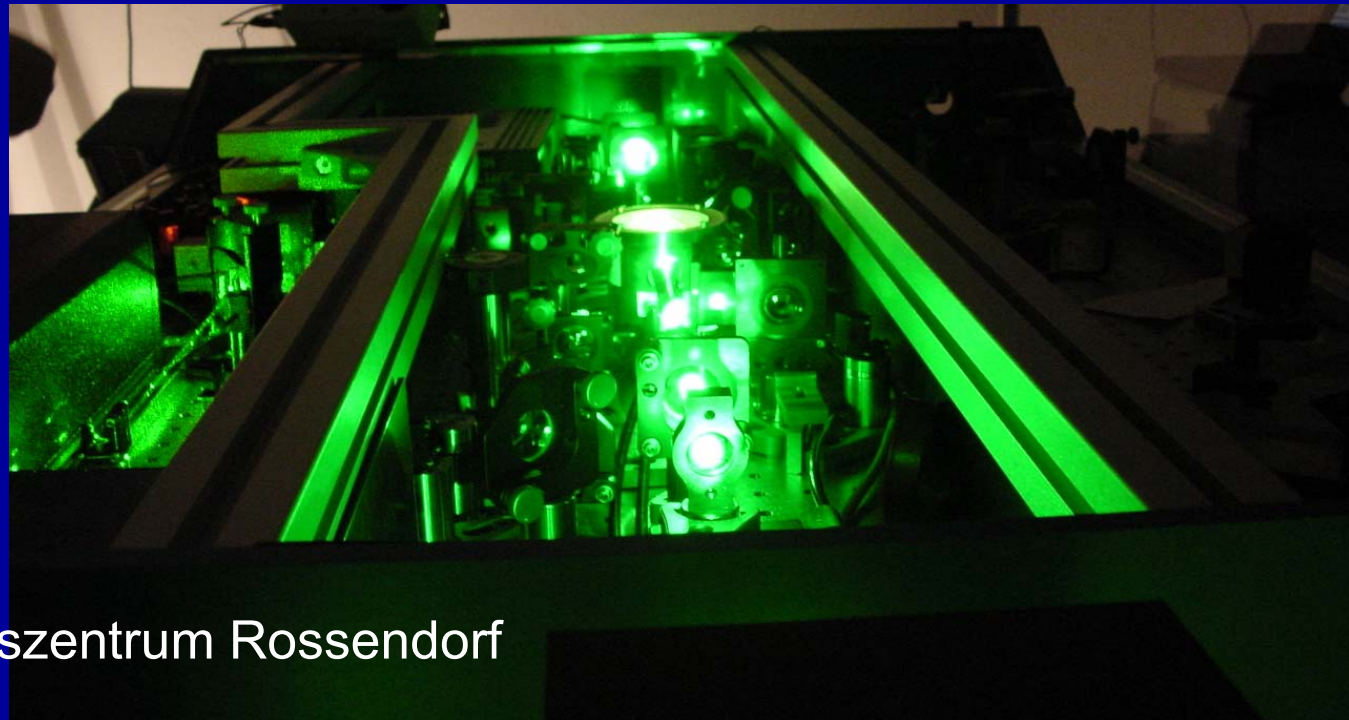


Die Stoppuhren der Forschung: Femtosekundenlaser

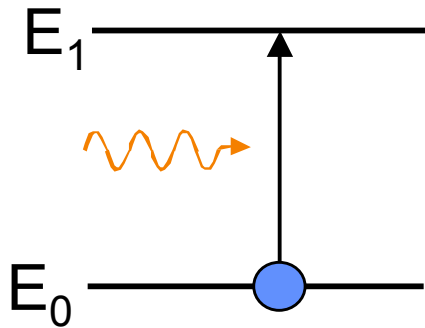
Stephan Winnerl
Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung



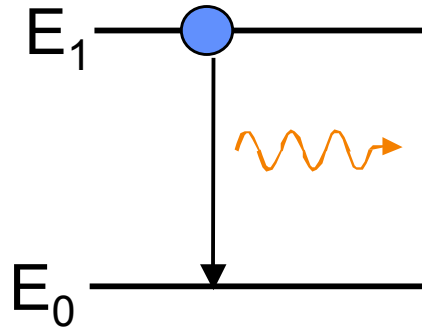
Forschungszentrum Rossendorf

- ◆ Femtosekunden Laserpulse ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$)
Grundlagen und praktische Realisierung
- ◆ Die Anrege-Abfrage (*pump-probe*) Technik in der Femtosekunden-Spektroskopie
Untersuchung der Dynamik von Ladungsträgern und Gitterschwingungen in Halbleitern
- ◆ Zusammenfassung und Ausblick

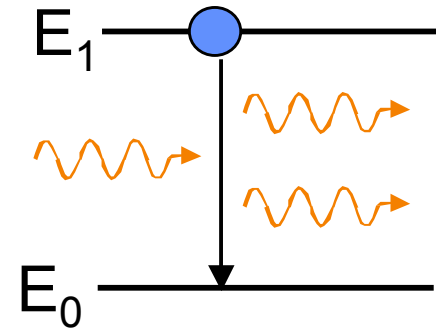
Elementare Prozesse in einem Zwei-Niveau-System



