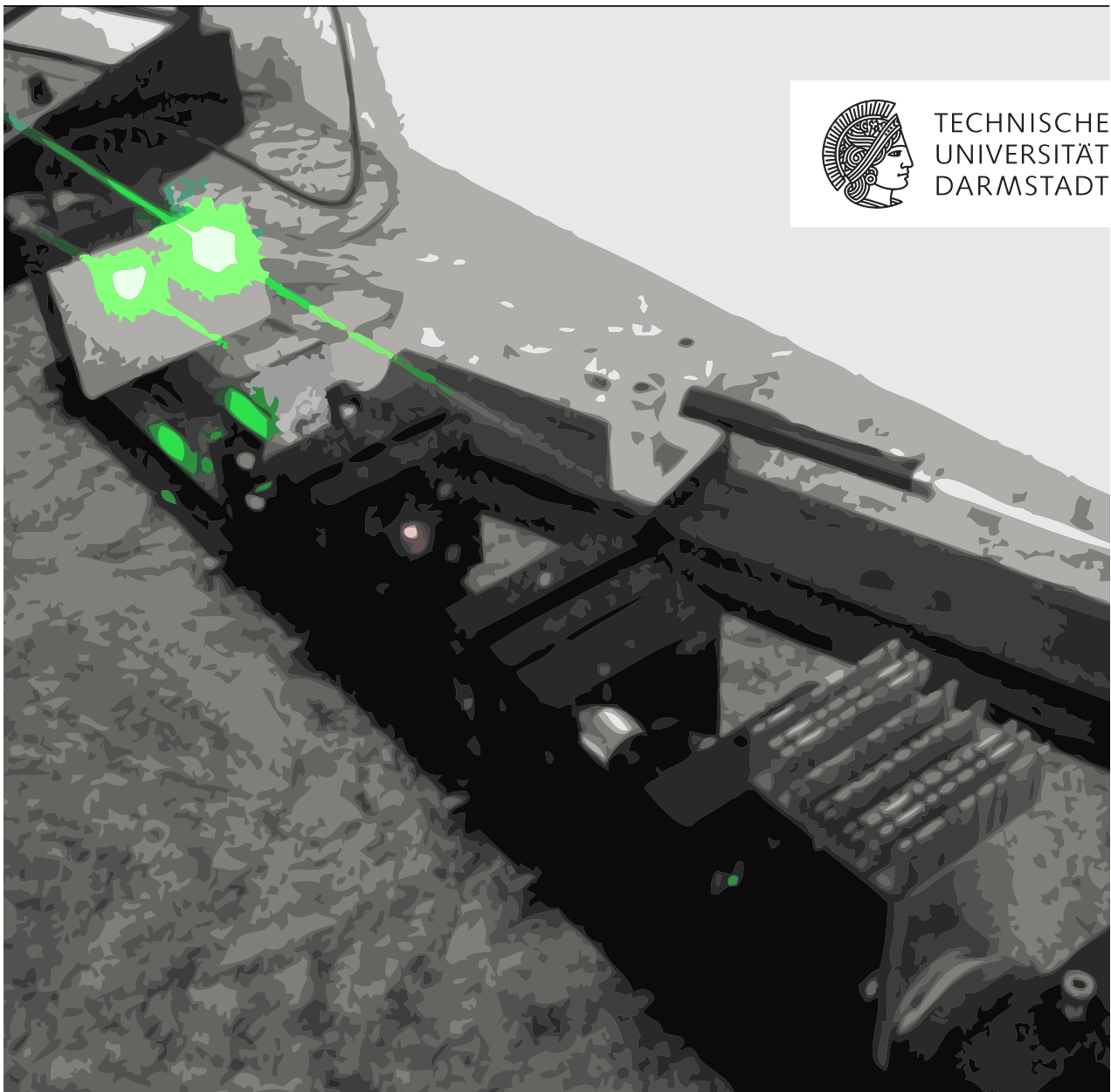

Versuch 4.6: Laserdioden-gepumpter Nd:YAG-Laser und Frequenzverdopplung

Abteilung A: Institut für Angewandte Physik
Physikalisches Praktikum für Fortgeschrittene



1. Vor der Durchführung

FP4.6, Version 1.8 (30.03.2026), Autoren: I. Fischer, S. Mandre.

Aktualisierung: L. Drzewietzki, S. Breuer, O. Nikiforov, T. Grunwitz, M. Sinther

Institut für Angewandte Physik, Abteilung A

1.1. Vorbereitung

- Die für den Versuch relevanten Themengebiete umfassen folgende Punkte. Die hierzu notwendige Literatur, die zu lesen ist, ist im nächsten Abschnitt im Detail referenziert.
 - Bestandteile und Funktionsprinzip eines Lasers
 - Halbleiter-(Dioden-)Laser
 - Nd:YAG-Laser
 - Grundlagen der nichtlinearen Optik
 - Frequenzverdopplung
 - Umgang mit Lasern / Laserschutz
 - Bitte die **Fragen in der Anleitung beantworten**.
 - Bitte die Aufgaben in der Durchführung und der Auswertung **vor** dem Versuch anschauen.
 - Ein Notebook oder alternativ Millimeterpapier und Taschenrechner mitbringen.
-

1.2. Literatur

Zur Vorbereitung des Versuches sind folgende Literaturquellen bitte *zu lesen!* Diese befinden sich alle in den Literaturlisten. (Die online links sind nur aus dem TUD-Netz oder per TUD-VPN erreichbar.)

