

4.6 Nd:YAG Laser

Ausarbeitung

Fortgeschrittenenpraktikum an der TU Darmstadt
Versuch durchgeführt von: Jan Schupp, Florian Wetzel
Versuchsdatum: 06.07.2009
Betreuer: Dipl. Phys. Lukas Drzewietzki



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Inhaltsverzeichnis

1.....	Theorie zum Versuch	3
1.1.	Laser	3
1.2.	Nd:YAG-Laser	3
1.3.	Halbleiterlaser	4
1.4.	Frequenzverdopplung.....	5
2.....	Versuchsdurchführung und Auswertung.....	7
2.1.	Versuchsaufbau	7
2.2.	Aufgabe 1 – Absorption von Nd:YAG	7
2.3.	Aufgabe 2 – Arbeitsgerade der Laserdiode.....	8
2.4.	Aufgabe 3 – Kennlinie der Laserdiode	8
2.5.	Aufgabe 4 – Kennlinie des Nd:YAG-Lasers.....	9
2.6.	Aufgabe 5 – Frequenzverdopplung mit einem KTP-Kristall.....	11

1. Theorie zum Versuch

1.1. Laser

Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) sind Lichtquellen, die sich durch eine besonders ausgeprägte zeitliche und räumliche Kohärenz, eine relativ scharfe Monochromasie sowie sehr starke Intensitäten auszeichnen.

Ein Laser besteht im Wesentlichen aus einem aktiven Material, einem Anreger und einem Resonator.

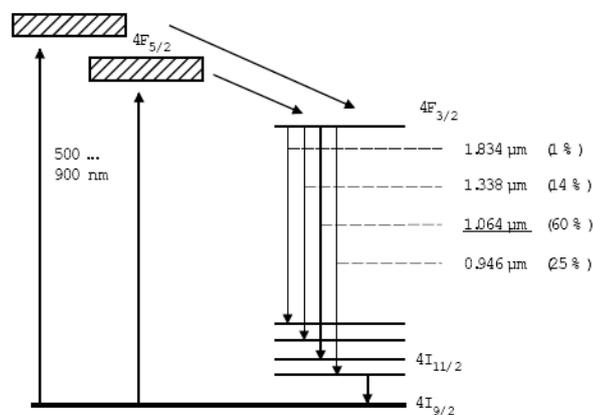
Das aktive Material kann gasförmig, flüssig oder aber auch ein Festkörper sein. Voraussetzung für die Erzeugung von Laserlicht ist eine Besetzungsinversion der Energieniveaus. Diese entspricht einer höheren Besetzungsdichte eines oberen Energieniveaus gegenüber einem unteren.

Eine solche Besetzungsinversion kann beispielsweise durch Anregungs- oder Pumpvorgänge (z.B. Optisches Pumpen, Beschuss mit hochenergetischen Elektronen, Injektion von Minoritätsträgern über einen p-n Übergang) erzeugt werden.

Erfolgt eine spontane Emission eines Photons durch den Übergang eines Elektrons von einem höheren in einen niedrigeren Energiezustand, so kann dieses Photon weitere angeregte Elektronen in den Grundzustand versetzen, wobei weitere Photonen frei werden (stimulierte Emission), die die selben Eigenschaften wie das erste Photon aufweisen. Um die Intensität zusätzlich zu verstärken und für die Kohärenz, bzw. Monochromasie zu sorgen, befindet sich das aktive Material in einem Resonator, der im Wesentlichen aus zwei gegenüberliegenden parallelen Spiegeln besteht. Dabei ist einer der Spiegel teildurchlässig und der andere reflektiert das Licht zu 100%. Da durch den teildurchlässigen Spiegel immer nur eine gewisse Anzahl Photonen den Laser verlassen und die übrigen Photonen auf ihrem Weg durch das aktive Material weitere identische Photonen anregen, führt dieser Resonator zu einer Verstärkung der Intensität. Besonders bevorzugt werden hierbei Wellenlängen, die einer stehenden Welle im Resonator entsprechen. Durch die Vorzugsrichtung senkrecht zu den Spiegeln und die bevorzugten Wellenlängen werden stimulierte Emissionen andersartiger Photonen unterdrückt, was zu der beschriebenen Kohärenz und Monochromasie führt.

1.2. Nd:YAG-Laser

Ein sehr oft verwendeter Festkörperlaser ist der in diesem Versuch verwendete Nd:YAG Laser. Als aktives Material dient hierbei Yttrium-Aluminium-Granat ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$), bei dem 1% der Y^{3+} -Ionen durch Nd^{3+} -Ionen ersetzt wurden. Das Anregen wird hierbei durch optisches Pumpen realisiert, was in diesem Versuch mit Hilfe eines Halbleiterlasers erfolgt.



