

**Hochschule für Technik  
und Wirtschaft Berlin**

University of Applied Sciences

# Optik

Sophie Kröger

(Seminar gemeinsam mit Markus Nölle)

- Was ist Licht überhaupt?!
- Gauß'sche Optik, nicht-lineare Optik
- Laser: Was bedeutet *monochromatisch*, *kohärent* und *parallel*?
- Was sind Laser-Moden?
- kurze Pulse versus hohe Auflösung
  
- **Forschungsthemen:**
  - ✓ Hochauflösende Spektroskopie
  - ✓ Laserentwicklung: cw-OPO
  - ✓ Lasermaterialbearbeitung

## Elektromagnetische Wellen

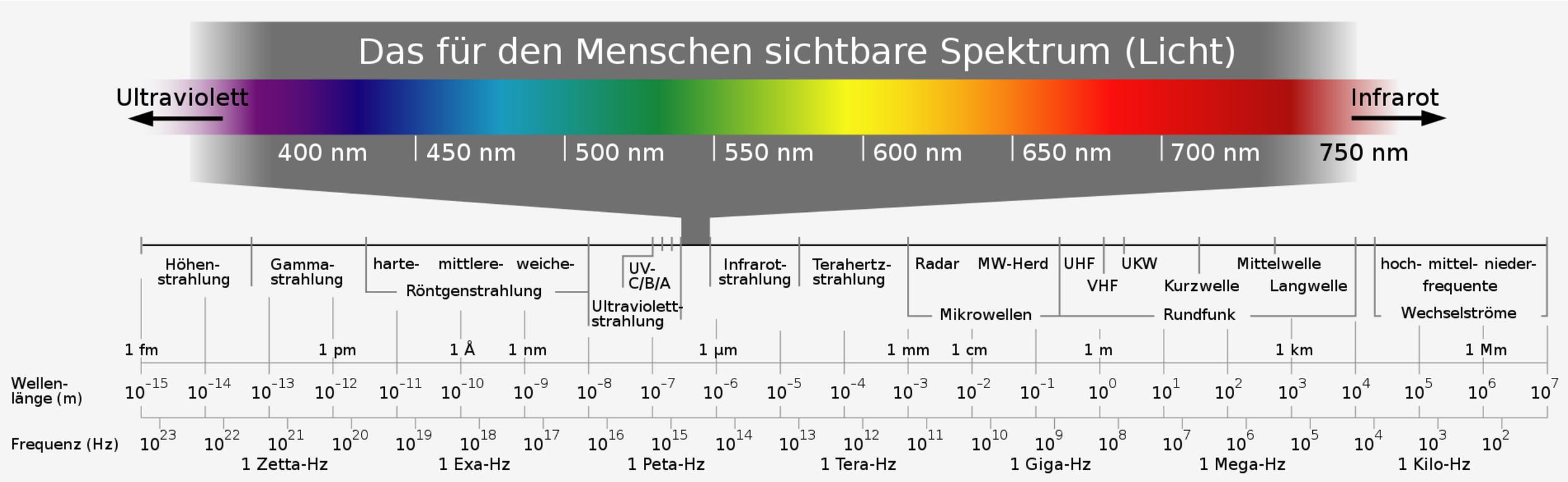


Abb: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic\\_spectrum\\_-de\\_c.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_spectrum_-de_c.svg)

Was ist Licht?

Energie der Photonen

Teilchen?

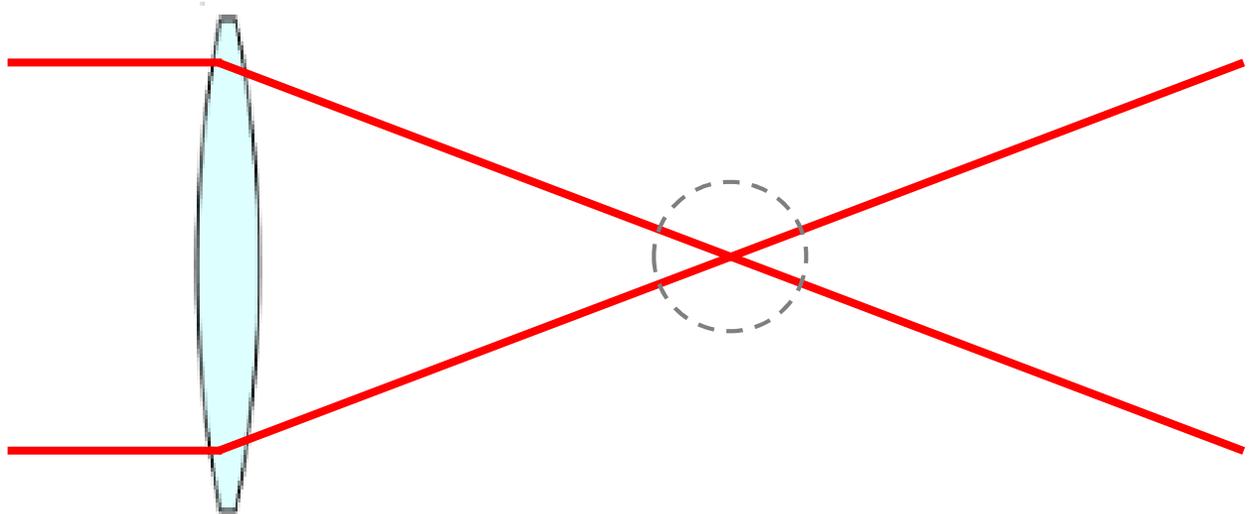
Welle?

Wellenlänge, Wellenzahl

Strahl?

Strahlprofil

- Strahlenoptik
- Wellenoptik
- Quantenoptik



Strahlenoptik: Fokussierung **beliebig klein**

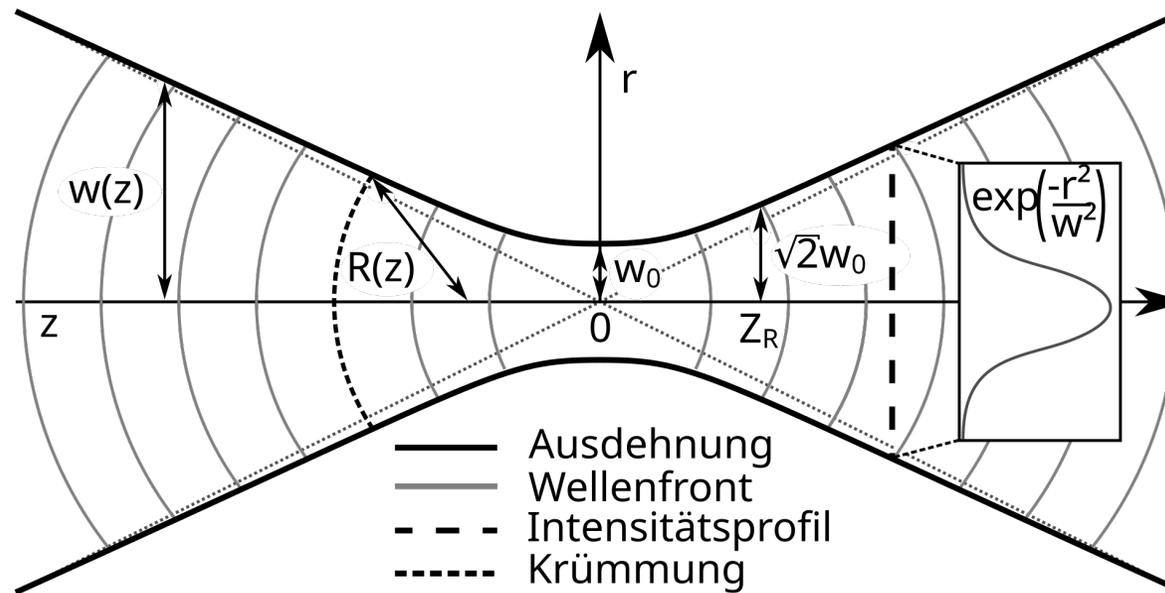
Gauß'sche Optik:

Fokus nicht unendlich klein  $\Rightarrow$  Taille

Strahl näherungsweise linear bis zur der schmalsten Stelle

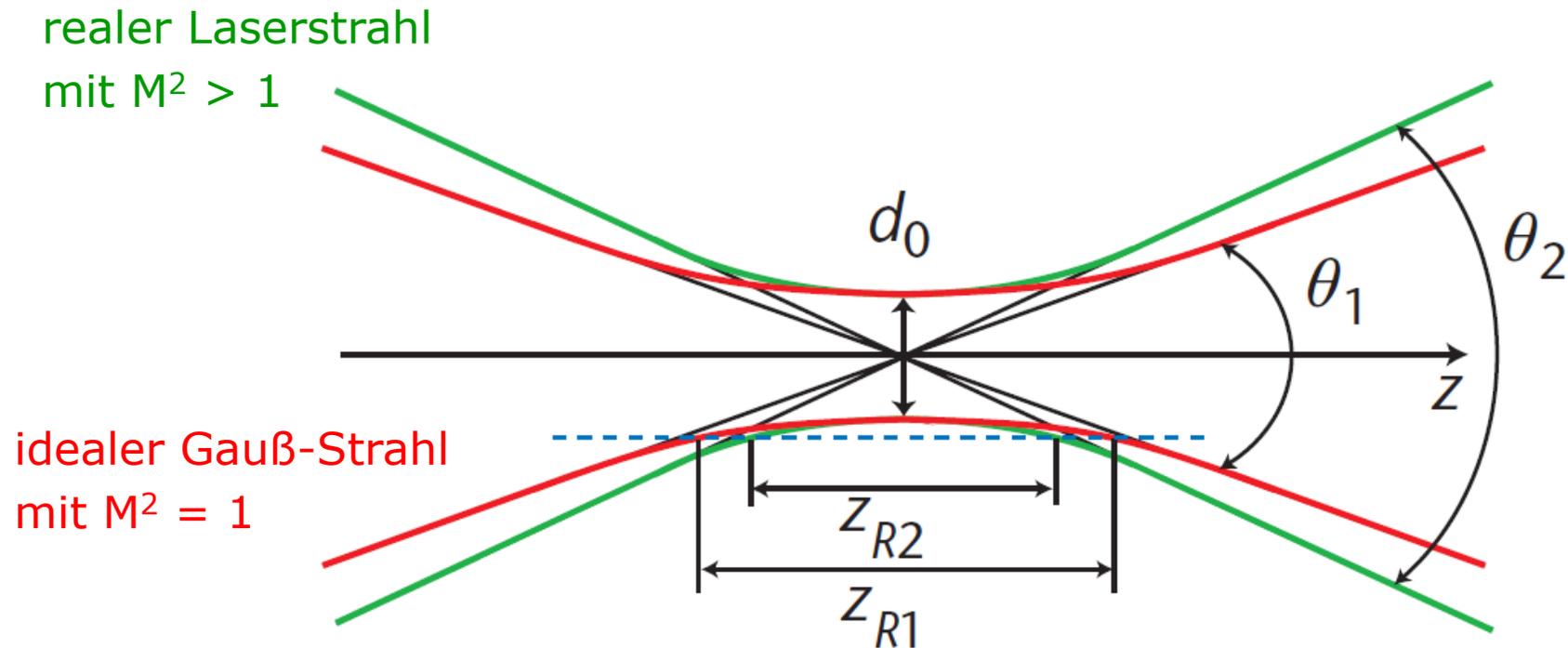
räumliche Intensitätsverteilung quer zur Ausbreitungsachse: Gauß-Profil

