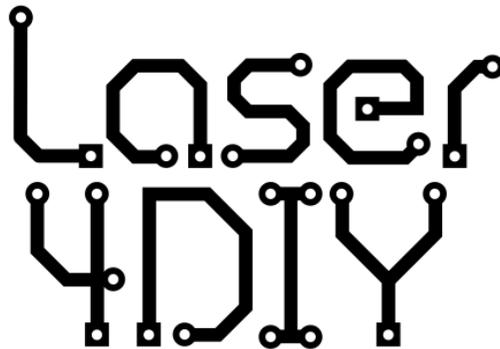


Teil II des Abschlussberichts zu dem F+E-Vorhaben LASER4DIY, FKZ 13N14038

Schlussbericht

zum Projekt



Erforschung von Open-Source-Lösungen für die laserbasierte Erstellung von prototypischen Elektronikplatinen und zu kostengünstigen Sicherheitseinhausungen für Do-It-Yourself-Projekte mit Lasern (LASER4DIY)



Zuwendungsempfänger: FabLab München e.V.

Laufzeit des Vorhabens: 1.5.2016 - 30.6.2021

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Durchführende Stelle:

FabLab München e.V.
Georg-Kerschensteiner-Str 18
81829 München

**Ansprechpartner:**

Andreas Kahler
Vorstand, FabLab München e.V.
andreas@fablab-muenchen.de

Autoren des Schlussberichts:

Andreas Kahler
Tobias Gutmann
Andreas Welzmüller
Teja Philipp



Open-Hardware-Projekte sind lebendige Projekte. Sie leben vom Feedback der Community, werden idealerweise fortlaufend weiterentwickelt und sind daher niemals abgeschlossen. Deswegen haben wir unsere Ergebnisse auch – wie für Open-Hardware-Projekte üblich – online veröffentlicht. Die Hauptseite ist unter www.laser4diy.org zu finden. Einzelne Komponenten wurden aber auch auf anderen Plattformen veröffentlicht, z.B. auf github.com. Infoboxen wie diese weisen auf den jeweiligen Ort hin.

Inhaltsverzeichnis

1. Übersicht	4
2. Sicherheitseinhausung	4
2.1 Evaluierung von Materialien und Fertigungstechniken	4
2.2 Parametrisches Gehäuse	5
2.3 Normenrecherche und Grundlagen für die Zertifizierung	6
2.4 Schutzgehäuse für den LaserPCB	7
2.5 Open Hardware Laser-Shutter	8
3. LaserPCB	9
3.1 Laseraufbau mit Bounce-Geometrie	10
3.2 Microchip-Laser	12
3.3 Aufbau mit Microchip-Laser	14
3.4 Kühlsystem	17
3.5 TEC-Controller	19
3.6 Laser-Treiber	20
3.7 Verfahreninheit	22
4. Zusammenfassung und Ausblick	24
4.1 Erzielte Ergebnisse	24
4.2 Veröffentlichung der Ergebnisse	25
4.3 Verwendung der Projektmittel	26
4.4 Ausblick	26
Literaturverzeichnis	27

1. Übersicht

Das Ziel des Projekts LASER4DIY war der Entwurf eines kostengünstigen Geräts zur Erstellung prototypischer Elektronikplatinen auf Basis eines Lasers. Darüber hinaus sollte ein passendes Schutzgehäuse konstruiert werden. Die zugehörige Dokumentation sollte gemäß den Zielen des Förderprogramms „Open Photonik“ unter einer Open-Source-Lizenz veröffentlicht werden und so die Thematik Lasersicherheit vermitteln sowie mit den Bauplänen zu dem Laserstrukturier-Gerät eine Alternative zu verfügbaren, kommerziellen Produkten darstellen. Zielgruppe dieser Publikationen sind Maker, Bildungseinrichtungen, FabLabs und Makerspaces.

Zum Start des Projekts gab es keine solche Dokumentation für Laserschutzgehäuse oder Baupläne für Lasergeräte zur Ablation von Kupfer, die unter einer frei verfügbaren Lizenz öffentlich zugänglich gewesen wären. Auch mit Abschluss des Vorhabens sind uns keine anderen Veröffentlichungen dieser Art bekannt geworden.

Die Arbeiten an LASER4DIY wurden in zwei Unterprojekten parallel durchgeführt. Die Arbeiten und Ergebnisse im Bereich Laserschutzgehäuse werden im nachfolgenden Kapitel dargestellt. Für das Laserstrukturier-Gerät – „LaserPCB“ getauft – wird im Kapitel 3 eingegangen.

2. Sicherheitseinhausung

2.1 Evaluierung von Materialien und Fertigungstechniken

Bei der Evaluierung von Materialien für den Bau eines Laserschutzgehäuses sollten solche ermittelt werden, aus denen günstig ein Laserschutzgehäuse konstruiert werden kann. Dazu muss es ausreichend laserresistent sein, aber auch leicht zu fertigen, idealerweise mit Maschinen die in einem FabLab zur Verfügung stehen. Außerdem wurden Fertigungstechniken für diese Werkstoffe untersucht, denn abgesehen von den reinen stofflichen Eigenschaften ist dies für die Herstellung von Laserschutzgehäusen wichtig, damit auch blickdichte Verbindungen hergestellt werden können.

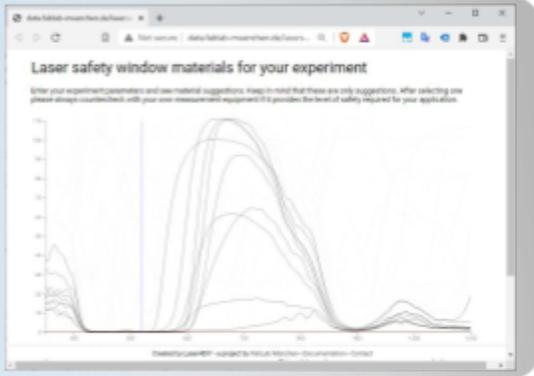
Des Weiteren wurden im Projekt Materialien für den Einsatz als Sichtfenster näher evaluiert. Es wurden gängige, transparente Materialien wie eingefärbtes Polycarbonat untersucht und deren Transmissionsgrad in Abhängigkeit zur Wellenlänge des verwendeten Lasers untersucht. Die

Ergebnisse mündeten in einem interaktiven Online-Tool zur Auswahl eines geeigneten Sichtfenster-Materials für die jeweilige Anwendung:

Laser safety window materials for your experiment
Online-Tool zur Auswahl eines Materials für Sichtfenster

URL:
http://data.fablab-muenchen.de/lasersafe_safety_housing/





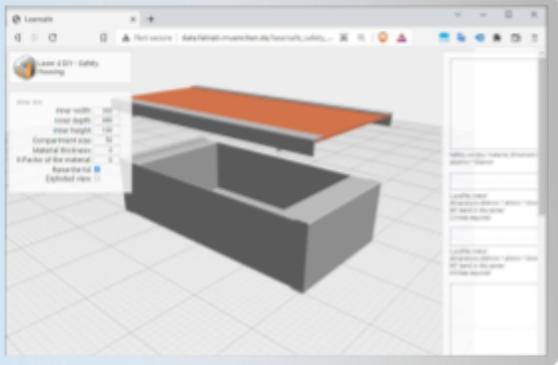
2.2 Parametrisches Gehäuse

Basierend auf diesen Material-Untersuchungen wurde ein Gehäuse-Design erstellt. Zum Einsatz kommt dabei Aluminium- oder (Edel-)Stahlblech das mittels Abkantbank gebogen und mittels Nieten oder Schrauben verbunden wird. Kombiniert werden kann dies mit einem transparenten Deckel, dessen Material mit dem erwähnten Online-Tool ermittelt werden kann. Um das Design einfach an unterschiedliche Platzanforderungen anpassen zu können, wurde das Gehäuse-Design parametrisch aufgebaut. Auch hier wurde ein Online-Tool implementiert, welches die Parameter entgegennimmt, das 3D-Modell visualisiert und den entsprechenden Bauplan zur Verfügung stellt. Dieses Gehäuse-Design diente auch als Grundlage für das Gehäuse des LaserPCB (siehe unten).

LASER4DIY Safety Housing
Parametrisches Laserschutzgehäuse (Online-Tool)

URL:
http://data.fablab-muenchen.de/lasersafe_safety_housing/





2.3 Normenrecherche und Grundlagen für die Zertifizierung

Für die Zertifizierung eines Lasergeräts müssen nicht nur Richtlinien zum Laserschutz eingehalten werden, sondern es sind eine Vielzahl von Normen relevant, z.B. im Bereich Elektrik oder Mechanik. Deshalb ging den Aktivitäten im Bereich des Laserschutzgehäuses eine Normenrecherche voraus. Wie sich im Laufe dieser herausgestellt hat, lassen sich die Ziele der Flexibilität des Systems (anpassbar an unterschiedliche Platzanforderungen, andere Wellenlänge oder Leistung des eingesetzten Lasers, etc.) nicht mit einer Zertifizierung kombinieren. Zur Zertifizierung gemäß Normen zur Maschinensicherheit einschließlich Zuordnung einer Laserschutzklasse können nur konkrete Ausgestaltungen eines solchen parametrischen Designs gelangen. Daher wurden die Ziele des Projekts angepasst, und stattdessen Dokumentationen und Werkzeuge für einen potenziellen Anwender erstellt, die die Fertigstellung eines an die jeweiligen Bedürfnisse angepassten Gehäuses unterstützt, welches dann alle Voraussetzungen für die Zertifizierung erfüllt.