Energieschema des Nd:YAG
(Quelle: Anleitungsblatt)

Beim Nd:YAG-Lasers handelt es sich um einen 4-Niveau-Laser. Hierdurch kann die Forderung der Besetzungsinversion leichter erfüllt werden. Durch das optische Pumpen werden Elektronen vom Grundzustand auf das $4F_{5/2}$ -Niveau angehoben. Von dort geht das Elektron ohne Photonenemission in das metastabile $4F_{3/2}$ -Niveau über. Durch spontane oder stimulierte Emission eines Photons fällt es auf das $4I_{11/2}$ -Niveau, von dem aus es wieder in den Grundzustand gelangt. Da das $4F_{5/2}$ -Niveau sowie das $4I_{11/2}$ -Niveau im Vergleich zum metastabilen $4F_{3/2}$ -Niveau sehr kurzlebig sind, erreicht man hohe Besetzungsdichten auf dem metastabilen $4F_{3/2}$ -Niveau und dem Grundniveau. Die höhere Besetzungsdichte im metastabilen $4F_{3/2}$ -Niveau gegenüber dem $4I_{11/2}$ -Niveau führt zu der gewünschten Besetzungsinversion.

1.3. Halbleiterlaser

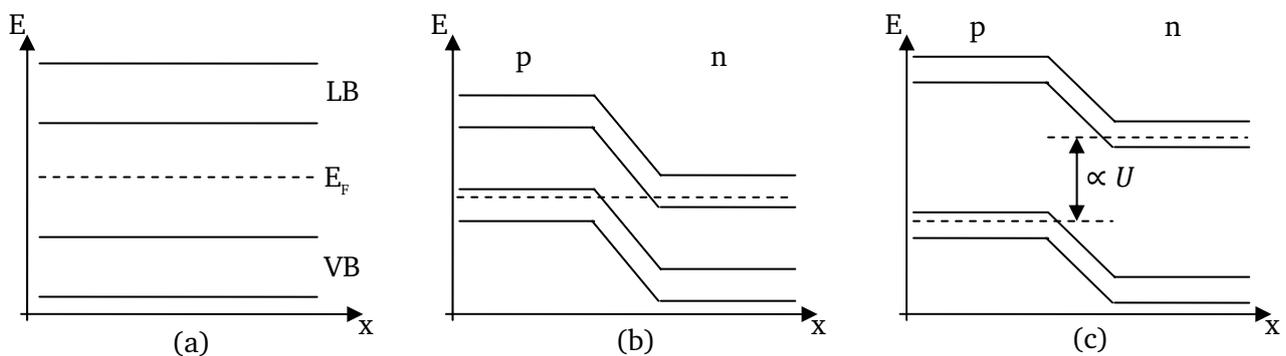
Der in diesem Versuch zum optischen Pumpen verwendete Halbleiterlaser besteht aus GaAs/GaAlAs. Aus diesem Material können Halbleiterlaser mit einem Spektralbereich von ca. 400nm bis ca. 3 μ m hergestellt werden.

Der Hauptunterschied zwischen Festkörper- und Halbleiterlasern besteht darin, dass ein Festkörperlaser diskrete Energieniveaus aufweist, während diese beim Halbleiterlaser in quasi-kontinuierlichen Bändern vorliegen. Das Aufspalten der Energieniveaus in Bänder kommt daher, weil die Atome im Halbleiter so nah beieinander liegen, dass die Elektronenwolken überlappen. Anschaulich gesehen bestehen dadurch Aufenthaltswahrscheinlichkeiten für Elektronen eines Atoms auch in anderen Atomen. Da aufgrund des Pauli-Prinzips keine zwei Elektronen in ihren Quantenzahlen übereinstimmen dürfen, spalten die Energieniveaus zu Bändern auf.

Zwischen dem Valenz- (VB) und dem Leitungsband (LB) liegt die Fermienergie (E_F), die dem obersten besetzten Energieniveau bei $T = 0 K$ entspricht. (a)

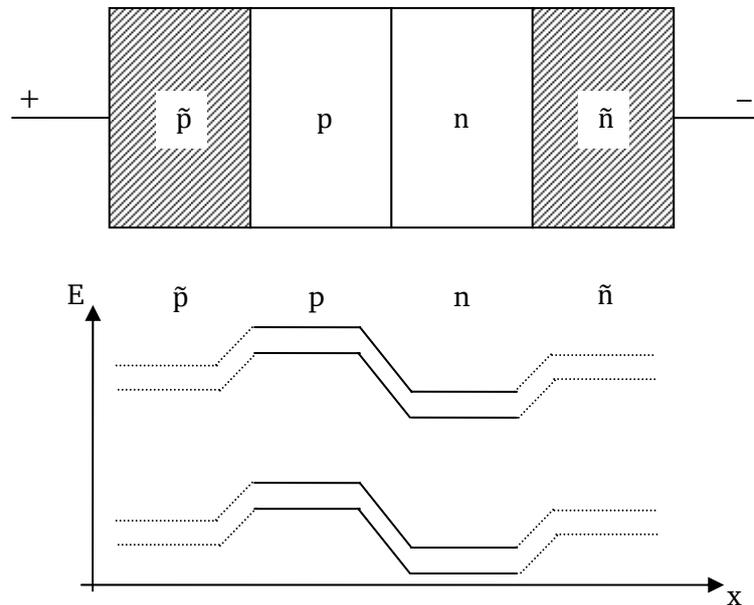
Durch eine p- bzw. n-Dotierung des Halbleiters können die Bänder derart verschoben werden, dass die Fermienergie innerhalb des Valenz- bzw. des Leitungsbandes liegt. (b)

Durch Anlegen einer Spannung kann die Fermienergie des p-dotierten Halbleiters von der Fermienergie des n-dotierten Halbleiters abweichen. (c) Fließt zusätzlich ein Strom (Ladungsträgerzufuhr) so wird die gewünschte Besetzungsinversion erreicht.



