



Member of the TRUMPF Group 

AMPHOS GmbH Tel: +49 241 565292 10
Kaiserstraße 100 Fax: +49 241 565292 99
D-52134 Herzogenrath E-Mail: info@amphos.de
GERMANY Internet: www.amphos.de

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor



Verbundvorhaben: Technologien für die neueste 2nm-
Mikroelektronik - IT2 -

Teilvorhaben: Hochleistungslaserquelle auf InnoSlab Basis

FKZ: 16MEE0023

Laufzeit: 01.09.2020 - 30.09.2023

Abschlussbericht Teil 1

Claus Schnitzler, Philipp Heck, Fabian Ludwig, Arvid Hage, Torsten Mans

November 2024

Content

Content..... 2

1 Aufgabenstellung..... 3

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn..... 3

3 Ablauf des Vorhabens 3

4 Wesentliche Ergebnisse 4

History

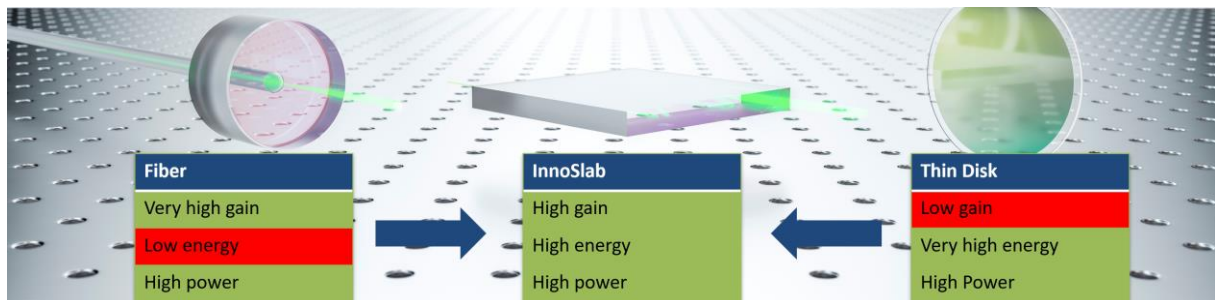
version	date	who	Comment
1.0	01.03.2024	TLH1sc	Initial Release
1.1	22.11.2024	TLH1sc	Final Version

1 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung von AMPHOS innerhalb des Konsortiums war die Entwicklung und der Aufbau einer Hochleistungslaserstrahlquelle im Kurzpulsbereich, die für die Erzeugung von EUV Strahlung genutzt werden kann. Die Strahlquelle ist Teil eines grösseren Lasersystems mit weiteren Strahlquellen. Aus diesem Grund ist insbesondere die zeitliche Synchronisation ein wesentlicher Fokus der Arbeiten. Dazu gehört auch die pulsgenaue Ansteuerung und die Einstellbarkeit der Pulsparameter (Pulsdauer, Wiederholrate,...). Die räumliche Strahlqualität muss beugungsbegrenzt, d.h. am physikalischen Limit liegen, um eine möglichst hohe Intensität am Target zu erreichen.

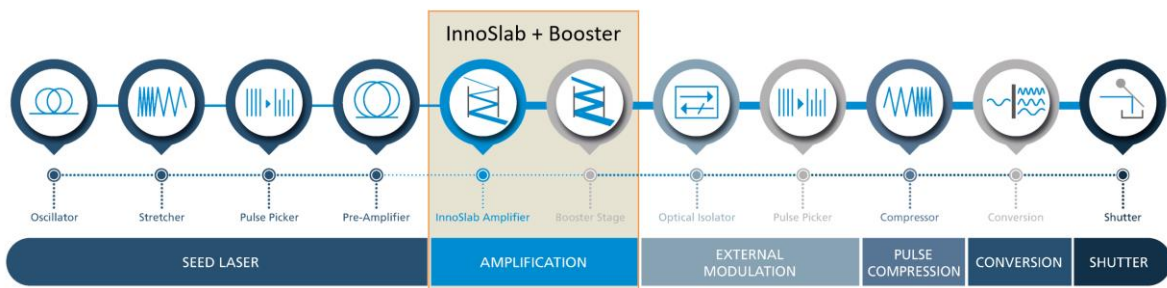
2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn

Zu Beginn des Vorhabens sind Kurzpuls laser mit beugungsbegrenzter Strahlqualität im Bereich von 200W verfügbar. Dies bezieht sich insbesondere auf Laser mit gleichzeitig hoher Pulsenergie (>5mJ) Faserlaserbasierte Systeme besitzen aufgrund des geringen Strahlquerschnitts am Ort der Faser nur wenige mJ Pulsenergie. Hier besitzt das von AMPHOS eingesetzte InnoSlab Konzept den grundlegenden Vorteil gleichzeitig eine hohe Verstärkung und grossen Strahlquerschnitt zu erlauben. Das folgende Bild zeigt den Vergleich unterschiedlicher Verstärkerkonzepte.



