



This project has received funding from the Eurostars-2 joint programme with co-funding from the European Union Horizon 2020 research and innovation programme

Bericht zum Vorhaben

Entwicklung einer neuartiger 2 μ m Festkörperverstärker und deren Systemintegration

neo**LASE**

im Rahmen des Eurostars Projekts

**Ultrakurzpuls laser bei 2 μ m für neuartige, transparente
Mikromaterialbearbeitung;**

E! 114877 Akronym DISRUPT

Dr. Maik Frede
neoLASE GmbH
Hollerithallee 17
D-30419 Hannover

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin / beim Autor.

Förderkennzeichen: 01QE2102A
Projektlaufzeit: 01.07.2021 – 30.06.2025

1. Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Projekts war die Entwicklung und der experimentelle Aufbau verschiedener Konzepte für Hochleistungs-Festkörperverserker im Wellenlängenbereich um 2 µm. Dieser Spektralbereich gewinnt in der Laser-Materialbearbeitung zunehmend an Relevanz, da er spezifische Vorteile hinsichtlich Absorptionseigenschaften vieler Materialien bietet. Besonders im Fokus stand die Entwicklung leistungsfähiger Laserverstärker auf Basis von Holmium- und Thulium-dotierten Kristallen mit dem Ziel, Ultrakurzpulssysteme mit hoher Energie, kurzer Pulsdauer und stabilem Betrieb bereitzustellen. Zur Realisierung des Projekts sollten sowohl klassische Verstärkerkonzepte mit Ho:YLF-Kristallen als auch alternative Architekturen unter Verwendung von Tm:YAP-Kristallen erforscht und aufgebaut werden. Die Herausforderung bestand insbesondere in der Kombination hoher Verstärkung bei gleichzeitiger Einhaltung der Zerstörschwellen von Verstärkermedien und optischen Komponenten. Darüber hinaus war die Bereitstellung geeigneter Seed- und Pump Laser essenziell für die experimentellen Arbeiten, was sich im Projektverlauf als kritischer Zeitfaktor herausstellte.

1.2 Planung und Ablauf des Vorhabens

Design und Simulation:

Zunächst wurden geeignete Verstärkerdesigns erarbeitet. Mittels numerischer Simulationen wurde die Verstärkung in Abhängigkeit des Strahlradius untersucht. Gleichzeitig wurde die maximal zulässige Pulsspitzenleistung anhand der Zerstörschwelle des Ho:YLF-Kristalls abgeschätzt. Für eine Seedenergie von 1 nJ ergab sich beispielsweise bei sechsfachem Durchgang eine mögliche Verstärkung von ca. 30 dB bei einem Strahlradius von ca. 0,55 mm und 1 ps Pulse.

Experimenteller Aufbau der Ho:YLF-Verstärker:

Basierend auf den Simulationen wurde ein Multipass-Verstärker aufgebaut. Durch Variation der Polarisationsrichtung konnten die beiden Kristallachsen genutzt und damit das Emissionsspektrum verbreitert werden. Dies sollte die Verstärkung kürzerer Pulse ermöglichen. Die Umsetzung erfolgte in einem konzeptionellen Aufbau mit überlagertem Pump- und Laserstrahl.

Entwicklung alternativer Tm:YAP-Verstärker:

Parallel zum Ho:YLF-Konzept wurde ein Tm:YAP-Verstärker bei 1940 nm entwickelt. Hierbei wurde ein endgepumpter Aufbau mit mehreren Verstärkermodulen realisiert. Im Vierfach-Durchgangsaufbau konnten Ausgangsleistungen bis zu 16 W bei 20 µJ Pulsenergie und 500 fs Pulsdauer erreicht werden.

Pumplaser-Entwicklung und -Integration:

Für die Ho:YLF-Verstärker wurden zwei Pumplaser untersucht: ein selbst entwickelter Tm:YAP-Oszillator sowie ein System des Projektpartners MULTITEL. Der Eigenbau-Oszillator zeigte begrenzte Verstärkung bei unzureichender Effizienz. Das MULTITEL-System hingegen

ermöglichte eine stabile Pumplichtversorgung bis 19,3 W. Die Strahlkaustik wurde experimentell vermessen und für eine effiziente Einkopplung angepasst.

1.3 Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit

Simulation und Optimierung des Verstärkerdesigns: Die kritischen Parameter wie Pulsenergie, Strahlradius und Verstärkungsgrad wurden erfolgreich modelliert und für das Design herangezogen.

Aufbau und Test zweier Verstärkersysteme:

Der Ho:YLF-Multipass-Verstärker demonstrierte vielversprechende Verstärkungswerte bei geeigneter Strahlführung und Polarisationskontrolle.

Der Tm:YAP-Verstärker erwies sich als effiziente Alternative, insbesondere durch seine Möglichkeit zur direkten Diodenpumpe.

Pumpquellenentwicklung und Charakterisierung:

Die selbst entwickelte Tm:YAP-Oszillatorquelle war grundsätzlich funktionsfähig, jedoch für eine wirtschaftliche Nutzung nicht geeignet.

Der kommerzielle Pump laser von MULTITEL ermöglichte stabile Pumpbedingungen, wies jedoch mechanische und thermische Herausforderungen auf, die für eine industrielle Integration überarbeitet werden mussten.

Die Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern LZH, neoLASE und MULTITEL war essenziell für den Fortschritt des Projekts. Trotz logistischer Herausforderungen durch verspätete Komponentenlieferungen wurden die technischen Ziele im Wesentlichen erreicht. Insbesondere die Bereitstellung von Seed- und Pumpquellen durch die Partner bildete die Grundlage für den erfolgreichen Aufbau der Verstärkerkonzepte. Darüber hinaus konnte durch die Kombination von Simulation, experimentellem Aufbau und messtechnischer Charakterisierung ein vollständiges Systemverständnis für zukünftige Entwicklungen im 2 µm-Bereich geschaffen werden.

2. Ausführliche Darstellung

2.1 Erzielte Ergebnisse

Innerhalb des Projekts sollten unterschiedliche Konzepte für Hochleistungs-Festkörperverstärker entwickelt und aufgebaut werden. Hierzu wurden Kristalldesigns definiert, Optik-Simulationen durchgeführt und entsprechende Optikkomponenten aufgebaut. Die Lasermoden- und Pumpspotgrößen in den Laserkristallen wurden bestimmt und optimiert. Für die experimentellen Untersuchungen der Verstärker sind ein passender Seedlaser und eine Pumplichtquelle, beides Bereitstellungen der Projektpartner, notwendig. Beide Strahlquellen wurden mit erheblicher Verspätung zur Verfügung gestellt weshalb es zu einer zeitlichen Verzögerung kam.

