

**Master-Forschungspraktikum  
Universität Göttingen – Fakultät für Physik**

---

**Ausarbeitung  
zum Versuch FM.ULP**

**Spatial and Temporal Distortion of Ultrashort  
Light Pulses**

Name: Eric Bertok  
Email: eric.bertok@stud.uni-goettingen.de  
Datum Versuchsdurchführung: 22. November 2017  
Name Betreuer(in): Dr. Sabine Steil  
Kopie der testierten Ausarbeitung gewünscht: ☐ ja ☒ nein  
Unterschrift:

**Abgabe**

Datum: Unterschrift Betreuer(in):

**Testat**

Datum: Name Prüfer(in):  
Punktezahl: Unterschrift:  
Note:



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>1</b>
2.1	Grundlagen . . . . .	1
2.2	Instantane Frequenz und Chirp . . . . .	1
2.3	Gaußpuls und Bandprodukt . . . . .	2
2.4	Dispersion im Medium . . . . .	2
<b>3</b>	<b>Experimentelle Methoden und Messgrößen</b>	<b>3</b>
3.1	Spatial chirp . . . . .	3
3.2	Pulse front tilt . . . . .	3
3.3	Prismenkompessor . . . . .	3
3.4	Grenouille . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Durchführung</b>	<b>5</b>
4.1	Aufbau . . . . .	5
4.2	Sicherheitshinweise . . . . .	5
4.3	Durchführung . . . . .	5
<b>5</b>	<b>Auswertung</b>	<b>6</b>
5.1	Prismenkompessor . . . . .	6
5.2	Glasfenster . . . . .	7
5.3	Spatial Chirp und Pulse Front Tilt . . . . .	7
5.4	Langpassfilter . . . . .	9
5.5	Dielektrische Spiegel . . . . .	9
5.6	Rechteckiges Spiegelpaar . . . . .	12
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>12</b>

# 1 Einleitung

## 2 Theorie

### 2.1 Grundlagen

Zur Beschreibung Ultrakurzer Laserpulse verwendet man einen semiklassischen Ansatz, bei dem die Maxwell-Gleichungen für eine makroskopische Polarisierung gelöst wird. Im Folgenden wird das Vektorfeld des elektrischen Feldes  $\vec{E}$  durch einen Skalar  $E$  genähert [Diels]. Hiermit wird eine für das Experiment relevante Polarisationsrichtung beachtet. Im Allgemeinen sind auch Effekte möglich, bei denen verschiedene Polarisationsrichtungen miteinander koppeln, was eine genauere Betrachtung erfordert. Ausgehend von dem elektrischen Feld  $E(t)$  definiert man mithilfe der Fourier Transformation das komplexe Spektrum  $\tilde{E}(\omega) = \mathcal{F}[E(t)] = \int_{\mathbb{R}} E(t)e^{-i\omega t}dt$ . Die Rücktransformation ergibt sich zu  $E(t) = \mathcal{F}^{-1}[\tilde{E}(\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{\mathbb{R}} \tilde{E}(\omega)e^{i\omega t}d\omega$ . Dies funktioniert aufgrund der Linearität der Maxwell-Gleichungen. Die Lösung kann somit in eine Superposition von ebenen Wellen zerlegt werden. Hier ist  $\omega$  die Kreisfrequenz der ebenen Welle. Nach konvention wird häufig nur der positive Anteil des Spektrums betrachtet. Er hat aufgrund der Reellwertigkeit von  $E$  den vollen Informationsgehalt [Diels]. Bei der Fourier-Rücktransformation integriert man so nur über alle positiven  $\omega$  [Diels]. Ein Puls wird nun beschrieben durch [Trebino lec]

$$E(t) = \frac{1}{2} \sqrt{I(t)} \exp(i[\omega_0 t - \Phi(t)]), \quad (2.1)$$

wobei  $\omega_0$  die sog. Trägerfrequenz und  $\phi(t)$  eine allgemeine Phase in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  ist. Die Trägerfrequenz ist der oszillatorische Anteil des Pulses innerhalb der Einhüllenden  $\sqrt{I(t)}$  und wird häufig in eine komplexe Einhüllende  $E_0$  integriert. Die Phase  $\phi(t)$  beschreibt die zeitliche Veränderung der Farbe des Pulses.  $I(t) = |E(t)|^2$  ist die Intensität des Pulses. Ist  $I$  eine stark gepeakte Funktion, so redet man von einem "ultrakurzen Puls". Analog kann man durch  $S = |\tilde{E}(\omega)|^2$  die spektrale Intensität einführen. Somit gilt  $\tilde{E}(\omega) = \sqrt{S(\omega)} \exp(-i\varphi(\omega))$ , wobei  $\varphi(\omega)$  die spektrale Phase ist. Diese ist zentrale Größe bei der Beschreibung von gechirpten Pulsen (siehe unten). Die Beschreibung des Spektrums ist auch mithilfe der Wellenlänge  $\lambda$  möglich. Die Umrechnung ergibt sich zu [Trebino lec]:

$$S_\lambda(\lambda) = S_\omega \left( \frac{2\pi c}{\lambda^2} \right) \frac{2\pi c}{\lambda^2}. \quad (2.2)$$

### 2.2 Instantane Frequenz und Chirp

Die instantane Frequenz eines ultrakurzen Pulses ist definiert als [trebino lec]

$$\omega_{\text{inst}} = \omega_0 - \frac{d\phi}{dt}, \quad (2.3)$$

mit der Phase  $\phi$  und der Trägerfrequenz  $\omega_0$ . Man kann nun sowohl die Phase, als auch die spektrale Phase taylor-entwickeln:

$$\phi(t) = \phi_0 + \underbrace{\frac{d\phi}{dt}|_{t=0}}_{\phi_1} t + \underbrace{\frac{d^2\phi}{dt^2}|_{t=0}}_{\phi_2} \frac{t^2}{2} + \dots, \quad (2.4)$$

$$\varphi(\omega) = \varphi_0 + \underbrace{\frac{d\varphi}{d\omega}|_{\omega=\omega_0}}_{\varphi_1} (\omega - \omega_0) + \underbrace{\frac{d^2\varphi}{d\omega^2}|_{\omega=\omega_0}}_{\varphi_2} \frac{(\omega - \omega_0)^2}{2} + \dots. \quad (2.5)$$

Hier ist  $\varphi_1 = \frac{d\varphi}{d\omega}|_{\omega=\omega_0}$  der sogenannte "group delay" (GD) und  $\varphi_2 = \frac{d^2\varphi}{d\omega^2}|_{\omega=\omega_0}$  die "group delay dispersion" (GDD). Hieraus ist zu sehen: Eine nichtverschwindendes  $\phi_1$  erzeugt nach Gleichung (2.3) einen konstanten offset in der instantanen Frequenz. Dies resultiert nach dem Fourier shift theorem [CITE] zu einer Verschiebung im Spektrum. Andersherum erzeugt ein nicht verschwindender GD einen offset in der temporalen Intensität. Dies ist zur bestimmung von Pulsängen irrelevant. Ist jedoch  $\varphi_2$  ungleich Null, so kommt es zur Dispersion: Die Gruppengeschwindigkeit ändert sich für verschiedene Frequenzen unterschiedlich und der Puls verläuft. Einen solchen Puls nennt man (linear) gechirpt. Analoges passiert bei einem nichtverschwindenden  $\phi_2$ . Die instantane Frequenz ändert sich hier linear mit der Zeit.

## 2.3 Gaußpuls und Bandprodukt

Die am einfachsten zu handhabende Pulsform ist die eines Gaußpulses: [DIELS]

$$E(t) = E_0 \exp \left[ -2 \ln 2 \left( \frac{t}{\tau_{\text{FWHM}}} \right)^2 \right]. \quad (2.6)$$

$\tau_{\text{FWHM}}$  bezeichnet die “full-width half maximum”, also die Halbwertsbreite des Pulses, welche eine von vielen Definitionen zur Beschreibung der Puls- oder Spektralbreite ist. Sie ist definiert als die Breite an der Halben Pulshöhe. Im Folgenden wird stets  $\tau \equiv \tau_{\text{FWHM}}$  gesetzt. Der Gaußpuls ist neben seiner einfachen Handhabbarkeit auch eine der am häufigsten auftretenden Pulsformen.