Ein zentrales Dokument bei der Zertifizierung eines Geräts ist die Risikobeurteilung. Sie ist Aufgabe des Herstellers einer Maschine und dient der Risikominderung vor Inverkehrbringen. In ihr werden alle möglichen Risiken, die von einer Maschine ausgehen, aufgelistet und beurteilt. Während für die Reduzierung der Risiken im Projekt LASER4DIY mit dem Laserschutzgehäuse und dessen Komponenten vieles angeboten wird, müssen erstmal die Risiken eines konkreten Anwendungsfalls (die „Maschine“) ermittelt werden. Mit den Maßnahmen des Laserschutzgehäuses können diese minimiert werden, sodass einer Zertifizierung nichts im Wege steht. Für die Auflistung möglicher Gefährdungen, die von einem typischen Laseraufbau im Bildungs- oder Hobbybereich oder von gängigen Lasercutter/Lasergravurgerät ausgehen, haben wir eine Mindmap entworfen, die bei dem Prozess unterstützen soll (aber keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben kann):

Mindmap Risikobeurteilung
Interaktive Mindmap zur Risikobeurteilung

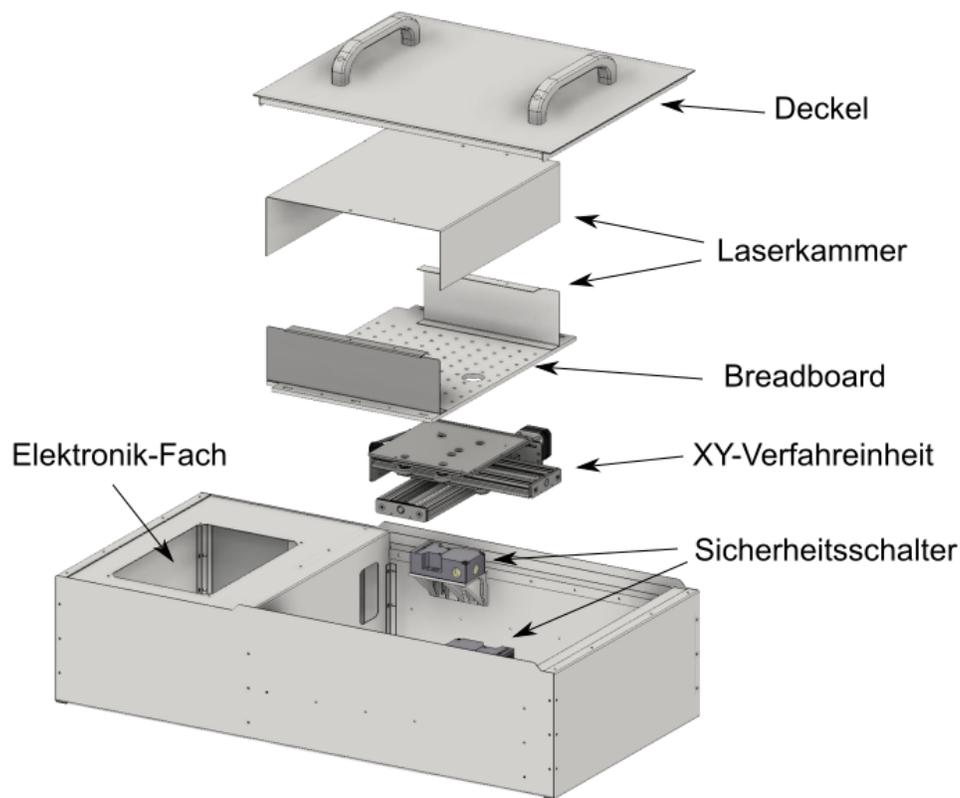
URL:
http://data.fablab-muenchen.de/lasersafe_risk_analysis/





2.4 Schutzgehäuse für den LaserPCB

Aufbauend auf den Vorarbeiten im Bereich Laserschutzgehäuse, insbesondere dem parametrischen Gehäuseplaner, wurde ein Schutzgehäuse aus Edelstahl-Blech konzipiert, in dem der Laseraufbau samt XY-Tisch und Elektronik Platz findet. Die Netzteile für die Stromversorgung und das Kühlsystem wurden in eine separate Versorgungseinheit ausgelagert. Dies bietet den Vorteil, dass im eigentlichen LaserPCB-Gehäuse nur kleine Spannungen bis 24V vorhanden sind und dieses so auch deutlich kompakter und leichter ausfällt.

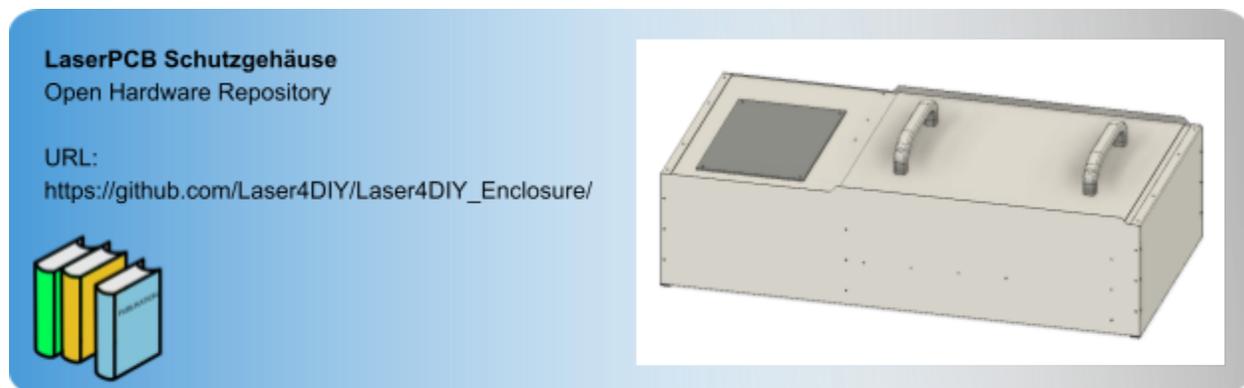


Explosionszeichnung des LaserPCB-Schutzgehäuses

Das Gehäuse ist zweigeteilt: Im linken Teil befinden sich die Elektronik-Komponenten (Lasertreiber, TEC-Controller, Schutzschaltung, Controller für den XY-Tisch) sowie die Anschlüsse für Stromversorgung, Wasserkühlung und Abluft. Der rechte Teil ist lichtdicht ausgeführt und über einen Schacht mit dem linken Teil verbunden. Darin liegende Kabel, Kühl- und Abluftschläuche werden um zwei Ecken geführt, sodass kein Licht in den linken Gehäuseteil gelangen kann, wo es über Lüftungsöffnungen nach draußen gelangen könnte. Die Laserquelle sitzt auf einem Breadboard aus 8 mm starkem lasergeschnittenen Aluminium und

wird nach oben hin mit einer Laserkammer aus Stahlblech gegen Schmutz und versehentlicher Berührung geschützt. Durch eine Öffnung wird der Laserstrahl nach unten auf die XY-Verfahrenheit gelenkt, wo sich dann die zu bearbeitende Platine befindet. Zur Bestückung kann der Arbeitstisch seitlich nach rechts herausgefahren werden. Der Deckel ist mit Schutzschaltern gesichert, beim Öffnen wird der Laser ausgeschaltet. Eine externe Absaugvorrichtung wird über einen Schlauch angeschlossen der unter dem Breadboard direkt zum Arbeitspunkt der Anordnung führt.

Mit diesem Schutzgehäuse erfüllt das Gerät alle Voraussetzungen zur Zertifizierung als Laserschutzklasse 1, damit es auch außerhalb eines Laserschutzraumes betrieben werden kann.



2.5 Open Hardware Laser-Shutter

Als weitere Komponente für die Erstellung von sicheren Laserexperimenten und Lasercuttern/-gravurgeräten wurde ein Lasershutter entworfen. Eine Kupferfahne wird dabei von einem Drehmagneten aus dem Strahlengang geschwenkt. Bei geschlossenem Shutter wird die Laserstrahlung in eine Strahlenfalle abgelenkt, das verwendete Kupfer der Fahne ist dabei für Infrarot-Laserlicht ausgelegt. Damit ist der Shutter insbesondere für die in FabLabs und Makerspaces weit verbreiteten CO2-Lasercutter geeignet. Passend zum Shutter wurde eine Schutzschaltung entworfen, die den Shutter nur bei geschlossener Tür bzw. Deckel des Lasergeräts öffnet und die einwandfreie Funktion des Shutters mit Hilfe von zwei Induktionssensoren überwacht. Das Gehäuse des Shutters besteht aus gefrästen Aluminiumteilen. Das mechanische Design und die Schutzschaltung wurden ebenfalls unter einer freien Lizenz veröffentlicht.