1. aus F.K. Kneubühl, M.W. Sigrist: Laser (Grundlagen zu Laserprinzip, Halbleiter- und Nd:YAG-Laser).
2. aus W. Koechner: Solid state laser engineering (zum Nd:YAG-Laser). e-book link
3. aus W. Demtröder: Laserspektroskopie, Kapitel 5.7 (zur Frequenzverdopplung). e-book link
4. aus L. Bergmann, C. Schäfer: Optik, Kapitel 8 (Grundlagen der Nichtlinearen Optik).
5. aus C.E. Wieman, L. Hollberg: Using diode lasers for atomic physics (Literaturliste) Review of Scientific Instruments 62, 1 (1991), Teil 111 G: 1001 ways to kill a laser. paper link
6. Laserschutzunterlagen: Gefahren beim Arbeiten mit Lasern, Laserklassifikation.

Bei Interesse und zur weiterführenden Lektüre empfehlen sich folgende Literaturquellen.

1. aus H. Fouckhardt: Photonik (weitere Grundlagen zum Halbleiterlaser).
 2. C.E. Wieman, L. Hollberg: Using diode lasers for atomic physics (Literaturmappe) in Review of Scientific Instruments 62, 1 (1991) (Eigenschaften des Halbleiterlasers für den praktischen Gebrauch).
paper link
 3. R.F. Belt, G.Gashurov, Y.S.Liu: KTP as a harmonic generator for Nd:YAG-lasers (Literaturmappe) (alles rund um den KTP-Kristall).
 4. aus W. Koechner: Solid state laser engineering (Literaturmappe) (zu Resonatorgeometrien, deren Stabilität und zu transversalen Moden). e-book link
-

1.3. Versuchsziel

In diesem Versuch werden physikalische Eigenschaften von zwei wichtigen Festkörperlaser-Typen untersucht: dem Halbleiterlaser (oder auch Laserdiode) und dem Nd:YAG-Laser. Der Halbleiterlaser dient in diesem Versuch zum optischen Pumpen des Nd:YAG-Lasers. Durch diese Konfiguration sind extrem kompakte Festkörperlaser möglich geworden, die hohe Ausgangsleistungen erlauben oder selbst in Laserpointern Platz finden.

Um den Nd:YAG-Kristall effektiv pumpen zu können wird dessen Absorptionsverhalten bei Variation der Halbleiterlaserparameter Temperatur und Injektionsstrom vermessen. Beide Laser werden mittels ihrer Lichtleistungs-/Pumpleistungs-Kennlinien charakterisiert. Schließlich wird die im Nd:YAG-Resonator vorhandene hohe Lichtintensität dazu genutzt, effiziente nichtlineare Wechselwirkung von Licht mit Materie zur Erzeugung von Licht neuer Frequenzen zu nutzen. Hierzu wird die Lichtfrequenz des Nd:YAG-Lasers mittels eines KTP-Kristalls verdoppelt. Anhand dieses Aufbaus und des so erzeugten grünen Lichtes können einige grundlegende nichtlineare optische Eigenschaften und Resonatoreigenschaften demonstriert werden.

1.4. Theorie

1.4.1. Grundlagen der Laseremission

Laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) sind Lichtquellen, mit denen hohe spektrale Reinheit und große Leistungsdichten erzielt werden können. Sie sind ein fester Bestandteil der modernen Physik, als auch der Technik. Beispiele für Bereiche, in denen Laser zum Einsatz kommen sind die optische Nachrichtenübertragung, optische Speicher, CD-Spieler, Laserdrucker, in der Metrologie, in Medizin und in der Materialbearbeitung. In der Physik haben sie vor allem im Bereich der Spektroskopie neue Möglichkeiten eröffnet und zu neuen Erkenntnissen geführt. Durch die hohen spektralen Leistungsdichten werden in der Wechselwirkung von Licht und Materie insbesondere nichtlinear optische Prozesse relevant, wie Frequenzverdopplung oder Erzeugung von Mischfrequenzen.

Das Laserprinzip beruht auf der kohärenten Lichtverstärkung in einem optisch aktiven Medium, das sich in einem optischen Resonator befindet. Als aktives Medium können atomare oder molekulare Gase, Festkörper oder auch Flüssigkeiten dienen (einen Überblick über mögliche Lasermedien bietet z.B. [1]). Voraussetzung für Lichtverstärkung ist das Vorhandensein einer Besetzungsinversion zwischen zwei Energie-Niveaus. In Abbildung 1.1 sind verschiedene Niveau-Schemata dargestellt. Durch einen Anregungs- oder Pumpvorgang (*Welche Anregungsvorgänge gibt es?*) wird das System aus dem Grundzustand mit der Energie E_0 in einen höheren Energiezustand E_1 gehoben. Je vollständiger die Umkehr der Besetzungszahlen gelingt, umso

