

Laserdioden-gepumpter Nd:YAG Laser und Frequenzverdoppelung

Markus Rosenstihl

1 Ziel des Versuchs

In diesem Versuch untersuchen wir Funktionsweise von Festkörperlasern sowie Frequenzverdoppelnde Kristalle bzw. nichtlineare Effekte. Als Festkörperlaser verwenden wir einen Nd:YAG Laser der mit einer Halbleiter Laserdiode gepumpt wird.

2 Das Laserprinzip:

Um Laserlicht zu erzeugen muss man das Lasermedium zur Besetzungsinversion bringen. Um Besetzungsinversion zu erzeugen benötigt man mindestens drei Energieniveaus. Das oberste ist der metastabile Zustand, das mittlere ist das obere Laserniveau. Der Grundzustand ist das untere Laserniveau. Die Aufenthaltsdauer der Elektronen im metastabilen Niveau muss kürzer sein als die Aufenthaltsdauer der Elektronen im oberen Laserniveau. Bringt man nun Elektronen aus dem Grundzustand in das metastabile Niveau, von wo sie nach kurzer Zeit strahlungslos auf das obere Laserniveau fallen, so erhält man nach einiger Zeit eine Besetzungsinversion, d.h. das obere Niveau ist stärker besetzt als das untere Laserniveau:

$n_{\text{unt. Laserniveau}} > n_{\text{Grundniveau}}$. Da das obere Laserniveau überbesetzt ist, wird das Atom zur sogenannten stimulierten Emission gebracht. Das heisst, dass ein einfallendes Lichtquant das Atom zur Aussendung eines weiteren Lichtquants gleicher Energie, Phase und Polarisation animiert.

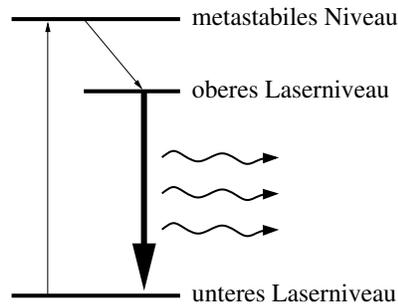


Figure 1: **Drei-Level-Schema**

2.1 Die Umsetzung des Laserprinzips beim Halbleiterlaser

In unserem Versuch verwenden wir einen GaAs/AlGaAs Halbleiterlaser. Die Energieniveaus die zur Emission benutzt werden sind der untere Bereich des Leitungsbandes und der obere Bereich des Valenzbandes. Beim p-n-bergang gibt es eine kleine Schicht, die sogenannte Aktive Zone in welcher die benötigte Besetzungsinversion vorliegt. Für GaAs ist diese Schicht etwa $1 \mu\text{m}$ dick.

Da Halbleiter sehr breite Energieniveaus haben, und man für die Laserfähigkeit nur eine bestimmte Mode haben will, platziert man das Medium zwischen zwei Spiegel die als Interferometer dienen. Die Moden (stehende Wellen) haben eine gleichmässige Frequenzdifferenz von $\Delta\nu = \frac{c}{2d}$. Es wird nur das Licht verstärkt, das diese bestimmten Frequenz hat, parallel zu den Spiegeln ist und zusätzlich noch im Verstärkungsbereich des Gain-Mediums ist. Als Spiegel dienen unter anderem die Kristallflächen, die aufgrund ihres hohen Brechungsindex immerhin noch ungefähr 32% reflektieren. Halbleiterlaser sind besonders deshalb interessant, da sie Strom mit sehr hoher Effizienz direkt in Licht umwandeln. Sie lassen sich sehr kostengünstig herstellen, und können auf einem Chip integriert werden, wodurch sie für die elektro-optische Signalverarbeitung sehr wichtig geworden sind. Ausserdem ist ihre Wellenlänge abstimbar.

