

Laserdioden-gepumpter Nd:YAD-Laser und Frequenzverdopplung

bei Dominik Blömer
Marco Möller
Felix Neuschäfer

durchgeführt am 14.05.2007

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	2
2	Vorbereitung	3
2.1	Grundlagen der Laseremission	3
2.2	Halbleiter-Laser	3
2.3	Nd:YAG-Laser	3
2.4	Nichtlinearen Optik und Frequenzverdopplung	3
3	Durchführung und Auswertung	4
3.1	Versuchsaufbau	4
3.2	Charakterisierung Laserdiode	4
3.2.1	Frequenzzeichnung	4
3.2.2	Arbeitsgerade	6
3.2.3	Kennlinie	7
3.2.4	Differentielle Quanteneffizienz	8
3.3	Charakterisierung Nd:YAG Laser	8
3.3.1	Justage	8
3.3.2	Kennlinie	9
3.3.3	Quantenwirkungsgrad	10
3.3.4	Totale Leistungseffizienz	10
3.4	Frequenzverdopplung	11
3.4.1	Versuchsaufbau	11
3.4.2	Konversionseffizienz	11
3.4.3	Maximale Konversionseffizienz	12
3.5	Charakterisierung Laserpointer	12
4	Fazit	13

1 Kurzfassung

In diesem Versuch sollen ein Halbleiterlaser und ein durch den Halbleiterlaser gepumpten Nd:YAG-Laser untersucht werden. Zu diesem Zweck werden sie durch Kennlinien charakterisiert und das Absorptionsverhalten des Nd:YAG-Kristalls gemessen.

Zudem sollen nichtlinearen Eigenschaften eines Kristalls am Beispiel von Frequenzverdopplung untersucht werden.

2 Vorbereitung

2.1 Grundlagen der Laseremission

Laser produzieren Lichtquanten durch stimulierte Emission von Atomen in einem Resonator, bei der ein Photon einen Übergang stimuliert, durch den ein weiteres Photon mit identischen Eigenschaften ausgelöst wird und somit kaskadenartige Verstärkung eintritt. Die Wahrscheinlichkeit für diesen Vorgang ist in einem System mit 2 Niveaus genauso hoch, wie die Wahrscheinlichkeit für eine Absorption. Zur Verstärkung von Licht muss eine Besetzungsinversion vorliegen, die für eine höhere Wahrscheinlichkeit der stimulierten Emission sorgt. Da dies in einem 2-Niveau-System nicht möglich ist, werden Systeme mit mehr Niveaus konstruiert. Eine Besetzungsinversion kann nicht ohne weiteres erzeugt werden, da Zustände mit niedrigerer Energie im thermodynamischen Gleichgewicht immer stärker besetzt sind als höherenergetische.

In einem Drei-Niveau-System wird ein Zustand über dem oberen Laserniveau angeregt, das eine kurze Lebensdauer hat. Wenn das obere Laserniveau aufgrund einer vergleichbaren Lebensdauer fast leer ist, kann so eine Besetzungsinversion erreicht werden.

Bei einem Vier-Niveau-Laser gibt es ein weiteres Niveau oberhalb des Grundzustandes. Aus diesem und nach der Emission des Photons geht es das Elektron strahlungslos in den Grundzustand über. So wird eine Besetzungsinversion zwischen unterem und oberem Laserniveau erzeugt.

Die Energie, die die Atome des aktiven Mediums innerhalb des optischen Resonators anregt, muss dem System von außen zugeführt werden und wird Pumpleistung genannt.

2.2 Halbleiter-Laser

Halbleiter-Laser werden auch Diodenlaser genannt. Die Besetzungsinversion wird durch einen Strom im Übergang zwischen den dotierten Materialien hergestellt. Durch den Strom entstehen immer neue Elektronen und Löcher, die rekombinieren und immer weitere Photonen erzeugen. Dabei ist der nötige Pumpstrom für den Beginn des Laserbetriebs als Schwellenstrom bekannt. Die Wellenlänge der Laserstrahlung lässt sich durchstimmen, da sie von Pumpstrom und Temperatur abhängt. Die Abhängigkeit beruht hierbei auf der Änderung der optischen Weglänge bzw. einer Änderung der Brechzahl und der Abstandsänderung der Energieniveaus. Wenn diese Art Laser als Pumpe für einen anderen Laser verwendet wird, muss die Pumpwellenlänge genau getroffen werden.

2.3 Nd:YAG-Laser

In diesem wichtigen Festkörperlaser besteht der Wirtskristall aus Yttrium–Aluminium–Granat (YAG), bei dem ca. 1% der Y^{3+} -Ionen durch Nd^{3+} -Ionen ersetzt werden. Die Energieniveaus spalten zu Bändern auf und dienen als Anregungsniveaus. Dieser Laser stellt ein Vier-Niveau-System dar. Das obere Laserniveau hat dabei mit 0,23 ms eine recht lange Lebenszeit, wodurch er durch die hohe Besetzungsdichte große Mengen an Energie speichern kann. Der bevorzugte Laserübergang ergibt dann die 1064 nm- Linie.

