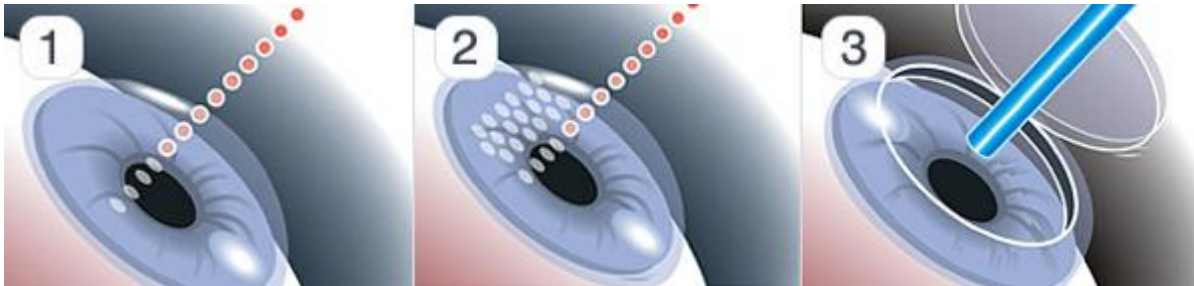
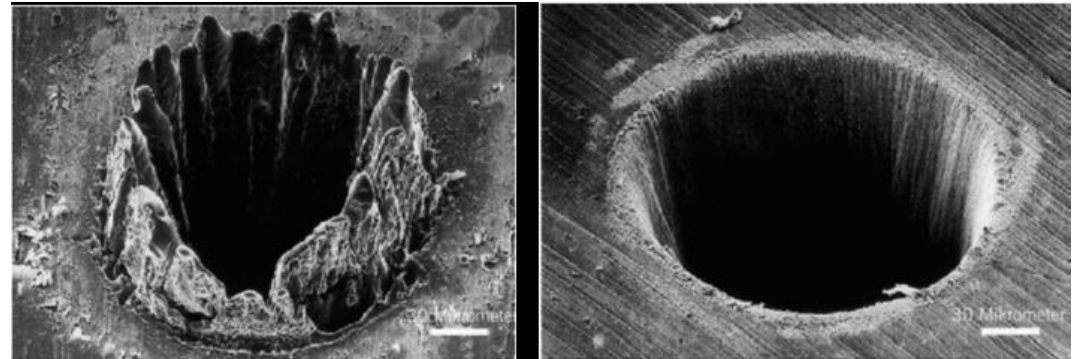


Femtosekunden Ti:Sa Laser & Verstärkersysteme



www.lasik-finder.de/augenlaser/femto-lasik/behandlungsablauf-femto-lasik



www.wiley-vch.de/berlin/journals/op/07-01/OP0701_S48_S53.pdf

Femtosekunden Ti:Sa Laser & Verstärkersysteme

1. Titan-Saphir
2. Chirped pulse amplification

Seed Laser

Faraday-Isolator

Stretcher

Pump Laser

Verstärkung

Titan-Saphir — $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$

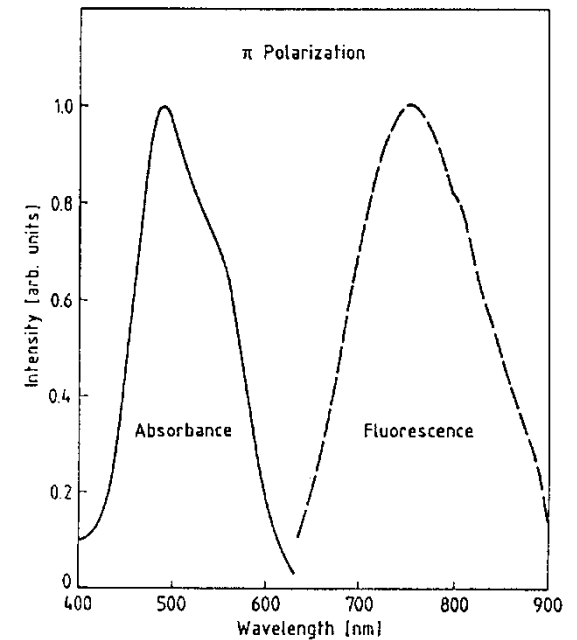
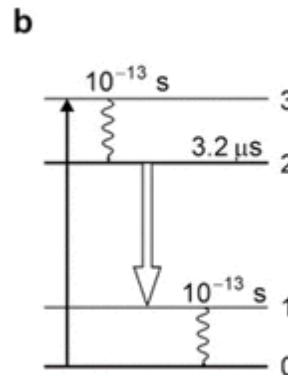
- makroskopisch:
 - gute thermische Leitfähigkeit
 - hohe Zerstörschwelle
 - sehr hart



www.altechna.de/product_details.php?id=10

Titan-Saphir — $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$

- mikroskopisch:
 - Ti Konzentration $\sim 10^{19}\text{cm}^{-3}$
 - Ti: $[\text{Ar}] 3d^2 4s^2 \leftrightarrow \text{Ti}^{3+}: [\text{Ar}] 3d^1$
 - 4-Niveau-Laser



Koechner, Solid-State Lasers (2003)

Aufbau CPA (chirped pulse amplification)

Seed: Ti:Sa

800 nm, 80 MHz, 750 mW (9 nJ)