Da (Kreis-) Frequenz und Zeit konjugierte Variablen einer Fourier Transformation sind, gilt für sie die Unschärferelation, genannt “Zeit-Bandbreiteprodukt”: [Diels]

$$\langle \omega^2 \rangle \langle t^2 \rangle \geq \frac{M^4}{4} \kappa_c, \quad (2.7)$$

wobei  $\langle \Delta \omega^2 \rangle$  bzw.  $\langle \Delta t^2 \rangle$  die Pulsbreite bzw. die Bandbreite -berechnet durch das zweite Moment [Diels]- bezeichnet.  $M$  ist ein Formfaktor, der die Abweichung zum idealen Gaußpuls bezeichnet [CITE].  $\kappa_c$  ist der Chirpfaktor, welcher angibt, dass bei gec chirpten Pulsen das Zeit-Bandbreiteprodukt größer ist, als für ungechirpte Pulse. Einen ungechirpten Puls bezeichnet man demnach auch als “Fourier-limitiert”. Fourier-limitierte Pulse sind also für eine konstante Bandbreite stets am kürzesten. Die Umrechnung von den zweiten Momenten zur Halbwertsbreite ist für Gaußpulse einfach über die Varianz einer Gaußverteilung zu berechnen. Es gilt  $\tau = 2\sqrt{2 \ln 2} \langle t^2 \rangle$ . Aus Gleichung (2.7) mit  $M = 1$  und  $\kappa_c = 1$  lässt sich ebenfalls  $\langle \omega^2 \rangle = \frac{1}{4 \langle t^2 \rangle}$  durch die Halbwertsbreite ausdrücken. Ausgedrückt durch die reguläre Frequenz  $\nu$  erhält man

$$\Delta \nu \Delta t = 0.441. \quad (2.8)$$

## 2.4 Dispersion im Medium

Bewegt sich ein Lichtpuls durch ein Medium, so wird eine Transferfunktion im Frequenzbild zum elektrischen Feld multipliziert [trebino lec]:  $\tilde{E}_{\text{out}}(\omega) = \tilde{E}_{\text{in}}(\omega) \exp(-\alpha(\omega)L) \exp(-in(\omega)k_0L)$ . Hier beschreibt  $\alpha$  die Absorption, welche in diesem Versuch ignoriert wird.  $n(\omega)$  ist der Brechungsindex des Materials in Abhängigkeit von der Frequenz,  $k_0$  ist die Wellenzahl bei der Trägerfrequenz und  $L$  ist die Länge des Materials. Relevant für die Verbreiterung von Pulslängen ist die Modulation der spektralen Phase. Aufgrund der Form der Transferfunktion wird diese direkt hinzuaddiert [trebino]:

$$\varphi_{\text{out}}(\omega) = \varphi_{\text{in}} + n(\omega)k_0L. \quad (2.9)$$

Eine Taylornäherung des Wellenvektors  $k(\omega) = n(\omega)k_0$  ergibt analog zu Gleichung (2.5) die sog. “group velocity dispersion” (GVD): [TREBINO]

$$\text{GVD} = k''(\omega_0) = \frac{1}{2} \frac{\lambda_0^3}{2\pi c_0^2} \frac{d^2 n}{d\lambda^2}, \quad (2.10)$$

mit der Trägerwellenlänge  $\lambda_0$  und der Lichtgeschwindigkeit  $c_0$ . Es gilt  $\text{GDD} = \text{GVD} L$ . Der wellenlängenabhängige Brechungsindex berechnet sich aus der Sellmeier Gleichung [CITE refr.]:

$$n^2(\lambda) = \frac{B_1 \lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2 \lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3 \lambda^2}{\lambda^2 - C_3}, \quad (2.11)$$

mit materialspezifischen numerischen Konstanten  $B_i, C_i$ , die z.B. in [3] aufgelistet sind.

Für die Veränderung der Pulsbreite in Abhängigkeit der GDD gilt folgende Beziehung, die in dieser Version durch Wigner-Distributionen [DIELS] hergeleitet wird:

$$\langle t^2 \rangle = \langle t_0^2 \rangle + \left[ \frac{d^2 \varphi}{d\omega^2} \Big|_0 \right]^2 \langle \omega^2 \rangle, \quad (2.12)$$

der Chirp, den der Puls erfährt berechnet sich also durch “GDD  $\times$  Bandbreite”. Aus den Umrechnungsregeln in Abschnitt 2.3 kann man somit den Effekt von einer group velocity dispersion auf einen Puls mit gegebener Bandbreite berechnen.

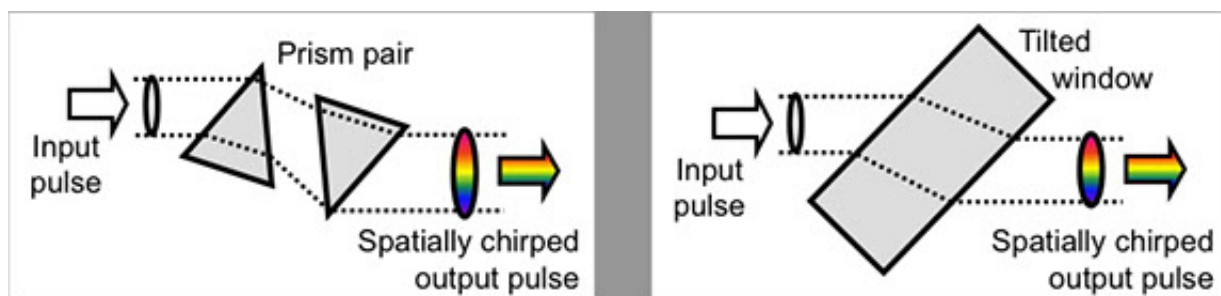


Abb. 1: Spatial chirp verursacht durch einen Prismenkompressor (links) und ein schiefes Glas (rechts) [5]

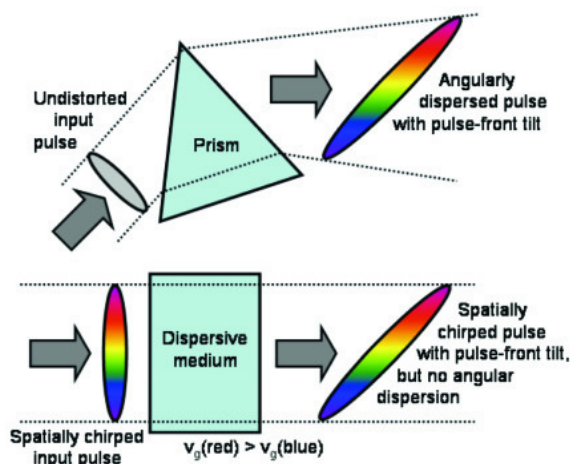


Abb. 2: Pulse front tilt verursacht durch Winkeldispersion (oben) und räumlichen Chirp (unten) [6].

## 3 Experimentelle Methoden und Messgrößen

### 3.1 Spatial chirp

Im Vergleich zu ebenen Wellen (continuous waves, cw's) bestehen ultrakurze Pulse aus sehr vielen Frequenzen: Sie haben eine hohe Bandbreite. Dies folgt unmittelbar aus dem Fourierzusammenhang zwischen Bandbreite und Pulslänge, dem Bandprodukt aus Gleichung (2.7). Aufgrund dieser hohen Bandbreite sind ultrakurze Laserpulse sehr viel anfälliger gegenüber Verzerrungen in der Zeit (temporaler Chirp) und im Raum, da Dispersion stets durch einen veränderlichen Brechungsindex in Abhängigkeit der verschiedenen Wellenlängen auftritt. Zeitliche Verzerrungen sorgen für eine Pulsverbreiterung nach Gleichung (2.7). Ein analoger Effekt tritt auch räumlich ein: Es kommt zu einem räumlichen Chirp, wenn verschiedene Wellenlängen einen unterschiedlichen Weg durch das Medium nehmen, wie zum Beispiel in einem Prismenkompressor (s.u.). Anstatt zu verschiedenen Zeiten findet man hier die Farben des Pulses an verschiedenen Orten, der Puls wird räumlich aufgefächert. Dieser Effekt tritt durch Winkeldispersion, wie im Prismenkompressor, aber auch in einem schrägen Glas ein, was in Abb. 1 aufgezeigt ist.