Laser4DIY Laser Shutter

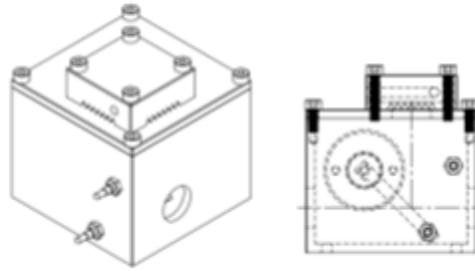
Open Hardware Repository

URL:

https://github.com/Laser4DIY/Laser4DIY_LaserShutter



LASER4DIY Laser Shutter



3. LaserPCB

Das Laserstrukturier-Gerät LaserPCB soll es ermöglichen, mit kostengünstiger Technik (als Preis für alle Komponenten wurde zum Projektstart eine Summe von 2000 Euro angesetzt) prototypische Elektronikplatinen mittels Laserablation herstellen zu können. Herausforderung dabei ist die eigentliche Laserquelle, denn gängige, zu diesem Budget passende Laser können entweder nicht die notwendigen Leistungen bzw. Energiedichten erzeugen oder emittieren Laserlicht in einer Wellenlänge, die für das Bearbeiten von Kupfer nicht geeignet ist.

Darüber hinaus benötigt LaserPCB eine motorisierte Verfahrereinheit, einen Lasertreiber, ein Kühlsystem mit zugehörigem TEC-Controller und das bereits erwähnte Laserschutzgehäuse. Für all diese Komponenten wurden keine fertigen, kommerziellen Lösungen verwendet, sondern eigene Ansätze entworfen. So konnten die Materialkosten niedrig gehalten werden und die Dokumentationen zu den Komponenten wurden im Sinne des Förderprogramms als Open Hardware veröffentlicht.

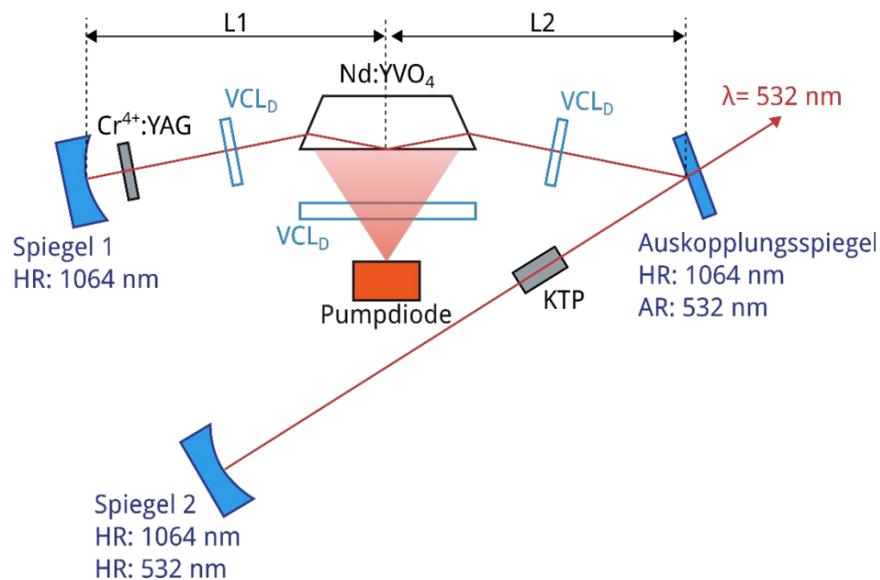
Bei der Laserquelle wurde anfangs auf ein Design mit optischem Resonator, passivem Q-Switch auf Cr:YAG-Basis und Nd:YVO4-Gain-Modul gesetzt. Trifft Strahlung von $\lambda = 1064 \text{ nm}$ auf eine Platine, so wird die Strahlung kaum absorbiert, da Kupfer im Infrarotbereich eine Reflektivität von bis zu 95 % besitzt. Daher wurde im Resonator zusätzlich ein Frequenzverdoppler hinzugefügt, welcher die Wellenlänge von $\lambda = 1064 \text{ nm}$ auf $\lambda = 532 \text{ nm}$ halbiert. Bei dieser Wellenlänge ist der Absorptionsgrad von Kupfer um das Zehnfache höher, wodurch Ablation mit deutlich geringeren Laserleistungen möglich wird. Dieses auf einer Bounce-Geometrie basierende Design wird im folgenden Abschnitt 3.1 beschrieben.

Bei der praktischen Umsetzung dieses Ansatzes stellte sich allerdings heraus, dass die Justage eines derartigen Resonators aufwändig ist, da unter anderem ein Justage-Laser benötigt wird.

Da das Design aber passend zur Zielgruppe einfach und ohne teure Hilfsmittel reproduzierbar sein soll, wurde daher im Laufe des Projektes beschlossen, auf ein Setup mit Microchip-Laser und MOPA-Architektur (Master Oscillator Power Amplifier) umzusteigen. Dieser Aufbau ist deutlich leichter umzusetzen und mit wenigen Hilfsmitteln zu justieren, ist aber trotzdem in der Lage, kurze Pulse bei hoher Puls-Spitzenleistung zu liefern. Dieses veränderte Design wird in den Abschnitten 3.2 und 3.3 erläutert.

3.1 Laseraufbau mit Bounce-Geometrie

Als Laserquelle für das LaserPCB-Projekt war ein Dioden-gepumpter Festkörperlaser mit einem neodym-dotierten Yttrium-Vanadat Kristall (Nd:YVO₄) vorgesehen. 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 der folgenden Abbildung ist der Aufbau des Lasersystems dargestellt, welcher sich stark an der Veröffentlichung von Thomas und Damzen, 2011 orientiert.[1]



Schematische Darstellung des Nd:YVO₄-Lasers mit Bounce-Geometrie nach [1]

Der trapezförmige Nd:YVO₄-Kristall besitzt die Maße von 15 × 5 × 2 mm³. Um eine parasitäre interne Reflexion im Kristall zu vermeiden, sind die 5 × 2 mm² Flächen um 4° nach innen geneigt und besitzen zudem eine Antireflexionsbeschichtung (AR-Beschichtung) für eine Wellenlänge von 1064 nm. Der zylindrische Laserdiodenbarren emittiert eine Wellenlänge von

808 nm mit einer maximalen optischen Leistung $P = 60 \text{ W}$ bei einem Wirkungsgrad von 50 %. Mit Hilfe einer vertikalen zylindrischen Linse (VCLD) wird die Pumpstrahlung mit einer Brennweite von 10 mm auf den Kristall gerichtet. Um hohe Spitzenleistungen des Lasers zu erreichen, wird ein Q-Switch eingesetzt. Dieser sättigbare Absorber ist ein Cr^{4+} :YAG-Kristall mit den Maßen $5 \times 5 \times 3 \text{ mm}^3$ und wird in der Nähe des Spiegels 1 platziert.

Der hierfür verwendete Frequenzverdoppler ist ein Kaliumtitanylphosphat (KTP)-Kristall, welcher eine Größe von $3 \times 3 \times 5 \text{ mm}^3$ besitzt. Wie in der Abbildung dargestellt, wird der vom Nd:YVO₄ emittierte Strahl durch einen Reflexionsspiegel abgelenkt und anschließend durch den KTP-Kristall geleitet. Durch einen Auskopplungsspiegel 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.

Der Aufbau wurde mit Hilfe eines Finite Elemente Analyse-Programms simuliert. Die thermischen Effekte im Nd:YVO₄-Kristalls konnten so analysiert werden, wodurch die Geometrie des Resonators ermittelt werden konnte. Zudem konnte die mittlere Leistung im CW-Betrieb, als auch die Spitzenleistung unter Einsatz des Q-Switch der Laserquelle berechnet werden. Die Simulation wurde ohne Frequenzverdoppelung durchgeführt, da diese für die Geometrie des Lasers von untergeordneter Bedeutung ist.

Die Ergebnisse aus der durchgeführten Simulation zeigten im Allgemeinen deutlich höhere Ausgangsleistungen als gemäß [1] unter realen Bedingungen erwartet werden könnte. Wir haben in einem Versuch gezeigt, dass dieser Aufbau prinzipiell funktioniert und auch geeignet ist, Laserpulse mit für die Ablation von Kupfer genügend hohen Peakleistungen zu erzeugen, auch wenn die Werte aus der Simulation – wie erwartet – nicht erreicht werden konnten.

