

ALBERT-LUDWIGS-UNIVERSITÄT FREIBURG
PHYSIKLABOR FÜR ANFÄNGER*INNEN, TEIL 2
WINTERSEMESTER 2021/22

VERSUCH 77 AM 06.04.2022

Pr:YLF-Laser

Gruppe 211:
07.04.2022

Assistent:

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel des Versuchs	2
2	Aufbau und Durchführung	2
3	Auswertung und Fehleranalyse	4
3.1	Kalibrierung	4
3.2	Leistung und Wirkungsgrad des Pumplasers	6
3.3	Absorption im Pr:YLF-Kristall	9
3.4	Aufbau des Pr:YLF-Lasers	11
4	Diskussion der Ergebnisse	13
4.1	Zusammenstellung der Ergebnisse	13
4.2	Vergleich mit erwarteter Theorie	13
4.3	Fehlerdiskussion	14
4.4	Verbesserte Messmethoden	14
5	Literatur	16
6	Anhang	17
6.1	Laborbuch	17
6.2	Abbildungsverzeichnis	21

1 Ziel des Versuchs

In den folgenden Versuchsteilen soll ein Pr:YLF-Laser aufgebaut und seine Leistung untersucht werden. Hierzu wird zunächst eine Fotodiode mit einem Laserleistungsmessgerät für die Leistungsmessung kalibriert. Anschließend wird die Leistung des zum Pumpen verwendeten Diodenlasers, die Transmission der Laserleistung durch einen ND-Filter und die Absorption der Leistung im Pr:YLF-Kristall gemessen. Abschließend wird der Pr:YLF-Laser aufgebaut und sein Wirkungsgrad optimiert.

2 Aufbau und Durchführung

Zunächst wird eine Fotodiode zur Leistungsmessung kalibriert. Hierzu wird der Diodenlaser mit unterschiedlichen elektrischen Leistungen P betrieben. Es werden an den Netzgeräten die Spannung U , der Strom I und die Regelspannung u abgelesen. Wie in [Abbildung 1](#) zu sehen, wird ein Laserleistungsmessgerät beziehungsweise eine Fotodiode nach zwei Spiegeln möglichst senkrecht zum Diodenlaserstrahl positioniert. Es wird für die gleichen Spannungs- und Strommessungen, die Leistung P ohne ND-Filter, der Fotostrom $I_{F, \text{ohne}}$ ohne ND-Filter und der Fotostrom $I_{F, \text{mit}}$ mit ND-Filter gemessen. Die Fotoströme werden dabei mithilfe eines analogen Multimeters ermittelt. Anschließend wird für variierte Werte der Regelspannung u und damit variiertem Strom I der Fotostrom hinter dem ND-Filter gemessen. Dieser Filter schwächt dabei die Intensität aller Wellenlängen gleichermaßen ab.

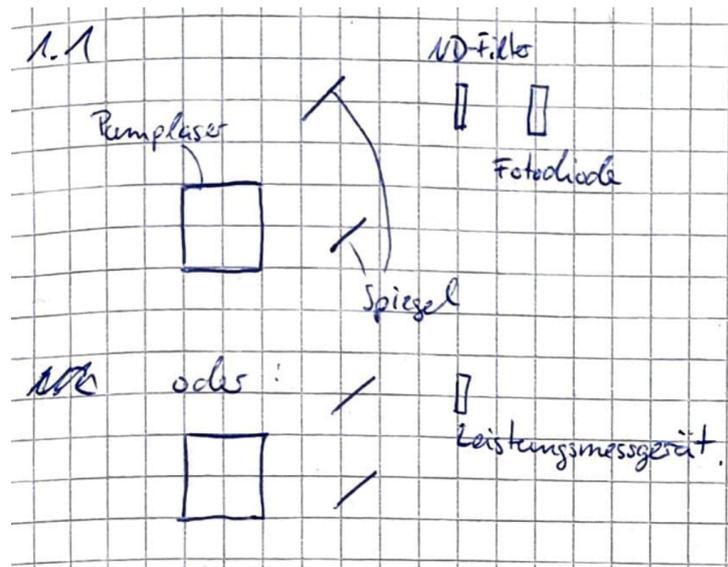


Abb. 1: Skizze des in den ersten beiden Versuchsteilen verwendeten Versuchsaufbaus aus dem Laborbuch ([Abbildung 9](#)) mit allen verwendeten optischen Elementen. Insbesondere sind die Bauteile Pumplaser, Spiegel, ND-Filter, Fotodiode und Leistungsmessgerät eingezeichnet.

Desweiteren wird für verschiedene Regelspannungen u und Strom I der Fotostrom I_F hinter dem Pr:YLF-Kristall bestimmt. Der hierfür verwendete Versuchsaufbau ist in [Abbildung 2](#) zu sehen.

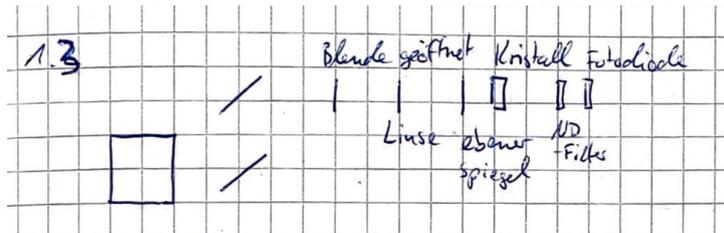


Abb. 2: Skizze des im dritten Versuchsteil verwendeten Versuchsaufbaus aus dem Laborbuch ([Abbildung 9](#)) mit allen verwendeten optischen Elementen. Insbesondere sind die Bauteile Pumplaser, Spiegel, Blende, Linse, Resonator mit Kristall, ND-Filter und Fotodiode eingezeichnet.

Abschließend wird der Pr:YLF-Laser fertiggestellt. Dabei wird ein bereits vorhandener Aufbau, der in [Abbildung 3](#) zu finden ist, verwendet. Der Diodenlaserstrahl wird durch zwei Spiegel und eine Linse auf den Pr:YLF-Kristall fokussiert. Vor dem Pr:YLF-Kristall befindet sich ein ebener, halbdurchlässiger Spiegel, der nur im Bereich 600 bis 640 nm mehr als 99,5% des Lichtes reflektiert [1]. Hinter dem Kristall befindet sich ein sphärischer Spiegel mit Krümmungsradius $R = 100$ mm, der nur 97% des Lichtes im Wellenlängenbereich 600-640 nm reflektiert. Anschließend werden der ND- und ein Farbfilter auf der optischen Bank montiert. Der Farbfilter schwächt nur die Intensität des Wellenlängenbereichs des Diodenlasers ab.

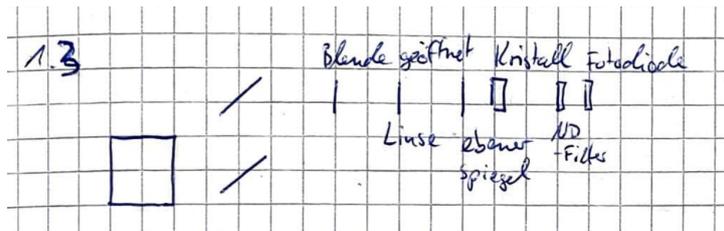


Abb. 3: Skizze des im letzten Versuchsteil verwendeten Versuchsaufbaus aus dem Laborbuch ([Abbildung 9](#)) mit allen verwendeten optischen Elementen. Insbesondere sind die Bauteile Pumplaser, Spiegel, Blende, Linse, Resonator mit Kristall, ND-Filter, Farbfilter und Fotodiode eingezeichnet.

Zur Optimierung des Pr:YLF-Lasers wird der Fotostrom $I_{\text{Pr:YLF}}$ nach den Filtern gemessen. Es werden der Laserstrom I sowie die Positionen und Ausrichtungen der Spiegel, des Kristalls und der Linse variiert, bis der erhaltene Fotostrom $I_{\text{Pr:YLF}}$ maximiert ist.

