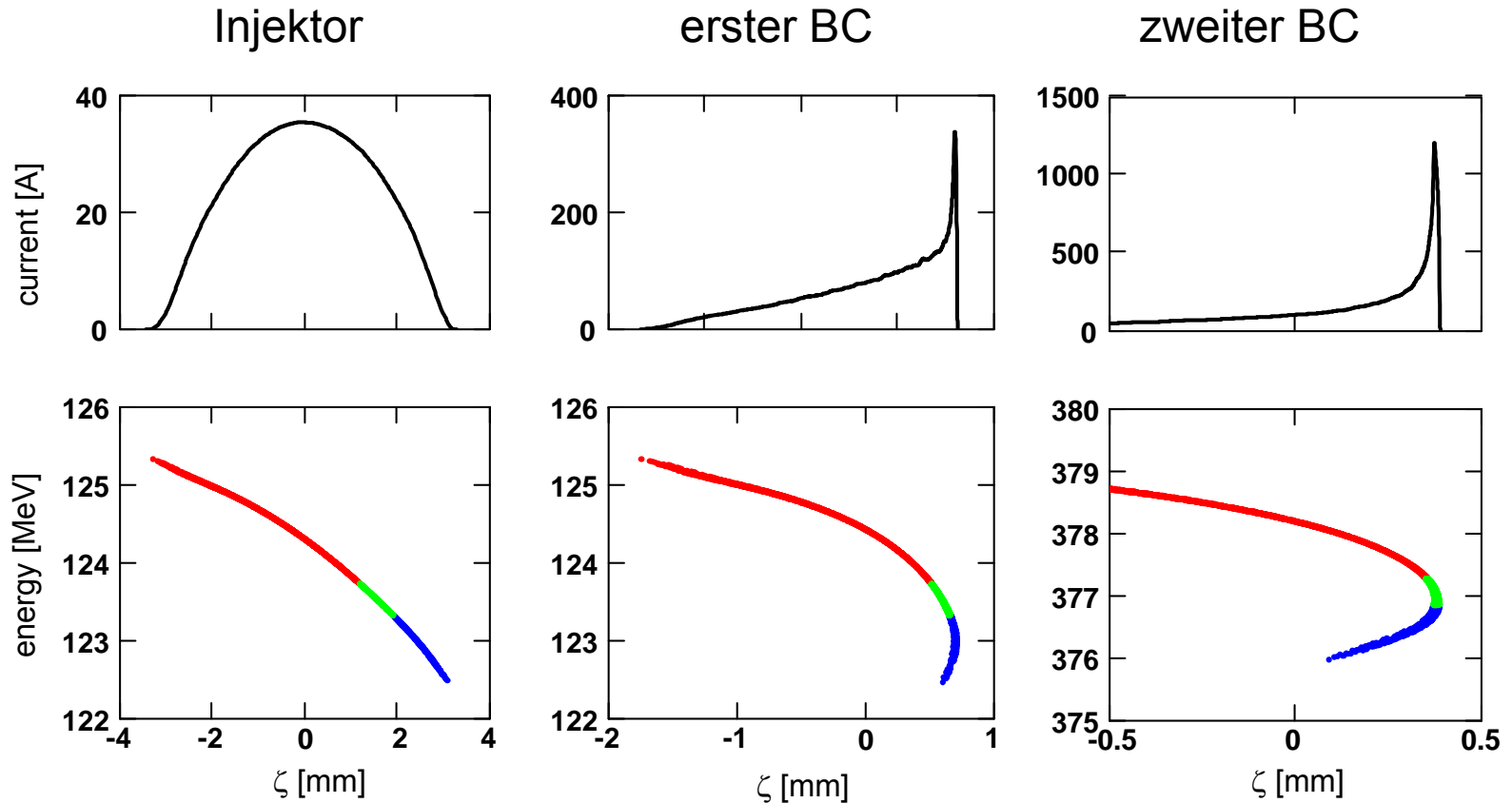


FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



Bunch-Kompression



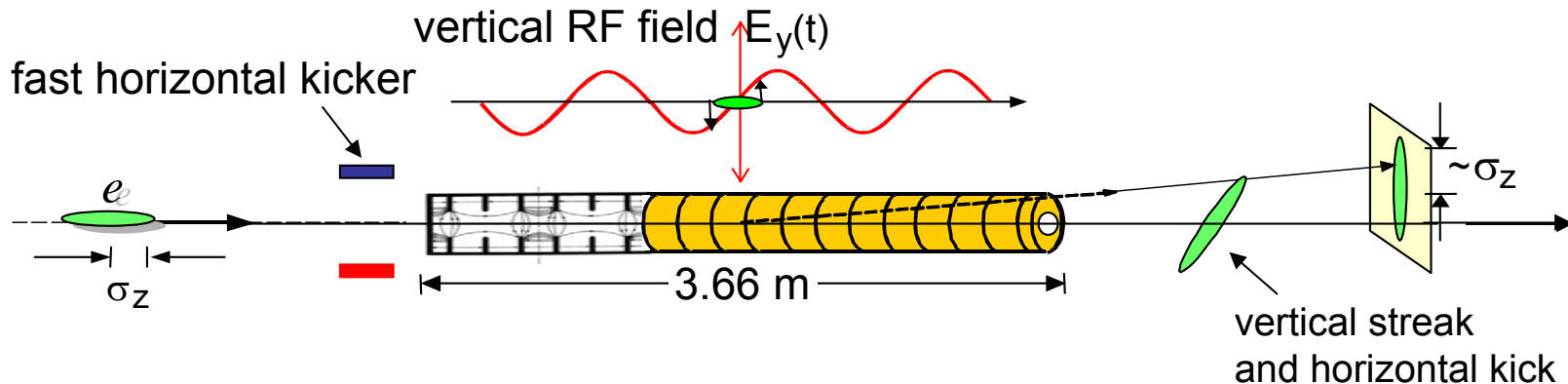
Rechnungen von Martin Dohlus

FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg

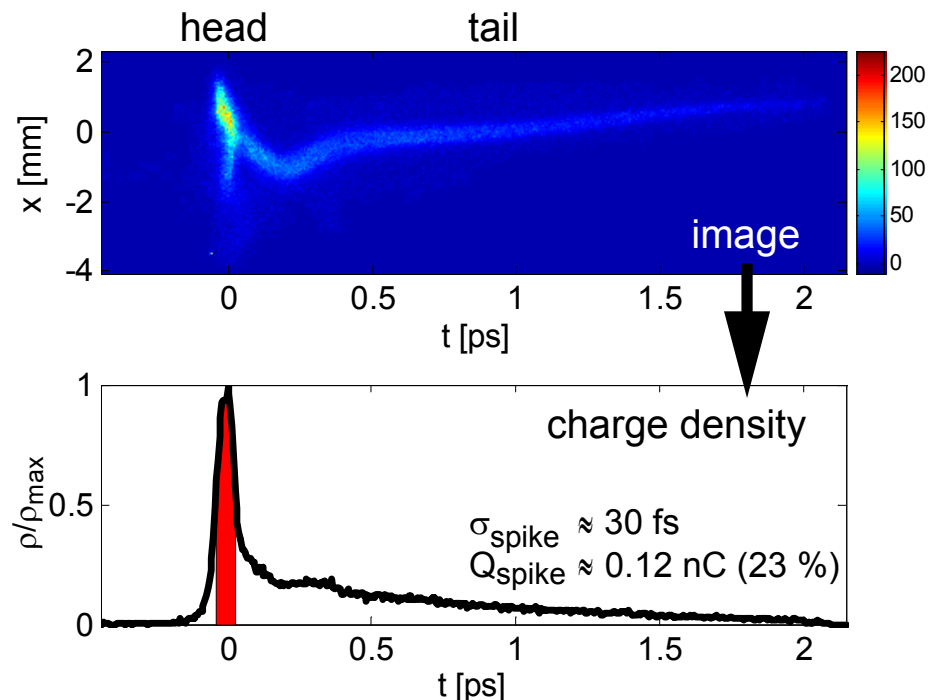


Bunchlängenmessung mit dem transversal ablenkenden Resonator (TDS)



hochauflösendes
Messverfahren zur
Bunchlängenbestimmung
nach dem Prinzip des
Oszillographen

Auflösung: ca. 20 fs



FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



Übersicht

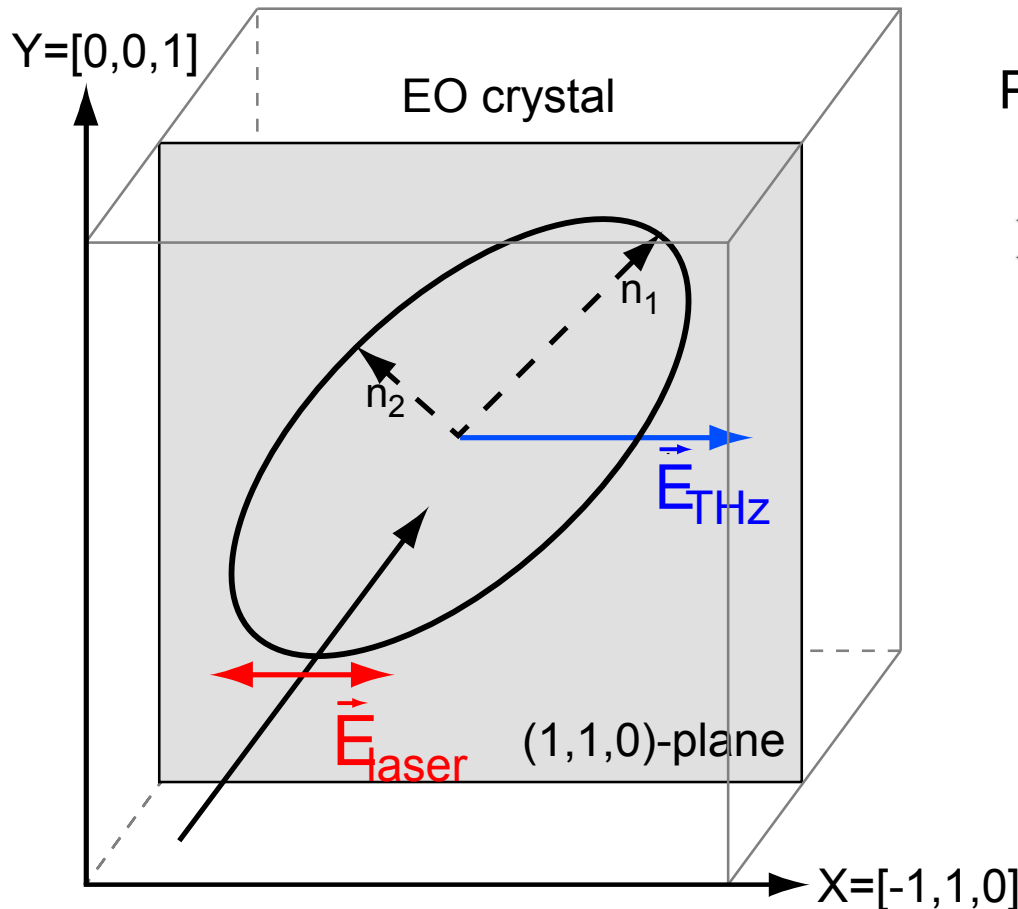
- Motivation
- Grundlagen
 - EO Effekt
 - EO Messprinzip
 - Detektionsverfahren
- Messmethoden und Ergebnisse
 - Abtastung mit variabler Verzögerung
 - Spektral kodierte Messungen
 - Zeitlich kodierte Messungen
- Anwendungen
- Zusammenfassung

FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



Der elektro-optische Effekt: Feldinduzierte Doppelbrechung



Phasenverzögerung:

$$\Gamma = \frac{\omega d}{c}(n_1 - n_2)$$

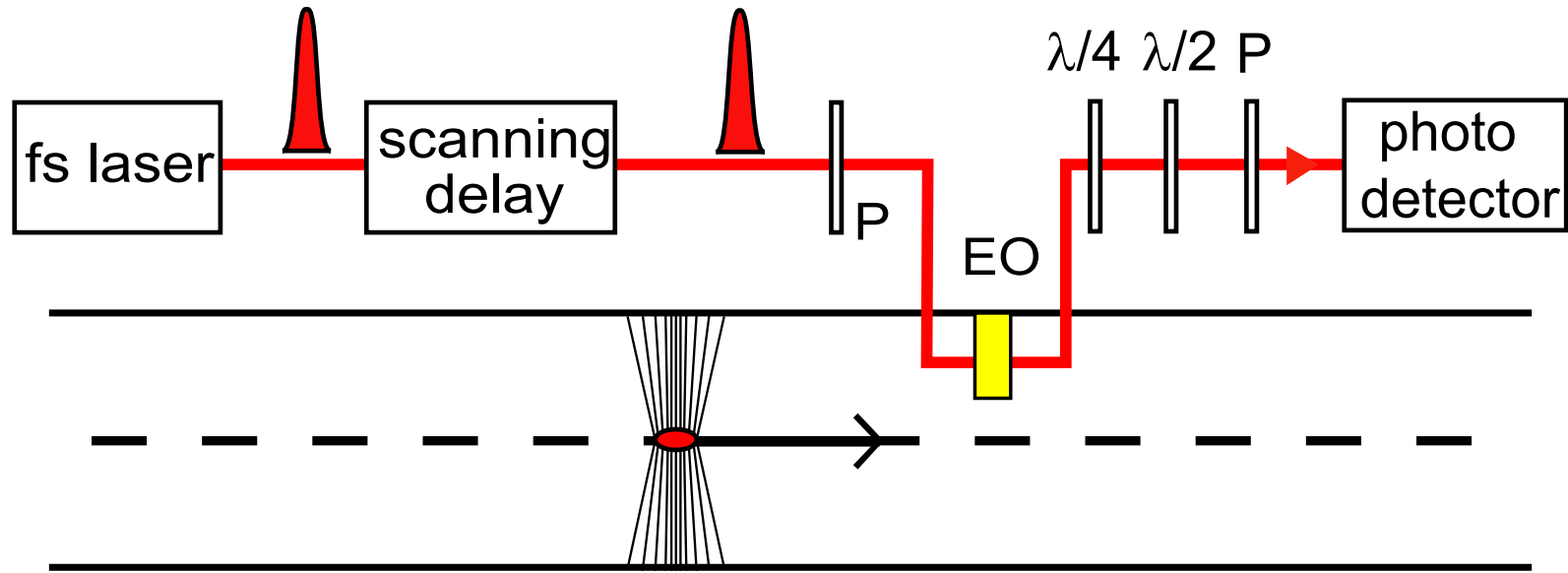
$$= \frac{\omega d}{c}n_0^3 r_{41} E_{\text{THz}}$$

FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



Elektro-Optische Abtastung



- Das Coulomb-Feld des Elektronenbunches erzeugt im EO-Kristalls eine Doppelbrechung.
- Diese Doppelbrechung wird mit einem Laser abgetastet.

FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



Effekt der Verzögerungsplatten

$$E_{\text{det}}(\theta, \phi, \Gamma) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \mathbf{H}(\theta) \cdot \mathbf{Q}(\phi) \cdot \mathbf{EO} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot E_{\text{laser}}$$

$$\mathbf{EO} = \mathbf{R}(-\pi/4) \cdot \begin{pmatrix} \exp(-i\Gamma/2) & 0 \\ 0 & \exp(+i\Gamma/2) \end{pmatrix} \cdot \mathbf{R}(\pi/4)$$

$\mathbf{Q}(\phi)$: Viertelwellenplatte, verdreht um ϕ

$\mathbf{H}(\theta)$: Halbwellenplatte, verdreht um θ

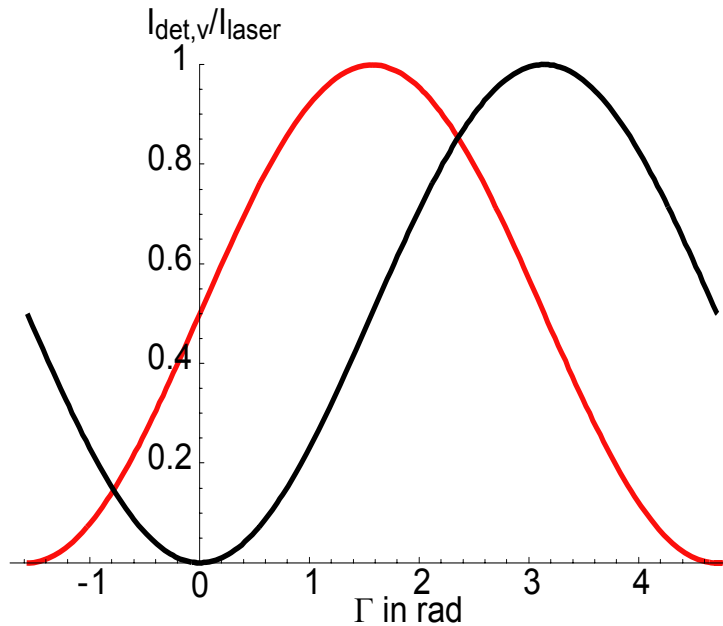
$$I_{\text{det}}(\theta, 0, \Gamma) = \frac{I_{\text{laser}}}{2} [1 - \cos(\Gamma + 4\theta)]$$

FLASH

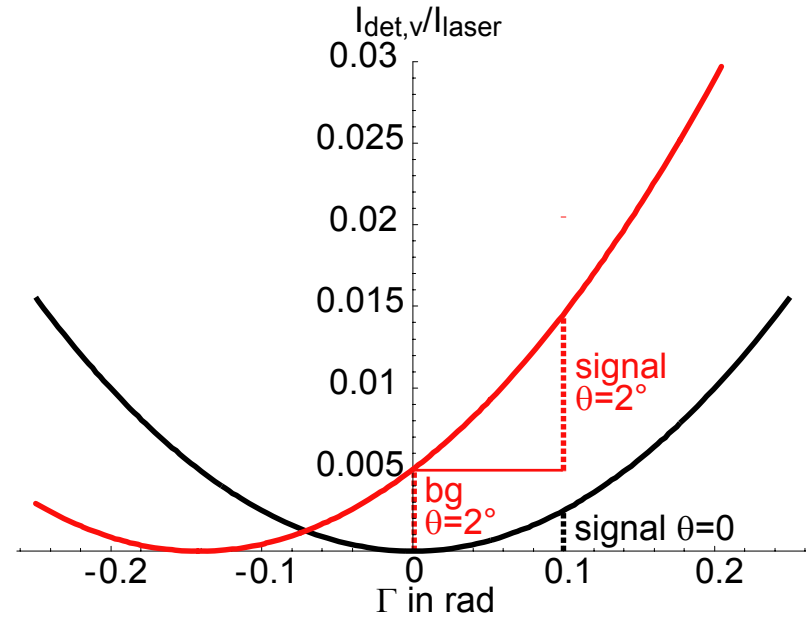
Free-Electron Laser
in Hamburg



Effekt der Verzögerungsplatten



$\theta=0$ $4\theta=\pi/2$



$\theta=0^\circ$ $\theta=2^\circ$

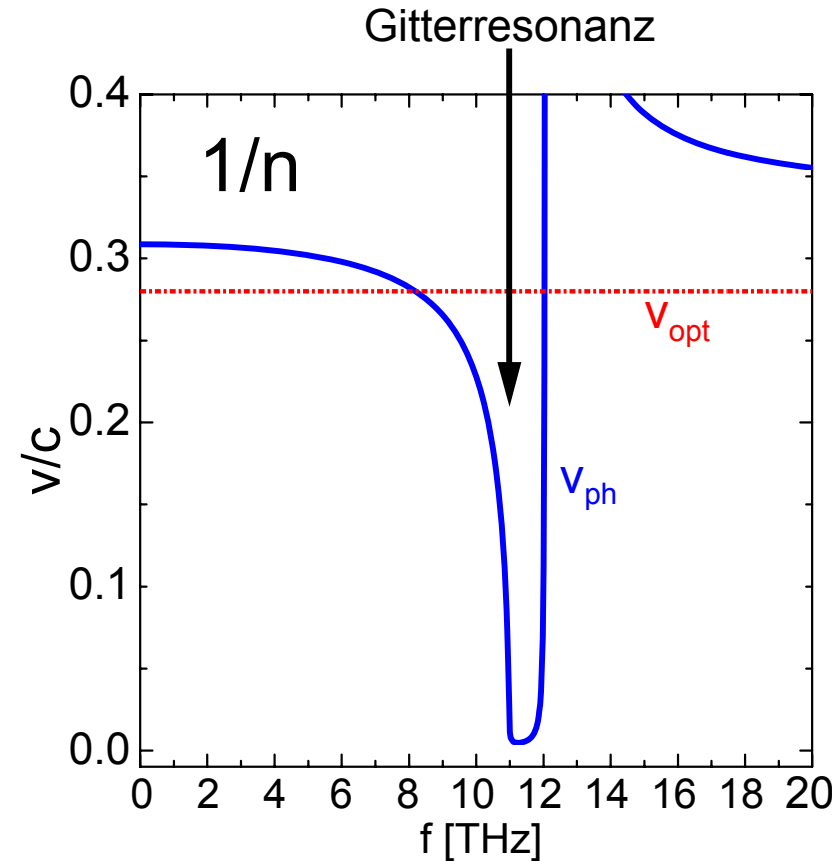
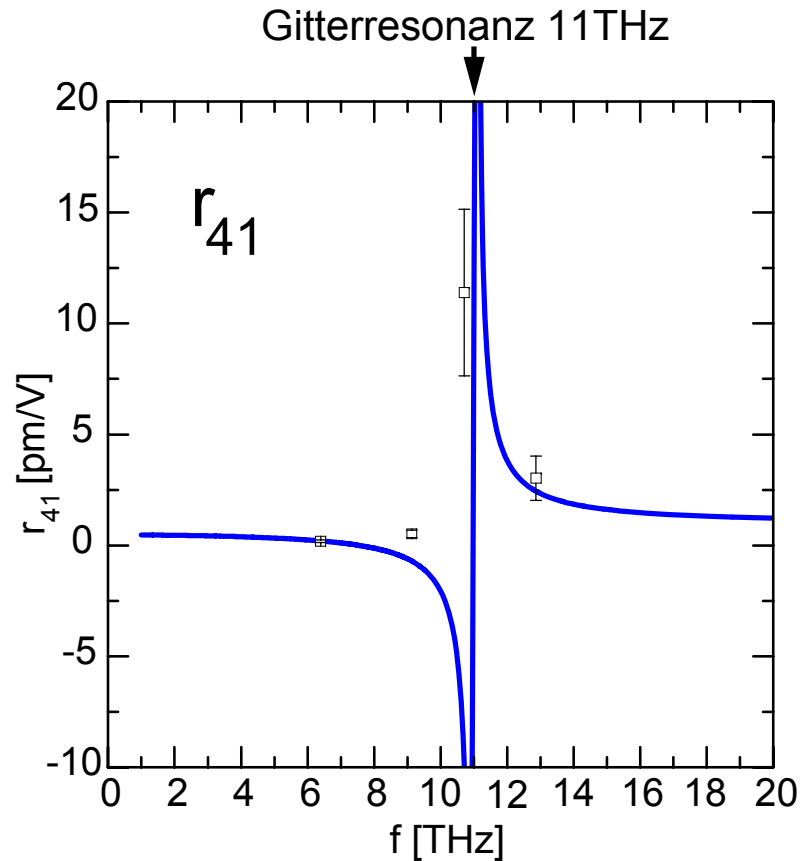
$$I_{det}(\theta, 0, \Gamma) = \frac{I_{laser}}{2} [1 - \cos(\Gamma + 4\theta)]$$

FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



$r_{41}(f)$ und Phasengeschwindigkeit in GaP



Faust, Henry. PRL 1966
Nelson, Turner. J. Appl. P. 1968

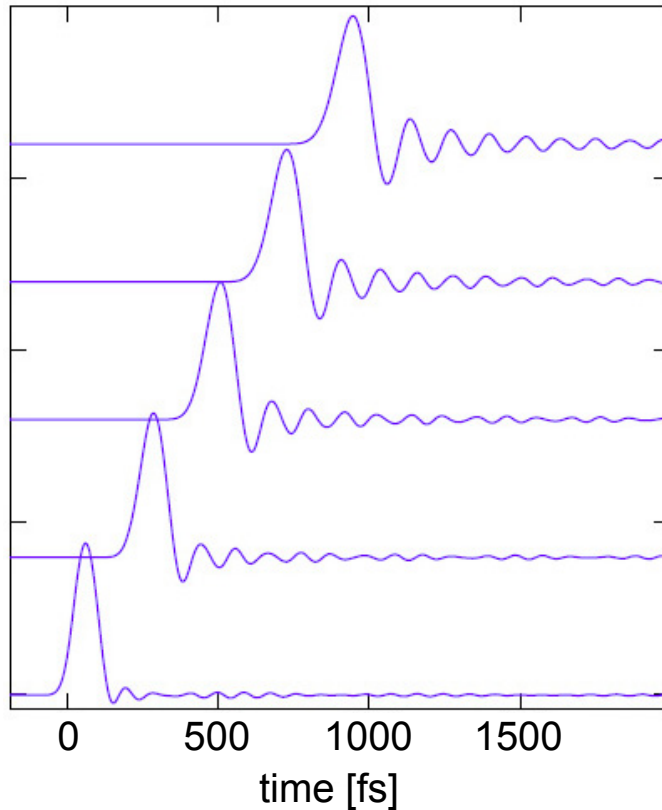
FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg

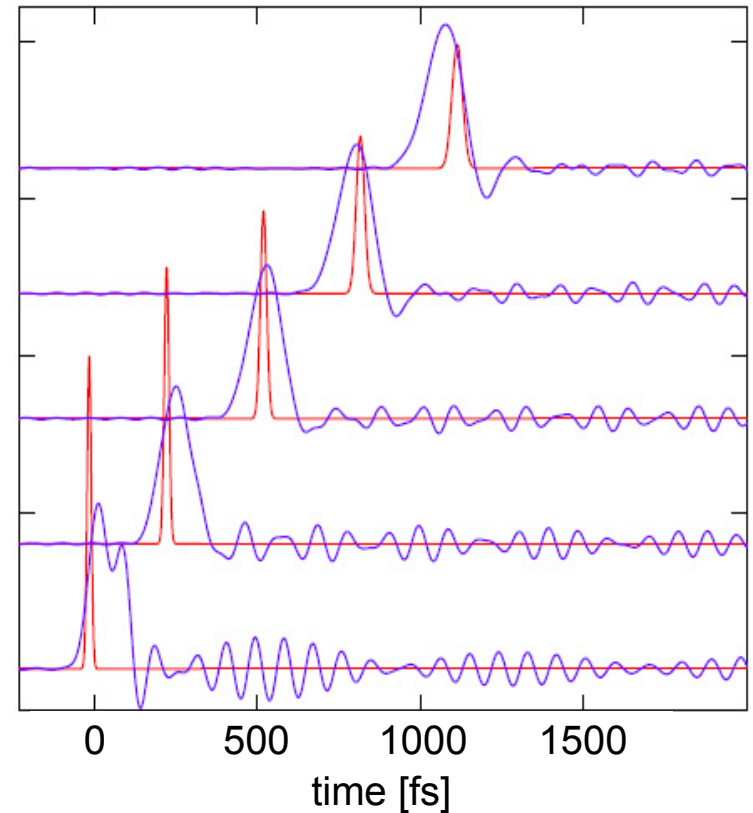


Propagation der Pulse in GaP

THz-Puls



effektiver THz- und **Laserpuls**



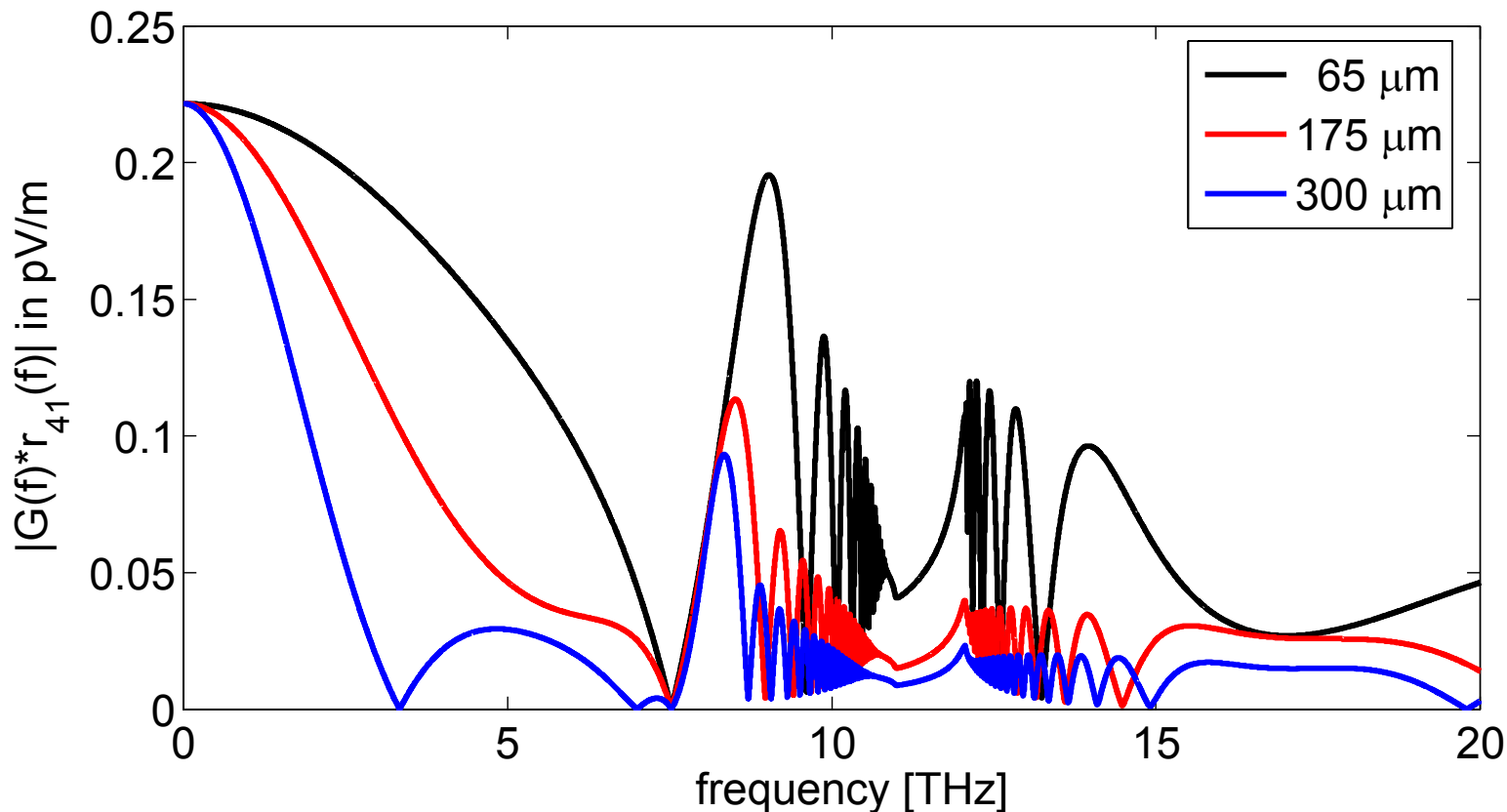
EO-Signal: Produkt aus effektiven THz-Feld und Laser integriert über Kristalldicke

FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



Effizienzfunktion des EO-Kristalls



$$G(f, d) = r_{41} \frac{2}{1 + n(f) + ik(f)} \frac{1}{d} \int_0^d \exp \left[i 2\pi f z \left(\frac{1}{v_{ph}(f)} - \frac{1}{v_g} \right) \right] dz$$

Signalverzerrung für dicke Kristalle

FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



Übersicht

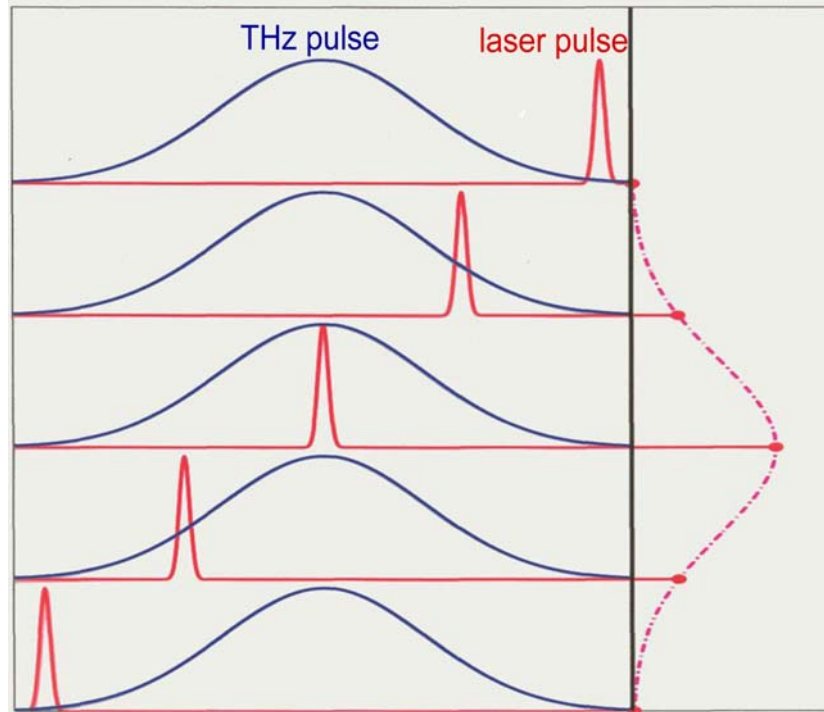
- Motivation
- Grundlagen
 - EO Effekt
 - EO Messprinzip
 - Detektionsverfahren
- **Messmethoden und Ergebnisse**
 - Abtastung mit variabler Verzögerung
 - Spektral kodierte Messungen
 - Zeitlich kodierte Messungen
- Anwendungen
- Zusammenfassung

FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



Elektro-Optische Abtastung mit variabler Verzögerung



EOS:
Electro-Optic Sampling

- häufig für Experimente in der THz-Spektroskopie verwendet
- technisch einfach, hohe Auflösung

Probleme: - mittelt über viele Bunche
- nicht anwendbar bei Zeitschwankungen

FLASH

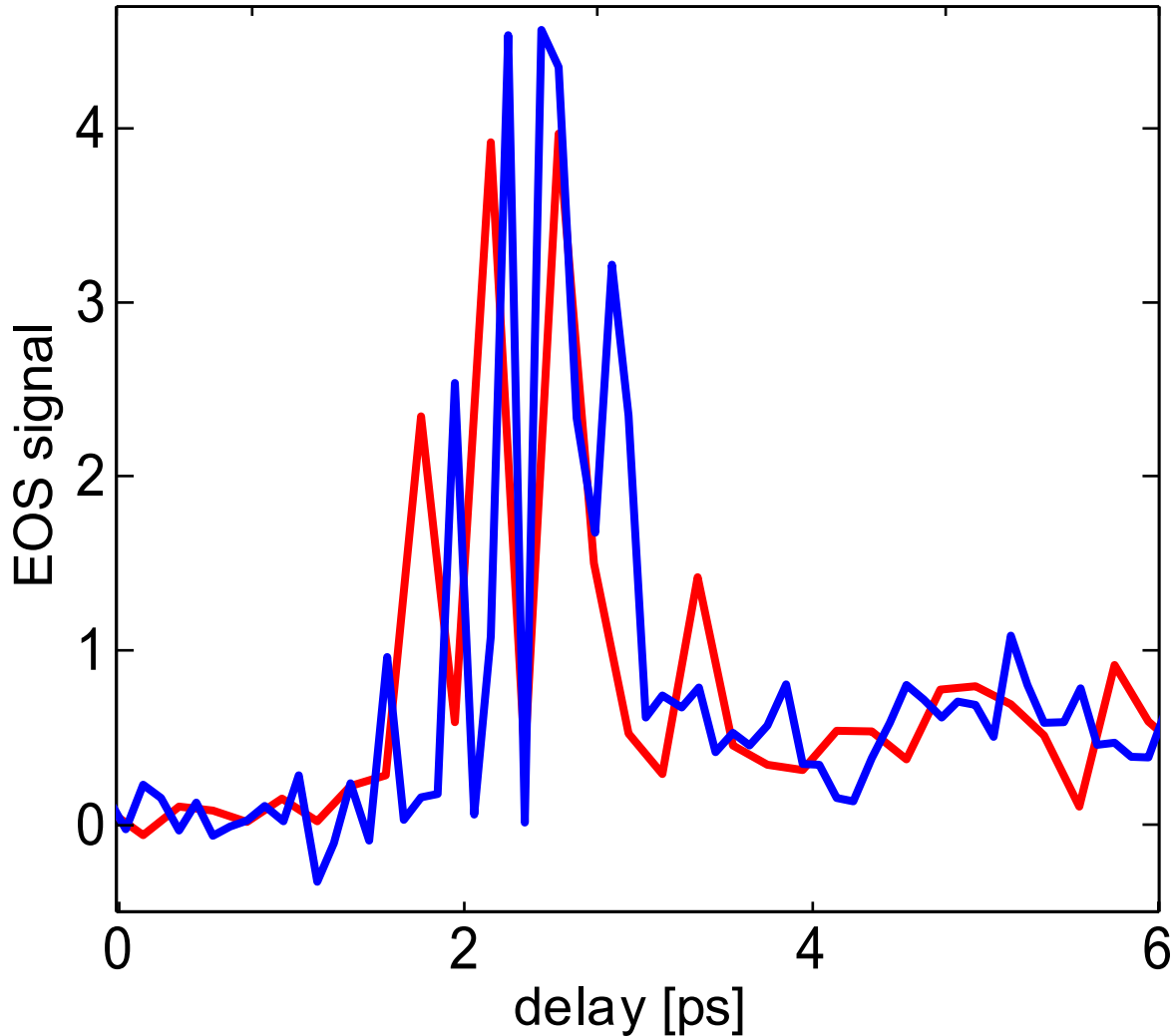
Free-Electron Laser
in Hamburg



Elektro-Optische Abtastung mit variabler Verzögerung

**Zeitjitter:
etwa 200 fs,
größer als
Bunchlänge**

**Einzelschuss-
messungen
notwendig!**

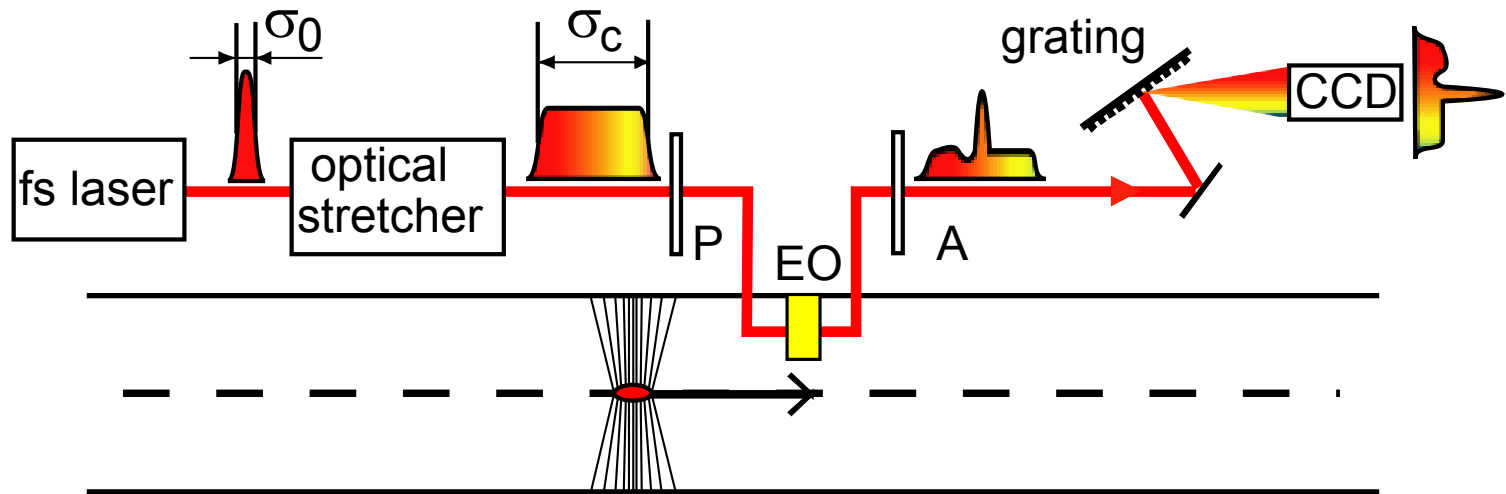


FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



Spektral kodierte EO-Messung



- Lineare Zeitabhängigkeit der Wellenlängen im Laserpuls („chirp“)
- Bunchstruktur wird in das spektrale Profil des Laserpulses übertragen
- Problem: Frequenzmischung mit THz-Puls erzeugt neue Frequenzanteile:
 \Rightarrow Pulsverbreiterung und -verformungen bei großem Chirp $\alpha \approx 1/\sqrt{\sigma_0 \sigma_c}$

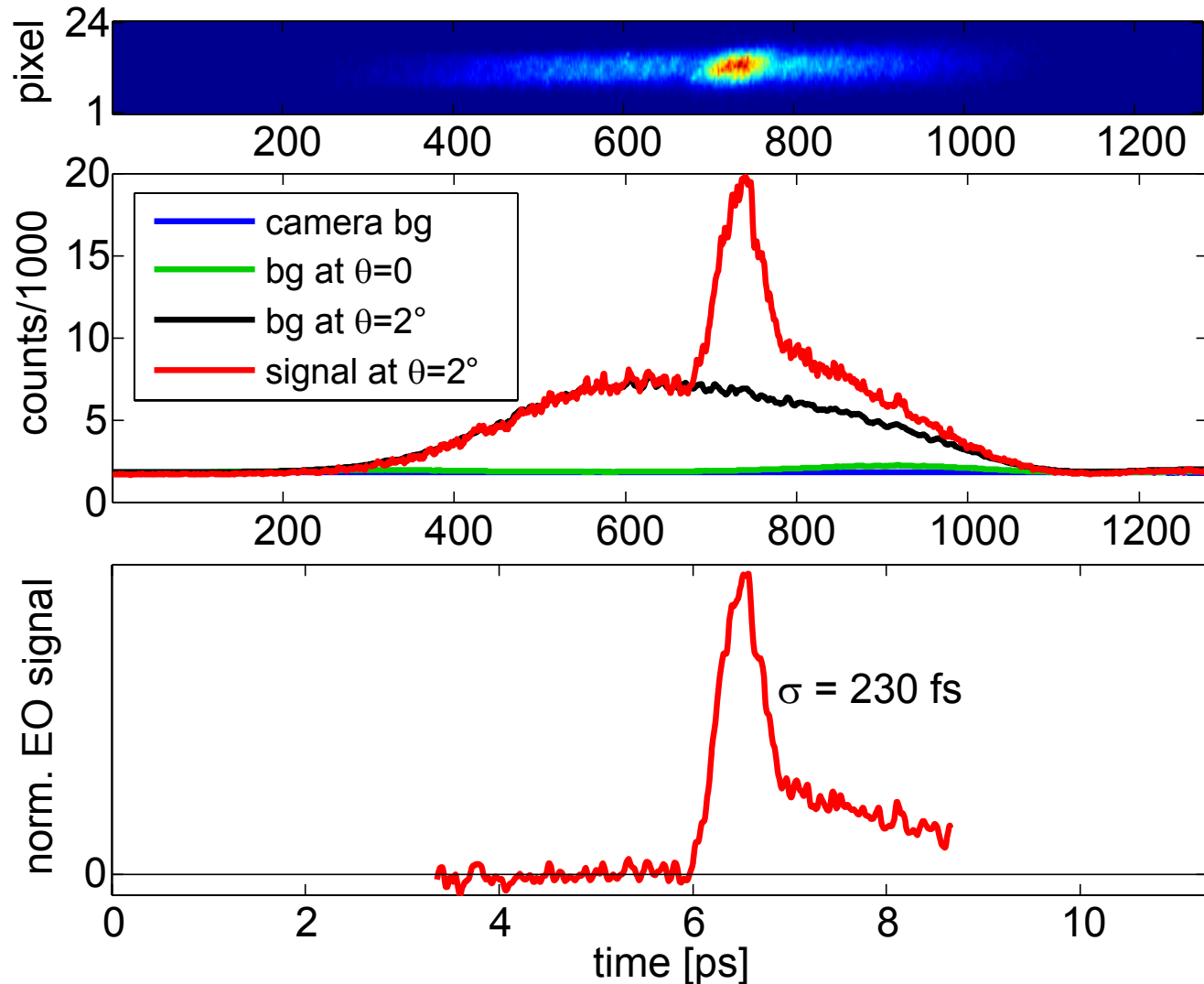
$$\sigma_{\min} > \sqrt{\sigma_0 \sigma_c} \approx 100 \text{ fs}$$

FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



Spektral kodierte EO-Messungen



FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



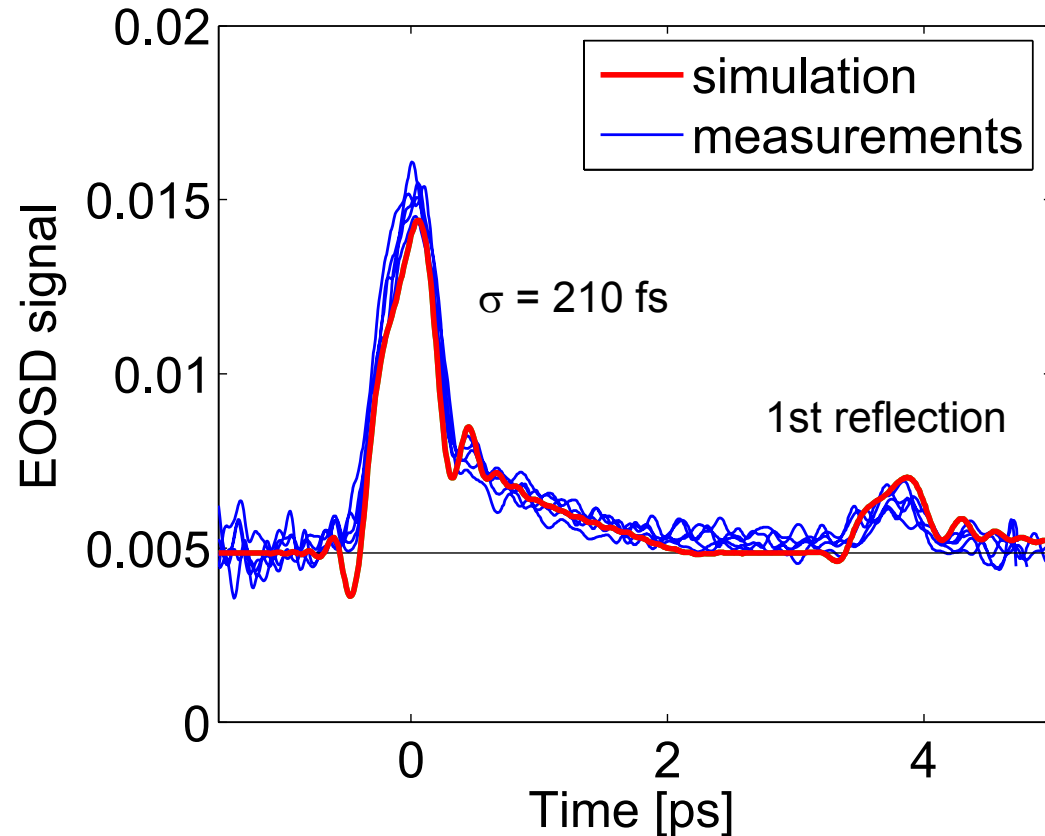
GaP 175 μm , $\sigma_0=7$ fs, $\sigma_c=1.5$ ps

