

Physikpraktikum für Vorgerückte

# Festkörperlaser

Christian Walther <[cwalther@gmx.ch](mailto:cwalther@gmx.ch)>

Juli 2003

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zusammenfassung</b>	<b>2</b>
<b>2 Geräte</b>	<b>2</b>
<b>3 Hohlspiegelkavität</b>	<b>2</b>
<b>4 Planspiegelkavität mit Linse</b>	<b>4</b>
<b>5 Resonatorinterne Frequenzverdoppelung</b>	<b>5</b>
5.1 Leistungsmessung . . . . .	5
5.2 Transversale Moden . . . . .	6
<b>6 Passive Güteschaltung</b>	<b>7</b>
6.1 Auswirkungen der Pumpleistung . . . . .	9
6.2 Auswirkungen der Kavitätslänge . . . . .	10
<b>7 Passive Güteschaltung mit externer Frequenzverdoppelung</b>	<b>13</b>

# 1 Zusammenfassung

An einem diodengepumpten Nd:YVO<sub>4</sub>-Infrarot-Laser werden verschiedene Kavitätskonfigurationen untersucht und in ihrer Leistung verglichen. Ein KTP-Kristall erzeugt durch nichtlineare Frequenzverdoppelung aus dem infraroten grünes Licht, mit welchem die Struktur der transversalen Moden sichtbar wird. Ein Cr<sup>4+</sup>:YAG-Kristall als sättigbarer Absorber bringt den vorher kontinuierlich laufenden Laser durch passive Güteschaltung zum Aussenden von Pulsen, deren Parameter untersucht werden.

# 2 Geräte

Der Nd:YVO<sub>4</sub>-Laserkristall ist zusammen mit seiner Pumpdiode, die bei einer Wellenlänge von 808 nm emittiert, fest in einem Gehäuse eingebaut und mit einer Elektronik zur Steuerung der Pumpdiode verbunden. Seine hintere Seite ist für das Laserlicht mit einer Wellenlänge von 1064 nm hochreflektiv beschichtet, deshalb wird der Aufbau mit dem Kristall immer als Kavitätsendspiegel verwendet.

Vor dem Laserkristall können auf einer Schiene verschiedene Spiegel, Linsen und andere optische Kristalle montiert werden. Zur groben Ausrichtung der Bauelemente wird ein roter Laserpointer verwendet, dessen Strahl parallel zur Schiene ausgerichtet wird. Das einzustellende optische Element wird dann gekippt, bis der Laserstrahl auf seiner Oberfläche senkrecht in sich gespiegelt wird. Die Feineinstellung der Ausrichtung erfolgt später im Betrieb des Lasers.

Zur Leistungsmessung stehen einerseits ein thermisch arbeitendes Powermeter zur Verfügung, das ziemlich langsam reagiert, aber über einen grossen Wellenlängenbereich funktioniert und auf unter einem Milliwatt genau anzeigt, andererseits eine Photodiode an einem digitalen Oszillographen für die zeitliche Untersuchung der Signale.

# 3 Hohlspiegelkavität

Die einfachste Kavität besteht aus dem Laserkristallaufbau am einen und einem Hohlspiegel am anderen Ende (Abbildung 1). Ein Spiegel, der für das Pumplicht hochtrans-

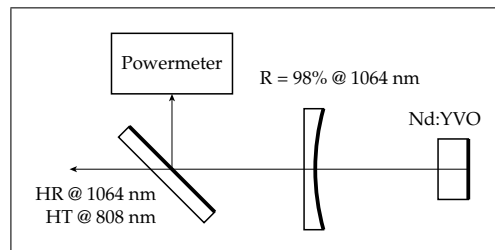
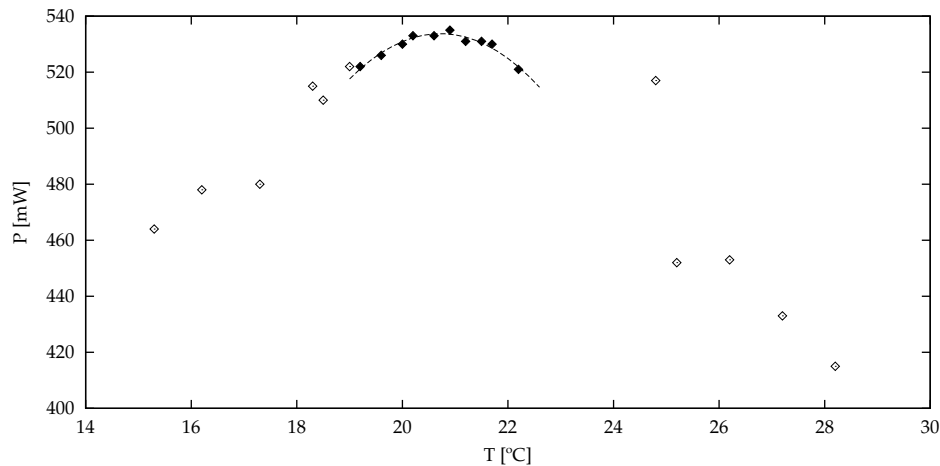


Abbildung 1: Hohlspiegelkavität

parent und für das Laserlicht hochreflektierend ist, lenkt den Laserstrahl auf das Powermeter. Nach der Grobausrichtung mit dem Laserpointer und gegebenenfalls leichtem Wackeln am Hohlspiegel springt dieser Laser recht leicht an. Zur qualitativen

Funktionskontrolle kann eine fluoreszierende Karte eingesetzt werden, die das infrarote in sichtbares Licht umwandelt. Als optimale Kavitätslänge stellte sich ein Abstand von ca. 60 mm zwischen Laserkristallgehäuse und Hohlspiegel heraus.