Kerr-lens modelocking: <100 fs

Pump: Nd:YLF

527 nm (2ω), 1 kHz, 20 mJ

Q-Switch: Pulsdauer <250 ns

Faraday-Isolator

Stretcher

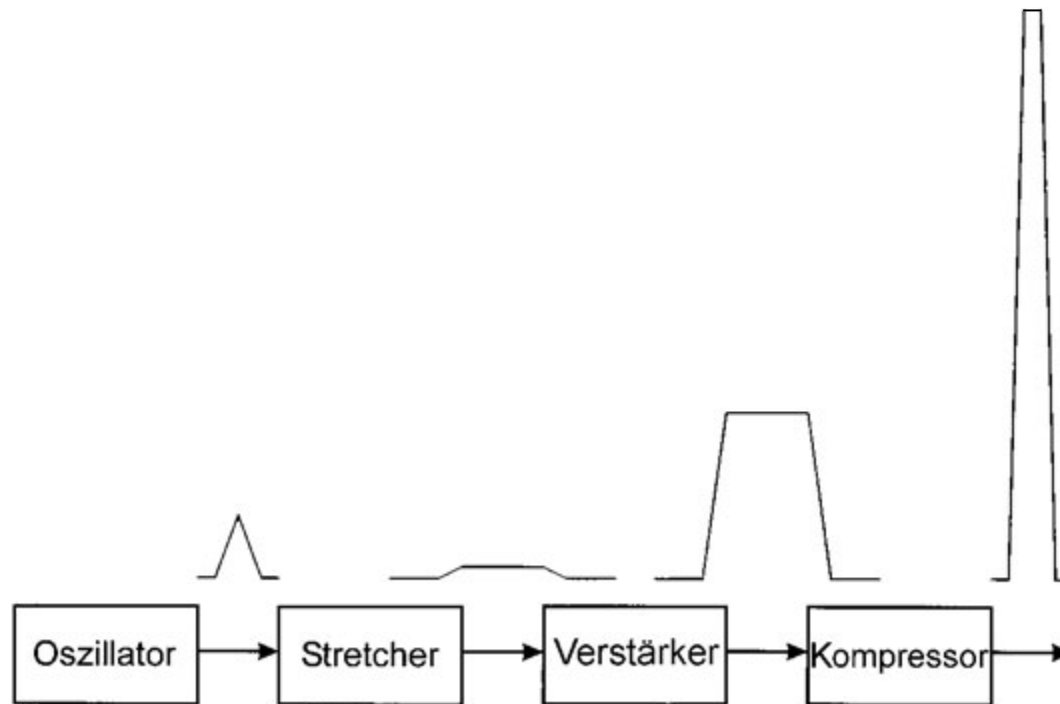
Ti:Sa
Regenerativer Verstärker

Kompressor

CPA

Output: 800 nm, 1 kHz, 1 mJ, <100 fs

CPA – Chirped Pulse Amplification

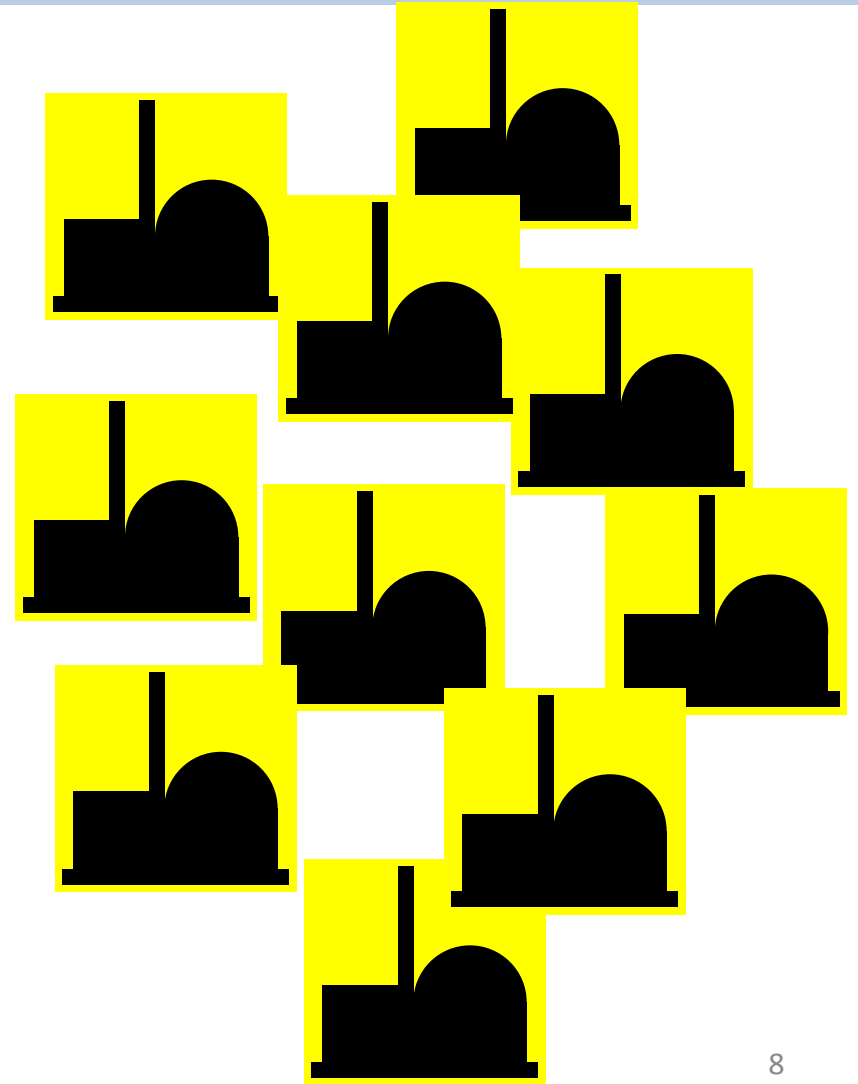


Eichler, Laser (2006)