3 Ablauf des Vorhabens

AMPHOS Lasersysteme bieten aufgrund des modularen MOPA-Aufbaus aus Seedlaser, Verstärker und nichtlinearer Optik eine ideale Voraussetzung, flexible Lasersysteme mit hoher Ausgangsleistung zu realisieren. Das folgende Schema zeigt den grundsätzlichen Aufbau.

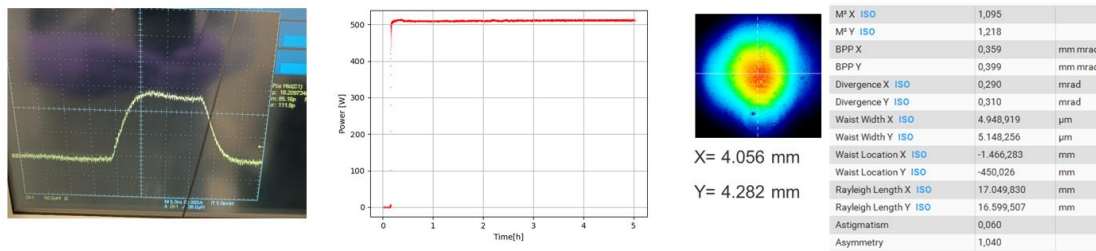


Der Seedlaser erzeugt die zeitliche Abfolge der Pulse und auch die exakte Pulsform. Danach werden InnoSlab Verstärker eingesetzt um die Leistung zu erhöhen. Im aktuellen Projekt ist erstmalig eine weitere Slab-Verstärker verwendet worden (Booster).

4 Wesentliche Ergebnisse

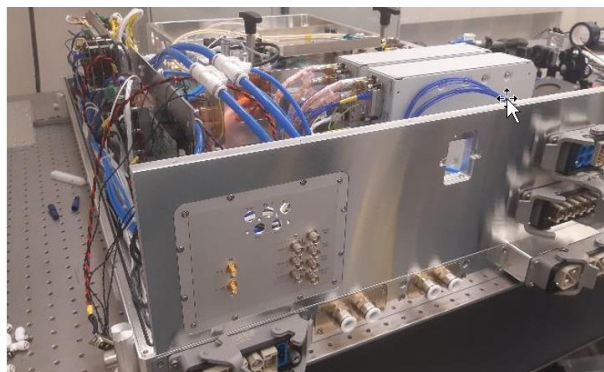
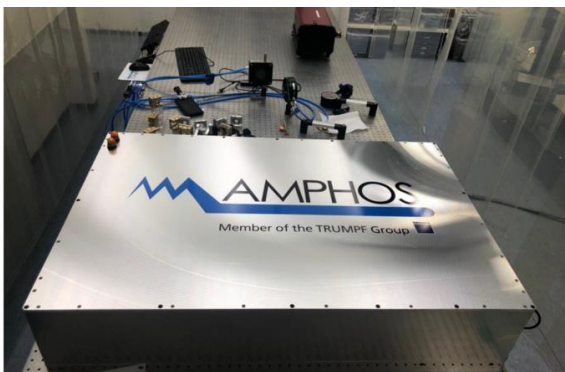
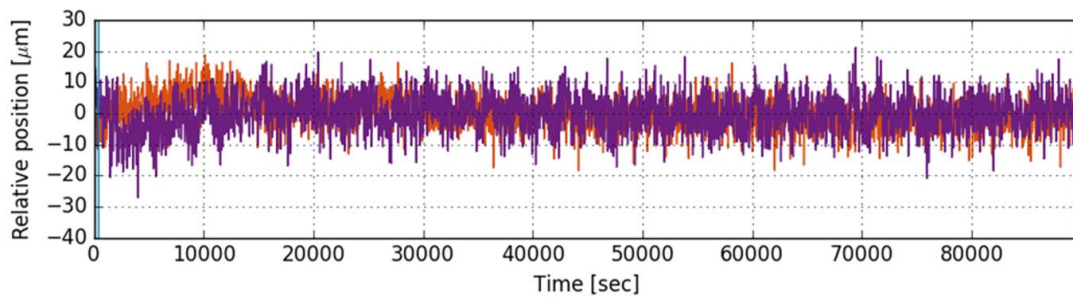
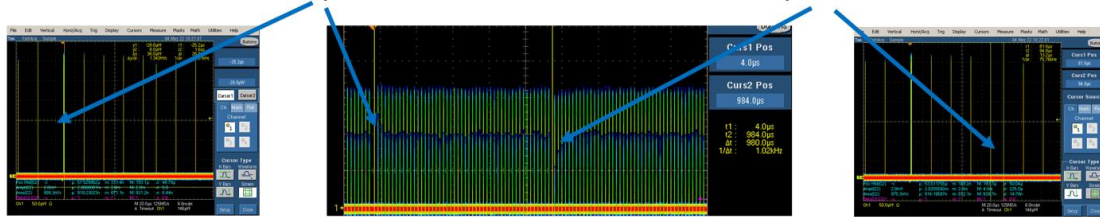
Im Projekt konnte eine Kurzpuls laserstrahlquelle mit ausserordentlichen Eigenschaften realisiert werden. Die mittlere Ausgangsleistung beträgt im Langzeitbetrieb 500W, es sind auch 800W erreicht worden. Die Strahlqualität ist beugungsbegrenzt, die Pulsdauer einstellbar und die zeitliche Pulsabfolge kann exakt auf eine externe Quelle synchronisiert werden.

