

# Fortgeschrittenenpraktikum

## Protokoll zu Versuchen mit dem Neodym-YAG-Laser

Jonas Lieb, 312136  
*Gruppe 20*

RWTH Aachen

12. März 2015

### **Zusammenfassung**

In diesem Versuch wird ein diodengepumpter Nd-YAG-Festkörperlaser zusammengesetzt und charakterisiert. Dabei sind besonders die Laserschwelle und die Lasereffizienz von Interesse. Nach der Charakterisierung wird der Laser mit einem KTP-Kristall modifiziert, sodass statt des infraroten Lichts (1064 nm) frequenzverdoppeltes grünes Licht zu beobachten ist. Im letzten Versuchsteil wird der Laser mithilfe von aktiver Gütemodulation in den Pulsbetrieb versetzt und die Höhe der Pulse vermessen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Charakterisierung des Diodenlasers</b>	<b>3</b>
2.1	Messung des Absorptionsspektrums durch Variation der Temperatur	3
2.2	Bestimmung der Ausgangsleistung in Abhängigkeit des Diodenstroms	5
<b>3</b>	<b>Charakterisierung des Nd-YAG-Lasers</b>	<b>8</b>
3.1	Lebensdauer des ${}^4F_{3/2}$ -Niveaus . . . . .	8
3.2	Bestimmung der Ausgangsleistung in Abhängigkeit der Pumpleistung	10
3.3	Spiking . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Frequenzverdopplung mit KTP</b>	<b>14</b>
4.1	Aufbau und Durchführung . . . . .	14
4.2	Rohdaten . . . . .	15
4.3	Auswertung . . . . .	16
<b>5</b>	<b>Aktive Gütemodulation</b>	<b>17</b>
5.1	Abhängigkeit der Leistung von der Frequenz . . . . .	17
5.2	Bestimmung der Peakleistung . . . . .	19
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>20</b>

# 1 Einleitung

Der in diesem Versuch genutzte Festkörperlaser besteht aus Neodym-dotiertem Yttrium-Aluminium-Granat und ist ein 4-Niveau-Laser mit einer Laser-Wellenlänge von  $\lambda = 1064 \text{ nm}$ . Er besitzt mehrere Absorptionslinien bei 804.4 nm, 808.4 nm, 812.9 nm und 817.3 nm, die als Pump-Wellenlängen genutzt werden können. Das Pumpen erfolgt durch einen Halbleiter-Diodenlaser. Durch Variation der Temperatur dehnt sich der Halbleiter aus und kann so auf verschiedene Wellenlängen um ca. 810 nm eingestellt werden. Dieses Verhalten, die Ausgangsleistung und Laserschwelle werden zunächst bestimmt.

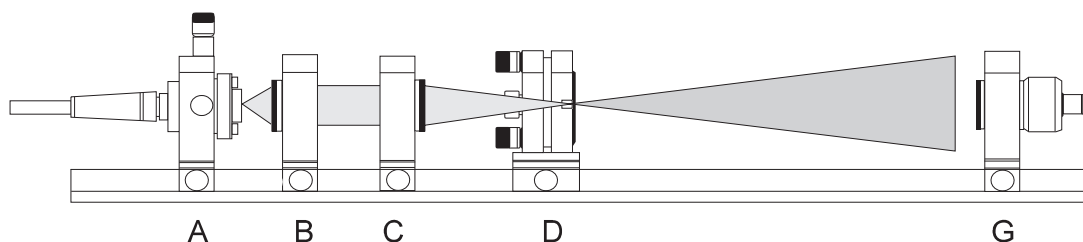
Im Anschluss wird ein KTP-Kristall in den Resonator des Nd-YAG-Lasers eingebaut, sodass durch nichtlineare Effekte eine Frequenzverdopplung auf 532 nm (grünes Licht) stattfindet. Die Effizienz dieses Prozesses wird betrachtet.

Im letzten Versuchsteil wird der Laser in den Pulsbetrieb versetzt. Dafür wird anstelle des KTP-Kristalls eine Pockelszelle in den Resonator verbaut, die von einem Frequenzgenerator getrieben wird und zur aktiven Gütemodulation dient. Durch die Modulation werden deutlich höhere Peakleistungen erzielt. Diese werden mithilfe eines Photosensors vermessen.

## 2 Charakterisierung des Diodenlasers

### 2.1 Messung des Absorptionsspektrums durch Variation der Temperatur

#### 2.1.1 Aufbau und Durchführung



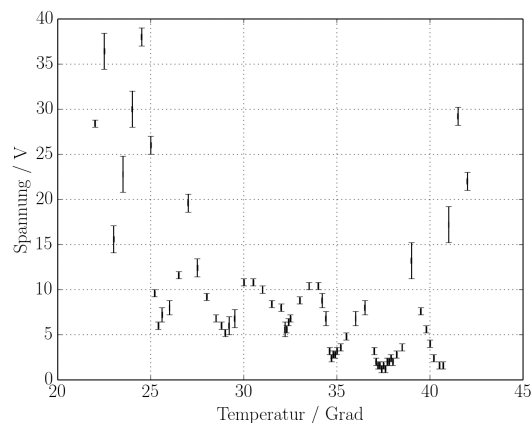
**Abbildung 1:** Versuchsaufbau zur Charakterisierung des Diodenlasers. Montiert sind Diodenlaser (A), Kollimator ( $f = 6 \text{ mm}$ , B), Fokussiereinheit ( $f = 50 \text{ mm}$ , C), Nd-YAG Stab (D) und Photodetektor (G). Zusätzlich ist der Diodenlaser mit einem Diodentreiber, auf dem sich die Diodentemperatur einstellen lässt, und der Photodetektor über einen Verstärker mit einem Oszilloskop verbunden. Bildquelle: [1, S. 33]

Während der gesamten Versuchsreihe wird *Versuchsaufbau 3* verwendet.

Zuerst wird der Diodenlaser charakterisiert. Dazu wird im ersten Versuchsteil die Abhängigkeit zwischen geregelter Temperatur und der emittierten Wellenlänge betrachtet. Der Aufbau ist in Abbildung 1 gezeigt und besteht im Wesentlichen aus dem Diodenlaser, dem Nd-YAG Stab und einem Photodetektor. Die Temperatur kann in  $0.1^\circ\text{C}$  Schritten am Diodentreiber eingestellt werden. Zur Vermessung der Wellenlänge wird das bekannte Absorptionsspektrum von YAG verwendet. Die Intensität wird am Ende der optischen Bank mit einem Photodetektor vermessen, der mit einem Oszilloskop verbunden wird. Die Messwerte werden manuell vom Oszilloskop abgelesen und ihr Fehler aufgrund des Rauschens ebenfalls manuell abgeschätzt. Die Temperaturschritte sind arbiträr gewählt, sie betragen ca.  $0.5^\circ\text{C}$  zwischen den Minima und bis zu  $0.1^\circ\text{C}$  um die Minima.

Bei der Veränderung der Temperatur und damit der Wellenlänge werden mehrere Absorptionspeaks erwartet, die sich als Intensitätsminima messen lassen.

### 2.1.2 Rohdaten



**Abbildung 2:** Transmissionsspektrum von YAG. Die auf dem Oszilloskop abgelesene Spannung ist proportional zur Intensität und auf der vertikalen Achse aufgetragen, auf der horizontalen Achse befindet sich die Temperatur des Diodenlasers.

Die Messdaten sind in Abbildung 2 zu sehen. Auf der vertikalen Achse wurde die auf dem Oszilloskop abgelesene Spannung mit den geschätzten Fehlern aufgetragen. Der Fehler auf die Temperatur beträgt  $0.1^\circ\text{C}/\sqrt{12} = 0.03^\circ\text{C}$ , da die Schwankungen geringer sind als die Digitalanzeige des Diodentreibers, die eine Einstellung auf  $0.1^\circ\text{C}$  erlaubt.