Energieniveaus für (a) einen Halbleiter, (b) den Übergang zwischen einem p- und einem n-dotierten Halbleiter und (c) einem p- und einem n-dotierten Halbleiter, zwischen denen eine Spannung U angelegt ist.

Um Übergänge außerhalb des gewünschten Übergangsbereich zwischen dem p- und dem n- dotierten Halbleiter zu erschweren, umgibt man die dotierten Halbleiter mit weiteren Halbleitern (Heterostruktur), die so dotiert werden, dass die Energieniveaus folgendermaßen liegen:



Beispielsweise die Energieniveaus des \tilde{n} -dotierten Halbleiters sind so gewählt, dass sie höher liegen, als die des n-dotierten. Somit erreicht man eine höhere Besetzungsdichte in der Nähe des p-n-Übergangs. Die erwähnten Energieniveaus des \tilde{n} -dotierten Halbleiters sollten allerdings auch nicht höher liegen als die des p-dotierten, da andernfalls die Wahrscheinlichkeit für Übergänge vom \tilde{n} -dotierten zum n-dotierten steigen würde (z.B. durch Tunneleffekte).

1.4. Frequenzverdopplung

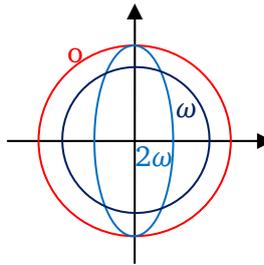
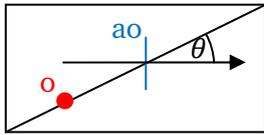
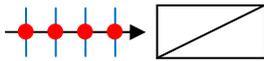
Eine wichtige Eigenschaft bei der Beschreibung der Wechselwirkung von elektromagnetischer Strahlung mit Materie ist die Polarisation der Materie:

$$P \propto \chi^{(1)} \cdot E + \chi^{(2)} \cdot E^2 + \sigma(E^3)$$

Für kleine Energien, wie sie im Alltag beobachtet werden können, ist der lineare Teil $P \propto \chi^{(1)} \cdot E$ eine ausreichend gute Approximation. Bei höheren Energien, wie sie beispielsweise im durchgeführten Versuch erreicht werden, sind Terme höherer Ordnung nicht mehr vernachlässigbar, so dass man auch Effekte beobachten kann, die auf diesen Termen basieren. Einer der so genannten $\chi^{(2)}$ -Effekten ist die Frequenzverdopplung, die im Versuch genauer untersucht werden sollte.

Für diesen Effekt eignen sich insbesondere nichtlineare, doppelbrechende Materialien, wie beispielsweise der im Versuch verwendete KTP-Kristall (Kalium-Titanyl-Phosphat).

Im Versuch platzierten wir den KTP-Kristall in den Strahlengang des Nd:YAG-Lasers und untersuchten die Intensität des frequenzverdoppelten Strahls, dessen Wellenlänge sich nun im sichtbaren Bereich bei $\lambda = 532 \text{ nm}$ befand, in Abhängigkeit vom angelegten Strom I_A .



Da Wellen verschiedener Wellenlängen unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten aufweisen (außer in Vakuum) und die Frequenzverdopplung an verschiedenen Stellen im Kristall auftreten kann, kann es zu destruktiver Interferenz der frequenzverdoppelten Wellen kommen.

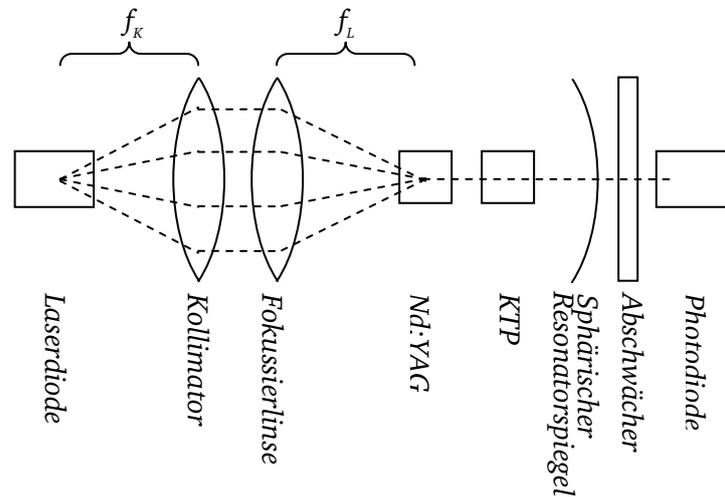
Um dies zu vermeiden, benutzt man die Tatsache, dass der Brechungsindex des außerordentlichen Strahls vom Winkel θ zwischen Ausbreitungsrichtung und der optischen Achse des Kristalls abhängt. Hierbei muss das Frequenzverdoppelte senkrecht zum fundamentalen Licht sein.