Im folgend Bild sind die wesentlichen Messergebnisse dargestellt. Bei Pulsform, Leistung, Strahlqualität, Ansteuerbarkeit und Stabilität sind die Werte erreicht worden, die eine Verwendung im Bereich der EUV Technologie möglich machen. Im unteren Teil ist der Laserkopf zu sehen.



Timing using trigger generator pattern:

50 shots at 50kHz → 26.8µs break → 50 shots at 50kHz → 13.2µs break → ...





Member of the TRUMPF Group 

AMPHOS GmbH Tel: +49 241 565292 10
Kaiserstraße 100 Fax: +49 241 565292 99
D-52134 Herzogenrath E-Mail: info@amphos.de
GERMANY Internet: www.amphos.de

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor



Verbundvorhaben: Technologien für die neueste 2nm-
Mikroelektronik - IT2 -

Teilvorhaben: Hochleistungslaserquelle auf InnoSlab Basis

FKZ: 16MEE0023

Laufzeit: 01.09.2020 - 30.09.2023

Abschlussbericht Teil 2

Claus Schnitzler, Philipp Heck, Fabian Ludwig, Arvid Hage, Torsten Mans

November 2024

Content

Content.....	2
1 Aufgabenstellung.....	3
2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn.....	3
3 Ablauf des Vorhabens und Ergebnisse.....	4
3.1 Auslegung des Lasersystems	4
3.2 Aufbau des InnoSlab Verstärkers	6
3.3 Aufbau einer weiteren Verstärkerstufe	8
4 Wesentliche Ergebnisse	13

History

version	date	who	Comment
1.0	01.03.2024	TLH1sc	Initial Release
1.1	22.11.2024	TLH1sc	Final version

1 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung von AMPHOS innerhalb des Konsortiums war die Entwicklung und der Aufbau einer Hochleistungslaserstrahlquelle im Kurzpulsbereich (Nanosekunden Pulsdauer), die für die Erzeugung von EUV Strahlung genutzt werden kann.

Die Strahlquelle ist Teil eines grösseren Lasersystems mit weiteren Strahlquellen. Aus diesem Grund ist insbesondere die zeitliche Synchronisation ein wesentlicher Fokus der Arbeiten. Die Strahlquelle muss auf eine externe Quelle synchronisierbar sein mit einem möglichst geringen Jitter.

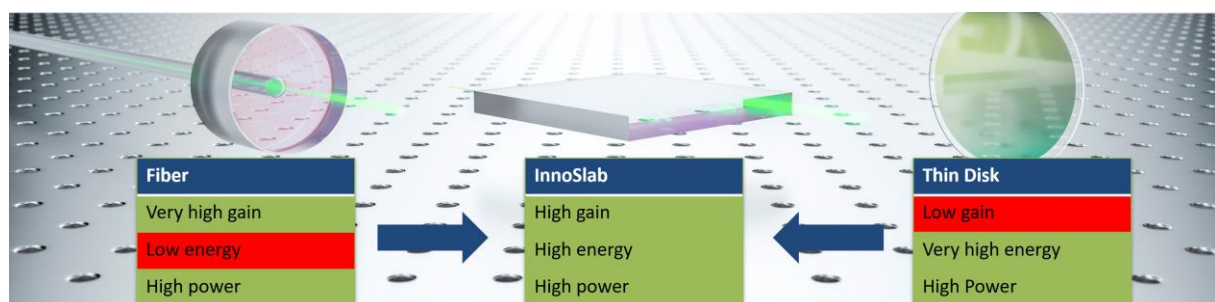
Zur pulsgenaue Ansteuerung ist auch die Einstellbarkeit der Pulsparameter (Pulsdauer, Pulsform,...) erforderlich, um den Prozess der UV Erzeugung zu optimieren.

Die räumliche Strahlqualität muss beugungsbegrenzt, d.h. am physikalischen Limit liegen, um eine möglichst hohe Intensität am Target zu erreichen.

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn

Zu Beginn des Vorhabens sind Kurzpuls laser mit beugungsbegrenzter Strahlqualität im Bereich von 200W verfügbar. Dies bezieht sich insbesondere auf Laser mit gleichzeitig hoher Pulsenergie (>5mJ).

