

# LASERDIODEN-GEPUMPTER Nd:YAG-LASER UND FREQUENZVERDOPPELUNG

Ausarbeitung von Erik Brambrink

## **Ziel des Versuches**

In diesem Versuch werden zwei in der Praxis wichtige Festkörperlaser und das Phänomen der Frequenzverdoppelung untersucht. Die Lasertypen sind einerseits ein Halbleiterlaser und andererseits ein Nd:YAG-Laser, der mit den Halbleiterlasern gepumpt wird. Durch Variation von Temperatur und Stromstärke an den Laserdioden wird der optimale Arbeitspunkt des Nd:YAG-Lasers bestimmt. Mit der hohen Leistung des Nd:YAG-Lasers wird dann anhand der Frequenzverdoppelung ein Phänomen der nichtlinearen Optik studiert.

## **Grundlagen**

Laserstrahlung wird durch stimulierte Emission (daher der Name) in einem optischen Resonator erzeugt. Stimulierte Emission bedeutet, daß ein angeregtes Atom durch ein einfallendes Photon passender Energie zur Emission eines Photons gleicher Energie, Polarisation und Phase „stimuliert“ wird. Dadurch wird die hohe Kohärenz und Monochromasie der Laserstrahlung erreicht. Um stimulierte Emission zu bekommen, muß eine Besetzungsinversion vorliegen, daß heißt, daß mehr Atome im angeregtem Zustand (oberes Laserniveau) als im „Grundzustand“ (unteres Laserniveau) sind. Nur so ist sichergestellt, daß es auch zu einer Lichtverstärkung kommt, da ansonsten die Wahrscheinlichkeit für die Absorption des Photons größer ist als für eine stimulierte Emission.

Eine Besetzungsinversion zu erzeugen stößt jedoch auf gewisse Schwierigkeiten, da im Zustand des thermodynamischen Gleichgewichts ein Zustand niedriger Energie immer höher besetzt ist als ein Zustand höherer Energie. Eine Gleichbesetzung wäre auch nur bei unendlich hoher Temperatur möglich (Maxwell-Boltzmann-Statistik). Auch ein optisches Pumpen ist nicht möglich, da die Wahrscheinlichkeit für Absorption genauso hoch ist wie für stimulierte Emission. Um diese Probleme zu umgehen, bedient man sich 3- bzw. 4-Niveau-Laser. Beim 3-Niveau-Laser regt man das System in einen Zustand an, der über dem oberen Laser-Niveau liegt. Ist die Lebensdauer des oberen Laser-Niveaus größer als die des oberen Anregungsniveaus (metastabiler Zustand), so kann das Laser-Niveau gefüllt werden, da das obere Anregungsniveau fast leer ist und somit trotz des gefüllten Laser-Niveaus weiter Elektronen aufnehmen kann ohne die Boltzmann-Statistik zu verletzen. Der 4-Niveau-Laser hat als unteres Laserniveau ein über dem Grundzustand liegendes. Nach der Laser-Emission geht das Elektron strahlungslos und schnell in den Grundzustand über. Dadurch ist das untere Laser-Niveau praktisch leer und die Besetzungsinversion nahezu perfekt. Es wird also verhindert, daß ein Photon im Resonator durch Absorption vernichtet wird, da kein Elektron zum absorbieren da ist.

Hat man also ein geeignetes Lasersystem bleibt nur noch das Problem, die Atome in den oberen Anregungszustand zu bringen. Diesen Vorgang nennt man Pumpen. Um zu pumpen gibt es mehrere Möglichkeiten: Die erste, beim Rubinlaser angewandte, war das optische Pumpen mittels Blitzlampen. Alternativ kann man auch mit Hg-Dampf-Lampen oder wie in diesem Versuch mit anderen Lasern pumpen. Das hängt letztlich vom Lasertyp und der Anwendung ab. Eine weitere Möglichkeit ist das Pumpen mittels Gleichstrom-Gasentladung, wie sie beim Helium-Neon-Laser oder beim CO<sub>2</sub>-Laser angewandt wird. Außerdem kann man einen hochenergetischen Elektronenstrahl zum Pumpen verwenden (FEL). Zu guter Letzt

bleibt noch die Möglichkeit des Pumpens mit elektrischem Strom an einem pn-Übergang eines Diodenlasers, der bei diesem Versuch sehr wichtig ist.

