

UNIVERSITÄT REGENSBURG

F-Praktikum

VERSUCH:
DIODEN-GEPUMPTER FESTKÖRPERLASER



18.01.2022

Inhaltsverzeichnis

1	Überblick	3
2	Versuchsvorbereitung	3
3	Der Versuchsaufbau	5
3.1	Der Dioden-gepumpte Festkörperlaser	5
3.2	Die Lasersteuerung	9
3.3	Weitere Versuchsutensilien	10
4	Lasersicherheit	11
4.1	Gefahren durch Laserstrahlung	11
4.2	Die Laserklassen	12
4.3	Sicherheitsvorkehrungen	16
5	Versuchsdurchführung	18
5.1	Strahlcharakteristik	18
5.2	Diodenkennlinien	19
5.3	Resonatoraufbau	19
5.4	Optimierung der infraroten Leistung bei 1064 nm	22
5.5	Frequenzverdopplung	22
5.6	Dynamische Lasereigenschaften	23
6	Versuchsauswertung	25
7	Literatur	27
8	Erklärung	28

1 Überblick

Durch den Einsatz eines Halbleiterlasers als Pumplichtquelle können kompakte und effiziente, sog. „Dioden-gepumpte Festkörperlaser“ (DPSS Laser: **D**iode **P**umped **S**olid State Laser) mit hoher Strahlqualität realisiert werden.

In diesem Versuch lernen Sie den Aufbau eines Dioden-gepumpten Nd:YVO₄-Lasers der bei 1064 nm emittiert mit Resonator-interner Frequenzverdopplung kennen. Zunächst untersuchen Sie die typischen Strahleigenschaften von Diodenlasern und deren elektrischen Charakteristika. Des weiteren werden Sie den Resonator des Nd:YVO₄-Lasers aufbauen und justieren, sowie die Lasertätigkeit bei unterschiedlichen Moden herbeiführen.

Nach Optimierung der infraroten Leistung folgt schließlich eine resonator-interne Frequenzverdopplung mittels eines KTP-Kristalls (Kaliumtitanylphosphat KTiOPO₄), d.h. es findet hier eine Umwandlung der infraroten Strahlung ($\lambda = 1064$ nm) in sichtbare grüne Strahlung ($\lambda = 532$ nm) statt. Auch hier können Sie die Lasertätigkeit bei unterschiedlichen Moden herbeiführen. Abschließend untersuchen Sie anhand der Relaxationsschwingungen die dynamischen Lasereigenschaften.

2 Versuchsvorbereitung

Anhand folgender Fragen sollten Sie Ihre Vorbereitung aufbauen. Die in Kapitel 7 aufgeführten Literaturangaben sollen Ihnen dabei eine Hilfestellung geben.

- Wie funktioniert ein Laser?
Erklären Sie hierbei den prinzipiellen Aufbau, sowie die Begriffe Besetzungsinversion, spontane und stimulierte Emission, ...
- Was ist ein Halbleiterlaser?
Klären Sie hierbei die Begriffe index- und verstärkungsgeführt (index- and gain-guided), Quantentrog (quantum well), Schwellstrom, differentieller Wirkungsgrad und Divergenz.
Wie schauen typische Spannungs-Strom- und Lichtleistungs-Strom-Kennlinien aus?
Wie lässt sich die Emissionswellenlänge eines Diodenlasers verändern?
- Welche Kollimierungsmöglichkeiten bieten sich für Laserdioden an?
Befassen Sie sich hierbei auch mit Gauß-Lichtbündeln.
- Informieren Sie sich über verschiedene Resonatorkonfigurationen und bestimmen Sie den Stabilitätsbereich des im Versuch verwendeten hemisphärischen Resonators.
- Was ist ein DPSS-Laser?
Erläutern Sie hier grob die Funktionsweise und die Vorteile gegenüber Diodenlasern bzw. lampengepumpten Lasern.

- Befassen Sie sich mit 4-Niveau-Systemen. Die Begriffe Ratengleichungen, Spiking und Relaxationsoszillationen sollten Ihnen geläufig sein.
- Die resonator-interne Frequenzverdopplung fällt in den Bereich der Nichtlinearen Optik. Nennen Sie Beispiele für nichtlineare optische Prozesse 2. und 3. Ordnung. Klären Sie die Begriffe Brechungsindexanpassung (Index-Matching), Phasenanpassung (Phase-Matching) und Konversion.
- Das Thema Lasersicherheit sollten Sie keinesfalls bei Ihrer Vorbereitung vergessen. Sie müssen sich der Gefahren und Verantwortung bei diesem Praktikumsversuch bewusst sein. Nur dann dürfen Sie diesen Versuch durchführen.

Die bereits schriftlich ausgearbeitete Versuchsvorbereitung bringen Sie bitte zur Vorbesprechung mit. Des Weiteren müssen Sie bereits über die Sicherheitsrichtlinien informiert sein, und über den Versuchsaufbau genau Bescheid wissen. Bringen Sie die hinten beigefügte Erklärung zur Sicherheitsbelehrung am Versuchstag mit.

3 Der Versuchsaufbau

Hier erhalten Sie einen Überblick über die einzelnen Geräte, deren Funktion und Bedienung.

3.1 Der Dioden-gepumpte Festkörperlaser

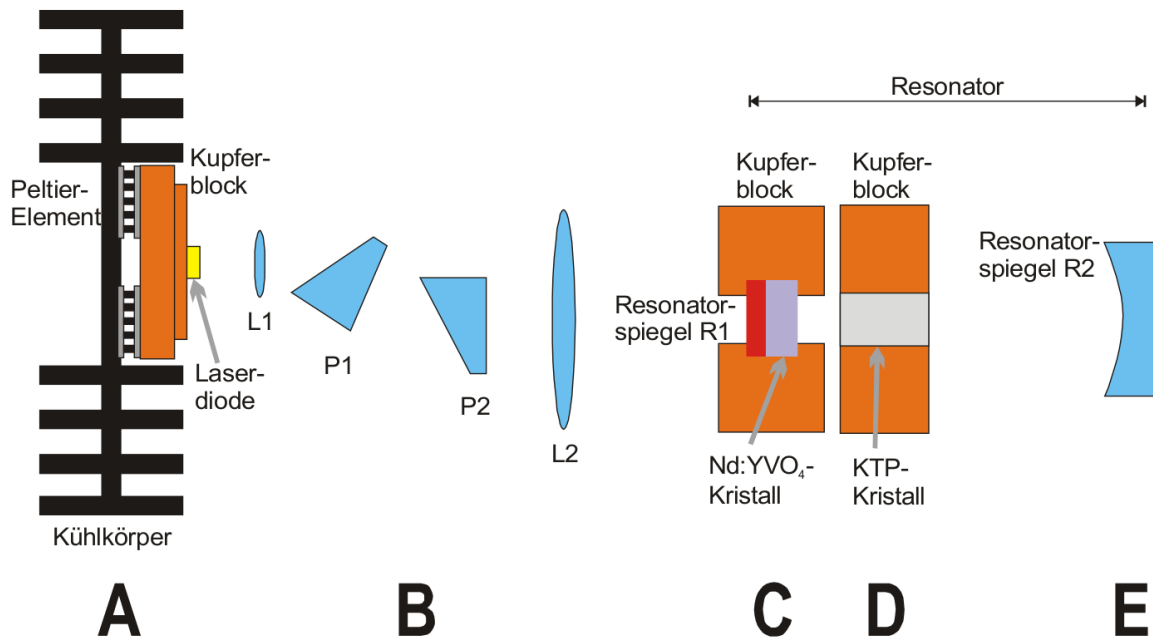


Abbildung 1: Aufbau des Dioden-gepumpten Festkörperlasers

Die Komponenten:

A) Laserdiode mit Peltier-Kühlung

Die 808 nm-Pumpdiode von Sony (SLD 322 V, 500 mW optische Maximalleistung) ist in einem Kupferblock montiert und wird über vier in Serie geschaltete Peltier-elemente gekühlt. Als Temperaturfühler wird ein Thermistor eingesetzt. Der große Kühlkörper (Wärmewiderstand 0,1 K/W) dient zur Wärmeabfuhr und ist auch für noch leistungsfähigere Pumpdioden (bis ca. 2 W optische Leistung) ausgelegt.