Die Unsicherheiten von Regelspannung u , Strom I und Spannung U werden aufgrund der digitalen Skala mit Rechteckverteilung [2] auf die letzte Nachkommastelle abgeschätzt. Der Fotostrom I_F hat eine Unsicherheit, die sich aus der Unsicherheit des verwendeten Messgerätes [3] und einer zusätzlichen Ableseunsicherheit der analogen Skala zusammensetzt. Die Ableseunsicherheit wird dabei aufgrund der analogen Skala mit Dreiecksverteilung [2] auf das je nach Messbereich bestehende Intervall zwischen zwei Skalenstrichen berechnet. Die jeweiligen Unsicherheiten bei verschiedenen Messbereichen sind im Laborbuch in [Abbildung 9](#) im Anhang zu finden.

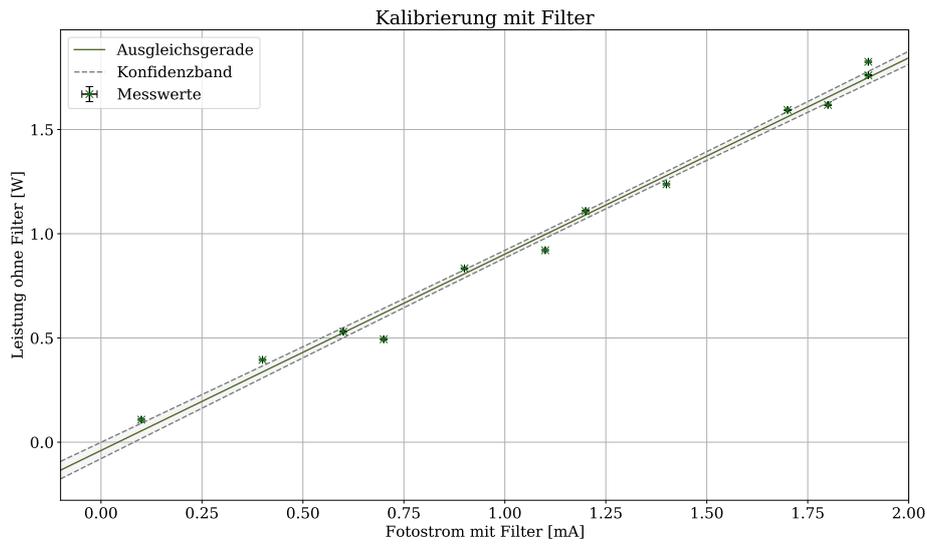
3 Auswertung und Fehleranalyse

3.1 Kalibrierung

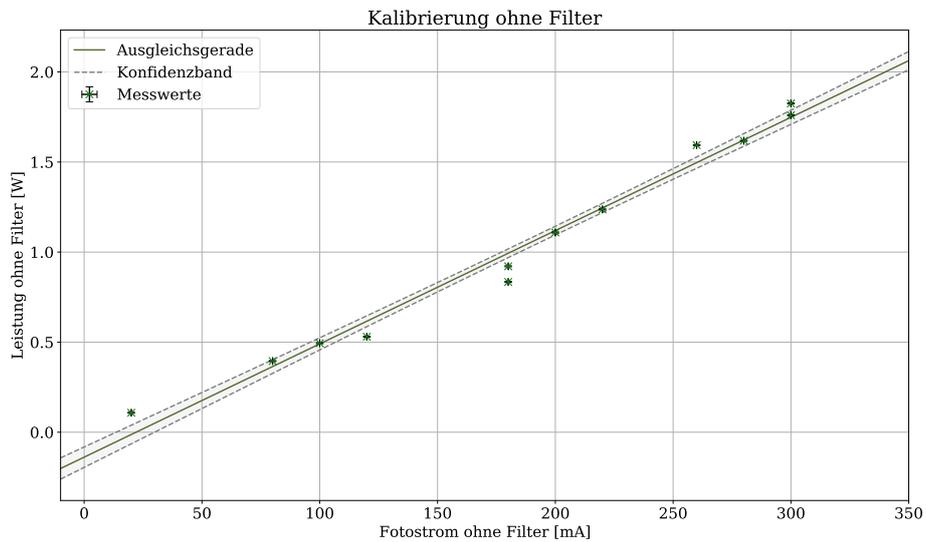
Um die Leistung des Diodenlasers und später des Pr:YLF-Lasers beurteilen zu können, wird zunächst untersucht, welcher Zusammenhang zwischen der tatsächlichen Laserleistung P_L ohne ND-Filter und dem gemessenen Fotodiodenstroms mit und ohne Filter – $I_{F, \text{mit}}$ beziehungsweise $I_{F, \text{ohne}}$ – besteht.

Es ist allerdings zu beachten, dass die Messung des Stroms I bei einer höheren Temperatur des Diodenlasers einen Offset besitzt, da die Kühlung des Lasers zusätzliche Leistung verbraucht. Um diesen Offset abzuschätzen, wird zu Beginn die Abweichung zwischen der Strommessung ohne und mit Kühlung bei fünf Messungen aufgenommen, da danach die Kühlung dauerhaft in Betrieb ist. Aus dem Mittelwert und der Standardabweichung des Mittelwertes dieser Stromschwankung ergibt sich dann ein Offset von etwa $I_{\text{off}} = (1,106 \pm 0,002)$ A. Dieser Offset wird in den folgenden Versuchsteilen von der Strommessung I subtrahiert.

Die gemessenen Werte für die Laserleistung P_L werden gegen den Fotostrom der Fotodiode mit und ohne ND-Filter aufgetragen. Dabei wird darauf geachtet, dass die Werte von Regelspannung u , Strom I und Spannung U bei der Messung mit Laserleistungsmessgerät und den Messungen mit Fotodiode gleich sind. Zur Umrechnung von Fotostrom I_F mit oder ohne Filter in Laserleistung P_L in den folgenden Teilen wird eine ungewichtete lineare Regression der Werte mit Formeln aus [4] durchgeführt. Die lineare Regression wird dabei ungewichtet durchgeführt, da die Werte stärker um die Ausgleichsgerade streuen, als die Fehler auf die Messwerte vermuten lassen. Die erhaltenen Ausgleichsgeraden sowie die Konfidenzbänder sind zusammen mit den Messwerten in [Abbildung 4](#) dargestellt.



(a) Kalibrierung der Fotodiode mit ND-Filter



(b) Kalibrierung der Fotodiode ohne ND-Filter

Abb. 4: Aufgetragen sind die beiden zur Kalibrierung verwendeten, ungewichteten linearen Regressionen mit den jeweiligen 1σ -Konfidenzbändern. Dabei ist jeweils die mit dem Leistungsmessgerät gemessene Laserleistung P_L in W ohne ND-Filter gegen die gemessenen Fotoströme I_F in mA aufgetragen. Der Strom wird im ersten Schaubild mit und im zweiten Schaubild ohne ND-Filter gemessen.

