

LASER4DIY - Nd:YVO4 Laserquelle

[deutsche Version] [to the English version]

Aufbau des Lasers

Als Laserquelle für das LASER4DIY-Projekt soll ein diodengepumpter Festkörperlaser mit einem neodym-dotierten Yttrium-Vanadat Kristall (Nd:YVO₄) verwendet. Dieser weitverbreitete Laser eignet sich besonders, da der Nd:YVO₄ Kristall kostengünstig, einfach zu beschaffen und zudem, durch Verwendung der sogenannten Bounce-Geometrie, sehr leistungsstark ist. In Abbildung 1 ist der Aufbau des verwendeten Lasersystems dargestellt, welcher sich stark an der Veröffentlichung von *Thomas und Damzen, 2011* orientiert.[1]

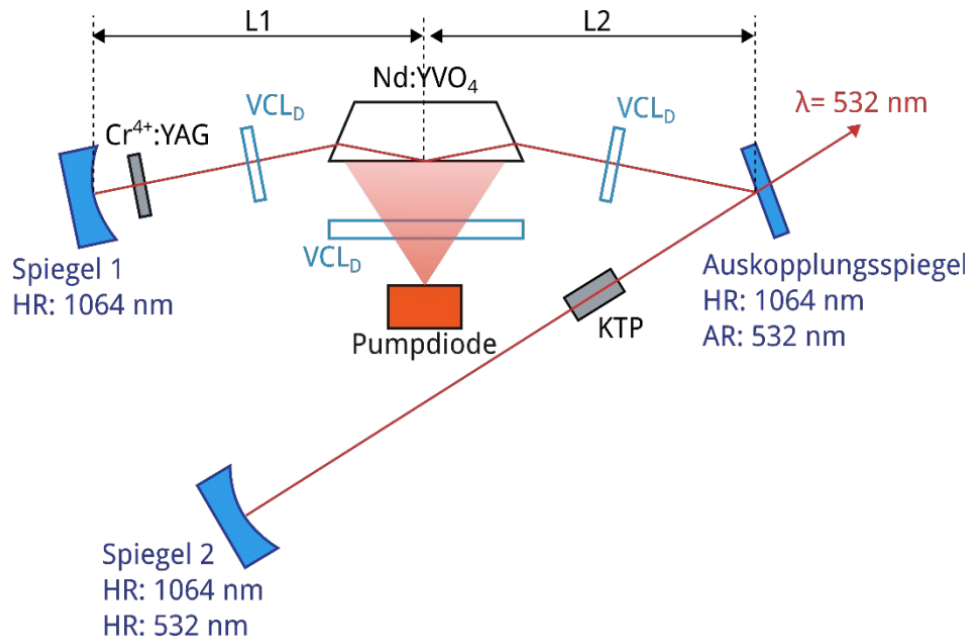


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Nd:YVO₄-Lasers mit passiven Q-switch und einem Cr⁴⁺:YAG-Sättigungsabsorber-Kristall und einem zusätzlichen KTP-Kristall als Frequenzverdoppler nach [1]

Der trapezförmige Nd:YVO₄-Kristall besitzt die Maße von 15 x 5 x 2 mm. Um eine parasitäre interne Reflexion im Kristall zu vermeiden, sind die 5 x 2 mm Flächen um 4° nach innen geneigt und besitzen zudem eine Antireflexionsbeschichtung (AR-Beschichtung) für eine Wellenlänge von 1064 nm. Der zylindrische Laserdiodenbarrn emittiert eine Wellenlänge von 808 nm mit einer maximalen optischen Leistung P = 60 W bei einem Wirkungsgrad von 50 %. Mithilfe einer vertikalen zylindrischen Linse (VCLD) wird die Pumpstrahlung mit einer Brennweite von 10 mm auf den Kristall gerichtet. Wenn der Nd:YVO₄-Kristall eine Strahlung bei = 1064 nm emittiert, wird dabei Restenergie in Form von Wärme freigesetzt. Da sich pro 3 K Temperaturveränderung in der Laserdiode die emittierte Wellenlänge um 1 nm von der optimalen Wellenlänge von 808 nm für den Nd:YVO₄-Kristall verschiebt, muss die Laserdiode und der Kristall konstant auf einer Temperatur gehalten werden. Diese Wellenlängenverschiebung führt zu Leistungsverlusten und sollte daher vermieden werden. Hierfür werden Kupferplatten an den Seiten des Kristalls angebracht. Mithilfe eines Peltier-Elements und einem CPU-Kühler werden die Kupferplatten auf einer konstanten Temperatur gehalten, wodurch aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit von Kupfer der Kristall während des Betriebs ebenfalls auf einer konstanten Temperatur gehalten werden kann.

