

Festkörperlaser

Tom Heinrich

Guido Falk von Rudorff

26.10.11 (Versuch) 08.11.11 (Protokoll)

1 Festkörperlaser

Physikalische Grundlagen

Absorption Elektronen eines Atoms können einfallende Strahlung absorbieren und deren Energie nutzen, um ein höheres Energieniveau zu erreichen, das sie nach kurzer Zeit wieder unter Abgabe der Energiedifferenz in Form von \rightarrow Photonen oder \rightarrow Phononen verlassen. Dabei müssen die Elektronen nicht direkt wieder auf das Ausgangsniveau zurückkehren; die Energie kann auch in mehreren Schritten abgegeben werden. Die Wahrscheinlichkeit der Absorption wird durch den EINSTEINKoeffizienten B_{12} beschrieben: $\frac{dN_1}{dt} = -N_1 B_{12} u$ mit der Anzahl N_1 der Elektronen im unteren Energieniveau und der Strahlungsdichte u .

Aktives Medium Das Material, aus dem die \rightarrow Photonen eines \rightarrow Lasers emittiert werden, wird aktives Medium genannt. Voraussetzung für die Eignung ist die Möglichkeit, durch \rightarrow Pumpen oder konzeptionelle Bedingungen wie beim \rightarrow Diodenlaser eine \rightarrow Besetzungsinversion herzustellen, damit durch \rightarrow stimulierte Emission die Photonen freigesetzt werden können. Das aktive Medium kann sowohl fest, flüssig als auch gasförmig sein und ist in eine \rightarrow Kavität eingeschlossen.

Aktive Zone So wird der Bereich eines \rightarrow pn-Übergangs genannt, in dem die beiden unterschiedlichen Leitungs- und Valenzbänder sich einander angleichen. In diesem Bereich ist die Raumladungsdichte im Vergleich zum \rightarrow n- und p-dotierten Material reduziert. Wird an den pn-Übergang eine Spannung angelegt, so kann je nach Polung die aktive Zone vergrößert oder verkleinert werden. Innerhalb der aktiven Zone herrscht ein Gleichgewicht zwischen dem Diffusionsstrom, der durch die vom n- in den p-Halbleiter übergehenden Elektronen erzeugt wird und dem Feldstrom, der sich aufgrund der durch die diffundierten Elektronen entstehenden unterschiedlichen Raumladungsdichten ausbildet.

Brechungsindex Der Brechungsindex n gibt das Verhältnis zwischen der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum zur Lichtgeschwindigkeit im Material an und ist damit materialabhängig. Zu einem geringen Maße verändert sich der Brechungsindex aufgrund von Dispersion auch bei der Verwendung von Strahlung anderer Wellenlänge. Von den Brechungsindizes zweier angrenzender Materialien hängt der Winkel ab, unter dem Totalreflexion auftritt, was bei \rightarrow Wellenleitern und somit bei \rightarrow Diodenlasern relevant ist.

Diodenlaser Ein Diodenlaser nutzt im Gegensatz zu einem Festkörperlaser keine diskreten Energieniveaus sondern die Energiebänder, die sich im \rightarrow pn-Übergang einander angleichen. Legt man eine Spannung entgegen der Sperrrichtung an die so entstehende Diode an, so verschieben sich die Besetzungsgrenzen der Energieniveaus gegenüber der ohne anliegende Spannung in beiden Teilen gleichen Fermienergie derart, dass aus dem Leitungsband im n-dotierten Material innerhalb der aktiven Zone Elektronen in das Valenzband des p-dotierten Materials gelangen können. Durch diese Rekombination wird – wie in Abb. (2) visualisiert – der Energieunterschied in Form von Strahlung abgegeben. Auch bei diesem \rightarrow Laser wird ein Resonator benötigt, der von den Seiten des aktiven Mediums gebildet wird. Für eine hohe Ausbeute in Bezug auf die Emission von Photonen ist es wichtig, dass es sich um direkte \rightarrow Halbleiter handelt, bei denen sich das Minimum des Energieverlaufs des Leitungsbandes exakt oberhalb des Maximums des Energieverlaufs des Valenzbandes befindet. Die \rightarrow Besetzungsinversion wird durch das Anlegen einer Spannung hervorgerufen. Da sich Elektron und Loch auch eine gewisse Zeitspanne lang nahe beieinander befinden können, ohne zu rekombinieren, kann eine Rekombination andere Elektron-Loch-Paare dazu bringen, ebenfalls zu rekombinieren, sodass sich auch beim Diodenlaser eine \rightarrow stimulierte Emission ergibt. Dafür ist auch Voraussetzung, dass die Energieniveaus im Diodenlaser nicht diskret sondern kontinuierliche Bänder sind, sodass das \rightarrow PAULI-Prinzip keine Anwendung findet.

Dotierung Unter Dotierung versteht man das kontrollierte Einfügen von Fremdatomen in einen Kristall mit dem Ziel, die Eigenschaften des so entstehenden Materials wie z.B. die Leitfähigkeit trotz der vergleichsweise geringen Konzentration von Fremdatomen, die typischerweise bei 10^{-8} bis 10^{-4} liegt, deutlich zu verändern. Dabei werden entweder höherwertige Fremdatome eingebracht, sodass ein leichter Elektronenüberschuss entsteht oder niederwertige Fremdatome, durch die einen leichten Elektronenmangel hervorrufen. Erstere Materialien nennt man n-dotiert, letztere p-dotiert.

Besetzungsinversion Eine Besetzungsinversion zwischen zwei Energieniveaus liegt dann vor, wenn sich in dem höheren der beiden mehr Elektronen befinden als in dem unteren. Weil dieser Zustand nur künstlich hervorgerufen werden kann und das genaue Gegenteil des Normalzustandes darstellt, spricht man von einer Besetzungsinversion.

Fermienergie Die Fermienergie ist das Energieniveau in einem Material, bis zu dem alle Niveaus mit Elektronen besetzt sind. Der genaue Wert ist materialabhängig und kann bei einem \rightarrow pn-Übergang durch Anlegen einer Spannung verändert werden.

Gaußprofil Betrachtet man den Querschnitt durch ein zweidimensional aufgelöstes Diagramm der Intensität eines \rightarrow Laserstrahls in der Ebene senkrecht zur Strahlrichtung, so entspricht das im Idealfall einer Gaußkurve. Dieser Zustand wird TEM_{00} genannt, wobei weitere abweichende Intensitätsverteilungen durch TEM_{nl} bezeichnet und von den Laguerre-Polynomen mit den Indizes n und l beschrieben werden.

Halbleiter Ein Material, das bei niedrigen Temperaturen nicht, bei höheren aber gut leitet, nennt man Halbleiter. Die Bandlücke ist nicht so groß wie bei den Nichtleitern und kann daher von den thermisch angeregten Elektronen überwunden werden, sodass sich auch Elektronen im Leitungs- statt nur im Valenzband befinden.

Kavität Der →optische Resonator beim →Laser ist eine Kavität. Man unterscheidet zwischen einer offenen Kavität, bei der der Strahlengang nur in einer der drei Achsen beschränkt ist und eine geschlossene Kavität, die das →aktive Medium in alle drei Richtungen abschirmt. In den meisten Fällen wird für einen Laser eine offene Kavität verwendet.

Laser Das Akronym für *light amplification by stimulated emission of radiation* beschreibt einen Vorgang, bei dem →Photonen fast gleicher Frequenz, Phase, Polarisation und Richtung freigesetzt werden. Dazu muss mittels →Pumpen eine →Besetzungsinversion erzielt werden. Für einen Laser ist mindestens ein Drei-Niveau-System nötig, da sonst keine →Besetzungsinversion erreicht werden kann; häufig wird auch ein Vier-Niveau-System verwendet. Bei einem Drei-Niveau-Laser nach Abb. (1) wird durch Pumpen ein Elektron vom Grundzustand A auf das Niveau B gebracht, das eine kurze Lebensdauer hat, da das Elektron vergleichsweise rasch durch einen strahlungslosen Übergang, bei dem ein →Phonon entsteht, auf das Energieniveau C gelangt, auf dem das Elektron relativ lange verbleibt. Dadurch ist es möglich, dass ein Photon der passenden Frequenz für den Übergang von C in den Grundzustand A auf das Elektron trifft und der Energieunterschied durch diese →stimulierte Emission in Form von Strahlung freigesetzt wird. Vom Grundzustand kann das Elektron dann wiederum durch Pumpen auf das Energieniveau B gebracht werden. Der Vier-Niveau-Laser besitzt – wie der Name schon sagt – ein weiteres Energieniveau, das sich zwischen C und A befindet und in Abb. (1) mit D bezeichnet ist. Dabei wird D so gewählt, dass der Übergang von D in den Grundzustand A sehr schnell verläuft, sodass die notwendige Besetzungsinversion zwischen den Niveaus C und D leichter aufrecht erhalten werden kann. Jedes dieser Niveaus kann entartet sein, sodass geringfügig unterschiedliche Frequenzen zu berücksichtigen sind. Selten wird auch ein →Diodenlaser als „Zwei-Niveau-System“ geführt; dabei wird allerdings die Besetzungsinversion durch einen anliegenden Strom hergestellt. Der Übergang von C nach A oder D ist der gewünschte Übergang; die Frequenz der emittierten Laserstrahlung entspricht dem Energieunterschied. Für den stabilen Betrieb eines Lasers muss Strahlung dieses Übergangs mehrfach durch das →aktive Medium geschickt werden, das zu diesem Zweck in einer →Kavität eingeschlossen ist.

Laserschwelle Als Laserschwelle wird der Grenzwert für die Energiezufuhr beim →Pumpen bezeichnet, ab dem der Aufbau beginnt als →Laser zu arbeiten, da dann die Verluste durch Absorption und Emission im Resonator durch die Pumpleistung gerade kompensiert werden. Die Laserschwelle kann aus einem Diagramm bestimmt werden, in dem die Ausgangsleistung des Lasers über der Pumpleistung aufgetragen ist. Oberhalb der Laserschwelle ist die Steigung deutlich größer als unterhalb derselben, sodass auch die Absolutwerte unterhalb der Laserschwelle deutlich kleiner als die oberhalb sind. Die Regressionsgerade durch die Punkte im steil verlaufenden Abschnitt schneidet die x-Achse an der Laserschwelle. Der Wert für die Laserschwelle ist temperaturabhängig und vergrößert sich mit steigender Temperatur.

Moden Die in einem →(optischen) Resonator möglichen Schwingungen sind grundsätzlich stehende Wellen, da nur dabei konstruktive Interferenz wirkt. Die Abmessungen des Resonators geben somit die möglichen Moden vor. Bei TEM-Moden stehen sowohl elektrische als auch magnetische Komponente der Strahlung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung.

Nd:YAG-Laser Dieser →Laser ist ein Festkörperlaser, dessen aktives Medium mit Neodym dotierter Yttrium-Aluminium-Granat ist.

Optischer Resonator Zwei Spiegel, die achsennahe Strahlen dazu zwingen, das aktive Medium immer wieder zu durchqueren, werden bei einem →Laser als optischer Resonator verwendet. Dabei muss das →Stabilitätskriterium in Bezug auf die Spiegelposition eingehalten werden. In der Regel werden gewölbte Spiegel verwendet, um den Bereich der achsennahen Strahlen, der so genutzt werden kann, zu vergrößern. Nebenbei wird durch Verwendung eines oder gar zweier gewölbter Spiegel die Justierung des Aufbaus deutlich vereinfacht, allerdings können dann in dem Resonator auch Transversalwellen schwingen, die eine Fokussierung erschweren. Daher wird meist ein planer und ein gewölbter Spiegel verwendet.

Pauli-Prinzip Das PAULI-Prinzip besagt, dass keine zwei Fermionen – wie es Elektronen sind – den durch die gleichen Quantenzahlen beschriebenen Zustand besetzen können. Beim →Diodenlaser ist zu beachten, dass aufgrund der kontinuierlichen Bänder das PAULI-Prinzip keine Anwendung findet.

Phononen Gitterschwingungen, auch Phononen genannt, nehmen den Impuls auf, der bei indirekten Übergängen zur Erfüllung der Impulserhaltung noch fehlt. Auf ähnliche Weise wird auch die Energie aus den strahlungslosen Übergängen bei einem →Laser auf das Gitter übertragen. Aus diesem Grund müssen Laser gekühlt werden.

pn-Übergang Bringt man ein →n-dotiertes und ein p-dotiertes Material in direkten Kontakt, so entsteht ein pn-Übergang. Innerhalb der →aktiven Zone gleichen sich die jeweils unterschiedlichen Energieniveaus der Leitungs- und Valenzbänder wie in Abb. (2) an. Elektronen aus dem n-dotierten Donatormaterial diffundieren in das p-dotierte Akzeptormaterial, sodass nach Rekombination von Elektronen und Löchern die aktive Zone eine geringere Raumladungsdichte als die restlichen Halbleiter aufweist. Details sind beim Eintrag zur aktiven Zone aufgeführt.

Pumpen Pumpen bezeichnet den Prozess, durch den ein Elektron auf ein höheres Energieniveau gebracht wird. In diesem Versuch ist zwischen elektrischem und optischem Pumpen zu unterscheiden. Elektrisches Pumpen findet bei →Diodenlasern Anwendung und wird dort erklärt. Optisches Pumpen besteht darin, durch Strahlung einen bestimmten Übergang anzuregen, sodass Elektronen durch →Absorption die Energie aufnehmen können. Optisches Pumpen kann entweder mit einer Lampe oder einem →Laser erfolgen, wobei die Lampe aufgrund des großen Spektralbereichs, in dem sie emittiert, nur einen geringen Wirkungsgrad erzielen kann, wohingegen bei Verwendung eines Lasers direkt eine passende Frequenz gewählt werden kann.

quantum efficiency Dieser Begriff – manchmal auch Quanteneffizienz genannt – beschreibt den Quotienten aus der Energie eines emittierten →Laserphotons und der Energie eines →Pumpphotons.

quantum yield Der Quotient aus der Anzahl der stimulierten Emissionen und der absorbierten Photonen in einem →Laser wird *quantum yield* oder auch Quantenausbeute genannt.

slope efficiency Die im Abschnitt →Laserschwelle erwähnte Steigung im Diagramm der Ausgangsleistung eines →Lasers in Bezug auf die →Pumpleistung oberhalb der Laserschwelle wird *slope efficiency* genannt. Sie ist bei

fester Temperatur über den Arbeitsbereich des Lasers näherungsweise konstant.

Spontane Emission Ein angeregtes Elektron kann auf zwei Arten wieder in einen Zustand niedrigerer Energie zurückfallen. Einer der beiden Vorgänge ist die spontane Emission, bei der die Abregung ohne äußeren Einfluss geschieht. Die Wahrscheinlichkeit wird wie bei der \rightarrow Absorption durch durch einen EINSTEINKoeffizienten – hier A_{21} – beschrieben $\frac{dN_2}{dt} = -N_2 A_{21}$ wobei N_2 die Anzahl der Elektronen im höheren Energieniveau beschreibt.