Für die Steigung b und den y -Achsenabschnitt a ergeben sich dabei folgende Werte:

$$\begin{aligned}
 a_{\text{mit}} &= (-0,04 \pm 0,04) \text{ W}, \\
 b_{\text{mit}} &= (940 \pm 30) \text{ W mA}^{-1}, \\
 a_{\text{ohne}} &= (-0,14 \pm 0,06) \text{ W}, \\
 b_{\text{ohne}} &= (6,3 \pm 0,3) \text{ W mA}^{-1}.
 \end{aligned}$$

Somit kann folgender Zusammenhang für die Umrechnung von Fotostrom I_F in Laserleistung P_L gefunden werden, wobei aus der Kalibrierung ein systematischer Fehler auf a und b entsteht und es auf I_F einen statistischen Fehler gibt:

$$\begin{aligned} \text{Mit Filter: } P_L &= b_{\text{mit}} \cdot I_{F, \text{mit}} + a_{\text{mit}}, \\ \Delta_{\text{stat}} P_L &= |b_{\text{mit}} \cdot \Delta I_{F, \text{mit}}|, \\ \Delta_{\text{syst}} P_L &= \sqrt{(I_{F, \text{mit}} \cdot \Delta b_{\text{mit}})^2 + \Delta a_{\text{mit}}^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Ohne Filter: } P_L &= b_{\text{ohne}} \cdot I_{F, \text{ohne}} + a_{\text{ohne}}, \\ \Delta_{\text{stat}} P_L &= |b_{\text{ohne}} \cdot \Delta I_{F, \text{ohne}}|, \\ \Delta_{\text{syst}} P_L &= \sqrt{(I_{F, \text{ohne}} \cdot \Delta b_{\text{ohne}})^2 + \Delta a_{\text{ohne}}^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Aus dem Vergleich der Fotoströme mit und ohne ND-Filter, kann nun noch der Transmissionsgrad T ermittelt werden. Dieser ist definiert als das Verhältnis der Intensitäten vor und nach dem ND-Filter. Da der Laserstrahl sehr stark kollimiert ist und einen geringen Strahldurchmesser hat, kann die Leistung als zur Intensität proportional angenommen werden. Weil der Zusammenhang zwischen Fotostrom I_F und Leistung, wie in [Abbildung 4](#) zu erkennen, näherungsweise linear ist und der y -Achsenabschnitt der Ausgleichgeraden nahe an der Null liegt, ist der Fotostrom I_F proportional zur Leistung P_L . Dementsprechend kann gefolgert werden, dass Fotostrom I_F und Intensität proportional zu einander sind. Für den Transmissionsgrad T folgt also:

$$T = \frac{I_{F, \text{mit}}}{I_{F, \text{ohne}}}, \quad (3)$$

$$\Delta T = \sqrt{\left(\frac{\Delta I_{F, \text{mit}}}{I_{F, \text{ohne}}}\right)^2 + \left(-\frac{I_{F, \text{mit}} \cdot \Delta I_{F, \text{ohne}}}{I_{F, \text{ohne}}^2}\right)^2}. \quad (4)$$

Die Unsicherheit wird dabei mit Fehlerfortpflanzung [2] berechnet. Der Transmissionsgrad T wird so aus allen Strömen $I_{F, \text{mit}}$ und $I_{F, \text{ohne}}$ bei gleichem Strom I und Spannung U berechnet. Als Bestwert für den Transmissionsgrad wird der Mittelwert und die Standardabweichung des Mittelwertes [2] aller so berechneten Werte verwendet. Hieraus wird außerdem die optische Dichte $-\log_{10} T$ berechnet. Für den Transmissionsgrad T und die optische Dichte ergibt sich:

$$\begin{aligned} T &= (0,59 \pm 0,02) \%, \\ -\log_{10} T &= 2,227 \pm 0,015. \end{aligned}$$

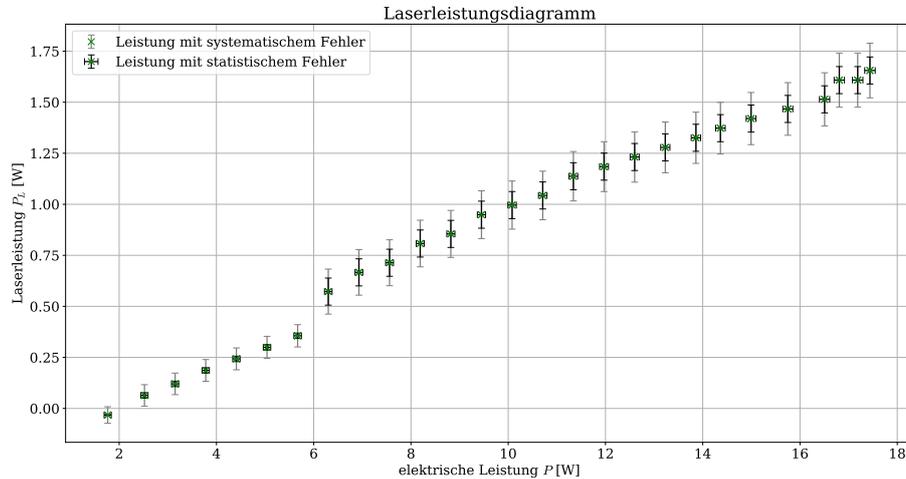
3.2 Leistung und Wirkungsgrad des Pumplasers

In diesem Versuchsteil soll die Laserleistung des Pumplasers P_L mithilfe des gemessenen Fotodiodenstroms I_F untersucht werden, wobei erneut der ND-Filter benutzt wird. Dazu wird bei verschiedenen Regelspannungen u der gemessene Fotodiodenstrom mittels der Ergebnisse aus der Kalibrierung ([Gleichung 1](#)) in die Pumplaserleistung umgerechnet. Die daraus erhaltenen Laserleistungen werden dann in Abhängigkeit von der gemessenen elektrischen Leistung P in [Abbildung 5a](#) dargestellt. Für die elektrische Leistung P und ihre Unsicherheit aus Fehlerfortpflanzung [2] gilt hierbei:

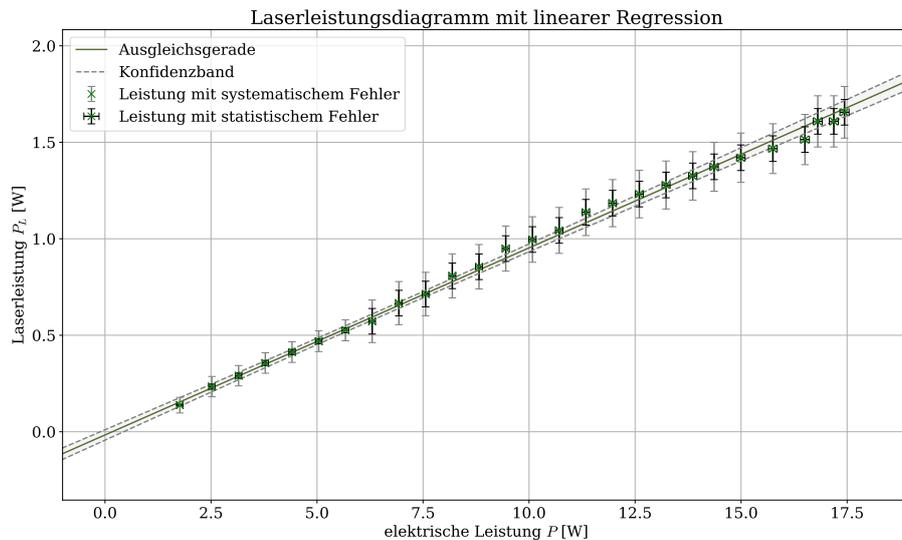
$$\begin{aligned} P &= UI, \\ \Delta P &= \sqrt{(U \Delta I)^2 + (I \Delta U)^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Der klar erkennbare Knick bei etwa 6 W entsteht dabei wahrscheinlich durch die Umstellung des Messbereichs des analogen Ampèremeters, was noch in der Fehlerdiskussion näher erläutert wird. Weil angenommen wird, dass es sich dabei nur um einen konstanten Offset handelt,

der die Steigung nicht beeinflusst, werden in [Abbildung 5b](#) die Werte vor dem Knick so weit nach oben verschoben, bis sie in etwa auf einer Geraden liegen, da der obere Messbereich für die nachfolgenden Messungen der relevante ist. Es wird eine gewichtete lineare Regression der Werte mit Formeln aus [\[4\]](#) durchgeführt, da die Fehler hier größer sind als die Streuung um die Ausgleichsgerade und die vorhandene Unsicherheit sonst vermutlich unterschätzt würde.