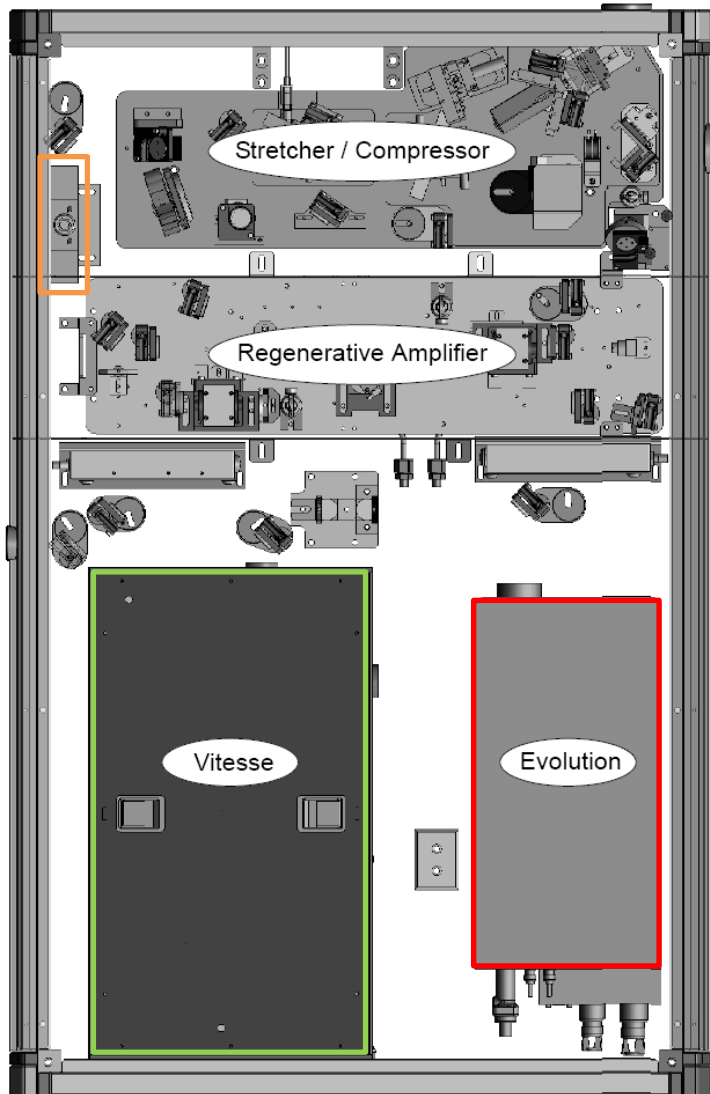
CPA output

800 nm, 1 kHz

$$P = \frac{E}{t} = \frac{1 \text{ mJ}}{100 \text{ fs}} = 10 \text{ GW} =$$



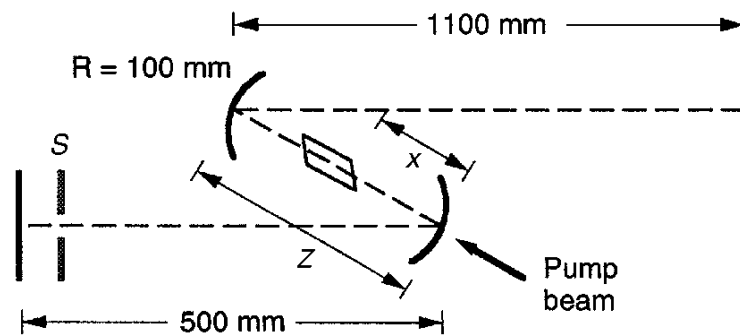
Coherent libra CPA



- **Pump:** Nd:YLF, 527 nm (2ω)
Q-Switch: Pulsdauer <250 ns, 1 kHz, 20 W,
- **Seed:** Ti:Sa, 800 nm
KLM: Pulsdauer <100 fs, 80 MHz, 750 mW
- **Faraday-Isolator**

CPA Seed: Ti:Sa, 800 nm

- Pump: Nd:YVO, 532 nm cw, 5 W
- Frequenzverdopplung: 1064 nm \rightarrow 532 nm
- Kerr-lens modelocking:
<100 fs, 80 MHz, >750 mW



Koechner, Solid-State Lasers (2003)

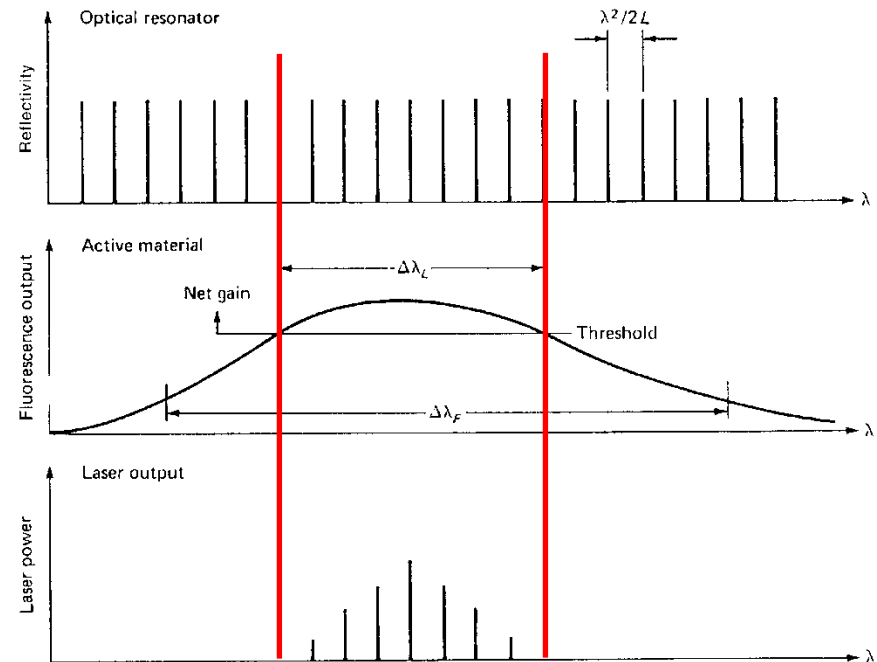
Longitudinale Moden

- Resonatorbedingung:

$$n\lambda = 2L$$

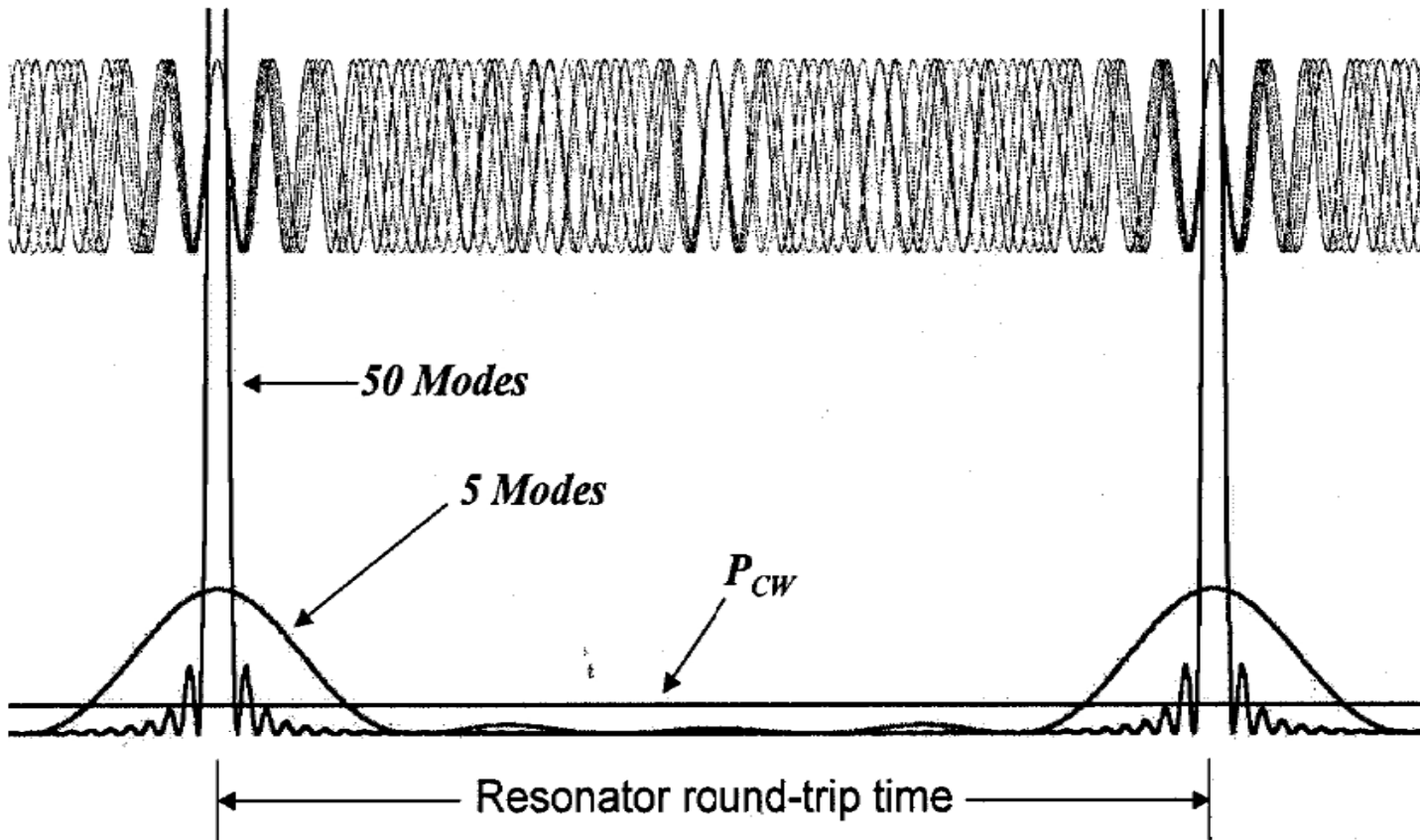
- Freier Spektralbereich:

$$\Delta\nu_{FSR} = \frac{c}{2L}$$



Koechner, Solid-State Lasers (2003)