Amplifier Design

In AP 3 sollen unterschiedliche Konzepte für Hochleistungs-Festkörperverstärker entwickelt und aufgebaut werden. Aufgrund der geringen Ausgangsenergie (~nJ) des Seedlasers ist eine

effiziente Verstärkung notwendig um die benötigten Ausgangsenergien (>100µJ) zu erreichen. Eine möglichst hohe Verstärkung kann mit geringen Laserstrahlgrößen im Verstärkerkristall erreicht werden. Auf der anderen Seite limitiert die Pulsspitzenleistung und somit die Zerstörschwelle der Komponenten die Minimierung der Strahlgrößen. In der

Abbildung 1 sind diese Zusammenhänge dargestellt. Im linken Graph ist die ungesättigte Verstärkung eines Ho:Ylf Kristalls mit ca. 10W absorbiertes Pumpleistung für unterschiedliche Laserstrahlradien dargestellt. In rot für einen 1x, blau für einen 2x und violett für einen 6-fach Durchgang (x = Datenpunkte aus Ergebnissen am LZH). Auf der rechten Seite ist die aus der Verstärkung in 6 Durchgängen und einer Seedenergie von 1nJ resultierende Pulsspitzenleistung über den Laserstrahlradien und einer Pulsdauer von 1ps (rot) und 10ps (blau) dargestellt. Von Herstellern [1] wird für Ho:YLF Kristalle eine Zerstörschwelle von >10J/cm² angegeben (für 10 ns⁻¹-Pulse). Die zugehörige Pulsspitzenleistung von 1GW/cm² ist gepunktet in

Abbildung 1, rechts, eingezeichnet hiernach ergibt sich ein minimaler Laserstrahlradius von etwa 0,4 mm für 10ps-Pulse bzw. 0,55mm für 1ps Pulse. Für einen 6-fach Durchgang kann mit diesem Strahlradius ein Verstärkungsfaktor von ca. 30dB erreicht werden.

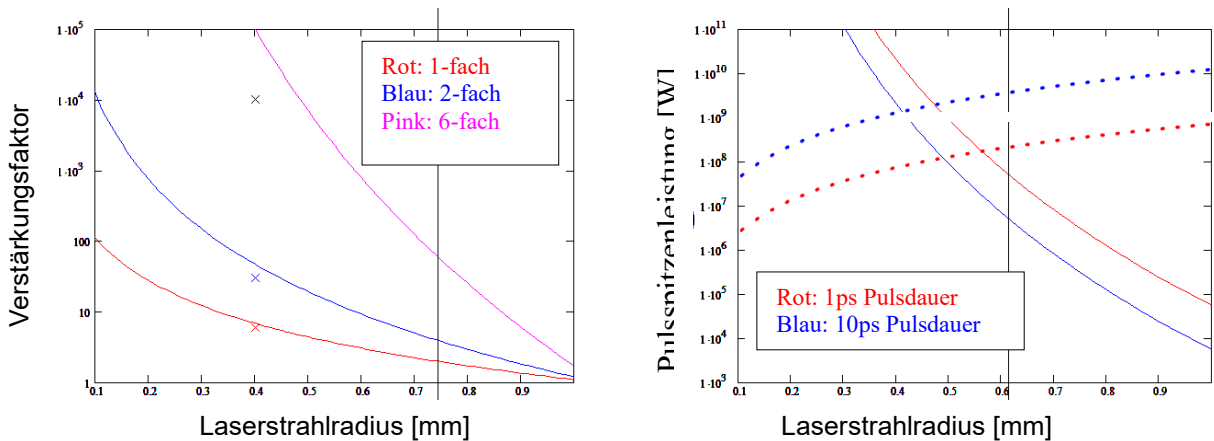


Abbildung 1: Verstärkung (links) und Pulsspitzenleistung (rechts) eines Ho:Ylf Verstärkers

Zur Verifizierung der Berechnungen sind experimentelle Untersuchungen zur Kleinsignalverstärkung in Holmium dotierten Kristallen (Ho:Ylf) geplant. Für das Verstärkerdesign gilt es neben dem eigentlichen Verstärkungsfaktor auch ein möglichst breites Spektrum zur Verstärkung kurzer Pulse bereitzustellen. Ein Ansatz zur Verbreiterung des Emissionsspektrums von Ho:YLF ist die Verwendung der unterschiedlichen Kristallachsen, was durch Drehen der linearen polarisierten Strahlung realisiert werden kann. Die Emissionswirkungsquerschnitte der beiden Achsen sind jedoch unterschiedlich, was durch die Wahl einer geeigneten Anzahl an Durchgängen kompensiert werden kann.

Abbildung 2 zeigt in rot und schwarz die normierten Emissionsspektren für zwei unterschiedliche Kristallachsen (E-Feld parallel zur kristallographischen a-, bzw. c-Achse). Beide Spektren weisen

¹ Für ps-Pulse liegen keine verlässlichen Literaturdaten vor.

einen relativ schmalen Peak bei etwas unterschiedlicher Wellenlänge auf. Durch das Bandbreitenlimit ist daher die theoretische Pulsdauer auf jeweils etwas über 1ps limitiert. In einem Mehrfachdurchgang sollen im Fortgang die Spektren kombiniert werden, so dass die spektrale Breite vergrößert werden kann. Hierdurch wird erwartet, dass theoretisch auch deutlich kürzere Pulsdauern möglich sind.

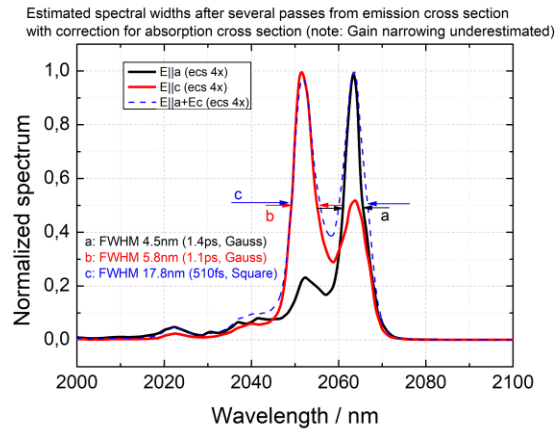


Abbildung 2: Emissionsspektren für Ho:YLF bei unterschiedlichen Kristallachsen.

Der Verstärker soll von einem cw Thulium-dotierten MOPA-System (WP2, MULTITEL) gepumpt werden. Aufgrund der guten Strahlqualität lassen sich Pump- und Laserstrahl gut überlagern und durch eine geeignete Abbildung mehrere Male fokussiert durch das Verstärkungsmedium propagieren (Abbildung 3).

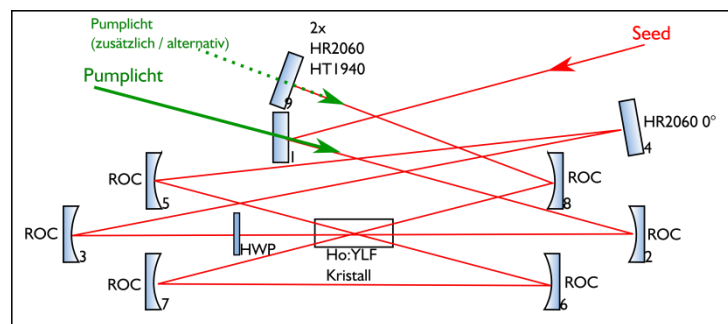


Abbildung 3: Konzeptioneller Aufbau des Multipass-Verstärkers.