### 3.2 Pulse front tilt

Eine weitere räumliche Verzerrung ist der sog. Pulse front tilt. Er gibt an, um wie viel die Pulsfront eines Laserpulses gegenüber der optischen Achse geneigt ist. Er wird hervorgerufen durch Winkeldispersion oder auch durch das Durchqueren eines räumlich gechirpten Pulses durch ein lineares Medium (Abb. 2).

### 3.3 Prismenkompressor

Mithilfe des Prismenkompressors (PC) kann ein gechirpter Puls wieder zu einem (nahezu) fourierlimitierten Puls komprimiert werden. Der Aufbau des Prismenkompressors ist in Abb. 3 zu sehen. Der Puls durchquert zwei Pris-

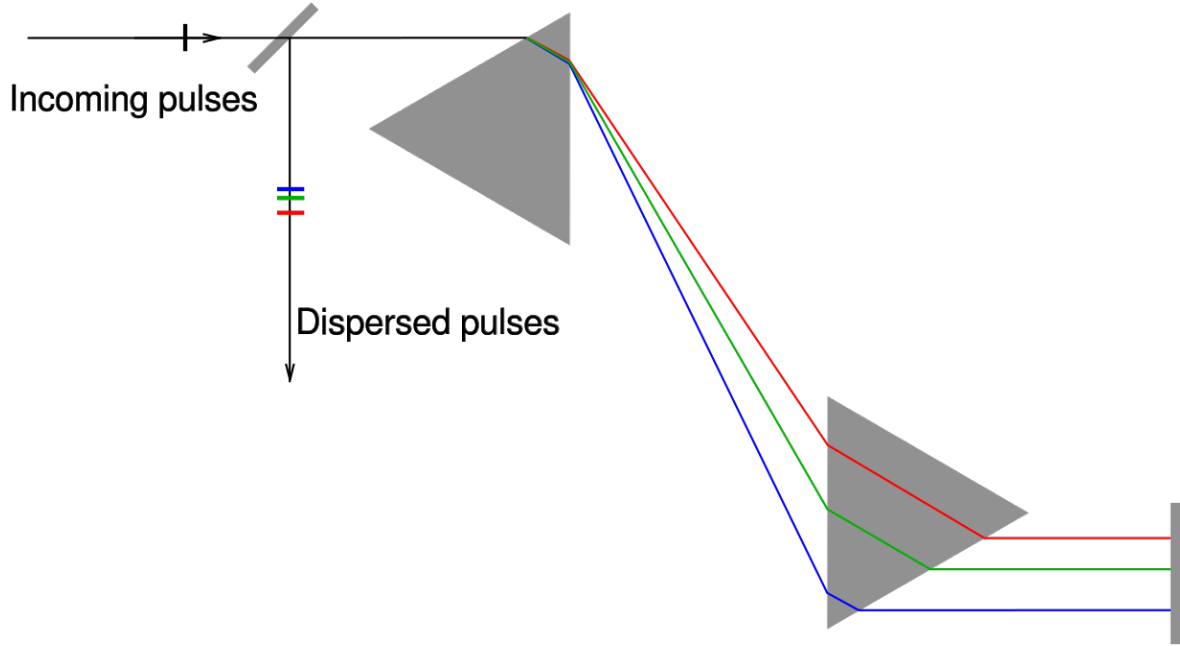


Abb. 3: Schematischer Aufbau eines Prismenkompressors. Ein ungechirpter Puls tritt ein und wird temporal gechirpt, da unterschiedliche Wellenlängen andere Propagationspfade nehmen. Bei entgegengesetztem Durchgang wird ersichtlich: Ein gechirpter Puls wird durch einen Prismenkompressor bei richtiger Einstellung ungechirpt, "komprimiert". Die Insertion ist definiert als der Abstand des Eintrittspunktes der zentralen Wellenlänge (hier grün) und der Spitze des zweiten Prismas .[2]

men, die entgegengesetzt parallel zueinander aufgestellt sind. Dabei sind sie so positioniert, dass der Puls beim ersten Prisma gerade durch die Spitze durchquert. Nach Snell's Gesetz verlassen die unterschiedlichen Wellenlängen das erste Prisma in unterschiedlichen Winkeln. Dadurch durchqueren sie unterschiedlich lange Strecken im zweiten Prisma. Durch die spezielle Positionierung verlassen alle Wellenlängen das zweite Prisma wieder parallel, aber mit einem räumlichen Chirp. Um diesen auszugleichen wird der Strahl an einem Spiegel zurückreflektiert und nimmt somit den gleichen Weg erneut durch den Prismenkompressor. Durch die unterschiedlichen Weglängen der verschiedenen Frequenzen kann bei richtiger Positionierung des zweiten Prismas die Group Delay Dispersion negativ werden, wodurch ein gechirpter Puls entchirpt werden kann. Für die GDD des Prismenkompressors gilt: [DIELS]

$$\frac{d^2\varphi}{d\omega^2}|_{\omega_0} = 2 \frac{\lambda_0^2}{2\pi c_0^2} \left[ L_g \frac{d^2n}{d\lambda^2}|_{\lambda_0} - \left( 4L + \frac{L_g}{n(\lambda_0)^3} \right) \left( \frac{dn}{d\lambda}|_{\lambda_0} \right)^2 \right], \quad (3.1)$$

wobei  $\lambda_0$  die Trägerwellenlänge,  $L_g$  die Weglänge im Glas für die Trägerwellenlänge und  $L$  der Abstand der Spitzen der beiden Prismen ist. Für symmetrisch positionierte Prismen in Brewsterwinkelkonfiguration gilt  $L_g = 2I \frac{1}{\sqrt{1+n(\lambda_0)^2}}$  mit dem Einschub (insertion) des zweiten Prismas  $I$ , welcher im Experiment mit der Millimeterschraube direkt eingestellt wird.

### 3.4 Grenouille

Um einen zeitlichen Prozess zu messen, benötigt man einen zweiten kürzeren Prozess, um den ersten auflösen zu können. Da ultrakurze Pulse einige Femtosekunden lang sind, während die Elektronik auf der Nanosekenskala agiert, ist es demnach für solche besonders schwer, die Pulslänge zu messen. Es gibt verschiedene Methoden: Ein erste Ansatz ist es, mithilfe eines Michelson-Interferometers die Autokorrelation  $A(\tau) = \int E(t)E^*(t - \tau)dt$  zu bestimmen. Aus der gemessenen Intensität lässt sich die grobe Pulsstruktur rekonstruieren. Autokorrelationsmethoden haben allerdings viele Probleme, wie die Unterschätzung der Pulslänge durch sog. kohärente Artefakte [4]. Zusätzlich ist es unmöglich, die Phase eines ultrakurzen Pulses mithilfe dieser Methoden zu messen.