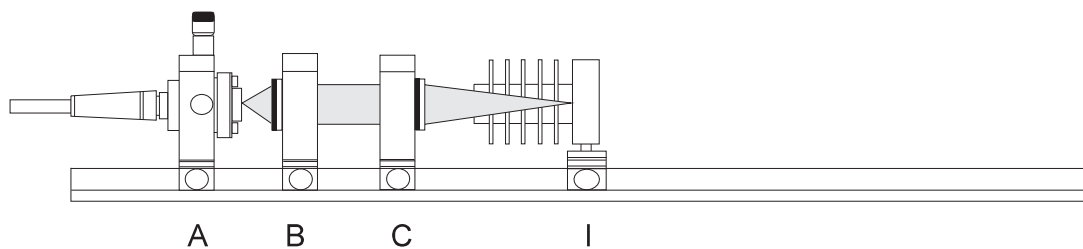
### 2.1.3 Auswertung

Deutlich zu erkennen sind mehrere Intensitätsminima. Diese liegen bei ca.  $25.5^\circ\text{C}$ ,  $29.0^\circ\text{C}$ ,  $32.3^\circ\text{C}$ ,  $34.8^\circ\text{C}$ ,  $37.5^\circ\text{C}$  und  $40.6^\circ\text{C}$ . Eine genaue Zuordnung zu den erwarteten Absorptionswellenlängen ist nicht nötig und möglich, da kein Model für

den Zusammenhang bekannt ist, und da in den folgenden Versuchsteilen lediglich ein Absorptionsmaximum genutzt werden muss, welches in Form der Diodentemperatur angegeben wird.

## 2.2 Bestimmung der Ausgangsleistung in Abhängigkeit des Diodenstroms

### 2.2.1 Aufbau und Durchführung



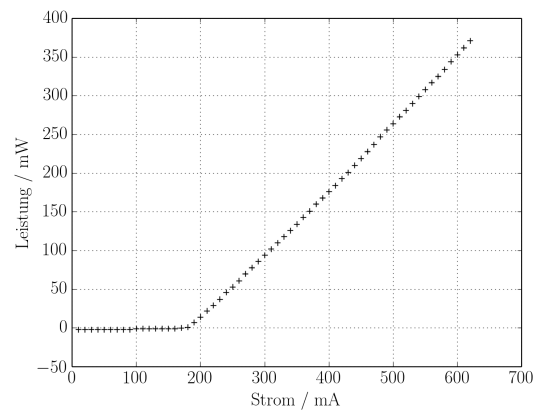
**Abbildung 3:** Versuchsaufbau Bestimmung der Ausgangsleistung. Montiert sind Diodenlaser (A), Kollimator ( $f = 6 \text{ mm}$ , B), Fokussiereinheit ( $f = 50 \text{ mm}$ , C) und Leistungsmesser „LaserMate-Q“ (I) mit 1000:1 Dämpfer. Bildquelle: [1, S. 35]

In diesem Versuchsteil wird die Ausgangsleistung in Abhängigkeit des Diodenstroms bei fester Temperatur vermessen. Es wird erwartet, dass ab einer bestimmten Laserschwelle die Laserleistung proportional zur Stromstärke ansteigt.

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3 abgebildet. Diesmal wird eine Temperatur von  $38.6^\circ\text{C}$  eingestellt, da sich nach Erwärmung des Lasers das fünfte Minimum bei dieser Temperatur befindet. Die gemessenen Intensitäten werden auf einem Leistungsmessgerät abgelesen, der eingestellte Messbereich beträgt zuerst  $300 \mu\text{W}$ , bis dieser überschritten ist und auf  $1 \text{ mW}$  gewechselt wird. Aufgrund des 1000:1 Dämpfers müssen diese Werte jedoch mit dem Faktor 1000 multipliziert werden, um die Ausgangsleistung zu bestimmen. Die Stromstärke wird im Bereich von 0 bis  $620 \text{ mA}$  in  $10 \text{ mA}$ -Schritten eingestellt und je ein Leistungsmesswert notiert.

### 2.2.2 Rohdaten

Abbildung 4 zeigt die Messdaten, dabei ist der eingestellte Strom auf der horizontalen Achse und die gemessene Leistung auf der vertikalen aufgetragen. Die Leistung ist bereits mit dem Faktor 1000 multipliziert, um für den 1000:1 Dämpfer zu kompensieren. Der Fehler auf die Stromeinstellung beträgt  $1 \text{ mA}/\sqrt{12} = 0.3 \text{ mA}$ , da der Diodentreiber über eine Digitalanzeige verfügt, auf der sich nur Milliampere einstellen lassen. Der Fehler auf die gemessene Leistung beträgt analog  $0.3 \text{ mW}$ , da auch hier eine Digitalanzeige verwendet wurde. Da die Fehlerbalken in dieser Auftragung sehr klein sind, werden sie auf dem Plot als Kreuze abgebildet.



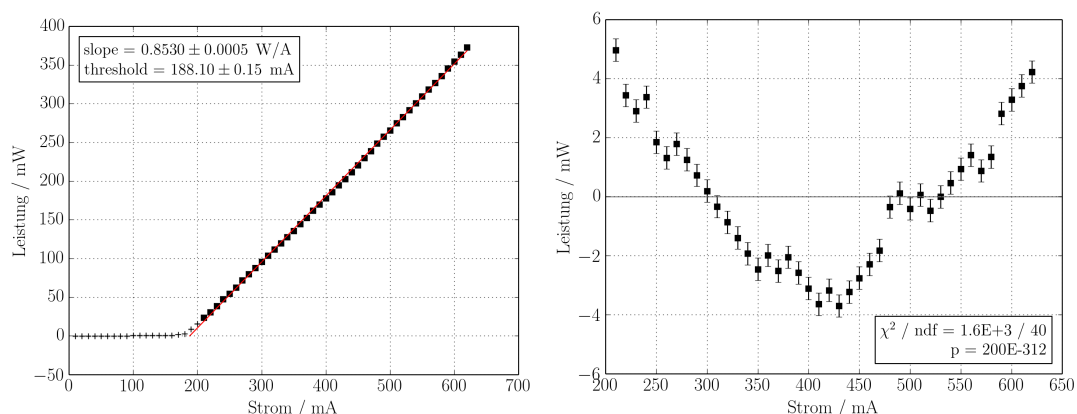
**Abbildung 4:** Rohdaten zur Leistungsmessung des Diodenlasers. Auf der horizontalen Achse ist der am Treiber eingestellte Strom aufgetragen, die vertikale Achse zeigt die gemessene Leistung, die bereits mit dem Faktor 1000 multipliziert wurde.

### 2.2.3 Auswertung

Das Kernstück der Analyse ist eine Geradenanpassung. Dafür muss zuerst eine Offsetkorrektur durchgeführt werden und ein valider Bereich für den Fit ausgewählt werden.

Für die Bestimmung des Offsets wird der Mittelwert aller gemessenen Leistungen mit  $I < 150$  mA gebildet. Dieser beträgt  $-1.64$  mW und wird nun von der Leistung subtrahiert, sodass diese im unteren Bereich 0 mW beträgt.

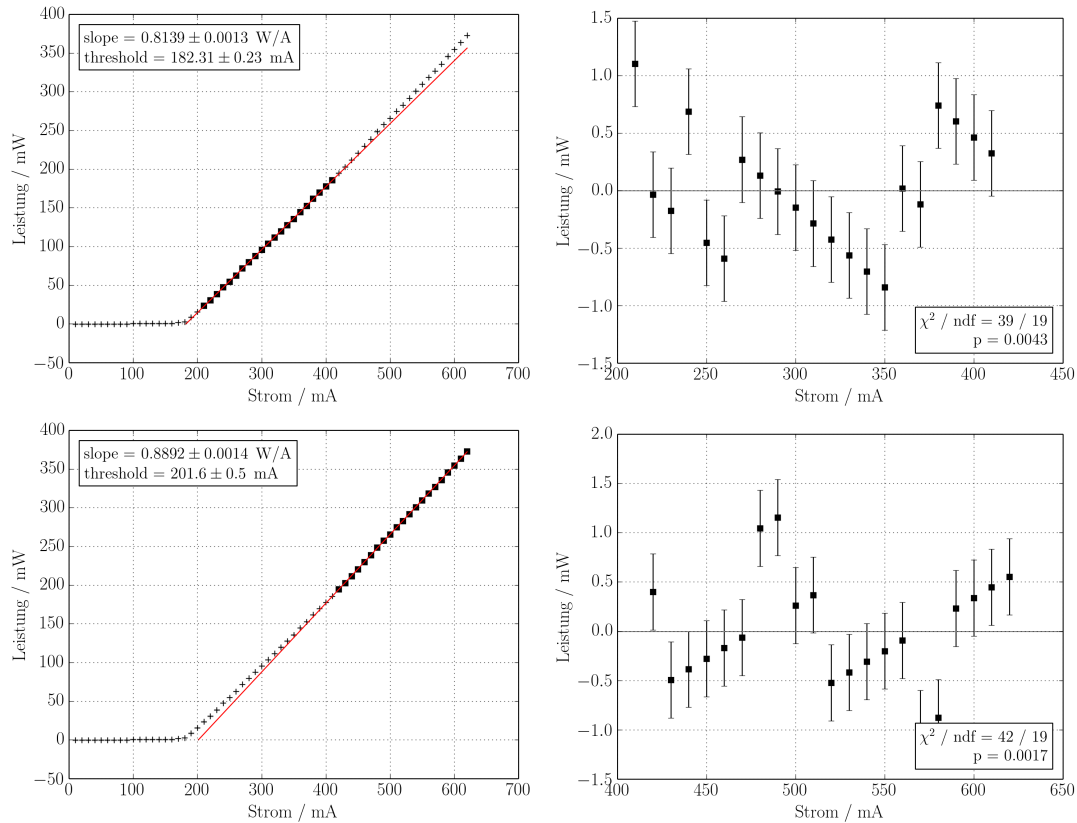
Der valide Anpassungsbereich wird manuell geschätzt. Es werden zur Anpassung ausschließlich Werte  $I > 200$  mA genutzt, da die Laserschwelle augenscheinlich darunter liegt.