(a) Laserleistungsmessgerät mit den originalen Messwerten



(b) Laserleistungsmessgerät mit den angepassten Messwerten

Abb. 5: Zu sehen sind die aus der Kalibrierung und dem Fotostrom berechneten Werte für die Laserleistung P_L in W, aufgetragen gegen die über $P = UI$ berechnete angelegte Leistung, ebenfalls in W. Während im oberen Diagramm die originalen Messwerte aufgetragen sind, ist im unteren Diagramm der Bereich vor dem Knick wie im Fließtext beschrieben korrigiert. Im unteren Diagramm ist zusätzlich eine gewichtete lineare Regression mit 1σ -Konfidenzband eingezeichnet.

Für die Steigung b und den y -Achsenabschnitt a ergeben sich dabei folgende Werte:

$$a = (-0,02 \pm 0,03) \text{ W},$$

$$b = 0,097 \pm 0,003.$$

Um die Laserschwelle P^* zu bestimmen, ab der der Laserbetrieb einsetzt, muss der x -Achsenabschnitt bestimmt werden, wobei die Fehlerfortpflanzung erneut mit Formeln aus [2] durchgeführt wird:

$$P_L = b \cdot P + a \stackrel{!}{=} 0 \quad (6)$$

$$\Rightarrow P^* = -\frac{a}{b}, \quad (7)$$

$$\Delta P^* = \sqrt{\left(-\frac{\Delta a}{b}\right)^2 + \left(\frac{a \cdot \Delta b}{b^2}\right)^2}. \quad (8)$$

Daraus ergibt sich

$$P^* = (0,2 \pm 0,3) \text{ W}.$$

Der differentielle Wirkungsgrad dP_L/dP entspricht der Geradensteigung, der mithilfe der linearen Regression bestimmten Ausgleichsgerade und liegt bei:

$$\frac{dP_L}{dP} = b = 0,097 \pm 0,003.$$

Es soll außerdem der Wirkungsgrad η des Pumplasers bestimmt werden, wobei erneut die Fehlerfortpflanzung mithilfe der Formeln aus [2] durchgeführt wird:

$$\eta = \frac{P_L}{P}$$

$$\Delta_{\text{stat}}\eta = \sqrt{\left(\frac{\Delta_{\text{stat}}P_L}{P}\right)^2 + \left(-\frac{P_L \cdot \Delta P}{P^2}\right)^2}, \quad (9)$$

$$\Delta_{\text{syst}}\eta = \sqrt{\left(\frac{\Delta_{\text{syst}}P_L}{P}\right)^2}.$$

Der Wirkungsgrad η ist zusammen mit dem zuvor bestimmten differentiellen Wirkungsgrad dP_L/dP in [Abbildung 6](#) dargestellt:

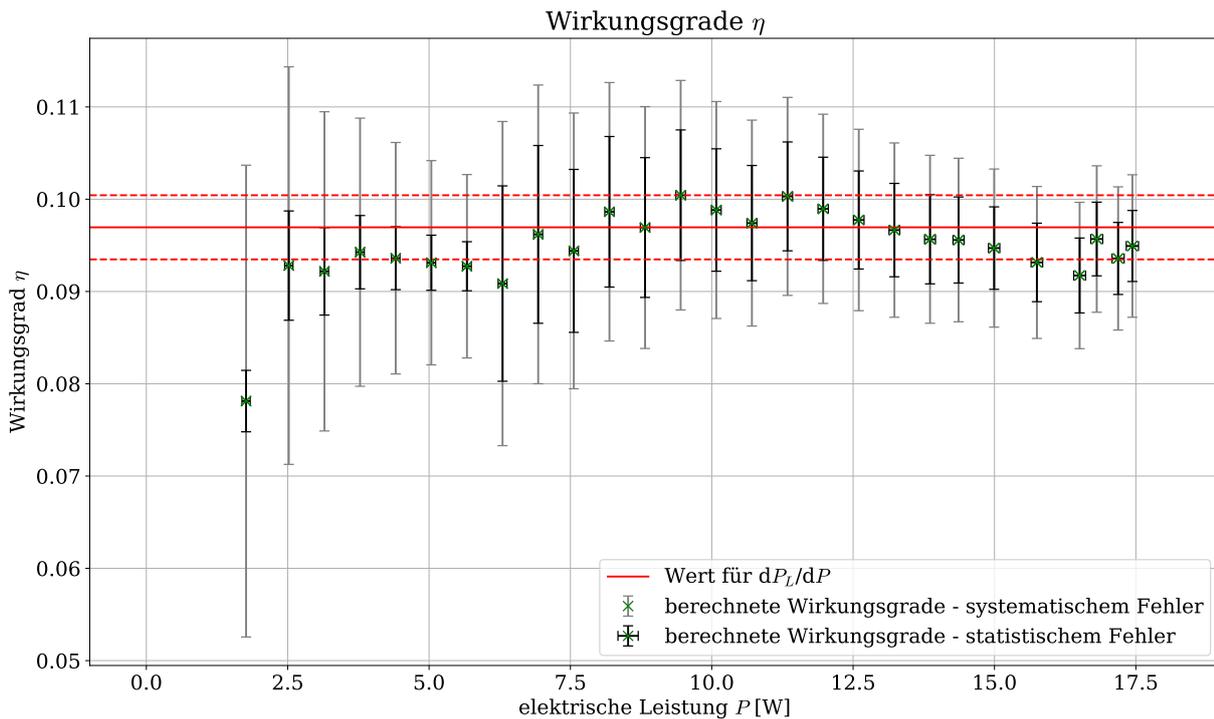


Abb. 6: Aufgetragen ist der Wirkungsgrad $\eta = P_L/P$ des Diodenlasers gegen die angelegte elektrische Leistung P in W. Zusätzlich ist der Wert für den differentiellen Wirkungsgrad dP_L/dP zusammen mit der Unsicherheit in rot eingezeichnet.

3.3 Absorption im Pr:YLF-Kristall

Damit der Pr:YLF-Laser Strahlung emittieren kann, müssen die Atome des Pr:YLF-Kristalls in einen angeregten Zustand versetzt werden. Hierfür wird der Diodenlaser auf den Pr:YLF-Kristall gerichtet. Die zur Anregung der Atome verwendete Leistung wird somit im Kristall absorbiert. Diese Absorption soll im folgenden Versuchsteil untersucht werden.

Es wird der Fotostrom I_F nach dem Pr:YLF-Kristall gemessen und mit [Gleichung 1](#) in eine Laserleistung P'_L umgerechnet. Die dabei angelegte elektrische Leistung wird erneut wie in [Gleichung 5](#) berechnet. In [Abbildung 7](#) sind die Laserleistungen nach dem Kristall P'_L gegen die elektrische Leistung P aufgetragen. Zusätzlich ist, zum besseren Vergleich der Leistung vor und nach dem Kristall, die Leistung ohne Kristall P_L aus [Unterabschnitt 3.2](#) eingezeichnet.

