
4.6: Laserdiodengepumpter Nd:YAG-Laser und Frequenzverdopplung

Andreas Kleiner

Matr-Nr.: 1574166

E-Mail: akleiner@online.de

Anton Konrad Cyrol

Matr-Nr.: 1639629

E-Mail: anton.cyrol@stud.tu-darmstadt.de

Betreuer: Dipl. Phys. Lukas Drzewietzki
Versuch durchgeführt am: 30. Mai 2011
Abgabedatum: 9. Juni 2011



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

PHYSIKALISCHES PRAKTIKUM
FÜR FORTGESCHRITTENE

Wir erklären hiermit, dass wir diese Ausarbeitung selbst und ohne unzulässige Hilfe Dritter verfasst und auch in Teilen keine Kopien anderer Arbeiten verwendet haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	2
2	Theoretische Grundlagen	2
2.1	Laseremission	2
2.2	Halbleiter-(Dioden-)Laser	2
2.3	Nd:YAG-Laser	2
2.4	Nichtlineare Optik	2
2.5	Frequenzverdopplung	3
2.6	Laserschutz	3
3	Versuchsablauf	3
4	Versuchsdurchführung & Auswertung	3
4.1	Absorption von Nd:YAG	3
4.2	Halbleiterlaser	4
4.2.1	Kennlinie des Halbleiters	4
4.2.2	Differenzielle Quanteneffizienz	5
4.3	Nd:YAG - Laser	5
4.3.1	Nd:YAG-Leistung / Pumpleistungs - Kennlinie	6
4.3.2	Quantenwirkungsgrad	6
4.3.3	Totale Leistungseffizienz	6
4.4	Frequenzverdoppelung	7
4.4.1	Lichtleistungsverlauf	7
4.4.2	Konversionseffizienz	7
4.4.3	Maximale Konversionseffizienz	8
4.5	Laserpointer	8
5	Ergebnis	9

1 Einführung

Der Laser ist die Grundlage vieler moderner Anwendungen sowohl im wissenschaftlichen als auch im industriellen Bereich. In diesem Versuch soll ein Nd:YAG - Laser gebaut werden, der ein weit verbreiteter Festkörperlaser ist. Im Versuch wird der Nd:YAG - Kristall durch einen Halbleiterlaser optisch gepumpt. Der Nd:YAG - Laser emittiert elektromagnetische Strahlung im infraroten Bereich (1064nm), welche durch Frequenzverdoppelung mittels eines KTP - Kristalls für das menschliche Auge sichtbar gemacht wird. Der im Versuch verwendete Aufbau findet in dieser Art auch Verwendung bei grünen Laserpointern.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Laseremission

Grundlage für die Laseremission ist eine Besetzungsinversion, d.h. ein energetisch höheres Niveau muss stärker besetzt sein, als das energetisch niedrigere. Laserlicht wird durch stimulierte Emission erzeugt, d.h. ein angeregtes Atom wird mit Licht bestrahlt, wodurch bei passender Energie des Photons, das Atom in einen energetisch niedrigeren Zustand übergeht. Dabei wird noch ein zweites Photon emittiert, das identisch zum einfallenden Photon ist, d.h. es hat die gleiche Energie, die gleiche Bewegungsrichtung und die gleiche Polarisation.

Der Prozess der stimulierten Emission findet in einem aktiven Medium statt. Um eine Laseremission zu ermöglichen, muss das aktive Medium gepumpt werden. Das geschieht in einem Resonator. Er enthält das aktive Medium und wird durch Spiegel, die auf den beiden Seiten des Mediums angebracht werden, die senkrecht auf der Ausbreitungsrichtung stehen, begrenzt. Damit das Laserlicht den Resonator verlassen kann, ist einer der beiden Spiegel teildurchlässig.

2.2 Halbleiter-(Dioden-)Laser

Beim Halbleiterlaser kann die Besetzungsinversion entweder durch optisches Pumpen, Beschuss mit hochenergetischen Elektronen oder durch Injektion von Minoritätsträgern erzielt werden. Für die Laseremission wird der pn-Übergang ausgenutzt, bei dem Elektronen vom Leitungsband in das Valenzband fallen und dabei ein Photon emittieren. Die Intensität des Lichtes des Halbleiterlasers ist abhängig vom Injektionsstrom und steigt oberhalb des Schwellstroms schnell an. Damit verbunden ist die starke Abnahme der Breite des Emissionsspektrums.