Bei der Wahl der genauen Wellenlänge des Pumplasers ist es entscheidend, die Wasserabsorptionslinien im Wellenlängenbereich um 1940 nm zu meiden, da Luftfeuchtigkeit innerhalb des Lasersystems ansonsten zu Problemen und Instabilitäten im Betrieb des Lasers führen kann. Zu diesem Zweck wurden die entsprechenden Linien vorab anhand der HITRAN [2] Datenbank analysiert, die Druckverbreiterung berechnet und die Zielwellenlänge des Pumplasers definiert (Abbildung 4).

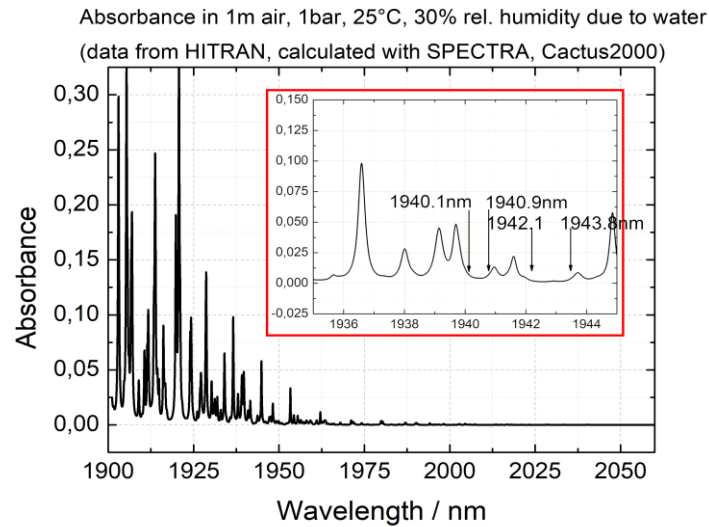


Abbildung 4: Wasserabsorptionslinien im Bereich um 1940nm
(Einsatz: Vergrößerung des relevanten Bereichs).

Für die in AP5 geplante Laserintegration stellt das LZH bereits zum Anfang des Projekts einen bereits vorhandenen Demolaser zur Verfügung. Die neoLASE GmbH hat diese Arbeiten in Bereich Elektroniksteuerung unterstützt.

Alternatives Amplifierkonzept

Neben der Verstärkerentwicklung bei 2050 nm (Ho:Ylf) wurde zusätzlich ein Verstärker bei 1940 nm (Tm:YAP) entwickelt, der den Vorteil hat, direkt durch Laserdioden angeregt zu werden. Hierzu wurde ein endgepumptes Standardkonzept, ähnlich wie aus dem 1 µm Bereich bekannt verwendet. Als Seedlaser wurde ein kommerzieller Femtosekundenlaser der Fa. Innolas verwendet. Zunächst wurde für das Setup die Verstärkung im Einfach- / Doppeldurchgang und für verschiedene Pumpspotdurchmesser untersucht. Abbildung 5 zeigt die optimierte Verstärkung durch einen einzelnen Kristall. Mit einer Eingangsleistung im Bereich von ca. 160 mW und einer absorbierten Pumpleistung von ca. 12 W konnte ein Verstärkungsfaktor von ca. 1,5 erzielt werden.

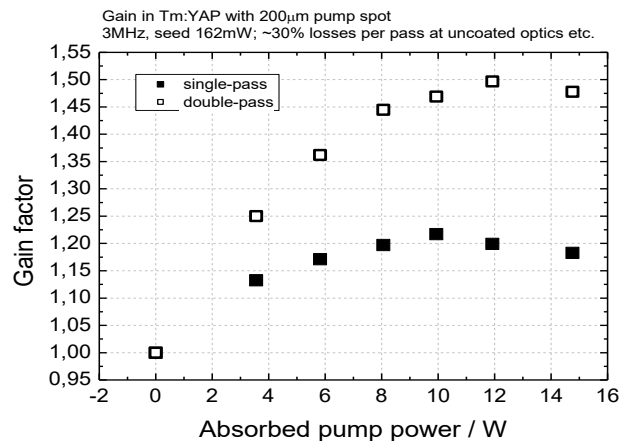


Abbildung 5: Tm:YLF Verstärkerexperimente zur Bestimmung der Verstärkung.

Entwicklung einer neuartigen 2µm Festkörperverserker und deren Systemintegration

Für eine weitere Skalierung der Ausgangsleistung wurde das Setup in eine 4er Verstärkeranordnung überführt. Somit sind bis zu 8 Durchgänge durch die Verstärkermedien bei geringem Platzbedarf möglich. In Abbildung 6 ist der entsprechende Aufbau schematisch und in der aufgebauten Form dargestellt.

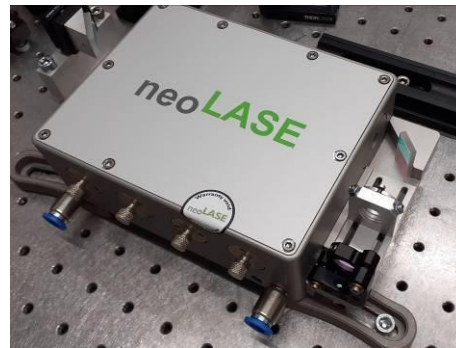
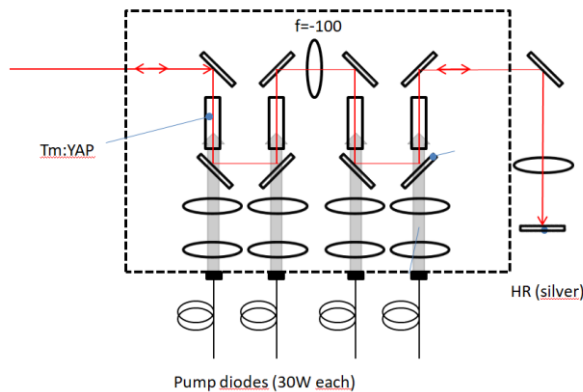


Abbildung 6: Tm:YLF Verstärkeranordnung mit 4 Kristallen.

Mit dem 4er Verstärker konnte ein Verstärkungsfaktor von 10 und eine Ausgangsleistung von bis zu 16 W bei einer Eingangsleistung von maximal 2,7 W erzielt werden. Bei einer Wiederholrate von 500kHz entspricht dies einer Pulsenergie von 20 µJ. Somit konnte ein Gesamtsystem mit Pulsdauern im Bereich von 500fs, einer Pulsenergie von 20µJ und einer mittleren Leistung von bis zu 16 W realisiert werden.

