

Laser-basierte Synchronisation mittels *two-color optical cross correlation* mit
Femtosekunden-Genauigkeit am FLASH
- Vorstellung des Konzeptes und erste Ergebnisse -

Sebastian Schulz^{1,2} Vladimir Arsov²

¹Institut für Experimentalphysik
Universität Hamburg

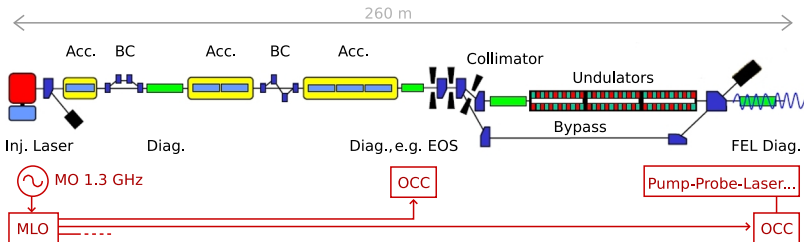
²Deutsches Elektronen-Synchrotron - FLA, Hamburg

DPG Tagung 2008 - T71 - Freitag, 07.03.2008

Übersicht

- 1 Inhalt und Motivation
- 2 Grundlagen
 - Aufbau eines balanced optical cross correlators
 - Fehlersignal
 - Beta-Bariumborat
- 3 Erste Messungen und Ergebnisse
 - Erzeugung des Summenfrequenzsignals
 - Beobachtung des Fehlersignals
- 4 Ausblick und Zusammenfassung
 - Zukunftspläne
 - Zusammenfassung

Motivation

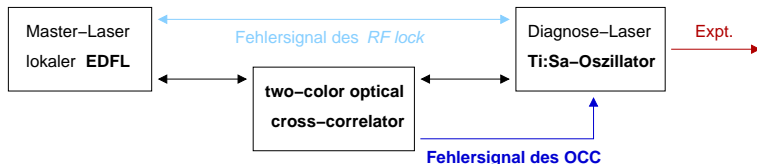


Optisches Synchronisationssystem: Ergänzung des bisherigen RF-Systems

- Anforderung: *timing jitter* < 30 fs (rms)
- Master-Laser-Oszillator gekoppelt an 1.3 GHz-Referenz
- Distribution der Timing-Information: aktiv längenstabilisierte *fiber links*
- Anwendung: Diagnose-Laser, Pump-Probe-Laser, ...

Aufgabenstellung

Synchronisation eines Diagnose-Lasers auf einen Master-Laser:



Parameter des **Diagnose-Lasers** - Ti:Sa Oszillator

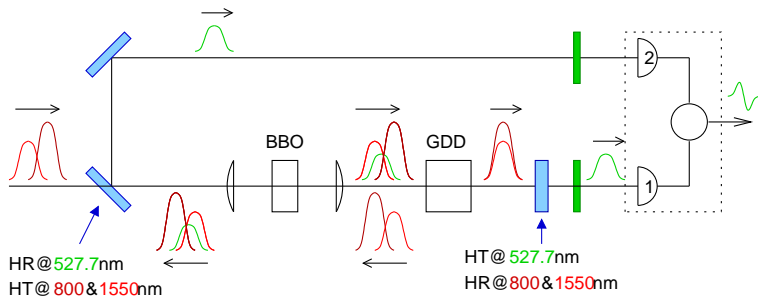
- $\lambda_{\text{Ti:Sa}} = 800 \text{ nm}$, $\Delta\lambda_{\text{Ti:Sa}} = 85 \text{ nm}$, $\tau_{\text{Ti:Sa}} \approx 15 \dots 35 \text{ fs}$ (kritisch)
- $\langle P_{\text{Ti:Sa}} \rangle = 440 \text{ mW}$, $f_{\text{rep,Ti:Sa}} = 81.0 \text{ MHz}$

Parameter des **Master-Lasers** - lokaler "erbium-doped fiber laser"

- $\lambda_{\text{EDFL}} = 1550 \text{ nm}$, $\Delta\lambda_{\text{EDFL}} \approx 70 \text{ nm}$
- $\langle P_{\text{EDFL}} \rangle = 15 \text{ mW}$, $f_{\text{rep,EDFL}} = 40.5 \text{ MHz}$

