

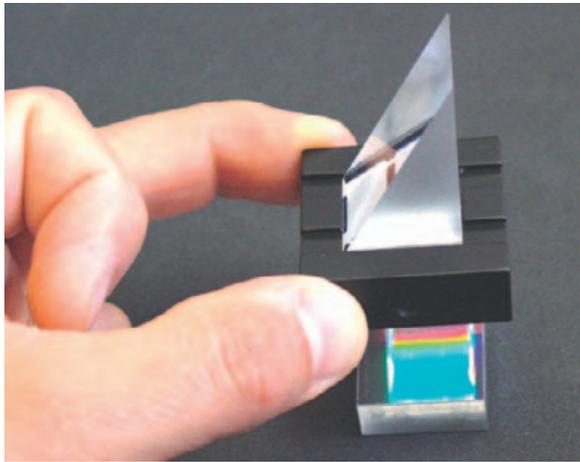


# Laserpulscompression mit Reflexionsgrisms

Exakte Dispersionskompensation von meterlangen Glasstrecken

Harald Kroker, Steve Kane, Franz Josef Schäfer und Bruno Touzet

Abb. 1 Reflexionsgrisms dienen der Dispersionskontrolle und Pulscompression.



Beim Durchgang von ultrakurzen Pulsen durch ein dispersives Medium laufen die Pulse spektral auseinander, weil die Laufgeschwindigkeit wellenlängenabhängig ist und bereits über die spektrale Pulsbreite merklich variiert. Diese auch „zeitlicher chirp“ genannte Pulsstreckung tritt in allen optischen Elementen wie

Fenstern, Linsen, Fasern, aber auch in Verstärkerkristallen auf und wird um so größer, je kürzer die Pulsdauer ist, weil die Linienbreite linear zunimmt (Zeit-Bandbreitenprodukt). Diese Pulsstreckung ist zwar oft unerwünscht, sie wird aber auch kontrolliert genutzt, um Einzelpulse möglichst hoch verstärken zu können, ohne Zerstörschwellen im Laser bzw. Verstärker selbst zu erreichen. Erst die anschließende Komprimierung führt zur Spitzenleistung. Das ist das Funktionsprinzip der CPA-Kurzpulslaser (Chirped Puls Amplification, Pulsverstärkung durch spektrale Pulslängendehnung). Letztlich ist das Ziel bei Kurzpulslasern aber immer, ein optisches System mit genau entgegengesetzter Dispersion zu erreichen und damit optimierte Pulse maximaler Leistung. Dies ist aber schwierig, wenn viel dispersives Material kompensiert werden muss.

## Pulscompression

Klassische Pulscompressoren werden entweder aus Paaren von Reflexionsgittern oder von Prismen aufgebaut, wobei beide Techniken klare Grenzen haben. Dies lässt sich verstehen, wenn man die Wirkung des Materialbrechungsindex auf den Puls genauer betrachtet: In erster Ordnung verschiebt sich der gesamte Puls zeitlich („Group Delay“), was für eine Pulsstreckung unbedeutend ist. In zweiter Ordnung wird der Puls linear mit der Frequenz gestreckt (Group Delay Dispersion, GDD), die dritte Ordnung (Third Order Dispersion, TOD) beschreibt entsprechend eine quadratische Streckung.

GDD und TOD können positives oder negatives Vorzeichen haben. Optiken, wie sie in Lasern zum Einsatz kommen, haben normale Dispersion, das heißt positive GDD, zusätzlich aber auch positive TOD. Ein Kompressor, der Materialdispersionen korrigieren soll, muss daher sowohl negative GDD als auch negative TOD haben. Gitterpaare haben zwar negative GDD, aber immer positive TOD, was zu residuellem Chirp im Puls führt. Prismenpaare können durch die

richtige Wahl von Prismenmaterial und -geometrie sowohl GDD und TOD kompensieren, aber nur für sehr begrenzte Materialstärken: Ein Zentimeter Material erfordert etwa 10 cm Prismenabstand.

Touzet gelang es, dieses Problem für einige zehn Meter dispersiven Materials zu lösen und TOD auf null zu reduzieren, indem er Reflexionsgitter durch Transmissionsgitterprismen (Grisms; zusammengesetzt aus grating und prism) ersetzte [1]. Kane und Squier verfeinerten diese Methode und erzeugten damit experimentell ausreichend negative GDD und TOD, um hundert Meter Faserstrecke zu kompensieren [2]. Der Nachteil der Transmissionsgitter war allerdings die moderate Effizienz von etwa 25 % pro Umlauf.