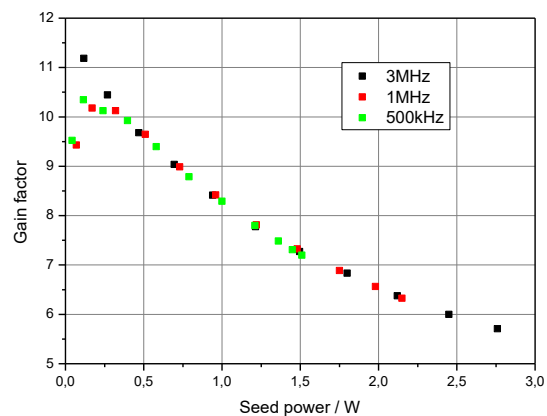
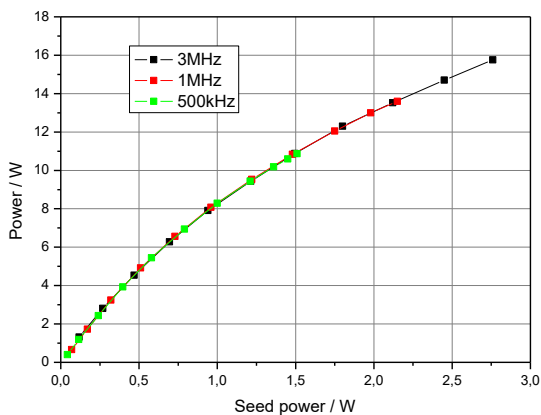


Abbildung 7: Ergebnisse der Ausgangsleistung und Verstärkung der 4er Verstärkeranordnung.

Alternativer Pumplaser

Aufgrund der Emissionswellenlänge von 1940 nm bietet Tm:YAP auch die Möglichkeit des Einsatzes als Pumpquelle für den Ho:Ylf Verstärker. Hierzu wurde ein Tm:YAP Kristall in einer Resonatoranordnung aufgebaut und getestet (Abbildung 8). Die Abbildung zeigt einen ersten Laboraufbau, um die grundsätzliche Eignung als Pumplaser zu untersuchen. Es wurden verschiedene Resonatorlängen untersucht und dabei die Strahlqualität bestimmt. Grundsätzlich wird die Strahlqualität mit kürzerem Resonator besser, während gleichzeitig die höchste Ausgangsleistung erzielt werden konnte (Abbildung 9).

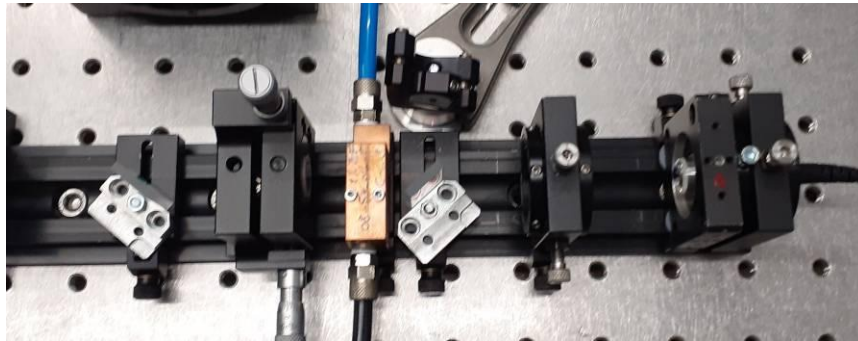


Abbildung 8: Tm:YAP Resonatoraufbau.

Mit dem Tm:YAP Oszillator konnte eine Ausgangsleistung von bis zu ca. 12 W bei einer Strahlqualität von M^2 ca. 1,5 erreicht werden. Die Emissionswellenlänge liegt bei ca. 1936 nm und soll im nächsten Schritt zusammen mit einem Ho:Ylf Kristall getestet werden. Hier ist zunächst entscheidend, ob die Wellenlänge außerhalb der Wasserabsorptionslinien und auf der anderen Seite innerhalb der Absorption von Ho-Ylf liegt.

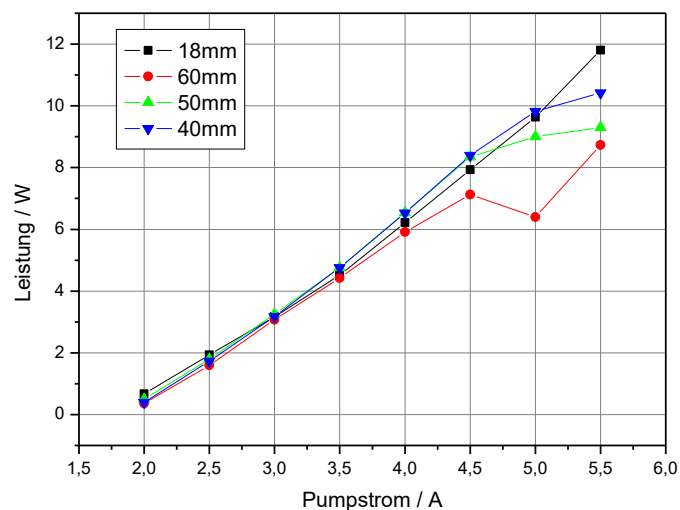


Abbildung 9: Ausgangsleistung des Oszillators.

Der entwickelte Tm:YAP Oszillator wurde im Folgenden in ein robusteres mechanisches Design (Abbildung 10) überführt.

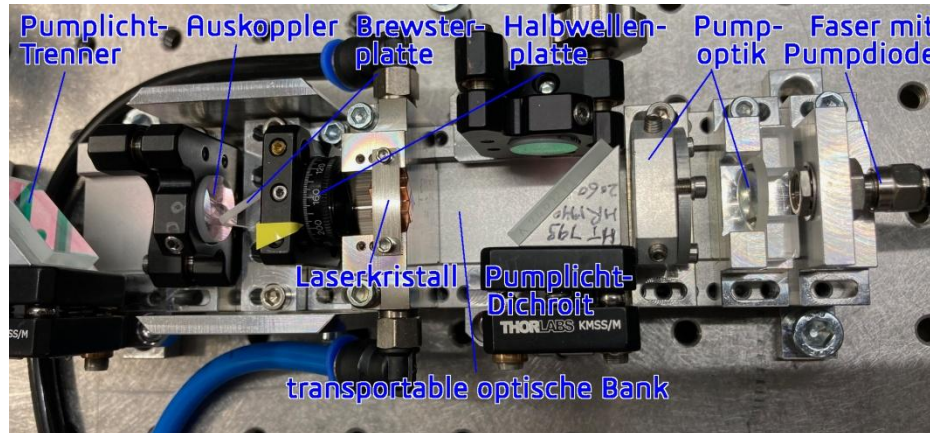


Abbildung 10: Vereinfachter neoLASE Pumplaser zur Durchführung von 2µm Vorversuchen

Da die Pumplichtquelle für einen Ho:YLF Verstärker linear polarisiert sein sollte, wurde der Resonator um einen Polarisator und eine Halbwellenplatte ergänzt. Eine Variation der internen Polarisation und des Pumpstromes führte zu einer sprunghaften Variation der Emissionswellenlänge und der Ausgangsleistung. In Abhängigkeit der Polarisation konnten im Wesentlichen drei Emissionslinien gemessen werden: um 1980nm, um 1940nm und um 1880nm. Bei der Zielpumpwellenlänge um 1940nm konnte die Leistung auf etwa 4W optimiert werden (siehe Abbildung 11, links).