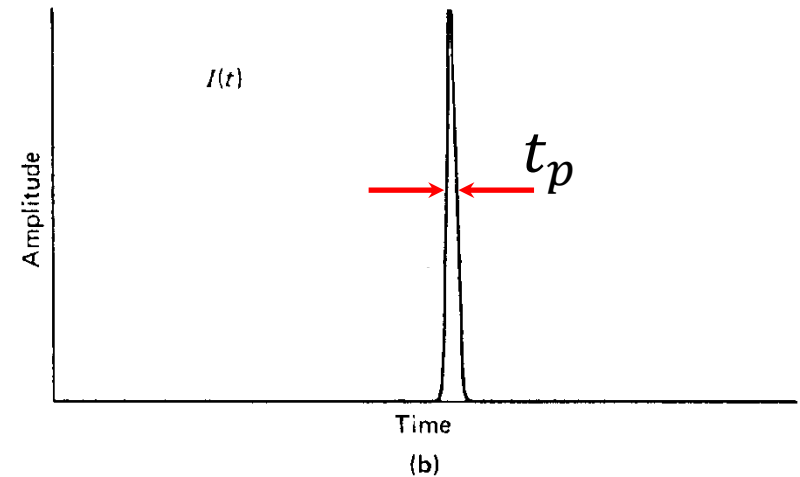
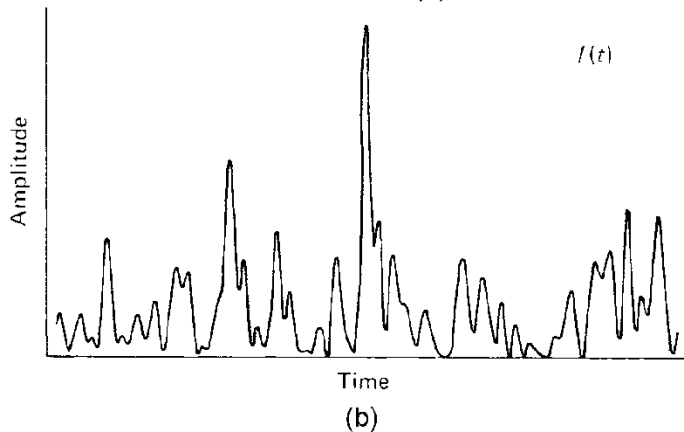
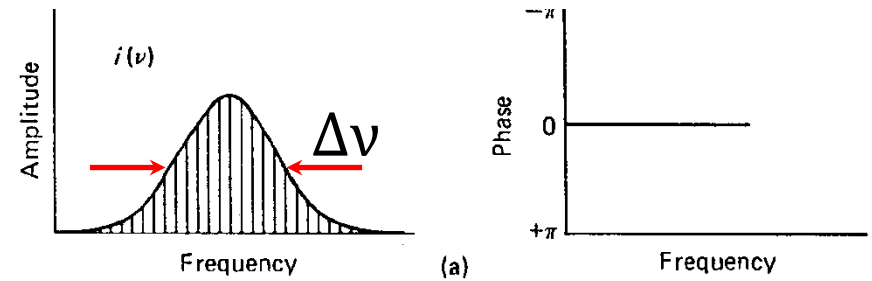
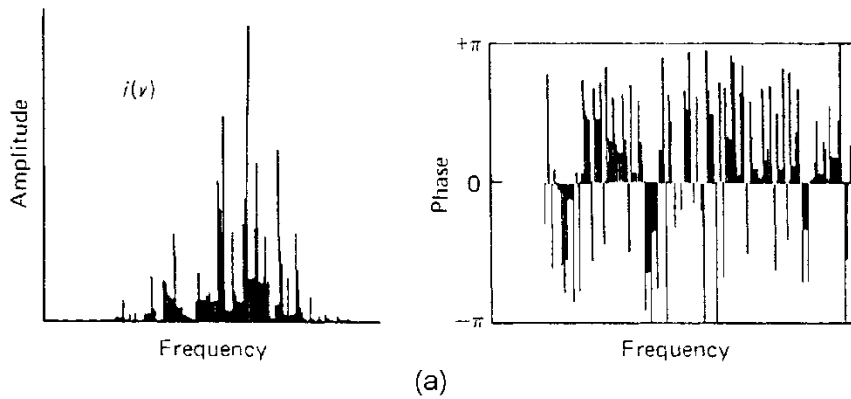
Modenkopplung



M. Didomenico, J. Appl. Phys. Lett. 35, 2870 (1964); L. Hargrove *et al.*, Appl. Phys. Lett 5, 4 (1964)

Modenkopplung

$$\Delta\nu \cdot t_p = \text{const.}$$

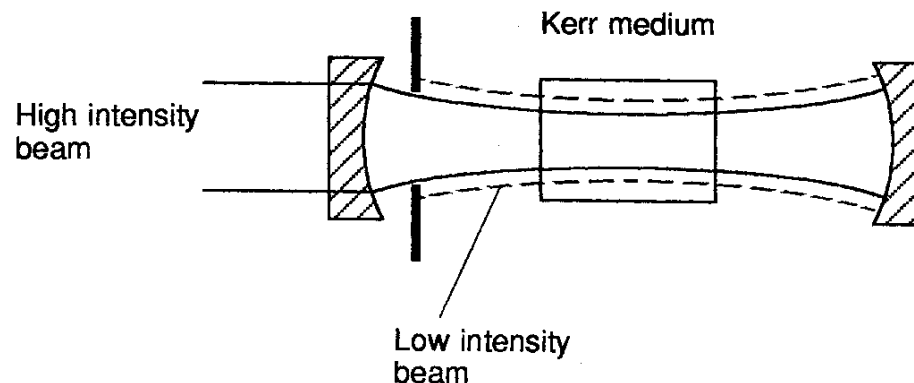


Koechner, Solid-State Lasers (2003)

