
Laserdioden-gepumpter Nd:YAG-Laser und Frequenzverdopplung

Ilja Homm und Thorsten Bitsch
Betreuer: Lukas Drzewietzki
23.01.2012



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fortgeschrittenen-Praktikum
Abteilung A

1 Einleitung

1.1 Ziel des Versuchs

Der Versuch soll u.a. zwei wichtige Arten von Festkörperlasern vorstellen. Diese sind der Halbleiterlaser, der zum optischen Pumpen des Nd:YAG-Lasers verwendet wird, sowie der Nd:YAG-Laser an sich. Im Laufe des Versuchs wird der YAG-Laser Stück für Stück aufgebaut und zum Schluss mithilfe eines doppelbrechenden Kristalls die Frequenzverdopplung als ein nichtlineares optisches Phänomen untersucht und mittels dieser ein grüner Strahl der doppelten Frequenz erzeugt.

1.2 Physikalische Grundlagen

1.2.1 Laseremission

Das Wort Laser ist eine Abkürzung und steht für Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. 1960 wurde der erste Laser hergestellt und heutzutage ist er ein nicht wegzudenkender Bestandteil des alltäglichen Lebens, sowie der Industrie und Technik. Mittlerweile werden Laser in vielen Geräten, wie zum Beispiel CD-Laufwerken und Laserdruckern, sowie in Bereichen, wie Medizin und Materialbearbeitung eingesetzt. Wie der Name schon sagt, basiert der Laser auf der stimulierten Emission, bei der ein Photon auf ein bereits angeregtes Elektron ausgesandt wird und dieses zum Übergang in den Grundzustand „zwingt“, während ein anderes Photon derselben Energie emittiert wird. Dabei muss die Energie des einstrahlenden Photons genau der Energiedifferenz zwischen dem angeregten und dem Grundzustand entsprechen. Neben der stimulierten gibt es noch die spontane Emission, bei der die angeregten Elektronen von alleine in den Grundzustand übergehen, sowie die Absorption. Im Falle der Absorption wird ein Photon von einem Elektron absorbiert und somit befindet sich daraufhin das Elektron in einem angeregten Zustand. Um eine wirkungsvolle Laseremission zu erhalten, muss eine Besetzungsinversion stattfinden. Das heißt, es müssen sich mehr Elektronen im angeregten, als im Grundzustand, befinden. Diese Besetzungsinversion wird u.a. durch optisches Pumpen erzielt. Beim optischen Pumpen werden Elektronen in ein noch höheres Energieniveau angeregt als das Laserniveau, das für die Laseremission notwendig ist. In diesem Niveau verweilen sie jedoch nicht lange, sondern zerfallen relativ schnell in das Laserniveau, sodass es zu keinem Sättigungseffekt kommen kann und sich immer mehr Elektronen im Laserniveau ansammeln können. Bei einem Drei-Niveau-System gehen die Elektronen aus dem Laserniveau über in den Grundzustand und es wird dabei ein Photon emittiert. Der Nd:YAG-Laser ist ein Vier-Niveau-Laser, bei dem sich zwischen dem Grundzustand und dem Laserniveau noch ein weiteres Hilfsniveau befindet. Durch dieses Hilfsniveau ist der Grundzustand noch geringer besetzt, sodass man mit geringerer Pumpleistung eine Besetzungsinversion erreichen kann (siehe Abbildung 1).

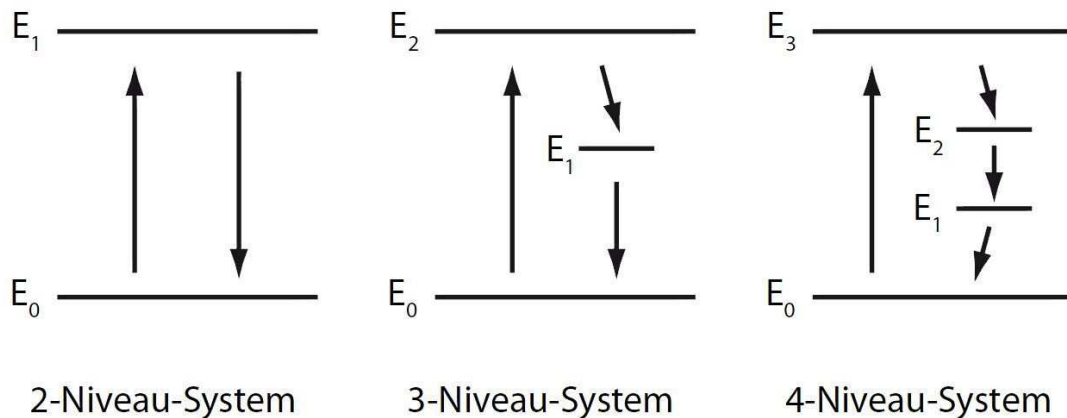


Abbildung 1: Niveau-Schemata für den Laserbetrieb [1]

1.2.2 Halbleiterlaser

Die ersten Halbleiterlaser wurden 1962 hergestellt. Für diesen Versuch wird ein GaAs/AlGaAs-Halbleiterlaser verwendet, der ähnlich einer Leuchtdiode aufgebaut ist, allerdings Laserlicht emittiert. Im Allgemeinen ist die Emissionswellenlänge abhängig vom Halbleitermaterial, wobei es für diesen Fall ca. 800 nm sind. Die Laseremission vollzieht sich durch Rekombinationsprozesse am pn-Übergang. Durch die Besetzungsinversion, zu der es mithilfe von elektrischem Strom kommt, werden über die Hälfte der Elektronen ins Leitungsband gebracht und somit entstehen im Valenzband zu über 50 % Löcher. Das Fermi-niveau der Elektronen dringt dabei ins Leitungsband und das der Löcher ins Valenzband. Als Resonator dienen die Endflächen des Kristalls, die das emittierte Licht im Kristall hin- und herspiegeln, bis es in die gewünschte Richtung austritt. Der Halbleiterlaser wird zum optischen Pumpen des Nd:YAG-Lasers verwendet.

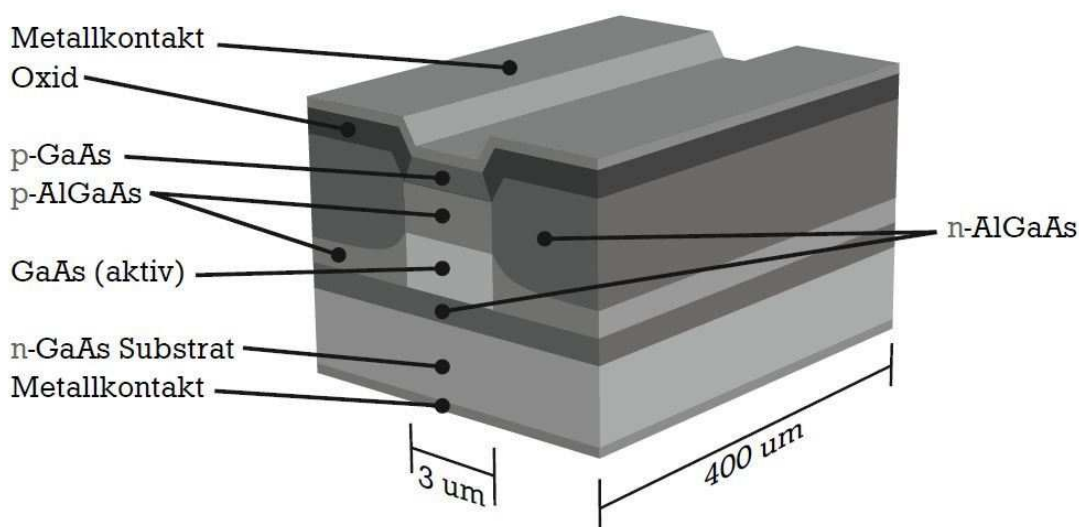


Abbildung 2: Doppelheterostruktur eines GaAs/AlGaAs-Halbleiterlasers [1]