räumliche Intensitätsverteilung längs der Ausbreitungsachse: Lorentz-Profil



minimaler Fokus auch abhängig von der Qualität des Strahls

⇒ Maß für die Fokussierbarkeit: Beugungsmaßzahl  $M^2$

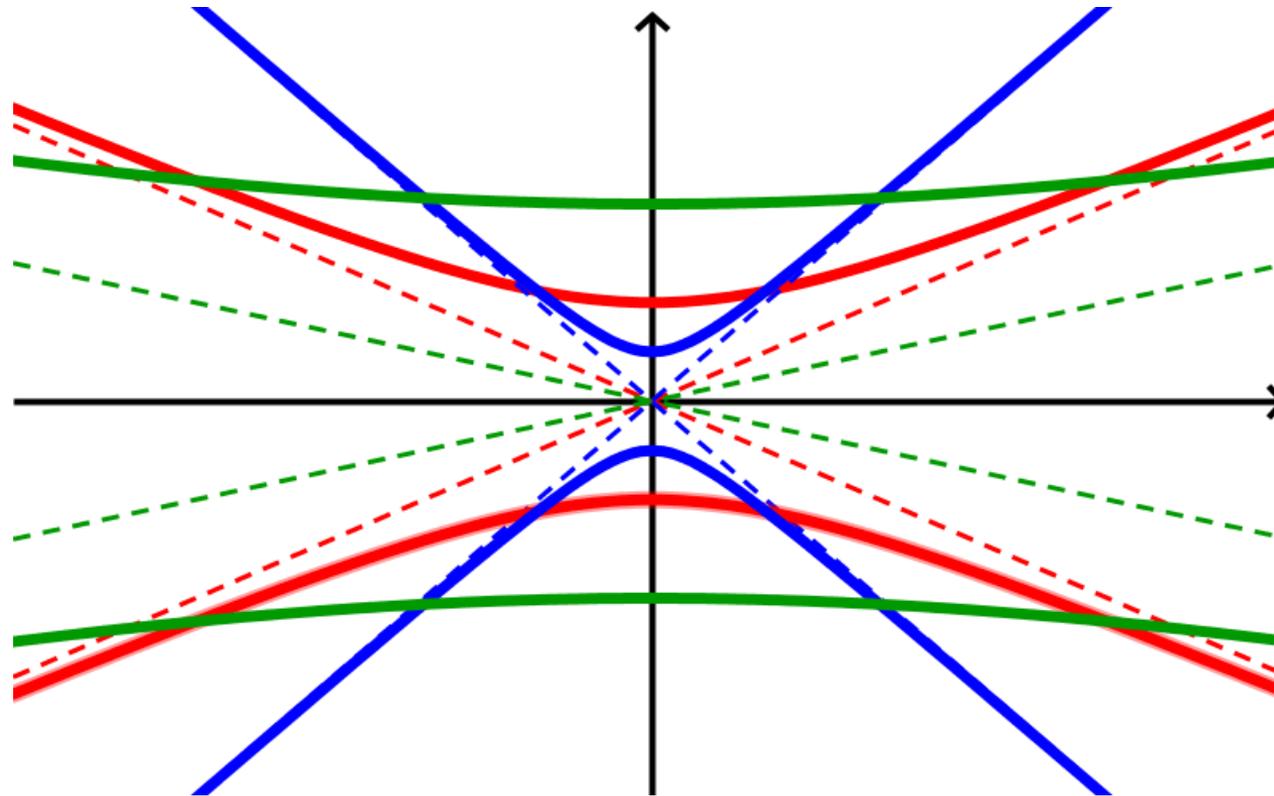


# Gauß'sche Optik

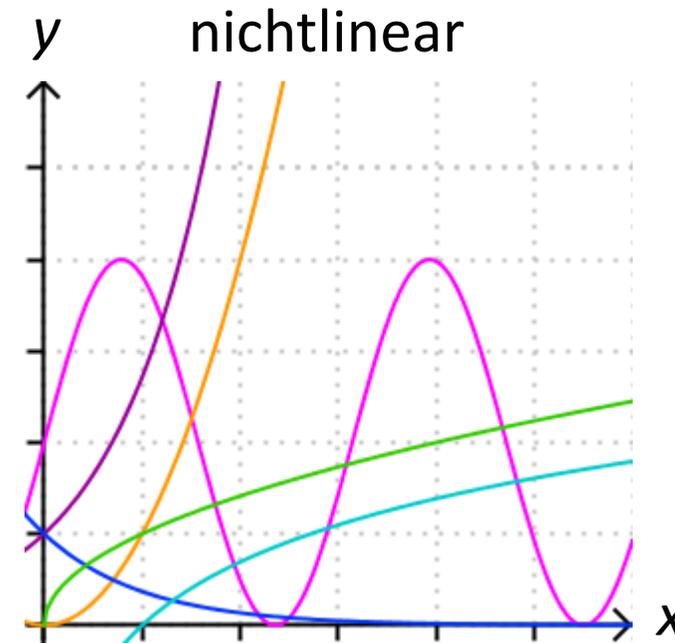
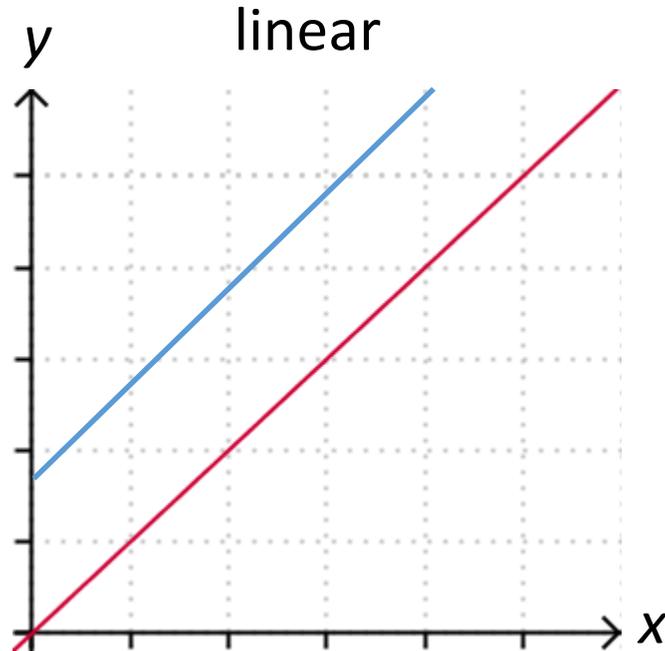
bei Fokussierung: Strahldurchmessers der Taille abhängig vom Divergenzwinkel.

⇒ minimaler Fokus abhängig von der Wahl der Linsen

⇒ Fokus kann nicht gleichzeitig sehr klein und sehr lang sein



Was bedeutet "nichtlinear"?



**nichtlineare Optik**: Sammelbegriff für Effekte, die bei hohen Lichtintensitäten auftreten

Ursache: **nichtlineare** Reaktion eines Mediums

## lineare Reaktion eines Mediums:

Atome bzw. Moleküle wie harmonische Oszillatoren:  
induzierte elektrische Dipolmomente,  
proportional zur elektrischen Feldstärke



⇒ Dipole senden Licht der gleichen Frequenz aus das einfallende Licht

⇒ Frequenz bleibt bei Wechselwirkung mit Materie unverändert  
(Reflexion, Transmission oder Streuung)

Licht bei Durchgang durch „normales“ Medium:

nur Veränderung der Phasengeschwindigkeit des Lichtes

Was bedeutet "nichtlinear" beim Durchgang durch ein Medium?

**niedrige Intensitäten**  $\Rightarrow$  Polarisation linear zum elektrischen Feld

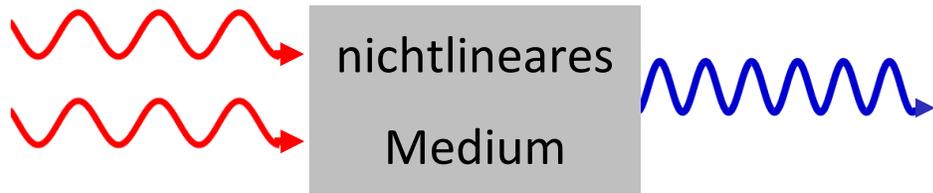
Proportionalitätsfaktor: elektrische Suszeptibilität

**hohe Intensitäten**  $\Rightarrow$  auch Terme höherer Ordnung

Überlagerungen verschiedener Lichtwellen mit unterschiedlichen Frequenzen

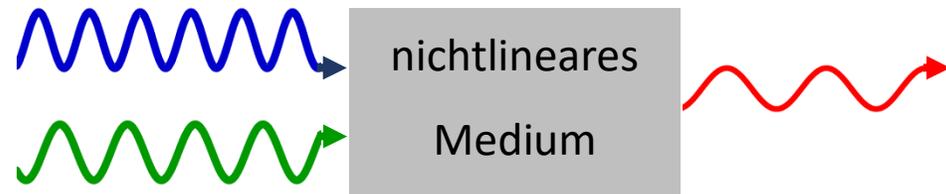
$\Rightarrow$  neue Frequenzen

## Frequenzverdopplung, SHG (second harmonic generation)

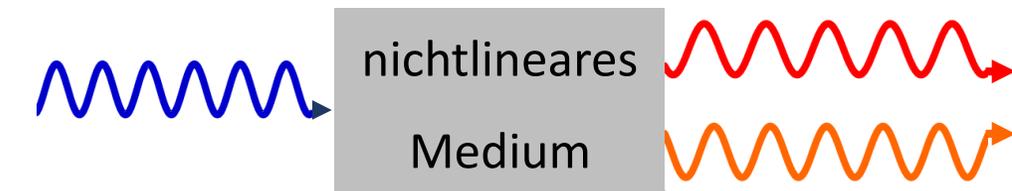


auch möglich: THG (third harmonic generation), ...