Allerdings wurden auch praktische Schwächen des Aufbaus festgestellt:

- Ausschlaggebend für die Ausgangsleistung des Lasers ist eine hohe Leistung der Pumpdiode. Geplant waren der Einsatz von 60W-Dioden. Die Beschaffung dieser Dioden stellte sich jedoch als schwierig heraus. So konnten getestete Exemplare die Spezifikationen nicht erfüllen. Um den Projektfortschritt nicht unnötig zu verzögern, wurde für weitere Tests auf eine Laserdiode eines Premium-Anbieters zurückgegriffen. Die Diode kann die Anforderungen erfüllen, sprengt aber mit ihrem Preis die angestrebten Materialkosten.

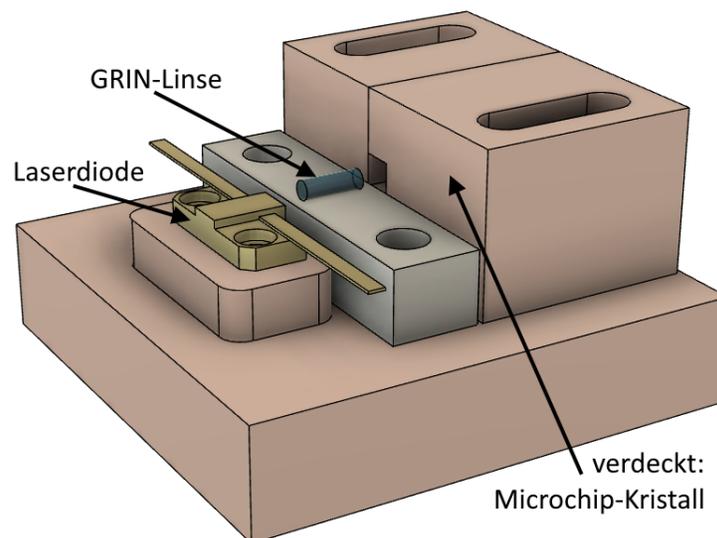
- Der Einsatz von schwächeren Pumpdioden verursacht eine niedrigere Ausgangsleistung und gefährdete das Erreichen des Projektziels, nämlich die Möglichkeit der Ablation von Kupfer.
- Für die Justierung des Laseraufbaus ist ein Hilfs laser nötig, wir haben einen Nd:Yag-Laser genutzt. Die Kosten für diesen Laser treiben aber die Kosten für einen Nachbau nach oben und die Justage des Aufbaus ist kompliziert. Die Attraktivität des Projekts sinkt dadurch.

Wir haben aus diesen Gründen nach einem alternativen Setup gesucht, das einerseits die mögliche Peakleistung erhöht und andererseits die Justage des Systems erleichtert. Der resultierende Aufbau wird in den folgenden Abschnitten beschrieben.

3.2 Microchip-Laser

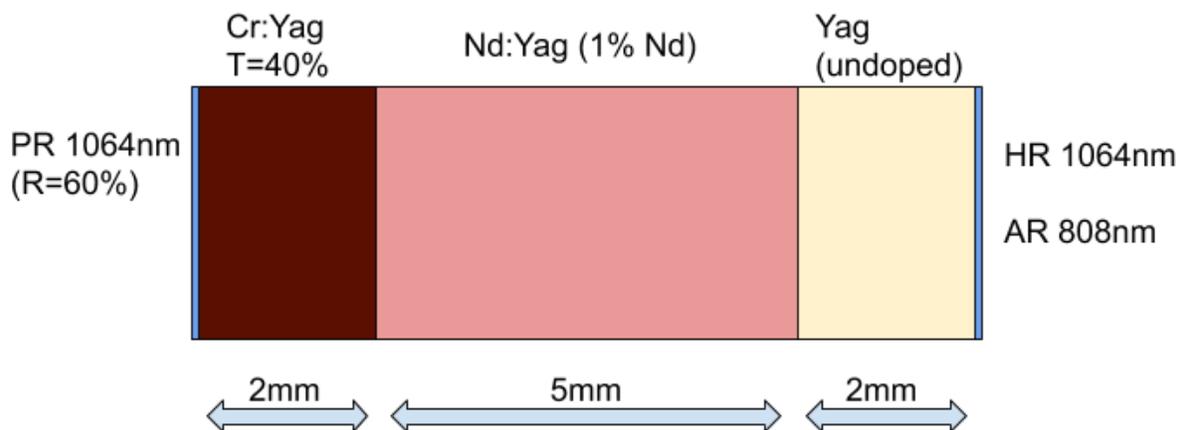
Das Laserdesign, das für LaserPCB nun Verwendung findet, nutzt einen Laser mit Microchip-Resonator als Basis. Eine Freistrahl-Diode erzeugt Pumpstrahlung mit einer Wellenlänge von 808 nm, einer symmetrischen Strahldivergenz von $8^\circ \times 8^\circ$ und einer 200 μm Emittergröße. Eine GRIN-Linse (GRadient-INDEX-Linse) mit einer Brennweite von 1,95 mm und einem beidseitigen Antireflex-Coating für 830 nm fokussiert diese auf einen engen Bereich im Microchip-Kristall, wodurch die Effizienz erhöht wird.

Für einen kompakten Aufbau wurde ein spezieller Kühlkörper entworfen, welcher sowohl die Laserdiode als auch die GRIN-Linse und den Microchip-Kristall hält und kühlt:



Der Microchip-Kristall besteht aus einem passiven Q-Switch auf Cr:YAG-Basis, einem Nd:YAG-Kristall und einem undotierten YAG-Kristall, welche miteinander verschmolzen sind. Der undotierte YAG-Kristall dient hier der effizienteren Wärmeabfuhr und einer dadurch reduzierten thermischen Linse. Zudem werden auf die Endflächen die Resonatorspiegel und Antireflexbeschichtungen für die Pump-Strahlung aufgedampft. Im Verlauf der Versuche wurden mehrere Kombinationen für die einzelnen Bereiche des diffusion-bonded Kristalls getestet.

Vereinzelt wurden durch die hohen Peak-Leistungen in den Microchip-Resonatoren die HR-Beschichtungen verletzt. Leider konnten Simulationen hier keine brauchbaren Ergebnisse liefern, weshalb iterativ Kristall-Parameter angepasst wurden. Die besten und robustesten Eigenschaften wurden mit dem folgenden Kristall realisiert:



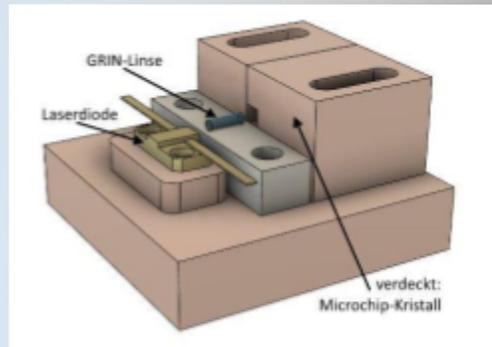
Der Kristall hat die Abmaße $3 \times 3 \times 9 \text{ mm}^3$ und eine Dotierung von 1 % Nd. Die Auskoppel-Fläche hat eine Reflektivität von 60 % bei 1064 nm und die Einkoppelfläche eine Reflektivität von $>99,5 \%$ bei 1064 nm und $<0,5 \%$ bei 808 nm.

Im LaserPCB-Aufbau wird eine Pumpdiode mit 10W maximaler Leistung mit einer Emittergröße von $200 \mu\text{m}$ bei einer Strahldivergenz von $8^\circ \times 8^\circ$ eingesetzt. Bei einer Pumpleistung von 8,9 W (10A bei 1,9V) erreicht dieser Aufbau eine mittlere Ausgangsleistung von 1,36 W bei 1064 nm. Die Pulslänge beträgt etwa 2,5 ns (FWHM) bei einer Repetitionsrate von 11,3 kHz. Näherungsweise lässt sich hieraus eine Pulsenergie von $120 \mu\text{J}$ und eine Peakleistung von knapp 50 kW errechnen. Die Temperatur wird dabei so eingestellt, dass eine maximale Emission des Microchip-Kristalls bei 1064 nm erfolgt, in unserem Fall lag diese bei $16,1^\circ\text{C}$.