Absorption

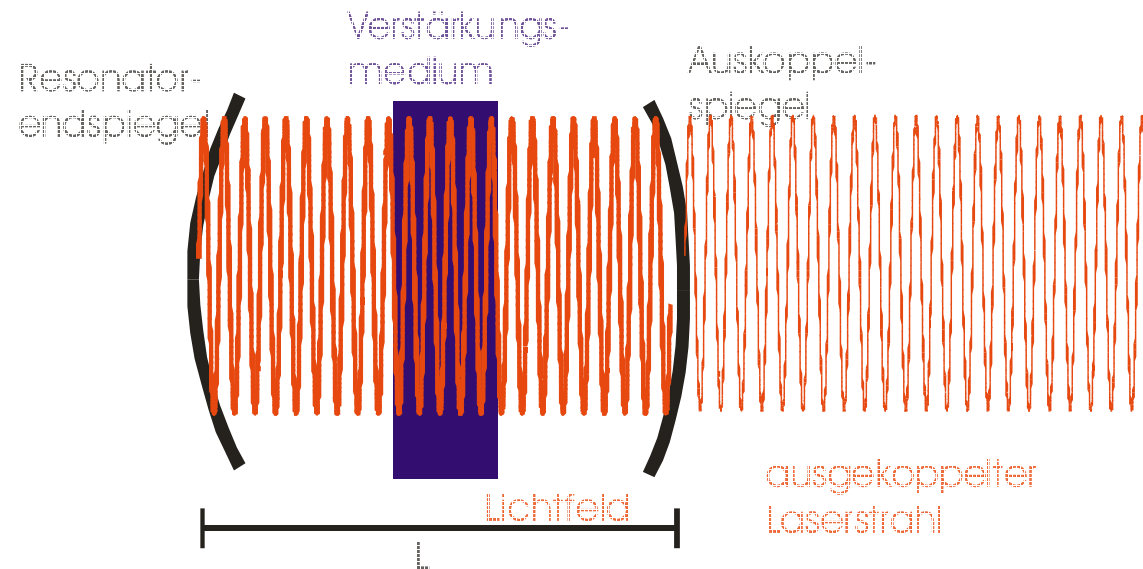


Spontane
Emission

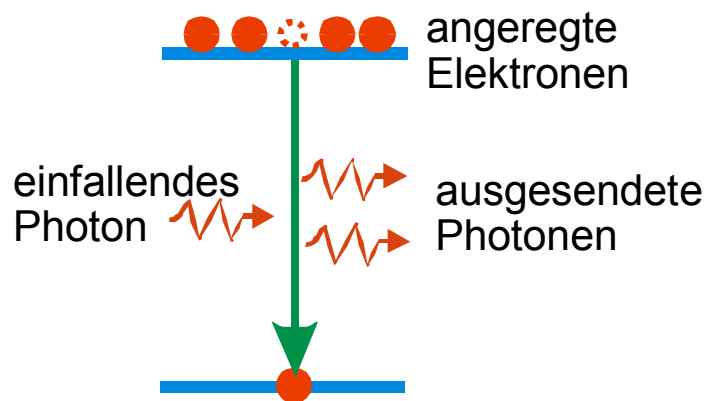


Stimulierte
Emission

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation: LASER



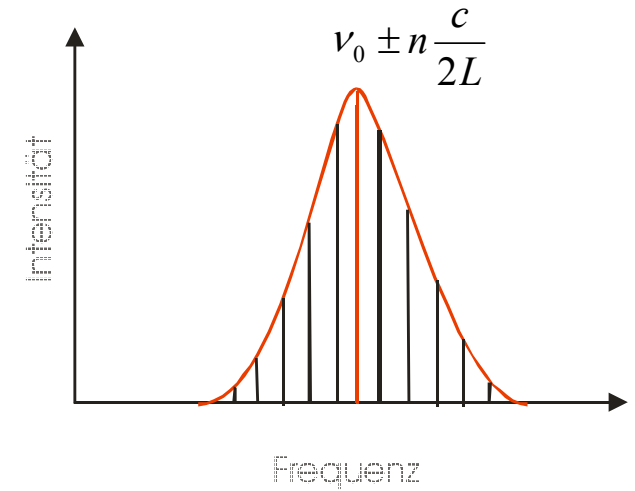
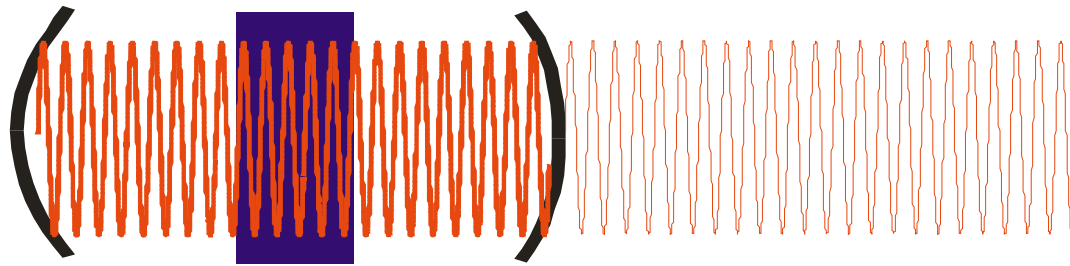
Stimulierte Emission



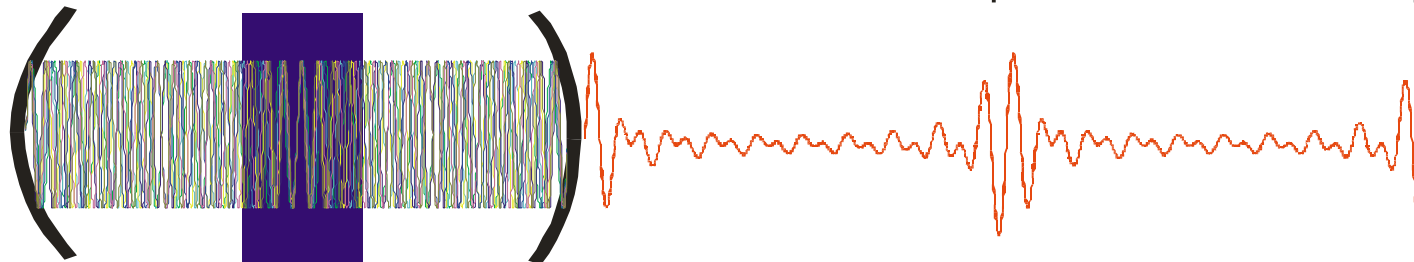
Bedingung für Resonatormoden:
$$\nu_n = n \frac{c}{2L}$$

Bedingung für Laserbetrieb: Gewinn > Verlust

continuous wave (cw) Laser (Dauerstrichlaser)

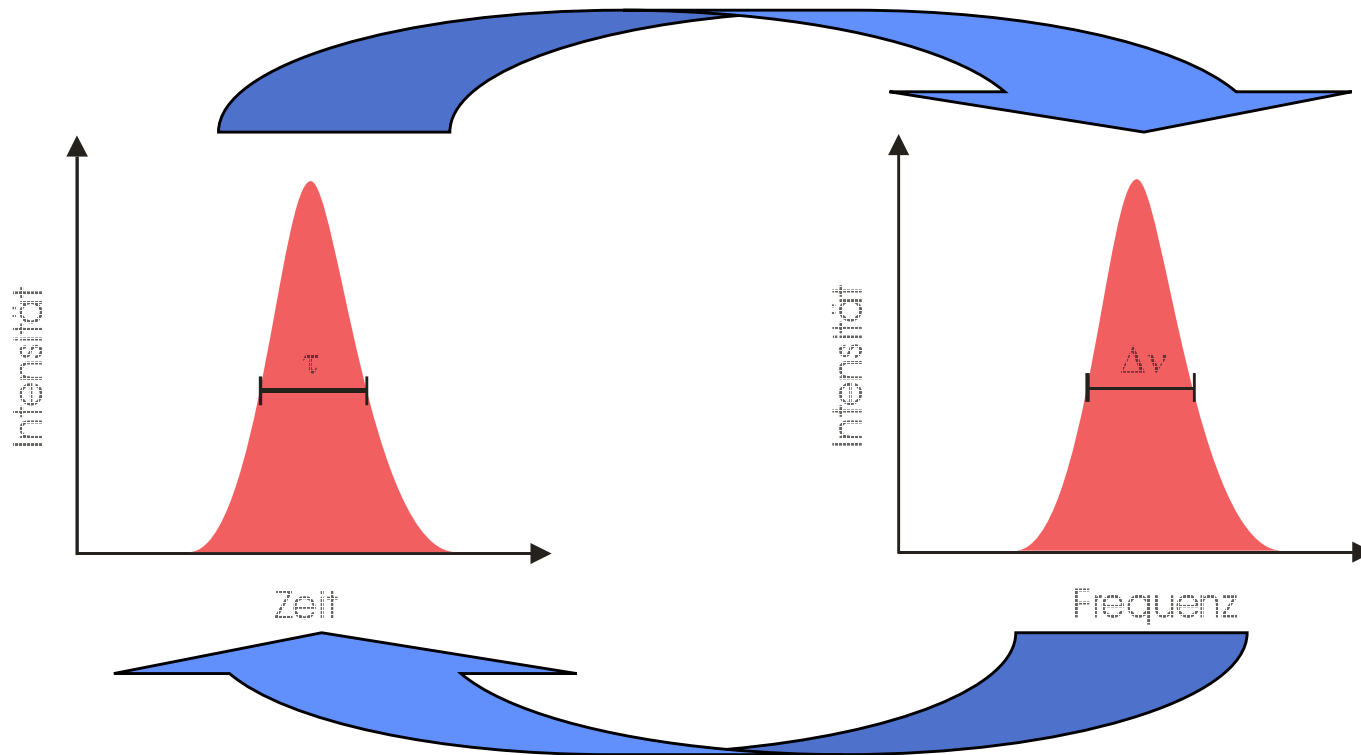


gepulster Laser



Modenkopplung

Femtosekunden Laser



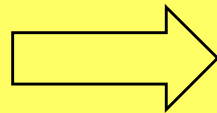
Zeit - Bandbreite Produkt : $\tau \Delta\nu \geq k$
vgl. Zeit - Energie Unschärferelation