Einen Vergleich der Verstärkerkonzepte zeigt das folgende Bild. Während Faserlaser eine hohe Leistung ermöglichen und eine grosse Verstärkung besitzen, ist die erzielbare Energie aufgrund der kleinen Querschnittsfläche gering. Scheibenlaser bieten eine grosse Querschnittsfläche und erlauben somit sehr hohe Pulsenergie, aber aufgrund der geringen Dicke bieten diese keine hohe Verstärkung, so daß sie im Wesentlichen in regenerativen Verstärkern eingesetzt werden, was im vorliegenden Fall die Anforderungen an Jitter nicht erfüllt.



Das InnoSlab Konzept vereint die Vorteile der beiden Konzepte und eignet sich ideal zur Verstärkung von kurzen und ultrakurzen Pulsen mit hoher Energie.

Im vorliegenden Projekt soll ein InnoSlab basiertes Lasersystem entwickelt werden und die zeitliche Verstärkung erforscht werden, das in der EUV Erzeugung eingesetzt werden kann.

3 Ablauf des Vorhabens und Ergebnisse

Das Vorhaben gliedert sich in folgende Schritte:

1. Auslegung des Lasersystems. Erstellen der Spezifikationen
2. Aufbau des InnoSlab Verstärkers
3. Leistungsskalierung durch zusätzliche Boosterstufe

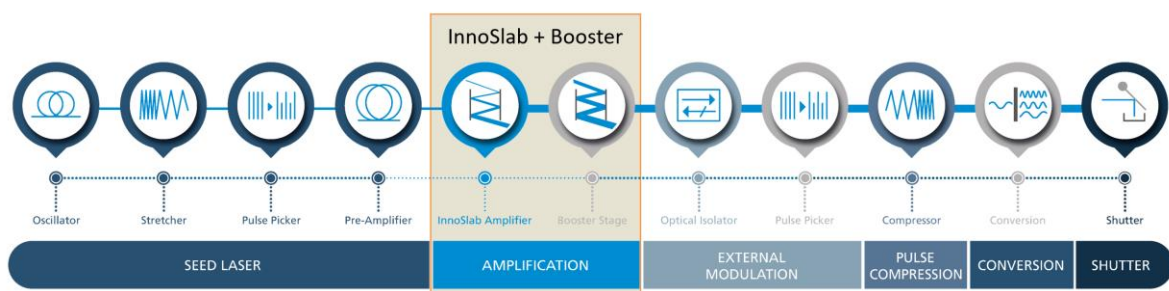
Aufgrund der Laufzeitverlängerung konnte noch ein weiterer chritt hinzugefügt werden: die kompaktere Bauweise.

Im folgenden werden die 3 Schritte beschrieben und die wesentlichen Ergebnisse dargestellt.

3.1 Auslegung des Lasersystems

AMPHOS Lasersysteme sind modular aufgebaut nach dem „Maser-Oszillator-Power-Amplifier“ (MOPA) Konzept. Hier wird die zeitliche und sektrale Struktur der Pulse durch den Seedlaser vorgegeben, der dann in einer Verstärkersektion zu hoher Ausgangsleistung verstärkt wird. Isolator, Moudlator und evtl. nichtlineare Komponenten können dem System hinzugefügt werden.

Das folgende Bild zeigt den Aufbau für ein modengekoppeltes CPA Lasersystem.



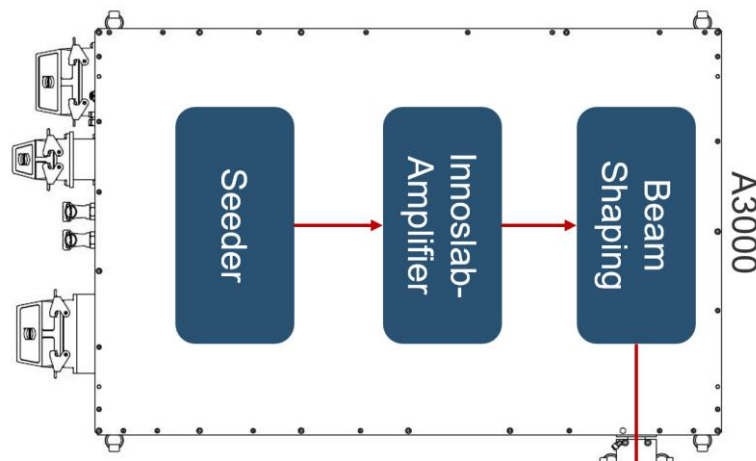
Im vorliegenden Porjekt wird anstelle eines modengekoppelten Systems eine laserdioden verwendet, die direkt elektrisch angesteuert werden kann. Die Puls-Streckung und Puls-Kompression entfällt.

Mit den Projektpartnern sind folgende Spezifikationen ermittelt worden. Diese sollen mit einer einzelnen InnoSlabstufe erreicht werden. Die Liste des Spezifikationen ist in folgender Tabelle zu sehen.

