

# Nichtlineare Optik

In diesem Versuch werden zwei für die Laserentwicklung sehr wichtige nicht-lineare optische Effekte untersucht: Die Frequenzverdopplung (SHG) und die sättigbare Absorption. Der Schwerpunkt des Versuchs liegt auf der Anwendung dieser Effekte, die zum Entwurf von frequenzverdoppelten, beziehungsweise gepulsten Lasern genutzt werden.

Im ersten Teil des Versuchs wird zunächst ein sehr kompakter diodengepumpter Nd:YAG-Laser aufgebaut. Es werden alle relevanten Laserparameter untersucht und der Aufbau optimiert.

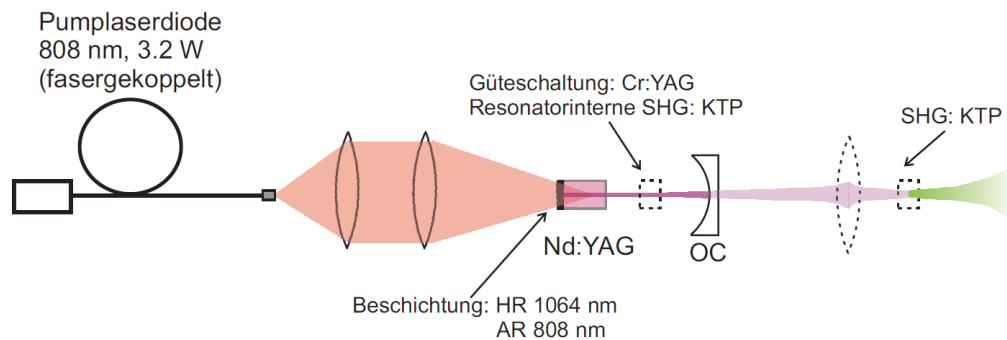
Der zweite Teil des Versuchs beschäftigt sich mit der Frequenzverdopplung des erzeugten Laserlichts. Es wird untersucht, wie man das infrarote Licht des Lasers mit 1064 nm Wellenlänge zu grünem Licht bei 532 nm umwandeln kann. Da zur Anregung solcher nichtlinearer Prozesse hohe Spitzenleistungen notwendig sind, werden außerdem mit dem Verfahren der Güteschaltung anstatt dem kontinuierlichen Laserstrahl kurze Laserpulse erzeugt.

## I. Erforderliche Kenntnisse

- Laserprinzip (1)
- Gaußsche Strahloptik (2)
- Stabilität optischer Resonatoren (2), (3) S. 138
- Frequenzverdopplung (4),(3)
- Prinzip der Güteschaltung (1)

## II. Literatur

- (1): **Kneubühl, Sigrist: „Laser“**, Teubner (1988)  
Kapitel 3 (Laserprinzip)  
Kapitel 9 (Güteschaltung)
- (2): **Milonni, Eberly: „Lasers“**, Wiley (1988)  
Kapitel 14.1 - 14.8
- (3): **Yariv, „Quantum Electronics“**, Wiley (1975), 2. Auflage  
Kapitel 16
- (4): [http://de.wikipedia.org/wiki/Nichtlineare\\_Optik](http://de.wikipedia.org/wiki/Nichtlineare_Optik)



### III. Experimentelle Aufgabe

WICHTIG: Die eingestellte Temperatur der Laserdiode darf 30.5 °C nicht übersteigen, der Laderdiodenstrom nicht  $I_{max} = 3.7A$ .

Beim Aufbau des Nd:YAG Lasers erhalten Sie Unterstützung vom Assistenten.