Die Wellenlänge der Pumpdiode hängt von der Temperatur ab. Diese kann deshalb mit der Pumpdiodensteuerung elektronisch geregelt werden. Um die optimale Betriebstemperatur zu finden, wird an der Steuerung der Temperaturbereich in kleinen Schritten durchgeföhren und jeweils mit dem Powermeter die Laser-Ausgangsleistung gemessen. Das Resultat zeigt Abbildung 2: Ein Maximum in der Nähe von 21 °C. Um

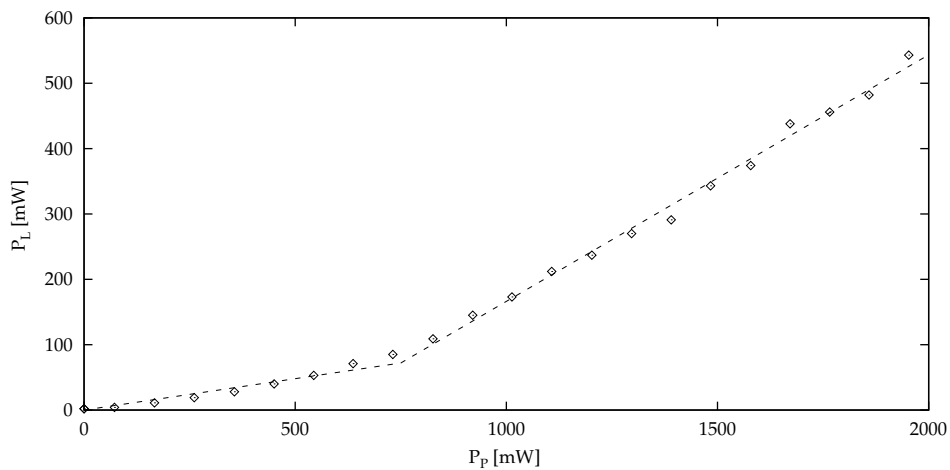


**Abbildung 2:** Temperaturabhängigkeit der Laserleistung

das Maximum genauer zu bestimmen, wurden einige Datenpunkte um das Maximum herum ausgewählt (ausgefüllte Punkte) und eine Parabel daran gefittet. Deren Scheitel liegt bei 20,7 °C. Diese Betriebstemperatur wurde für alle nachfolgenden Versuche verwendet.

Um die Laserleistung als Funktion der Pumpleistung zu messen, wurde der Strom durch die Pumpdiode in Schritten von ca. 100 mA von 200 mA bis zum Maximum von ca. 2400 mA hochgeföhren und jeweils mit dem Powermeter die Ausgangsleistung gemessen. Der Diodenstrom wurde dann mit Hilfe der in der Anleitung gegebenen Kennlinie der Diode, welche (innerhalb der Ablesegenauigkeit von ca. 10–20 mW) sehr gut durch  $P_P = \max(0, -310 \text{ mW} + 0,95 \frac{\text{mW}}{\text{mA}} \cdot I)$  modelliert werden kann, in die Pumpleistung umgerechnet.

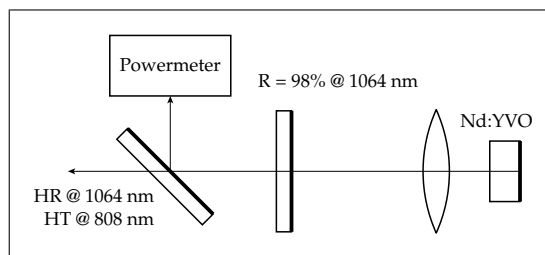
Das Resultat ist zu sehen in Abbildung 3. Es ist deutlich sichtbar, dass die Laserleistung ab einer Schwelle von ca. 750 mW linear mit der Pumpleistung zunimmt, mit einem Wirkungsgrad (Slope Efficiency) von ca. 38%. Dass die Leistung schon unterhalb der Schwelle grösser als Null ist, was sie nach der Theorie nicht sollte, dürfte zum einen daran liegen, dass der Trennspiegel das Pumplicht nicht vollständig ausfiltert, zum anderen ist darin der in Laserrichtung emittierte Teil der spontanen Emission im Laserkristall eingeschlossen.



**Abbildung 3:** Laserleistung als Funktion der Pumpleistung bei der Hohlspiegelkavität

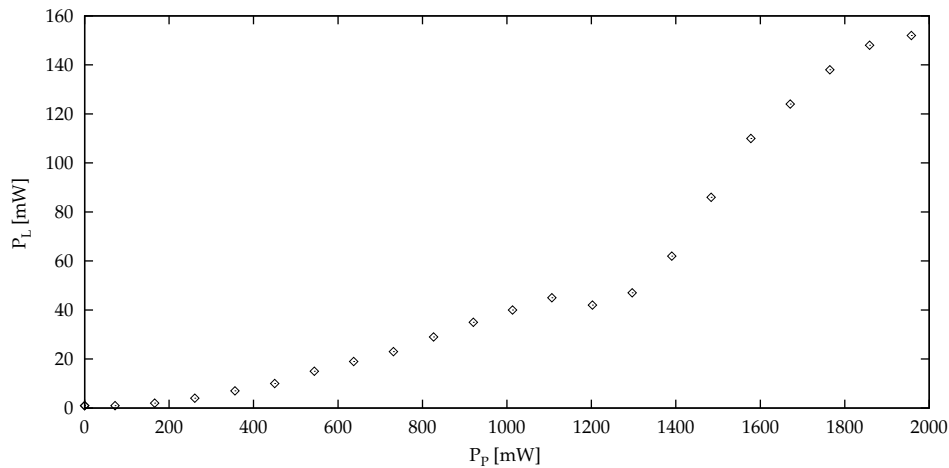
## 4 Planspiegelkavität mit Linse

Eine Kavität mit zwei Planspiegeln liegt theoretisch am Rand des Stabilitatsgebietes, aber mit einer zusätzlichen fokussierenden Linse können stabile Moden erreicht werden (Abbildung 4).