1.2.3 Nd:YAG-Laser

Der Nd:YAG-Laser besteht, wie der Name schon sagt, aus Yttrium-Aluminium-Granat, wobei allerdings der YAG-Kristall zu ca. 1 % mit Nd^{3+} -Ionen dotiert ist. Er ist einer der am häufigsten eingesetzten 4-Niveau-Laser. Die oberen Anregungsniveaus werden mithilfe des umgebenden Kristallgitters zu breiten Bändern aufgespalten, die eine nur sehr geringe Lebensdauer haben und somit eine gute Voraussetzung für eine Besetzungsinversion schaffen. Kommt es infolge von optischem Pumpen zu einer Anregung, so gehen die Elektronen aus dem oberen Anregungsniveau sehr schnell und strahlungslos in das metastabile obere Laserniveau über, wo sie mit $240 \mu\text{s}$ eine relativ lange Zeit verweilen und somit eine hohe Besetzungsdichte entsteht. Von diesem Laserniveau erfolgt dann mit einer Wahrscheinlichkeit von 60 % ein Laserübergang mit einer Emissionswellenlänge von $1064 \mu\text{m}$ in das untere Laserniveau, von dem aus die Elektronen wieder strahlungslos nach 10^{-7} s in den Grundzustand zerfallen.

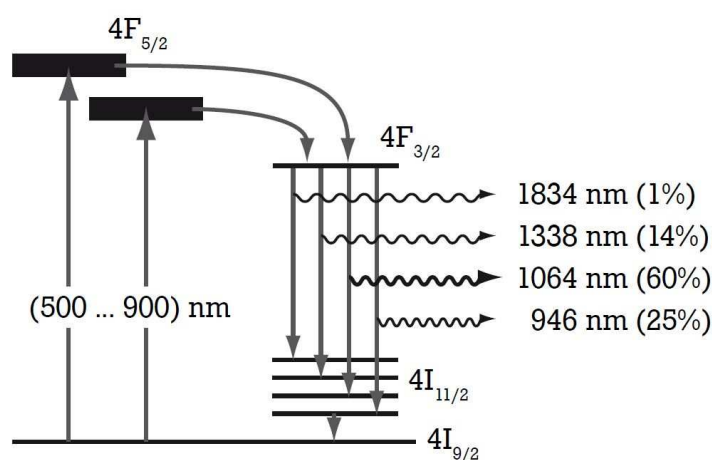


Abbildung 3: Energieniveauschema des Nd:YAG-Lasers [1]

1.2.4 Nichtlineare Optik und Frequenzverdopplung

Während bei niedrigen Intensitäten von klassischer Optik gesprochen wird, treten Phänomene der nichtlinearen Optik auf, wenn hohe Intensitäten auf Materie treffen. In diesem Bereich ist die dielektrische Polarisierung \vec{P} nicht mehr nur proportional zur elektrischen Feldstärke \vec{E} , sondern sieht folgendermaßen aus:

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

Der Term $\chi^{(1)}$ ist linear und beinhaltet Effekte wie z.B. Brechung und lineare Absorption. $\chi^{(2)}$ beschreibt u.a. die Erzeugung der zweiten Harmonischen, parametrisches Mischen (Erzeugung von Summen- und Differenzfrequenzen), sowie optische Gleichrichtung. Zu $\chi^{(3)}$ zählen mitunter die Erzeugung der dritten Harmonischen, die Raman- und Brillouin-Streuung, der Kerr-Effekt und das Verwellenmischen. Die höheren Terme werden nicht berücksichtigt, da sie vernachlässigbar klein sind.

Der zuerst entdeckte und wichtigste $\chi^{(2)}$ -Effekt im Allgemeinen und für diesen Versuch ist die optische Frequenzverdopplung. Bei der Frequenzverdopplung wird Licht, das auf einen

doppelbrechenden Kristall fällt, in seiner Frequenz verdoppelt. In diesem Versuch wurde ein KTP-Kristall (Kalium-Titanyl-Phosphat) verwendet und das infrarote Nd:YAG-Licht mit einer Emissionswellenlänge von $\lambda = 1064 \text{ nm}$ zu einem Lichtstrahl der Wellenlänge $\lambda = 532 \text{ nm}$ frequenzverdoppelt. Für die Phasenanpassungsbedingung (Phase Matching) gilt:

$$n_1(\omega_1) = n_2(\omega_2) = n_2(2\omega_1) , \text{ mit } \omega_2 = 2\omega_1 \quad (2)$$

Dies bedeutet, dass die Brechungsindizes beider Lichtwellen gleich sein müssen, damit es nicht zu einer destruktiven Interferenz kommen kann. Um dies zu ermöglichen, müssen doppelbrechende Kristalle verwendet werden.

2 Versuchsaufbau

Der Nd:YAG-Laser im Versuch besteht aus einer Reihe verschiedener Komponenten. Grafik 4 zeigt schematisch den kompletten Aufbau des Nd:YAG-Lasers.

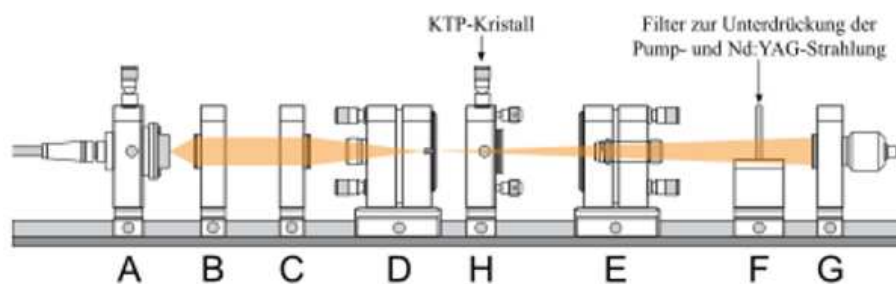


Abbildung 4: Aufbau des Nd:YAG-Lasers [2]

- A → Diodenlasermodul
- B → Kollimator
- C → Fokussierlinse
- D → Nd:YAG Modul
- H → KTP-Kristall
- E → Laserspiegel mit Justagemodul
- F → Filter
- G → Photodetektor

Zu Beginn des Versuchs besteht der Aufbau lediglich aus der Kombination {A,B,C,F,G} und wird im Laufe des Versuchs Stück für Stück erweitert.

Das Diodenlasermodul besteht unter anderem aus einem GaAs-Diodenlaser, dessen Licht durch die Kollimator- und Fokussierlinse auf den Nd:YAG-Kristall fokussiert wird. Der Nd:YAG-Laser wird durch den Diodenlaser gepumpt und sendet dabei Laserlicht im IR-Bereich aus. Der teildurchlässige Hohlspiegel und der Nd:YAG-Kristall bilden den Laserresonator, indem sich der frequenzverdoppelnde KTP-Kristall befindet. Hinter dem Spiegel befindet sich ein Filtermodul, mit dem bestimmte Wellenlängen herausgefiltert werden können. Eine Laserdiode erzeugt, bei eingestrahltm Laserlicht mit ausreichender Energie, an einem Multimeter einen messbaren Photostrom.