Im nebenstehenden Diagramm (Polarkoordinaten!) kann man die Abhängigkeit des Brechungsindex vom Winkel θ für verschiedene Frequenzen erkennen. Dabei entspricht die Fundamentale dem ordentlichen und die Frequenzverdoppelte dem außerordentlichen Strahl. Um die beschriebene destruktive Interferenz zu vermeiden, ist es notwendig, dass sich die beiden Wellen unterschiedlicher Frequenz mit gleicher Geschwindigkeit ausbreiten, was an den Schnittpunkten der elliptischen Graphen der Fall ist.

2. Versuchsdurchführung und Auswertung

2.1. Versuchsaufbau

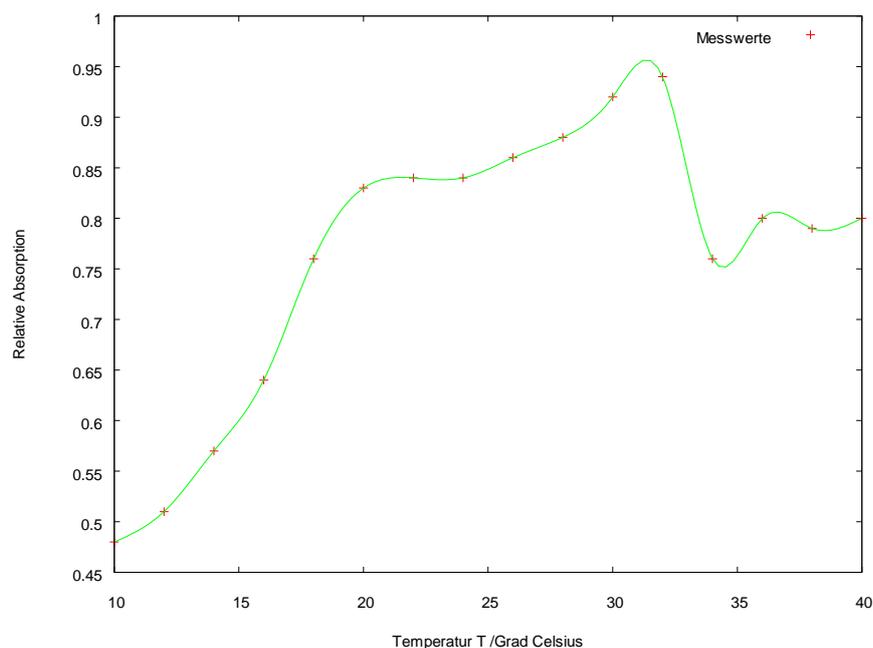
Der Versuchsaufbau wurde im Laufe der durchgeführten Aufgaben aufgebaut und erweitert. Der endgültige Aufbau war folgendermaßen beschaffen:



2.2. Aufgabe 1 – Absorption von Nd:YAG

Um die Transmission des Nd:YAG-Lasers zu bestimmen benötigten wir die Laserdiode, den Kollimator, die Fokussierlinse, den Nd:YAG-Kristall, einen Abschwächer (Transmission $T = 0,025$), sowie die Photodiode.

Für die Messung stellten wir einen Injektionsstrom von 350mA ein und durchliefen das Temperaturintervall von $T_1 = 10\text{ }^\circ\text{C}$ bis $T_2 = 40\text{ }^\circ\text{C}$ in Schritten von $\Delta T = 2\text{ }^\circ\text{C}$.

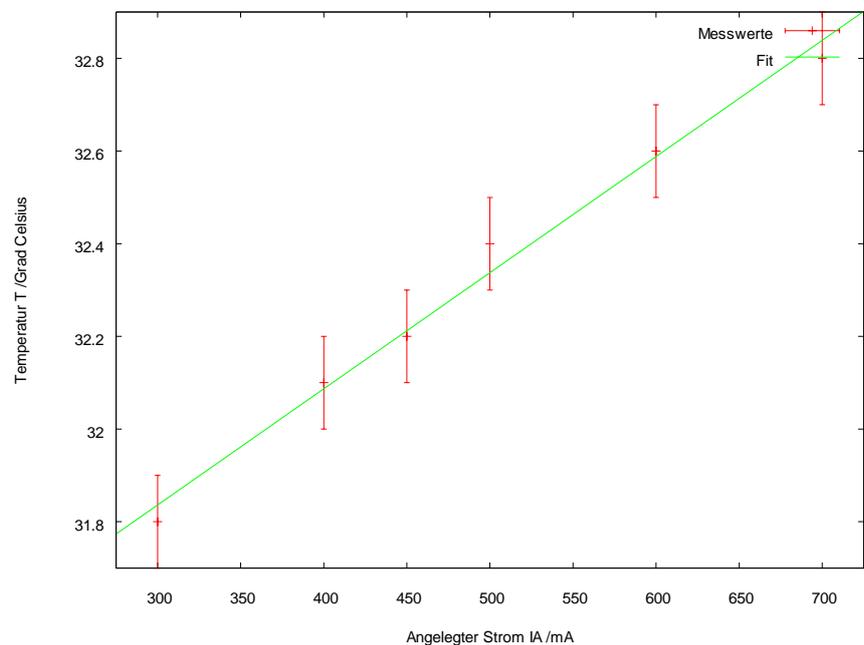


Der hier dargestellte Graph entspricht der transmittierten Intensität, so dass wir aus den tabellarischen Werten das Absorptionsmaximum des Nd:YAG-Kristalls bei $T_A = 32^\circ\text{C}$ abschätzten. Aus dem ausliegenden Absorptionsspektrum ordneten wir diesem Maximum eine Wellenlänge von $\lambda = 804,4\text{ nm}$ zu.