Beim Halbleiterlaser findet der Laserübergang zwischen den niedrigsten Energien des Leitungsbands und den höchsten Energien des Valenzbandes statt. Das ganze sieht dann so aus, als ob das Valenzband zu einem p-dotiertem Halbleiter und das Leitungsband zu einem n-dotiertem Halbleiter gehört. Das Energiegap muß kleiner sein als die Energie des Photons. Die einfachste Möglichkeit, eine Laserdiode zu realisieren, ist die Nutzung des p-n-Übergangs einer Diode für die Laserstrahlung, wobei es in der Überlappungszone zu einem besetzungsinvertierten Zustand kommt, falls der Strom nur groß genug ist. Die Laserstrahlung wird dann senkrecht zum p-n-Übergang emittiert, wobei die Kristallflächen als optischer Resonator dienen. Bei dieser Konstruktion ist der Schwellenstrom, ab dem die Laserstrahlung beginnt, jedoch sehr groß (ca.  $100\text{kA/cm}^2$ ). Deshalb verwendet man heute Doppel-Heterostruktur-(DH-)Diodenlaser. Bei diesem Typ besteht die aktive Zone aus einem anderen (nicht-dotiertem) Material und p- und n-dotierten Material, das jeweils ein energetisch günstigeres Niveau hat, als das umgebende dotierte Material. Alle Elektronen bzw. Löcher wandern also in diesen Bereich, bevor sie rekombinieren. Dies bewirkt eine schmalere aktive Zone, was wiederum einen niedrigeren Schwellenstrom (ca.  $1\text{kA/cm}^2$ ) zur Folge hat. Die emittierte Wellenlänge des Diodenlaser hängt von Temperatur und Injektionsstrom ab, da beide die optischen Eigenschaften des Kristalls verändern und die Dichte der Elektron-Loch-Paare verändern.

Der Nd:YAG-Laser ist ein Festkörperlaser, bei dem die  $\text{Nd}^{3+}$ -Ionen, die im Wirtskristall die  $\text{Y}^{3+}$ -Ionen zu ca. 1% ersetzen, als aktive Laser-Zentren wirken. Die Dichte der aktiven Zentren ist damit wesentlich höher als bei Gas-Lasern, weshalb sich auch wesentlich höhere Leistungen erzielen lassen. Da das YAG-Kristall eine gute Wärmeleitfähigkeit besitzt, eignet sich der Nd:YAG-Laser gut für hohe Dauerleistungen bzw. hohe Repetitionsraten im Pulsbetrieb. Als 4-Niveau-Laser besitzt er eine hohe Besetzungsinversion. Zum Pumpen der Laser werden entweder klassische Lichtquellen wie Blitzlampen oder Gasentladungslampen oder auch Laserdioden benutzt. Ein weitere Vorteil von Nd:YAG-Lasern ist ihr energiescharfer Übergang, woraus sich eine hohe Frequenzstabilität ergibt.

Eine weitere wichtige Grundlage für den Versuch ist die nichtlineare Optik, die zur Erklärung der Frequenzverdoppelung benötigt wird. In der linearen Optik geht man davon aus, daß die Polarisation eines Atoms linear mit der elektrischen Feldstärke anwächst. Daraus folgen direkt Eigenschaften wie das Superpositionsprinzip und die Erhaltung der Frequenz. Bei hohen Intensitäten ist diese Linearität jedoch nicht mehr gewährleistet, da die elastische Anbindung des Elektrons an das Atom nur bei kleinen Feldstärken stimmt. Deshalb ist die Polarisation des Atoms auch von den höheren Potenzen der Feldstärke abhängig. Ist jedoch das E-Feld periodisch zeitabhängig, so ist  $E^2$  mit der doppelten Frequenz zeitabhängig (Additionstheorem). Damit hätte man schon die Frequenzverdoppelung. Nichtlineare Optik befaßt sich jedoch auch mit den höheren Potenzen des E-Feldes, den Effekten 3., 4. usw. Ordnung. Die Effekte der nichtlinearen Optik spielen in Forschung und Technik eine große Rolle. Neben den Frequenzvervielfachungen gibt es auch die Möglichkeit Frequenzdifferenzen von zwei Wellen zu erzeugen (Parametrischer Verstärker). Desweiteren gibt es die Möglichkeit der optischen Gleichrichtung und spektroskopische Untersuchungen (Raman-Streuung, Brillouin-Streuung), um nur einige von ihnen zu nennen.