GRENOUILLE (Grating-eliminated No-nonsense Observation Of Ultrafast Incident Laser Light E Fields) behebt alle Probleme von Autokorrelationsmethoden und liefert zusätzliche Informationen über den Puls: Es basiert auf dem "Frequency Resolved Optical Gating" (FROG) [CITE FROG], bei dem die spektrale Intensität gegenüber der zeitlichen Verzögerung des Auftreffens auf den Detektor, der sogenannte Frog trace gemessen wird. Aus diesem wird mithilfe eines Algorithmus die Pulsdauer, die Bandbreite sowie die Phase und die spektrale Phase rekonstruiert. Bei GRENOUILLE wird ein vereinfachter Aufbau, bestehend aus einem Fresnelschen Biprisma und einem second-harmonic generation (SHG) Kristall verwendet. Der Aufbau und die Funktionsweise ist in ?? zu sehen. Der breite SHG Kristall fächert die unterschiedlichen Wellenlängen entlang einer Dimension auf, während das Fresnelsche Biprisma in der anderen Dimension den Puls teilt und mit unterschiedlicher Verzögerung mit sich selbst interferieren lässt. Dadurch entsteht der Frog trace, welcher den Puls überestimiert. Somit lassen sich alle relevanten Informationen eines ultrakurzen Pulses rekonstruieren [CITE]. Insbesondere liefert die spektrale Phase den Chirp des Pulses. Es ist jedoch darauf zu achten, dass die Methode symmetrisch gegenüber der Zeitrichtung ist und deswegen der Vorzeichen des Chirps nicht bestimmt wird. Zusätzlich werden automatisch der pulse front tilt, sowie der räumliche Chirp gemessen. Sie spiegeln sich im Frog trace jeweils als Verschiebung auf der Verzögerungsachse und als Scherung des Traces wider.

## 4 Durchführung

### 4.1 Aufbau

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 4 zu sehen. Die verwendete Laserquelle ist ein Spectra Physics Tsunami mit einer zentralen Wellenlänge von 800 nm, einer durchschnittsleistung von 400 mW, einer Pulsrate von 76 MHz und einer Pulsdauer von 22 fs bei einer Bandbreite von 58 nm. Der Strahl durchquert zunächst einer  $\lambda/2$  Platte und wird p-polarisiert. Anschließend durchquert er den Prismenkompressor. Der Abstand der Prismen von Spitze zu Spitze wurde gemessen und beträgt  $43,2 \pm 0.3$  cm. Der Prismeneinschub wird direkt über eine Millimeterschraube variiert. Dem Laser stehen nun drei mögliche Strahlengänge zur Verfügung, welche jeweils mit Klappspiegeln eingestellt werden können. Pfad 1 besteht aus metallischen Spiegeln und einer optischen Bank, auf die verschiedene Glasfenster aus BK7 oder MgF2, sowie ein Glasspat und ein Langpass Filter geschraubt werden können. Pfad 2 besteht aus dielektrischen Spiegeln. Auf Pfad 3 durchquert der Strahl ein Spiegelpaar mit jeweils 5 Reflektionen. Es handelt sich hierbei um gechirpte Spiegel, was die spätere Auswertung zeigt. Alle drei Pfade enden in dem Messinstrument, einem Swamp Optics Grenouille (Modell 8-20-USB). Zur Justage der Strahlengänge stehen diverse Justagespiegel, Infrarot-Irisblenden und Infrarotkarten bereit.

### 4.2 Sicherheitshinweise

Da es sich bei dem verwendeten Laser um einen der Klasse 4 handelt, sind zunächst einige Sicherheitshinweise zu beachten: Es müssen stets geeignete Laserschutzbrillen getragen werden. Alle reflektierenden Objekte müssen vor dem Versuch abgelegt werden. Es sollte auch trotz der Schutzbrillen niemals direkt in den Laserstrahl geschaut werden. Ebenso sollte vermieden werden, mit der Hand direkt in den Strahlengang zu fassen. Es ist besonders wichtig, dass stets der gesamte Strahlengang des Lasers bekannt ist, bevor dieser zur Propagation freigegeben wird. Deswegen müssen bei der Justage stets zwei Infrarotkarten und gegebenenfalls weitere Beamdumps benutzt werden, um den Strahlengang nach und nach durch die hinzugefügten optischen Elemente zu leiten. Niemals darf ein optisches Element ohne Blockieren des Lasers in den Strahlengang gestellt werden, da unerwartete Reflexe auftreten können.

### 4.3 Durchführung

Zunächst wird der Prismenkompressor ohne zusätzliche optische Elemente vermessen und somit auch seine optimale Position bestimmt. Dazu wird der Laser mithilfe der Irisblenden und den Justagespiegeln auf Strahlengang 1 justiert. Bei dieser und jeder anderen Messung muss der Laser zunächst mithilfe des space-Modus der Analysesoftware der Strahl in den Grenouille zentriert werden. Dies geschieht wieder mit Justagespiegeln und zwei Irisblenden. Wichtig ist, dass der erste Spiegel den Strahl auf die erste Irisblende ausrichtet, während der zweite Spiegel für die zweite Blende verwendet wird ("beam walking"). Anschließend kann die Software auf den time-mode gestellt werden um die Echtzeitdaten des Lasers zu sehen. Hierbei ist auf ausreichende, aber nicht zu große Intensität des auftreffenden Strahles zu achten, welche über die zweite  $\lambda/2$  Platte unmittelbar vorm Analysator eingestellt werden kann.



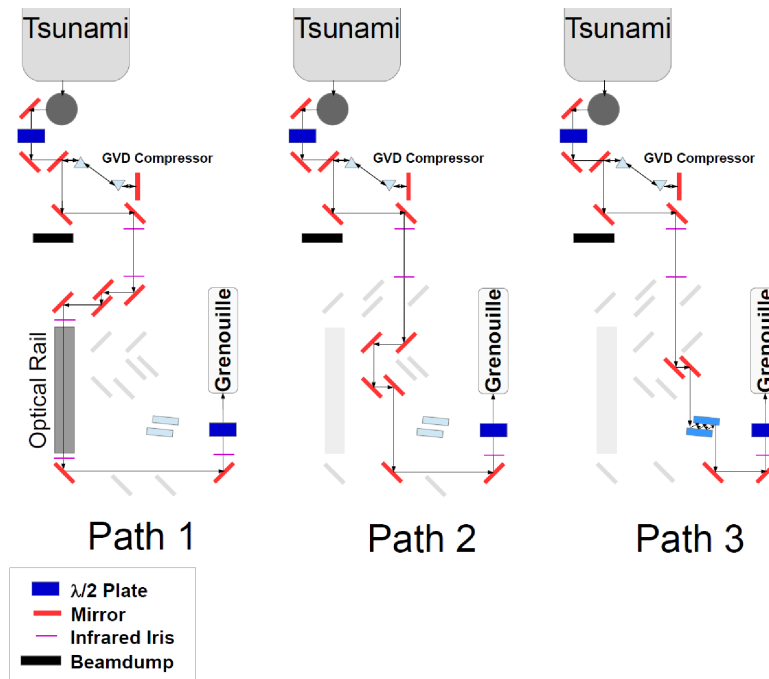


Abb. 4: Versuchsaufbau. Der Laser passiert zunächst eine  $\lambda/2$  Platte, anschließend den Prismenkompressor und geht dann entlang einen von drei möglichen Strahlengängen mit unterschiedlichen optischen Komponenten. Nach einer zweiten  $\lambda/2$  Platte endet der Strahl im Grenouille Analysator [1].

Um die optimale Kompressorposition zu bestimmen, wird der Einschub über die Millimeterschraube solange variiert, bis die gemessene Pulslänge (temporal FWHM) minimal ist. Da der Laser bereits mit etwas Chirp aus der Quelle kommt, wird somit garantiert, dass der komprimierte Puls die kürzeste Dauer und somit (näherungsweise) gaußförmig und ungechirpt ist (siehe Auswertung). Dies ist der Ausgangspunkt von allen anderen Messungen. Die Daten werden gespeichert und die Prismenkonfiguration notiert. Anschließend werden weitere Daten für unterschiedliche Prismenpositionen ermittelt.