Um hohe Spitzenleistungen des Lasers zu erreichen, wird ein Q-switch eingesetzt. Dieser sättigbare Absorber ist ein Cr⁴⁺:YAG-Kristall mit den Maßen 5 x 5 x 3 mm und wird in der Nähe des Spiegels 1 platziert.

Trifft die vom Nd:YVO₄-Kristall emittierte Strahlung von = 1064 nm auf eine Kupferplatte, so wird die Strahlung kaum vom Kupfer absorbiert, da Kupfer im Infrarotbereich (= 780 nm bis 1 mm) die Strahlung zu 95 % reflektiert. Daher muss im Resonator zusätzlich ein Frequenzverdoppler eingebaut werden, welcher die Wellenlänge von = 1064 nm auf = 532 nm halbiert. Bei dieser Wellenlänge ist der Absorptionsgrad von Kupfer um das 10fache höher, wodurch die hohe Energiezufuhr des Lasers das Kupfer stark erhitzt bis es schließlich verdampft.

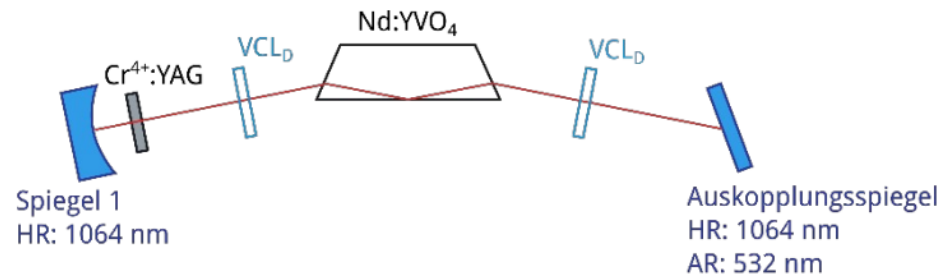
Der hierfür verwendete Frequenzverdoppler ist ein Kaliumtitanylphosphat (KTP)-Kristall, welcher eine Größe von 3 x 3 x 5 mm besitzt. Wie in Abbildung 1 dargestellt, wird der vom Nd:YVO₄ emittierte Strahl durch einen Reflexionsspiegel abgelenkt und anschließend durch den KTP-Kristall geleitet. Durch einen Auskopplungsspiegel (engl. OC=Output coupler) mit einer hohen Reflexion (HR) bei 1064 nm und einer Antireflexion (AR) von 532 nm wird der Laserstrahl in der gewünschten Wellenlänge aus dem Resonator geleitet.

Da die Pumpstrahlung nur einen Teilbereich des Nd:YVO₄-Kristalls anregt, bildet sich aufgrund des Temperaturgradienten eine thermische Linse aus. Je nachdem wie groß der Temperaturgradient ist, entsteht ein unterschiedlicher Brechungsindex, wodurch die emittierte Strahlung mit einem anderen Winkel aus dem Kristall austritt. Anhand dieses Winkels werden dann die Längen L1 und L2 (siehe Abbildung 1) eingestellt um einen leistungsstarken Laserstrahl zu erzielen.

Simulation der Laserquelle

Die Simulation wurde mit dem Programm LASCAD durchgeführt. Mithilfe dieses Programm ist eine Finite Elemente Analyse (FEA) über die thermischen Effekte des Nd:YVO₄-Kristalls möglich, wodurch die genaue Geometrie des Resonators ermittelt werden kann. Dabei sind vor allem die Abstände des Spiegels 1 und des Auskopplungsspiegels vom Kristall (siehe Abbildung 1) für die spätere Konstruktion von Bedeutung. Zudem kann mithilfe des Simulations-programmes die mittlere Leistung im CW (continuous wave)-Betrieb, als auch die Spitzen-leistung mithilfe des Q-switch der ausgewählten Laserquelle berechnet werden. Die Simulation wurde ohne eine Frequenzverdoppelung durchgeführt, da diese für die Geometrie des Lasers von untergeordneter Bedeutung ist.

