Nd:YAG - Laser

Golubkov Andrej
Meierhofer Georg

Betreuer: Dr. Carlo Callegari
Datum: 13.05.2004

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen **2**
1.1 Allgemeines über Laserlicht . . . 2
1.2 Laser Aufbau . . . 2
1.3 Nd:YAG Laser . . . 2
1.4 Absorptionskennlinie . . . 3
1.5 Vierniveausystem des Nd:YAG Lasers . . . 4
1.5.1 Absorption . . . 4
1.5.2 Relaxation1 . . . 4
1.5.3 Spontane Emission . . . 5
1.5.4 Induzierte Emission . . . 5
1.5.5 Relaxation 2 . . . 5
1.5.6 Ratengleichungen . . . 5
1.6 Betriebsarten . . . 6
1.6.1 Dauerstrich (Continuous Wave, cw) . . . 6
1.6.2 Gepulst (Q- switch) . . . 7
1.6.3 Quasi-CW . . . 7
1.7 Resonator . . . 7
1.8 Resonatormoden . . . 7
1.8.1 Longitudinale Moden . . . 7
1.8.2 Transversale Moden (TEM) . . . 8
1.9 Laserdiode als Pump- Lichtquelle . . . 8
1.10 Nichlineare Optik . . . 9
1.10.1 Frequenzverdopplung . . . 10

2 Versuche **11**
2.1 Dieodenlaserkennlinie . . . 11
2.2 Absorptionsspektrum . . . 13
2.3 Spontane Emission . . . 14
2.4 Kalibration der Laserdiode . . . 15
2.5 Nd:YAG Laserkennlinie . . . 17
2.6 Laserleistung bei verschiedenen Pumpwellelängen . . . 19
2.7 Frequenzverdopplung . . . 20

3 Fehlerbetrachtung **24**

4 Zusammenfassung **24**

1 Grundlagen

1.1 Allgemeines über Laserlicht

LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) senden im Gegensatz zu den "normalen" Lichtquellen kohärentes Licht aus. Bei einem idealen Single- Mode Laser haben die abgestrahlten Photonen die gleiche Intensität, Richtung, Frequenz, Polarisation und Phase. Derzeit sind Laser für UV bis IR Licht, und Leistungen im mW bereich bis zu MW verfügbar. Das Laserlicht kann also sehr intensiv sein, und lässt sich wegen seiner Kohärentz sehr gut kontrollieren.

1.2 Laser Aufbau

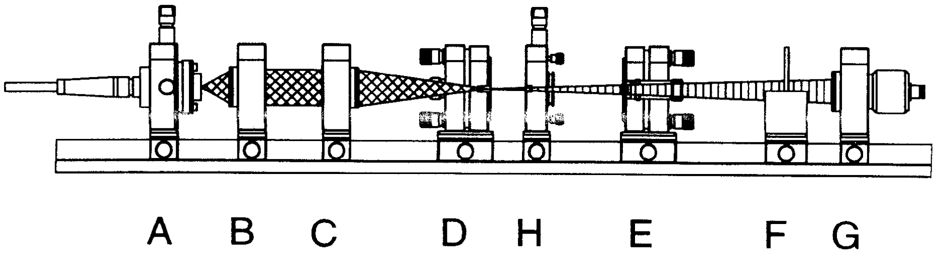


Abbildung 1: Aufbau des Nd:YAG Lasers: A - Leuchtdiodenlaser als Pumpquelle B/C - Linsen zum bündeln des Pumplichts, D - Nd:YAG Kristall gleichzeitig auch linker Spiegel des Resonators, H - Frequenzverdoppel- Kristall, E - Auskoppelspiegel F - Farbfilter, G - Detektor (Photodiode)

Der Leuchtdiodenlaser liefert bei ca. 800nm die Energie, um die Nd Atome im Nd:YAG Kristall anzuregen. Durch spontane Emission entstehen dort vereinzelt Photonen bei ca. 1000nm. Sie werden im Resonator zwischen den zwei Spiegeln reflektiert. Trifft ein durch spontane Emission erzeugtes Photon dann wieder auf ein angeregtes Nd Atom, kann ein zweites kohärentes Photon entstehen. Bei gut justierten Spiegeln können so die Photonen hin und herlaufen und sich im Kristall verstärken. Durch den rechten teildurchlässigen Spiegel kann ein Teil des Lichts im Resonator ausgekoppelt werden. Die Lichtintensität ist im Resonator um ein vielfaches stärker, als die des ausgekoppelten Lichts.

1.3 Nd:YAG Laser

Als aktives Medium wird Neodymium (Nd) dotierter YAG Kristall (Yttrium Aluminum Granat $Y_3Al_5O_{12}$) verwendet. Wie die meisten Festkörperlaser wird er optisch gepumpt. Dieser Laser strahlt am Stärksten im nahen Infrarotbereich bei 1064nm. Leistungen bis 4 kW sind in Serienlasern erreichbar. Es ist sowohl ein CW (Continous Wave, d.h. kontinuierlicher), wie auch ein gepulster Betrieb möglich.

1.4 Absorptionskennlinie

Zum Pumpen des Lasers ist nur den Niveauübergang von 1 auf 4 interessant.

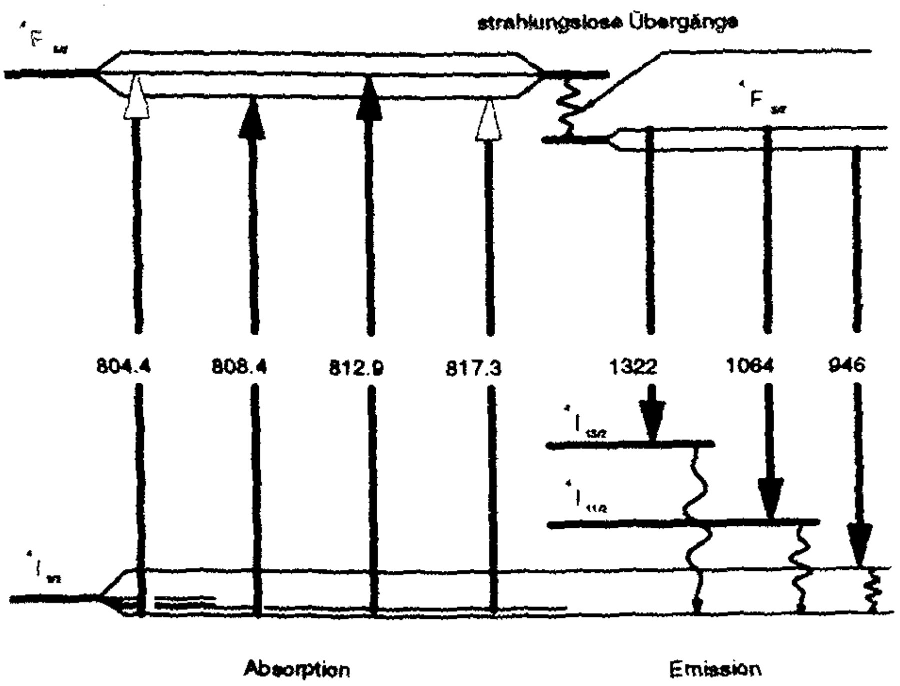


Abbildung 2: Für den Laserbetrieb wichtige Nd Energieniveaus

Die Spektroskopische Bezeichnung für Niveau 1 ist $^4I_{9/2}$ für Niveau 4 $^4I_{5/2}$. Niveau 1 ist in 5 Unterniveaus aufgespalten, Niveau 4 in 3 Unterniveaus. Dazwieschen sind wie in Abbildung (2) eingezeichnet. Übergänge bei 804.4nm, 808.4nm, 812.9nm, und 817.3nm möglich. Das Licht wird allerdings nicht nur bei genau diesen Frequenzen absorbiert. Wegen der Heisenbergschen Unschärferelation ist die Absorptionskurve um die diskrete Linie verbreitert. Wegen der Schwingungen der Nd Atome kommt es zu einer weiteren Verbreitung, so das sich diese benachbarten Übergänge überlappen.
Für den Laserbetrieb muss nun genau dieser Absorptionsbereich um 800nm angeregt werden. Dies geschieht mit Entladungslampen oder Laserdioden. Mit den Entladungslampen lassen sich die höchsten Leistungen erreichen, sie senden aber ein sehr breitbandiges Licht aus, so dass nur ein geringer Teil vom Laserkristall aufgenommen wird. Der Wirkungsgrad ist entsprechend schlecht bei ca. 3 %. Mit Laserdioden bekommt man genau auf 800nm abgestimmtes Licht, mit gutem Wirkungsgrad von ca. 50%, die Pumpleistung ist aber trotzdem geringer, da die Diodenleistung grundsätzlich kleiner als die der Entladungslampen ist.