2.3. Aufgabe 2 – Arbeitsgerade der Laserdiode

Der Aufbau ist der gleiche wie in Aufgabe 1. Um die Arbeitsgerade der Laserdiode zu ermitteln, ist es notwendig die Zentralwellenlänge konstant zu halten, desweiteren wird hierdurch realisiert, dass der YAG-Laser immer mit der richtigen Wellenlänge λ gepumpt wird. Entsprechend wurde die Temperatur T jeweils so an den variierten angelegten Strom I_A angepasst, dass das Absorptionsmaximum getroffen wurde. Aus den erhaltenen Messwerten konnte eine Arbeitsgerade angefitet werden:

I_A / mA	$T / ^\circ\text{C}$
300	31,8
400	32,1
450	32,2
500	32,4
600	32,6
700	32,8



$$\text{Fitparameter: } T(I_A) = (0,0025 \pm 0,0001) \frac{^\circ\text{C}}{\text{mA}} \cdot I_A + (31,08 \pm 0,07)^\circ\text{C}$$

Mithilfe dieses Fits konnten wir in den folgenden Aufgaben die Temperatur T jeweils so an den angelegten Strom anpassen, dass wir uns stets mit der konstanten Zentralwellenlänge arbeiteten.

2.4. Aufgabe 3 – Kennlinie der Laserdiode

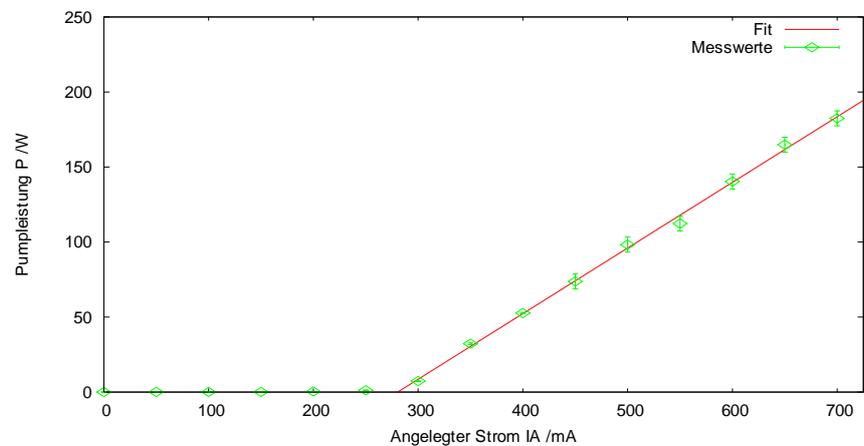
In diesem Aufgabenteil sollte die Kennlinie der Laserdiode aufgenommen werden, sowie der Schwellstrom I_{thr} und die differentielle Quanteneffizienz η_{ext} bestimmt werden. Dazu wurde wieder der gleiche Aufbau verwendet, allerdings ohne den Nd:YAG-Kristall.

In Abhängigkeit vom angelegten Strom I_A (und entsprechend der Arbeitsgeraden angepassten Temperatur T) wurde die Intensität gemessen. Um die Kennlinie (P/I-Diagramm) darzustellen, muss der gemessene Strom zunächst in die optische Leistung der Laserdiode umgerechnet werden:

$$P = \frac{I_A}{s \cdot T}$$

mit der spektralen Empfindlichkeit der Photodiode $s = 0,57 \text{ A/W}$ bei $\lambda = 810 \text{ nm}$ und der Transmission des Abschwächers $T = 0,025$.

I_A / mA	I / mA	P / mW
0	0,001	0,07
50	0,0015	0,11
100	0,002	0,14
150	0,0025	0,18
200	0,006	0,42
250	0,0175	1,23
300	0,105	7,37
350	0,46	32,28
400	0,75	52,63
450	1,05	73,68
500	1,4	98,25
550	1,6	112,28
600	2	140,35
650	2,35	164,91
700	2,6	182,46



Fitparameter: $P(I_A) = (0,437 \pm 0,007) \text{ mW} \cdot I_A - (123 \pm 4) \text{ mA}$

Der Schwellstrom I_{thr} ergibt sich als Nullstelle des linearen Fits: $I_{thr} = I_{A_0} \approx 281 \text{ mA}$.

Die differentielle Quanteneffizienz berechnet sich zu:

$$\eta_{ext} = \frac{eP_{out}}{h\nu(I - I_{thr})}$$

Dabei entspricht $\frac{eP_{out}}{(I - I_{thr})}$ der Steigung des linearen Fits. Dementsprechend ergibt sich eine differentielle

Quanteneffizienz von $\eta_{ext} = \frac{e \cdot \lambda}{h \cdot c} \cdot \frac{P_{out}}{(I - I_{thr})} \approx 0,2835$.