Beispiel:

$$\lambda_0 = 800 \text{ nm}$$

$$t = 100 \text{ fs} \quad \Delta\lambda = 10 \text{ nm}$$

$$t = 5 \text{ fs} \quad \Delta\lambda = 200 \text{ nm}$$

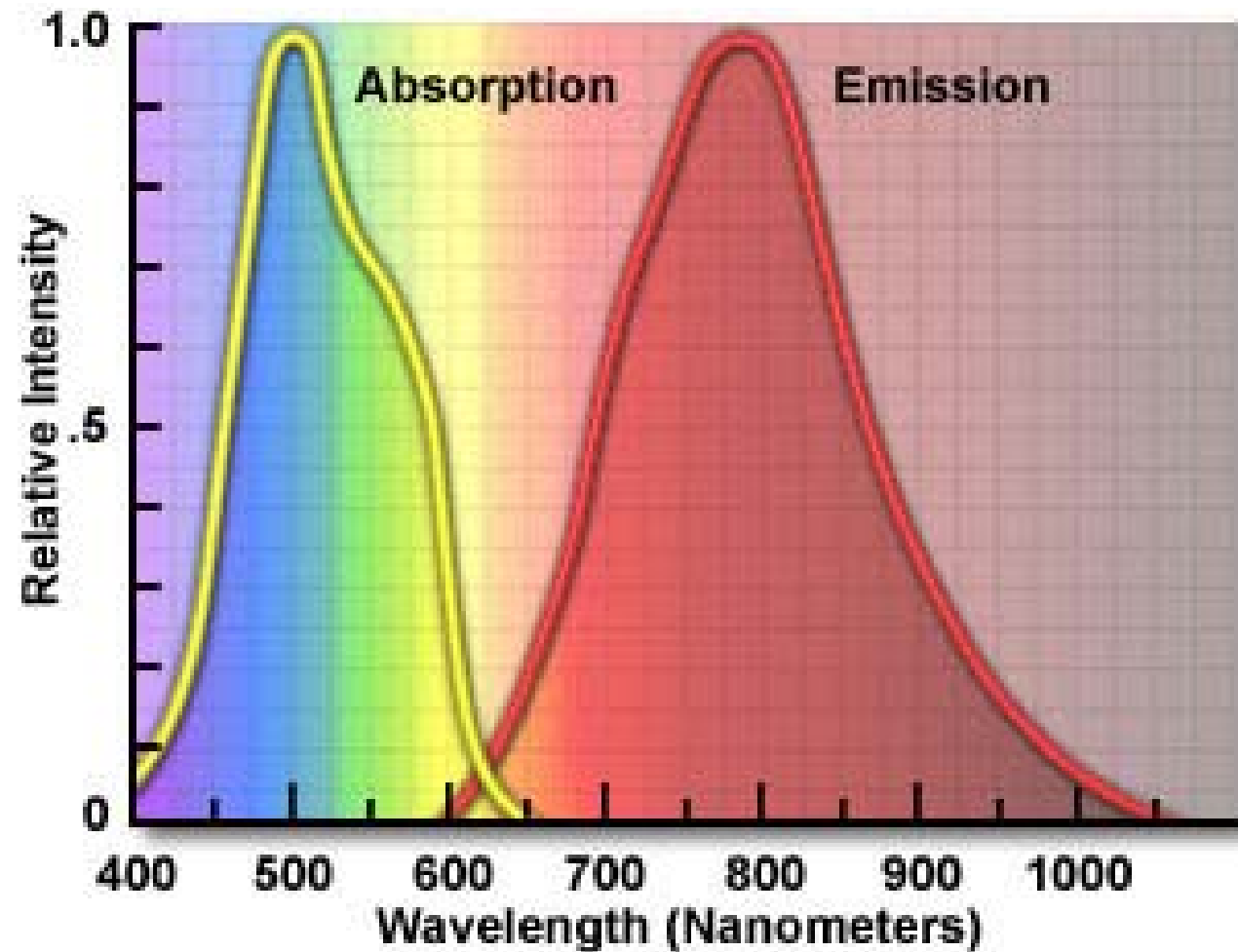


Welches Lasermedium?