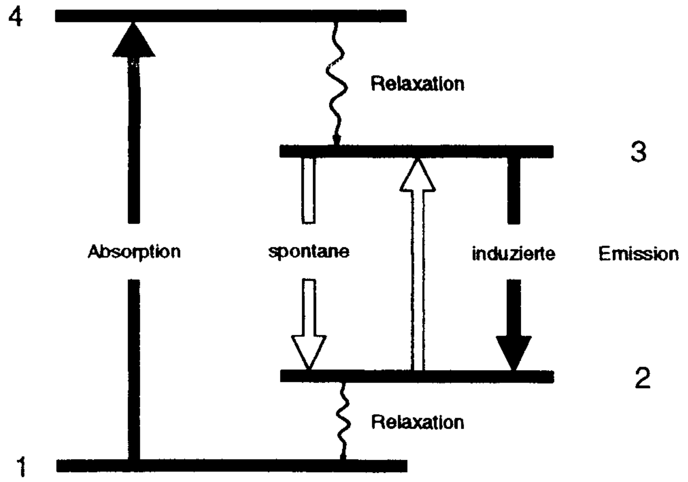


Abbildung 3: Model der für Laserbetrieb wichtigen Energieniveaus

1.5 Vierniveausystem des Nd:YAG Lasers

Es gibt 4 für den Laserbetrieb wichtige Nd- Energieniveaus.
Die wichtigsten Prozesse sind folgende:

1.5.1 Absorption

Durch optisches Pumpen werden die Nd Atome aus dem Grundniveau 1 in das Niveau 4 gehoben. Dabei absorbieren sie die einfallende Strahlung der Pumpquelle (in unserem Fall eine Laserdiode). Die Absorption erfolgt bei diskreten Frequenzen, die der Energiedifferenz des Übergangs entsprechen. $\nu\hbar = E_4 - E_1$

1.5.2 Relaxation1

Aus dem Niveau 4 Relaxieren die Nd Atome sehr schnell zum Niveau 3. Der Übergang erfolgt strahlunglos, durch Stösse oder Änderung der Schwingungsmoden. Das bedeutet, dass N_4, die Zahl der Nd Atome im Niveau 4 als 0 angenommen werden kann.
Pumprate (Absorption + Relaxation1):

$$\frac{dN_3}{dt} = \eta \cdot W_{14} \cdot N_1 = W_P \cdot N_1 \tag{1}$$

N_3	...Anzahl der Nd Atome im Niveau 3
η	...Pumpwirkungsgrad
W_{14}	...Energie, um von Niveau 1 nach 4 zu kommen
W_P	...Pumpenergie

1.5.3 Spontane Emission

Durch Abstrahlung von Photonen können die Nd Atome vom Niveau 3 in das Niveau 2 kommen. Spontane Rate:

$$\frac{dN_3}{dt} = -\Gamma \cdot N_3 \tag{2}$$

mit

$$\Gamma = \frac{1}{\tau_s} \tag{3}$$

τ_s ...Mittlere Lebnsdauer des Nd Atoms im Niveau 3, bevor es spontan ein Photon emmitiert

1.5.4 Induzierte Emission

Erst durch die induzierte Emission kann das für den Laser typische kohärente Licht entstehen. Dabei kollidiert ein Photon mit einem Nd Atom im Niveau 3. Das Atom emmitiert dann ein zum ersten identisches Photon, das die gleiche Richtung, Polarität, Energie und Phase hat. Es gibt dann also 2 "identische" Photonen. Diese können weitere Nd Atome zur induzierten Emision anregen. Das Atom fällt nach der Energieabgabe auf Niveau 2. Es besteht auch die Möglichkeit für den umgekehrten Prozess; das Photon kann von einem Atom im Niveau 2 absorbiert werden. Es steigt dann zurück ins Niveau 3. Die induzierte Rate hängt also von der Photonendichte p, und denn Besetzungszalhen N_2 und N_3 ab.

$$\frac{dN_3}{dt} = \sigma \cdot c \cdot p \cdot (N_2 - N_3) \tag{4}$$

σ ...Wirkungsquerschnitt
p ...Photonendichte

1.5.5 Relaxation 2

Der Übergang von 2 nach 3 erfolgt ähnlich, wie der Übergang von 4 nach 3 sehr schnell und strahlungslos. Es wird angenommen: $N_2 = 0$. Dadurch wird auch verhindert, dass Photonen durch Atome im Niveau 2 absorbiert werden.

1.5.6 Ratengleichungen

Mit sehr kleinen N_2 und N_4 sowie mit konstanter N_0

$$N_0 = N_1 + N_3 \tag{5}$$

ergibt sich

$$\frac{dn}{dt} = -\sigma c p n - \Gamma n + W_p \cdot (N_0 - n) \tag{6}$$

N_0 ...Gesamtanzahl der beteiligten Nd Atome
n ... Besetzungsinversion $N_3 - N_2$

Die Photonendichte p ist nicht konstant, wegen der Emissions und Absorptionsprozessen in 2 - 3 Niveaus:

$$\frac{dp}{dt} = -\sigma cp(N_2 - N_3) = \sigma cpn \tag{7}$$

Durch Verluste im Resonator:

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{p}{\tau_{ph}} \tag{8}$$

insgesammt:

$$\frac{dp}{dt} = p(\sigma cn - \frac{1}{\tau_{ph}}) \tag{9}$$

Für stationären cw Betrieb sind die Besetzungszahlen zeitlich konstant. Für die Ratengleichungen (6) und (9) gibt es dann eine einfache Lösung:

$$n = \frac{N_0 W_p}{c\sigma p + W_p + \Gamma} \tag{10}$$

$$p = W_p(\tau_{ph} N_0 - \frac{N_0}{c\sigma}) - \frac{\Gamma}{c\sigma} \tag{11}$$

Man sieht, dass die Inversion n auch ohne einen Photonenfeld p vorhanden ist, also auch wenn der Laser noch keine kohärente Strahlung liefert. Aus (11) sieht man, dass die ausgekoppelte Strahlung (proportional zu p) erst ab einer Mindestpumpleistung P_{th} grösser 0 ist. Die Größen p und W_p sind der direkten Messung nicht zugänglich, deshalb verwendet man die Gleichungen:

$$P_a = \alpha_S(P_P - P_{th}) \tag{12}$$

mit dem sogenannten differentiellen Wirkungsgrad

$$\alpha_S = \nu \frac{E_{32}}{E_{41}} \cdot \frac{T}{T + L} \tag{13}$$

P_a	...Leistung des ausgekoppelten Lichts
P_P	... Pumpleistung
P_{th}	... Schwellpumpleistung
T	... Transmission des Auskoppelspiegels
L	... Verluste des Resonators

1.6 Betriebsarten

1.6.1 Dauerstrich (Continuous Wave, cw)

Die Inversion n und die Ausgansleistung P_a sind in dieser Betriebsart zeitlich konstant. In userem Experiment wurde nur diese Betriebsart benutzt.