## Summen- oder Differenzfrequenzerzeugung



## Parametrischer Prozess ("Frequenzteilung")



Bei all diesen Prozessen gilt:

- **Energieerhaltung**
- **Impulserhaltung** (Photonen-Impuls)

## monochromatisch, kohärent und parallel

Idealvorstellung

in Realität: nichts ist perfekt monochromatisch, kohärent und parallel

Linienbreite und Kohärenzlänge:

Maß für die Annäherung an das Ideal  
der monochromatischen Strahlung

Linienbreite von Lasern:

von 10 nm bis  $10^{-11}$  nm

(bzw. von 10 THz bis 100 kHz

oder  $300 \text{ cm}^{-1}$  bis  $3 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^{-1}$  )

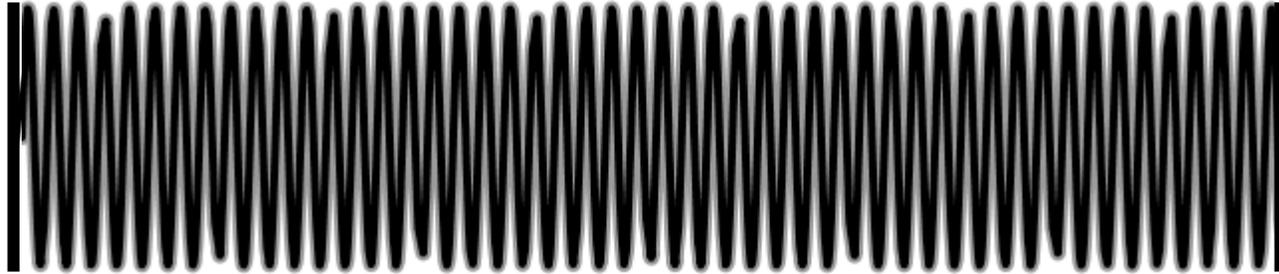
Typische Kohärenzlängen	
Lasertyp	Kohärenzlänge
Lampengepumpter Nd:YAG	1 cm
HeNe (unstabilisiert)	20 cm
HeNe (stabilisiert)	1 km
Argon/Krypton	1 cm
Argon/Krypton + Etalon	1 m
Farbstofflaser	5 – 250 m
Faserlaser (unstabilisiert)	50 $\mu\text{m}$
Faserlaser (stabilisiert)	100 km
Freilaufender Diodenlaser	< 1 mm
Diodenlaser mit externem Resonator	100 – 1000 m

**monochromatisch, kohärent und parallel**

je größer der Laser um so besser monochromatisch und parallel die Strahlung

Resonatorlängen: von 200 nm bis über 2 m

Lasermode = stehende Welle im Laserresonator



Die wievielte Mode?

$$L = n \cdot \lambda$$

angenommen:  $L = 50 \text{ cm}$ ,  $\lambda = 500 \text{ nm}$   $\Rightarrow n = 10^6$

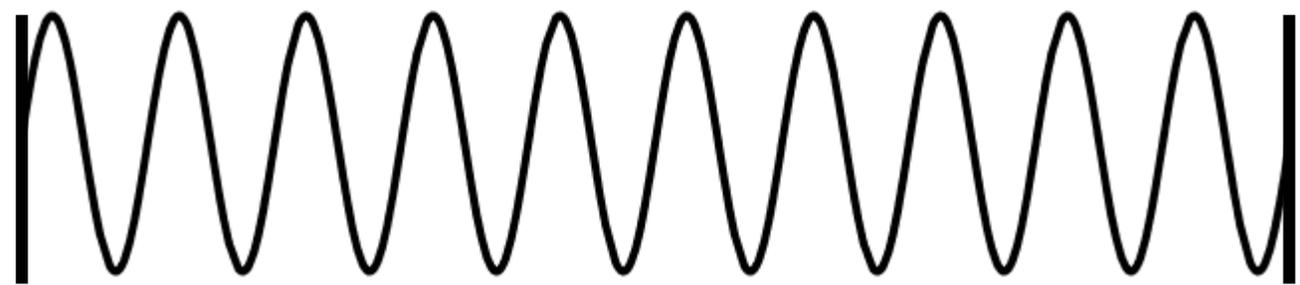
$L$  : optische Länge des Resonators

$\lambda$  : Wellenlänge

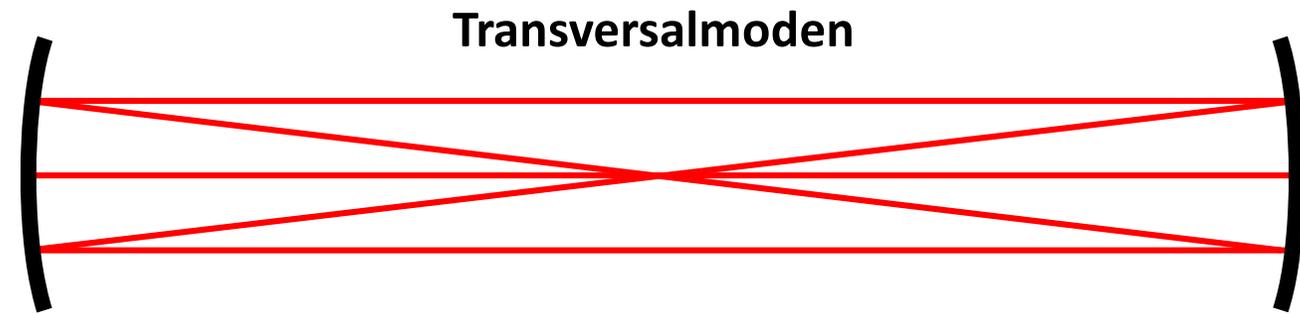
$n$  : Anzahl der Moden

# Lasermoden

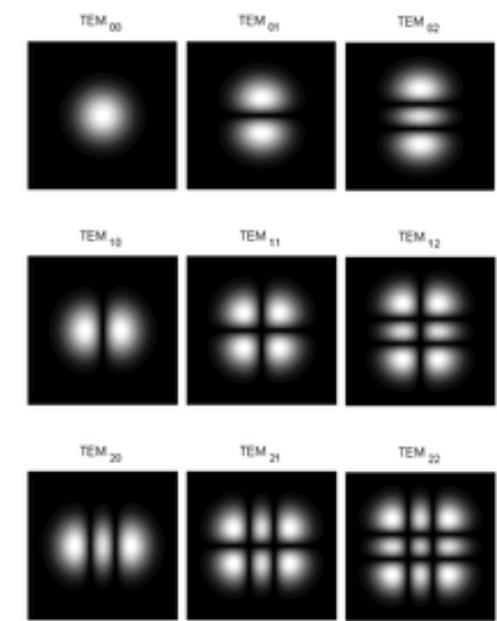
Lasermode = stehende Welle im Laserresonator



Longitudinalmoden



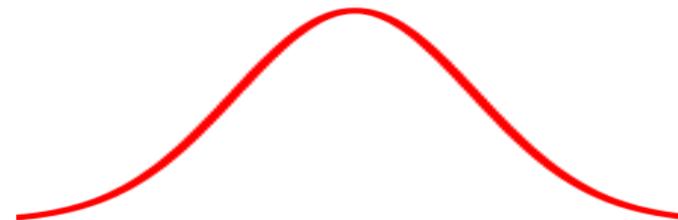
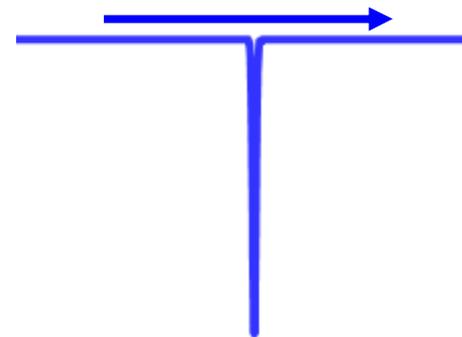
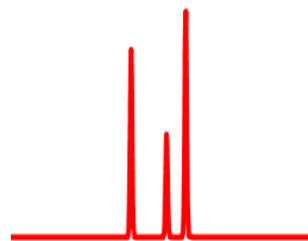
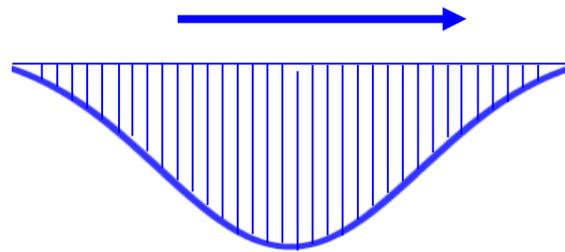
Transversalmoden



TEM (transversalelektromagnetische) Moden

Was ist besser, eine einzelne Mode oder viele Moden?

schmalbandig oder breitbandig?