Halbleiterlaser-Kristalle können unterschiedlich aufgebaut sein. Bei gewinngeführten Lasern wird durch eine Isolationsschicht der Stromfluss durch den Kristall auf ein kleines Gebiet begrenzt. Der Nachteil dieser Bauart ist die hohe Absorption von Laserlicht in den ungepumpten Bereichen. Bei indexgeführten Lasern wird der aktive Bereich mit einem Material mit geringerem Brechungsindex umgeben. Dadurch bleibt das Licht wegen Totalreflexion im aktiven Bereich. Diese Lasertypen arbeiten bei Schwellströmen von $I_{\text{thr}} < 10\mu\text{A}$. Weiterhin gibt es noch quantum well-Laser.

2.3 Nd:YAG-Laser

Dieser Laser besteht aus einem Neodym-dotierten Yttrium-Aluminium Granat-Kristall. In diesem Lasersystem gibt es vier Energieniveaus. Der Nd:YAG-Laser emittiert vier Wellenlängen: 1834 nm (1%), 1338 nm (14%), 1064 nm (60%) und 946 nm (25%). Das optische Pumpen kann entweder über eine Xenon-Blitzlampe oder über einen weiteren Halbleiterlaser (GaAs-Laser mit $\lambda = 805 - 809\text{ nm}$) geschehen. Durch die Dotierung des YAG Kristall ungefähr 1% der Y^{3+} -Ionen durch Nd^{3+} -Ionen ersetzt.

2.4 Nichtlineare Optik

Fällt eine elektromagnetische Welle auf ein Medium, so induziert die einfallende Welle elektrische Dipolmomente. Die Vektorsumme der elektrischen Dipolmomente nennt man die dielektrische Polarisation. In der linearen Optik geht man davon aus, dass die dielektrische Polarisation proportional zur elektrischen Feldstärke der einfallenden Welle ist. Dadurch folgt, dass im linearen Bereich das Superpositionsprinzip und die Erhaltung der Wellenfrequenz gilt. Diese beiden Prinzipien gelten in der nichtlinearen Optik nicht mehr. Man entwickelt die dielektrische Polarisation mit einer Potenzreihenentwicklung nach der elektrischen Feldstärke:

$$\vec{P}(\vec{E}) = \epsilon_0 \left[\chi^{(1)} \vec{E}^1 + \chi^{(2)} \vec{E}^2 + \chi^{(3)} \vec{E}^3 + \dots \right] \quad (1)$$

Es gilt $\chi^{(n)} \gg \chi^{(n+1)}$. Folglich treten bei niedrigen Intensitäten kaum Effekte höherer Potenzen auf. Daher gelang es erst nach Entdeckung des Lasers nichtlineare Effekte nachzuweisen, da dieser ausreichend hohe Intensitäten liefert. Mittlerweile hat man einige Effekte höherer Ordnung entdeckt.

2.5 Frequenzverdopplung

Optische Frequenzverdopplung ist ein nichtlinearer Effekt 2. Ordnung. Er wird dadurch hervorgerufen, dass Elektronen soweit ausgelenkt werden, sodass die entstehende Schwingung anharmonisch ist. Es entstehen folglich Wellen höherer Frequenzen. Damit sich eine sogenannte Oberwelle doppelter Frequenz makroskopisch ausbreiten kann, müssen sich, die von den einzelnen Oszillatoren ausgehenden Wellen, konstruktiv überlagern. Dies ist genau dann der Fall, falls die Phasengeschwindigkeit der Oberwelle und der Grundwelle gleich sind. Da diese gegeben ist durch $v_{phase} = c/n(\omega)$, muss gelten

$$n(\omega_1) = n(\omega_2) = n(2\omega_1) \quad (2)$$

Dies kann man mit optisch anisotropen Medien erreichen. Im Versuch wird dazu einen Kaliumtitanylphosphat (KTP) - Kristall verwendet. Dies ist ein optisch einachsiger Kristall, dessen Brechungsindexellipsoid folglich rotationssymmetrisch ist. Durch variieren des Winkels zwischen der Ausbreitungsrichtung der Welle und der optischen Achse kann man erreichen, dass $n(\omega_o) = n(\omega_{ao})$ ist (wobei o für ordentlicher und ao für außerordentlicher Strahl steht). Ist nun $\omega_o = \omega_{Grundwelle}$ und $\omega_{ao} = \omega_{Oberwelle}$, so kann die Bedingung (2) erfüllt werden.

