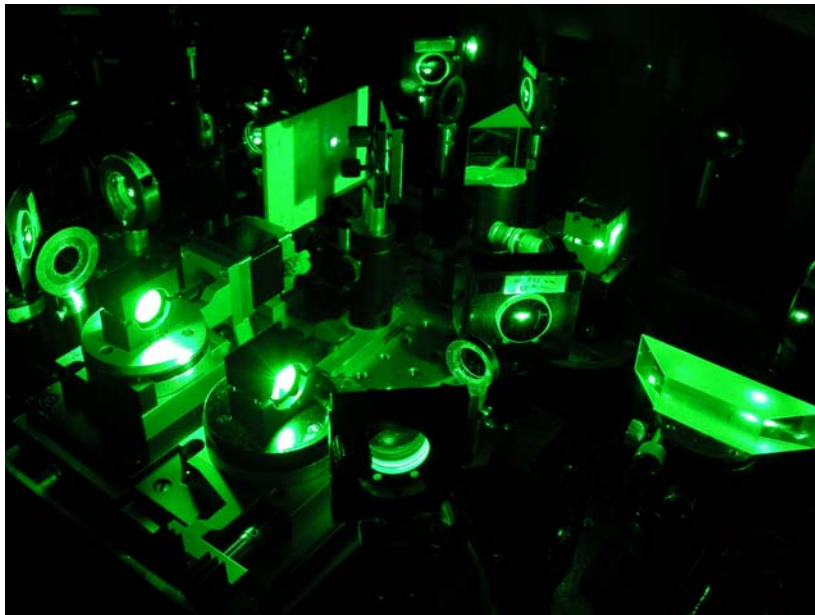


Anleitung zum Fortgeschrittenen Praktikum:

Erzeugung und Charakterisierung kurzer Laserpulse



Ansprechpartner:

Dipl.-Phys. Björn Braunschweig

B.Braunschweig@pe.tu-clausthal.de ; Tel: 05323/72-3117 ; Raum 214

1 Einleitung

Kurze Laserpulse bieten die einzigartige Möglichkeit hohe Zeitaufösungen und hohe mögliche Leistungsdichten zu verbinden. Die Zeitaufösung kann z.B. dazu verwendet werden um dynamische Prozesse auf Oberflächen aber auch an Grenzflächen zu untersuchen.

Heutige kommerziell erhältliche "state-of-the-art" Lasersysteme erreichen problemlos Pulsdauern unter 100 fs (1 fs entspricht 10^{-15} s), die neueste Entwicklung auf dem Gebiet der ultrakurzen Laserpulse sind Attosekundenlaser mit Wellenlängen im extremen Ultraviolett. Damit ist Tor zur Attosekundenphysik von z.B. Elektronenbewegungen innerhalb oder auch zwischen Atomen aufgeschlagen und fundamentale Prozesse in Atomen, Molekülen und Festkörpern können so auf dieser Zeitskala untersucht werden.

Aber auch die mit kurzen Laserpulsen erreichbaren hohen Leistungsdichten bei gleichzeitiger niedriger mittlerer Leistung ermöglichen z.B. die nichtlineare Optik an Grenzflächen, Mehrphotonenphotoemission aber auch Laserablation und Laserdeposition. So erreicht z.B. ein 20 fs-Laser mit einer Pulsenergie von einem Joule im Fokus des Laserstrahls eine Leistungsdichte von 10^{20} W/cm². Im Gegensatz dazu ist der die gesamte Strahlungsleistung der Sonne, welche die Erde trifft, nur 10^{17} W.

2 Wellengruppe - Ebene Welle

Gerade bei Lasern mit kurzen Pulsdauern im Piko- und Femtosekundenbereich ist die oft gemachte Näherung von ebenen Wellen nicht mehr zur Beschreibung aller auftretenden Phänomene möglich.

Mechanismen wie z.B. Pulsverbreiterung, Pulskompression, Chirp etc. erfordern gerade die Behandlung der Lichtimpulse als Wellengruppe.

$$\begin{array}{ll} \text{Ebene Welle:} & E(t) = E_0 \cdot e^{i(\omega t - kx)} \\ \text{Wellenpaket} & E(t) = E_0 \cdot e^{-\frac{t^2}{2\tau^2}} e^{i(\omega t - kx)} \end{array}$$

Bei einem Wellenpaket sind natürlich alle physikalisch denkbaren (z.B. Lorentz, sech^2 , Rechteck) Einhüllenden möglich. Im folgenden soll aber nur eine Gaußfunktion als Einhüllende betrachtet werden, da diese eine besonders einfache mathematische Beschreibung mit physikalisch sinnvollen Ergebnissen liefert.