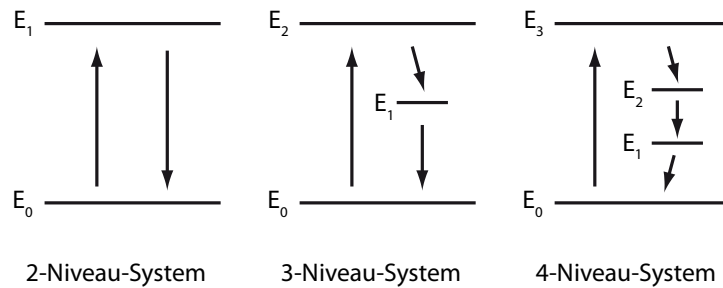


Abbildung 1.1.: Niveauschemata für den Laserbetrieb.

effektiver verläuft die Verstärkung durch stimulierte Emission. Ist das Niveau E_0 leer und das Niveau E_1 voll besetzt, so kann ein eingestrahktes Photon der Energie $\delta E = E_1 - E_0$ nicht absorbiert werden; es muss bei Wechselwirkung mit dem System einen Emissionsprozess aus dem besetzten Niveau E_1 auslösen.

Optisch gepumpte Systeme haben mindestens 2, nicht-optisch gepumpte Systeme haben mindestens 3 Niveaus. In einem 2-Niveau-System ist keine Besetzungsinversion zu erzielen (*Warum nicht?*). Man benötigt dazu weitere Hilfsniveaus. Beim 3-Niveau-System erfolgt die Anregung aus dem Grundzustand E_0 in das instabile Hilfsniveau E_2 . Aus diesem Niveau erfolgt ein schneller Übergang der Energie durch strahlungslose Relaxationsprozesse in das metastabile Niveau E_1 . Durch diesen schnellen Relaxationsprozess bleibt das Niveau E_2 auch bei hoher Anregung stets nahezu leer, so dass kein Sättigungseffekt den Anregungsvorgang behindert. Durch den metastabilen Zustand E_1 ist im oberen Laserniveau eine hohe Besetzungsdichte erreichbar. Damit wird die Laserbedingung $N_1 > N_0$ bei ausreichend starker Anregung erfüllbar.

Beim 4-Niveau-System existiert eine vierte Energiestufe, so dass der Laserübergang nicht im Grundniveau endet, sondern in einem darüberliegenden Niveau. Auf diese Weise werden Laserniveau und Grundzustand des aktiven Mediums voneinander getrennt. Von dieser vierten Stufe erfolgt durch strahlungslose Relaxationsprozesse ein schneller Übergang in den Grundzustand. Durch die so erzielbaren geringen Besetzungszahlen des unteren Laserniveaus lässt sich die Besetzungsinversion noch einfacher bei geringeren Pumpleistungen realisieren. Das Auslösen der Laseremission geschieht dann durch spontane Emissionsprozesse im Resonator. (*Welche Bedingung muss ein Resonator für einen stabilen Laserbetrieb erfüllen?*)

1.4.2. Eigenschaften des Halbleiterlasers

Bereits kurz nach der Verwirklichung der ersten Laser 1960, wurden 1962 die ersten Laser realisiert, die Halbleitermaterial als aktives Medium verwenden. Für den Laserbetrieb eignen sich im Wesentlichen nur Halbleiter mit einer direkten Bandlücke. Dies gilt für viele der III/V- und II/VI-Halbleiter und der entsprechenden Legierungen. Aus diesen Materialien können Halbleiterlaser im Spektralbereich von ca. 400 nm bis ca. 3 μm realisiert werden. Ein sehr wichtiges Lasermaterial ist GaAs/AlGaAs, aus dem auch der hier verwendete Halbleiterlaser besteht. Seine Emissionswellenlänge liegt bei ca. 800 nm. Die Besonderheit von Halbleitermaterial als Lasermaterial besteht darin, dass die am Laserprozess beteiligten Energie-Niveaus als (quasi-)kontinuierliche Energiebänder und nicht als diskrete Niveaus vorliegen. (*Warum?*) Es sind dies Leitungs- und Valenzband des Halbleiters, die durch die Bandlückenenergie W_g voneinander getrennt

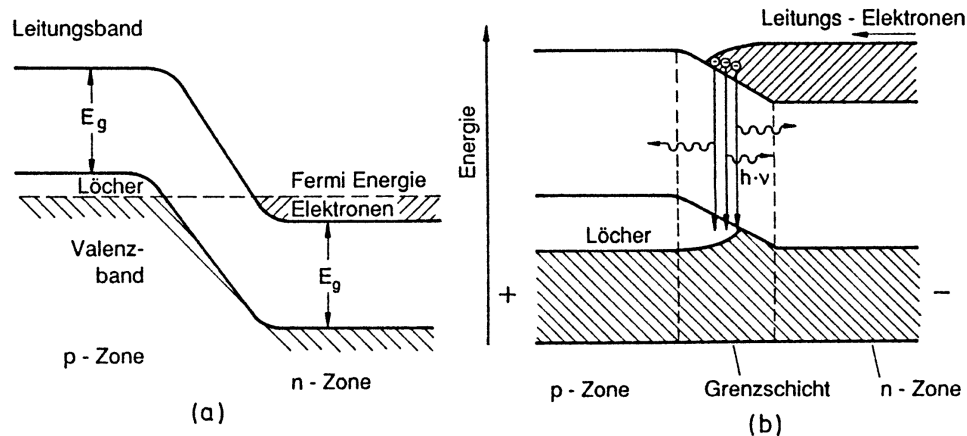


Abbildung 1.2.: Skizze zum Prinzip einer Halbleiterdiode aus [3]. (a) pn-Übergang ohne angelegte Spannung. (b) Laserbetrieb bei Spannung in Durchlassrichtung.