Um eine effektive Frequenzverdoppelung zu erreichen, ist es wichtig, daß das nichtlineare Material die gleiche Brechzahl für die einfallende Welle hat wie für die verdoppelte. Ansonsten würden zwei verdoppelte Teilwellen, die nach unterschiedlicher Eindringtiefe entstehen, nicht mehr in Phase sein. Die Folge wäre eine destruktive Interferenz. Da nichtlineare Materialien meistens dispersiv sind, braucht man eine andere Möglichkeit der

Phasenanpassung. Zu diesem Zweck nimmt man ein doppelbrechendes Material, in dem Grund- und Oberwelle senkrecht zueinander polarisiert sind. Fällt der Strahl im richtigen Winkel zur optischen Achse des Kristalls ein, so ist die Dispersion für die Grundwelle und die verdoppelte Welle gleich, da sich die Effekte der Frequenzabhängigkeit und der Polarisationsabhängigkeit aufheben (Phase-Matching). Diese Einstellung ist jedoch wellenlängenabhängig.

## **Versuchsaufbau**

Zu dem Versuch wurden, wie in obiger Skizze dargestellt, folgende Bauteile verwendet:

- Laserdiode, temperaturgeregelt, stromgeregelt (mit Netzteil)
- Kollimator
- Fokussierlinse (Brennweite ca. 4 cm)
- Nd:YAG-Kristall mit planer verspiegelter Fläche
- KTP-Kristall
- sphärischer Resonatorspiegel ( $r=100$  mm)
- Filterhalter mit den Filtern RG 1000, BG 39 und einem Abschwächer ( $T=2,5\%$ )
- Photodiode mit folgenden Empfindlichkeiten: 810 nm: 0,57 A/W; 1064 nm: 0,22 A/W; 532 nm: 0,28 A/W
- Ein Analog-Multimeter ohne Parallaxenspiegel für echte Präzisionsmessungen

Je nach Meßvorgang wurden die entsprechenden Komponenten entfernt, die nicht benötigt waren.

## **Versuchsdurchführung**

Zuerst wurde eine Absorptionskurve des Nd:YAG-Kristalls aufgenommen, wobei die Wellenlängenänderung durch die Variation der Temperatur bewerkstelligt wurde. Anschließend wurde die Temperaturabhängigkeit der Ausgangsleistung der Laserdiode gemessen. Aus dem Quotient der beiden Werte wurde dann eine Absorptionskurve gezeichnet. Dem Maximum wurde dann die Zentralwellenlänge zugeordnet.

Anschließend wurde die Absorption in Abhängigkeit vom Injektionsstrom gemessen. Zu diesem Zweck wurde bei drei weiteren Stromstärken (600 mA, 690 mA, 790 mA) die Temperatur der maximale Absorption gesucht. Dabei wurde zuerst grob das Maximum mit Kristall gesucht und dann um dieses Maximum herum mit und ohne Kristall vermessen. Aus den Quotient der beiden Größen wurde wieder das Absorptionsmaximum bestimmt. nach graphischem Auftragen der Werte konnte man eine Gerade durch die Punkte ziehen, die Arbeitsgerade. Aus dieser kann man zu jeder Stromstärke die Temperatur ablesen, bei der das Nd:YAG-Kristall seine maximale Absorption hat.

Dann wurde eine Kennlinie der Laserdiode aufgenommen, in diesem Fall Leistung über Stromstärke. Die Werte wurden entlang der Arbeitsgeraden vermessen, da diese Werte später zum Vergleich mit der Leistung des Nd:YAG-Lasers herangezogen werden. Bei all diesen Messungen wurde der Abschwächer vor die Photodiode gestellt, um zu verhindern, daß diese in Sättigung geht.

Anschließend wurde der Resonator des Nd:YAG-Lasers aufgebaut. Dabei wurde der Plan-Spiegel ausgerichtet, indem man den reflektierten Strahl durch einjustieren des Spiegels in sich selbst zurückwirft. Der Wölbspiegel wird grob nach Augenmaß ausgerichtet. Durch diese Maßnahmen wurde eine schwache Laser-Emission erreicht und durch Einbringen des RG 1000-Filters vom Restlicht der Laserdiode getrennt. Anschließend wurde, durch Vergleichsmessungen mit der Photodiode, die Ausgangsleistung durch Variation des Resonators und des Fokus maximiert. Danach wurde eine Kennlinie entlang der

Arbeitsgerade aufgenommen. Das Transmissionsverhalten des Filters ist im Protokoll vermerkt.