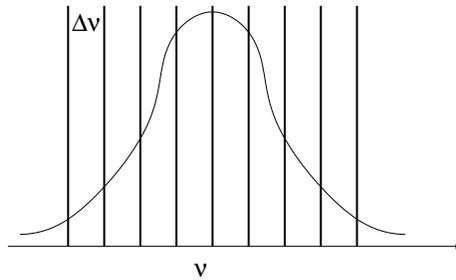


Figure 2: Verstärkungsbereich

2.2 Die Umsetzung des Laserprinzips beim Festkörperlaser

Da die Laserübergänge zwischen den Energieniveaus in den inneren Schalen statt finden und damit vom Feld des Wirtskristalls nicht beeinflusst sind, sind diese bergänge sehr scharf. Die Anzahl der aktiven Ionen der Festkörperlaser beträgt bis zu 1%. In unserem Versuch verwenden wir ein mit Neodym-Ionen dotierter Yttrium-Aluminium-Granat Laser, kurz Nd:YAG-Laser. Das YAG ist ein kubischer Kristall, damit erklärt sich die hohe Wärmeleitfähigkeit, die wichtig ist um den Kristall zu kühlen. Der Nd:YAG-Laser ist ein Vier-Niveau Laser.

Da strahlungslose Übergänge den Kristall erwärmen, sollte er eigentlich gekühlt werden, aber aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit (10 mal höher als beim Nd:Glas Laser) ist das beim Nd:YAG nicht nötig! Ein weiterer Vorteil ist die geringe Linienbreite des Nd:YAG: sie ist bis zu 50 mal kleiner als beim Nd:Glas Laser mit seiner amorphen Struktur. Der grösste Vorteil aber ist, dass die Pumpbänder des Nd:YAG beinahe genau mit den Laserbändern des GaAs-Halbleiterlaser zusammenfallen. Damit kann man sehr effektiv Pumpen.

2.3 Nichtlineare Effekte

Trifft eine hochenergetische elektro-magnetische Welle auf ein Medium, so erzeugt sie durch Ladungsverschiebung induzierte elektrische Dipolmomente. Diese Wirken als Quellen für neue EM-Wellen welche durch die elektrische Polarisierung bestimmt werden:

$$P(E) = \epsilon_0 [\text{chi}^{(1)} E + \text{chi}^{(2)} E^2 + \text{chi}^{(3)} E^3 + \dots]$$

Daraus erhält man als Überlagerung zweier Wellen:

$$E = E_1 \cos(\omega_1 t + k_1 z) + E_2 \cos(\omega_2 t + k_2 z)$$

für die Polarisation P (hier nur quadratischer Term) das interessante Ergebnis:

$$P^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 \chi^2 [(E_1^2 + E_2^2) + E_1^2 \cos(2\omega_1 t) + E_2^2 \cos(2\omega_2 t) + 2E_1 E_2 \cos((\omega_1 + \omega_2)t) + 2E_1 E_2 \cos((\omega_1 - \omega_2)t)]$$

Man erkennt einen frequenzunabhängigen Term (Optische Gleichrichtung), Summen- und Differenzterme, und zwei Terme der Frequenzverdopplung wenn $\omega_1 = \omega_2$ ist:

$$2\omega_1, 2\omega_2 \sim E_1^2, E_2^2$$

d.h. je stärker die Intensität des einfallenden Lichtes, desto stärker ist der Effekt ($I(2\omega) \sim I^2(\omega)$).

3 Der Versuchsaufbau

Der Laserstrahl des Halbleiterlasers wird durch den Kollimator und eine Fokussierlinse parallelisiert. Dann trifft er auf den ersten Resonatorspiegel. Danach folgt der Nd:YAG Kristall (genauer eine Fläche des Nd:YAG dient als erster Resonatorspiegel) und ein sphärischer Resonatorspiegel. Zwischen Nd:YAG und 2. Resonatorspiegel kann man den KTP Kristall einbringen. Nach dem letzten Resonatorspiegel folgen noch der Filterhalter für die je 3mm starken RG1000 und BG39 Filter oder der 2,5% Abschwächer. Ganz am Ende des Strahlengangs befindet sich die Photodiode zur Intensitätsmessung.

