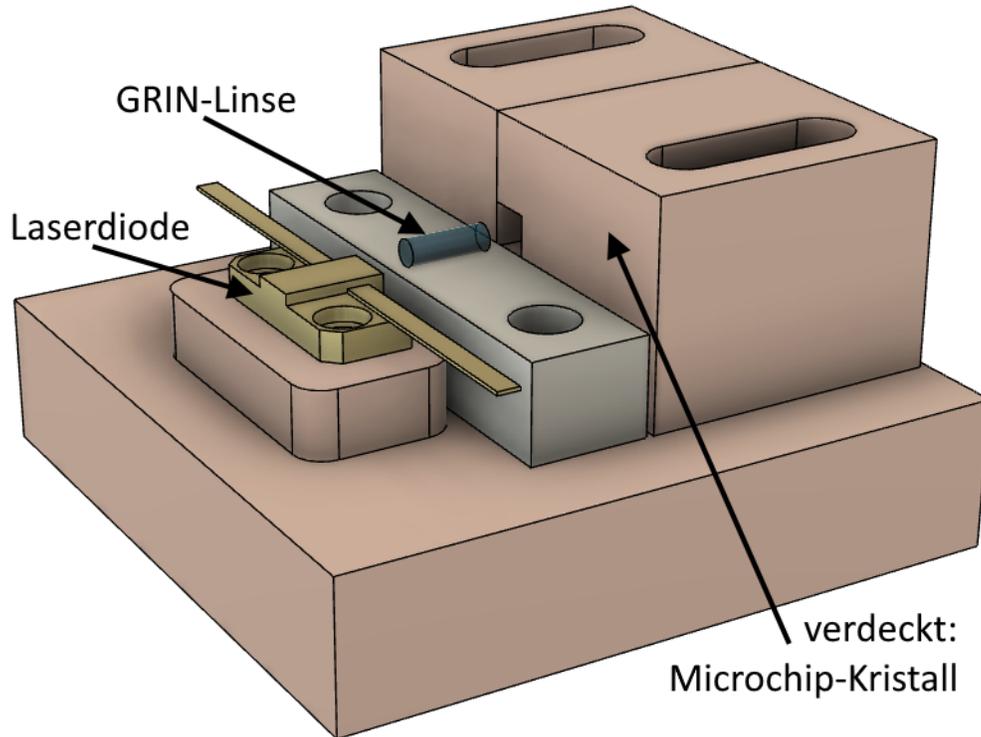


Laser4DIY Microchip-Laser

[Deutsche Version] [\[to English version\]](#)

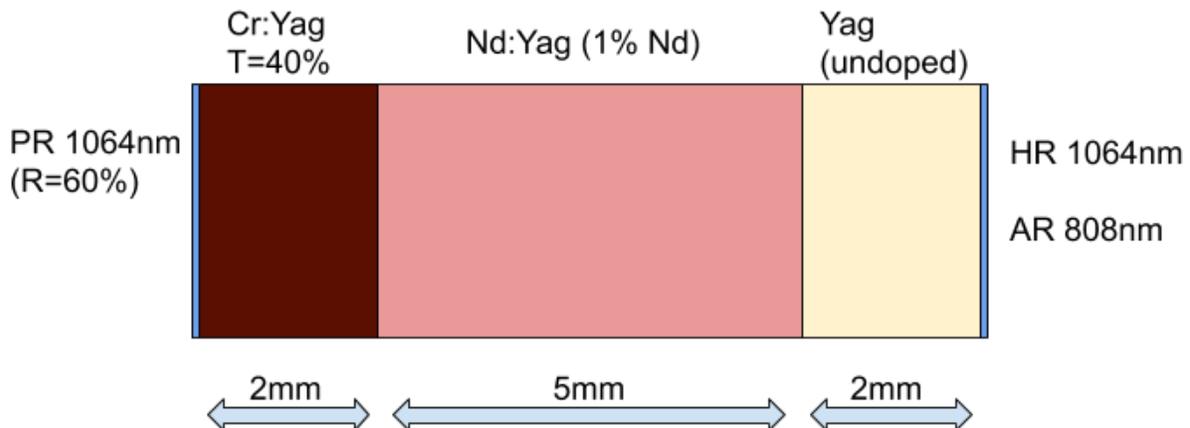
Laser4DIY nutzt einen Laser mit Microchip-Resonator als Basis. Eine Freistrahl-Diode erzeugt Pumpstrahlung mit einer Wellenlänge von 808 nm, einer symmetrischen Strahldivergenz von $8^\circ \times 8^\circ$ und einer $200 \mu\text{m}$ Emittergröße. Eine GRIN-Linse (GRAdient-INDEX-Linse) mit einer Brennweite 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 Einkopplfläche eine Reflektivität von $>99,5 \%$ bei 1064 nm und $<0,5 \%$ bei 808 nm.