Laser4DIY Laser Source

Open Hardware Repository

URL: <https://github.com/Laser4DIY/LaserSource>

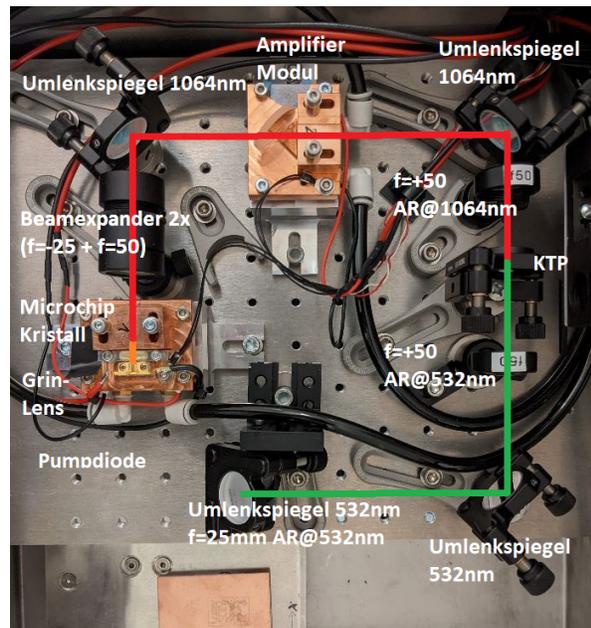
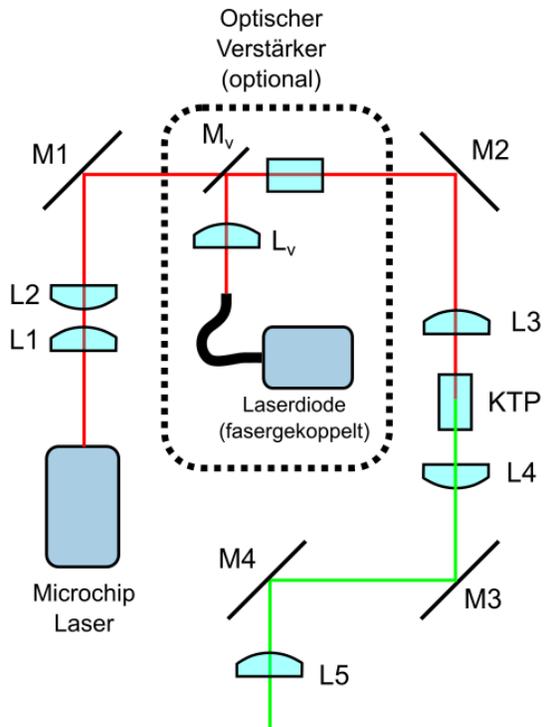


3.3 Aufbau mit Microchip-Laser

Der Aufbau der LaserPCB-Laserquelle ist in zwei Varianten möglich, einer mit optischem Verstärker, und einer ohne diesem. Während mit Verstärker bei Einsatz von zusätzlichen Komponenten und damit verbundenen zusätzlichen Kosten natürlich eine höhere Ausgangsleistung resultiert, ergibt sich ohne Verstärkung ein kostengünstigeres, weniger komplexes System.

Als Basis dient der eben beschriebene Microchip-Laser. Der divergente Laserstrahl aus dem Microchip-Kristall mit $\lambda = 1064 \text{ nm}$ wird mittels eines Zweifach-Beamexpanders (L1 und L2 in der Abbildung unten) aufgeweitet und kollimiert.

Nach dem ersten Umlenkspiegel M1 kann das Verstärkermodul integriert werden. Es ist mechanisch ähnlich dem Microchip-Modul aufgebaut, besitzt allerdings einen dichroischen Spiegel (M_V) unter 45° , der auf beiden Seiten eine $AR@1064\text{nm}$ Beschichtung aufweist, und auf der dem Amplifier-Kristall zugewandten Seite ein $HR@808\text{nm}$ Coating. Über eine fasergekoppelte Pumpdiode kann dieser über die Linse L_V mit 808 nm oder 878 nm gepumpt werden.



Schematischer Aufbau des Lasers (links) und Aufbau im LaserPCB (rechts, Verstärkermodul mit im Bild, allerdings ohne zugehörige Pumpdiode)

Der 1064 nm Strahl wird nach der zweiten Umlenkung (M2) durch eine $f=+50\text{mm}$ Linse in den KTP-Kristall fokussiert. Der KTP-Kristall wird in Rotation um die Strahlachse und Winkel zur Strahlachse auf eine maximale Konversionseffizienz justiert.

Nach der Frequenzverdopplung kollimiert eine weitere $f=+50\text{mm}$ Linse den resultierenden Laserstrahl mit 532 nm. Die folgenden zwei Spiegel (M3, M4) lenken den Strahl durch eine Öffnung in der optischen Platte nach unten, wo sich die Verfahrenseinheit befindet. M3 und M4 besitzen lediglich ein $\text{HR}@532\text{nm}$ Coating und transmittieren nur ca. 50 % der Leistung bei 1064 nm, diese ist damit bei dem späteren Ablationsprozess nicht relevant.

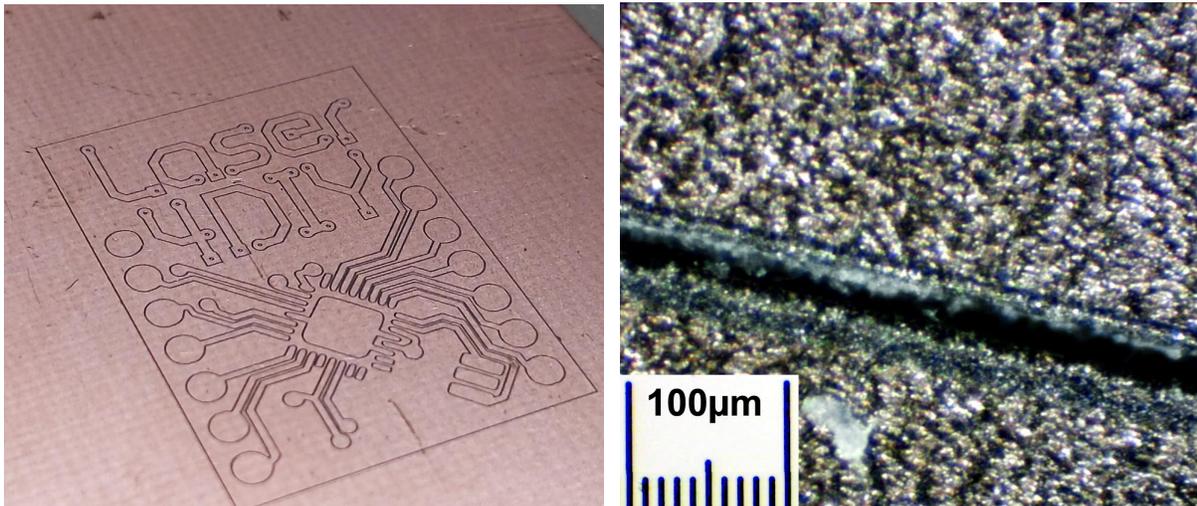
In der Öffnung des Breadboards sitzt eine Linse mit $f=25\text{mm}$ (L5), die den Laserstrahl auf die zu bearbeitende Platine fokussiert.

Die Temperaturen der Pumpdioden werden auf maximalen Leistungsoutput eingestellt, um eine bestmögliche Absorption zu gewährleisten. Der KTP-Kristall sollte bei der ersten Justage

schrittweise von einer Entfernung mindestens 1 cm größer der Brennweite der Linse an den Fokus herangeführt werden, um eine laserinduzierte Schädigung des Kristalls zu vermeiden.

Mit dem oben beschriebenen Output des Microchip-Lasers (1,36 W mittlere Leistung) konnte mit diesem Setup eine mittlere Leistung von 0,25 W bei $\lambda = 532$ nm erreicht werden. Dies entspricht näherungsweise einer Pulsenergie von 20 μ J und eine Peakleistung von ca. 9 kW. Mit einer angenommenen Fokusgröße von 40 μ m ergibt sich daraus eine Spitzenleistung von über 1200 MW/cm² auf der Oberfläche der Platine.

Mit diesem Aufbau konnten Standard-Kupferbeschichtungen auf einer Platine (35 μ m Dicke) mit einer Verfahrgeschwindigkeit 40 mm/min und zwei Durchgängen vollständig und elektrisch trennend abgetragen werden. Die Ablation erfolgt dabei auf einer Breite von ca. 15-20 μ m, was sehr feine Details ermöglicht.