4 Versuchsdurchführung

4.1 Absorption von Nd:YAG

Aufbau: Laserdiode-Kollimator-2,5% Abschwächer-Photodiode

Zunächst misst man den Photostrom in Abhängigkeit der Temperatur bei einem konstantem Diodenstrom von $I_0 = 885mA$. Der gemessene Photostrom sollte dabei proportional zur Photoleistung sein. Danach wiederholt man diese Messung, setzt aber den Nd:YAG-Kristall ein. Dadurch erhält man ein Transmissionspektrum anhand dessen man die Temperatur bestimmt bei der die Absorption maximal wird. Unter Vernachlässigung von Reflexionen gilt:

$$\text{rel. Absorption} + \text{rel. Transmission} = 1$$

Daraus erhält man das *relative Absorptionsspektrum* (Siehe Abb. 1). Als Maximum der Absorption verwendeten wir das bei 28.5 C, was laut ausliegendem Absorptionsspektrum einer Wellenlänge von 808.4 nm entspricht.

4.2 Arbeitsgerade der Laserdiode

Um weitere Versuche durchführen zu können benötigen wir die Arbeitsgerade. Entlang der Arbeitsgerade ist die Wellenlänge der Laserdiode konstant, jedoch bei variablem Strom und Temperatur. Wir wollen den Nd:YAG mit unterschiedlicher Leistung pumpen; deswegen müssen wir immer bei der vorher bestimmten Wellenlänge bleiben.

Bei allen nachfolgenden Messungen bewegt man sich auf der Arbeitsgerade!

4.3 Kennlinie der Laserdiode

Aus dem Strom bestimmt man durch folgende Formel die Leistung:

$$P = \frac{I}{c \cdot \tau} \quad (1)$$

wobei c die spektrale Empfindlichkeit ($c=0.57/ A/W$ bei 810nm) und τ der Transmissionskoeffizient des Abschwächers ist ($\tau=2.5\%$)

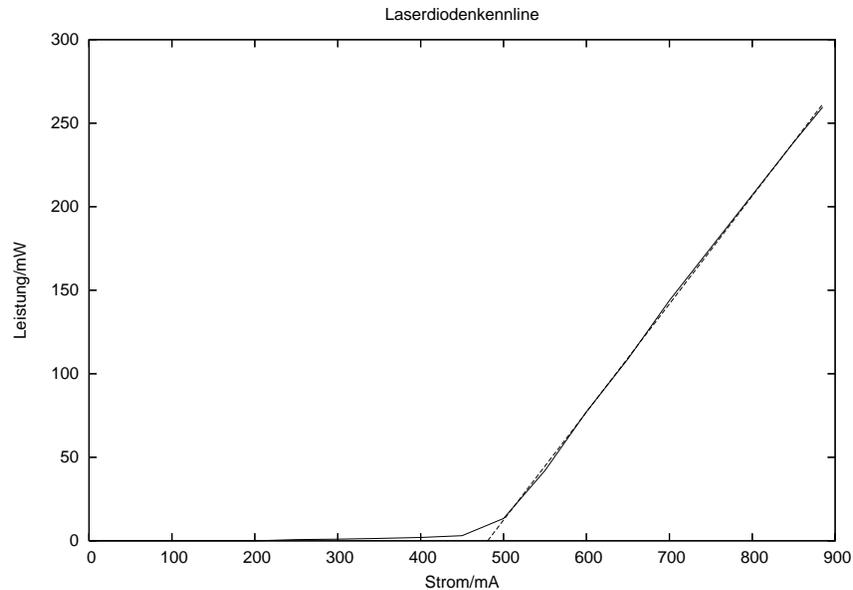


Figure 3: **Halbleiterlaser Kennlinie**

Lineare Regression liefert einen Schwellstrom von $I_{thr} = 468.5mA$ und eine Steigung $\frac{\Delta P}{\Delta I} = 0.62$. Aus der Kennlinie lässt sich zudem noch die differentielle Quanteneffizienz bestimmen. Das ist das Verhältnis von der Zahl der Elektronen die zum Laser beitragen und der Gesamtzahl der angeregten Elektronen:

$$\eta_q = \frac{e}{h \cdot \nu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta I} = 0.65 \cdot 0.62 = 0.40$$

4.4 Kennlinie des Nd:YAG Lasers

4.4.1 Aufbau des Nd:YAG Lasers

Der Spiegel mit dem Nd:YAG-Kristall wurde senkrecht zum Laserstrahl justiert, der andere Spiegel wurde so justiert, dass die Ausgangsleistung des Lasers maximal wurde. Da wir nur den Nd:YAG- Laserstrahl (1064 nm) messen wollten mussten wir den Strahl der Laserdiode (808.4 nm) mit dem RG 1000 Filter herausfiltern. Bei 1064nm lässt der Filter 0.64 % /mm durch, woraus folgt das bei 3mm noch $0.64^3 = 0.262$ % durchkommen. Das Licht der

Laserdiode wird fast vollkommen herausgefiltert. Die Photodiode hat eine Empfindlichkeit von 0.22 A/W bei 1064 nm.