Um die Simulation der Laserquelle mit dem verwendeten Programm durchführen zu können, musste der Versuchsaufbau vereinfacht modelliert werden. Es wurde zum einen die Simulation mit einem rechteckigen Kristall anstelle eines Trapezes durchgeführt und zum anderen nahm das Programm eine Anti-Reflexion im Kristall von 100 % an, welche in der Realität bei etwa 99,9 % liegt. Außerdem war es nicht möglich, die Bounce-Geometrie im Kristall zu simulieren. Hierfür wurde, wie in Abbildung 2 zu erkennen ist, der Laserstrahl möglichst nah auf die Unterkante des Kristalls gesetzt, da in diesem Bereich der Temperaturgradient im Kristall am besten mit der realen Bounce-Geometrie vergleichbar ist. Bei der Bounce-Geometrie ist die thermische Linse großflächig und verläuft einmal durch den gesamten Strahlengang. Dabei ist die thermische Spannung an jedem Punkt im Strahlengang gleich, wodurch die thermische Linse gut kompensiert wird und somit eine hohe Strahlenleistung erzielt werden kann. Bei einem rein seitlich gepumpten Laser ist die thermische Linse sehr stark ausgeprägt und die thermische Spannung im Kristall variiert je nach Position, was zu einem hohen Leistungsverlust des generierten Laserstrahls führt. Der Wirkungsgrad liegt dabei bei nur 10 %, wohingegen die Bounce-Geometrie einen Wirkungsgrad von 50 % erzielt. Somit musste für die Simulation eine bessere Anpassung erfolgen, um näherungsweise die Bounce-Geometrie simulieren zu können. Da bei der Bounce-Geometrie der Laser mit einem schrägen Winkel im Kristall auftritt und dort mit dem gleichen Winkel wieder reflektiert wird, kann die Geometrie des Lasers an dieser Stelle, wie in Abbildung 3 gezeigt, betrachtet werden. Wird diese Geometrie nun an der Kristallfläche gespiegelt entsteht ein geradlinig verlaufender Laser, mit gleichverteilter thermischer Spannung im Kristall. Diese Betrachtung kann in der Simulation realisiert werden, in dem der Kristall seitlich am untersten Rand gepumpt wird (siehe Abbildung 2). In diesem Pumpbereich entsteht eine geringere thermische Linse, wodurch hier die thermischen Spannungen im Laser der Bounce-Geometrie ähneln. Die Abbildung 4 und Abbildung 5 zeigen die jeweilige Temperaturverteilung im Kristall eines seitlich gepumpten Kristalls und eines, der Bounce-Geometrie nachempfundenen, gepumpten Kristalls.



a) Realer Verlauf des Laserstrahls



b) Simulierter Verlauf des Laserstrahls

Abbildung 2: Darstellung des a) realen und b) simulierten Verlauf des Laserstrahls