**Abbildung 5:** Geradenanpassung im Bereich  $I > 200$  mA. Der resultierende Threshold liegt bei  $(188.10 \pm 0.15)$  mA. Im rechten Teil sind die Residuen gezeigt,  $\chi^2/\text{ndf} = 40$ , außerdem zeigt sich eine deutliche Systematik.

Zur Anpassung wird der Migrad-Algorithmus verwendet. Das Ergebnis der An-

passung ist in Abbildung 5 gezeigt. Der Threshold beträgt demnach  $(188.10 \pm 0.15)$  mA, und die Leistungssteigerung  $(0.8530 \pm 0.0005)$  W/A. Allerdings lässt der Residuenplot (rechte Seite der Abbildung 5) erkennen, dass ein systematischer Fehler vorliegt und das Model separat an die Daten von 200 mA bis 410 mA und über 410 mA angepasst werden muss.



**Abbildung 6:** Geradenanpassung im Bereich von 200 bis 410 mA (oben), sowie im Bereich  $> 410$  mA (unten). Die Residuengraphen zeigen eine deutlich bessere Anpassung, es sind nur noch Systematiken durch Binning zu erkennen.

Strombereich	Threshold	Slope	$\chi^2/\text{ndf}$
alles $> 200$ mA	$(188.10 \pm 0.15)$ mA	$(0.8530 \pm 0.0005)$ W/A	40.0
200 bis 410 mA	$(182.10 \pm 0.23)$ mA	$(0.8139 \pm 0.0013)$ W/A	2.1
$> 410$ mA	$(201.6 \pm 0.5)$ mA	$(0.8892 \pm 0.0014)$ W/A	2.2

**Tabelle 1:** Ergebnisse von Anpassungen für verschiedene Bereiche

Das Ergebnis dieser eingeschränkten Anpassung ist in Abbildung 6 und Tabelle 1 gezeigt. Die Anpassungen sind deutlich besser gelungen und weisen nur noch eine Binning-Systematik auf.

Möglicher Grund für die Separation der Daten in zwei Bereiche ist eine Veränderung des Messaufbaus, sowie das Umschalten des Messbereiches des Leistungsmes-

sers.

Da der untere Bereich aufgrund seiner Nähe zum Laserthreshold den geringeren Fehler aufweist, wird dieses Ergebnis als finales Ergebnis genutzt: Der Laserthreshold der Laserdiode beträgt

$$(182.10 \pm 0.23) \text{ mA}$$

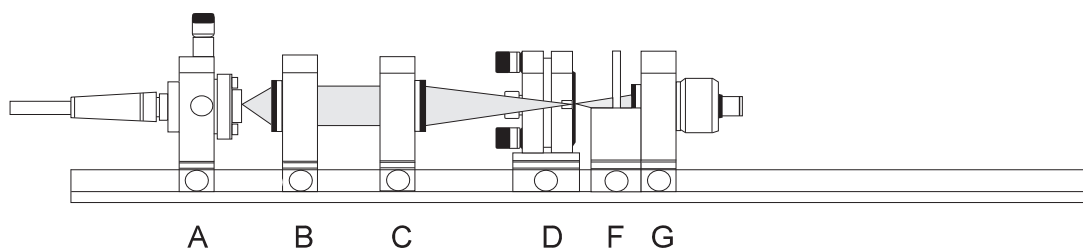
Darüber hinaus beträgt die Leistungssteigerung bei Stromänderung

$$(0.8139 \pm 0.0013) \text{ W/A}$$

## 3 Charakterisierung des Nd-YAG-Lasers

### 3.1 Lebensdauer des $^4F_{3/2}$ -Niveaus

#### 3.1.1 Aufbau und Durchführung



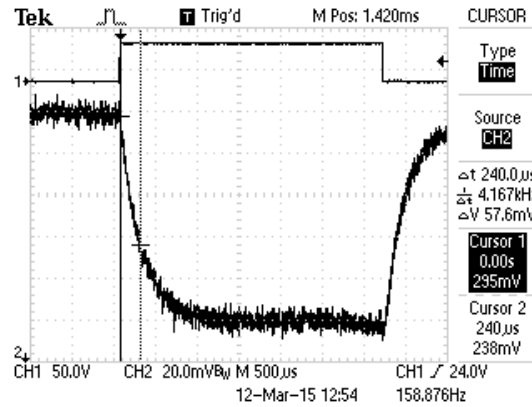
**Abbildung 7:** Versuchsaufbau zur Bestimmung der Lebensdauer des  $^4F_{3/2}$ -Niveaus. Montiert sind Diodenlaser (A), Kollimator ( $f = 6 \text{ mm}$ , B), Fokussiereinheit ( $f = 50 \text{ mm}$ , C), Nd-YAG Stab (D), Filter RG 1000 (Transmission nur  $\lambda > 1000 \text{ nm}$ , F) und Photodetektor (G). Letzterer ist über einen Verstärker an ein Oszilloskop angeschlossen. Bildquelle: [1, S. 35]

In diesem Versuchsteil wird der Nd-YAG-Stab erneut eingebaut und vermessen. Der Diodenlaser wird im Pulsbetrieb betrieben. Es wird erwartet, dass die Infrarotintensität des Neodyms der Schaltung des Pump lasers träge folgt und daher nach Ein- und Abschalten ein exponentieller Anstieg bzw. Abfall zu messen ist.

Der Versuchsaufbau befindet sich in Abbildung 7. Die Laserdiode wird im Pulsbetrieb bei ca. 160 Hz und mit einem Strom von 197 mA, also knapp über der Laserschwelle, betrieben. Erneut beträgt die eingestellte Temperatur 38.6 °C.

Die Daten werden am Oszilloskop abgelesen und zusätzlich auf einem USB-Stick als csv-Datei gespeichert, sodass sie separat analysiert werden können. Ein manuelles Ablesen der Lebensdauer mithilfe der Oszilloskopcursor ergibt 240  $\mu\text{s}$ .





**Abbildung 8:** Rohdaten auf dem Oszilloskop. Eine Schnelleinschätzung von  $\tau = 240 \mu\text{s}$  ist zu sehen.

### 3.1.2 Rohdaten

Die Rohdaten zu diesem Versuchsteil (Abbildung 8) entstammen direkt dem Oszilloskop. Die obere Linie entspricht die Messdaten von Kanal 1, der direkt mit dem Diodentreiber verbunden ist und als Trigger dient. Dieser Kanal ist invertiert, so dass das höhere Spannungsniveau zu einer ausgeschalteten Diode korrespondiert. Der Zeitpunkt des Abschaltens des Diodenlasers ist mit dem Cursor markiert und wird im folgenden als  $t = 0$  festgelegt.

Auf Kanal 2 sind die Messdaten des Photodetektors zu sehen. Es zeigt sich, dass bei  $t < 0$  eine gesättigte Intensität gemessen wird, nach Abschalten der Diode fällt die gemessene Intensität jedoch wie erwartet exponentiell auf einen geringeren Wert ab.