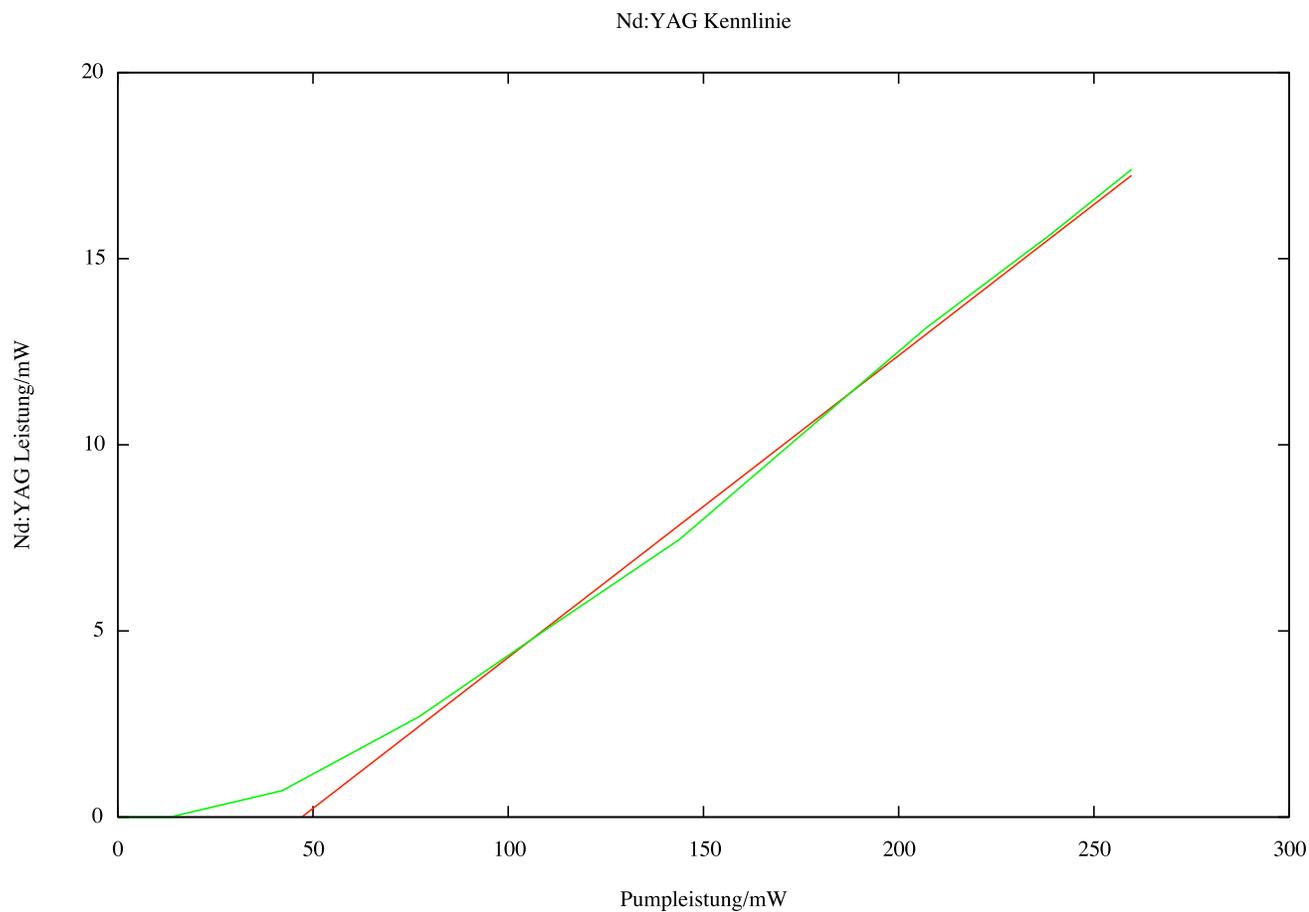


Figure 4: **Nd:YAG Kennlinie**

Aus dieser Leistungskennlinie des Nd:YAG erhält man durch lineare Regression von 50-300 mW und dem Schnittpunkt mit der x-Achse als Schwellenleistung 47.13 mW, d.h. man muss mindestens mit 47.13 mW pumpen um den Nd:YAG zum lasern zu bringen.