**Abbildung 4:** Planspiegelkavität mit Linse

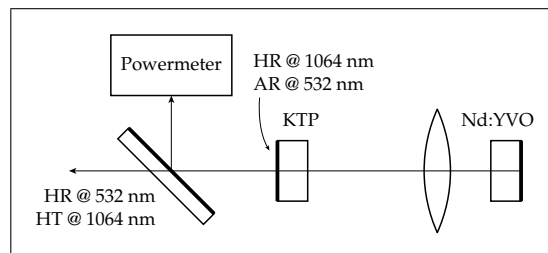
Die optimale Länge dieser Kavität lag bei einem Abstand von ca. 25 mm zwischen Spiegel und Laserkristallgehause. Die zweitbeste Leistung brachte ein Abstand von ca. 40 mm. Die Messung der Slope Efficiency wie oben brachte das folgende Resultat (Abbildung 5): Aufgrund der zusätzlichen Verluste durch die Linse ist die Ausgangsleistung niedriger. Ebenfalls durch die erhohnten Verluste verschob sich die Pumpschwelle hinauf auf ca. 1300 mW. Die Slope Efficiency liegt im Bereich von 20% oder etwas darunter, lässt sich aber nicht genau bestimmen, weil oberhalb der Schwelle nur wenige Datenpunkte vorhanden sind, und sich die Kurve nach oben abzuflachen scheint.



**Abbildung 5:** Laserleistung als Funktion der Pumpleistung bei der Planspiegelkavität mit Linse

## 5 Resonatorinterne Frequenzverdoppelung

Um effizient nichtlineare Frequenzverdoppelung zu betreiben, muss die Intensität möglichst hoch sein. Es bietet sich deshalb an, den frequenzverdoppelnden Kristall innerhalb der Kavität zu platzieren, wo die Intensität ein Vielfaches der ausgekoppelten Intensität ist. Beim hier verwendeten KTP-Kristall ist die eine Seite für 1064 nm hochreflektierend beschichtet, der Kristall kann also direkt anstelle des Auskoppelspiegels in die Planspiegelkavität mit Linse montiert werden. Ausgekoppelt wird damit nicht das infrarote, sondern direkt die eine Hälfte des grünen Lichts (die andere Hälfte geht in die Kavität zurück und geht dort verloren). Der Ablenkspiegel zum Powermeter wird hier hochreflektierend für 532 nm und hochtransmittierend für 1064 nm gewählt (Abbildung 6).



**Abbildung 6:** Kavität für resonatorinterne Frequenzverdoppelung

### 5.1 Leistungsmessung

Da die auf das Powermeter auffallende grüne Leistung bei diesem Versuch sehr klein ist, ergaben sich einige Schwierigkeiten bei der Messung. Als erstes fiel auf, dass sich die Messwerte je nach Standort des Experimentators im Bereich von mW änderten.

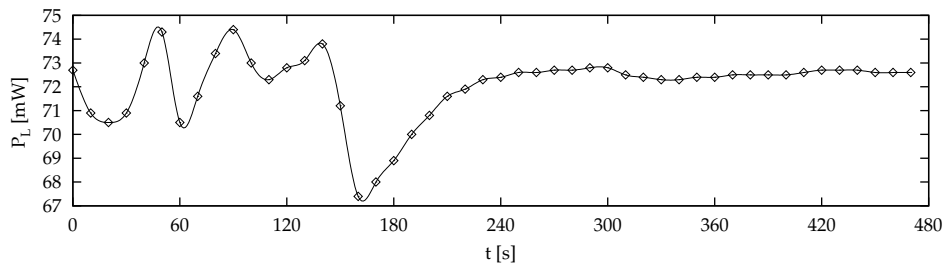
Der Verdacht, dass der Grund dafür die Temperaturstrahlung der Körperwärme ist, wird bestätigt durch folgende Überschlagsrechnung: Der Grundumsatz zur Erhaltung der Körpertemperatur des Menschen ist ca. 80 W. Wird der Körper zur Punktquelle idealisiert, so ist die in einem Abstand von 1 Meter auf einer kreisförmigen Fläche von 3 cm Durchmesser gemessene Leistung

$$80 \text{ W} \cdot \frac{\pi(1.5 \text{ cm})^2}{4\pi(1 \text{ m})^2} = 4.5 \text{ mW}.$$

Dieses Problem liess sich schliesslich durch Abschirmung mit einer am Experimentierplatz zufällig vorhandenen Metallplatte und einem papierenen Tunnel über dem Strahlengang lösen.

Zweitens zeigte sich, dass das Powermeter auch noch eine hohe Leistung misst, wenn die Kavität so lang gemacht wird, dass kein grünes Licht mehr von Auge sichtbar ist. Der Verdacht drängt sich auf, dass trotz der beiden Filterspiegel noch eine signifikante Menge Infrarot bis zum Detektor durchdringt.