#### 1. Aufbau des Nd:YAG-Lasers:

- Kollimieren Sie den Ausgangsstrahl der Laserdiode mit einer Linse mit  $f_1 = 8 \text{ mm}$  Brennweite und refokussieren Sie den kollimierten Strahl mit einer weiteren Linse mit  $f_2 = 15 \text{ mm}$  Brennweite. (Beide Linsen sind plan-konvex geschliffen. Wie werden sie „richtig“ in den Strahl gestellt?)
- Stellen Sie den Laserkristall in den Fokus, mit der verspiegelten Seite zur Pumpoptik. Sie erkennen die optimale Position an einem leichten weißen Leuchten des Kristalls, an der Stelle, an der das Pumplicht den Laserkristall durchquert. (Eventuell müssen Sie den Raum verdunkeln, aber bei angeschalteter Laserdiode **nie-mals die Laserschutzbrille abziehen!**) Die Feinjustage erfolgt später bei laufendem Laser.
- Setzen Sie zunächst den Auskoppelspiegel mit  $OC = 10\%$  in den Spiegelhalter und montieren Sie den Spiegel in ca. 5 – 10 cm Abstand vom Kristallende.
- Positionieren Sie den Spiegel so, dass das teilweise dort reflektierte Pumplicht auf den Kristallhalter zurückgeworfen wird. Versuchen Sie den Laserbetrieb herzustellen, indem Sie den Spiegel sukzessive verstellen und alle Positionen durchfahren. Kontrollieren Sie gleichzeitig mit der Strahlkarte, um zu sehen, in welcher Position der Laser anspringt.

2. Optimieren Sie die Leistung des aufgebauten Lasers, aber achten Sie dabei, dass der Laser im Grundmode ( $\text{TEM}_{00}$ ) läuft. Die größten Verbesserungen erzielt man durch:
  - Verstellen des Endspiegels
  - Verschieben der Fokussierungslinse (Verschiebetisch)
3. Parameter des cw-Nd:YAG Lasers.

Messen Sie die folgenden Größen:

- Die Ausgangsleistung als Funktion des Diodenstroms
  - Die Ausgangsleistung bei verschiedenen Auskoppelgraden des zweiten Laserspiegels (OC 10%, 20% und 30%). Wie kann man den optimalen Auskoppelgrad berechnen?  
(Betrachten Sie die Ratengleichungen aus Abschnitt IV für den stationären Fall  $d/dt = 0$ . Für den Gewinn gilt im stationären Fall  $g_s = l_{ges} = -\ln(1 - OC) - \ln(1 - s)$ , wobei  $s$  sonstige Verluste zusätzlich zu den Auskoppelverlusten  $OC$  sind. Die ausgekoppelte Leistung ist  $P_{out} = OC \cdot P_s$ . Nehmen Sie  $s \approx 0.01 \dots 0.02$  an.)
  - Die Ausgangsleistung als Funktion der Resonatorlänge
  - Wo liegt die Stabilitätsgrenze des Resonators? Vergleichen Sie diese mit der theoretischen Stabilitätsgrenze.
4. Resonatorexterne Frequenzverdopplung
    - Setzen Sie, falls nicht schon geschehen, zunächst wieder den 10% Auskoppelspiegel in den Laser ein und optimieren Sie den Laser.
    - Fokussieren Sie den Laserstrahl hinter dem Auskoppelspiegel mit der Linse mit  $f = 35 \text{ mm}$ . (Um bei den folgenden Versuchsteilen Zeit zu sparen, achten Sie darauf, dass zwischen dem Endspiegel des Lasers und der Fokussierungslinse für den KTP-Kristall noch genügend Platz bleibt, um das Leistungsmessgerät dazwischen zu stellen.)
    - Stellen Sie den KTP-Kristall in den Fokus
    - Optimieren Sie die Leistung des grünen Lichtes durch Verschieben der Fokussierungslinse und durch Drehen des KTP-Kristalls. Was verändert man durch das Drehen des Kristalls?