2.4 Nichtlineare Optik und Frequenzverdopplung

In nichtlinearen optischen Medien ist der Zusammenhang zwischen elektrischem Feld und der Polarisation nicht mehr linear. Während die Suszeptibilität χ_e in der linearen Optik eine Materialkonstante ist, wird sie im nichtlinearen Bereich abhängig von der Feldstärke des elektrischen Feldes. In diesen Bereich kommt man z.B., wenn Licht hoher Intensität auf Materie fällt. In diesem Fall kann man nicht mehr von der elastischen Anbindung des Elektrons an das Atom ausgehen.

Die Polarisation wird nach Potenzen des elektrischen Feldes entwickelt. Der quadratische Term sorgt dabei unter anderem für Frequenzverdopplung, was bedeutet, dass ein Teil des einfallenden Feldes in eines mit der doppelten Frequenz umgewandelt wird. Jedoch muss das Material dieselbe Brechzahl für die einfallende und die verdoppelte Welle haben, da es sonst zu einer Phasenverschiebung kommt und destruktive Interferenz entstehen kann. Daher werden doppelbrechende Medien eingesetzt, bei denen der Strahl im richtigen Winkel einfallen muss, so dass sich die Effekte durch die Abhängigkeit von der Frequenz und der Polarisation gerade aufheben und die Anpassung der Phasen gewährleistet ist.

3 Durchführung und Auswertung

3.1 Versuchsaufbau

Um die Messungen durchzuführen, wird die Laserdiode bzw. später der Laserpointer mit einer Konstantstromquelle verbunden. Bei der Laserdiode lässt sich zudem auch die Temperatur per Peltier-Element einstellen und per Thermowiderstand überwachen. Den Abschluss der verschiedenen aufgebauten optischen Bänke bildet eine Photodiode. Deren Strom wird über ein Amperemeter gemessen. Für die Fehlerrechnung sind folgende Mess- / Einstellfehler angenommen worden:

- Photodioden Strom $\pm 2,5\%$ vom Skalenendwert
- Stromquelle $\pm 7mA$
- Temperatur $\pm 0,3C$

Um sicherzustellen, dass das Licht der Fotodiode auch parallel zur optischen Bank verläuft und möglichst komplett von der Photodiode erfasst wird, wurde der Aufbau justiert. Hierzu wurde einmal die Höhe mit direkt vor der Laserdiode platzierter Photodiode korrekt eingestellt und einmal mit am Ende der optischen Bank platzierter Photodiode. Der Nd:YAG Kristall sollte direkt im Fokus der Fokussierlinse liegen. Hierzu wurde der Brennpunkt mit einem Stück Papier im Strahlengang gesucht und der Kristall an dieser Stelle platziert.