Stabilitätskriterium Für \rightarrow optische Resonatoren bei \rightarrow Lasern müssen die Radien der Spiegel R_i und deren Abstand L eine Bedingung einhalten, das sogenannte Stabilitätskriterium mit den Resonatorparametern g_i

$$0 \leq g_1 g_2 \leq 1 \quad g_i = 1 - \frac{L}{R_i} \quad (1)$$

Stimulierte Emission Ein mit der \rightarrow spontanen Emission konkurrierender Prozess zur Abregung eines Elektrons ist die stimulierte Emission, bei der auf das Elektron treffende Strahlung mit der ungefähren Energie des stimulierten Übergangs dazu führt, dass das Elektron auf das niedrigere Energieniveau gelangt. Dadurch wird der Energieunterschied zwischen den Niveaus abgegeben und befindet sich in Phase mit der stimulierenden Strahlung. Für die Übergangswahrscheinlichkeit gilt mit der Nomenklatur der obigen Gleichungen und dem EINSTEINKoeffizienten $B_{21} \frac{dN_1}{dt} = N_2 B_{21} u$

Wellenleiter \rightarrow Diodenlaser werden häufig zusammengeschlossen, indem die Strahlung durch Wellenleiter transportiert wird. Dabei handelt es sich um ein Material, bei dem die optische Grenzschicht derart ausgestaltet ist, dass die Welle an den Wänden des Wellenleiters jeweils total reflektiert wird.

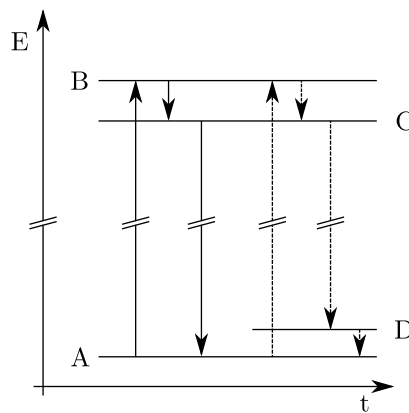


Abbildung 1: Schematisches Prinzip eines Drei-Niveau-Lasers (links, durchgezogen) und eines Vier-Niveau-Lasers (rechts, gestrichelt). Zeit und Energie sind nicht maßstabsgetreu.

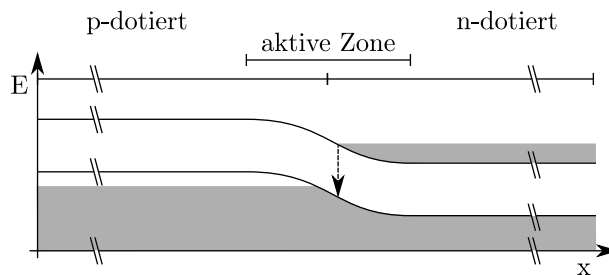


Abbildung 2: Schematisches Prinzip eines pn-Übergangs mit anliegender Spannung in Durchlassrichtung. Ein möglicher Übergang ist gestrichelt eingezeichnet.

Aufgaben und Aufbau

Aufgabe 1

Im ersten Versuchsabschnitt soll die Kennlinie zwischen Pump- und Laserleistung für verschiedene Temperaturen vermessen werden, aus der sowohl die *slope efficiency* als auch die Laserschwelle bestimmt werden kann. Dazu wird ein von einem externen Gerät gesteuerter Diodenlaser auf eine optische Schiene montiert. Das Steuergerät erlaubt es, den Pumpstrom im Bereich von 0 mA bis 1000 mA mit einer Genauigkeit von ± 1 mA zu regulieren. Ebenso kann die Temperatur der Diode über ein PELTIERelement im Bereich von 10°C bis 40°C eingestellt werden, wobei das Steuergerät die tatsächliche Temperatur am Chip misst und mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1$ $^\circ\text{C}$ darstellt. Trotz der Kontrollmessung der Temperatur am Chip der Laserdiode wird seitens des Herstellers empfohlen, zwischen zehn Sekunden und einigen Minuten abzuwarten, bevor mit der Messung begonnen wird. Der Diodenlaser liefert – wie alle Laser seiner Klasse – stark divergierendes Licht, das mittels einer Linse kollimiert werden muss, damit die Intensität durch eine Photodiode am anderen Ende der optischen Schiene

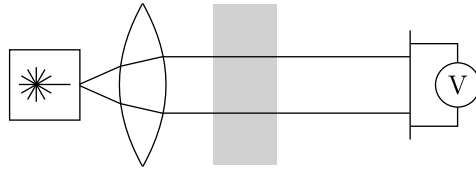


Abbildung 3: Schematischer Aufbau für die erste Aufgabe mit Laserdiode, Kollimatorlinse, Filter und Photodiode (v.l.n.r.). Bei der zweiten Aufgabe wurde die Photodiode durch einen CMOS-Chip ersetzt.

registriert werden kann. Das Messergebnis der Photodiode wurde durch ein Oszilloskop aufgenommen und am Rechner dargestellt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die zeitliche Auflösung des Oszilloskops nur in der Nähe der Laserschwelle zumindest qualitativ genutzt werden kann – ansonsten erfüllt das Oszilloskop hier nur die Funktion eines Voltmeters.

Die korrekte Kollimation des Lichtes des Diodenlasers wurde überprüft, indem am Steuergerät ein vergleichsweise hoher Strom von etwa 500 mA eingestellt wurde. Auf den in den Strahlengang gehaltenen IR-Detektorkarten wurde ohne Linse im Strahlengang in kurzer Entfernung zum Diodenlaser ein Punkt, in weiterer ein waagerechter Strich sichtbar. Die Detektorkarten mussten auch in den weiteren Versuchsteilen verwendet werden, weil der Diodenlaser trotz der Temperatur- und Pumpspannungsabhängigkeit Strahlung mit etwa 805 nm und der Nd:YAG-Laser Strahlung bei etwa 1064 nm emittiert. Der Strahl ist dann korrekt kollimiert, wenn sich weder Form noch Größe über die Länge der optischen Schiene von etwa 50 cm kaum ändert. Eine Fokussierung ist bei diesem Versuchsteil nicht sinnvoll – insbesondere da sich die ungefilterte Intensität der Diodenstrahlung als zu hoch für die Photodiode herausgestellt hat, die sich bereits weit im Sättigungsbereich befand.

Da durch eine Sättigung neue Fehler und Abweichungen bei der Bestimmung der *slope efficiency* zu erwarten sind, wurde ein Filter zwischen Linse und Photodiode eingebracht. Bei der Wahl der Filterstärken ist zwischen zwei Effekten ein Mittelweg zu finden: zwar dämpft ein starker Filter die Eingangsstrahlung so weit, dass der Sättigungsbereich der Photodiode vermieden wird aber dafür wird der Bereich vor der Laserschwelle im Diagramm kaum aufzulösen zu sein. Daher muss eine Filtereinstellung genutzt werden, bei der die Regressionsgerade, die zur Bestimmung der *slope efficiency* herangezogen wird, noch von hinreichend vielen Messpunkten außerhalb des Sättigungsbereichs der Photodiode gestützt wird, bei der aber ansonsten möglichst der gesamte Reaktionsbereich der Photodiode ausgenutzt wird. Von dieser Idee ausgehend könnte man versucht sein, für unterschiedliche Temperaturen auch unterschiedliche Filtereinstellungen zu nutzen, damit diese auf den jeweiligen Intensitätsverlauf optimiert werden können. Jedoch müsste dann um die Kennlinien zu den unterschiedlichen Temperaturen vergleichen zu können, zumindest das relative Verhältnis der Transmissivität der Filter bekannt sein und bei der Auswertung berücksichtigt werden. Da dadurch eine weitere Ungenauigkeit eingeführt werden würde, ist hier nur eine Filtereinstellung für alle vier Kurven genutzt worden. Der verwendete Filter bestand aus zwei Gläsern – die Angaben zur optischen Dichte sind im Abschnitt „Durchführung“ angegeben.

Da die tatsächlichen Messwerte keine Leistungen sondern ein Strom (für die Laserdiode) und eine Spannung (für die Photodiode) sind, müssen die Daten zur Bestimmung der *slope efficiency* jeweils in Leistungen umgerechnet werden. Das geschieht für die Laserdiode durch Abschätzen der elektrischen Pumpleistung bei einer zugrunde gelegten Spannung von 1,9 V. Bei der Photodiode kann durch eine Vergleichsmessung mit einem Powermeter das Verhältnis zwischen in der Diode erzeugter Spannung und Laserleistung bestimmt werden, von dem in der Auswertung angenommen wird, dass es linear verläuft. Dennoch bleibt diese Korrelation wellenlängenabhängig, sodass beim Nd:YAG-Laser eine erneute Kalibrierung notwendig ist. Um mögliche Fehler weitestgehend zu eliminieren wurde für die Vergleichsmessung ein Punkt weit oberhalb der Laserschwelle des Diodenlasers ausgesucht, der jedoch noch nicht so viel Strom durch die Laserdiode fließen lässt, dass die Intensität der Laserstrahlung zu groß wird und die Photodiode sich in ihrem Sättigungsbereich befindet. Der Sättigungsbereich ließ sich aus den Daten eines Vorversuchs bestimmen.

Aufgabe 2

Nachdem in der ersten Aufgabe nur die Leistung des Lasers analysiert wurde, befasst sich die zweite Aufgabe mit dem Strahlprofil. Dazu wurde der Aufbau beibehalten, aber statt der Photodiode ein CMOS-Chip auf der optischen Schiene montiert. Dabei bietet sich die Wahl eines CMOS-Chips gegenüber einem üblicheren CCD-Chip an, weil der CMOS empfindlicher im hier verwendeten Infrarotbereich ist. Die höhere Empfindlichkeit bringt aber auch ein größeres Risiko der Überstrahlung mit sich. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Chip bei extremer lokaler Überbelichtung statt des zu erwartenden weißen Flecks einen schwarzen Bereich melden kann. Das ist jedoch im Wesentlichen wichtig für die dritte Aufgabe.

Im Rahmen der Versuchsdurchführung hat sich ergeben, dass der bis dahin verwendete Filter noch nicht stark genug war, um eine Überbelichtung zu verhindern, sodass zwischen dem bereits eingebauten Filter aus der ersten Aufgabe ein weiterer auf der optischen Schiene montiert werden musste.

Aufgabe 3

Die dritte Aufgabe entspricht der ersten mit dem Unterschied, dass dieses Mal die Kurven eine durch den Diodenlaser gepumpten Nd:YAG-Lasers bestimmt werden sollen. Die zu bestimmenden – z.T. temperaturabhängigen – Kenndaten sind identisch und auch das Verfahren zur Bestimmung der echten *slope efficiency* – also das Verhältnis der Leistungen statt der gemessenen Daten Strom und Spannung – kann beibehalten werden. Beim Aufbau wurde nun nach der Kollimation mittels einer Linse der Strahl der Laserdiode wieder fokussiert. Im Brennpunkt wurde das aktive Medium des Nd:YAG-Lasers untergebracht, dessen der Linse zugewandte Seite bereits herstellerseitig als Spiegel beschichtet wurde. In einem Abstand der das Stabilitätskriterium nach Glg. (1) erfüllt, wurde dann der zu einem Kugelsegment gewölbte Spiegel derart montiert, dass sich das aktive Medium des

Lasers innerhalb der Kugel befände, wäre diese vollständig. Dieser Spiegel lässt bei einer Wellenlänge von 1064 nm etwa 2% durch und reflektiert – näherungsweise – den Rest der Strahlung. Sowohl das aktive Medium und damit auch der daran befestigte Spiegel als auch der separate Spiegel lassen sich sowohl horizontal als auch vertikal neigen. Auf der anderen Seite des Nd:YAG-Lasers wurde der CMOS-Sensor zunächst beibehalten um das Strahlprofil zu verbessern und möglichst nahe an TEM₀₀ anzunähern. Nachdem dieser Zustand erreicht wurde, musste die Stabilität des Lasers noch dadurch überprüft werden, dass der gesamte Bereich oberhalb der Laserschwelle des Diodenlasers mittels des zugehörigen Steuerungsgeräts durchfahren wurde. Hier zeigte sich, dass das Strahlprofil konstant blieb, sodass die Einbringung einer Blende in den Strahlgang nicht mehr nötig war. Diese Blende würde innerhalb des Resonators montiert werden.

Zwischen dem Austrittsspiegel des Nd:YAG-Lasers und der Photodiode wurden zwei Filter eingesetzt: der erste um die verbleibende Pumpstrahlung aus dem Diodenlaser zu unterdrücken und der andere um die Photodiode davor zu bewahren, in deren Sättigungsbereich zu arbeiten.

Durchführung

Vorversuch

Um aus den gemessenen Informationen – also Stromstärke und Spannung – die gewünschten Daten, also Leistungswerte – errechnen zu können, ist eine Kalibrierung und eine Schätzung nötig.

Der als näherungsweise linear angenommene Zusammenhang zwischen Laserleistung und Photodiodenspannung wird von zwei Messwerten gestützt. Bei abgedeckter Photodiode liegt noch eine Spannung von $U_0 = 0,80 \pm 0,10$ mV an und die Leistung beträgt $P_0 = 0$ mW. Bei einfallender Strahlung mit einer durch das Powermeter bestimmten Leistung von $P_1 = 11,10 \pm 0,10$ mW wurde eine Spannung von $U_1 = 593 \pm 10$ mV gemessen. Der Fehler für die Leistungsangabe entspricht der Anzeigegenauigkeit des Powermeters. Für die Regressionsgerade

$$P = aU + b \quad (2)$$

gilt dann $a = (0,01873 \pm 0,00017) \frac{\text{mW}}{\text{mV}}$, $b = (-0,0150 \pm 0,0020)$ mW. Die Fehlerrechnung folgt – wenn nicht anders angegeben – auch bei den anderen Aufgaben den Regeln der GAUSSSchen Fehlerfortpflanzung.

Da es genauso viele Messwerte wie freie Parameter gibt, wurde der Fehler der Parameter aus dem Abstand zu den Parametern der Regressionsgeraden bei um die jeweiligen Fehler vergrößerten Messwerten bestimmt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass P_0 als nicht fehlerbehaftet angesehen wird.

Die elektrische Pumpleistung lässt sich näherungsweise dadurch bestimmen, dass die Spannung an der Laserdiode laut Datenblatt bei $U_D = (1,9 \pm 0,1)$ V liegt. Der Fehler dieses Wertes ergibt sich aus der Anzahl der aufgeführten signifikanten Stellen. Mithilfe weiterer – hier aus Platzgründen fehlender – Messdaten wurde das Sättigungsverhalten geschätzt: ab einer Laserleistung von etwa 9 mW und damit bei diesem Aufbau ab einer Pumpleistung von 0,4 W erreicht die Photodiode ihren Sättigungsbereich.

Um bei den weiteren Versuchen abschätzen zu können, wie fein die Messintervalle sein müssten und ob der Aufbau generell funktionsfähig ist, wurde eine exemplarische Messreihe bei 23,8 °C und den optischen Dichten der Filter 0,5 sowie 1,5 aufgenommen. Die Daten sind aus Platzgründen nicht aufgeführt, machen aber deutlich, dass der Bereich vor der Laserschwelle ohne viele Stützpunkte zuverlässige Informationen liefern wird, aber die Bestimmung der *slope efficiency* wesentlich davon abhängig, wie gut es gelingt, viele Messwerte auf der Steigung direkt nach der Laserschwelle aber vor dem Erreichen der Sättigung zu erhalten.