3 Versuchsdurchführung

Der gesamte Versuchsablauf ist aus der Versuchsanleitung Abschnitt 4.2 zu entnehmen (siehe Anhang). Punkt 4.2.6 wurde unter Absprache mit dem Betreuer nicht durchgeführt, und Punkt 4.2.5 doppelt durchgeführt. Dabei wurde einmal die Intensität bei steigender (bzw. sinkender) Temperatur des Diodenlasers durchgeführt, um die Existenz von Hysterese-Effekten zu untersuchen.

3.1 Absorption des Nd:YAG-Kristalls

Die relative Absorption des Nd:YAG-Kristalls wurde mit der folgenden Formel berechnet:

$$A_{\text{rel}} = 1 - \frac{I_{\text{mit}}}{I_{\text{ohne}}} \quad (3)$$

Die folgende Grafik zeigt das Absorptionsspektrum des Nd:YAG Kristalls bei veränderlicher Temperatur des Pumpasers. Das höchste Maximum des Absorptionsspektrums markiert die Zentralwellenlänge von $\lambda_{\text{pump}} = 808,4 \text{ nm}$. Im Versuch wurde dieses Maximum bei einem Injektionsstrom von $I_{\text{pump}} = 700 \text{ mA}$ und einer Temperatur von $T_{\text{pump}} = 18 \text{ °C}$ erreicht.

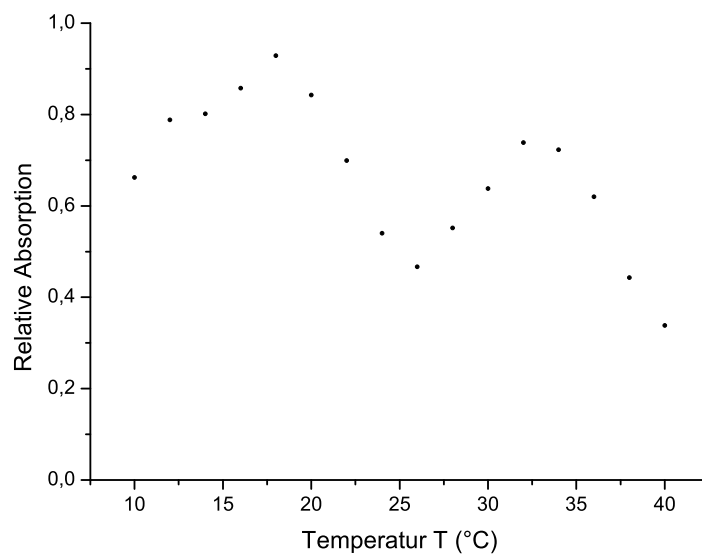


Abbildung 5: Absorptionsspektrum des Nd:YAG Kristalls

3.2 Arbeitsgerade der Laserdiode

Um eine Arbeitsgerade der Laserdiode festzulegen, wurde bei konstantem Pumpstrom die Temperatur so lange variiert, bis der Photostrom minimal wird.

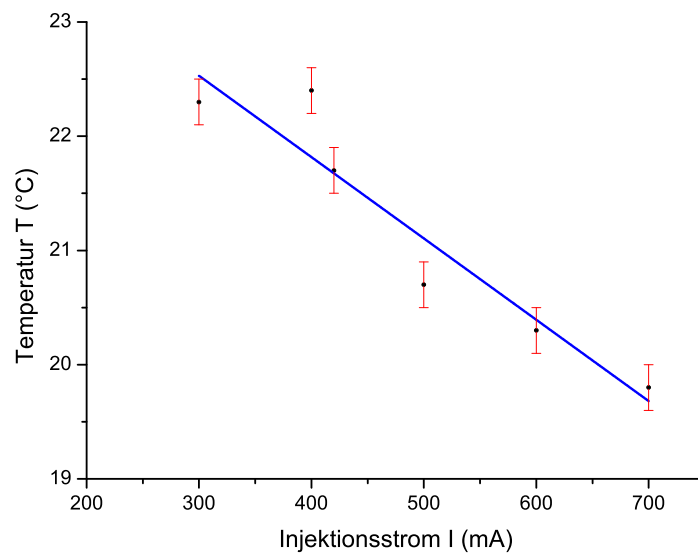


Abbildung 6: Arbeitsgerade der Laserdiode

3.3 Kennlinie der Laserdiode

Um die Kennlinie des Halbleiterlasers aufzunehmen, wird der Photostrom in Abhängigkeit vom Pumpstrom gemessen. Dabei wird die Temperatur so nachgeführt, dass man sich entlang der Arbeitsgeraden bewegt.

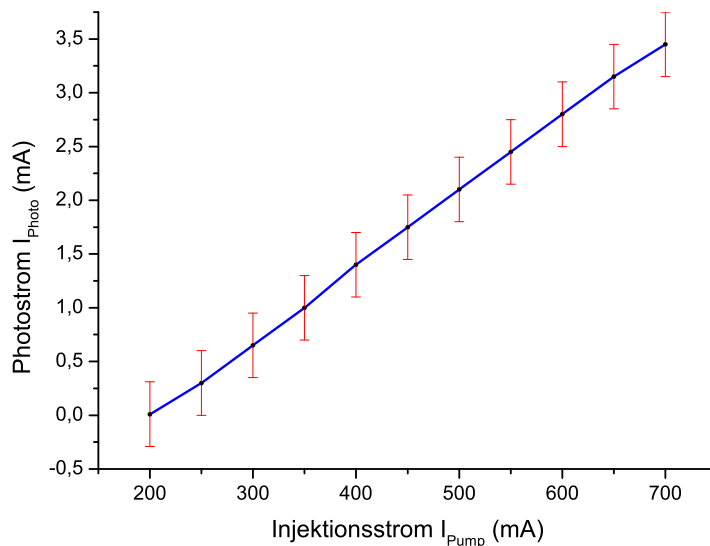


Abbildung 7: Kennlinie der Laserdiode

3.4 Kennlinie des Nd:YAG Lasers

Die Kennlinie des Nd:YAG Lasers wird wie im Schritt zuvor aufgenommen.

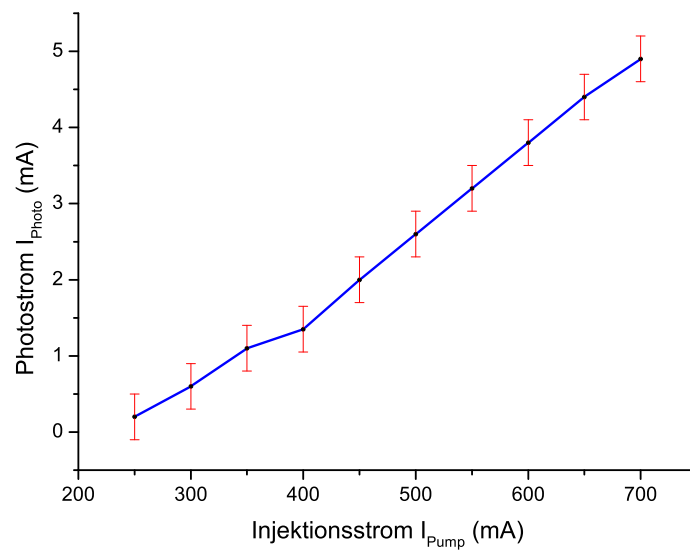


Abbildung 8: Kennlinie des Nd:YAG Lasers

3.5 Kennlinie des Nd:YAG Lasers mit KTP Kristall

Es werden zwei Messungen durchgeführt. Dabei wurden zwei unterschiedliche Filter (RG-1000, BG-39) in den Messaufbau eingesetzt und der Photostrom bei veränderlichem Injektionsstrom gemessen.

