

Inhaltsverzeichnis

1	Ziele des Versuchs	2
2	Aufbau und Durchführung	2
3	Auswertung und Fehleranalyse	5
3.1	Kalibrierung der Fotodiode	5
3.2	Laserleistung und Wirkungsgrad des Diodenlasers	7
3.3	Absorption der Pumpstrahlung im Pr:YLF-Kristall	10
3.4	Untersuchung des Pr:YLF-Lasers	12
4	Diskussion der Ergebnisse	13
4.1	Angabe und Diskussion der Endergebnisse	13
4.2	Diskussion der verwendeten Messmethoden	15
4.3	Verbesserte Messmethoden	16
A	Anhang	18
	Abbildungsverzeichnis	18
	Literaturverzeichnis	18
A.1	Messprotokoll	19

Formal:

Top!

1,0

Auswertung:

Hier und da kleine Fehler aber da es sonst recht ausführlich und klar formuliert ist, ist es in Ordnung.

1,0

Fehleranalyse:

Einwandfrei

1,0

Diskussion:

Die Diskussion war sehr sehr ausführlich und hat sich mit vielen Kleinigkeiten beschäftigt. Sie war fast etwas zu ausführlich.

1,0

1 Ziele des Versuchs

Ziel dieses Versuches ist es einen Pr:YLF-Laser zu bauen und in Betrieb zu nehmen. Hierzu wird zunächst der Diodenlaser untersucht, der als Pumpstrahl dient, ebenso wie die Absorption im ND-Filter und im Pr:YLF-Kristall selbst. Im Anschluss daran wird der Laser aufgebaut und optimiert. Um eine aussagekräftige Interpretation der Messung zu ermöglichen, wird zuletzt eine Kalibrierung des Aufbaus durchgeführt, die es erlaubt die Leistung des jeweils betrachteten Lasers zu ermitteln. Diese Vorgehensweise erlaubt es, die Laser-Leistung und den Wirkungsgrad des Pr:YLF-Lasers zu bestimmen.

2 Aufbau und Durchführung

Für den Aufbau des Lasers standen ein optischer Tisch, ein Diodenlaser mit zwei Netzgeräten und verschiedene optische Komponenten zur Verfügung. Der Diodenlaser wurde mit zwei Netzgeräten betrieben, die die benötigte Leistung (Labornetzgerät LPS1305), sowie die Regelspannung (Labornetzgerät LPS1153) zur Verfügung stellten.

Für die Messung, wurde dabei die Spannung U am Netzgerät einmalig auf $U = 10\text{ V}$ eingestellt, ebenso wie der Regler für die Stromstärke auf einen Bereich, sodass $I < 3\text{ A}$ für alle Messungen galt. Während der Messung wurde also nur die Regelspannung u verändert. Dies geschah in einem Messbereich von 0 V bis 12 V .

Der finale Laser ist ein Pr:YLF-Laser. Pr:YLF steht hierbei für einen „Praseodym dotierten Yttrium-Lithium-Fluorid Kristall“. Es handelt sich also um einen Festkörper-Laser, für den der Diodenlaser als Pumpstrahl dient und damit die nötige Energie liefert um die Besetzungsinversion im Kristall zu erzielen und aufrecht zu erhalten. Der finale Versuchsaufbau ist [Abbildung 1](#) zu entnehmen.

Zu Beginn des Versuches wurde der Diodenlaser (Typ LaserTack PD-01159, LDM-445-2000-CC) untersucht. Hierfür wurde, wie in [Abbildung 1](#) der Laser-Strahl aus dem Diodenlaser über die beiden Spiegel auf die optische Achse gelenkt. Abweichend zum in [Abbildung 1](#) sichtbaren Aufbau, wurde die Irisblende herausgenommen und stattdessen dicht vor die Linse die Fotodiode gestellt. Dieser kleine Aufbau ermöglicht es zunächst den direkt vom Diodenlaser erzeugten Fotodiodenstrom I_F für verschiedene Regelspannungen u zu messen, der proportional zur Leistung des Lasers sein sollte. Die Messung wurde dabei mit Hilfe eines analogen Multimeters vom Typ PeakTech 3260 durchgeführt, das direkt mit Hilfe zweier Bananenstecker mit der Fotodiode verbunden war. Das Messgerät wurde im 1 A-Eingang verwendet und auf einen Messbereich von 250 mA Gleichstrom eingestellt. Auffällig bei der Durchführung war, dass es nach dem Einschalten des Lasers zunächst große, sprunghafte Schwankungen der angezeigten Stromstärke I gab. Da die Spannung U konstant gehalten wurde, änderte sich damit auch die benötigte Leistung des Lasers. Auf mögliche Ursachen hierfür wird später eingegangen.

Auch wurde schnell klar, dass eine sinnvolle Messung ohne ND-Filter nur im Bereich einer Regelspannung von $0,0\text{ V}$ bis $7,0\text{ V}$ durchgeführt werden konnte. Schon im Bereich von $5,0\text{ V}$ bis $7,0\text{ V}$ Regelspannung änderte sich der gemessene Diodenstrom kaum. Auch kam es nach kurzem Beleuchten der Fotodiode zu starken Abfällen des gemessenen Diodenstroms.

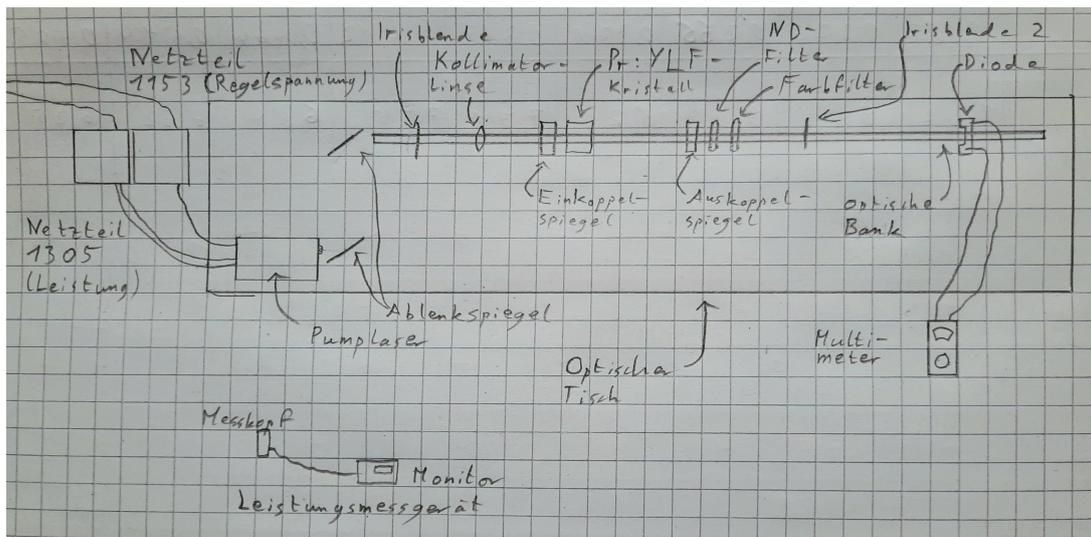


Abbildung 1: Finaler Versuchsaufbau des Pr:YLF-Lasers. Das Licht des Diodenlasers wird über zwei Ablenkspiegel auf die optische Achse geleitet und mit Hilfe einer Linse in die Kavität gebündelt, wo es den Pr:YLF-Kristall anregt. Anschließend verlässt der Laserstrahl nach mehreren Reflexionen die Kavität über den teildurchlässigen Spiegel und wird über einen ND-Filter und einen Farbfilter auf die Fotodiode geleitet, wo abschließend der Diodenstrom gemessen werden kann. Die beiden Irisblenden wurden weit offen gelassen, da diese die Intensität des Lasers deutlich abschwächen.

Die Messung wurde in diesem Bereich so durchgeführt, dass die Fotodiode abgedeckt wurde und nur für die Messung beleuchtet war. Dadurch ließen sich die starken Abfälle im Diodenstrom, die möglicherweise durch Überhitzung der Diode auftraten umgehen.

Dennoch wurde, um die Diode nicht zu zerstören nur eine Messung bis $u_{\max.} = 7,0\text{ V}$ durchgeführt. Schon bei kurzer Beleuchtung der Diode fing diese an leicht verbrannt zu riechen, sodass von einer Messung mit höherer Regelspannung abgesehen wurde.

Um dennoch eine aussagekräftige Untersuchung des Pump lasers zu ermöglichen, wurde nun der ND-Filter (Neutral Density Filter) vor die Fotodiode gesetzt. Wieder wurde der Fotodiodenstrom I_F für verschiedene Regelspannungen u gemessen und zusammen mit Spannung U und Stromstärke I des Lasers aufgetragen. Das Messgerät musste dabei aufgrund der verringerten Intensität auf einen Messbereich von $500\ \mu\text{A}$ eingestellt werden. Mit der später stattfinden Kalibrierung, ermöglicht diese Vorgehensweise wieder sinnvolle Rückschlüsse auf die Laserleistung über einen großen Messbereich.