Aufgabe 1

Da die Position der Laserschwelle und die *slope efficiency* in Abhängigkeit von der Temperatur bestimmt werden sollten, war zunächst die Frage zu klären, welche Temperaturen ausgewählt werden sollten. Um im Rahmen der dritten Aufgabe die Messdaten besser vergleichen zu können, wurden die Temperaturen verwendet, die später auch zu nutzen waren, sodass die Übergänge des Nd:YAG-Lasers einmal in Resonanz, einmal mit mehr und einmal mit weniger Strahlungsenergie als die der Resonanzfrequenz angeregt werden. Da der Diodenlaser nicht monochromatisches Licht abstrahlt, kann damit jeweils nur das Maximum des Intensitätsverlaufs über die Frequenzen beeinflusst werden. Die ausgewählten Temperaturen sind für diesen Versuch zunächst unerheblich, sollten aber gleichmäßig und über einen signifikanten Teil des Arbeitsbereichs des Steuergeräts verteilt sein. Nach den Kalibrierkurven aus der Dokumentation des Versuchs ergaben sich folgende Temperaturen: $T_1 = (15,9 \pm 0,1)$ °C, $T_2 = (23,6 \pm 0,1)$ °C, $T_3 = (31,8 \pm 0,1)$ °C, $T_4 = (38,0 \pm 0,1)$ °C.

Der Fehler entspricht den Angaben aus dem Handbuch zum Steuergerät des Diodenlasers. Die Fehlerangaben für die Spannung in den Tabellen sind aus den Schwankungen geschätzt.

Bei allen vier Messreihen wurde das gleiche Verfahren zur Bestimmung der Laserschwelle und der *slope efficiency* benutzt, bei dem zunächst je ein näherungsweise linear verlaufender Abschnitt der Messdaten vor der

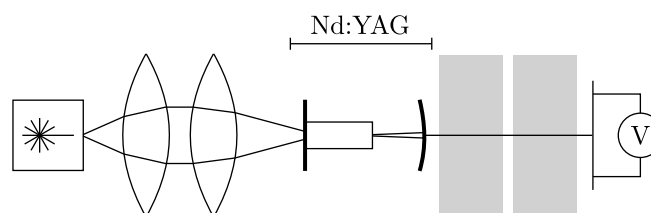


Abbildung 4: Schematischer Aufbau für die dritte Aufgabe mit Laserdiode, Kollimatorlinse, Fokussierlinse, Spiegel, aktivem Medium, Spiegel, zwei Filtern und Photodiode (v.l.n.r.). Zur Kalibrierung wurde die Photodiode durch einen CMOS-Chip ersetzt.

Laserschwelle (im Folgenden A-Bereich) und direkt nach der Laserschwelle (im Folgenden B-Bereich) aus-
 gesucht und dann aus diesen Daten jeweils die Regressionsgerade errechnet wurde. Der Schnittpunkt der beiden
 Geraden ergibt die Laserschwelle, die Steigung der Gerade für die Messdaten nach der Laserschwelle dann die
slope efficiency.

Die Messdaten für die Temperatur T_1 sind in Tab. (1) aufgeführt. Das Diagramm Abb. (5) wurde genutzt,
 um die Messwerte für die Pumpleistungen P_x , die folgende Bedingung erfüllen, dem A-Bereich zuzuweisen
 $142,5 \text{ mW} \leq P_x \leq 245,1 \text{ mW}$ Definiert man die Ausgleichsgerade mit den Parametern $P_1 = cP_P + d$ ergibt die
 lineare Regression die Werte $c = (0,00848 \pm 0,00021)$, $d = (3,640 \pm 0,044) \text{ mW}$ mit dem Bestimmtheitsmaß $R^2 =$
 $0,996$ Für den B-Bereich mit der Bedingung $264,1 \text{ mW} \leq P_x \leq 285,0 \text{ mW}$ erhält man so $c' = (0,0642 \pm 0,0028)$,
 $d' = (-10,85 \pm 0,78) \text{ mW}$ und ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,98$ Alle Funktionen sind in den entsprechenden
 Diagrammen eingezeichnet; auf Grenzgeraden wurde dabei der Übersichtlichkeit halber verzichtet. Für die x-
 Koordinate des Schnittpunkts gilt $cx + d = c'x + d' \Leftrightarrow cx - c'x = d' - d \Leftrightarrow x = \frac{d'-d}{c-c'}$ Die Laserschwelle,
 die mit der x-Koordinate des Schnittpunkts identisch ist, befindet sich daher bei $L_1 = (260 \pm 22) \text{ mW}$ was
 einem Pumpstrom von $I_1 = (137 \pm 14) \text{ mA}$ entspricht. Bei den Fehlerangaben von L_1 und I_1 wurde zunächst
 berücksichtigt, dass der Fehler von c im Vergleich zu dem von c' und der von d im Vergleich zu dem von d'
 vernachlässigbar ist; die restliche Berechnung erfolgte wie üblich.

Strom [mA]	Spannung [mV]	Pumpleistung [mW]	Diodenleistung [mW]
25,0 ± 1,0	149,4 ± 8,0	47,5 ± 4,4	2,78 ± 0,15
50,0 ± 1,0	228,4 ± 8,0	95,0 ± 5,2	4,26 ± 0,15
75,0 ± 1,0	259,3 ± 8,0	142,5 ± 6,3	4,84 ± 0,16
90,0 ± 1,0	272,8 ± 8,0	171,0 ± 6,9	5,09 ± 0,16
100,0 ± 1,0	282,1 ± 8,0	190,0 ± 7,3	5,27 ± 0,16
110,0 ± 1,0	289,5 ± 8,0	209,0 ± 7,7	5,41 ± 0,16
120,0 ± 1,0	299,4 ± 8,0	228,0 ± 8,0	5,59 ± 0,16
125,0 ± 1,0	302,5 ± 8,0	237,5 ± 8,2	5,65 ± 0,16
127,0 ± 1,0	302,5 ± 8,0	241,3 ± 8,3	5,65 ± 0,16
129,0 ± 1,0	307,4 ± 8,0	245,1 ± 8,3	5,74 ± 0,16
131,0 ± 1,0	311,1 ± 8,0	248,9 ± 8,3	5,81 ± 0,16
133,0 ± 1,0	313,0 ± 8,0	252,7 ± 8,4	5,85 ± 0,16
135,0 ± 1,0	317,3 ± 8,0	256,5 ± 8,4	5,93 ± 0,16
137,0 ± 1,0	321,6 ± 8,0	260,3 ± 8,4	6,01 ± 0,16
139,0 ± 1,0	327,2 ± 8,0	264,1 ± 8,4	6,11 ± 0,16
141,0 ± 1,0	337,0 ± 8,0	267,9 ± 8,3	6,30 ± 0,16
142,0 ± 1,0	346,9 ± 8,0	269,8 ± 8,1	6,48 ± 0,16
143,0 ± 1,0	353,7 ± 8,0	271,7 ± 8,0	6,61 ± 0,16
144,0 ± 1,0	358,6 ± 8,0	273,6 ± 8,0	6,70 ± 0,16
145,0 ± 1,0	369,8 ± 8,0	275,5 ± 7,9	6,91 ± 0,16
146,0 ± 1,0	372,2 ± 8,0	277,4 ± 7,9	6,96 ± 0,16
147,0 ± 1,0	384,6 ± 8,0	279,3 ± 7,7	7,19 ± 0,16
149,0 ± 1,0	392,0 ± 8,0	283,1 ± 7,7	7,33 ± 0,16
150,0 ± 1,0	394,4 ± 8,0	285,0 ± 7,7	7,37 ± 0,16
155,0 ± 1,0	409,9 ± 8,0	294,5 ± 7,6	7,66 ± 0,17
160,0 ± 1,0	424,1 ± 8,0	304,0 ± 7,6	7,93 ± 0,17
165,0 ± 1,0	428,4 ± 8,0	313,5 ± 7,8	8,01 ± 0,17
175,0 ± 1,0	435,8 ± 8,0	332,5 ± 8,0	8,15 ± 0,17
200,0 ± 1,0	464,2 ± 8,0	380,0 ± 8,4	8,68 ± 0,17

Tabelle 1: Aufgabe 1: Messreihe mit T_1

Die aufgenommenen Messwerte für die zweite Temperatureinstellung sind in Tab. (2) aufgeführt. Dabei ist
 während der Datenaufnahme aufgefallen, dass die Messwerte bei T_2 in der Nähe der Laserschwelle deutlich
 stärker schwanken. Aus Abb. (6) ist der A-Bereich mit $171,0 \text{ mW} \leq P_x \leq 266 \text{ mW}$ bestimmt worden, sodass
 die Ausgleichsgerade $P_2 = eP_P + f$ für diesen Bereich mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,98$ und den
 Parametern $e = (0,00766 \pm 0,00028)$, $f = (3,763 \pm 0,061) \text{ mW}$ bestimmt werden konnte. Der B-Bereich erfasst
 Messwerte mit der Bedingung $277 \text{ mW} \leq P_x \leq 309,7 \text{ mW}$ und ergibt die Parameter $e' = (0,0440 \pm 0,0013)$,
 $f' = (-5,94 \pm 0,39) \text{ mW}$ bei einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,98$ Der Schnittpunkt befindet sich bei
 $L_2 = (267 \pm 19) \text{ mW}$ sodass die Laserschwelle bei einem Pumpstrom von $I_2 = (140 \pm 13) \text{ mA}$ erreicht ist. Die
 Fehlerrechnung folgt der o.a. Methode.

Die dritte Messung und Auswertung erfolgte analog aus den Daten in Tab. (3) unter Zuhilfenahme der Abb. (7).
 Der A-Bereich wurde auf das Intervall $218,5 \text{ mW} \leq P_x \leq 275,5 \text{ mW}$ festgelegt, wodurch die Ausgleichsgerade
 $P_3 = gP_P + h$ mit den Parametern $g = (0,00921 \pm 0,00020)$, $h = (3,304 \pm 0,050) \text{ mW}$ und dem Bestimmtheitsmaß
 $R^2 = 0,998$ gegeben ist. Im B-Bereich $286,9 \text{ mW} \leq P_x \leq 296,4 \text{ mW}$ ergaben sich für die Parameter $g' =$
 $(0,0899 \pm 0,0038)$, $h' = (-19,7 \pm 1,1) \text{ mW}$ und für das Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,992$ Der Schnittpunkt der
 beiden Geraden findet sich dann bei $L_3 = (285 \pm 20) \text{ mW}$ was einem Diodenstrom von $I_3 = (150 \pm 13) \text{ mA}$
 entspricht.

Bei der vierten Messreihe hat sich herausgestellt, dass die Intensität des Diodenlasers so weit zugenommen
 hat, dass es notwendig wurde, einen weiteren Filter in den Strahlengang zu bringen. Um die Messdaten dennoch
 vergleichen zu können, wurde bei auf T_4 eingeregelter Temperatur ein vergleichsweise hoher Diodenstrom von
 374 mA eingestellt und die Laserleistung mit dem Powermeter zweimal vermessen. Zwar war in beiden Fällen der
 Aufbau so wie bei den drei vorherigen Messungen – also mit zwei Filtergläsern – aber in dem zweiten Fall wurde
 der zusätzliche Filter eingebaut. Die beiden Messwerte lauten $P'_1 = (2,63 \pm 0,01) \text{ mW}$, $P'_2 = (0,52 \pm 0,01) \text{ mW}$
 Definiert man den Korrekturfaktor λ nach $\lambda = \frac{P'_1}{P_1}$ so ergibt sich $\lambda = (0,1977 \pm 0,0039)$ Für die Bestimmung
 der Laserschwelle ist der Korrekturfaktor unerheblich, aber die *slope efficiency* muss um diesen Wert korrigiert
 werden. Da die Schwankungen der vom Oszilloskop angezeigten Werte bei dieser Messreihe deutlich größer als
 die bei den anderen Messreihen waren, wurde der Fehler hier durchweg größer geschätzt.