sind. Die für den Laserbetrieb notwendige Besetzungsinversion bedeutet für das Halbleitermaterial, dass im Leitungsband Energieintervalle mehr als zur Hälfte mit Elektronen und im Valenzband mehr als zur Hälfte mit Löchern (fehlende Elektronen) besetzt sind. Da die Relaxationsprozesse der Ladungsträger innerhalb der Bänder sehr viel schneller ablaufen als beispielsweise die Wechselwirkungsprozesse mit dem Gitter, lässt sich das entstehende dynamische Gleichgewicht meist als ein Quasi-Gleichgewichtssystem beschreiben, in dem jeweils die Elektronen im Leitungsband und die Löcher im Valenzband untereinander im thermodynamischen Gleichgewicht sind. Wie alle besetzungsinvertierten Systeme ist der Halbleiter als Ganzes natürlich in einem thermodynamischen Nichtgleichgewichtszustand. Die Besetzungswahrscheinlichkeit $f(W)$ der Zustände in Leitungs- und Valenzband mit der Energie W genügt somit einer Quasi-Fermi-Statistik:

$$f(W) = \frac{1}{1 + e^{(W - W_{F(L,V)}) / (k_B T)}}$$

wobei $W_{F(L,V)}$ die Quasi-Fermienergien im Leitungs- bzw. Valenzband sind, k_B die Boltzmannkonstante und T die Temperatur. Als notwendige Laserbedingung (Inversionsbedingung) ergibt sich somit:

$$W_g < h\nu < W_{F,L} - W_{F,V}$$

Dies ist die sogenannte Bernard-Duraffourg'sche Laserbedingung. Das Pumpen zur Erzeugung der Besetzungsinversion erfolgt in Halbleiterlasern meistens durch Ladungsträgerinjektion in einen p-n-Übergang, d.h. man schickt elektrischen Strom durch die Laserdiode (siehe Abbildung 1.2).

Zunächst konnten Halbleiterlaser nur gepulst und bei tiefen Temperaturen betrieben werden, seit 1970 ist kontinuierliche Emission bei Raumtemperatur möglich. Eine wesentliche Rolle spielt hierbei die Strukturierung des Halbleitermaterials, insbesondere die Realisierung des p-n-Übergangs als Homo- und später als Doppelheterostruktur. Abbildung 1.3 zeigt einen typischen Aufbau heute verwendeter kantenemittierender Halbleiterlaser. Als Resonatorspiegel dienen die Kristallendflächen, die man durch Spalten des Kristalls entlang bestimmter Kristallachsen erhält. Deren Reflektivität beträgt nur aufgrund des Brechungsindex-Sprunges ($n(\text{GaAs}) = 3,6$) ca. 32%. Dies reicht in vielen Fällen bereits aus, um Lasertätigkeit zu ermöglichen. Zusätzlich können noch Ver- bzw. Entspiegelungsschichten auf die Laserfacetten

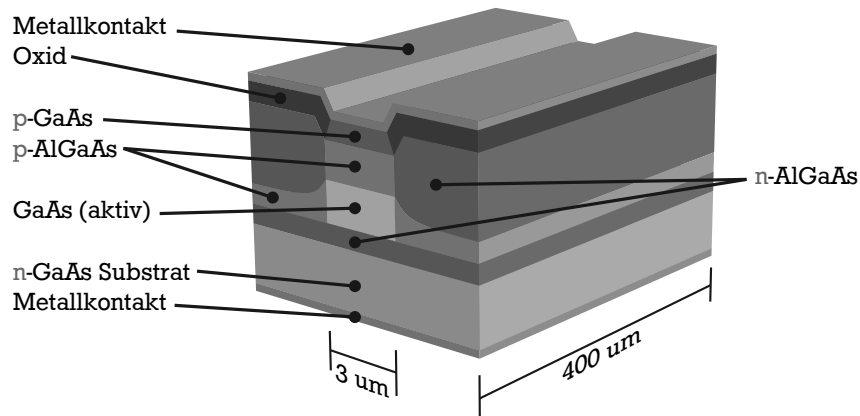


Abbildung 1.3.: Doppelheterostruktur eines GaAs/AlGaAs-Halbleiterlasers.

aufgebracht werden. Das Licht wird in Halbleiterlasern sowohl in lateraler (in der Wachstumsebene) als auch in vertikaler (in Wachstums-) Richtung geführt. Dies geschieht in vertikaler Richtung durch die Doppelheterostruktur, d.h. durch das Einbetten der aktiven Zone (GaAs) in Schichten aus GaAlAs, das einen etwas kleineren Brechungsindex besitzt. Da GaAlAs außerdem eine etwas größere Bandlücke besitzt, erreicht man zudem ein Einschließen der Ladungsträger in den Bereich, in dem die Rekombination stattfinden soll. In lateraler Richtung kann die Führung ebenso durch Einbetten in ein Material mit geringerem Brechungsindex geschehen (Indexführung), oder aber durch ein räumlich definiertes Pumpprofil (Gewinnführung).