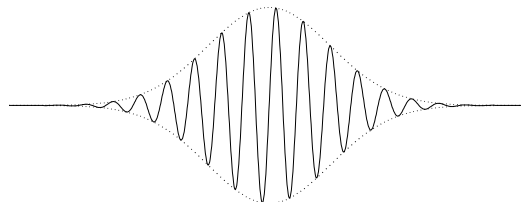


Abb. 1: Wellenpaket mit gaußförmiger Einhüllenden

3 Frequenzspektren kurzer Laserpulse

Der Zusammenhang zwischen spektraler Bandbreite $\Delta\omega$ und der FWHM-Pulsdauer ΔT soll nun einmal anhand eines Pulses mit gaußförmiger Amplitude

$$E(t) = E_0 \cdot e^{-2\ln 2 \frac{t^2}{\Delta T^2}} e^{i\omega t}$$

abgeleitet werden, für die Intensität gilt dann:

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-4\ln 2 \frac{t^2}{\Delta T^2}}$$

Eine Fouriertransformation von $E(t)$ bzw. $I(t)$ liefert:

$$\tilde{E}(\nu) = \tilde{E}_0 \cdot e^{-\frac{\pi^2 \Delta T^2 \nu^2}{2 \ln 2}} \quad (1)$$

$$\tilde{I}(\nu) = \tilde{I}_0 \cdot e^{-\frac{\pi^2 \Delta T^2 \nu^2}{\ln 2}}$$

Für die Halbwertsbreite des Spektrums gilt also

$$\Delta\nu = \frac{2 \ln 2}{\pi \Delta T}$$

Für das Zeit-Bandbreite-Produkt eines Wellenpaketes mit gaußförmiger Einhüllenden gilt wegen (1):

$$\Delta\nu \cdot \Delta T = \frac{2 \ln 2}{\pi} = 0,4413$$

Viel allgemeiner lässt sich diese Beziehung für beliebige Pulsformen durch die Energie-Zeit-Unschärferelation ausdrücken:

$$\Delta\tau \cdot \Delta\omega \geq \frac{1}{2}$$

4 Erzeugung von kurzen Laserpulsen

4.1 Güteschaltung

Durch Verkürzen der Emissionsdauer eines Lasers kann eine Erhöhung der Spitzenleistung bei gegebener Pumpenergie erreicht werden. Dieses wird durch eine Güteschaltung, auch "Q-switch" genannt, erreicht, wobei sogenannte Riesenimpulse entstehen.

Bei normalem Pulsbetrieb wird z.B. bei Nd:YAG Festkörperlasern ein Pumpimpuls von etwa $100 \mu\text{s}$ oder länger eingestrahlt, es entsteht somit während der gesamten Pumpdauer Laserstrahlung. Zur Erhöhung der Leistung des Laserpulses kann man den Laser erst dann anschwingen lassen, wenn maximale Besetzungsinversion hergestellt wurde. Zu diesem Zweck wird der Resonator erst während des Pumpens zugeschaltet, indem der Strahlengang wiederhergestellt oder die internen Verluste verringert werden.

Die kürzesten mit gütegeschalteten Lasern erreichbaren Pulsdauern liegen bei einigen 10 ns.

5 Modenkopplung (Mode Locking)

Im Laserresonator können sich nicht nur transversale stehende Wellen (TEM-Moden) ausbilden, sondern natürlich auch longitudinale Moden. Hat nun der Resonator die Länge L , so können diese Moden folgende Frequenzen annehmen:

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} = \frac{2L}{c} \cdot n \quad (2)$$

Wegen der Energie-Zeit-Unschärferelation muss nun diese Mode nicht nur eine Frequenz, sondern die Bandbreite $\Delta\omega$ korreliert mit der Pulsdauer ΔT beinhalten, also:

$$\frac{\Delta\omega}{2\pi} = \Delta\nu = \frac{2L}{c} \cdot n \quad (3)$$

Das heißt aber auch, dass das Verstärkermedium des Lasers auch in der Lage sein muss diese Bandbreite zu verstärken. Es können nun, insofern (3) erfüllt ist, viele Moden im Resonator anschwingen. Die einzelnen longitudinalen Moden interferieren je nach relativer Phase, entweder konstruktiv oder destruktiv miteinander. Aus der Überlagerung der elektrischen Felder (ebene Wellen) ergibt sich:

$$E_{mode} = \sum_n E_n \cdot e^{i[(\omega_0 + n\Delta\omega)t + \phi_n]}$$

mit dem einfachen Ansatz $\phi_n = 0$ (konstruktive Interferenz) und $E_0 = E_n = const.$ folgt nach Anwendung der geometrischen Reihe:

$$E_{mode} = E_0 \cdot e^{i\omega t} e^{i\left(\frac{N-1}{2}\Delta\omega t\right)} \cdot \frac{\sin\left(\frac{N\Delta\omega t}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\Delta\omega t}{2}\right)}$$