1.6.2 Gepulst (Q- switch)

Gepulste Laser werden mit Blitzlampen optisch gepumpt. Durch Einschwingvorgänge der Inversion n und der Photonendichte p nach dem Einschalten des Pumplichts etstehen sehr hohe Leistungsspitzen. Beim Q- switching wird eine kontinuirlich eingeschaltete Lichquelle zum Pumpen verwendet. Es wird aber der Resonatorkreis blockiert, bis sich die Inversion voll aufgebaut hat. Das kann z.B. durch eine Pockelszelle im Resonatorkreis erreicht werden. Dann wird er freigegeben, und die Inversion wird mit einem kurzerm starkerm Lichtimpuls abgebaut. Der ganze Vorgang kann dann sofort wiederholt werden. Mit Blitzlampen kann man die höchsten Leistungsspitzen erreichen, der Wirkungsgrad ist aber sehr gering.

1.6.3 Quasi-CW

Quasi-CW Laser sind gepulste Laser mit einer sehr hohen Pulsrate pro Sekunde. Das können durchaus 10kHz - 100kHz sein. Während die Spitzenleistung pro Puls den cw Betrieb um Grössenordunungen übersteigen kann, ist die zeitlich gemittelte Leistung geringer, als die von cw.

1.7 Resonator

Der Laserresonator besteht aus zwei Spiegeln, zwischen denen das Laserlicht hin und her reflektiert wird. Es kommt dabei darauf an, dass möglichst viel Kristallvolumen durch das kohärente Licht ausgeleuchtet wird. Übliche Resonatortypen:

- **Planparalleler Resonator:** Beide Spiegel sind eben und Planparallel. Dieser Typ wäre ideal, ist aber sehr schwierig zu justieren.

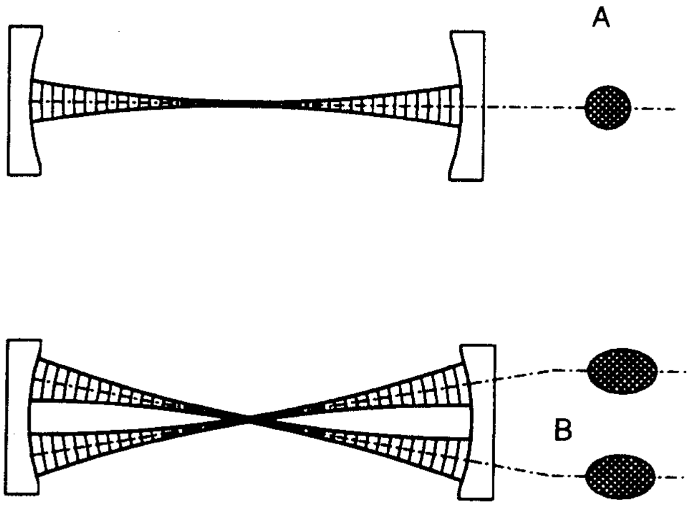
- **Hemisphärischer Resonator:** Ein Spiegel ist eben, der andere sphärisch. Dieser Typ wird am häufigsten verwendet. Er ist unkritisch in der Justage.

- **Sphärischer Resonator:** Beide Spiegel sind sphärisch geschliefen. Er ist am Einfachsten einstellbar, es können sich aber leicht mehrere Moden ausbilden.

1.8 Resonatormoden

1.8.1 Longitudinale Moden

Das kohärente Licht im Resonator kann nur als stehende Welle mit einem Minimum an den Spiegelwänden existieren. Da der Spiegelabstand L fix ist, hängt das nur von der Wellenlänge λ des Lichts ab. Im Resonator könnten theoretisch mehrere Moden mit verschiedenen λ existieren, solange $L = n \cdot \lambda/2$ erfüllt ist. Es können aber nur jene $\nu = c/\lambda$ verstärkt werden, die dem Nd Übergang von Niveau 3 auf 2 entsprechen. Bei $\lambda = 1064nm$ bzw. $\nu = 2.85 \cdot 10^5 GHz$ ist dieser Bereich $90GHz$ breit. Aus den Ratengleichungen geht aber hervor, dass auch von diesen Moden nur jene mit der grössten Emmisionswahrscheinlichkeit anschwingt.



Abl EM_{00} Mode

Abbildung 5: Sphärischer Resonator mit eingezeichneten TEM_{01} Mode

1.8.2 Transversale Moden (TEM)

Neben den Longitudianl Moden gibt es auch Transversal Moden (TEM). Sie entstehen wenn die stehende Welle in gekrümten Spiegeln unter verschiedenen Winkeln 'hineinpassen' kann und äußern sich als Intensitätsverteilung senkrecht zur Strahlungsrichtung. Diese Moden werden mit Indizes m und n identifiziert: TEM_{mn}. m ist die Anzahl der Intensitäts-Spots in X- Richtung, n die Anzahl in Y- Richtung. TEM_{00} ist der wichtigste Mode. Seine Intesität ist gaußverteilt und liegt in der Optischen Achse des Lasers. Wenn TEM Moden höherer Ordnung anschwingen, kann es schwierig werden, den Laserstrahl zu fokusieren. Man kann sie durch Blenden im Resonator rausfiltern. . TEM_{00} Lichleistung ist grösser bei grösserem Spiegelradius des hemisphärischer Resonator, weil dann die TEM_{00} Fläche steigt.

1.9 Laserdiode als Pump- Lichtquelle

Im Gegensatz zu 'normalen' Laser besitzen die Halbleiterlaser nicht diskrete Energieniveaus sondern Energiebänder. Das bedeutet, dass die Energie auch nicht bei wenigen diskreten Frequenzen abgestrahlt wird. Es sind alle Frequenzen möglich, die der Energie beim Übergang zwischen 2 Energiebändern entsprechen. Durch den Resonator werden natürlich nicht alle verstärkt. Bei der Laserdiode sind die Resonatoreigenschaften stark von der Temperatur und der Stromdichte abhängig. Durch die Temperatur ändert sich die Länge und die Brechzahl des Resonators, durch die Stromdichte steigt die Ladungsträgerdichte in der aktiven Zone und ändert ebenfalls die Brechzahl. Der Resonator ist in der p-n Übergangszone konstruiert, das Licht breitet sich darin wie in einem Glasfaserkabel aus, deshalb ist die spätere Fokusierung sehr aufwendig. Das Licht wird stattdessen zum Pumpen eines weiteren Lasers verwendet.
Für kleinere Laserleistungen sind Laserdioden als Pumpquelle ideal. Die GaAlAs Lasediode sendet Licht im Rot-IR 730nm-830nm Bereich aus. Das entspricht der Wellenlänge für

den Nd Übergang von Niveau 1 auf 4, also zum Erzeugen der Inversion. Durch varieren der Temperatur (mit einem Peltierelement) lässt sich die Pumpwellenlänge genau einstellen. Einzelne Laserdioden erreichen Leistungen bis 2W. Durch parallelschalten können bis zu 100W pro Chip erreicht werden.