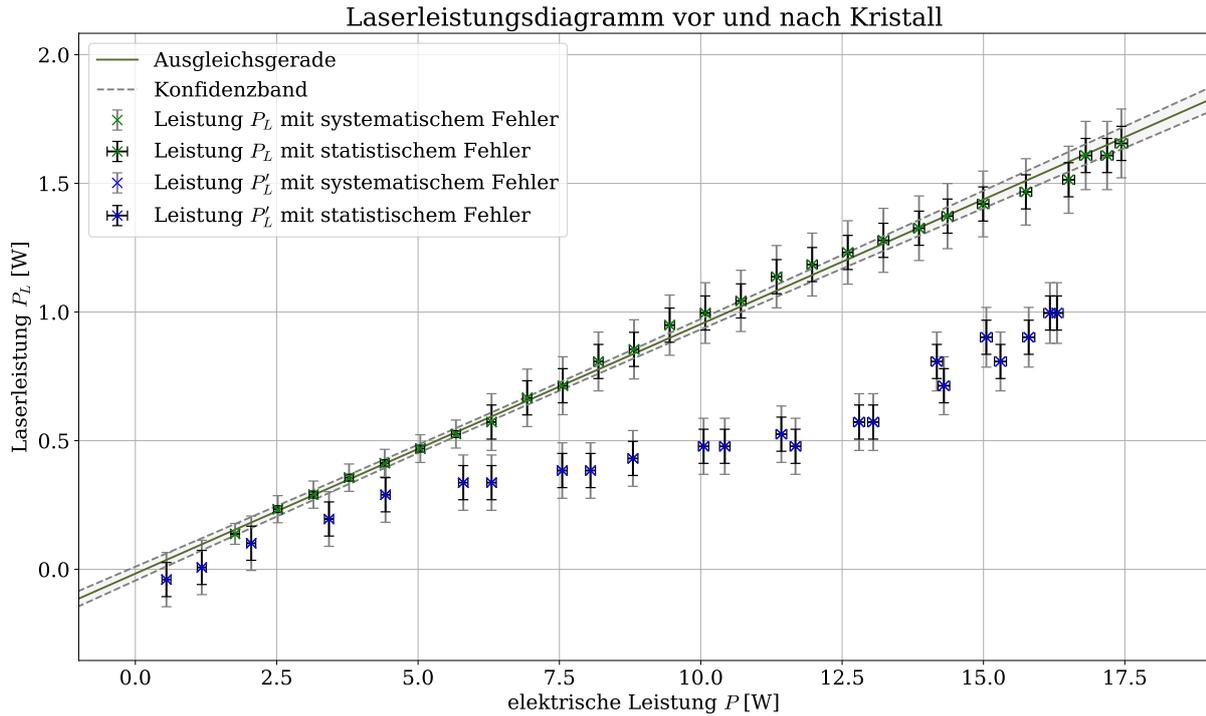


Abb. 7: Zu sehen ist die Laserleistung bei Messung vor dem Pr:YLF-Kristall in grün aus [Abbildung 5b](#) und nach dem Kristall in blau. Dabei wird jeweils die aus dem Fotodiodenstrom berechnete Laserleistung P_L beziehungsweise P'_L in W gegen die angelegte elektrische Leistung P in W aufgetragen.

Es fällt auf, dass für die Laserleistung nach dem Kristall P'_L auch negative Leistungen auftreten. Gründe hierfür werden in der Fehlerdiskussion gesucht. Ansonsten kann beobachtet werden, dass die Leistung nach dem Kristall geringer ist als vor dem Kristall, also tatsächlich Leistung im Kristall absorbiert wird. Dies kann auch schon während der Versuchsdurchführung vermutet werden, da der Kristall anfängt rot zu strahlen.

Um die Absorption quantitativ bewerten zu können, wird die absorbierte Leistung P_A berechnet. Die Laserleistung vor dem Kristall P_L wird dabei mit der in [Abbildung 7](#) zu sehenden und in [Unterabschnitt 3.2](#) durchgeführten linearen Regression berechnet. Mit der Steigung $b = 0,097 \pm 0,003$ und dem y -Achsenabschnitt $a = (-0,01 \pm 0,02) \text{ W}$ kann die Laserleistung P_L bei einer bestimmten elektrischen Leistung P wie folgt berechnet werden:

$$\begin{aligned}
 P_L &= b \cdot (UI) + a, \\
 \Delta_{\text{stat}} P_L &= \sqrt{(bI \cdot \Delta U)^2 + (bU \cdot \Delta I)^2}, \\
 \Delta_{\text{syst}} P_L &= \sqrt{(UI \cdot \Delta b)^2 + \Delta a^2}.
 \end{aligned} \tag{10}$$

Dabei ergibt sich ein systematischer Fehler aus der linearen Regression und ein statistischer Fehler aus der Messung der Spannung U und des Stromes I . Beide werden mit Fehlerfortpflanzung [2] berechnet.

Für die absorbierte Leistung P_A existieren ebenfalls statistische und systematische Unsicherhei-

ten. Es gilt:

$$\begin{aligned}
 P_A &= P_L - P'_L, \\
 \Delta_{\text{stat}} P_A &= \sqrt{\Delta_{\text{stat}} P_L^2 + (-\Delta_{\text{stat}} P'_L)^2}, \\
 \Delta_{\text{syst}} P_A &= \sqrt{\Delta_{\text{syst}} P_L^2 + (-\Delta_{\text{syst}} P'_L)^2}.
 \end{aligned} \tag{11}$$

Die Fehler werden dabei aus Fehlerfortpflanzung mit Formeln aus [2] berechnet.

Die somit berechneten absorbierten Leistungen P_A sind in [Abbildung 8](#) gegen die elektrische Leistung P aufgetragen.

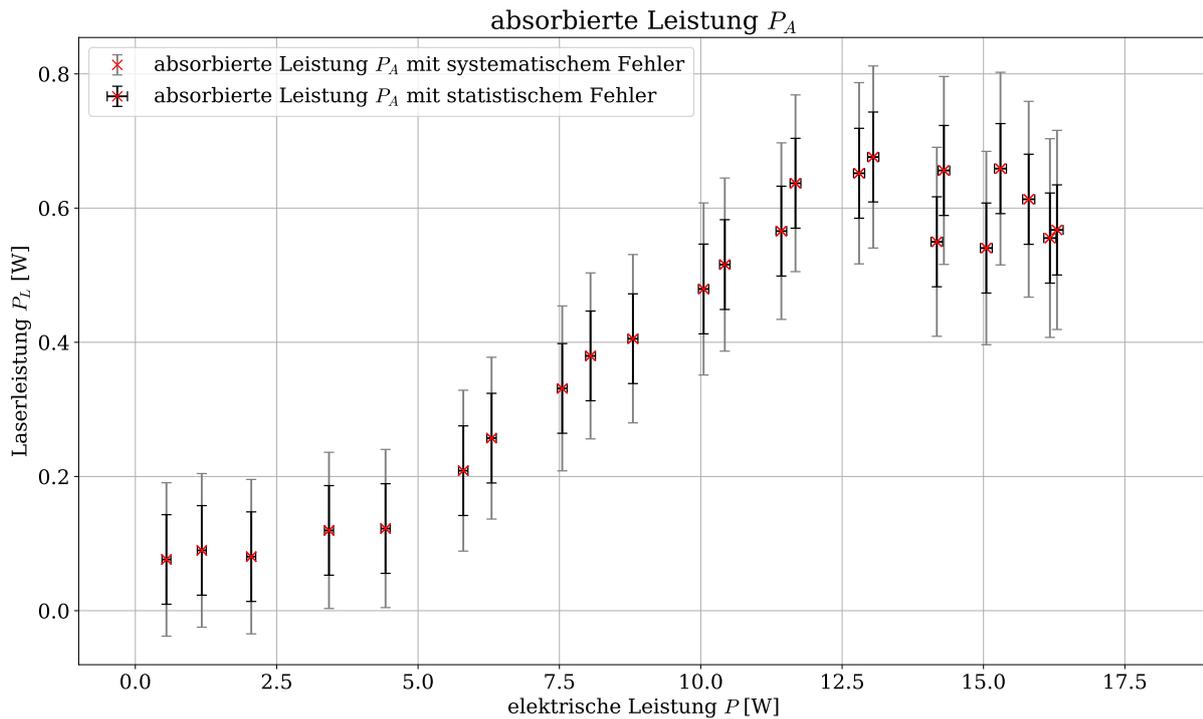


Abb. 8: Aufgetragen ist die im Pr:YLF-Kristall absorbierte Leistung $P_A = P_L - P'_L$ in W gegen die angelegte elektrische Leistung P in W.