Nun werden Daten mit verschiedenen optischen Elementen, wie unterschiedlich dicken Gläsern aus BK7 und MgF2, sowie einem Glasspat und einem Langpassfilter auf der optischen Bank aufgenommen. Bei jedem optischen Element muss der Strahl erneut in den Grenouille zentriert werden. Bei jeder Messung wird zunächst die Messung bei optimaler Kompressorposition durchgeführt. Anschließend wird versucht, die Pulsverbreiterungen mit dem Kompressor zu kompensieren, indem wieder die Pulslänge minimiert wird. Die Prismenpositionen werden erneut aufgeschrieben. Anschließend wird der Laser auf Strahlengang 2 justiert und es werden bei optimaler Prismeneinstellung Daten für die dielektrischen Spiegel gespeichert und erneut wird versucht die Verzerrungen zu kompensieren. Als nächstes wird der Strahlengang 3 justiert und der Effekt der Spiegelpaare wird bei optimaler Prismenposition aufgenommen und versucht zu kompensieren. Nun wird die Bandbreite des Lasers verändert und die Messungen des Prismenkompressors und der der Glasfenster werden wiederholt. Es wurde versäumt, für die zweite Bandbreite eine neue optimale Prismenposition zu bestimmen.

## 5 Auswertung

### 5.1 Prismenkompressor

Zunächst wird die Vermessung des Prismenkompressors analysiert. Dafür werden für unterschiedlichen Einschub des zweiten Prismas gemessenen zeitlichen Pulsintensitäten sowie das Spektrum verglichen. Um die Insertion  $I$  des Prismas zu bestimmen, wurde der Wert der Millimeterschraube bei der optimalen Einstellung mit minimaler Pulsdauer ("opt") von jenem abgezogen, bei welchem die Bandbreite aufgrund des Abschneidens des Lasers durch Verfehlen des zweiten Prismas geringer wurde. Dies ist jedoch eine grobe Abschätzung, da der genaue Zeitpunkt des Verfehlens aufgrund des endlichen Laserdurchmessers willkürlich war. Die Idee ist, dass das Abschneiden ei-

$a$	$b$	$\chi^2$	$a$	$b$	$\chi^2$
$0.001507 \pm 0.000014$	$-0.001793 \pm 0.000054$	$2e - 6$	$0.000727 \pm 0.000021$	$793.88 \pm 0.60$	$0.003$
$0.000555 \pm 0.000003$	$1.612 \pm 0.034$	$2e - 6$	$0.001815 \pm 0.000046$	$797.81 \pm 0.11$	$1e - 4$

Tab. 1: Ergebnisse der quadratischen Fits für die Phase und die spektrale Phase der optimalen Prismenkonfiguration.

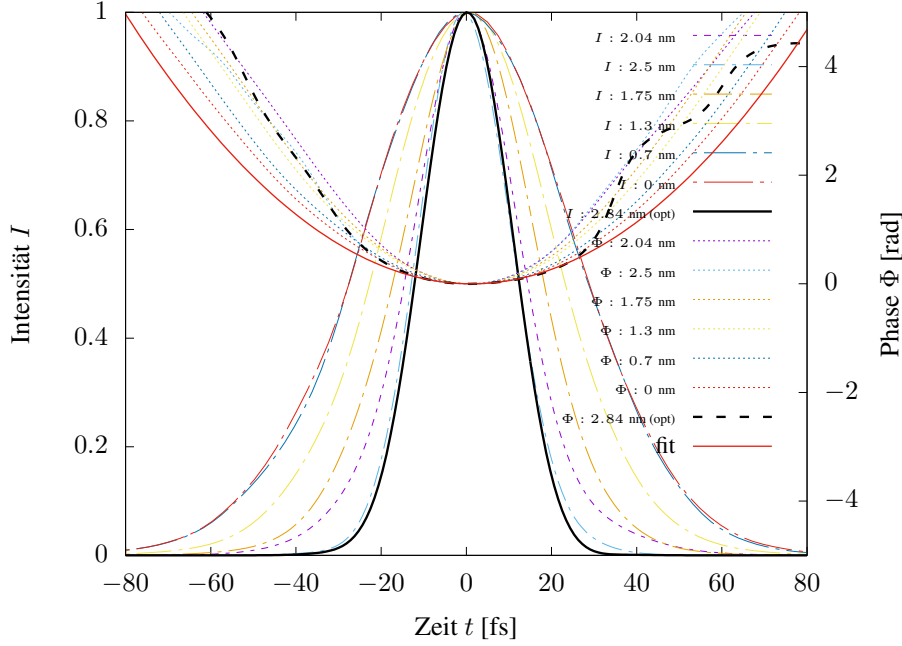


Abb. 5: blah

ner Insertion von 0 mm bedeutet. Die gemessene zeitliche Pulsintensität der ersten Laserausgangsbandbreite ist in Abb. 5 in Abhängigkeit von der Insertion  $I$  aufgetragen. Ebenso eingetragen sind die gemessenen Phasen  $\Phi$ . Es ist zu beachten, dass es sich hier um den Absolutbetrag der Phase handelt, da das Vorzeichen aufgrund der Zeitumkehrsymmetrie von Grenouille keine Bedeutung hat. Um den linearen Chirp, also den Term zweiter Ordnung in Gleichung (2.5) zu bestimmen, wird um das Phasenmaximum bei optimale Prismeneinstellung eine Funktion mit Ansatz  $\frac{1}{2}ax^2 + bx$  gefittet. Der Term  $a$  ist nach Gleichung (2.5) die zweite Ableitung der Phase nach der Zeit und gibt somit den zeitlichen Chirp an. Der Term  $b$  gibt an, um wie viel sich das Spektrum verschiebt. In Abb. 6 ist das vermessene Spektrum, sowie die spektralen Phasen der ersten laserbandbreite für verschiedene  $I$  aufgetragen. Wie bei den zeitlichen Intensitäten wird auch hier die Phase für die optimale Einstellung mit einem quadratischen Polynom gefittet. Der quadratische Term ist der lineare Chirp, welcher für eine Pulsverbreiterung im Zeitraum verantwortlich ist. Gleiches wird ebenfalls für die zweite Ausgangsbandbreite von  $\langle \omega^2 \rangle = ???$  berechnet. Die Intensität und das Spektrum mit Phasen ist jeweils in Abb. 7 und Abb. 8 aufgetragen. Es wurde versäumt, für diese zweite Bandbreite eine neue optimale Prismenkompressorposition zu bestimmen, demnach ist mit "opt" hier weiterhin die optimale Position der ersten Bandbreite bezeichnet. Die Ergebnisse der Regressionen sind in Tabelle Tabelle 1 zusammengefasst.

## 5.2 Glasfenster

### 5.3 Spatial Chirp und Pulse Front Tilt

Der räumliche Chirp, welcher von der Quick-Frog Software gemessen wurde, ist zusammen mit dem Puls Front tilt in Tabelle 2 aufgetragen. Für die Messung ohne optische Elemente wurden ebenfalls beide Werte zum Vergleich eingetragen. Da von jedem Element höchstens zwei Datenpunkte vorhanden sind, wurde auf einen Plot verzichtet. Man sieht, dass auch ohne optisches Element sowohl der PFT als auch der räumliche Chirp nicht null sind. Deswegen ist in Abb. 9 beides für verschiedene Prismeneinschübe, aber ohne optisches Element aufgetragen. Man erkennt, dass der räumliche Chirp mit steigendem Prismeneinschub geringer wird, während der PFT wächst. Fehler wurden von