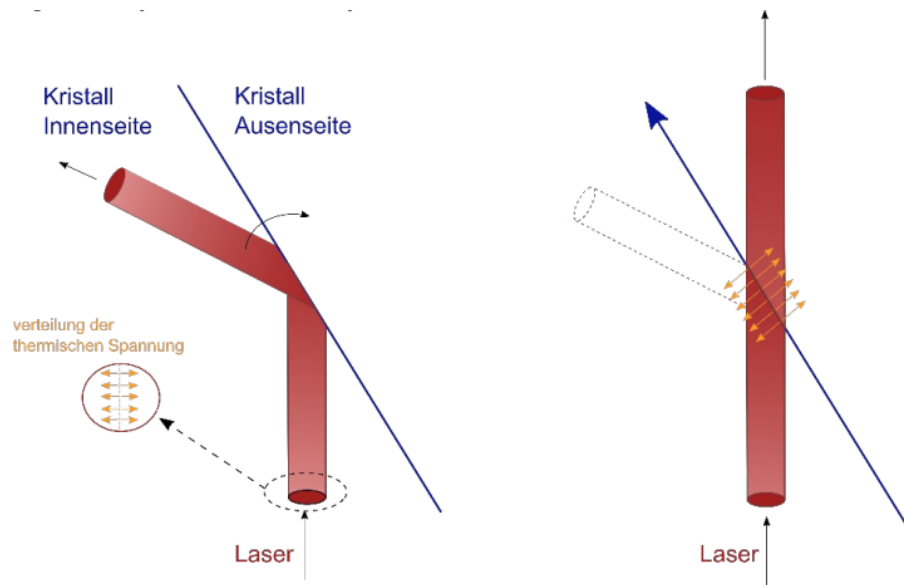


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Strahlenverlaufs der Bounce-Geometrie (links) und der, für die Simulation angepasste, gespiegelte Strahlenverlauf (rechts) am Kristall und die jeweilige Verteilung der thermischen Spannung des Kristalls im Strahlengang