Man sieht, dass die absorbierte Leistung P_A zunächst gering ist. Mit zunehmender elektrischer Leistung P steigt sie an und bildet bei etwa $P = 12,5$ W einen Hochpunkt. Danach fällt die absorbierte Leistung wieder etwas ab. Damit der Pr:YLF-Laser möglichst effizient arbeiten kann, sollte die Anregung im Kristall möglichst hoch sein. Beim Aufbau des Lasers sollte also der hier zu erkennende Hochpunkt der absorbierten Leistung P_A eingestellt werden.

3.4 Aufbau des Pr:YLF-Lasers

Die bereits in [Abschnitt 2](#) erläuterten Feineinstellungen des Pr:YLF-Lasers werden so lange optimiert, bis der gemessene Fotostrom I_F maximal ist. Der dabei ermittelte Wert liegt bei:

$$I_F = (1,25 \pm 0,07) \text{ A.}$$

Die elektrische Leistung wird erneut mithilfe von [Gleichung 5](#) bestimmt:

$$P = (12,18 \pm 0,10) \text{ W.}$$

Um die Laserleistung des Pumplasers P_L zu bestimmen, wird [Gleichung 10](#) genutzt, mit der sich folgender Wert ergibt:

$$P_L = (1,164 \pm 0,009 \pm 0,050) \text{ W.}$$

Es wird zuerst die statistische und dann die systematische Unsicherheit angegeben. Zur Bestimmung der Laserleistung $P_{\text{Pr:YLF}}$ des Pr:YLF-Lasers wird [Gleichung 1](#) genutzt. Damit ergibt sich aus dem gemessenen Fotostrom I_F :

$$P_{\text{Pr:YLF}} = (1,14 \pm 0,07 \pm 0,05) \text{ W.}$$

Es wird zuletzt der Wirkungsgrad $\eta_{\text{Pr:YLF}}$, der sich aus dem Verhältnis der Pr:YLF-Laserleistung $P_{\text{Pr:YLF}}$ und der Pumplaserleistung P_L ergibt, berechnet. Außerdem wird der Wirkungsgrad η_{ges} aus dem Verhältnis von $P_{\text{Pr:YLF}}$ und der elektrischen Leistung P berechnet:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{Pr:YLF}} &= \frac{P_{\text{Pr:YLF}}}{P_L}, \\ \Delta_{\text{stat}}\eta_{\text{Pr:YLF}} &= \sqrt{\left(\frac{\Delta_{\text{stat}}P_{\text{Pr:YLF}}}{P_L}\right)^2 + \left(-\frac{P_{\text{Pr:YLF}} \cdot \Delta_{\text{stat}}P_L}{P_L^2}\right)^2}, \\ \Delta_{\text{syst}}\eta_{\text{Pr:YLF}} &= \sqrt{\left(\frac{\Delta_{\text{syst}}P_{\text{Pr:YLF}}}{P_L}\right)^2 + \left(-\frac{P_{\text{Pr:YLF}} \cdot \Delta_{\text{syst}}P_L}{P_L^2}\right)^2}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \eta_{\text{ges}} &= \frac{P_{\text{Pr:YLF}}}{P}, \\ \Delta_{\text{stat}}\eta_{\text{ges}} &= \sqrt{\left(\frac{\Delta_{\text{stat}}P_{\text{Pr:YLF}}}{P}\right)^2 + \left(-\frac{P_{\text{Pr:YLF}} \cdot \Delta P}{P^2}\right)^2}, \\ \Delta_{\text{syst}}\eta_{\text{ges}} &= \sqrt{\left(\frac{\Delta_{\text{syst}}P_{\text{Pr:YLF}}}{P}\right)^2}. \end{aligned} \quad (13)$$

Damit ergeben sich folgende Wirkungsgrade:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{Pr:YLF}} &= (97 \pm 6 \pm 6) \%, \\ \eta_{\text{ges}} &= (9,3 \pm 0,5 \pm 0,4) \%. \end{aligned}$$

Um zu überprüfen, ob die ermittelten Leistungen realistisch sind, wird ein Plausibilitätscheck durchgeführt. Da die Leistung des Pumplasers P_L durch den Farbfilter vor der Fotodiode herausgefiltert wird, sollte die gemessene Leistung hinter den Filtern nur aus dem durch den Pr:YLF-Laser emittierten Licht kommen. Dieses Licht kann maximal die Leistung haben, die mit dem Diodenlaser in den Kristall gepumpt wird, da durch den Diodenlaser erst die Atome angeregt werden. Betrachtet man also die absorbierte Leistung P_A bei der angelegten elektrischen Leistung $P = (12,18 \pm 0,10) \text{ W}$, so sollte sie nicht kleiner als die Leistung des Pr:YLF-Lasers $P_{\text{Pr:YLF}}$ sein.

Aus [Abbildung 8](#) kann abgelesen werden, dass die maximal absorbierte Leistung ungefähr $P_A = 0,7 \text{ W}$ beträgt. Die erhaltene Laserleistung des Pr:YLF-Lasers beträgt aber mit $(1,14 \pm 0,09) \text{ W}$ deutlich mehr. Das widerspricht der Energieerhaltung. Mögliche bei der Messung und Auswertung begangene Fehlerquellen, die zu diesem Widerspruch führen können, werden in der Fehlerdiskussion behandelt.

4 Diskussion der Ergebnisse

4.1 Zusammenstellung der Ergebnisse

Im ersten Versuchsteil konnte anhand der Messung sowohl des Fotodiodenstroms als auch der Leistung mit einem Leistungsmessgerät eine Kalibrierung der Fotodiode durchgeführt und eine Umrechnungsformel zwischen $I_{F, \text{mit}}$ und P_L gefunden werden:

$$P_L = b_{\text{mit}} \cdot I_{F, \text{mit}} + a_{\text{mit}},$$

mit $a_{\text{mit}} = (-0,04 \pm 0,04) \text{ W},$

$$b_{\text{mit}} = (940 \pm 30) \text{ W mA}^{-1}.$$

Mithilfe dieser Kalibrierung konnte im nächsten Schritt die Laserleistung des Pumplasers in Abhängigkeit von der angelegten elektrischen Leistung bestimmt und die erwartete Linearität bestätigt werden. Zusätzlich konnten die Laserschwelle P^* und der differentielle Wirkungsgrad dP_L/dP ermittelt werden:

$$P^* = (0,2 \pm 0,3) \text{ W},$$

$$\frac{dP_L}{dP} = 0,097 \pm 0,003.$$

Bei der Auftragung des Wirkungsgrades $\eta = P_L/P$ gegen die angelegte Leistung P ergibt sich ein Plateau, das recht schnell erreicht ist und um den Wert für dP_L/dP streut.

Im dritten Versuchsteil konnte aus der Messung des Fotodiodenstroms hinter dem Pr:YLF-Kristall erneut die Laserleistung und dadurch die im Kristall absorbierte Leistung ermittelt werden. Im letzten Schritt konnte nach feinerer Justage des Lasers ein maximaler Fotodiodenstrom bestimmt und die passende Laserleistung ermittelt werden:

$$I_F = (1,25 \pm 0,07) \text{ A},$$

$$P_{\text{Pr:YLF}} = (1,14 \pm 0,07 \pm 0,05) \text{ W}.$$

Mithilfe der angelegten elektrischen Leistung $P = (12,18 \pm 0,10) \text{ W}$ und damit der Leistung des Pumplasers $P_L = (1,164 \pm 0,009 \pm 0,050) \text{ W}$ konnten abschließend Wirkungsgrade für den Gesamtlaser und die Umwandlung von Pumpleistung in Lasereistung bestimmt werden:

$$\eta_{\text{Pr:YLF}} = (97 \pm 6 \pm 6) \%,$$

$$\eta_{\text{ges}} = (9,3 \pm 0,5 \pm 0,4) \%.$$

4.2 Vergleich mit erwarteter Theorie

Die von der Theorie vorhergesagte Linearität zwischen Laserleistung und angelegter Leistung in [Abbildung 5b](#) kann bestätigt werden. Die ermittelte Laserschwelle $P^* = (0,2 \pm 0,3) \text{ W}$ scheint dabei einen recht kleinen Wert zu haben, was auch an ihrer Verträglichkeit mit der Null erkennbar ist. Da jedoch für den verwendeten Laser kein Literaturwert für die Laserschwelle bekannt ist, lässt sich schwer sagen, wie realistisch dieser Wert ist. Der kleine Wert für die Laserschwelle erklärt auch den extrem schnellen Anstieg zum Plateau im Wirkungsgraddiagramm in [Abbildung 6](#). Wie erwartet nähert sich das Plateau dem Wert für den differentiellen Wirkungsgrad an und streut statistisch darum.