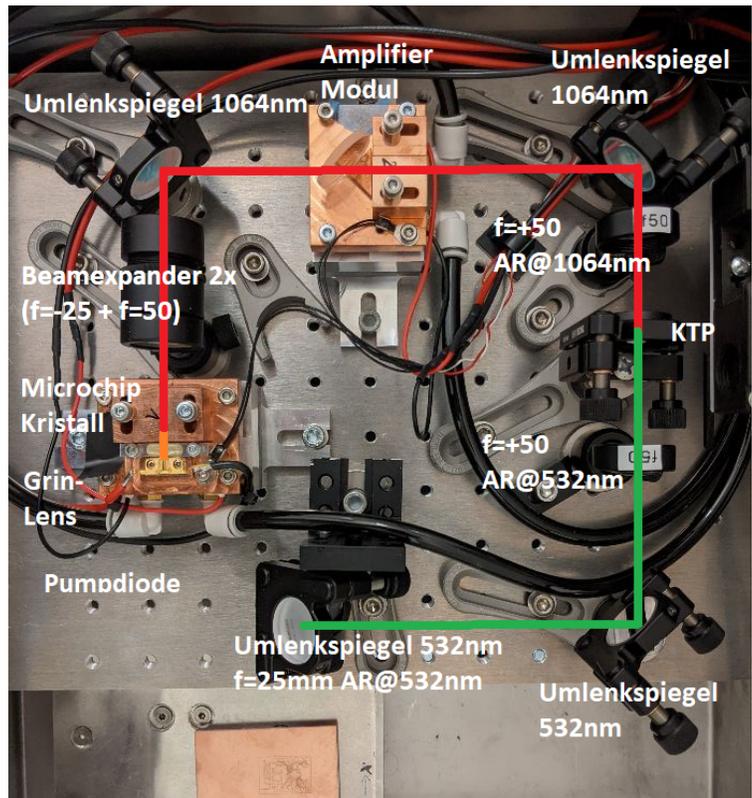
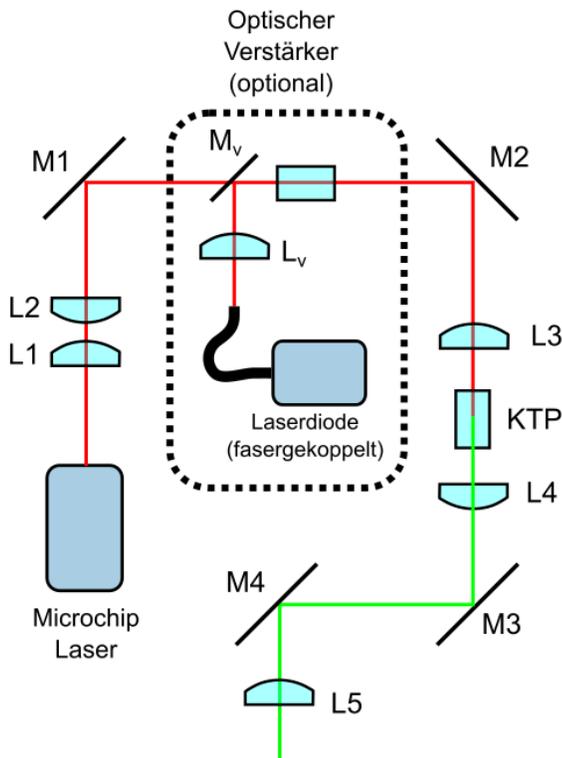
Im Laseraufbau wird eine Pumpdiode mit 10W maximaler Leistung mit einer Emittiergröße von 200 μm bei einer Strahldivergenz von $8^\circ \times 8^\circ$ eingesetzt. Bei einer Pumpleistung von 8,9 W (10A bei 1,9V) erreicht dieser Aufbau eine mittlere Ausgangsleistung von 1,36 W bei 1064 nm. Die Pulslänge beträgt etwa 2,5 ns (FWHM) bei einer Repetitionsrate von 11,3 kHz. Näherungsweise lässt sich hieraus eine Pulsenergie von 120 μJ 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 $^\circ\text{C}$.