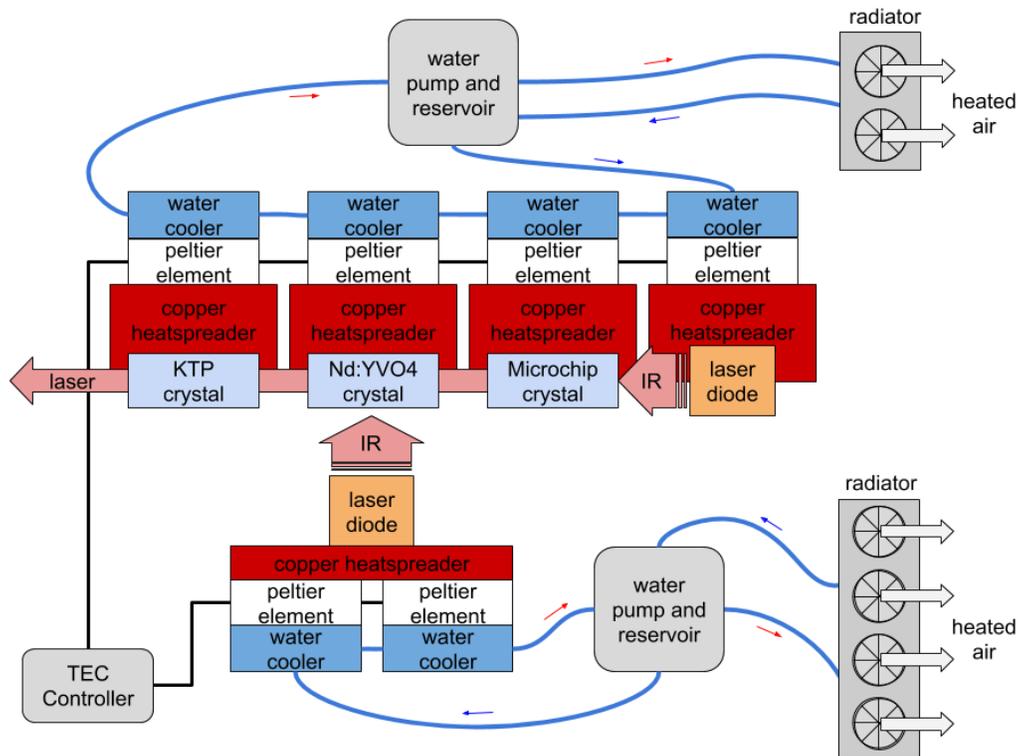
Mit dem LaserPCB erstellte Platine (links), Mikroskopaufnahme einer Ablation (rechts)

Das Setup mit optischem Verstärker wurde erfolgreich auf seine Funktionsfähigkeit überprüft. Dafür wurde eine Pumpdiode eingesetzt, die von der Firma Wematec GmbH kostenlos zur Verfügung gestellt wurde. Von einer Recherche zu möglichen Zulieferern für eine Pumpdiode, die kostenmäßig für den Einsatz im LaserPCB-System infrage käme und von einer Integration des optischen Verstärkers in die Dokumentation wurde aber im Rahmen dieses Vorhabens abgesehen und bleibt möglichen, zukünftigen Forschungsarbeiten vorbehalten.

3.4 Kühlsystem

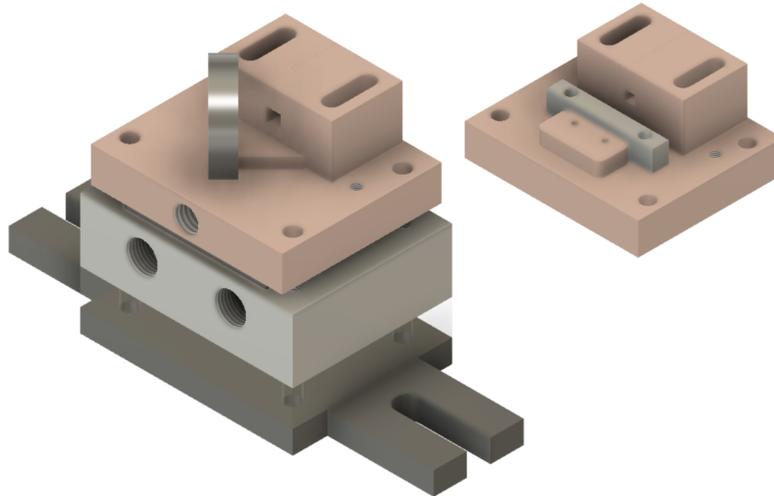
Die Kühlung der Komponenten – im Falle des Aufbaus mit Bounce-Geometrie insbesondere der 60W-Pumpdiode – hat sich schon 2017 als problematisch erwiesen und verschiedene Konfigurationen wurden getestet. Das System wurde über mehrere Iterationen optimiert, sodass es jetzt für die konzipierten Lasersetups geeignet ist.

Grundsätzlich kommen Peltierelemente zur Kühlung bzw. Temperaturstabilisierung der kritischen Komponenten zum Einsatz. Die erzeugte Abwärme wird über eine Wasserkühlung mittels Radiatoren abgeführt. Die folgende Abbildung zeigt einen schematischen Überblick über das Kühlsystem:



Schematischer Aufbau des Kühlsystems (Variante Aufbau mit Bounce-Geometrie)

Während für die Wasserkühlung inklusive Pumpe, Ausgleichsbehälter und Radiator relativ kostengünstige Standardkomponenten aus der PC-Technik zum Einsatz kommen, sind für die Laserdiode, den Laserkristall und den Microchip-Laser maßgeschneiderte Kupferkühlkörper nötig:



Links ist der Gesamtaufbau für das Verstärkermodul zu sehen, bei dem hochintegriert Kupferwärmeleiter mit Funktionsflächen zum Ankleben von Optikbauteilen, Peltierelement, Kühlkörper, Acrylverschlussplatte und Grundplatte mit Befestigungsnasen für einen Optiktisch zu einem Bauteil verschraubt werden. Baugleich ist dann auch der Aufbau für den Microchip-Laser, welcher sich nur durch den oberen Teil aus Kupfer unterscheidet. Dieser obere Teil mit verschiedenen Funktionsflächen zum Einbau von Laserdiode, GRIN-Linse und Microchip-Kristall ist rechts zu sehen.

Wie bereits erwähnt befinden sich beim LaserPCB-Gerät Teile des Kühlsystems, nämlich Radiatoren, Wasserpumpe und Ausgleichsbehälter in einer separaten Versorgungseinheit:



Geöffnete Versorgungseinheit: links der Ausgleichsbehälter mit integrierter Pumpe, hinten die Radiatoren des Kühlsystems

3.5 TEC-Controller

Der TEC-Controller ist die Regeleinheit des Kühlsystems und ist für Temperaturstabilisierung der Kristalle und der Laserdiode(n) verantwortlich. Dafür wurde eine Platine entworfen, die doppelt übereinander auf einen Arduino Due aufgesteckt werden kann und in der Lage ist, vier Peltierelemente mit jeweils 108W Wärmetransportleistung anzusteuern und damit je nach Bedarf durch Kühlung oder Heizen eine Stabilisierung der Temperatur zu gewährleisten. Dabei wird die Temperatur durch an die Platine angeschlossene NTC-Widerstände ausgelesen, im Mikrocontroller durch einen PID-Regler verarbeitet und dann die Peltierelemente über jeweils eine H-Brücke angesteuert.

Die gewünschten Spezifikationen des Temperatur-Controllers sind folgende:

- 4-Kanäle mit 108W Wärmetransportleistung
- H-Brücken für 12A bei 15.5V für Kühlen oder Heizen
- Arduino-kompatibler Microcontroller
- Fertigbar in Heimarbeit durch 2-lagige Platine und handlötbare Komponenten

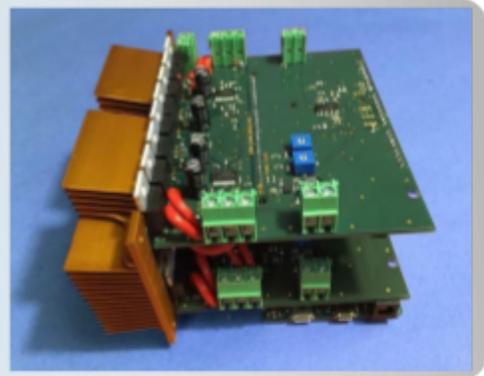
Der bereits am Anfang des Projektes konstruierte TEC-Controller ist regelmäßig im Einsatz bei den Tests unserer Laser-Setups. Um die Bedienbarkeit zu verbessern, wurde noch ein OLED-Display hinzugefügt, welches die Regelparameter (Soll-/Ist-Temperatur und Kühl-/Heizwert) anzeigt, sodass man im Betrieb keinen angeschlossenen Computer mehr benötigt. Dieses Display hat sich so bewährt, dass es in der nächsten Version des TEC-Controllers fest auf der Platine integriert werden soll.

LASER4DIY TEC Controller

Regelung für thermo-elektrische Kühlung

URL:

<https://github.com/Laser4DIY/TEC-Controller>



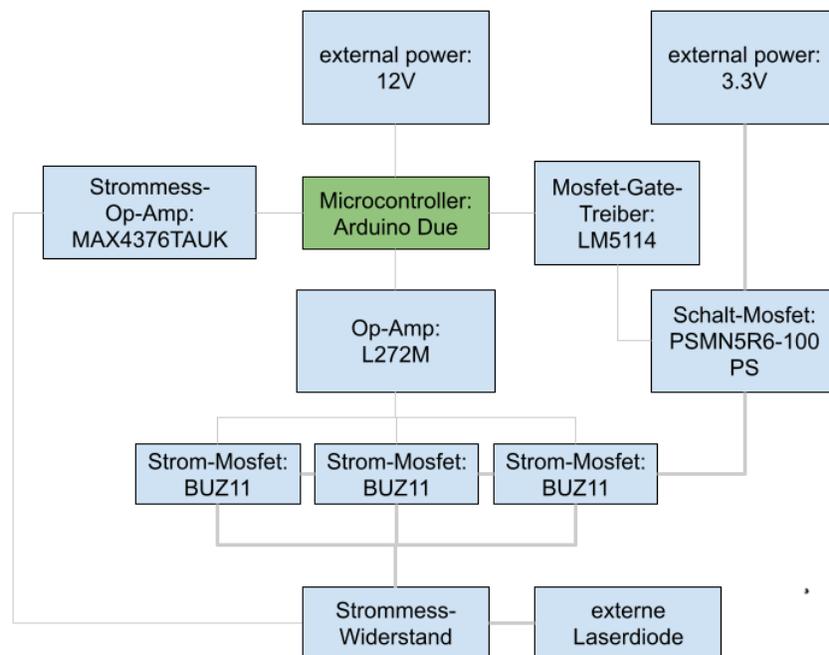
3.6 Laser-Treiber

Zum Betrieb einer Laserdiode ist ein Diodentreiber notwendig, da Laserdioden genau wie LEDs auch mit einer Gleichstromquelle betrieben werden müssen.