Aufgrund der vorangegangenen Probleme mit der Fotodiode, wurde die erste Messreihe ohne ND-Filter verworfen.

Im Anschluss wurde die Absorption der Pumpstrahlung im Pr:YLF-Kristall untersucht. Hierfür wurde der selbe Aufbau genutzt und der Pr:YLF-Kristall vor dem ND-Filter platziert. Abermals wurde das Diodenstrom-Messgerät auf einen Messbereich von $500\ \mu\text{A}$ eingestellt und der Diodenstrom für verschieden Regelspannungen u gemessen. Hierbei wurden für alle Messreihen immer die selben Einstellungen an der Regelspannung verwendet wie zuvor um eine größere Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu erzielen.

Nun wurde der Laser selbst aufgebaut. Hierfür wurden wieder der ND-Filter und die Fotodiode gemäß [Abbildung 1](#) an das Ende der optischen Bank gesetzt. Der Aufbau besteht nun aus den beiden Ablenkspiegeln, die den Laser-Strahl auf die optische Achse lenken, einer Irisblende und einer Linse, die den Strahl in den Pr:YLF-Kristall kollimiert. Hinter der Linse steht der erste Spiegel der Kavität. Dieser ist für das blaue Licht des Lasers durchlässig und für das rote, im Pr:YLF-Kristall erzeugte Licht nahezu vollständig reflektierend. Direkt hinter diesem Einkoppelspiegel wurde der Pr:YLF-Kristall selbst aufgebaut. In einem Abstand dazu befindet sich der Auskoppelspiegel, der eine Rundung mit einem Radius von 100 mm aufweist. Dieser Spiegel ist teildurchlässig, und hat nach [1] eine Reflektivität von $R \approx 0,97$ im verwendeten Wellenlängenbereich. Hinter diesem Spiegel befindet sich der ND-Filter, der die Intensität des austretenden Strahls abschwächt und ein Farbfilter, der nur das rote Licht des Pr:YLF-Lasers, nicht aber das blaue Licht des Pumplasers passieren lässt. Zuletzt sind wieder eine Irisblende und die Fotodiode aufgebaut, die Rückschlüsse auf die Leistung des erzeugten Laser-Strahls zulässt.

Um einen optimalen Aufbau des Lasers mit maximaler Intensität zu erreichen, wurden einige Verbesserungen und Anpassungen durchgeführt. Hierbei wurde immer direkt am Multimeter die gemessene Stromstärke der Fotodiode beobachtet und versucht diese durch die Anpassungen zu maximieren.

Zunächst wurde die Position der Linse so eingestellt, dass der Punkt im Pr:YLF-Kristall möglichst scharf erschien, das Licht also im Kristall fokussiert war. Anschließend wurde der Abstand der beiden Spiegel, also die Länge der Kavität angepasst. Diese ist optimal, wenn der Abstand beider Spiegel genau dem Krümmungsradius des Auskoppelspiegels entspricht. Auch die Ausrichtung der beiden Spiegel, der Linse und des Pr:YLF-Kristalls wurden mit Hilfe der Stellschrauben justiert. Hierbei wurde immer wo lange justiert bis die angezeigte Stromstärke an der Diode maximal wurde und dann wieder abnahm. Im Bereich dieses Maximums wurde dann jeweils eine optimale Einstellung gewählt.

Die beiden Irisblenden wurden auf die maximale Öffnung eingestellt, da bei kleineren Öffnungen der Diodenstrom deutlich abnahm. Der ND- und der Farbfilter wurden direkt hinter dem Auskoppelspiegel positioniert. Ihre Positionierung ist unkritisch, da hinter dem Auskoppelspiegel das Licht im Optimalfall kollimiert sein sollte. Dies wurde auch kurz mit Hilfe eines Papierstreifens überprüft und konnte in guter Näherung angenommen werden. Mit diesen optimalen Einstellungen, konnte ein Wert für den gemessenen Fotodiodenstrom aufgenommen werden. Dieser erlaubt es Rückschlüsse auf die Leistung und den Wirkungsgrad des Pr:YLF-Lasers zu ziehen.

Zuletzt wurde die Kalibrierung der Fotodiode durchgeführt. Diese musste am Ende des Versuchs erfolgen, da das hierzu notwendige Messgerät nicht früher zur Verfügung stand. Wieder wurde mit dem selben Versuchsaufbau wie in Teil 1 verwendet, die Fotodiode also vor die Linse gestellt. Abwechselnd wurde nun für verschiedene Regelspannungen u der Strom an der Fotodiode mit und ohne ND-Filter, und die tatsächliche Leistung des Lasers mit dem kalibrierten Leistungsmessgerät ohne ND-Filter aufgenommen. Abermals wurde die Fotodiode ohne ND-Filter nur bis zu einer Regelspannung von 7,0 V betrieben.

Durch den Vergleich des gemessenen Diodenstroms mit der tatsächlichen Leistung, ist im weiteren Verlauf eine direkte Umrechnung des Diodenstroms in die Leistung des Lasers möglich.

3 Auswertung und Fehleranalyse

3.1 Kalibrierung der Fotodiode

Um später vom gemessenen Fotodiodenstrom I_F auf die Laserleistung P_L schließen zu können, wird im ersten Versuchsteil zunächst die Fotodiode mit Hilfe eines Leistungsmessgeräts kalibriert. Hierfür wurde für verschiedene Regelspannungen u im Bereich von 0 V bis 12 V eine Messreihe mit 27 Messungen durchgeführt bei denen die Laserleistung P_L , Fotodiodenstromstärke I_F ohne ND-Filter und die Stromstärke I_{FND} mit ND-Filter bestimmt wurden. Es konnte mit einer Laserleistung im Bereich von ungefähr 0 W bis 2 W gemessen werden, wobei ab einer Leistung von 1,771 W, also bei einer Regelspannung von 5,0 V nur noch der Fotodiodenstrom I_{FND} mit ND-Filter gemessen wurde, da ab hier die Laserleistung so stark war, dass die Fotodiode ohne ND-Filter stark erhitze. Dies führte zu sehr großen Schwankungen der Fotodiodenstromstärke, weshalb eine Messung nicht mehr aufgenommen wurde. Die Messwerte sind [Abbildung 7](#) zu entnehmen.

Die Fotodiodenstromstärke ohne ND-Filter wurde dabei im Messbereich von 250 mA mit dem analogen Multimeter und mit ND-Filter im Messbereich von 500 μ A gemessen. Für beide Bereiche liegt nach [2] eine systematische Unsicherheit von 2 % des Skalenendwerts vor. Zusätzlich wurde aufgrund der Ableseunsicherheit eine statistische Unsicherheit von $\Delta I_F^{\text{stat.}} = 2,5 \text{ mA}$ und $\Delta I_{FND}^{\text{stat.}} = 5 \mu\text{A}$ geschätzt.

Der Leistungsdetektor zur Messung der Laserleistung weist nach [3] eine systematische Unsicherheit von $\Delta P_L^{\text{syst.1}} = 1 \text{ mW}$ auf und das zugehörige Leistungsmessgerät hat nach [4] eine systematische Unsicherheit von $\Delta P_L^{\text{syst.2}} = 0,5 \%$ des angezeigten Messwerts. Der gesamte systematische Fehler auf die Leistungsmesser wird durch quadratische Addition über

$$\Delta P_L^{\text{syst.}} = \sqrt{(\Delta P_L^{\text{syst.1}})^2 + (\Delta P_L^{\text{syst.2}})^2} \quad (1)$$

berechnet. Aufgrund von Schwankungen am Messgerät wird außerdem eine statistische Ableseunsicherheit von $\Delta P_L^{\text{stat.}} = 0,005 \text{ W}$ geschätzt. In [Abbildung 2](#) sind die gemessenen Leistungen P_L des Diodenlasers in Abhängigkeit vom Fotodiodenstrom ohne bzw. mit ND-Filter mitsamt der statistischen und systematischen Unsicherheiten sichtbar.