2.6 Laserschutz

Beim Experimentieren mit Lasern ist besondere Vorsicht geboten, da Laser auf Grund ihrer hohen Leistungsdichten und der guten Fokussierbarkeit gefährlich für Augen und Haut werden können. Man unterteilt Laser nach der europäischen Norm (EN 60825-1) in mehrere Klassen:

- Klasse 1: $400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$, Leistung $P \leq 25 \mu\text{W}$
- Klasse 1 M: $302.5 \text{ nm} < \lambda < 4000 \text{ nm}$, Leistung $P \leq 25 \mu\text{W}$
Laser dieser Klasse sind ungefährlich, meist handelt es sich um Laser in einem verschlossenen Gehäuse.
- Klasse 2: $400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$, Leistung $P \leq 1 \text{ mW}$
Das Licht ist für ein Zeit von 0.25 s für das Auge ungefährlich. Daher ist hier ausreichend Schutz durch den Lidschlussreflex geboten.
- Klasse 3R: $302.5 \text{ nm} < \lambda < 10^6 \text{ nm}$, Leistung $1 \text{ mW} \leq P \leq 5 \text{ mW}$
Das Licht ist gefährlich für das menschliche Auge.
- Klasse 3B: $302.5 \text{ nm} < \lambda < 10^6 \text{ nm}$, Leistung $5 \text{ mW} \leq P \leq 500 \text{ mW}$
Das Licht kann auch für die Haut gefährlich sein. Diffuses Streulicht ist in der Regel ungefährlich.
- Klasse 4: $302.5 \text{ nm} < \lambda < 10^6 \text{ nm}$, Leistung $P > 500 \text{ mW}$
Auch diffuses Streulicht ist gefährlich.

3 Versuchsablauf

Zunächst wird die relative Absorption des Nd:YAG - Kristalls in Abhängigkeit der Wellenlänge Temperatur ermittelt. Die relative Absorption variiert mit der Wellenlänge, welche wiederum von der Temperatur abhängt.

Anschließend soll die Arbeitsgerade der Laserdiode bestimmt werden. Diese gibt an, welche Temperatur bei einer bestimmten Leistung gewählt werden muss, sodass die Zentralwellenlänge konstant ist.

Danach wird die Kennlinie der Laserdiode (ohne Nd:YAG - Kristall) entlang der Arbeitsgeraden bestimmt.

Im nächsten Schritt wird der Resonator eingesetzt und somit Laseremission ermöglicht. Die Apparatur wird so justiert, dass die Emission maximal ist.

Schließlich kann der KTP - Kristall eingesetzt werden, um so die Frequenz des Lichtes zu verdoppeln. Die Intensität des verdoppelten sowie die des nicht verdoppelten Lichtes wird in Abhängigkeit des Injektionsstroms gemessen.

4 Versuchsdurchführung & Auswertung

4.1 Absorption von Nd:YAG

Indem der Nd:YAG-Kristall mit Licht jener Wellenlänge gepumpt wird, bei der er am besten absorbiert, kann die Leistung des Lasers maximiert werden. Diese Wellenlänge wurde im Versuch zuerst ermittelt.

Der Versuchsaufbau bestand aus dem Halbleiterlaser selbst, Kollimator, Fokussierlinse, einem optischen Abschwächer mit $T = 2.5\%$ und einer Photodiode. Linse wurde eine Brennweite von $f = 8 \text{ cm}$ mit dem Lineal gemessen. Vor der Messung wurde der Halbleiterlaser auf die Photodiode ausgerichtet.

Zur Bestimmung der relative Absorption des Nd:YAG-Kristalls wurde die Intensität des Laserlichts einmal mit und einmal ohne Nd:YAG-Kristall gemessen. Hierzu wurde die vom Halbleiterlaser emittierte Wellenlänge durch Ändern der Temperatur durchgestimmt.

Die relative Absorption A ergibt sich dann zu

$$A = \frac{I_0 - I_{\text{Nd:YAG}}}{I_0} \quad (3)$$

mit I_0 = Photostrom ohne Kristall und $I_{\text{Nd:YAG}}$ = Photostrom mit eingesetztem Nd:YAG-Kristall.

Bei der Messung wurde der Injektionsstrom konstant bei $I_{\text{in}} = 700$ mA gehalten. Die Temperatur wurde von $T = 10^\circ\text{C}$ bis $T = 40^\circ\text{C}$ variiert und die Intensität an der Photodiode gemessen.

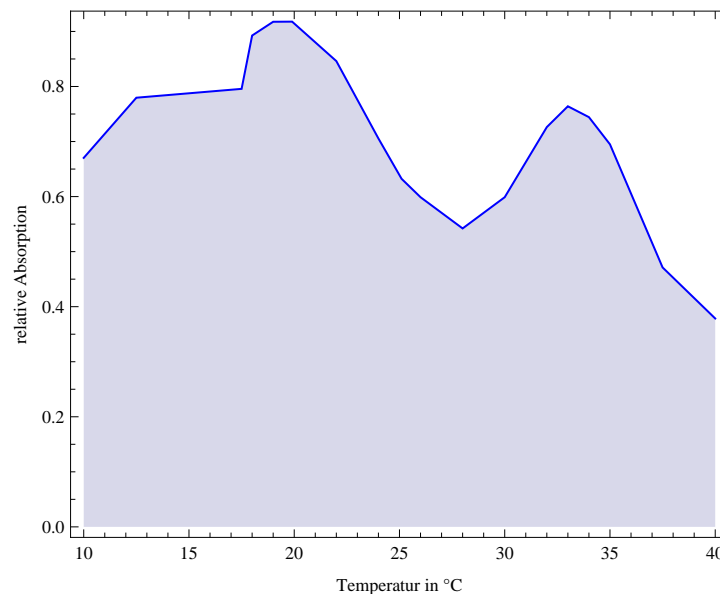


Abbildung 4.1: Relative Absorption, die sich gemäß Formel (3) ergibt.