Die gewünschten Spezifikationen des Lasertreibers sind folgende:

- Strombelastbarkeit: 80 A
- Arduino-kompatibler Microcontroller
- Fertigbar in Heimarbeit durch 2-lagige Platine und handlötbare Komponenten

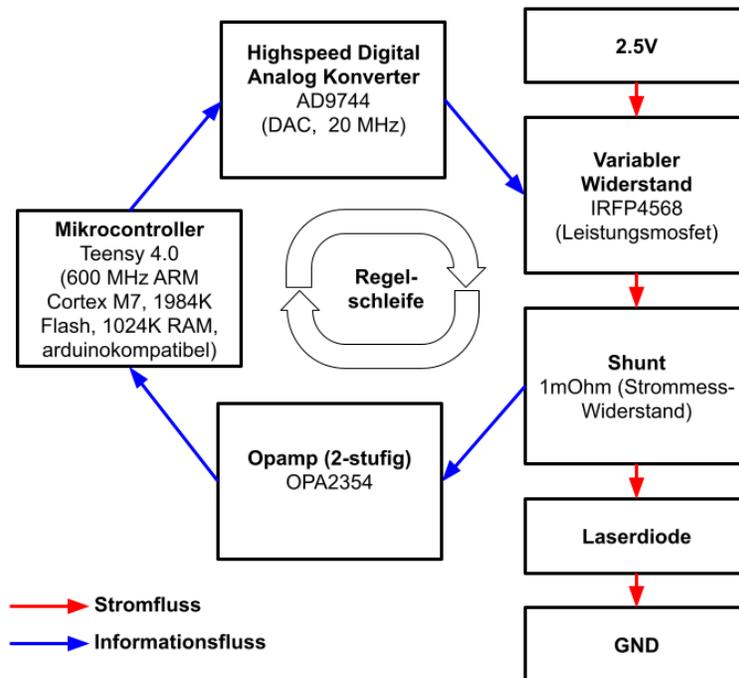
Beim Lasertreiber wurde anfangs auf eine analoge Regelung gesetzt, dabei dient ein Mosfet (Metalloxid-Feldeffekt-Transistor) als Gleichstromquelle. Dies ist möglich da man einen Mosfet nicht nur als Schalter, sondern auch als variablen Widerstand betreiben kann. Die Charakteristik in dieser sogenannten Sättigungsregion führt dazu, dass der Strom relativ konstant bleibt, auch wenn man die darüber anliegende Spannung verändert. Dieser Konstantstrom ist über die Gate-Source-Spannung einstellbar, welche in diesem Fall über den Digital-Analog-Konverter-Ausgang des verwendeten Arduino Due und einem nachgeschalteten Verstärker eingestellt werden kann. Die Regelung selbst funktioniert rein analog durch die Eigenschaften der parallel geschalteten Strom-Mosfets:



Beim Einsatz dieser ersten Version des Lasertreibers gab es in der Praxis Probleme, da auf Basis der Analogregelung ein schwingungsfreier Betrieb schwierig zu erreichen war. Es wäre

zwar möglich gewesen, das vorhandene Konzept auf eine bestimmte Stromstärke zu optimieren, sodass es nicht zu Schwingungen der Stromstärke kommt, ein Ändern der Laserleistung wäre dann aber nicht mehr möglich gewesen, die Lösung dann wenig flexibel.

Deswegen wurde beschlossen, ein anderes Konzept zu verfolgen: eine digitale Regelung auf Basis eines Mikrocontrollers. Dies ermöglicht es, verschiedene Regelfunktionen zu testen und diese im laufenden Betrieb je nach Anforderung des Lasersystems in Software zu ändern.



Weiterhin ist es mit dieser Lösung möglich, beliebige Pulsformen zu fahren, wohingegen mit der reinen Analoglösung nur Rechteckpulse möglich sind. Ein weiterer Vorteil ist es, dass man schnell verschiedene Regelalgorithmen implementieren und testen kann, bei der Analoglösung muss man jeweils eine neue Schaltung entwerfen und aufbauen.

Technisch gelöst wird dies durch ein Arduino-kompatibles Mikrocontrollerboard, dem Teensy 4.0, welches über einen Messwiderstand und einen Messverstärker den aktuell fließenden Strom misst, diesen Wert dann in Software verarbeitet und dementsprechend den sich im Leistungsstromkreis befindlichen Mosfet ansteuert, damit der Stromfluss bei Störungen gleich bleibt. Diese Datenverarbeitung soll durch die Auswahl der Mess- und Steuerelektronik und der Leistung des Mikrocontrollers in 2 μ s abgeschlossen sein, sodass eine Regelfrequenz von 500 kHz möglich ist.

Der angekündigte Strommessverstärker MAX9643 wurde durch eine zweistufige Verstärkerschaltung auf Basis des OPA2354 von Texas Instruments ersetzt.



Das Design dieser Lasertreiber-Schaltung wurde bereits simuliert, ein Demonstrator wurde aufgebaut. Die einzelnen Teile der Schaltung wurden erfolgreich getestet, nur die Stromregulierung ist noch fehlerhaft. Der berechnete Spannungsbereich für die Steuerung des Mosfets reicht nicht aus, da dessen Charakteristik im Sättigungsbereich in der Realität deutlich vom Datenblatt abweicht. Hier ist noch eine Möglichkeit vorzusehen, diese Spannung manuell an den jeweiligen Mosfet anzupassen.

3.7 Verfahrenheit

Für die Anwendung als Laserstrukturiergerät für Plantinen wird neben der Laserquelle eine Verfahrenheit benötigt. Aus Kostengründen wird bei LaserPCB die Laserquelle stationär betrieben und das Werkstück verfahren. Es wird ebenfalls auf eine Z-Achse verzichtet (Fokussierung stattdessen über Anpassung der Linsenposition), sodass ein einfacher XY-Tisch benutzt werden kann.

Bei einem ersten Entwurf wurde ein angepasstes ACRO 55¹ der Firma Openbuilds benutzt, ein Open-Source-System mit einem Fahrweg von ca. 30 × 30 cm². Da bei unserem Ansatz das Werkstück unter dem Laser bewegt wird, und die Werkstückauflage mit in den Bauraum der Maschine passen muss, ergibt sich eine nutzbare Arbeitsfläche von ca. 15 × 15 cm². Das ACRO 55 hat jedoch ein Gesamtmaß von ca. 50 × 50 cm². Gemessen an der resultierenden

¹ <https://openbuilds.com/builds/openbuilds-acro-system.5416/>

Arbeitsfläche ist das sehr viel und dementsprechend groß muss auch das Gehäuse für das Lasergravursystem ausgelegt werden.

Aus diesem Grund wurde eine alternative Mechanik konstruiert, die bei einer Arbeitsfläche von $16 \times 16 \text{ cm}^2$ nur eine Grundfläche von $37 \times 33 \text{ cm}^2$ benötigt. Außerdem wurde die Höhe auf unter 6 cm reduziert.