Der steigende Bedarf an Dispersionskompensation großer Materialstärken führte zu einer Erweiterung der Grism-Lösung. Die optimierte Kombination von Glasprisma und Reflexionsgitter (Abb. 1) ermöglicht eine Gitteranordnung nahe der Littrow-Konfiguration, bei der Ein- und Ausgangswinkel des Strahls gleich sind. Dies ist ideal für hohe Effizienz von bis zu 90 % und vergleichbar mit den

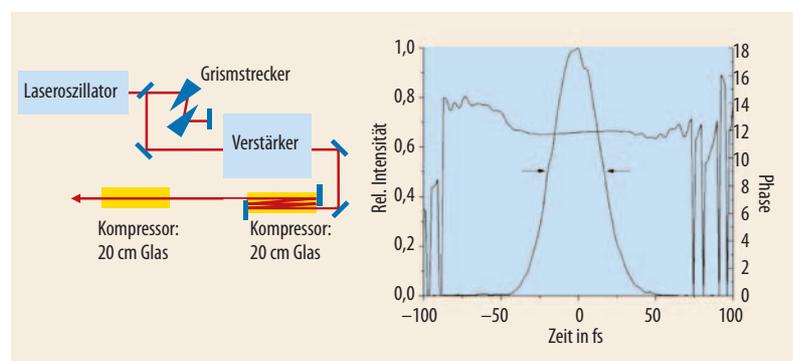


Abb. 2 DPA-Lasersystem mit Reflexionsgrisms zur Dispersionskompensation von 120 cm Glas. Links ist der schematische Aufbau skizziert, rechts die zeit-

liche Autokorrelationsfunktion dargestellt, die eine Pulslänge von 35 fs Halbwertsbreite zeigt.

Dr. Harald Kroker, Horiba Jobin Yvon GmbH, Chiemgaustr. 148, 81549 München; Dr. Steve Kane, Horiba Jobin Yvon Inc., 3880 Park Ave. Edison, NJ 08820, USA; Franz Josef Schäfer, Horiba Jobin Yvon GmbH, Chiemgaustr. 148, 81549 München; Bruno Touzet, Horiba Jobin Yvon SAS, 16-18 Rue de Canal, 91165 Longjumeau Cedex, Frankreich



besten kommerziellen Gitterkompressoren. Ein Patent zur Nutzung dieser neuen Reflexionsgitterprismen zur Pulscompression wurde beantragt [3]. Die Firma Horiba Jobin Yvon bietet mehrere Systeme, für unterschiedliche Anwendungen und Glasstärken optimiert, kommerziell an.

## Kompensation von dickem Glas bei 800 nm

Eine 2004 vorgestellte Technik, die „Downchirped Pulse Amplification“ (DPA), erlaubt es, kurze Pulse mit sehr hoher mittlerer Leistung zu erzeugen [4]. Im Gegensatz zu der üblichen CPA-Technik mit Gitterpaaren sowohl für Strecker als auch Kompressor, wird bei der DPA nur die Pulsstreckung mit Gittern durchgeführt, und zwar mit großem negativem Chirp. Nach der Verstärkung in einem Ti:Saphir-Kristall wird der Puls durch den Durchgang durch meterdickes Glas komprimiert. Dieser Glaskompressor hat mehrere Vorteile:

- Die Effizienz wird nur durch Reflexionsverluste reduziert, die sich aber durch geeignete Beschichtungen extrem minimieren lassen. Damit kann die Transmission bis zu eine Größenordnung besser sein als bei einem Gitterkompressor, der üblicherweise mehrfach durchlaufen werden muss.

- Die Ausrichtung eines Glasblockes ist unkritisch und nicht mit den Justageanforderungen eines Gitterkompressors zu vergleichen.

- Räumlicher Chirp, d. h. eine spektrale Aufspaltung des lateralen Strahlprofils, lässt sich reduzieren.

Die Schwierigkeit dabei ist allerdings, dass sowohl GDD als auch TOD beim Strecken und Komprimieren exakt übereinstimmen müssen, um bandweitenlimitierte Pulse zu erhalten. Reflexionsgrisms sind also dafür prädestiniert.

Gaudiosi et al. konnten zeigen, dass sich durch die Kombination von Grismstreckern und Glaskompressor Pulse von 35 fs Länge erzeugen lassen (Abb. 2) [5]. Die Grisms bestehen aus einem Gitter mit 600 Linien/mm und einem

BK7-Prisma. Der Glaskompressor ist eine 20 cm lange Glassäule, die mehrfach durchlaufen wird, um eine Gesamtglasstärke von 120 cm zu erreichen. Der Aufbau blieb dabei sehr kompakt: Der Grismstreckern war keine 7 cm lang und kompensierte  $200\,000\text{ fs}^2\text{ GDD}$  und  $120\,000\text{ fs}^3\text{ TOD}$ .