Um in den weiteren Versuchsteilen vom Fotodiodenstrom auf die Diodenlaserleistung zu schließen, wird mit Hilfe der in [5] auf Seite 13 gegebenen Formeln eine Anpassung der Form $P_L = a + b \cdot I$ durch gewichtete lineare Regression durchgeführt. Für die Ausgleichsfunktion ohne ND-Filter ergibt sich dabei

$$P_L = a_F + b_F \cdot I_F \quad (2)$$

mit

$$a_F = (-0,16 \pm 0,07) \text{ W} \quad (2a)$$

$$b_F = (11,8 \pm 1,0) \text{ W A}^{-1} . \quad (2b)$$

In [Abb. 2](#) links hätte vielleicht eine quadratische Funktion besser gepasst. Niemand hat gesagt, dass es eine Gerade sein muss. Außerdem kann man sich streiten, ob es sinnvoll ist einen Achsenabschnitt zuzulassen, da physikalisch gesehen bei 0 Leistung auch kein Strom zu verzeichnen wäre. Das ist aber alles nicht so relevant, weil ihr das rechte Diagramm für die weiteren Rechnungen verwendet, und es da alles ganz gut passt.

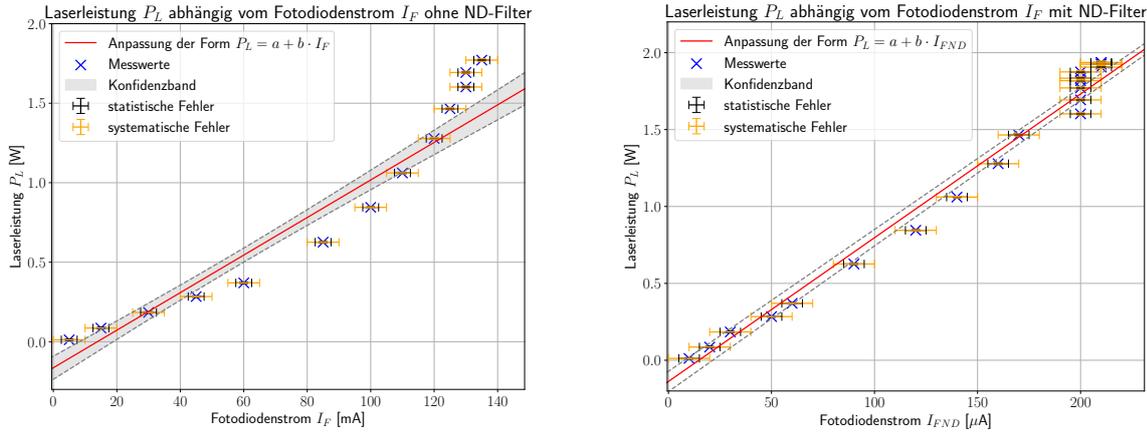


Abbildung 2: Sichtbar sind die Messwerte der Diodenlaserleistung P_L aufgetragen gegen den Fotodiodenstrom I_F ohne ND-Filter (links) bzw. gegen den Fotodiodenstrom I_{FND} mitsamt statistischen und systematischen Unsicherheiten. Außerdem dargestellt sind die durch gewichtete lineare Regression erhaltenen Ausgleichsfunktionen der Form $P_L = a + b \cdot I$ für beide Fälle ohne und mit ND-Filter nach Gleichung (2) und Gleichung (3) mitsamt der Konfidenzbänder. Anhand dieser Ausgleichsfunktionen kann später vom gemessenen Fotodiodenstrom I_{FND} auf die Laserleistung P_L geschlossen werden.

Die Ausgleichsfunktion mit ND-Filter ist dahingegen gegeben durch

$$P_L = a_{FND} + b_{FND} \cdot I_{FND} \tag{3}$$

mit

$$a_{FND} = (-0,14 \pm 0,03) \text{ W} \tag{3a}$$

$$b_{FND} = (9,3 \pm 0,2) \cdot 10^3 \text{ W A}^{-1} . \tag{3b}$$

Die Anpassungen mitsamt ihrer Konfidenzbänder sind ebenfalls in [Abbildung 2](#) sichtbar. Durch die Messwerte der Stromstärken I_F und I_{FND} bei gleicher Laserleistung P_L lässt sich der Transmissionsgrad des ND-Filters untersuchen. Dieser ist gegeben durch

$$T = \frac{I_{FND}}{I_F} . \tag{4}$$

Es konnten dabei jedoch nur 13 Transmissionsgrade bis zu $P_L = 1,771 \text{ W}$ bestimmt werden, da danach aus den oben genannten Gründen keine Stromstärken ohne ND-Filter mehr messbar waren. Die Standardabweichung der Transmissionsgrade ergibt sich nach [6], zu

$$s_T = 0,03 \% .$$

Bildet man den Mittelwert aus diesen 13 Messwerten und berechnet die Standardabweichung des Mittelwerts $s_{\bar{T}}$, wie ebenfalls in [6] gegeben, so ergibt sich für den Transmissionsgrad des ND-Filters

$$\bar{T} = (0,133 \pm 0,008) \% .$$

Der ND-Filter lässt also nur einen sehr geringen Anteil der Laserintensität zur Fotodiode durch. Aus dem Transmissionsgrad lässt sich zudem die optische Dichte D des ND-Filters über

$$D = -\log_{10}(\bar{T}) \quad (5)$$

bestimmen. Über Gauß'sche Fehlerfortpflanzung ergibt sich die Unsicherheit dabei durch

$$\Delta D = \frac{s_{\bar{T}}}{\ln(10) \cdot \bar{T}} \cdot \quad (6)$$

Als Endergebnis lässt sich daher für die optische Dichte des ND-Filters zu

$$D = (2,88 \pm 0,03)$$

angeben.

3.2 Laserleistung und Wirkungsgrad des Diodenlasers

Im Anschluss werden die Laserleistung und der Wirkungsgrad des Diodenlasers bestimmt. Hierfür wurden, wie bereits erwähnt, Spannung U und Stromstärke I des Netzgeräts und Fotodiodenstrom I_F für verschiedene Regelspannungen u gemessen. Die Messung erfolgte mit ND-Filter, da eine Messung ohne diesen nicht sinnvoll durchzuführen war. Die gemessenen Werte sind in [Abbildung 6](#) zu finden. Zunächst wird die vom Netzgerät zur Verfügung gestellte Aufnahmeleistung

$$P = UI \quad (7)$$

bestimmt. Die zugehörige Unsicherheit ergibt sich aus den Unsicherheiten am Netzgerät. Da das Netzgeräthandbuch nicht abrufbar war, mussten die Unsicherheiten geschätzt werden. Die angezeigten Werte am Netzgerät schwankten nicht, als Unsicherheit wurde deshalb jeweils die letzte angezeigte Ziffer ($\Delta U = 0,1 \text{ V}$, $\Delta I = 0,01 \text{ A}$) angenommen. Mit Gauß'scher Fehlerfortpflanzung ergibt sich:

$$\Delta P = \sqrt{(U\Delta I)^2 + (I\Delta U)^2} \quad (8)$$

Aus dem gemessenen Strom der Fotodiode wird mit dem zuvor bestimmten Umrechenkoeffizienten mit ND-Filter die Laserleistung

$$P_L = a_{\text{FND}} + b_{\text{FND}} I_{\text{FND}} \quad (9)$$

berechnet. Auch hier ergibt sich durch Gauß'sche Fehlerfortpflanzung

$$\Delta P_L = \sqrt{(a_{\text{FND}})^2 + (b_{\text{FND}}\Delta I_{\text{FND}})^2 + (I_{\text{FND}}\Delta b_{\text{FND}})^2}, \quad (10)$$

Ich glaube hier fehlt ein Delta.

wobei die Unsicherheit des Fotodiodenstroms der vom Hersteller angegebenen Ableseunsicherheit für den verwendeten Messbereich entspricht. Die Unsicherheiten der Umrechenkoeffizienten wurden zuvor berechnet.

In [Abbildung 3](#) ist die Laserleistung gegen die Aufnahmeleistung aufgetragen.