Halbleiterlaser weisen eine Abhängigkeit der Emissionswellenlänge sowohl von der Temperatur, als auch von dem Injektionsstrom auf. Dabei steigt die Emissionswellenlänge des hier verwendeten Halbleiterlasers bei Erhöhen der Temperatur im betrachteten Bereich um ca. 0,25 nm/K. (Die tatsächlichen Werte hängen von der Bauart und von dem Material des Lasers ab.) Zudem steigt die Emissionswellenlänge bei wachsendem Injektionsstrom um ca. 0,05 nm/mA. Die starke Temperaturabhängigkeit der Wellenlänge hat ihre Ursache in einer Vergrößerung der optischen Weglänge im Lasermedium und einer Verschiebung des Gewinnprofils mit wachsender Temperatur. Die Abhängigkeit vom Injektionsstrom liegt in der Änderung des Brechungsindex und ebenso des Gewinnprofils bei steigender Elektron-Loch-Paar-Dichte begründet. In diesem Versuch wird diese Durchstimmbarkeit der Wellenlänge ausgenutzt, um das Absorptionsprofil des Nd:YAG-Kristalls zu vermessen und hinterher optimale Pumpabsorption für den Laserbetrieb des Nd:YAG-Lasers zu gewährleisten. Dabei muss beachtet werden, dass auch die Verlustmechanismen eine starke Temperaturabhängigkeit aufweisen und somit die emittierte Leistung des Halbleiterlasers bei steigender Temperatur sinkt.

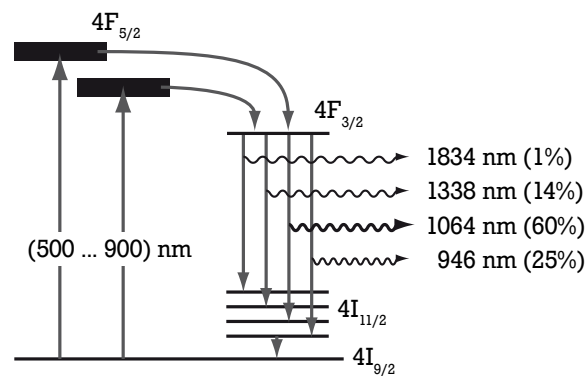


Abbildung 1.4.: Energieniveauschema des Nd:YAG-Lasers.

1.4.3. Nd:YAG-Laser

Nd:YAG ist eines der wichtigsten aktiven Medien für Festkörperlaser. Der Wirtskristall besteht aus Yttrium-Aluminium-Granat ($Y_3Al_5O_{12}$), einem Kristall hoher optischer Qualität und guter Wärmeleitung. Zur Herstellung des Nd:YAG-Laserkristalls wird der Wirtskristall dotiert, wobei circa 1 % der Y^{3+} -Ionen durch Nd^{3+} -Ionen ersetzt werden. Die Energieniveaus der Neodymionen spalten im Substrat unter dem Einfluss des Kristallfeldes zu breiten Bändern auf. Diese Bänder dienen als Anregungsniveaus. Die Anregung erfolgt durch optisches Pumpen. Sie kann einerseits mit Hilfe von Blitzlampen geschehen, oder aber wie hier mit einem Halbleiterlaser. Letzteres bringt einige signifikante Vorteile für die Effizienz der Anregung, eine geringe Linienbreite der Laseremission oder auch für eine kompakte Bauweise. Der Nd:YAG-Laser ist ein 4-Niveau-Laser. Das Termschema ist in Abbildung 1.4 dargestellt.

Aus dem oberen angeregten kurzlebigen Zustand erfolgt ein schneller strahlungsloser Übergang in das metastabile Niveau $4F_{3/2}$. Dadurch ist die Besetzungsdichte im Anregungsniveau sehr gering, so dass auch bei starker Energiezufuhr das Anregungsniveau stets nahezu leer bleibt. Es bestehen gute Bedingungen für einen kontinuierlichen effektiven Anregungsvorgang. Durch die lange Lebensdauer der Ladungsträger von $240 \mu s$ im metastabilen oberen Laserniveau $4F_{3/2}$ hat dieses Niveau eine hohe Besetzungsdichte. Der bevorzugte Laserübergang von $4F_{3/2}$ nach $4I_{11/2}$ (Übergangswahrscheinlichkeit: 60 %) liefert die energiereiche 1064 nm Emissionslinie. Vom unteren Laserniveau erfolgt mit einer Zeitkonstanten von $10^{-7} s$ ein strahlungsloser Übergang in den Grundzustand. Aufgrund der geringen Besetzungsdichte im unteren Laserniveau ist eine hohe Besetzungsinversion mit moderaten Pumpraten möglich.

1.4.4. Nichtlineare Optik / Frequenzverdopplung

Trifft Licht hoher spektraler Leistungsdichte auf Materie, so ist in der Regel die dadurch erzeugte Mediums-Polarisation \vec{P} , die wiederum selbst eine elektromagnetische Welle abstrahlt, keine lineare Funktion der Feldstärke mehr. Das Superpositionsprinzip für auftreffende Wellen gilt in diesem Fall nicht mehr. Man spricht von dem Bereich der Nichtlinearen Optik. Mit der Entwicklung des Lasers wurde dieser Bereich sehr gut zugänglich und hat zu einer Vielzahl von Anwendungen für technische und wissenschaftliche Zwecke geführt (*Welche? siehe Literatur*).