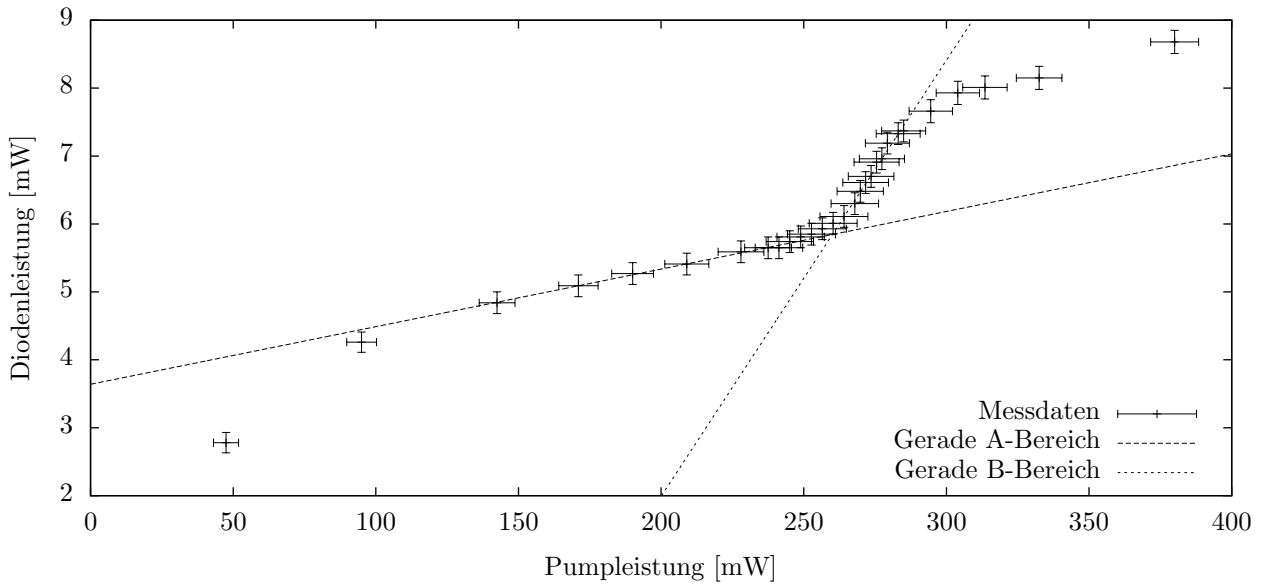


Abbildung 5: Aufgabe 1: Messreihe mit T_1

Strom [mA]	Spannung [mV]	Pumpleistung [mW]	Diodenleistung [mW]
25,0 ± 1,0	146,2 ± 8,0	47,5 ± 4,5	2,72 ± 0,15
50,0 ± 1,0	226,5 ± 8,0	95,0 ± 5,3	4,23 ± 0,15
75,0 ± 1,0	258,0 ± 8,0	142,5 ± 6,3	4,82 ± 0,16
80,0 ± 1,0	261,0 ± 8,0	152,0 ± 6,6	4,87 ± 0,16
85,0 ± 1,0	268,5 ± 8,0	161,5 ± 6,7	5,01 ± 0,16
90,0 ± 1,0	273,5 ± 8,0	171,0 ± 6,9	5,11 ± 0,16
95,0 ± 1,0	276,5 ± 8,0	180,5 ± 7,1	5,16 ± 0,16
100,0 ± 1,0	280,2 ± 8,0	190,0 ± 7,3	5,23 ± 0,16
105,0 ± 1,0	281,5 ± 8,0	199,5 ± 7,6	5,26 ± 0,16
110,0 ± 1,0	285,2 ± 8,0	209,0 ± 7,8	5,33 ± 0,16
115,0 ± 1,0	290,1 ± 8,0	218,5 ± 7,9	5,42 ± 0,16
120,0 ± 1,0	293,2 ± 8,0	228,0 ± 8,1	5,48 ± 0,16
125,0 ± 1,0	297,5 ± 8,0	237,5 ± 8,3	5,56 ± 0,16
130,0 ± 1,0	303,1 ± 8,0	247,0 ± 8,4	5,66 ± 0,16
135,0 ± 1,0	308,0 ± 8,0	256,5 ± 8,6	5,75 ± 0,16
140,0 ± 1,0	312 ± 15	266 ± 15	5,83 ± 0,29
145,0 ± 1,0	319 ± 15	276 ± 15	5,96 ± 0,29
146,0 ± 1,0	329 ± 15	277 ± 15	6,15 ± 0,29
147,0 ± 1,0	342,6 ± 8,0	279,3 ± 8,4	6,40 ± 0,16
148,0 ± 1,0	340,7 ± 8,0	281,2 ± 8,5	6,37 ± 0,16
149,0 ± 1,0	351,2 ± 8,0	283,1 ± 8,3	6,56 ± 0,16
150,0 ± 1,0	355,6 ± 8,0	285,0 ± 8,3	6,65 ± 0,16
151,0 ± 1,0	358,6 ± 8,0	286,9 ± 8,3	6,70 ± 0,16
153,0 ± 1,0	368,5 ± 8,0	290,7 ± 8,2	6,89 ± 0,16
155,0 ± 1,0	374,7 ± 8,0	294,5 ± 8,2	7,00 ± 0,16
157,0 ± 1,0	387,7 ± 8,0	298,3 ± 8,1	7,25 ± 0,16
159,0 ± 1,0	393,2 ± 8,0	302,1 ± 8,0	7,35 ± 0,16
160,0 ± 1,0	396,3 ± 8,0	304,0 ± 8,0	7,41 ± 0,16
161,0 ± 1,0	400,0 ± 8,0	305,9 ± 8,0	7,48 ± 0,16
163,0 ± 1,0	411,1 ± 8,0	309,7 ± 7,9	7,68 ± 0,17
165,0 ± 1,0	409,9 ± 8,0	313,5 ± 8,0	7,66 ± 0,17
170,0 ± 1,0	423,5 ± 8,0	323,0 ± 8,0	7,92 ± 0,17
175,0 ± 1,0	437,0 ± 8,0	332,5 ± 8,0	8,17 ± 0,17
200,0 ± 1,0	463,6 ± 8,0	380,0 ± 8,5	8,67 ± 0,17

Tabelle 2: Aufgabe 1: Messreihe mit T_2

Der A-Bereich ist für T_4 nicht so markant wie bei den anderen Messdaten und enthält einen kleinen Knick, auf den noch in der Diskussion eingegangen wird. Für die Auswertung wurde der A-Bereich auf das Intervall $171,0 \text{ mW} \leq P_x \leq 266,0 \text{ mW}$ festgelegt, wodurch die Ausgleichsgerade $P_4 = iP_P + j$ mit den Parametern $i = (0,0680 \pm 0,0021)$, $j = (-3,93 \pm 0,46) \text{ mW}$ und dem Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,994$ gegeben ist. Im B-Bereich $294,5 \text{ mW} \leq P_x \leq 307,8 \text{ mW}$ ergaben sich für die Parameter $i' = (0,536 \pm 0,041)$, $j' = (-140 \pm 12) \text{ mW}$ und für das Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,97$. Der Schnittpunkt der beiden Geraden findet sich dann bei $L_4 = (307 \pm 35) \text{ mW}$ was einem Diodenstrom von $I_4 = (162 \pm 20) \text{ mA}$ entspricht. Die vier Messpunkte für die Laserschwelle lassen sich nun über der Temperatur auftragen. Aus Abb. (9) ist ersichtlich, dass die Laserschwelle mit der Temperatur steigt. Die Gründe und Details werden im Abschnitt „Diskussion“ erörtert.

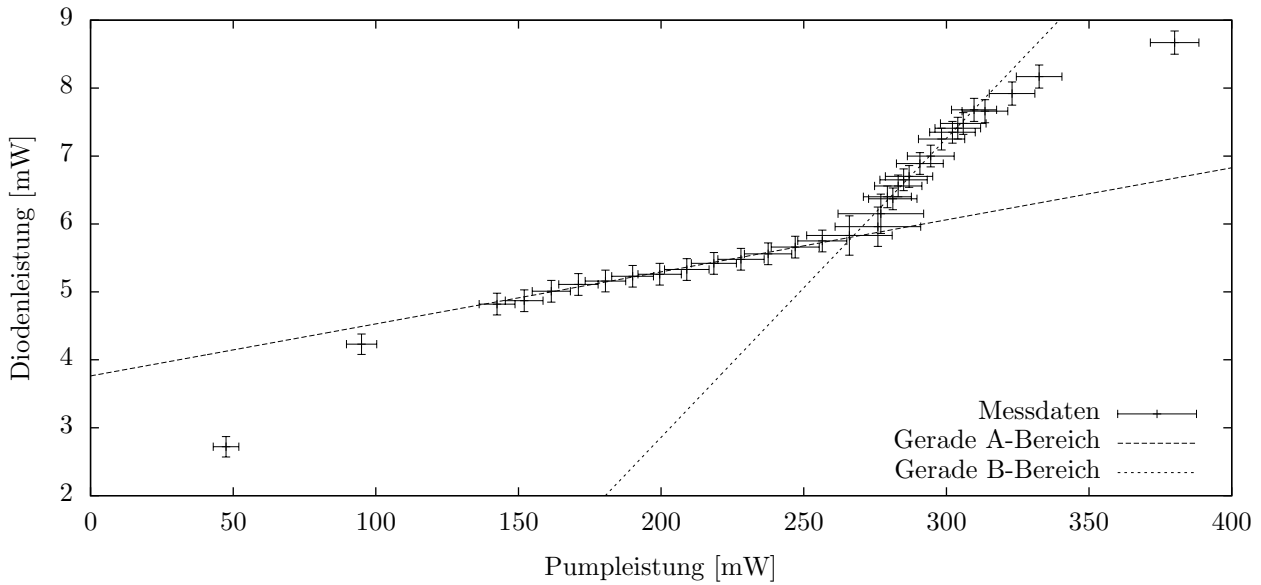


Abbildung 6: Aufgabe 1: Messreihe mit T_2

Strom [mA]	Spannung [mV]	Pumpleistung [mW]	Diodenleistung [mW]
25,0 ± 1,0	142,5 ± 8,0	47,5 ± 4,6	2,65 ± 0,15
50,0 ± 1,0	221,0 ± 8,0	95,0 ± 5,3	4,12 ± 0,15
75,0 ± 1,0	263,7 ± 8,0	142,5 ± 6,2	4,92 ± 0,16
100,0 ± 1,0	275,9 ± 8,0	190,0 ± 7,4	5,15 ± 0,16
115,0 ± 1,0	284,6 ± 8,0	218,5 ± 8,0	5,32 ± 0,16
120,0 ± 1,0	289,5 ± 8,0	228,0 ± 8,2	5,41 ± 0,16
125,0 ± 1,0	293,8 ± 8,0	237,5 ± 8,4	5,49 ± 0,16
130,0 ± 1,0	297,5 ± 8,0	247,0 ± 8,5	5,56 ± 0,16
135,0 ± 1,0	303,7 ± 8,0	256,5 ± 8,7	5,67 ± 0,16
140,0 ± 1,0	308,0 ± 8,0	266,0 ± 8,8	5,75 ± 0,16
145,0 ± 1,0	313,0 ± 8,0	275,5 ± 8,9	5,85 ± 0,16
150,0 ± 1,0	317,9 ± 8,0	285,0 ± 9,1	5,94 ± 0,16
151,0 ± 1,0	325,9 ± 8,0	286,9 ± 8,9	6,09 ± 0,16
152,0 ± 1,0	338,3 ± 8,0	288,8 ± 8,7	6,32 ± 0,16
153,0 ± 1,0	348,1 ± 8,0	290,7 ± 8,6	6,50 ± 0,16
154,0 ± 1,0	356,2 ± 8,0	292,6 ± 8,5	6,66 ± 0,16
155,0 ± 1,0	364,2 ± 8,0	294,5 ± 8,4	6,81 ± 0,16
156,0 ± 1,0	372,2 ± 8,0	296,4 ± 8,3	6,96 ± 0,16
157,0 ± 1,0	373,5 ± 8,0	298,3 ± 8,3	6,98 ± 0,16
159,0 ± 1,0	385,8 ± 8,0	302,1 ± 8,2	7,21 ± 0,16
160,0 ± 1,0	388,3 ± 8,0	304,0 ± 8,2	7,26 ± 0,16
161,0 ± 1,0	392,0 ± 8,0	305,9 ± 8,1	7,33 ± 0,16
163,0 ± 1,0	397,5 ± 8,0	309,7 ± 8,1	7,43 ± 0,16
165,0 ± 1,0	404,9 ± 8,0	313,5 ± 8,1	7,57 ± 0,16
170,0 ± 1,0	413,0 ± 8,0	323,0 ± 8,2	7,72 ± 0,17
175,0 ± 1,0	422,2 ± 8,0	332,5 ± 8,2	7,89 ± 0,17
200,0 ± 1,0	464,2 ± 8,0	380,0 ± 8,4	8,68 ± 0,17
225,0 ± 1,0	477,2 ± 8,0	427,5 ± 9,1	8,92 ± 0,17

Tabelle 3: Aufgabe 1: Messreihe mit T_3

Aufgabe 2

Mit einer Temperatur von $23,7^\circ\text{C}$ wurden die Bilder in Abb. (10) bis Abb. (11) aufgenommen. Für die Filter sind die beiden Scheiben mit einer optischen Dichte von 1,5 und 0,5 verwendet worden. Um die Form besser erkennen zu können, wurden alle Aufnahmen invertiert wiedergegeben. Damit besteht zwischen einem ursprünglichen Grauwert G und dem neuen Grauwert G' der Zusammenhang $G' = 255 - G$. Die Bilder aus Abb. (10) sind – wie auch an der deutlich niedrigeren Intensität im Vergleich zu den anderen beiden Abbildungen zu erkennen – unterhalb der Laserschwelle mit (135 ± 1) mA bzw. (140 ± 1) mA Pumpstrom aufgenommen worden. Nach Aufgabe 1 befindet sich für die Temperatur von $23,6^\circ\text{C}$ die Pumpstromstärke für die Laserschwelle bei $I_2 = (140 \pm 13)$ mW und verschiebt sich bei höheren Temperaturen zu größeren Pumpströmen, sodass die Beobachtung hier mit denen aus Aufgabe 1 übereinstimmt. Die anderen beiden Abbildungen sind bei (150 ± 1) mA bzw. (155 ± 1) mA Pumpstrom aufgenommen worden.

Da das im Skript erwähnte Programm zur Konvertierung der Graustufenbilder in eine zahlenbasierte Tabelle nicht funktionierte, sind die Bilddaten mit eigenen Programmen weiterverarbeitet worden. Da die Wiedergabe der Zahlen keinen praktischen Wert hat und nur die Informationen aus den Bildern dupliziert, wurde auf das Einfügen der Tabellen verzichtet. Auffällig ist, dass sich die beiden ersten Strahlprofile in Bezug auf die Intensität kaum voneinander unterscheiden, die letzten beiden aber schon. Das entspricht deutlich den zuvor erhaltenen Messwerten, dass die Strahlungsintensität oberhalb der Laserschwelle stark zunimmt. Die runden Objekte, die

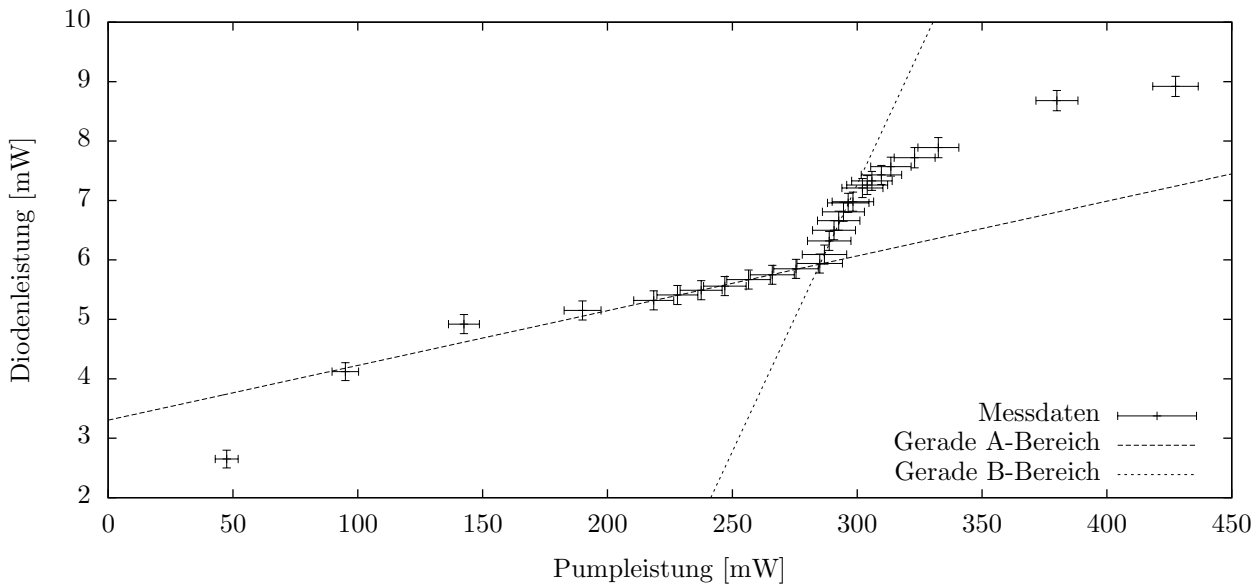


Abbildung 7: Aufgabe 1: Messreihe mit T_3

Strom [mA]	Spannung [mV]	Strom [mA]	Spannung [mV]
25,0 ± 1,0	55 ± 15	150,0 ± 1,0	174 ± 15
30,0 ± 1,0	56 ± 15	151,0 ± 1,0	179 ± 15
50,0 ± 1,0	57 ± 15	152,0 ± 1,0	181 ± 15
40,0 ± 1,0	59 ± 15	153,0 ± 1,0	183 ± 15
60,0 ± 1,0	67 ± 15	154,0 ± 1,0	186 ± 15
75,0 ± 1,0	70 ± 15	155,0 ± 1,0	191 ± 15
80,0 ± 1,0	73 ± 15	156,0 ± 1,0	194 ± 15
90,0 ± 1,0	82 ± 15	157,0 ± 1,0	197 ± 15
100,0 ± 1,0	93 ± 15	158,0 ± 1,0	215 ± 15
105,0 ± 1,0	104 ± 15	159,0 ± 1,0	230 ± 15
110,0 ± 1,0	110 ± 15	160,0 ± 1,0	241 ± 15
115,0 ± 1,0	117 ± 15	161,0 ± 1,0	253 ± 15
120,0 ± 1,0	120 ± 15	162,0 ± 1,0	257 ± 15
125,0 ± 1,0	128 ± 15	175,0 ± 1,0	294 ± 15
130,0 ± 1,0	135 ± 15	200,0 ± 1,0	320 ± 15
140,0 ± 1,0	152 ± 15	225,0 ± 1,0	334 ± 15
148,0 ± 1,0	171 ± 15	-	-

Tabelle 4: Aufgabe 1: Messreihe mit T_4 : unkorrigierte Messdaten

bei den Aufnahmen zu erkennen sind, sind wohl Partikel auf dem CMOS-Chip, da ein Bewegen des Filters zwischen Laser und CMOS-Chip die Position der Kreise auf dem Bild nicht änderte. Um die Bilder entlang der beiden Achsen auswerten zu können, ohne diese Artefakte durch eine Kalibrierung des Bildes herauszurechnen, wurden die Bilddaten auf die Achsen projiziert, indem alle Grauwerte einer Zeile bzw. einer Spalte aufaddiert wurden. Das scheint angesichts der präzisen parallelen Ausrichtung, des etwa rechteckigen Laserprofils zu den Bildachsen zulässig. Diese „Querschnitte“ sind in Abb. (12) für die senkrechte (lange) Achse und in Abb. (13) für die waagerechte (kurze) Achse eingezeichnet. Aufgrund der hohen Punktedichte sind die einzelnen Werte mit Linien verbunden worden, damit die Tendenz besser sichtbar wird. Die dadurch entstehenden interpolierten Zwischenwerte sind nicht als Messwerte anzusehen.