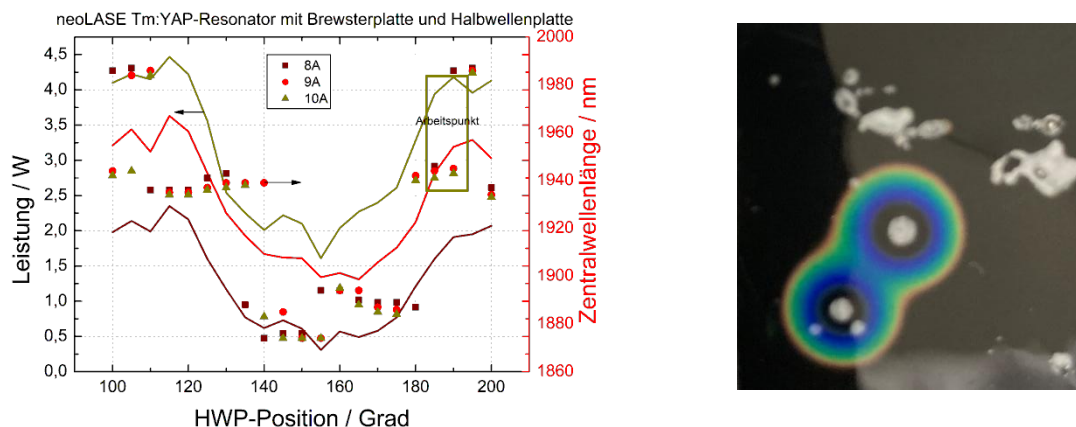


Abbildung 11: Spektrum und Leistung aus dem Tm:YAP Festkörperoszillator in Abhängigkeit der Position der internen Wellenplatte (links), Strahlprofil auf Thermokarte (Doppelter Reflex eines Keilsubstrats, rechts).

Das Strahlprofil wurde lediglich mittels einer Thermokarte abgeschätzt, da zum Zeitpunkt der Messungen weder eine Kamera noch der in ZB22 verwendete „Beamanalyzer“ zur Vermessung der Strahlqualität zur Verfügung standen (Abbildung 11, rechts). Des Weiteren wurde die Leistung in einem 2-fach Festkörperverserker mit 2x30W Pumpleistung auf Tm:YAP-Basis untersucht, um sie weiter zu verstärken. In diesem Aufbau konnten nur Verstärkungsfaktoren von $<1,2$ bei 1940nm erzielt werden, so dass dieser Ansatz als unwirtschaftlich verworfen wurde.

Im Dezember 2023 wurde der Selbstbau-Oszillator durch den Pumplaser von Projektpartner Multitel ausgetauscht. Das System besteht aus einem Rack, in welchem ein Wasserkühler und die Elektronikeinheit untergebracht sind (**Abbildung 12**).

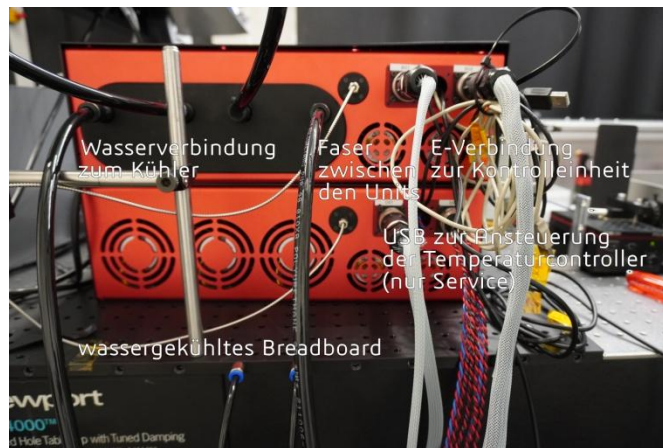
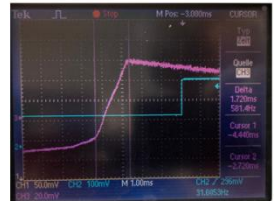
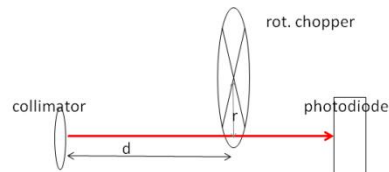
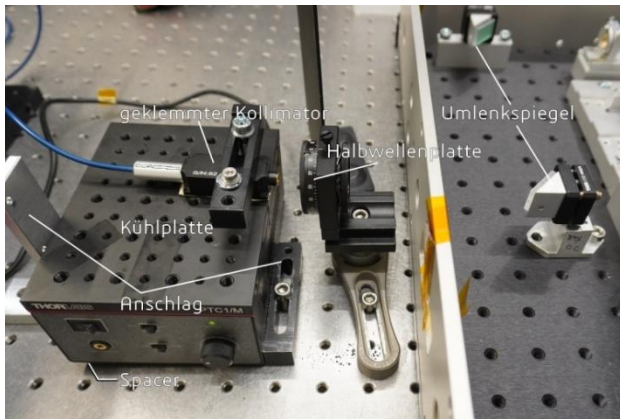


Abbildung 12: Pumplasersystem

Der Laserkopf wird auf einem wasserdurchflossenen Breadboard platziert und zusätzlich selbst vom Kühlwasser durchströmt. Thermische Stabilität wird bei einer Kühlwassertemperatur von 12°C erreicht. Das optische Interface des Pumplasers besteht aus einem Kollimator, welcher ebenfalls auf 14°C gekühlt werden muss und der daher auf einer Kühlplatte angebracht wird. Dieser Teil des Systems ist in Abbildung 13, links, gezeigt. Das mechanische Design als auch die notwendigen Kühltemperaturen sind für ein industrietaugliches Design unbrauchbar. Für eine finale Integration müsste das System überarbeitet werden.

Die Kaustik hinter dem Kollimator wurde mittels eines Chopperwheels vermessen, indem dieses in einem definierten Abstand hinter dem Kollimator betrieben wird, während das passierende Laserlicht hinter dem Chopperwheel mit einer Photodiode und einem Oszilloskop ausgewertet wird. Aus der Anstiegszeit des „gechoppten“ Signals lässt sich dann bei bekannter Rotationsfrequenz auf den Strahldurchmesser zurückrechnen. Der Aufbau ist in Abbildung 13, rechts gezeigt.