Zeit - Bandbreite Produkt : $\tau \Delta\nu \geq k$

vgl. Zeit - Energie Unschärferelation

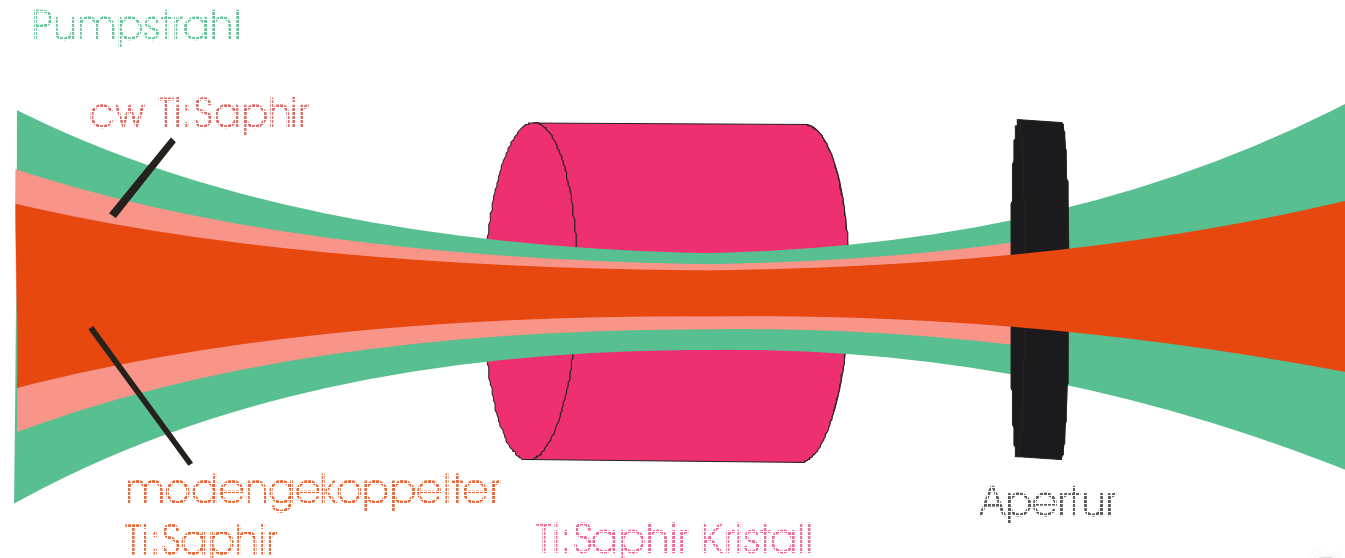
Ti:Saphir Laser



Femtosekunden passiv modengekoppelter Ti:Saphir-Laser

Aktive Modenkopplung: „zu langsam“

⇒ passive Modenkopplung über optische Nichtlinearität

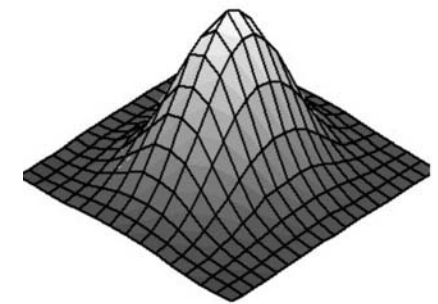


Kerr Effekt: $n(r,t) = n_0 + n_2 I(r,t)$

⇒ intensitätsabhängiger Brechungsindex

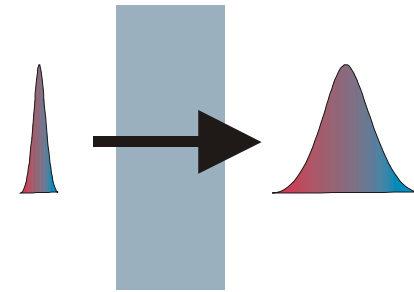
⇒ Kerr Linse ⇒ Selbstfokussierung hoher Intensitäten

⇒ Modenkopplung, Unterdrückung des cw Anteils

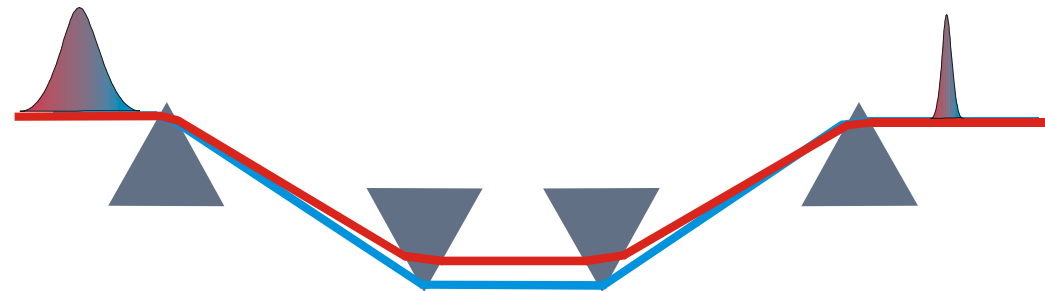


Dispersionskompensation

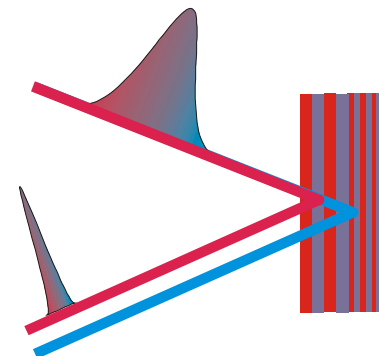
- ◆ Problem: Dispersion $n(\lambda)$
 - Puls läuft auseinander („chirp“)



- ◆ Dispersionskompensation
 - Prismensequenz

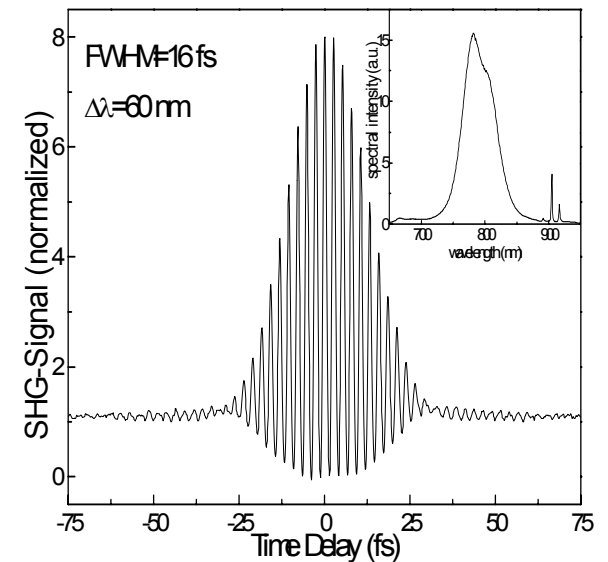
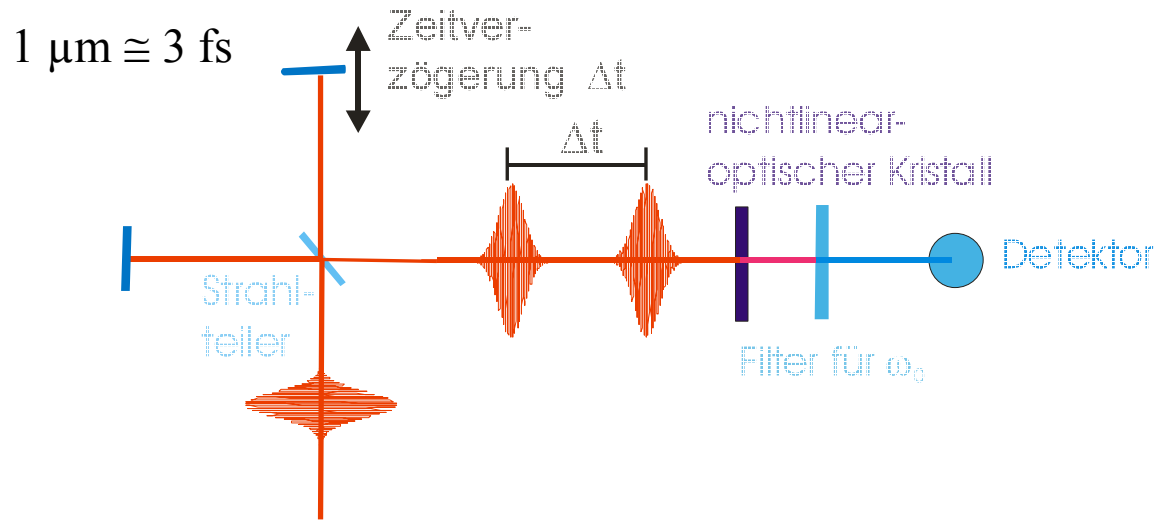


- „chirped mirrors“



Messung kurzer Pulse durch Autokorrelation

Schnellste Elektronik (einige ps) ist zu langsam
 \Rightarrow Autokorrelationsmessung