Zur Klassifikation der verschiedenen auftretenden Phänomene entwickelt man die Polarisation nach Potenzen des elektrischen Feldes:

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

Im Allgemeinen sind auch die Suszeptibilitäten $\chi^{(n)}$ noch frequenzabhängig. Der lineare Term mit $\chi^{(1)}$ beschreibt beispielsweise Brechung und lineare Absorption. Zu den sogenannten $\chi^{(2)}$ -Effekten zählen Erzeugung der zweiten Harmonischen, parametrisches Mischen wie Erzeugung von Summen- und Differenzfrequenzen oder optische Gleichrichtung. Unter die $\chi^{(3)}$ -Effekte fallen z.B. Erzeugung der dritten Harmonischen, Raman- und Brillouin-Streuung, Kerr-Effekt oder Vierwellenmischen.

Darüber hinaus gibt es noch Effekte höherer Ordnung, die aber in der Regel keine bedeutende Rolle spielen. Hier steht nun ein fundamentaler $\chi^{(2)}$ -Effekt im Mittelpunkt der Untersuchungen: die optische Frequenzverdopplung. Dies war zudem der als erster beobachtete nichtlinear-optische Effekt. Frequenzverdopplung heißt, dass ein Teil des einfallenden optischen Feldes in ein Feld der doppelten Frequenz umgewandelt wird. Die Effizienz dieses Prozesses hängt von den nichtlinear-optischen Koeffizienten des verwendeten Materials ab. Als effiziente nichtlineare Materialien werden oft doppelbrechende Kristalle eingesetzt (*Warum?*). Verbreitete Anwendung finden z.B. KTP (Kalium-Titanyl-Phosphat), LiO₃ (Lithium-Jodat), LiNbO₃ (Lithium-Niobat), BBO (Barium-Beta-Borat) oder LBO (Lithium-Borat).

In diesem Versuch wird ein KTP-Kristall dazu verwendet, die Frequenz des Nd:YAG-Laserlichts zu verdoppeln. Auf diese Weise kann infrarotes Nd:YAG-Licht ($\lambda = 1064 \text{ nm}$) in sichtbares (grünes) Licht mit der Wellenlänge $\lambda = 532 \text{ nm}$ umgewandelt werden. Um in der Praxis effiziente Frequenzverdopplung zu erzielen, spielen neben den nichtlinear optischen Koeffizienten auch noch die Dispersion des Mediums und die Strahlform eine bedeutende Rolle. Damit man nicht bereits während der Erzeugung destruktive Interferenz erhält, muss das Material für das Licht der fundamentalen und der verdoppelten Frequenz denselben Brechungsindex besitzen (*Warum?*). Diese Anpassung bezeichnet man als Phasenanpassung oder "phase matching". (*Welche Methoden des Phase Matching existieren? Mit welchen Faktoren skaliert die Effizienz der Frequenzverdopplung?*)

2. Experiment

Der Versuchsaufbau wird im Verlauf des Praktikumstages kontinuierlich entwickelt und erweitert. Die für die einzelnen Versuchsaufgaben nötigen Komponenten sind dabei in der Anleitung jeweils angegeben.

2.1. Allgemeines

Generell sollten folgende wichtigen Punkte beachtet werden:

- Anschließen der Laserdiode an das Steuergerät darf nur bei ausgeschaltetem Netzschalter erfolgen!
- Vor allen Veränderungen des Versuchsaufbaus, insbesondere im Strahlengang, muss der Injektionsstrom auf 0 mA eingestellt und der Schlüsselschalter auf die Position AUS gedreht werden!
- Es dürfen keine spiegelnden oder gerichtet reflektierenden Gegenstände in den Laserstrahl gebracht werden (Ring, Uhr, ...)!

2.2. Versuchsablauf

1. Absorption von Nd:YAG Es wird folgender Aufbau benötigt: Laserdiode, Kollimator, Fokussierlinse, einseitig antireflexbeschichteter Nd:YAG-Kristall, optischer Abschwächer ($T = 2,5\%$) und Photodiode.

Um die Abhängigkeit der Zentralwellenlänge der Laserdiodenstrahlung von Temperatur und Injektionsstrom zu bestimmen, bedient man sich der bekannten Absorptionslinien von Nd:YAG. Die Maxima der Absorption liegen bei Wellenlängen von 804,4 nm, 808,4 nm, 812,9 nm und 817,3 nm. (Siehe auch ausliegendes Absorptionsspektrum.)

Zur Messung regelt man zunächst die Temperatur auf $T = 12^\circ\text{C}$ und stellt danach den maximal erlaubten Injektionsstrom ein. Durch Änderung der Temperatur bei konstantem Injektionsstrom wird die Wellenlänge des Laserlichts durchgestimmt. Man misst zum einen die Intensität des durch den Nd:YAG-Kristall transmittierten Lichts zwischen $T = 12^\circ\text{C}$ und $T = 40^\circ\text{C}$ und zum anderen die Intensität der Laserdiodenstrahlung ohne Nd:YAG-Kristall bei ansonsten unverändertem Aufbau im gleichen Temperaturintervall.