Dieser Wert entspricht dem Anteil der Elektronen im angelegten Strom, die kohärente Photonen erzeugen und damit zur Lichtleistung beitragen.

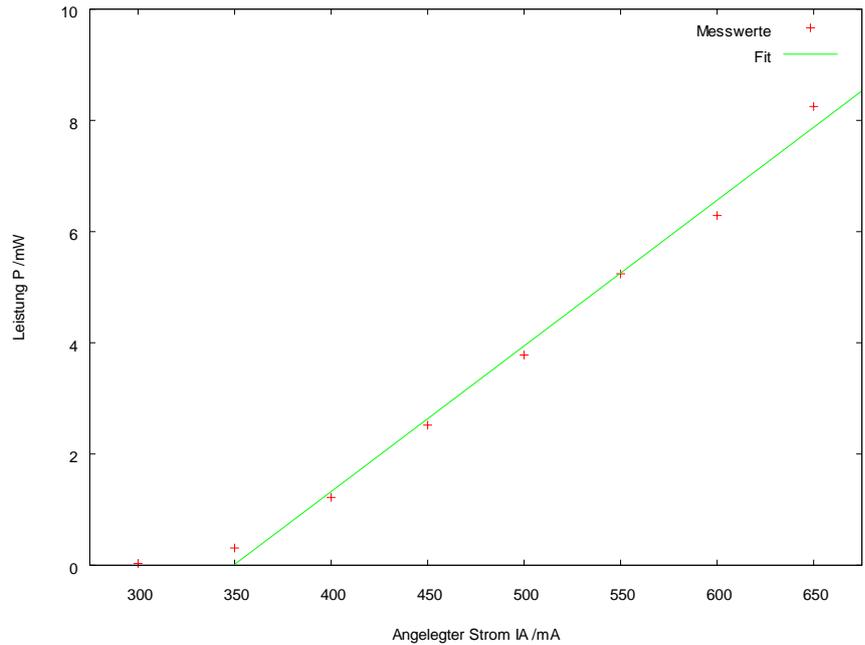
2.5. Aufgabe 4 – Kennlinie des Nd:YAG-Lasers

In diesem Aufgabenteil sollte die Kennlinie des Nd:YAG-Lasers aufgenommen werden. Dazu wurde der endgültige Aufbau ohne den KTP-Kristall verwendet. Anstelle des Abschwächers wurde ein RG1000-Filter in den Strahlengang platziert, der Wellenlängen unterhalb von $\lambda = 1000 \text{ nm}$ absorbiert und somit das Licht der Laserdiode herausfiltert, während das Licht des Nd:YAG-Lasers durchgelassen wird.

Um eine maximale Ausgangsleistung zu erzielen, wurde der Nd:YAG-Kristall bei maximal angelegtem Strom $I_{Amax} = 700 \text{ mA}$ mit Hilfe von Verstellerschrauben an der Halterung justiert, bis die gemessene Intensität maximal war. Außerdem wurde die Fokussierlinse, die bislang nur nach Augenmaß platziert worden war, so verschoben, dass die gemessene Intensität maximal war.

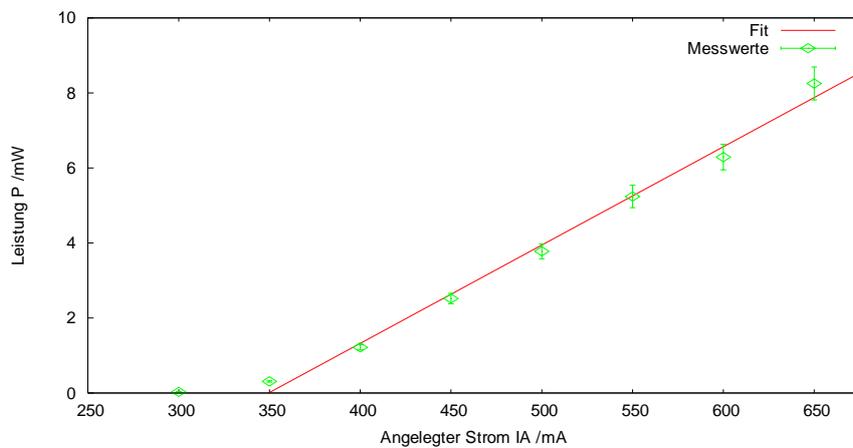
Die spektrale Empfindlichkeit der Photodiode ist $s = 0,22 \text{ A/W}$ bei $\lambda = 1064 \text{ nm}$, der Transmissionskoeffizient des RG1000 für diese Wellenlänge beträgt $T = 0,65$.