Kerr-lens modelocking (KLM)

- Änderung des Brechungsindex $\sim E^2$
$$\Delta n = K \lambda E^2$$

→ Selbstfokussierung bei Gauß-Moden
- Ti:Sa aktives Medium und Kerr-Linse zugleich



Koechner, Solid-State Lasers (2003)

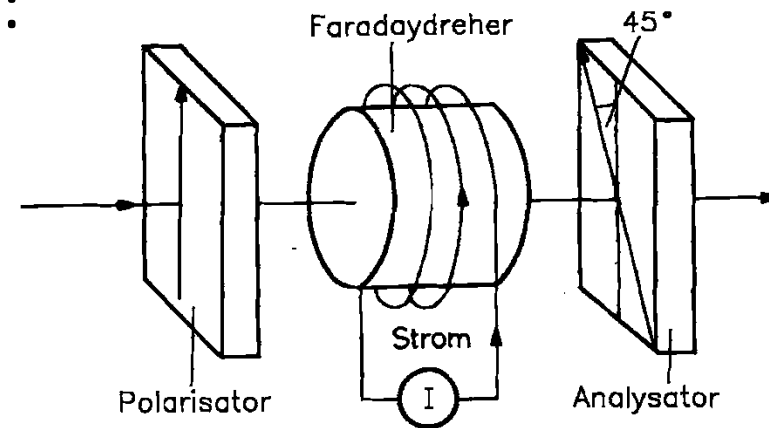
Faraday-Isolator

- Magneto-optischer Effekt

$$\delta = lVH = VNI \quad (H = NI/l)$$

- Rotation invariant unter Strahlrichtung
- Anforderungen an den Kristall:
 - hohe Verdet-Konstante V
 - niedrige Absorption
 - niedriger nichtlinearer Brechungsindex

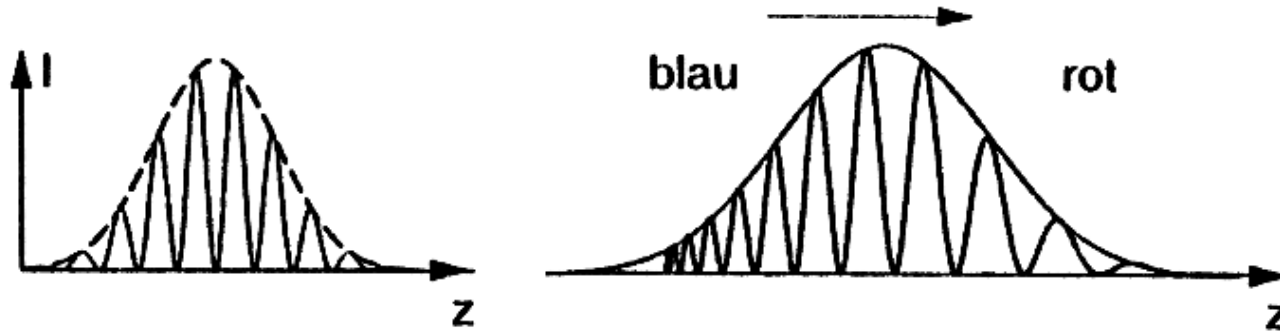
→ Terbium-Gallium-Granat (TGG)



Eichler, Laser (2006)

Stretcher

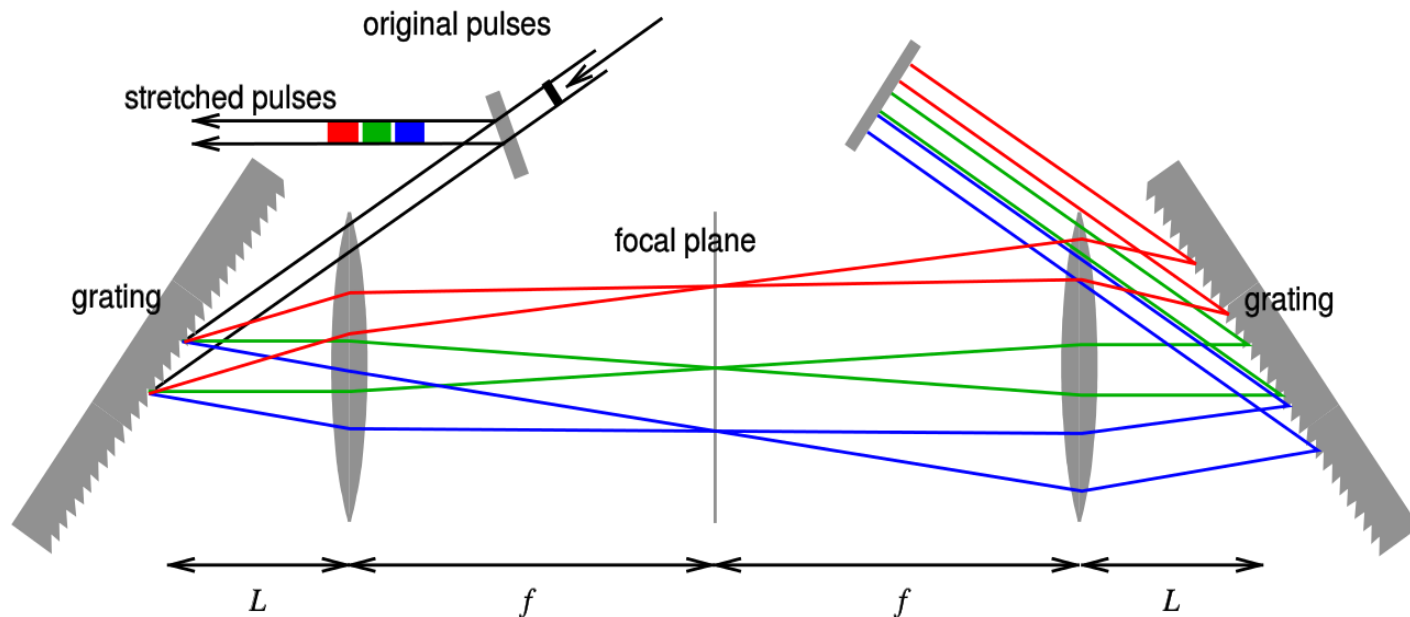
dispersive Pulsverlängerung: Chirp



Demtröder, Laserspektroskopie (2007)