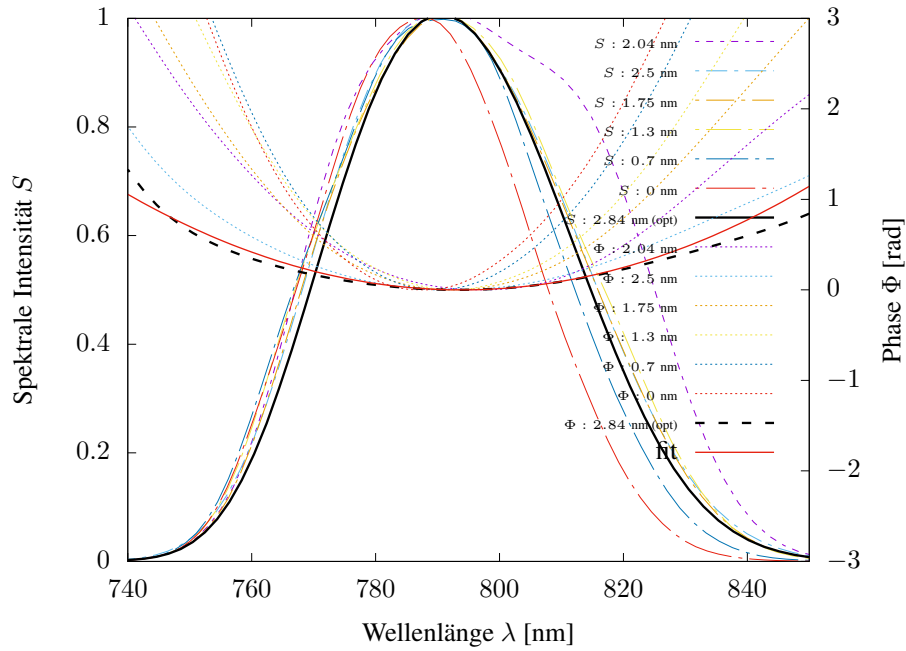


Abb. 6: blah

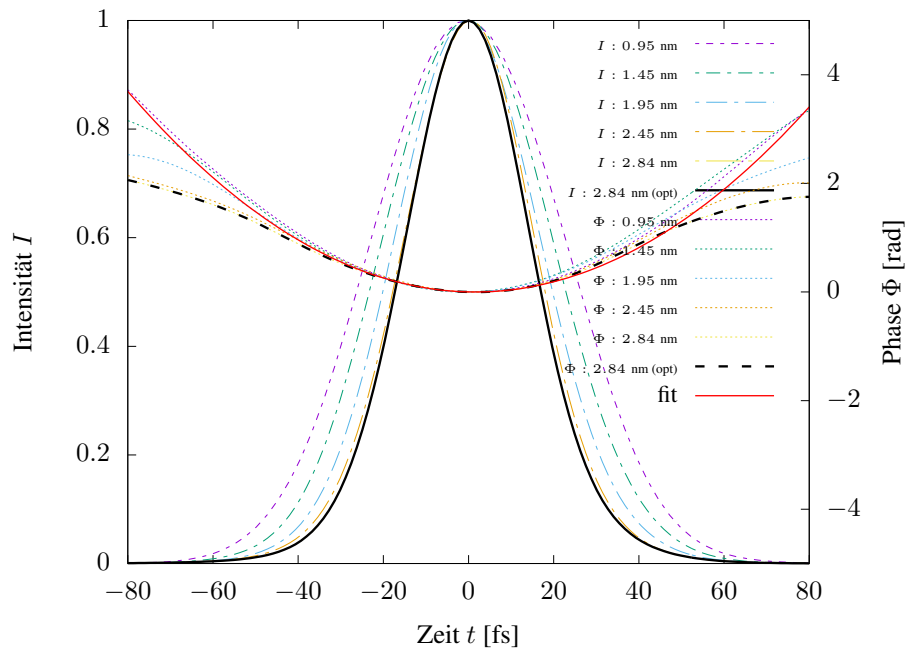


Abb. 7: blah2

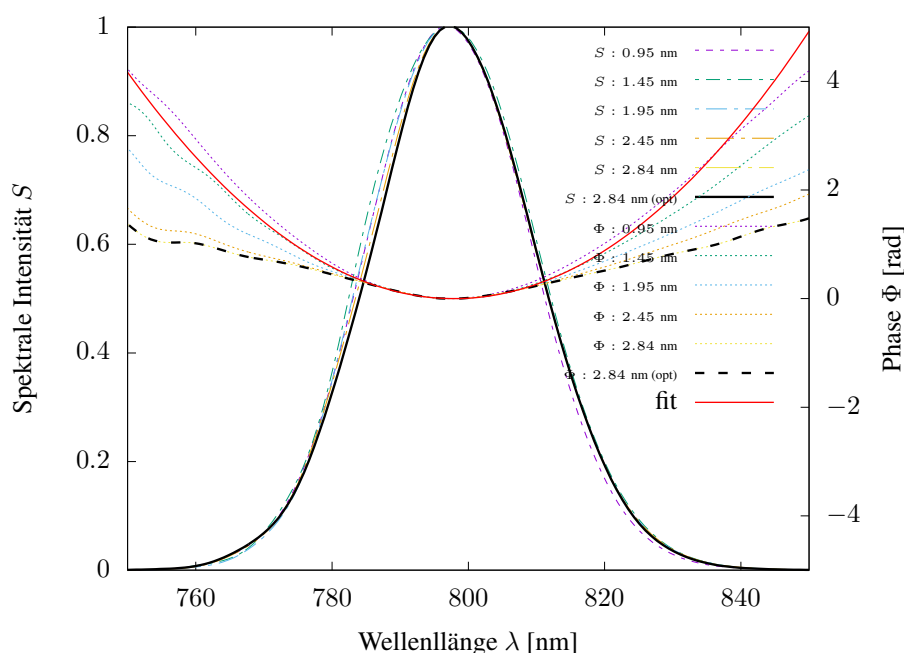


Abb. 8: blah2

Objekt	Spatial Chirp [ $10^{-5} \Delta\lambda/\Delta x$ ]		Pulse front tilt [fs/mm]	
	unkompensiert	kompensiert	unkompensiert	kompensiert
Nur PC	-7	-	-8.38	-
5 mm BK7	-30	-5	-8.52	-8.80
10 mm BK7	-59	2760	-8.6	-9.80
5 mm MgF2	-20	-5	-8.59	-9.01
5 mm BK7 +30°	-28	0.07	-6.59	-7.86
5 mm BK7 .30°	-31	-8	-8.44	-8.69
BK7 Keil (wedge)	-11	11	-15.87	-15.1
longpass	-90	-44	-7.06	-8.08

Tab. 2: Von Quick Frog gemessener räumlicher Chirp und Puls Front Tilt, jeweils in optimaler (unkompensierter) Prismenkonfiguration und mit Kompensierung für verschiedene optische Elemente.

der Analysesoftware nicht berechnet, aber man kann die Schwankungen der Messwerte größer als den Messfehler des Instrumentes annehmen.

## 5.4 Langpassfilter

Für den Langpassfilter sind Intensität und Spektrum jeweils in Abb. 10 und 11 zusammen mit den zugehörigen Phasen sowohl in optimaler als auch in kompensierter PC-Konfiguration aufgetragen. Ebenfalls aufgetragen ist Intensität und Spektrum inklusive Phase der Messung ohne Langpassfilter bei optimaler Prismenkonfiguration. Die zugehörigen Pulsdauern und Bandbreiten sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Zum Vergleich ist für die gemessene Bandbreite der Langpass-Messung mithilfe vom Zeit-Bandprodukt Gleichung (2.8) die resultierende Pulsdauer eines fourierlimitierten Pulses berechnet worden.