Wie in Abbildung 4.1 zu sehen ist, gibt es zwei Absorptionsmaxima. Anhand der ausliegenden Auftragung von relativer Absorption über der Wellenlänge konnte das größere der beiden Maxima der Wellenlänge 808.4 nm und das kleinere der Wellenlänge 812.9 nm zugeordnet werden.

4.2 Halbleiterlaser

4.2.1 Kennlinie des Halbleiters

Der Versuchsaufbau ist der gleiche wie bei der Bestimmung der Absorption.

Bevor die Kennlinie aufgenommen werden konnte, wurde die Arbeitsgerade der Laserdiode für $\lambda = 808.4$ nm bestimmt. Hierfür wurde in den Versuchsaufbau zusätzlich der Nd:YAG-Kristall hinter die Fokussierlinse eingesetzt. Durch Nachregeln der Temperatur wurde die Wellenlänge konstant gehalten. Bei verschiedenen Injektionsströmen I_{in} wurde die Temperatur ermittelt, bei der minimale Intensität, d.h. maximale Absorption auftritt. Die so gewonnenen Werte ergeben die Arbeitsgerade der Laserdiode (siehe Abb. 4.2). Die Abweichung bei $I = 300$ mA ist durch das einfallende Tageslicht zu erklären, das bei geringer Leistung des Lasers einen größeren Effekt hat. Daher wurde dieser Wert bei dem Fit vernachlässigt.

Mit der bekannten Arbeitsgerade wurde dann die Kennlinie der Laserdiode aufgenommen werden. Dabei wurden nur Wertepaare genommen, die auf der Arbeitsgeraden zu liegen, da hier die Wellenlänge konstant ist, und die Photostrom an der Photodiode damit nur vom Injektionsstrom abhängt.

Die Leistung lässt sich berechnen durch

$$P = \frac{I}{0.57 \frac{\text{A}}{\text{W}} \cdot 0.025} \quad (4)$$

Die Fitgerade ist gegeben durch $f(I_{\text{in}}) = -112.034 + 0.534439 \cdot I$. Der Schwellstrom ergibt sich daraus zu $I_{\text{th}} = 209.629$ mA. Außerdem ergibt sich aus dem Fit $I_{\text{min}} = 202.688$ mA und $I_{\text{max}} = 216.71$ mA.

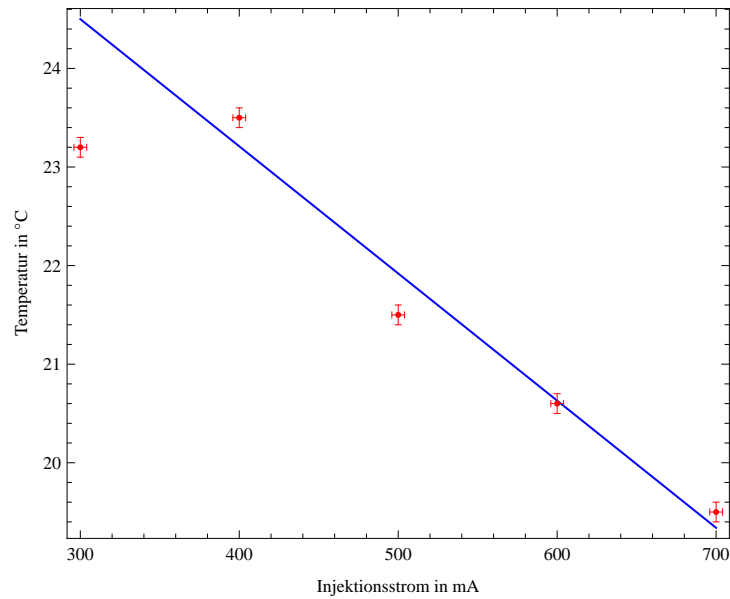


Abbildung 4.2: Arbeitsgerade des Halbleiterlasers. Der rote Graph ergibt sich aus den Messwerten. Der blaue Graph ist ein linearer Fit, bei dem das Datenpaar (300 mA, 23.2 °C) vernachlässigt wurde.