Die Position der Linse hinter dem Diodenlaser wurde zwar gegenüber Aufgabe 1 verändert; die Aufnahmen der Strahlprofile wurden jedoch bei den immer gleichen Einstellungen erstellt.

Bei den Zeilensummen in Abb. (12) fällt zunächst auf, dass die beiden unteren Niveaus, die die Daten für einen Pumpstrom unterhalb der Laserschwelle darstellen, außer in den Randbereichen nahezu konstant verlaufen und keine Vorzugsseite haben. Die leichten Intensitätsschwankungen auf den Plateaus sind aber nicht konstant unter Veränderungen des Pumpstroms, sodass man sie nicht direkt mit geometrischen Effekten im Aufbau des Diodenlasers erklären kann. Auffällig ist weiterhin, dass unterhalb der Laserschwelle die Intensität der Strahlung über das gesamte Strahlprofil unter Erhöhung des Pumpstroms gleichmäßig verteilt zunimmt, wohingegen beim Überschreiten der Laserschwelle die Intensität in den Randbereichen zunächst deutlich abnimmt und erst unter weiterer Erhöhung des Pumpstroms zu einer erhöhten Intensität in den Randbereichen führt. Nach dem Überschreiten der Laserschwelle bildet sich jedoch eine Vorzugsseite aus; der untere Teil des Strahls ist deutlich intensiver als der obere. Erhöht man den Pumpstrom und damit die Pumpleistung noch weiter, so bildet sich eine weitere Intensitätsspitze aus, die an Intensität fast an die erste Spitze heranreicht. Die Kennlinien für die Pumpströme oberhalb der Laserschwelle sind nicht gleichmäßig, sondern moduliert, wobei die Ähnlichkeit der Modulation augenfällig ist – besonders der mittlere Bereich zwischen 250 und 320 Pixeln, in dem die Maxima und Minima fast deckungsgleich sind. Hier liegt die Vermutung nahe, dass es sich um geometrische Einflüsse der Laserdiode handelt. Da laut Tutor diese Diode aus zwei übereinander angeordneten Chips besteht und somit

Strom [mA]	Spannung [mV]	Pumpleistung [mW]	Diodenleistung [mW]
25,0 ± 1,0	279 ± 15	47,5 ± 4,5	5,21 ± 0,28
30,0 ± 1,0	285 ± 15	57,0 ± 4,9	5,32 ± 0,29
40,0 ± 1,0	298 ± 15	76,0 ± 5,7	5,56 ± 0,29
50,0 ± 1,0	288 ± 15	95,0 ± 6,9	5,38 ± 0,29
60,0 ± 1,0	337 ± 15	114,0 ± 7,0	6,30 ± 0,29
75,0 ± 1,0	356 ± 15	142,5 ± 7,9	6,65 ± 0,29
80,0 ± 1,0	369 ± 15	152,0 ± 8,1	6,90 ± 0,29
90,0 ± 1,0	415 ± 15	171,0 ± 8,1	7,75 ± 0,29
100,0 ± 1,0	470 ± 15	190,0 ± 8,0	8,79 ± 0,29
105,0 ± 1,0	525 ± 15	199,5 ± 7,6	9,81 ± 0,29
110,0 ± 1,0	556 ± 15	209,0 ± 7,5	10,41 ± 0,30
115,0 ± 1,0	591 ± 15	218,5 ± 7,4	11,05 ± 0,30
120,0 ± 1,0	608 ± 15	228,0 ± 7,5	11,37 ± 0,30
125,0 ± 1,0	647 ± 15	237,5 ± 7,4	12,10 ± 0,30
130,0 ± 1,0	681 ± 15	247,0 ± 7,3	12,74 ± 0,30
140,0 ± 1,0	767 ± 15	266,0 ± 7,1	14,35 ± 0,31
148,0 ± 1,0	865 ± 15	281,2 ± 6,8	16,19 ± 0,32
150,0 ± 1,0	878 ± 15	285,0 ± 6,8	16,43 ± 0,32
151,0 ± 1,0	907 ± 15	286,9 ± 6,6	16,97 ± 0,32
152,0 ± 1,0	914 ± 15	288,8 ± 6,6	17,10 ± 0,32
153,0 ± 1,0	923 ± 15	290,7 ± 6,6	17,27 ± 0,32
154,0 ± 1,0	943 ± 15	292,6 ± 6,6	17,64 ± 0,32
155,0 ± 1,0	968 ± 15	294,5 ± 6,5	18,12 ± 0,33
156,0 ± 1,0	980 ± 15	296,4 ± 6,4	18,35 ± 0,33
157,0 ± 1,0	996 ± 15	298,3 ± 6,4	18,64 ± 0,33
158,0 ± 1,0	1090 ± 15	300,2 ± 6,0	20,39 ± 0,34
159,0 ± 1,0	1161 ± 15	302,1 ± 5,8	21,74 ± 0,34
160,0 ± 1,0	1218 ± 15	304,0 ± 5,6	22,79 ± 0,35
161,0 ± 1,0	1280 ± 15	305,9 ± 5,5	23,96 ± 0,36
162,0 ± 1,0	1302 ± 15	307,8 ± 5,4	24,37 ± 0,36
175,0 ± 1,0	1486 ± 15	332,5 ± 5,3	27,82 ± 0,38
200,0 ± 1,0	1621 ± 15	380,0 ± 5,4	30,34 ± 0,39
225,0 ± 1,0	1689 ± 15	427,5 ± 5,7	31,63 ± 0,40

Tabelle 5: Aufgabe 1: Messreihe mit T_4 : um λ korrigierte Messdaten

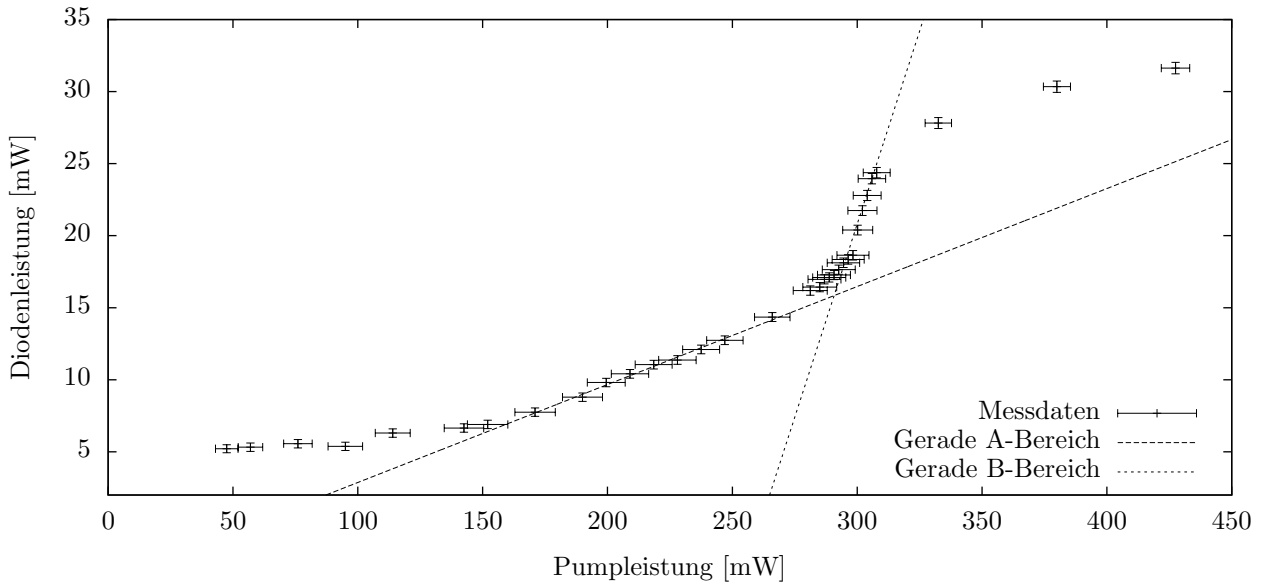


Abbildung 8: Aufgabe 1: Messreihe mit T_4

das Licht von zwei Laserdioden zusammengebracht wird, ist es plausibel, Interferenz als Ursache zu vermuten. Die genauen Abmessungen sind zwar nicht bekannt, aber im Folgenden soll eine prüfende Abschätzung vorgenommen werden. Die aktive Zone einer Diode hat eine Größe von näherungsweise $a \simeq 1$ mm und emittiert Licht der Wellenlänge $\lambda \simeq 800$ nm über eine optische Schiene von einer Länge $d \simeq 50$ cm. Für die Position der Maxima bei einem Doppelspaltexperiment gilt $x = n\lambda \frac{d}{a}$ wobei x den Abstand vom Mittelpunkt des Strahls auf dem Beobachtungsschirm (hier CMOS-Chip) darstellt. Setzt man die o.a. Werte in die Gleichung ein, so ergibt sich ein Abstand zwischen dem Maximum n -ter Ordnung und dem der Ordnung $n+1$ von etwa $\Delta x = 0,4$ mm. Durch die Detektorkarten kann der Strahldurchmesser nach der Kollimatorlinse mit etwa $D = 4$ mm abgeschätzt werden. Für die Aufgabe ist ohnehin die *full width at half maximum* – kurz FWHM – zumindest als Vergleichswert der beiden Achsen zu bestimmen. Die maximale Zeilensumme für den Strahl mit der größten Intensität beträgt $S_Z = 22332$ die FWHM lässt sich damit aus den Daten zu $\sigma_Z = 211$ Pixel bestimmen. Für den Abstand der Interferenzmaxima in Pixel gilt dann näherungsweise $\Delta x' = \frac{\Delta x}{D} \sigma_z$. Einsetzen liefert $\Delta x' \simeq 21$ Pixel. Der Abstand der Maxima beträgt bei den Messdaten etwa 20 bis 25 Pixel, sodass die Vermutung zutreffend zu sein scheint. Aufgrund der vagen Angaben zu den Abmessungen des Aufbaus ist eine detaillierte Analyse und Auflistung der

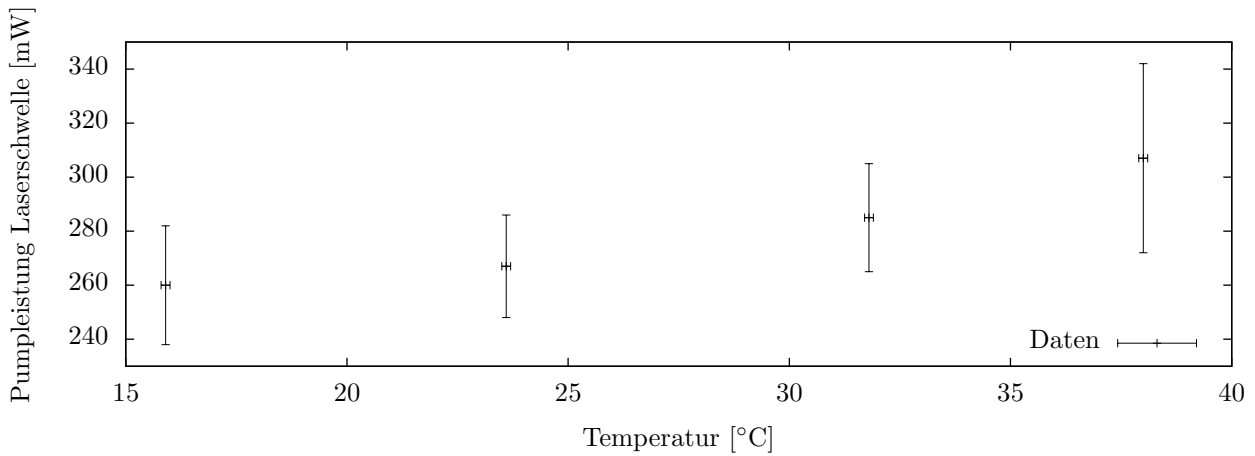


Abbildung 9: Aufgabe 1: Laserschwelle in Abhängigkeit von der Temperatur

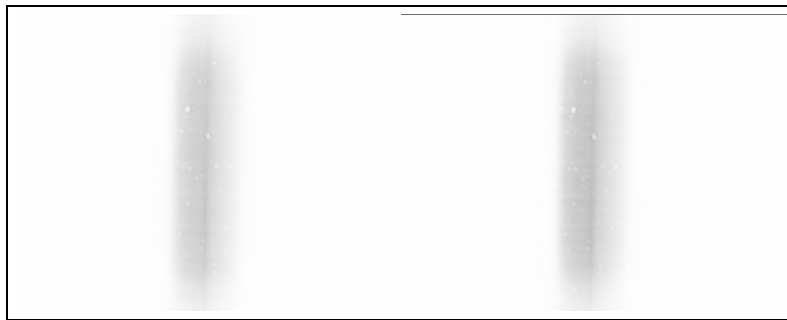


Abbildung 10: Aufgabe 2: Strahlprofil bei (135 ± 1) mA Pumpstrom (links) und Aufgabe 2: Strahlprofil bei (140 ± 1) mA Pumpstrom (rechts)

Maxima nicht sinnvoll.