Das hängt von der Anwendung ab.

nichtlineare Effekte  $\Rightarrow$  möglichst hohe Leistungen

gepulste Laser  $\Rightarrow$  bei gleicher mittlerer Leistung  
viel höhere Peak-Leistungen

"Arbeitspferd" unter den Kurzzeit-Laser: Titan:Saphir-Laser

Typischer Ti:Sa-Laser-Puls:	Wellenlänge:	800 nm
	Strahlquerschnitt:	1 mm
	Pulsdauer:	100 fs = $10^{-13}$ s
	Folgefrequenz:	80 MHz
		$\Rightarrow$ 12,5 ns = $1,25 \cdot 10^{-8}$ s Pulsabstand

Intensitätsüberhöhung: 12,5 ns / 100 fs  $\approx 10^5$

# gepulste Laser

Typischer Ti:Sa-Laser-Puls:

Strahlquerschnitt: 1 mm

Pulsdauer: 100 fs =  $10^{-13}$  s

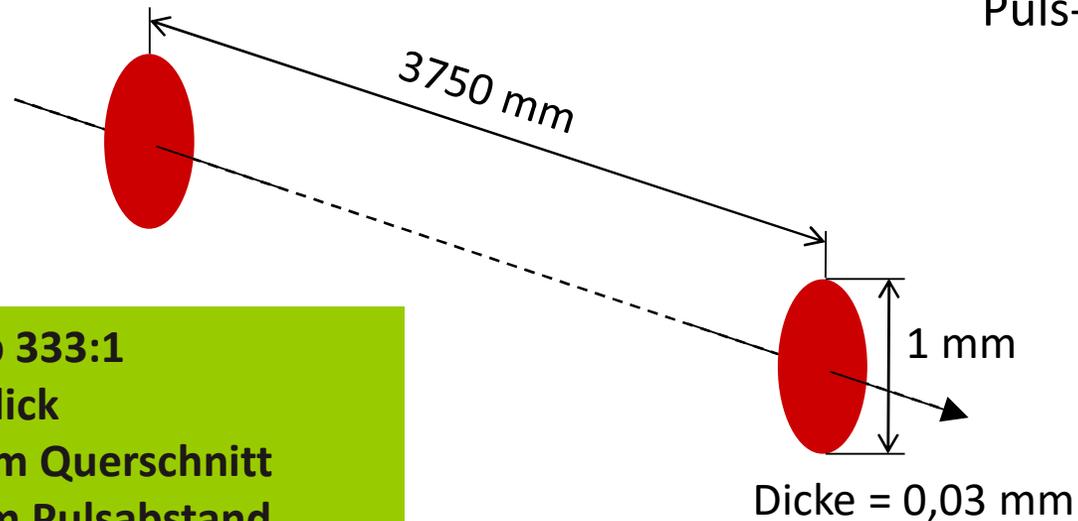
Folgefrequenz: 80 MHz

⇒ 12,5 ns Pulsabstand

mit  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s umgerechnet in Längen

Pulsabstand: 3,75 m

Puls-“Dicke“: 30  $\mu$ m



im Maßstab 333:1

1 cm dick

33,3 cm Querschnitt

1250 m Pulsabstand

Wunsch: hohe Leistung und kleine Bandbreite

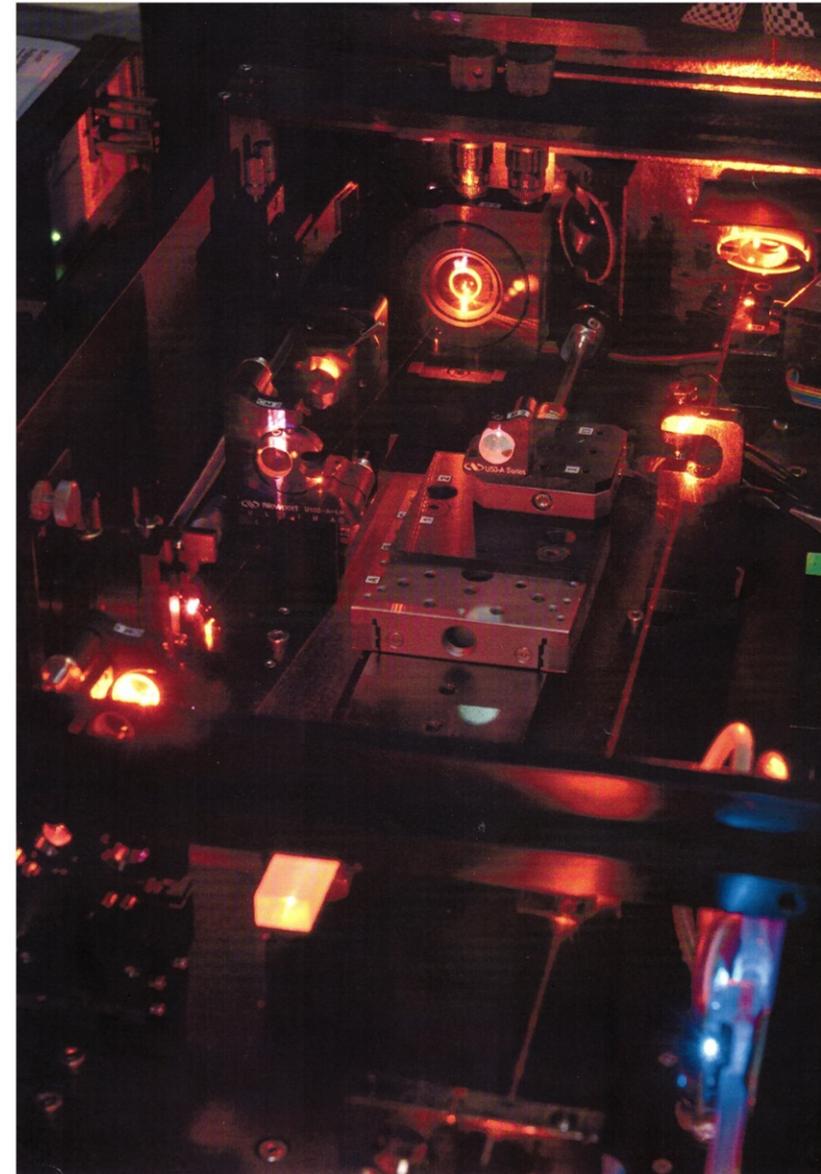
beschränkt durch Heisenbergsche Unschärferelation

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$$

⇒ z.B. für 200 fs-Puls:  $\Delta\lambda \geq 1,5 \text{ nm}$

⇒ für hochauflösende Spektroskopie: Dauerstrich-(cw)-Laser notwendig

# „Freistrahl“-Laser und „closed-box“



## Meine Themen:

- ✓ Hochauflösende Spektroskopie  
Laserlabore in Graz, Istanbul, Riga
- ✓ Laserentwicklung: cw-OPO  
hier vor Ort, in Zusammenarbeit mit der Firma APE
- ✓ Lasermaterialbearbeitung  
hier vor Ort, Laser von der HAW Hamburg

## Motivation

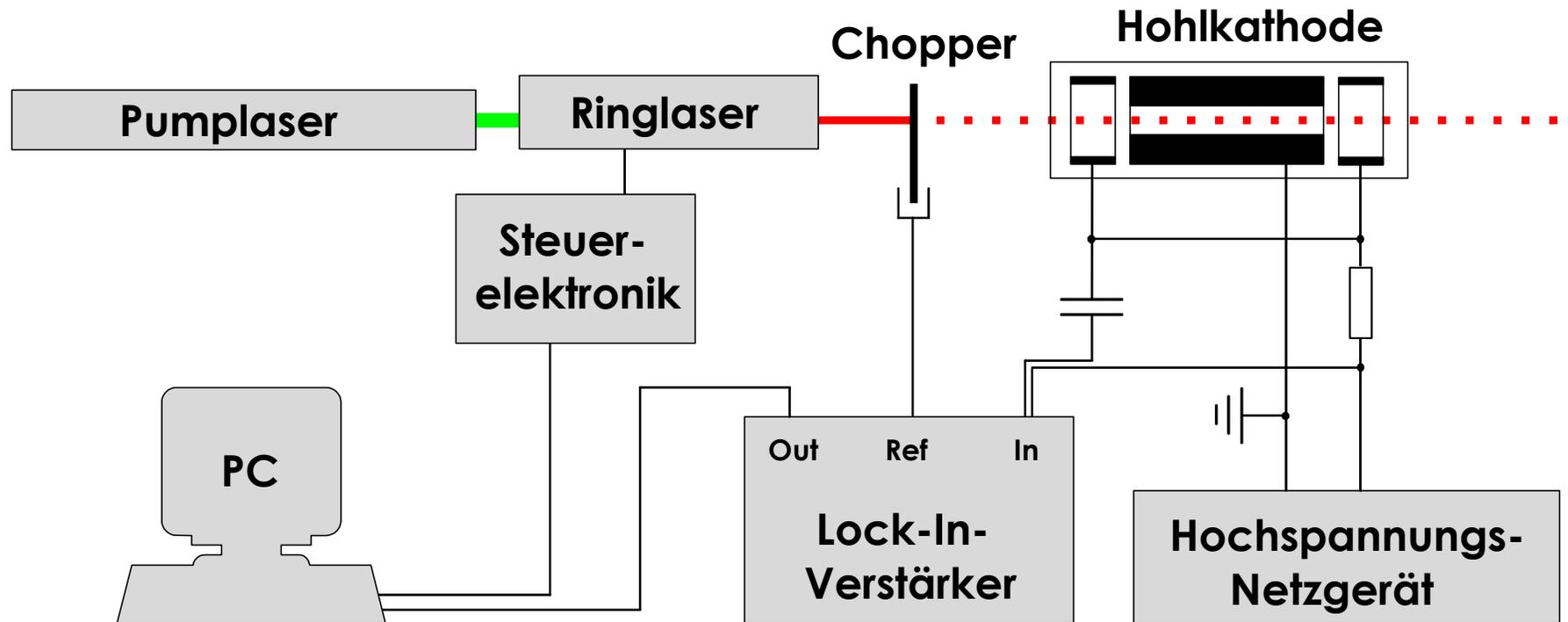
- Atomspektroskopie bereits „altes“ Thema, aber ...  
... für komplexere Atome bisher nur ein Bruchteil der Informationen über die atomaren Strukturen experimentell bekannt
- Weiterentwicklung moderner Teleskope in der Astrophysik  $\Rightarrow$   
astrophysikalische Spektren mit immer höherer Auflösung und Empfindlichkeit
- Genauigkeit und Verfügbarkeit atomarer Daten entscheidend für Analyse



auch Anwendungen in anderen Bereichen, z.B.:

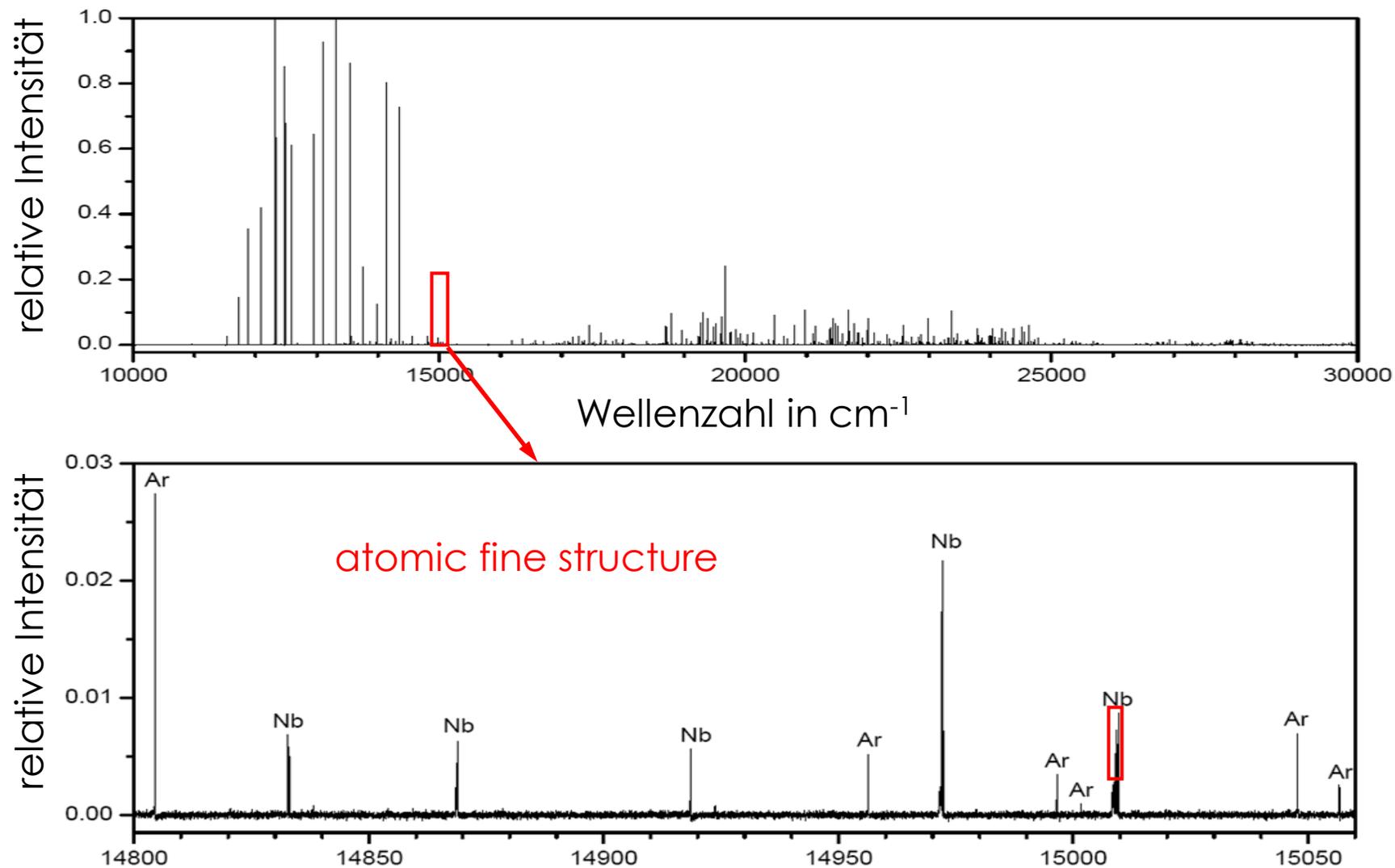
- Plasmaphysik
- Grundlegende Untersuchung von physikalischen Effekten

Methoden:  
z.B. Optogalvanisch Spectroskopie (OGS)