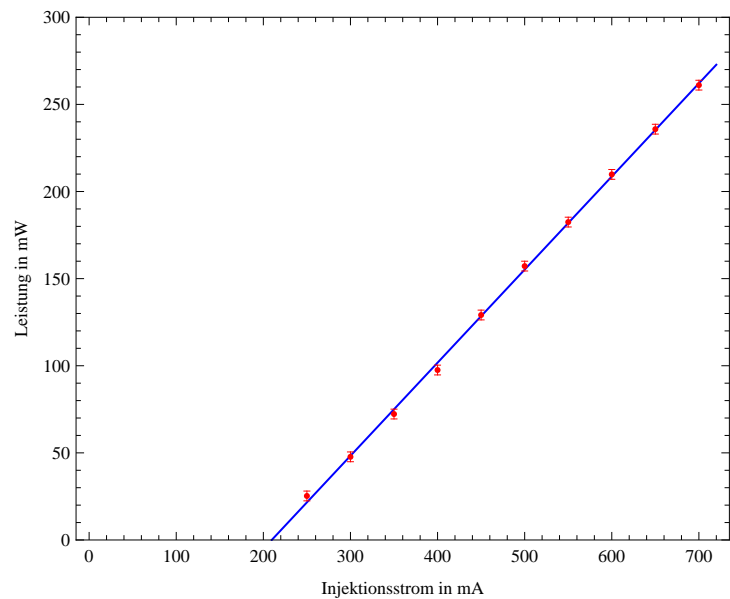


Abbildung 4.3: Kennlinie des Halbleiterlasers.

4.2.2 Differenzielle Quanteneffizienz

Die differenzielle Quanteneffizienz ist gegeben durch

$$\eta_{\text{ext}} = \frac{e \cdot P_{\text{out}}}{h\nu(I - I_{\text{th}})} = \frac{e \frac{E_{\text{ph}} \cdot n_{\text{ph}}}{\Delta t}}{E_{\text{ph}} \frac{n_e \cdot e}{\Delta t}} = \frac{n_{\text{ph}}}{n_e} = \frac{e \cdot 808,4 \text{ nm}}{h \cdot c} \cdot 0.534439 \frac{\text{W}}{\text{A}} = 0.3485 \quad (5)$$

Die differenzielle Quanteneffizienz gibt an, wie viele Photonen pro Elektron emittiert werden.

4.3 Nd:YAG - Laser

Um Laseremission durch den Nd:YAG-Laser zu ermöglichen, wurde ein sphärischer Resonatorspiegel eingebaut. Der Spiegel wurde so justiert, dass die Laseremission maximal ist. Damit war der Nd:YAG-Laser komplett. Die Justage war so genau, dass der Photostrom ($I_{\text{photo}} = 5.8 \text{ mA}$) für $\lambda = 1064 \text{ nm}$ den Wert bei vergangenen Experimenten übertroffen hat.

4.3.1 Nd:YAG-Leistung / Pumpleistungs - Kennlinie

Die Kennlinie des Nd:YAG-Lasers ist in Abb. 4.4 zu sehen. Zwischen 150 mW und 200 mW sind zwei Messwerte zu erkennen, die vergleichsweise weit von der Geraden entfernt liegen. Bei dem niedrigeren der beiden Werte kommt die Abweichung durch eine falsch eingestellte Temperatur zustande. Anstelle von 21.0°C hätten 22.0°C eingestellt werden müssen. Die andere Abweichung ist so nicht zu erklären und kann auf einen Messfehler zurückgeführt werden, der dadurch aufgetreten sein kann, dass die stark fluktuierende Anzeige am Messgerät noch nicht eingependelt war.

Trotz dieser Ausreißer ist ein linearer Zusammenhang erkennbar, denn die Messwerte oberhalb und unterhalb der Ausreißer liegen annähernd auf einer Geraden.

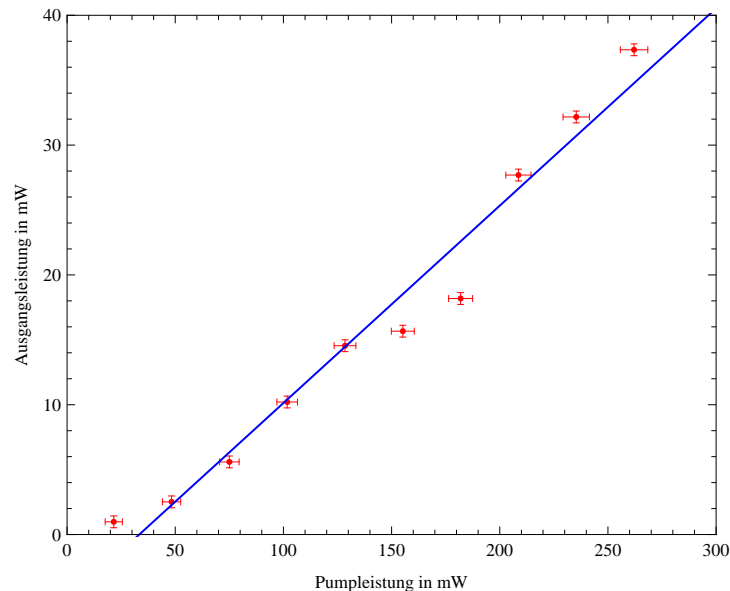


Abbildung 4.4: Kennlinie des Nd:YAG-Lasers.