Fehlersignal also $f_{\text{err}} = 40.5 \text{ MHz}$

Aufbau eines *balanced optical cross correlators*



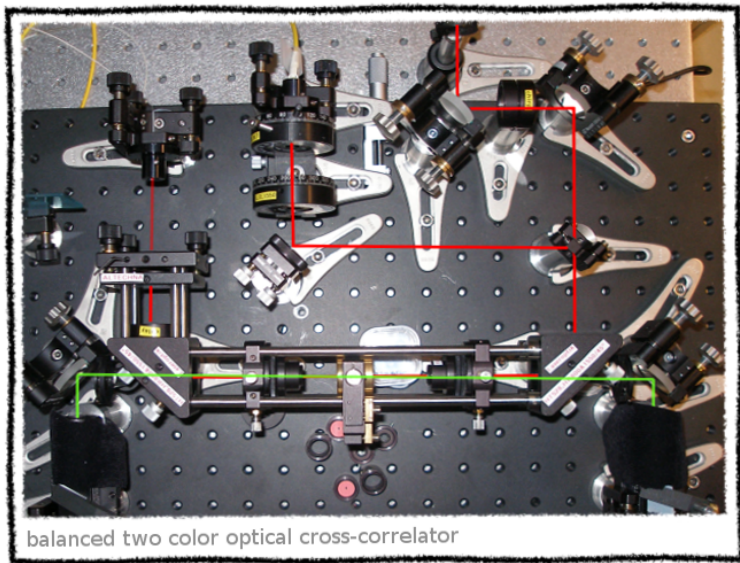
Funktionsprinzip

- Erzeugung eines *group delays* ("Puls-Tausch")
- Zweimalige Summenfrequenz-Erzeugung in einem nicht-linearen optischen Kristall (\Rightarrow hintergrundfreie Detektion)

Implementierung

- Strahlüberlagerung und Separation der Summenfrequenz mittels dichroitischer Spiegel

Aufbau eines *balanced optical cross correlators*



Fehlersignal

Annahme: **Gauß-Puls**

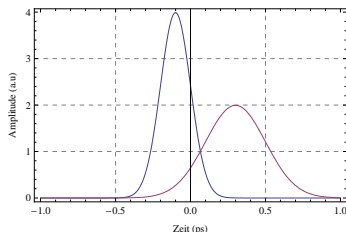
$$I_i(t) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(t - t_i)^2}{2\sigma_i^2}\right\}$$

Intensität der **Summenfrequenz** proportional zur Faltung (Korrelationsfunktion, abhängig von Δt):

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

Betrachte außerdem: **Ableitung der Faltung**

- Anpassung des *group delays* berechenbar
- Informationen über Änderung des Überlapps



Fehlersignal

Annahme: **Gauß-Puls**

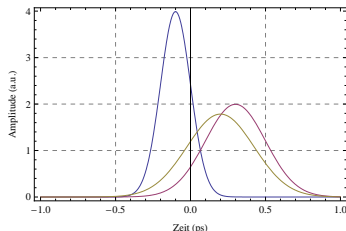
$$I_i(t) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(t - t_i)^2}{2\sigma_i^2}\right\}$$

Intensität der **Summenfrequenz** proportional zur Faltung (Korrelationsfunktion, abhängig von Δt):

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

Betrachte außerdem: **Ableitung der Faltung**

- Anpassung des *group delays* berechenbar
- Informationen über Änderung des Überlapps



β -Bariumborat (BBO) I

Einige Eigenschaften von BBO

- negativer uniaxialer Kristall
($n_o > n_e, \Delta n \approx 0.13$)
- Punktgruppe $3m$
- transparent ab 189 nm
- Phasenanpassung bis 204.8 nm möglich
- hohe Zerstörschwelle

Annahme: plane-wave, fixed-field approximation, d.h. vernachlässigt werden:

- Temperatureffekte
- dispersive Pulsverbreiterung
- Absorption
- ...