Das Design basiert ebenfalls auf Open-Hardware-Komponenten von Openbuilds. Es wurde mit einigen Nicht-Standard-Bauteilen erweitert, damit die erwähnte Kompaktheit erreicht werden kann. Trotz des relativ einfachen und kostengünstigen Aufbaus erreicht der XY-Tisch eine hohe mechanische Präzision. Das Spiel des Tisches beträgt in beiden Achsrichtungen nur etwa 0,05 mm. Zur Ansteuerung wird ein Microcontroller-Board auf STM32-Basis verwendet. Die eingesetzte Firmware erlaubt eine aktive Kompensation des Spiels, sodass auch feinste Details präzise aufgelöst werden können:

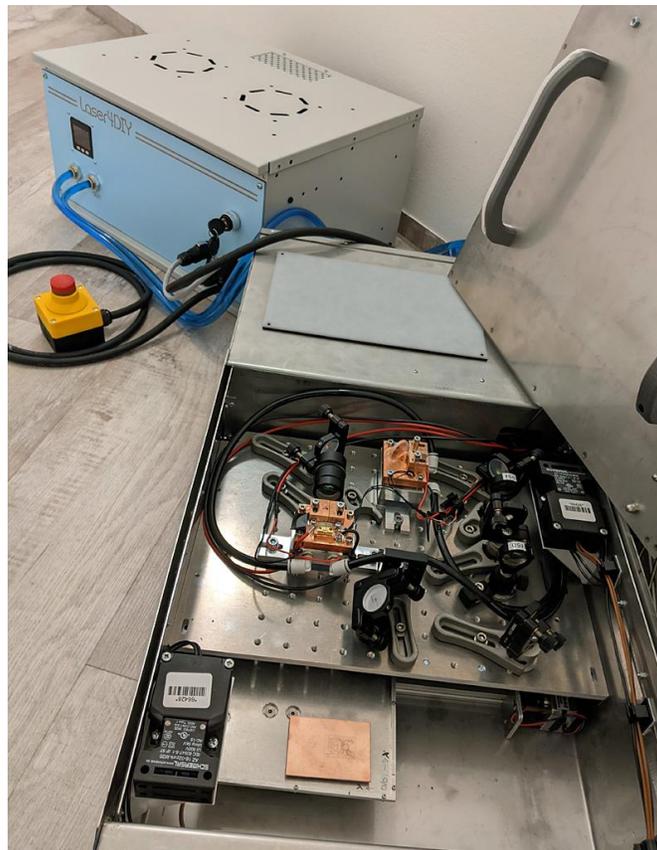


Fein aufgelöste Gravur des LASER4DIY-Logos auf einer Münze, erstellt mit dem LaserPCB

4. Zusammenfassung und Ausblick

4.1 Erzielte Ergebnisse

Als Ergebnis des Projekts entstanden zahlreiche Online-Dokumentationen, Open-Hardware-Repositories und interaktive Online-Werkzeuge, die die Erfahrungen aus den Teilprojekten für Interessierte zur Verfügung stellen. Die dokumentierten Geräte können aufgrund der freien Lizenz reproduziert werden oder können als Grundlage für neue Projekte dienen. Da Unterkomponenten separat und unabhängig voneinander dokumentiert wurden, bieten diese die Möglichkeit, auch – eventuell leicht abgewandelt – für andere Projekte eingesetzt werden zu können.



LaserPCB-Gerät mit separater Versorgungseinheit im Hintergrund. Die Abdeckung der Laserquelle wurde für das Foto entfernt.

Das entworfene LaserPCB-Gerät ermöglicht die Ablation von Kupfer für die prototypische Herstellung von Elektronik-Platinen. Bei einer Standarddicke der Kupferschicht von 35 µm erfolgt dies mit einer Verfahrensgeschwindigkeit von 40 mm/min (bei zwei Durchgängen). Während professionelle Laserstrukturiermaschinen eine deutlich höhere Arbeitsgeschwindigkeit erreichen, ist LaserPCB aufgrund der erheblich geringeren Kosten – der Materialpreis aller verwendeten Bauteile beträgt ca. 2500-3000 Euro – eine sehr attraktive Alternative z.B. für FabLabs und Makerspaces und erlaubt aufgrund der Veröffentlichung als Open Hardware Weiterentwicklungen oder kann als Grundlage für andere Forschungsprojekte dienen.

Für den Einsatz als Gerät zur Herstellung von Platinen-Prototypen sehen wir gerade im Umfeld von FabLabs und Makerspaces einen idealen Einsatzort. Zwar ist die Beauftragung von Dienstleistern für solche Platinen inzwischen recht günstig geworden, doch häufig wünscht man sich schnellere Ergebnisse für kürzere Iterationszyklen bei der Elektronikentwicklung. Hier kann LaserPCB eine sinnvolle Alternative zur Herstellung mittels Ätzen oder Isolationsfräsen darstellen, weil es keine giftigen Chemikalien benötigt und es eine sehr hohe Auflösung bietet, die insbesondere bei SMD-Bestückung nötig ist, die auch im Maker-Umfeld immer populärer wird.

4.2 Veröffentlichung der Ergebnisse

Wir haben unsere Ergebnisse – wie für Open-Hardware-Projekte üblich – online veröffentlicht. Open-Hardware-Projekte sind nicht statisch, sie leben vom Feedback der Community, werden idealerweise fortlaufend weiterentwickelt, weshalb die Online-Veröffentlichung die geeignete Publikationsform ist.

Die Hauptseite des Projekts ist unter www.laser4diy.org zu finden (es findet eine Weiterleitung ins Wiki des FabLab München statt). Einzelne Komponenten wurden aber auch auf anderen Plattformen veröffentlicht; in diesem Bericht weisen Infoboxen darauf hin.

Tobias Gutmann, Teil des Projektteams von LASER4DIY, hat die Komponenten TEC-Controller und Lasertreiber im Rahmen seiner Masterarbeit mit dem Titel „Open Source Nd:YVO4 Laser for Copper Ablation Studies“ [5] erforscht und dokumentiert, die er 2018 an der LMU München abgegeben hat.

4.3 Verwendung der Projektmittel

Das Forschungsvorhaben LASER4DIY wurde im Rahmen des Förderprogramms „Open Photonik“ vom BMBF mit Mitteln in Höhe von 307 TEuro unterstützt. Ein Großteil dieser Summe (ca. 160 TEuro) wurde für Beschäftigungsentgelte ausgegeben. Etwa 23,5 TEuro wurden in Ausstattung investiert, hauptsächlich in Messtechnik zur Evaluierung der Testaufbauten.

4.4 Ausblick

Wir erhoffen uns, dass die veröffentlichten Dokumentationen demnächst von Interessenten aufgegriffen werden und Nachbauten des LaserPCB und den anderen Komponenten entstehen. Dazu werden wir das Projekt auf Messen und Makerfaires präsentieren und weitere mögliche Interessenten ansprechen. Feedback von Personen bzw. Gruppen, die unsere Entwürfe reproduzieren wollen, soll benutzt werden, um die Dokumentation weiter zu verbessern. Idealerweise entsteht dabei eine kleine Community, die für ein lebendiges Open-Hardware-Projekt notwendig ist.

Anschlussforschung wäre insbesondere in folgenden Bereichen möglich und sinnvoll:

- Das Laser-Setup mit optischem Verstärker ist im Rahmen des Projekts zwar untersucht und die Eignung für die Erhöhung der Laserleistung für die Anwendung (Ablation von Kupfer) ist gezeigt worden, wurde aber zugunsten eines einfacheren und kostengünstigeren Aufbaus nicht weiter verfolgt. Dennoch hätte ein solcher Aufbau das Potenzial, ein Gerät für die Herstellung von Platinenprototypen durch die Steigerung der Arbeitsgeschwindigkeit für die Praxis noch besser geeignet zu machen. Das aktuelle Design wurde so gestaltet, dass ein „Upgrade“ des Laseraufbaus möglich wäre, bereits bestehende Geräte könnten also eventuell ohne großen Aufwand umgerüstet werden.
- Der LASER4DIY Lasertreiber mit digitaler Regelung könnte mit Hilfe von softwareseitigen Änderungen mit Zusatzfunktionalität ausgestattet werden, wie z.B. der Erzeugung von präzisen Pulsen mit definierten Pulsformen. Dies würde das Feld der möglichen Anwendungen dieser Elektronikkomponente deutlich erweitern.
- Während der Fokus dieses Projekts auf der Ablation von Kupfer lag, sind für die Fertigstellung von Elektronikplatinen noch weitere Schritte nötig: Bohrung von Löchern, Fräsen bzw. Zurechtschneiden der Platine in die richtige Form, Herstellung von Vias und Aufbringen von Lötstopplack. Diese Schritte werden herkömmlich ausgeführt, es wäre aber wünschenswert, den Workflow für die Verwendung mit dem LaserPCB zu

optimieren. Es gilt auch zu untersuchen, ob Teilschritte automatisiert oder sogar mit in das Gerät integriert werden könnten.

- Mit dem Laseraufbau, der im Rahmen des Projekts entstanden ist, können Ablationen mit einem Durchmesser im Bereich von 10-20 μm durchgeführt werden. Damit wäre er auch geeignet, um Micromachining durchzuführen. Ein Open-Hardware-Projekt in diesem Bereich erscheint vielversprechend.

München, 28.2.2022

Literaturverzeichnis

[1] G. M. Thomas, 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 Arbeit 832, 2003.

[3] „Maschinensicherheit online“, DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.), Beuth Verlag, URL: www.maschinensicherheit-online.de

[4] Werner Schmidt. „Optische Spektroskopie: eine Einführung“. 2. Aufl. OCLC: 76074090. Weinheim: Wiley-VCH, 2000. 372 S.

[5] Tobias Maximilian Gutmann. „Open Source Nd:YVO4 Laser for Copper Ablation Studies“. Master’s Thesis in Physics, Ludwig-Maximilians-Universität München, Faculty for Physics, 2018

[6] Ian Fraser, „Leitfaden für die Anwendung der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG“, 2. Auflage, Europäische Kommission Unternehmen und Industrie, 2010