### 3.1.3 Auswertung

Um die Lebensdauer genauer zu bestimmen, wird eine Anpassung einer Exponentialfunktion durchgeführt. Dafür werden zunächst die Fehler auf die Spannungsmesswerte geschätzt. Es bietet sich dabei an, den Stichprobenfehler der Daten mit  $t < 0$  zu berechnen. Dieser beträgt  $\sigma = 2.75 \text{ mV}$  und wird im folgenden als Fehler auf alle Spannungswerte genutzt.

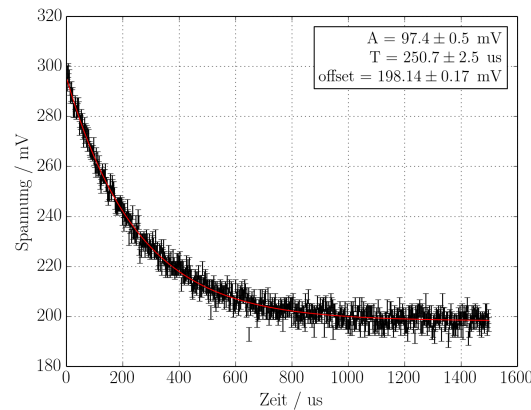
Nun wird eine Anpassung an eine Funktion der Form

$$f(t) = A \exp\left(-\frac{t}{T}\right) + \text{offset}$$

durchgeführt. Dadurch bezeichnet  $T$  die Lebensdauer des  ${}^4F_{3/2}$ -Niveaus. Die anderen Fitparameter sind nicht von Interesse.

Das Ergebnis der Anpassung ist in Abbildung 9 gezeigt. Die Anpassung erfolgt mit  $\chi^2/\text{ndf} = 751.8/746 = 1.01$ . Für die Lebensdauer ergibt sich

$$T = (250.7 \pm 2.5) \mu\text{s}$$

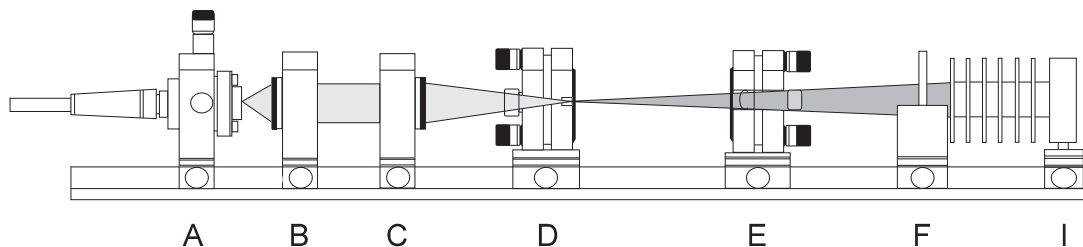


**Abbildung 9:** Ausgewertete Kurve des Oszilloskops. Auf die Spannungswerte wird ein Fehler von 2.75 mV angenommen, die Qualität der Anpassung ist  $\chi^2/\text{ndf} = 1.01$

Dieser Wert ist  $4\sigma$  von der Grobabschätzung mit den Oszilloskop cursorn ( $240 \mu\text{s}$ ) und  $8\sigma$  vom Literaturwert  $230 \mu\text{s}$  entfernt.

## 3.2 Bestimmung der Ausgangsleistung in Abhängigkeit der Pumpleistung

### 3.2.1 Aufbau und Durchführung



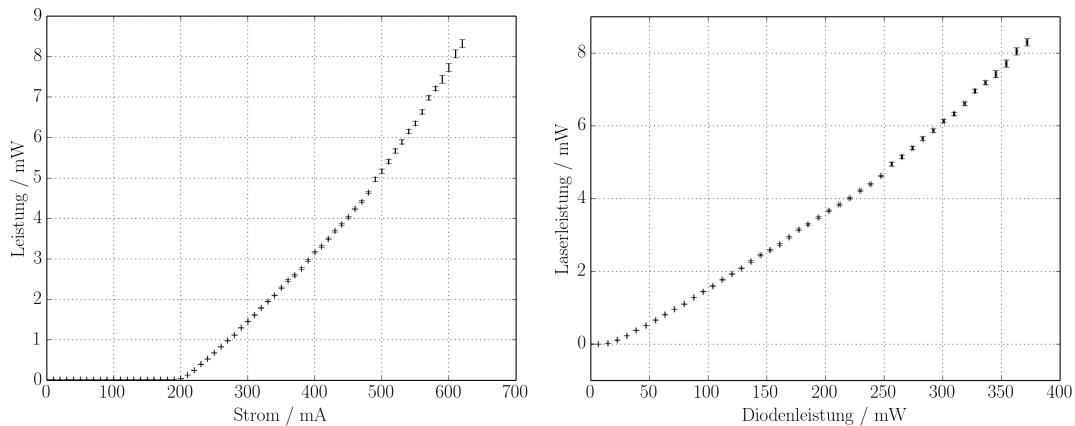
**Abbildung 10:** Versuchsaufbau zur Messung der Ausgangsleistung. Montiert sind Diodenlaser (A), Kollimator ( $f = 6 \text{ mm}$ , B), Fokussiereinheit ( $f = 50 \text{ mm}$ , C), Nd-YAG Stab (D), Spiegel 100 – 2 % (E), Filter RG 1000 (Transmission nur  $\lambda > 1000 \text{ nm}$ , F) und Leistungsmesser „LaserMate-Q“ (I) mit 1000:1 Dämpfer. Bildquelle: [1, S. 36]

In diesem Versuchsteil wird zum ersten Mal der Resonator des Nd-YAG-Festkörperlasers aufgebaut (siehe Abbildung 10). Dieser besteht aus einem auf den YAG-Stab aufgedampften Spiegel und einem einzelnen 100 – 2 % Spiegel. Aus letzterem wird die infrarote Laserstrahlung der Wellenlänge  $\lambda = 1064 \text{ nm}$  emittiert. Da dort ebenfalls Anteile des Pumplichtes austreten, werden diese vor dem Photodetektor durch einen RG 1000 Filter absorbiert.

Die Leistung dieses Lasers wird in Abhängigkeit des Diodenstromes gemessen, mithilfe der vorherigen Charakterisierung der Diode kann so die Lasereffizienz berechnet werden.

Der Diodenstrom wird in 10 mA-Schritten von 0 bis 620 mA variiert. Als Diodentemperatur werden  $38.5^\circ\text{C}$  eingestellt. Die Intensität wird am Leistungsmesser auf einer Digitalanzeige abgelesen, ihr Fehler wird über die Schwankungen manuell geschätzt und beträgt je nach Messwert zwischen  $3\text{ }\mu\text{W}$  und  $100\text{ }\mu\text{W}$ .

### 3.2.2 Rohdaten



**Abbildung 11:** Rohdaten zur Leistungsmessung des Festkörperlaser. Links: Auf der horizontalen Achse ist der am Diodentreiber eingestellte Strom aufgetragen, die vertikale Achse zeigt die gemessene Leistung, die bereits mit dem Faktor 1000 multipliziert wurde. Rechts: Die horizontale Achse zeigt die Diodenleistung, die mithilfe einer abschnittsweise definierten Funktion berechnet wurde.

In den Messdaten (Abbildung 11, linke Seite) zeigt sich das erwartete Muster: die ersten Werte unterhalb der Laserschwelle sind ungefähr 0 mW, über der Schwelle steigt die Leistung monoton an.

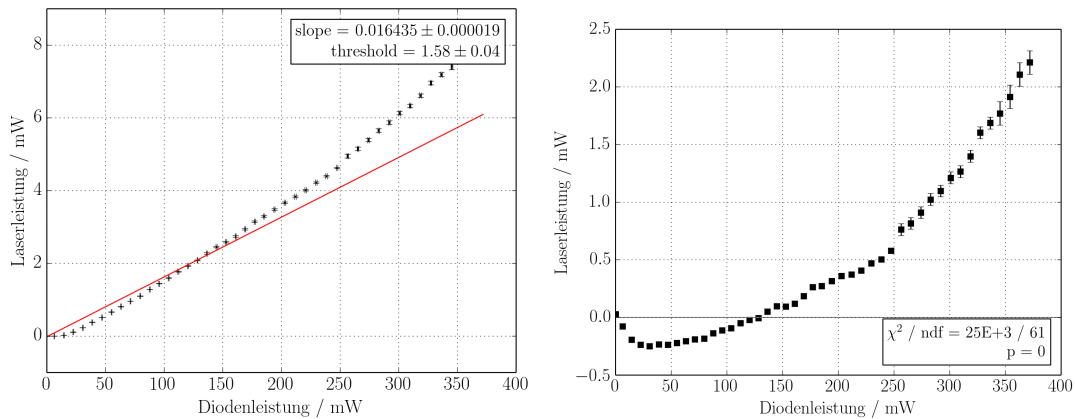
### 3.2.3 Auswertung

Zuerst wird erneut eine Offsetkorrektur durchgeführt. Dafür wird von allen Daten ein Offset von 0.02 mW subtrahiert, da dies der Mittelwert der Daten für  $I < 150\text{ mA}$  ist.