4.3.2 Quantenwirkungsgrad

Der Quantenwirkungsgrad ist definiert als

$$\epsilon = \frac{\text{Energie des Laserphotons}}{\text{Energie des Pumpphotons}} = \frac{\lambda_{\text{Laserphoton}}}{\lambda_{\text{Pumpphoton}}} \quad (6)$$

für den im Versuch gebauten Laser ergibt er sich zu

$$\epsilon = \frac{808.4 \text{ nm}}{1064 \text{ nm}} = 0.7598 \quad (7)$$

4.3.3 Totale Leistungseffizienz

Die totale Leistungseffizienz η_p wird berechnet durch

$$\eta_p = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \quad (8)$$

mit der Laserleistung P_{out} und der Pumpleistung P_{in} .

In Abb. 4.5 wurde die totale Leistungseffizienz über der Pumpleistung aufgetragen. Der maximale Wert der totalen Leistungseffizienz liegt bei ungefähr 0.15, bei einer maximalen Pumpleistung von 300 mW. Da der Versuchsaufbau nicht vom Umgebungslicht abgeschirmt wurde, ergibt sich dadurch eine Störung, die bei geringer Laserleistung einen höheren Einfluss hat, wie an den großen Fehlerbalken zu erkennen ist. Offensichtlich ist der theoretische Quantenwirkungsgrad $\epsilon = 0.7598$ im Experiment nicht annähernd erreicht worden. Dies liegt unter anderem daran, dass der Nd:YAG - Kristall mehrere Emissionslinien hat. Die relative Intensität der 1064 nm - Linie liegt nur bei 60%. Zudem wird nicht das gesamte Licht im Nd:YAG - Kristall absorbiert. Außerdem gibt es immer Verluste auf Grund einer nicht optimalen Justage.

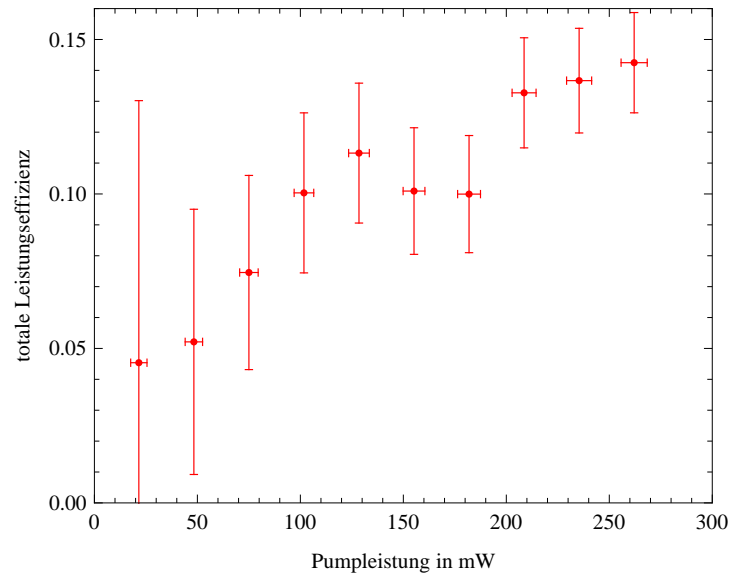


Abbildung 4.5: Totale Leistungseffizienz η_p des Nd:YAG-Lasers.

4.4 Frequenzverdoppelung

4.4.1 Lichtleistungsverlauf

In Abb. 4.6 wurde der Lichtleistungs / Fundamentalleistungs - Verlauf der Frequenzverdopplung aufgetragen. Wie zu sehen ist, ergibt sich ein quadratischer Zusammenhang. Die Fitkurve ergibt sich zu $P_{\text{Out}} = 0.0023173 \cdot P_{\text{In}}^2$