## 5. Güteschaltung des Nd:YAG-Lasers

- Lassen Sie zunächst den Aufbau zur Frequenzverdopplung aus Punkt 4 noch stehen.
- Setzen Sie den Cr:YAG-Kristall zwischen den Laserkristall und den Endspiegel ein. Man sollte nun sofort sehen, dass die Leistung des grünen Lichtes stark gestiegen ist. Optimieren Sie den Laser nochmals durch leichtes Verstellen des Endspiegels.
- Messen Sie nun im gütegeschalteten Fall nochmals die durchschnittliche Ausgangsleistung des Lasers in Abhängigkeit des Diodenstroms (ohne/vor KTP Kristall!).
- Stellen Sie nun die Photodiode direkt hinter den Auskoppelspiegel, aber nicht direkt in den Strahl, um sie nicht zu sättigen. Schließen Sie die Photodiode an das Oszilloskop an und versuchen Sie, einzelne Pulse aufzulösen. (Falls das Signal zu schwach ist, schieben Sie die Photodiode langsam immer weiter in den Strahl.)
- Messen Sie die Repetitionsrate der Laserpulse in Abhängigkeit vom Diodenstrom. ( $f_{Rep} = \frac{1}{\Delta t}$  wobei  $\Delta t$  der zeitliche Abstand zweier Pulsen ist)
- Messen Sie die Leistung des frequenzverdoppelten Lichts in Abhängigkeit vom Diodenstrom. Verwenden Sie das Interferenzfilter, um das nicht umgewandelte infrarote Licht rauszufiltern. Was für ein Kurvenverlauf ist zu erwarten?  
(Beachten Sie, dass mit sinkendem Diodenstrom einerseits die Durchschnittsleistung des Laser, aber andererseits auch die Repetitionsrate sinkt. Siehe auch die beiden zuletzt aufgenommen Kurven. Die Pulsdauer bleibt ungefähr immer konstant, da Sie nur von Materialparametern abhängt.) (Beachten Sie des Weiteren, dass das Interferenzfilter näherungsweise senkrecht (aber nicht exakt senkrecht, damit der Resonator nicht durch rückgekoppelte Strahlung gestört wird) im Strahl stehen sollte, da ansonsten Reste des Pumplichts transmittiert werden. **WICHTIG:** Der nicht konvertierte Laserstrahl wird vom Filter reflektiert und sollte daher gegen einen Strahlblocker gelenkt werden.)

Bei Interesse finden Sie eine genaue Beschreibung der Theorie zur Güteschaltung mit Berechnungen zur Pulsdauer, Repetitionsrate usw. zum Beispiel in:

Spühler et.al., J.Opt.Soc.Am.B, **16**, No 3 (1999).

## 6. Resonatorinterne Frequenzverdopplung

- Entfernen Sie den Cr:YAG-Kristall aus dem Laserresonator, setzen Sie anstatt eines Auskoppelspiegels einen zu 100% reflektierenden Spiegel ein und bringen Sie den Laser wieder zum Laufen.
- Setzen Sie an die Stelle, an der der Cr:YAG-Kristall stand, nun den KTP-Kristall ein. Optimieren Sie die Leistung des grünen Lichts durch Drehen des KTP-Kristalls und verstellen des Laserendspiegels.
- Messen Sie die Leistung des grünen Lichts in Abhängigkeit vom Diodenstrom.

## IV. Umformung der Laser-Ratengleichungen von „Kneubühl-Sigrist“ (1)

In (1), Kapitel 3 werden die Ratengleichungen für einen Zweiniveau-Laser hergeleitet (Gl. 3-29 bis 3-31). Diese Gleichungen beschreiben die folgenden Größen:

- $N_1$ : Population des unteren Laserniveaus
- $N_2$ : Population des oberen Laserniveaus
- $\tilde{n}$ : Photonendichte (in den meisten Büchern mit  $\Phi$  bezeichnet)

Für den praktischen Gebrauch ist es einfacher die Ratengleichungen umzuformen, so dass besser bekannte Parameter, wie Wirkungsquerschnitte, Lebensdauern usw. in den Gleichungen verwendet werden, anstatt schwer zugänglicher Größen wie beispielsweise Einstieffkoeffizienten. Geht man zudem nicht mehr von einem Zweiniveausystem, sondern von einem Vierniveaulaser ((2), S. 304) aus, kann man davon ausgehen, dass das untere Laserniveau unbesetzt und damit  $N_1 \approx 0$  ist. Die Ratengleichungen können umgeformt werden zu folgender Darstellung:

$$\frac{d}{dt}N_2 = -\frac{N_2}{\tau_L} - \sigma_L c N_2 \tilde{n} + R \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}\tilde{n} = -\frac{\tilde{n}}{\tau_P} + \frac{\sigma_L c}{V} \cdot N_2 \left(\tilde{n} + \frac{1}{V}\right) \quad (2)$$

Dabei wurden folgende Größen verwendet (in Klammern stehen die entsprechenden Größen, wie sie in (1) verwendet wurden):

- $\tau_L$ : Lebensdauer des oberen Laserniveaus
- $\sigma_L$ : Wirkungsquerschnitt der stimulierten Emission
- $\tau_P$ : Lebensdauer der Photonen im Resonator  $\tau_P = \frac{T_R}{l} = \frac{L/c}{l} \ (l \hat{=} \kappa \text{ Verluste, } L \text{ Resonatorlänge})$
- Verluste:  $l \hat{=} \kappa = \ln(1 - OC)$ , wobei OC der Grad des Auskoppelspiegels ist (z.B. OC = 0.05 für einen 5%-Auskoppelspiegel)
- V: Modenvolumen im Resonator (bzw. im Gainmedium, d.h. im Laserkristall)