Zuletzt wurde noch in den Resonator ein KTP-Kristall eingesetzt, und zwar nahe an das Nd:YAG-Kristall, da dort die Intensität am größten ist. Es ergab sich ein intensives grünes Licht, was dann mit dem Filter BG 39 für die Photodiode von der restlichen Infrarotstrahlung bereinigt wurde. Durch Ausrichtung des KTP-Kristalls (Phasenanpassung) wurde die Ausgangsleistung für grünes Licht maximiert. Dann wurden noch Kennlinien des Lasers im grünen und im infrarotem (RG 1000) Spektrum aufgenommen, um diese beiden Werte zu vergleichen. Nach der Theorie sollte eine quadratische Abhängigkeit für das grüne Licht herauskommen.

Noch eine Anmerkung zu den Messungen. Das benutzte Meßgerät hatte seltsamerweise einen Meßbereich, der bis 6 ging, jedoch eine Skala, die nur bis 3 ging. Wie diese Anzeige nun letztlich zu verstehen ist, ist nicht ganz klar, wobei wir davon ausgegangen sind, daß die Skalenwerte entsprechen verdoppelt werden müssen. Deshalb sind möglicherweise absolut Leistungsbestimmung falsch, jedoch die Verhältnisse der Leistungen stimmen trotzdem noch.

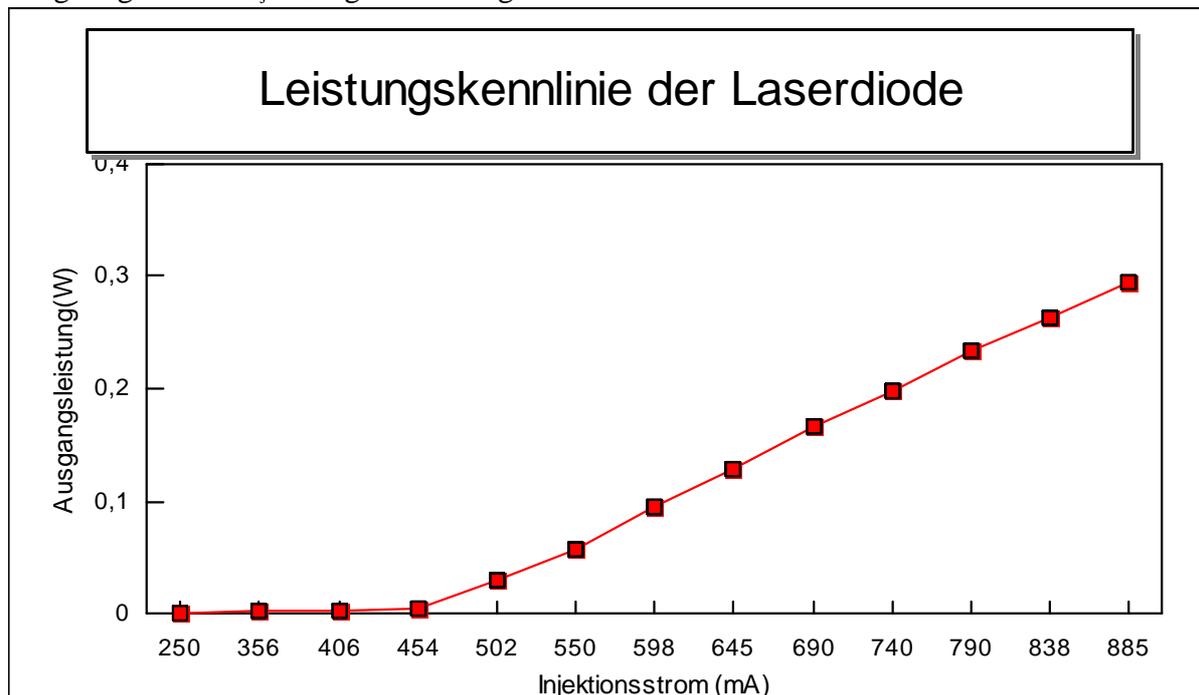
## Auswertung

### Untersuchungen am Halbleiterlaser

Aus der Stromstärke de Photodiode berechnet sich die Leistung wie folgt:

$$P = \frac{I_{Photodiode}}{\text{Empfindlichkeit} \cdot T_{Filter}} = \frac{I_{Photodiode}}{0,57 \frac{A}{W} \cdot 2,5\%}$$