## 5.5 Dielektrische Spiegel

Die Messung für Pfad 2 mit den drei dielektrischen Spiegeln ergab ein sehr verzerrtes FROG-Trace (Abb. 12). Als Vergleich ist der Trace der optimalen Prismenkompressor-Messung in Abb. 13 zu sehen. Aufgrund dieser Verzerrung und da der FROG-error sehr groß ist, ist keine sinnvolle Rekonstruktion der Pulsform möglich. Ebenso ist aus dem Spektrum keine sinnvolle Information zu entnehmen, außer dass hier erhebliche Verzerrungen auftreten. Die

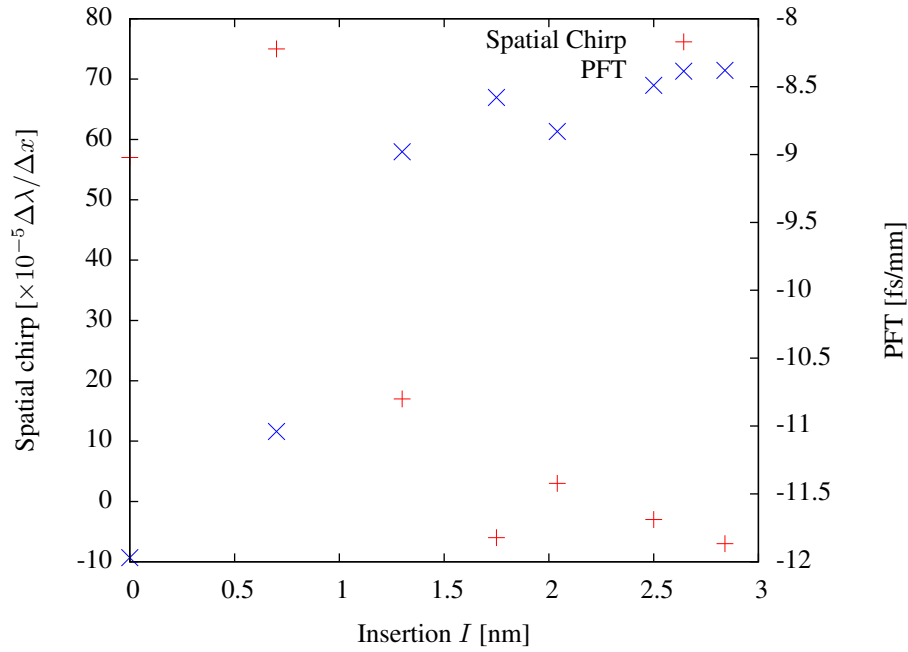


Abb. 9: Puls Front Tilt und Spatial Chirp der Prismenkompressorausmessung in Abhängigkeit der Insertion.

Messung	$\tau$ [fs]	$\Delta\lambda$ [nm]	$\lambda_0$ [nm]	FWHM Zeit-Bandprodukt
Ohne LP (opt)	24.6	45.3	793.9	0.533
Langpass (opt)	56.4	34.9	784.3	0.958
Langpass (komp)	37.4	38.6	784.3	0.702
Theorie	25.9	34.9	784.3	0.441

Tab. 3: Pulsdauern, Bandbreiten, Trägerwellenlängen, sowie das Zeit-Bandprodukt der Messungen ohne und mit Langpassfilter. Für die opt. Langpass-Messung wurde die fourierlimitierte Pulsdauer berechnet.

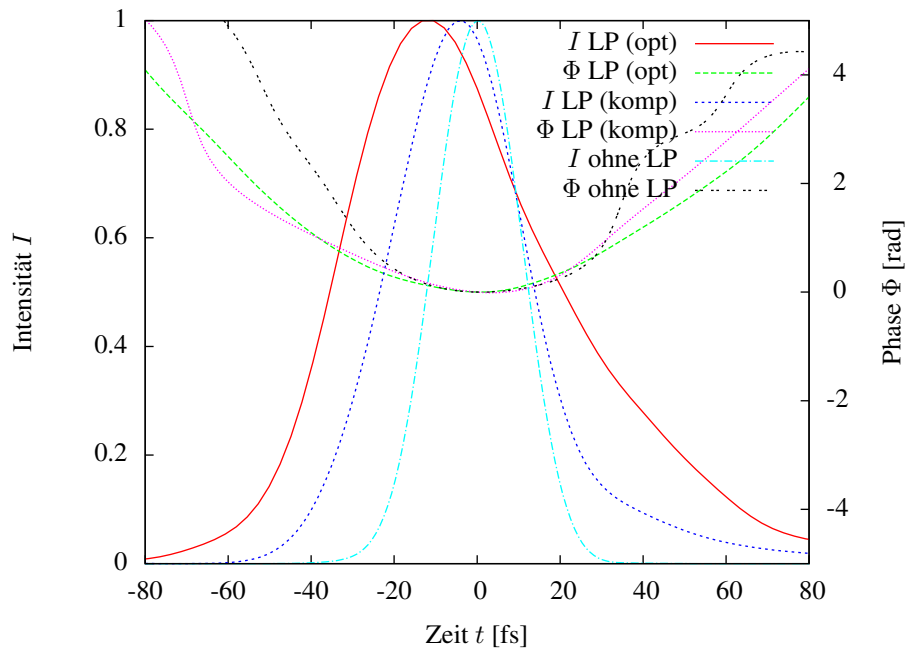


Abb. 10: Intensität bei optimaler Prismenkonfiguration (opt) ohne Langpassfilter und bei eingesetztem Langpassfilter unkompensiert und kompensiert.

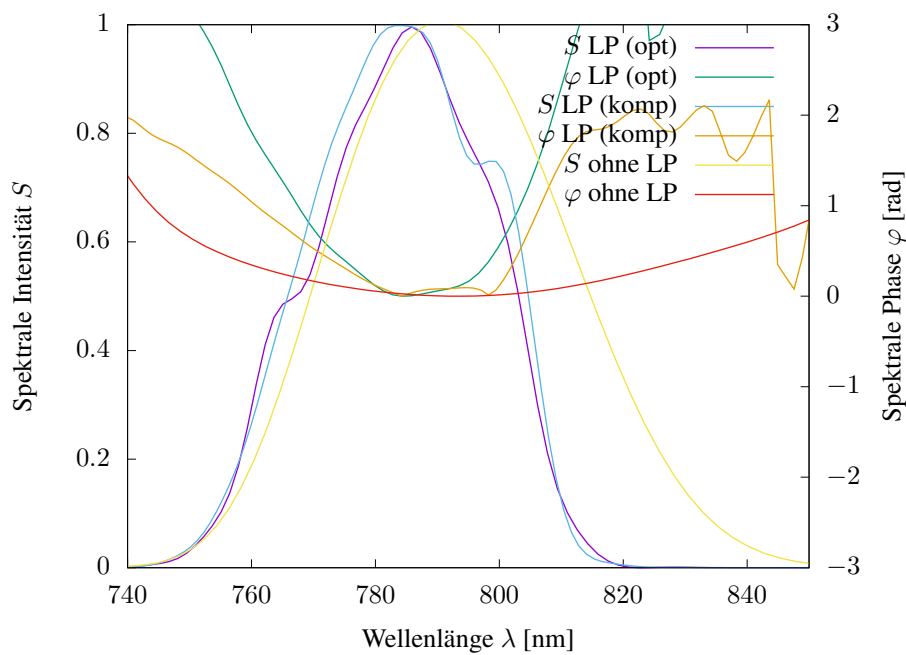


Abb. 11: Spektrum bei optimaler Prismenkonfiguration (opt) ohne Langpassfilter und mit eingesetztem Langpassfilter, unkompensiert und kompensiert.

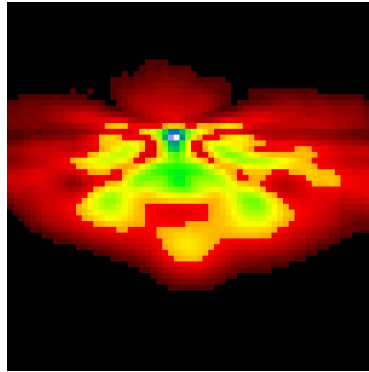


Abb. 12: Experimenteller FROG trace für die Messung mit dielektrischen Spiegeln. Der Trace ist sehr verzerrt, wodurch keine sinnvolle Rekonstruktion der Pulsform möglich ist.

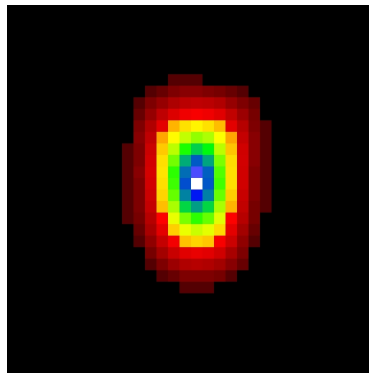


Abb. 13: Experimenteller FROG trace der optimalen Prismenkompressormessung.