Blau: trigger vom chopper
 Pink: Photodiodesignal
 Die Anstiegszeit von 1.72ms bei 31Hz entspricht 1,3mm Strahldurchmesser

Abbildung 13: Links: Kollimator des Pumpasers, Rechts: Aufbau zur Vermessung der Kaustik mit ScopeTrace (Beispiel)

Die Kaustikmessung hat ergeben, dass der Strahldurchmesser bei etwa 1,3mm liegt und dass das Pumplicht leicht divergent in den Verstärkeraufbau eingekoppelt wird. Um einen zu kleinen Fokus im Ho:YLF-Kristall innerhalb des Multipass-Verstärkers zu vermeiden, wurde daher das Einkoppelteleskop so angepasst, dass ein Strahlradius von 150µm erreicht wird. Die Ausgangsleistung des Pumpasers ist über das Touchpanel an der GUI einstellbar. Zur Verfügung stehen elf vordefinierte Leistungen zwischen 4.1W und 19.3W. Beim Vermessen der „Set“-Werte wurden keine Diskrepanzen zur tatsächlich emittierten Ausgangsleistung festgestellt. Dennoch gestaltet sich die Justage des Verstärkers mit einer minimalen Leistung von etwa 4W ohne zusätzliche Abschwächung wegen des komplexen Strahlwegs als kompliziert. Die Absorption des Pumplichtes in dem für den Verstärker vorgesehenem Ho:YLF-Kristall wurde im Einfachdurchgang, sowie im 6-fach Durchgang innerhalb der Multipasszelle vermessen. Dabei wurde die Eingangspolarisation in Bezug auf die Kristallachse verstimmt. Die Absorption von mehr als 99% im Mehrfachdurchgang dürfte für den Verstärkerbetrieb ausreichend sein. Die Ergebnisse sind in Abbildung 14 dargestellt.

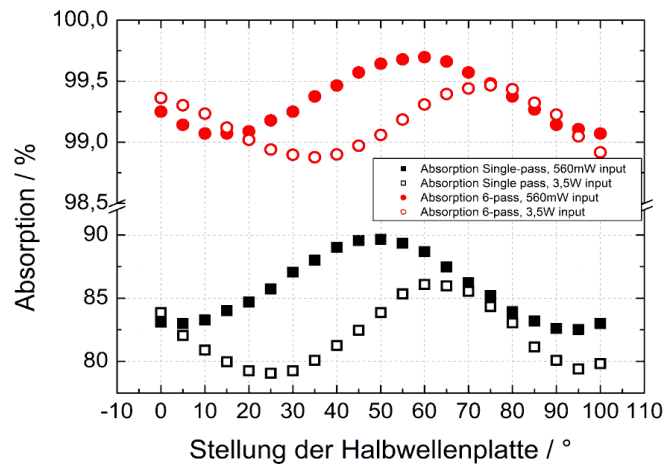


Abbildung 14: Absorption im für den Multipass-Verstärker vorgesehenem Ho:YLF Kristall. Rot: 6-fach Durchgang, schwarz: Einfach-Durchgang. Gefüllte bzw. offene Symbole entsprechen unterschiedlichen Eingangsleistungen. Mehr als 3.5W wurden bislang nicht getestet.

Seedlaser

Der vom LZH gestellte Seedlaser besteht neben dem eigentlichen Laserkopf aus einer Vielzahl an externen Temperatur- und Stromtreibern und verschiedenen Software-Interfaces zur Ansteuerung des verbauten Fiber-Bragg-Gitters und des Seedlasers. Ein Überblick über die Hardware ist in Abbildung 15 gezeigt. Eine Überführung in ein industrielles Design müsste hier noch stattfinden, da der aktuelle Aufbau nur für den Laborbetrieb ausgelegt ist.

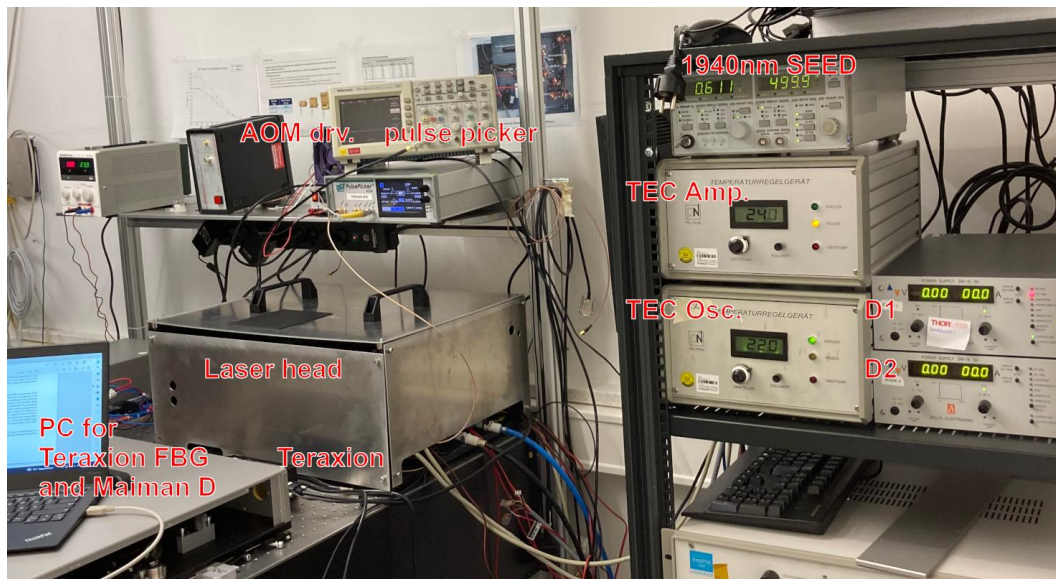


Abbildung 15: Seedlaser mit zugehörigen Komponenten zur Ansteuerung

Der Seedlaser wurde im Anschluss in den Räumlichkeiten der Neolase GmbH getestet und charakterisiert. Das gemessene Spektrum, die Pulsenergie und der Pulszug sind in Abbildung 16 von links nach rechts gezeigt.

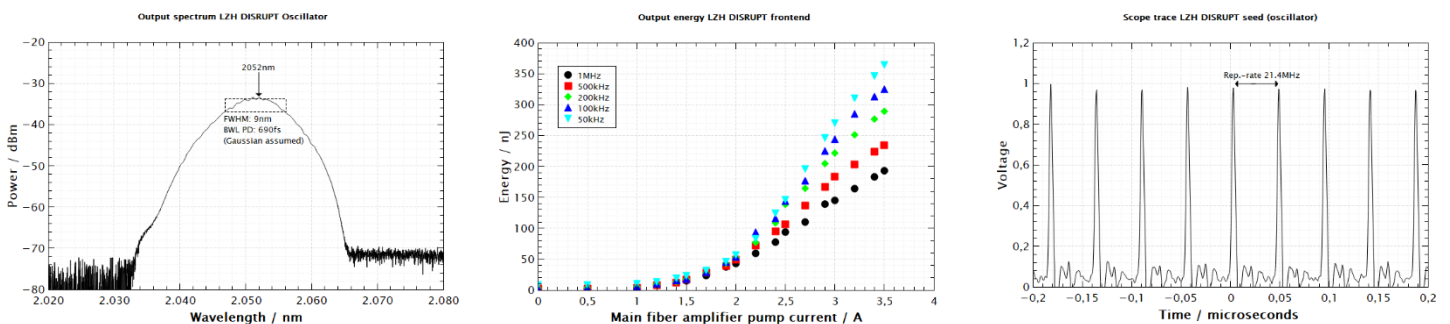


Abbildung 16: Charakterisierung des Seelasers. Links: Optisches Spektrum, Mitte: Pulsenergie in Abhängigkeit des Pumpstromes bei verschiedenen Seedleistungen, Rechts: Pulszug des Oszillators vor dem Picken.