1.10 Nichlineare Optik

Nach dem üblichen Model werden die Elektronen der Atome eines Mediums von der elektromagnetischen Strahlung ausgelenkt, und so die Atoma polarisiert. Es entsteht ein Dipol, der mit der gleichen Frequenz oszilliert, wie das Feld. Es erzeugt dann selbst ein elektromagnetischen Feld. Wegen Phasenverschiebung zum ursprünglichen Feld breitet sich das Licht im Medium langsamer aus, als im Vakuum. Das Elektron und der Atomkern können bei kleinen Lichtintensitäten als harmonischer Oszillator betrachtet werden. Die Polarisation hängt linear von der Feldstärke E und der Suszeptilitätskonstante χ ab:

$$P = \chi_L \cdot E \tag{14}$$

Bei hohen Lichtintensitäten, wie sie bei Laserstrahlung auftreten, wird die Auslenkung des Elektrons so gross, dass das Bindungpotential nicht mehr als rein quadratisch angesehen werden kann. Das Elektron schwingt dann anharmonisch. Durch Fouriertransformation wird ersichtlich, dass die abgestrahlte elektromagnetische Welle sich aus mehreren überlagerten Frequenzen zusammensetzen kann. Mathematisch gesehen hängt die Polarisation jetzt auch von Termen höherer Ordnung ab:

$$P = \chi_L \cdot E + \chi_2 \cdot E^2 + \chi_3 \cdot E^3 \cdots \tag{15}$$

1.10.1 Frequenzverdopplung

Einer der nichtlinearen Effekte ist die Frequenzverdopplung. Wird ein KTP Kristall (Kalium Titanyl Phosphat $K\ Ti\ O\ PO_4$) richtig in den Laserresonator gestellt, so entsteht neben dem Infraroten auch Licht der doppelten Frequenz mit 532nm. Es ist als grünes Licht leicht erkennbar.
Frequenzverdopplung ist ein quadratischer Effekt:

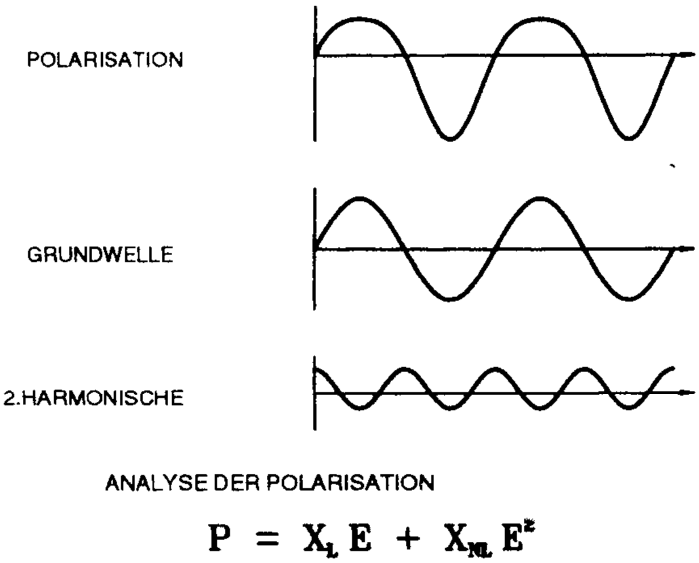


Abbildung 6: Fourieranalyse des vom KTP Kristalls abgestrahlten Lichts

Da der Brechungsindex der doppelten Frequenz $c_{2\nu}$ sich vom Brechungsindex des ursprünglichen Lichts c_ν wegen der Dispersion unterscheiden wird, werden doppelbrechende Kristalle verwendet. Durch Drehung des Kristalls können der ordentliche und außerordentliche Brechungsindex so ausgenutzt werden, dass sich die einfache und verdoppelte Strahlung mit der gleichen Geschwindigkeit im Kristall ausbreitet. Durch dieses sogenannte Phase-Matching wird erreicht, dass die Grundwelle und die 2. Harmonische in Phase bleiben, und zusammen die anharmonische Polariastion bilden. Bei ideal justiertem Kristall gilt:

$$\eta_{SHG} = \frac{P_{2\nu}}{P_\nu} = CI_\nu L^2 \tag{16}$$

η_{SHG}	...Wirkungsgrad der Frequenzverdopplung
$P_{2\nu}$	... Lichtleistung der zweiten Harmonischen
$P_{2\nu}$	... Lichtleistung der Grundwelle
L	... Länge des Frequenzverdoppler- Kristalls
C	... Materialkonstante

2 Versuche

2.1 Dieodenlaserkennlinie

Es wurde die Laserdiode, der Kollimator und der Photodetektor verwendet. Das stark divergente Licht der Laserdiode wurde mit dem Kollimator parallel gemacht und dann mit dem Photodetektor gemessen. Bei einer konstanten Laserdiodentemperatur von $T = 15.0°C \pm 0.1°C$ wurde bei verschiedenen Injektionsströmen die Lichtintensität gemessen. Der Messsignalverstärker des Photodetektors liefert einen Strom, der an einem 50Ω Widerstand eine Spannung verursacht. Diese Spannung wurde an einem Oszilloskop gemessen. Die Messung wurde bei Pulsbetrieb durchgeführt. Die uns interessierende Lichtintensität entspricht dann der Signaldifferenz bei ein- und ausgeschalteten Laserdiode. Es wird so verhindert, dass das Umgebungslicht mitgemessen wird.

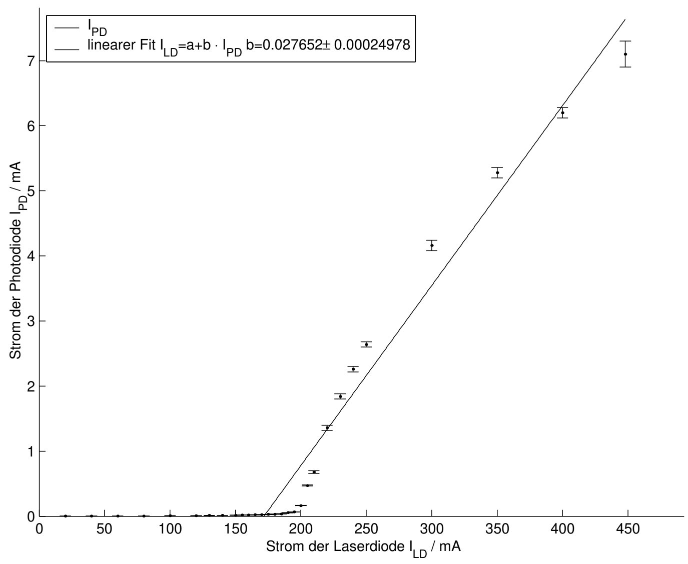


Abbildung 7: Diodenlaserkennlinie

Ergebnisse:

- $I_{th} = 200mA$ ... willkürlich festgesetzt
- $\alpha = 0.0277 \pm 0.0002$

Tabelle 1: Diodenlaserkennlinie

I_{LD}	... Injektionsstrom der Laserdiode in mA
A	... Abgelesen Spannung am Oszilloskop in Div
U_{DIV}	... Verstärkung am Oszilloskop in V/Div
$Gain$	... Verstärkung des Photodiodenstroms
I_{PD}	... berechneter Strom der Photodiode in mA

$I_{LD}/[mA]$	$A/[Div]$	$U_{Div}/[mV]$	$Gain$	$I_{PD}/[mA]$	$\Delta I_{PD}/[mA]$
448.	3.55	500.	5.00	7.10	0.200
400.	7.75	200.	5.00	6.20	0.0800
350.	6.60	200.	5.00	5.28	0.0800
300.	5.20	200.	5.00	4.16	0.0800
250.	6.60	100.	5.00	2.64	0.0400
240.	5.65	100.	5.00	2.26	0.0400
230.	4.60	100.	5.00	1.84	0.0400
220.	3.40	100.	5.00	1.36	0.0400
210.	3.40	50.0	5.00	0.680	0.0200
205.	5.90	20.0	5.00	0.472	0.00800
200.	4.10	10.0	5.00	0.164	0.00400
195.	3.30	5.00	5.00	0.0660	0.00200
190.	5.40	5.00	10.0	0.0540	0.00100
185.	3.70	5.00	10.0	0.0370	0.00100
180.	3.10	5.00	10.0	0.0310	0.00100
175.	2.70	5.00	10.0	0.0270	0.00100
170.	3.00	20.0	50.0	0.0240	0.000800
165.	2.70	20.0	50.0	0.0216	0.000800
160.	2.40	20.0	50.0	0.0192	0.000800
155.	4.30	10.0	50.0	0.0172	0.000400
150.	3.90	10.0	50.0	0.0156	0.000400
140.	3.30	10.0	50.0	0.0132	0.000400
130.	5.40	5.00	50.0	0.0108	0.000200
120.	4.40	5.00	50.0	0.00880	0.000200
100.	3.20	5.00	50.0	0.00640	0.000200
80.0	4.30	5.00	100.	0.00430	0.000100
60.0	2.90	5.00	100.	0.00290	0.000100
40.0	1.50	5.00	100.	0.00150	0.000100
20.0	0.600	5.00	100.	0.000600	0.000100