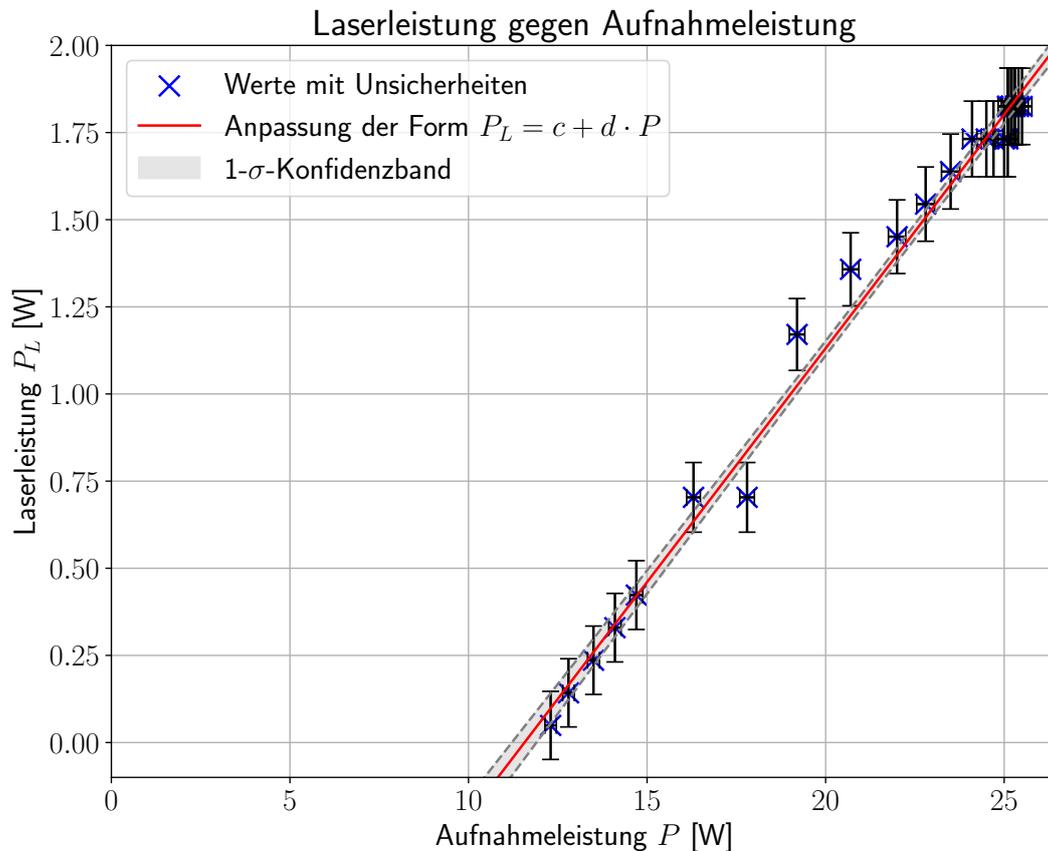


Abbildung 3: Auftragung der Laserleistung gegen die Aufnahmeleistung. Die Werte und deren Unsicherheiten wurden mit [Gleichungen \(7\) bis \(10\)](#) berechnet. Zudem wurde eine lineare Regression der Form $P_L = c + d \cdot P$ durchgeführt, diese ist zusammen mit dem $1\text{-}\sigma$ -Konfidenzband dargestellt.

Da die Messpunkte scheinbar einen linearen Verlauf aufweisen, wurde eine lineare Regression der Form

$$P_L = c + d \cdot P \quad (11)$$

mit

$$c = (-1,55 \pm 0,09) \text{ W} \quad (11a)$$

$$d = (0,134 \pm 0,004) \quad (11b)$$

mit `scipy.optimize.curve_fit` in *Python* durchgeführt. Das $1\text{-}\sigma$ -Konfidenzband wurde mit den in [\[5\]](#) eingeführten Zusammenhängen berechnet. Ein reduzierter χ^2 -Test mit

$$\chi_\nu^2 = 0,3$$

bescheinigt der Anpassung eine gute Verträglichkeit mit den Messwerten.

Aus den Anpassungsparametern kann die Laserschwelle P^* , also die Aufnahmeleistung berechnet werden, bei welcher der Laserbetrieb einsetzt. Es ergibt sich

$$P^* = -\frac{c}{d} . \quad (12)$$

$$\Delta P^* = \sqrt{\left(-\frac{1}{d}\Delta c\right)^2 + \left(\frac{c}{d^2}\Delta d\right)^2}$$

Die Unsicherheiten folgen durch Anwendung der Gaußschen Fehlerfortpflanzung. Die Laserschwelle beträgt demnach

$$P^* = (11,6 \pm 0,8) \text{ W} .$$

Die durch die Anpassung suggerierte Extrapolation hin zu negativen Leistungen ist unphysikalisch. Vielmehr gibt es Aufnahmeleistungen $< P^*$, bei welchen noch kein Laserbetrieb einsetzt, also keine Leistung P_L gemessen werden kann. Die Anpassung müsste für $P < P^*$ also konstant auf $P = 0$ fortgeführt werden.

Die Steigung der Anpassung wird als differentieller Wirkungsgrad

$$\frac{dP_L}{dP} = d = (0,134 \pm 0,004)$$

des Diodenlasers interpretiert.

Da bei diesem sowohl die Laserschwelle, als auch Schwankungen der einzelnen Messwerte um die Regression nicht berücksichtigt werden, wird der Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{P_L}{P} \quad (13)$$

aus dem Leistungsverhältnis der einzelnen Messungen bestimmt. Dessen Unsicherheit berechnet sich mit

$$\Delta\eta = \sqrt{\left(\frac{1}{P}\Delta P_L\right)^2 + \left(-\frac{P_L}{P^2}\Delta P\right)^2} . \quad (14)$$

Der Wirkungsgrad ist für die jeweiligen Aufnahmeleistungen in [Abbildung 4](#) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass dieser durchaus leistungsabhängig ist. Für Leistungen nahe der Laserschwelle ist der Wirkungsgrad sehr klein. Er steigt im dargestellten Leistungsbereich zunächst stark an und nähert sich dann einem Wert von 7% bis 8% an. Dass sich der Wirkungsgrad so stark vom differentiellen unterscheidet kommt daher, dass der differentielle Wirkungsgrad nur aus der Steigung der Anpassung resultiert, während der Wirkungsgrad der einzelnen Werte deutlichen Schwankungen unterliegt, die durch die Ausgleichsgerade gemittelt wurden.

Insgesamt ist der Wirkungsgrad schlechter als für einen Diodenlaser erwartet. Mögliche Ursachen hierfür werden in der Diskussion betrachtet.

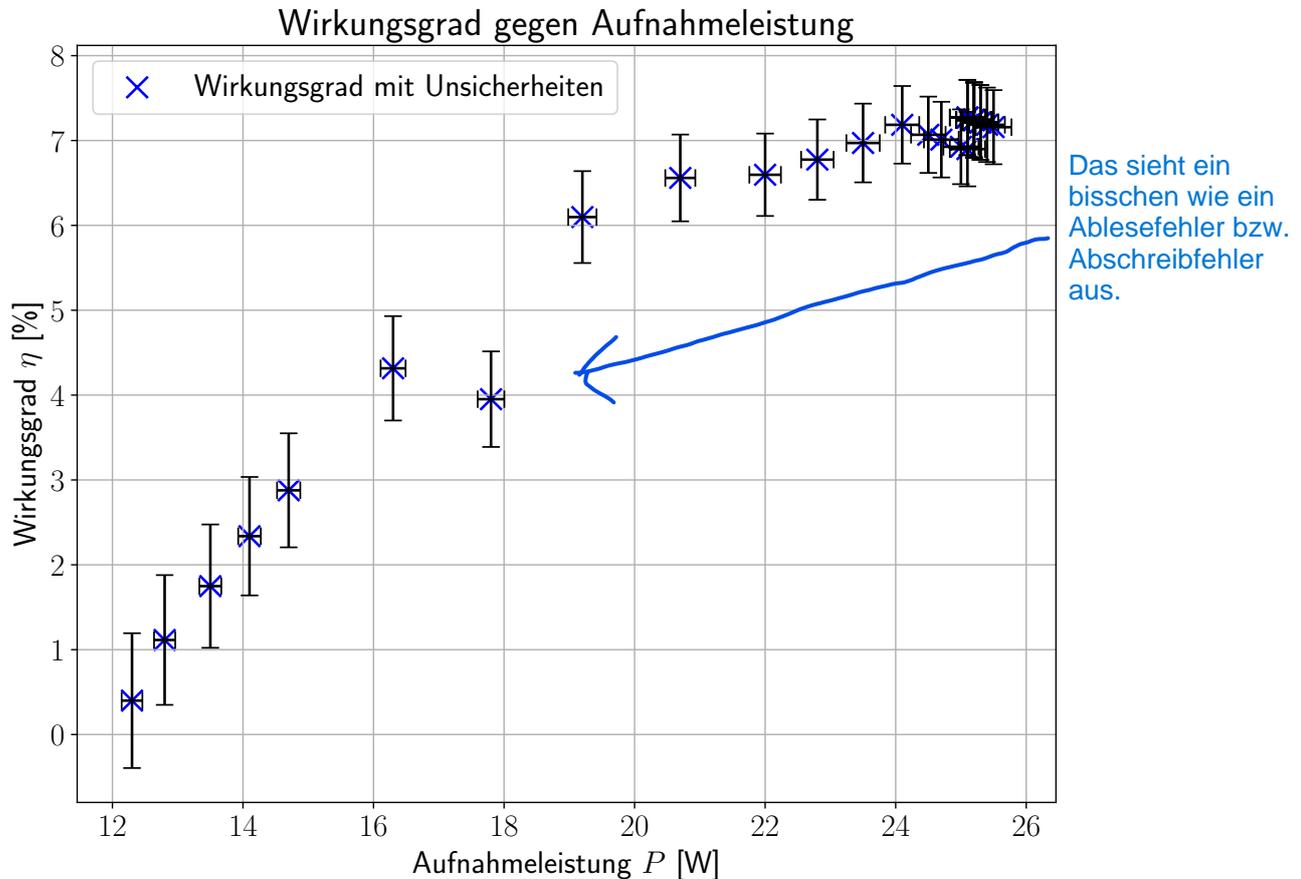


Abbildung 4: Wirkungsgrad des Diodenlasers für verschiedene Aufnahmeleistungen. Die Wirkungsgrade und deren Unsicherheiten wurden mit [Gleichungen \(13\)](#) und [\(14\)](#) berechnet. Die Aufnahmeleistung ergibt sich aus [Gleichungen \(7\)](#) und [\(8\)](#).