Aufbau des Lasers

Der Aufbau der 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 (MV) unter 45° , der auf beiden Seiten eine AR@1064nm Beschichtung aufweist, und auf der dem Amplifier-Kristall zugewandten Seite ein HR@808nm Coating. Über eine fasergekoppelte Pumpdiode kann dieser über die Linse LV mit 808 nm oder 878 nm gepumpt werden.



Schematischer Aufbau des Lasers (links) und Aufbau im Gerät (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.

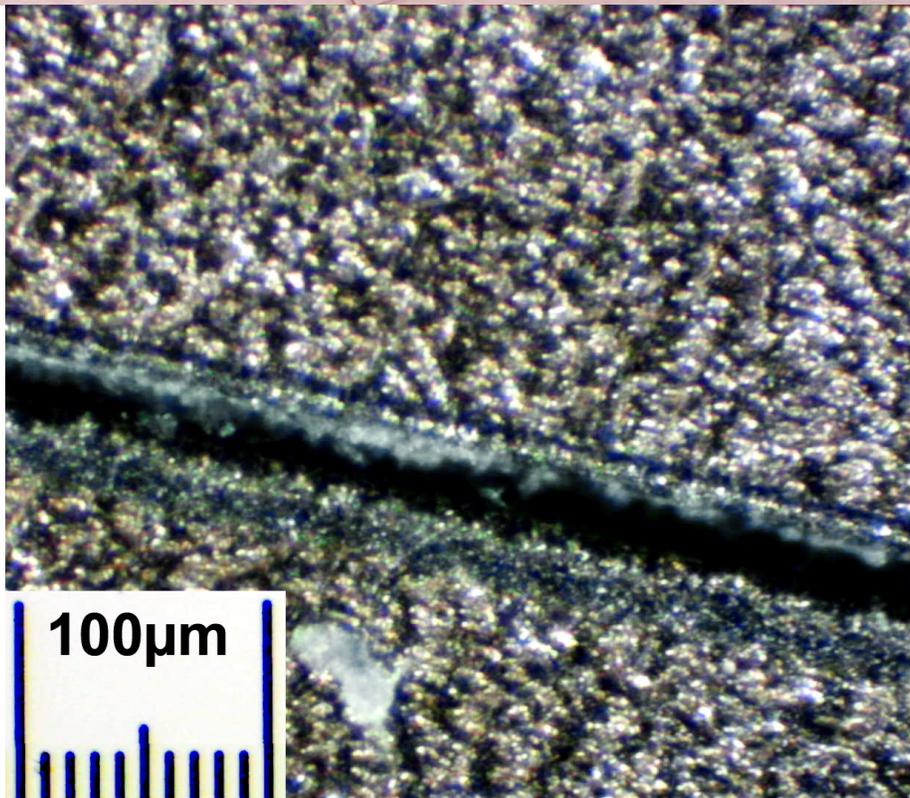
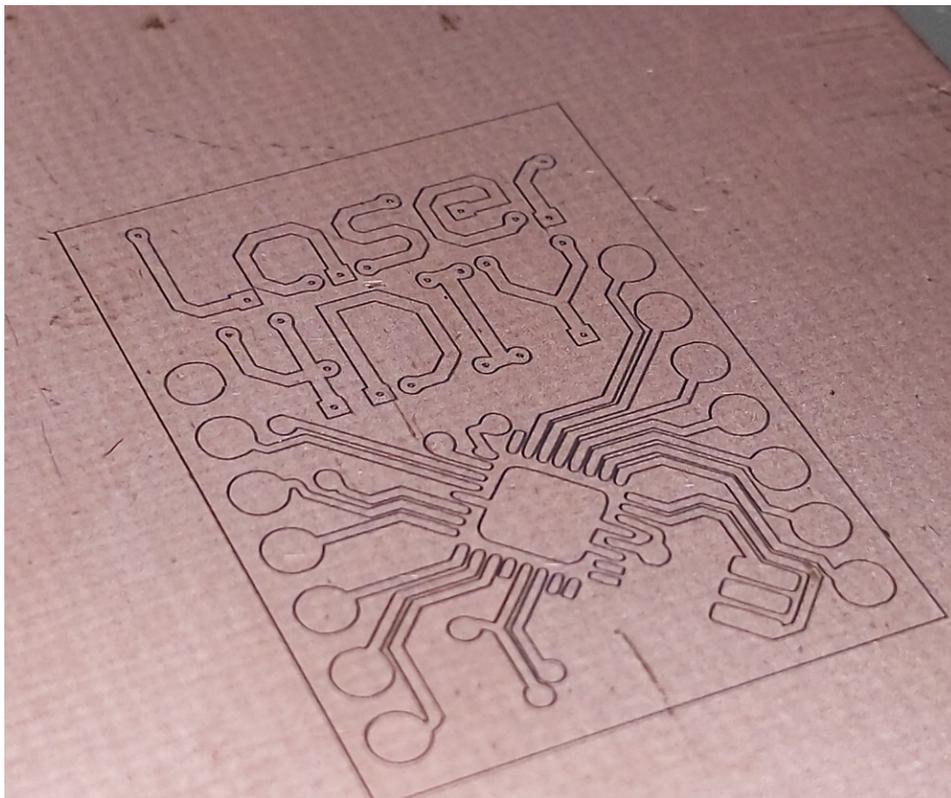
Nach der Frequenzverdopplung kollimiert eine weitere $f = +50 \text{ mm}$ Linse den resultierenden Laserstrahl mit 532 nm. Die folgenden zwei Spiegel (M3, M4) lenken den Strahl durch eine Öffnung in der optischen Platte nach unten, wo sich die Verfahrenheit befindet. M3 und M4 besitzen lediglich ein HR@532nm 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.



