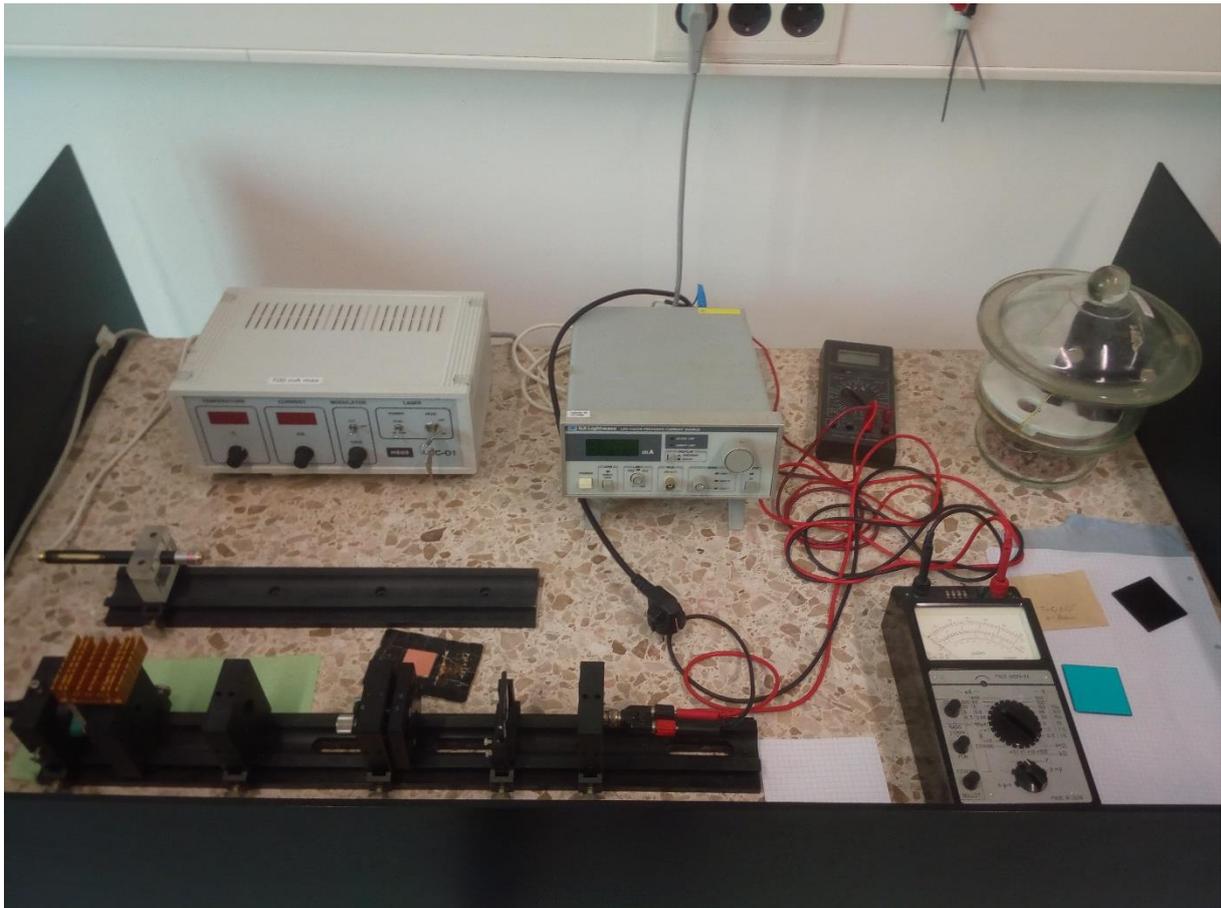


Versuch 4.6.: Laserdiodengepumpter Nd:YAG-Laser und Frequenzverdopplung



Betreuer: Oleg Nikiforov

Datum: 16.10.2017

Experimentatoren:

Benjamin Kosmala

Maximilian R. Lubba

Inhalt

1	Einleitung.....	4
2	Versuchsziel.....	4
3.	Vorbereitung	5
3.1.	Energieniveaus und Wechselwirkungen	5
3.2.	Strahlungsverstärkung.....	5
3.2.1.	Besetzungsinversion.....	5
3.2.2.	Realisierung durch Pumpen	6
3.2.3.	Keine Besetzungsinversion bei einem 2-Niveau-Laser.....	6
3.2.4.	Laseraktivität erst bei 3- ,4- und mehr-Niveau-Lasern.....	6
3.2.5.	Laser-Resonator.....	7
3.3.	Halbleiter-(Dioden-)Laser	7
3.3.1.	Energiebänder	7
3.3.2.	Halbleiter	7
3.3.3.	Dotierung/ Elektronen-Loch-Leitung.....	8
3.3.4.	Sperrschicht/Diffusions-Potentialströme und Besetzungsinversion.....	8
3.3.5.	Diode	8
3.3.6.	Aufrechterhaltung der Besetzungsinversion.....	8
3.3.7.	GaAs-Laser	9
3.4.	Nd:YAG-Laser.....	9
3.4.1.	Konstruktion	9
3.5.	Grundlagen der Nichtlinearen Optik	10
3.5.1.	Frequenzverdopplung	10
3.6.	Umgang mit Lasern/Laserschutz	10
3.6.1.	Schutz des Lasers.....	10
3.6.2.	Schutz vor Lasern.....	11
4.	Aufgaben/Auswertung	12
4.1.	Aufgabe 1: (Absorptionsspektrum)	12
4.2.	Aufgabe 2: (Arbeitsgerade)	15
4.3.	Aufgabe 3: (Kennlinie)	17
4.4.	Auswertung 1: (Auswertung zum Halbleiterlaser)	18
a)	Schwellstrom	18
b)	Differentielle Quanteneffizienz	18
4.5.	Aufgabe 4: (Kennlinie des Nd:YAG-Lasers).....	19
4.6.	Auswertung 2: (Auswertung zum Nd:YAG-Kristall)	20
a)	Kennlinie des Nd:YAG	20

b)	Quantenwirkungsgrad.....	21
c)	Totale Leistungseffizienz	21
4.7.	Aufgabe 5: (KTP-Kristall und Frequenzverdopplung)	22
4.8.	Auswertung 3: (Auswertung zur Frequenzverdopplung)	25
a)	Umgebungsleistung.....	25
b)	Lichtleistung/Fundamentalleistung.....	27
c)	Konversionseffizienz.....	28
d)	Diskussion der Konversionseffizienz	30
4.9.	Aufgabe 6: (Laserpointer).....	30
4.10.	Auswertung 4: (Auswertung zum kommerziellen Laser)	30
5.	Fazit	31
6.	Eidesstaatliche Erklärung	33
8.	Quellenverzeichnis	34
9.	Laborbuch.....	34

1 Einleitung

Laser sind Lichtquellen, die sich in vielerlei Hinsicht von klassischen Lichtquellen unterscheiden. Sie sind in der Lage, kohärentes, intensives und sehr frequenzbeschränktes Licht auszusenden. Deswegen sind sie heutzutage nicht mehr aus naturwissenschaftlichen Anwendungsbereichen wegzudenken. So wird mit Ihnen Grundlagenforschung betrieben, etwa beim Erzeugen von Plasmen bei Fusionsprozessen, Untersuchung von quantenmechanischen Effekten, z. B. „Test der Bell’schen Ungleichung“, Versuch 4.2, oder beim „Kühlen und Fangen von Rubidiumatomen in einer magneto-optischen Falle“, Versuch 4.4. Weiterhin finden Sie Anwendung in der Medizin (etwa beim Beseitigen von Hornhautverkrümmung und dem gezielten Behandeln von Krebszellen), in der Metrologie (etwa beim Vermessen von Abständen durch Interferometer) und in der Fertigungstechnik (etwa beim Schneiden/Schweißen von Werkstücken). Gleichzeitig findet man sie auch im Alltag, etwa bei CD-Laufwerken, Lichtschranken und Beamern.

Viele Laser nutzen zudem Effekte der nichtlinearen Optik, z. B. den der Frequenzverdopplung, der die Nutzung von UV-Lasern im Infrarot-Bereich ermöglicht, Aufschluss über optisch nichtlineare Medien gibt und Einsicht in atomare Strukturen erlaubt.

2 Versuchsziel

Daher ist es durchaus sinnvoll, sich mit der Funktionsweise eines Lasers auseinander zu setzen. Neben dem Aufbau eines Lasers interessiert natürlich auch die Quantifizierung seiner Eigenschaften. Von Bedeutung sind hierbei u. a. Schwellen- und Lichtleistungen, Arbeitsgeraden und Effizienz der einzelnen Laserkomponenten (Frequenzverdopplung, Wirkungsgrad).

In dem hier vorliegenden Versuch wird der Laser schrittweise konstruiert und emittiert dabei Licht von 532nm Wellenlänge.

Hierzu benutzt man zunächst einen Halbleiterlaser (oder auch Laserdiode), um einen Nd:YAG-Kristall optisch zu pumpen. Um eine möglichst hohe Lichtleistung zu erzielen, wird anfangs das Absorptionsspektrum des Nd:YAG-Kristalls bestimmt. Daraus lässt sich ableiten, wie dieser sich bei unterschiedlichen Injektionsströmen sowie Temperaturen des Halbleiterlasers verhält. Allgemein werden proportionale Zusammenhänge zwischen Pumpströmen/-leistung und Lichtleistung erwartet. Sobald die Versuchsanordnung fein genug abgestimmt wurde, sodass die Ausgangsleistung hoch genug ist, wird mittels eines KTP-Kristalls ein nichtlinearer, optischer Effekt beobachtet, die Frequenzverdopplung. Zuletzt werden die im Versuch erhobenen Leistungsdaten mit einem kommerziellen Lasersystem der gleichen Funktionsweise verglichen.

3. Vorbereitung

Anfangs müssen die theoretischen Grundlagen der Laseremission und Frequenzverdopplung erläutert werden.

Zunächst wird das Modell eines gebundenen Elektrons in Energieniveaus und auftretende Effekte als Grundlage von Laserlicht eingeführt.

Danach wird Strahlungsverstärkung in einem solchen System erklärt.

Anschließend wird erklärt, wie der Aufbau praktisch realisiert wird und zwei für den Versuch wichtige Arten vorgestellt: Der Halbleiterlaser (oder Laserdiode) und der Nd:YAG-Laser.

Danach wird der optisch nicht-lineare Effekt der Frequenzverdopplung beleuchtet, da er für die Entstehung des charakteristischen grünen Laserlichts eines Nd:YAGs verantwortlich ist.

Zum Schluss werden Grundlagen zum Laserschutz und allgemeine Sicherheitshinweise behandelt.

3.1. Energieniveaus und Wechselwirkungen

Betrachtet man ein gebundenes Elektron in einem Atom, so kann man diesem laut der Quantenmechanik diskrete Energieniveaus zuordnen. Nach Einstein interagieren diese mit Lichtquanten. Es treten folgende Effekte auf:

1. Absorption: Dabei trifft ein Lichtquant auf ein Elektron. Die Energie des Photons muss dabei der Differenz von beliebig höherem und derzeitigem Zustand des Elektrons entsprechen. Dann wird das Lichtquant vom Elektron absorbiert und es gelangt in das höhere Niveau. Dabei darf der höhere Zustand nicht vollständig besetzt sein. Man nennt das Elektron dann auch angeregt.

2. Spontane Emission: Der nun erreichte Zustand ist instabil, da das Elektron (wie auch alle anderen Objekte in der Physik) den niedrigsten Energiezustand anstrebt. Als intrinsische Eigenschaft des Quantenobjekts Elektron lässt sich der genaue Zeitpunkt des Übergangs in den niedrigeren Zustand nicht exakt beschreiben, weshalb man diesen Prozess als spontan bezeichnet. Dabei wird ein Lichtquant frei, dessen Energie gerade der Differenz der vom Elektron zurückgelegten Energiedifferenz entspricht.

3. Stimulierte Emission: Es liegt ein Elektron in einem angeregten Zustand und ein Photon vor, dessen Energie einer Energiedifferenz zwischen derzeitigem Elektronenzustand und einem niedrigeren entspricht. Trifft dieses Photon auf das angeregte Elektron, so wechselt das Elektron in den entsprechenden niedrigeren Zustand. Die dabei freiwerdende Energie wird in Form eines weiteren Lichtquants derselben Energie, Impuls und Phasenbeziehung wie dem eintreffenden abgegeben.

Bei den beiden Emissionsvorgängen darf der niedrigere Zustand nicht vollständig besetzt sein. Die Effekte sind in Abbildung 1 veranschaulicht.

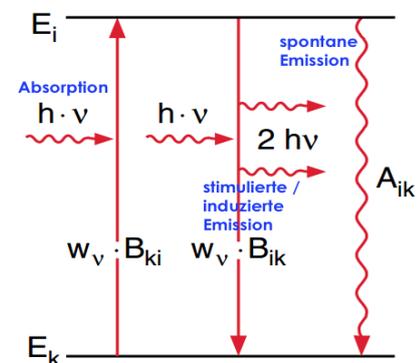


Abbildung 1: Veranschaulichung der Wechselwirkung von Photon und gebundenem Elektron [7]

3.2. Strahlungsverstärkung

Um Strahlungsverstärkung nach dem Laserprinzip zu erreichen, bedient man sich verschiedener Effekte und Techniken um diese zu realisieren. Die ist nötig, da Licht allein durch die in 3.1. erwähnten Vorgänge nicht zum gewünschten Laserlicht wird.

3.2.1. Besetzungsinversion

Zunächst ist es notwendig dafür zu sorgen, dass die Prozesse der Emission die der Absorption überwiegen. Im thermischen Gleichgewicht liegen nämlich mehr Elektronen in niedrigeren als in höheren Zuständen vor, weil sie bevorzugt den niedrigeren Energiezustand anstreben. Es kann also nicht mehr Emission als Absorption stattfinden. Durch äußeres Hinzuführen von Energie erhalten sie

genug Energie, um von ihrem derzeitigen Zustand in einen höheren zu wechseln. Geschieht dies oft genug, d. h. ist die aus der Boltzmann-Verteilung resultierende Gleichung

$$\frac{N_2}{g_2} > \frac{N_1}{g_1}$$

(wobei N_i die Anzahl an Elektronen im i -ten Niveau und g_i die Energieentartung des i -ten Niveaus darstellt) erfüllt, so spricht man von einer Besetzungsinversion. Dieser Effekt lässt sich nur bei bestimmten Materialien beobachten, die man dann auch als optisch aktives Medium bezeichnet.

3.2.2. Realisierung durch Pumpen

Das Erhöhen der Elektronen in ein höheres Niveau nennt man auch Pumpen. Dies kann auf verschiedene Arten und Weisen geschehen, etwa durch Druck- und Temperaturänderung, EM-Einwirkung oder Gasexpansion. In diesem Versuch wird durch Photonen gepumpt, was man dann auch optisches Pumpen nennt.

3.2.3. Keine Besetzungsinversion bei einem 2-Niveau-Laser

Hierbei ist anzumerken, dass Besetzungsinversion bei einem 2-Niveau-System nicht erreicht werden kann. Bei theoretischer Betrachtung ergibt sich, dass auch bei gesättigter Pumprate Absorption und stimulierte Emission in einem 2-Niveau-System gleichwahrscheinlich sind. Allerdings wird die Anzahl der angeregten Elektronen durch spontane Emission noch weiter gemindert. Es können sich in einem solchen System also nicht mehr Elektronen in einem höheren als in einem niedrigeren befinden [6].

3.2.4. Laseraktivität erst bei 3-, 4- und mehr-Niveau-Lasern

Besetzungsinversion kann erst bei Niveaus mit mindestens 3 Zuständen auftreten. Die Niveauschemata sind in Abbildung 2 zu sehen, i. F. beziehen sich Benennungen also darauf.