3.3 Absorption der Pumpstrahlung im Pr:YLF-Kristall

Im Anschluss wird die Absorption der Pumpstrahlung im Pr:YLF-Kristall untersucht. Abermals wird hierfür der selbe Aufbau wie zuvor genutzt und der Pr:YLF-Kristall, wie im Aufbau beschrieben vor dem ND-Filter platziert. Abermals wurde für die selben Regelspannungen wie zuvor der Fotodiodenstrom gemessen und notiert. Das Multimeter war abermals auf den selben Messbereich von $500 \mu\text{A}$ eingestellt, weshalb sich die entsprechenden Unsicherheiten wie bei der vorherigen Messung ergeben.

Die so gemessenen Diodenströme sind zusammen mit den Messwerten für Spannung U , Stromstärke I und die Regelspannung u in [Abbildung 7](#) zu finden.

Anhand von [Gleichung \(7\)](#) wurde die Aufnahmeleistung des Lasers berechnet.

Die Leistung P'_L des Lasers nach Durchlaufen des Pr:YLF-Kristalls berechnet sich nach dem Zusammenhang aus [Gleichung \(3\)](#) und den Messwerten für die entsprechende Diodenstromstärke I'_D .

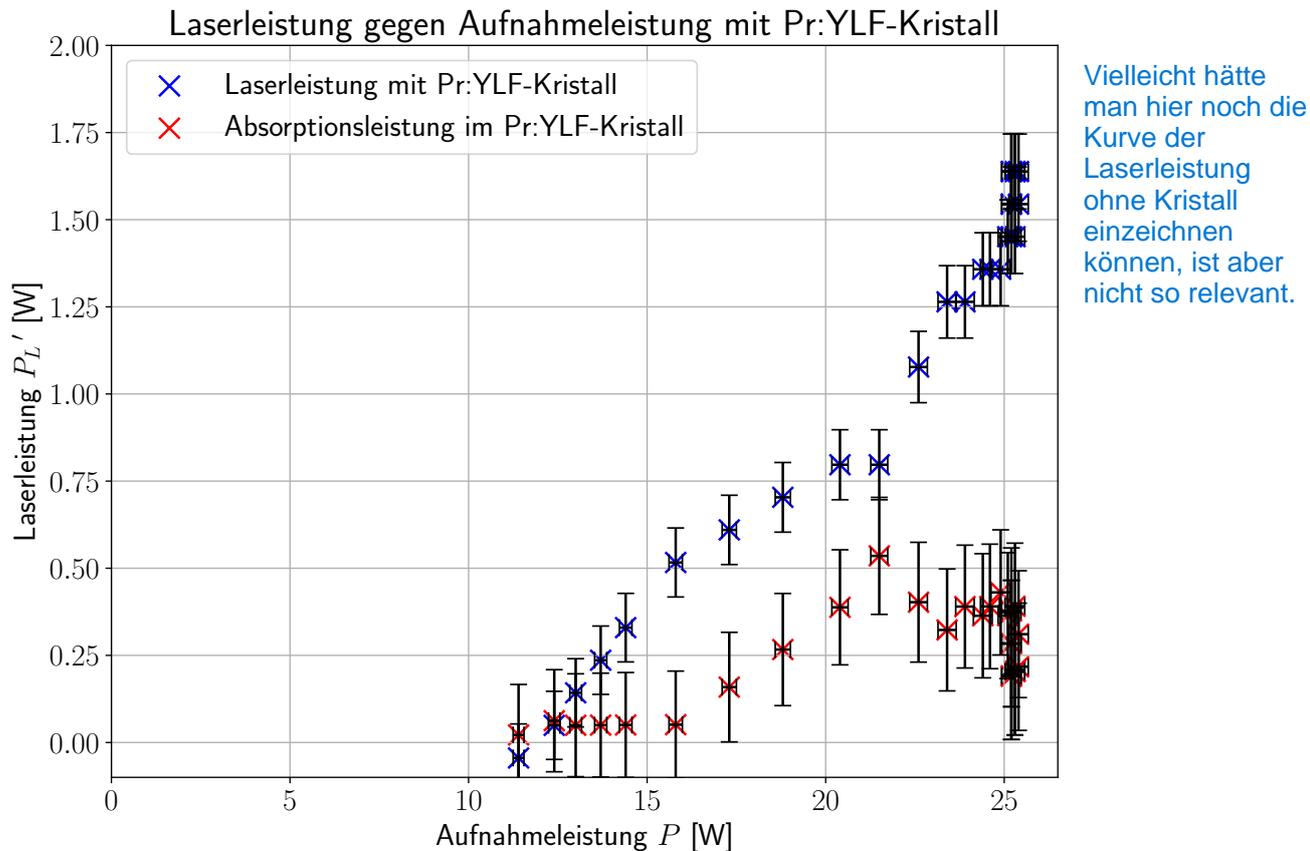


Abbildung 5: Dargestellt sind in blau die nach [Gleichung \(3\)](#) berechneten Werte für die Laserleistung nach Durchlaufen des Pr:YLF-Kristalls und des ND-Filters gegen die Aufnahmeleistung nach [Gleichung \(7\)](#). Die Unsicherheiten wurden erneut nach [Gleichung \(10\)](#) berechnet. Auch sind die nach [Gleichung \(15\)](#) berechneten Werte für die Absorptionsleistung im Pr:YLF-Kristall in rot dargestellt. Diese ergeben sich aus der Differenz der in [Abbildung 3](#) dargestellten Ausgleichsgerade und den berechneten Leistungen nach Durchlaufen des Kristalls. Die Unsicherheiten wurden nach Gauß'scher Fehlerfortpflanzung berechnet und sind ebenfalls in [Gleichung \(15\)](#) zu finden. Es ist deutlich sichtbar, dass die im Kristall absorbierte Leistung eher gering ist, aber für größere Aufnahmeleistungen deutlich zunimmt.

In [Abbildung 5](#) sind die jeweiligen berechneten Werte für die Laserleistung P_L' gegen die Aufnahmeleistung P aufgetragen.

Die dargestellten Unsicherheiten der Laserleistung P_L' im Pr:YLF-Kristall ergeben sich abermals nach [Gleichung \(10\)](#).

Die Einteilung der x- und y-Achsen wurde gleich gewählt wie in [Gleichung \(3\)](#). Daher ist deutlich sichtbar, dass die Werte der Laserleistung mit Pr:YLF-Kristall nicht deutlich unter dem Verlauf der Leistungen ohne Kristall liegen. Die Absorptionsleistung wird also voraussichtlich eher gering sein.

Um nun die tatsächliche Absorptionsleistung im Kristall zu ermitteln, wurde mit Hilfe der linearen Regression aus [Gleichung \(11\)](#) die Leistung des Lasers P_L , unter Berücksichtigung des ND-Filters aus den Aufnahmeleistungen berechnet.

Die Absorptionsleistung im Pr:YLF-Kristall ergibt sich somit durch

$$\begin{aligned} P_A &= c + d \cdot P - P'_L \\ \Delta P_A &= \sqrt{(\Delta c)^2 + (P \Delta d)^2 + (d \Delta P)^2 + (\Delta P'_L)^2} . \end{aligned} \quad (15)$$

Die so berechneten Absorptionsleistungen sind ebenfalls in [Abbildung 5](#) dargestellt. Wie erwartet ist sie anfangs eher klein und nimmt für zunehmende Aufnahmeleistung deutlich zu. Auf mögliche Ursachen hierfür wird in der Diskussion eingegangen.