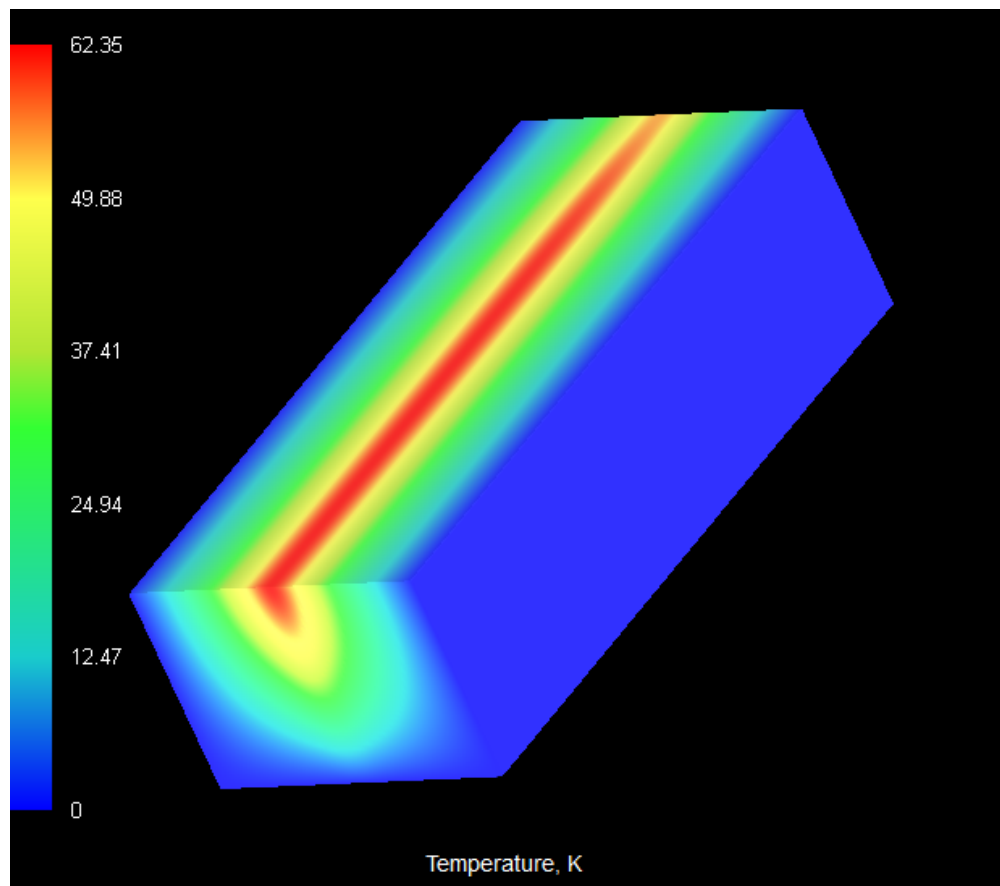


Abbildung 4 Temperaturverlauf des seitlich gepumpten Kristalls

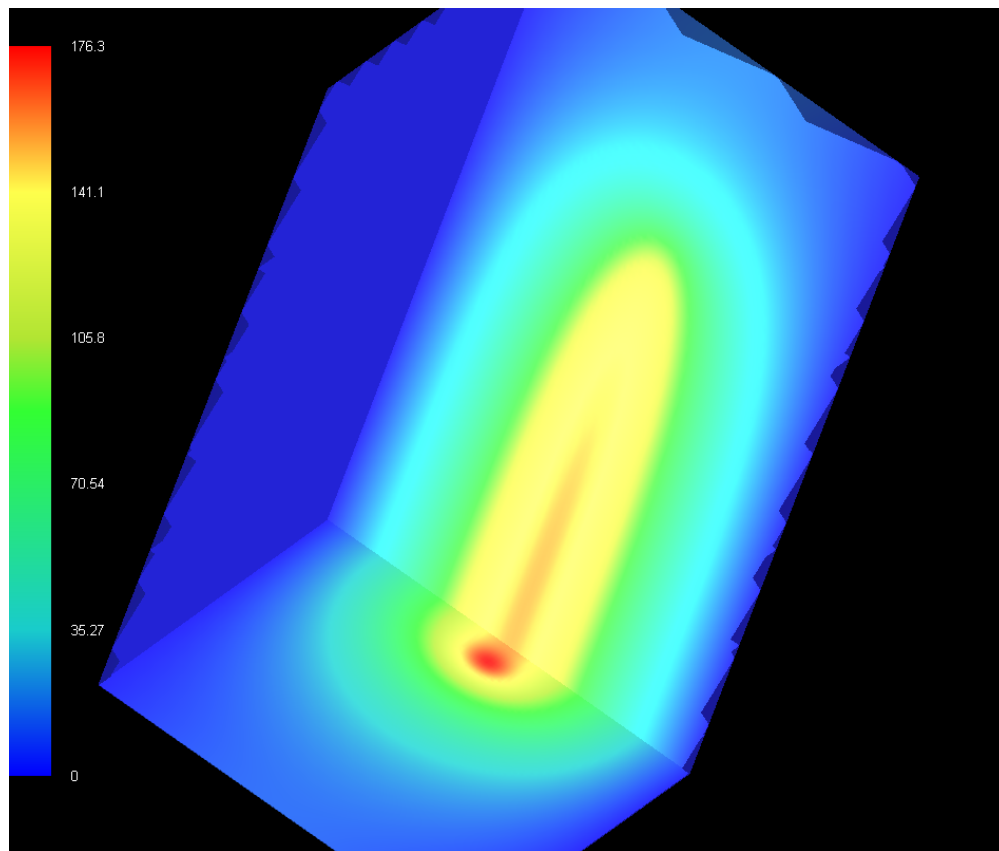


Abbildung 5: Temperaturverlauf des simulierten Kristalls

Ergebnisse der Simulation

Die nachfolgenden Ergebnisse der Simulation wurden mit den Abständen $L_1 = L_2 = 25$ mm zwischen den Reflexionsspiegeln und des Kristalls berechnet. Da nur eine Näherung der Bounce-Geometrie simuliert werden konnte, muss bei den berechneten Ausgangsleistungen mit einer Abweichung von bis zu 50% gerechnet werden.

In Abbildung 6 ist die mittlere Ausgangsleistung des Laserstrahls in Abhängigkeit zur absorbierten Pumpleistung im CW-Betrieb dargestellt. Der Reflexionsgrad des Auskopplungs-spiegels beträgt dabei $R=0,9$. Die Leistung des Laserstrahls nimmt etwa linear zur absorbierten Pumpleistung bis 35 W zu und geht anschließend in einen exponentiellen Verlauf über, bis bei einer Pumpleistung von 51 W die maximale Ausgangleistung von 24 W erreicht wurde. Somit wird ein Wirkungsgrad von ca. 50 % erzielt. *Thomas und Damzen, 2011* erreichte mit $R=0,7$ eine Ausgangsleistung von 13,8 W und erreicht somit einen Wirkungsgrad von lediglich 30 %.