Betrachtet man das 3-Niveau-System, so ergibt sich die Besetzungsinversion durch das Hilfsniveau E_1 , welches einen metastabilen Zustand (d. h., seine Lebensdauer liegt im Bereich von Mikrosekunden, was bedeutend länger ist als die Lebensdauer des instabilen Niveaus E_2 im Bereich von 0,1 Pikosekunden)

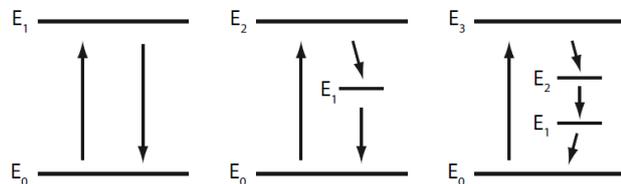


Abbildung 2: (von links nach rechts) 2-, 3- und 4-Niveau-System [8]

darstellt. Pumpt man das System, so gelangen die Elektronen aus E_0 nach E_2 . Dabei entleert sich das Niveau E_0 , während die Elektronen aus E_2 schnell und strahlungsfrei nach E_1 gelangen. Da dieser Zustand metastabil ist, befinden sich im Vergleich zu E_0 mehr Elektronen im angeregten Zustand, was die Besetzungsinversion darstellt.

Allerdings ist Besetzungsinversion nur eine der Bedingungen für Laseraktivität. Es muss nun auch die stimulierte Emission aus dem Niveau E_1 die spontane überwiegen. Das ist auch durch die Langlebigkeit gegeben, da die Elektronen durch sie lange genug auf einem Niveau aufhalten, ohne spontan zu emittieren. Gelangt nun ein anderes durch Emission entstandenes Photon zu den Elektronen auf E_1 , so findet nahezu nur die gewünschte stimulierte Emission statt.

Bei einem 4-Niveau-System ist der Vorgang nahezu identisch, bringt aber noch einen Vorteil mit sich. Das weitere Hilfsniveau E_1 ist wiederum ein instabiles, während E_2 metastabil ist. Durch den Pumpvorgang gelangen Elektronen aus E_0 nach E_3 und von dort strahlungsfrei nach E_2 . Ab hier ist wieder die Langlebigkeit für Besetzungsinversion und überwiegende stimulierte Emission verantwortlich, allerdings ist durch das Niveau E_1 die Besetzungsinversion noch größer bzw. einfacher herzustellen, da es instabil ist und somit jederzeit als nahezu leer angesehen werden kann.

3.2.5. Laser-Resonator

Nun ist das so entstandene Licht ungerichtet, von geringer Intensität und emittiert in einem großen Frequenzbereich.

Durch Platzieren des optisch aktiven Mediums in einer passenden Spiegelvorrichtung werden nur Photonen entlang der optischen Achse des Systems im System gehalten, der Rest wird nach außen reflektiert und geht verloren.

Die Intensität erhöht sich dadurch, dass Photonen entlang der optischen Achse reflektiert werden und somit für weitere stimulierte Emission sorgen können. Einer der Spiegel ist teildurchlässig, erlaubt also mehrere Reflexionen vor der Auskopplung. Während eines Durchlaufs im Resonator erhöht sich die Anzahl an durch stimulierte Emission ausgesendeten Photonen exponentiell. Dabei muss durch Überschreiten einer entsprechenden Pumpratschwelle noch dafür gesorgt werden, dass Verluste durch Absorption und Auskopplung übertroffen werden.

Zuletzt wird durch Einstellung des Abstands der Spiegel dafür gesorgt, dass sich stehende Wellen ausbilden können. Dies hat einerseits weitere Lichtverstärkung durch konstruktive Interferenz und andererseits Einschränkung des

Frequenzbereichs zur Folge, da Moden, die nicht der eingestellten entsprechen, destruktiv interferieren.

Eine Vorrichtung, die dies gewährleistet, nennt man Resonator. Alle Bauteile zusammen sind in Abbildung 3 veranschaulicht.

Dabei gibt es verschiedene Arten. Man trifft häufig auf planare, konvexe und konkave Spiegel, die dann auch untereinander kombiniert werden. In diesem Versuch wird eine plan-konkave Vorrichtung genutzt.

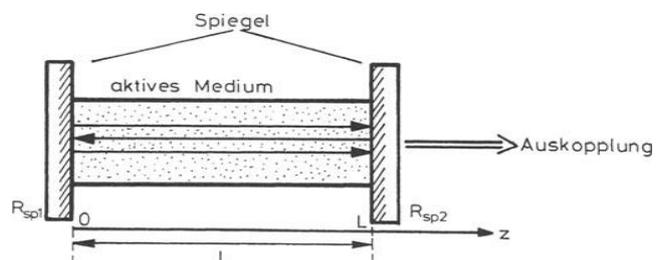


Abbildung 3: Prinzipieller Aufbau eines Lasers, bestehend aus Pumpe, optisch aktiven Medium und Resonator [1]

3.3. Halbleiter-(Dioden-)Laser

In diesem Versuch wird ein Nd:YAG-Kristall optisch gepumpt. Hierzu wird ein Halbleiterlaser verwendet, da dieser u. a. durch seine kompakte Bauweise, niedrigen Anschaffungskosten und Robustheit viele Vorteile mit sich bringt.

3.3.1. Energiebänder

Wie schon in 3.1. erwähnt, gibt es im Atom für ein gebundenes Elektron nur diskrete Zustände, die es einnehmen kann. Nähern sich zwei Atome an, so beobachtet man eine Aufspaltung der Energieniveaus aufgrund der elektrostatischen Wechselwirkung und Auswahlregeln nach Pauli. Die entstehenden Energieniveaus befinden sich dann über- und unterhalb der ursprünglichen Niveaus. Nähert man nun hinreichend viele Atome aneinander an, so spalten sich die Energieniveaus zwar immer weiter auf, liegen aber dicht beieinander und bilden somit ein Quasi-Kontinuum.

Für so einen Atomverbund bilden die Bindungselektronen das Valenzband aus. Sind über diese Elektronen hinaus noch weitere vorhanden, die nicht zur Bindung beitragen, so findet man diese in höher gelegenen Energien, dem Leitungsband. Den Abstand zwischen Valenz- und Leitungsband bezeichnet man als Bandlücke. Wichtig ist hierbei noch der die Fermienergie, die die Energie kennzeichnet, die ein Elektron im thermodynamischen Gleichgewicht maximal annehmen kann.

3.3.2. Halbleiter

Materialien lassen sich bezüglich ihrer elektrischen Leitfähigkeit in drei Gruppen unterteilen:

Bei Isolatoren liegt die Fermienergie so niedrig, dass man sie auch durch äußere Energiezufuhr nicht so weit anheben kann, dass sie sich im Leitungsband befindet. Es kann also kein Elektron so weit angehoben werden, dass es zu einer elektrischen Leitfähigkeit des Materials kommen kann.

Bei Leitern liegt die Fermienergie im Leitungsband, sodass bereits ohne äußere Einwirkung eine

elektrische Leitfähigkeit des Materials vorliegt.

Bei Halbleitern liegt die Fermienergie so zwischen Valenz- und Leitungsband, sodass es durch äußere Energiezufuhr zu einer Leitfähigkeit des Materials kommt. Ansonsten ist das Material nichtleitend.

3.3.3. Dotierung/ Elektronen-Loch-Leitung

Bringt man in den Atomverbund eines Halbleiters ein Fremdatom ein, so spricht man von einer Dotierung. Dabei kommt ein Fremdatom auf etwa 10^7 ursprüngliche Atome.

Bringt man Atome mit mehr Elektronen in der Valenzschale als im Halbleiter ein, so gelangen diese zusätzlichen Elektronen ins Leitungsband, da das Valenzband vollständig gefüllt ist. Man spricht dann von einem n-Halbleiter, da in diesem die Leitung durch Elektronen erfolgt, die Fermienergie ist dadurch gestiegen.

Analog dazu kann man auch Atome mit einem Elektron weniger in der Valenzschale einführen, sodass ein Elektronenmangel im Valenzband vorliegt. Man spricht dann von einem p-Halbleiter, da man hier die durch Elektronenmangel entstandenen Löcher als Ladungsträger, durch die die Leitung erfolgt, ansieht. Die Fermienergie senkt sich dabei ab.

Trotz der Dotierung sind beide Halbleiter elektrisch neutral, was oft aufgrund der Bezeichnung missverstanden wird, da sie genauso viele Elektronen wie Protonen aufweisen.

3.3.4. Sperrschicht/Diffusions-Potentialströme und Besetzungsinversion

Bringt man solche n-/p-dotierten Halbleiter zusammen, so ist die gesuchte Besetzungsinversion vorhanden, da die Materialien an sich zwar neutral geladen sind, in Bezug auf die Bänder aber mehr Elektronen im n-Leitungsband als im p-Valenzband vorliegen. Es bildet sich an der Grenzschicht der beiden Halbleiter ein Diffusionsstrom, der Elektronen bzw. Löcher an der Grenzschicht rekombinieren lässt, d. h., dass Elektronen des aus dem Leitungsband des n-Halbleiters in das Valenzband des p-Halbleiters gelangen. Dabei wird Energie in Form von Photonen frei. Wegen der Bänder liegt keine scharfe Grenze für die Energie der emittierten Photonen vor. Es werden Photonen im Bereich zwischen Bandlücke und den Fermienergien der beiden Halbleiter emittiert:

$$E_g < h\nu < F_n - F_p$$

wobei E_g die Bandlücke, F_n das Fermienergie der n-dotierten bzw. F_p das Fermienergie der p-dotierten Zone und $h\nu$ die Energie des emittierten Photons darstellt. Die Situation ist in Abbildung 4 veranschaulicht.

Allerdings geht dabei auch die Besetzungsinversion verloren. Denn durch das Zusammenführen wird der n-Halbleiter positiv geladen (Elektronen rekombinieren mit Löchern aus dem p-Halbleiter im p-Halbleiter) und der p-Halbleiter negativ geladen (Löcher rekombinieren mit Elektronen aus dem n-Halbleiter im n-Halbleiter). Dieses sich ausbildende elektrische Potential sorgt für eine Potentialbarriere, welche dem Diffusionsstrom entgegenwirkt.

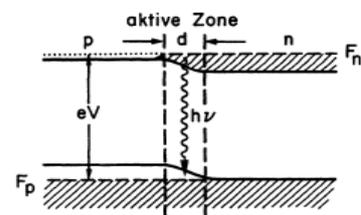


Abbildung 4: Emission in einem p-n-Übergang [1]

3.3.5. Diode

Diese Vorrichtung stellt eine Diode dar, da nun von einer äußeren Spannung abhängig ist, ob sich die Potentialbarriere weiter aufbaut (Spannung entgegen der Durchlassrichtung) oder abbaut (Spannung in der Durchlassrichtung).

3.3.6. Aufrechterhaltung der Besetzungsinversion

Legt man also eine Spannung in Durchlassrichtung an, so werden für die Dauer der Spannung die rekombinierten Elektronen im Valenzband des p-Halbleiters abgetragen und die rekombinierten Löcher im Leitungsband des n-Halbleiters durch Elektronen aufgefüllt. Da sich nun wieder im n-Halbleiter Elektronen im höheren Leitungsband und im p-Halbleiter Löcher im Valenzband befinden, hält dies die Besetzungsinversion aufrecht. Elektronen und Löcher können nun stets

rekombinieren und senden dabei Photonen aus.

Die angelegte Spannung stellt die Pumpe dar, die Grenzschicht das optisch aktive Medium und die Endflächen der Halbleiterkristalle den Resonator, was die Laserdiode ausmacht.

Die ausgesendete Leistung ist von Temperatur und angelegter Spannung bzw. Strom, mit dem sich die Elektronen zwischen den Grenzschichten bewegen, abhängig. Steigt die Temperatur bzw. sinkt der Injektionsstrom, so nimmt die Leistung des Lasers ab. Das liegt daran, dass bei steigender Temperatur die Besetzungsinversion des Lasers abnimmt (Vgl. S.318 in [1]) und somit weniger Licht ausgesendet wird. Nimmt der Injektionsstrom ab, so sind über einen festen Zeitraum weniger Elektronen an der Laseremission beteiligt, was die Leistung auch entsprechend absenkt. Anzumerken ist noch, dass es einen Schwellstrom gibt, ab dem die Laseraktivität stark zunimmt, da zuvor die spontane Emission überwiegt.

3.3.7. GaAs-Laser

In diesem Versuch wird ein Gallium-Arsenit(GaAs)-Laser genutzt. Er stellt einen rauschfreien Vertreter der Laserdioden dar, sodass er gegenüber billigeren (und aus weniger gefährlichen Materialien bestehenden) Lasern wie z. B. aus Silizium und Germanium bevorzugt wird. Die nebenstehende Skizze veranschaulicht den Aufbau.

Er emittiert in Bereichen um Raumtemperatur Licht der Wellenlänge von ungefähr 800nm, was sich als nützlich erweist, um den eigentlichen Laser dieses Versuchs optisch zu pumpen.

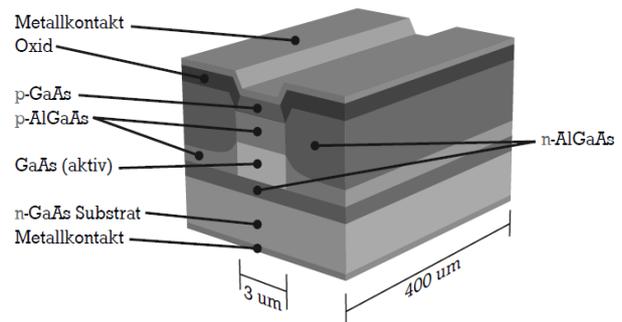


Abbildung 5: Schematischer Aufbau eines GaAs-Kristalls [8]

3.4. Nd:YAG-Laser

Der Nd:YAG-Laser ist ein Vierniveau-Laser. Er besteht aus einem Yttrium-Aluminium-Granat($Y_3Al_5O_{12}$)-Kristall, wobei das optische aktive Medium, welches hierbei verwendet wird, im Kristall eingearbeitete Neodym-Ionen sind. Der Grund dafür, Neodym in einen Kristall einzubetten, besteht darin, die Bänder des 60% wahrscheinlichen 1064nm Übergangs breiter zu machen. Das Energieniveauschema ist in Abbildung 6 zu sehen.

Neodym in anderen Kristallen einzubetten ändert nur geringfügig die Wellenlänge.

Die sich entwickelnde Wärme bereitet bei diesem Material weniger Probleme, da Nd:YAG sehr wärmeleitfähig ist und keine Auswirkung auf die Injektionsleistungsschwelle hat.

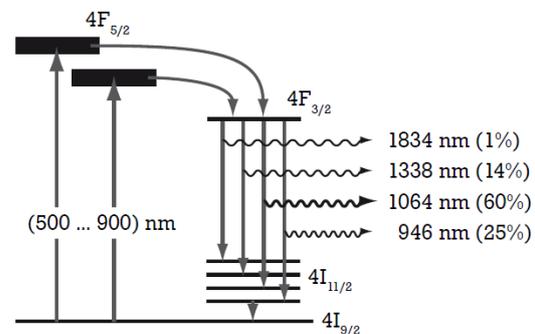


Abbildung 6: Bändermodell des Nd:YAG-Kristalls mit entsprechenden Emissionswellenlängen [8]

3.4.1. Konstruktion

Dabei wird der Laser folgendermaßen konstruiert: Zum Pumpen des Nd:YAG wird ein Diodenlaser genutzt, dessen emittierte Wellenlänge im Bereich von 805 bis 810 nm liegt. Durch Fokussierungsoptik gelangt das Licht in den Nd:YAG, wobei ein Teil der Energie des Lichts vom Nd:YAG-Kristall aufgenommen wird. Das von ihm emittierte Licht besitzt u. a. eine Wellenlänge von 1064nm.

3.5. Grundlagen der Nichtlinearen Optik

Beim Eindringen von elektromagnetischen Wellen in Materie wird diese von der Welle polarisiert. In einfachen Fällen nutzt man das Modell des harmonischen Oszillators, um Feldstärke und Polarisation zu beschreiben. Bei sehr hohen Feldstärken verhalten sich Polarisation und Feldstärke aber nicht mehr linear, die Suszeptibilität χ (eine Materialkonstante) wird abhängig von der Feldstärke. Durch Taylor-Entwicklung erhält man folgenden Ausdruck:

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi^{(1)} \vec{E} + \varepsilon_0 (\chi^{(2)} \vec{E}) \vec{E} + \dots$$

Hierbei ist $\chi^{(1)}$ ein Skalar, $\chi^{(2)}$ ein Vektor. Im vorliegenden Versuch sind die Feldstärken aber nur groß genug, um quadratische Abhängigkeiten von der Feldstärke festzustellen.