3.4 Untersuchung des Pr:YLF-Lasers

Zuletzt wurde, wie in [Abschnitt 2](#) beschrieben der Pr:YLF-Laser selbst aufgebaut und kalibriert. Durch feine Justage ließ sich somit eine Stromstärke an der Photodiode von

$$I_{F,Pr:YLF} = (70 \pm (10 \text{ syst.} + 5 \text{ stat.})) \mu\text{A}$$

messen. Die Unsicherheiten ergeben sich abermals aus der systematischen und statistischen Unsicherheit des Messgeräts, wobei die statistische Unsicherheit aufgrund von Schwankungen des Zeigers geschätzt wurde. Die Messwerte wurden bei einer Spannung $U = (10,0 \pm 0,1) \text{ V}$, mit Stromstärke $I = (2,40 \pm 0,01) \text{ A}$ und Regelspannung $u = (6,4 \pm 0,1) \text{ V}$ ermittelt. Diese Einstellungen wurde gewählt, da bei diesen die größte Anregung des Lasers stattfand, also die maximale Intensität gemessen werden konnte. Dies entspricht allerdings nicht unbedingt dem maximalen Wirkungsgrad. Dieser hätte auch bei einer kleineren Aufnahmeleistung erreicht werden können, was sich im Versuch aber schlecht überprüfen ließ.

Um aus der Stromstärke die tatsächliche Leistung des Lasers zu bestimmen, wurde der Zusammenhang nach [Gleichung \(3\)](#) genutzt. Für die Leistung ergibt sich

$$P_{Pr:YLF} = (0,79 \pm (0,10 \text{ syst.} + 0,05 \text{ stat.})) \text{ W}$$

Ich glaube hier habt ihr den Achsenabschnitt aus versehen addiert anstatt subtrahiert. Es sollten eher 0,51 W sein.

Die Unsicherheiten ergeben sich, indem getrennt für statistische und systematische Unsicherheiten eine Gauß'sche Fehlerfortpflanzung durchgeführt wurde. Die Unsicherheiten aus der linearen Regression wurden dabei als zugrunde liegende, systematische Unsicherheiten angesehen.

Es folgt

$$\begin{aligned} \Delta P_{Pr:YLF}^{\text{sys.}} &= \sqrt{(\Delta a_{\text{FND}})^2 + (b_{\text{FND}} \cdot \Delta I_{F,Pr:YLF}^{\text{sys.}})^2 + (I_{F,Pr:YLF} \cdot \Delta b_{\text{FND}})^2} \\ \Delta P_{Pr:YLF}^{\text{stat.}} &= |b_{\text{FND}} \cdot \Delta I_{F,Pr:YLF}^{\text{stat.}}| . \end{aligned} \quad (16)$$

Um nun die Leistung des Lasers mit der Leistung des Pumplasers zu vergleichen und einen Rückschluss auf den Wirkungsgrad des Pr:YLF-Lasers zu ziehen, muss diese zunächst ermittelt werden. Abermals wird die Aufnahmeleistung nach [Gleichung \(7\)](#) berechnet und mit Hilfe der linearen Regression nach [Gleichung \(11\)](#) umgerechnet. Die Leistung des Lasers ergibt sich somit zu

$$P_L = (1,67 \pm 0,14) \text{ W} ,$$

wobei die Unsicherheit abermals nach Gauß'scher Fehlerfortpflanzung zu

$$\Delta P_L = \sqrt{(\Delta c)^2 + (d \cdot \Delta P_L)^2 + (P_L \cdot \Delta d)^2} \quad (17)$$

berechnet wurde.

Mit diesen Ergebnissen, kann nun der Wirkungsgrad $\eta_{\text{Pr:YLF}}$ des Pr:YLF-Lasers berechnet werden. Dieser kann mit Hilfe von [Gleichung \(13\)](#) ermittelt werden, wobei nun der Quotient

$$\eta_{\text{Pr:YLF}} = \frac{P_{\text{Pr:YLF}}}{P_L} \quad (18)$$

mit den Unsicherheiten

$$\Delta \eta_{\text{Pr:YLF}}^{\text{sys.}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta P_{\text{Pr:YLF}}^{\text{sys.}}}{P_L}\right)^2 + \left(\frac{P_{\text{Pr:YLF}}}{P_L^2} \cdot \Delta P_L\right)^2} \quad (19)$$

$$\Delta \eta_{\text{Pr:YLF}}^{\text{stat.}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta P_{\text{Pr:YLF}}^{\text{stat.}}}{P_L}\right)^2 + \left(\frac{P_{\text{Pr:YLF}}}{P_L^2} \cdot \Delta P_L\right)^2} \quad (20)$$

berechnet wird.

Somit ergibt sich der Wirkungsgrad des Pr:YLF-Lasers, wobei die Leistung des Diodenlasers als Eingangsleistung betrachtet wurde. Der selbst gebaute Laser hatte somit einen Wirkungsgrad von

$$\eta_{\text{Pr:YLF}} = (47 \pm (7 \text{ syst.} + 5 \text{ stat.})) \% .$$

Mit 0.51W anstatt eurer 0.79W sind dass dann etwa 30%. Das wirkt zwar immer noch etwas hoch aber gut.

4 Diskussion der Ergebnisse

4.1 Angabe und Diskussion der Endergebnisse

Zunächst fand die Kalibrierung der Laserleistung in Abhängigkeit der Stromstärke statt. Über mehrere Messwerte wurde hierfür eine lineare Regression durchgeführt, deren Parameter sich zu

$$a_{\text{FND}} = (-0,14 \pm 0,03) \text{ W}$$

$$b_{\text{FND}} = (9,3 \pm 0,2) \cdot 10^3 \text{ W A}^{-1}$$

in einer Anpassung der Form $P_L = a_{\text{FND}} + b_{\text{FND}} \cdot I_{\text{FND}}$ ergaben. Diese Umrechnung wurde für alle weiteren Versuchsteile verwendet um von Fotodiodenströmen I_{FND} mit ND-Filter auf die Laserleistung P_L zu schließen.

Im ersten Teil der Auswertung wurden Transmissionsgrad und optische Dichte des ND-Filters aus einer Messreihe bestimmt. Diese ergaben sich zu:

$$\begin{aligned} \bar{T} &= (0,133 \pm 0,008) \% & \frac{\Delta\bar{T}}{\bar{T}} &= 6 \% \\ D &= (2,88 \pm 0,03) & \frac{\Delta D}{D} &= 1 \% . \end{aligned}$$

Durch die Mittelwertbildung über die einzelnen Messpunkte, sind die relativen Unsicherheiten hierbei ausreichend gering.

Um den Diodenlaser genauer zu untersuchen, wurde die Laserschwelle $P^* = (11,6 \pm 0,8) \text{ W}$ aus dem Schnittpunkt der Regression in [Abbildung 3](#) mit der x-Achse bestimmt. Bei dieser Leistung geht der Pumplaser in den Laserbetrieb über. Aus der Steigung der Regression ergibt sich der differentielle Wirkungsgrad

$$\frac{dP_L}{dP} = (0,134 \pm 0,004) \quad \frac{\Delta dP_L/dP}{dP_L/dP} = 3 \% .$$

Da die Anpassung die Messreihe gut beschrieb und nur einen reduzierten χ^2 -Test von $\chi^2_\nu = 0,3$ aufwies, ist auch hier die Genauigkeit der Messung sehr hoch.

Zusätzlich wurde der Wirkungsgrad des Pumplasers für jeden Messpunkt der Messreihe bestimmt. Dieser ist in [Abbildung 4](#) dargestellt. Für Aufnahmeleistungen in der Nähe der Laserschwelle ist der Wirkungsgrad gering. Er steigt für höhere Leistungen bis zu einem Wert von $7\% < \eta_{\max} < 8\%$. Hier scheint eine Art Plateau erreicht. Insgesamt lässt sich sagen, dass der Wirkungsgrad des Pumplasers deutlich geringer ist als erwartet. Diese Feststellung wird im Laufe der Diskussion erneut aufgegriffen.

Unter Verwendung der bisherigen Ergebnisse kann die absorbierte Leistung des Pr:YLF-Kristalls bestimmt werden. Diese ist in [Abbildung 5](#) gegen die Aufnahmeleistung des Lasers dargestellt. Deutlich sichtbar ist, dass auch diese nicht konstant verläuft, sondern nach einem kurzen, nahezu konstanten Bereich deutlich ansteigt. Ein möglicher Grund hierfür ist die Erwärmung des Kristalls bei längerer Einstrahlung.