Drittens zeigte das Powermeter eigentümliche unregelmässige Schwankungen um ca. 0.2 mW auf Minutenskala. Ein Beispiel einer solchen Schwankung zeigt Abbildung 7.

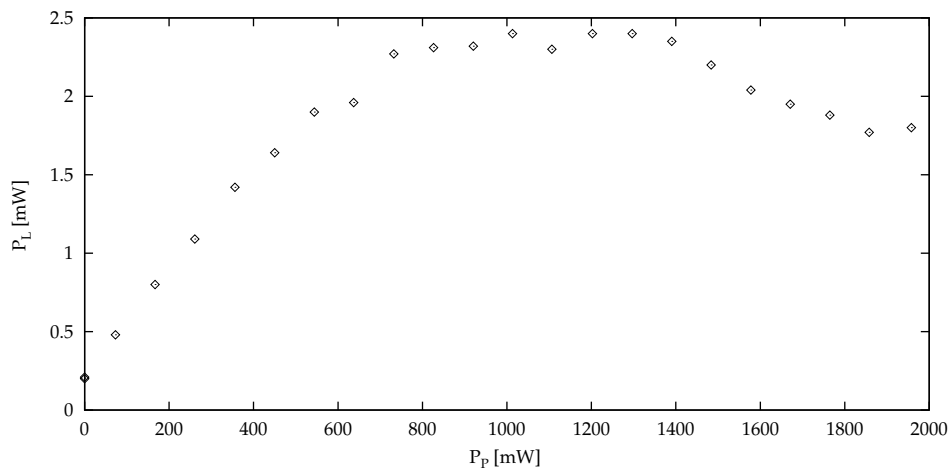


**Abbildung 7:** Zeitliche Schwankung der Leistungsmessung

Die trotz dieser Schwierigkeiten gemessene Slope Efficiency ist zu sehen in Abbildung 8. Hier ist wegen der nichtlinearen Frequenzverdoppelung kein linearer Zusammenhang mehr zu erwarten, aber trotzdem sollte die Ausgangsleistung wenigstens monoton von der Pumpleistung abhängen. Dass dies hier nicht der Fall ist, könnte mit einem Modensprung zusammenhängen (beim Erhöhen der Pumpleistung wird plötzlich eine andere transversale Mode maximal verstärkt), allerdings wäre dann eher eine sprunghafte Änderung zu erwarten. Wegen der erwähnten Schwierigkeiten lässt sich aber nicht viel Klares aussagen.

## 5.2 Transversale Moden

Im auf einen weissen Hintergrund projizierten grünen Licht sind die transversalen Moden des Lasers gut beobachtbar. Allerdings bringt dieser Laser keine besonders grosse Vielfalt an Moden hervor, alle bestehen in irgendeiner Weise aus horizontalen Streifen. Vertikale Streifen oder rotationssymmetrische Moden waren keine zu beobachten. Durch Kippen des KTP-Kristalls um die horizontale Achse kann die Zahl und der Abstand der Streifen verändert werden, Kippen um die vertikale Achse bewirkt eine Art



**Abbildung 8:** Frequenzverdoppelte Laserleistung als Funktion der Pumpleistung bei resonatorinterner Frequenzverdoppelung

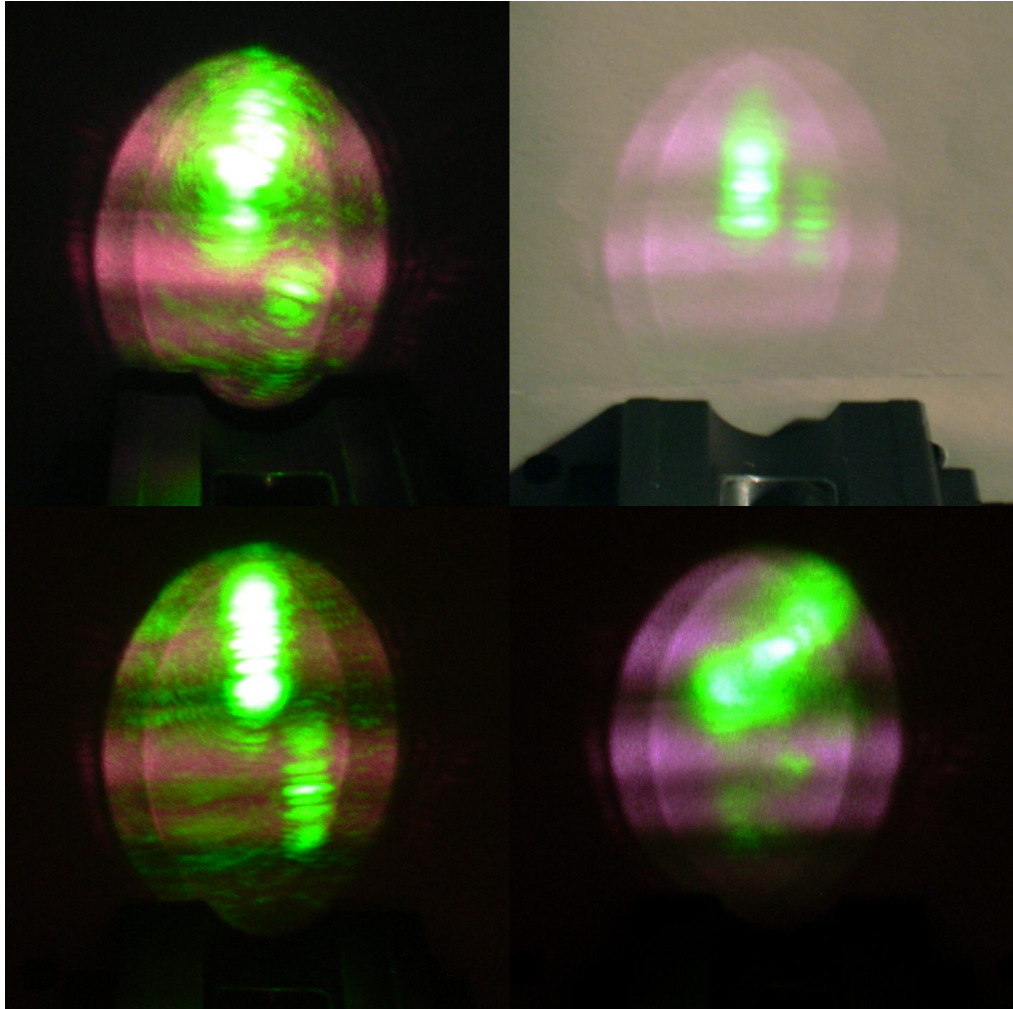
seitliche Scherung des Bildes. Die Präferenz für horizontale Streifen könnte daher rühren, dass auch die Pumpe ein solches horizontales Streifenmuster aufweist und daher im Laserkristall eine mit horizontalen Streifen modulierte Inversion vorhanden ist, in der horizontal gestreifte Moden besonders gut verstärkt werden – vorausgesetzt, man kann aus der Pumplichtverteilung fern vom Kristall überhaupt auf die Verteilung im Kristall schliessen.