3.2 Charakterisierung Laserdiode

3.2.1 Frequenzzeichnung

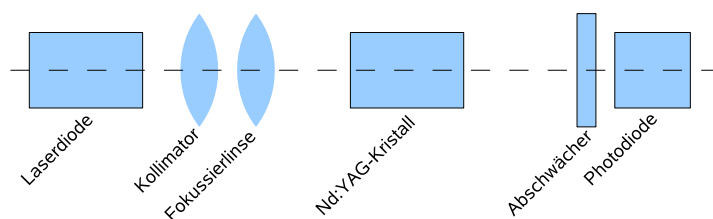


Abbildung 1: Versuchsaufbau Laserdiodencharakterisierung

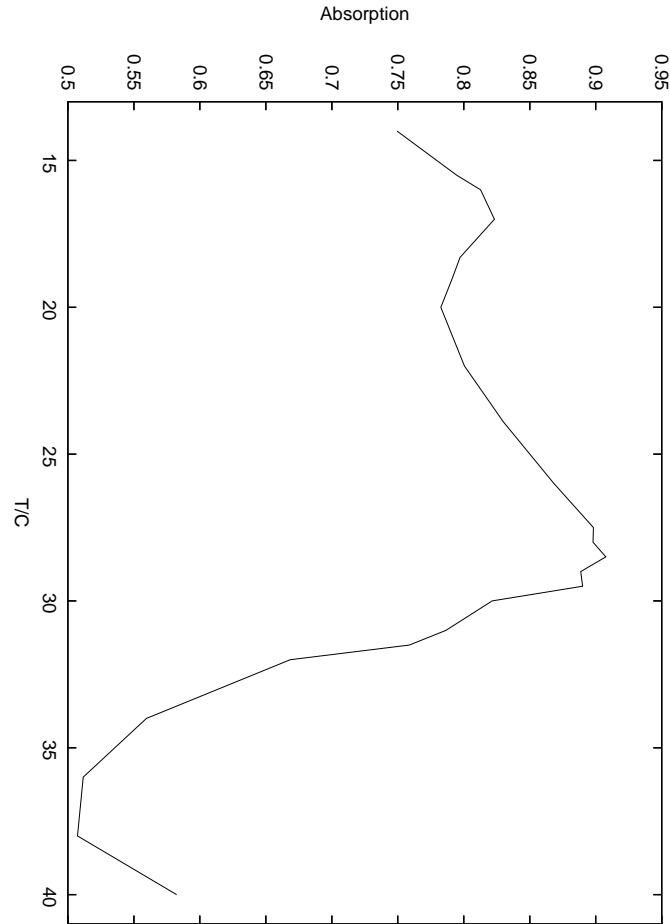


Abbildung 2: Absorption des Nd:YAG Kristalls

Es soll die Absorptionskurve des Nd:YAG-Kristalls vermessen werden. In Abb. 1 auf der vorherigen Seite ist der hierfür verwendete Messaufbau skizziert. Zum Aufnehmen der Absorptionskurve wird ein konstanter Injektionsstrom von 885 mA eingestellt und die Temperatur von 10 bis 40 °C durchfahren um den dazugehörigen Strom an der Photodiode abzulesen. Dies wird einmal mit dem Kristall und einmal ohne durchgeführt. Bei der Messung sollte darauf geachtet werden, bei denselben Temperaturwerten in beiden Messreihen Daten aufzunehmen um weitere Fehler durch Interpolierung zu vermeiden. Da wir bei 29 °C nur einmal einen Wert aus der Messreihe mit Filter aufgeschrieben haben, wurde der Punkt in der anderen Messreihe interpoliert.

Die relative Absorption wird nun über

$$A = \frac{I_{ohne} - I_{mit}}{I_{ohne}} = 1 - \frac{I_{mit}}{I_{ohne}}$$

errechnet und gegen die Temperatur aufgetragen (Abb. 2). In der Kurve sind 2 Maxima zu erkennen, sowie der Anstieg zu einem dritten. Diese Maxima werden den bekannten Absorptionslinien von Nd:YAG zugeordnet. Es ergeben sich $\lambda_1 = 804,4 \text{ nm}$ bei 17°C und $\lambda_2 = 808,4 \text{ nm}$ bei $28,5^\circ\text{C}$.

3.2.2 Arbeitsgerade

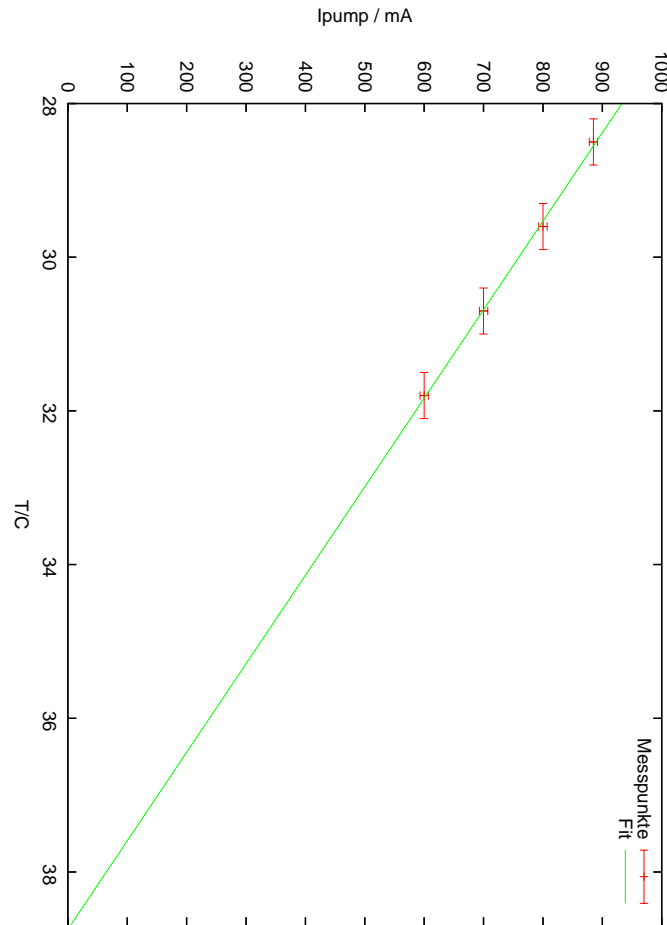


Abbildung 3: Arbeitsgerade der Laserdiode

Für die weiteren Versuche soll die Zentralwellenlänge der Laserdiode konstant gehalten werden um maximale Pumpleistung für den Nd:YAG zu garantieren. Dazu muss die Temperatur passend zum Injektionsstrom nachgeführt werden. Den linearen Zusammenhang zwischen diesen Größen bei konstanter Zentralwellenlänge bezeichnet man als Arbeitsgerade. Auch hierzu wurde der Aufbau aus 1 auf Seite 4 verwendet.