Achten Sie beim Betrieb darauf, die Pumpdiode nur im Temperaturbereich zwischen 17 und 26°C zu betreiben. Temperaturen unter 17°C führen zum Beschlagen der Laserdiode: Kondenswasser kann hier die Diode zerstören. Temperaturen über 26°C beschleunigen den Alterungsprozess der Diode und führen zu Leistungseinbußen.

Eine Photodiode ist bereits in die Laserdiode integriert, und wird später zur Leistungsmessung verwendet.

ACHTUNG!**Berühren Sie keinesfalls die Laserdiode!**

Diese kann durch elektrostatische Entladungen zerstört werden.

B) Kollimator

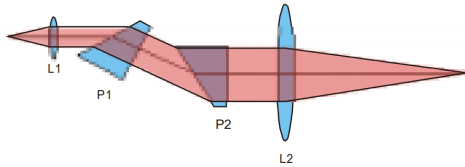


Abbildung 2: Kollimator

Die Kunststofflinse L1 (Brennweite $f = 6,5$ mm, Durchmesser $d = 5,0$ mm) führt den divergenten Pumpstrahl in einen näherungsweise parallelen, aber ellipsenförmigen Laserstrahl über. Die beiden anamorphischen Prismen (P1 und P2) weiten den Strahl in x -Richtung so auf, dass dieser möglichst symmetrisch ist¹. Die Fokussierlinse L2 ($f = 85$ mm, $d = 35$ mm) erzeugt einen ca. $55\text{ }\mu\text{m}$ großen Brennfleck auf der Nd:YVO₄-Kristall-Oberfläche.

Der Kollimator wurde bereits vom Betreuer optimal einjustiert. **Drehen Sie deshalb niemals an den Mikrometerschrauben der einzelnen Linsen.**

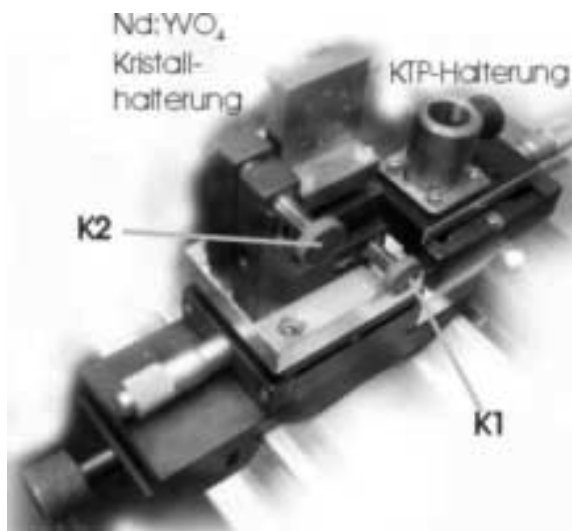
ACHTUNG!**Berühren Sie keinesfalls die optischen Komponenten!**

Eventuelle Fettablagerungen (z.B. Fingerabdrücke) und Staubpartikel dürfen nur mit speziellem Linsenreinigungspapier entfernt werden. Bitte informieren Sie gegebenenfalls den Betreuer.

C) Nd:YVO₄-Kristall

Im Kupferblock befindet sich der nur $3 \cdot 3 \cdot 1\text{ mm}^3$ große Neodym-dotierte Yttrium-Vanadat-Kristall. Dieser Kristall ist beidseitig beschichtet: Die der Pump-Laserdiode zugewandte Seite trägt eine Antireflexbeschichtung für 808 nm und ist hochreflektierend für 1064 nm und 532 nm und bildet somit zugleich den ebenen Resonatorspiegel R1. Die gegenüberliegende Seite ist für 1064 nm und 532 nm antireflexbeschichtet.

¹Daher auch der Begriff anamorph oder auch anamorphotisch, was soviel wie verzerren in eine Richtung bedeutet.



Die Strahlaustrittsöffnung des Nd:YVO₄-Kristallhalter ist bereits in die optische Achse einjustiert. Lediglich die Neigung des Kristalls (also die Neigung des ersten Resonatorspiegels R1) muss von Ihnen mittels der Feingewindeschrauben K1 und K2 eingestellt werden.

Abbildung 3: Links im Bild ist die Halterung des Nd:YVO₄-Kristalls, auf den Verschiebetisch rechts daneben kann der KTP-Kristall aufgebaut werden.

ACHTUNG!

Berühren Sie keinesfalls die Kristalloberflächen.

D) KTP-Kristall

Der KTP-Kristall (Kaliumtitanylphosphat KTiOPO_4) zur Frequenzverdopplung ist ebenfalls in einem Kupferblock eingebaut und wird ständig auf 40°C temperiert. Damit wird verhindert, dass der stark hygroskopische Kristall beschlägt. Außerdem werden die für die Phasenanpassung kritischen Brechungsindizes konstant gehalten. Die Halterung kann in der Höhe eingestellt, seitlich verschoben und mit den Feingewindeschrauben V1, V2 und V3 um drei Achsen gedreht werden.

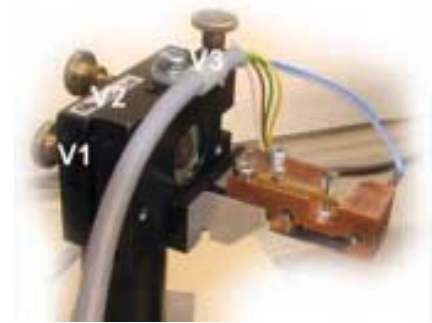


Abbildung 4: KTP-Halterung

ACHTUNG!

Berühren Sie keinesfalls die Kristalloberflächen.

Atmen, husten oder niesen Sie nicht in Richtung des Kristalls.

Deaktivieren Sie niemals die Kristallheizung.

E) Resonatorspiegel R2

Der zweite gekrümmte Resonatorspiegel R2 (Krümmungsradius $r = 75 \text{ mm}$) ist bereits in der Höhe und der Lage quer zur optischen Schiene vorjustiert, d.h. die optische Achse verläuft durch das Zentrum des Spiegels. Lediglich die Spiegelneigung muss von Ihnen mittels der beiden Feingewindeschrauben S1 und S2 eingestellt werden.



Abbildung 5: Resonatorspiegel R2

ACHTUNG!

Berühren Sie keinesfalls den Resonatorspiegel R2.

Der Spiegel kann nicht gereinigt werden!

F) Justierlaser mit Kollimierungslinse L3

Eine sichtbare Laserdiode ($\lambda = 645 \text{ nm}$, 1 mW optische Leistung) von Sanyo dient als Justierlaser. Dieser Laser kann - wie auch die Kollimierungslinse - in der Höhe und in der Neigung verstellt werden. Die Abbildung zeigt den Justierlaser ohne Linse L3.



Abbildung 6: Justierlaser

ACHTUNG!

Berühren Sie keinesfalls die Laserdiode!

Diese kann durch elektrostatische Entladungen zerstört werden.

Berühren Sie die Kollimierungslinse nicht.