Abbildung 9 zeigt einige mit einer Digitalkamera aufgenommene Bilder der transversalen Moden. Zu beachten ist, dass das CCD der Kamera Infrarot sieht – was in den Bildern violett erscheint, ist in Wirklichkeit infrarot und also fürs menschliche Auge unsichtbar. Die breiten violetten Streifen sind die erwähnten Streifen der Pumpe, der infraroten Laserstrahl ist so schmal, dass er von den grünen Flecken übertönt wird. Der schwächere grüne Fleck rechts unterhalb des Hauptflecks stammt von der Rückseite des Ablenkspiegels, in den Digitalkamera-Bildern ist darin die Modenstruktur meist besser zu erkennen, weil der Hauptfleck überbelichtet ist.

## 6 Passive Güteschaltung

Um mit dem Laser Pulse zu erzeugen, kann man einen sättigbaren Absorber einsetzen, der die Resonatorverluste intensitätsabhängig macht. Als Absorber wird hier ein  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG-Kristall eingesetzt, dessen Chrom-Ionen zunächst Licht absorbieren, dann gesättigt bleiben, bis sie nach  $3.5 \mu\text{s}$  durch Fluoreszenz wieder in den Grundzustand fallen.

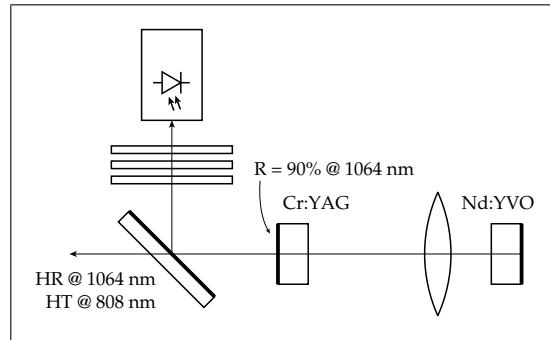
Der Cr:YAG-Kristall ist auf der einen Seite 90%-reflex-beschichtet und kann somit als Auskoppelspiegel dienen. Er wird an derselben Stelle wie vorher der KTP-Kristall in die Planspiegelkavität mit Linse eingesetzt. Um die Pulse zeitaufgelöst zu betrachten, wird diesmal als Detektor die Photodiode am Oszillographen benützt. Um die auf die Photodiode fallende Intensität möglichst gross zu haben, aber trotzdem noch im linearen Antwortbereich, kann vor die Diode eine variable Anzahl von verschiedenen



**Abbildung 9:** Transversale Moden



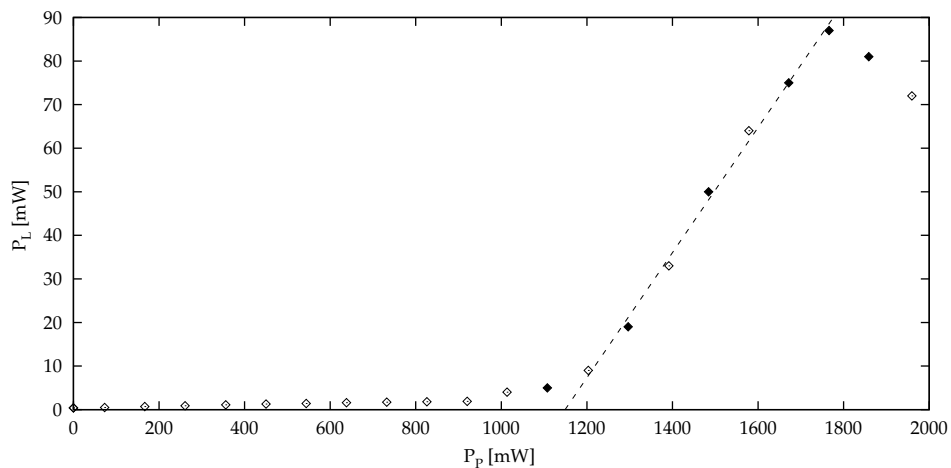
starken Abschwächfiltern gestellt werden (Abbildung 10).