4.4.2 Leistungseffizienz des Nd:YAG

Die totale Leistungseffizienz des Nd:YAG Lasers ist die Leistung des Nd:YAG Lasers geteilt durch die Pumpleistung des Halbleiterlasers. Der Leistungseffizienz des Nd:YAG beträgt theoretisch maximal $\frac{808.4nm}{1064nm} = 76\%$. Die tatsächliche Leistungseffizienz ist wesentlich niedriger und liegt bei maximal 7%.

Ein Grund liegt sicher darin das wir nur einen der vier Laserübergänge verwenden. Es liesse sich vielleicht noch etwas steigern, indem man das Pumpvolumen oder Modenvolumen noch etwas vergrößert. Dies wäre zum Beispiel möglich wenn man das Strahlprofil der Laserdiode vom elliptischen weg zu einem kreisrunden Strahlprofil bringt. Ein weiteres Argument ist die Tatsache dass nicht die ganze eingestrahlte Leistung vom Kristall absorbiert wird.

4.5 Frequenzverdopplung

Um den nichtlinearen Effekt der Frequenzverdopplung zu untersuchen wurde ein KTP-Kristall in den Resonator des Nd:YAG-Lasers eingesetzt. Wie im vorherigen Versuch wurde zuerst die Leistung des Nd:YAG gemessen (RG1000 Filter; Transmission 0.25) und danach die des grünen Laserstrahls (Filter BG39, Transmission $0.87 \cdot 0.96^2 = 0.88$). Die Empfindlichkeit der Photodiode beträgt bei 1064nm 0,22 A/W und bei 532nm 0.28 A/W. Wir erwarten, wie in der Theorie erwähnt, eine quadratische Abhängigkeit:

Durch lineare Regression erhalten wir eine Steigung von 0.43 was leider nicht einer quadratischen Abhängigkeit der Konversionseffizienz von der Fundamentalleistung entspricht. Da die Frequenzverdoppelung einem Effekt quadratischer Ordnung zuzuschreiben ist, sollte in unserem Experiment die Steigung den Wert 1 haben ($\gamma = \frac{P_{532}}{P_{1064}} \sim \frac{P_{1064}^2}{P_{1064}}$). Der Grund für diese Diskrepanz ist mir unbekannt evtl. haben wir falsche Werte notiert. Wenn man die Leuchtstärke des grünen Laserstrahls mit dem eines normalen HeNe-Lasers vergleicht so fällt einem auf, dass der grüne Strahl um einiges heller ist als der des HeNe-Lasers. Dies liegt daran dass die spektrale Empfindlichkeit des Auges bei grünem Licht am grössten ist.

4.6 Laserpointer

Der Laserpointer entspricht dem Aufbau unseres Lasers, jedoch sind die Bauteile hoch integriert. Für den Laserpointer wurde aus der Kennlinie