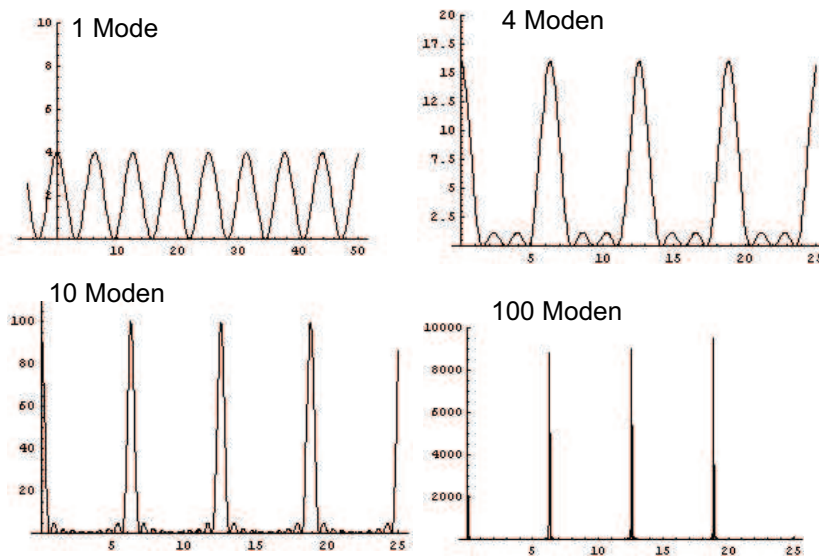


Abb. 2: Modenkopplung für eine verschiedene Anzahl gekoppelter Moden

6 Charakterisierung kurzer Laserpulse

6.1 Autokorrelation

Zur Vermessung kurzer Laser können im allgemeinen keine Photodioden mehr eingesetzt werden, da deren Anstiegszeiten in der Regel größer 100 ps sind. Als weitere Technik kommt hier die Autokorrelation kurzer Laserpulse zum Einsatz. Hierbei wird die Zeitstruktur des Pulses auf eine Orts- bzw. Wegstruktur transformiert, welche miteinander korrelieren.

Beispiel:

10 ps lassen sich schwer messen, sie entsprechen aber einer Wegstrecke von 3 mm, welche sich mit mechanischen Systemen leicht einstellen lässt.

In diesem Praktikumsversuch wird die Intensitätsautokorrelation zweiter Ordnung verwendet, informieren Sie sich darüber in der entsprechenden Literatur (z.B. C. Rulliere: "Femtosecond Laser Pulses").

7 Experimenteller Aufbau

7.1 Aufbau und Funktion des regenerativen Verstärkers

Bei der regenerativen Verstärkung wird ein relativ schwacher Startpuls in einen Laserresonator eingekoppelt, erfährt zunächst bei jedem Durchgang durch das Lasermedium eine Verstärkung und wird bei Erreichen der maximalen Pulsenergie wieder aus dem Resonator herausreflektiert.

Im Folgenden soll der für den Versuch benutzte regenerative Verstärker (Abbildung 3) diskutiert werden. Oben rechts in der Abbildung 3 erkennt man den sog. "Seedlaser". Es ist in unserem Fall ein laserdiodengepumpter, akustooptisch-modengekoppelter Nd:YAG-Laser. Er emittiert bei einer Wellenlänge von 1064 nm mit einer Wiederholrate von 100 MHz und liefert eine Leistung von ca. 90 mW. Die Pulsdauer ist unter 25 ps. Die Laserpulse verlassen den Laser parallel zur Tischebene polarisiert. Unmittelbar nach dem Seedlaser folgt ein zweistufiger Faraday-Isolator. Dieser transmittiert die Strahlung vom Seedlaser und blockt die aus dem Verstärkerresonator zurückreflektierte Strahlung. Jede Teilstufe des Faradayisolators dreht die Polarisation des Laserstrahls um 45° , d.h. die Polarisation wird insgesamt um 90° gedreht und der transmittierte Strahl ist damit senkrecht zur Tischebene polarisiert. Nach dem Faraday-Isolator folgt eine unbeschichtete BK7-Platte, die zur Einkoppelung des Seedpulses in den reg. Verstärker bzw. zur Auskoppelung des verstärkten Pulse aus dem reg. Verstärker dient. Sie reflektiert ungefähr 10% der einfallenden Strahlung. Der reflektierte Anteil wird mittels eines hochreflektierenden Spiegels und zweier Dünnschichtpolarisatoren (unter dem Brewsterwinkel von 56°) in den Verstärkerresonator eingekoppelt.