Dazu wurden nun ausgehend von 885 mA und 28,5°C bei 3 weiteren Strömen die Temperatur so eingestellt, dass maximale Absorption vorliegt, also minimale Transmission von Licht die Photodiode erreicht und die entsprechende Temperatur notiert.

In die so erhaltenen Werte wird eine Gerade gefittet¹ ($I(T) = a \cdot T + b$) und es ergibt sich für die Parameter

$$a = (-86,8182 \pm 2,362) \frac{mA}{C}$$

$$b = (3363,82 \pm 71,27) mA$$

(Abb. 3).

¹Alle Fits in dieser Ausarbeitung wurde mit GnuPlot Version 4.0 patchlevel 0 erstellt.

3.2.3 Kennlinie

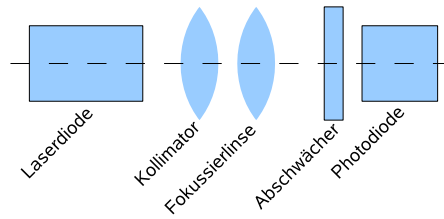


Abbildung 4: Versuchsaufbau Kennlinienbestimmung

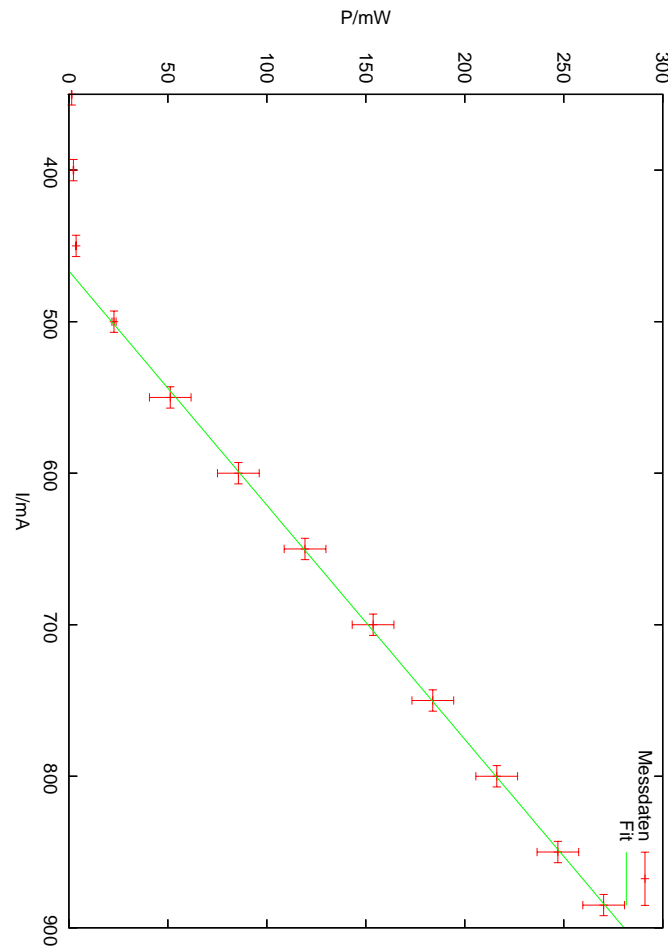


Abbildung 5: Kennlinie der Laserdiode

Zur Aufnahme der Kennlinie wurde der Laser entlang der Arbeitsgeraden gefahren und die Stromstärke an der Photodiode gemessen. Daraus berechnet sich die Leistung zu

$$P_{Diode} = \frac{I_{Photo}}{0,57 \frac{A}{W} \cdot 0,025},$$

wobei $0,57 \frac{A}{W}$ die Empfindlichkeit der Photodiode bei 810 nm und 2,5 % der Transmissionskoeffizienten des Abschwächers ist. In Abb. 4 ist der hierfür verwendete Messaufbau skizziert.

In das so erhaltene P/I-Diagramm wird eine Gerade durch die 9 letzten Messpunkte gefittet und es ergibt sich $P = a \cdot I + b$ mit

$$\begin{aligned} a &= (0,647156 \pm 0,004306) \frac{W}{A} \\ b &= (-301,95 \pm 3,056) mW \end{aligned}$$

(Abb. 5 auf der vorherigen Seite).

Zusätzlich der Schwellenstrom zu $I_{th} = 466,6 mA$ bestimmt, indem der Schnittpunkt des Fits mit der x-Achse berechnet wurde.