Rechnungen

- Phasenanpassungswinkel
- Phasen- und Gruppengeschwindigkeit
- *walk-off* Winkel
- Reflexionsverluste
- Effektive nichtlineare Koeffizienten
- GVD und GDD
- Chirp und Pulsverbreiterung
- Effektive Längen (L_{NL}, \dots)
- *mix acceptance bandwidth*
- Konversionseffizienz
- ...

β -Bariumborat (BBO) I

Einige Eigenschaften von BBO

- negativer uniaxialer Kristall
($n_o > n_e, \Delta n \approx 0.13$)
- Punktgruppe $3m$
- transparent ab 189 nm
- Phasenanpassung bis 204.8 nm möglich
- hohe Zerstörschwelle

Annahme: plane-wave, fixed-field approximation, d.h. vernachlässigt werden:

- Temperatureffekte
- dispersive Pulsverbreiterung
- Absorption
- ...

Rechnungen

- Phasenanpassungswinkel
- Phasen- und Gruppengeschwindigkeit
- *walk-off* Winkel
- Reflexionsverluste
- Effektive nichtlineare Koeffizienten
- GVD und GDD
- Chirp und Pulsverbreiterung
- Effektive Längen (L_{NL}, \dots)
- *mix acceptance bandwidth*
- Konversionseffizienz
- ...

β -Bariumborat (BBO) I

Einige Eigenschaften von BBO

- negativer uniaxialer Kristall
($n_o > n_e, \Delta n \approx 0.13$)
- Punktgruppe $3m$
- transparent ab 189 nm
- Phasenanpassung bis 204.8 nm möglich
- hohe Zerstörschwelle

Annahme: plane-wave, fixed-field approximation, d.h. vernachlässigt werden:

- Temperatureffekte
- dispersive Pulsverbreiterung
- Absorption
- ...

Rechnungen

- Phasenanpassungswinkel
- Phasen- und Gruppengeschwindigkeit
- *walk-off* Winkel
- Reflexionsverluste
- Effektive nichtlineare Koeffizienten
- GVD und GDD
- Chirp und Pulsverbreiterung
- Effektive Längen (L_{NL}, \dots)
- *mix acceptance bandwidth*
- Konversionseffizienz
- ...

β -Bariumborat (BBO) II

Phasenanpassung

- Typ I^- , d.h. **ooe-Konfiguration**
- kolineare Überlagerung \Rightarrow skalares *matching*, d.h. unabhängig von ϕ

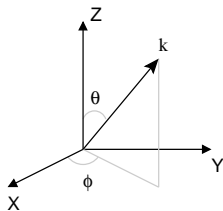
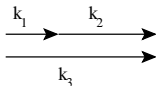
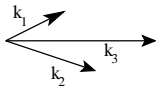
$$k_3^e(\theta) = k_1^o + k_2^o$$

$$\Rightarrow \lambda_3 = \left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} \right)^{-1} = 527.7 \text{ nm}$$

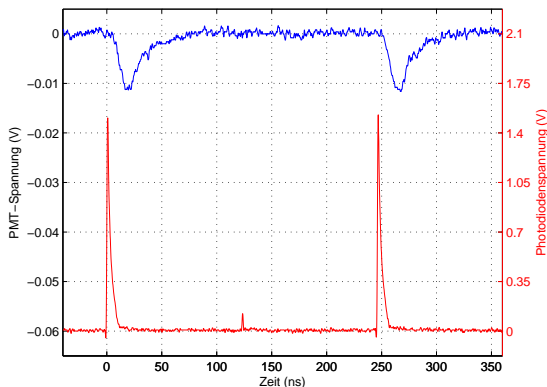
- Phasenanpassungswinkel: $\theta_{\text{pm}}^{\text{ooe}} = 22.2^\circ$
(Ausgangspunkt: Sellmeier-Gleichung)

Einige Vorteile der "ooe"-Konfiguration

- größte Konversionseffizienz
- o-Strahlen keinen *walk-off*, $\rho_{\text{SFG}} = 54.7 \text{ mrad}$
 \Rightarrow räumliche Trennung des Hintergrunds



Erste Beobachtung des Summenfrequenzsignals



SFG-Signal (“vorwärts”),
gemessen mit PMT1:

- $f_{\text{err}} = 40.5 \text{ MHz}$
- $V_{\text{PMT1}} \approx -10 \text{ mV}$
- $V_{\text{PMT1}} \approx -50 \text{ mV}$
- $V_{\text{PMT1}} \approx -45 \text{ mV}$

Reflexion an BBO-Kristall ist
unterdrückbar!