Requirement	Value
Pulse frequency	50 kHz / 80 kHz / 100kHz
wavelength	1029nm - 1031nm
Wavelength repeatability laser to laser	<1 nm
Pulse duration nominal and range	adjustable 5ns – 20 ns (2ns best effort)
Puls Shape	adjustable, nominal 0... 100% in 2ns-steps
Pulse energy at target	8 mJ – 4mJ
Nominal power at laser exit	400 W
Energy stability pulse 2 pulse, 3 sigma	<3%
Pulse 2 pulse energy control	20% - 100%
Energy between triggers, Leakage power	<0.1W
Trigger to trigger timing (trigger range)	20 μ s / 16 μ s / 10 μ s +- 2 us
Added trigger timing to go off droplet ('dTmiss')	6 us
Trigger to light jitter (trigger timing error)	<1 ns
Beam profile	Gaussian
Beam diameter 1/e2	~3 mm
Beam quality M2	<1.5
Beam pointing stability short term, 0.5 s	<2 urad
Beam pointing stability long term, 24 hr	<10 urad
Polarization	Linear, vertical, >200:1

Im Wesentlichen soll eine Laserleistung von >400W erreicht werden bei einer Pulsenergie bis zu 8mJ.

Nach Festlegung der Spezifikation ist das Lasersystem entworfen worden. Der Laserkopf – im Bild unten als Schema – beinhaltet den Seedlaser, die InnoSlab Verstärkerstufe und eine Strahlformungseinheit („Beam Shaping“) die wiederum aus zylinderförmigen Linsen, einem Isolator und einem Modulator besteht. Die Gesamtabmessung das Laserkopfes beträgt ca. 110 x 72 x 20 cm³

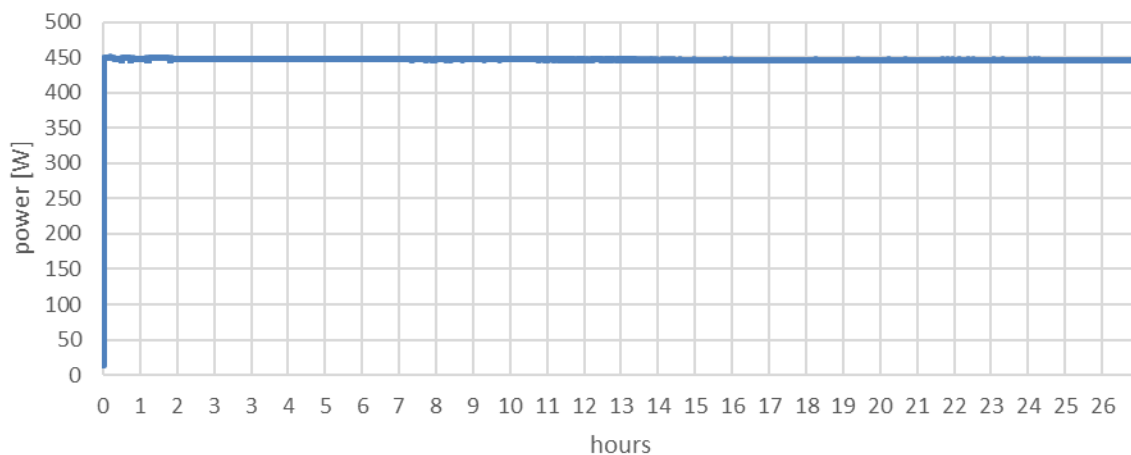


3.2 Aufbau des InnoSlab Verstärkers

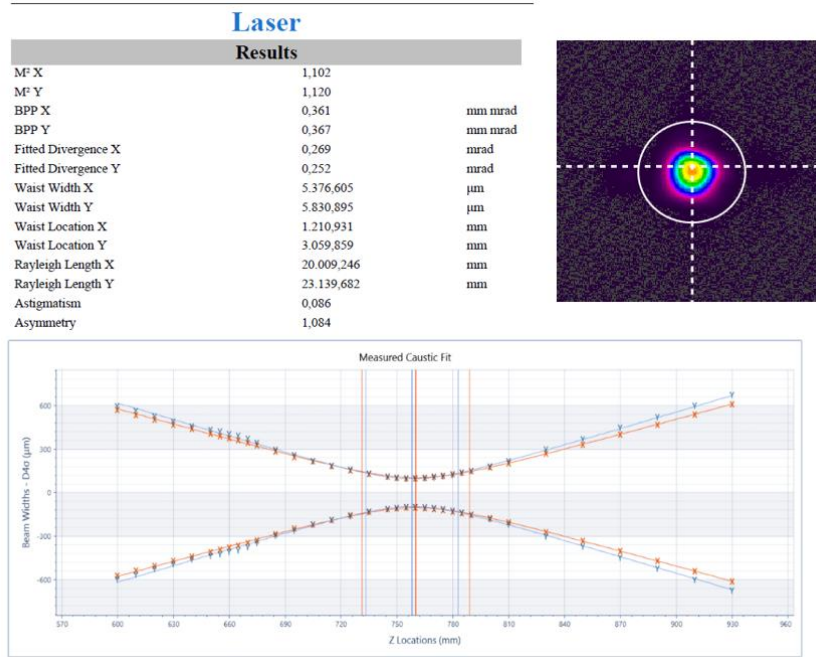
Das folgende Bild zeigt den Aufbau des Laserkopfes im Labor. Charakterisierung erfolgt durch einen Messaufbau, der simultan Leistung, räumliche Strahlqualität und die zeitliche Pulsform erfassen kann. Die Versorgungseinheit mit allen Kühlaggregaten und der Pumpdiodenversorgung ist im hinteren Bereich zu sehen.