Das Bild bei den Spaltensummen in Abb. (13) ist deutlich klarer. Zum Einen ist auch bei niedrigen Pumpströmen und damit Strahlungsintensitäten deutlich erkennbar, dass der Strahl keineswegs symmetrisch ist, sondern auf der einen Seite der Mitte steil und auf der anderen sanfter abfällt. Die Beobachtung bei den Zeilensummen, dass die Intensität beim Überschreiten der Laserschwelle an einigen Stellen zunächst abnehmen kann, dann aber wieder ansteigt, kann ebenfalls, wenngleich nicht so deutlich, bestätigt werden. Die Vorzugsrichtung in den Messdaten lässt sich aber hier nicht mit einer weiteren Diode erklären, sondern müsste auf die Anordnung der optischen Elemente auf der Schiene zurückzuführen sein. Die Modulation des Intensitätsverlaufs ist bei den Spaltensummen besser als bei den Zeilensummen zu erkennen und bewegt sich in der gleichen Größenordnung von etwa 20 bis 25 Pixeln. Da die aktive Zone der Laserdiode im Vergleich zum Strahldurchmesser nicht vernachlässigbar klein ist, können Interferenzmuster in beiden Achsen auftreten. Zur Bestimmung der FWHM wurde zunächst die größte Spaltensumme für die Aufnahme mit maximaler Intensität aus den Daten mit $S_S = 54314$ ermittelt, was auf eine FWHM von $\sigma_S = 88$ führt. Damit ist deutlich, dass der Strahl stark von einem GAUSS-Profil abweicht. Die Folgen werden im Abschnitt „Diskussion“ besprochen.



Abbildung 11: Aufgabe 2: Strahlprofil bei (150 ± 1) mA Pumpstrom (links) und Aufgabe 2: Strahlprofil bei (155 ± 1) mA Pumpstrom (rechts)

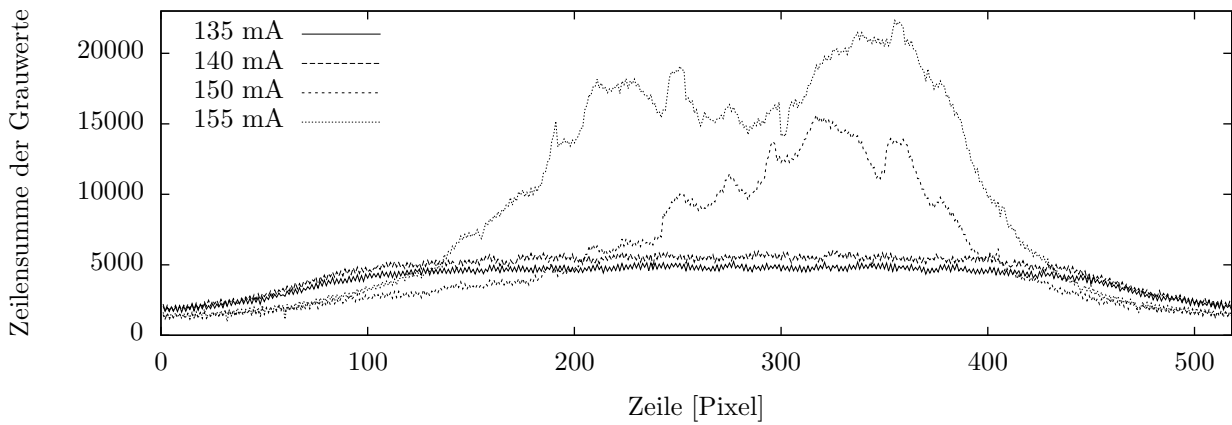


Abbildung 12: Aufgabe 2: Zeilensumme der Grauwerte für verschiedene Pumpströme

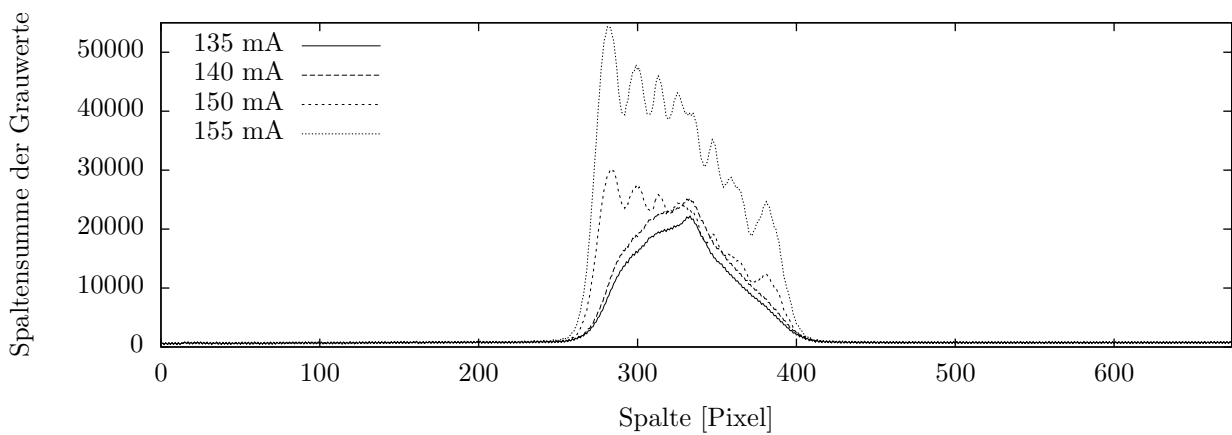


Abbildung 13: Aufgabe 2: Spaltensumme der Grauwerte für verschiedene Pumpströme

Aufgabe 3

Bei diesem Aufbau muss das Stabilitätskriterium nach Glg. (1) eingehalten werden, damit der Nd:YAG Laser stabil arbeiten kann. Die Resonatorparameter g_i lassen sich nach Glg. (1) aus den Spiegelradien errechnen. Da der eine Spiegel direkt auf die Rückseite des aktiven Mediums aufgetragen ist, handelt es sich um einen planen Spiegel $R_1 = \infty$ der andere Spiegel hat einen Radius von $R_2 = 100$ mm Die Angabe eines Fehlers ist hier wenig sinnvoll, da nach dem Stabilitätskriterium nur ein Intervall definiert wird, in dem der Spiegelabstand L liegen muss. Die Resonatorparameter lauten demnach $g_1 = 1$ $g_2 = 1 - \frac{L}{100 \text{ mm}}$ Damit ist das Stabilitätskriterium erfüllt, wenn $0 \text{ mm} \leq L \leq 100 \text{ mm}$ gilt. Bei der Justierung des Lasers ist aufgefallen, dass sich unter Betrachtung des Strahlprofils mit dem CMOS-Chip keine anderen Moden als TEM_{00} beobachten ließen, sodass auf die Irisblende verzichtet wurde.

Die Laserschwelle wurde – genau wie die *slope efficiency* – nach der Methode ermittelt, die schon für die Daten vom Diodenlaser in der ersten Aufgabe angewendet wurde. Allerdings mussten zwei weitere Filter eingebracht werden: einer, der das Pumplicht des Diodenlasers ausblendet und ein weiterer neutraler Filter, der die Intensität insgesamt herabsetzt. Hier muss die Relation zwischen Photodiodenspannung und Laserleistung erneut bestimmt werden, weil die Photodiode nun auf die geänderte Frequenz (die Wellenlänge beträgt 1064 nm statt 804 nm) anders ansprechen wird. Dazu ist der Messpunkt aufgenommen worden, dass $U_2 = (414 \pm 10) \text{ mV}$ Diodenspannung gemäß Powermeter $P_1 = (1,47 \pm 0,01) \text{ mW}$ ergeben. Damit gilt für die Ausgleichsgerade nach Glg. (2) $a' = (0,003558 \pm 0,000060) \frac{\text{mW}}{\text{mV}}$, $b' = (-0,00285 \pm 0,00030) \text{ mW}$ Da es genauso viele Messwerte wie freie Parameter gibt, wurde der Fehler der Parameter aus dem Abstand zu den Parametern der Regressionsgeraden bei um die jeweiligen Fehler vergrößerten Messwerten bestimmt.

Zur Ermittlung der korrekten *slope efficiency* muss desweiteren bestimmt werden, wie stark die verwendeten Filter das Licht des Nd:YAG-Lasers filtern. Bei der folgenden Auswertung wurde angenommen, dass der Filter, der das Licht des Diodenlasers unterdrücken soll, das des Nd:YAG-Lasers ungehindert passieren lässt, da sonst eine eigene Messreihe nur für den Filter notwendig geworden wäre. Natürlich handelt es sich dabei um eine Näherung; tendenziell wird die *slope efficiency* also zu niedrig gemessen. Also wurde bei den Parametern $(38,0 \pm 0,1) \text{ }^\circ\text{C}$ und $(572 \pm 1) \text{ mA}$ für den Diodenlaser die Leistung des Nd:YAG-Laser nur mit dem Filter für das Pumplicht zu $(3,85 \pm 0,01) \text{ mW}$ gemessen; brachte man den zweiten Filter ebenfalls in den Strahlengang,

so erhielt man den Messwert $(0,53 \pm 0,01)$ mW. Damit beträgt der Korrekturfaktor $\lambda' = (0,138 \pm 0,014)$. Für die Umrechnung vom Pumpstrom des Diodenlasers in Ausgangsleistung des Diodenlasers und damit in die Pumpleistung des Nd:YAG-Lasers müssen zwei Bereiche unterschieden werden: unterhalb der Laserschwelle des Diodenlasers wurde die zu der jeweiligen Temperatur gehörige, in Aufgabe 1 ermittelte Ausgleichsgerade für den A-Bereich, oberhalb der Laserschwelle für den B-Bereich herangezogen. Die exakten Messwerte aus Aufgabe 1 lassen sich nicht nutzen, weil sie von der Sättigung der Photodiode beeinflusst sind. Der Fehler der so interpolierten Daten wurde aus den Abweichungen zu den Daten geschätzt, die sich aus der Verwendung der jeweiligen Grenzgeraden ergeben. Das ist zulässig, weil der Fehler der durch die Geraden entsteht, deutlich höher ist als jener, der durch die Messwerterfassung auftritt. In den Tabellen ist der die Laserleistung des Nd:YAG-Lasers betreffende Korrekturfaktor λ' bereits berücksichtigt.

Für die Messdaten zu T_1 sind zwei Kurven aufgenommen worden, weil die erste Messreihe zu starke Schwankungen aufwies, die dadurch zustande kamen, dass der gesamte Messbereich zunächst in groben Schritten durchlaufen wurde und danach der für die Auswertung relevante Teil mit mehr Messwerten unterfüttert wurde. Die beim zweiten Durchlauf gefundenen Messdaten wichen durchweg von den vorherigen Daten ab, sodass der Verdacht naheliegt, dass die Temperatur beim ersten Durchlauf noch nicht auf dem Anzeigewert angekommen ist. Das widerspricht jedoch der Darstellung des Herstellers, dass die angezeigte Temperatur ein Messwert sei. Die Daten aus der ersten Messreihe sind aus Platzgründen weder aufgeführt noch visualisiert.

Strom [mA]	Spannung [mV]	Pumpleistung [mW]	Laserleistung [mW]
100 ± 1,0	24,21 ± 8,0	5,251 ± 0,084	0,604 ± 0,068
125 ± 1,0	25,91 ± 8,0	5,654 ± 0,094	0,647 ± 0,072
150 ± 1,0	27,36 ± 8,0	7,4 ± 1,6	0,685 ± 0,075
170 ± 1,0	28,09 ± 8,0	9,9 ± 1,7	0,704 ± 0,077
175 ± 1,0	28,57 ± 8,0	10,5 ± 1,7	0,716 ± 0,078
165 ± 1,0	29,06 ± 8,0	9,3 ± 1,7	0,729 ± 0,079
180 ± 1,0	29,78 ± 8,0	11,1 ± 1,7	0,747 ± 0,081
185 ± 1,0	32,45 ± 8,0	11,7 ± 1,8	0,816 ± 0,088
186 ± 1,0	37,77 ± 8,0	11,8 ± 1,8	0,95 ± 0,10
187 ± 1,0	43,34 ± 8,0	12,0 ± 1,8	1,10 ± 0,11
188 ± 1,0	47,22 ± 8,0	12,1 ± 1,8	1,20 ± 0,12
190 ± 1,0	49,39 ± 8,0	12,3 ± 1,8	1,25 ± 0,13
195 ± 1,0	51,09 ± 8,0	12,9 ± 1,8	1,30 ± 0,13
200 ± 1,0	63,44 ± 8,0	13,5 ± 1,8	1,61 ± 0,17
202 ± 1,0	66,34 ± 8,0	13,8 ± 1,9	1,69 ± 0,17
205 ± 1,0	72,15 ± 8,0	14,2 ± 1,9	1,84 ± 0,19
207 ± 1,0	87,65 ± 8,0	14,4 ± 1,9	2,24 ± 0,23
210 ± 1,0	97,82 ± 8,0	14,8 ± 1,9	2,50 ± 0,26
212 ± 1,0	99,76 ± 8,0	15,0 ± 1,9	2,55 ± 0,26
215 ± 1,0	111,4 ± 8,0	15,4 ± 1,9	2,85 ± 0,29
217 ± 1,0	127,8 ± 8,0	15,6 ± 1,9	3,27 ± 0,33
220 ± 1,0	133,2 ± 8,0	16,0 ± 2,0	3,41 ± 0,35
222 ± 1,0	143,3 ± 8,0	16,2 ± 2,0	3,67 ± 0,37
225 ± 1,0	152,5 ± 8,0	16,6 ± 2,0	3,91 ± 0,40
227 ± 1,0	157,4 ± 8,0	16,8 ± 2,0	4,04 ± 0,41
250 ± 1,0	201 ± 8,0	19,6 ± 2,1	5,16 ± 0,52
275 ± 1,0	226,4 ± 8,0	22,7 ± 2,2	5,82 ± 0,59
300 ± 1,0	238,5 ± 8,0	25,7 ± 2,4	6,13 ± 0,62

Tabelle 6: Aufgabe 3: Messreihe mit T_1 : um λ' korrigierte Messdaten; verwendete Daten

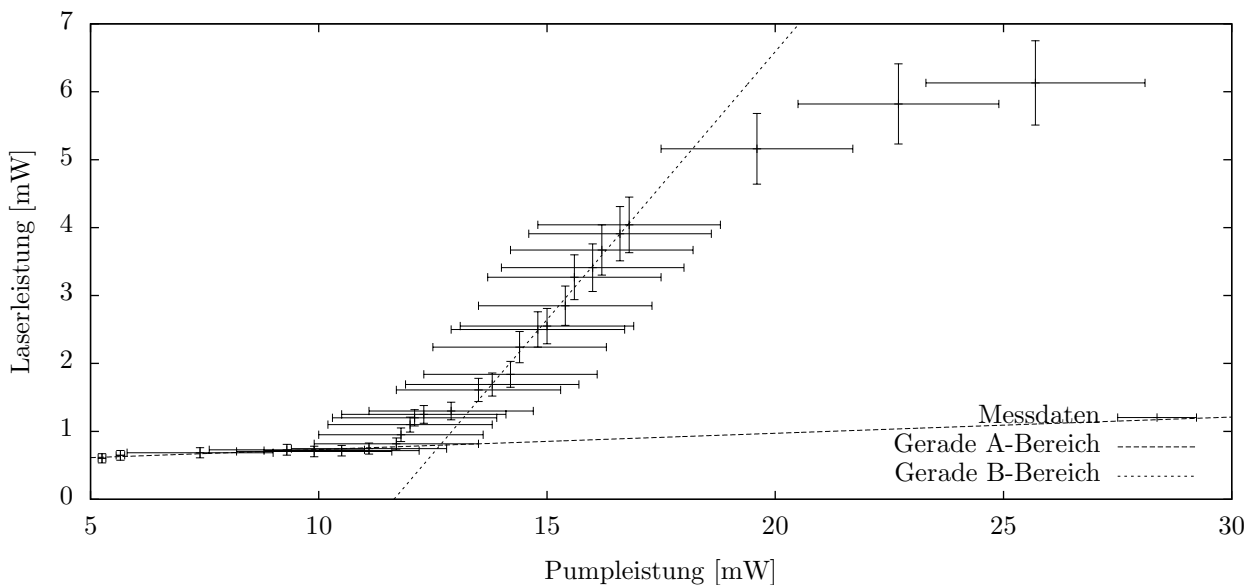


Abbildung 14: Aufgabe 3: Messreihe mit T_1 ; verwendete Daten

Für die Auswertung ist also nach einigen Minuten Wartezeit eine Messreihe aufgenommen worden, die diese Schwankungen nicht aufweist. Die Messergebnisse sind in Tab. (6) und Abb. (14) eingetragen. Für den A-Bereich wurden die Messwerte ausgewählt, die der Bedingung $5,251 \text{ mW} \leq P_x \leq 11,7 \text{ mW}$ genügen, sodass die Ausgleichsgerade $P_1^* = kP_P + l$ für diesen Bereich mit den Parametern $k = (0,0239 \pm 0,0042)$, $l = (0,494 \pm 0,038) \text{ mW}$ beschrieben werden kann, wobei das Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,85$ beträgt. Für den B-Bereich $13,5 \text{ mW} \leq P_x \leq 16,6 \text{ mW}$ findet man die Parameter $k' = (0,789 \pm 0,034)$, $l' = (-9,19 \pm 0,52) \text{ mW}$ mit dem Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,988$. Der Schnittpunkt und damit die Laserschwelle findet sich bei $L_1^* = (12,66 \pm 0,90) \text{ mW}$. Die Ausgleichsgeraden sind in Abb. (14) eingezeichnet.