Disputation Bernd Steffen, 3. Juli 2007

Spektrale Kodierung: Vergleich gemessener Signale mit Simulation

5 aufeinander folgende
Elektronenbunche,
Ankunftszeit korrigiert

Simulation:
EO-Signal eines mit TDS
gemessenen Bunches



GaP 175 μ m

$\theta=2^\circ$

$\sigma_0=7$ fs

$\sigma_c=1.5$ ps

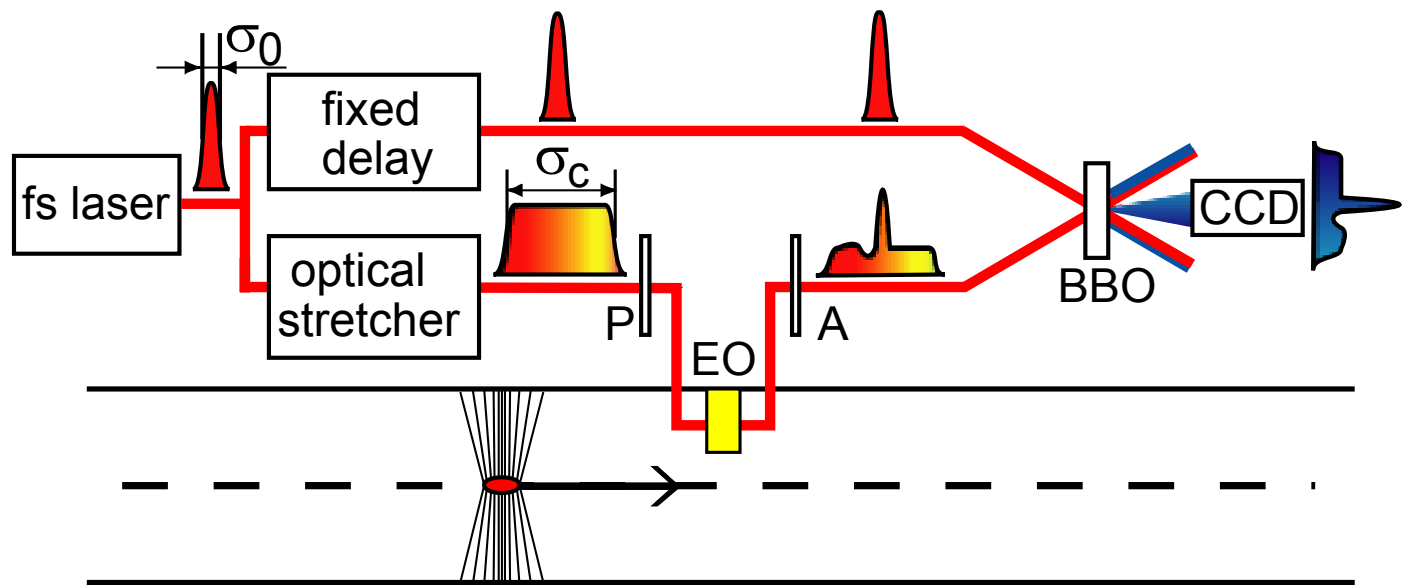
Perfekte Übereinstimmung in Form und Amplitude

FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg

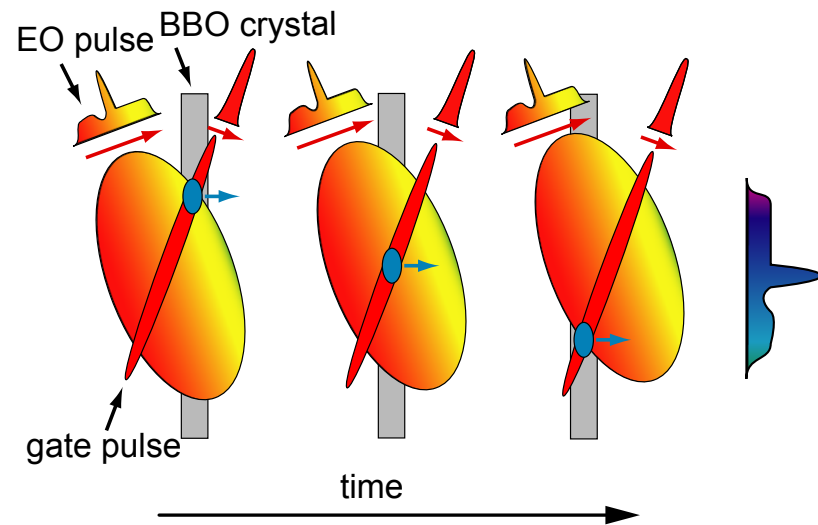


Zeitlich kodierte EO-Messung



- Kreuzkorrelation mit fs-Puls in frequenzverdoppelnden Kristall (BBO)

- ca. 200 μJ Pulsenergie nötig

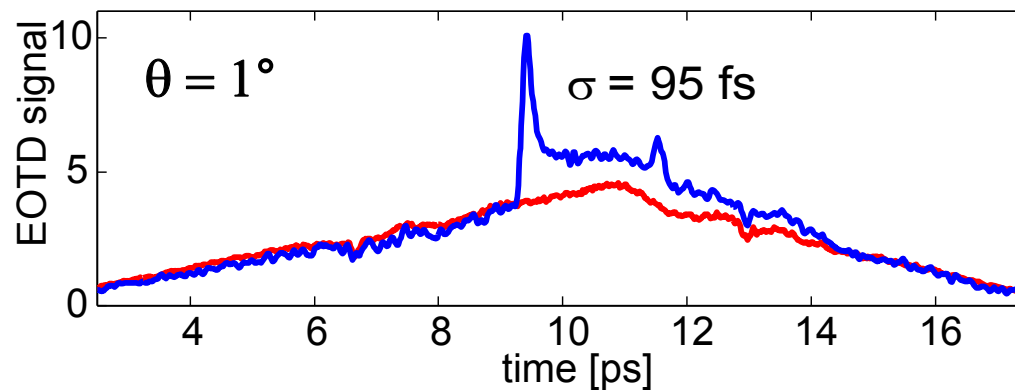
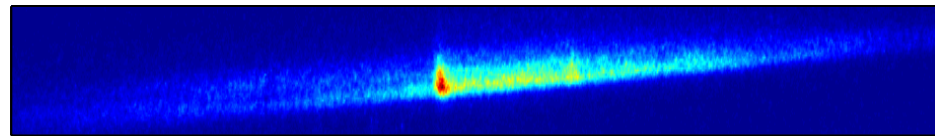
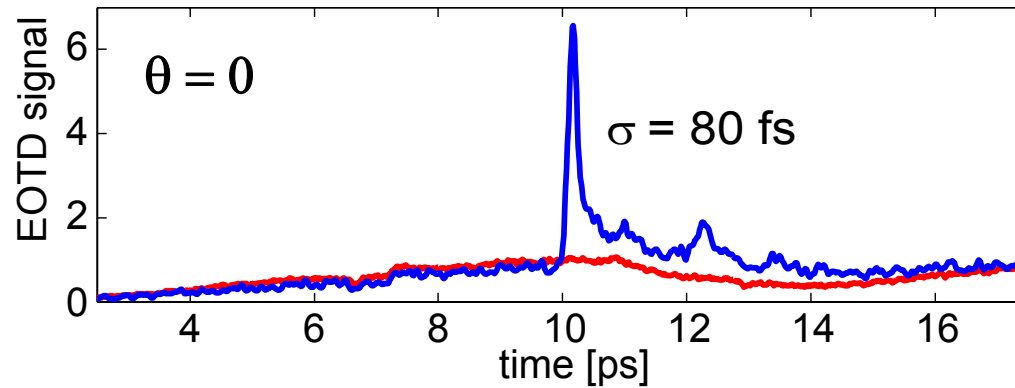
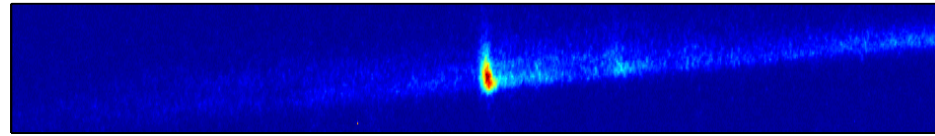


FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



Zeitlich kodierte EO-Messung

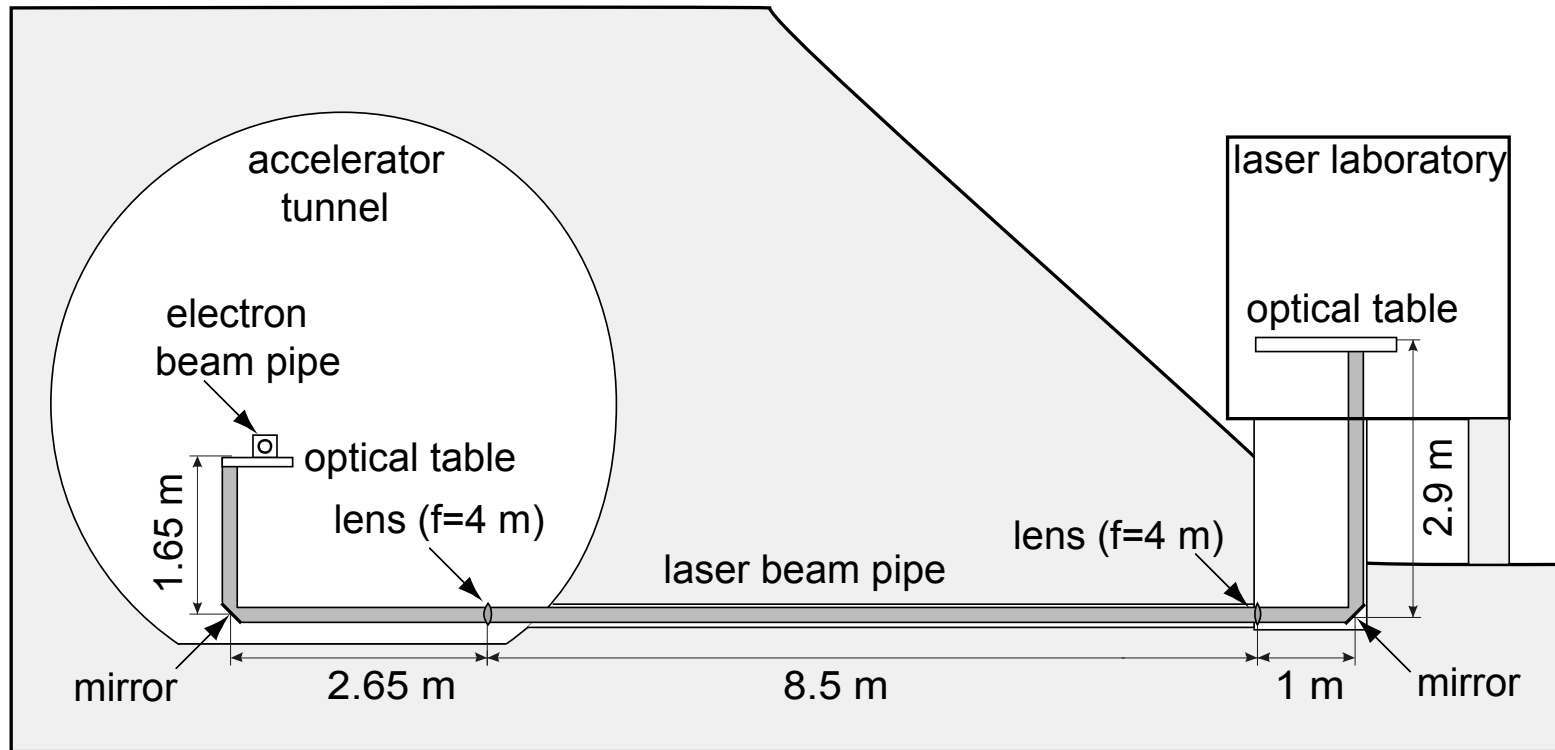


FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



EO-Aufbau bei FLASH



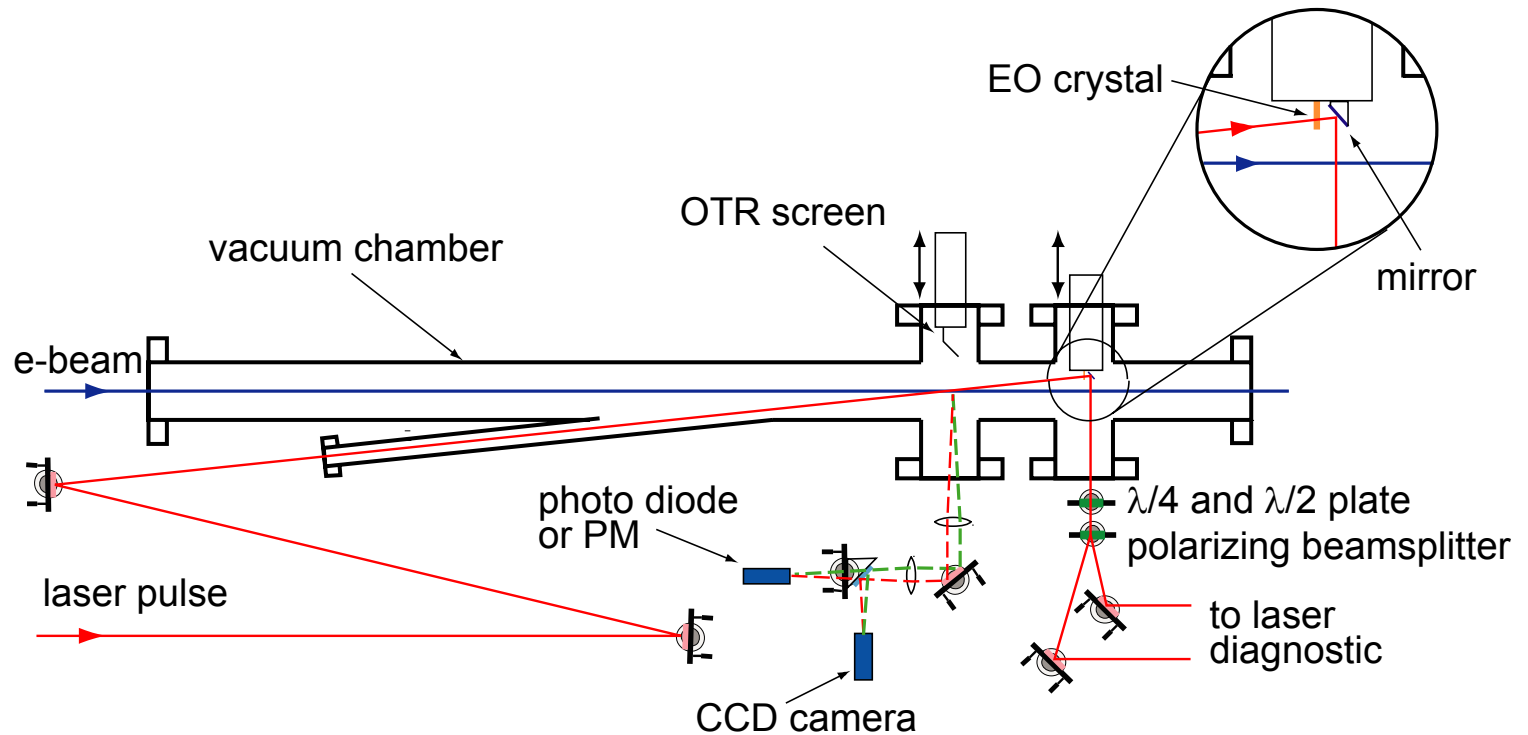
FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg

- Lasersystem im Labor außerhalb des Beschleunigertunnels:
 - 4 nJ, 7 fs Ti:Sa Oszillator
 - 1 mJ, 15 fs Ti:Sa Verstärkersystem
- 20 m evakuiertes Transportrohr in den Tunnel



EO-Vakuumkammer im Strahlrohr

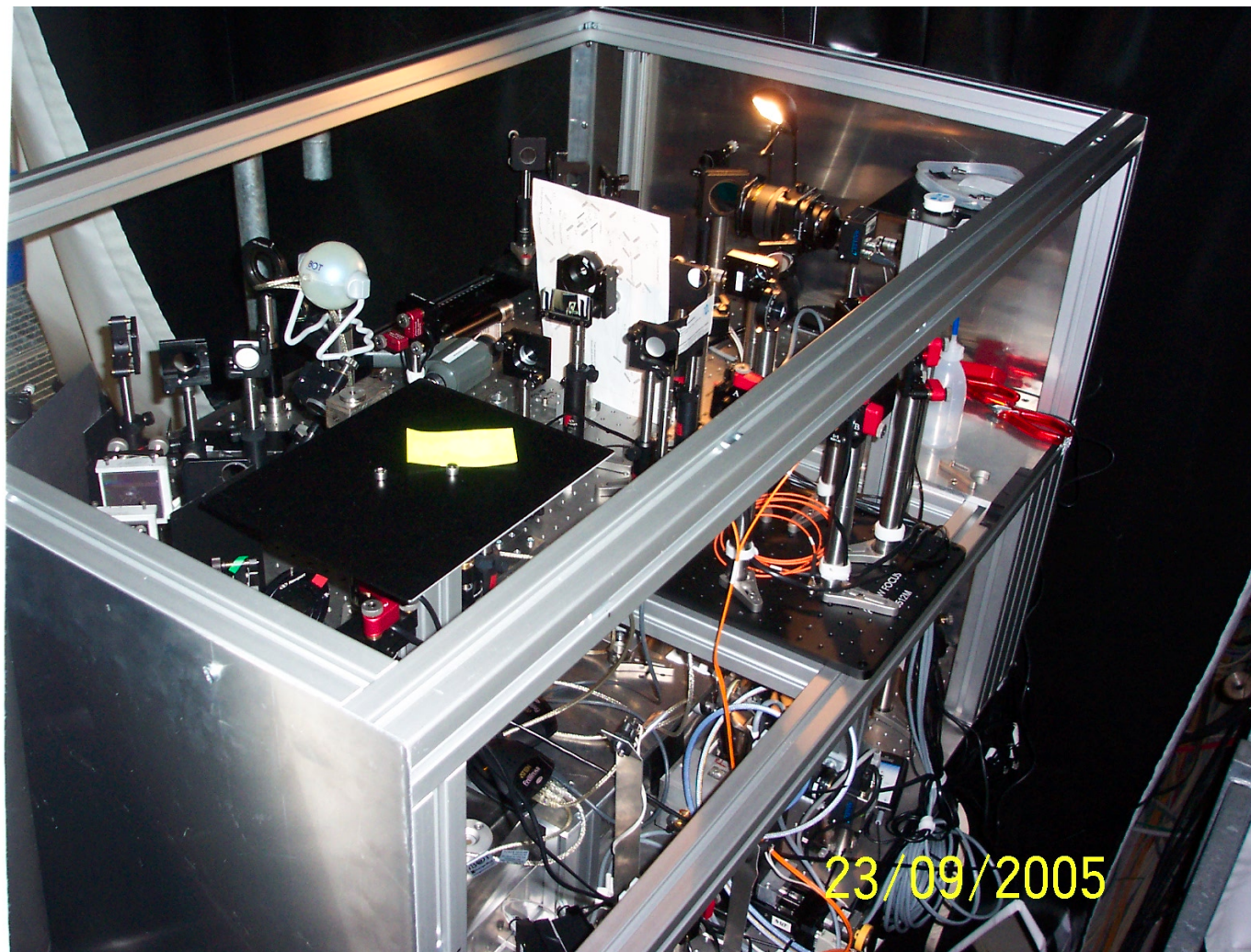


- planer (175 μm) und keilförmiger (30-200 μm) GaP-Kristall im Strahlrohr
- Aufbau erlaubt spektral und zeitlich kodierte Messungen

FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



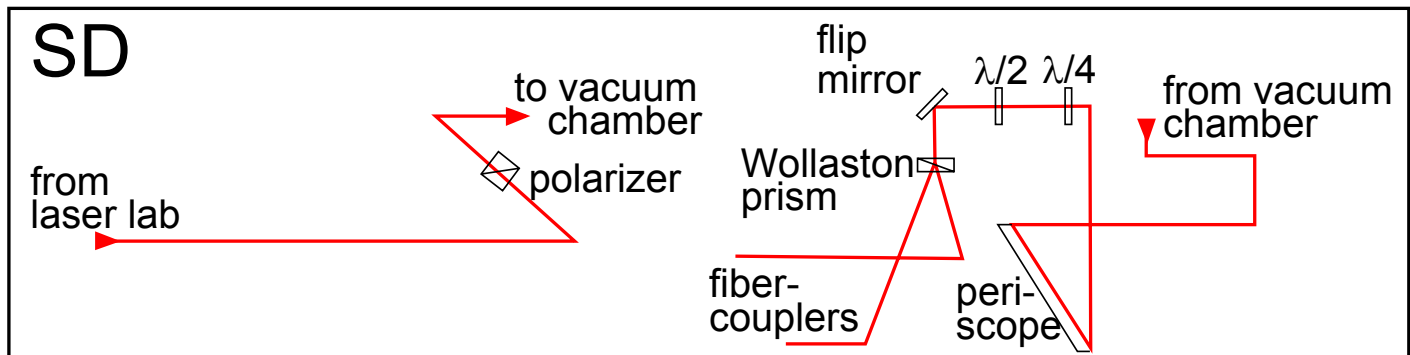
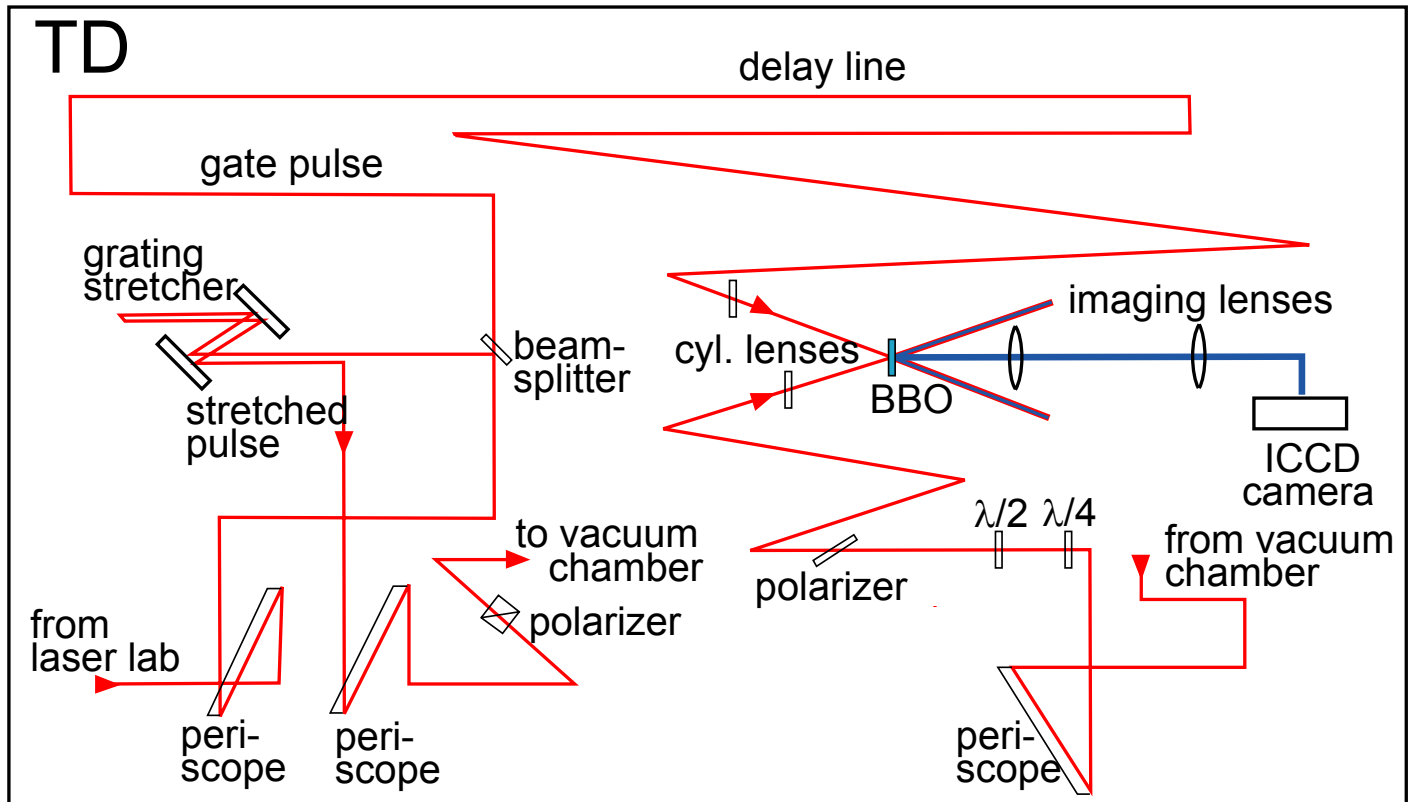


FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



EO-Aufbau im Beschleunigertunnel

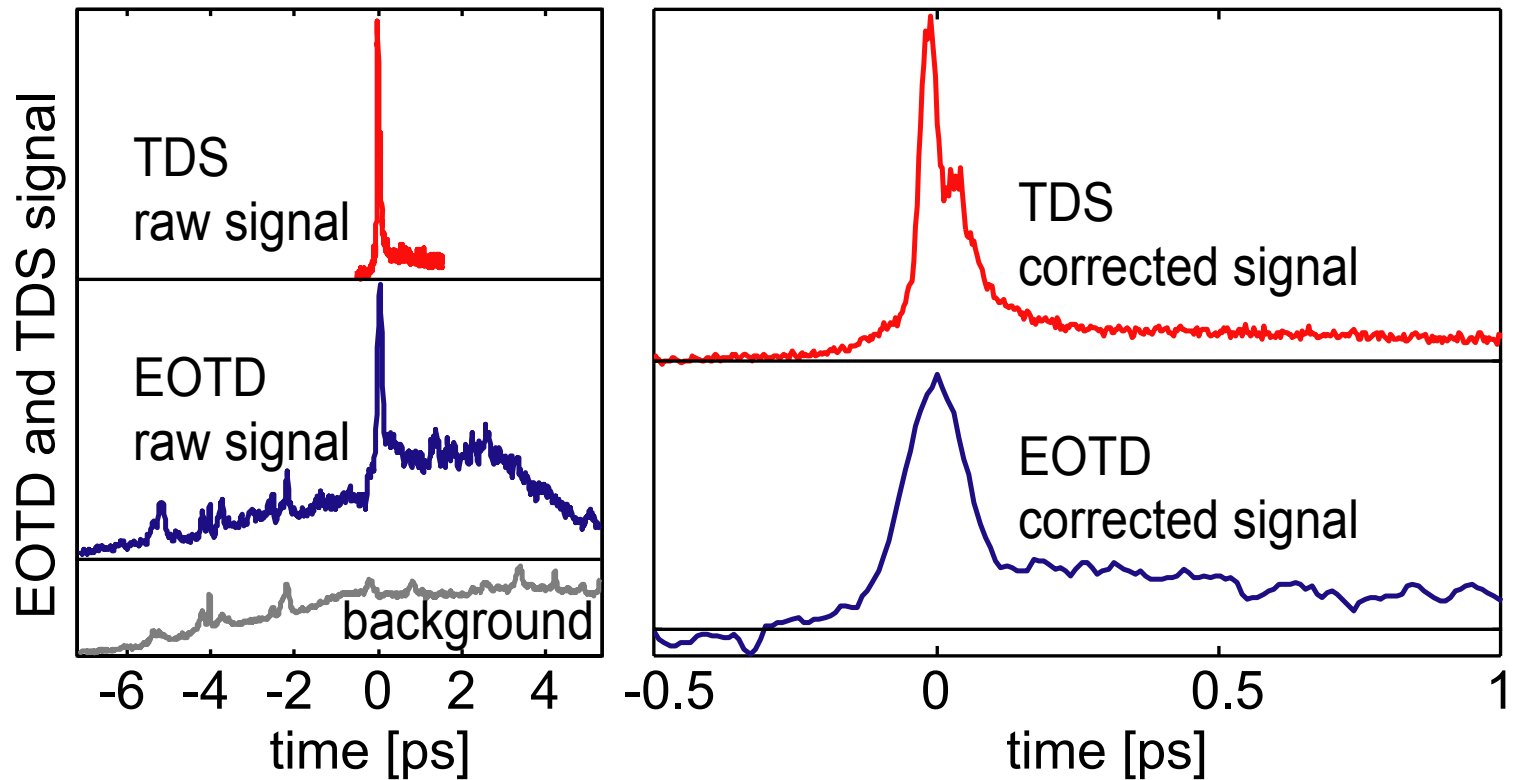


FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



Zeitlich kodierte EO-Messung verglichen mit TDS-Messung



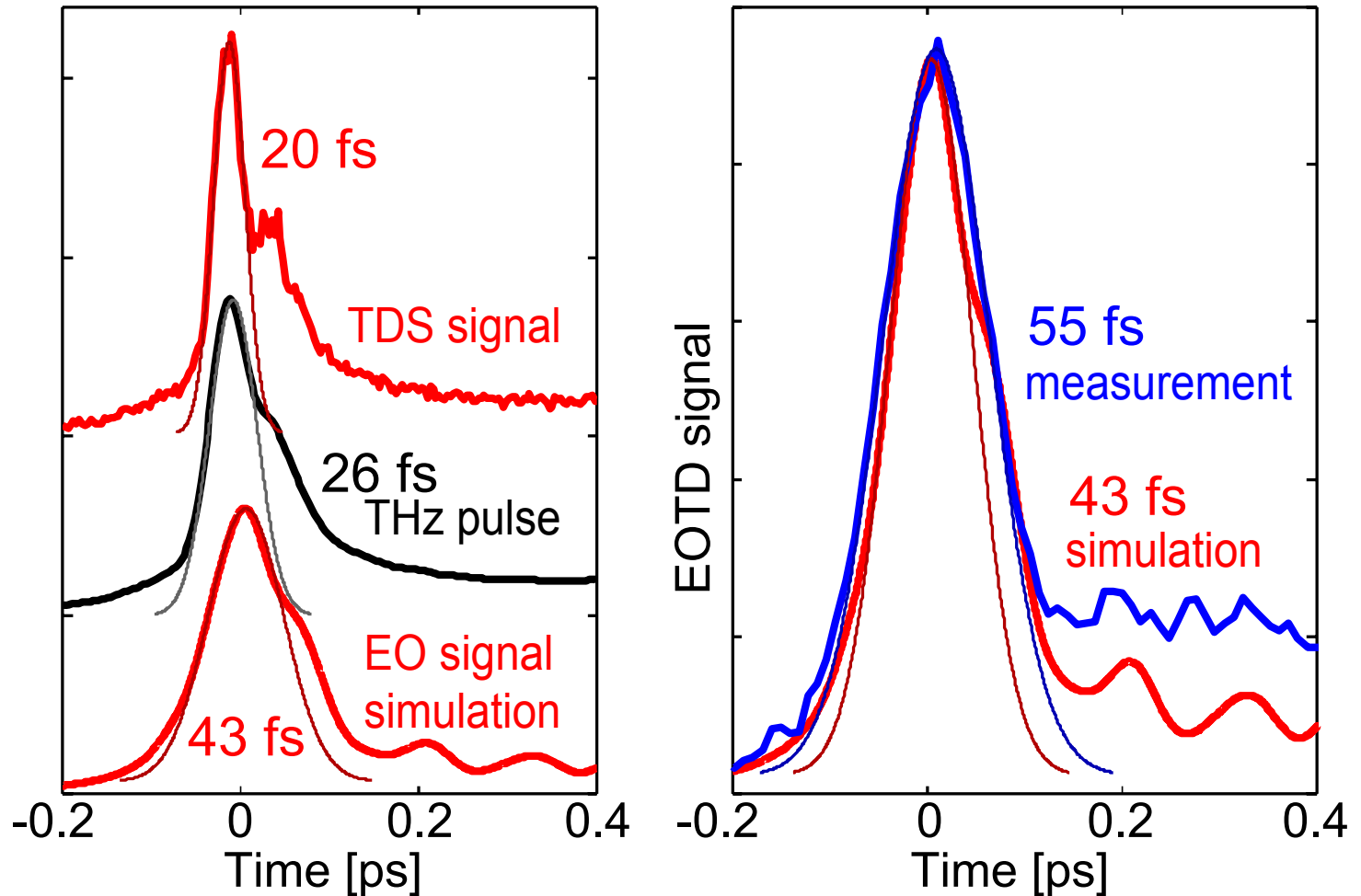
erster Bunch im Makropuls: elektro-optisch vermessen
zweiter Bunch: TDS

FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



Zeitlich kodierte EO-Messung verglichen mit TDS-Messung



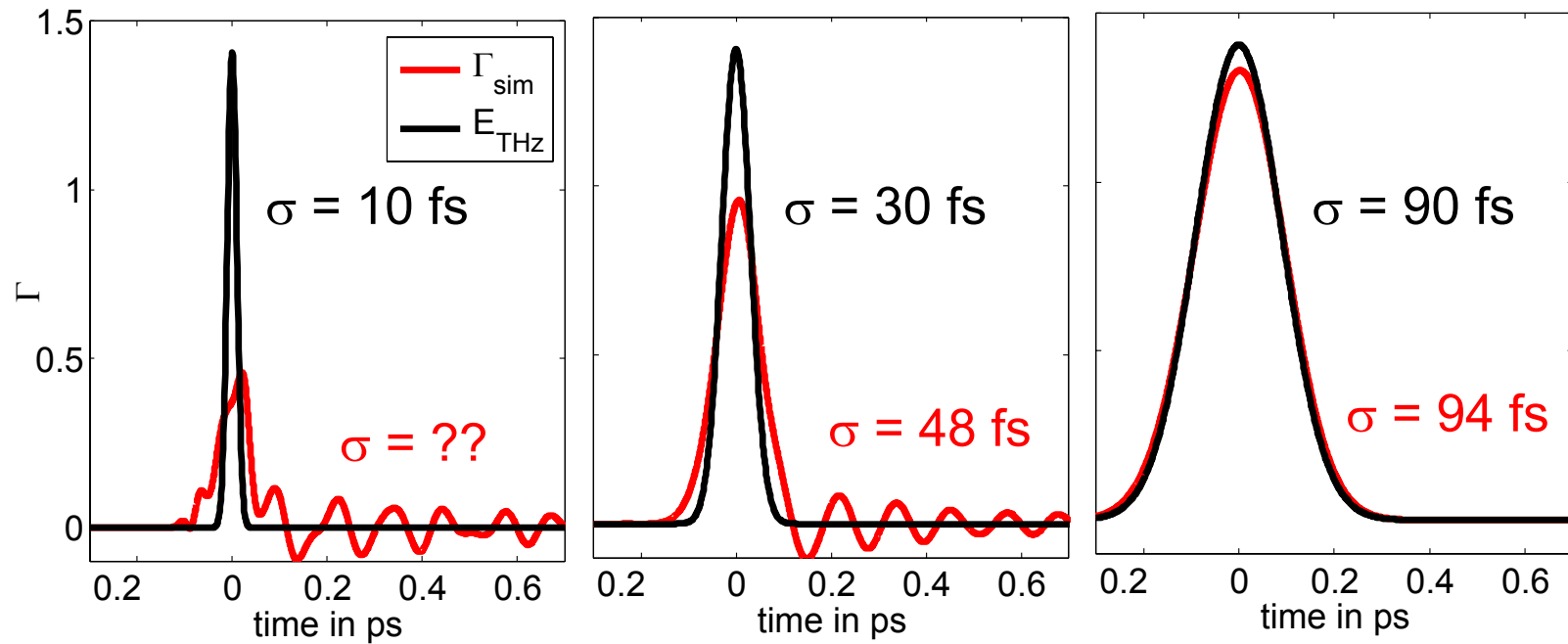
- Sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation
- Auflösungsgrenze der EO Messung mit GaP fast erreicht

FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



Simulierte EO-Signale von gaußförmigen THz-Pulsen in 65 μm GaP

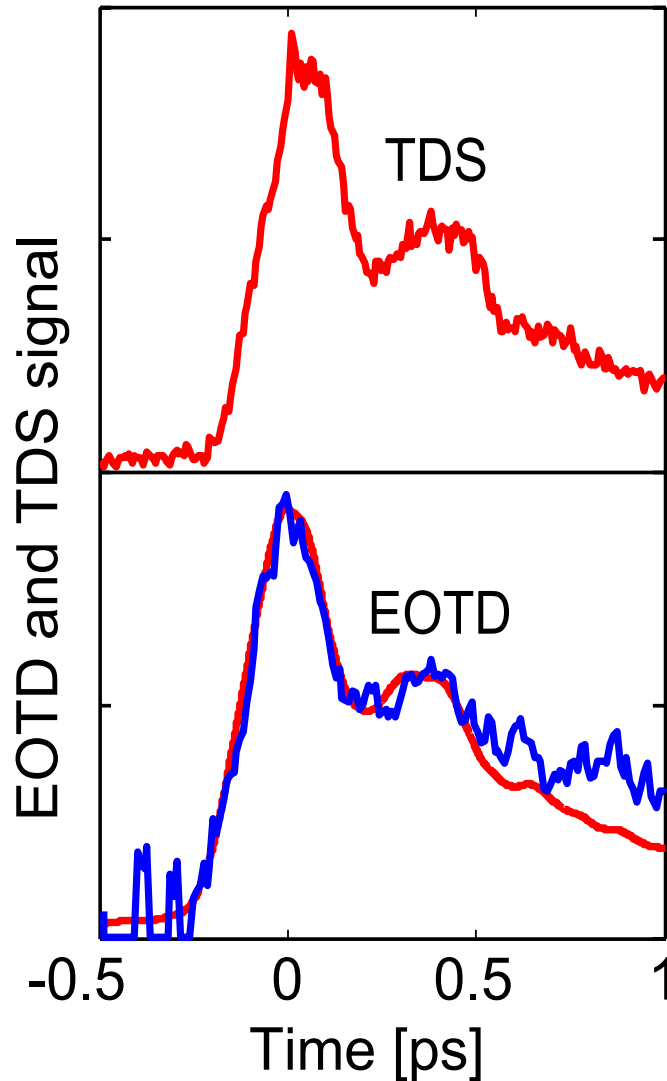


FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



TDS- und zeitkodierte EO-Messung an “überkomprimierten” Bunchen



Genaue Reproduktion
der Bunchform

FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



Übersicht

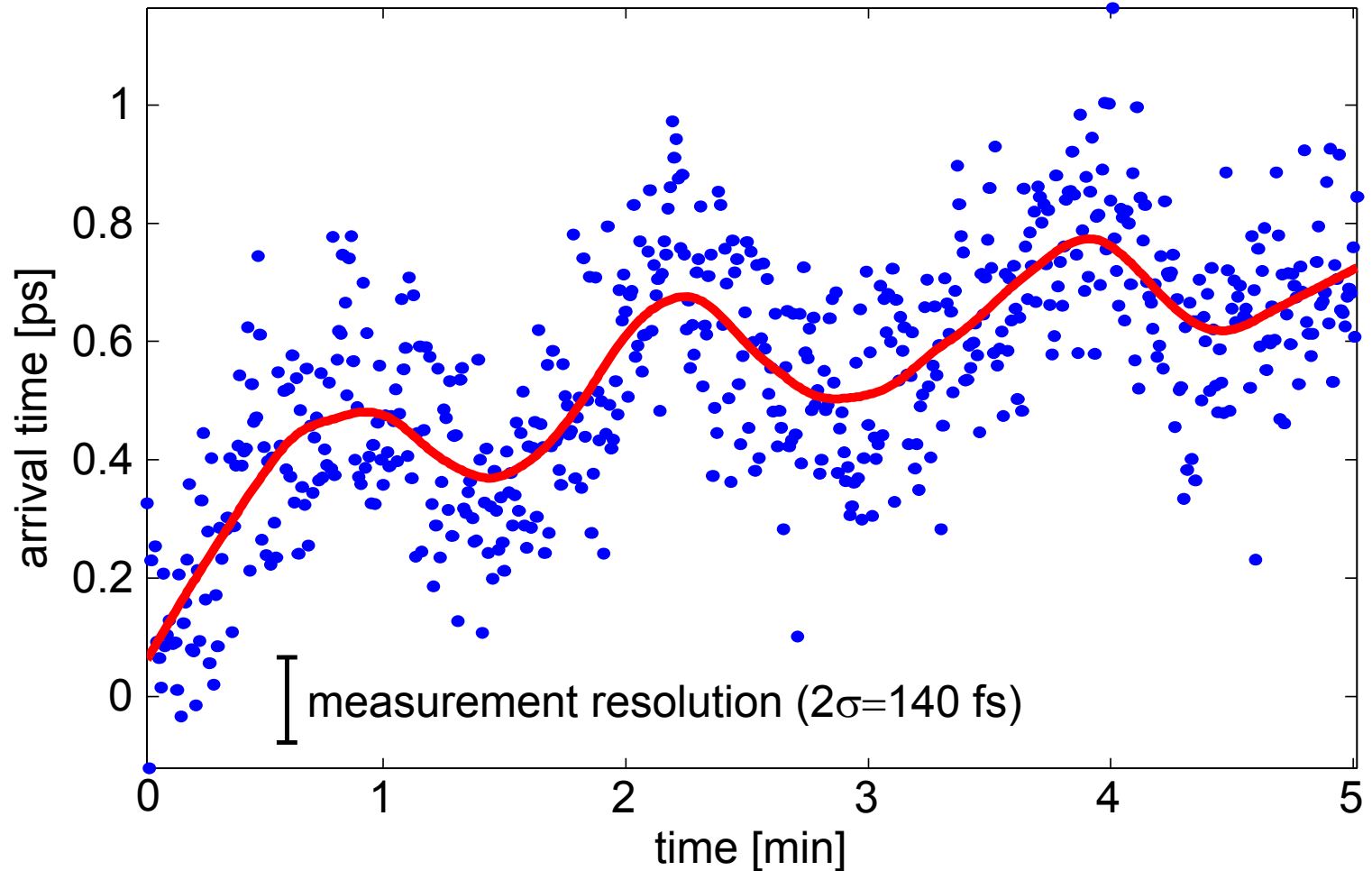
- Motivation
- Grundlagen
 - EO Effekt
 - EO Messprinzip
 - Detektionsverfahren
- Messmethoden und Ergebnisse
 - Abtastung mit variabler Verzögerung
 - Spektral kodierte Messungen
 - Zeitlich kodierte Messungen
- Anwendungen
- Zusammenfassung

FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



Zeitjitter, gemessen mit spektraler Kodierung



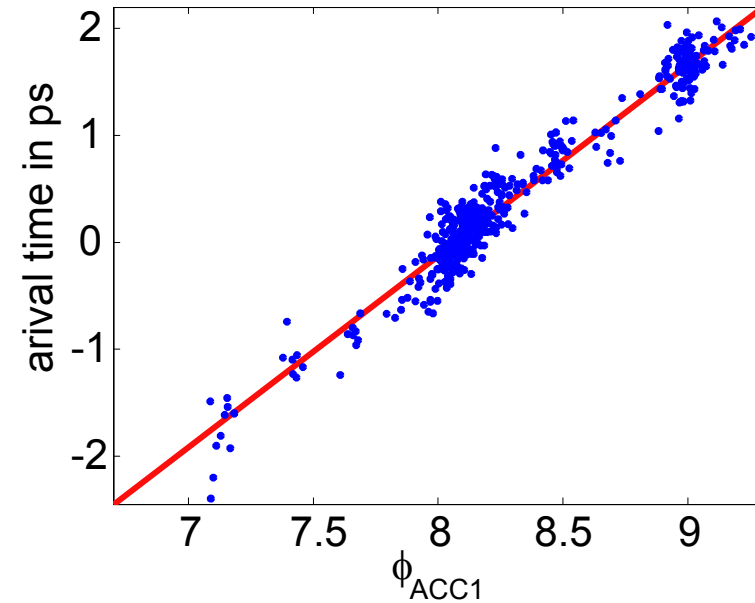
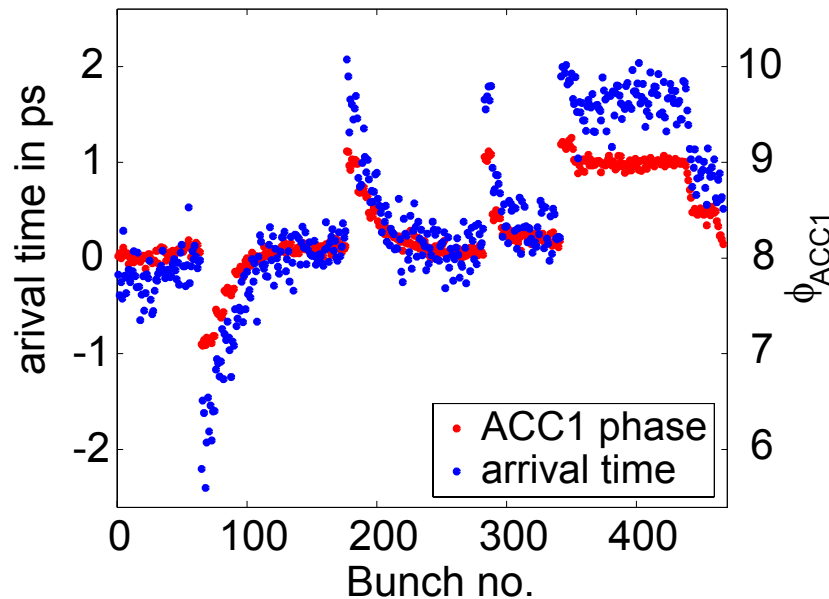
- Zeitjitter: hier 200 fs (rms) incl. langsamer Drift
- ohne langsame Drift: **130 fs (rms)**

FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



Messung der Ankunftszeit der Elektronenbunche in Abhängigkeit der Beschleunigungsphase in ACC1



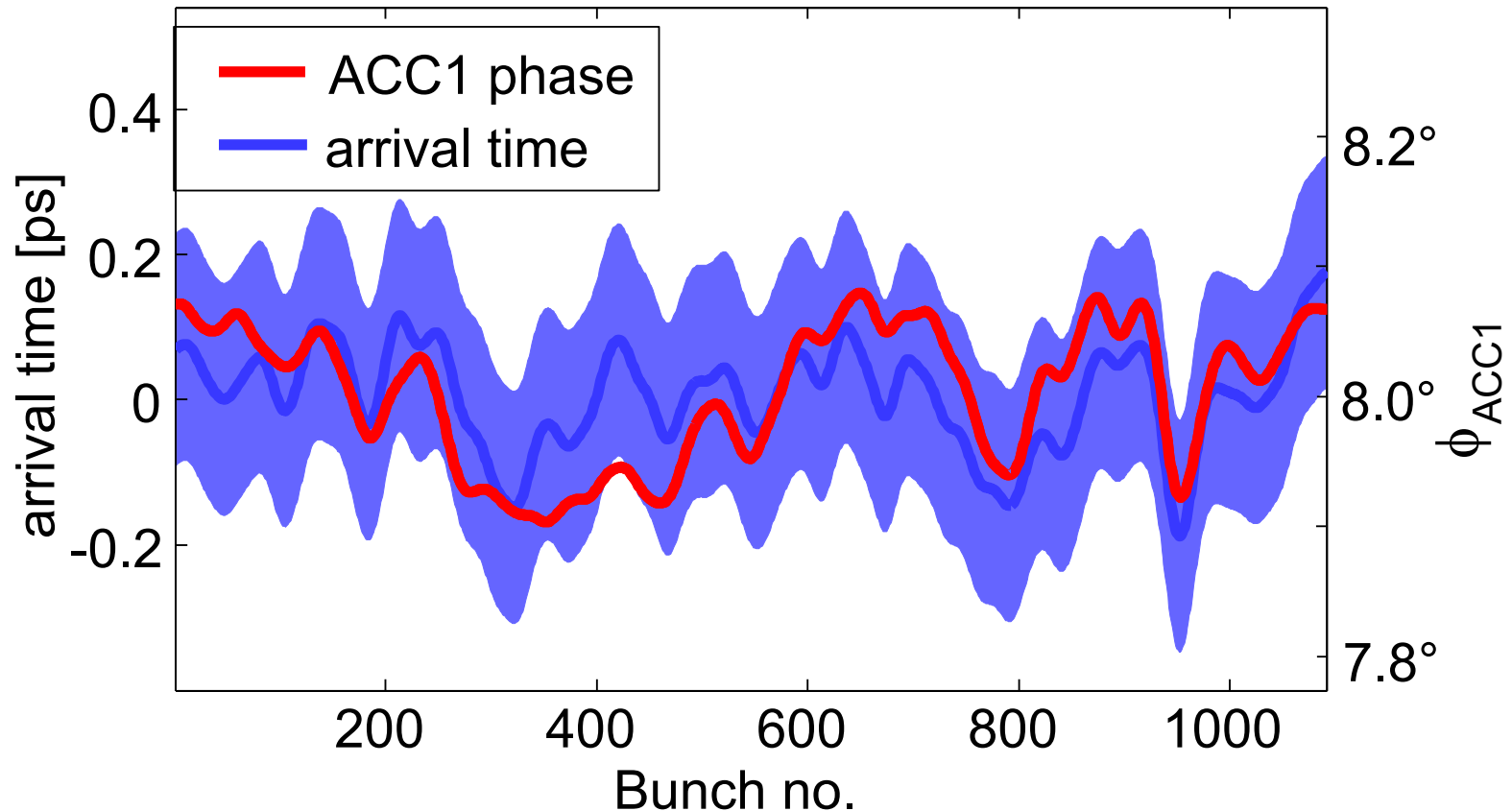
Ankunftszeitänderung: 1.79 ps/Grad

FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



Korrelation zw. Ankunftszeit und ACC1-Phase



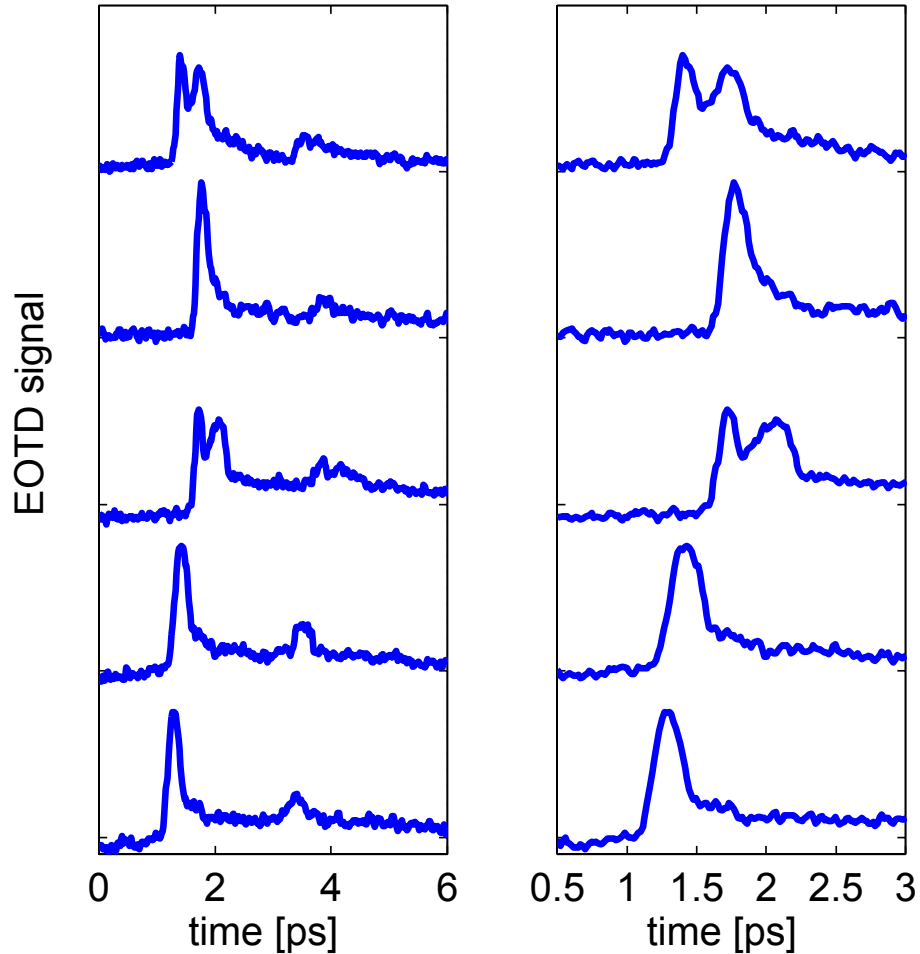
- ⇒ korrelierter Zeitjitter durch Phasenschwankung: 103 fs
- ⇒ unkorrelierte Zeitjitter anderer Quellen: 135 fs
- ⇒ Messfehler der Phasenmessung: 0.04° oder 73 fs

FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



Bunchform bei ausgeschaltetem Kompressions-Feedback



Gelegentlich auftretende Doppelpulse

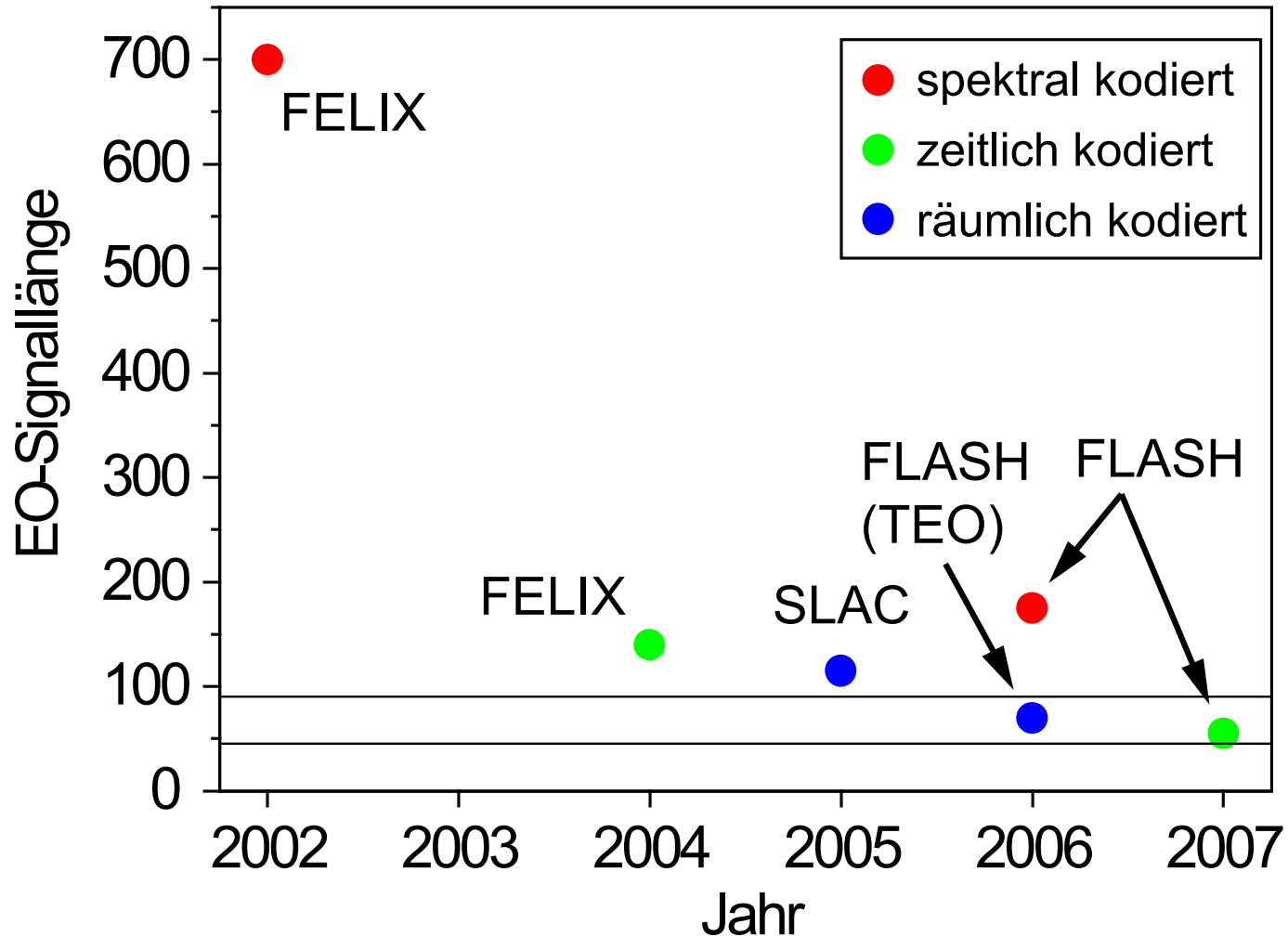
bis zu einem Pulsabstand von ca. 130 fs als Doppelpulse zu erkennen

FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



Vergleich mit anderen Gruppen



FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



Zusammenfassung

- elektro-optische Bunchlängenmessung bei FLASH wurde erfolgreich aufgebaut und getestet
- kürzeste weltweit gemessenen EO-Signale an einem Beschleuniger: 55 fs
- umfangreiche Simulationen zeigen sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Signalen
- gemessene Signallängen nahe der Auflösungs Grenze für Galliumphosphid

FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



Vielen Dank!

Alan Gillespie, Alan MacLeod, Albert Schleiermacher, Alexander Titze, Anja Heins, Armin Azima, Axel Winter, Bart Faatz, Bernd Beyer, Bernhard Schmidt, Burghard Sparr, Christopher Gerth, Dirk Ahrent, Ernst-Axel Knabbe, Florian Löhl, Gerhard Grygiel, Giel Berden, Harald Redlin, Helmut Remde, Holger Schlarb, Hossein Delsim-Hashemi, Ingrid Nikodem, Jens Hansen, Jörg Rossbach, Jörg Thomas, Jonathan Phillips, Kai Ludwig, Kay Rehlich, Klaus Sengstock, Manfred Tonutti, Markus Hüning, Martin Dohlus, Matthias Böttcher, Matthias Hoffmann, Max Görler, Michael Röhrs, Olaf Hensler, Oliver Grimm, Otto Peters, Peter Schmüser, Pedro Castro, Sara Casalbuoni, Siegfried Schreiber, Stefan Düsterer, Stephan Simrock, Steve Jamison, Thomas Bruns, Uschi Djuanda, Vladimir Arsov, Vladimir Rybnikov, Vitaly Kocharyan, Wolfgang Reinsch, u.v.m.

FLASH

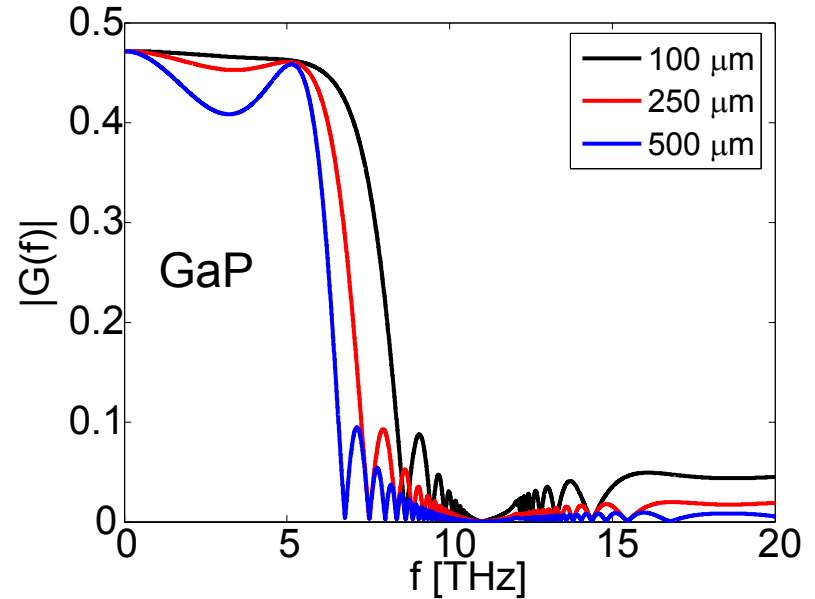
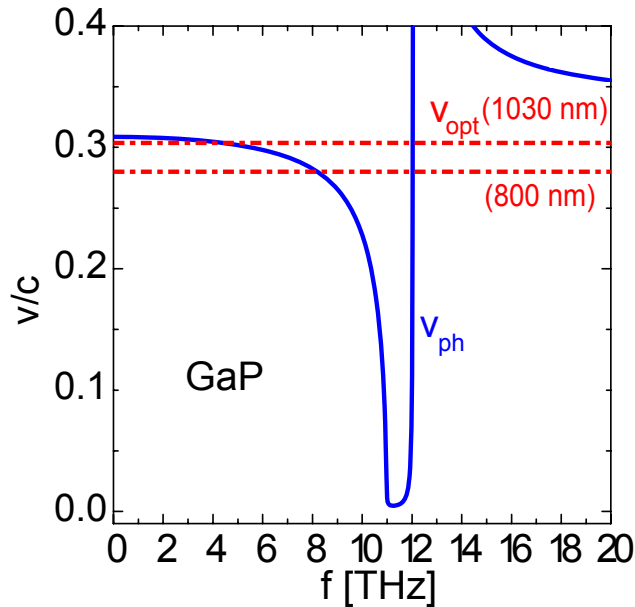
Free-Electron Laser
in Hamburg



FLASH
Free-Electron Laser
in Hamburg

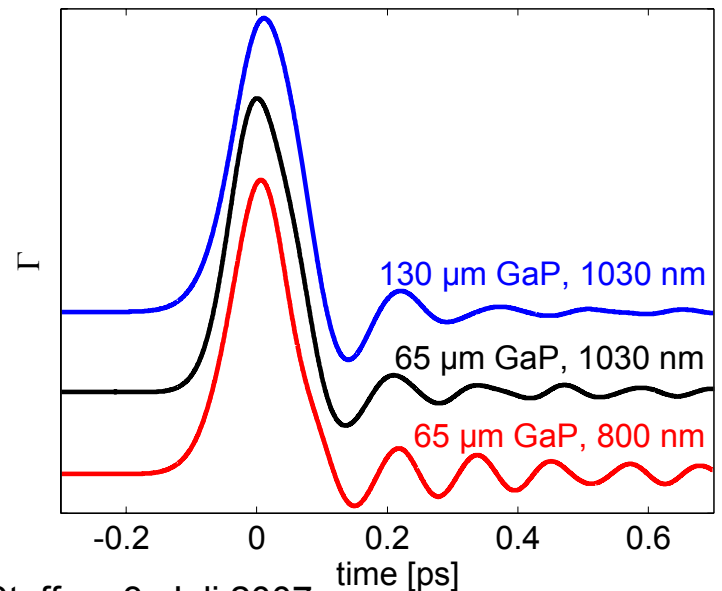


Ausblick: EO mit Faserlasern



Ytterbium dotierter Faserlaser
bei $\lambda=1030$ nm

- einfacher (billiger) Laser
 - bessere Synchronisation
 - bessere Phasen Anpassung
- bei niedrigen Frequenzen:
dickere GaP-Kristalle möglich

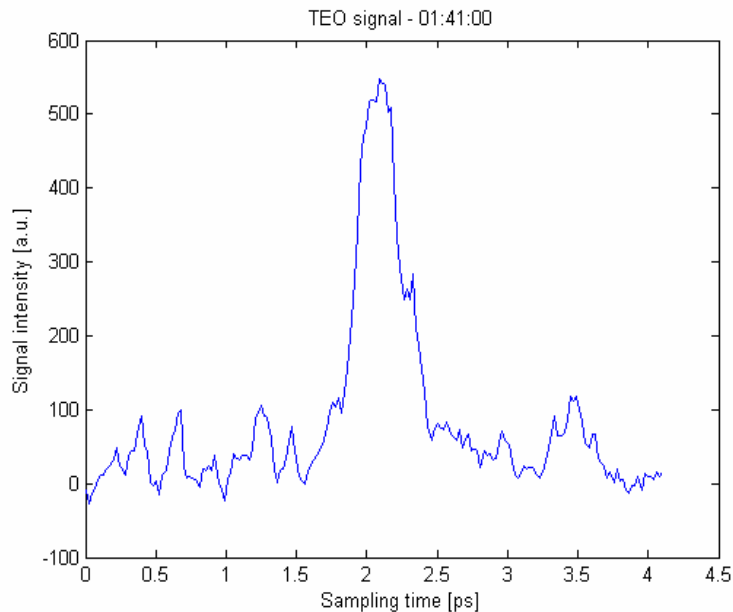
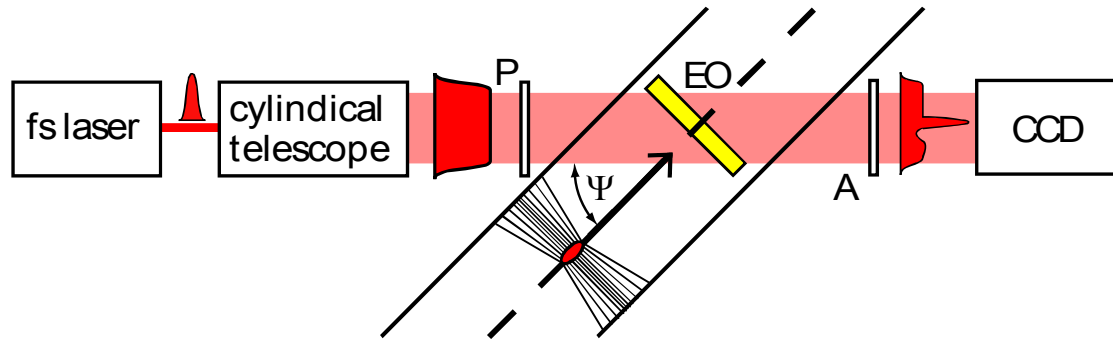


FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg

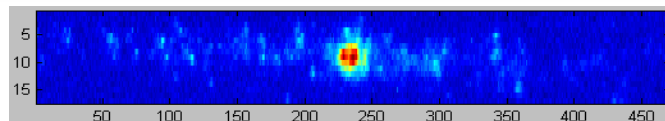


Spatial decoding TEO



160 fs (FWHM) measured at FLASH
(TEO experiment)

- + simple laser system
- + high repetition rate
- + high resolution: **120fs**
- more complex imaging optics