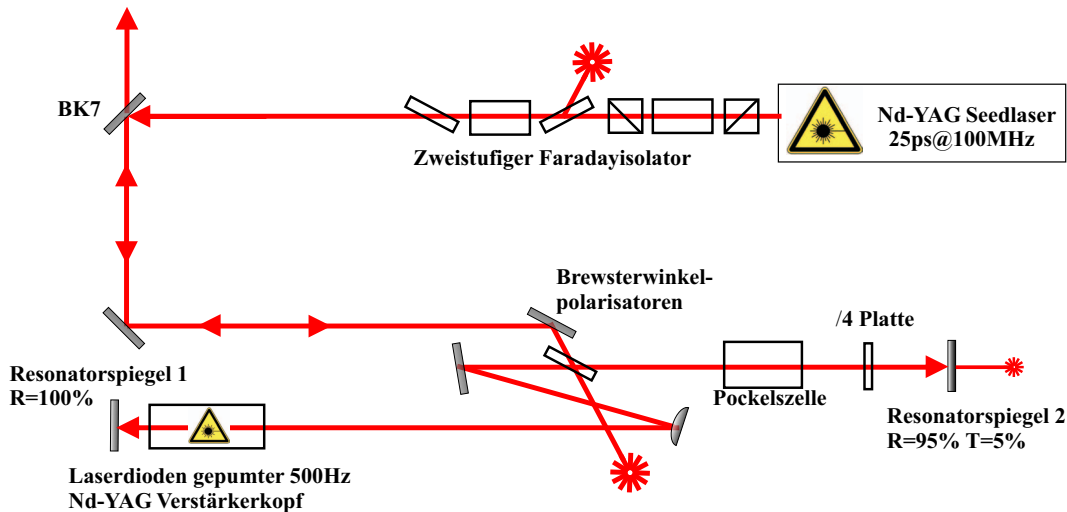


Abb. 3: Aufbau des im Praktikum verwendeten regenerativen Verstärkers

7.2 Der Verstärkerresonator

Der Verstärkerresonator besteht aus 4 Laserspiegeln, dem diodengepumpten Laserkopf, einem Dünnschichtpolarisator, einer Pockelszelle und einer $\lambda/4$ -Platte.

7.3 Die Pockelszelle

Die Pockelszelle, deren Wirkung auf den Pockelseffekt¹ beruht, wirkt als schaltbare $\lambda/4$ -Platte. Der Laserstrahl propagiert dabei parallel zur optischen Kristallachse. Die Größe der erzeugten Doppelbrechung ist proportional zur angelegten Spannung. Bei angelegter Spannung wirkt die Zelle als $\lambda/4$ -Platte und ändert die Polarisation transmittierender Strahlung von linear auf zirkular und umgekehrt. Die Pockelszelle ist direkt unterhalb eines Hochspannungstreibers installiert, der die notwendigen Spannungen von einer Spannungsversorgung mit dem nötigen Betriebsstrom für die Elektronik des Treibers und einer Hochspannung erhält wird. Durch die Installation des Spannungstreibers direkt unterhalb der Zelle werden die Spannungszuleitungen zur Pockelszelle verkürzt, damit die Induktivität der Zuleitungen und die Schaltzeiten der Zelle möglichst klein sind. Wenn beide Elektroden auf gleichem Potential liegen (2.43 kV gegen Masse), ist die Pockelszelle nicht aktiv, d.h. in dieser Phase gibt es kein elektrisches Feld in den Kristallen, und die transmittierende Laserstrahlung erfährt keine Änderung der Polarisation. Die Schaltung der Zelle erfolgt mittels zweier Triggersignale (ab jetzt Trigger1 und Trigger2 genannt), die von der Steuerelektronik der Pockelszelle zum Spannungstreibers gesendet werden. Mit Trigger1 wird das Potential einer Elektrode auf Null gesetzt und damit ein elektrisches Feld an den BBO-Kristallen in der Pockelszelle angelegt. In dieser Phase wirkt die Pockelszelle wie eine $\lambda/4$ -Platte und ändert bei Transmission die Polarisation von linear polarisiert auf zirkular polarisiert und umgekehrt. Durch Trigger2 wird das Potential der anderen Elektrode ebenfalls auf Null gesetzt, so das beide Elektroden wieder