Aus den gemessenen Werten wird die relative Absorption berechnet und als Funktion der Temperatur aufgetragen. Den Maxima ordnet man die obigen Zentralwellenlängen zu.

2. Arbeitsgerade der Laserdiode Es wird derselbe Aufbau benötigt wie unter 1. mit Nd:YAG-Kristall.

Für die weitere Versuchsdurchführung ist es notwendig, die Pumpleistung zu variieren, dabei jedoch die Zentralwellenlänge der Laserdiode konstant zu halten. Hierfür muss die Temperatur der Laserdiode entsprechend nachgeführt werden. Die Geraden konstanter Zentralwellenlänge im Lichteleistungs-/Temperatur-Diagramm werden als Arbeitsgeraden bezeichnet. Im folgenden soll die Arbeitsgerade für $\lambda = 808,4\text{ nm}$ bestimmt werden. Der aus 1. bekannte Wert maximaler Absorption

kann nun mit höherer Präzision ermittelt werden. Anschließend nimmt man den Punkt maximaler Absorption für weitere vier Werte des Injektionsstroms auf. (*Wie geht man dabei effektiv vor?*) Durch die fünf so erhaltenen Wertepaare (I, T) legt man die Arbeitsgerade falls möglich.

3. Kennlinie der Laserdiode Es wird derselbe Aufbau benötigt wie unter 1. und 2., aber ohne Nd:YAG-Kristall.

Mit der Photodiode (mit Abschwächer) nimmt man die Kennlinie (P/I-Diagramm) der Laserdiode auf; dabei bewegt man sich entlang der Arbeitsgeraden. (*Warum?*)

4. Kennlinie des Nd:YAG-Lasers Es wird folgender Aufbau benötigt: Laserdiode, Kollimator, Fokussierlinse, einseitig antireflexbeschichteter Nd:YAG-Kristall ($l = 5 \text{ mm}$), sphärischer Resonatorspiegel ($r = 100 \text{ mm}$), Farbfilter RG1000 und Photodiode.

Zur Justage des Nd:YAG-Resonators richtet man zunächst den Nd:YAG-Kristall senkrecht zur optischen Achse aus (*Wie?*) Danach wird der sphärische Resonatorspiegel, der als Auskoppelspiegel dient, genauso vorjustiert. *In welchem Abstand zum Nd:YAG-Kristall soll sich der Hohlspiegel befinden?* Diese Grundjustage sollte ausreichen um bereits Laseremission zu ermöglichen. Durch Verkippen von Spiegel und Nd:YAG-Kristall wird die Ausgangslichtleistung optimiert. Es ist im Hinblick auf die nächste Aufgabe darauf zu achten, dass sich keine höheren transversalen Moden ausbilden. (*Warum?*) Vor der Aufnahme der Kennlinie ist noch zu prüfen, ob durch Verschieben des Fokus die Nd:YAG-Laser-Ausgangsleistung erhöht werden kann.

Bestimmen Sie für die Auswertung aus den ausliegenden Datenblättern die Transmission von BG39 (3 mm) und RG1000-Filter (3 mm). Siehe dazu Kapitel 3.

5. Intracavity-Verdopplung mit einem KTP-Kristall Es wird derselbe Aufbau benötigt wie unter 4., jedoch nun mit Farbfilter BG39 und anschließend RG1000.

In den auf maximale Ausgangsleistung justierten Resonator des Nd:YAG-Lasers (ausgeschaltet!) wird nun der KTP-Verdopplerkristall eingesetzt. (*Wohin?*) Durch Phasenanpassung des KTP-Kristalls (*Wie?*), sowie durch Nachjustieren des Resonators, wird die Ausgangsleistung des grünen Lichts ($\lambda = 532 \text{ nm}$) maximiert. Nun nimmt man die Intensität des grünen frequenzverdoppelten Lichtes *und* anschließend des infraroten Nd:YAG-Lichtes als Funktion des Injektionsstroms der Laserdiode auf. (*Was erwartet man?*)

6. Charakterisierung eines kommerziellen Laserpointers In Aufgaben 1 bis 5 wurde Schritt für Schritt ein grüner Laser ($\lambda = 532 \text{ nm}$) aufgebaut. Tatsächlich wird das gleiche Prinzip eingesetzt, um kompakte Lasersysteme zu verwirklichen. Ein solches kompaktes System liegt in Form eines grünen Laserpointers vor. Das Grundprinzip dieses kommerziellen Laserpointers stimmt mit dem des Lasersystems überein, das im Laufe des Versuchs aufgebaut wurde, allerdings sind Details nicht bekannt.

Welche Untersuchungen können für eine Grundcharakterisierung des Laserpointers in Betracht gezogen werden? In Absprache mit dem Betreuer sollen mögliche Untersuchungen diskutiert und eine dieser Möglichkeiten durchgeführt werden.

Es wird folgender Aufbau benötigt: Laserpointer, Farbfilter und Photodiode.

Der Betriebsstrom des Laserpointers kann variiert werden, wird allerdings von einer internen Elektronik auf maximal 200 mA begrenzt. Die angelegte Spannung sollte 3,2V nicht überschreiten.