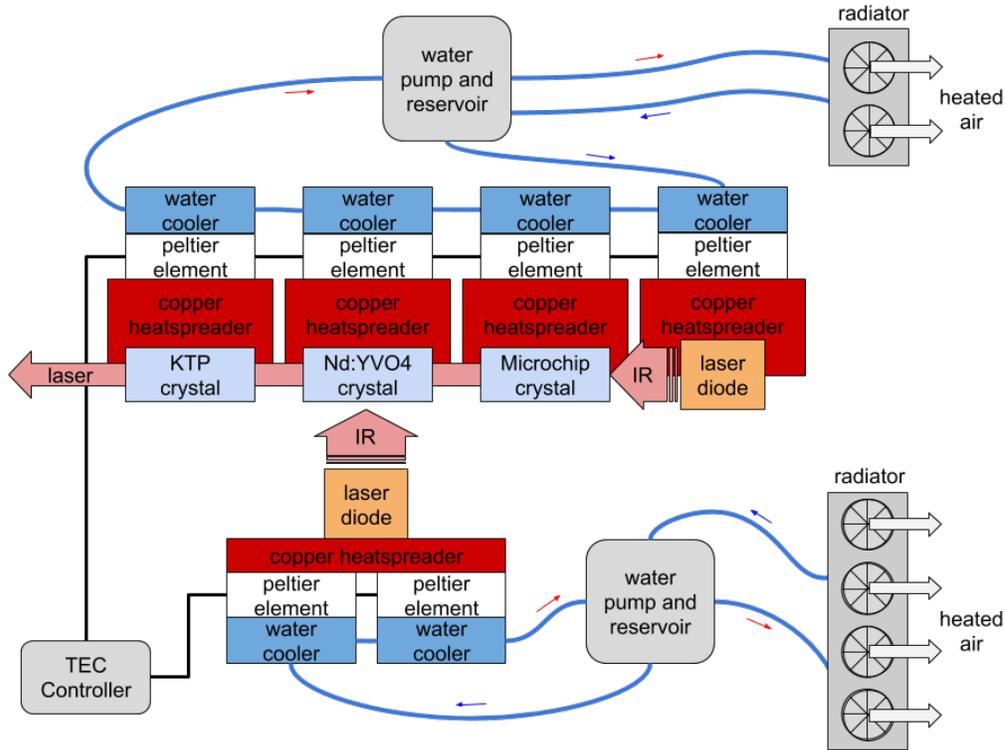
Mit dem Laser4DIY-Gerät erstellte Platine (links), Mikroskopaufnahme einer Ablation (rechts)