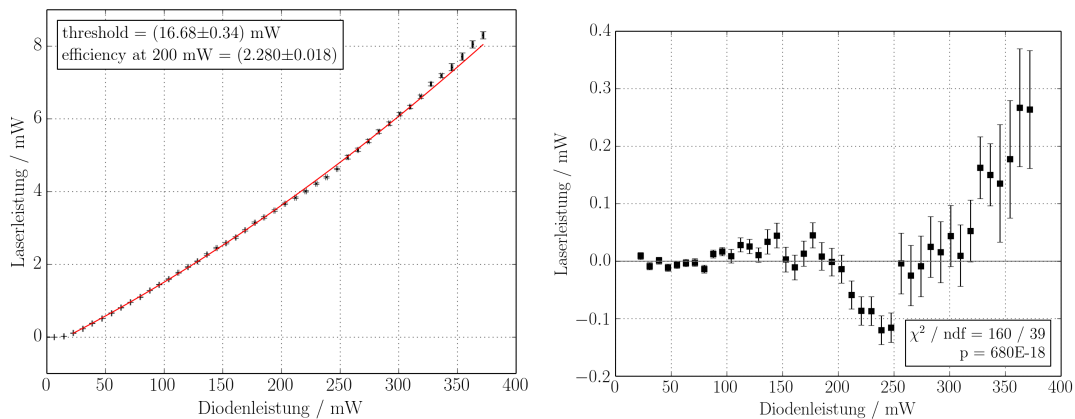
Danach werden die Daten in Abhängigkeit der Diodenleistung aufgetragen. Dazu werden die Erkenntnisse des Vorversuches (Tabelle 1) genutzt, um eine abschnittsweise definierte Funktion zu bilden, die diese Abhängigkeit beschreibt:

$$P(I) = \begin{cases} 0 & I < 182.10\text{ mA} \\ (I - (182.10 \pm 0.23)\text{ mA}) \cdot (0.8139 \pm 0.0013)\text{ W/A} & 182.10\text{ mA} < I < 410\text{ mA} \\ (I - (201.6 \pm 0.5)\text{ mA}) \cdot (0.8892 \pm 0.0014)\text{ W/A} & I > 410\text{ mA} \end{cases}$$

Mithilfe dieser Funktion und Gaußscher Fehlerfortpflanzung kann nun die Diodenleistung auf der horizontalen Achse aufgetragen werden (Abbildung 11, rechte Seite).



**Abbildung 12:** Lineare Anpassung an die Leistungsmessung. Diese schlägt fehl,  $\chi^2/\text{ndf} = 410$ . Die Residuen zeigen, dass ein Polynom höheren Grades vermutlich besser angepasst werden kann.



**Abbildung 13:** Anpassung eines Polynoms zweiten Grades an die Leistungsmessung. Daraus berechnet sich eine Schwellleistung von  $(16.68 \pm 0.68) \text{ mW}$ . Die Effizienz  $\frac{dP_{\text{out}}}{dP_{\text{in}}}$  beträgt bei beispielsweise 200 mW Eingangsleistung  $(2.280 \pm 0.018)\%$ .

In Abbildung 12 ist eine lineare Anpassung an die Leistungsmessung gezeigt. Wie  $\chi^2/\text{ndf} = 410$  zeigt, ist diese Anpassung ungültig (oder sehr unwahrscheinlich). Daher wird im Folgenden ein Polynom zweiten Grades angepasst.

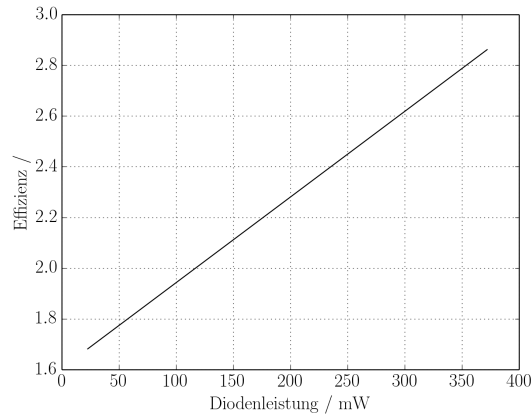
Eine solche Anpassung ist in Abbildung 13 zu sehen. Aus den Vorfaktoren im Polynom (Tabelle 2) kann nun die Nullstelle berechnet werden, die die Laserschwelle darstellt. Daraus ergibt sich eine Schwellleistung von

$$(16.68 \pm 0.34) \text{ mW}$$

Die Effizienz des Vorgangs hängt aufgrund der quadratischen Anpassung linear von der Pumpleistung ab. Der Zusammenhang ist in Abbildung 14 abgebildet. Demnach beträgt sie zwischen 1.5 und 3 %.

$a_2$	$(1.69 \pm 0.04) \times 10^{-5} \text{ 1/mW}$
$a_1$	$(0.01605 \pm 0.00010)$
$a_0$	$(-0.272 \pm 0.005) \text{ mW}$

**Tabelle 2:** Fittergebnisse der Anpassung  $P(x) = a_2x^2 + a_1x + a_0$



**Abbildung 14:** Abhängigkeit der Effizienz  $\frac{dP_{\text{out}}}{dP_{\text{in}}}$  von der Pumpleistung.

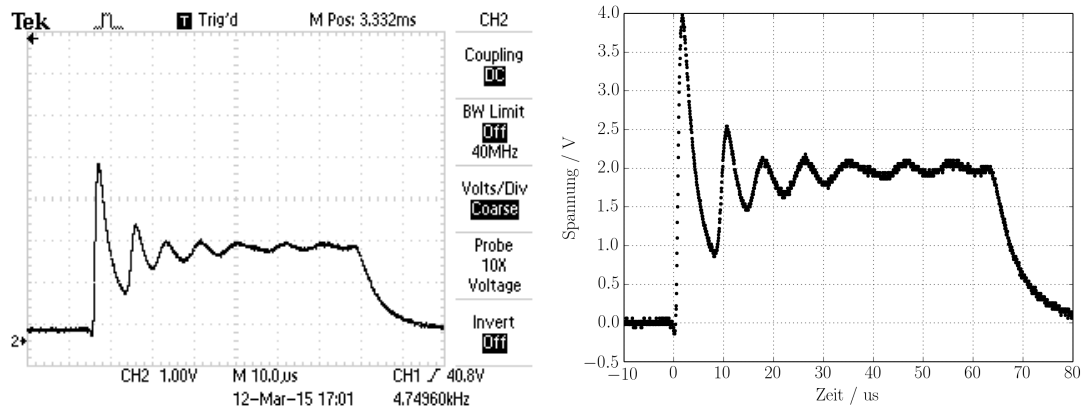
## 3.3 Spiking

### 3.3.1 Aufbau und Durchführung

In diesem Versuchsteil wird Spiking betrachtet. Beim Einschalten des Pump lasers entsteht zuerst eine Leistungsspitze, die in einer anharmonischen, gedämpften Schwingung auf die Laserleistung abfällt. Der Versuchsaufbau ist analog zum letzten Versuchsteil (Abbildung 10), außer dass anstelle des Leistungsmessers erneut der Photodetektor verwendet wird, der an ein Oszilloskop angeschlossen ist. Der Diodenlaser wird moduliert mit ca. 4.75 kHz. Ebenfalls an das Oszilloskop angeschlossen ist ein Signal, dass proportional zum Pumpstrom ist, sodass auf das modulierte Signal getriggert werden kann.

### 3.3.2 Rohdaten

In Abbildung 15 sind auf der linken Seite die Rohdaten vom Oszilloskop zu sehen. Auf der rechten Seite sind die aus der `csv`-Datei rekonstruierten Daten abgebildet, die Zeitskala ist so verschoben, dass der Spiking-Prozess bei  $t = 0$  beginnt. Auf der vertikalen Achse ist die gemessene Spannung aufgetragen, die proportional zur Intensität ist. Sie ist so korrigiert, dass bei  $t < 0$  die Spannung im Mittel bei  $U = 0$  liegt. Diese Daten werden in der Auswertung nur qualitativ betrachtet.