Strom [mA]	Spannung [mV]	Pumpleistung [mW]	Laserleistung [mW]
100,0 ± 1,0	24,8 ± 8,0	5,22 ± 0,11	0,619 ± 0,069
105,0 ± 1,0	24,7 ± 8,0	5,29 ± 0,12	0,616 ± 0,069
110,0 ± 1,0	28,2 ± 8,0	5,36 ± 0,12	0,707 ± 0,077
115,0 ± 1,0	27,2 ± 8,0	5,44 ± 0,12	0,682 ± 0,075
120,0 ± 1,0	25,5 ± 8,0	5,51 ± 0,12	0,638 ± 0,071
125,0 ± 1,0	26,9 ± 8,0	5,58 ± 0,13	0,672 ± 0,074
130,0 ± 1,0	25,8 ± 8,0	5,66 ± 0,13	0,644 ± 0,071
135,0 ± 1,0	26,2 ± 8,0	5,73 ± 0,13	0,654 ± 0,072
140,0 ± 1,0	26,6 ± 8,0	5,80 ± 0,14	0,666 ± 0,073
145,0 ± 1,0	27,5 ± 8,0	6,18 ± 0,75	0,688 ± 0,075
150,0 ± 1,0	27,5 ± 8,0	6,60 ± 0,76	0,688 ± 0,075
155,0 ± 1,0	27,9 ± 8,0	7,02 ± 0,77	0,697 ± 0,076
160,0 ± 1,0	30,3 ± 8,0	7,44 ± 0,79	0,760 ± 0,082
161,0 ± 1,0	28,9 ± 8,0	7,52 ± 0,79	0,725 ± 0,079
163,0 ± 1,0	34,9 ± 8,0	7,69 ± 0,79	0,878 ± 0,094
165,0 ± 1,0	61,5 ± 8,0	7,85 ± 0,80	1,56 ± 0,16
167,0 ± 1,0	70,7 ± 8,0	8,02 ± 0,80	1,80 ± 0,19
169,0 ± 1,0	81,8 ± 8,0	8,19 ± 0,81	2,09 ± 0,21
170,0 ± 1,0	86,2 ± 8,0	8,27 ± 0,81	2,20 ± 0,23
173,0 ± 1,0	100,2 ± 8,0	8,52 ± 0,82	2,56 ± 0,26
175,0 ± 1,0	111,4 ± 8,0	8,69 ± 0,82	2,85 ± 0,29
177,0 ± 1,0	132,2 ± 8,0	8,86 ± 0,83	3,39 ± 0,34
179,0 ± 1,0	141,9 ± 8,0	9,02 ± 0,83	3,64 ± 0,37
181,0 ± 1,0	165,5 ± 8,0	9,19 ± 0,84	4,25 ± 0,43
183,0 ± 1,0	172,4 ± 8,0	9,36 ± 0,84	4,42 ± 0,45
185,0 ± 1,0	178,0 ± 8,0	9,53 ± 0,85	4,57 ± 0,46
200,0 ± 1,0	211,9 ± 8,0	10,78 ± 0,88	5,44 ± 0,55
225,0 ± 1,0	240,9 ± 8,0	12,87 ± 0,95	6,19 ± 0,63
250,0 ± 1,0	259,1 ± 8,0	15,0 ± 1,0	6,66 ± 0,68

Tabelle 7: Aufgabe 3: Messreihe mit T_2 : um λ' korrigierte Messdaten

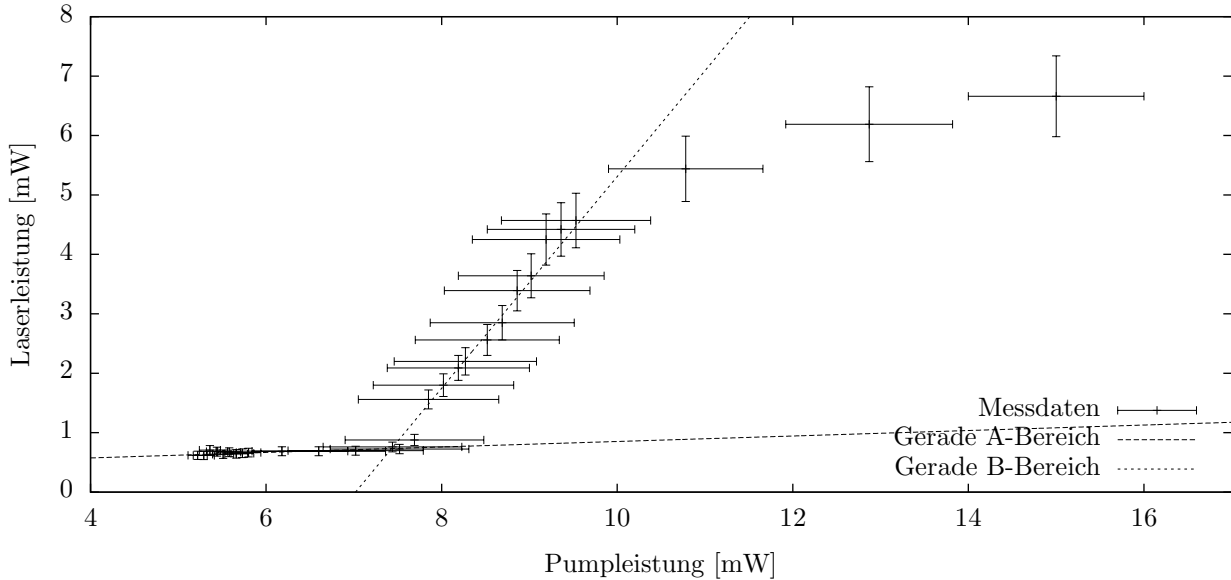


Abbildung 15: Aufgabe 3: Messreihe mit T_2

Die Ergebnisse für T_2 sind in Tab. (7) und Abb. (15) eingetragen. Für den A-Bereich wurden die Messwerte ausgewählt, die der Bedingung $5,66 \text{ mW} \leq P_x \leq 7,52 \text{ mW}$ genügen, sodass die Ausgleichsgerade $P_1^* = mP_P + n$ für diesen Bereich mit den Parametern $m = (0,0461 \pm 0,0077)$, $n = (0,391 \pm 0,051) \text{ mW}$ beschrieben werden kann, wobei das Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,86$ beträgt. Für den B-Bereich $7,85 \text{ mW} \leq P_x \leq 9,02 \text{ mW}$ findet man die Parameter $m' = (1,781 \pm 0,087)$, $n' = (-12,50 \pm 0,73) \text{ mW}$ mit dem Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,986$. Der Schnittpunkt und damit die Laserschwelle findet sich bei $L_2^* = (7,43 \pm 0,57) \text{ mW}$. Die Ausgleichsgeraden sind in Abb. (15) eingezeichnet.

Strom [mA]	Spannung [mV]	Pumpleistung [mW]	Laserleistung [mW]
100,0 ± 1,0	27,7 ± 8,0	5,054 ± 0,088	0,694 ± 0,076
125,0 ± 1,0	24,5 ± 8,0	5,49 ± 0,10	0,610 ± 0,068
140,0 ± 1,0	28,0 ± 8,0	5,75 ± 0,10	0,700 ± 0,077
145,0 ± 1,0	27,2 ± 8,0	5,84 ± 0,11	0,682 ± 0,075
150,0 ± 1,0	24,8 ± 8,0	5,93 ± 0,11	0,619 ± 0,069
155,0 ± 1,0	29,8 ± 8,0	6,8 ± 2,2	0,747 ± 0,081
160,0 ± 1,0	30,3 ± 8,0	7,6 ± 2,3	0,760 ± 0,082
165,0 ± 1,0	30,0 ± 8,0	8,5 ± 2,3	0,753 ± 0,082
170,0 ± 1,0	31,5 ± 8,0	9,3 ± 2,3	0,791 ± 0,085
172,0 ± 1,0	35,7 ± 8,0	9,7 ± 2,3	0,900 ± 0,096
174,0 ± 1,0	40,9 ± 8,0	10,0 ± 2,4	1,03 ± 0,11
175,0 ± 1,0	52,1 ± 8,0	10,2 ± 2,4	1,32 ± 0,14
176,0 ± 1,0	51,6 ± 8,0	10,4 ± 2,4	1,31 ± 0,14
177,0 ± 1,0	54,0 ± 8,0	10,5 ± 2,4	1,37 ± 0,14
178,0 ± 1,0	68,0 ± 8,0	10,7 ± 2,4	1,73 ± 0,18
180,0 ± 1,0	75,1 ± 8,0	11,0 ± 2,4	1,91 ± 0,20
182,0 ± 1,0	84,5 ± 8,0	11,4 ± 2,4	2,16 ± 0,22
185,0 ± 1,0	105,1 ± 8,0	11,9 ± 2,4	2,69 ± 0,27
187,0 ± 1,0	118,6 ± 8,0	12,2 ± 2,5	3,04 ± 0,31
190,0 ± 1,0	138,5 ± 8,0	12,8 ± 2,5	3,55 ± 0,36
192,0 ± 1,0	152,5 ± 8,0	13,1 ± 2,5	3,91 ± 0,40
195,0 ± 1,0	168,0 ± 8,0	13,6 ± 2,5	4,31 ± 0,44
197,0 ± 1,0	177,2 ± 8,0	13,9 ± 2,5	4,55 ± 0,46
200,0 ± 1,0	198,5 ± 8,0	14,5 ± 2,5	5,10 ± 0,52
225,0 ± 1,0	233,7 ± 8,0	18,7 ± 2,7	6,00 ± 0,61
250,0 ± 1,0	260,3 ± 8,0	23,0 ± 2,9	6,69 ± 0,68

Tabelle 8: Aufgabe 3: Messreihe mit T_3 : um λ' korrigierte Messdaten

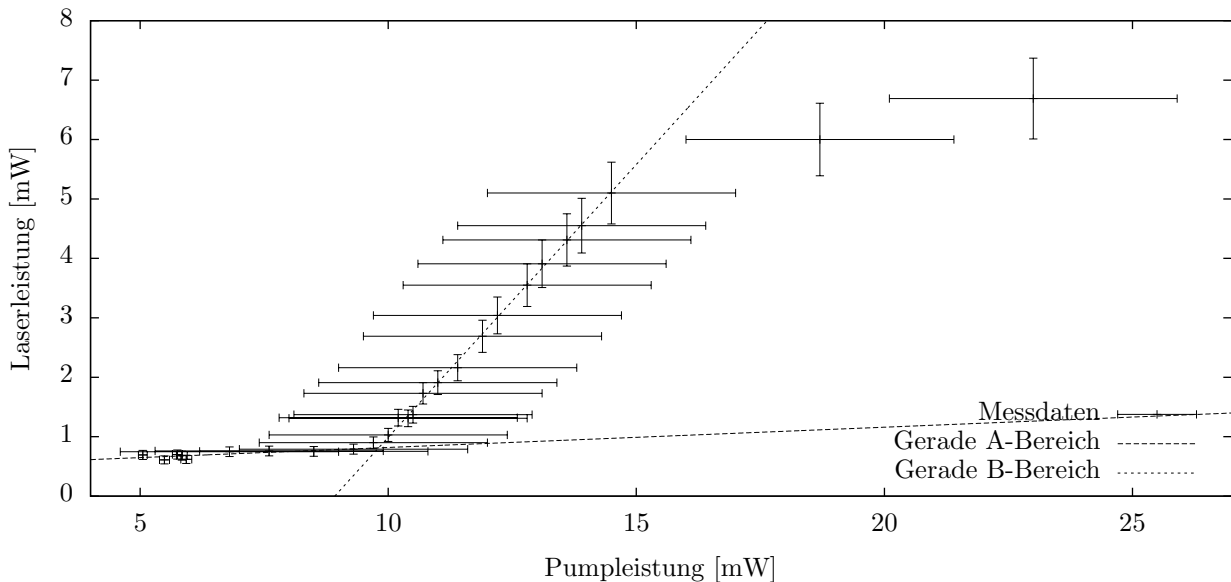


Abbildung 16: Aufgabe 3: Messreihe mit T_3

Die Ergebnisse für T_3 sind in Tab. (8) und Abb. (16) eingetragen. Für den A-Bereich wurden die Messwerte ausgewählt, die der Bedingung $5,054 \text{ mW} \leq P_x \leq 9,3 \text{ mW}$ genügen, sodass die Ausgleichsgerade $P_1^* = oP_P + p$ für diesen Bereich mit den Parametern $o = (0,0341 \pm 0,0098)$ $p = (0,478 \pm 0,067) \text{ mW}$ beschrieben werden kann, wobei das Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,63$ beträgt. Für den B-Bereich $10,7 \text{ mW} \leq P_x \leq 13,9 \text{ mW}$ findet man die Parameter $o' = (0,918 \pm 0,021)$, $p' = (-8,19 \pm 0,26) \text{ mW}$ mit dem Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,996$. Der Schnittpunkt und damit die Laserschwelle findet sich bei $L_3^* = (9,81 \pm 0,38) \text{ mW}$. Die Ausgleichsgeraden sind in Abb. (16) eingezeichnet.