Strecher

- Gitter spaltet Spektrum auf
- Auskopplung mit unterschiedlichen Laufwegen

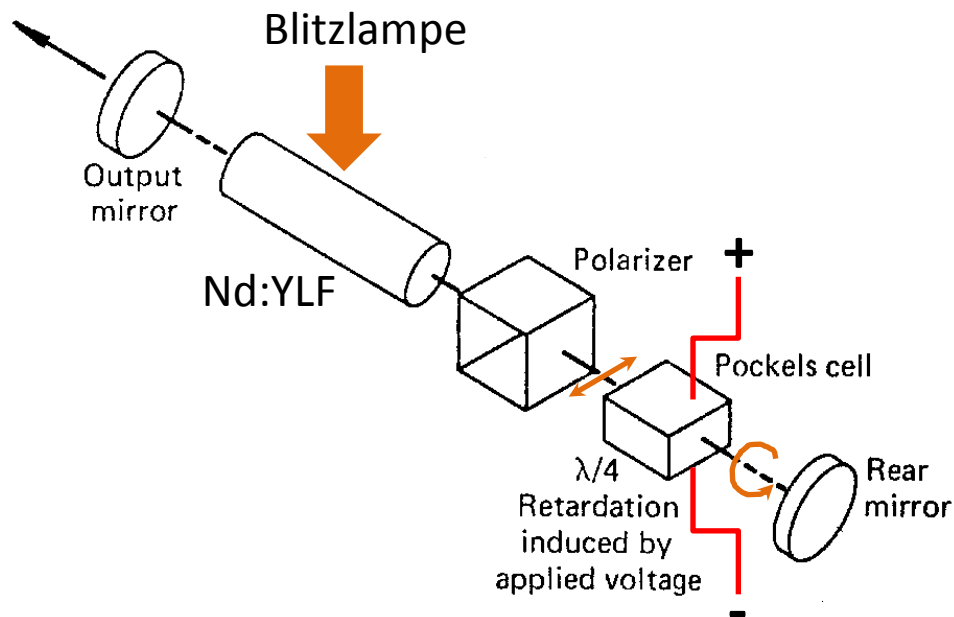


www.en.wikipedia.org/wiki/Chirped_pulse_amplification

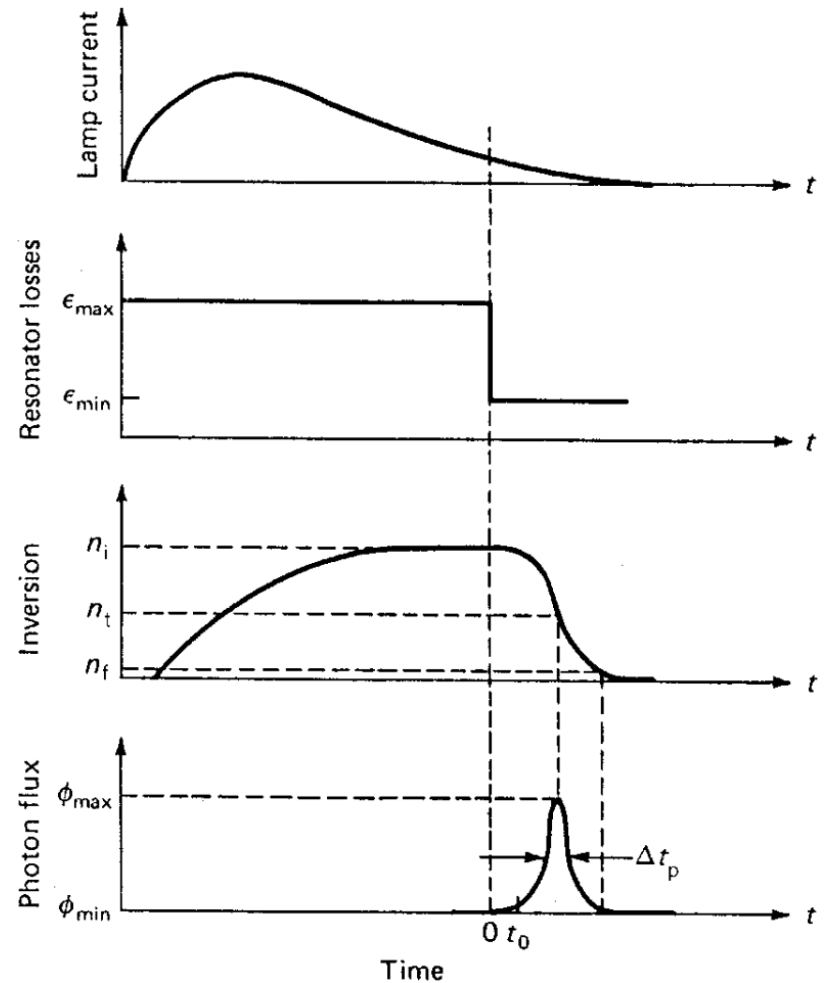
CPA Pump: Nd:YLF

- Frequenzverdopplung mit LBO Kristall:
1054 nm → 527 nm
- Q-Switch: Pulsdauer <250 ns, 20 mJ, 1 kHz

Q-Switch mit Pockels-Zelle



Koechner, Solid-State Lasers (2003)



Koechner, Solid-State Lasers (2003)

Pockels-Effekt

- Änderung der Doppelbrechung $\sim E$

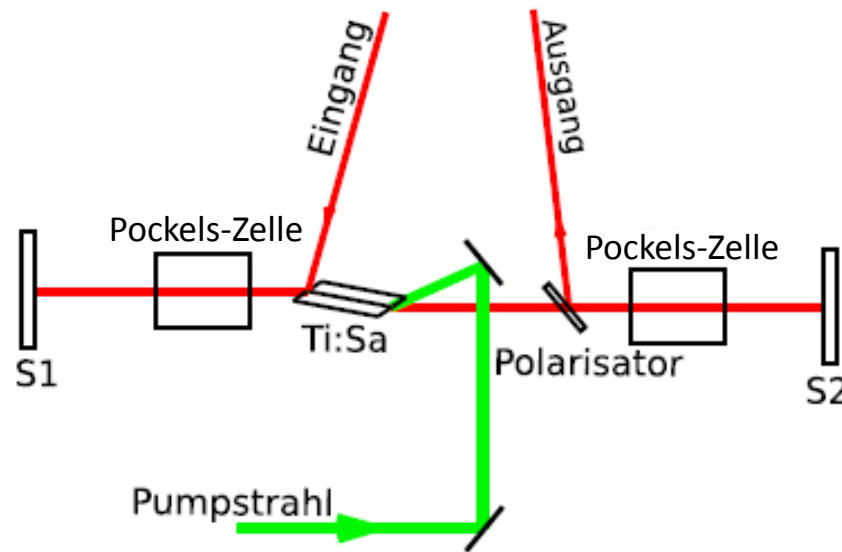
$$\Delta n = n^3 r E = \frac{n^3 r U}{d}$$

$$\Delta n \cdot l = \frac{\lambda}{4} \quad \rightarrow \quad U_{1/4} = \frac{\lambda d}{4 n^3 r l}$$

- Anforderungen an den Kristall:
 - hohe Zerstörschwelle
 - hoher elektro-optischer Koeffizient r
 - gute optische Qualität
- geeignet: KDP longitudinal, LiNbO₃ transversal