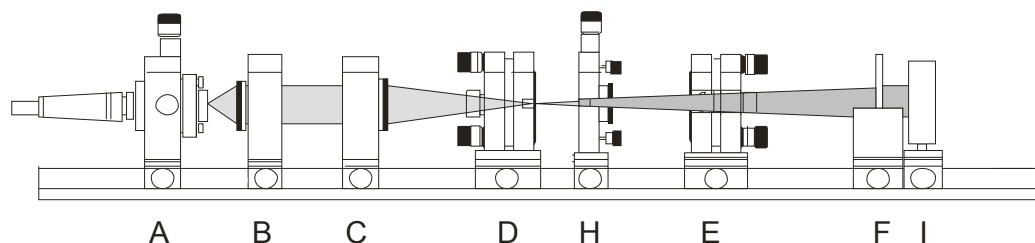
**Abbildung 15:** Rohdaten des Spikings. Linke Seite: direktes Bildschirmfoto vom Oszilloskop. Getriggert wurde auf die Modulationsfrequenz, die mit 4.75 kHz angegeben ist. Rechte Seite: aus gespeicherten Daten rekonstruierter Verlauf. Die Zeitskala wurde angepasst, sodass der Beginn des Spikings bei  $t = 0$  abgebildet ist. Außerdem wurde eine Offsetkorrektur mit den Daten von  $t < 0$  durchgeführt.

### 3.3.3 Auswertung

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Spannung zuerst auf ca. 4.0 V springt und sich danach anharmonisch und gedämpft auf 2.0 V einschwingt. Der gesamte Prozess dauert ca. 60  $\mu$ s.

## 4 Frequenzverdopplung mit KTP

### 4.1 Aufbau und Durchführung



**Abbildung 16:** Versuchsaufbau zur Frequenzverdopplung. Montiert sind Diodenlaser (A), Kollimator ( $f = 6$  mm, B), Fokussiereinheit ( $f = 50$  mm, C), Nd-YAG Stab (D), KTP-Kristall (H), Spiegel 100 – 2 % (E), Filter BG 39 (Transmission nur  $\lambda \approx 532$  nm, F) und Leistungsmesser „LaserMate-Q“ (I) (ohne 1000:1 Dämpfer). Bildquelle: [1, S. 38]

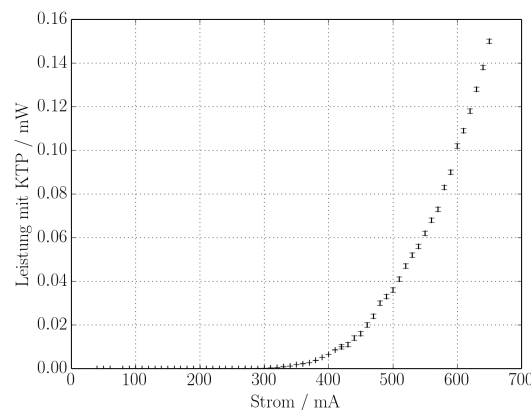
In diesem Versuchsteil wird ein KTP-Kristall in den Laserresonator eingebaut. Aufgrund nichtlinearer optischer Effekte wird die Frequenz der Laserstrahlung

verdoppelt, die Wellenlänge halbiert sich dadurch von 1064 nm auf 532 nm. Das emittierte Licht ist damit für das menschliche Auge sichtbar und erscheint grün.

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 16 zu sehen. Wie im vorherigen Versuch ist der Festkörperlaser vollständig aufgebaut, jedoch ist in den Resonator ein KTP-Kristall eingebaut. Die Position der Laserspiegel ist dementsprechend korrigiert, sodass nun grünliches Licht am Austrittsspiegel emittiert wird und den Filter passiert. Die Leistung wird erneut mit dem Leistungsmessgerät vermessen, diesmal ohne 1000:1 Dämpfer.

Die eingestellte Diodentemperatur beträgt 34.9 °C. Die Stromstärke wird von 0 bis 650 mA variiert, zu jedem Messpunkt wird ein Leistungsmesspunkt mit dem Leistungsmesser LaserMate-Q aufgenommen. Der Messbereich wird entsprechend angepasst (zuerst bis 100 nW, dann 1 µW, 10 µW, 300 µW). Die Fehler auf den Messwert werden aufgrund der Schwankungen der Leistungsmessung geschätzt. Sie betragen in den Messbereichen 0.2 nW, 0.02 µW, 0.03 µW und 1 µW.

## 4.2 Rohdaten

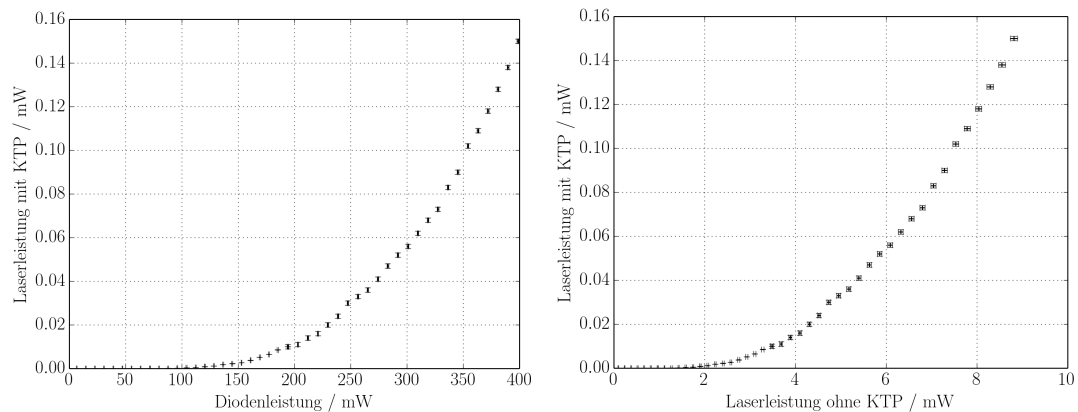


**Abbildung 17:** Rohdaten der Vermessung des Nd-YAG-Lasers mit eingebautem KTP-Kristall. Auf der horizontalen Achse befindet sich die am Diodentreiber eingestellte Stromstärke, auf der vertikalen Achse ist die gemessene Ausgangsleistung aufgetragen.

Die rohen Messdaten sind in Abbildung 17 zu finden.

Aus ihnen kann nun, analog zum letzten Versuch, zuerst eine Auftragung von Leistung gegen Diodenleistung und dann Laserleistung mit KTP gegen Laserleistung ohne KTP erstellt werden. Für letztere wird das folgende Polynom zweiten Grades verwendet:

$$P_{\text{Laser}}(P_{\text{Diode}}) = \begin{cases} 0 & P_{\text{Diode}} < 16.68 \text{ mW} \\ (16.69 \pm 0.04) \times 10^{-5} \text{ 1/mW} \cdot P_{\text{Diode}}^2 + (0.01605 \pm 0.00010) \cdot P_{\text{Diode}} + (-0.272 \pm 0.005) \text{ mW} & \text{sonst} \end{cases}$$

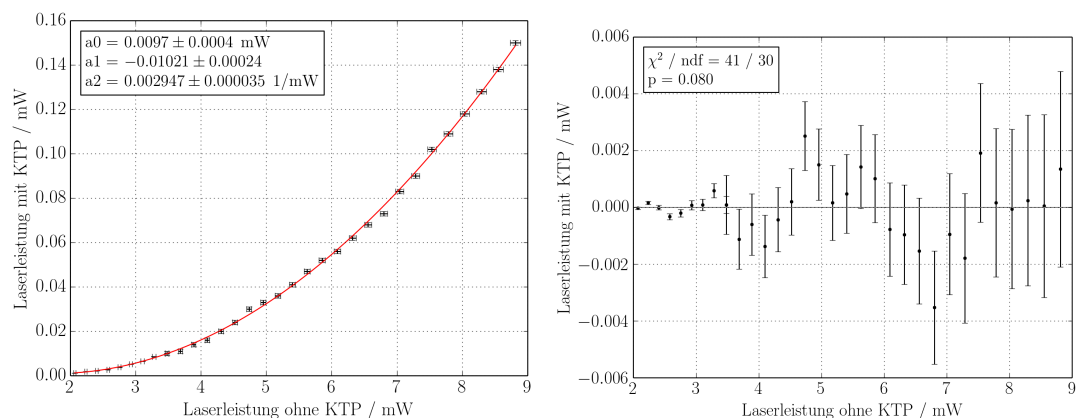


**Abbildung 18:** Verarbeitete Rohdaten der Messung mit KTP. Links: auf der horizontalen Achse wurde der Diodenstrom durch die Diodenleistung ersetzt. Rechts: auf der horizontalen Achse wurde die Diodenleistung durch die Laserleistung ohne KTP ersetzt.