Die Ausgangsleistung beträgt ca. 450W. Eine Langzeitmessung über 26 Stunden ist im folgenden dargestellt. Die geforderte Stabilität ist gegeben.

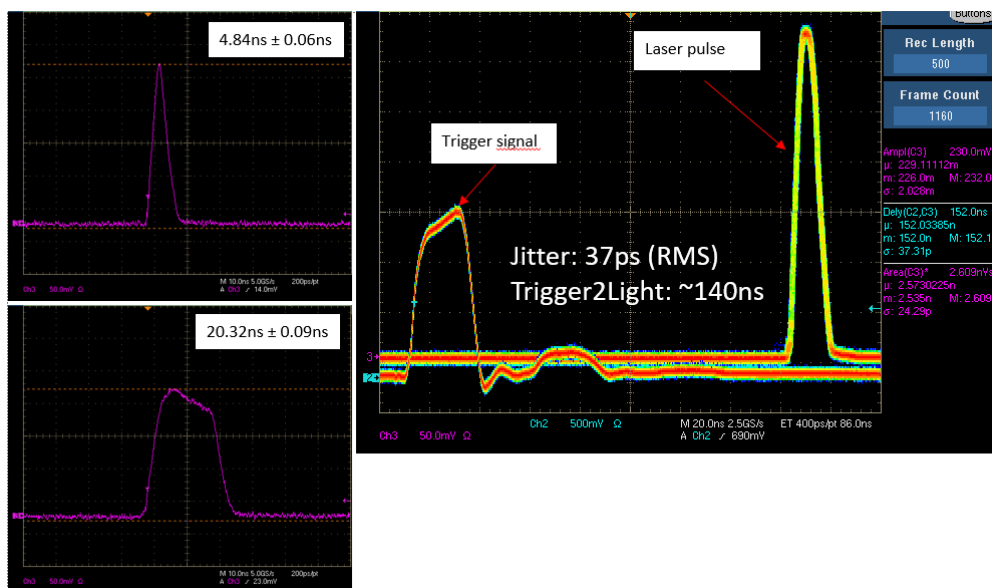


Die räumliche Strahlqualität ist mittels Kaustikmessung und Auswertung erfolgt. Hierzu wird ein kommerzielles Messgerät der Firma Ophir verwendet, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Mit einer gemessenen Strahlqualitätskennzahl von $M^2=1,102$ und $M^2=1,120$ in x bzw. y Richtung ist die Strahlqualität beugungsbegrenzt. Das Strahlprofil im Fokus ist rotationssymmetrisch und gaussförmig.

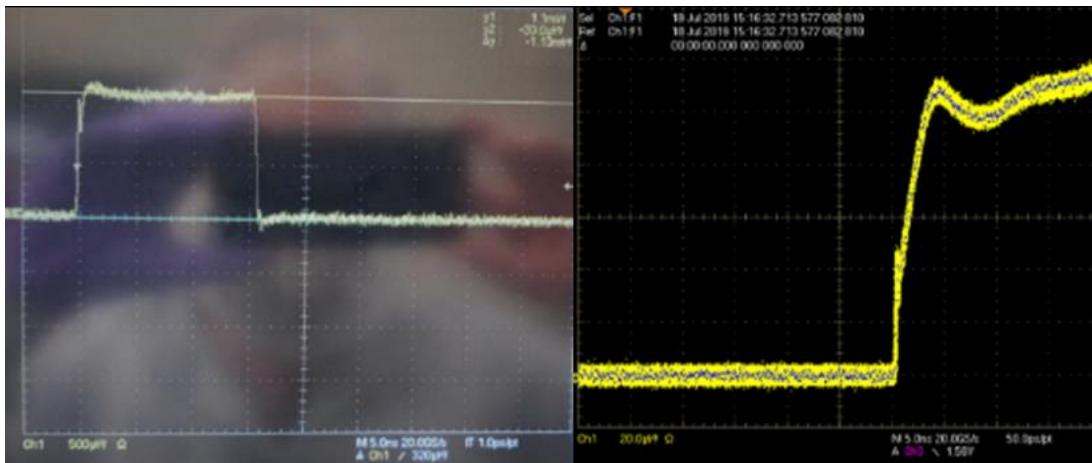


Die zeitliche Strahlform und Stabilität sind mit schnellen Photodioden und hochauflösenden Oszilloskopen charakterisiert worden.