3.2.4 Differentielle Quanteneffizienz

Die differentielle Quanteneffizienz ist über

$$\eta_{ext} = \frac{e P_{Photo}}{h \nu (I - I_{th})}$$

definiert. Er ist also der Quotient aus der Anzahl der Photonen und der frei gewordenen Elektronen oder anders ausgedrückt, die Wahrscheinlichkeit für das Freisetzen eines Elektrons.

Da $\frac{P_{Photo}}{I - I_{th}}$ gerade der Steigung der Kennlinie entspricht, ergibt sich bei einer Wellenlänge von 808,4 nm $\eta_{ext} = 0,421$.

3.3 Charakterisierung Nd:YAG Laser

3.3.1 Justage

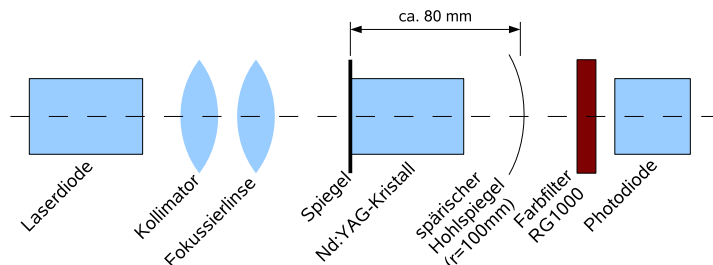


Abbildung 6: Versuchsaufbau Nd:YAG Laser

Der Nd:YAG Laser wurde wie in Abb. 6 aufgebaut. Um hier eine möglichst hohe Ausgangsleistung zu erzielen, musste der Resonator möglichst gut justiert werden:

- Nd:YAG Kristall senkrecht zur optischen Achse ausrichten: Hierzu den reflektierten Laserstrahl deckungsgleich mit dem Einfallenden justieren. Dies lässt mit einem Stück Papier im Strahlengang feststellen.
- Spärischen Ausgangsspiegel nach Augenmaß vorjustieren
- Durch Verkippen von Spiegel und Nd:YAG Kristall Ausgangsleistung maximieren.
- Durch simultanes Verkippen von Kristall und Spiegel Ausgangsleistung maximieren.
- Durch Korrektur der Ausrichtung der Laserdiode Ausgangsleistung maximieren.

Die Punkte wurden iterativ über einen Zeitraum von ca. 1h durchgeführt.

3.3.2 Kennlinie

Zur Aufnahme der Kennlinie wurde die Laserdiode entlang der Arbeitsgeraden gefahren und die Stromstärke an der Photodiode gemessen. Daraus berechnet sich die Leistung zu

$$P_{Nd:YAG} = \frac{I_{Photo}}{0,22 \frac{A}{W} \cdot 0,65},$$

wobei $0,22 \frac{A}{W}$ die Empfindlichkeit der Photodiode bei 1064 nm und 0,65 der Transmissionskoeffizienten des RG1000 Filters bei 1064 nm ist. Diesen Transmissionskoeffizienten haben wir durch lineare Interpolation aus den Werten von 0,64 bei 1060nm und 0,66 bei 1070 nm bestimmt. Die so erhaltene Leistung des Nd:YAG Lasers haben wir zur Pumpleistung (siehe Abschnitt 3.2.3 auf Seite 7) in Beziehung gesetzt und in Abb. 7 dargestellt.

In das so erhaltene P/I-Diagramm wird eine Gerade durch die 8 letzten Messpunkte gefittet und es ergibt sich $P = a \cdot I + b$ mit

$$\begin{aligned} a &= 0,0708389 \pm 0,001704 \\ b &= (-3,14478 \pm 0,3085) \text{ mW}. \end{aligned}$$

Leider konnten wir GnuPlot nicht dazu bringen, die unterschiedlichen Fehlerbalken zu berücksichtigen, da dies den Fit nicht mehr konvergieren ließ.

Zusätzlich wurde aus der Abbildung die Schwelleistung zu $P_{th,2} = 44,4 \text{ mW}$ bestimmt, wiederum indem der Schnittpunkt des Fits mit der x-Achse berechnet wurde.