Die sich aus dem Spektrum ergebene bandbreitenlimitierte Pulsdauer liegt bei etwa 680fs. Nach der Verstärkung im Festkörpersystem sollen die Pulse mittels eines Gitterkompressors wieder komprimiert werden. Hierfür wurde ein optisches Transmissionsgitterpaar mit einer Strichzahl von 800l/mm beschafft. Für eine Zentralwellenlänge von 2050nm ergibt sich hieraus ein Littrow-Winkel von 55.1°. In Absprache mit dem Projektpartner LZH wurde das im Seedlaser verbaute CFBG hierauf abgestimmt (siehe Abbildung 17).

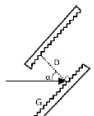

1. Pulse parameters				
Pulse center wavelength	Oscillator output	After stretching	After amplification	After compression
	2050.00 nm		2050.00 nm	
Spectral shape If custom (please provide file)	Gaussian		Gaussian	
Spectral bandwidth at full-width half-maximum	13.00 nm		13.00 nm	
Pulse duration		300000.00 fs		400.00 fs
2. System additional dispersion Fill out section 2.1 OR 2.2				
2.1 Linear and non-linear dispersion coefficients excluding stretcher and compressor				
β_2		ps ²		
β_3		ps ³		
β_4 (if known)		ps ⁴		
OR				
2.2 Total fiber length (in red in figure 1) Lets TeraXion assess the linear dispersion coefficients				
Fiber length	11.00	m		
Figure 1				
3. Compressor parameters Fill out section 3.1 OR 3.2 according to your compressor type (diffraction grating or VBG).				
3.1 Diffraction grating (Treacy) compressor design			3.2 Volume Bragg grating (VBG) compressor design	
Specify compressor parameters and possible adjustments. Enter 0 for fixed compressor.			Please provide VBG specification sheet	
D = Perpendicular distance	350.00 mm	± 50.00 mm	α = beam incidence angle (typically 0°)	0°
α = beam incidence angle or L for Littrow angle	55.1°	± 1.00°	Single or double pass	Single pass
G = Grooves per mm	800		VBG dispersion (per pass)	ps/nm
				

Abbildung 17: Spec-Sheet zur Abstimmung des Chirped Volume Bragg-Gratings (CFBG) mit dem Gitterkompressor.

Der Gitterkompressor soll im typischen 2-fach Durchgang verwendet werden, wie er in Abbildung 18 schematisch gezeigt ist.

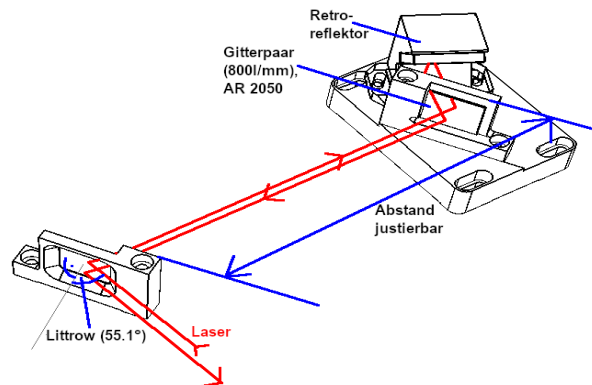


Abbildung 18: Beispielaufbau eines typischen Gitterkompressors.

Entwicklung einer neuartigen 2µm Festkörperversrärker und deren Systemintegration

Der Seedlaser wurde vor der Justage in den Multipass-Verstärker kollimiert und die Kaustik mittels eines Chopperwheels vermessen, indem dieses in einem definierten Abstand hinter dem Kollimator betrieben wird, während das passierende Laserlicht hinter dem Chopperwheel mit einer Photodiode und einem Oszilloskop ausgewertet wird. Aus der Anstiegszeit des „gechoppten“ Signals lässt sich dann bei bekannter Rotationsfrequenz auf den Strahldurchmesser zurückrechnen (Abbildung 19).

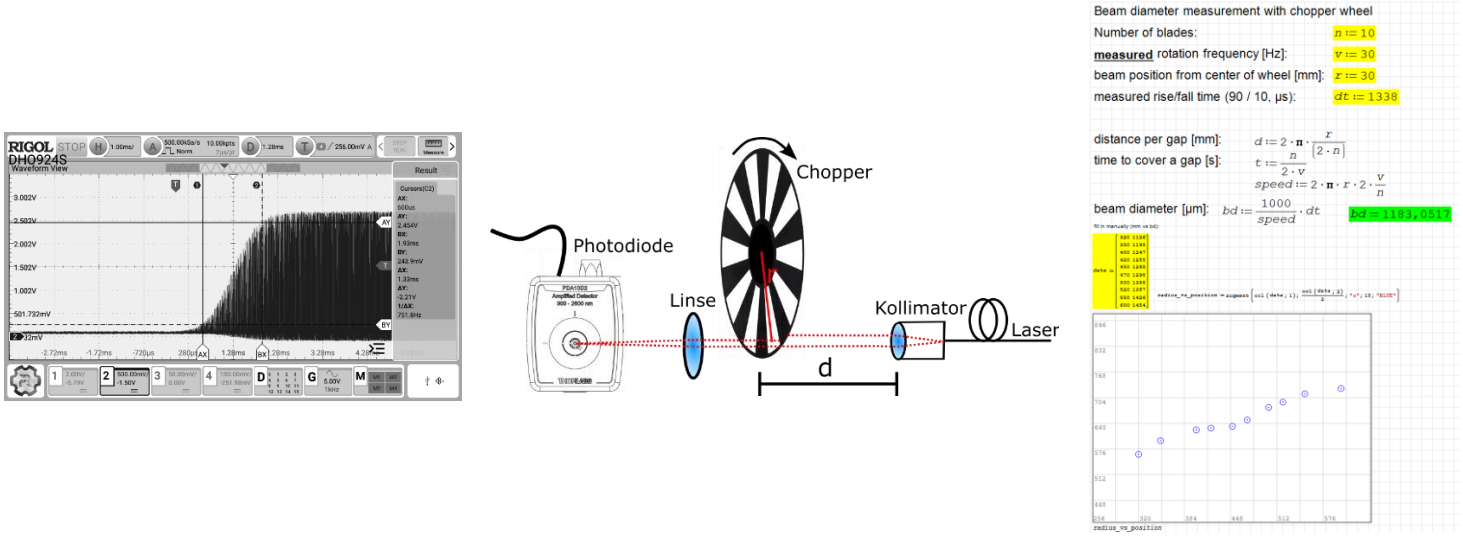


Abbildung 19: Aufbau zur Strahlvermessung mittels Chopperwheel (links), Beispieltrace (mitte) und Skript zur Auswertung (rechts).