Aufgetragen über  $I_{injektion}$  ergibt sich folgendes Bild:



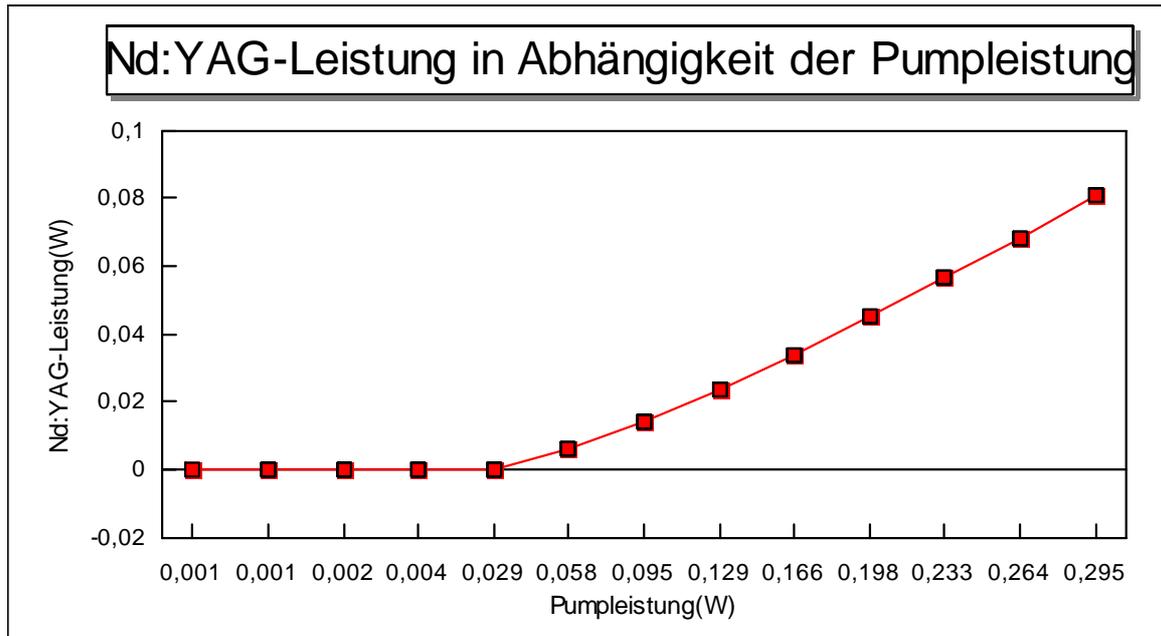
Der Schwellenstrom  $I_{th}$  läßt sich mittels Regression aus dem linear steigenden Teil der Kurve bestimmen. Man erhält eine Steigung von 0.694 W/A und einen Achsenabschnitt von -317,13 W. Daraus bestimmt sich der Schwellenstrom zu 457 mA.

Außerdem läßt sich die differentielle Quanteneffizienz, dieser Wert gibt an, wieviele der Elektronen, die über den Schwellstrom hinaus durch den Halbleiter fließen, ein Photon erzeugen, daß zum Laserprozeß beigetragen hat, bestimmen:  $\eta_{ext} = \frac{e}{h\nu} \frac{P_{out}}{I - I_{th}}$ , wobei der

zweite Term nichts anderes ist, als die Steigung der Geraden im linearen Anstiegsbereich. Diese wurde mittels Geradenregression bestimmt. Es ergab sich als Wert: 0,694 W/A. Mit  $\nu = 3,7 \cdot 10^{14}$  Hz wird dann  $\eta_{\text{ext}}$  zu 0,453 bestimmt.