Auch im nächsten Versuchsteil ergeben sich realistische Verläufe für die Laserleistung nach dem Pr:YLF-Kristall und die darin absorbierte Leistung. Wie erwartet steigt die absorbierte Leistung mit höherer eingestrahelter Leistung an, wobei sich dann für eine bestimmte elektrische Leistung zwischen 12,5 W und 15,0 W ein Maximalwert für die absorbierte Leistung ergibt.

Der im letzten Versuchsteil bestimmte Gesamtwirkungsgrad von $\eta_{\text{ges}} = (9,3 \pm 0,5 \pm 0,4) \%$ liegt in einem realistischen Rahmen für diodengepumpte Festkörperlaser [5]. Der Wert für den Wirkungsgrad zwischen Leistung des Pr:YLF-Lasers und Pumplaserleistung scheint jedoch mit $\eta_{\text{Pr:YLF}} = (97 \pm 6 \pm 6) \%$ relativ hoch gegriffen. Auch der nachfolgend angestellte Plausibilitätscheck legt nahe, dass in diesem Versuchsteil Probleme aufgetreten sein können. Diese Probleme sollen nachfolgend in der Fehlerdiskussion aufgegriffen werden.

4.3 Fehlerdiskussion

Als erstes Problem bei der Auswertung fällt der deutliche Knick in den gemessenen Daten für die Laserleistung in [Abbildung 5a](#) auf. Da ein solches Verhalten auch schon in anderem Kontext beobachtet werden konnte, kann mit hoher Sicherheit die Umstellung des Messbereichs des analogen Multimeters als Fehlerquelle hierfür identifiziert werden. Durch die Umstellung des Messbereichs wird auch die Größe des Innenwiderstands umgestellt, was eine generelle Verfälschung der Daten und damit einen Knick beim Umschalten ergibt. Die Anpassung der kleineren Werte an den zweiten Messbereich scheint dabei am sinnvollsten, da auch in späteren Messungen immer dieser Messbereich gewählt wird und damit die Werte in sich konsistent sind.

Eine direkte Folge dieser Anpassung der Werte könnte sein, dass die Leistungsschwelle P^* zu klein wird. Durch die Werte, die nun alle auf einer höheren Geraden liegen, verschiebt sich auch der x -Achsenabschnitt zur Null hin. Da jedoch weder über die Plausibilität der Laserschwelle etwas ausgesagt werden kann, da kein Vergleichswert für den verwendeten Laser vorliegt, noch beurteilt werden kann, welcher Messbereich des Multimeters die Daten am besten widerspiegelt, kann an dieser Stelle keine eindeutige Aussage über den Wert der Leistungsschwelle getroffen werden. Auf den Wert für den differentiellen Wirkungsgrad hat die Verschiebung der Werte keine Auswirkung, da hierdurch die Steigung der Geraden nicht verändert wird.

Eine weitere Auffälligkeit bei der Auswertung stellen die teilweise auftretenden, negativen Werte dar, wie in [Abbildung 7](#) zu sehen. Diese ergeben sich aus der Umrechnung durch die lineare Regression. Da dort unter anderem der y -Achsenabschnitt nicht null ist, kann es bei statistischen Streuungen auch passieren, dass durch die Umrechnung negative Werte auftreten.

Eine wichtige Auffälligkeit im letzten Versuchsteil ist, dass aus dem Laser mehr Leistung austritt als im Kristall absorbiert wird und damit ein extrem hoher Wirkungsgrad von über 90% zustande kommt. Zu diesem Phänomen können mehrere Faktoren beitragen. Zunächst wurde die Messung der absorbierten Leistung vor der Feinjustage des Aufbaus durchgeführt, wodurch sich diese zum Beispiel durch bessere Fokussierung der Linse oder genauere Position der Spiegel noch einmal geändert haben könnte. Dann wäre es möglich, dass aus dem Laser doch nur soviel Leistung austritt, wie auch im Kristall absorbiert wird. Des Weiteren wäre es möglich, dass innerhalb des Resonators zum Beispiel durch Reflexionen des Pumplaserstrahls weitere Anregungen zustande kommen, die weitere Absorptionsleistung im Kristall bereitstellen. Eine letzte Möglichkeit wäre, dass trotz der verschiedenen Spiegel und Filter noch Teile das Diodenlaserlichts auf die Fotodiode treffen. Auch dadurch ließe sich eine höhere Leistung nach dem Resonator erklären. Generell ist es daher fraglich, wie sinnvoll es ist, die aufgenommene Absorptionsleistung im Kristall mit der Leistung zu vergleichen, die nach der Feinjustage aus dem kompletten Aufbau tritt.

4.4 Verbesserte Messmethoden

Eine erste wichtige Verbesserung des Messprozesses würde sich durch einen separaten Kühlkreislauf innerhalb des Lasers ergeben. Durch die Kombination aus Kühlleistung und Laserleistung in einem Stromkreis lässt sich nur schwer feststellen, welche Leistung für Laser und welche Leistung für Kühlung verwendet wird. So muss zunächst ein Offset bestimmt werden, um später die Kühlleistung abziehen zu können. Besonders während des Aufheizprozesses des Lasers kommt es zusätzlich zu Sprüngen im Verbrauch der Leistung, die eine weitere Fehlerquelle liefern können.

Sollte sich ein separater Kühlkreislauf nicht realisieren lassen, kann zunächst abgewartet werden bis sich der Laser komplett aufgeheizt hat und die Kühlung ständig in Betrieb ist, um zumindest vergleichbare Werte zu erhalten.

Eine weitere Verbesserung, die insbesondere eine bessere Beurteilung möglicher Fehlerquellen ermöglichen könnte, wäre es, weitere Messreihen hinter bestimmten Bauteile aufzunehmen, um dann deren Funktion besser zu beurteilen. Eine Messung mit und ohne Farbfilter könnte beispielsweise genutzt werden, um zu überprüfen, ob die komplette Strahlung des Pumplasers absorbiert wird. Außerdem könnte es sinnvoll sein den Resonator noch einmal einzeln zu vermessen. Um eine durch die Optimierung des Laseraufbaus veränderte Absorption im Kristall festzustellen, könnte man die Leistungsmessungen hierzu nach dem fertiggestellten Aufbau des Lasers wiederholen. Alternativ kann während des Aufbaus immer wieder die Leistung nach dem Kristall untersucht werden, um zu erkennen, wie die Absorption optimiert werden kann. Das Aufnehmen weiterer Messreihen ist jedoch sehr zeitaufwendig und kann in der zur Verfügung stehenden Zeit nicht realisiert werden.

Bei der Messung des Stroms mithilfe des analogen Multimeters kann ein Knick in den Daten wie in [Abbildung 5a](#) dadurch vermieden werden, dass der Messbereich des Multimeters nicht verstellt wird. Darunter kann jedoch die Genauigkeit der Daten im Bereich kleiner Ströme leiden. Insgesamt empfiehlt es sich, den Messbereich vor der Messung anhand der maximalen Ströme der jeweiligen Messreihe abzuschätzen.

Eine letzte Möglichkeit zur Verbesserung wäre es natürlich, die Leistung in jeder Messreihe direkt mit dem Leistungsmessgerät zu messen. Dadurch ließe sich die Kalibrierung vermeiden, durch die jeweils systematische Fehler hinzukommen, die die Messung ungenauer machen.