## Yb-Faseranwendung bei 1030 nm

In Yb-dotierten Faserlasern laufen die ultrakurzen Pulse durch sehr große Faserlängen. Kürzlich entwickelten Kuznetsova et al. ein CPA-System mit einem Yb-dotierten Faserverstärker, das einen 10 m langen Faserstreckern zusammen mit einem Grismkompressor verwendet [6]. Zur zeitlichen Pulscharakterisierung wurde für dieses System die Autokorrelationsfunktion gemessen und mit einem gewöhnlichem Gitterkompressor verglichen (Abb. 3). Die Pulse haben eine Autokorrelationsbreite von 120 fs und sind damit durch die reduzierte Verstärkungsbreite der Faser begrenzt (gain-narrowing limit). Das heißt, GDD und TOD wurden vollständig kompensiert. Dagegen

zeigt die Gitterkompression deutliche Pulsverbreiterung. Inzwischen ist dieses Experiment erweitert worden und es gelang, eine Faserstrecke von 400 m erfolgreich mit einem Grismabstand von 24 cm zu kompensieren [7]!

Es ist absehbar, dass Reflexionsgitterprismen auch bei anderen Anwendungen, bei denen Fasern zur Übermittlung von Femtosekundenpulsen genutzt werden (z. B. Multiphotonenmikroskopie), große Vorteile haben. Das Potenzial ist deutlich, eine Standardlösung nahe liegend und spezielle Anpassungen sind möglich!

- [1] P. Tournais, Electron. Lett. **29**, 1414 (1993)
- [2] S. Kane und J. Squier, IEEE J. Quantum Electron. **31**, 2052 (1995)
- [3] S. Kane, Grating with angled output prism face for providing wavelength dependent group delay, US Patent Application (2006)
- [4] H. C. Kapteyn und S. J. Backus, Downchirped pulse amplification, U.S. Patent 7,072,101, July 4, 2006
- [5] D. Gaudiosi et al., Optics Express **14**, 9277 (2006)
- [6] L. Kuznetsova et al., Advanced Solid-State Photonics 2007, Vancouver, Canada, paper TuB3 (2007)
- [7] L. Kuznetsova, Dissertation, Cornell Universität (2008)

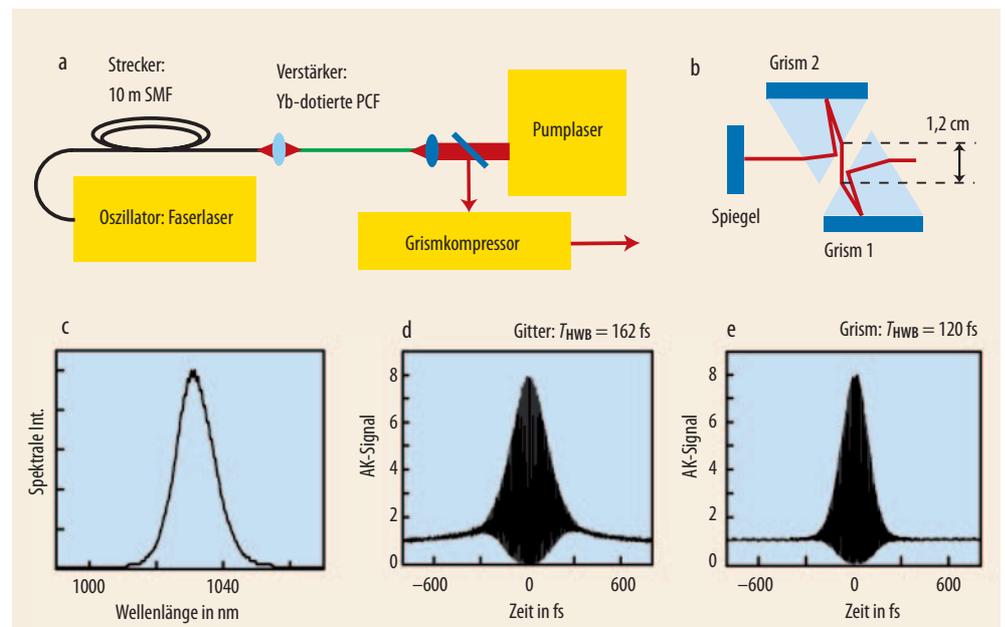


Abb. 3 Ein Verstärker aus einer Yb-dotierten, photonischen Kristallfaser (PCF) verwendet eine 10 m lange „single mode“ Faser als Pulsstreckern (a). Der verstärkte Strahl wird mit einem sehr kompakten Reflexionsgrismkompressor (b) transformationslimitiert komprimiert, was mit Gittern nicht möglich ist: Die

interferometrische Autokorrelationsfunktion von Gitter (d) und Grismkompressor (e) zeigt die deutliche Reduzierung der Pulsdauer und, zusammen mit der spektralen Verteilung der Linie (c), dass die Pulse nur mit den Grisms vollständig komprimiert sind.