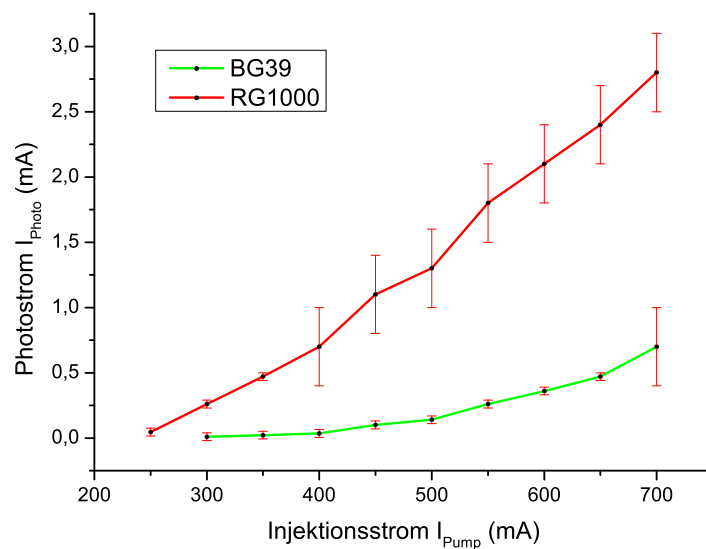


Abbildung 9: Kennlinie des Nd:YAG Lasers mit KTP Kristall

4 Auswertung

4.1 Halbleiterlaser

Die Kennlinie der Lichtleistung des Halbleiterlasers P_{HL} in Abhängigkeit vom Injektionsstrom I wird mithilfe des Stroms an der Photodiode I_{Photo} , der spektralen Empfindlichkeit der Photodiode $\alpha = 0,57 \text{ A/W}$ und einer Transmission des Abschwächungsfilters $T = 0,025$ bestimmt:

$$P_{\text{HL}} = \frac{I_{\text{Photo}}}{\alpha T} \quad (4)$$

Die Ausgleichsgerade hat folgende Form und Aussehen:

$$P_{\text{HL}}(I) = m \cdot I + b = (4,93 \cdot 10^{-4} \pm 3,63 \cdot 10^{-6}) \frac{\text{W}}{\text{mA}} \cdot I - (0,1 \pm 0,0017) \text{ W} \quad (5)$$

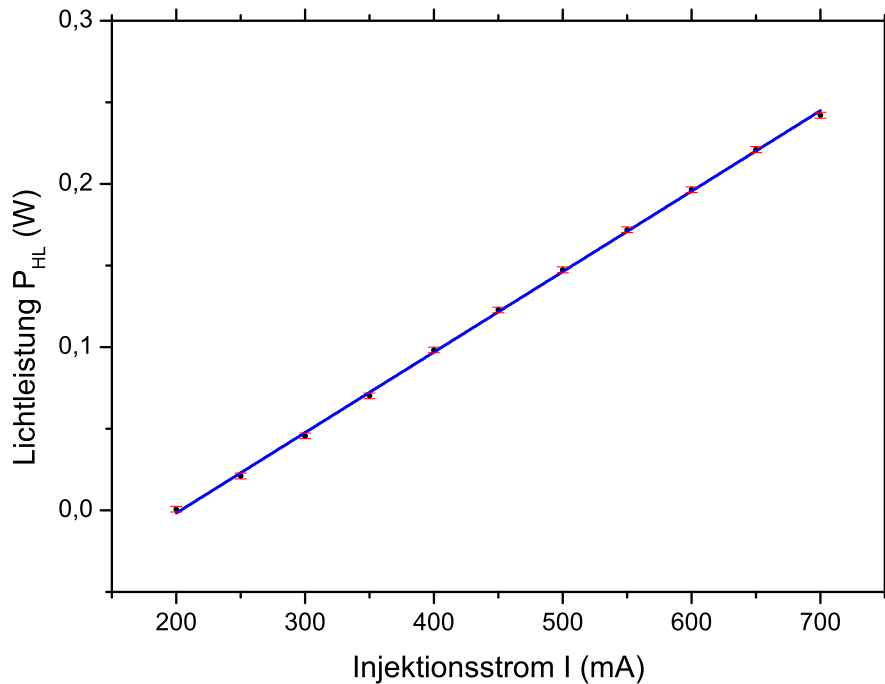


Abbildung 10: Lichtleistungs-/Injektionsstrom-Kennlinie

Aus der Gleichung (5) lässt sich der Schwellstrom I_{th} bestimmen, indem $P_{\text{HL}}(I) = 0$ gesetzt wird. Damit ergibt sich $I_{\text{th}} = (202,84 \pm 3,76) \text{ mA}$.

Die differentielle Quanteneffizienz $\eta_{\text{ext}} = \frac{e P_{\text{out}}}{h\nu(I - I_{\text{th}})}$ bestimmt das Verhältnis der emittierten Photonen zu den Elektronen, die oberhalb des Schwellstroms fließen. Da $\frac{P_{\text{out}}}{(I - I_{\text{th}})}$ gerade die Steigung m und $\nu = c/\lambda$ ist, ergibt sich für $\lambda = 808,4 \text{ nm}$:

$$\eta_{\text{ext}} = \frac{e\lambda}{hc} \cdot m = 0,321 \pm 0,049 \quad (6)$$

4.2 Nd:YAG-Laser

Um die Schwelleistung des Nd:YAG-Lasers zu bestimmen, wird zunächst wieder die Nd:YAG-Leistungs-/Pumpleistungs-Kennlinie gezeichnet. Die Lichtleistung vom Nd:YAG ist dabei $P_{\text{Nd:YAG}} = \frac{I_{\text{photo}}}{\alpha T}$. α ist in diesem Fall 0,22 A/W und $T = 0,65$ wurde dem Datenblatt für den RG1000-Farbfilter entnommen. Die Nd:YAG-Leistung über die Pumpleistung der Laserdiode aufgetragen, ergibt:

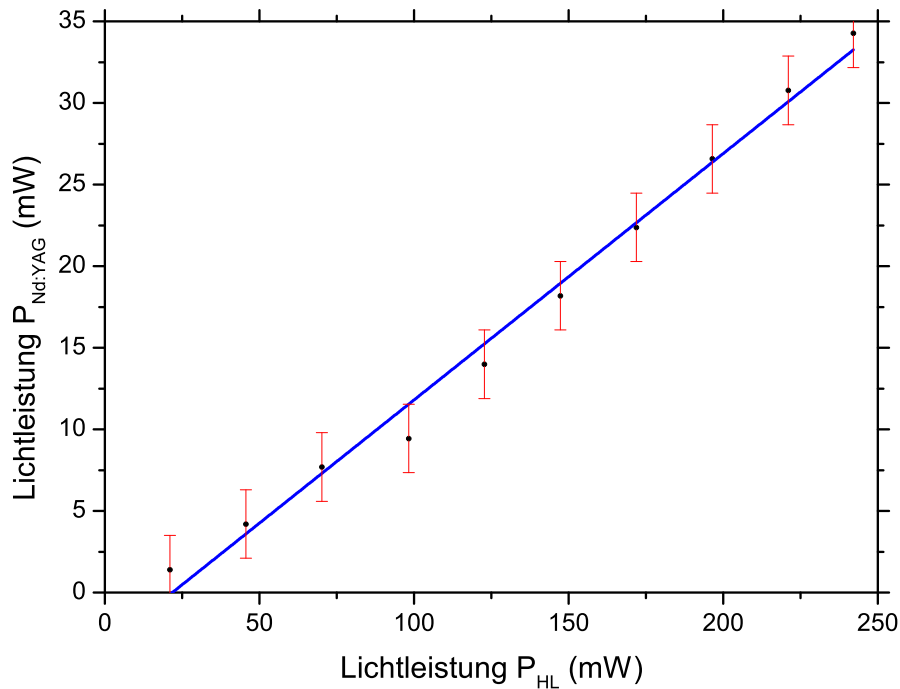


Abbildung 11: Nd:YAG-Leistungs-/Pumpleistungs-Kennlinie (Strom von oben nach unten)