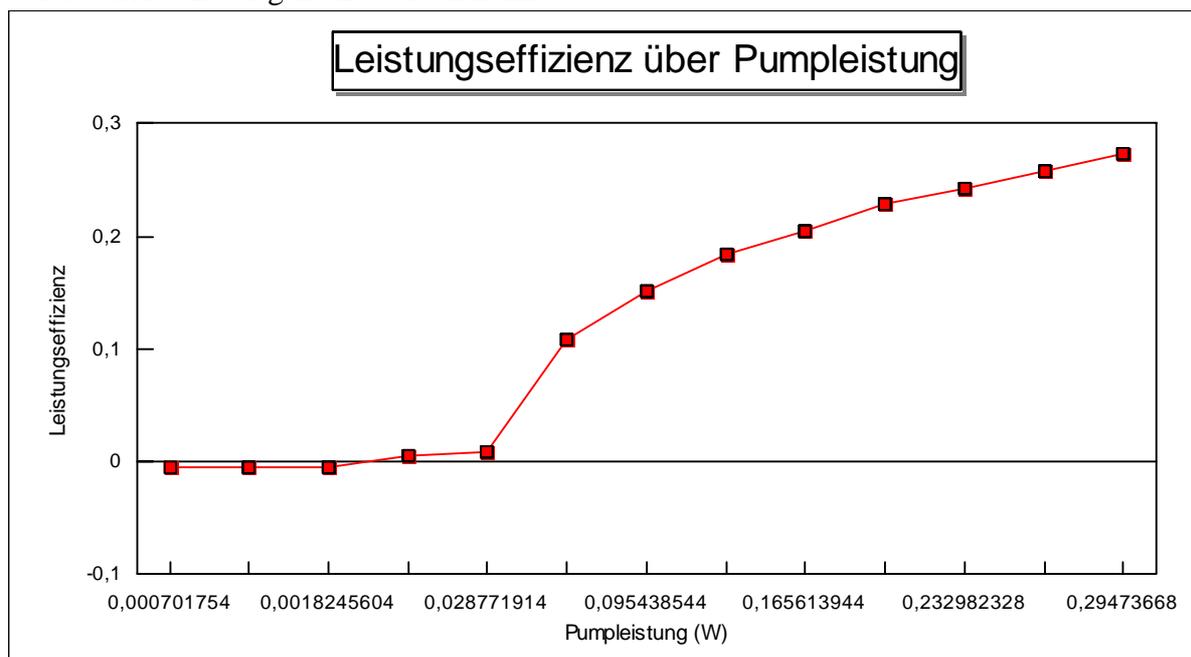
### Untersuchungen am Nd:YAG-Laser

Um beim Nd:YAG-Laser Wirkungsgrad und Schwellleistung zu bestimmen, wurde die Leistungsabgabe hier genauso bestimmt, wie bei der Laserdiode.  $T_{\text{Filter}}$  ist hier  $0,62^3$ , da der Filter 3 mm stark war. Die vom Restlicht der Diode, das den Filter passiert, verursachten Photoströme werden noch abgezogen, auch wenn das nur Korrekturen im  $\mu\text{W}$ -Bereich bewirkt. Das ergibt dann folgende Kennlinie:



Wie man der Grafik entnehmen kann, liegt die Schwellleistung bei 0,03 W.

Eine interessante Größe ist die Leistungseffizienz  $\eta_p$ , die angibt, wieviel der Diodenleistung von Nd:YAG-Laser genutzt werden kann.