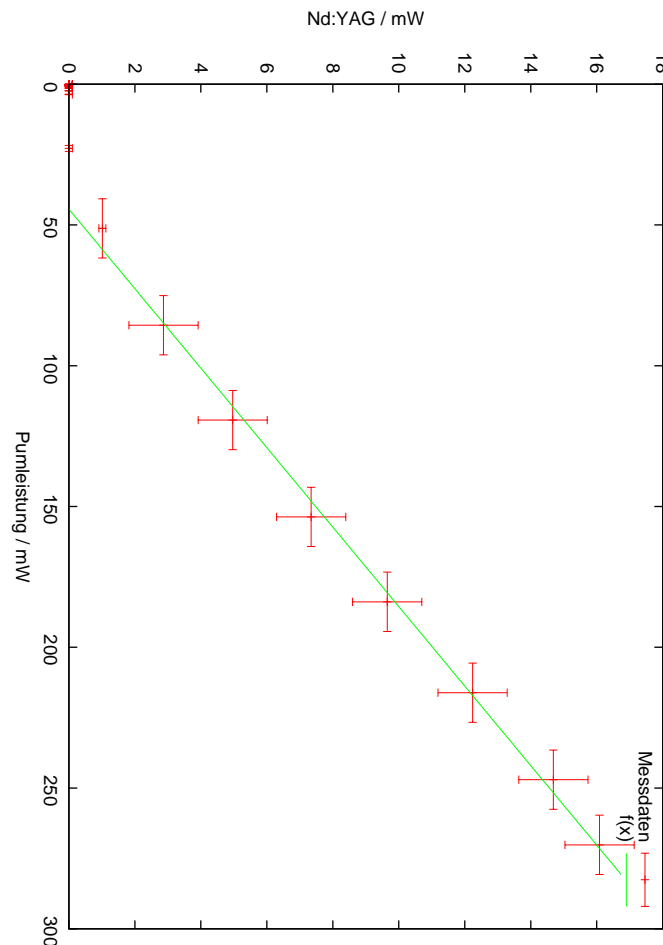


Abbildung 7: Kennlinie Nd:YAG zu Pumpleistung

3.3.3 Quantenwirkungsgrad

Der Quantenwirkungsgrad dieser Anordnung errechnet sich zu

$$\epsilon = \frac{E_{\text{Ausgangsphoton}}}{E_{\text{Pumpphoton}}} = \frac{\frac{hc}{\lambda_{\text{Ausgangsphoton}}}}{\frac{hc}{\lambda_{\text{Pumpphoton}}}} = \frac{\lambda_{\text{Pumpphoton}}}{\lambda_{\text{Ausgangsphoton}}} = \frac{808,4\text{nm}}{1064\text{nm}} = 75,9\%$$

3.3.4 Totale Leistungseffizienz

Die totale Leistungseffizienz ergibt sich aus dem Verhältnis von Laserleistung zu Pumpleistung. In Abbildung 8 ist sie für unseren Versuch aufgetragen.

Sehr auffällig ist die Diskrepanz zwischen den maximal 6% aus der Kurve und den theoretischen 75,9%. Mögliche Erklärungen sind, dass die Übergänge mit 1064 nm im Nd:YAG-Laser nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 60% stattfinden. Außerdem ist der Laserstrahl am Platz der Photodiode deutlich aufgeweitet und somit kann nicht sichergestellt sein, dass die vollständige Intensität registriert wird.