Für die Ausgleichsgerade ergibt sich:

$$P_{\text{Nd:YAG}}(P_{\text{HL}}) = m \cdot P_{\text{HL}} + b = (0,15 \pm 0,0052) \cdot P_{\text{HL}} - (3,3 \pm 0,7885) \text{ mW} \quad (7)$$

Damit lässt sich die Schwelleistung P_{th} berechnen zu:

$$P_{\text{th}} = P_{\text{HL}}(P_{\text{Nd:YAG}} = 0) = (22 \pm 5,31) \text{ mW} \quad (8)$$

In diesem Fall wurde beim Messen der Injektionsstrom von oben nach unten abgesenkt. Um zu überprüfen, ob Hysteresephänomene auftreten, wurde mit dem Betreuer ausgemacht, anstatt der letzten Aufgabe mit dem Laserpointer noch einmal die Kennlinie des Nd:YAG-Lasers zu messen, während der Strom erhöht wird. Dafür ergeben sich folgende Geradengleichung und Ausgleichsgerade:

$$P_{\text{Nd:YAG}}(P_{\text{HL}}) = m \cdot P_{\text{HL}} + b = (0,15 \pm 0,0047) \cdot P_{\text{HL}} - (3,43 \pm 0,7065) \text{ mW} \quad (9)$$

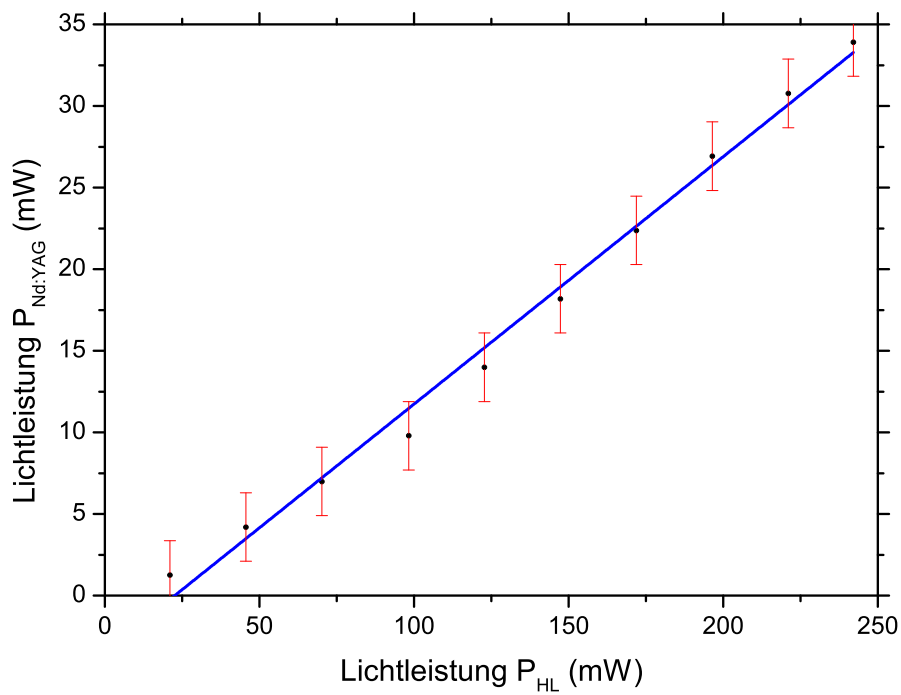


Abbildung 12: Nd:YAG-Leistungs-/Pumpleistungs-Kennlinie (Strom von unten nach oben)

Die beiden Ausgleichsgeraden übereinander gelegt:

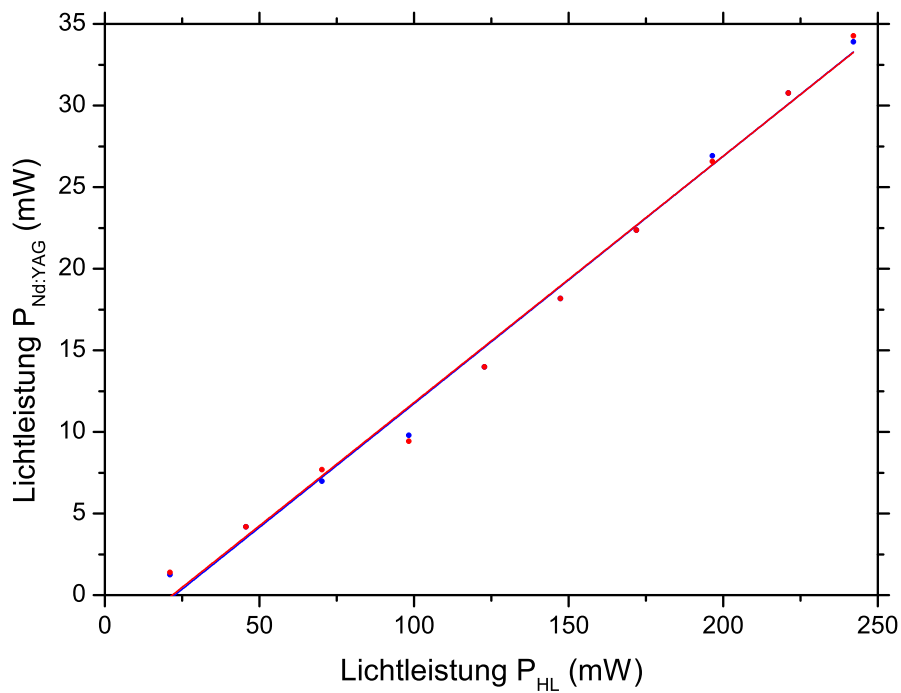


Abbildung 13: Geraden 11 und 12 übereinander gelegt

Sowohl an den Gleichungen, als auch an den Geraden ist zu erkennen, dass keine Hystereseffekte vorhanden sind.

Der Quantenwirkungsgrad des Nd:YAG-Lasers ϵ ist der Quotient aus der Energie der Laserphotonen und der Energie der Pumpphotonen und ergibt:

$$\epsilon = \frac{E_{\text{Nd:YAG}}}{E_{\text{HL}}} = \frac{hc/\lambda_{\text{Nd:YAG}}}{hc/\lambda_{\text{HL}}} = \frac{\lambda_{\text{HL}}}{\lambda_{\text{Nd:YAG}}} = \frac{810 \text{ nm}}{1064 \text{ nm}} = 0,76 \quad (10)$$

Die totale Leistungseffizienz η_p ist, wie in der Anleitung angegeben, der Quotient aus Nd:YAG-Laserleistung und Pumpleistung, also $\eta_p = \frac{P_{\text{Nd:YAG}}}{P_{\text{HL}}} = 0,15 - \frac{3,43 \text{ W}}{P_{\text{HL}}}$. Die mithilfe dieser Formel berechneten Werte aufgetragen gegen die Pumpleistung P_{HL} zeigt das folgende Diagramm:

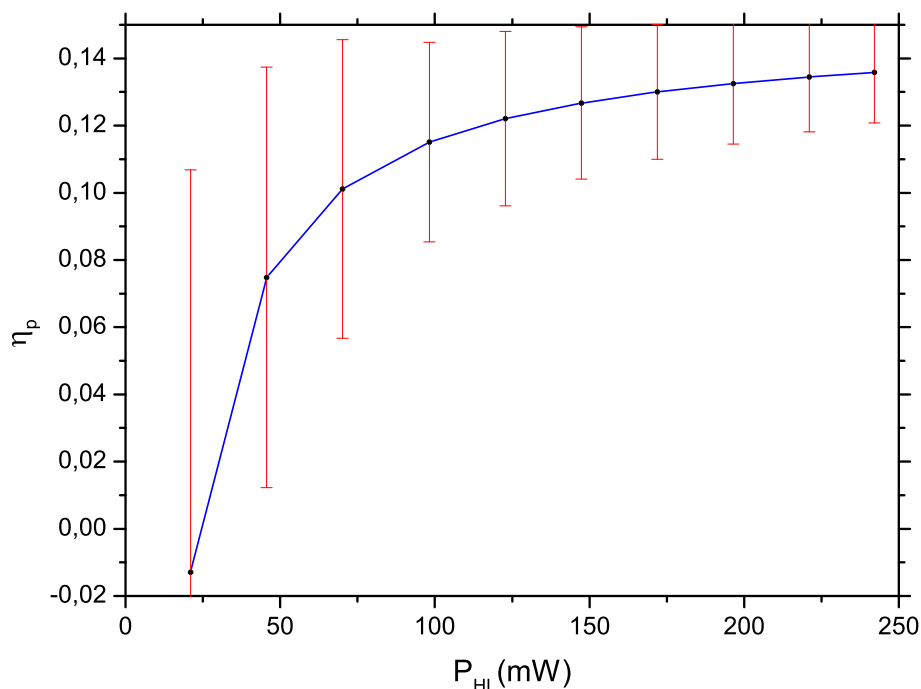


Abbildung 14: Leistungseffizienz in Abhängigkeit von der Pumpleistung

Der Quantenwirkungsgrad ϵ liegt bei 76 %, während der Wert der totalen Leistungseffizienz η_p gegen 15 % strebt. Diese Diskrepanz ist die Ursache von vielerlei Gründen. Einerseits ist der Versuchsaufbau nicht perfekt justiert, zum Anderen werden vom Nd:YAG-Kristall vier Spektrallinien emittiert, von denen nur eine mit einer Intensität von 60 % den Farbfilter durchdringt und es wird auch nicht das komplette Licht des Pumplasers im Nd:YAG-Laser umgewandelt.

4.3 Nd:YAG und Frequenzverdopplung

Als nächstes wird ein KTP-Kristall eingesetzt, sodass es zu einer Frequenzverdopplung kommt. Nachdem der Aufbau mit einem BG39-Filter justiert wurde, wird erstmal eine Messung mit dem RG1000-Filter gemacht und das frequenzverdoppelte Licht ausgesondert. Damit wird die Abhängigkeit der Leistung des Nd:YAG-Lichts von der Pumpleistung überprüft:

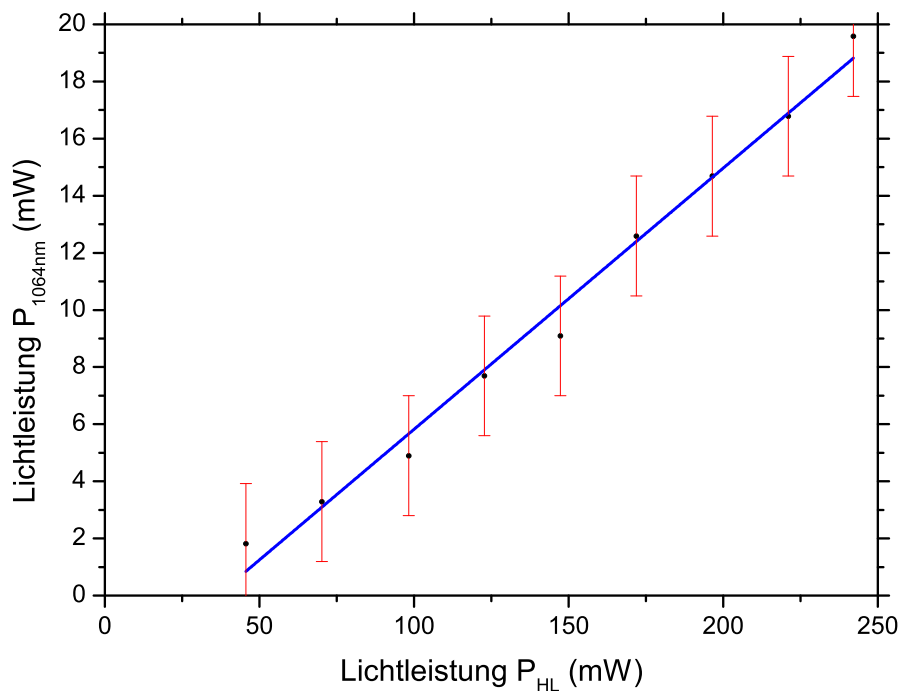


Abbildung 15: Lichtleistung Nd:YAG in Abhängigkeit von Pumpleistung unter Einfluss eines KTP-Kristalls

Die Geradengleichung sieht aus, wie folgt:

$$P_{1064nm} = m \cdot P_{HL} + b = (0,09 \pm 0,0036)P_{HL} - (3,32 \pm 0,5778) \text{ mW} \quad (11)$$

Damit liegt die Schwellleistung des Halbleiterlasers bei $36,89 \pm 6,42$ mW.

Daraufhin wurde der RG1000-Filter entfernt und wiederum ein 3 mm dicker BG39-Filter eingesetzt, mit dem auch das, mithilfe der Frequenzverdopplung entstandene, grüne Laserlicht der Wellenlänge 532 nm auf seine Leistung in Abhängigkeit der Pumpleistung untersucht worden ist. Für die Leistung dieses Lichts gilt: $P_{532nm} = \frac{I_{Photo,532nm}}{\alpha T}$. Der Transmissionskoeffizient ist 0,28 A/W und $\alpha = 0,795$ wurde dem Online-Datenblatt für den BG39-Filter entnommen. Damit ergeben sich für die parabolische Ausgleichskurve folgende Form und Aussehen:

$$P_{532nm} = a \cdot P_{HL}^2 + b \cdot P_{HL} + c$$

$$= (7,41 \cdot 10^{-5} \pm 7,05 \cdot 10^{-6}) \frac{1}{\text{mW}} \cdot P_{HL}^2 - (0,0078 \pm 0,0019) \cdot P_{HL} + (0,25 \pm 0,11) \text{ mW}$$