2.2 Absorptionsspektrum

Als nächstes wurde das Absorptionsspektrum des Nd:YAG Kristalls um 800nm aufgenommen. Dabei wurde das Laserdiodenlicht mit dem Kollimator parallel gestellt, und dann mit einer Linse auf den Kristall fokusiert. Ein Teil des Lichts wird dann vom Kristall absorbiert, das Restlicht wird von der Photodiode gemessen. Für die beste Auflösung wird der Injektionsstrom der Laserdiode auf das Maximum von $I_{LD} = 440mA$ gestellt. Dann wird die Temperatur der Laserdiode, und mit ihr die Lichtwellenlänge variiert.

Tabelle 2: Absorptionsspektrum

T	... Temperatur der Laserdiode in °C
A	... Abgelesen Spannung am Oszilloskop in Div
U_{DIV}	... Verstärkung am Oszilloskop in V/Div
$Gain$	... Verstärkung des Photodiodenstroms
I_{PD}	... berechneter Strom der Photodiode in mA

$T/[°C]$	$A/[Div]$	$U_{Div}/[mV]$	$Gain$	$I_{PD}/[mA]$	$\Delta I_{PD}/[mA]$
8.80	5.40	100.	10.0	1.08	0.0200
10.0	7.50	50.0	10.0	0.750	0.0100
12.5	4.80	100.	10.0	0.960	0.0200
14.8	5.50	100.	10.0	1.10	0.0200
17.3	3.90	100.	10.0	0.780	0.0200
20.0	3.90	50.0	10.0	0.390	0.0100
22.7	5.50	20.0	10.0	0.220	0.00400
24.8	6.90	50.0	10.0	0.690	0.0100
27.8	5.40	200.	10.0	2.16	0.0400
29.6	6.80	200.	10.0	2.72	0.0400
32.3	5.60	200.	10.0	2.24	0.0400
35.2	6.70	100.	10.0	1.34	0.0200
37.5	4.70	100.	10.0	0.940	0.0200
39.5	6.10	100.	10.0	1.22	0.0200
41.6	5.30	200.	10.0	2.12	0.0400

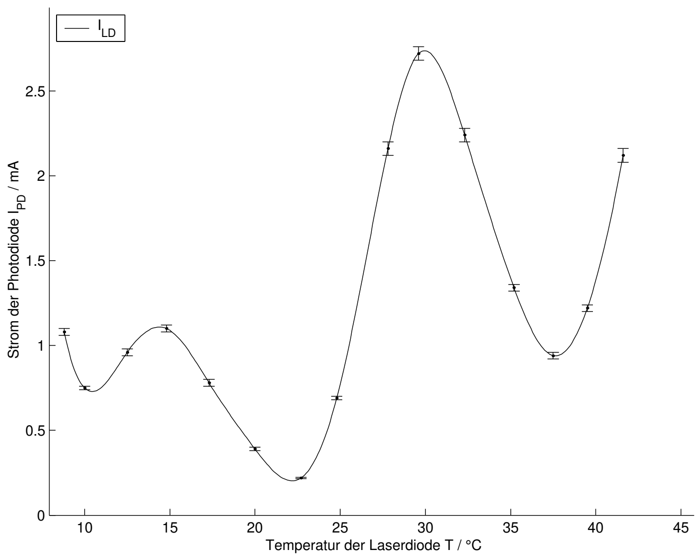


Abbildung 8: Absorptionsspektrum

2.3 Spontane Emission

Die Messung wird ähnlich wie beim Absorptionswspektrum durchgeführt. Es wird aber der RG 1000 Filter vor die Photodiode gesetzt, so dass nur das emmitierte Licht der Nd Atome gemessen wird. Die Nd Atome werden dann mit der Laserdiode gepumpt. Nach dem Abschalten der Laserdiode erfolgt spontane Emmission, die als exponetial absteigende Intensität am Oszilloskop zu sehen ist. Die Kurve wird mit

$$I_{PH} = n \cdot e^{-A_{32} \cdot t} \tag{17}$$

I_{PH}	...gemessene Intensität der spontanen Emission
A_{32}	... Wahrscheinlichkeit für die spontane Emission
t	... Zeit
n	... Proportionalitätsfaktor

gefittet. Uns interresiert dabei nur A_{32}.
Ergebnisse:

- $A_{32} = (0.420 \pm 0.009)\mu s^{-1}$

Tabelle 3: Spontane Emission

t	... Zeit nach Pumplichtabschaltung in μs
A	... Abgelesen Spannung am Oszilloskop in Div
U_{DIV}	... Verstärkung am Oszilloskop in V/Div
$Gain$	... Verstärkung des Photodiodenstroms
I_{PD}	... berechneter Strom der Photodiode in mA

$t/[us]$	$A/[Div]$	$U_{Div}/[mV]$	$Gain$	$I_{PD}/[mA]$	$\Delta I_{PD}/[mA]$
0.000	7.00	5.00	100.	0.00700	0.000100
1.00	4.50	5.00	100.	0.00450	0.000100
2.00	3.00	5.00	100.	0.00300	0.000100
3.00	2.00	5.00	100.	0.00200	0.000100
4.00	1.30	5.00	100.	0.00130	0.000100
5.00	0.800	5.00	100.	0.000800	0.000100
6.00	0.600	5.00	100.	0.000600	0.000100
7.00	0.400	5.00	100.	0.000400	0.000100
8.00	0.300	5.00	100.	0.000300	0.000100
9.00	0.200	5.00	100.	0.000200	0.000100

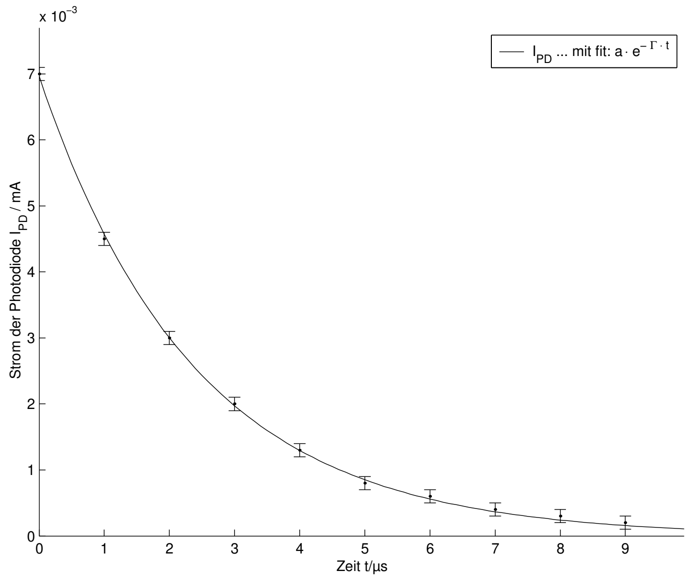


Abbildung 9: Spontane Emission

2.4 Kalibration der Laserdiode

Die Wellenlänge des abgestrahlten Lichts ändert sich bei der Laserdiode abhängig vom Injektionsstrom und der Temperatur. Wenn man Messungen bei konstanter Wellenlänge und verschiedenen Intensitäten machen will, muss die Temperatur nachgeregelt werden. Zur

Kalibration wurde die Temperatur abhängig von der Intensität bei konstanter Wellenlänge aufgenommen. Vorgangsweise: die Wellenlänge wurde so eingestellt, dass ein Absorptionsmaximum durch den Kristall erfolgte. Dann wurde der Injektionsstrom in fixen Schritten verringert, und die jeweilige Temperatur so nachgeregelt, dass die Wellenlänge konstant beim Absorptionsmaximum bleibt. Die so erhaltenen Messpunkte können mit einer Geraden gefittet werden. Mit der Geradenformel lässt sich dann zu jedem Injektionsstrom die passende Temperatur für die Frequenz mit dem maximalen Pumpwirkungsgrad finden.