Pulsform wird von den dielektrischen Spiegeln regelrecht zerstört. Auch eine Kompensierung mit dem Prismenkompressor war unmöglich: Die Pulsdauer war absolut unberührt von dem Einschub des zweiten Prismas.

## 5.6 Rechteckiges Spiegelpaar

Für die Rechteckspiegel mit jeweils 5 Reflektionen zeichnet sich ein ähnliches Bild, wie für die dielektrischen Spiegel ab. Der FROG-Trace ist verzerrt und der FROG error ist groß ebenso sind der rekonstruierte FROG trace stark unterschiedlich vom experimentellen. Die Ergebnisse sind in Abb. 14 für die unkompensierte, sowie in Abb. 15 für die kompensierte Messung zu sehen. Allerdings sind die Verzerrungen hier nicht so stark wie zuvor. Die Pulsintensität, sowie das Spektrum mit Phase sind in Abb. 16 und 17 zu sehen. Man erkennt eine deutliche Phasenfluktuation, sowie eine große Pulsbreite bei den kompensierten Prismenkompressoreinstellungen. Die Messungen in optimaler Einstellung sind stattdessen mit Ausnahme von einigen Einschnedungen in der Intensität nahezu Gaußförmig, wenn auch mit deutlich größerer Pulsdauer im Vergleich zu den metallischen Spiegeln.

## 6 Diskussion

[7]

## Literatur

- [1] *Praktikumshandbuch*. master-fp.physik.uni-goettingen.de. – Von Betreuerin erhalten
- [2] *Prism compressor*. <http://en.wikipedia.org/wiki/Prism-compressor>. – Zugriffsdatum: 11.12.2017
- [3] *refractive index database*. <https://refractiveindex.info/>. – Zugriffsdatum: 11.12.2017

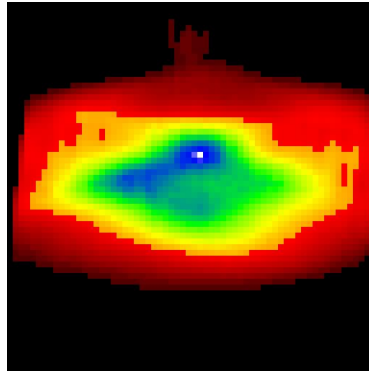


Abb. 14: Experimenteller FROG trace des Spiegelpaares

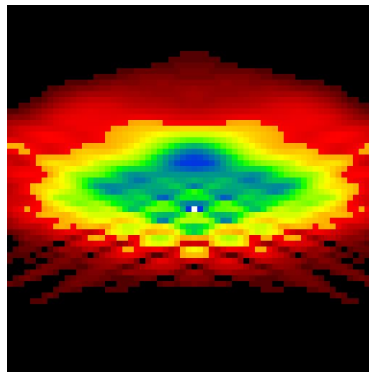


Abb. 15: Rekonstruierter FROG trace des Spiegelpaares

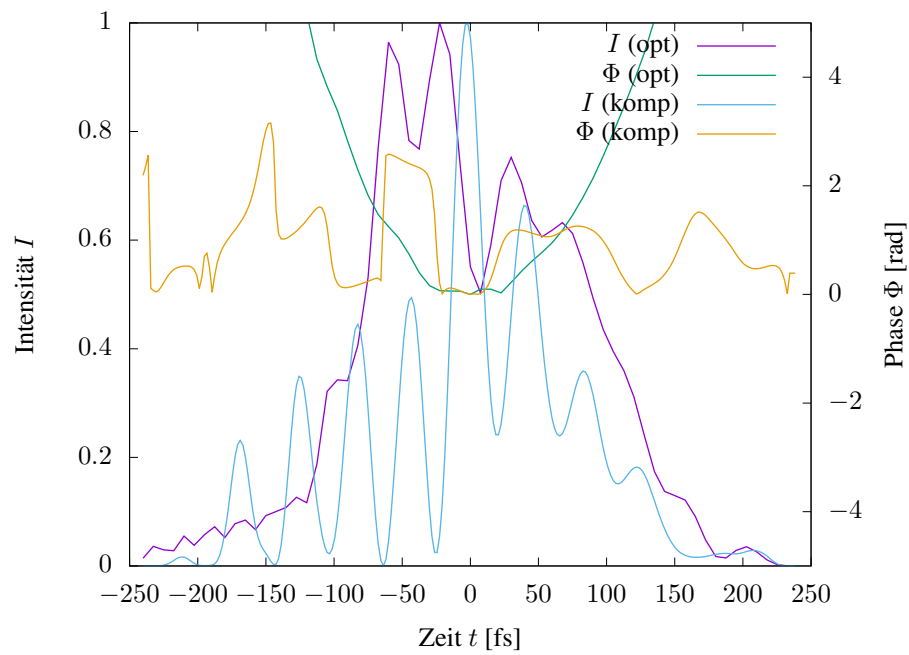


Abb. 16: Experimenteller FROG trace des Spiegelpaares



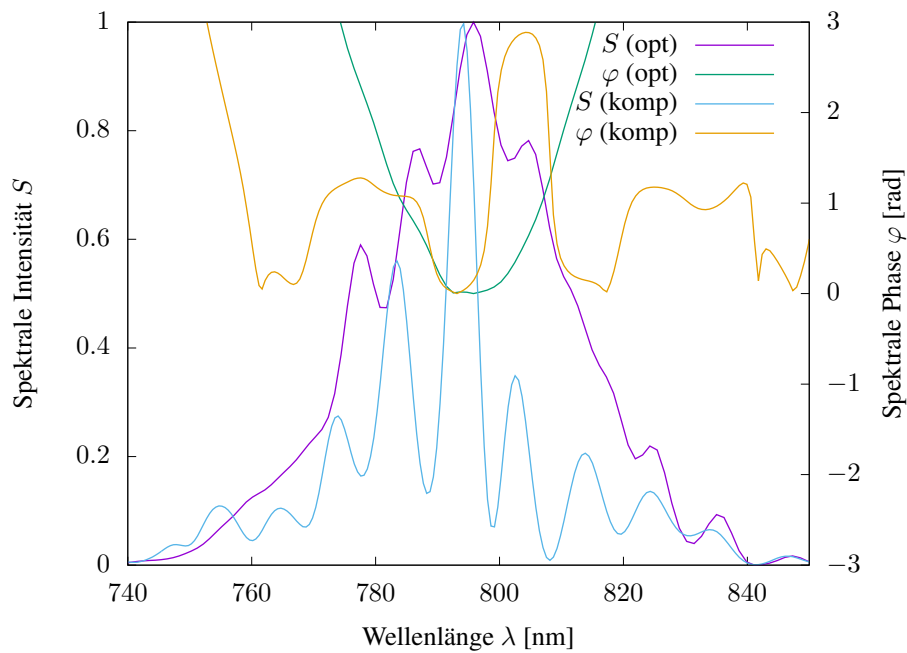


Abb. 17: Rekonstruierter FROG trace des Spiegelpaares

- [4] *Swamp Optics*. <http://www.swampoptics.com>. – Zugrifssdatum: 11.12.2017
- [5] *Swamp optics tutorial on spatial chirp*. <http://www.swampoptics.com/assets/tutorials-spatio-temporal-2015.pdf>. – Zugrifssdatum: 11.12.2017
- [6] AKTURK, Selcuk ; GU, Xun ; ZEEK, Erik ; TREBINO, Rick: Pulse-front tilt caused by spatial and temporal chirp. In: *Opt. Express* 12 (2004), Sep, Nr. 19, S. 4399–4410. – URL <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-12-19-4399>
- [7] TIDECKS, Reinhard: *Current-induced nonequilibrium phenomena in quasi-one-dimensional superconductors*. Springer, 1990