3.2 Die Lasersteuerung

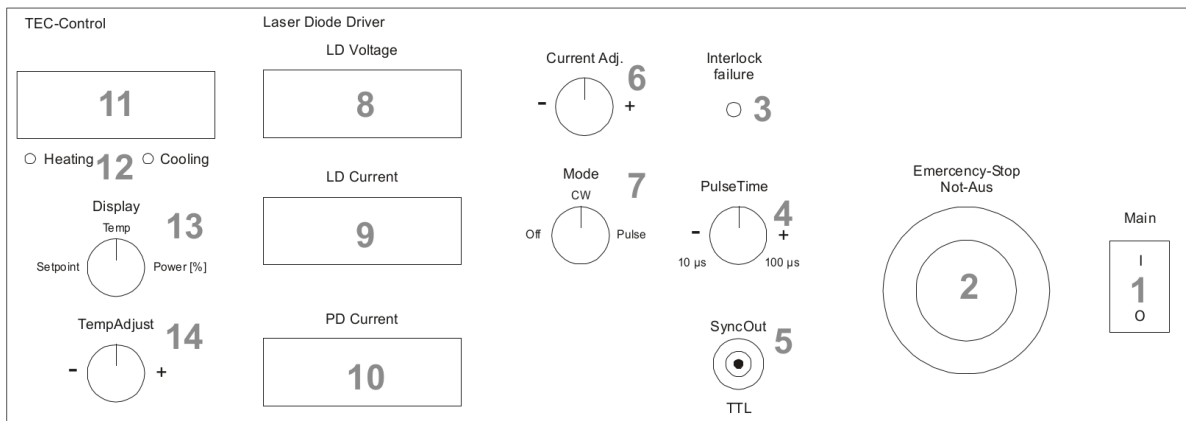


Abbildung 7: Frontplatte des Lasersteuergerätes

Das Lasersteuergerät ist wie folgt aufgebaut:

- 1) Hauptschalter
zum Ein-/Ausschalten des gesamten Gerätes
- 2) Not-Aus-Knopf
unterbricht sofort die Stromzufuhr zur Pumpdiode
- 3) Interlockkontrolllampe
leuchtet, wenn die Sicherheitsabschaltung der Laserdiode aktiviert ist
- 4) Pulsbreitenregler
stellt die Breite des Strompulses ein (nur Pulsbetrieb)
- 5) Monitorausgang
gibt das Rechteckpulssignal aus (Puls-Betrieb)
- 6) Stromstärkeregler
CW-Betrieb: stellt den Pump-Laserdiodenstrom ein
Puls-Betrieb: stellt die Pulshöhe ein
- 7) Betriebsart-Auswahlknopf
stellt den Betriebsmodus der Pumpdiode ein:
Off: Laserdiode aus
CW: Laserdiode im Dauerstrichbetrieb
Pulse: Laserdiode im Pulsbetrieb
- 8) Spannungsanzeige
zeigt den Spannungsabfall über der Pumpdiode an

- 9) Pumpdiodenstromanzeige
zeigt den Strom durch die Pump-Laserdiode an
- 10) Photodiodenstromanzeige
zeigt den Strom durch die pumpdiodeninterne Photodiode an
- 11) Temperatur der Laserdiode
- 12) Temperaturkontrollleuchten
Gelb: Pump-Laserdiode wird gekühlt
Rot: Pump-Laserdiode wird beheizt
- 13) Vorwahlknopf für Temperaturanzeige
Setpoint: Anzeige der Solltemperatur
Temp: Anzeige der aktuellen Temperatur
Power [%]: -keine Funktion-
- 14) Temperatureinstellknopf
für die Soll-Temperatur der Pump-Laserdiode

3.3 Weitere Versuchsutensilien

Für den Versuch liegen noch folgende benötigte Utensilien bereit:

- Lochblende zum Justieren des Resonatorspiegels R2
- Fotodiode PD1 zur Leistungsmessung
- Schnelle Fotodiode PD2 zur Beobachtung der dynamischen Lasereigenschaften
- Filter BG 36-2
- Filter BG 18
- Schirm mit Millimeterpapier
- Überbrückungsklemmen für die Sicherheitsschalter
- Infrarotindikorkarte
- Laserschutzbrillen

4 Lasersicherheit

4.1 Gefahren durch Laserstrahlung

Licht wird abhängig von der Wellenlänge mehr oder weniger stark von biologischem Gewebe absorbiert. Die absorbierte Strahlungsenergie wird dann im Normalfall in Wärme umgewandelt und kann (abhängig von der Strahlungsleistung, dem Durchmesser des Laserstrahls, der Einwirkdauer und der Wellenlänge) zu sog. thermischen Schäden, d.h. Verbrennungen z.B. an der Haut oder im Auge führen.

Besonders kritisch sind solche Schädigungen an den Sehzellen der Netzhaut. Da das Auge im Wellenlängenbereich zwischen 400 und 1400 nm transparent ist, wird eintreffende Laserstrahlung direkt auf die Netzhaut fokussiert, es entsteht ein nur einige μm großer Brennfleck. Geht man von einem Pupillendurchmesser von 7 mm und einer Brennfleckgröße von $1,5 \mu\text{m}$ aus, so erhöht sich die Leistungsdichte ungefähr um das 22.000.000-fache $((7 \text{ mm}:1,5 \mu\text{m})^2)$. Daher ist es möglich, dass selbst kleine Leistungen um 1 mW zu unheilbaren Netzhautschäden führen können.

ACHTUNG!

Schauen Sie deshalb nie direkt in die Laserdiode!

Beachten Sie die Sicherheitshinweise!

Tragen Sie bei Betrieb der Pumplaserdiode mit geöffneter Schutzvorrichtung stets die Laserschutzbrillen!

Die Pump-Laserdiode hat bis zu 500 mW Lichtleistung.

Schäden an der Netzhaut sind irreversibel!

4.2 Die Laserklassen

Gemäß DIN EN 60825-1/11:2001 werden Laser in folgende Klassen eingeteilt²:

Klasse 1	Die zugängliche Laserstrahlung ist unter vernünftigerweise vorhersehbaren Bedingungen ungefährlich. <i>Anmerkung:</i> <i>Die vernünftigerweise vorhersehbaren Bedingungen sind beim bestimmungsgemäßen Betrieb eingehalten.</i> <i>Der Grenzwert der zugänglichen Strahlung der DIN EN 60825-1:2001-11 im Wellenlängenbereich von 400 bis 1400 nm zur Klassifizierung eines Lasers ist zwischen 100 s und 30.000 s gleich. Deshalb sind bei Langzeiteinwirkungen Belästigungen nicht auszuschließen.</i>
Klasse 1M	Die zugängliche Laserstrahlung liegt im Wellenlängenbereich von 302,5 bis 4.000 nm. Die zugängliche Laserstrahlung ist für das Auge ungefährlich, solange der Querschnitt nicht durch optische Instrumente (Lupen, Linsen, Teleskope) verkleinert wird! <i>Anmerkung:</i> <i>Sofern keine optisch sammelnden Instrumente verwendet werden, die den Strahlquerschnitt verkleinern, besteht bei Lasereinrichtungen der Klasse 1M eine vergleichbare Gefährdung wie bei Lasereinrichtungen der Klasse 1.</i> <i>Bei Einsatz optisch sammelnder Instrumente können vergleichbare Gefährdungen wie bei Klasse 3R oder 3B auftreten.</i>