Literatur

- [1] Dr. Christof Bartels, Dr. Lukas Bruder, Dr. Thomas Pfohl: *Versuch 77 - Pr:YLF-Laser, Versuchsbeschreibung des Physiklabors für Anfänger*innen*, (Freiburg im Breisgau, 2022)
- [2] Dr. Christof Bartels, Dr. Lukas Bruder, Dr. Thomas Pfohl: *Datenanalyse Teil A - Skript zur Vorlesung am 06.09.2021*, (Freiburg im Breisgau, 2021/22)
- [3] PeakTech Prüf- und Messtechnik GmbH: *PeakTech 3260: Bedienungsanleitung / Operation manual*, S.6f
- [4] Dr. Christof Bartels, Dr. Lukas Bruder, Dr. Thomas Pfohl: *Datenanalyse Teil B - Skript zur Vorlesung am 28.02.2022*, (Freiburg im Breisgau, 2021/22)
- [5] Unbekannte*r Autor*in: *Wikipedia - Festkörperlaser* https://de.wikipedia.org/wiki/Festk%C3%B6rperlaser#Pumpen_mit_Diodenlasern (aufgerufen am: 07.04.2022)
- [6] Paul A. Tipler, Gene Mosca: *Physik - für Studierende der Naturwissenschaften und Technik*, 8.Auflage, (Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2019), Abschnitt 34.8 „Laser“

6 Anhang

6.1 Laborbuch

060422

Versuch 77 - Pr. YLF-Laser

1) Versuchsaufbau

1.1

Rückspannung: u
 Spannung: U
 Strom: I
 Fotostrom: I_F mit analogem Multimeter

1.2 oder

1.3

1.4

Unsicherheiten:

$$\Delta u = \frac{0,1}{\sqrt{3}} \text{ V}$$

$$\Delta I = \frac{0,01}{\sqrt{3}} \text{ V}$$

$$\Delta I_F = :$$

$50 \mu\text{A}$	$\Delta I_F = 2\% \cdot 50 \mu\text{A} + \frac{1}{\sqrt{6}} \mu\text{A}$
$500 \mu\text{A}$	$\Delta I_F = 2\% \cdot 500 \mu\text{A} + \frac{10}{\sqrt{6}} \mu\text{A}$
$2,5 \text{ mA}$	$\Delta I_F = 2\% \cdot 2,5 \text{ mA} + \frac{0,05}{\sqrt{6}} \text{ mA}$
5 mA	$\Delta I_F = 2\% \cdot 5 \text{ mA} + \frac{0,1}{\sqrt{6}} \text{ mA}$
1000 mA	$\Delta I_F = 2\% \cdot 1000 \text{ mA} + \frac{20}{\sqrt{6}} \text{ mA}$

$$\Delta P_L = \frac{0,005}{\sqrt{3}} \text{ W}$$

Abb. 9: Laborbuch, Seite 1

2) Messungen

$$U = (12,6 \pm \frac{0,1}{\sqrt{3}}) V$$

u in V	I in A	I _F in mA	Messb. I _F	mit ND-Filter?
0,2	0,14	25,0	5 mA	Nein
0,4	0,20	24,0	50 mA	"
0,5	0,25	44,0	"	"
0,7	0,30	65	250 mA	"
0,9	0,35	85	"	"
1,0	0,40	100	"	"
1,2	0,45	115	"	"
1,4	0,50	130	"	"

2.2

Messung mit ND-Filter

u in V	I in A	I _F in mA	Messb. I _F	I in A mit Kühlung
0,2	0,14	0,008	50 μA	
0,4	0,20	0,110	500 μA	
0,5	0,25	0,170	"	
0,7	0,30	0,240	"	
0,9	0,35	0,300	"	
1,0	0,40	0,360	"	1,50
1,2	0,45	0,420	"	1,56
1,4	0,50	0,650	2,5 mA	1,60
1,5	0,55	0,75	"	1,66
1,7	0,60	0,80	"	1,71
1,9	0,65	0,90	"	
2,0	0,70	0,95	"	
2,2	0,75	1,05	"	
2,4	0,80	1,10	"	
2,5	0,85	1,15	"	
2,7	0,90	1,25	"	
2,9	0,95	1,30	"	
3,0	1,00	1,35	"	
3,2	1,05	1,40	"	
3,4	1,10	1,45	"	
3,6	1,14	1,50	"	
3,8	1,19	1,55	"	
4,1	1,25	1,60	"	

Abb. 10: Laborbuch, Seite 2

u in V	I_F in mA	I_D in mA ohne Kühlung	I_D in mA mit Kühlung	Messb. I_F
4,5	1,65 1,65	1,31	2,42	2,5 mA
4,7	1,75 1,75		2,44	"
5,2	1,75		2,47	"
5,5	1,80		2,49	"

2.1 Kalibrierung
mit Filter

P_L in W	I_F in mA	Messb. I_F	u in V	I in A
0,012	1,0	25 mA		
0,021	1,5			
0,017	0,9	5 mA	2,0	1,79
0,020	1,3		2,8	2,05
0,030	1,7		4,0	2,31
0,033	1,9		5,0	2,40
0,037			6,0	2,44

Abb. 11: Laborbuch, Seite 3

P_L in Watt ohne Filter	M.b. 1000mA I_F in mA ohne Filter	M.b. 5mA I_F in mA mit Filter	u in V	I in A mit Kühlung	$U = 12,5V \cdot \frac{0,1}{\sqrt{3}}$
0,494	100	0,7	1,5	1,45	
0,521	180	1,1	2,4	1,74	
1,237	220	1,4	3,1	1,95	
1,618	280	1,8	4,5	2,24	
1,760	300	1,9	5,5	2,35	
1,825	300	1,9	6,2	2,40	
1,594	260	1,7	4,2	2,20	
0,395	80	0,4	1,1	1,35	
1,109	200	1,2	2,7	1,85	
0,102	20	0,1	0,5	1,19	
0,530	120	0,6	1,3	1,47	
0,834	180	0,9	2,0	1,68	

2-3

$U = 12,5V \cdot \frac{0,1}{\sqrt{3}}$

u in V	I in A mit Kühlung	M.b. 2,5mA I_F in mA mit Filter
0,5	1,20	0,05
0,9	1,38	0,25
1,6	1,57	0,40
2,0	1,71	0,45
2,7	1,91	0,55
3,1	2,02	0,60
3,5	2,13	0,65
4,2	2,25	0,80
4,7	2,33	0,90
5,3	2,37	1,00
5,7	2,40	1,10
6,3	2,41	1,10
0,3	1,15	0,00
0,7	1,27	0,15
1,3	1,46	0,35
1,8	1,61	0,40
2,4	1,81	0,50
2,2	1,75	0,45
2,9	1,94	0,55
3,3	2,04	0,55
3,8	2,15	0,65
4,4	2,24	0,90
5,0	2,31	1,00

2.4

$u = 3,7V$

$I = 2,08A$

$I_F = 1,25mA$ M.b. 2,5mA

06.04.22 VT Bremke

Abb. 12: Laborbuch, Seite 4

Abbildungsverzeichnis

1	Versuchsaufbau Teil 1 und 2	2
2	Versuchsaufbau Teil 3	3
3	Versuchsaufbau Teil 4	3
4	Kalibrierung der Fotodiode mithilfe des Leistungsmessgeräts	5
5	Laserleistungsdiagramme mit originalen und angepassten Messwerten und linearer Regression	7
6	Wirkungsgrad des Diodenlasers	9
7	Laserleistungsdiagramm vor und nach dem Kristall	10
8	Absorptionsleistungsdiagramm	11
9	Laborbuch, Seite 1	17
10	Laborbuch, Seite 2	18
11	Laborbuch, Seite 3	19
12	Laborbuch, Seite 4	20