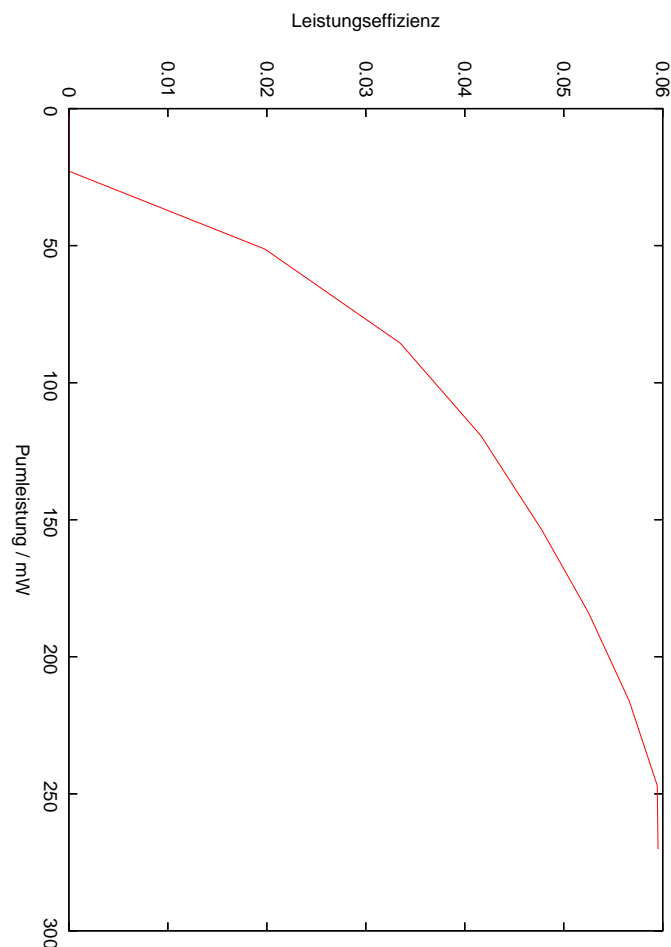


Abbildung 8: Totale Leistungseffizienz des Nd:YAG Lasers

3.4 Frequenzverdopplung

3.4.1 Versuchsaufbau

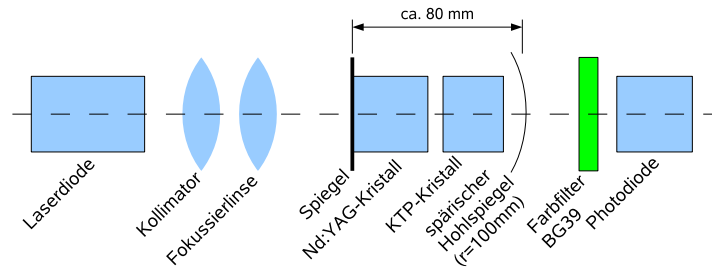


Abbildung 9: Versuchsaufbau Frequenzverdopplung

Zur Analyse der Frequenzverdopplung haben wir den Versuchsaufbau wie in Abbildung 9 modifiziert. Der KTP-Verdoppler-Kristall wurde nicht wie üblich hinter den Resonator, sondern hineingesetzt, da hier ein größeres E Feld vorliegt und somit die nichtlinearen Effekte besser zur Geltung kommen.

Um P_{532nm} aus dem Photostrom zu berechnen, haben wir folgende Formel genutzt:

$$P_{Nd:YAG} = \frac{I_{Photo}}{0,28 \frac{A}{W} \cdot 0,79},$$

wobei $0,28 \frac{A}{W}$ die Empfindlichkeit der Photodiode bei 532 nm und 0,79 der Transmissionskoeffizienten des BG39 Filters bei 532 nm ist. Um diesen Transmissionskoeffizienten zu erhalten, haben wir zunächst die Werte der Transitivität des im Datenblatt beschriebenen 1mm breiten Filters zum genutzten 3mm breiten Filter umgerechnet:

$$T_{3mm} = T_{1mm} \cdot T_{i1mm}^2$$

Hieraus erhielten wir die Werte 0,8 bei 530nm und 0,76 bei 540 nm aus denen wir durch lineare Interpolation 0,79 bei 532nm bestimmt haben.

3.4.2 Konversionseffizienz

In Abb. 10 auf der nächsten Seite haben wir die Konversionseffizienz

$$\gamma_{SHG} = \frac{P_{doppel}}{P_{fundamental}} = \frac{P_{532nm}}{P_{532nm} + P_{1064nm}}$$

aufgetragen. Aufgrund der quadratischen Abhängigkeit erwartet man eine Gerade:

$$\frac{P_{doppel}}{P_{fundamental}} \sim \frac{P_{fundamental}^2}{P_{fundamental}} = P_{fundamental}$$

Tatsächlich hat aber ein Fit mit

$$f(x) = a \cdot x^b,$$

, was einer Gerade im Logarithmischen entspricht, ergeben

$$\begin{aligned} a &= 0.0060272 \pm 0.002084 \\ b &= 0.881016 \pm 0.1963. \end{aligned}$$

Allerdings liegt das zu erwartende $b = 1$ noch im Konfidenzintervall liegt.