3.5.1. Frequenzverdopplung

Nimmt man nun für die EM-Welle eine Kosinuswelle an, so erhält man folgenden Ausdruck für die Polarisation:

$$\vec{P} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 (\chi^{(1)} \vec{E}) + \varepsilon_0 \chi^{(1)} \vec{E} \cos(\omega t) + \frac{1}{2} \varepsilon_0 (\chi^{(2)} \vec{E}) \vec{E} \cos(2\omega t)$$

bestehend aus einem Gleichanteil, der einlaufenden Grundwelle und einem frequenzverdoppelten Anteil. Letzterer ist entscheidend für die Nutzung des Lasers.

Allerdings kann man das Licht nicht einfach entkoppeln. Durch verschiedene Frequenzen der Wellenanteile breiten sie sich unterschiedlich schnell im Material aus (Dispersion), es kommt zu destruktiver Interferenz. Nutzt man nun einen optisch einachsigen Kristall, so kann man die Frequenz- und Winkelabhängigkeit des Brechungsindex ausnutzen, um jeweils denselben für beide Anteile der Polarisation zu erhalten, sodass die in [3] aufgeführte Bedingung

$$v_{ph}(2\omega) = v_{ph}(\omega)$$

erfüllt ist. Sie besagt, dass Grundwelle und erzeugte Oberwelle dieselbe Frequenz aufweisen.

So erhält man aus einfallendem Licht der Frequenz ω_1 zwei EM-Wellen mit ω_1 und $\omega_2 = 2\omega_1$, also die gewünschte Frequenzverdopplung.

Dieser Effekt wird genutzt, um die vom Nd:YAG-Kristall ausgesendeten 1064nm auf 532nm zu halbieren.

3.6. Umgang mit Lasern/Laserschutz

Da in diesem Versuch mit teils empfindlichen Lasern gearbeitet, aber auch die Arbeiten mit und an Lasern Risiken mit sich bringen, müssen noch Grundlagen für einen sachgemäßen Umgang mit Lasern vermittelt werden. Sowohl auf Technik- als auch auf gesundheitlicher Seite sind Schäden zu minimieren.

3.6.1. Schutz des Lasers

[4] nennt einige technische Schäden die auftreten können:

Zum einen sind sogenannte Transienten (ein Einschwingvorgang auf eine kurzzeitige Störung) zu beachten. Beispielsweise kann ein großer Auslastungswechsel ((versehentliches) An- und Ausstellen eines Lasers) durch Ausregelungsvorgänge zu Spannungsschwankungen und somit Schäden führen. Zudem können Entladungen den Laser zerstören, was aber durch entsprechende Erdungen und eine passende Laboreinrichtung verhindert werden kann.

Zuletzt muss darauf geachtet werden, dass leitende Elemente des Lasers möglichst nicht berührt werden, um Stromschläge beim Einsatz zu vermeiden.

3.6.2. Schutz vor Lasern

Laut Laserschutzanleitung OO können auch gesundheitliche Schäden auftreten:

Aufgrund der Eigenschaften eines Lasers, Licht stark, gerichtet und in großer Intensität zu emittieren und so im erheblichen Maße Schäden verursachen zu können, müssen beim Arbeiten mit solchen gewisse Punkte beachtet werden.

Allgemein gilt, dass Laser je nach Leistung und Wellenlänge in verschiedene sogenannte Laserschutzklassen eingeteilt werden. So kann eine längere oder über mehrmalig über einen längeren Zeitraum stattfindende Bestrahlung der Augen (speziell durch UV-Laserstrahlen (<380nm)) Horn und Netzhaut beschädigen oder gänzlich zerstören. Strahlen im sichtbaren Spektrum werden von der Linse stark gebündelt und können so aufgrund anwachsender thermischer Energie die Netzhaut beschädigen. Bei Lasern höherer Schutzklasse ist das Tragen einer speziellen Brille erforderlich. Sollten dennoch Strahlen in das Auge (bzw. das Sichtfeld) gelangen, ist es notwendig, die Augenlider zu schließen und umgehend seinen Kopf wegzudrehen. Laser können schon ab Schutzklasse 3 Schäden an Haut und anderen gut absorbieren Objekten Schäden anrichten. So lassen sich weitere Maßnahmen ergänzen:

- Den Kopf von den Strahlgängen fernhalten
- Reflektierende Objekten nicht in den Strahlengang führen (Uhren, Ketten, ...)
- Austausch optischer Bauteile und Arbeiten an der Apparatur nur bei ausgeschaltetem Laser durchführen
- Vor dem Einbau prüfen das keine unerwünschten Reflexe auftreten
- Auf die Umgebung achten (Personen und Dinge die durch unbedachtes Verhalten eine Gefahr herbeiführen könnten)

4. Aufgaben/Auswertung

Für den Versuch stehen folgende Geräte zur Verfügung: Zwei Labor Spannung-/Stromversorgungsgeräte (Für den Laserpointer und den Halbleiterlaser), Eine Photodiode sowie einen Temperaturregler für die Diode, eine Kollimationslinse, Fokussierlinse, Verschiedene Optische Filter/Abschwächer, Nd:YAG Kristall, KTP-Kristall und ein Multimeter.

4.1. Aufgabe 1: (Absorptionsspektrum)

Zunächst sollen die Absorption des Nd:YAG-Kristalls und der Photodiode vermessen werden. Dies dient dazu, die relative Absorption der Vorrichtung zu bestimmen und mit dem Referenzspektrum abzugleichen, um so die Wellenlänge zu ermitteln, bei der der Kristall am besten Licht absorbiert. Man baut dazu den in der Aufgabe vorgesehen Aufbau auf:

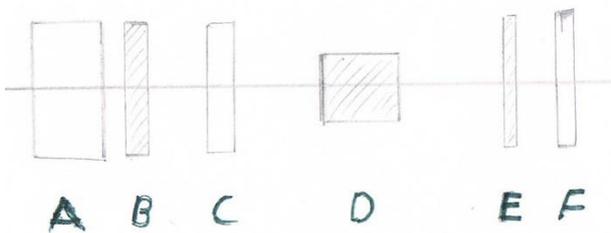


Abbildung 7: Versuchsaufbau für Aufgabe 1 [9]

wobei A die Laserdiode, B der Kollimator, C die Fokussierlinse, D der Nd:YAG-Kristall, E der optische Abschwächer und F die Photodiode ist.

Hier betrug der Abstand von Fokussierlinse und Nd:YAG-Kristall (vermessen mit einem Lineal), damit sich der Kristall auch im Fokus der Linse befindet: $\overline{CD} = (11,2 \pm 0,5) \text{cm}$.

Dabei wird der Injektionsstrom auf 700mA gestellt und die Temperatur von 10°C bis 40°C in 2°C-Schritten durchgeregelt. Die Idee dabei ist, dass die ausgesendete Wellenlänge des Diodenlasers proportional zur Betriebstemperatur ist und man so mit dem Referenzspektrum vergleichen kann. Gemessen wird der Strom der Photodiode, der proportional zur Intensität des ankommenden Lichtes ist.

Dabei ist die Skaleneinteilung des Strommessgeräts in 30er-Schritte aufgeteilt, wobei diese 30 Schritte 6mA ausmachen.

I. F. werden also die abgelesenen Skalenteile angegeben, d.h. in Einheiten von: $\frac{6}{30} \text{mA}$.

Als Messungenauigkeiten wurden angenommen:

$\Delta T = 0,1^\circ\text{C}$ für die Temperatur, da die Anzeige nicht schwankte und daher der kleinste Skalenteil der Anzeige verwendet wurde.

$\Delta I_{inj} = 20 \text{mA}$ für den Injektionsstrom, da dieser für diesen Teil des Versuches sehr starken Schwankungen unterlag.

$\Delta I_{PD} = 0,25 \cdot \frac{6}{30} \text{mA} = 0,05 \text{mA}$ für den Photodiodenstrom, was durch Betrachtung der Skala sinnvoll erschien und mit den Schwankungen der Messnadel vereinbar war.

Es wurde mit eingesetztem Nd:YAG-Kristall folgender Strom gemessen:

T in [°C]	I_{PD} in [6/30 mA]	I_{PD} in [mA]
10,00	3,75	0,75
12,00	2,50	0,50
14,00	2,00	0,40
16,00	2,00	0,40
18,00	1,00	0,20
20,00	0,75	0,15
22,00	1,00	0,20
24,00	2,40	0,48
26,00	4,60	0,92
28,00	4,00	0,80
30,00	3,00	0,60
32,00	2,05	0,41
34,00	2,00	0,40
36,00	3,00	0,60
38,00	3,75	0,75
40,00	5,00	1,00

Tabelle 1: Messung des Laserdiodenstroms mit Nd:YAG-Kristall

Und ohne Kristall:

T in [°C]	I_{PD} in [6/30 mA]	I_{PD} in [mA]
10,00	9,00	1,80
12,00	9,00	1,80
14,00	9,00	1,80
16,00	9,25	1,85
18,00	9,30	1,86
20,00	9,40	1,88
22,00	9,50	1,90
24,00	9,50	1,90
26,00	9,00	1,80
28,00	9,00	1,80
30,00	9,00	1,80
32,00	8,75	1,75
34,00	8,75	1,75
36,00	8,75	1,75
38,00	9,25	1,85
40,00	8,75	1,75

Tabelle 2: Messung des Laserdiodenstroms ohne Nd:YAG-Kristall

Mittels der Formel

$$Abs_{Rel} = 1 - \frac{I_{Nd:YAG}}{I_{Diode}}$$

wird die relative Absorption der Vorrichtung bestimmt:

T in [°C]	Abs_{Rel}
10,00	0,58
12,00	0,72
14,00	0,78
16,00	0,78
18,00	0,89
20,00	0,92
22,00	0,89
24,00	0,75
26,00	0,49
28,00	0,56
30,00	0,67
32,00	0,77
34,00	0,77
36,00	0,66
38,00	0,59
40,00	0,43

Tabelle 3: Werte des Absorptionsspektrums zur entsprechenden Temperatur

Der Messungenauigkeit ergibt sich nach Gauß zu:

$$\Delta Abs_{Rel} = \sqrt{\left(\frac{\partial Abs_{Rel}}{\partial I_{Nd:YAG}} \cdot \Delta I_{Nd:YAG}\right)^2 + \left(\frac{\partial Abs_{Rel}}{\partial I_{Diode}} \cdot \Delta I_{Diode}\right)^2} = 0,03$$

wobei die relative Absorption in Einheiten von 1 vorliegt.

Als Auftragung von Absorption und Temperatur erhält man:

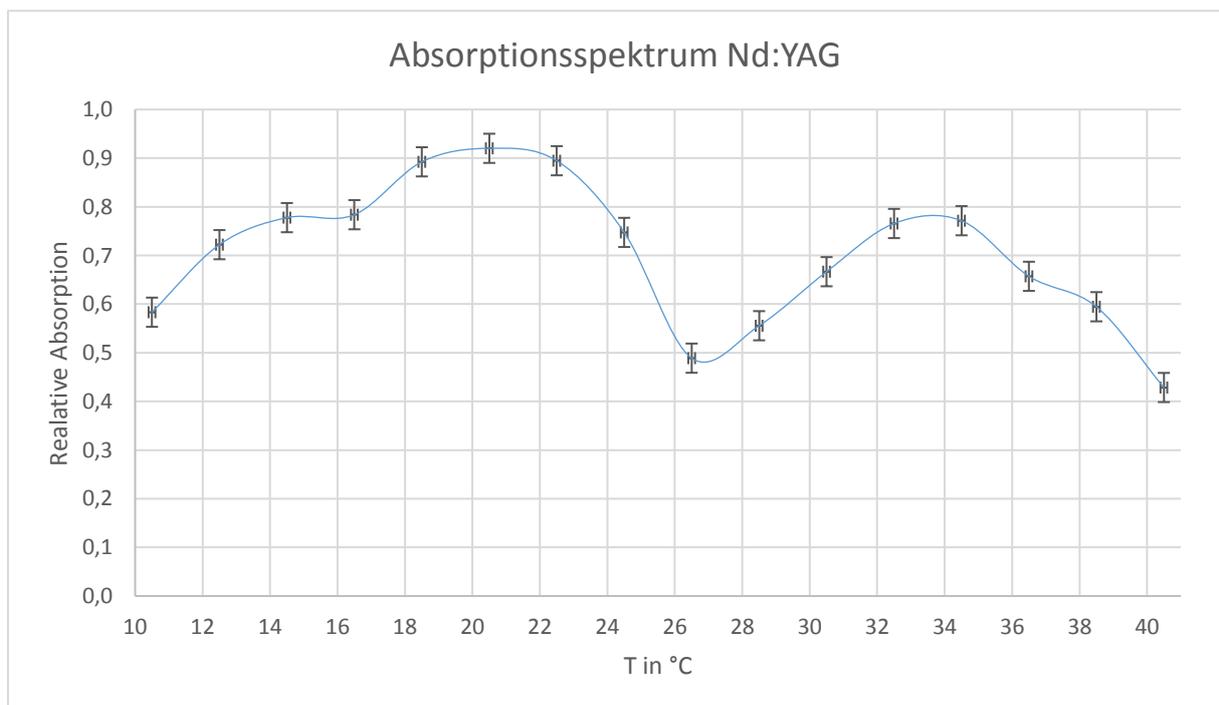


Abbildung 8: Gemessenes Absorptionsspektrum des Nd:YAG-Kristalls

Man erkennt sehr deutlich die Peaks bei 808,4nm und 812,9 nm. Die beiden anderen bei 817,3nm und 804,4nm kann man zumindest ein wenig erahnen, siehe Grafik:

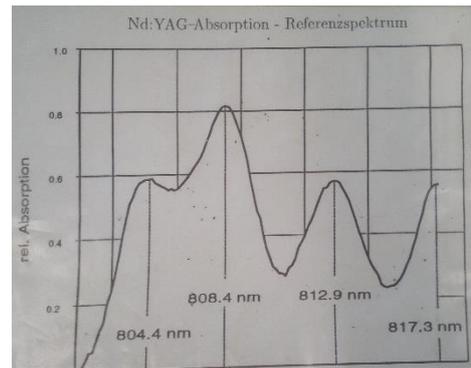


Abbildung 9: Referenzspektrum des Nd:YAG-Kristalls [9]

Der größte Peak ist hier bei 808,4nm zu finden, was einer Betriebstemperatur von $T \approx 20^\circ\text{C}$ entspricht, was in der folgenden Aufgabe genutzt wird.

4.2. Aufgabe 2: (Arbeitsgerade)

Nun soll die Arbeitsgerade der Laderdiode bestimmt werden. Dazu wird derselbe Aufbau wie in Aufgabe 1 benötigt.

Die Arbeitsgerade ist diejenige Gerade, bei der der Laser in Abhängigkeit von Temperatur und Injektionsstrom Licht bei einer Wellenlänge von 808,4nm aussendet. Dies wird überprüft mithilfe des Nd:YAG-Kristalls, da dieser bei dieser Wellenlänge optimal absorbiert und die Photodiode somit für jeden Messpunkt einen Tiefpunkt des von ihr gemessenen Stromes angeben sollte.

Der Injektionsstrom wird in 50mA-Schritten reduziert und die Temperatur so eingestellt, dass der Photodiodenstrom ein Minimum ausgibt. Dies wird erreicht durch probeweises Drehen des Temperaturreglers und Betrachten des Ausschlags der Messnadel des Strommessgeräts.

Für die Temperatur wird hier ein Fehler von $\Delta T = 0,5^\circ\text{C}$ angenommen, da zwar die Nadel keine allzu großen Ausschläge vollführte, aber das ständige Drehen des Temperaturreglers mehr berücksichtigt werden sollte, als das bloße Einstellen einer Temperatur wie in Aufgabe 1.

Der Injektionsstrom wies diesmal nicht dieselben großen Schwankungen auf und tat dies auch für den Rest des Versuches nicht mehr. Ab hier wird der Fehler des Injektionsstromes mit $\Delta I_{inj} = 5\text{mA}$ festgelegt.