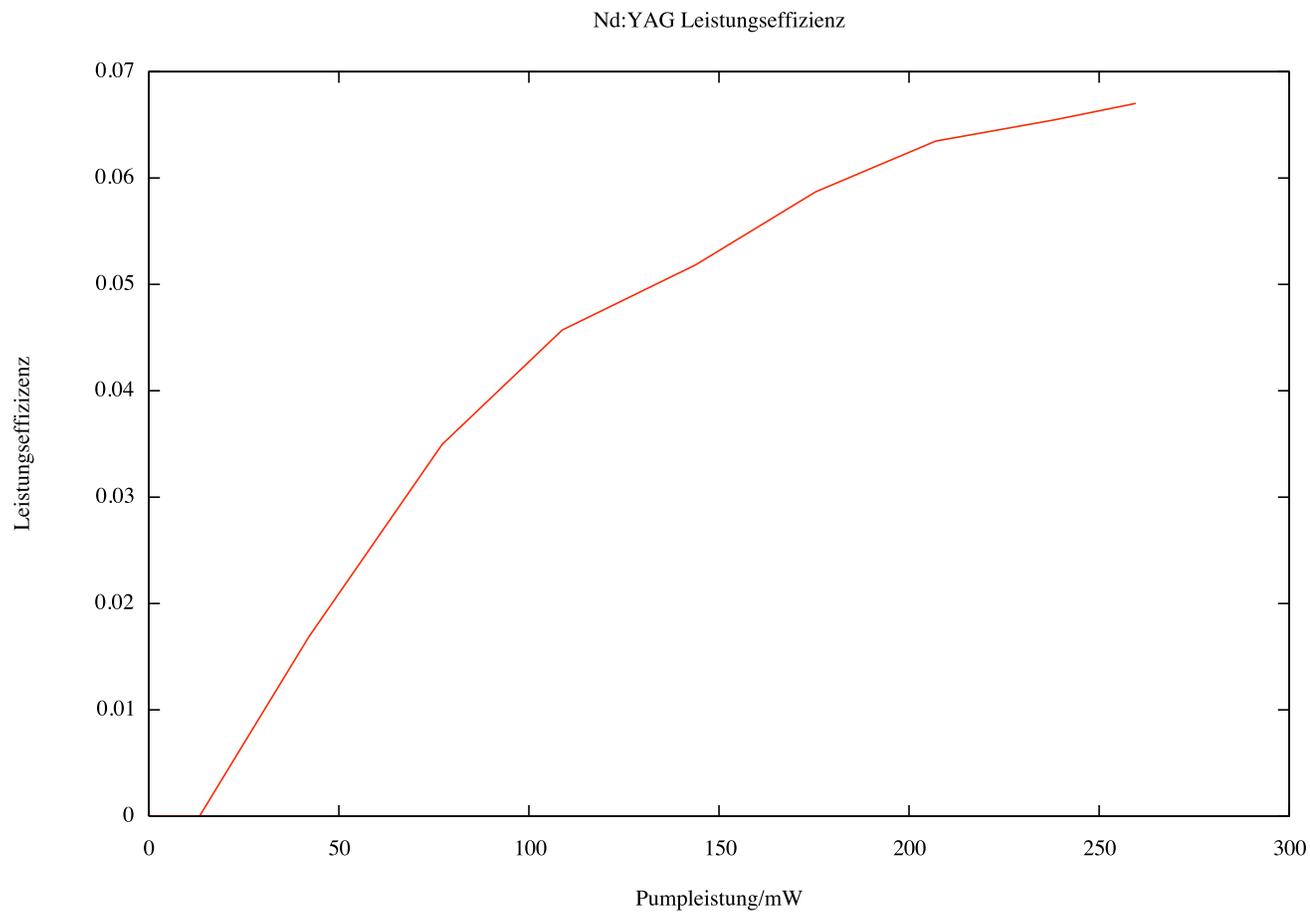


Figure 5: Nd:YAG Leistungseffizienz

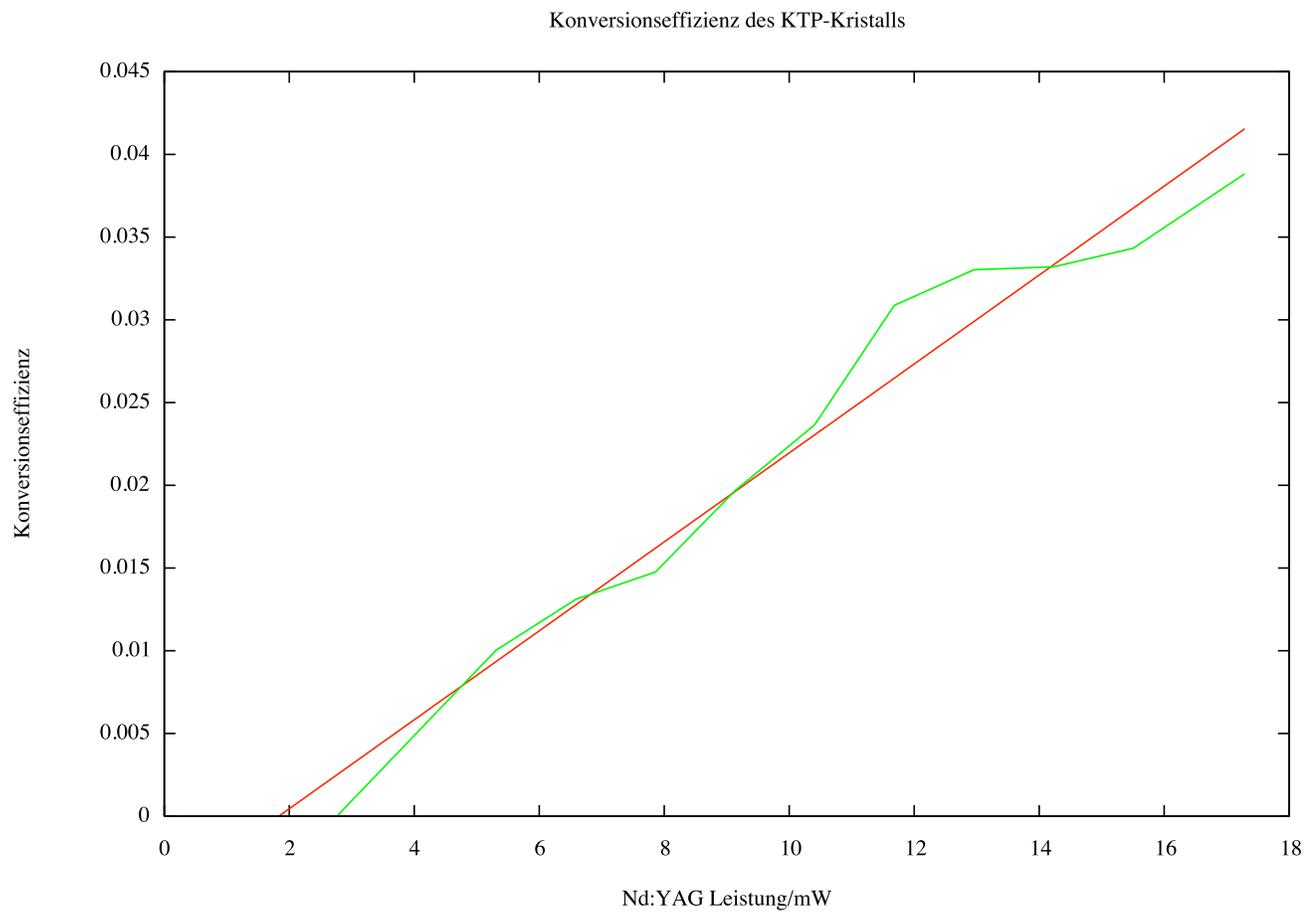


Figure 6: **Konversionseffizient des KTP-Kristalls**

der Schwellenstrom bestimmt. Quadratische¹ Regression liefert 143.59 mA. Desweiteren wurde die Leistungseffizienz in Abhängigkeit der Eingangsleistung bestimmt. Es werden maximal 2% der Eingangsleistung detektiert (Abbildung 2).