Tabelle 4: Kurwe für konstantes λ

I_{LD} ... Injektionsstrom der Laserdiode in mA
T ... Temperatur der Laserdiode in °C
A ... Abgelesen Spannung am Oszilloskop in Div
U_{DIV} ... Verstärkung am Oszilloskop in V/Div
$Gain$ ... Verstärkung des Photodiodenstroms

$I_{LD}/[mA]$	$T/[°C]$	$A/[Div]$	$U_{Div}/[mV]$	$Gain$
448.	21.7	2.10	50.0	10.0
425.	22.8	4.10	20.0	10.0
400.	23.8	3.80	20.0	10.0
375.	24.9	6.70	10.0	10.0
350.	25.8	3.00	20.0	10.0
325.	26.7	5.50	10.0	10.0
300.	27.7	4.80	10.0	10.0
275.	28.8	4.00	10.0	10.0
250.	29.7	5.70	5.00	10.0

Ergebnisse:

$$T_{LD}(I_{LD}) = a + b \cdot I_{LD} \tag{18}$$

- $a = (39.7 \pm 0.2)\,°C$
- $b = (-0.0399 \pm 0.0005)\,°C/mA$

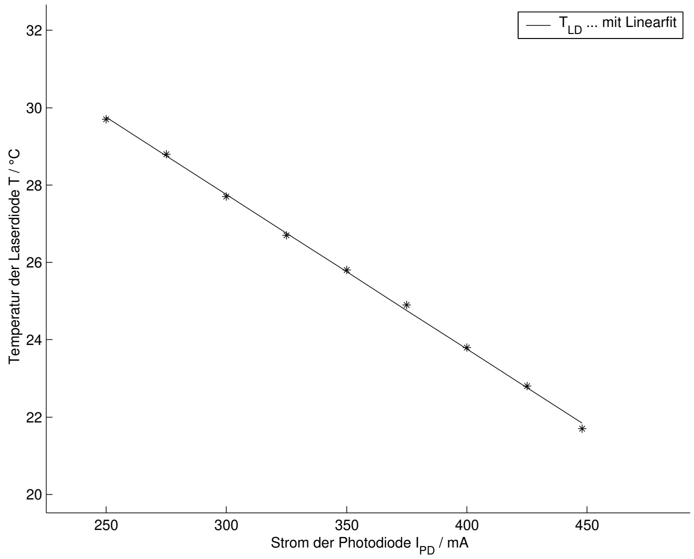


Abbildung 10: Kurwe für konstantes λ

2.5 Nd:YAG Laserkennlinie

Für diese Messung muss der Resonator justiert werden. Es wird der rechte Spiegel eingesetzt. Der linke Spiegel ist bereits links im Nd:YAG Kristall integriert und ist für 800nm Pumplicht mit 15% durchlässig. Die Beiden Spiegel müssen so justiert werden, dass die Maximale Nd- Laserlichtintensität erreicht wird. Vor den Lichtsensor wird jetzt ein RG 1000 Filter gestellt. Damit wird verhindert, dass die Pumpstrahlung mitgemessen wird. Die Justierung erfolgt mit moduliertem Injektionsstrom, so dass am Oszilloskop die Intensitätsdifferenz zum Umgebungslicht zu sehen ist.
Analog zur Messung der Laserdioden- Kennlinie wird nach der Justierung die Laserleistung abhängig von der Pumpleistung gemessen. Man darf dabei nicht auf das Nachstellen der Temperatur und denn 1000nm Filter vergessen.

- $I_{th} = 260mA$ ... willkürlich gewählt
- $\alpha = 0.0041 \pm 0.0003$

Tabelle 5: Nd:YAG Laserkennlinie

I_{LD}	... Injektionsstrom der Laserdiode in mA
T	... Temperatur der Laserdiode in °C
A	... Abgelesen Spannung am Oszilloskop in Div
U_{DIV}	... Verstärkung am Oszilloskop in V/Div
$Gain$	... Verstärkung des Photodiodenstroms
I_{PD}	... berechneter Strom der Photodiode in mA

$I_{LD}/[mA]$	$T/[?C]$	$A/[Div]$	$U_{Div}/[mV]$	$Gain$	$I_{PD}/[mA]$	$\Delta I_{PD}/[mA]$
200.	31.7	0.000	10.0	50.0	0.000	0.000400
225.	30.8	0.000	10.0	50.0	0.000	0.000400
240.	30.1	0.000	10.0	50.0	0.000	0.000400
250.	29.7	3.40	10.0	50.0	0.0136	0.000400
260.	29.3	4.80	10.0	50.0	0.0192	0.000400
270.	28.9	3.40	50.0	50.0	0.0680	0.00200
280.	28.5	5.10	50.0	50.0	0.102	0.00200
290.	28.1	6.60	50.0	50.0	0.132	0.00200
300.	27.7	4.20	100.	50.0	0.168	0.00400
310.	27.3	5.40	100.	50.0	0.216	0.00400
320.	26.9	3.40	200.	50.0	0.272	0.00800
330.	26.5	3.80	200.	50.0	0.304	0.00800
340.	26.1	4.10	200.	50.0	0.328	0.00800
350.	25.7	4.90	200.	50.0	0.392	0.00800
375.	24.7	6.10	200.	50.0	0.488	0.00800
400.	23.7	3.00	500.	50.0	0.600	0.0200
425.	22.7	3.40	500.	50.0	0.680	0.0200
449.	21.7	4.00	500.	50.0	0.800	0.0200

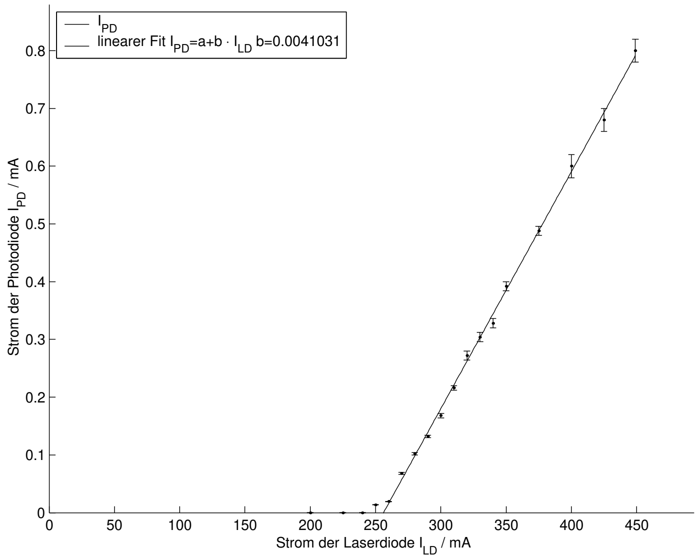


Abbildung 11: Nd:YAG Laserkennlinie

2.6 Laserleistung bei verschiedenen Pumpwellelängen

Wie beim Absorptionsspektrum wurde hier der Injektionsstrom auf 440mA gestellt und die Temperatur variiert. Abhängig von der Temperatur und somit von der Pumpwellenlänge wurde die Nd:YAG Laserlichtintensität gemessen.