Es wurde gemessen:

T in [$^\circ\text{C}$]	I_{inj} in [mA]
20,00	700,00
20,50	650,00
20,60	600,00
21,40	550,00
22,90	500,00
23,10	450,00
23,00	400,00
22,60	350,00

Tabelle 4: Wertepaare zur Arbeitsgeraden

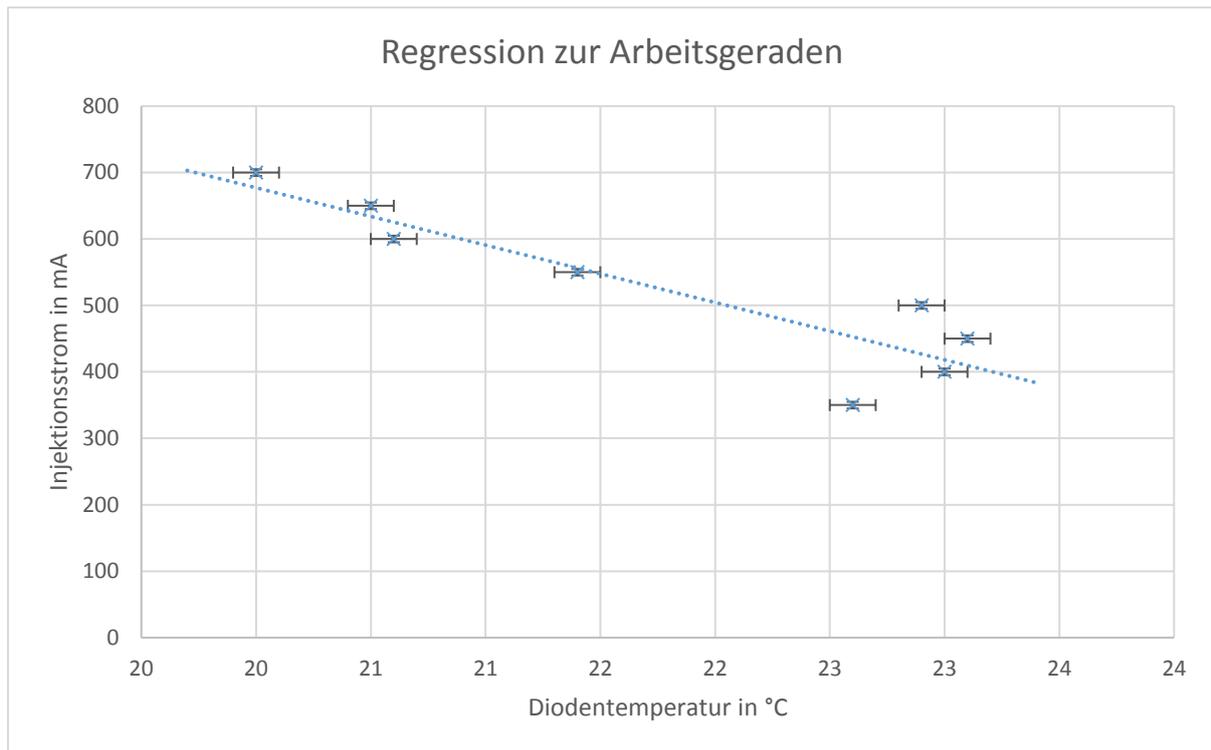


Abbildung 10: Arbeitsgerade der Laserdiode

Diese Werte wurden mithilfe des TR bereits im Versuch zu einer Gerade interpoliert, allerdings wurde dabei T auf I aufgetragen, obwohl es eigentlich andersrum sein sollte. Dies macht aber nichts, da diese Gerade die Umkehrfunktion zur eigentlich gesuchten Gerade darstellt und die in Aufgabe 3 ermittelten Wertepaare lediglich ihre „Koordinaten vertauscht“ haben, für das Entlanggehen der Arbeitsgerade aber genauso verwendbar waren.

Die eigentlich zu ermittelnde Gerade ist somit:

$$I_{Inj}(T) = (-86,31 \pm 16,74) \frac{mA}{^{\circ}C} \cdot T + (2403,4 \pm 364,9) mA$$

Auffällig hierbei sind die letzten vier, stark streuenden Werte.

Eine mögliche Erklärung dafür liefert das Absorptionsspektrum des Nd:YAG-Kristalls. An ihm ist zu sehen, dass man sich ab ca. 23°C nicht mehr im Maximum der Wellenlänge von 808,4nm befindet. Nun kann es sein, dass zu gegebener Temperatur und Injektionsstrom ein Minimum an der Photodiode abzulesen war, es sich aber um eine andere Wellenlänge als die gewünschten 808,4nm gehandelt haben könnte.

Ansonsten könnten Umgebungslicht oder Ablesefehler beim Suchen der Minima mitverursachend sein. Insbesondere bei der Suche der Minima war es oft so, dass man eines gefunden hat, aber noch ein wenig Spiel mit der Temperatur hatte, bevor sich eine Änderung des Messgeräts eingestellt hatte.

4.3. Aufgabe 3: (Kennlinie)

Nun wird die Kennlinie der Laserdiode bestimmt. Dazu wird folgender Aufbau benötigt:

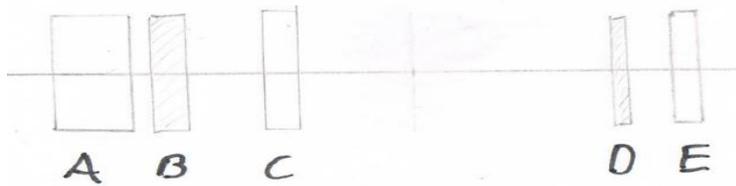


Abbildung 11: Versuchsaufbau für Aufgabe 3 [9]

wobei A die Laserdiode, B den Kollimator, C die Fokussierlinse, D den optischen Abschwächer und E die Photodiode bezeichnen.

Die Kennlinie der Laserdiode gibt die an der Photodiode ankommende Leistung in Abhängigkeit vom Injektionsstrom an. Dabei werden Wertepaare abgegangen, die auf der Arbeitsgerade liegen, um die 808,4nm zu gewährleisten.

Hierzu wird der Nd:YAG-Kristall ausgebaut, es soll nur die Leistung des Diodenlasers vermessen werden.

Zuerst wird der Injektionsstrom auf 700mA gestellt, in 50mA-Schritten verringert und mit der in Aufgabe 2 ermittelten Gerade die passende Temperatur eingestellt. Für jedes Wertepaar wird der Photodiodenstrom abgelesen, da dieser, verrechnet mit der spektralen Empfindlichkeit der Photodiode und der Transmittivität des Filters, die ankommende Leistung liefert.

Die Leistung, die an der Photodiode ankommt, berechnet sich dabei aus

$$P = \frac{I_{PD}}{\alpha \cdot T}$$

wobei α die spektrale Empfindlichkeit der Photodiode und T die Transmittivität des abschwächenden Filters darstellt. Hier sind $\alpha = 0,57 \frac{A}{W}$ (da hier nur Licht der Wellenlänge 808,4nm ankommt) und $T=0,025$.

Es wurde gemessen und berechnet:

T in [°C] (Berechnet aus 2)	I_{inj} in [mA]	I_{PD} in [6/30mA]	I_{PD} in [mA]	P ohne Filter in [mW]
19,7	700	9,5	1,9	133,33
20,3	650	8,4	1,68	117,89
20,9	600	7,2	1,44	101,05
21,5	550	6,2	1,24	87,02
22,1	500	5	1	70,18
22,7	450	4	0,8	56,14
23,3	400	3	0,6	42,11
23,9	350	2,1	0,42	29,47
24,5	300	1,4	0,28	19,65
25,1	250	0,4	0,08	5,61
25,7	200	0,02	0,004	0,28
26,3	150	0,01	0,002	0,14

Tabelle 5: Gemessener Photodiodenstrom und berechnete Photodiodenleistung von der Laserdiode zu den Wertepaaren der Arbeitsgerade

Dabei war ab 100mA kein Unterschied zum Tageslicht mehr feststellbar.

Es ergibt sich folgendes P/I-Diagramm:

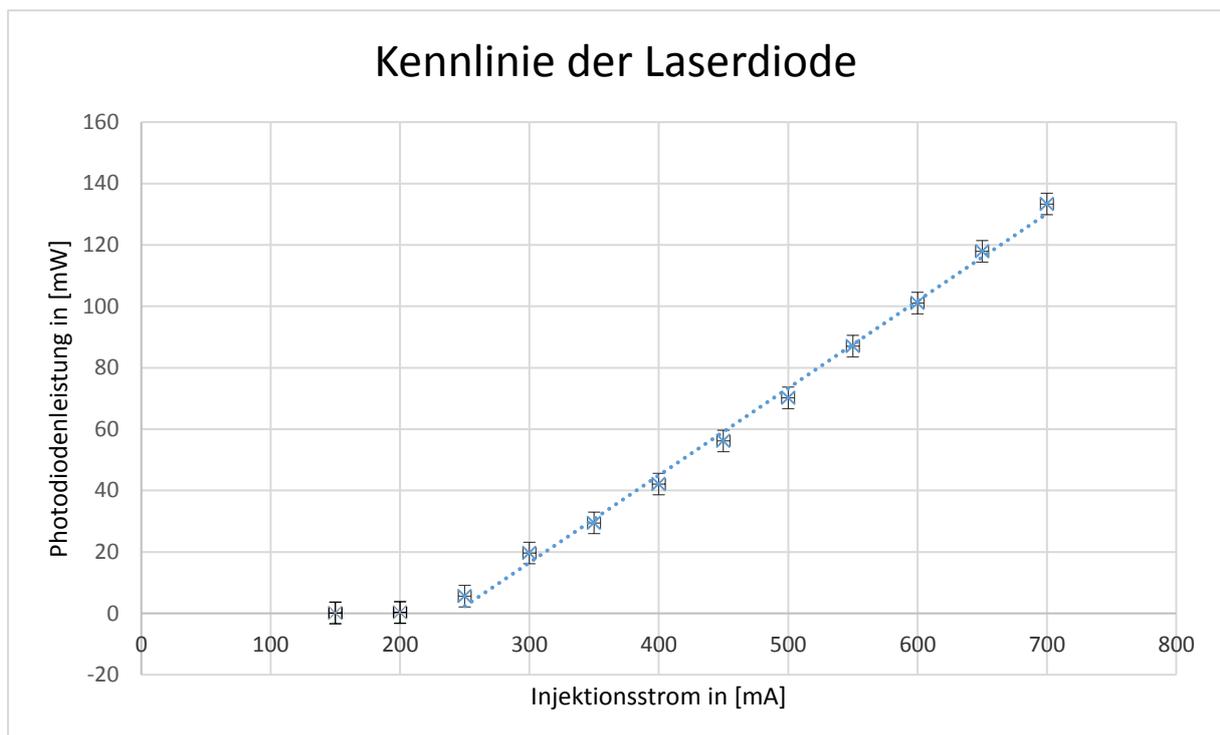


Abbildung 12: Kennlinie der Laserdiode

Mit der Ausgleichsgerade

$$P_{PD}(I_{Inj}) = (0,28 \pm 0,006) \frac{mW}{mA} \cdot I_{Inj} - (68,7 \pm 3,09)mW$$

wobei für diese die ersten beiden Werte herausgenommen wurden, da sie sehr nahe bei einem Photodiolenstrom von 0A lagen und somit dem Bereich unter dem zu bestimmenden Schwellstrom zuzuordnen sind. Der Schwellstrom der Diode ist derjenige Strom, bei dem die Diode anfängt, messbares Laserlicht auszusenden. Dass dennoch ein von 0A verschiedener Strom bei der Photodiode festzustellen war, liegt daran, dass unter dem Schwellstrom im Laser spontane Emission stattfindet. Die Laseraktivität verschwindet also nicht, ist aber sehr ungerichtet und kommt entsprechend schwach an der Photodiode an.

4.4. Auswertung 1: (Auswertung zum Halbleiterlaser)

a) Schwellstrom

Bei der Nullstelle der Kennlinie ist der Schwellstrom zu finden, da für Ströme, die größer als die Nullstelle des P/I-Diagramms sind, eine Laseraktivität bei der Photodiode durch einen deutlich von Null verschiedenen Ausschlag des Photodiolenstroms nachzuweisen war.

Die Nullstelle befindet sich bei $I_{th} \approx (245 \pm 17)mA$, was im zu erwartenden Bereich für einen solchen Laser liegt.

b) Differentielle Quanteneffizienz

Hierbei lässt sich noch eine differentielle Quanteneffizienz angeben. Diese ist das Verhältnis dafür, wie viel Leistung ausgesendet (ausgesendete Photonen) und wie viel in den Laser eingesteckt (Rekombination Elektronen-Loch-Paare) wurde.

Sie ist definiert über

$$\eta_{ext} = \frac{e \cdot P_{out}}{h\nu(I - I_{th})} = \frac{e}{h \frac{c}{\lambda}} \cdot m_{Ausgleichsgerade}$$

da es sich bei $\frac{P_{out}}{I-I_{th}}$ um die Steigung der Geraden handelt. Einsetzen der Werte und Ungenauigkeitsberechnung nach Gauß liefert hier $\eta_{ext} = 0,16 \pm 0,007$. D. h., dass von 6 Rekombinationen in der Laserdiode nur ein Photon an der Photodiode gemessen wurde.

4.5. Aufgabe 4: (Kennlinie des Nd:YAG-Lasers)

Nun soll die Kennlinie des Nd:YAG-Lasers bestimmt werden. Dazu wird wieder der Nd:YAG-Kristall und der Resonatorspiegel eingebaut und der bei der Photodiode ausgelöste Strom gemessen. Vor der Photodiode wird dabei ein Farbfilter (in diesem Fall ein RG1000 Farbfilter, der nur Anteile der Wellenlänge 1064nm durchlässt) platziert, um die Anteile des Diodenlasers auszublenden und möglichst nur die Strahlung des Nd:YAG-Lasers in die Photodiode zu senden. Hierbei wurde der Nd:YAG-Kristall senkrecht zur optischen Achse ausgerichtet, indem man ein Indikatorplättchen in den Strahlengang hielt und das auf dem Plättchen sichtbare Licht per Augenmaß mit der Position der Photodiode abglich. Eine Feinabstimmung wird schlussendlich erreicht indem alle Stellschrauben solange variiert werden, bis an der Diode ein maximaler Ausschlag festzustellen war. Damit ergibt sich folgender Aufbau:

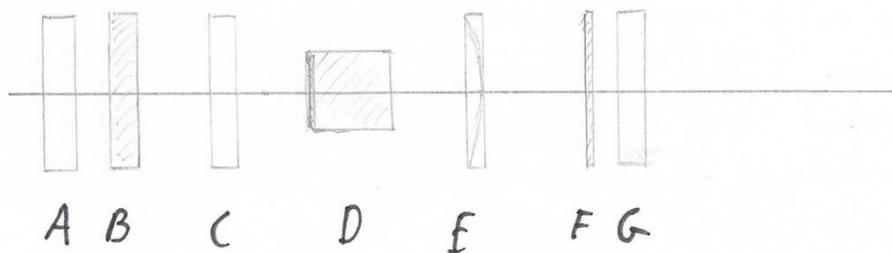


Abbildung 13: Versuchsaufbau zu Aufgabe 4

wobei A die Laserdiode, B der Kollimator, C die Fokussierlinse, D der Nd:YAG-Kristall, E der sphärische Resonatorspiegel, F der Farbfilter RG1000 und G die Photodiode ist.

Der Abstand von Hohlspiegel zu Kristall ergibt sich gem. [1] aus:

$$0 \leq \left(1 - \frac{L}{R_1}\right)\left(1 - \frac{L}{R_2}\right) \leq 1$$

wobei L der Abstand von Hohlspiegel und Kristall, und R_i der Krümmungsradius eines Spiegels ist. Hier ist $R_1 = R_{Kristall} = \infty$ und $R_2 = R_{Spiegel} = 10\text{cm}$.

Der Abstand wurde dabei größtmöglich gewählt, damit sich der KTP-Kristall später gut einstellen lässt und wurde zu $L = (8 \pm 0,5)\text{cm}$ festgesetzt.

Die Ausbildung von höheren transversalen Moden wurde dadurch verhindert, dass man durch die Feinjustage ein möglichst kleines, rundes Strahlprofil erreicht, was den Vorteil hat, dass sich die meiste Intensität in der Strahlmitte befindet.