Regenerative amplification

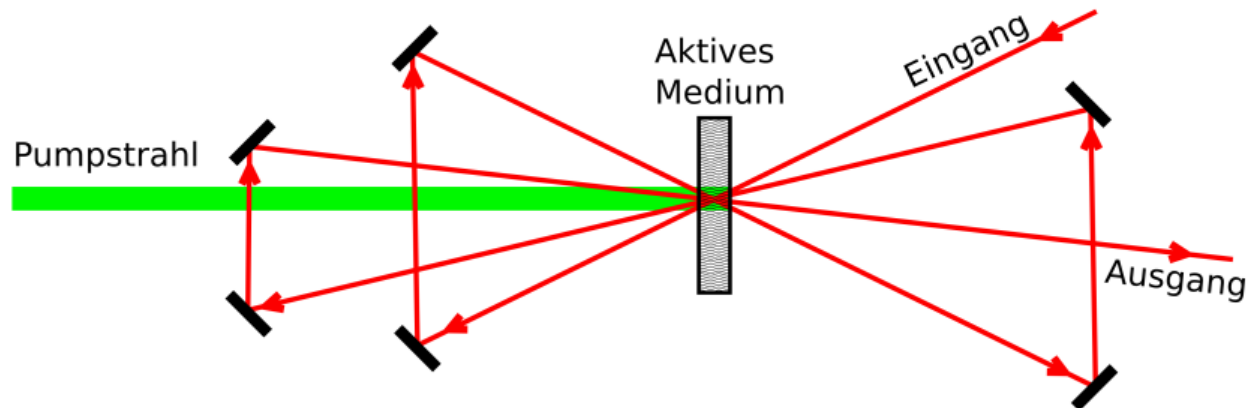
- Q-Switch with 2 Pockels-Cells
- Auskopplung mit Pump-Frequenz (1 kHz)



Dovgal, Entwicklung und Aufbau eines optischen Verstärkers für ps-Laserpulse, Master-Thesis (2009)

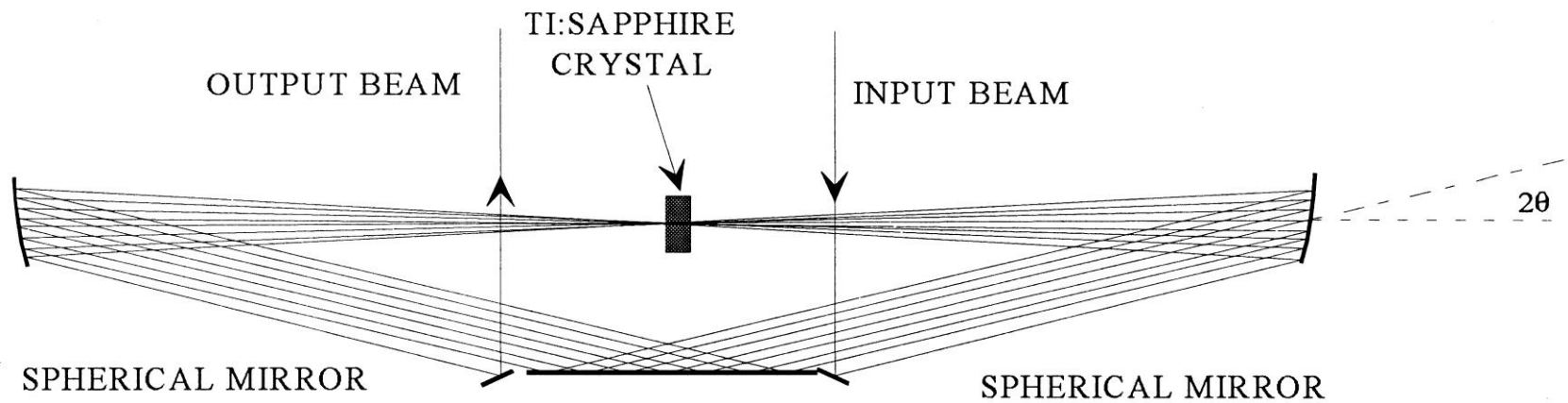
Multi-pass amplification

Umläufe durch Resonatorgeometrie bestimmt



Dovgal, Entwicklung und Aufbau eines optischen Verstärkers für ps-Laserpulse,
Master-Thesis (2009)

Multi-pass amplification



Li and Gibson, Flexible aberration-free multipass amplifier and compressor for ultrashort-pulse amplification, J. Opt. Soc. Am. B 15, 2404 (1998)

Verstärkersysteme

Regenerative

Verstärkung um bis zu 10^{10}

- + Umlaufzahl mit Pockels-Zellen bestimmbar
- + am weitesten verbreitet
- Dispersion / nichtlineare Effekte in den Pockels-Zellen