Die Ergebnisse für T_4 sind in Tab. (9) und Abb. (17) eingetragen. Für den A-Bereich wurden die Messwerte ausgewählt, die der Bedingung $8,99 \text{ mW} \leq P_x \leq 33,1 \text{ mW}$ genügen, sodass die Ausgleichsgerade $P_1^* = qP_P + r$ für diesen Bereich mit den Parametern $q = (0,00029 \pm 0,00034)$, $r = (0,7329 \pm 0,0066) \text{ mW}$ beschrieben werden kann, wobei das Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,25$ beträgt. Für den B-Bereich $40,3 \text{ mW} \leq P_x \leq 70,8 \text{ mW}$ findet man die Parameter $q' = (0,1333 \pm 0,0026)$, $r' = (-4,39 \pm 0,14) \text{ mW}$ mit dem Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,996$. Der Schnittpunkt und damit die Laserschwelle findet sich bei $L_4^* = (38,5 \pm 1,4) \text{ mW}$. Die Ausgleichsgeraden sind in Abb. (17) eingezeichnet.

Nach den im Skript angegebene Kalibrierkurven des Lasers wird der Nd:YAG-Laser bei T_2 in Resonanz gepumpt; bei T_1 liegt die Wellenlänge unterhalb der Resonanzwellenlänge, bei den anderen Temperaturen oberhalb. Der Grund dafür ist die Verschiebung der intensivsten Wellenlänge des Diodenlasers in Abhängigkeit von der Temperatur.

Strom [mA]	Spannung [mV]	Pumpleistung [mW]	Laserleistung [mW]
100 ± 1,0	29,06 ± 8,0	8,99 ± 0,86	0,729 ± 0,079
125 ± 1,0	29,56 ± 8,0	12,22 ± 0,96	0,741 ± 0,080
150 ± 1,0	29,54 ± 8,0	15,5 ± 1,1	0,741 ± 0,080
170 ± 1,0	29,54 ± 8,0	33,1 ± 1,2	0,741 ± 0,080
175 ± 1,0	32,45 ± 8,0	38,2 ± 1,6	0,816 ± 0,088
177 ± 1,0	42,13 ± 8,0	40,3 ± 1,8	1,07 ± 0,11
180 ± 1,0	53,51 ± 8,0	43,3 ± 2,0	1,36 ± 0,14
182 ± 1,0	62,47 ± 8,0	45,3 ± 2,2	1,59 ± 0,16
185 ± 1,0	84,26 ± 8,0	48,4 ± 2,4	2,15 ± 0,22
187 ± 1,0	92,49 ± 8,0	50,4 ± 2,6	2,36 ± 0,24
190 ± 1,0	100,7 ± 8,0	53,5 ± 2,8	2,58 ± 0,26
192 ± 1,0	118,6 ± 8,0	55,5 ± 3,0	3,04 ± 0,31
195 ± 1,0	126,9 ± 8,0	58,6 ± 3,2	3,25 ± 0,33
197 ± 1,0	143,3 ± 8,0	60,6 ± 3,3	3,67 ± 0,37
200 ± 1,0	161,3 ± 8,0	63,7 ± 3,6	4,14 ± 0,42
202 ± 1,0	171,9 ± 8,0	65,7 ± 3,7	4,41 ± 0,45
205 ± 1,0	188,9 ± 8,0	68,8 ± 4,0	4,85 ± 0,49
207 ± 1,0	196,1 ± 8,0	70,8 ± 4,1	5,04 ± 0,51
210 ± 1,0	194,6 ± 8,0	73,9 ± 4,4	5,00 ± 0,51
215 ± 1,0	211,9 ± 8,0	79,0 ± 4,7	5,44 ± 0,55
225 ± 1,0	226,4 ± 8,0	89,1 ± 5,5	5,82 ± 0,59
250 ± 1,0	248,2 ± 8,0	114,6 ± 7,5	6,38 ± 0,65
275 ± 1,0	263,9 ± 8,0	140,1 ± 9,4	6,78 ± 0,69
300 ± 1,0	271,2 ± 8,0	165,5 ± 11,4	6,97 ± 0,71

Tabelle 9: Aufgabe 3: Messreihe mit T_4 : um λ' korrigierte Messdaten

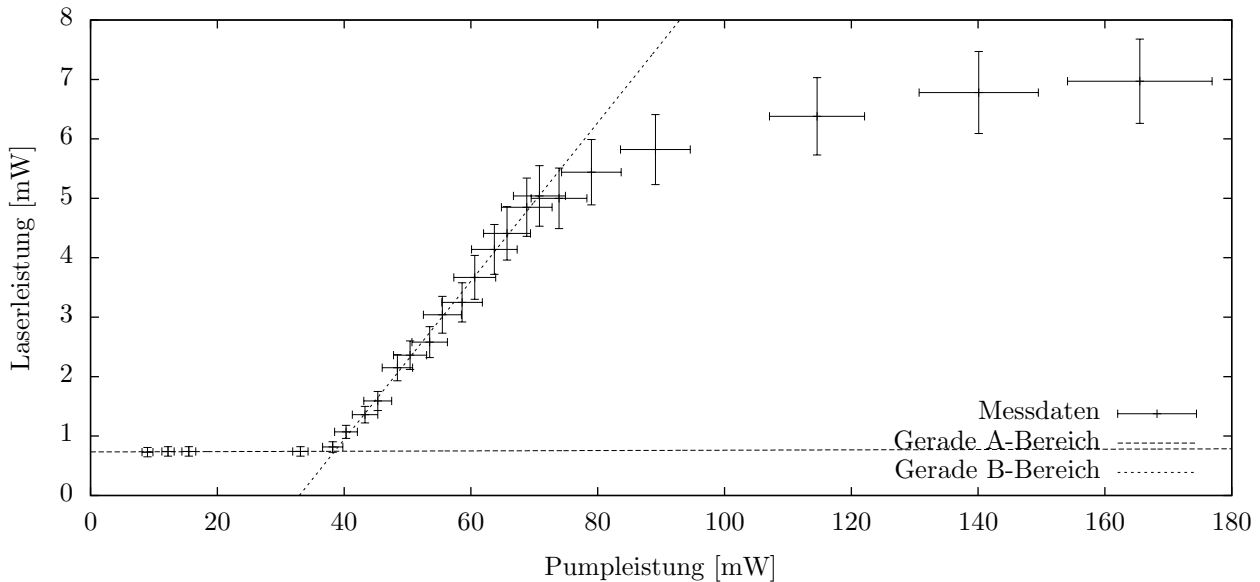


Abbildung 17: Aufgabe 3: Messreihe mit T_4

Für die Quanteneffizienz q_e gilt $q_e = \frac{E_o}{E_i} = \frac{\lambda_i}{\lambda_o}$ mit einfallender Strahlung der Energie E_i und emittierter Strahlung der Energie E_o . Für die Quantenausbeute q_y gilt $q_y = \frac{\text{Anzahl emittierter Photonen}}{\text{Anzahl absorbiertes Photonen}} = \frac{P_o/E_o}{P_i/E_i} = \frac{P_o}{P_i q_e}$. Die Ausgangsleistung P_o kann für Bereiche oberhalb der Laserschwelle durch die *slope efficiency* s_e genähert werden $q_y \simeq \frac{P_i s_e}{P_i q_e} = \frac{s_e}{q_e}$. Treten zudem Resonatorverluste l auf, so vermindert sich q_y entsprechend. Der praktische Wert lautet also $q'_y = q_y(1 - l)$. Für die vier Temperaturen ergeben sich so Werte von $q'_{y1} = 1,0$, $q'_{y2} = 2,2$, $q'_{y3} = 1,2$, $q'_{y4} = 0,2$. Auf die Fehlerberechnung wurde verzichtet, da bereits die Resonatorverluste mit 5% nur geschätzt sind und die Fehlerspannen somit eine falsche Genauigkeit vortäuschen würden. Die restlichen im Aufgabentext vorgegebenen Fragen werden im Abschnitt „Diskussion“ angesprochen.

Diskussion

Vorversuch

Im Vorversuch konnte die Relation zwischen Laserleistung und Photodiodenspannung bestimmt werden. Der damit verbundene Fehler ist sehr klein, sodass das Verfahren im Rahmen dieses Versuches nicht weiter optimiert werden muss. Allerdings ist es unbefriedigend, zur Errechnung der elektrischen Pumpleistung die näherungsweise bekannte Spannung an der Laserdiode zu benutzen, da hier ein relativ großer Schätzfehler eingebunden wird. Hier wäre eine direkte Messung mit einem weiteren Messgerät wünschenswert. Dieser Schätzfehler könnte auch für die Beobachtung verantwortlich sein, nach der die Laserdiode mit wenigen Prozent Wirkungsgrad vergleichsweise

ineffizient ist – typisch wären mehrere 10 Prozent.

Aufgabe 1

Die Laserschwel­len wurden mit $L_1 = (260 \pm 22)$ mW, $L_2 = (267 \pm 19)$ mW, $L_3 = (285 \pm 20)$ mW, $L_4 = (307 \pm 35)$ mW gemessen; für die *slope efficiency* gilt $c' = (0,0642 \pm 0,0028)$, $e' = (0,0440 \pm 0,0013)$, $g' = (0,0899 \pm 0,0038)$, $i' = (0,536 \pm 0,041)$. Generell ist bei der Erhebung der Messdaten aufgefallen, dass in der Nähe der Laserschwelle die Spannungsangabe des Oszilloskops stark schwankt. Das ist darauf zurückzuführen, dass der Laser noch nicht durchweg stabil arbeitet, sondern nur sporadisch aktiv werden kann.

Aus Abb. (9) ist ersichtlich, dass die Laserschwelle bei steigender Temperatur ebenfalls angehoben wird. Im Detail ist bei den Messdaten zu T_4 ein Knick im A-Bereich zu erkennen, der bei den niedrigeren Temperaturen nicht auftritt. Dennoch lässt sich die Abhängigkeit der Laserschwelle von der Temperatur nahezu perfekt durch eine quadratische Funktion annähern. Die Temperaturabhängigkeit der Laserschwelle kann zwei Ursachen haben: entweder sinkt mit höherer Temperatur die Effizienz der Energieaufnahme durch das elektrische Pumpen oder die Absorptionsverluste steigen mit höherer Temperatur. Da die Temperaturunterschiede vergleichsweise klein sind, kann der Einfluss der Absorptionsverluste vernachlässigt werden. Wird die Temperatur erhöht, so steigt die Anzahl der Elektronen am pn-Übergang, die thermisch angeregt das Energieband oberhalb der FERMI-Energie erreichen. Das bedeutet aber auch, dass die Elektronen im n-Halbleiter höher gepumpt werden müssen, um die gleiche Energiedifferenz zum unteren Energieband aufzuweisen, sodass eine höhere Temperatur höhere Pumpströme erfordert. Dazu kommt, dass eine höhere Temperatur die Bandlücke tendenziell verkleinert. Dieser Einfluss ist näherungsweise quadratisch von der Temperatur abhängig und könnte somit die o.a. Relation erklären.

Aufgabe 2

Der offensichtlichste Unterschied zwischen der Laserdiode und einem Laser mit regulärem Resonator ist das Strahlprofil. Der Bauart entsprechend gelingt es einer Laserdiode nicht, ein rotationssymmetrisches Bild zu erzeugen, da das aktive Medium im Profil viereckig ist. Das hat direkten Einfluss auf die Nutzbarkeit des Strahls. Für eine feine Fokussierung z.B. für technische Anwendungen ist es wünschenswert, eine möglichst dem GAUSS-Profil entsprechende Strahlform zu erreichen; andernfalls wird sich die Strahlung nicht gut fokussieren lassen und daher auch bei der Umlenkung durch Wellenleiter oder Spiegelsysteme unhandlich sein. Dazu kommt der höhere Energieaufwand, sollte das unscharfe Licht nutzbar sein, da die nicht auf das Zentrum fokussierten Strahlengänge auch durch den Laser gespeist werden müssen.

Die aufgenommenen Bilder sind vermutlich um 90° gedreht – sie sind erstellt worden, während die Kollimatorlinse so justiert wurde, dass die Struktur des Strahlprofils möglichst klar sichtbar wurde. Dabei ließ sich das Profil von einem liegenden Rechteck auch zu dem in den Aufnahmen erkennbaren stehenden Rechteck verformen. Die zwei groben Maxima lassen darauf schließen, dass es sich bei dieser Diode eigentlich um zwei Laserdioden handelt, die übereinander verbaut sind. Sollten sie parallel geschaltet sein, so könnten leichte Fertigungsabweichungen in Bezug auf den Widerstand erklären, warum eine der beiden Dioden – wie in den Diagrammen klar ersichtlich – nicht so gleichmäßig auf eine Erhöhung der Stromstärke reagiert wie die andere, sondern später und mit geringerer Intensität anspricht.

Aufgabe 3

Die hier bestimmten Werte für die *slope efficiency* sind mit $k' = (0,789 \pm 0,034)$, $m' = (1,781 \pm 0,087)$, $\sigma' = (0,918 \pm 0,021)$, $q' = (0,1333 \pm 0,0026)$ deutlich größer als die aus Aufgabe 1 und leider auch deutlich größer als typische Werte. Es liegt daher nahe, dass bei der Kalibrierung für die Umrechnung von Photodiodespannung in Leistung ein Fehler aufgetreten ist, der damit zu grundsätzlich höheren Werten führt. Werte größer als sind physikalisch nur für kleine Bereiche möglich. Auf die Laserschwel­len $L_1^* = (12,66 \pm 0,90)$ mW, $L_2^* = (7,43 \pm 0,57)$ mW, $L_3^* = (9,81 \pm 0,38)$ mW, $L_4^* = (38,5 \pm 1,4)$ mW hat das jedoch keinen bis kaum einen Einfluss. deutlich erkennbar ist jedoch, dass die *slope efficiency* dann hoch ist, wenn der Laser in Resonanz gepumpt wird, was bei T_2 der Fall ist. Damit muss beim Aufbau eines diodengepumpten Lasers auf die Temperatur der Laserdiode – und damit auf die Wellenlänge der Strahlung mit maximaler Intensität – geachtet werden und diese bei einem Wert stabilisiert werden, der möglichst in Resonanz zu einem zu pumpenden Übergang liegt. In diesem Fall kann die notwendige Pumpleistung reduziert und die Eigenschaften des gepumpten Lasers über einen längeren Zeitraum stabil gehalten werden.

Das teilweise ungünstige Bestimmtheitsmaß im A-Bereich ist kein Grund zur Sorge: der Anstieg ist nur bei einigen Graphen zu gering und hat somit auf die Laserschwelle auch kaum eine Auswirkung. Relevant ist die Steigung ohnehin nur im B-Bereich.

Quellen

- Jürgen Eichler, Hans-Joachim Eichler: „Laser: Bauformen, Strahlführung, Anwendungen“, 7. Auflage, Springer, Berlin, 2010.
- Wolfgang Demtröder: „Experimentalphysik 3“, 4. Auflage, Springer, Berlin, 2010.
- Versuchsskript der FU Berlin
- Klaus Dickmann: „Diode laser pumped Nd:YAG Laser“, MEOS GmbH, 2003.