Die Pulsdauer ist einstellbar im Bereich von ca. 5ns bis ca. 20ns. Der Jitter beträgt 37ps (RMS), was ausserordentlich gut und deutlich geringer als die spezifizierten 1ns ist.



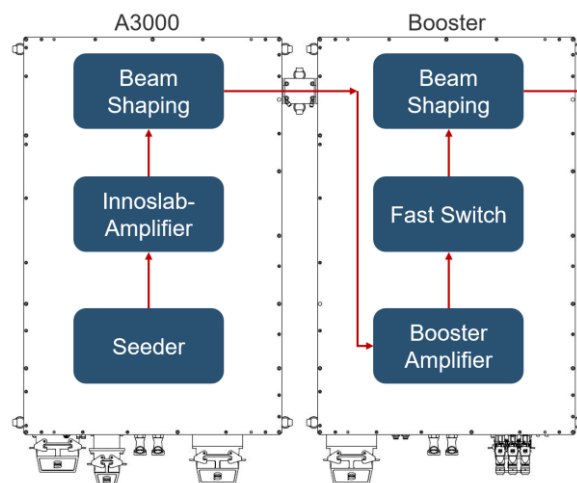
Durch gezielte elektrische Ansteuerung der Seedlaserdiode kann die Pulsform gesteuert werden. Das nachfolgende Bild zeigt zwei Oszilloskop Traces. Im linken Teil ist die „tophatförmige“ Verteilung zu sehen, im rechten Teil die Anstiegsflanke mit einem sehr geringen Jitter.



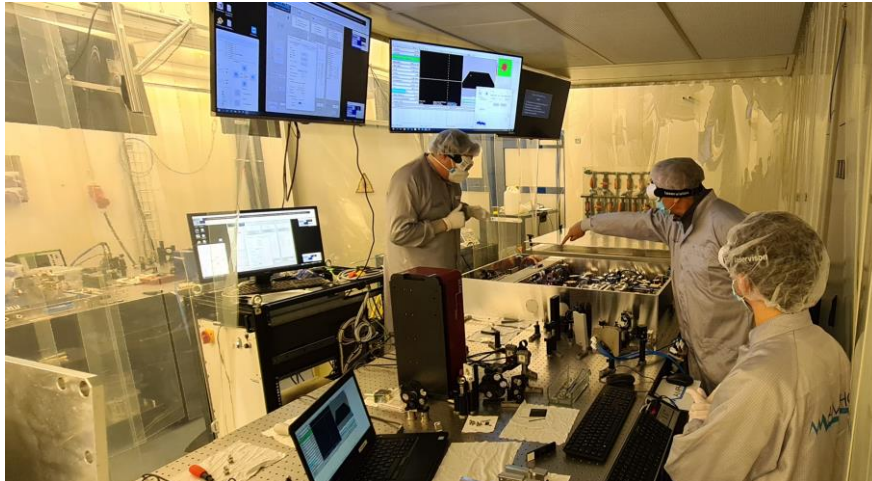
Die Ergebnisse der ersten Verstärkerstufe entsprechen den Erwartungen und Spezifikationen. Da eine grössere Ausgangsleistung und grössere Pulsenergie zu besserer Konversionseffizienz führen kann, ist eine weitere Verstärkerstufe im Rahmen des Projektes ausgelegt und realisiert worden.

3.3 Aufbau einer weiteren Verstärkerstufe

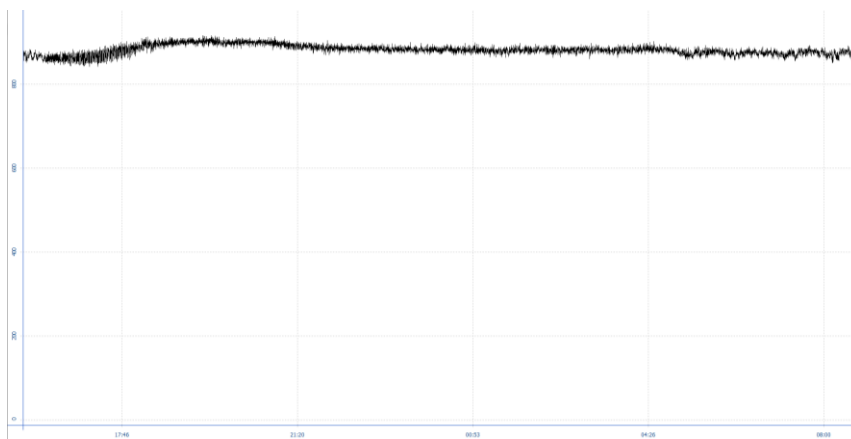
Schematisch ist der Aufbau im folgenden gezeigt. Eine zweite Box ist dem Laser hinzugefügt worden. Diese enthält einen weiteren Slab Verstärker, den „Booster Amplifier“