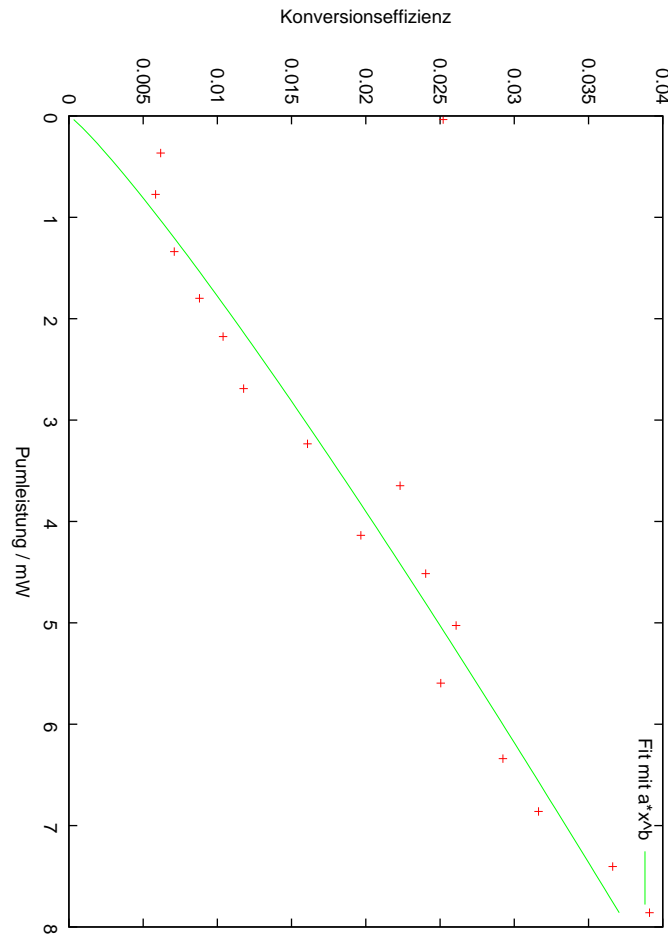


Abbildung 10: Konversionseffizienz der Frequenzverdopplung

3.4.3 Maximale Konversionseffizienz

Es wurde eine maximale Konversionseffizienz von 3,91% erreicht.

Mit einer größeren Fundamentalleistung und besserer Justierung ließe sich dieser Wert vermutlich noch verbessern.

3.5 Charakterisierung Laserpointer

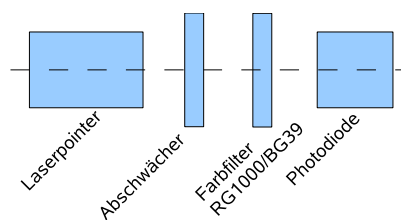


Abbildung 11: Versuchsaufbau Charakterisierung eines Laserpointers

Um einen uns unbekanntem Laserpointer zu charakterisieren, haben wir einen Versuchsaufbau wie in Abb. 11 skizziert, verwendet. Beim 1064nm Farfilter (RG1000) haben wir eine Intensität von 0 an der Photodiode

gemessen. Bei 532nm hingegen konnten wir die Kurve aus Abb. 12 aufnehmen. Hierzu verwendeten wir die gleichen Umrechnungen für den Photodiodenstrom wie in Abschnitt 3.4 auf Seite 11.

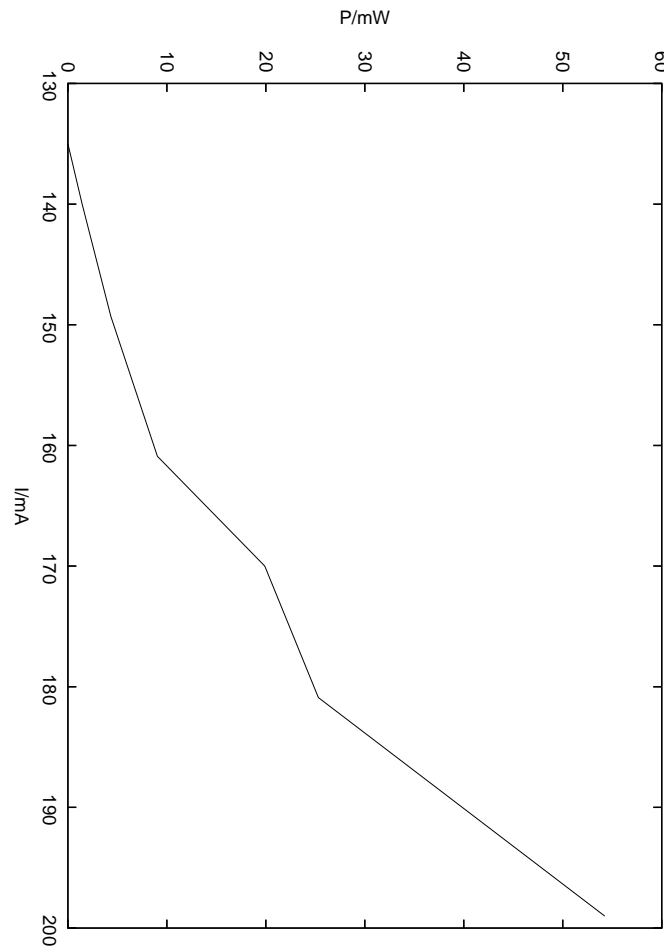


Abbildung 12: Kennlinie Laserpointer bei 532nm

4 Fazit

Es ist uns gelungen, den Halbleiterlaser und den Nd:YAG-Laser bezüglich ihrer physikalischen Eigenschaften zu untersuchen und die meisten Erwartungen zu bestätigen. Fraglich bleibt, ob durch eine noch aufwändigere Justierung bessere Ergebnisse hätten erzielt werden können.

Trotz einem geringen Wert für die Konversionseffizienz, ließ sich das Phänomen der Frequenzverdopplung erstaunlich genau nachweisen.

Zudem konnten wir einen uns unbekanntem Laserpointer mit den zur Verfügung stehenden Mitteln charakterisieren.

Literatur

- [1] Anleitungsblatt zum Versuch
- [2] Literaturliste zum Versuch

[3] Alte Ausarbeitung von Stefanie Sammet

[4] Wikipedia www.wikipedia.net