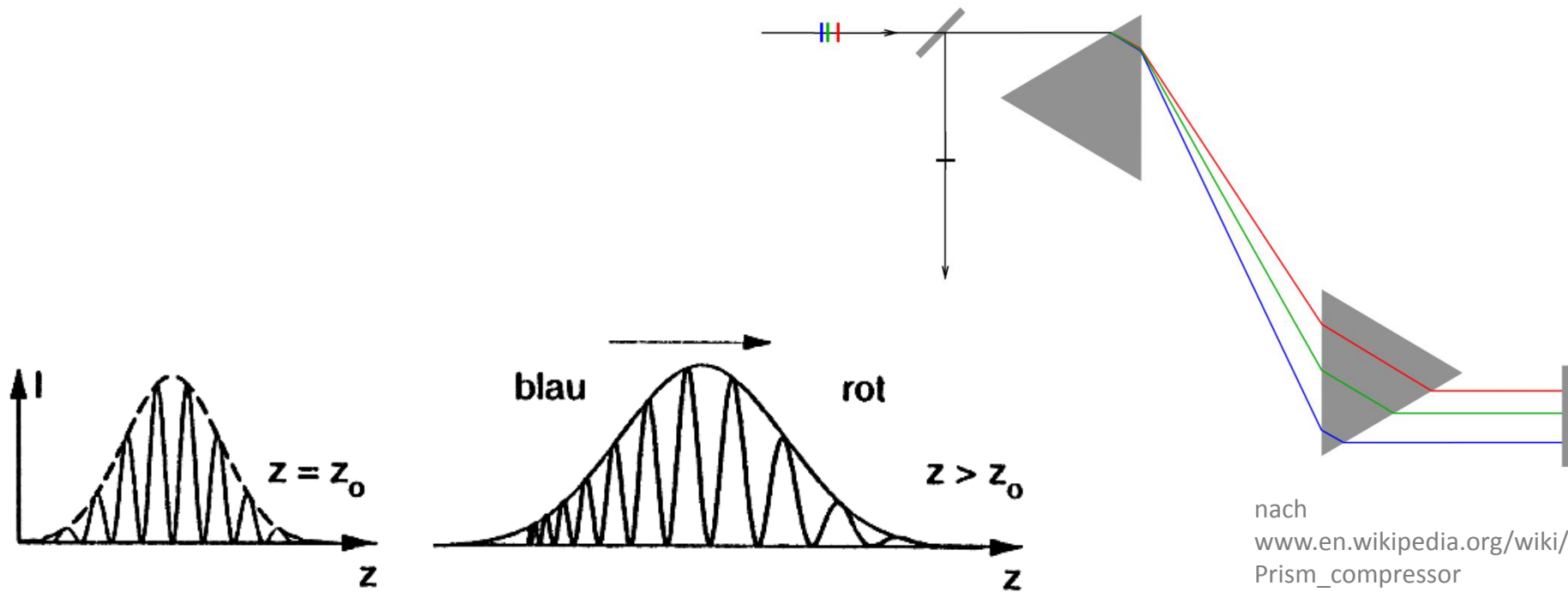
Multi-pass

Verstärkung um bis zu 10

- + geeignet bei hohen Eingangsenergien
- + oft in Folge eines regenerativen Verstärkers
- feste Umlaufzahl durch Geometrie

Kompression gechirpter Pulse

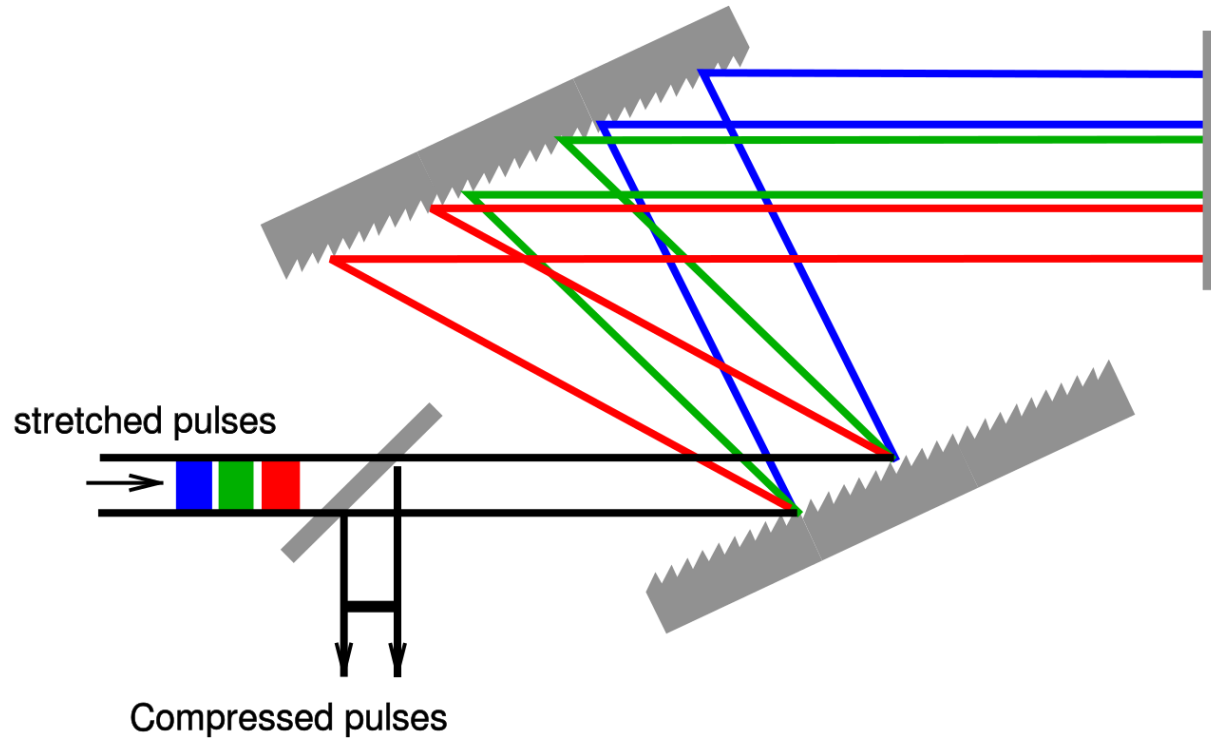
Kompensation des Chirps durch unterschiedliche optische Wege



Demtröder, Laserspektroskopie (2007)

nach
[www.en.wikipedia.org/wiki/
Prism_compressor](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Prism_compressor)

Kompression gechirpter Pulse



www.en.wikipedia.org/wiki/Chirped_pulse_amplification

Aufbau CPA (chirped pulse amplification)

Seed: Ti:Sa

800 nm, 80 MHz, 750 mW (9 nJ)

Kerr-lens modelocking: <100 fs

Pump: Nd:YLF

527 nm (2ω), 1 kHz, 20 mJ

Q-Switch: Pulsdauer <250 ns

Faraday-Isolator

Stretcher

Ti:Sa
Regenerativer Verstärker

Kompressor

CPA

Output: 800 nm, 1 kHz, 1 mJ, <100 fs

Übersicht

Optische Regler

- Kerr-Linse
 - intensitätsabhängige Selbstfokussierung
 - Modenkopplung für fs-Pulse
- Pockels-Zelle
 - Änderung der Polarisation durch externes Feld
 - verwendbar als Q-Switch für ns-Pulse
- Faraday-Effekt
 - magneto-optische Drehung der Polarisation
 - verwendbar als optische Diode

Wie lange muss ein 20 fs Laser (1 kHz) laufen, um 1 s Licht zu erzeugen?

1585 Jahre

Quellen

- Demtröder, Laserspektroskopie (2007)
- Dovgal, Entwicklung und Aufbau eines optischen Verstärkers für ps-Laserpulse, Master-Thesis (2009)
- Eichler, Laser (2006)
- Koechner, Solid-State Lasers (2003)
- Li and Gibson, J. Opt. Soc. Am. B 15, 2404 (1998)
- Renk, Basics of Laser Physics (2012)
- www.altechna.de (03.06.15)
- www.coherent.com (03.06.15)
- www.lasik-finder.de (03.06.15)
- www.rp-photonics.com (03.06.15)
- www.wikipedia.org (03.06.15)
- www.wiley-vch.de (03.06.15)

Aufbau CPA (chirped pulse amplification)

Seed: Ti:Sa

800 nm, 80 MHz, 750 mW (9 nJ)

Kerr-lens modelocking: <100 fs

Pump: Nd:YLF

527 nm (2ω), 1 kHz, 20 mJ

Q-Switch: Pulsdauer <250 ns

Faraday-Isolator

Stretcher

Ti:Sa
Regenerativer Verstärker

Kompressor

CPA

Output: 800 nm, 1 kHz, 1 mJ, <100 fs