Die Vorfaktoren stammen dabei aus der Anpassung im letzten Versuchsteil (Tabelle 2).

### 4.3 Auswertung

Schon in den verarbeiteten Rohdaten lässt sich eine nichtlineare Abhängigkeit erkennen. Laut Praktikumsskript wird ein „quadratischer Zusammenhang“ [1] erwartet. Um diese Theorie zu überprüfen, wird erneut ein Polynom zweiten Grades angepasst.



**Abbildung 19:** Quadratische Anpassung der Messergebnisse der Leistungsmessung mit KTP. Es wurden ausschließlich Daten mit einer Eingangsleistung von über 2 mW berücksichtigt.

Dafür werden die Daten zunächst eingeschränkt. Da die gemessene Leistung von 0 einen sehr geringen Fehler besitzt, beeinflusst sie die Anpassung negativ. Deshalb



ist es vorteilhaft, nur die Daten ab einer Eingangsleistung von 2 mW aufwärts zu berücksichtigen.

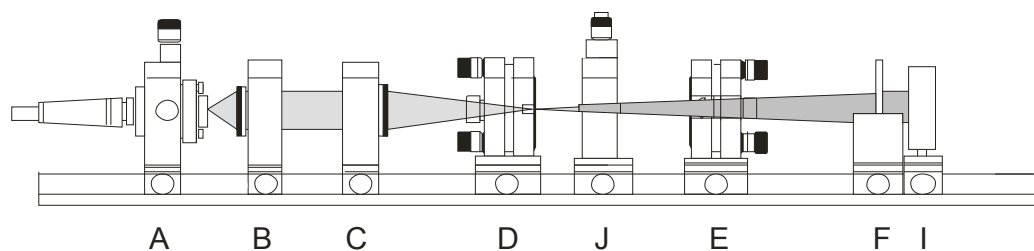
Die Anpassung des Polynoms zweiten Grades gelingt,  $\chi^2/\text{ndf} = 1.37$ , siehe Abbildung 19. Eine Interpretation dieses Ergebnisses ist aufgrund von Mängeln der Herleitung des theoretischen Modells jedoch nicht möglich.

Es lässt sich lediglich bemerken, dass auf höchster Leistung bei einer Eingangsleistung von fast 8.7 mW eine frequenzverdoppelte Leistung von 0.15 mW gemessen werden kann. Dies entspricht einer Effizienz von nur 1.72 %.

## 5 Aktive Gütemodulation

### 5.1 Abhängigkeit der Leistung von der Frequenz

#### 5.1.1 Aufbau und Durchführung



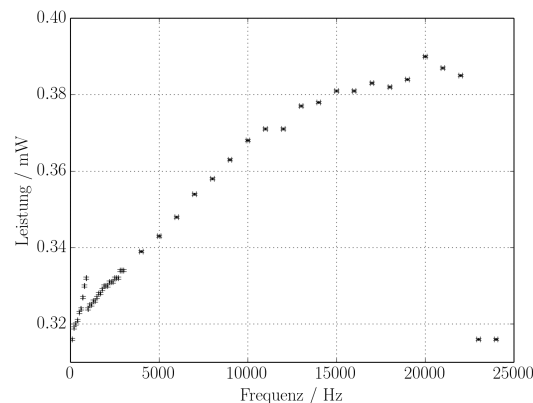
**Abbildung 20:** Versuchsaufbau zum Q-Switching. Montiert sind Diodenlaser (A), Kollimator ( $f = 6$  mm, B), Fokussiereinheit ( $f = 50$  mm, C), Nd-YAG Stab (D), Pockelszelle (J), Spiegel 100 – 2 % (E), Filter RG 1000 (Transmission nur  $\lambda > 1000$  nm, F) und Leistungsmesser „LaserMate-Q“ (I) (ohne 1000:1 Dämpfer). Bildquelle: [1, S. 38]

In diesem Versuch wird das Verhalten des Lasers unter aktiver Gütemodulation untersucht. Wie im Versuchsaufbau (Abbildung 20) zu sehen, ist diesmal in den Resonator eine getriebene Pockelszelle eingebaut. Während an dieser eine Spannung anliegt, ist die Güte des Resonators gering, d.h. dass kein Laservorgang stattfindet. Erst wenn die Spannung abfällt, beginnt der Laserprozess. Aufgrund der höheren davor aufgebauten Inversion entsteht eine Leistungsspitze, bevor der Laser sich wieder gedämpft und anharmonisch auf die niedrigere Leistung einschwingt.

An die Pockelszelle wird ein Rechtecksignal eines Signalgenerators angelegt. Die Frequenz des Signals wird in 100 Hz-Schritten variiert, die Leistung wird im ersten Versuchsteil mit dem Leistungsmesser „LaserMate-Q“ gemessen. Aufgrund der Einstellungsgenauigkeit beträgt die Schwankung auf die Frequenz dabei zuerst 2 Hz, ab 4000 Hz wurde diese nur noch auf 100 Hz Genauigkeit eingestellt. Der Fehler auf die Leistungsmessung ist durch das Binning der Digitalanzeige gegeben und beträgt  $1 \mu\text{W}/\sqrt{12} = 0.3 \mu\text{W}$ . Die Laserdiode wird mit 653 mA bei einer Temperatur von 34.9 °C betrieben.

Es wird erwartet, dass die Durchschnittsleistung des Lasers zuerst linear mit der Frequenz ansteigt, da die Anzahl der Peaks pro Zeitintervall proportional zur Frequenz ist. Außerdem wird erwartet, dass dieser Effekt in eine Sättigung geht, sobald die Sperrzeit der Pockelszelle zu gering wird, sodass keine Besetzungsinversion mehr auftritt. Für hohe Frequenzen wird erwartet, dass die Leistung wieder absinkt, da die Pockelszelle nicht beliebig schnell schalten kann.

### 5.1.2 Rohdaten



**Abbildung 21:** Rohdaten der Leistungsmessung mit aktiver Gütemodulation. Auf der horizontalen Achse befindet sich die eingestellte Frequenz, auf der vertikalen Achse die gemessene Leistung. Wie erwartet steigt die Leistung zuerst mit der Frequenz, erreicht ein Sättigungsniveau und fällt letztendlich steil ab.

Die Rohdaten (Abbildung 21) zeigen den erwarteten Verlauf. Zuerst steigt die Durchschnittsleistung mit der Frequenz an, wird gesättigt und fällt bei ca. 23 kHz auf das Ausgangsniveau ab.

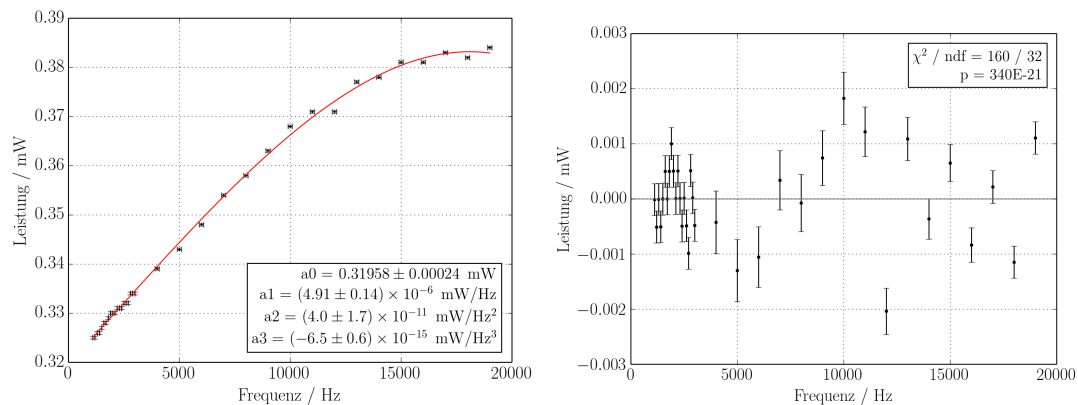
### 5.1.3 Auswertung

$a_3$	$(-6.5 \pm 0.6) \times 10^{-15} \text{ mW/Hz}^3$
$a_2$	$(4.0 \pm 1.7) \times 10^{-11} \text{ mW/Hz}^2$
$a_1$	$(4.9 \pm 0.14) \times 10^{-6} \text{ mW/Hz}$
$a_0$	$(0.31958 \pm 0.00024) \text{ mW}$

**Tabelle 3:** Anpassungsergebnisse an eine Funktion der Form  $P(f) = a_3 f^3 + a_2 f^2 + a_1 f + a_0$

Um an diese Daten ein Modell anzupassen, werden zunächst die Ausreißer bei niedrigen Frequenzen sowie die beiden Punkte bei 23 – 24 kHz entfernt.