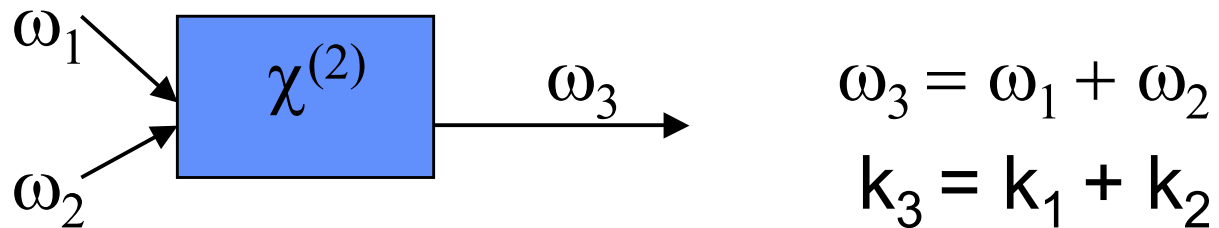


Frequenzverdopplung $P(2\omega) = \chi^{(2)} E_1(\omega) E_2(\omega)$

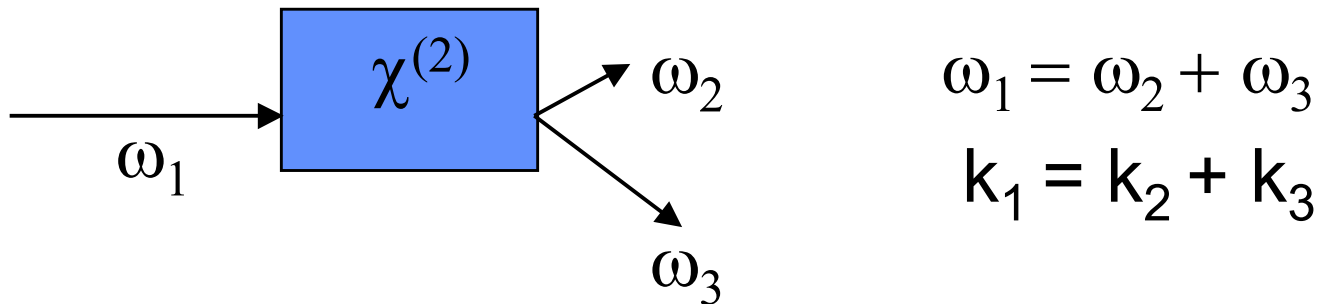
2. Ordnung Korrelationsfunktion $I_2(\Delta t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left| [E(t) + E(t + \Delta t)]^2 \right| dt$

Neue Frequenzen durch nichtlineare optische Prozesse

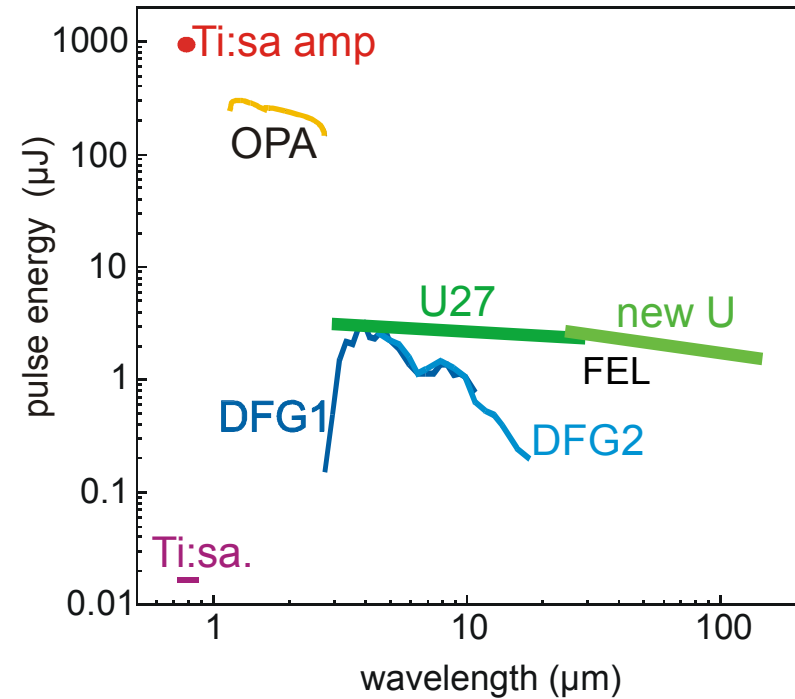
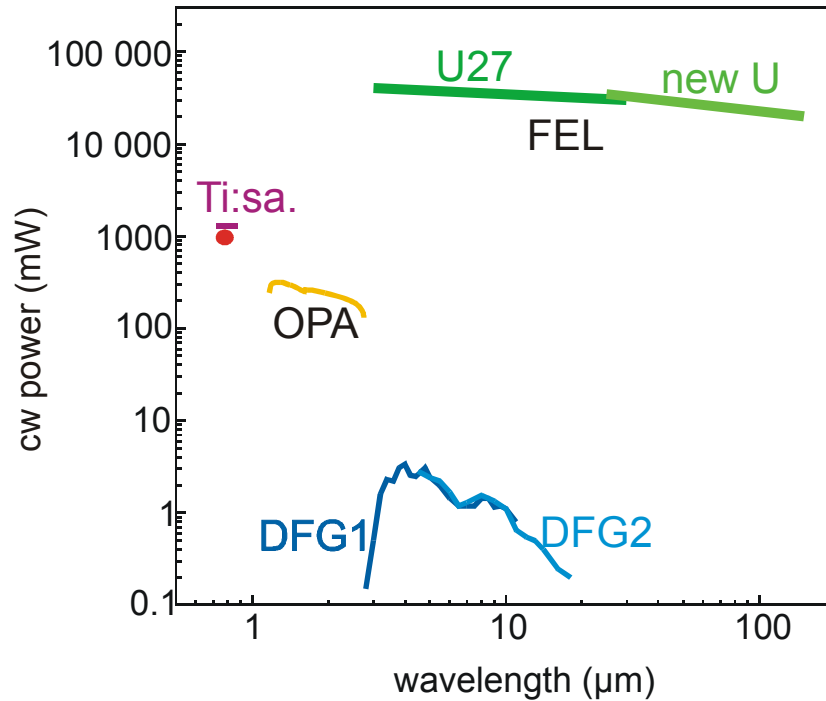
Summenfrequenz-Erzeugung:
Spezialfall: Frequenzverdopplung



Parametrische Generation:

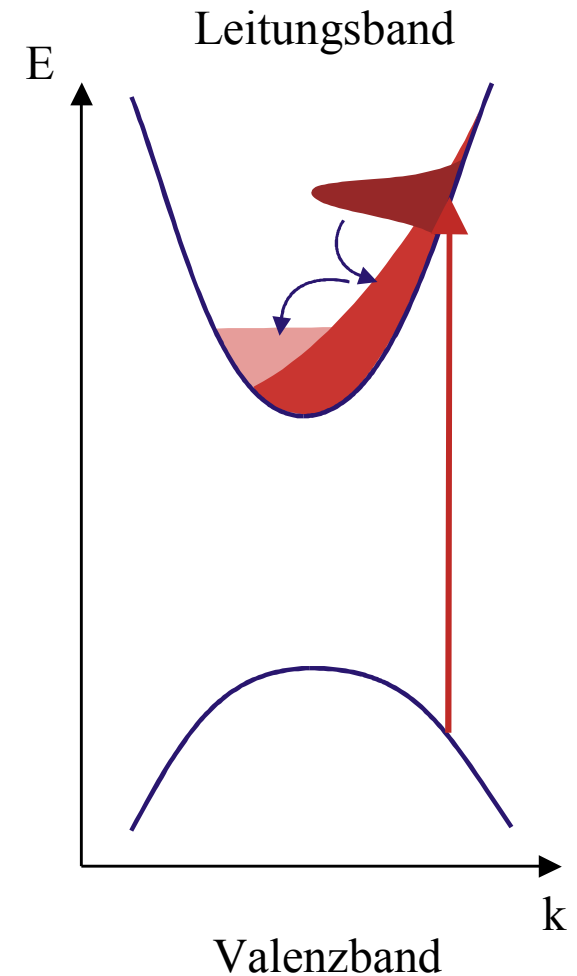
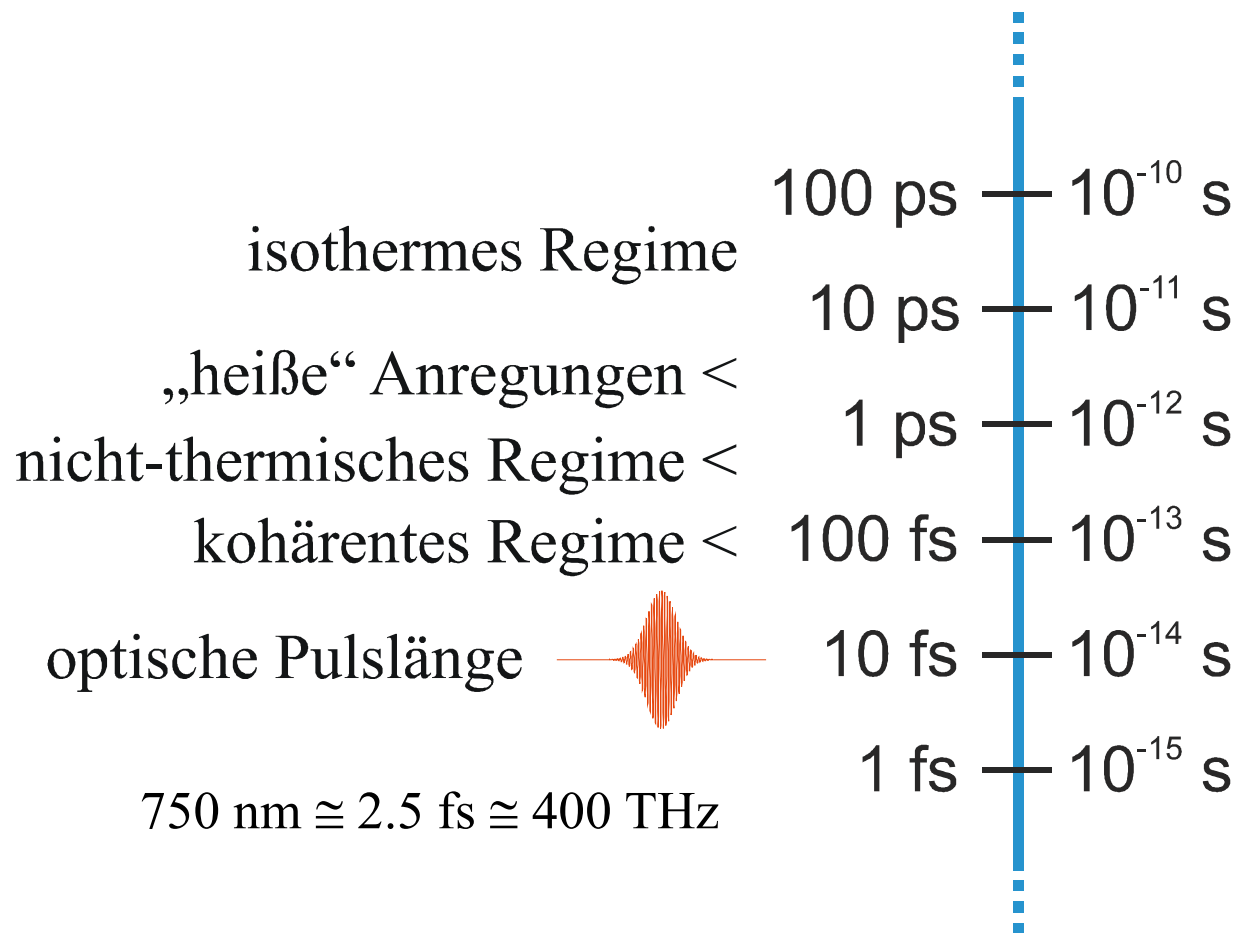


Kurzpulslaser am FZR



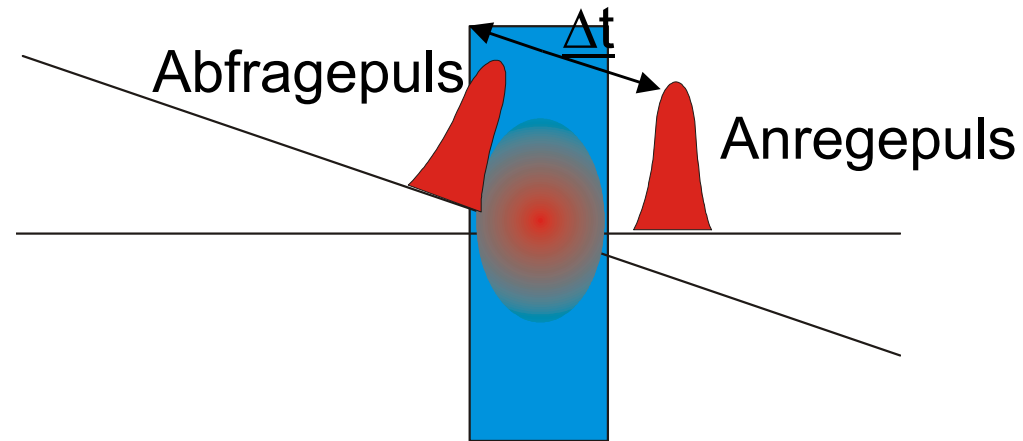
System	f_{rep}	τ_{pulse}
Ti:sapphire osc.	78 MHz	40 fs
Ti:sapphire amp.	1 kHz	25 fs
OPA	1 kHz	25 fs
DFG	1 kHz	25 fs
FEL	13 MHz	0.7...2 ps