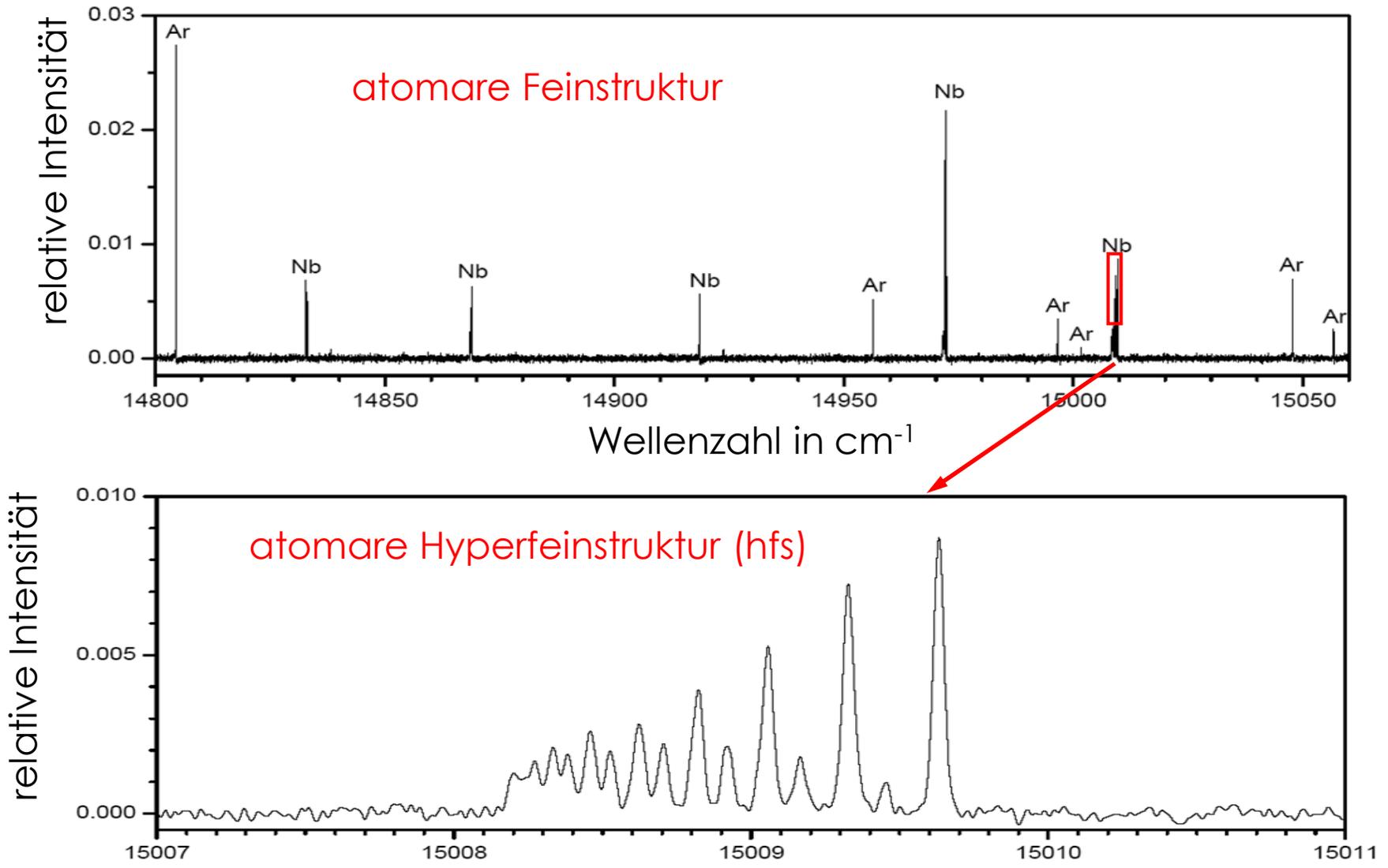


# Hochauflösende Spektroskopie

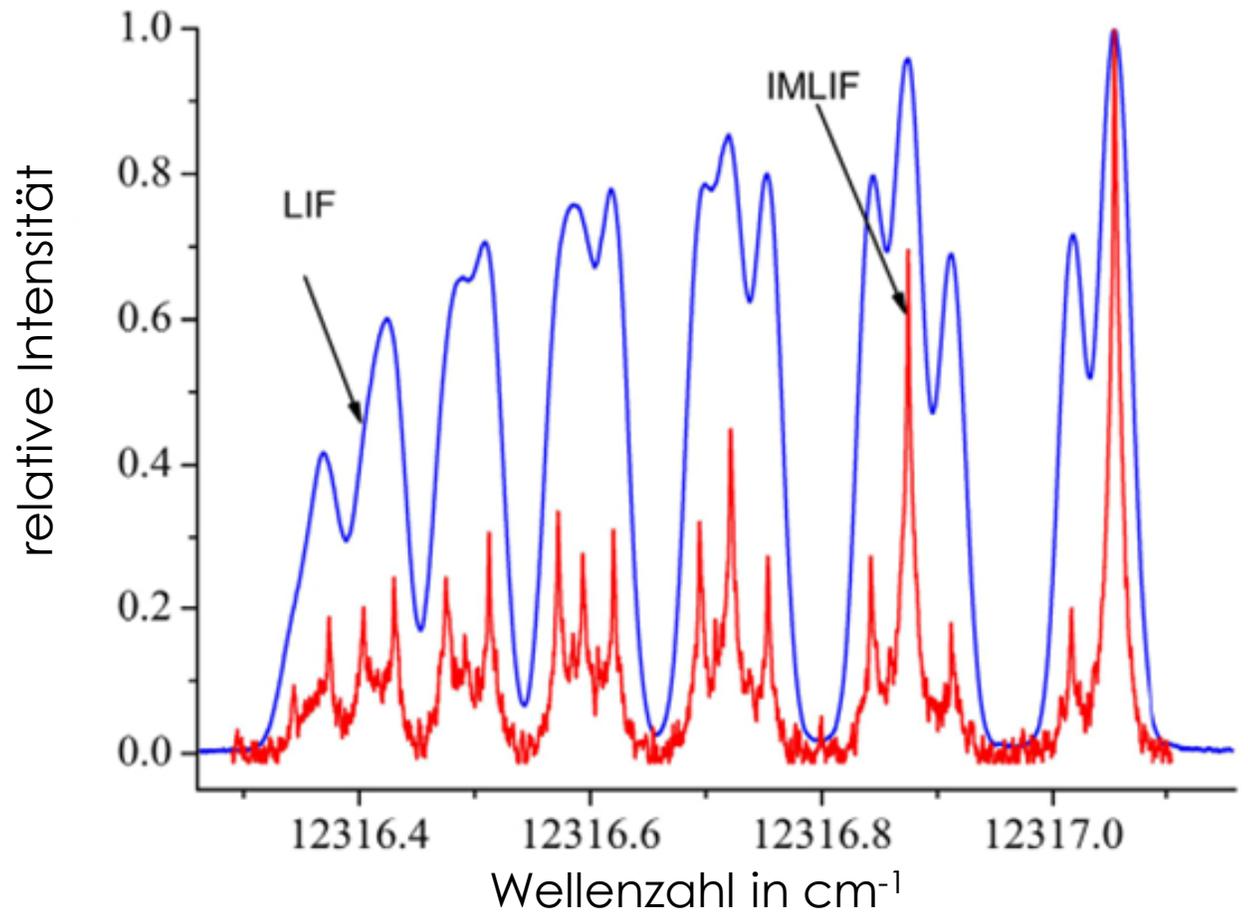
## Beispiel: FT Spectrum of Niobium



## Beispiel: Spectrum of Niobium

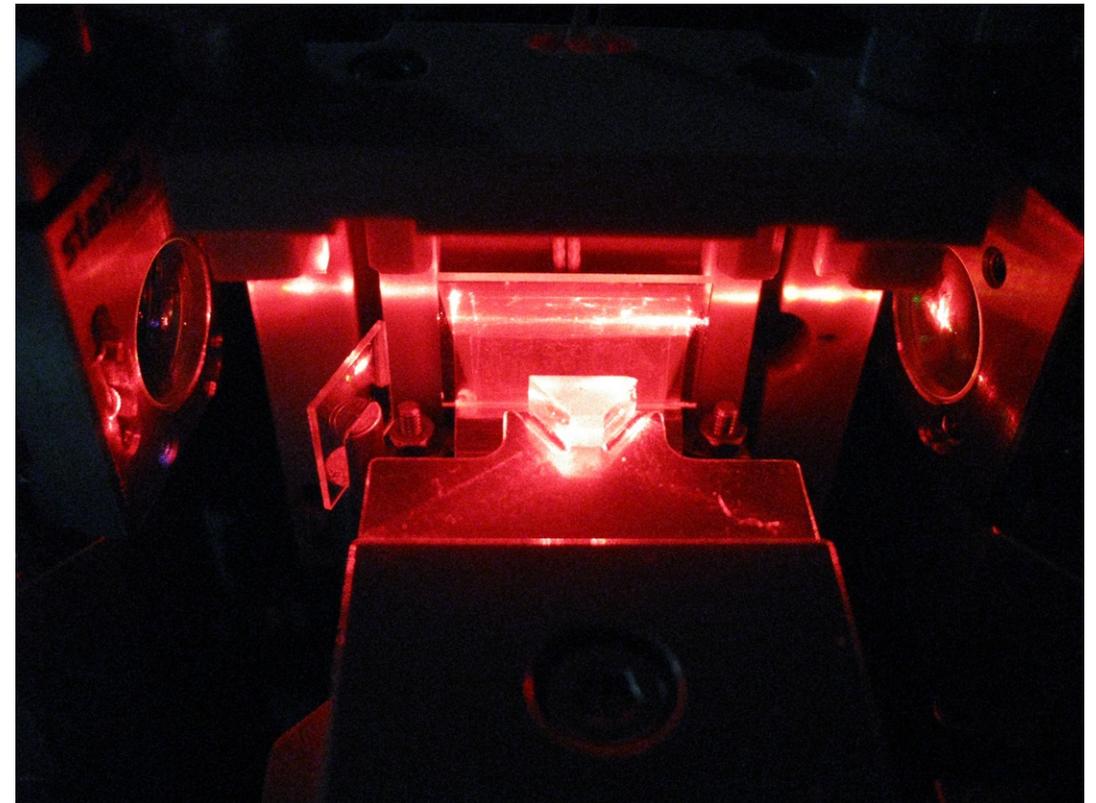
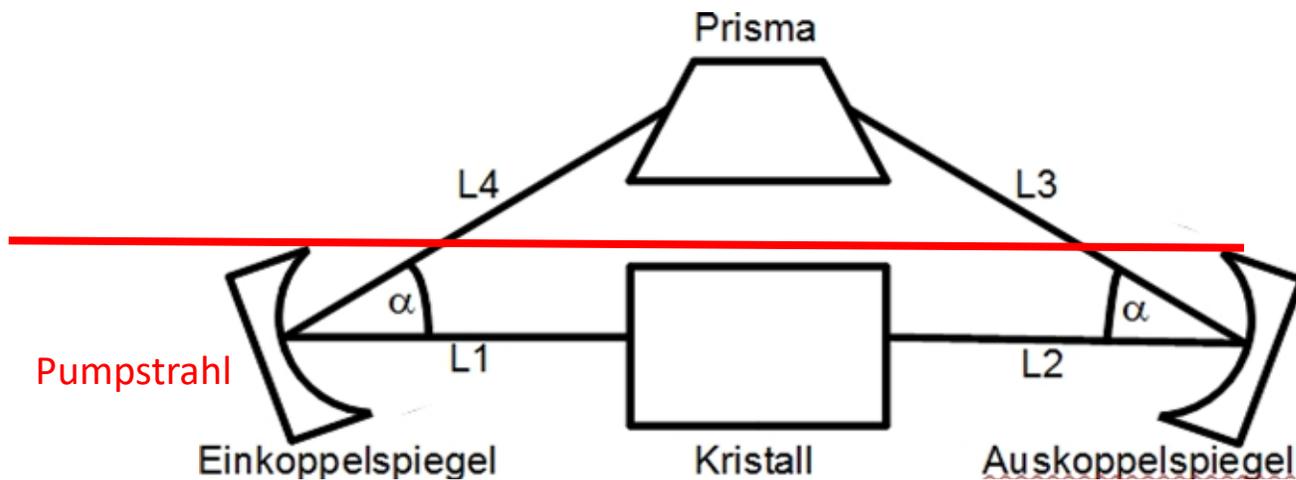


Doppler-verbreitert versus Doppler-reduziert



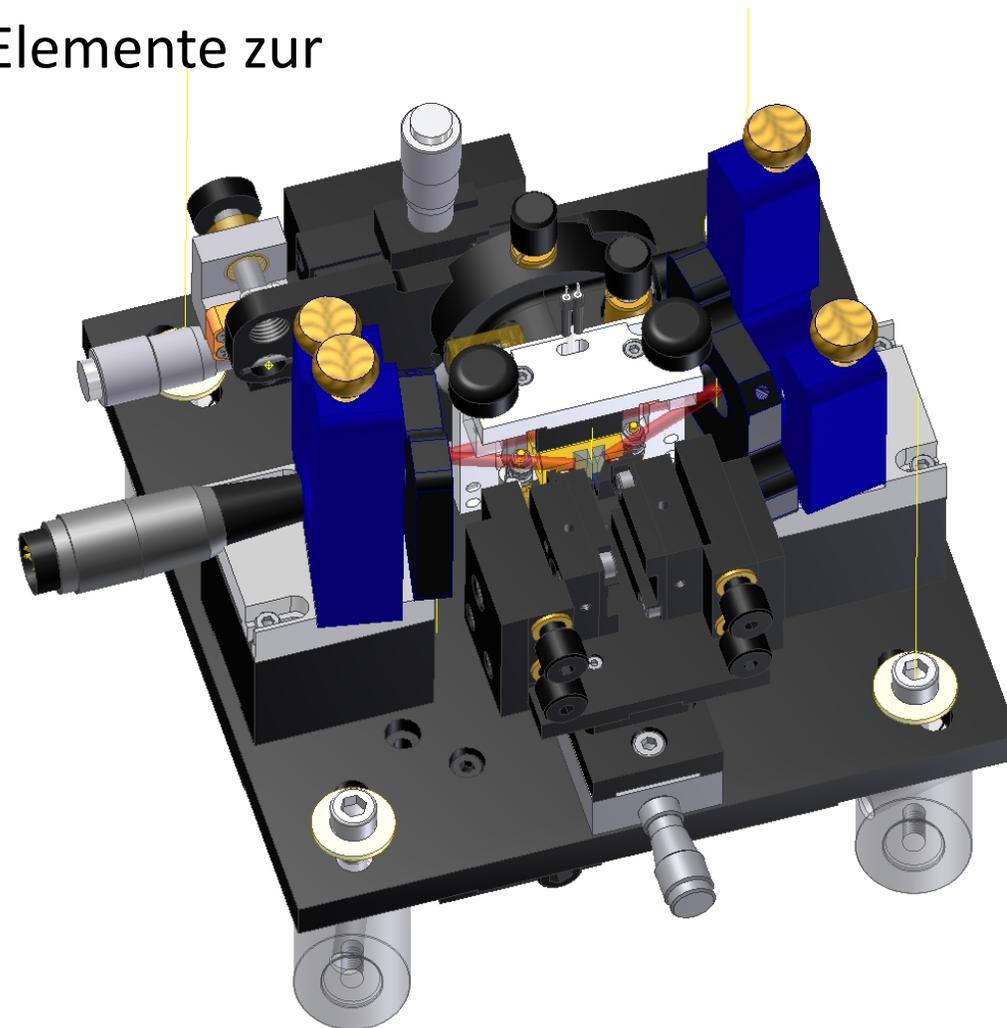
## Ziel

- Entwicklung einer abstimmbaren und durchstimmbaren Laserlichtquelle im NIR: optisch-parametrischer Oszillator im Dauerstrichbetrieb