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 Laser4DIY-System infrage käme und von einer Integration des optischen Verstärkers in die Dokumentation wurde erstmal abgesehen und bleibt möglichen, zukünftigen Forschungsarbeiten vorbehalten.

Kühlsystem

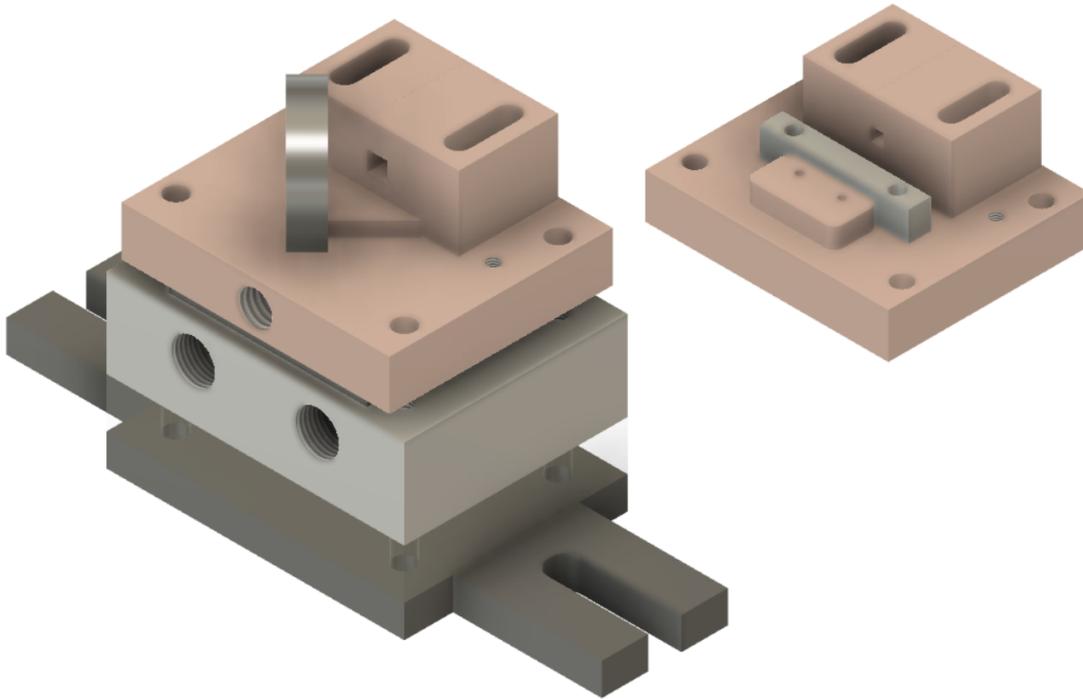
Die Kühlung der Komponenten – im Falle des Aufbaus mit Bounce-Geometrie insbesondere der 60W-Pumpdiode – hat sich schon zu Beginn des Projekts als problematisch erwiesen und verschiedene Konfigurationen wurden getestet. Das System wurde über mehrere Iterationen optimiert, sodass es jetzt für die konzipierten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

Beim Laser4DIY-Gerät befinden sich 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