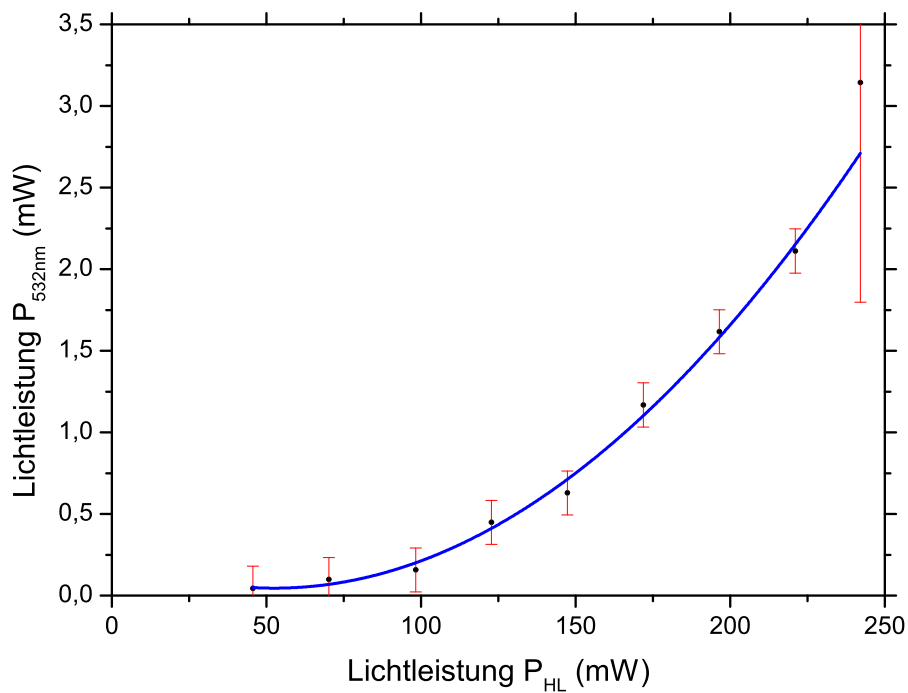


Abbildung 16: Leistung des frequenzverdoppelten Lichts in Abhängigkeit der Pumpleistung

Die Lichtleistung des grünen Lichts gegenüber der des Nd:YAG-Lichts zeigt dieses Diagramm:

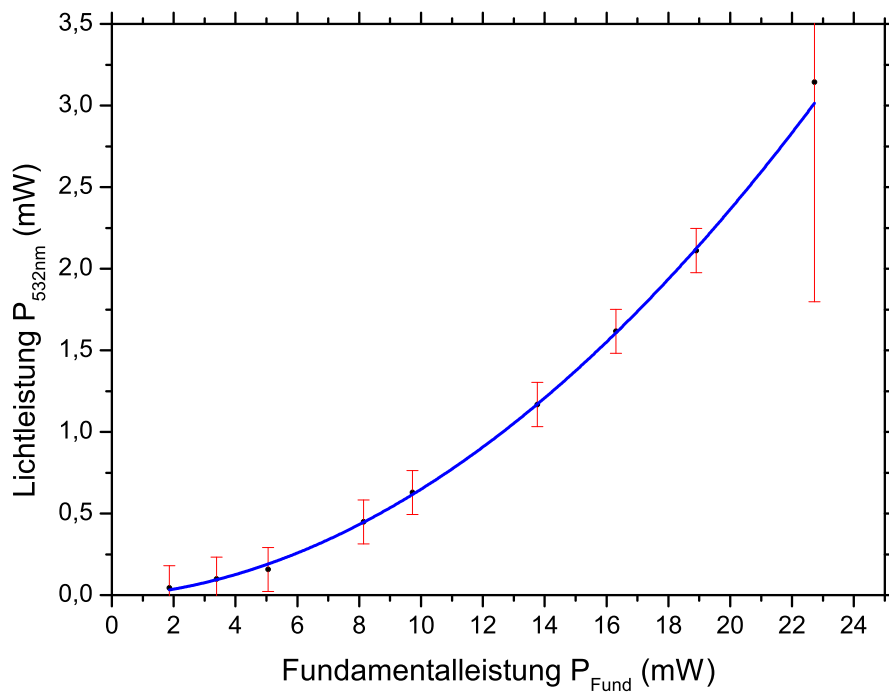


Abbildung 17: Leistung des frequenzverdoppelten Lichts in Abhängigkeit des Fundamentallichts

Die Konversionseffizienz γ_{SHG} der Frequenzverdopplung ist der Quotient aus den Leistungen des verdoppelten Lichts und der Fundamentalleistung. Dieser aufgetragen gegen die Lichtleistung der Fundamentallwelle ergibt Folgendes:

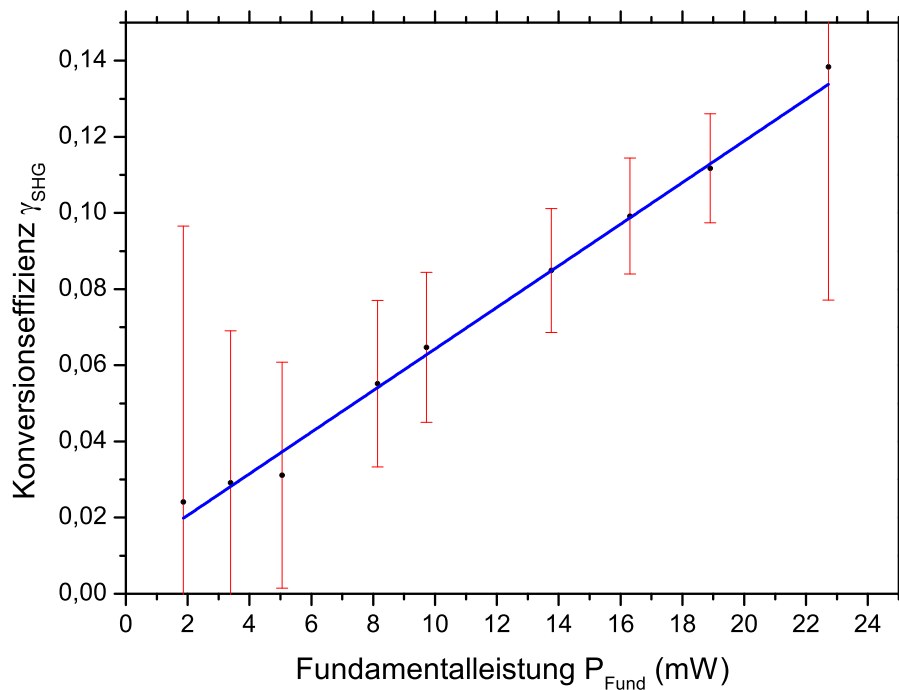


Abbildung 18: Konversionseffizienz in Abhängigkeit des Fundamentallichts

Sowie ein linearer Verlauf zwischen Konversionseffizienz und Fundamentalleistung erwartet wurde, lässt sich die Funktion mit einer Geraden ausgleichen:

$$\gamma_{\text{SHG}} = m \cdot P_{\text{Nd:YAG}} + b = (0,0055 \pm 1,48 \cdot 10^{-4}) \frac{1}{\text{mW}} \cdot P_{\text{Nd:YAG}} + (0,0097 \pm 0,0022)$$

Damit wurde eine maximale Konversionseffizienz von knapp 0,14 erreicht, die u.a. durch feineres Justieren bzw. höhere Laserleistung noch weiter angehoben werden könnte.

5 Fazit

Anhand des Versuchs wurden neue Erkenntnisse über die beiden wichtigen Festkörperlaser-Typen Halbleiter-Laser und Nd:YAG-Laser gewonnen. Es wurden ihre Eigenschaften und Verhaltensweisen nähergebracht und die Effizienz untersucht. Die theoretischen 76 % des Quantenwirkungsgrades wurden nicht erreicht, sondern nur eine totale Leistungseffizienz von ca. 15 %, was hauptsächlich an ungenauer Ausrichtung der Bauteile, sowie auch teilweise an den intrinsischen Eigenschaften der Bauteile selbst gelegen hat. Zu einem Vergleich mit einem kommerziellen Laserpointer ist es aufgrund einer Modifizierung der Versuchsdurchführung nicht mehr gekommen. Vermutlich hätte der Laserpointer gezeigt, dass eine deutliche Steigerung des Wirkungsgrades möglich ist, die auf eine Optimierung der Bauteile, sowie ihrer Justierung und ihrer Abstände zurückzuführen ist. Außerdem ist es gelungen mit einem optisch aktiven KTP-Kristall das infrarote Nd:YAG-Licht in seiner Frequenz zu verdoppeln, und somit in der Wellenlänge zu halbieren, und sichtbares grünes Licht zu erzeugen. Mit dem Effekt der Frequenzverdopplung wurde ein Einblick in den Bereich der modernen, nichtlinearen Optik geschaffen.