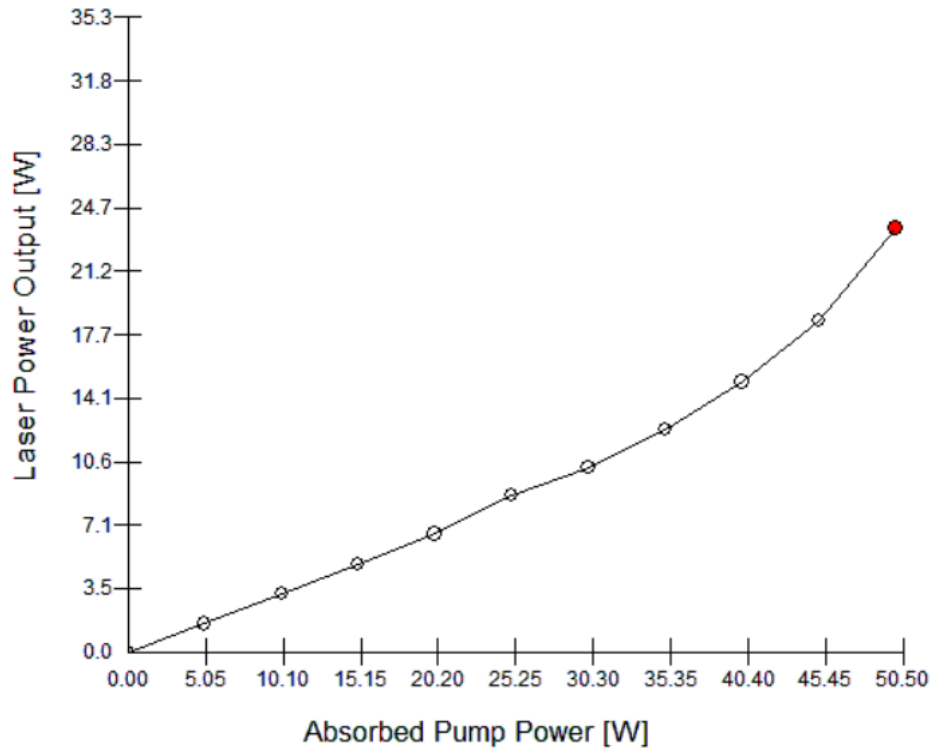


Abbildung 6: Simulierte mittlere Ausgangsleistung des Laserstrahls in Abhängigkeit zur absorbierten Pumpleistung, CW-Betrieb mit $R=0,9$

Desweiteren wurde eine Simulation mit Q-Switch durchgeführt, bei der die mittlere Ausgangsleistung in Abhängigkeit zur absorbierten Pumpleistung berechnet wurde (siehe Abbildung 7). Hierbei kann ebenfalls ein linearer Verlauf wie im CW-Betrieb beobachtet werden. Bei dieser Simulation wurde bei einer maximalen Pumpleistung von 51 W eine Ausgangsleistung von 17 W berechnet. Verglichen mit *Thomas und Damzen, 2011*, welche eine Ausgangsleistung von 11 W bei $R=0,7$ gemessen haben, ist der berechnete Wert deutlich höher. Dies liegt an der fehlenden simulierten Bounce-Geometrie. Daher sollte, wie auch im CW-Betrieb, mit einer niedrigeren Ausgangsleistung des Laserstrahls in der Realität gerechnet werden.