I_A / mA	I / mA	P / mW
300	0,004	0,03
350	0,045	0,31
400	0,175	1,22
450	0,36	2,52
500	0,54	3,78
550	0,75	5,24
600	0,9	6,29
650	1,18	8,25



$$\text{Fitparameter: } P(I_A) = (0,026 \pm 0,001)mW \cdot I_A - (9,2 \pm 0,5)mW$$

Trägt man die Nd:YAG-Leistung gegenüber der Pumpleistung auf, so kann die Schwellleistung P_{thr} bestimmt werden:



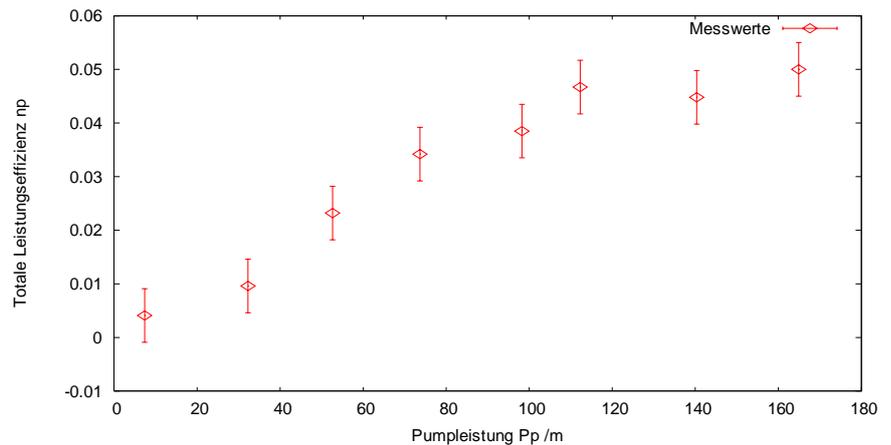
$$P(P_A) = (0,060 \pm 0,002) \cdot P_A - (1,8 \pm 2,4)mW$$

Die Schwellleistung P_{thr} ergibt sich als Nullstelle des linearen Fits: $P_{thr} = P_{A_0} \approx 30mW$.
Der Quantenwirkungsgrad bestimmt sich zu:

$$\epsilon = \frac{h \cdot \nu_{Nd:YAG}}{h \cdot \nu_{Pump}} = \frac{\lambda_{Pump}}{\lambda_{Nd:YAG}} \approx 0,76$$

Im Folgenden wurde noch die totale Leistungseffizienz $\eta_P = \frac{P_{Nd:YAG}}{P_{Pump}}$ gegenüber der Pumpleistung P_{Pump} aufgetragen:

P_{Pump} / mW	$P_{Nd:YAG} / mW$	η_P
7,37	0,03	0,0041
32,28	0,31	0,0096
52,63	1,22	0,0232
73,68	2,52	0,0342
98,25	3,78	0,0385
112,28	5,24	0,0467
140,35	6,29	0,0448
164,91	8,25	0,0500



Die maximal experimentell bestimmte Leistungseffizienz lag bei $\eta_P = 0,05$ lag weit unter dem erwarteten Wert in der Nähe des zuvor bestimmten Quantenwirkungsgrades $\epsilon \approx 0,76$.

Mögliche Gründe dafür sind folgende:

- Das Spektrum des Nd:YAG-Kristalls spaltet sich in 4 Spektrallinien, von denen die gemessene Linie mit $\lambda = 1064 \text{ nm}$ nur ca. 60 % der Intensität aufweist.
- Ein Teil des Lichts des Halbleiterlasers passiert den Nd:YAG-Kristall, sodass nicht die maximal mögliche Pumpleistung genutzt wird, hieraus ergibt sich die Pumpeffizienz.
- Der experimentelle Aufbau wird gewisse Fehler in seiner Justierung aufweisen.

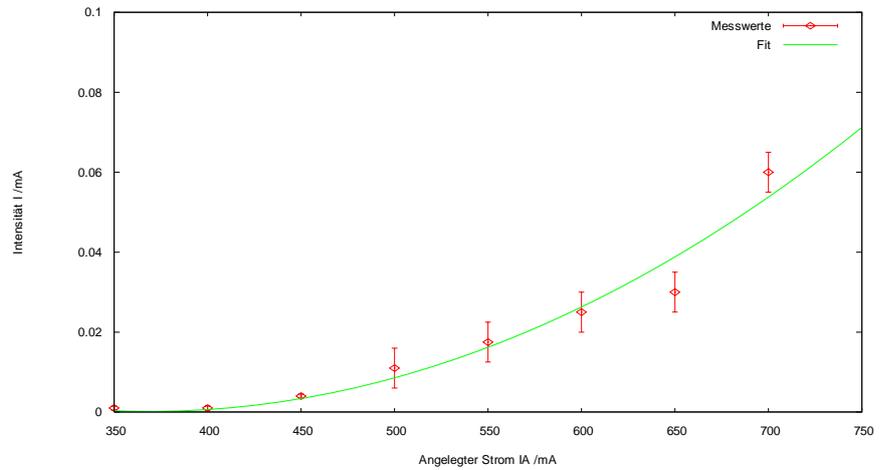
2.6. Aufgabe 5 – Frequenzverdopplung mit einem KTP-Kristall

In dieser Teilaufgabe sollte die Frequenzverdopplung mit einem KTP-Kristall analysiert werden. Dazu wurde der gleiche Aufbau wie in der vorigen Aufgabe verwendet, allerdings wurde für die Intensitätsmessung des frequenzverdoppelten sichtbaren Lichts der RG1000 Filter durch einen BG39-Filter ersetzt, der nur sichtbares Licht durchlässt. Anschließend wurde der Aufbau wieder so justiert, dass die Ausgangsintensität maximal war.