**Abbildung 10:** Kavität für passive Güteschaltung

## 6.1 Auswirkungen der Pumpleistung

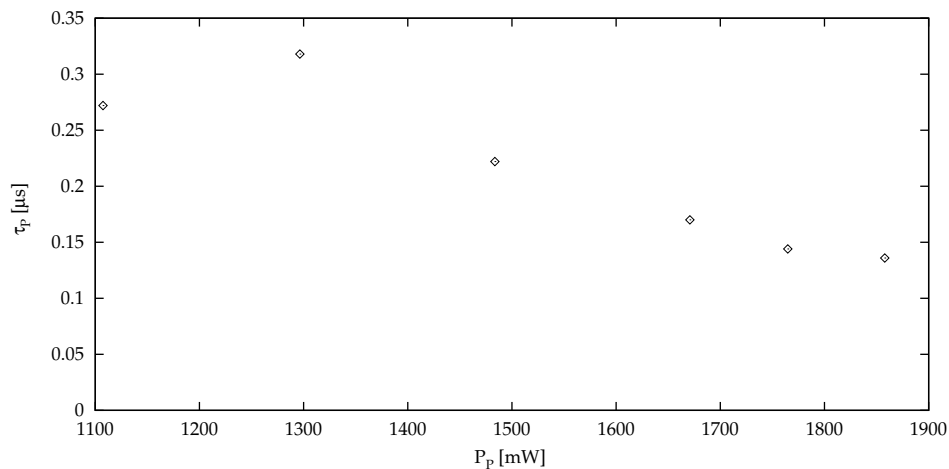
Nach dem Optimieren der Kavitätslänge – was ein nicht ganz einfaches Unterfangen war, da dieser Laser ziemlich empfindlich auf geometrische Veränderungen reagiert, erst nach langem herumprobieren überhaupt anspringt und damit die Reproduktion von früher erreichten Resultaten schwer macht – sollten die Abhängigkeit der Durchschnittsleistung und der Pulsdauer von der Pumpleistung gemessen werden. Die optimale Kavitätslänge war erreicht bei einem Abstand zwischen den Fassungen von Linse und Cr:YAG von 9 mm, entsprechend einer gesamten Kavitätslänge von ca. 41 mm. Die Durchschnittsleistung wird wie bei den vorigen Versuchen mit dem Powermeter gemessen, das Resultat ist zu sehen in Abbildung 11: Deutlich zeigt sich die Schwelle



**Abbildung 11:** Zeitgemittelte Laserleistung als Funktion der Pumpleistung bei passiver Güteschaltung

bei ca. 1100 mW mit nachfolgendem linearem Anstieg. Der Knick bei 1800 mW fällt

aus dem Rahmen – hier könnten ebenfalls Modensprünge hineinspielen, aber mit nur zwei Datenpunkten lässt sich das schwer beurteilen. Für die in [Abbildung 11](#) ausgefüllten Datenpunkte wurde auch die Pulsdauer bestimmt. Dazu wurde das Powermeter durch die Photodiode mit allen Abschwächfiltern davor ersetzt und dann die Filter sukzessive entfernt, bis das gepulste Signal auf dem Digital-Oszillographen deutlich erkennbar war (aber immer noch im linearen Antwortbereich). Mit dem Trigger wurde ein Puls in der Mitte des Bildschirms zentriert und direkt am Oszillographen eine Mittelung über 16 aufeinanderfolgende Pulse durchgeführt. Die erhaltene Kurvenform (an ca. 2500 Punkten gesampelt) wurde dann auf einen Computer übernommen und von dort aus weiterverarbeitet. Ein Matlab-Programm bestimmte automatisch Hintergrund und Pulshöhe und mass damit die Halbwertsbreite der Pulse aus: [Abbildung 12](#). Abgesehen vom ersten Punkt, der knapp an der Schwelle liegt, zeigt sich, dass die Puls-

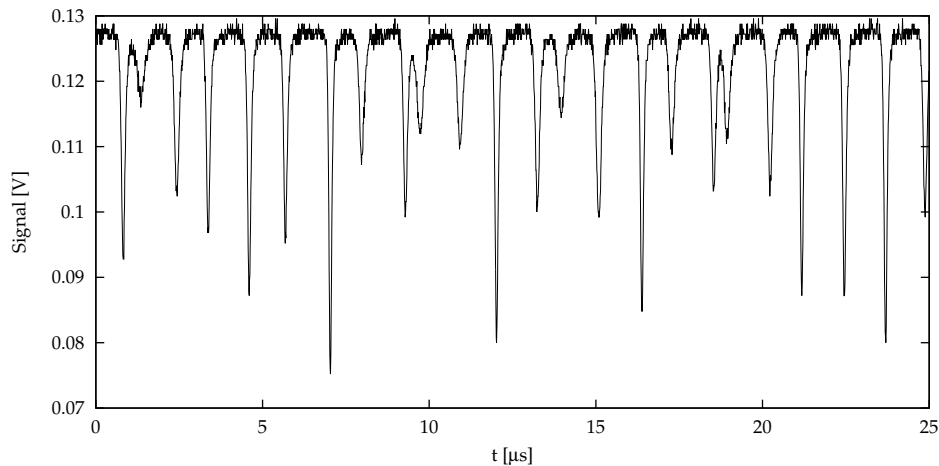


**Abbildung 12:** Pulsdauer (FWHM) als Funktion der Pumpleistung

dauer mit der Pumpleistung abnimmt. Das ist konsistent mit der Theorie, die besagt, dass die Pulsdase ungefähr umgekehrt proportional zur Modulationstiefe des sättigbaren Absorbers (Differenz zwischen ungesättigten und gesättigten Verlusten) ist. Je höher die Pumpleistung, desto höher die Intensität im Resonator und desto besser wird der Absorber gesättigt. Eine Aussage über die Variation der Pulsdauer zwischen einzelnen Pulsen kann hier leider nicht gemacht werden, da die Mittelung über viele Pulse schon vor der Datenaufzeichnung im Oszillographen stattfand.