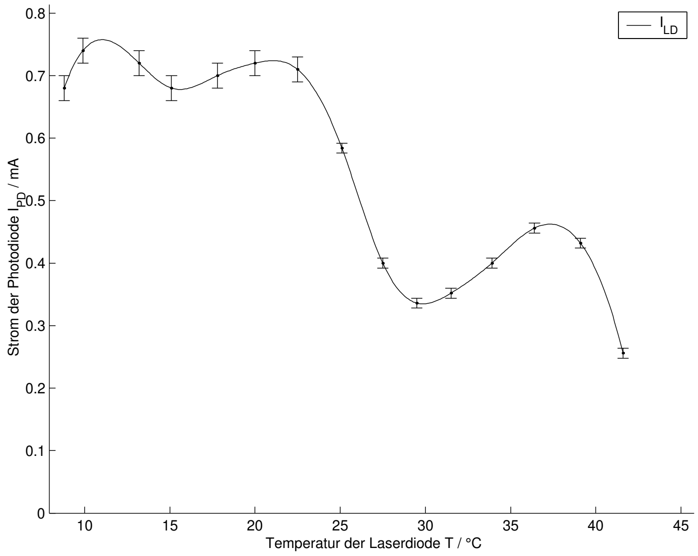


Abbildung 12: Laserleistung bei verschiedenen Pumpwellelängen

Tabelle 6: Laserleistung bei verschiedenen Pumpwellelängen

T	... Temperatur der Laserdiode in °C
A	... Abgelesen Spannung am Oszilloskop in Div
U_{DIV}	... Verstärkung am Oszilloskop in V/Div
$Gain$	... Verstärkung des Photodiodenstroms
I_{PD}	... berechneter Strom der Photodiode in mA

$T/[°C]$	$A/[Div]$	$U_{Div}/[mV]$	$Gain$	$I_{PD}/[mA]$	$\Delta I_{PD}/[mA]$
8.80	3.40	500.	50.0	0.680	0.0200
9.90	3.70	500.	50.0	0.740	0.0200
13.2	3.60	500.	50.0	0.720	0.0200
15.1	3.40	500.	50.0	0.680	0.0200
17.8	3.50	500.	50.0	0.700	0.0200
20.0	3.60	500.	50.0	0.720	0.0200
22.5	3.55	500.	50.0	0.710	0.0200
25.1	7.30	200.	50.0	0.584	0.00800
27.5	5.00	200.	50.0	0.400	0.00800
29.5	4.20	200.	50.0	0.336	0.00800
31.5	4.40	200.	50.0	0.352	0.00800
33.9	5.00	200.	50.0	0.400	0.00800
36.4	5.70	200.	50.0	0.456	0.00800
39.1	5.40	200.	50.0	0.432	0.00800
41.6	3.20	200.	50.0	0.256	0.00800

2.7 Frequenzverdopplung

Für die Frequenzverdopplung wird der KTP Kristall in den Resonator gestellt. Der Lichtstrahl sollte möglichst fokusiert durch den Kristall gehen. Mit dem Ozilloskop und dem BG 39 Filter die Leistung des grünen Lichts gemessen, so dass feinjustiert werden kann. Dann wird bei verschiedenen Injektionsströmen und konstanter Pumpwellenlänge abwechselnd mit dem RG 1000 (für infrarotes Licht) und dem BG 39 Filter (für grünes Licht) gemessen und die Lichtintensitäten notiert.
Leider ergaben die beiden Messungen keine brauchbaren Ergebnisse.
Mögliche systematische Fehler sind:

- Verschiedene Moden werden im KTP Kristall verschieden verstärkt.
- Neue eingeschwungene TEM treten unter einem Winkel α durch den KTP Kristall und werden verschieden verstärkt.

Tabelle 7: Frequenzverdopplung 1. Messung

I_{LD}	... Injektionsstrom der Laserdiode in mA
T	... Temperatur der Laserdiode in °C
A	... (RG 1000 Filter) Abgelesen Spannung am Oszilloskop in Div
U_{DIV}	... (RG 1000 Filter) Verstärkung am Oszilloskop in V/Div
$Gain$	... (RG 1000 Filter) Verstärkung des Photodiodenstroms
A	... (BG 39 Filter) Abgelesen Spannung am Oszilloskop in Div
U_{DIV}	... (BG 39 Filter) Verstärkung am Oszilloskop in V/Div
$Gain$	... (BG 39 Filter) Verstärkung des Photodiodenstroms
I_{YAG}	... (RG 1000 Filter) berechneter Strom der Photodiode in mA
I_{KTS}	... (BG 39 Filter) berechneter Strom der Photodiode in mA

$I_{LD}/[mA]$	$T/[°C]$	$A/[Div]$	$U_{Div}/[mV]$	$Gain$	$A/[Div]$	$U_{Div}/[mV]$	$Gain$	$I_{YAG}/[mA]$	$\Delta I_{YAG}/[mA]$	$I_{KTS}/[mA]$	$\Delta I_{KTS}/[mA]$
240.	30.1	0.000	5.00	100.	0.000	5.00	100.	0.000	0.000100	0.000	0.000100
250.	29.7	2.50	5.00	100.	0.000	5.00	100.	0.00250	0.000100	0.000	0.000100
260.	29.3	3.60	10.0	100.	0.000	5.00	100.	0.00720	0.000200	0.000	0.000100
270.	28.9	3.80	20.0	100.	0.000	5.00	100.	0.0152	0.000400	0.000	0.000100
280.	28.5	2.20	50.0	100.	0.100	5.00	100.	0.0220	0.00100	0.000100	0.000100
290.	28.1	3.00	50.0	100.	0.400	5.00	100.	0.0300	0.00100	0.000400	0.000100
300.	27.7	3.90	50.0	100.	0.700	5.00	100.	0.0390	0.00100	0.000700	0.000100
310.	27.3	4.80	50.0	100.	0.900	5.00	100.	0.0480	0.00100	0.000900	0.000100
320.	26.9	5.60	50.0	100.	0.200	5.00	100.	0.0560	0.00100	0.000200	0.000100
330.	26.5	6.50	50.0	100.	0.500	5.00	100.	0.0650	0.00100	0.000500	0.000100
340.	26.1	3.80	100.	100.	1.00	5.00	100.	0.0760	0.00200	0.00100	0.000100
350.	25.7	4.30	100.	100.	1.40	5.00	100.	0.0860	0.00200	0.00140	0.000100
360.	25.3	4.90	100.	100.	2.50	5.00	100.	0.0980	0.00200	0.00250	0.000100
370.	24.9	5.40	100.	100.	3.20	5.00	100.	0.108	0.00200	0.00320	0.000100
380.	24.5	6.00	100.	100.	4.50	5.00	100.	0.120	0.00200	0.00450	0.000100
390.	24.1	6.50	100.	100.	4.20	10.0	100.	0.130	0.00200	0.00840	0.000200
400.	23.7	7.00	100.	100.	6.00	10.0	100.	0.140	0.00200	0.0120	0.000200
410.	23.3	3.50	200.	100.	4.20	20.0	100.	0.140	0.00400	0.0168	0.000400
420.	22.9	3.70	200.	100.	5.00	20.0	100.	0.148	0.00400	0.0200	0.000400
430.	22.5	3.90	200.	100.	5.20	20.0	100.	0.156	0.00400	0.0208	0.000400
440.	22.1	4.10	200.	100.	5.60	20.0	100.	0.164	0.00400	0.0224	0.000400
450.	21.7	4.40	200.	100.	5.90	20.0	100.	0.176	0.00400	0.0236	0.000400