²aus Photonik 6/2002, S.50/51

Klasse 2	Die zugängliche Laserstrahlung liegt im sichtbaren Spektralbereich (400 bis 700 nm). Sie ist bei kurzzeitiger Einwirkungsdauer (bis 0,25 s) ungefährlich auch für das Auge. Zusätzliche Strahlungsanteile außerhalb des Wellenlängenbereiches von 400 bis 700 nm erfüllen die Bedingungen für Klasse 1 <i>Anmerkung:</i> <i>Bei Lasereinrichtungen der Klasse 2 ist das Auge bei zufälliger, kurzzeitiger Einwirkung der Laserstrahlung, d.h. bei Einwirkdauern bis 0,25 s, nicht gefährdet. Lasereinrichtungen der Klasse 2 dürfen deshalb ohne weitere Schutzmaßnahmen eingesetzt werden, wenn sichergestellt ist, dass weder ein absichtliches Hineinschauen für die Anwendung über längere Zeit als 0,25 s noch wiederholtes Hineinschauen in die Laserstrahlung bzw. spiegelnd reflektierte Laserstrahlung erforderlich ist.</i> <i>Von dem Vorhandensein eines Lidschlussreflexes zum Schutz der Augen darf in der Regel nicht ausgegangen werden:</i> <i>Für kontinuierlich strahlende Laser der Klasse 2 beträgt der Grenzwert der zugänglichen Strahlung (GZS) $P_{\text{grenz}} = 1 \text{ mW}$ (bei $C_6 = 1$)³</i>
Klasse 2M	Die zugängliche Laserstrahlung liegt im sichtbaren Spektralbereich von 400 bis 700 nm. Sie ist bei kurzzeitiger Einwirkungsdauer (bis 0,25 s) für das Auge ungefährlich, solange der Querschnitt nicht durch optische Instrumente (Lupen, Linsen, Teleskope) verkleinert wird! Zusätzliche Strahlungsanteile außerhalb des Wellenlängenbereichs von 400 bis 700 nm erfüllen die Bedingungen für Klasse 1M. <i>Anmerkung:</i> <i>Sofern keine optischen Instrumente verwendet werden, die den Strahlquerschnitt verkleinern, besteht bei Lasereinrichtungen der Klasse 2M eine vergleichbare Gefährdung wie bei Lasereinrichtungen der Klasse 1M. Bei Einsatz optisch sammelnder Instrumente können vergleichbare Gefährdungen wie bei Klasse 3R oder 3B auftreten.</i>

³ C_6 ist ein Korrekturfaktor für sog. scheinbare Quellen (u.a. nichtideale Laser, wie z.B. LEDs), deren scheinbare Quellengröße bei einem gegebenen Abstand größer als 1,5 mrad ist. Bei idealen Lasern gilt $C_6 = 1$. Bei einem idealen Diffusor kann C_6 maximal den Wert 66 annehmen. Größere Korrekturfaktoren bedeuten ein geringeres Gefährdungspotential der Strahlung.

Klasse 3A	Die zugängliche Laserstrahlung wird für das Auge gefährlich, wenn der Strahlquerschnitt durch optische Instrumente verkleinert wird! Sie ist für das Auge ungefährlich, solange der Querschnitt nicht durch optische Instrumente (Lupen, Linsen Teleskope) verkleinert wird! Ist dies nicht der Fall wird die ausgesandte Laserstrahlung im sichtbaren Spektralbereich (400 bis 700 nm) bei kurzzeitiger Einwirkungsdauer (bis 0,25 s), in den anderen Spektralbereichen auch bei Langzeitbestrahlung ungefährlich. <i>Anmerkung:</i> <i>Bei Lasereinrichtungen der Klasse 3A handelt es sich um Laser, die nach der alten Norm klassifiziert worden sind.</i> <i>Sofern keine optischen Instrumente verwendet werden, die den Strahlquerschnitt verkleinern, besteht bei Lasereinrichtungen der Klasse 3A, die nur im sichtbaren Spektralbereich emittieren, eine vergleichbare Gefährdung wie bei Lasereinrichtungen der Klasse 2.</i> <i>Bei Lasereinrichtungen der Klasse 3A, die nur im nicht sichtbaren Spektralbereich emittieren, besteht eine vergleichbare Gefährdung wie bei Lasereinrichtungen der Klasse 1.</i>
Klasse 3R	Die zugängliche Laserstrahlung liegt im Wellenlängenbereich von 302,5 nm bis 10^6 nm und ist gefährlich für das Auge. Die Leistung, bzw. die Energie beträgt maximal das Fünffache des Grenzwertes der zulässigen Strahlung der Klasse 2 im Wellenlängenbereich von 400 bis 700 nm. <i>Anmerkung:</i> <i>Lasereinrichtungen der Klasse 3R sind für das Auge potentiell gefährlich wie Lasereinrichtungen der Klasse 3B. Das Risiko eines Augenschadens wird dadurch verringert, dass der Grenzwert der zugänglichen Strahlung (GZS) im sichtbaren Wellenlängenbereich auf das Fünffache des Grenzwertes der zugänglichen Strahlung für Klasse 1 begrenzt ist.</i>

Klasse 3B	Die zugängliche Laserstrahlung ist gefährlich für das Auge, häufig auch für die Haut. <i>Anmerkung:</i> <i>Das direkte Blicken in den Strahl bei Lasern der Klasse 3B ist gefährlich. Ein Strahlbündel kann sicher über einen diffusen Reflektor betrachtet werden, wenn folgende Bedingungen gleichzeitig gelten:</i> <i>der minimale Beobachtungsabstand zwischen Schirm und Hornhaut des Auges ist 13 cm;</i> <i>die maximale Bestrahlungsdauer beträgt 10 s;</i> <i>es treten keine gerichteten Strahlteile auf, die ins Auge treten können.</i> <i>Ein Strahlenbündel kann nur dann über einen Diffusor betrachtet werden, wenn keine gerichteten Strahlanteile auftreten.</i> <i>Eine Gefährdung der Haut durch die zugängliche Laserstrahlung besteht bei Lasereinrichtungen der Klasse 3B, wenn die Werte der maximal zulässigen Bestrahlung (MZB) überschritten werden.</i>
Klasse 4	Die zugängliche Laserstrahlung ist sehr gefährlich für das Auge und gefährlich für die Haut. Auch diffus gestreute Strahlung kann gefährlich sein. Die Laserstrahlung kann Brand- und Explosionsgefahr verursachen. <i>Anmerkung:</i> <i>Lasereinrichtungen der Klasse 4 sind Hochleistungslaser, deren Ausgangsleistung bzw. -energien die Grenzwerte der zugänglichen Strahlung (GZS) für Klasse 3B übertreffen. Die Laserstrahlung von Einrichtungen der Klasse 4 ist so intensiv, dass bei jeglicher Art von Exposition der Augen oder der Haut mit Schädigungen zu rechnen ist. Außerdem muss bei der Anwendung von Lasereinrichtungen der Klasse 4 immer geprüft werden, ob ausreichende Maßnahmen gegen Brand- und Explosionsgefahren getroffen sind; siehe auch §§10 und 16 der Unfallverhütungsvorschrift „Laserstrahlung“.</i>

4.3 Sicherheitsvorkehrungen

Wegen der Gefahren, die von den verwendeten Lasern in diesem Versuch ausgehen, wurden folgende Sicherheitsvorkehrungen getroffen:

- Der Praktikumsraum kann nur durch eine Vorhangschleuse betreten werden. So soll sichergestellt werden, dass keine Laserstrahlung aus dem Praktikumsraum austreten kann, bzw. unbeteiligte Personen versehentlich den Raum betreten. Achten Sie stets darauf, dass die Vorhänge immer geschlossen sind!
- Wird der Hauptschalter (1) eingeschaltet so leuchtet vor dem Praktikumsraum eine rote Warnlampe um Unbeteiligte auf den Laserbetrieb hinzuweisen.
- Wird der Hauptschalter eingeschaltet, so muss der Betriebsauswahlknopf (7) auf „Off“ stehen, andernfalls leuchtet die Interlockanzeige (3) und die Stromzufuhr der Pumpdiode ist deaktiviert.
- Der DPSS-Laser befindet sich unter einer zweigeteilten Schutzabdeckung. Der vordere Bereich (hier befindet sich die Pumpdiode A samt Kollimierungsoptik B vgl. Abb. 8) ist mit einer festen Abdeckung versehen. Diese darf nur vom Betreuer geöffnet werden! Der Resonatorbereich (C,D,E in Abb. 8) des DPSS-Lasers liegt unter einem Klappdeckel. Dieser Deckel betätigt zwei Sicherheitsschalter. Wird der Deckel geöffnet, so schaltet sich die Pumpdiode automatisch ab (Interlockanzeige leuchtet).