## 6.2 Auswirkungen der Kavitätslänge

Für verschiedene Kavitätslängen wurde die Repetitionsrate, Pulsdauer, Pulsenergie und Spitzenleistung bestimmt. Dazu wurde mit dem Powermeter die Durchschnittsleistung gemessen sowie mit der Photodiode (mit passenden Abschwächfiltern) je drei Momentaufnahmen von ungefähr 25 Pulsen gemacht. Ein Beispiel einer solchen Aufnahme zeigt [Abbildung 13](#). Für die Pulsdauerbestimmung wurden ausserdem zeitlich höher aufgelöste Aufnahmen von einzelnen Pulsen genommen, allerdings zeigte sich, dass die Variation der Pulsdauer zwischen den einzelnen Pulsen grösser ist als die



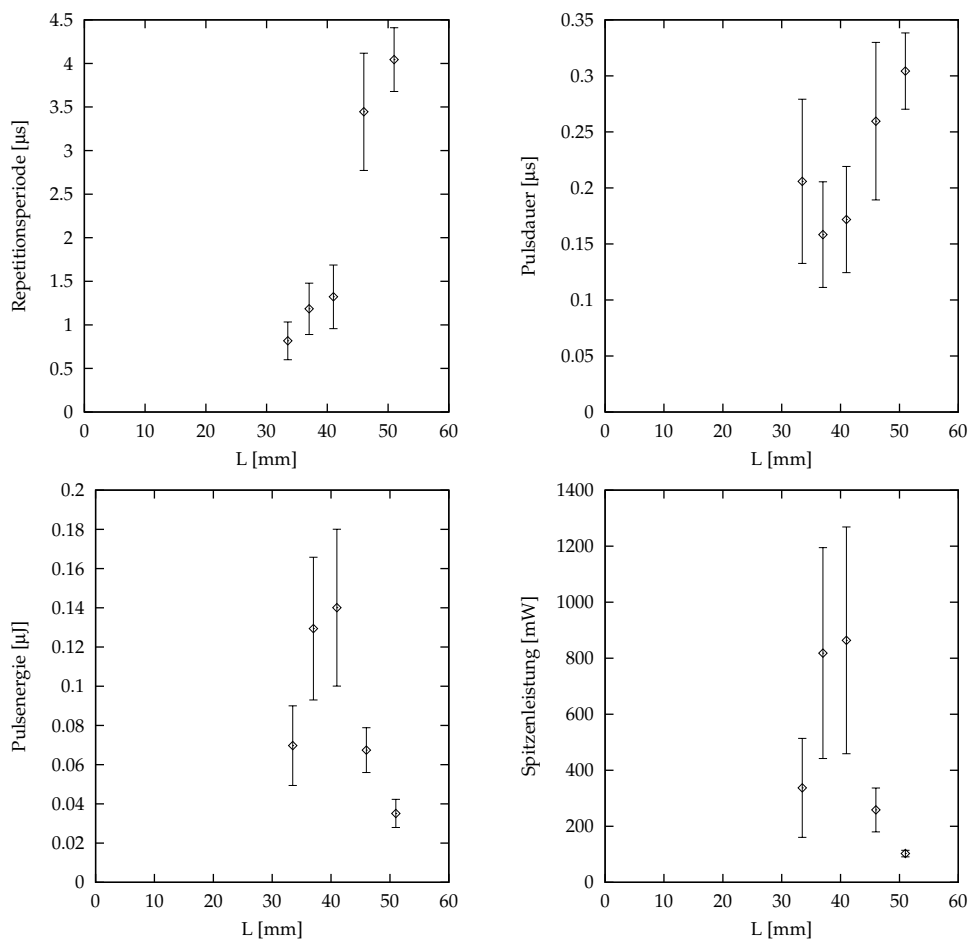
**Abbildung 13:** Momentaufnahme einiger Laserpulse (der Vorverstärker der Photodiode invertiert das Signal)

Zeitauflösung der Viel-Puls-Aufnahmen, weshalb für die Analyse nur diese verwendet wurden.

Zur Auswertung dieser recht grossen Datenmengen wurde wieder ein Matlab-Programm eingesetzt. Zunächst werden durch Vergleich der Datenpunkte mit ihren Nachbarn die Peaks identifiziert (was einige Feinabstimmung der Grösse der betrachteten Nachbarschaft benötigte, bis alle Peaks und kein Rauschen richtig identifiziert wurden). Punkte, die mehr als eine gewisse Distanz von den Peaks entfernt sind, werden zum Hintergrund gezählt und das Mittel all dieser Punkte als Hintergrundsignal festgelegt. Das Mittel aller Datenpunkte entspricht dem Signal der Durchschnittsleistung. Durch eine affine Transformation werden das Hintergrundsignal auf 0 und das Durchschnittssignal auf die gemessene Durchschnittsleistung transformiert, wodurch die Kurven eine quantitativ geeichte Leistungsskala bekommen. Für jeden einzelnen Puls werden nun Pulsdauer (volle Halbwertsbreite), Repetitionsperiode (Zeitabstand zum nächsten Puls), Pulsenergie (Integral) und Spitzenleistung (Maximum) berechnet und diese Daten über alle drei Schnappschüsse gesammelt. Als Endresultat kommen Mittelwert und Standardabweichung dieser Datensätze heraus, dargestellt in Abbildung 14.