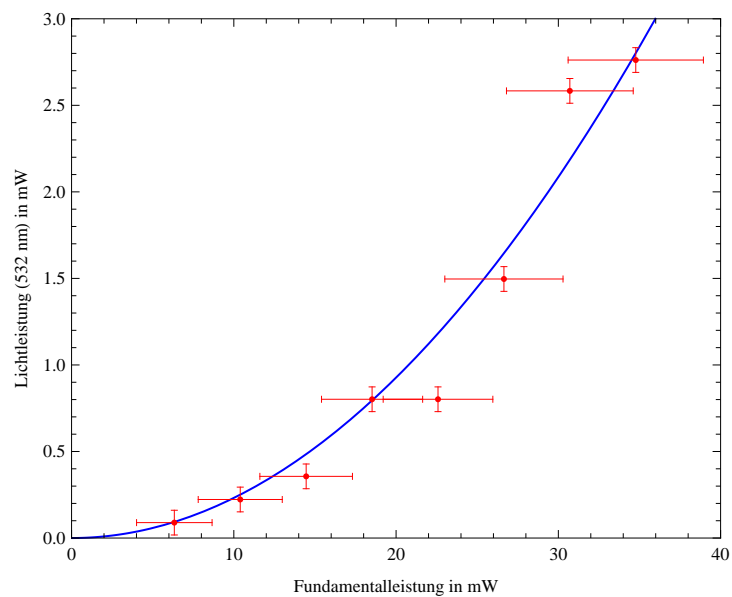


Abbildung 4.6: Lichtleistungs / Fundamentalleistungs - Verlauf der Frequenzverdopplung.

4.4.2 Konversionseffizienz

Die Konversionseffizienz γ_{SHG} wird berechnet durch

$$\gamma_{\text{SHG}} = \frac{P_{2\omega}}{P_{\omega}} \quad (9)$$

Zu erwarten wäre ein linearer Zusammenhang zwischen den beiden Leistungen. Betrachtet man die Auftragung in Abb. 4.7, so ist ein linearer Zusammenhang zu erkennen.

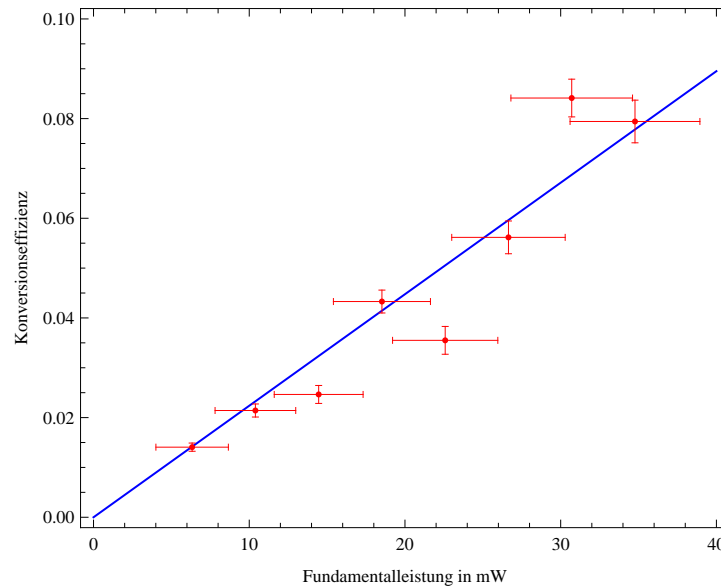


Abbildung 4.7: Konversionseffizienz γ_{SHG} der Frequenzverdopplung, aufgetragen über der Fundamentalleistung.

4.4.3 Maximale Konversionseffizienz

Wir haben eine maximale Konversionseffizienz von 0.0794228 ± 0.00427985 erreicht, bei einer Leistung von 34.7718 mW. Zwar haben wir einen noch höheren Wert von 0.0841283 ± 0.00378315 bei 30.709 mW gemessen, doch wird dieser aufgrund seiner hohen Abweichung, die offensichtlich aus einem Messfehler rührt, nicht berücksichtigt.

Durch eine höhere Laserleistung ließe sich die Konversionseffizienz noch weiter steigern.

4.5 Laserpointer

Das wichtigste Charakteristikum eines kommerziellen Laserpointer ist neben der Wellenlänge die Ausgangsleistung. Diese haben wir in der letzten Aufgabe gemessen. Bei dem kommerziellen Produkt handelte es sich ebenfalls um einen Nd:YAG-Laser. Zur Messung wurde der Strahl des Laserpointers auf die Photodiode gerichtet. Die gemessenen Größen sind in der Tabelle aufgeführt.

Größe	Wert	Fehler
Strom I_{In} in mA	198.6	0.1
Spannung U_{In} in V	2.83	0.005
Photostrom I	14.5 Sk = 0.29 mA	0.2 Sk = 0.04 mA

Mit $P_{\text{In}} = I_{\text{In}} \cdot U_{\text{In}}$ beträgt die aufgenommene Leistung $P_{\text{In}} = (0.562038 \pm 0.00103254) \text{ mW}$.

Die Laserleistung wird berechnet durch

$$P = \frac{I}{0.28 \frac{\text{A}}{\text{W}}} \quad (10)$$

Damit folgt $P = (1.03571 \pm 0.01429) \text{ mW}$. Dieser Wert erscheint realistisch. Er entspricht der typischen Leistung eines kommerziellen Laserpointers.