Mit dem RG1000 wurde gemessen:

T in [°C]	I_{Inj} in [mA]	I_{PD} in [6/30mA]	I_{PD} in [mA]	P in [mW]
19,70	700,00	14,50	2,90	20,28
20,30	650,00	12,50	2,50	17,48
20,90	600,00	10,40	2,08	14,55
21,50	550,00	8,50	1,70	11,89
22,10	500,00	6,80	1,36	9,51
22,70	450,00	4,10	0,82	5,73
23,30	400,00	2,50	0,50	3,50
23,90	350,00	1,00	0,20	1,40
24,50	300,00	0,30	0,06	0,42
25,10	250,00	0,005	0,001	0,007
25,70	200,00	0,002	0,0004	0,003
26,30	150,00	0	0	0

Tabelle 6: Gemessener Photodiodenstrom und berechnete Photodiodenleistung vom Nd:YAG zu den Wertepaaren der Arbeitsgerade

4.6. Auswertung 2: (Auswertung zum Nd:YAG-Kristall)

a) Kennlinie des Nd:YAG

Die in Aufgabe 3 bestimmte Leistung (ohne Filter) des Diodenlasers (i. F. P_{LD}) ist die Pumpleistung des Nd:YAG-Lasers. Nun wird die in dieser Aufgabe gemessene Leistung des Nd:YAG-Lasers (i. F. $P_{Nd:YAG}$) darauf aufgetragen:

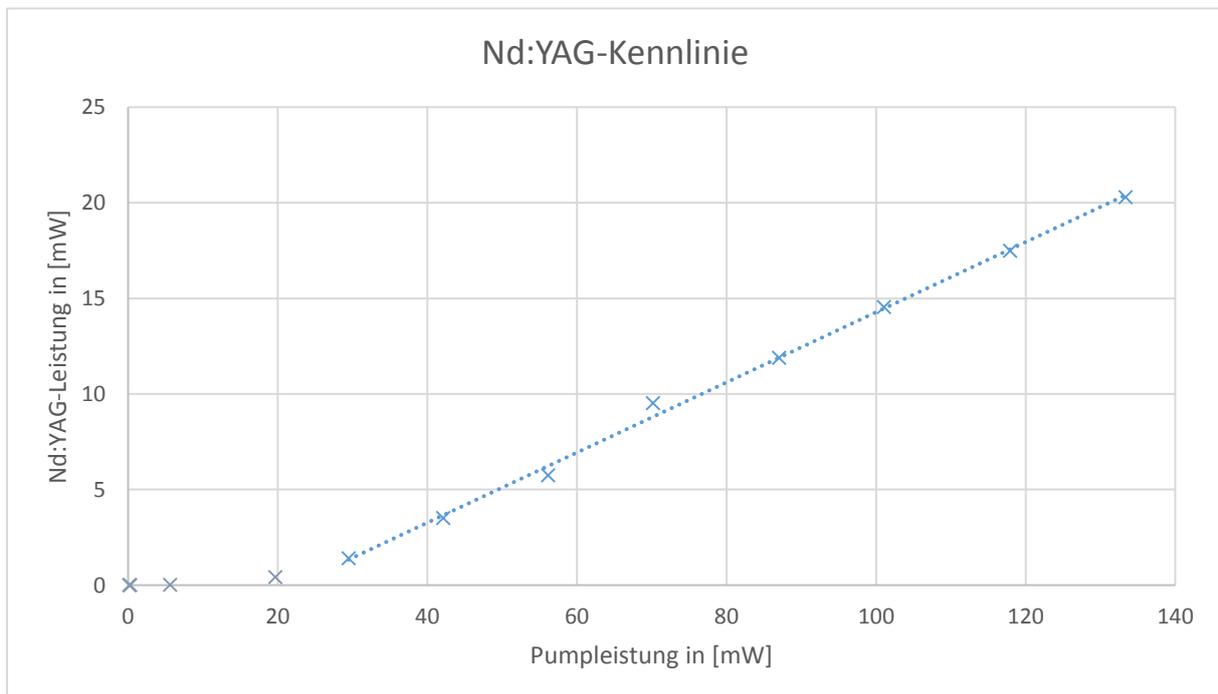


Abbildung 14: Nd:YAG-Kennlinie

Mit der Ausgleichsgeraden

$$P_{Nd:YAG}(P_{LD}) = (0,18 \pm 0,004) \cdot P_{LD} - (4,1 \pm 0,33)mW$$

Wie bei der Laserdiode gibt es auch hier unterhalb des Schwellleistung eine gewisse Laseraktivität, die aber nicht zur Kennlinie beiträgt. Daher wurden die ersten vier Werte für die Kennlinie vernachlässigt.

Die Schwelleistung der Nd:YAG-Lasers ergibt sich dabei (wie schon vorher der Schwellstrom) aus der Nullstelle der Ausgleichsgeraden zu $P_{th} \approx (22,8 \pm 2,5)mW$.

b) Quantenwirkungsgrad

Weiter lässt sich zum Nd:YAG-Laser auch der Quantenwirkungsgrad angeben. Er ist definiert durch

$$\epsilon = \frac{\text{Energie des Laserphotons}}{\text{Energie des Pumpphotons}} = \frac{\lambda_{pump}}{\lambda_{Laser}}$$

Und beträgt hier $\epsilon \approx 0,76$.

c) Totale Leistungseffizienz

Zuletzt ist zum Nd:YAG-Laser noch die totale Leistungseffizienz zu bestimmen. Sie ergibt sich aus

$$\eta_p = \frac{\text{Nd:YAG - Laserleistung}}{\text{Pumpleistung}} = \frac{P_{Nd:YAG}}{P_{pump}}$$

Mit:

$$\Delta\eta_p = \sqrt{\left(\frac{\Delta P_{Nd:YAG}}{P_{pump}}\right)^2 + \left(\frac{P_{Nd:YAG}}{P_{pump}^2} \Delta P_{pump}\right)^2}$$

Die Fehler der Pumpleistungen ergeben sich aus den vorherigen Aufgaben (Berechnung der Transmittivität von RG 1000 in Frequenzverdopplung a)):

$$\Delta P_{pump} = 3,51mW = \frac{\Delta I_{PD-LD}}{\alpha_{810nm} \cdot T}$$

$$\Delta P_{Nd:YAG} = 0,34mW = \frac{\Delta I_{Nd:YAG}}{\alpha_{1064nm} \cdot T_{RG1000}}$$

Dies liefert folgenden Graph:

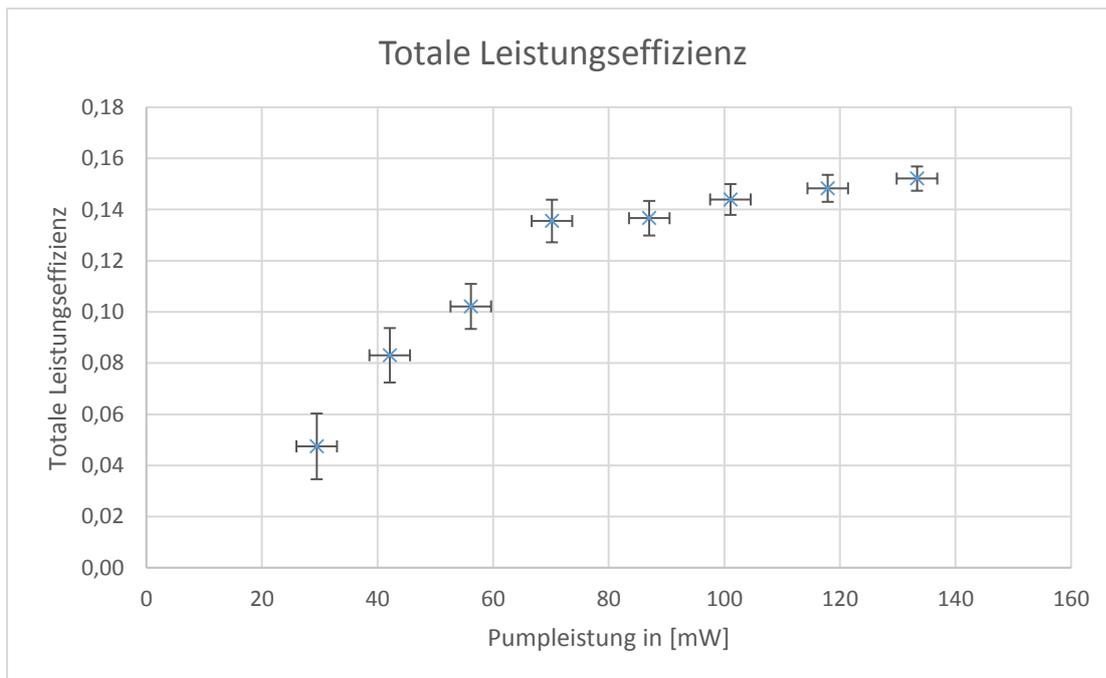


Abbildung 15: Totale Leistungseffizienz

Hierbei sind die ersten drei bis vier Wertepaare als unregelmäßiges Umgebungslicht zu identifizieren, da bereits ein Herein- bzw. Heraustreten aus dem Licht der Deckenbeleuchtung Schwankungen verursacht, die den geringen Schwankungen entsprechen könnten. Daher wurden diese in die Auftragung nicht übernommen. Zu sehen sind hier nur die Werte, die oberhalb der Schwellleistung des Nd:YAG liegen.

Der Verlauf der aufgetragenen Werte könnte einer Sättigungskurve entsprechen, was auch Sinn ergibt, da die totale Leistungseffizienz keinen höheren Wert als den Quantenwirkungsgrad erreichen kann. Das Verhältnis aus Quantenwirkungsgrad und höchster erzielter Leistungseffizienz beträgt hier 20%, es sind also 80% verloren gegangen.

Dass die Leistungseffizienzen hier bedeutend geringer ausfallen, liegt u. a. daran, dass das vom Nd:YAG-Laser ausgesendete Licht nicht nur aus Anteilen der Wellenlänge 1064nm, sondern auch aus anderen Anteilen (siehe Abschnitt 3.4) besteht. Diese wurden vom Filter ausgeblendet, wurden aber von der Pumpleistung erzeugt. Es gehen also alleine dadurch 40% der Pumpleistung verloren. Die weiteren 40% könnten von nicht optimaler Einstellung und alten Bauteilen zustande kommen.

4.7. Aufgabe 5: (KTP-Kristall und Frequenzverdopplung)

Es soll nun der eigentlich angestrebte grüne Laser gebaut werden. Dazu wird ein KTP-Kristall hinter dem Nd:YAG-Kristall eingebaut. Dabei war die Phasenanpassung bereits durch die Anfertigungsweise vorhanden und es mussten nur die Spiegel feinjustiert werden. Auch hier wurden wieder Farbfilter eingesetzt, wobei zu erwarten ist, dass die Infrarot-Anteile eine höhere Leistung liefern werden, da sie an sich zwar niedrigere Energie aufweisen, als grünes Licht, aber die Frequenzverdopplung nur für ca. 0,1% des ankommenden Lichtes auftritt. Der eine Farbfilter ist der bekannte RG1000 zum Transmittieren des 1064nm-Anteils und der andere ist der BG39 zum Transmittieren des 532nm-Anteils.

Der Aufbau wies folgende Maße auf:

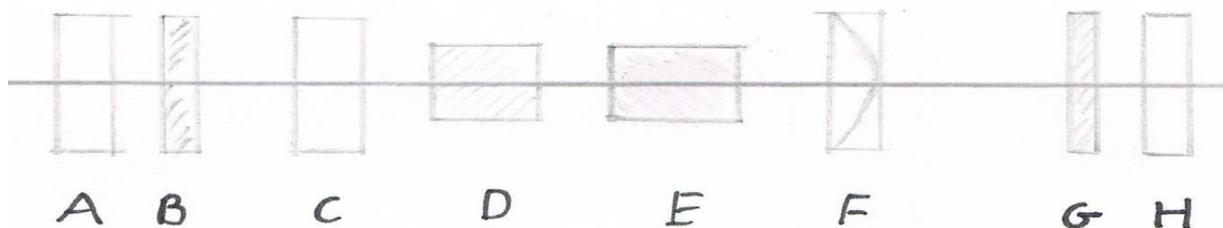


Abbildung 16: Versuchsaufbau für Aufgabe 5

wobei A die Laserdiode, B der Kollimator, C die Fokussierlinse, D der Nd:YAG-Kristall, E der KTP-Kristall, F der sphärische Resonatorspiegel, G einer der beiden Farbfilter und H die Photodiode ist. Hierbei musste auch ein anderer Skalenbereich eingestellt werden, was sich in der Einheit des Diodenstroms bemerkbar macht.

Es wurde gemessen mit BG39:

T in [°C]	I_{Inj} in [mA]	I_{PD} in [0,6/30mA]	I_{PD} in [mA]
19,7	700	4,9	0,10
20,3	650	4,2	0,08
20,9	600	3	0,06
21,5	550	1,5	0,03
22,1	500	1	0,02
22,7	450	0,3	0,006
23,3	400	0,2	0,004
23,9	350	0,18	0,0036

Tabelle 7: Gemessener Photodiodenstrom des Nd:YAG mit KTP-Kristall und BG39 Filter

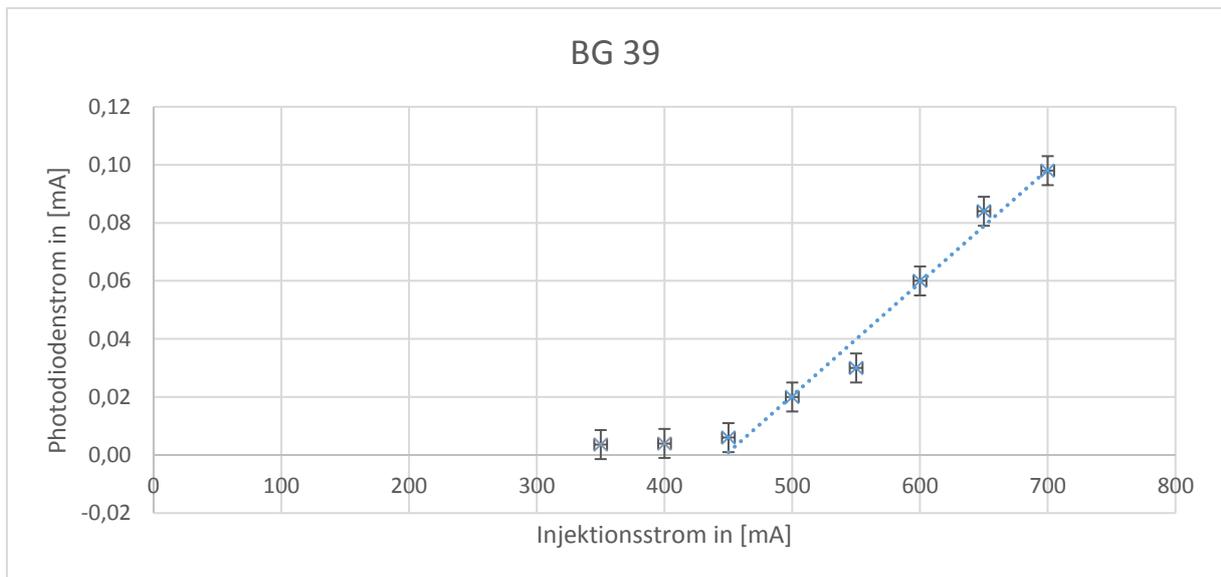


Abbildung 17: Auftragung der frequenzverdoppelten Anteile des Nd:YAG-Lasers

Es wurde gemessen für RG1000:

T in [°C]	I_{Inj} in [mA]	I_{PD} in [6/30mA]	I_{PD} in [mA]
19,7	700	7,2	1,44
20,3	650	6,1	1,22
20,9	600	5,2	1,04
21,5	550	4	0,80
22,1	500	2,8	0,56
22,7	450	2	0,40
23,3	400	1	0,20
23,9	350	0,04	0,01
24,5	300	0,002	0,0004
25,1	250	0,001	0,0002
25,7	200	0,001	0,0002

Tabelle 8: Gemessener Photodiodenstrom des Nd:YAG mit KTP-Kristall und RG1000 Filter

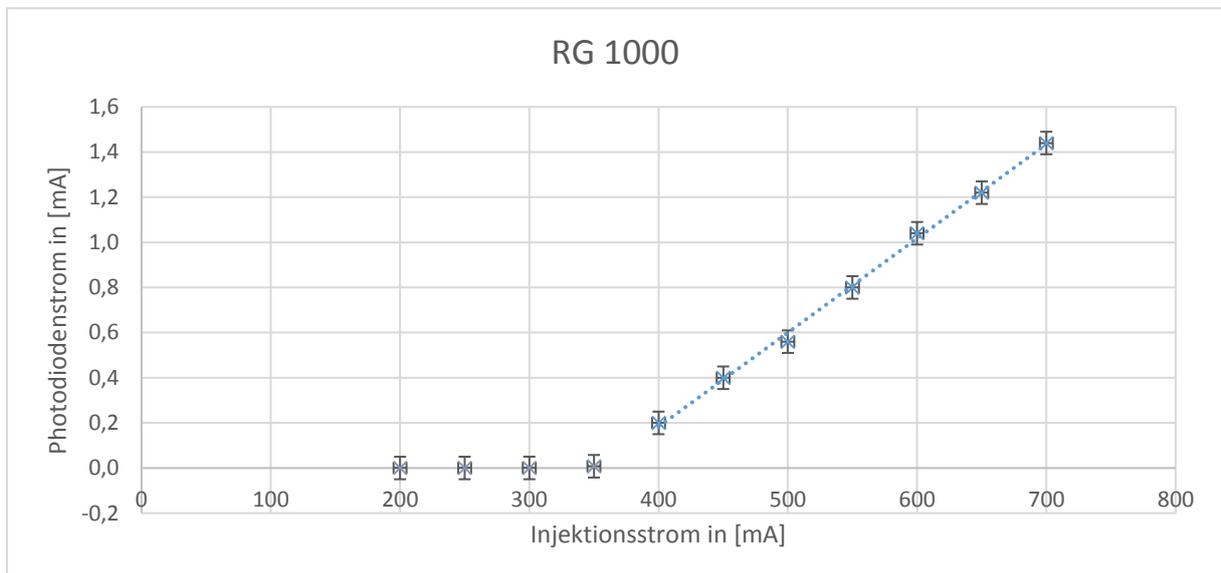


Abbildung 18: Auftragung der fundamentalen Anteile des Nd:YAG-Lasers

Wie man an den Werten sieht, liegen die Leistungen für Grünlicht unter denen vom Infrarotlicht, was die Erwartungen erfüllt, da die Frequenzverdopplung nur einen Bruchteil von diesem ausmacht.