Als erstes fällt auf, dass der Laser ziemlich instabil arbeitet, ersichtlich an den breiten Fehlerbalken und auch am Pulszugbeispiel (Abbildung 13) – alle Pulsparameter schwanken zeitlich ziemlich stark.

Des Weiteren wird klar, dass diese Messungen kaum zur Bestätigung irgendwelcher theoretischer Vorhersagen taugen. Die Änderung der Kavitätslänge wirkt sich zwar auf die Umlaufzeit aus, aber auch auf andere Resonatorparameter, insbesondere die Fokussierung des Strahls im Cr:YAG und damit auf die Modulationstiefe des Absorbers, und das in einer kaum irgendwie einfach zu modellierenden Art. Nach der Theorie ist die Repetitionsperiode proportional zur Modulationstiefe, die Pulsdauer proportional zur Umlaufzeit und umgekehrt proportional zur Modulationstiefe, die Pulsenergie proportional zur Modulationstiefe und die Spitzenleistung bis auf einen

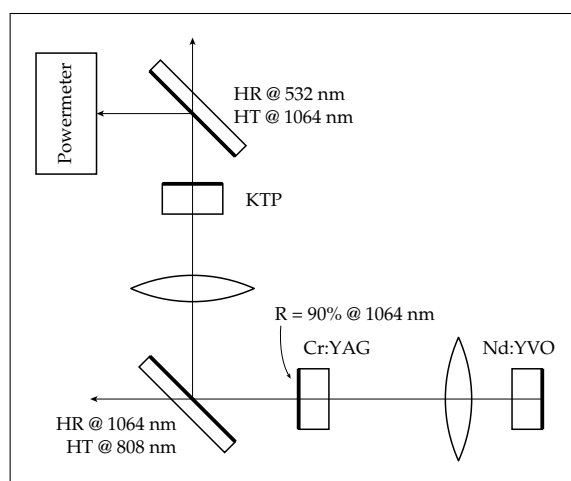


**Abbildung 14:** Pulsparameter als Funktion der Kavitätslänge

konstanten Faktor für die Pulsform der Quotient aus Pulsenergie und Pulsdauer. Offensichtlich ist der Resonator in der Nähe von 40 mm am stabilsten und die Modulationstiefe am grössten, und dieser Effekt dominiert alle Messungen.

## 7 Passive Güteschaltung mit externer Frequenzverdoppelung

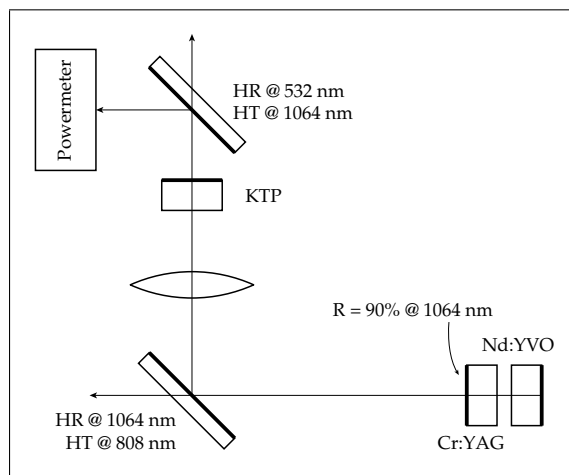
Die hohe Spitzenleistung der gütegeschalteten Pulse kann für die Frequenzverdoppelung im KTP-Kristall ausgenutzt werden. Dazu dient der Versuchsaufbau nach Abbildung 15. Dieser Versuch war jedoch nicht sehr erfolgreich. Auch nach langem Herum-



**Abbildung 15:** Passive Güteschaltung mit externer Frequenzverdoppelung

probieren und mehrfachen Ab- und Wiederaufbau der Anordnung konnten die hohen Infrarot-Ausgangsleistungen des vorigen Versuches nicht mehr reproduziert werden, die höchste erreichte Durchschnittsleistung lag bei 135 mW. Damit wurde im Versuchsaufbau von Abbildung 15 nur 1 mW grünes Licht gemessen, was kaum über dem Messfehler des Powermeters liegt.

Als Versuch, dennoch einen funktionierenden gütegeschalteten frequenzverdoppelten Laser zu erreichen, wurde in diesem Aufbau die Linse entfernt und der Cr:YAG-Kristall so nahe wie möglich an den Laserkristall platziert (Abbildung 16). Überraschenderweise sprang diese Planspiegelkavität nach kurzem Wackeln tatsächlich an – offenbar bewirkten die thermischen Linsen und eventuell der Kerr-Effekt in den Kristallen eine genügend starke Fokussierung, um die Kavität stabil zu machen. An infraroter Durchschnittsleistung wurden so ca. 300 mW produziert, nach der Frequenzverdoppelung blieben immerhin noch 2.3 mW Grün.



**Abbildung 16:** Passive Güteschaltung in kurzer Planspiegelkavität mit externer Frequenzverdopplung