## Herausforderung/Problem

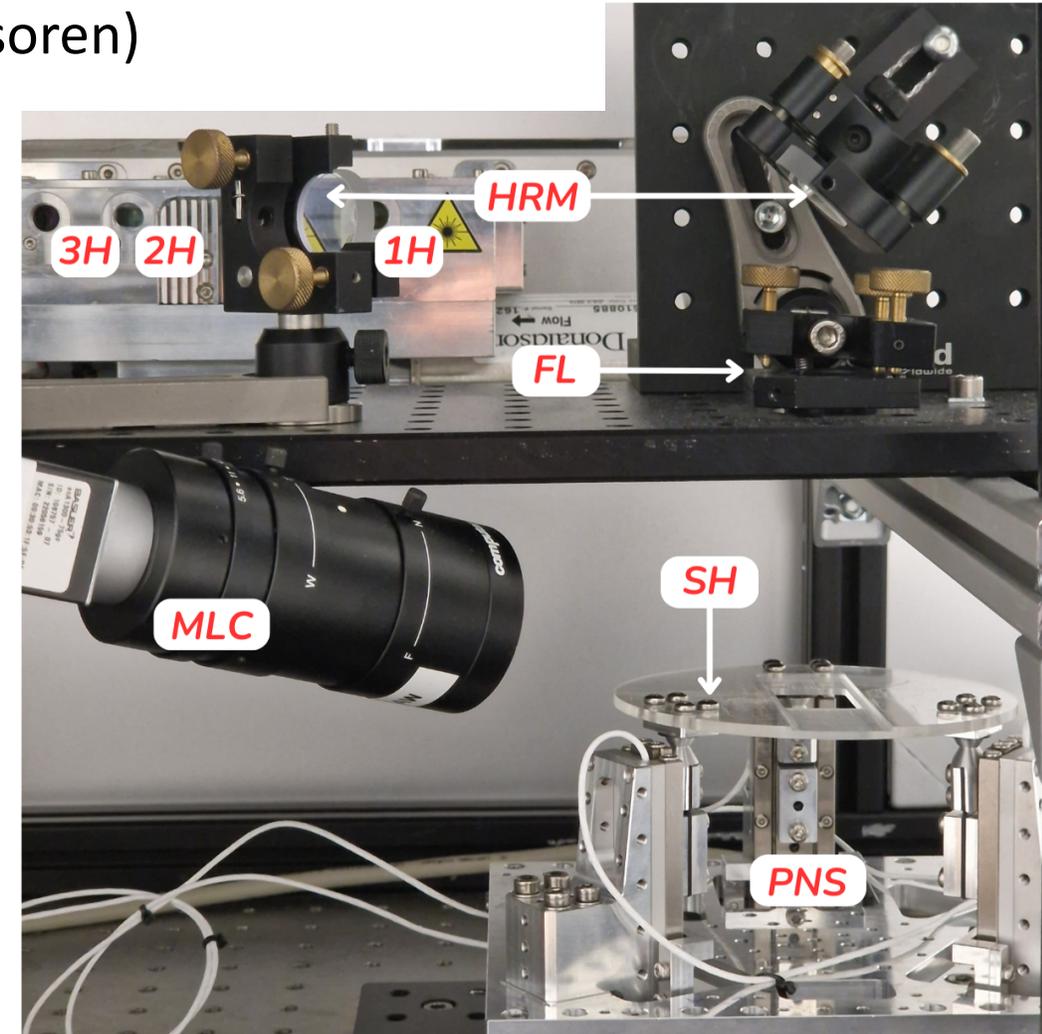
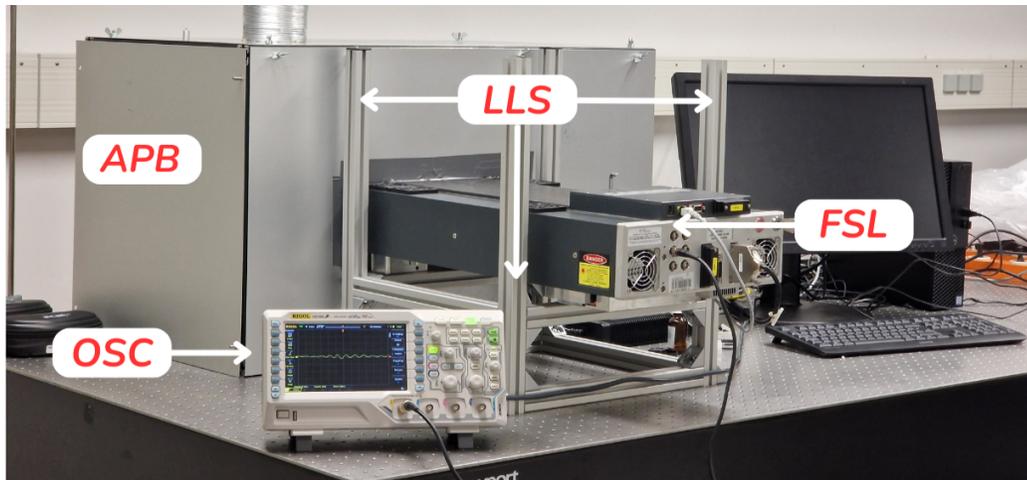
- Steuerung/Regelung der frequenzselektive Elemente zur
  - Stabilisierung der Wellenlänge
  - gezieltes Anfahren einer Wellenlänge



- Ziele**
- Funktionalisierung von Oberflächen (topografische Merkmale wie Rillen, Säulen, Poren) (ursprünglich für die Entwicklung von Biosensoren)
  - Erzeugung von Farbzentren in z.B. Diamant

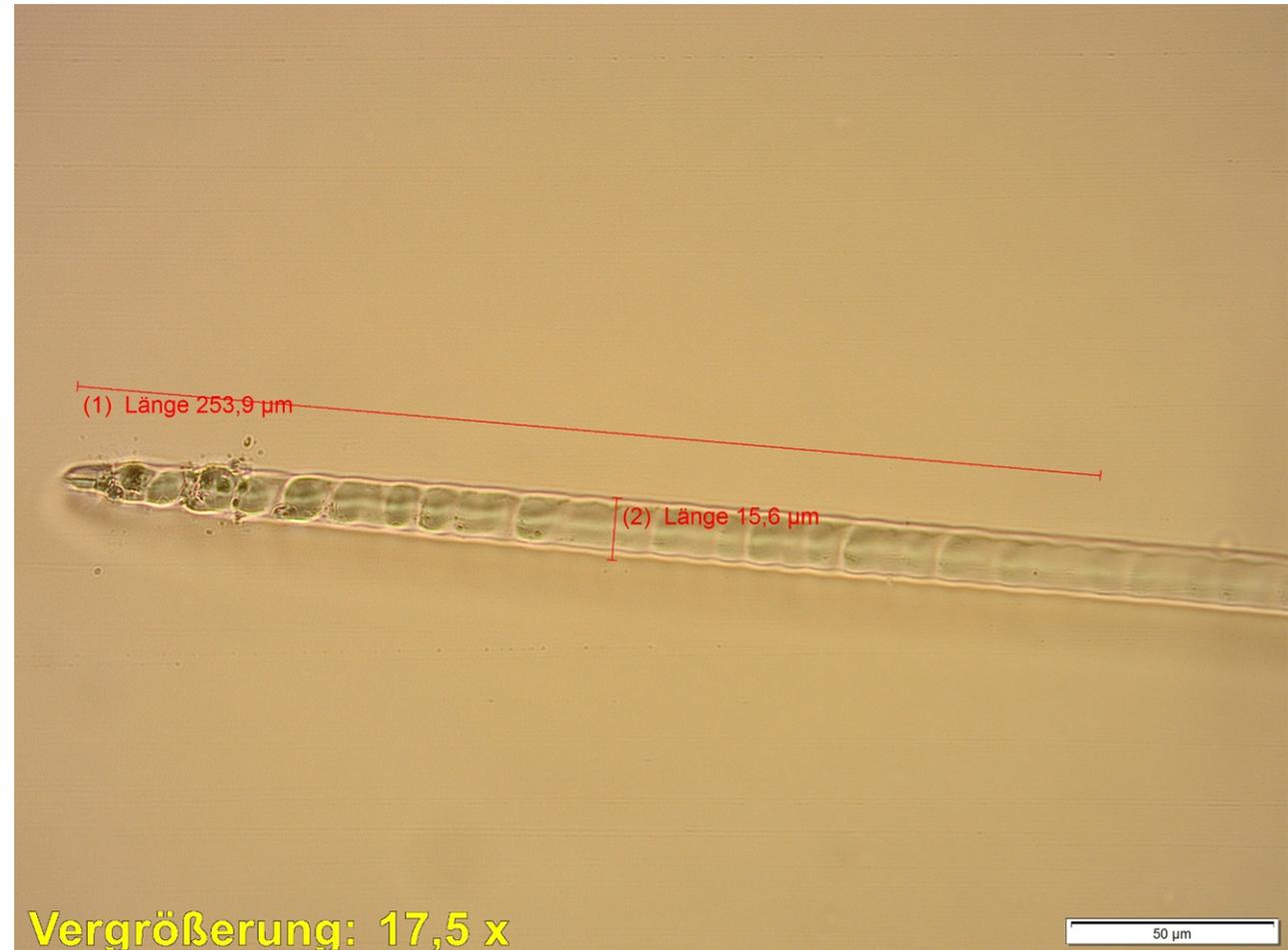
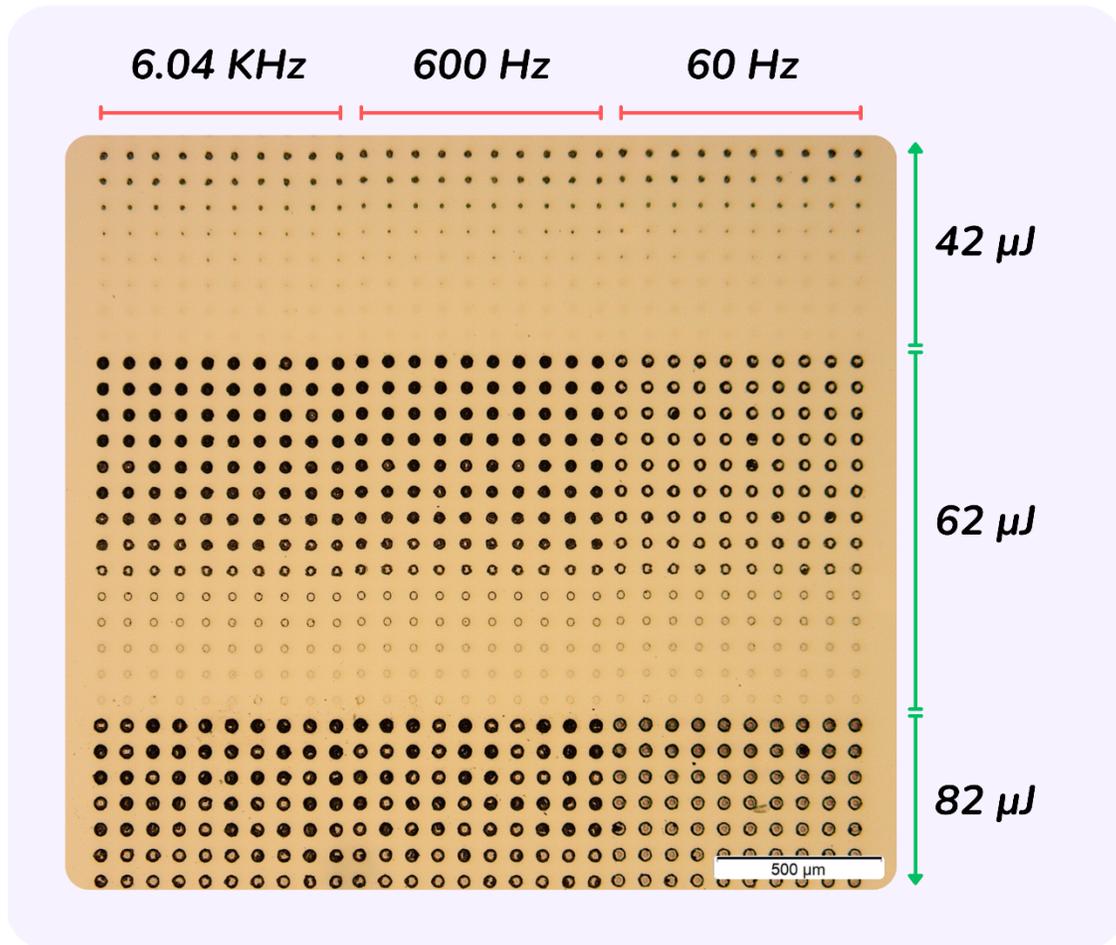
In Zusammenarbeit mit