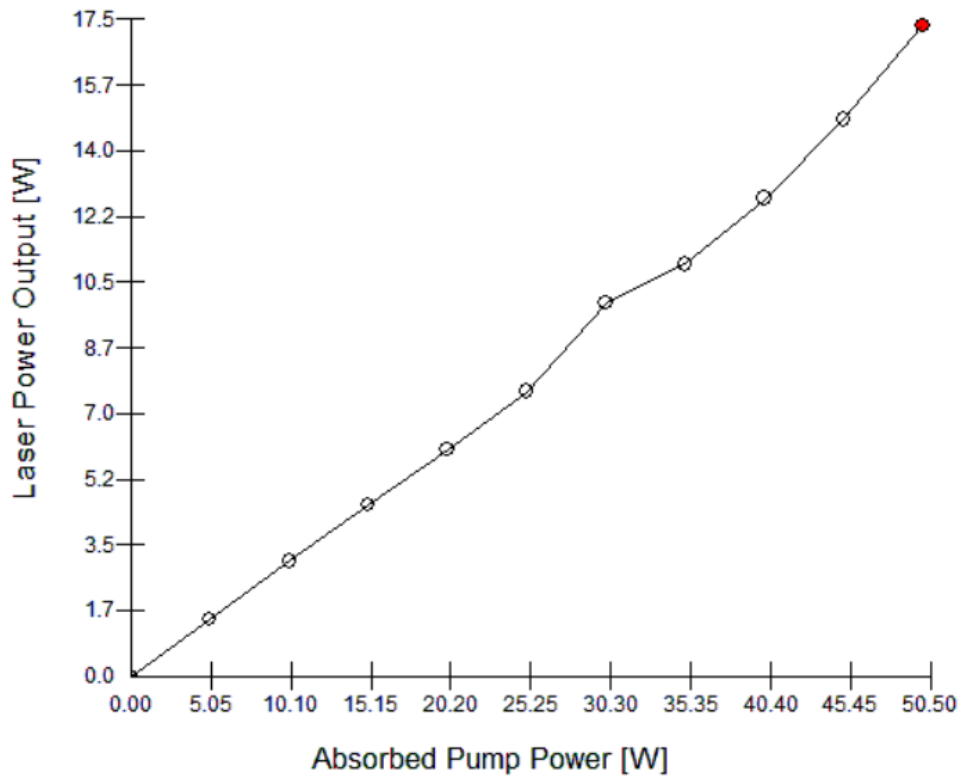


Abbildung 7: Simulierte mittlere Ausgangsleistung des Laserstrahls in Abhängigkeit zur absorbierten Pumpleistung, mit Q-Switch mit $R=0,9$

Als weitere Berechnung wurde die mittlere Ausgangsleistung des Laserstrahls in Abhängigkeit zum Reflexionsgrad des Ausgangsspiegels betrachtet. Die in Abbildung 8 dargestellte Abhängigkeit zeigt eine Leistungsminderung mit steigendem Reflexionsgrad. Auch hier kann aufgrund der Ergebnisse von *Thomas und Damzen, 2011* von einer weniger starken Abnahme der Leistung im experimentellen Versuch gerechnet werden.

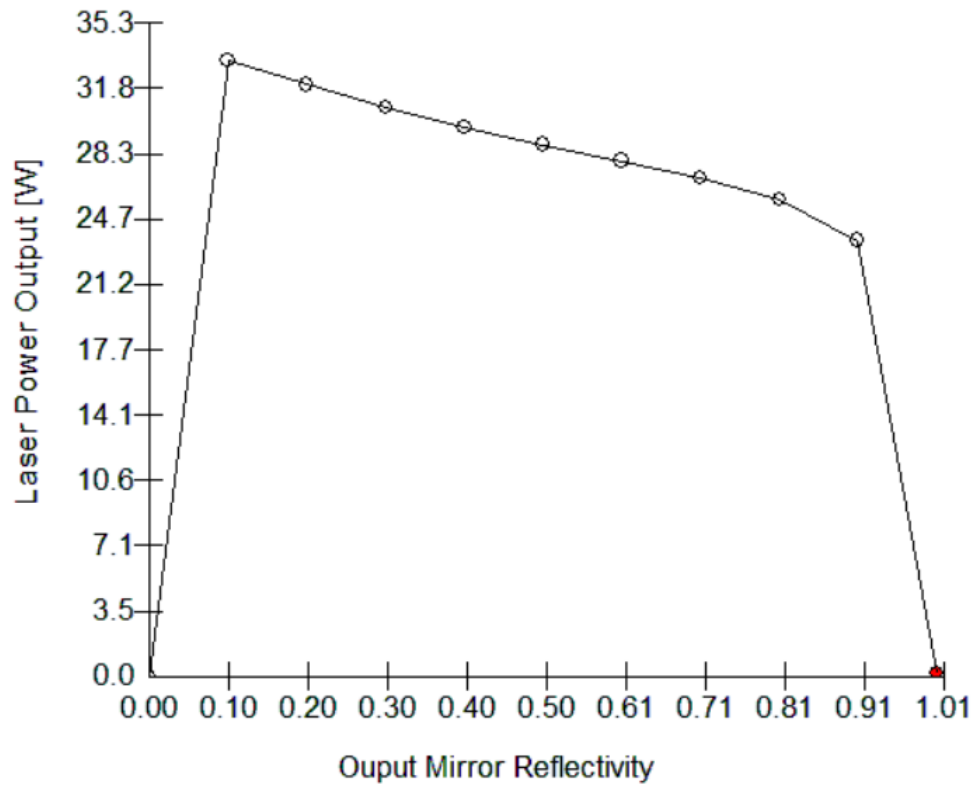


Abbildung 8: Graphische Darstellung der Ausgangsleistung des Laserstrahls in Abhängigkeit zum Reflexionsgrad des Ausgangsspiegels bei einer Pumpleistung von 51 W

Abbildung 9 zeigt eine Peakleistung von 16 kW bei einer Pulslänge von 6,39 ns. Berechnet man den ungefähren Faktor für die Bounce-Geometrie dazu, so wurden auch bei dieser Simulation eine deutlich höhere Spitzenleistung von $P_s = 24 \text{ kW}$ erreicht als *Thomas und Damzen, 2011*. Diese haben eine Spitzenleistung von 1,9kW experimentell ermittelt.