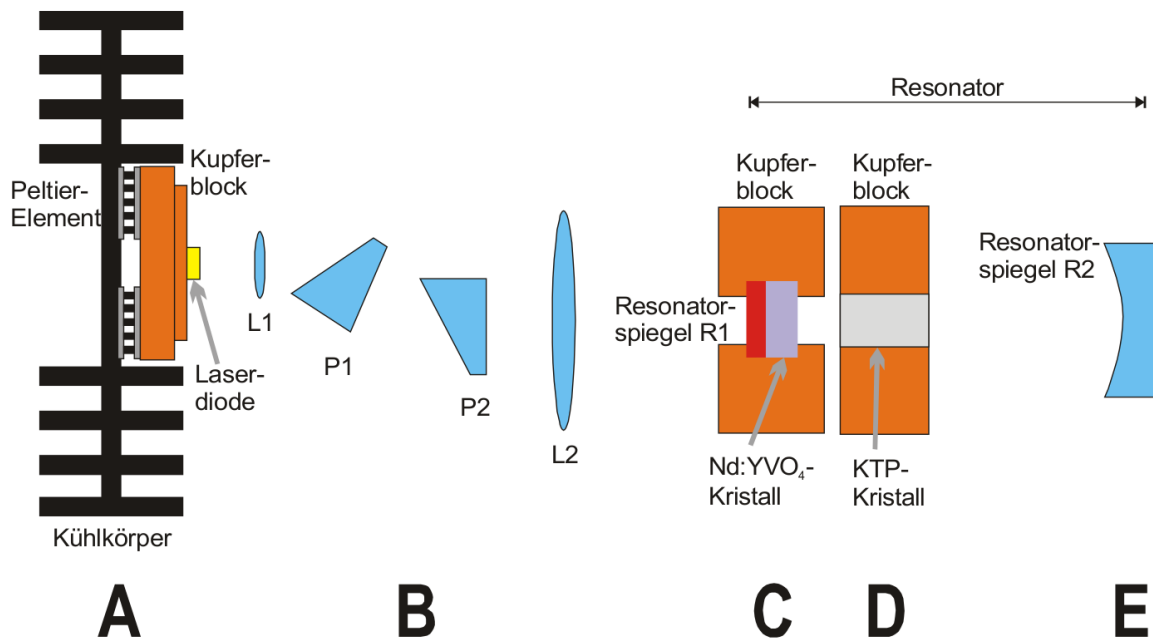


Abbildung 8: Aufbau der Schutzvorrichtungen

- Wird das zulässige Temperaturfenster (17 bis 26°C) der Pumplaserdiode verlassen, so wird deren Stromzufuhr unterbrochen (Interlockanzeige leuchtet).
- Wird der Not-Aus-Knopf betätigt, schaltet sich die Pumplaserdiode sofort ab (Interlockanzeige leuchtet).

So können Sie die Pumpdiode nach einer Sicherheitsabschaltung (Interlockanzeige leuchtet) wieder einschalten:

- Schalten Sie den Betriebsartauswahlknopf (7) auf „Off“.
- Stellen Sie sicher, dass
 - die Laserschutzabdeckung ganz geschlossen ist,
 - die tatsächliche Pump-Laserdiodentemperatur im zulässigen Bereich von 17 bis 26°C ist,
 - der Not-Aus-Knopf nicht mehr gedrückt ist (Knopf ggf. vorsichtig nach links oder rechts drehen).
- Stellen Sie den Betriebsartauswahlknopf auf die gewünschte Position, die Stromzufuhr der Pumplaserdiode ist wieder aktiv.

5 Versuchsdurchführung

Auf der optischen Schiene ist zunächst nur die Pumpdiode A, die Kollimierungsoptik B und der Nd:YVO₄-Kristall C aufgebaut. Da diese Komponenten bereits einjustiert sind, dürfen Sie deren Konfiguration nicht verändern!

5.1 Strahlcharakteristik

Befassen Sie sich zuerst mit der Strahlcharakteristik von Halbleiterlasern. Hierzu arbeiten Sie zunächst ausschließlich mit dem sichtbaren Justierlaser (Sanyo Laserdiode)! Sie werden den Strahldurchmesser dieser Sanyo-Laserdiode bei unterschiedlichen Entfernungen bestimmen. Als erstes gilt es aber, diese Laserdiode so zu justieren, dass deren Strahl in der durch den Nd:YVO₄-Kristall festgelegten optischen Achse verläuft. Gehen Sie hierzu wie folgt vor:

- Bringen Sie die Laserdiode möglichst parallel und nahe (ca. 5 mm) an die rückseitige (also die der Pump-Laserdiode abgewandten) Öffnung des Nd:YVO₄- Kristallhalters C (vgl. Abb. 9). Schalten Sie die Sanyo Laserdiode ein, und justieren Sie den Strahl exakt mittig auf die Öffnung des Kristallhalters. Die Feineinstellung der Höhe nehmen Sie mit der Feingewindeschraube der Halterung vor.
- Nun schieben Sie die Laserdiode entlang der optischen Schiene ca. 3 cm vom Kristallhalter weg, so dass dazwischen der Schirm Platz findet. Der Abstand Diode-Schirm sollte möglichst genau so sein wie vorher der Abstand Diode-Kristallhalter.
- Merken bzw. markieren Sie sich die Position des Laserspots auf dem Schirm. Durch Vergrößern des Abstands der Laserdiode vom Schirm vergrößert sich auch der Strahldurchmesser. Das Zentrum jedoch sollte fix bleiben; korrigieren Sie ggf. die Neigung der Laserdiode mit den entsprechenden zwei Feingewindeschrauben, so dass das Zentrum nicht wandert.
- Am äußersten Ende der optischen Schiene fixieren Sie dann die Laserdiode.

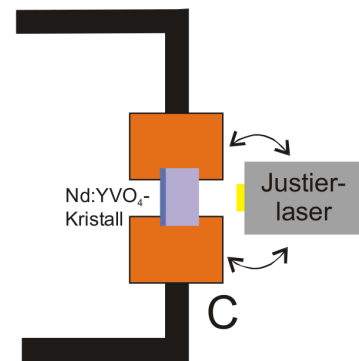


Abbildung 9: Einstellen des Justierlasers

Die optische Achse der Diode ist jetzt festgelegt. Beginnen Sie nun den Abstand des Schirms von der Laserdiode zu variieren, den Strahldurchmesser auszumessen und daraus dann die horizontale und vertikale Strahldivergenz bestimmen.

Schalten Sie die Justierlaserdiode wieder aus, verändern Sie aber deren Position nicht. Später wird sie noch zur Resonatorjustage benötigt.

5.2 Diodenkennlinien

Nun wenden Sie sich der 500 mW Pumpdiode A von Sony (SLD 322 V) zu. Der gesamte Kollimator B samt Nd:YVO₄-Kristallhalter ist bereits vorjustiert. **Verändern Sie diese Einstellungen bitte nicht!**

Schließen Sie die Laserschutzabdeckung und schalten Sie die Pump-Lasersteuerung am Hauptschalter (1) ein. Der Betriebsartauswahlknopf (7) muss hierbei auf „Off“ stehen. Schalten Sie den Vorwahlknopf für die Temperaturanzeige (13) zunächst auf „Setpoint“, stellen Sie 18°C ein und drehen Sie den Vorwahlschalter (13) wieder auf „Temp“.

ACHTUNG!

Der Vorwahlknopf (13) der Temperaturanzeige darf nur kurzzeitig auf „Setpoint“ gestellt werden. Ist die Pumplaserdiode in Betrieb, so muss der Vorwahlknopf (13) stets auf „Temp“ stehen.

Schalten Sie nun den Betriebsart-Auswahlknopf (7) auf „CW“, und nehmen Sie für unterschiedliche Temperaturen (18°C, 20°C, 22°C, 24°C) Spannungs-Strom- ($U-I$ -) sowie Lichtleistungs-Strom- ($P-I$ -) Kennlinien auf.