- $T_R$ : Resonatorumlaufzeit  $T_R = L/c$
- $c$ : effektive Ausbreitungsgeschwindigkeit im Laserresonator (bei cw-Lasern und kleinen Laserkristallen  $c \approx c_0$ , bei gepulsten Lasern die Gruppengeschwindigkeit  $c \approx v_g$ )
- $R$ : Pumprate,  $R = \frac{P_{abs}}{h \cdot \nu_{Pump}}$

Für den praktischen Gebrauch ist es noch besser die Ratengleichungen auf leichter messbare Größen anzuwenden. Man kann die Gleichungen (1), (2) so umformen, so dass sie den Verlauf von resonatorinterner Leistung  $P$  und Umlaufgewinn  $g$  beschreiben, wenn man folgenden Definition macht:

- Intensität:  $I = h\nu\tilde{n}c \quad [Wcm^{-2}]$
- Gewinn:  $g = \frac{\sigma_L c \frac{T_R}{2}}{V} \cdot N_2 = \frac{\sigma_L}{2 \cdot A_{eff}} \cdot N_2$
- Modenquerschnittsfläche im Lasermedium:  $A_{eff} = \pi w_L^2 \quad [cm^2]$
- Leistung:  $P = I \cdot A_{eff} \quad [W]$

Man erhält somit die folgenden Ratengleichungen:

$$\frac{d}{dt}g = -\frac{g - g_0}{\tau_L} - \frac{gP}{E_{sat}} \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt}P = \frac{2g - l}{T_R} \cdot P + \frac{2g}{T_R}P_{vac} \quad (4)$$

Dabei wurden die folgenden Definitionen verwendet:

- Kleinsignalgewinn:  $g_0 = \frac{\sigma_L}{2 \cdot A_{eff}} \cdot R \cdot \tau_L$
- Sättigungsenergie:  $E_{sat} = h\nu \frac{A_{eff}}{\sigma_L}$
- Vakuumsfluktuation:  $P_{vac} = \frac{h\nu}{T_R} \approx 0$

## V. Daten der Laserkomponenten

- Brennweite der gekrümmten Auskoppelspiegel  $f = 50 \text{ mm}$
- Länge des KTP-Kristalls:  $L = 5 \text{ mm}$
- Daten des Nd:YAG-Kristall
  - Nd:YAG,  $L = 5 \text{ mm}$ ,  $\varnothing = 3 \text{ mm}$  (YAG:  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ )
  - Pumpwellenlänge:  $\lambda_P = 807.5 \text{ nm}$
  - Frequenz des Pumplichts:  $\nu_{Pump} = \frac{c_0}{808 \text{ nm}} = 371 \text{ THz}$
  - Laserwellenlänge:  $\lambda = 1064 \text{ nm}$
  - Dotierung 1.0 atm%
  - Absorptionskoeffizient (bei 808 nm):  $\alpha \approx 0.22 \text{ mm}^{-1}$
  - Wirkungsquerschnitt der stimulierten Emission:  $\sigma_L = 2.8 \cdot 10^{-19} \text{ cm}^2$
  - Lebensdauer des oberen Laserniveaus:  $\tau_L \approx 230 \text{ }\mu\text{s}$
  - Strahlradius im Laserkristall  $w_L \approx 100 \text{ }\mu\text{m}$
- Cr:YAG-Kristall: Im ungesättigten Zustand ca. 10%-Absorption für Licht mit 1064 nm Wellenlänge

## VI. Verwendete Abkürzungen

- OC : output coupler (Auskoppelspiegel) oder Auskoppelgrad
- YAG: Yttrium Aluminium Granat (Wirtskristall für die Nd- oder Cr-Ionen). Nd:YAG ist der Laserkristall, Cr:YAG der sättigbare Absorber
- KTP: Kalium-Titanyl-Phosphat (nichtlinearer Kristall)
- SHG: second harmonic generation (Frequenzverdopplung)
- cw: continuous wave (Dauerstrich-Laser)
- HR: hochreflektierend
- AR: entspiegelt (anti-reflex beschichtet)