6 Quellen

- [1] Versuchsanleitung und -Mappe: Laserdioden-gepumpter Nd:YAG-Laser und Frequenzverdopplung, TU Darmstadt
- [2] <https://lp.uni-goettingen.de>; 07. Februar 2012
- [3] www.wikipedia.org

A Anhang

A.1 Versuchsablauf, Quelle [1]

4.2 Versuchsablauf

1. **Absorption von Nd:YAG** Es wird folgender Aufbau benötigt: Laserdiode, Kollimator, Fokussierlinse, einseitig antireflexbeschichteter Nd:YAG-Kristall, optischer Abschwächer ($T = 2,5\%$) und Photodiode.

Beim Aufbau ist dabei zu achten, dass der kollimierte Strahl mittels x-y-Verstellung der Laserdiode auf die Mitte der Photodiode einjustiert wird. Um die Abhängigkeit der Zentralwellenlänge der Laserdiodenstrahlung von Temperatur und Injektionsstrom zu bestimmen, bedient man sich der bekannten Absorptionslinien von Nd:YAG. Die Maxima der Absorption liegen bei Wellenlängen von 804.4 nm, 808.4 nm, 812.9 nm und 817.3 nm. (Siehe auch ausliegendes Absorptionsspektrum.)

Zur Messung regelt man zunächst die Temperatur auf $T = 10^\circ\text{C}$ und stellt danach den maximal erlaubten Injektionsstrom ein. Durch Änderung der Temperatur bei konstantem Injektionsstrom wird die Wellenlänge des Laserlichts durchgestimmt. Man misst zum einen die Intensität des durch den Nd:YAG-Kristall transmittierten Lichts zwischen $T = 10^\circ\text{C}$ und $T = 40^\circ\text{C}$ und zum anderen die Intensität der Laserdiodenstrahlung ohne Nd:YAG-Kristall bei ansonsten unverändertem Aufbau im gleichen Temperaturintervall.

Aus den gemessenen Werten wird die relative Absorption berechnet und als Funktion der Temperatur aufgetragen. Den Maxima ordnet man die obigen Zentralwellenlängen zu.

2. **Arbeitsgerade der Laserdiode** Es wird derselbe Aufbau benötigt wie unter 1 mit Nd:YAG-Kristall.

Für die weitere Versuchsdurchführung ist es notwendig, die Pumpleistung zu variieren, dabei jedoch die Zentralwellenlänge der Laserdiode konstant zu halten. Hierfür muss die Temperatur der Laserdiode entsprechend nachgeführt werden. Die Geraden konstanter Zentralwellenlänge im Lichtleistungs / Temperatur - Diagramm werden als Arbeitsgeraden bezeichnet. Im folgenden soll die Arbeitsgerade für $\lambda = 808.4 \text{ nm}$ bestimmt werden. Der aus 1. bekannte Wert maximaler Absorption kann nun mit höherer Präzision ermittelt werden. Anschließend nimmt man den Punkt maximaler Absorption für weitere vier Werte des Injektionsstroms auf. (*Wie geht man dabei effektiv vor?*) Durch die fünf so erhaltenen Wertepaare (I, T) legt man die Arbeitsgerade falls möglich.

3. **Kennlinie der Laserdiode** Es wird derselbe Aufbau benötigt wie unter 1. und 2. aber ohne Nd:YAG-Kristall.

Mit der Photodiode (mit Abschwächer) nimmt man die Kennlinie (P / I - Diagramm) der Laserdiode auf; dabei bewegt man sich entlang der Arbeitsgeraden. (*Warum?*)

4. **Kennlinie des Nd:YAG-Lasers** Es wird folgender Aufbau benötigt: Laserdiode, Kollimator, Fokussierlinse, einseitig antireflexbeschichteter Nd:YAG-Kristall ($l = 5 \text{ mm}$), sphärischer Resonatorspiegel ($r = 100 \text{ mm}$), Farbfilter RG1000 und Photodiode.

Zur Justage des Nd:YAG-Resonators richtet man zunächst den Nd:YAG-Kristall senkrecht zur optischen Achse aus (*Wie?*) Danach wird der sphärische Resonatorspiegel, der als Auskoppelspiegel dient, genauso vorjustiert. *In welchem Abstand zum Nd:YAG Kristall soll sich der Hohlspiegel befinden?* Diese Grundjustage sollte ausreichen um bereits Laseremission zu ermöglichen. Durch Verkippen von Spiegel und Nd:YAG-Kristall wird die Ausgangslichtleistung optimiert. Es ist im Hinblick auf die nächste Aufgabe darauf zu achten, dass sich keine höheren transversalen Moden ausbilden. (*Warum?*) Vor der Aufnahme der Kennlinie ist noch zu prüfen, ob durch Verschieben des Fokus die Nd:YAG-Laser-Ausgangsleistung erhöht werden kann.

Bestimmen Sie für die Auswertung aus den ausliegenden Datenblättern die Transmission von BG39 (3 mm) und RG1000-Filter (3 mm). Siehe dazu Kapitel 5.

-
5. Intracavity-Verdopplung mit einem KTP-Kristall Es wird derselbe Aufbau benötigt wie unter 4., jedoch nun mit Farbfilter BG39 und anschließend RG1000.

In den auf maximale Ausgangsleistung justierten Resonator des Nd:YAG-Lasers (ausgeschaltet!) wird nun der KTP-Verdoppler-Kristall eingesetzt. (*Wohin?*) Durch Phasenanpassung des KTP-Kristalls (*Wie?*), sowie durch Nachjustieren des Resonators, wird die Ausgangsleistung des grünen Lichts ($\lambda = 532 \text{ nm}$) maximiert. Nun nimmt man die Intensität des grünen frequenzverdoppelten Lichtes *und* anschließend des infraroten Nd:YAG-Lichtes als Funktion des Injektionsstroms der Laserdiode auf. (*Was erwartet man?*)

6. Charakterisierung eines kommerziellen Laserpointers In Aufgaben 1 bis 5 wurde Schritt für Schritt ein grüner Laser ($\lambda = 532 \text{ nm}$) aufgebaut. Tatsächlich wird das gleiche Prinzip eingesetzt, um kompakte Lasersysteme zu verwirklichen. Ein solches kompaktes System liegt in Form eines grünen Laserpointers vor. Das Grundprinzip dieses kommerziellen Laserpointers stimmt mit dem des Lasersystems überein, das im Laufe des Versuchs aufgebaut wurde, allerdings sind Details nicht bekannt.

Welche Untersuchungen können für eine Grundcharakterisierung des Laserpointers in Betracht gezogen werden? In Absprache mit dem Betreuer sollen mögliche Untersuchungen diskutiert und eine dieser Möglichkeiten durchgeführt werden.

Es wird folgender Aufbau benötigt: Laserpointer, Farbfilter und Photodiode.

Der Betriebsstrom des Laserpointers kann variiert werden, wird allerdings von einer internen Elektronik auf maximal 200 mA begrenzt. Die angelegte Spannung sollte 3,2 V nicht überschreiten.