Tabelle 8: Frequenzverdopplung 2. Messung

I_{LD} ... Injektionsstrom der Laserdiode in mA
T ... Temperatur der Laserdiode in °C
A ... (RG 1000 Filter) Abgelesen Spannung am Oszilloskop in Div
U_{DIV} ... (RG 1000 Filter) Verstärkung am Oszilloskop in V/Div
$Gain$ ... (RG 1000 Filter) Verstärkung des Photodiodenstroms
A ... (BG 39 Filter) Abgelesen Spannung am Oszilloskop in Div
U_{DIV} ... (BG 39 Filter) Verstärkung am Oszilloskop in V/Div
$Gain$ ... (BG 39 Filter) Verstärkung des Photodiodenstroms
I_{YAG} ... (RG 1000 Filter) berechneter Strom der Photodiode in mA
I_{KTS} ... (BG 39 Filter) berechneter Strom der Photodiode in mA

$I_{LD}/[mA]$	$T/[°C]$	$A/[Div]$	$U_{Div}/[mV]$	$Gain$	$A/[Div]$	$U_{Div}/[mV]$	$Gain$	$I_{YAG}/[mA]$	$\Delta I_{YAG}/[mA]$	$I_{KTS}/[mA]$	$\Delta I_{KTS}/[mA]$
240.	30.1	0.000	5.00	100.	0.000	5.00	100.	0.000	0.000100	0.000	0.000100
250.	29.7	0.000	5.00	100.	0.000	5.00	100.	0.000	0.000100	0.000	0.000100
260.	29.3	3.50	5.00	100.	0.000	5.00	100.	0.00350	0.000100	0.000	0.000100
270.	28.9	6.00	10.0	100.	0.000	5.00	100.	0.0120	0.000200	0.000	0.000100
280.	28.5	4.20	20.0	100.	0.000	5.00	100.	0.0168	0.000400	0.000	0.000100
290.	28.1	6.30	20.0	100.	0.000	5.00	100.	0.0252	0.000400	0.000	0.000100
300.	27.7	3.30	50.0	100.	0.000	5.00	100.	0.0330	0.00100	0.000	0.000100
310.	27.3	4.40	50.0	100.	0.000	5.00	100.	0.0440	0.00100	0.000	0.000100
320.	26.9	5.30	50.0	100.	0.000	5.00	100.	0.0530	0.00100	0.000	0.000100
330.	26.5	6.40	50.0	100.	0.000	5.00	100.	0.0640	0.00100	0.000	0.000100
340.	26.1	7.30	50.0	100.	0.500	5.00	100.	0.0730	0.00100	0.000500	0.000100
350.	25.7	4.10	100.	100.	0.900	5.00	100.	0.0820	0.00200	0.000900	0.000100
360.	25.3	4.70	100.	100.	2.50	5.00	100.	0.0940	0.00200	0.00250	0.000100
370.	24.9	5.00	100.	100.	3.50	5.00	100.	0.100	0.00200	0.00350	0.000100
380.	24.5	5.50	100.	100.	4.10	5.00	100.	0.110	0.00200	0.00410	0.000100
390.	24.1	5.90	100.	100.	4.60	5.00	100.	0.118	0.00200	0.00460	0.000100
400.	23.7	6.40	100.	100.	5.50	5.00	100.	0.128	0.00200	0.00550	0.000100
410.	23.3	6.90	100.	100.	3.90	10.0	100.	0.138	0.00200	0.00780	0.000200
420.	22.9	7.30	100.	100.	4.90	10.0	100.	0.146	0.00200	0.00980	0.000200
430.	22.5	7.60	100.	100.	5.60	10.0	100.	0.152	0.00200	0.0112	0.000200
440.	22.1	4.00	200.	100.	6.80	10.0	100.	0.160	0.00400	0.0136	0.000200
450.	21.7	4.20	200.	100.	3.90	20.0	100.	0.168	0.00400	0.0156	0.000400

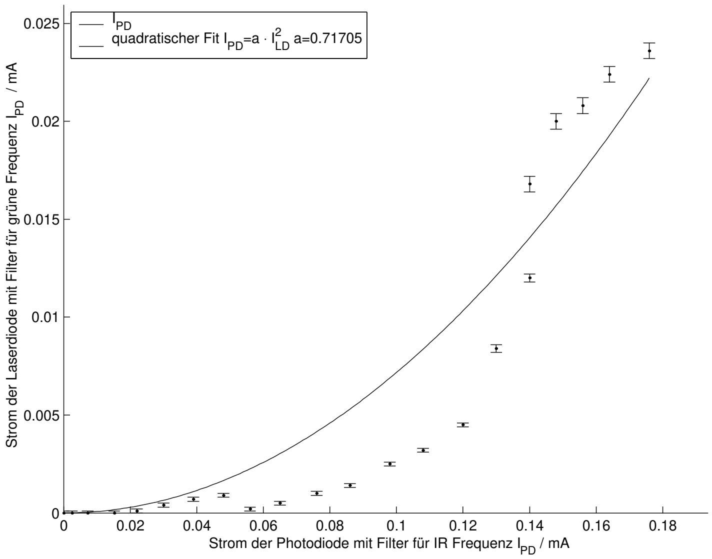


Abbildung 13: Frequenzverdopplung 1. Messung

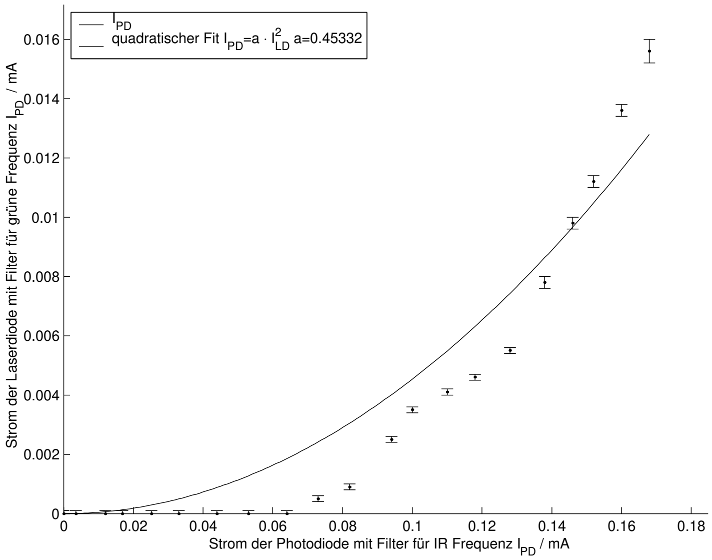


Abbildung 14: Frequenzverdopplung 2. Messung

3 Fehlerbetrachtung

Messfehler am Oszilloskop: Es wurde eine der zur Lichtintensität proportionale Spannung am Oszilloskop abgelesen. Der Ablesefehler beträgt $\Delta U = 0.1 \cdot DIV$. Die Fehler des 50Ω Widerstands und des Signalverstärkers wurden vernachlässigt. Der Photodetektor (Photodiode) wurde linear angenomen.
Messfehler der Temperatur: Die Temperatur konnte auf $\Delta T = 0.1°C$ genau eingestellt werden.
Messfehler des Injektionsstromes: Konnte auf $\Delta I_{LD} = 2mA$ genau eingestellt werden.

4 Zusammenfassung

Laserdiodenkennlinie: Hat einen Schwellstrom $I_{th} = 200mA$ und einen differentiellen Wirkungsgrad $\alpha = 0.0277 \pm 0.0002$

Laserdiodenkalibration: Der maximale Pumpwirkungsgrad wurde bei der Laserdiodentemperatur

$$T_{optimal} = (39.7 \pm 0.2) + I_{LD} \cdot (-0.0399 \pm 0.0005)$$

mit dem Laserdiodenstrom I_{LD} in mA gefunden.
Spontane Emission: Die Wahrscheinlichkeit für spontane Emision von Nivau 3 auf Nivau 2 beträgt $A_{32} = (0.420 \pm 0.009)\mu s^{-1}$

Nd:YAG - Laserkennlinie: Hat einen Schwellstrom $I_{th} = 260mA$ und einen differentiellen Wirkungsgrad $\alpha = 0.0041 \pm 0.0003$