¹Damit ist die Eigenschaft bestimmter Kristalle gemeint, durch Anlegen eines elektrischen Feldes Doppelbrechung zu erzeugen. Es gibt zwei Arten von Pockelszellen: eine, bei der das elektrische Feld parallel zur Strahlrichtung angelegt wird (longitudinaler Pockelseffekt), und eine bei der das Feld senkrecht zur Strahlrichtung angelegt wird (transversaler Pockelseffekt). In der betreffenden Pockelszelle wird der transversale Pockelseffekt ausgenutzt.

auf gleichem Potential liegen und in den Kristallen der Pockelszelle kein elektrisches Feld mehr vorhanden ist. In dieser Phase ändert die Pockelszelle nicht die Polarisation der transmittierenden Strahlung. Vereinfacht kann man also sagen, dass mit Trigger das elektrische Feld in den Kristallen eingeschaltet und mit Trigger2 wieder ausgeschaltet wird. Die Schaltzeiten des Hochspannungstreibers sind zu 3,4 ns beim Einschalten bzw. 3,7 ns zum Ausschalten der Hochspannung spezifiziert. Die minimal mögliche Zeit zwischen Ein- und Ausschalten der Spannung beträgt 9 ns und die maximal mögliche Zeit 999 ns.

7.4 Die Dünnschichtpolarisatoren

Die unter dem Brewsterwinkel von 56° eingebauten Dünnschichtpolarisatoren sind hochreflektierend für Strahlung, die senkrecht zur Einfallsebene polarisiert ist (und damit ebenfalls senkrecht zur Tischfläche polarisiert) und hochtransmittierend für Strahlung, die parallel zur Einfallsebene polarisiert ist.

7.5 Die $\lambda/4$ -Platte

Die $\lambda/4$ -Platte ist so eingebaut, das aus einfallendem linear polarisiertem Licht zirkular polarisiertes Licht wird und umgekehrt.

8 Fragen zur Vorbereitung

- Erläutern Sie allgemein wie ein Laser funktioniert
- Was versteht man unter cw, Q-switch und mode locking?
- Wie hängen spektrale Bandbreite und Pulsdauer bei kurzen Laserpulsen zusammen?
- Welche Arten gibt es um Modenkopplung zu erreichen?
- Wie können kurze Pulse vermessen werden?
- Erläutern Sie die Funktionsweise eines regenerativen Verstärkers.

9 Aufgaben

- (a) Betreiben Sie den Verstärker bei den vom Versuchsbetreuer vorgegebenen Parametern für Diodenstrom und Diodenpulsdauer im gütegeschalteten Modus (geblockter Seedlaser) und bestimmen Sie die Pulsdauer der erzeugten Pulse mit einer Photodiode und einem Oszilloskop. Messen Sie die maximale ausgekoppelte Leistung und bestimmen Sie die Pulsenergie.
- (b) Öffnen sie nun den Shutter des Seedlasers und beobachten Sie gleichzeitig den Laserpuls auf dem Oszilloskop. Erklären Sie Ihre Beobachtung.
- (c) Überzeugen Sie sich, dass die Pulse korrekt auskoppeln, in dem Sie bei gleichzeitiger Darstellung auf dem Oszilloskop das Delay 2 und gegebenenfalls auch Delay 1 der Pockelszelle verstellen. Bestimmen Sie aus der maximalen ausgekoppelten Leistung und der Leckleistung des Resonators die Pulsenergie.

- (d) Bestimmen Sie die Kleinsignalverstärkung von Nd:YAG im Bereich vernachlässigbarer Sättigung.
- (e) Messen Sie eine Autokorrelationskurve der verstärkten Pulse und berechnen Sie daraus die entsprechende FWHM-Pulsdauer.
- (f) Messen Sie mit Hilfe einer Iris-Blende den Strahldurchmesser des Lasers, indem Sie ein gaußförmiges Profil für die elektrische Feldstärke voraussetzen. Berechnen Sie mit den zuvor bestimmten Werten für Pulsenergie, Pulsdauer und Strahldurchmesser die Leistungsdichte der erzeugten Pulse.

Literatur

- C. Rulliere: "Femtosecond Laser Pulses"
- A. Yariv: "Optical Electronics in Modern Communications" (Kapitel 6)
- W. Köchner: "Solid State Laser Engineering"