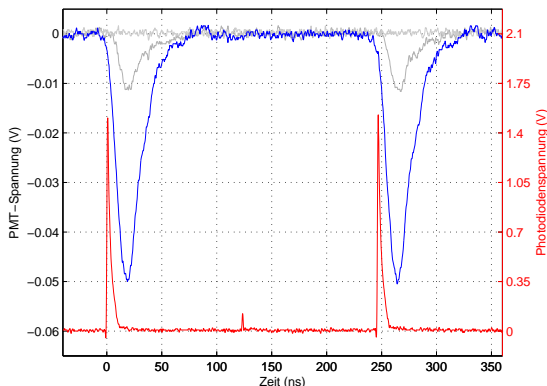
SFG-Signal (“rückwärts”),
gemessen mit PMT2, zum
Zeitpunkt t_0

- $V_{\text{PMT2}} \approx -35 \text{ mV}$

⇒ Summenfrequenzsignal ist messbar

⇒ ... und zwar in beide Richtungen

Erste Beobachtung des Summenfrequenzsignals



SFG-Signal (“vorwärts”),
gemessen mit PMT1:

- $f_{\text{err}} = 40.5 \text{ MHz}$
- $V_{\text{PMT1}} \approx -10 \text{ mV}$
- $V_{\text{PMT1}} \approx -50 \text{ mV}$
- $V_{\text{PMT1}} \approx -45 \text{ mV}$

Reflexion an BBO-Kristall ist
unterdrückbar!

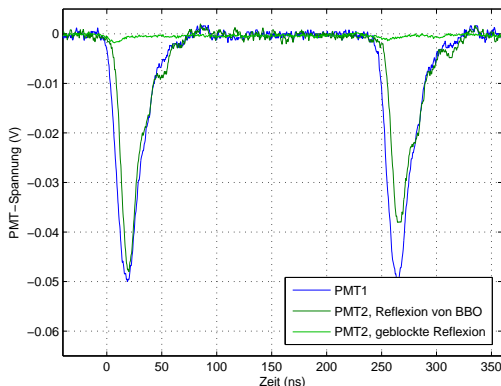
SFG-Signal (“rückwärts”),
gemessen mit PMT2, zum
Zeitpunkt t_0

- $V_{\text{PMT2}} \approx -35 \text{ mV}$

⇒ Summenfrequenzsignal ist messbar

⇒ ... und zwar in beide Richtungen

Erste Beobachtung des Summenfrequenzsignals



⇒ Summenfrequenzsignal ist messbar

⇒ ... und zwar in beide Richtungen

SFG-Signal (“vorwärts”),
gemessen mit PMT1:

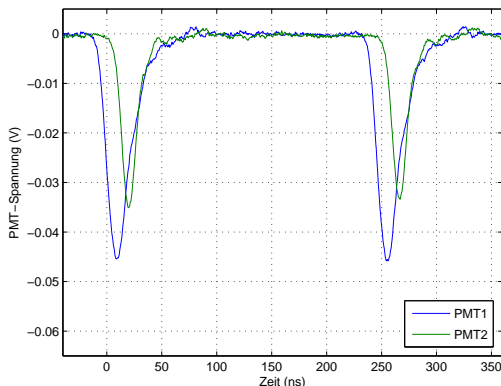
- $f_{\text{err}} = 40.5 \text{ MHz}$
- $V_{\text{PMT1}} \approx -10 \text{ mV}$
- $V_{\text{PMT1}} \approx -50 \text{ mV}$
- $V_{\text{PMT1}} \approx -45 \text{ mV}$

Reflexion an BBO-Kristall ist
unterdrückbar!