4.8. Auswertung 3: (Auswertung zur Frequenzverdopplung)

a) Umgebungsleistung

Zur weiteren Auswertung soll zunächst die Umgebungsleistung von den gemessenen Werten abgezogen werden. Dazu werden aus den ermittelten Photodiodenströmen zuerst die Leistungen berechnet, wofür die Transmissionseigenschaften der Filter wichtig sind, die entsprechenden Leistung-Injektionsstrom-Kennlinien aufgetragen und alles unterhalb der Schwellströme als Umgebungseffekt abgezogen.

Es gilt für die Transmissionskoeffizienten von RG1000 bei einer Dicke von $d=3\text{mm}$:

λ in [nm]	τ
1060	0,64
1070	0,68

Tabelle 9: Werte zur der Transmission des RG1000 bei bestimmter Wellenlänge

Für BG 39 bei einer Dicke von $d=1\text{mm}$ gilt:

λ in [nm]	$\tau_{\text{au\ss en}}$	τ_{innen}
530	0,87	0,96
540	0,86	0,94

Tabelle 10: Werte zur der Transmission des BG39 bei bestimmter Wellenlänge

Diese Werte müssen nun noch für die Apparatur angepasst werden.

Für den RG 1000 wird ein Mittelwert aus den beiden Koeffizienten gebildet, es gilt:

$$T_{RG\ 1000} = 0,66$$

Der BG 39 besteht aus drei 1mm dicken Schichten, zwei äußeren und einer inneren, sodass zunächst für jede Schicht ein Mittelwert der beiden Wellenlängen gebildet wird und diese dann passend miteinander multipliziert werden. Es gilt:

$$\overline{\tau_{\text{au\ss en}}} = 0,865, \overline{\tau_{\text{innen}}} = 0,95$$

$$T_{BG\ 39} = \overline{\tau_{\text{innen}}} \cdot \overline{\tau_{\text{au\ss en}}}^2 = 0,71$$

Nun können die Leistungen des fundamentalen Infrarotlichts und des frequenzverdoppelten grünen Lichts berechnet werden. Es gilt:

$$P_{\text{grün}} = \frac{I_{BG\ 39}}{\alpha_{\text{grün}} \cdot T_{BG\ 39}} \text{ mit } \Delta P_{\text{grün}} = \frac{\Delta I_{BG\ 39}}{\alpha_{\text{grün}} \cdot T_{BG\ 39}} = 0,03\text{mW}$$

$$P_{\text{infrarot}} = \frac{I_{RG\ 1000}}{\alpha_{\text{infrarot}} \cdot T_{RG\ 1000}} \text{ mit } \Delta P_{\text{infrarot}} = \frac{\Delta I_{RG\ 1000}}{\alpha_{\text{infrarot}} \cdot T_{RG\ 1000}} = 0,34\text{mW}$$

wobei die Fehler per Gauß'scher Fortpflanzung ermittelt wurden.

Die Fundamentalleistung ergibt sich aus der Summe von P_{infrarot} und $P_{\text{grün}}$, die dazugehörige Ungenauigkeit somit zu:

$$P_{\text{Fund.}} = \sqrt{(\Delta P_{\text{infrarot}})^2 + (\Delta P_{\text{grün}})^2} = 0,34\text{mW}$$

Man erhält folgende Leistungen (unter Berücksichtigung, dass einige der Leistungen als Umgebung identifiziert wurden s.o.):

$P_{grün}$ in [mW]	$P_{infrarot}$ in [mW]	$P_{Fund.}$ in [mW]
0,49	9,92	10,41
0,42	8,40	8,82
0,30	7,16	7,46
0,15	5,51	5,66
0,10	3,86	3,96
0,03	2,75	2,78
0,02	1,38	1,40
0,02	0,06	0,08

Tabelle 11: Ermittelte Fundamentalleistung und ihre Bestandteile

Der Schwellstrom zum Diodenlaser wurde in Auswertung 1. a) bereits bestimmt.

Der Nd:YAG besitzt keinen eigenen Injektionsstrom, man kann ihm aber den Injektionsstrom der Laserdiode zuordnen, ab dem der Nd:YAG anfängt, Laseraktivität, die von spontaner Emission verschieden ist, aufzuweisen. Dazu wird die Kennlinie aus 4. a) nochmals erstellt, aber diesmal die vom Nd:YAG ausgesendete Leistung nicht auf die von der Laserdiode ausgesendete Pumpleistung, sondern auf den zugehörigen Injektionsstrom aufgetragen.

Man erhält als Graph:

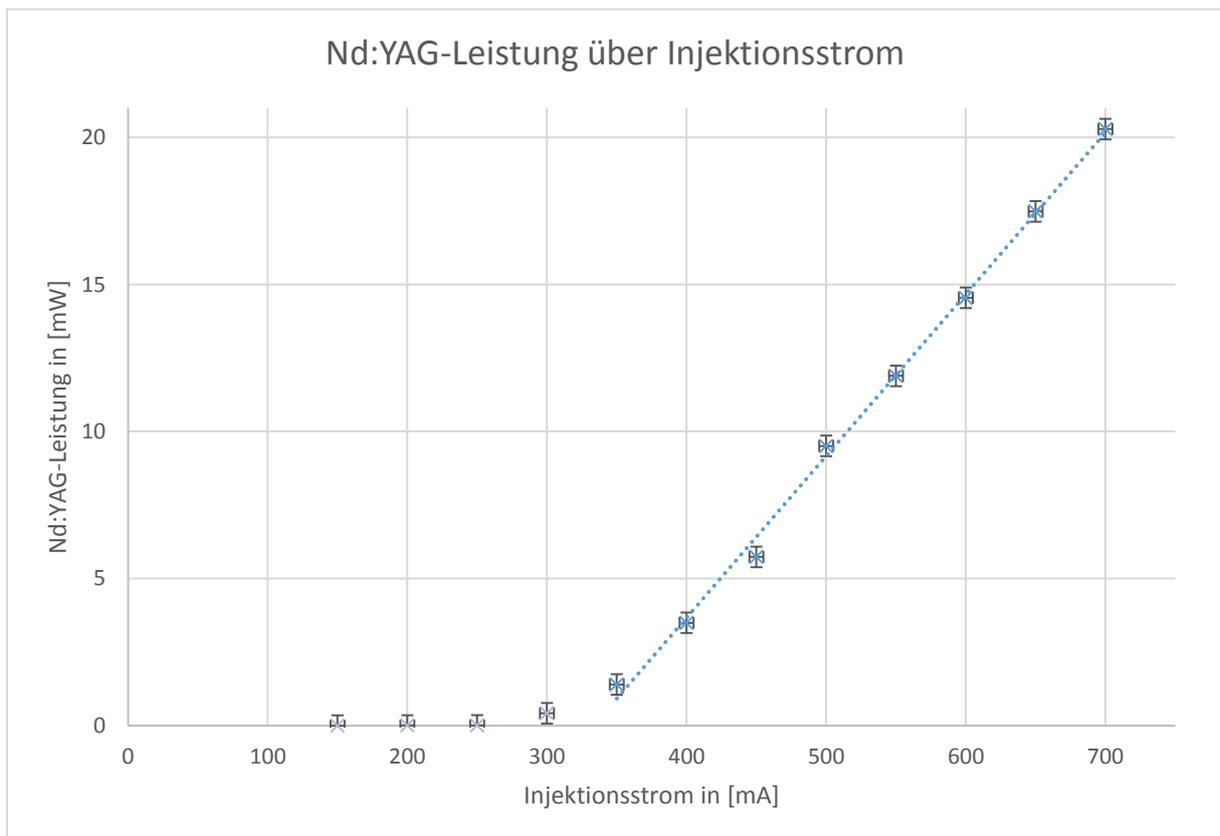


Abbildung 19: Nd:YAG-Leistung über den Injektionsstrom

Mit

$$P_{PD,Nd:YAG}(I_{Inj}) = (0,055 \pm 0,001) \frac{mW}{mA} \cdot I_{Inj} - (18,3 \pm 0,6)mW$$

Man erhält die Nullstelle und ihre Ungenauigkeit:

$$I_{th} = (329 \pm 20)mA$$

Alle Daten werden nun im Fundamental-/Lichtleistung-Pumpstrom-Diagramm zusammengetragen:

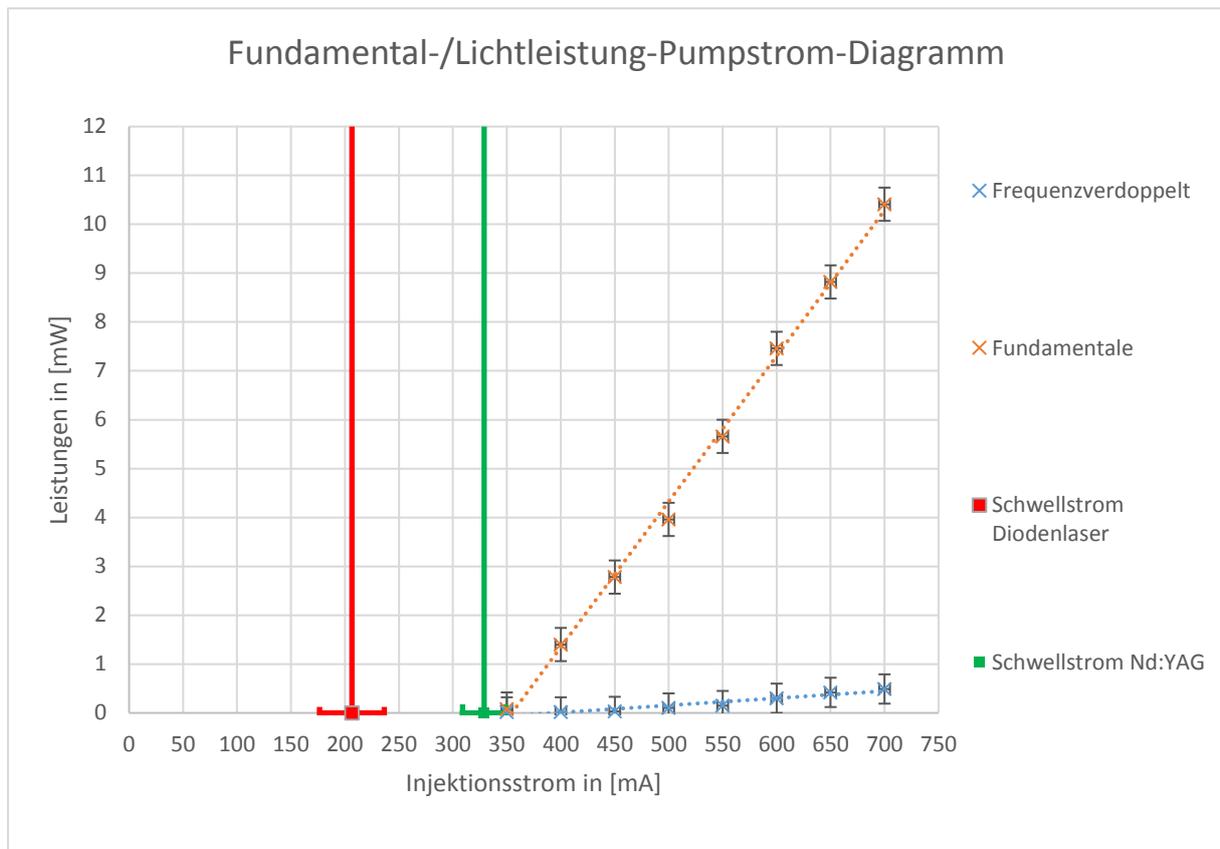


Abbildung 20: Leistungen des Fundamental- und Frequenzverdoppelt-Teils über den Injektionsstrom der Laserdiode

Würde man Laseraktivität unterhalb der Schwellströme feststellen, so kann diese nur von der Umgebung verursacht sein, da laut den Kennlinien der Laser nur oberhalb der Schwellströme Laserlicht ausgesendet werden kann. Da keine Werte unterhalb der Schwellströme (und nur knapp innerhalb der Fehlerbereiche) liegen, kann der Einfluss der Raumbeleuchtung für nachfolgende Betrachtungen vernachlässigt werden.

b) Lichtleistung/Fundamentalleistung

Man trägt nun die Lichtleistung über die Fundamentalleistung auf (diese wird hierbei wie in a) über die Summe der Frequenzverdoppelt- und Infrarot-Leistung approximiert). Die dazugehörigen Fehler wurden bereits in a) berechnet, und es gilt hier:

$$\Delta P_{Fund.} = \sqrt{(\Delta P_{grün})^2 + (\Delta P_{infrarot})^2} = 0,34 mW$$

Für die Auftragung von Licht- auf Fundamentalleistung wird hierbei ein quadratischer Fit genutzt. Dies ergibt sich folgendermaßen:

Intensität ist definiert als Leistungsflächendichte, d. h. es gilt: $P \sim I$. Weiterhin kann man berechnen, dass bei kleinen Konversionseffizienzen für fundamental und frequenzverdoppelte Intensitäten gilt [10]:

$$I(2\omega) \sim I^2(\omega)$$

Es ergibt sich also auf die Leistungen übertragen der Zusammenhang:

$$P(2\omega) \sim P^2(\omega)$$

Man erhält für die Auftragung:

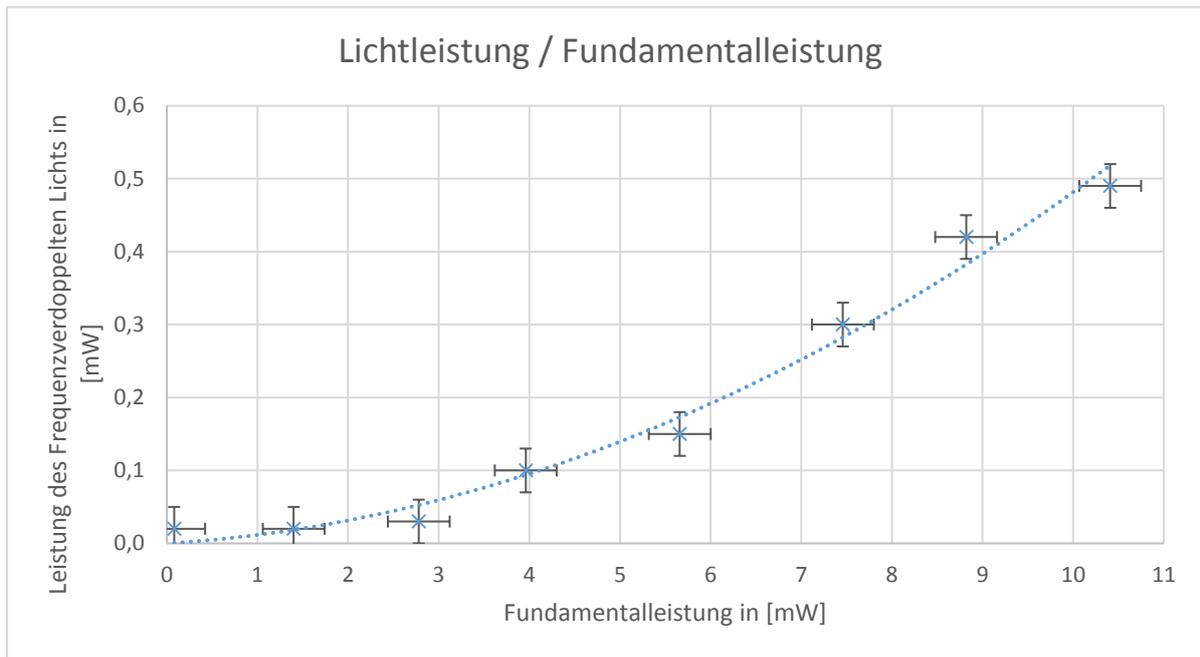


Abbildung 21: Quadratischer Zusammenhang zwischen frequenzverdoppeltem und fundamentalem Licht

Mit der Ausgleichskurve:

$$P_{\text{grün}}(P_{\text{Fund.}}) = (0,005 \pm 0,0002) \frac{1}{\text{mW}} \cdot P_{\text{Fund.}}^2$$

c) Konversionseffizienz

Nun soll die Konversionseffizienz über die Fundamentalleistung geplottet werden. Die Konversionseffizienz lässt sich dabei umformen:

$$\gamma_{\text{HSG}} = \frac{P_{\text{grün}}}{P_{\text{grün}} + P_{\text{infrarot}}} = \frac{P_{\text{grün}} + P_{\text{infrarot}} - P_{\text{infrarot}}}{P_{\text{grün}} + P_{\text{infrarot}}} = 1 - \frac{P_{\text{infrarot}}}{P_{\text{grün}} + P_{\text{infrarot}}}$$

und ergibt somit folgende Fehlerabschätzung:

$$\Delta\gamma_{\text{HSG}} = \sqrt{\left(\frac{P_{\text{infrarot}}}{(P_{\text{infrarot}} + P_{\text{grün}})^2} \cdot \Delta P_{\text{grün}}\right)^2 + \left(\frac{P_{\text{grün}}}{(P_{\text{infrarot}} + P_{\text{grün}})^2} \cdot \Delta P_{\text{infrarot}}\right)^2}$$

Mit den gemessenen Werten erhält man:

γ_{HSG}	$\Delta\gamma_{\text{HSG}}$
0,047	0,003
0,048	0,004
0,040	0,004
0,027	0,005
0,025	0,008
0,011	0,011
0,014	0,021
0,250	1,103

Tabelle 12: Konversionseffizienz und dazugehörige Ungenauigkeit

Der letzte Wert ist auffällig. Er lässt sich dadurch erklären, dass sich die zugehörigen Leistungen zu nahe an der Nd:YAG-Schwelle befinden. Im Plot wird dieser nicht mehr verwendet.

Es ergibt sich:

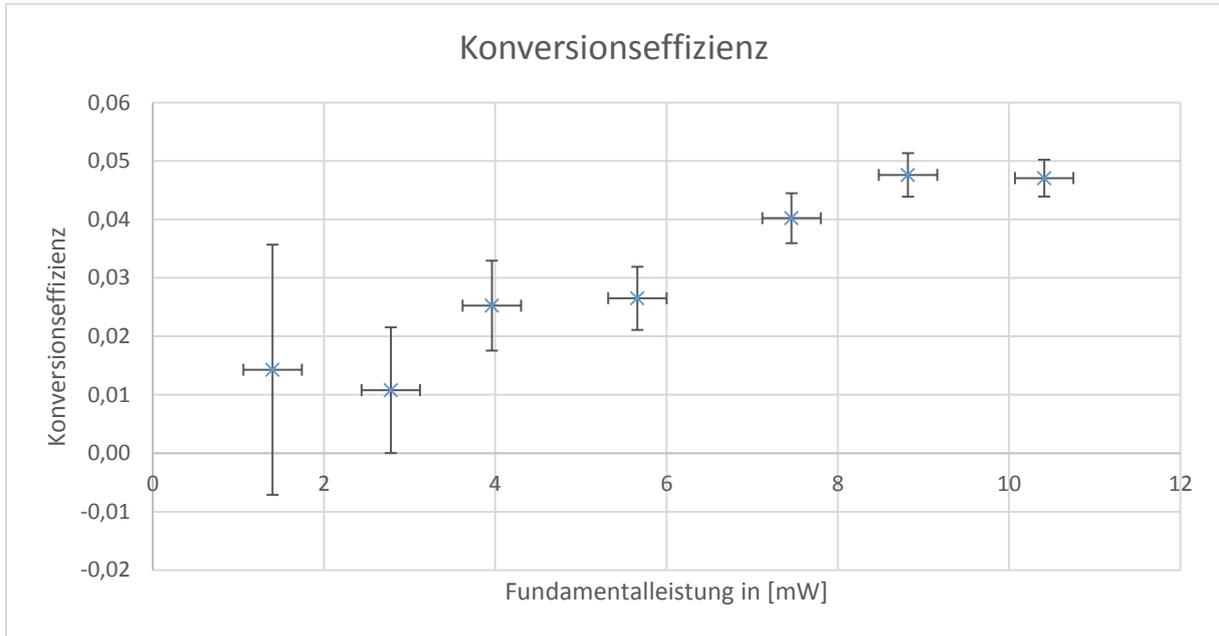


Abbildung 22: Konversionseffizienz

Da

$$\gamma_{HSG} = \frac{P_{grün}}{P_{Fund.}} \sim \frac{P_{Fund.}^2}{P_{Fund.}} = P_{Fund.}$$

gilt, ist es am logischsten, einen linearen Fit anzunehmen.

Man erhält (der folgende Plot sollte eigentlich eine Sättigungskurve sein, die Word nicht hinkriegt. Bis festgestellt wurde, dass es sich doch um eine lineare Approximation handelt, wobei Word dann nicht mehr berücksichtigt wurde):

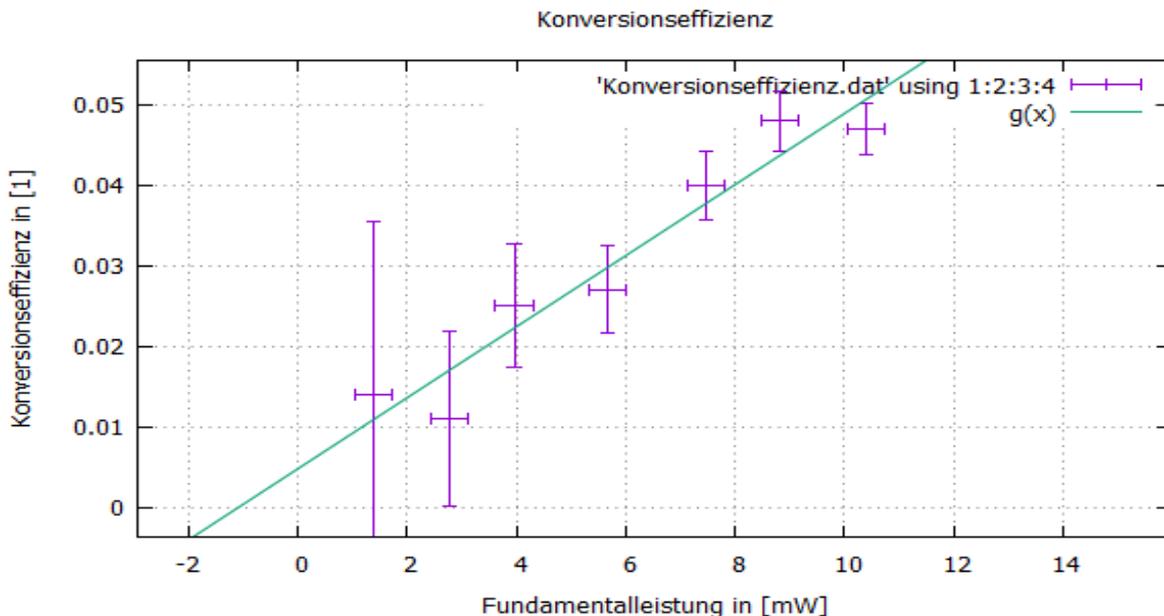


Abbildung 23: Konversionseffizienz mit Fit

Mit:

$$\gamma_{HSG}(P_{Fund.}) = (0,004 \pm 0,006) \frac{1}{mW} \cdot P_{Fund.} + (0,0048 \pm 0,004)$$

d) Diskussion der Konversionseffizienz

Konversionseffizienz γ_{HSG} ließe sich weiter steigern durch eine erhöhte Fundamentalleistung. Dies kann durch einen präziseren Versuchsaufbau oder durch eine Erhöhung der Pumpleistung erreicht werden.

Auch durch neue bzw. gereinigte Bauteile wäre eine Steigerung möglich, da die „alten“ Bauteile womöglich an optischer Güte/Reinheit, unter anderem durch Luftfeuchte in deren Behälter, verloren haben.

Ein Effekt, der nicht beeinflusst werden kann, ist die Tatsache, dass der Nd:YAG-Kristall nur zu 60% Licht der Wellenlänge 1064nm emittiert, d. h., dass ein Teil der Fundamentalleistung immer in die anderen 40% des emittierten Lichts aufgewendet wird.

4.9. Aufgabe 6: (Laserpointer)

Zuletzt soll ein kommerzieller Laserpointer dahingehend untersucht werden, inwieweit der hier selbstgebaute diesem entspricht. Dazu werden optische Leistung und Betriebsspannung notiert. Zudem wurden Farbfilter vor den kommerziellen Laser gesetzt, um die Einzelleistung der verschiedenen Wellenlängen zu messen und um beurteilen zu können, inwieweit diese für normale Anwendung eine Rolle spielen.

Für den kommerziellen Laser liegt vor:

Betriebsspannung $U_B = 2,86V$ bei Injektionsstrom $I_{Inj}' = 200mA$.

Die optische Leistung mit BG39-Filter vor dem Laserpointer beträgt:

$$P_1 = 9 \cdot \frac{0,6}{30} mA = 0,18mA.$$

Beim RG1000 wurde bei gleicher Spannung und Strom gemessen:

$$P_2 = 3 \cdot \frac{0,006}{30} mA = 6 \cdot 10^{-4} mA.$$

4.10. Auswertung 4: (Auswertung zum kommerziellen Laser)

Zur Auswertung berechnet man zunächst die eingesteckte elektrische Leistung:

$$P_{el} = U_B \cdot I'_{Inj} = 572mW.$$

Im Vergleich hierzu können die an der Photodiode ankommenden Leistungen aus P_1 und P_2 berechnet werden wie in Aufgabe 5:

$$P'_{Grün} = 0,905mW \text{ und } P'_{Infrarot} = 0,004mW$$

Daraus ergibt sich eine Gesamtleistung von:

$$P'_{ges} = 0,909mW$$

Daraus lässt sich nun folgender Wirkungsgrad berechnen:

$$\epsilon' = \frac{P'_{ges}}{P_{el}} = 0,0016.$$

Die beiden Leistungen an grünem bzw. infrarotem Licht beim Versuchsaufbau waren:

$$P_{Grün} = 0,03mW \text{ und } P_{Infrarot} = 0,34mW$$

Zum Vergleich dieser Wirkungsgrad beim vorliegenden Laseraufbau:

$$\epsilon = 0,00018$$

Die Effizienz eines kommerziellen Lasers ist also sehr gering, was zufolge hat, dass bei mobilen Lasern große Energiespeicher mitgeführt werden müssen. Daraus resultiert meist, dass die Batterien den größten Teil eines Laserpointers ausmachen. Es ist aber auch festzuhalten, dass der Laser im Versuch trotz langer Justage eine sehr geringe Ausgangsleistung erreicht.

Auch zu vermerken ist, dass der Infrarotanteil beim kommerziellen Laser gut herausgefiltert wird. Die dort gemessene Leistung entspricht nahezu dem Umgebungslicht, weshalb man argumentieren kann, dass dieser Anteil gut gefiltert wird. Der grüne Anteil hingegen ist beim kommerziellen Laser wesentlich höher als im Versuch, was zum einen an besserer Justage und zum andern auch daran liegen kann, dass dieser Laserpointer mit einem Nd:YVO Kristall arbeitet und dieser zu einem größerem Prozentsatz die 1064nm aussendet.

Es lässt sich ebenso noch erwähnen, dass grünes Licht von Augen intensiver wahrgenommen wird, da mehr grünempfindliche Zäpfchen vorhanden sind. Daher ist der bei billigen Lasern oft ungefilterte Infrarotanteil sehr gefährlich, auch wenn der grüne Teil stark erscheint. So ist im vorliegenden Laseraufbau der infrarote Anteil (rein von der Leistung betrachtet) gefährlicher. Zudem lässt sich vermuten, dass der Infrarotanteil sehr groß sein muss, wenn man sich den Unterschied der im Versuch vorkommenden Leistungen ansieht und auf die im Laserpointer gemessen überträgt.

Während des Versuchs konnte der ebenfalls auftretende Anteil des 808,4nm Lichtes (Nd:YVO wird nämlich mit derselben Wellenlänge gepumpt) nicht bestimmt werden. Das bedeutet, dass kommerzielle Laserpointer zwar effizienter sind, aber auch diese aufgrund interner Reflexion und diverser Filter insgesamt ineffizient arbeiten, da das meiste an eingesteckter elektrischer Energie in Wärme (siehe Wirkungsgrad) und nur ein kleiner Teil in Licht umgewandelt wird, wobei von diesem noch unerwünschte Teile ausgefiltert werden (z. B. der im Absatz vorher erwähnte Infrarotanteil, für den viel Energie ungenutzt verloren geht).

5. Fazit

Während des Versuchs ist es gelungen, die einzelnen Komponenten eines Lasers von 532nm Wellenlänge aufzubauen und ihn zu verstehen.

Beginnend mit der Laserdiode und Nd:YAG-Kristall kann durch Variation der Temperatur der Laserdiode das Absorptionsspektrum des Kristalls bestimmt werden, um ihn für folgende Messungen optimal betreiben zu können.

Da neben Temperatur auch der Injektionsstrom der Laserdiode verändert werden kann, muss für nachfolgende Messungen zunächst die Arbeitsgerade, d. h. eine Verknüpfung von Temperatur- und Injektionsstrom-Wertepaaren, ermittelt werden, auf der die ausgesendete Wellenlänge gleichbleibt.

Danach steht die Kennlinie der Laserdiode im Vordergrund. Sie gibt die ausgesendete Leistung in Abhängigkeit vom Injektionsstrom an, was sich als nützliches Wissen zur Bestimmung der Pumpschwelle des Nd:YAG-Lasers erweist. Nachdem einige Werte als Ergebnis spontaner Emission eingeordnet werden, wurde der lineare Zusammenhang von Injektionsstrom und ausgesendeter Leistung ersichtlich. Zudem lässt sich daraus der

Schwellstrom der Laserdiode bestimmen, ab dem geordnete Laseraktivität spontane Emissionsprozesse überwiegt.

Ein Vergleich mit anderen Auswertungen zeigt, dass die Quanteneffizienz des Aufbaus geringer ausfällt. Dies ist auf nicht optimale Einstellungen des Aufbaus zurückzuführen.