Die Kaustikmessung ergeben, dass der Strahldurchmesser bei etwa 1,2mm liegt und damit zu den Angaben des Kollimatorherstellers passt. Mit diesen Werten kann das Mode-Matching und somit die Propagation des Strahls im Multipass System berechnet werden (Abbildung 20).

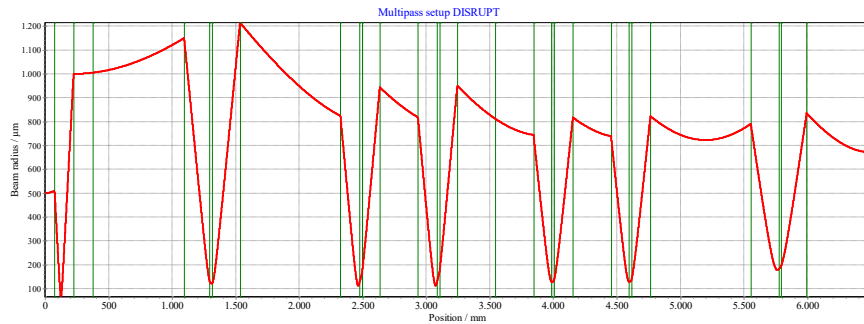


Abbildung 20: Berechnete Strahlpropagation

Integration

In **Arbeitspaket 5** sollen Seedlaser, Pumplaser und Verstärkersystem zu einem Gesamtsystem integriert werden. Leider waren für eine finale Integration und ein industrietaugliches Design die verwendeten Subsysteme nicht entsprechend ausgelegt. Für die finale Integration gilt es an folgenden Themen zu arbeiten

Pumplaser:

- Die Temperaturstabilisierung des Pumplasers auf 12°C Wassertemperatur wird bei einem Raumlufthewassergehalt von mehr als 12g/m³ bzw. einer relativen Luftfeuchte von etwa 40% zu Kondenswasserbildung führen. Außerhalb einer wohlkontrollierten Laborumgebung dürfte ein Dauerbetrieb daher kaum möglich sein. Darüber hinaus ist eine Montage der beiden Einheiten des Laserkopfes in einem Rack wegen der Cooling – Requirements nicht möglich
- Der Kollimatoraufbau mit Kühlplatte ermöglicht kein industrietaugliches Interface zum Festkörperverserker, da die Kühlplatte eine vorgegebene Höhe hat, das Faserende nicht justierbar ist, und eine Arretierung problematisch ist. Eine steckbare Verbindung zwischen Seedlaser und Verstärker dürfte somit nicht realisierbar sein.

Seedlaser:

- Das mechanische Packaging der Fasern ist nicht stabil genug für einen industriellen Einsatz. Das Breadboard sollte nicht gekippt werden, nach der Installation vor Ort (hier: im Labor) ist eine (kurze) Nachjustage der Parameter erforderlich. Darüber hinaus gibt es bislang kein stabiles Gehäuse, sondern lediglich einige provisorisch montierte schützende Blechwände.
- Der Funktionsbereich des Systems ist hinsichtlich der zu setzenden Temperaturen und Betriebsströme relativ klein, so dass gemutmaßt werden kann, dass wechselnde Umgebungsparameter eine Nachjustage erforderlich machen. In der neOLASE Laborumgebung ist das System seit der Inbetriebnahme allerdings stabil.
- Das optische Interface besteht aus einer weitgehend ungeschützten und nicht armierten Faser. Ein Handling außerhalb einer Laborumgebung wird als sehr riskant eingeschätzt (Abbildung 21).

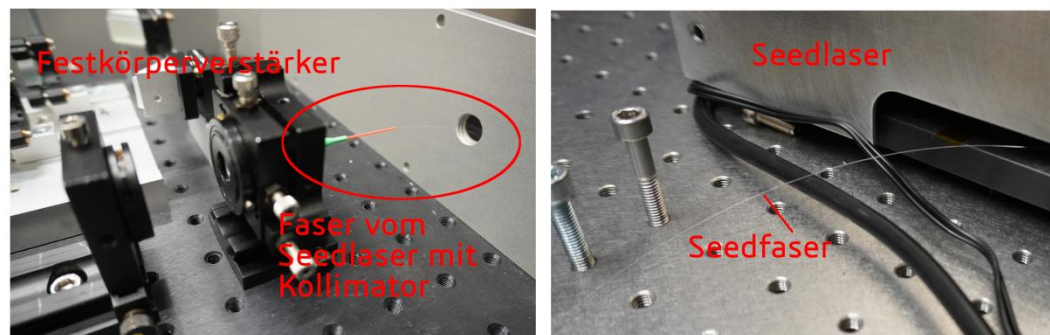


Abbildung 21: Seedlaser Faserinterface auf der Verstärkerseite (links) und auf der Laserseite (rechts).

Entwicklung einer neuartiger 2µm Festkörperverserker und deren Systemintegration

- Zwar könnten die zahlreichen einzelnen Treiber (AOM), Pulspicker, Diodennetzteile, Temperaturcontroller und das CFBG theoretisch in eine gemeinsame Controllbox integriert und möglicherweise auch über eine zusammenfassende GUI angesteuert werden, jedoch gibt es kein strukturiertes Elektro- und Wasserinterface für die Einzelkomponenten, welche noch in einem Rackeinschub o.ä. montiert werden müssten.
- Faserlänge, die Fasern sind zu kurz für einen Einbau in ein Rack und somit eine räumliche Trennung von Seed- und Pumplaser und dem Laserkopf nicht möglich.

Aus den genannten Gründen war es in der Projektlaufzeit nicht möglich eine industrietaugliche Integration der einzelnen Systeme durchzuführen. Auch für die Umsetzung des Laborsystems auf eine LASEA Anlage sind Änderungen notwendig.

Neben der technischen Betrachtung gab es erhebliche zeitliche Verzögerungen die zum einen auf die verspätete Bereitstellung von Seed- und Pumplaser und zum anderen auf den Weggang des Projektleiters Herrn Dr. Binhammer zurückzuführen sind.

Nach einer Neueinstellung einer Mitarbeiterin mit Vorkenntnissen im 2µm Bereich wird die neoLASE auch nach Projektende an der Integration weiterarbeiten. Nach ersten Gesprächen mit den Projektpartnern, verbleiben die notwendigen Systeme hierzu zunächst für weitere Experimente bei der neoLASE.