SFG-Signal (“rückwärts”),
gemessen mit PMT2, zum
Zeitpunkt t_0

- $V_{\text{PMT2}} \approx -35 \text{ mV}$

Erste Beobachtung des Summenfrequenzsignals



⇒ Summenfrequenzsignal ist messbar

⇒ ... und zwar in beide Richtungen

SFG-Signal (“vorwärts”),
gemessen mit PMT1:

- $f_{\text{err}} = 40.5 \text{ MHz}$
- $V_{\text{PMT1}} \approx -10 \text{ mV}$
- $V_{\text{PMT1}} \approx -50 \text{ mV}$
- $V_{\text{PMT1}} \approx -45 \text{ mV}$

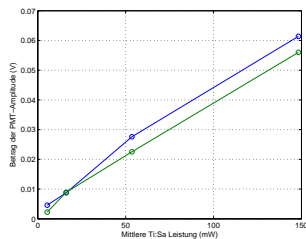
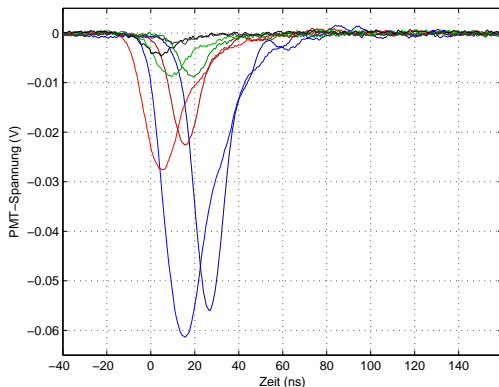
Reflexion an BBO-Kristall ist
unterdrückbar!

SFG-Signal (“rückwärts”),
gemessen mit PMT2, zum
Zeitpunkt t_0

- $V_{\text{PMT2}} \approx -35 \text{ mV}$

Einfluss der Ti:Sa-Laserleistung

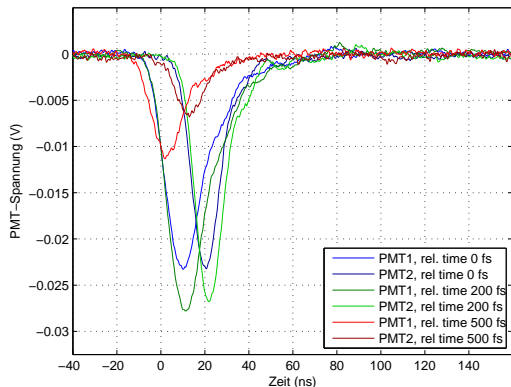
Messung mit **Neutraldichte-Filtern** vor Ti:Sa-Einkopplung



ND-Filter	$\langle P_{\text{Ti:Sa}} \rangle$ [mW]
0	145.8
0.5	49.2
1.0	16.2
1.5	5.1

⇒ geringe Leistung von ≈ 50 mW scheint ausreichend (Anforderung!)

Beobachtung des Fehlersignals



⇒ Der **proof of principle** ist erbracht!

Fehlersignal-Messung

- Variation von Δt zwischen den Pulsen
- Messe Amplitude der SFG-Signale

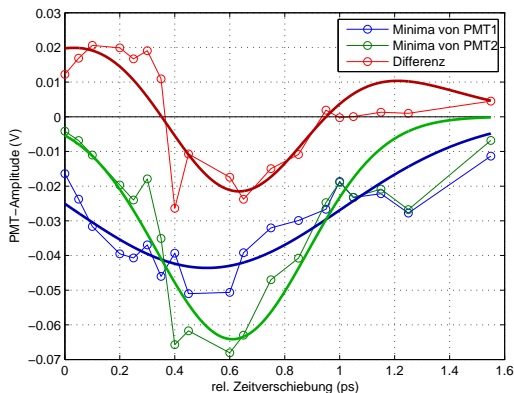
Probleme

- keine automatisierte Messung
- *timing jitter* des *RF lock*

Auswertung

- Gauß-Fit der Amplituden für verschiedene Δt
- Differenzsignal
- Steigung?

Beobachtung des Fehlersignals



⇒ Der **proof of principle** ist erbracht!