Analog zur vorherigen Aufgabe wird dann die Kennlinie des Nd:YAG-Lasers bestimmt. Dabei wird ein Farbfilter eingesetzt, um die Laserdiodenstrahlung auszublenden. Auch für den Nd:YAG-Laser können einige Werte der spontanen Emission zugeordnet werden, sodass auch hier eine Gerade für die Kennlinie gefunden werden kann. Auch hier lässt sich nun eine Schwellleistung des Nd:YAG-Lasers angeben, von der mittels Kennlinie der Laserdiode auf einen Schwellstrom der Laserdiode geschlossen werden kann.

Ein Vergleich von Quantenwirkungsgrad und totaler Leistungseffizienz zeigt, dass nur ca. 20% der ankommenden Strahlung aus der Laserdiode auch in emittierte Strahlung des Nd:YAG-Lasers umgewandelt wird. Erklärt wird dies mit dem Abstrahlspektrum des Nd:YAG und dem Versuchsaufbau.

Um den anfangs erwähnten Laser zu vervollständigen, wird ein KTP-Kristall eingesetzt, der durch seine nicht-linear optischen Eigenschaften für eine Frequenzverdopplung der vom Nd:YAG-Laser ausgesendeten Strahlung sorgt. Farbfilter sorgen auch hier dafür, dass nur 1064nm oder 532nm transmittiert werden. Das Licht der Laserdiode (sowohl fundamentales als auch frequenzverdoppeltes) wird immer ausgeblendet.

Für die nachfolgende Auswertung müssen Umgebungseffekte aus den Werten eliminiert werden. Dazu werden die fundamentalen und frequenzverdoppelten Anteile des Nd:YAG-Lasers auf den Injektionsstrom zurückgeführt und mit den Schwellströmen von Laserdiode und Nd:YAG-Laser verglichen. Der Schwellstrom der Laserdiode liegt, aufgrund allgemeiner Verlusteffekte zwischen Laserdiode und Nd:YAG-Laser, unter der des Nd:YAG-Lasers. Die Umgebung spielte dabei keine Rolle.

Unter der Annahme, dass die Konversionseffizienzen gering sind, kann ein quadratischer Zusammenhang zwischen Licht- und Fundamentalleistung des Nd:YAG-Lasers hergeleitet und durch einen passenden Fit auch bestätigt werden.

Anschließende Berechnung selbiger Konversionseffizienz bestätigt die vorher getroffene Annahme. An sich ist die Konversionseffizienz eine Sättigungskurve, in einem kleinen Bereich aber linear anzunähern, was von den Messwerten genügend reproduziert wird.

Verbesserungen der Konversionseffizienz könnten aller Voraussicht nach durch bessere Einstellung des Aufbaus und neuere Bauteile erzielt werden.

Zuletzt erfolgt ein Vergleich mit einem kommerziellen Laser, der statt einem Nd:YAG- einen Nd:YVO-Kristall ausgestattet ist. Es stellt sich heraus, dass die Effizienz des kommerziellen Lasers eine Größenordnung höher ausfällt und er weitaus mehr frequenzverdoppeltes Licht aussendet. An sich ist der Wirkungsgrad dennoch sehr gering, was aber hier sogar im Sinne des kommerziellen Lasers ist, da so potentielle Schäden eingeschränkt werden. Unterstützt wird dies noch durch die starke Filterung von Infrarotanteilen.

Die Erwartungen an den Versuch wurden erfüllt, Ungenauigkeiten nachvollziehbar erklärt und die Theorie hinter solchen Lasern erfolgreich nachvollzogen und überprüft.

6. Eidesstaatliche Erklärung

Hiermit wird versichert, dass die vorliegende Ausarbeitung nur von den Experimentatoren und ohne Hilfe von Dritten angefertigt wurde. Alle Stellen, die aus Quellen entnommen wurden, entsprechend gekennzeichnet.

Offenbach, den 29.10.2017

8. Quellenverzeichnis

- [1] F.K. Kneubühl, M.W. Sigrist, Laser, 6. Auflage, Teubner Studienbücher Physik, 2005
- [2] W. Demtröder, Laserspektroskopie, 5. Auflage, Springer, 2007
- [3] L. Bergmann, C. Schäfer, Relativistische Physik – Von der Elektrizität zur Optik, de Gruyter, 2015
- [4] C.E. Wieman, L. Hollberg: Using diode lasers for atomic physics: Review of Scientific Instruments 62, Teil 111 G: 1001 ways to kill a laser, 1991
- [5] O0 Laserschutz der TU Darmstadt
- [6] Thomas Halfmann, Skript zur Vorlesung „Experimentalphysik 3“, WiSe 16/17
- [7] W. Demtröder, Experimentalphysik 3, Atome, Moleküle, Festkörper, 5. Auflage, Springer, 2011
- [8] Versuchsanleitung Abteilung A Versuch 4.6.
- [9] Selbsterstellte Bilder/Grafiken
- [10] <https://www.fb06.fh-muenchen.de/lhm/images/Praktikum/MasterPOM/PraktikumNLOneu.pdf>, Stand: 19.11.2017, 23:35 Uhr

9. Laborbuch

①

Zunächst soll das Absorptionsspektrum des Nd:YAG-Kristalls vermessen werden, um die optimale Wellenlänge, bei der am meisten absorbiert wird und die meiste Besetzungsinversion vorliegt, zu finden.

Dazu wird der in der Aufgabe beschriebene Aufbau errichtet.

Der Abstand von Fokussierlinse und Nd:YAG-Kristall beträgt dabei

$$L = 11,2 \pm 0,5 \text{ cm.}$$

Dieser Wert werde mit ~~dem~~ einem Lineal vermessen.

Das Spektrum wird aufgenommen, indem man den Injektionsstrom der Diode auf 700 mA stellt und dann die Temperatur von 10°C nach 30°C in 2°C-Schritten durchstimmt, was für die Aussendung verschiedener

Wellenlängen aus dem Diodenlaser sorgt. Gemessen wird der Strom der Photodiode, der ~~von~~ ^{von} Nd:YAG-Kristalls ~~das~~ erzeugt wird:

der Strahlung des

T [°C]	I in mA _k [$\frac{6}{30}$ mA]
10	3,75 3,75
12	2,5
14	2
16	2
18	1
20	0,75 0,75
22	1
24	2,4
26	4,6
28	4
30	3

32	2,05
34	2
36	3
38	3,75 3,75
40	5

Dabei wird die Stromstärke in $\frac{6}{30}$ mA angegeben, da 30 Skalenteile vorliegen, die (hier) 6 mA ausmachen. Es wird also die Anzahl an vom Zeiger überschrittenen Skalenteilen notiert.

Als Ungenauigkeit der Stromskala wird $\Delta I = 0,25 \frac{6}{30}$ mA angenommen, was sich ~~aus~~ aus Einschätzung durch Hinschauen ergibt.

Anzumerken ist noch, dass ~~der~~ der Injektionsstrom fluktuiert. Daher wird für diesen ein Bereich von $\Delta I_{inj} = 20$ mA notiert. bed. wenn die Abw. teilw. viel höher war.
Da ~~noch~~ die Temperatur nicht geschwankt ist wird ein Fehler von $\Delta T = 0,1^\circ\text{C}$ angenommen.

Von wird der Kristall entfernt und der Strom der Photodiode gemessen, um einen Vergleich zur Anordnung mit Kristall zu haben und die relative Absorption zu bestimmen. Der Injektionsstrom wird weiterhin möglichst bei 70 mA gehalten.

T [°C]	I ₀ [$\frac{6}{30}$ mA]
40	9
38	9
36	9
34	9,25
32	9,3 9,3
30	9,4
28	9,5
26	9,5
24	9

22	9
20	9
19	8,75
16	8,75
14	8,75
12	8,25
10	8,75

Über einen tabellenfähigen Taschenrechner wurde nun die rel. Absorption des Kristalls gemäß:

$$A_{rel} = 1 - \frac{k}{I_0}$$

T [°C]	A _{rel}	ΔA _{rel}	mit ΔA _{rel} über bauß:
10°	0,57	0,03	$\Delta A_{rel} = \sqrt{\left(\frac{\partial A_{rel}}{\partial k} \Delta k\right)^2 + \left(\frac{\partial A_{rel}}{\partial I_0} \Delta I_0\right)^2}$
12	0,72	0,03	
14	0,77	0,03	
16	0,77	0,03	
18	0,809	0,03	
20	0,92	0,03	
22	0,89	0,03	
24	0,73	0,03	
26	0,52	0,03	
28	0,58	0,03	
30	0,68	0,03	
32	0,78	0,03	
34	0,78	0,03	
36	0,67	0,03	
38	0,58	0,03	
40	0,44	0,03	

Ohne einen Plot anzusehen sieht man bereits sehr deutlich, dass ein Maximum bei $T = 20^\circ\text{C}$ und $T = 33^\circ\text{C}$ vorliegt, was den Wellenlängen $808,4\text{nm}$ und $812,9\text{nm}$ entspricht. Das erste Maximum bei ca. $T = 19^\circ\text{C}$ wird im Plot vielleicht sichtbar ~~und~~ und entspricht $804,4\text{nm}$. Das letzte Maximum welches bei ca. ~~$T = 40^\circ\text{C}$~~ $T = 40^\circ\text{C}$ erscheinen sollte, könnte nicht gemessen werden. Die beste Absorption ~~liegt bei~~ bei $808,4\text{nm}$ könnte also erfolgreich reproduziert werden.

②

Man soll die Arbeitsgerade der Laserdiode bestimmt werden. Das ist diejenige Gerade bei der der Laser in Abh. von Temperatur und Injektionsstrom genau $808,4\text{nm}$ ~~ausstrahlt~~ Licht aussendet. Dies wird überprüft mithilfe des Nd:YAG-Kristalls, da dieser bei dieser WL optimal absorbiert und die Photodiode somit für jeden Messpunkt einen Tiefpunkt ~~des~~ des von ihr gemessenen Stroms ausgeben sollte.

Der Injektionsstrom wird in 50mA -Schritten erhöht und die Temperatur ~~so~~ eingestellt, dass der ~~Photodiode~~ Photodiodenstrom ein Minimum ausfällt (durch probeweise Drehen des Temperaturreglers und Betrachten des Ausschlags der Photodiode).

$T [^\circ\text{C}]$	$I_{inj} [\frac{6}{30} \text{mA}]$	Kon. Temperatur
20	700	Für die Temperatur wird ein Fehler von $\Delta T = 0,5^\circ\text{C}$ angenommen, weil es beim Feststellen der Minima oftmals keine Änderung des Ausschlags festzustellen war.
20,5	650	
20,6	600	
21,4	550	
22,3	500	
23,1	450	Der Injektionsstrom hat sich im Gegensatz zu ① diesmal weniger verändert und es wird $\Delta I_{inj} = 5\text{mA}$ angenommen
23 23	400	
22,6	350	

Diese Werte werden wieder mithilfe des TR zu einer ~~ger~~ Gerade interpoliert.

Man erhält für eine Gerade der Form $y = a + bx$:

$a = 28,125^\circ\text{C}$ $b = -0,012^\circ\text{C}/\text{mA}$ → falsche Gerade, es sollte I über T und nicht (so wie hier) die Inverse bestimmt werden. Da aber nur alle Wertepaare wichtig waren und nicht ihre Koordinaten, macht das nichts

③

Nun wird die Kennlinie der Laserdiode bestimmt. Dabei wird der Nd:YAG-Kristall abgebaut, es soll ja ~~immer~~ die Leistung der Diode gemessen werden. ~~Man~~
 ungeschwächte

Zuerst wird der Injektionsstrom auf 700 mA gestellt und der Photodiodenstrom abgelesen. Dabei bewegt man sich entlang der in ② ermittelten Abwärtsgeraden, da so gewährleistet ist, dass immer dieselbe Wellenlänge ausgesendet wird.

Zum Injektionsstrom wird also aus ② die passende Temperatur bestimmt, die ~~ger~~ Schalter entsprechend eingestellt und der Photodiodenstrom abgelesen.

Die Leistung bestimmt sich dann durch Multiplikation ~~von~~ des I_{inj} mit der spektralen Empfindlichkeit der Photodiode.

I_{inj} [mA mA]	I_{PD} [$\frac{6}{30}$ mA]	T [°C] aus ②
700	9,5	19,7
650	8,4	20,3
600	7,2	20,9
550	6,2	21,5
500	5	22,1
450	4	22,7
400	3	23,3
350	2,1	23,9
300	1,4	24,5
250	0,4	25,1
200	0,02	25,7
150	0,01	26,3

~~ab 100~~ ~~was bei~~ ~~der~~ ~~Temperatur~~ ~~bestimmt~~ ~~werden~~

④

Nun soll die Kennlinie des Nd:YAG-Lasers bestimmt werden. Nach einiger Feinjustage des in der Aufgabe geforderten Aufbaus konnten folgende Werte ermittelt werden:

I_{inj} [mA]	I_{po} [$\frac{1}{30}$ mA]	T [%]
700	14,5	19,7
650	12,5	20,3
600	10,4	20,9
550	8,8	21,5
500	6,8	22,1
450	4,1	22,7
400	2,5	23,3
350	1	23,9
300	0,3	24,5
250	0,005	25,1
200	0,002	25,7
150	0	26,3

Für die Auswertung wird zusätzlich folgendes benötigt:

~~B639, welche $d=1$ mm besitzt Transmission von $T=0,87$ bei 530 nm~~

Aus den Informationsblättern der Firma Schott liest man für die Filter

ab:

λ [nm]	T
1060	0,64
1070	0,68

λ [nm]	T	T_i
530	0,87	0,96
540	0,86	0,94

Die Ausbildung von transversalen Moden wurde durch ein rundes Strahlprofil erfolgreich verhindert.

⑤

Für die Frequenzverdopplung wird nun ein anderer Bereich des beim Ablesen des Photodiodenstroms gemessenen. Zudem wurde der KTP-Kristall *

$I_{PD} \left[\frac{0,6}{30} \text{ mA} \right]$	$I_{inj.} \text{ [mA]}$	$T \text{ [}^\circ\text{C]}$
4,9	700	siehe andere Tabellen
4,2		↓
3		⋮
1,5		
1		
0,3		
0,2		
0,18		

Diese Tabelle wurde mit B639 erstellt, rote Aufträge wurden gelockert zusätzlich

* hinter den Nd:YAG-Kristall gesetzt, um grünes Licht der doppelten Frequenz und somit Wellenlänge von 532nm zu erhalten.

Die Phasenanpassung ist bereits durch die präzise Aufbereitungsweise gewährleistet, nach einer Feinjustage konnten folgende 2 Tabellen erstellt werden:

Mit R61000 (grüne Perle ausgeblendet) erhält man:

$I_{PD} \left[\frac{6}{30} \text{ mA} \right]$	$I_{inj} \text{ [mA]}$	$T \text{ [}^\circ\text{C]}$
7,2	700	197
6,1	?	?
5,2		
4		
2,8		
2		
1		
0,04		
0,002		
0,001		
0,001 \rightarrow ab hier Tageslicht		

Das Ergebnis war ~~zu~~ zu erwarten, ~~da~~ da Frequenzverdopplung in diesen Energiebereichen nur 1% der vom Nd:YAG-Laser emittierten Strahlung ausmacht, weshalb die Leistung der ersten Tabelle geringer als die der zweiten sind.

⑥

Zielset ~~soll~~ soll ein kommerzieller Laserpointer mit dem bisher verwendeten Aufbau verglichen werden. Der bisher verwendete wurde bei einer Betriebsspannung von 3V betrieben.

Für den neuen liegt vor:

2,86V Betriebsspannung bei 200mA. Die opt. Leistung beim B639

beträgt $9 \cdot \frac{0,6}{30} \text{ mA}$.

Beim R61009 beträgt die opt. Leistung $0,3 \cdot \frac{0,06}{30} \text{ mA}$ bei 200mA und 2,86V.

☒ Für den Aufbau gilt (Vermessen mit Lineal):

Abstand sph. Spiegel zu Nd:YAG-Kr.: 8cm

Abstand Nd:YAG-Kr. zu KTP-Kr.: 1,5cm

Abstand Kollimator zu Diodenlaser: 11cm

Abstand Kollimator zu Nd:YAG-Kr.: 7,5cm

~~Abstand~~