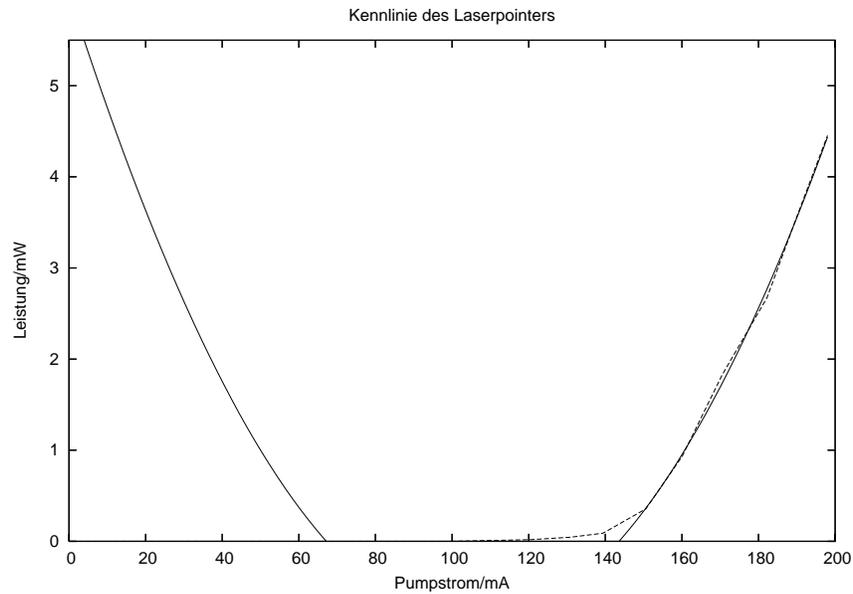


Figure 7: **Kennlinie des Laserpointers**

¹Quadratisch, weil wir die Pumpleistung des gesamten Systems (Halbleiter- UND Nd:YAG-Laser) messen:

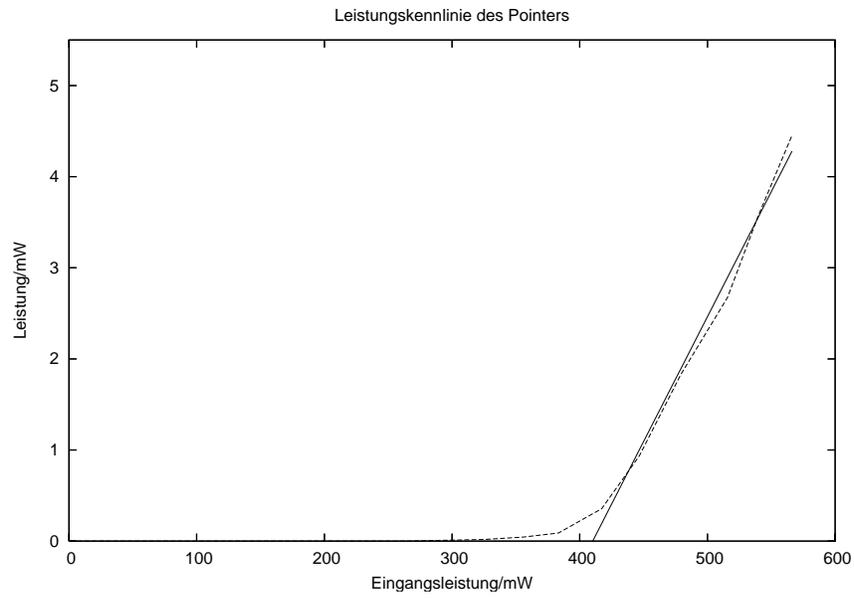


Figure 8: Leistungskennlinie

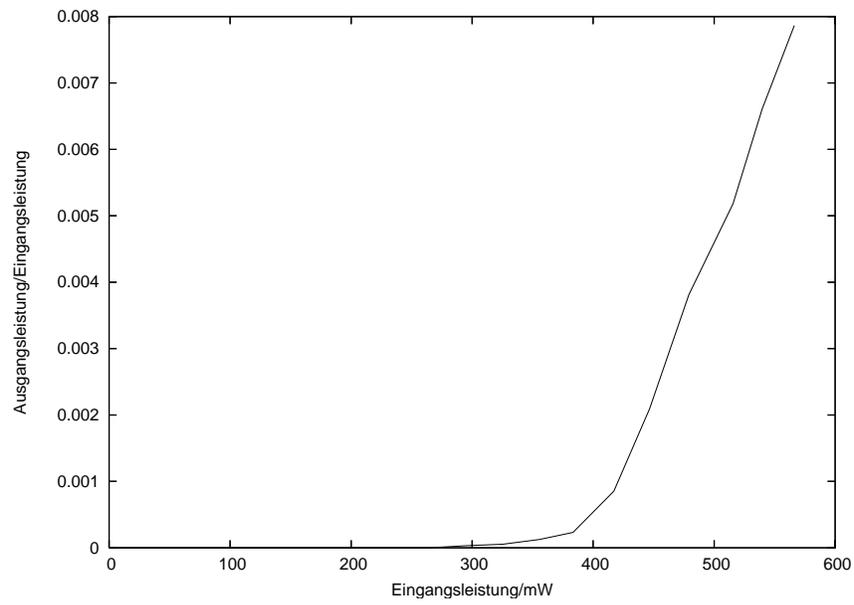


Figure 9: Leistungseffizienz des Laserpointers