Die Zeitskala für Anregungen in Halbleitern



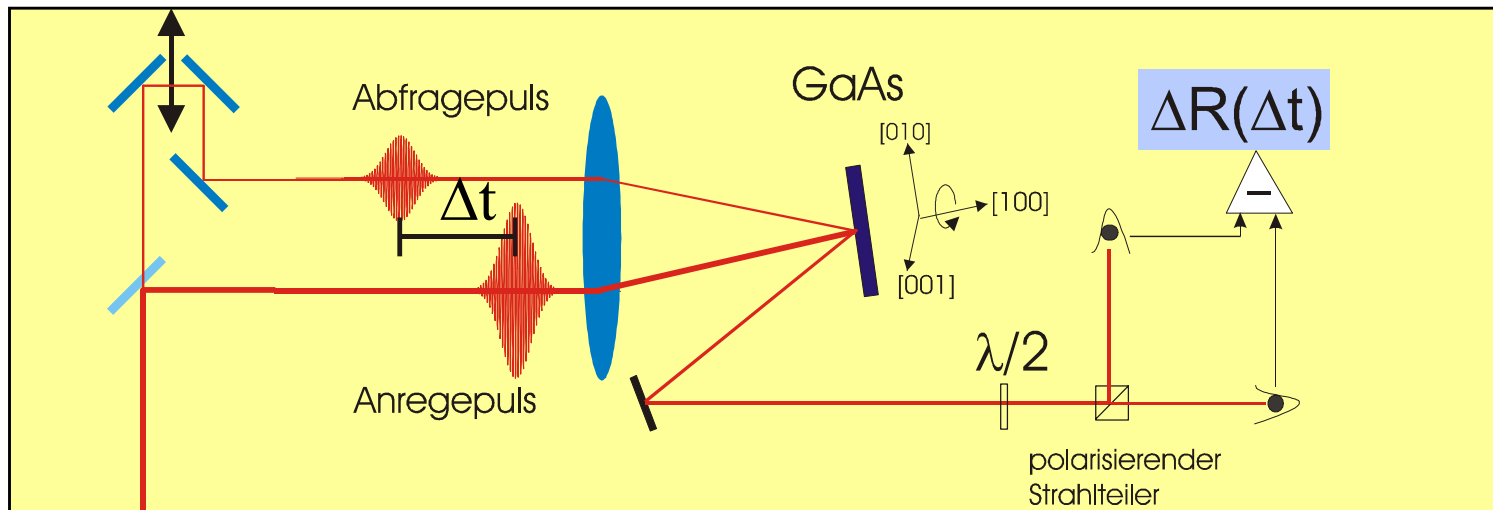
Zum Vergleich:
 Das Universum ist ca. 10 Mrd. Jahre = $3 \cdot 10^{17}$ s alt!

Prinzip eines Anrege-Abfrage-Experiments (pump-probe)



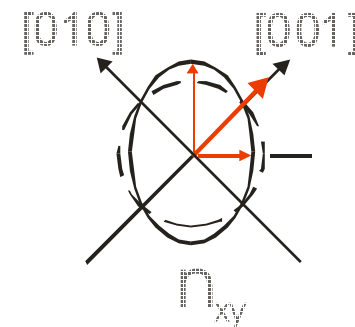
Der Abfragepuls sieht die durch den Anregepuls veränderten optischen Eigenschaften der Probe. Δt wird variiert.

Aufbau eines Anrege-Abfrage-Experiments (pump-probe)



$$\frac{\Delta R(\Delta t)}{R_0} = \frac{\Delta R_{[011]}(\Delta t) - \Delta R_{[01\bar{1}]}(\Delta t)}{R_0}$$

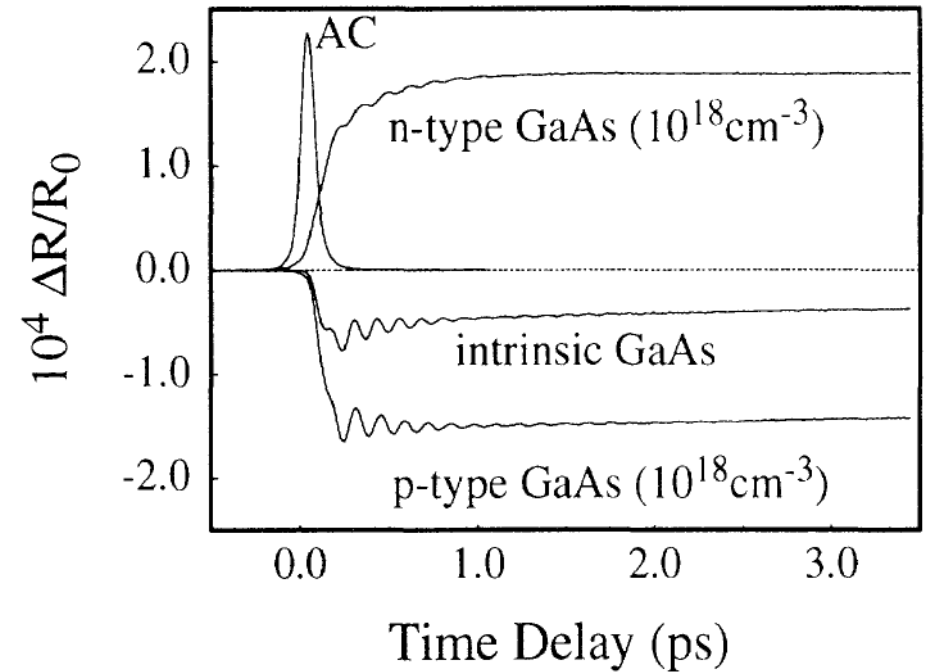
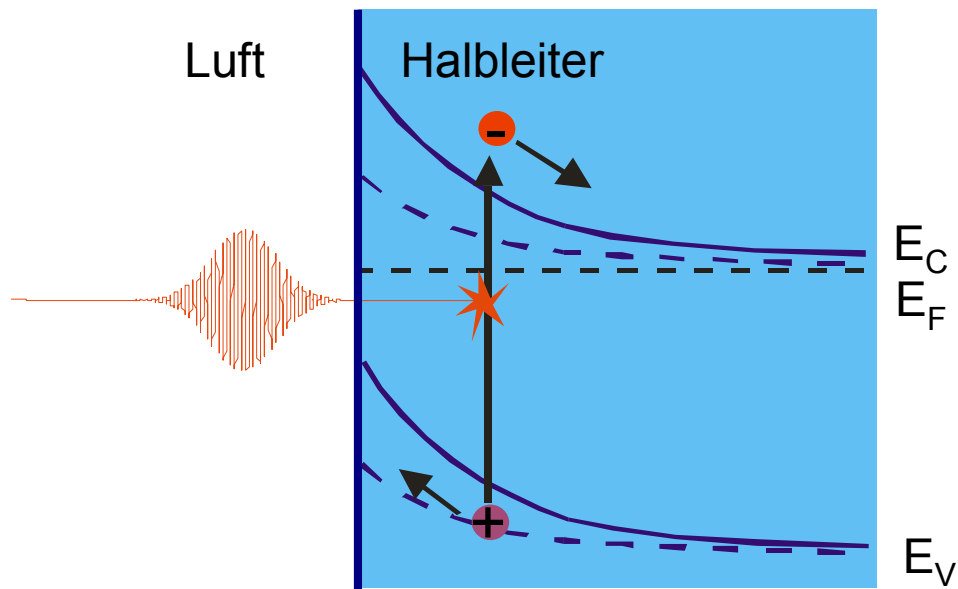
$$= \frac{4r_{41}n_0^3}{n_0^2 - 1} \Delta E_z(\Delta t)$$