Zur Messung der Lichtleistung wird die laserdiodeninterne Photodiode verwendet. Genauere Angaben dazu finden Sie dazu im bereitliegenden Praktikumsordner.

5.3 Resonatoraufbau

Die Kollimierungsoptik, sowie die Fokussierlinse und die Position des Nd:YVO₄- Kristallhalters sind bereits vorjustiert. Beginnen Sie jetzt mit dem Aufbau des Resonators.

Schalten Sie zunächst die Pumpdiode ab (Betriebsart-Auswahlknopf (7) auf „Off“ und öffnen Sie die rechte, klappbare Schutzabdeckung des Lasers. Benutzen Sie die sichtbare Laserdiode aus Kapitel 5.1 als Justierlaser:

Schalten Sie die Sanyo-Laserdiode wieder ein, und bringen Sie die bereitstehende Linse L3 möglichst nahe (ca. 2 mm) an diese Laserdiode, so dass der Laserstrahl die Linse zentral passiert. Überprüfen Sie wiederum mit dem Schirm, ob der Laserstrahl noch in der optischen Achse verläuft. Justieren Sie ggf. die Linse L3. Entfernen Sie den Schirm. Das Zentrum des Strahls sollte nun mit der Öffnung des Nd:YVO₄-Kristallhalters übereinstimmen, korrigieren Sie ggf. die Neigung der Linse mit den beiden Feingewindeschrauben. Variieren Sie den Abstand der Linse von der Sanyo-Laserdiode so, dass der Fokus genau in der Öffnung der Nd:YVO₄-Kristallhalterung liegt.

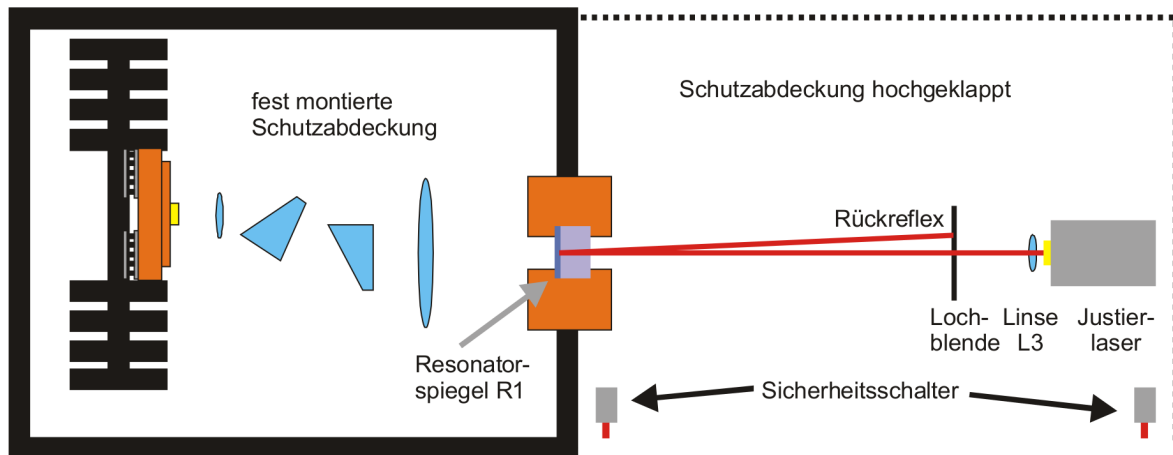


Abbildung 10: Justage des Resonatorspiegels R1

Jetzt bringen Sie die bereitliegende Lochblende möglichst nahe an der Justierlaserdiode in den Strahlengang. Der Strahl soll zunächst eine Lochblende und dann den Kristallhalter in Richtung Pumpdiode passieren (vgl. Abb. 10).

Wie Sie wissen, ist ein Resonatorspiegel bereits auf dem Nd:YVO₄-Kristall aufgedampft. Diesen gilt es nun auszurichten: Verstellen Sie die Neigung des Kristalls an den beiden Einstellschrauben (K1 und K2) so, dass der Rückreflex des Justierlaserstrahls (welcher auf der Lochblende sichtbar ist) mit der Blendenöffnung übereinstimmt.

Jetzt bauen Sie vorsichtig den zweiten Resonatorspiegel R2 im Abstand von 75 mm vom Nd:YVO₄-Kristallhalter ein.

ACHTUNG!

Berühren Sie keinesfalls den Resonatorspiegel.

Der Spiegel kann nicht gereinigt werden!

Vermeiden Sie mechanische Belastungen wie Stöße und Schläge.

Vergewissern Sie sich, dass der Justierstrahl den Spiegel zentral trifft. Die weitere Justage erfordert sehr viel Geduld und Fingerspitzengefühl: Um diesen Spiegel nun in der Neigung richtig einzustellen, schalten Sie den Justierlaser wieder ab und arbeiten mit der Pumpdiode weiter.

ACHTUNG!

Tragen Sie ab jetzt unbedingt die bereitliegenden Laserschutzbrillen!

Sie werden nun mit gefährlicher, nicht sichtbarer Infrarotstrahlung im Leistungsbereich bis zu 13 mW arbeiten. Dies ist der nicht vom Nd:YVO₄-Kristall absorbierte Anteil der Pumpstrahlung.

Schauen Sie niemals direkt in die Pump-Laserdiode!

Sollte jemand unverhofft den Raum betreten, so betätigen Sie sofort den Not-Aus-Knopf (2)!

Wenn Sie die Schutzbrille abnehmen wollen, drücken Sie zur eigenen Sicherheit vorher unbedingt den Not-Aus-Knopf (2)!

Setzen Sie die Schutzbrillen auf!

Überbrücken Sie nun die Sicherheitsschalter mit den Überbrückungsklammern (diese erhalten Sie vom Betreuer). Schalten Sie den Betriebsartauswahlknopf auf „CW“ und stellen Sie einen Pump-Laserdiodenstrom von 500 mA ein. Die Pumpdiodentemperatur stellen Sie auf 20°C. Damit Sie den Verlauf des infraroten Laserstrahls verfolgen können benutzen Sie eine Indikatorkarte. Trifft der Strahl auf die aktive Fläche, so sieht man einen roten Phosphoreszenzfleck. Abhängig von Bestrahlungsintensität und -dauer bleicht diese Stelle früher oder später aus. Verändern Sie dann die Position der Karte bzw. „laden“ Sie die aktive Fläche wieder auf, indem Sie diese kurz unter die nebenstehende Schreibtischlampe halten.

ACHTUNG!

Knicken Sie die Karte keinesfalls!

Suchen Sie mit der Indikatorkarte auf der Austrittsöffnung des Kristallhalters den Pumpstrahl und den Rückreflex des Resonatorspiegels (vgl. Abb. 11). Bringen Sie den Rückreflex mit dem Pumpstrahl zur Übereinstimmung, indem Sie mit den beiden Feingewindeschrauben S1 und S2 die Neigung des Resonatorspiegels R2 verstellen.