Weiterhin lässt sich die Effizienz $\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{In}}}$ berechnen. Wir bekommen $\eta = (0.184278 \pm 0.00256422) \%$. Im Vergleich dazu liegt die Effizienz unseres Laserpointers bei $\eta = \eta_{\text{Halbleiterlaser}} \cdot \eta_P \cdot \eta_{\text{KTP}} \approx \eta_{\text{Halbleiterlaser}} \cdot 0.15 \cdot 0.08 = \eta_{\text{Halbleiterlaser}} \cdot 0.012$ bei einem Injektionsstrom von $I = 700 \text{ mA}$. Wobei wir $\eta_{\text{Halbleiterlaser}}$ nicht genau bestimmen können, da wir nicht wissen wie hoch die Spannung war, mit dem dieser betrieben wurde. Wir wissen lediglich, dass $\eta_{\text{Halbleiterlaser}}$ kleiner als die differentielle Quanteneffizienz ($\eta_{\text{ext}} = 0.348$) ist.

5 Ergebnis

Wir konnten im Versuch einen funktionierenden Nd:YAG-Laser bauen. Entgegen der Erwartung hat das Justieren des Resonators wenig Zeit in Anspruch genommen. Die Justage war sehr präzise, sodass wir an der Photodiode ein Strom von $I = 5.7 \text{ mA}$ bei $\lambda = 1064 \text{ nm}$ messen konnten, was deutlich über dem Strom liegt, der bei vergangenen Experimenten erzielt wurde. Trotz dieses guten Ergebnisses wurde für das frequenzverdoppelte Licht mit $\lambda = 532 \text{ nm}$ nur ein Strom von $I = 0,62 \text{ mA}$ gemessen. Dieser Wert liegt im Bereich der Werte der Messungen vergangener Experimente. Das bedeutet, dass die Frequenzverdoppelung nicht so effektiv funktioniert hat, wie es möglich gewesen wäre. Einen Grund dafür konnten wir nicht feststellen. Eine erneute Justage hat auch zu keiner Verbesserung geführt.

Literatur

- [1] F.K. Kneubühl, M.W. Sigrist: Laser (Grundlagen zu Laserprinzip, Halbleiter-und Nd:YAG-Laser)
- [2] W. Koechner: Solid state laser engineering (zum Nd:YAG-Laser)
- [3] W. Demtröder: Laserspektroskopie, Kapitel 5.7 (zur Frequenzverdopplung)
- [4] L. Bergmann, C. Schäfer: Optik, Kapitel 8 (Grundlagen der Nichtlinearen Optik)
- [5] C.E. Wieman, L. Hollberg: Using diode lasers for atomic physics (Literaturmappe) Review of Scientific Instruments 62, 1 (1991), Teil 111 G: 1001 ways to kill a laser
- [6] Laserschutzunterlagen: Gefahren beim Arbeiten mit Lasern, Laserklassifikation

Rohdaten

Messdaten Aufgabe 1

T in °C	mit Nd:YAG	ohne Nd:YAG
10	6	18.2
12.5	4	18.15
17.5	3.8	18.6
18.	1.95	18.15
19	1.5	18.2
19.9	1.5	18.25
22.	2.8	18.2
24.	5.3	18.
25.1	6.6	17.95
26.	7.2	17.95
28.	8.15	17.8
30	7.2	17.95
32	4.9	17.9
33	4.2	17.8
34	4.5	17.6
35	5.4	17.7
37.5	9.2	17.4
40	11.	17.7

Messdaten Aufgabe 2

I in mA	T in °C	Wert des Minimums
700	19.5	19.5
600	20.6	13.
500	21.5	10.5
400	23.5	6.
300	23.2	2.15

Messdaten Aufgabe 3,4,5

I in mA	T in °C aus Fit	Laserdiode, Absorber in Skt. (30 Skt. = 6 mA)	Laserdiode, Nd:YAG, Rg1000 in Skt. (30 Skt. = 6 mA)	Laserdiode, Nd:YAG, KTP, Bg39 in Skt. (30 Skt. = 0.6 mA)	Laserdiode, Nd:YAG, KTP, Rg1000 in Skt. (30 Skt. = 6 mA)
250	25.145	1.8	0.7	0.	0.
300	24.5	3.4	1.8	0.	0.5
350	23.855	5.15	4.	1	1.5
400	23.21	6.95	7.3	2.5	3.
450	22.565	9.2	10.4	4	4.7
500	21.92	11.2	11.2	9	7.1
550	21.275	13.	13.	9	8.
600	20.63	14.95	19.8	16.8	10.5
650	19.985	16.8	23.	29	12.
700	19.34	18.6	26.7	31	13.1