- HAW Hamburg
- FU Berlin
- Poznan University of Technology

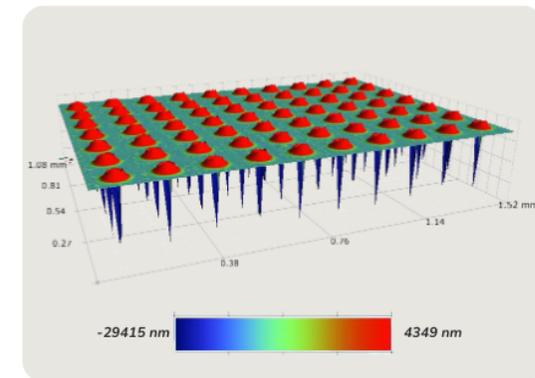
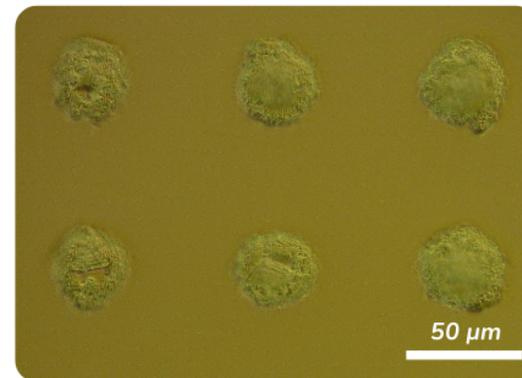
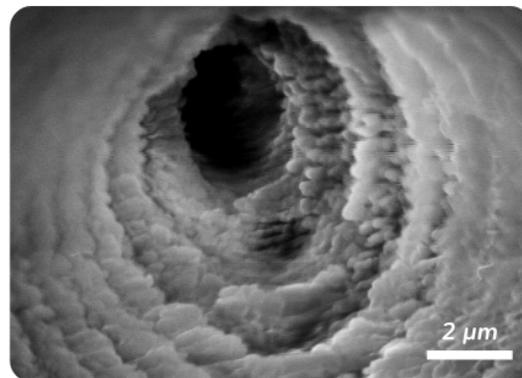
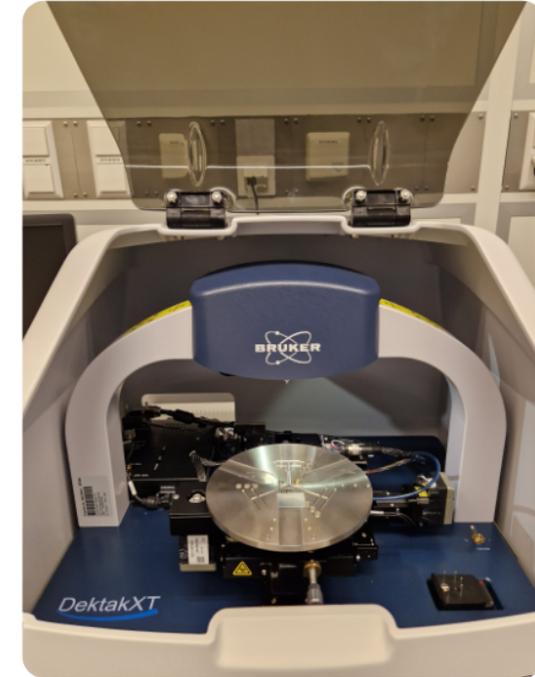
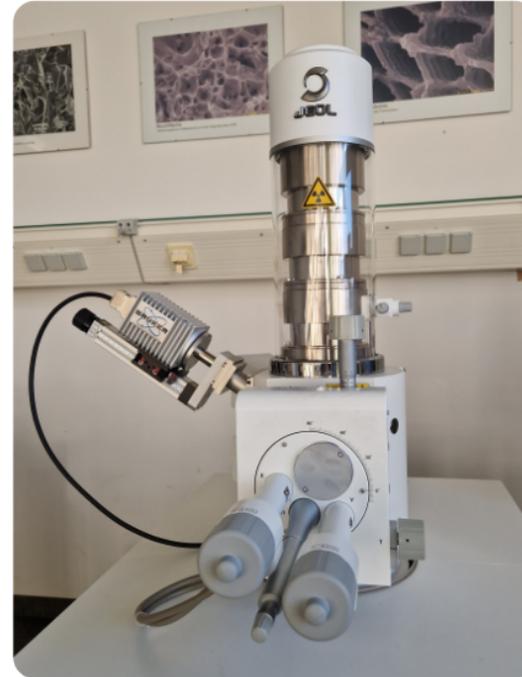




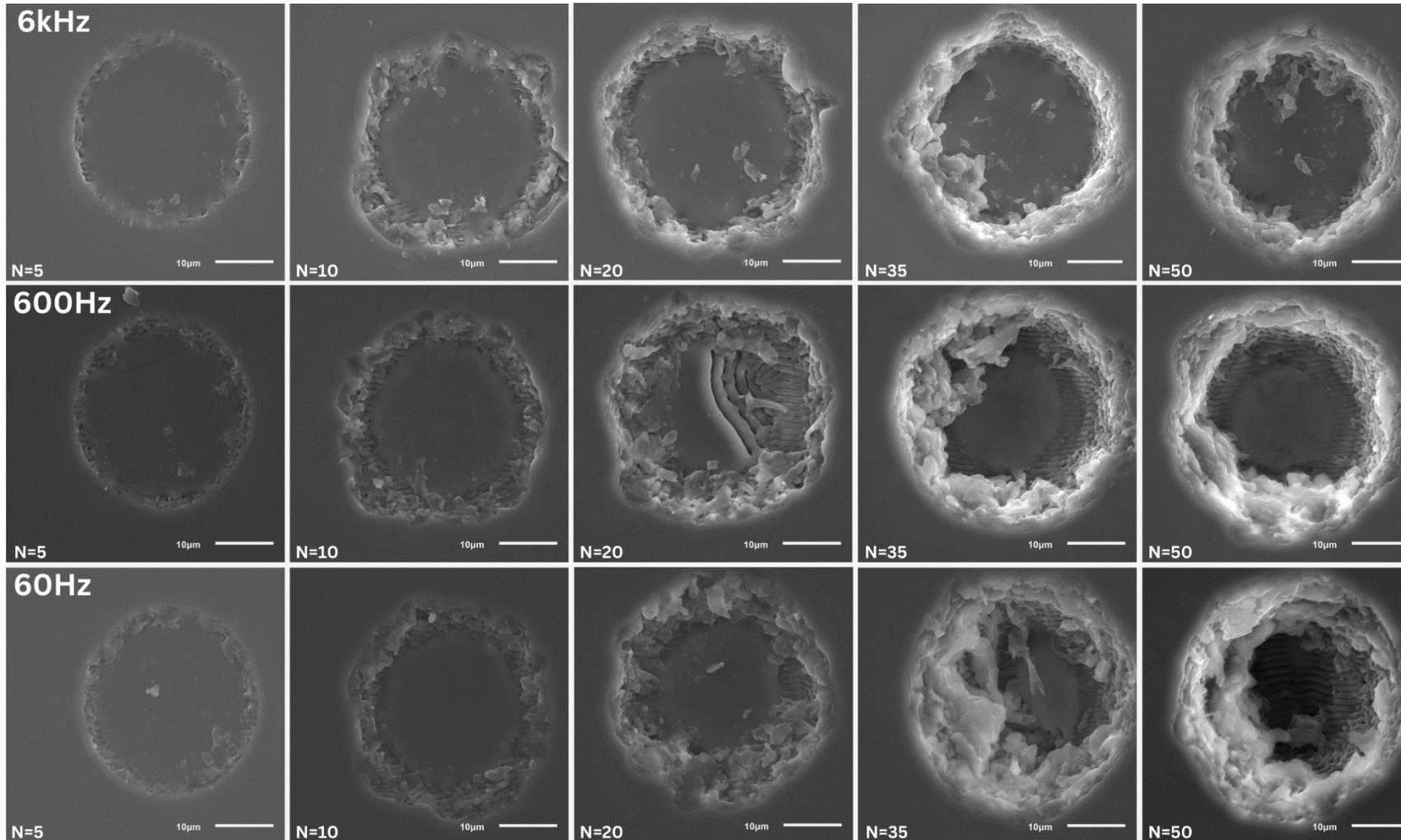
## Normalglas (Kalk-Natron-Glas)



## Charakterisierung der Proben:



## Unterschiedliche Anzahl von Pulsen bei unterschiedlichen Repetitionsraten



## Laser-Induced Periodic Surface Structures (LIPSS)



Fläche von  
0,5 mm x 0,5 mm