Indikatrix in der (100) Ebene

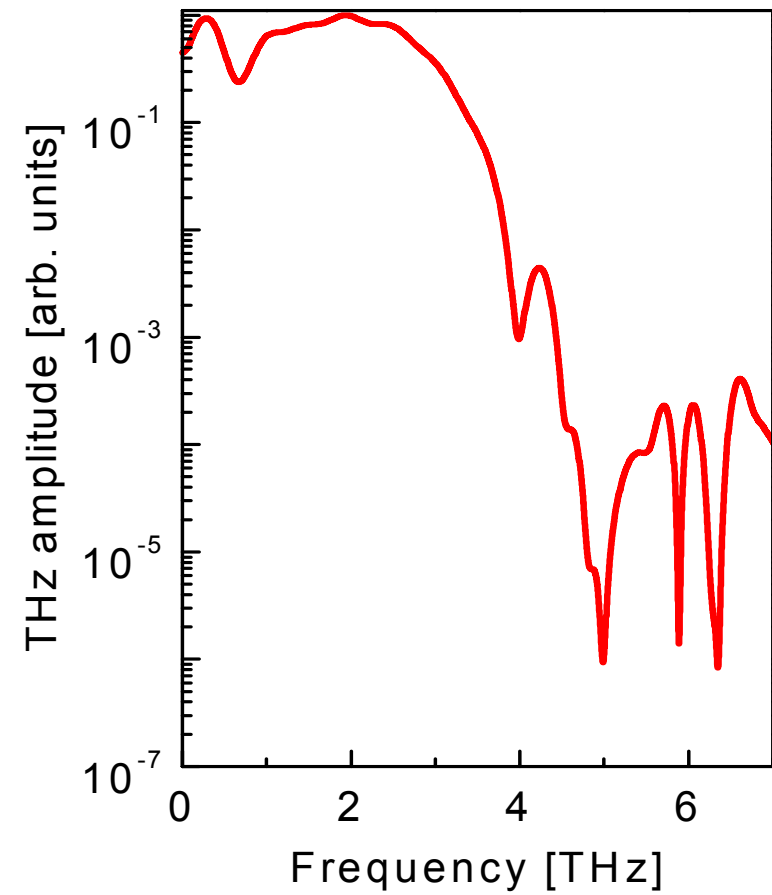
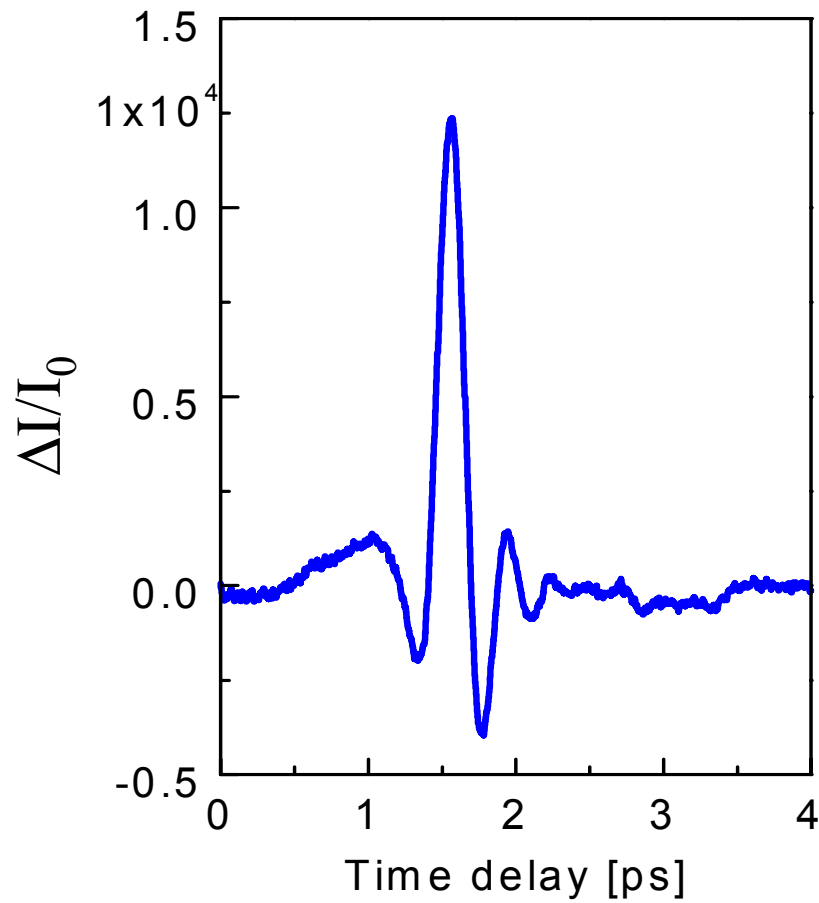
$\otimes E_z$

Experiment: fs-Anregung an einer Halbleiteroberfläche



T. Dekorsy et al., PRB **47**, 3842 (1993)

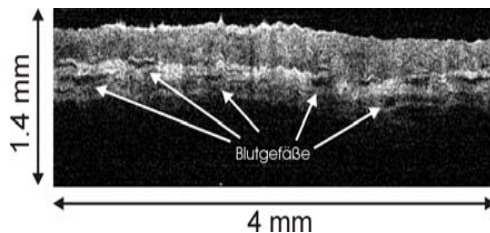
THz-Emission (InGaAs Oberflächenemitter)



Ausblick auf das Anwendungsspektrum von fs-Lasern

- ◆ Spektroskopie an Halbleiter-Quantenstrukturen
- ◆ Erforschung von chemischen Reaktionen
- ◆ Quantenkryptographie
- ◆ Medizinische Anwendungen, insbesondere Augen- und Zahn-OP

Optische Kohärenztomographie



Beispiel für Bildgebungsverfahren i.d.
Medizin: in-vivo, nicht-invasiv
Bild der Innenseite einer Unterlippe

Zusammenfassung

- ◆ Erzeugung ultrakurzer Laserpulse
 - breitbandiges Verstärkungsmedium: Titan:Saphir
 - passive Modenkopplung: Kerr-Effekt
 - Dispersionkontrolle: Prismen, *chirped mirrors*
- ◆ Umsetzen der Laserfrequenzen mit Hilfe von nichtlinearen optischen Effekten
- ◆ Experimente mit Femtosekundenlasern
 - Die Anrege-Abfrage-Technik
 - Anregungen an Halbleiteroberflächen
 - Ausblick auf weitere Anwendungen

Anhang: Internetseiten zum Thema

Abschließend möchte ich ein paar Internetseiten zum Thema angeben. Leider sind die Adressen der Seiten oft sehr lang. Am besten suchen Sie selbst nach den Stichworten, die Sie am meisten interessieren. Die Datei:

http://www.fgsw.uni-stuttgart.de/fst/dateien/fstgesamt/3sat_der_meisel_fuer_die_nanowelt.pdf bietet eine kurze Übersicht über die Anwendungsgebiete von Femtosekundenlasern.

Kurze Informationen zur Untersuchung chemischer Reaktionen mit Femtosekundenlasern gibt es unter:

<http://www.weltderphysik.de/themen/quanten/licht/laser/femtosekundenlaser/>

Etwas ausführlichere unter:

<http://www.pci.uni-heidelberg.de/pci/fpraktikum/ss00/Woerl.pdf>

Informationen zur Quantenkryptographie finden sich z.B. unter:

http://www.innovations-report.de/html/berichte/preise_foerderungen/special-2363.html

Etwas ausführlichere unter:

<http://www.pro-physik.de/Phy/pdfs/ISSART12536DE.PDF>

Als Einstieg zu den medizinischen Anwendungen möchte ich

http://www.ltb.fta-berlin.de/info_6.html

und

http://www.fgsw.uni-stuttgart.de/fst/presse/unterseiten/statements/weigl/texte/Weigl_Medizin.pdf

nennen.