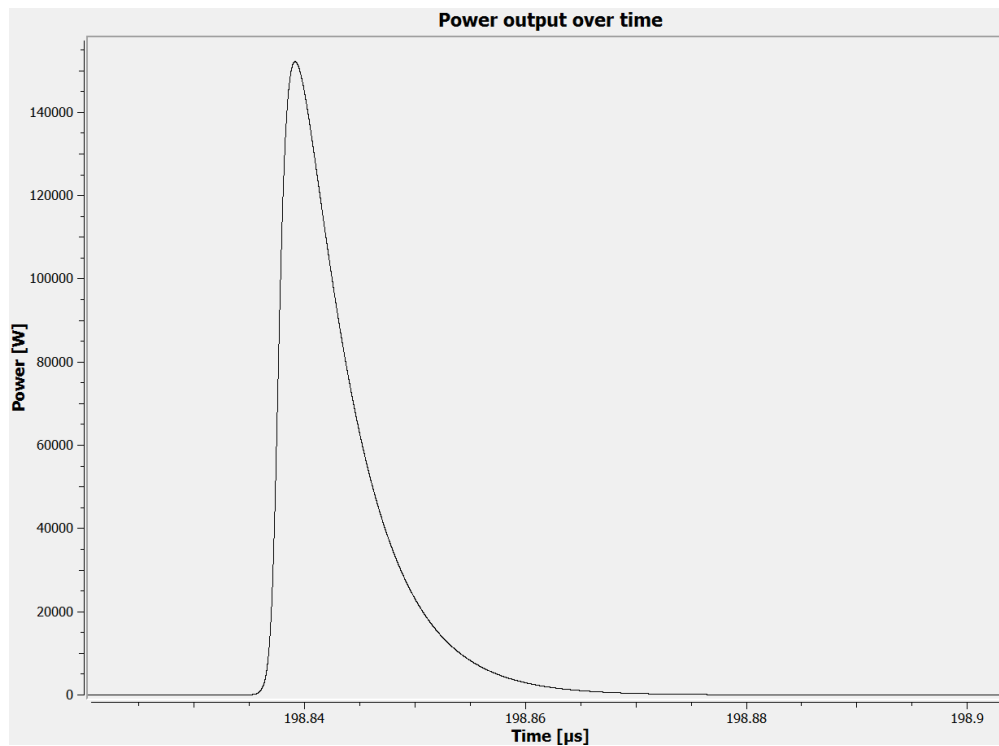


Abbildung 9: Simulierte Spitzenleistung des Impulslaserstrahls in Abhängigkeit zur Impulsdauer bei einem Reflexionsgrad des Auskopplungsspiegels von 0,9 und einer Pumpleistung von 51 W

Die Ergebnisse aus der durchgeführten Simulation zeigen im allgemeinen deutlich höhere Ausgangsleistungen als nach *Thomas und Damzen, 2011* unter realen Bedingungen erwartet werden kann. Dennoch dienen diese Ergebnisse als guten Anhaltspunkt für den Aufbau des Resonators, um eine erste Ausrichtung der Spiegel vornehmen zu können. Außerdem konnte durch die Simulation gezeigt werden, dass der verwendete Aufbau des Lasers mit einem Nd:YVO4-Kristalls genug Leistung aufbringt, um Kupferplatinen zu gravieren.

Konstruktion

Im laufenden Arbeitspaket wird nun die Konstruktion der Laserquelle geplant, insbesondere die Wärmesenken zum Abführen der überschüssigen Wärme.

[Work in progress]

Literatur:

- [1] G. M. Thomas and M. J. Damzen, "Passively Q-switched Nd: YVO 4 laser with greater than 11W average power," *Opt. Express*, vol. 19, no. 5, pp. 4577–4582, 2011.
- [2] "Betrieb von Lasereinrichtungen," Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik, Berufsgenossenschaftliche Informationen für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbe 832, 2003.