Die spektrale Empfindlichkeit der Photodiode ist $s = 0,22 \text{ A/W}$ ($s = 0,28 \text{ A/W}$) bei $\lambda = 1064 \text{ nm}$ (bei $\lambda = 532 \text{ nm}$), der Transmissionskoeffizient des RG1000 (BG39) für diese Wellenlänge beträgt $T = 0,65$ ($T = 0,87$).

Messung der Intensität des frequenzverdoppelten Lichts $\lambda = 532 \text{ nm}$ mit Filter BG39:

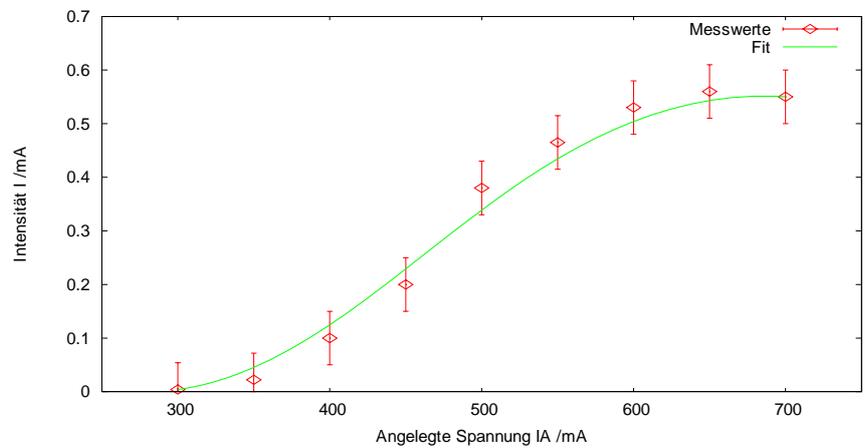
I_A / mA	I / mA
300	0,0001
350	0,0001
400	0,0001
450	0,004
500	0,011
550	0,0175
600	0,025
650	0,03
700	0,06



$$\text{Fitparameter: } I(I_A) = (5 \cdot 10^{-7} \pm 1 \cdot 10^{-7}) \frac{1}{\text{mA}} \cdot I_A^2 - (0,0004 \pm 0,0001) \cdot I_A + (0,07 \pm 0,02) \text{mA}$$

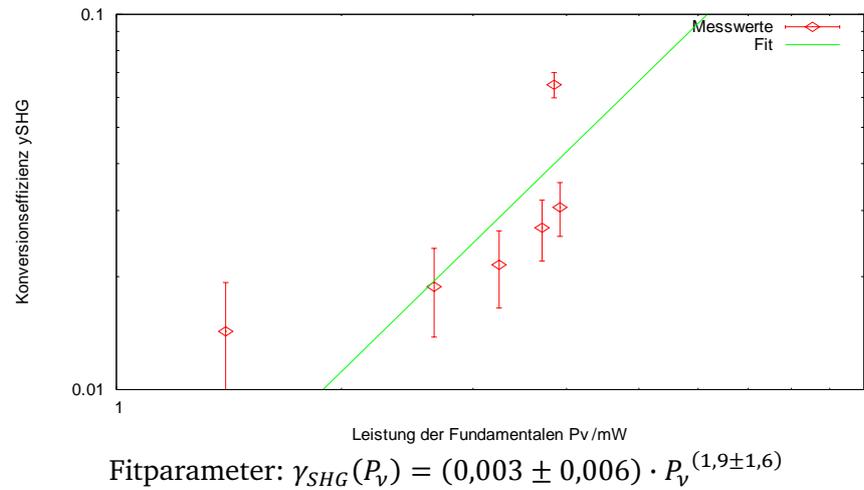
Messung der Intensität des fundamentalen Lichts $\lambda = 1064 \text{ nm}$ mit Filter RG1000:

I_A / mA	I / mA
300	0,004
350	0,022
400	0,1
450	0,2
500	0,38
550	0,465
600	0,53
650	0,56
700	0,55



Die Konversionseffizienz γ_{SHG} der Frequenzverdopplung ergibt sich als das Verhältnis von frequenzverdoppelter Leistung $P_{2\nu}$ zur Leistung der Fundamentalen P_ν .

P_ν / mW	$P_{2\nu} / mW$	γ_{SHG}
0,03	0,00	0,0000
0,15	0,00	0,0000
0,70	0,00	0,0000
1,40	0,02	0,0143
2,66	0,05	0,0188
3,25	0,07	0,0215
3,71	0,10	0,0270
3,92	0,12	0,0306
3,85	0,25	0,0649



Die maximale Konversionseffizienz lag bei $\gamma_{SHG_{max}} = 0,0649$. Wie dem Plot zu entnehmen ist, würde eine Steigerung der Konversionseffizienz durch eine Steigerung der Laserleistung erreicht.