3. Auswertung

3.1. Zusätzliche Daten für die Auswertung

- Für die Auswertung sind die Transmission von BG39- (3 mm) und RG1000-Filter (3 mm) (Hersteller Schott) aus den Datenblättern zu bestimmen. Diese findet man mit entsprechender Suche auch leicht im Internet. Bitte auf die angegebene Dicke in den Datenblättern achten. Hierbei bedeutet τ_i die interne Transmission, also alleinige Absorptionsabschwächung und τ die Gesamttransmission, also Absorptionsabschwächung *und* Reflexionen an den beiden Grenzflächen für die angegebene Dicke. Alternativ ist der Reflexionsfaktor gegeben, der der Quotient aus Transmission und interner Transmission ist.
- Die spektrale Empfindlichkeit der Photodiode (Photostrom/Lichtleistung) ist:
 - bei 810 nm: 0,57 A/W
 - bei 1064 nm: 0,22 A/W
 - bei 532 nm: 0,28 A/W
- Die Transmission des Abschwächungsfilters beträgt 0,025 (Aufgaben 1 bis 3).

3.2. Aufgaben

Stellen Sie die Eigenheiten von Halbleiterlaser und Nd:YAG-Laser kurz dar und beschreiben Sie den Versuchsablauf. Berücksichtigen Sie dabei folgende Punkte:

1. zum Halbleiterlaser:

- a) Zeichnen Sie die Lichtleistungs-/Injektionsstrom-Kennlinie des Halbleiterlasers und bestimmen Sie seinen Schwellstrom I_{th} .
- b) Bestimmen Sie die differentielle Quanteneffizienz $\eta_{ext} = \frac{eP_{out}}{h\nu(I-I_{th})}$ des Halbleiterlasers. Welche physikalische Bedeutung hat dieser Parameter?

2. zum Nd:YAG:

- a) Zeichnen Sie die Nd:YAG-Leistungs-/Pumpleistungs-Kennlinie des Nd:YAG-Lasers und bestimmen Sie seine Schwelleistung P_{th} .
- b) Bestimmen Sie den Quantenwirkungsgrad ϵ des Laserdioden-gepumpten Nd:YAG-Lasers (Energie des Laserphotons/Energie des Pumpphotons).
- c) Zeichnen Sie die totale Leistungseffizienz η_p des Nd:YAG-Lasers (Nd:YAG-Laserleistung/Pumpleistung) in Abhängigkeit von der Pumpleistung. Hierbei eventuell den Störeinfluss des Umgebungslichts beachten. Diskutieren Sie die Diskrepanz zwischen dem Quantenwirkungsgrad ϵ und der totalen Leistungseffizienz η_p . Bitte auch Fehlerfortpflanzung beachten.

3. zur Frequenzverdopplung:

- a) Einfluss des Umgebungslichts: Lichtleistung und Fundamentalleistung als Funktion des Pumpstroms auftragen. Halbleiterlaser- und YAG-Schwellen eintragen. Das Störlicht ist die gemessene Leistung unterhalb der YAG-Schwelle und muss entsprechend für die folgenden Aufgaben von beiden Leistungen abgezogen werden.
- b) Zeichnen Sie den Lichtleistungs-/Fundamentalleistungs-Verlauf der Frequenzverdopplung. Die Fundamentalleistung wird approximiert durch die Summe der Leistungen des frequenzverdoppelten und fundamentalen Lichts.
- c) Bestimmen Sie die Konversionseffizienz γ SHG der Frequenzverdopplung (frequenzverdoppelte Leistung/Leistung der Fundamentalen) in Abhängigkeit von der fundamentalen Leistung und fitten Sie mit einer geeigneten Fitfunktion die Messdaten. Welche Abhängigkeit erwartet man? Bitte auch Fehlerfortpflanzung beachten.
- d) Welche maximale Konversionseffizienz wurde erreicht? Wie ließe sie sich weiter steigern? Diskutieren Sie auch den möglichen Einfluss des Nd:YAG-Laserstrahlprofils auf die Konversionseffizienz.

4. zur Charakterisierung des Laserpointers:

- a) Werten Sie die Messungen zur Charakterisierung des Laserpointers unter den bei der Durchführung des Versuchs besprochenen Gesichtspunkten aus.

Generelles zur Auswertung: Beim Fitten der Messdaten sollte überlegt werden welche Fit-Funktion physikalisch sinnvoll ist und welche Parameter eventuell fest sein sollten. Bitte Fehlerfortpflanzung bei der Angabe der Fehler z.B. für die Effizienzen beachten.

Wichtiges nochmals zur Erinnerung:

- Das Deckblatt muss folgende Informationen erhalten: Versuchsbezeichnung, den Namen des Betreuers, das Datum der Durchführung, die Namen und Matrikelnummern des Versuchsteams.
- Die *finale* Version der Ausarbeitung sollte in elektronischer Version beim Betreuer abgegeben werden.
- Das während des Experiments angefertigte Versuchsprotokoll ist mit allen Messdaten an die Ausarbeitung anzuhängen.
- Nach Abschluss der Erstkorrektur muss verpflichtend ein Gespräch mit beiden Versuchsteilnehmern über die Ausarbeitung geführt werden. Hierbei müssen beide in der Lage sein die wesentlichen Punkte der Auswertung zu erklären. Die Verwendung von KI muss gekennzeichnet werden.