Fehlersignal-Messung

- Variation von Δt zwischen den Pulsen
- Messe Amplitude der SFG-Signale

Probleme

- keine automatisierte Messung
- *timing jitter* des *RF lock*

Auswertung

- Gauß-Fit der Amplituden für verschiedene Δt
- Differenzsignal
- Steigung?

Zukunftspläne

Research & Development

- Systematische Studien des SFG- und des Fehlersignals
- Optische Synchronisation der beiden Laser, d.h. automatisierte Messung des Fehlersignals und schließen des *feedback loops*
- Charakterisierung des *timing jitters* mittels zweitem *optical cross correlator* (“*out-of-loop*”-Messung)
- Untersuchungen zur Langzeitstabilität (Driftmessung)

Anwendung am Beschleuniger FLASH

- Aufbau eines *fiber link*-Endpunkts im EOS-Labor
- Optische Synchronisation des Diagnose-Lasers auf den *fiber link*
- Durchführung von Elektro-optischen Messungen und Analyse bzgl. der Zeitauflösung
- Aufbau weiterer *cross correlators* denkbar (Pump-Probe-Lasersystem, sFLASH, Injektor-Laser, ...)

Zukunftspläne

Research & Development

- Systematische Studien des SFG- und des Fehlersignals
- Optische Synchronisation der beiden Laser, d.h. automatisierte Messung des Fehlersignals und schließen des *feedback loops*
- Charakterisierung des *timing jitters* mittels zweitem *optical cross correlator* (“*out-of-loop*”-Messung)
- Untersuchungen zur Langzeitstabilität (Driftmessung)

Anwendung am Beschleuniger FLASH

- Aufbau eines *fiber link*-Endpunkts im EOS-Labor
- Optische Synchronisation des Diagnose-Lasers auf den *fiber link*
- Durchführung von Elektro-optischen Messungen und Analyse bzgl. der Zeitauflösung
- Aufbau weiterer *cross correlators* denkbar (Pump-Probe-Lasersystem, sFLASH, Injektor-Laser, ...)

Zusammenfassung

- Synchronisation zweier Laser-Systeme mit Femtosekunden-Genauigkeit ist nur durch Einsatz von **optical cross-correlators** möglich.
- Der **BBO**-Kristall eignet sich zur effizienten Erzeugung der Summenfrequenz von 800 nm und 1550 nm in Typ I^- -Konfiguration.
- Beobachtung der **SFG-Signale** in beiden Richtungen ist erfolgt.
- Die Aufnahme eines ersten **Fehlersignals** aus einer zeitabhängigen Messung war möglich.
- Einige **technische Probleme** bleiben, speziell der *timing jitter* des *RF lock*.
- Weitere **systematische Studien**, wie z.B. *group delay* und Driftmessungen, sind nötig.
- Ein Vergleich mit **Simulationsrechnungen** steht noch aus.
- Die **Anwendung** am FLASH erscheint jedoch realistisch.

Danksagung

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Vladimir Arsov, Christopher Behrens, Matthias Felber, Shaukat Khan, Florian Löhl, Frank Ludwig, Karl-Heinz Matthiesen, Jörg Rossbach, Holger Schlarb, Bernhard Schmidt, Peter Schmüser, Stephan Wesch, Axel Winter, Johann Zemella



Bibliographie und weiterführendes Material



T. R. Schibli *et.al.*

Attosecond active synchronization of passively mode-locked lasers by balanced cross correlation

Opt. Lett., 28(11):947–949, 2003



K. Kato

Second-Harmonic Generation to 2048 Å in β -BaB₂O₄

IEEE J. Quant. Elec., QE-22 No. 7, 1013–1014, 1986



V. G. Dmitriev, G. G. Gurzadyan, D. N. Nikogosyan

Handbook of Nonlinear Optical Crystals

Springer Verlag - Berlin Heidelberg New York, 3rd Edition, 1999



J. C. Diels, W. Rudolph

Ultrashort Laser Pulse Phenomena

Academic Press, 2nd Edition, 2006



V. Arsov, F. Löhl, H. Schlarb, A. Winter

Private Kommunikation