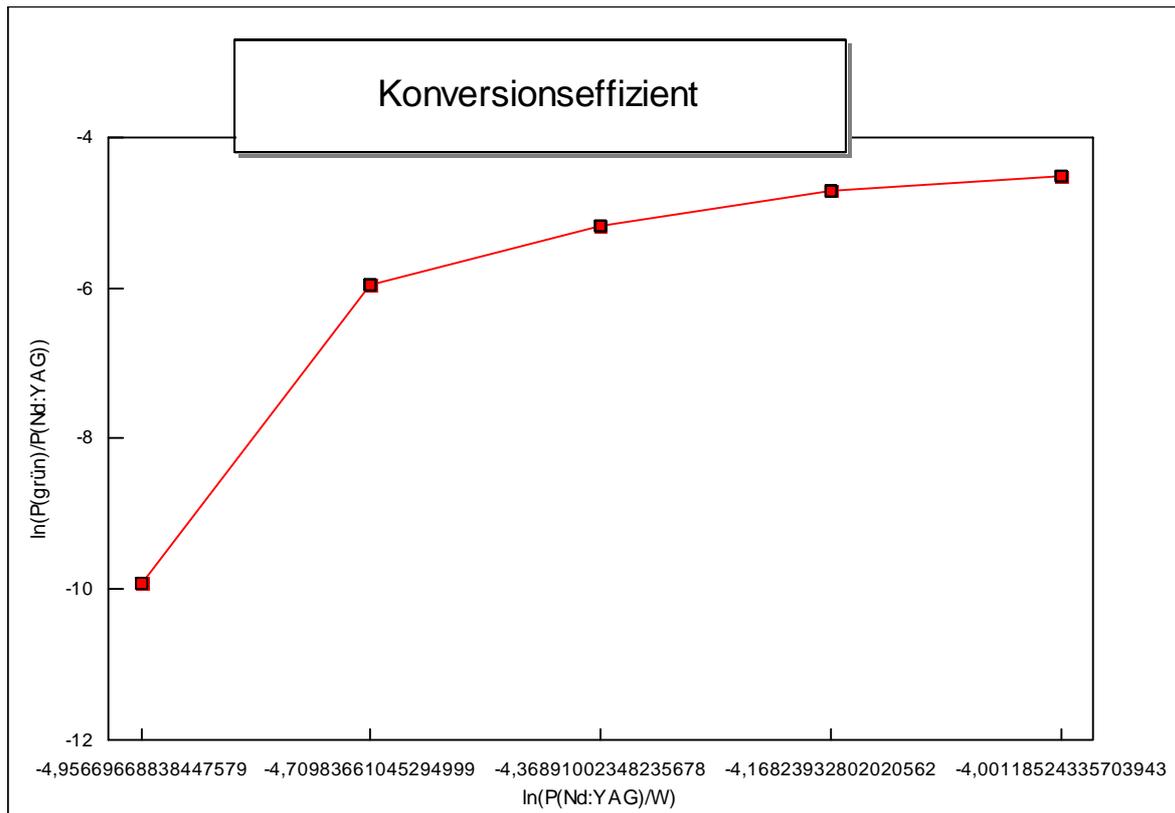


Die ursprüngliche Laser-Leistung kann also zu 20-30 % umgesetzt werden. Unterhalb der Schwelleistung ist die Effizienz erwartungsgemäß null, sie steigt dann schnell an, um dann weiter flach anzuwachsen.

Einen Energieverlust erhält man jedoch auch durch die geringere Energie der einzelnen Photonen. Dies wird durch den Quantenwirkungsgrad  $\epsilon$  ausgedrückt. Bei den beiden Wellenlängen 810 nm und 1064 nm beträgt  $\epsilon$  0,76.

### Untersuchungen zur Frequenzverdoppelung

Die interessante Größe, nämlich der Anteil der verdoppelten Leistung, heißt in diesem Fall Konversionseffizienz  $\gamma_{shg}$ . Da wir eine quadratische Abhängigkeit erwarten, wird die Kurve doppellogarithmisch aufgetragen:



Der erste Wert fällt ein bißchen aus der Reihe, was aber auch mit der unzureichenden Genauigkeit des Amperemeters in diesem Bereich zusammenhängt. Führt man mit den drei anderen Werten eine Regression durch, so bekommt man als Steigung 2,1. Das stimmt mit der erwarteten quadratischen Abhängigkeit ganz gut überein.

Die maximale in diesem Versuch erreichte Konversionseffizienz betrug 0,01. Diese läßt sich natürlich durch eine höhere Nd:YAG-Leistung steigern, da ja ein quadratischer Anstieg gegeben ist. Desweiteren giebt es die Möglichkeit, Laserdiode und Nd:YAG-Laser besser aufeinander abzustimmen. Um eine hohe Effizienz zu erhalten, muß das Modenvolumen der Diode dem Modenvolumen des Resonators möglichst gleichen. Da das Modenvolumen des Resonators durch die Anwendung meist vorgegeben ist, muß der Strahl der Diode entsprechend angepaßt werden. Da der Strahl der Diode durch Beugungseffekte stark elliptisch ist und der Strahl des Nd:YAG-Lasers rund (wegen des zylindersymmetrischen Resonators) muß der Strahl der Diode rund gemacht werden udrch entsprechende Optik. Damit läßt sich übrigens nicht nur die Konversionseffizienz, sondern die Leistung des Nd:Yag allgemein steigern.