Der Pr:YLF-Laser funktionierte nach sorgfältiger Ausrichtung der Komponenten. Er emittierte einen roten Laserstrahl, dessen Leistung noch durch kleinere Anpassungen optimiert werden konnte. Die so erzielte, maximale Leistung beträgt

$$\begin{aligned} P_{\text{Pr:YLF}} &= (0,79 \pm (0,10 \text{ syst.} + 0,05 \text{ stat.})) \text{ W} & \frac{\Delta P_{\text{Pr:YLF}}}{P_{\text{Pr:YLF}}} &= 19 \% \\ \eta_{\text{Pr:YLF}} &= (47 \pm (7 \text{ syst.} + 5 \text{ stat.})) \% & \frac{\Delta \eta_{\text{Pr:YLF}}}{\eta_{\text{Pr:YLF}}} &= 25 \% \end{aligned}$$

und bescheinigt dem Laser einen sehr guten Wirkungsgrad. Die hohen relativen Unsicherheiten resultieren hierbei stark aus der Vorgehensweise während der Messung. Für diese Endergebnisse wurden alle vorangegangenen Ergebnisse und Anpassungen verwendet, was aufgrund der mehrfachen Kombination von Zwischenergebnissen und der begrenzten Genauigkeit der Messungen unweigerlich zu den großen Unsicherheiten führt.

4.2 Diskussion der verwendeten Messmethoden

Bei der ersten Messung, die für den Versuch im Labor durchgeführt wurde, handelte es sich um die in Teil 2 behandelte Untersuchung der Laserleistung und des Wirkungsgrads des Diodenlasers. Hier wurde zunächst eine Messung des Fotodiodenstroms und der Leistungsaufnahme für verschiedene Regelspannungen ohne ND-Filter durchgeführt. Im Zeitraum dieser ersten Messreihe erhitze sich der Diodenlaser dabei ab dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme nach und nach. Die Kühlung des Lasers setzte daher zunächst in Intervallen ein, sodass sich die für die Kühlung notwendige Leistung und daher die entsprechende, durch die Kühlung auftretende, Stromstärke I in diesen Intervallen stark änderte. Für die einzelnen Messungen konnte daher der Kühlstrom nicht immer gleichermaßen bei der Leistungsaufnahme des Diodenlasers berücksichtigt werden.

Des Weiteren konnte bei dieser Messung ohne ND-Filter ab einer Spannung von ungefähr 5 V der Fotodiodenstrom nicht mehr mit dem analogen Multimeter gemessen werden, da sehr starke Schwankungen auftraten. Eine genauere Untersuchung dieses Problems ergab die Beobachtung, dass ab diesem Spannungsbereich ein verbrannter Geruch der Fotodiode festzustellen war. Vermutlich wurde die Diode bei diesem Laserleistungsbereich aufgrund der hohen Intensität zu stark erhitzt, sodass sich der Widerstand deutlich veränderte, was zu den großen Schwankungen der Stromstärke führte. Eine sinnvolle Messung war daher ohne ND-Filter nicht möglich gewesen.

Aus diesen Gründen wurde diese erste Messreihe nicht in der Auswertung berücksichtigt und ein zweites Mal mit ND-Filter durchgeführt.

Bei der Messung des Fotostroms mit dem analogen Multimeter fiel auf, dass bereits ohne anliegende Regelspannung ein Ausschlag am Multimeter von einem Skalenstrich angezeigt wurde. Dies lässt ein systematisches Offset von ungefähr $10\ \mu\text{A}$ für den $500\ \mu\text{A}$ Messbereich bzw. $5\ \mu\text{A}$ im $2,5\ \text{mA}$ Messbereich bei dem Fotodiodenstrom vermuten. Eine Ursache hierfür ist der durch das Sonnenlicht registrierte Strom an der Fotodiode, da der Versuchsaufbau nicht abgedunkelt wurde. Da das Umgebungslicht jedoch zeitweise variierte, kann auch nicht auf einen konstanten Wert des dadurch zu hoch gemessenen Fotodiodenstroms geschlossen werden. Dieses Offset konnte daher in den Auswertungen nicht gewinnbringend herausgerechnet werden. Abgesehen davon mussten für die Messungen des Fotodiodenstroms ohne und mit ND-Filter aufgrund dessen geringen Transmissionsvermögens unterschiedliche Messbereiche am analogen Multimeter verwendet werden, sodass die durch das Messgerät bedingten Unsicherheiten der Fotodiodenströme nicht konstant gehalten werden konnten. Hier ist außerdem zu berücksichtigen, dass am analogen Multimeter die Messwerte aufgrund der Skalierung stets nur mit einer Genauigkeit einer halben Skaleneinteilung abgelesen werden konnten, was zu größeren statistischen Unsicherheiten führte.

Betrachtet man den in Versuchsteil 2 bestimmten Wirkungsgrad des Diodenlasers, so ist auffällig, dass der entsprechende Wert eher gering ausfällt, also viel Leistung bei der Leistungsaufnahme des Diodenlasers verloren geht. Dies ist zum einen auf die oben bereits diskutierte Kühlung des Lasers zurückzuführen, deren benötigte Leistung abgeschätzt wurde.

Zum anderen sind hier auch Kabelwiderstände und der Innenwiderstand des Netzgeräts zu berücksichtigen. Die hierdurch abfallende Leistung wurde allerdings nicht bei der Bestimmung des Wirkungsgrads berücksichtigt, wodurch der entsprechend berechnete Wert geringer ausfällt.

Insbesondere bei der Bestimmung des Wirkungsgrads des Pr:YLF-Lasers ist hier außerdem zu berücksichtigen, dass auf die Laserleistung über den durch das Pumplaserlicht in Versuchsteil 1 kalibrierten Fotodiodenstrom geschlossen wurde. Hierbei wurde jedoch nicht berücksichtigt, dass die Fotodiode eventuell unterschiedliche Empfindlichkeiten für Laserlicht verschiedener Wellenlängen aufweist. Da der Pr:YLF-Laser eine deutlich größere Wellenlänge hat als der Diodenlaser, könnte die aus dem Fotodiodenstrom bestimmte Laserleistung also einen kleinen Fehler aufweisen, falls die Kalibrierung für Licht dieser neuen Wellenlänge nicht exakt anwendbar war.

Während des Versuchs konnte außerdem beobachtet werden, dass ein kleiner Anteil des roten Laserlichts von dem Pr:YLF-Laser aus der Kavität heraus zum Pumplaser gelangen konnte, was auf den geringen Transmissionsgrad $T < 0,005$ des Einkoppelspiegels für rotes Licht zurückgeführt werden könnte. Bei zu hoher Intensität des Laserlichts könnte dies zu Schäden des Pumplasers führen, falls beispielsweise kein Faraday-Rotator vor diesem platziert wurde.

Ebenfalls möglich ist, dass der erzeugte Pr:YLF-Laser eine leicht andere Wellenlänge hat als die, auf die die Bauteile, wie die Spiegel und der Farbfilter kalibriert sind. Insbesondere wäre bei einer leichten Abweichung der Laserwellenlänge eventuell der Absorptionsgrad des hinter dem ND-Filter platzierten Farbfilters zu berücksichtigen, welcher das Licht des Pumplasers herausfiltern sollte. Weicht die Pr:YLF-Wellenlänge ebenfalls ab, so könnte ein kleiner Anteil ebenfalls ungewollt durch diesen Farbfilter absorbiert werden, was eine geringere beobachtete Laserleistung und damit einen geringeren Wirkungsgrad zur Folge hätte.

Es gibt also einige wichtige Faktoren, die zu den Unsicherheiten der Messung beitragen. Im Folgenden werden daher mögliche Verbesserungen dieser Messmethoden diskutiert.

4.3 Verbesserte Messmethoden

Zur Messung des Fotodiodenstroms wurde für jeden Versuchsteil ein analoges Multimeter verwendet. Da dieses, wie oben beschrieben, eine größere Ableseunsicherheit aufgrund der Skaleneinteilung aufweist, wäre hier eine genauere Messung mit Hilfe eines digitalen Multimeters sinnvoll. Auch hätten dadurch die auftretenden Schwankungen des Fotodiodenstroms, die teils zu Schwierigkeiten in der Messung führten, besser untersucht werden können.

Um außerdem die durch das Sonnenlicht registrierte Fotodiodenstromstärke aufgrund der Umgebungsbeleuchtung zu verhindern, hätte der Versuchsaufbau durch eine Abdeckung abgedunkelt werden können. So wäre eventuell das oben diskutierte Offset am Multimeter bei einer Regelspannung von $u = 0$ V eliminiert worden und es lägen weniger Schwankungen im Fotodiodenstrom vor, die durch die variierende Umgebungsbeleuchtung hervorgerufen wurden.

In dem Versuch wurde außerdem lediglich eine Kalibration der Fotodiode mit Hilfe eines Leistungsmessgeräts durchgeführt. Danach wurden die Laserleistungen über die dadurch erhaltene Ausgleichsfunktion mit Hilfe der Fotodiodenströme berechnet. Wäre hier stattdessen für jede der Messungen ein Leistungsmessgerät zur Verfügung gestanden, so hätten die Laserleistungen und damit auch die Wirkungsgrade der Laser direkt gemessen werden können. Die Werte würden dann geringeren Unsicherheiten unterliegen und baubedingte Schwierigkeiten bei der Messung mit der Fotodiode würden umgangen werden.