Nun kann ein Polynom angepasst werden. Da kein analytisches Modell bekannt ist, welches dieses Verhalten beschreibt, wird der Grad des Polynoms arbiträr



**Abbildung 22:** Anpassung eines Polynoms zweiten Grades an die bereinigten Daten. Die Residuen streuen statistisch,  $\chi^2/\text{ndf} = 5.00$

gewählt, sodass die Residuen statistisch streuen. Dies ist bereits bei einem Polynom dritten Grades der Fall. Eine Anpassung an ein Polynom dritten Grades ist in Abbildung 22 zu sehen. Die Ergebnisse (Tabelle 3) werden in nächsten Versuchsteil zur Bestimmung der Peakleistung verwendet.

## 5.2 Bestimmung der Peakleistung

### 5.2.1 Aufbau und Durchführung

Der Aufbau ist dem des letzten Versuchsteils sehr ähnlich. Die einzige Änderung ist ein Photodetektor am Ende der optischen Bank, der anstelle des Leistungsmessers eingesetzt wird und über einen Verstärker mit dem Oszilloskop verbunden ist. Die Frequenz wird auf 1018 Hz fest eingestellt.

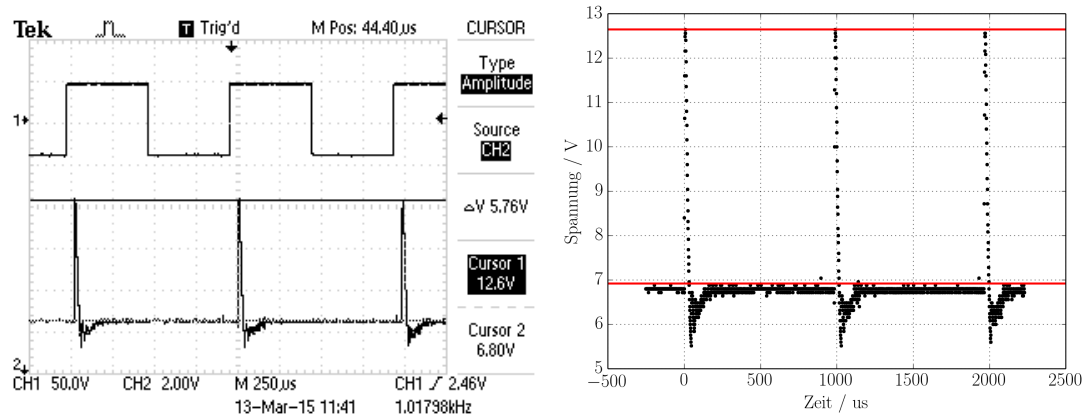
### 5.2.2 Rohdaten

Die Rohdaten sind in Abbildung 23 gezeigt. Es ist deutlich zu erkennen, dass ein Leistungspeak entsteht, sobald die Güte durch die Pockelszelle erhöht wird. Interessanterweise fällt die gemessene Spannung zwischen den Peaks (während die Güte gering ist) nicht auf 0V, sondern bleibt bei ca. 6.8V.

### 5.2.3 Auswertung

Anhand des vorherigen Versuches kann ausgesagt werden, dass die Durchschnittsleistung des Lasers bei 1018 Hz

$$P_{\text{avg}} = (324.60 \pm 0.28) \mu\text{W}$$



**Abbildung 23:** Links: Bildschirmfoto des Oszilloskops bei aktiver Gütemodulation. Kanal 1 (obere Linie) ist an den Pockelszellentreiber angeschlossen und invertiert, dadurch entspricht eine höhere Spannung einer höheren Güte. Kanal 2 zeigt die Messwerte des Photodetektors. Rechts: aufgearbeitetes Signal mit verschobener Zeitskala. Die horizontalen roten Linien bezeichnet Durchschnitts- und Peakspannung.

beträgt. Die Durchschnittsspannung und Maximalspannung innerhalb einer Periode können aus den Oszilloskopdaten berechnet werden. Zur Fehlerabschätzung wird der Stichprobenfehler des Rauschens berechnet, dass zwischen 300 und 900 µs auftritt:

$$\sigma = 35.8 \text{ mV}$$

Dieser Stichprobenfehler ist der Fehler auf den Maximalwert. Für den Fehler auf den Mittelwert wird der Stichprobenfehler durch die Wurzel der Anzahl der Datenpunkte in einer Periode dividiert. Daraus folgt

$$U_{\text{avg}} = (6.9171 \pm 0.0011) \text{ V}$$

$$U_{\text{peak}} = (12.64 \pm 0.04) \text{ V}$$

Die Peakleistung kann nun bestimmt werden und beträgt:

$$P_{\text{peak}} = P_{\text{avg}} \frac{U_{\text{peak}}}{U_{\text{avg}}} = (593.2 \pm 1.8) \mu\text{W}$$

Dass sowohl Durchschnitts- als auch Peakleistung so gering ausfallen, kann den Verlusten in der Pockelszelle zugesprochen werden, da diese auch ohne angelegte Spannung nicht vollkommen transmittiert.

## 6 Zusammenfassung

In mehreren Versuchsteilen wurden in diesem Versuch Eigenschaften des Neodym-YAG-Lasers untersucht. Nach der Suche nach einer geeigneten Diodentemperatur

wurde diese charakterisiert und ihr Schwellstrom  $((182.10 \pm 0.23) \text{ mA})$  und ihre Effizienz  $(0.8139 \pm 0.0013) \text{ W/A}$  bestimmt.

Mit diesen Daten konnte nun der Festkörperlaser aufgebaut und beobachtet werden.

Die Lebensdauer des  ${}^4F_{3/2}$ -Niveaus wurde bestimmt  $((250.7 \pm 2.5) \mu\text{s})$  und die Ausgangsleistung des Lasers wurde untersucht. Die Schwellleistung liegt bei  $(16.68 \pm 0.34) \text{ mW}$  und der Laser hat eine geringe Effizienz von 1.5 bis 3 %.

Das Spiking des Lasers wurde mit dem Oszilloskop beobachtet und qualitativ ausgewertet.

Die Frequenzverdopplung mit KTP wurde erfolgreich beobachtet, bis zu 1.7 % der Grundwellenleistung wurde in der höherfrequenten Welle beobachtet.

Mit der aktiven Gütemodulation konnten bei einer Durchschnittsleistung von  $(324.60 \pm 0.28) \mu\text{W}$  Peakleistungen von  $(593.2 \pm 1.8) \mu\text{W}$  gemessen werden.

## Literatur

- <sup>1</sup> Praktikumsanleitung: Versuch F08, Neodym-YAG-Laser, Teil 1. URL: [http://institut2a.physik.rwth-aachen.de/de/teaching/praktikum/Anleitungen/B\\_FK08-Nd-YAG\\_Teil1\\_12-03-2012.pdf](http://institut2a.physik.rwth-aachen.de/de/teaching/praktikum/Anleitungen/B_FK08-Nd-YAG_Teil1_12-03-2012.pdf) [Stand: 20.03.2015]
- <sup>2</sup> Praktikumsanleitung: Versuch F08, Neodym-YAG-Laser, Teil 2. URL: [http://institut2a.physik.rwth-aachen.de/de/teaching/praktikum/Anleitungen/B\\_FK08-Nd-YAG-Teil2\\_18-01-2012.pdf](http://institut2a.physik.rwth-aachen.de/de/teaching/praktikum/Anleitungen/B_FK08-Nd-YAG-Teil2_18-01-2012.pdf) [Stand: 20.03.2015]