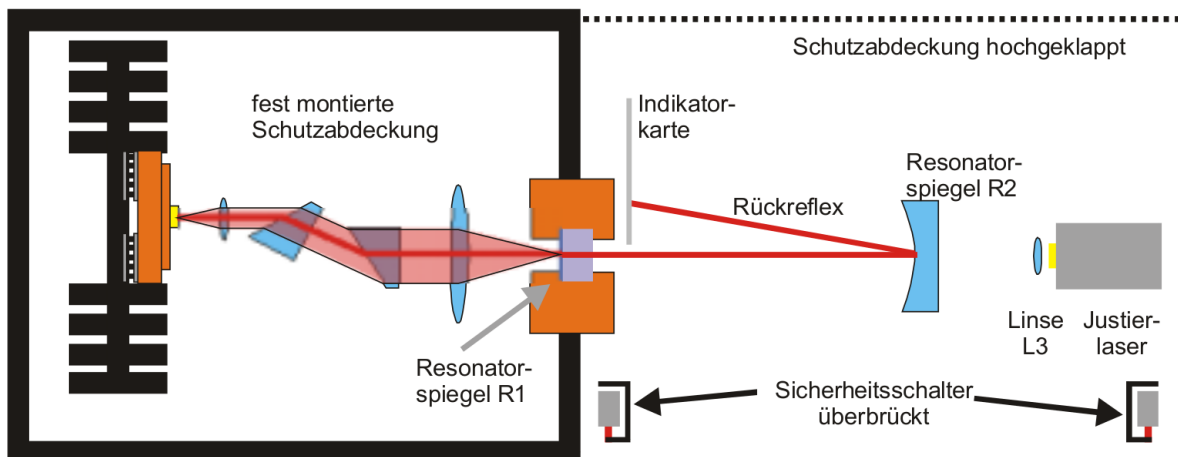


Abbildung 11: Justage des Resonatorspiegels R2

Hinter dem Resonatorspiegel wird dann auf der Indikatorkarte meist neben dem Pumpstrahl ein zweiter, schwächerer Strahl sichtbar. Dies ist der Laserstrahl des Nd:YVO₄-Lasers.

Nun bauen Sie den Filter BG 36-2 nach dem Resonatorspiegel R2 ein. Dieser Filter blockt die Pump-Laserstrahlung ab und lässt den Strahl des Nd:YVO₄-Lasers durch. Der Pumpstrahl ist dadurch hinter dem Filter nicht mehr auf der Indikatorkarte sichtbar. Durch minimale Neigungsveränderung des Auskoppelspiegels können Sie jetzt unterschiedliche Moden sichtbar machen. Welche Moden können Sie sehen? Stellen Sie die TEM₀₀ ein!

Wie kann man erkennen, dass es sich tatsächlich um die TEM₀₀ und nicht um eine Überlagerung vieler Moden handelt?

5.4 Optimierung der infraroten Leistung bei 1064 nm

Messen Sie zunächst die infrarote TEM₀₀-Leistung hinter dem Filter BG 36-2 in Abhängigkeit vom Pump-Laserdiodenstrom bei einer Resonatorlänge von 75 mm. Zur Leistungsmessung verwenden Sie die Fotodiode PD1. Die genaue Vorgehensweise entnehmen Sie dem bereitliegenden Praktikumsordner.

Variieren Sie nun die Resonatorlänge im Bereich von 39 bis 81 mm in 2 mm-Schritten, stellen Sie jeweils die TEM₀₀ ein und messen Sie dann hinter dem Filter die infrarote Leistung bei einem Pump-Laserdiodenstrom von 500 mA.

5.5 Frequenzverdopplung

Schalten Sie die Pumpdiode aus, entfernen Sie den Filter und bauen Sie nun den KTP-Verdopplerkristall in den Resonator ein. Der Kristall muss möglichst genau an der Strahlaustrittsöffnung des Nd:YVO₄-Kristallhalters positioniert werden.

ACHTUNG!

Berühren Sie keinesfalls die Kristalloberflächen.

Atmen und husten Sie nicht in Richtung des Kristalls. Vermeiden Sie mechanische Belastungen, wie Stöße und Schläge.

Deaktivieren Sie niemals die Kristallheizung.

Tragen Sie ab jetzt unbedingt die bereitliegenden Laserschutzbrillen!

Sie werden nun mit gefährlicher Infrarotstrahlung im Leistungsbereich bis zu 13 mW arbeiten.

Schauen Sie niemals direkt in die Pump-Laserdiode!

Sollte jemand unverhofft den Raum betreten, so betätigen Sie sofort den Not-Aus-Knopf (2)!

Wenn Sie die Schutzbrille abnehmen wollen, drücken Sie zur eigenen Sicherheit vorher unbedingt den Not-Aus-Knopf (2)!

Vergewissern Sie sich, dass Sie die Schutzbrille aufgesetzt haben und schalten Sie die Pumpdiode ein (cw-Betrieb). Nun können Sie den KTP-Kristall D einjustieren, er sollte möglichst parallel zum Nd:YVO₄-Kristallhalter eingebaut werden. Meist wird sofort ein grüner Strahl sichtbar. Durch Neigungsverstellung des KTP-Kristalls mit der Schraube V1 kann die Intensität verändert werden. Durch kleine Dejustage des Resonatorspiegels R2 und des KTP-Kristalls können Sie unterschiedliche Modenbilder erzeugen. Welche Moden können Sie sehen?

Bauen Sie jetzt hinter dem Auskoppelspiegel R2 den Filter BG 18 ein, so dass nun nur noch der grüne Laserstrahl durchgelassen wird. Da die KTP-Kristalltemperatur immer etwas schwankt, ändern sich damit auch die Brechungsindices. Dies führt bei unveränderten Einstellungen (der Pumpdiodentemperatur, des Pumpdiodenstroms, der Resonatorlänge und der Resonatorspiegelneigungen,...) zu Schwankungen der grünen Laserleistung. Ermitteln Sie deshalb bei der Leistungsmessung mit der Fotodiode immer die maximale grüne Leistung. Nehmen Sie eine $P_{\text{grün}}-I_{\text{Pumpdiode}}$ -Kennlinie bei TEM₀₀ auf (75 mm Resonatorlänge, 20°C Pump-Laserdiodentemperatur).

5.6 Dynamische Lasereigenschaften

Nun soll der Einschwingvorgang des Nd:YVO₄-Lasers, sowie die Lebensdauer des oberen Laserniveaus untersucht werden.

Schalten Sie die Pumpdiode aus, ersetzen Sie den Filter BG 18 durch den Filter BG 36-2, und entfernen Sie den KTP-Kristall sowie die Fotodiode PD1. Jetzt schließen Sie die schnelle Fotodiode PD2 an den ersten Eingang des Oszilloskops und den Pulsausgang (5) des Lasertreibers an den zweiten Eingang des Oszilloskops an. Den Trigger stellen Sie auf den 2. Eingang des Oszilloskops.

ACHTUNG!

Tragen Sie ab jetzt unbedingt die bereitliegenden Laserschutzbrillen!

Sie werden nun mit gefährlicher Infrarotstrahlung im Leistungsbereich bis zu 13 mW arbeiten.

Schauen Sie niemals direkt in die Pump-Laserdiode!

Sollte jemand unverhofft den Raum betreten, so betätigen Sie sofort den Not-Aus-Knopf (2)!

Wenn Sie die Schutzbrille abnehmen wollen, drücken Sie zur eigenen Sicherheit vorher unbedingt den Not-Aus-Knopf (2)!

Vergewissern Sie sich, dass Sie die Schutzbrille aufgesetzt haben! Schalten Sie nun die Pumpdiode wieder ein (cw-Betrieb) und führen Sie eine Lasertätigkeit bei TEM₀₀ herbei (500 mA Pump-Laserdiodenstrom, 20°C Pump-Laserdiodentemperatur). Bringen Sie die schnelle Fotodiode PD2 hinter dem Filter in den Nd:YVO₄-Laserstrahl, und optimieren

Sie die Positionierung mit dem Oszilloskop auf höchstes Ausgangssignal.

Jetzt schalten Sie den Lasertreiber von cw- auf Pulsbetrieb um. Am Oszilloskop können Sie nun auf Kanal 2 den rechteckförmigen Stromverlauf durch die Pumplaserdiode beobachten. Kanal 1 gibt das Signal der schnellen Fotodiode PD2 wieder. Variieren Sie die Pulsbreite im Bereich von $40\ \mu\text{s}$ bis $70\ \mu\text{s}$ (Pulsbreitenregler (4)). Die Pulshöhe (Stromstärkeregler (6)) sollte nicht zu hoch eingestellt werden, da sonst die Fotodiode in ihren Sättigungsbereich kommt.