Um die oben diskutierte, beobachtete Erhitzung der Fotodiode zu vermeiden, musste außerdem stets der ND-Filter vor dieser platziert werden, um Messungen in größeren Regelspannungsbereichen durchzuführen. Da sich für den ND-Filter jedoch ein extrem geringer Transmissionsgrad ergab, wurden die Intensitäten stark abgeschwächt. Ein etwas weniger absorbierender Filter wäre hier im Hinblick auf die Hintergrundbeleuchtung sinnvoll gewesen. So hätten, ohne zu starke Erhitzung der Fotodiode, stärkere Fotodiodenströme beobachtet werden können, was zu einem geringeren relativen Einfluss der schwankenden Hintergrundbeleuchtung auf die Messwerte geführt hätte.

Ein weiteres Problem, wie oben beschrieben, war außerdem die für die Kühlung und aufgrund der Kabel- und Netzgerätewiderstände benötigte Leistung, die bei der Aufnahmeleistung des Lasers nicht berücksichtigt wurde und daher den Wirkungsgrad verringerte. Dieser Leistungsverlust könnte durch eine Stromstärke- und Spannungsmessung außerhalb des Netzgeräts besser berücksichtigt werden, sodass die tatsächlich vom Diodenlaser aufgenommene Leistung besser bekannt wäre. Auch würde dieses Vorgehen die Unsicherheiten der Messwerte deutlich verringern.

In Versuchsteil 4 konnte abschließend der Pr:YLF-Laser justiert werden, um dessen Wirkungsgrad zu untersuchen. Hierfür war eine sehr feine Justage notwendig, um die maximale Intensität zu erzielen. Eine Skalierung auf der optischen Bank sowie die Kenntnis der Brennweite der zur Fokussierung des Diodenlasers verwendeten Linse wären hierbei für eine noch präzisere Justage hilfreich gewesen, da diese im vorliegenden Versuchsaufbau nur nach Gefühl durchgeführt werden konnte.

Auch ist hier zu berücksichtigen, dass ein kleiner Teil des Pr:YLF-Laserlichts aus der Kavität in Richtung Pumplaser austrat. Ein Antireflexspiegel mit noch größerem Reflexionsgrad hätte hier ebenfalls zu einem geringeren Intensitätsverlust des Laserlichts geführt, wodurch ein besserer Wirkungsgrad hätte erreicht werden können.

Durch die Umsetzung einiger dieser Verbesserungen, hätten somit die Messergebnisse genauer sowie deren Unsicherheiten geringer ausfallen können, was eine aussagekräftigere Vermessung des Aufbaus ermöglicht hätte.

Sehr sehr ausführlich.

A Anhang

Abbildungsverzeichnis

1	Versuchsaufbau Pr:YLF-Laser	3
2	Kalibrierung der Fotodiode	6
3	Laserleistung gegen Aufnahmeleistung	8
4	Wirkungsgrad gegen Aufnahmeleistung	10
5	Laserleistung gegen Aufnahmeleistung im Kristall	11
6	Messprotokoll Seite 1	19
7	Messprotokoll Seite 2	20
8	Messprotokoll Seite 3	21

Literaturverzeichnis

- [1] *Physiklabor für Anfänger*innen Teil 2, Anleitung Versuch 77, Pr:YLF-Laser* (Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022, 28. März 2022).
- [2] *Uni-T UT51 Bedienungsanleitung* (UNI-TREND TECHNOLOGY (DONG GUAN) LIMITED, 2022, 28. März 2022), <https://omnibus.uni-freiburg.de/~phypra/ap/44/PeakTech%203260%20Bedienungsanleitung.pdf>.
- [3] *Leistungsdetektor Bedienungsanleitung* (Gentec Electro-Optics Inc., Version 6.3, 28. März 2022), <https://omnibus.uni-freiburg.de/~phypra/ap/77/Gentec%20UP%20Series%20Thermopile%20Power%20Detectors.pdf>.
- [4] *Leistungsmessgerät Bedienungsanleitung* (Gentec Electro-Optics Inc., Revision 6.3, 28. März 2022), <https://omnibus.uni-freiburg.de/~phypra/ap/77/Gentec%20Uno.pdf>.
- [5] *Physiklabor für Anfänger*innen Teil 2, Datenanalyse B* (Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022, 7. März 2022).
- [6] *Physiklabor für Anfänger*innen Teil 2, Datenanalyse A* (Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022, 7. März 2022).
- [7] *Physiklabor für Anfänger*innen Teil 2, Aufbau Versuch 77* (Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022, 28. März 2022), <https://omnibus.uni-freiburg.de/~phypra/ap/77/>.

A.1 Messprotokoll

V77 Pri: YLF-Laser 29.03.2022

2. Laserleistung + Wirkungsgrad d. Diodenlasers
 Bem: die Fotodiode misst bei ausgeschaltetem Laser schon einen Strom von $\sim 5 \mu A$

ohne Filter

U [V]	10	=	=												
I [A]	0,11	0,18	0,24	0,30	0,37	0,52	0,68	0,83	0,98	1,11	1,22	1,30			
u [V]	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5			
I _F [mA]	5	15	30	45	60	85	100	105	110	115	110	120			

↑
 weiteres Glühen
 Messbereich 250 mA
 $\Delta I_F = \pm 5 \mu A$
 = \rightarrow Abwies Dauerbetriebe

↑
 Bei 0V Regelspannung fließt $\sim 1,3 A$ Strom (gepulst) für die Kühlung: Möglicherweise für hohe Spannungen Dauerbetriebe
 $\Delta I = 0,01 A$ ohne Dauerbetriebe

\rightarrow Abwertbare sinnvolle Messung mehr möglich

2,48	2,46	2,51	2,53	2,52
50	5,5	6,0	6,5	7,0
160	160	160	160	145

Nochmal diese Messreihe, diesmal mit Graufilter:

U [V]	10	10	=	=												
I [A]	1,23	1,28	1,35	1,41	1,47	1,63	1,71	1,82	2,07	2,20	2,28	2,35	2,41	2,45	2,47	2,50
u [V]	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
I _F [μA]	20	30	40	50	60	90	90	140	160	170	180	190	200	200	200	200

↑ jetzt ist der Laser schon warm und kühlt auf Dauerbetrieb

\rightarrow Messbereich: 500 μA ; Offset Gerät: 10 μA ; Offset Gerät mit Sonne: 20 μA
 $\Delta I_F = 5 \mu A$

=

2,51	2,52	2,53	2,51	2,52	2,52	2,51	2,52	2,53	2,54	2,55
7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0
200	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210

Abbildung 6: Messprotokoll Seite 1

3. Absorption im Pr:YLF-Kristall

U [V]	10																											
I [A]	174	174	1730	137	144	158	173	178	204	215	226	234	239	244	246	249	251	252	253	254	252	252	252	252	253	253	253	
u [V]	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5
I _F [μA]	10	20	30	40	50	70	80	90	100	100	130	150	150	160	160	170	170	170	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180

↳ Messbereich: 500 μA, ΔI_F = 5 μA

4. Laserbetrieb

Abu = 2,4 V schwingt die Kurve an

Nach Einstellen des Lasers:

I _F = 70 μA	Messber: 500 μA
U = 10 V	
I = 2,40 A	
u = 6,3 V	

7. Kalibrieren der Fotodiode

u [V]	0,2 0,4 0,6 0,8 1,0 1,5 2,0 2,5 3,0 3,5 4,0 4,5 5,0 5,5 6,0 6,5 7,0 7,5 8,0 8,5																											
P _L [W]	0,01	0,074	0,170	0,278	0,412	0,608	0,884	1,284	1,870	2,626	3,845	5,067	6,812	9,184	12,284	16,170	20,945	26,726	33,612	41,612	50,845	61,345	73,112	86,245	100,845	116,945	134,612	153,945
I _F [mA]	5	10	25	45	5	15	30	45	60	85	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
I _{F,FD} [μA]	5	5	5	5	10	20	30	50	60	90	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460

↳ 500 μA - Messber. ΔI_{F,FD} = 5 μA ΔP_L = 0,005

↳ 250 mA - Messber. ΔI_F = 2,5 mA

1,278	1,465	1,602	1,633	1,771	1,818	1,834	1,875	1,906	1,935	1,975	1,936																	
120	125	130	130	135																								
160	170	200	200	200	200	200	200	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210

Zu intensiv für Fotodiode

Abbildung 7: Messprotokoll Seite 2

9,0	9,5	10	10,5	11,0	11,5	12
1,944	1,944	1,947	1,954	1,948	1,956	1,948
/	/	/	/	/	/	/
210	210	210	220	220	220	220

29.03.22 VT Boemler

Abbildung 8: Messprotokoll Seite 3