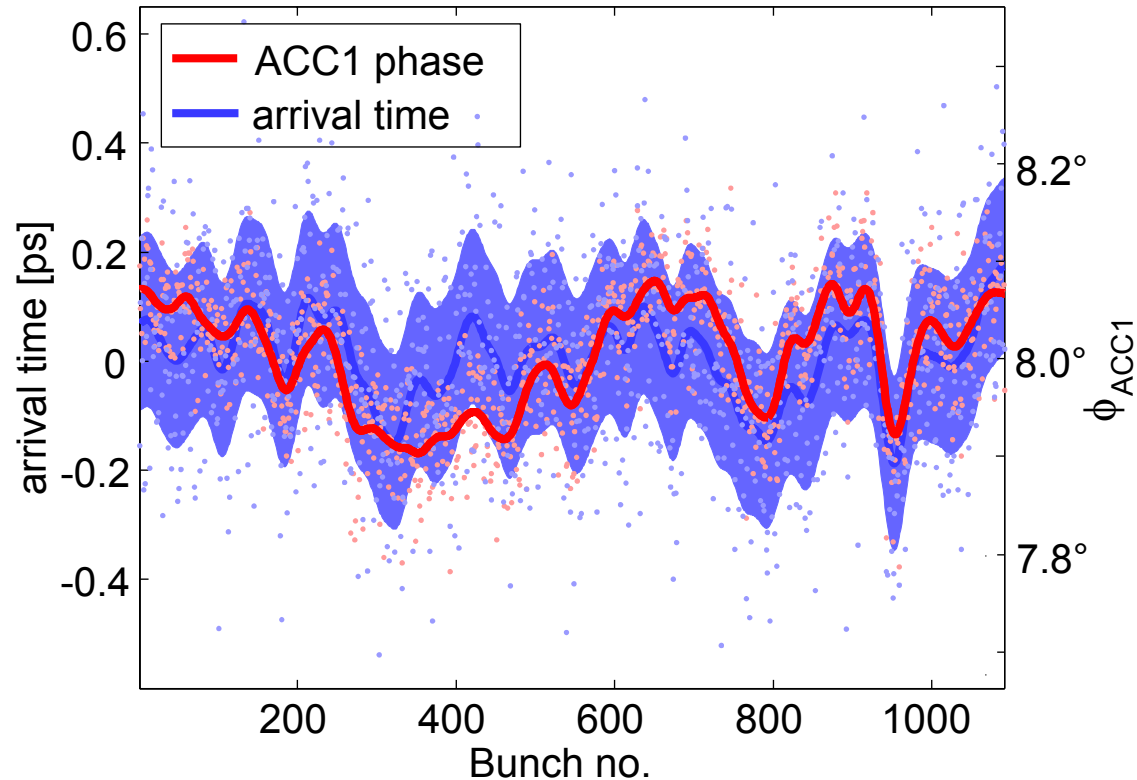
from Armin Azima et al., DESY

FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



Korrelation zw. Ankunftszeit und ACC1-Phase



gemessener Zeitjitter: 182 fs (rms)

gemessene Phasenschwankung: 0.07° , entspricht 127 fs

korrigierte (unkorrelierte) Zeitschwankung: 167 fs

von Lasersynchronisation: 65 fs

⇒ korrelierter Zeitjitter durch Phasenschwankung: 103 fs

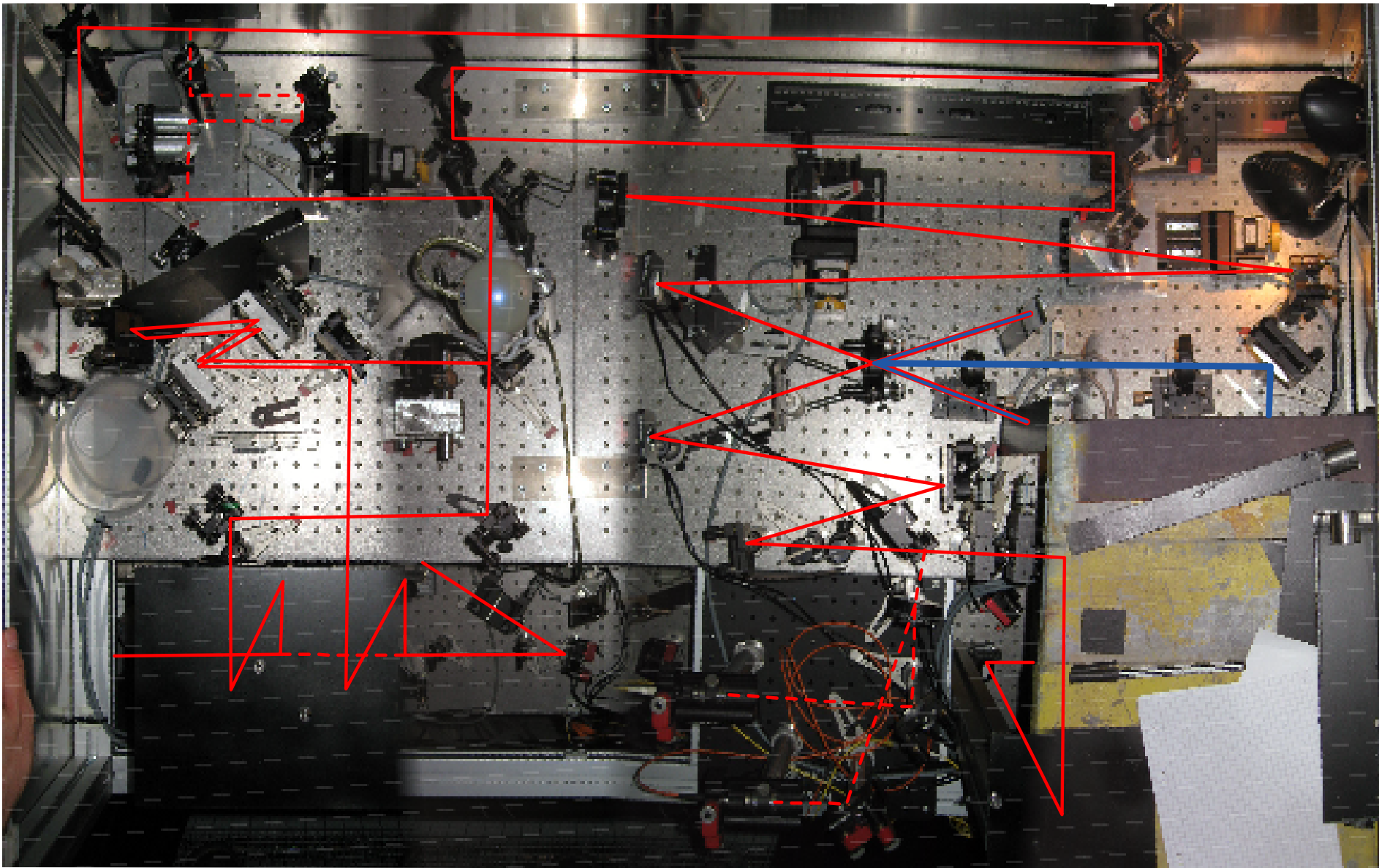
⇒ unkorrelierte Zeitjitter anderer Quellen: 135 fs

⇒ Messfehler der Phasenmessung: 0.04° oder 73 fs

FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg



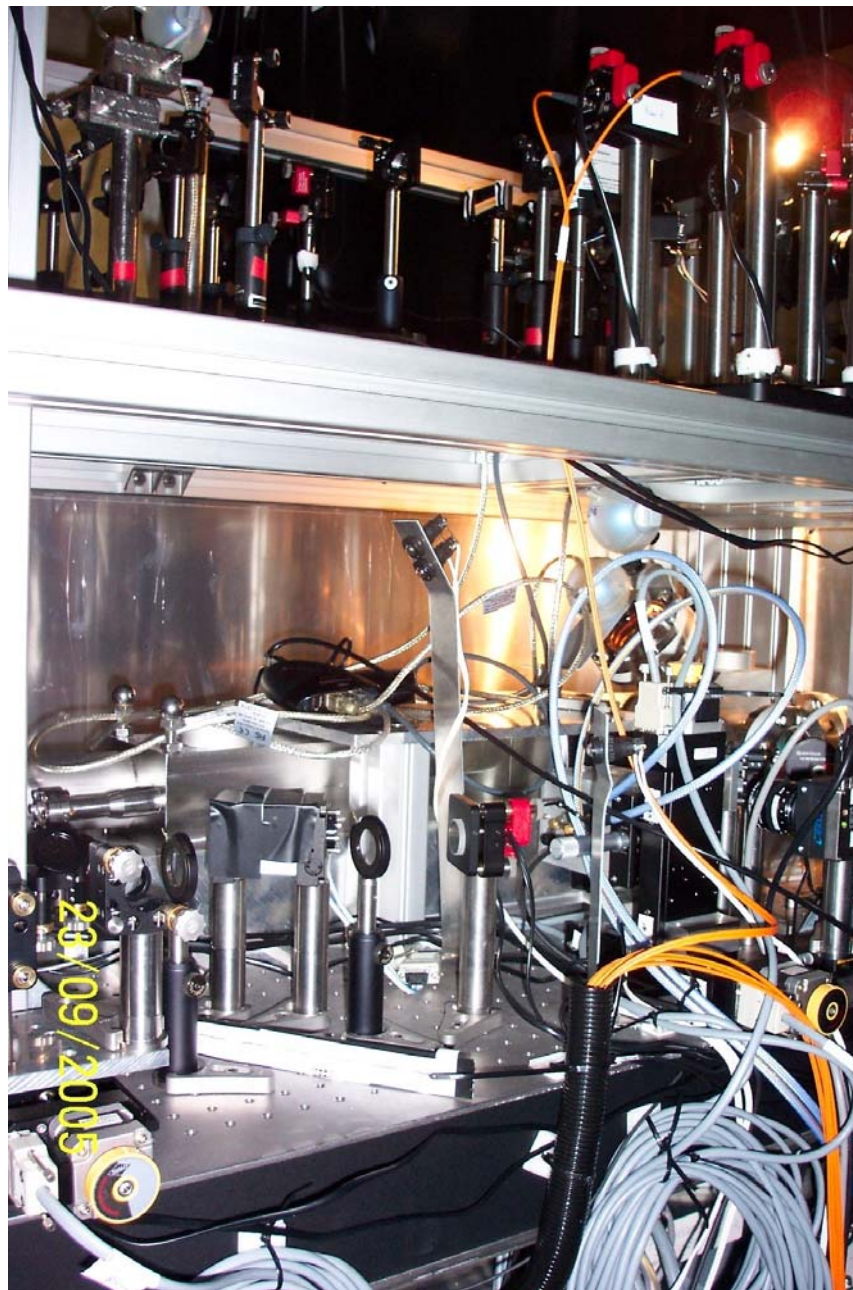


FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg

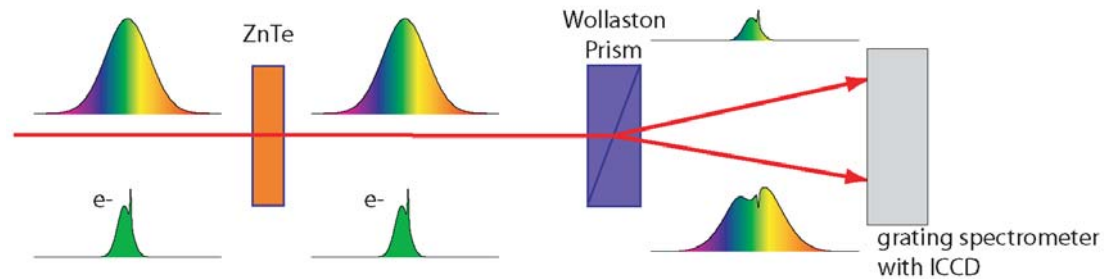


Bernd.Steffen@desy.de



Disputation Bernd Steffen, 3. Juli 2007

Crossed polarizer vs. balanced detection



Signal $\sim \sin^2(\Gamma/2) \approx 0.0025$

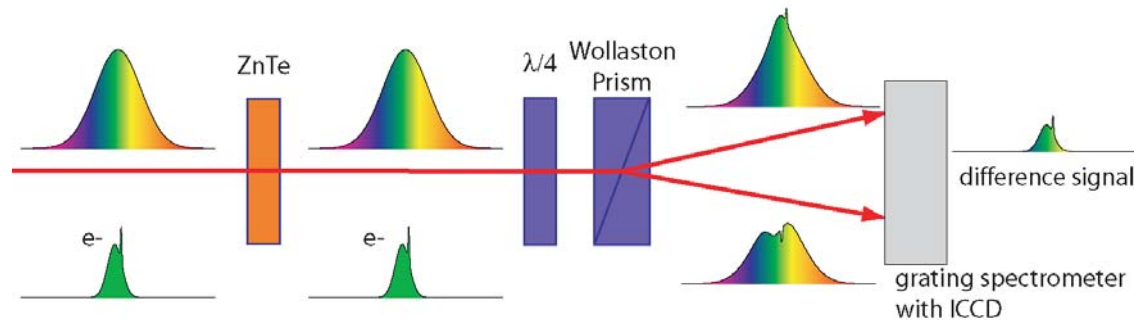
$\Gamma \sim E$ (Γ : phase difference between fast and slow optical axis)

$\Gamma \approx 0.1$

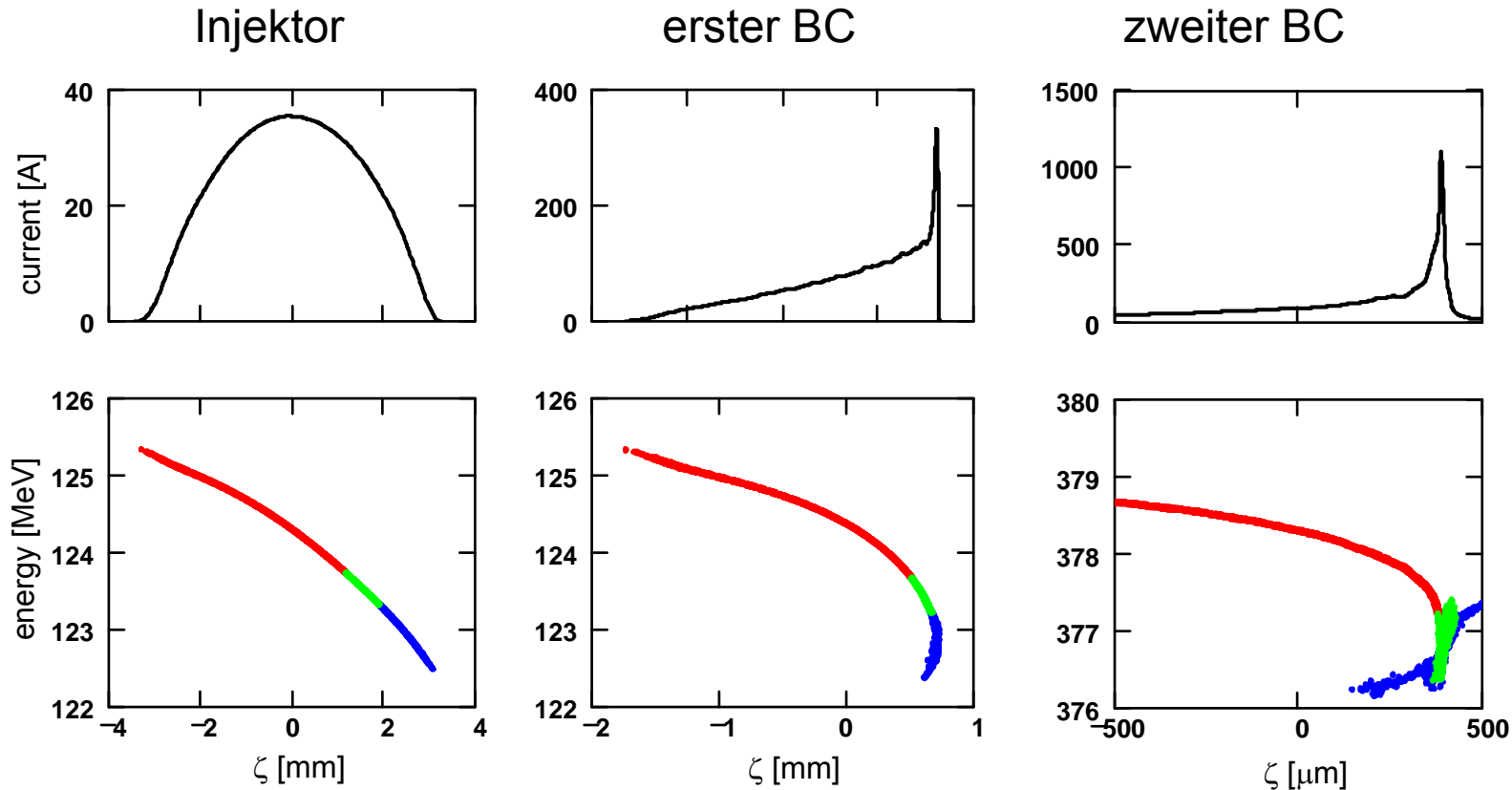
Difference signal $\sim \sin(\Gamma) \approx 0.1$

- + small background
- nonlinear
- small signals

- + linear
- + bigger signals
- big background (50% of I_{\max})



Bunch-Kompression



Rechnungen von Martin Dohlus

FLASH

Free-Electron Laser
in Hamburg