Ein guter Wert liegt bei ca. 130 mA. Beobachten Sie nun die Einschwingvorgänge des Lasers für unterschiedliche Pulsweiten und Pulshöhen. Mittels der Cursorfunktion des Oszilloskops kann man die Graphen vermessen. Auch ein Bildschirm-Hardcopy ist möglich. Näheres entnehmen Sie wieder dem bereitliegenden Praktikumsordner. Sie sollten hierbei die Dämpfung der Oszillationen und die Frequenz bestimmen.

Schalten Sie die Pump-Laserdiode wieder aus und entfernen Sie den Resonatorspiegel R2. Das Filter BG 36-2 kommt nun direkt an die hintere Öffnung Nd:YVO₄-Kristallhalters, dann folgt gleich die Fotodiode PD2.

ACHTUNG!

Tragen Sie ab jetzt unbedingt die bereitliegenden Laserschutzbrillen!

Schauen Sie niemals direkt in die Pump-Laserdiode!

Sollte jemand unverhofft den Raum betreten, so betätigen Sie sofort den Not-Aus-Knopf (2)!

Wenn Sie die Schutzbrille abnehmen wollen, drücken Sie zur eigenen Sicherheit vorher unbedingt den Not-Aus-Knopf (2)!

Vergewissern Sie sich, dass Sie die Schutzbrille aufgesetzt haben und schalten Sie die Pumpdiode wieder ein (cw-Betrieb). Die optimale Position der Diode ermitteln Sie wieder mit Hilfe des Oszilloskops. Nun schalten Sie auf Pulsbetrieb um, und bestimmen am Oszilloskop folgendermaßen die Lebensdauer des oberen Laserniveaus: Variieren Sie die Pulsbreite im Bereich von $40\ \mu\text{s}$ bis $70\ \mu\text{s}$ (Pulsbreitenregler (4)). Die Pulshöhe (Stromstärkeregler (6)) sollte nicht zu hoch eingestellt werden, da sonst die Fotodiode in ihren Sättigungsbereich kommt. Ein guter Wert liegt bei ca. 130 mA. Aus dem exponentiellen Teil der Abklingkurve lässt sich die Lebensdauer der Fluoreszenzemission ermitteln (Signalabfall auf $1/e$), diese stimmt mit der Lebensdauer des oberen Laserniveaus überein.

Zum Schluss Ihres Praktikumsversuchs schalten Sie bitte sämtliche Geräte aus und drehen Sie den Stromstärkeregler (6) ganz zurück und den Betriebsartwahlnopf (7) auf „Off“. Demontieren Sie auch die Überbrückungsklemmen der Sicherheitsschalter. Achten Sie darauf, dass die KTP-Kristallheizung aktiv ist.

6 Versuchsauswertung

In Ihrem Praktikumsprotokoll sollte neben ihren Messergebnissen (Fehlerbetrachtung nicht vergessen!) noch zusätzlich folgende kommentierte Auswertungen zu finden sein. Vergleichen Sie ggf. auch mit Ihren theoretischen Erwartungen.

Versuchsteil 1:

- Bestimmen Sie die horizontale und vertikale Strahldivergenz und stellen Sie Ihre Ergebnisse in geeigneter graphischer Form dar!

Versuchsteil 2:

- Stellen Sie die U - I - und P - I -Kennlinie jeweils gemeinsam dar.
- Bestimmen Sie jeweils den Schwellstrom und den differentiellen Wirkungsgrad der Laserdiode.
- Bestimmen Sie jeweils aus der zugeführten elektrischen und der abgegebenen Lichtleistung den elektrisch-zu-optischen Wirkungsgrad, und stellen Sie Ihre Ergebnisse in geeigneter Form dar. Wo wird die Diode am effizientesten betrieben?

Versuchsteil 3:

- Welche Resonatormoden konnten Sie beobachten?

Versuchsteil 4:

- Stellen Sie die P - I -Kennlinie des Nd:YVO₄-Lasers unter Berücksichtigung der Transmission des verwendeten Filters grafisch dar. Die notwendigen Werte entnehmen Sie aus den Transmissionskurven im Praktikumsordner.
- Stellen Sie die Ausgangsleistung des Nd:YVO₄-Lasers in Abhängigkeit von der optischen Ausgangsleistung der Pumpdiode dar und bestimmen Sie daraus die Schwellenleistung für den Nd:YVO₄-Laser.
- Tragen Sie die totale Leistungseffizienz über der optischen Leistung der Pumpdiode auf, d.h. erstellen Sie ein $P(\text{Nd:YVO}_4)/P_{\text{optisch}}(\text{Pumpdiode})$ - $P_{\text{optisch}}(\text{Pumpdiode})$ - Diagramm.
- Stellen Sie die Ausgangsleistung des Nd:YVO₄-Laser in Abhängigkeit der Resonatorlänge dar.

Versuchsteil 5:

- Welche Resonatormoden konnten Sie beobachten?
- Stellen Sie die optische Leistung im Grünen in Abhängigkeit vom Pump-Laserdiodenstrom bzw. der Ausgangsleistung der Pump-Laserdiode dar.

- Ermitteln Sie den Zusammenhang zwischen der Leistung im Grünen und der eingesetzten infraroten Leistung bei 1064 nm.

Versuchsteil 6:

- Welche mittlere Lebensdauer des oberen Laserniveaus konnten Sie ermitteln?
- Welche mittlere Dämpfung und Frequenz der Relaxationsoszillationen konnten Sie ermitteln?

7 Literatur

Folgende Bücher sollen Ihnen eine Hilfe bei der Erstellung der Versuchsvorbereitung sein. Gerne dürfen Sie auch in anderen Büchern, in Zeitschriften oder im WWW recherchieren.

- Peter Peuser: Diodengepumpte Festkörperlaser
1995, Springer Verlag
besonders Kap. 4.1 bis 4.3 Hochleistungsdiodenlaser: Grundlagen, Optische Charakteristik, Zuverlässigkeit und Alterung von Laserdioden
Signatur 84 UH 5616 P514
- Jörg-Uwe Fischbach: Optoelektronik
2. Auflage, 1982, Expert Verlag
besonders Kap. 5 Halbleiterlaser
Signatur 84 UH 5610 F528 (2)
- Albrecht Winnacker: Physik von Maser und Laser
1984, Bibliographisches Institut Mannheim
besonders Kap. 3 Allgemeine Grundlagen, Kap. 4.3 Halbleiterlaser
Signatur UH 5600 W776
- Orazio Svelto: Principles of Lasers
4th Edition, 1998, Plenum Press
besonders Kap. 6.3
Signatur 84 UH 5610 S968 (4)
- Jürgen Eichler: Laser
3. Auflage, 1998, Springer Verlag
besonders Kap. 13 Optische Resonatoren, Kap. 24 Sicherheitsvorschriften
Signatur 84 UH 5610 E34 (3)
- Horst Weber: Laser
1972, Physik Verlag
besonders Kap. 6 Nichtlineare Optik
Signatur 84 UH 5610 W373
- Walter Koechner: Solid-State Laser Engineering
4th Edition, 1996, Springer Verlag
Signatur 84 UH 5615 K77 (4)
- F. K. Kneubühl: Laser
5. Auflage, 1999, Teubner
Signatur 84 UH 5610 K68 (5)

8 Erklärung

Erklärung

Ich wurde über die gefährliche Wirkung von Laserstrahlen belehrt und habe die Versuchsanleitung genau durchgelesen.

Die darin vorkommenden Sicherheitshinweise werde ich strikt befolgen. Während des gesamten Versuches werde ich mich und andere beteiligte Personen vor gefährlicher Laserstrahlung schützen. Ich achte darauf, dass beim Betrieb der Pumplaserdiode die Schutzabdeckungen vollständig geschlossen sind bzw. die Schutzbrillen getragen werden. Eventuelle Mängel an den Schutzvorrichtungen und den verwendeten Geräten werde ich unverzüglich dem Versuchsbetreuer/ der Versuchsbetreuerin melden.

.....
Ort, Datum

.....
Unterschrift