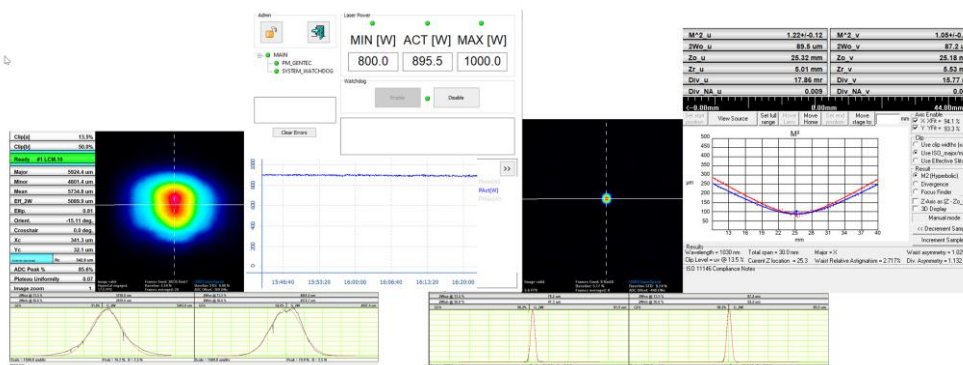
Die Box ist konstruiert und aufgebaut worden. Mit Hilfe der zweiten Verstärkerstufe konnte die Ausgangsleistung auf mehr als 800W gesteigert werden. Das Foto des Laboraufbaus ist im folgenden zu sehen. Die Boosterbox ist als offenes Gehäuse zu erkennen. Dahinter befindet sich der ursprüngliche 400W Verstärker.



Eine Langzeitmessung mit >800W Ausgangsleistung ist im folgenden Graph zu sehen. Die Leistung ist über 14 Stunden stabil.

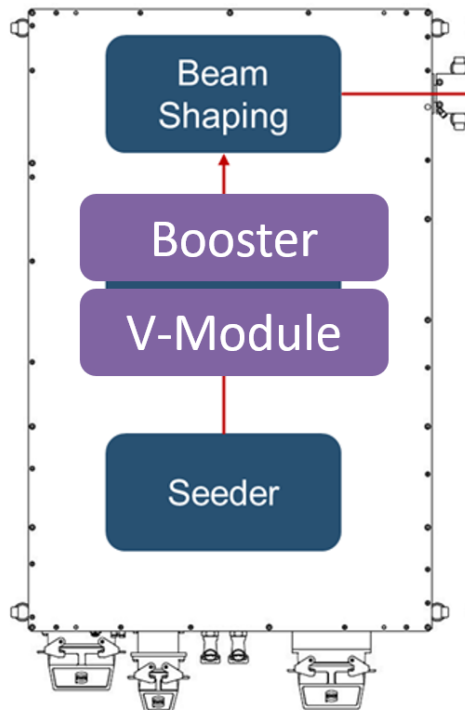


Strahlqualität und Intensitätsverteilung sind nahezu gaussförmig. Die M2 Werte betragen 1.22 in der x-Richtung und 1.05 in der y-Richtung.



Weitere Untersuchungen mit diesem System sind durchgeführt worden. Der Aufbau mit 2 Laserköpfen ist allerdings als komplex bewertet worden hinsichtlich der Verwendung in einer industrietauglichen Maschine. Aus diesem Grund ist der erste InnoSlab Verstärker durch ein

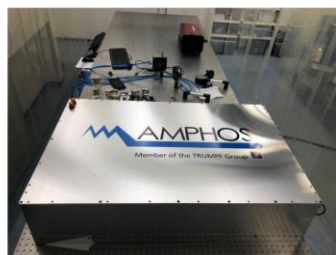
industrietaugliches, kompaktes Modul ersetzt worden, dessen Leistung geringer als 400W beträgt. Die „Boosterstufe“ konnte aber dadurch in den ersten Laserkopf integriert werden. Schematisch ist das vorgehen skizziert.



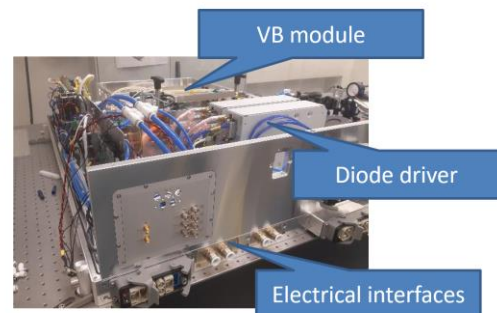
Ein solches Modul ist konstruiert und aufgebaut worden. Das Ergebnis ist in den folgenden Bildern zu erkennen. Der gesamte Laserkopf besteht aus einer einzigen Box. Somit ist eine Justage von zwei Boxen nicht erforderlich.



AMPHOS engineer before performing the shake test of the laser



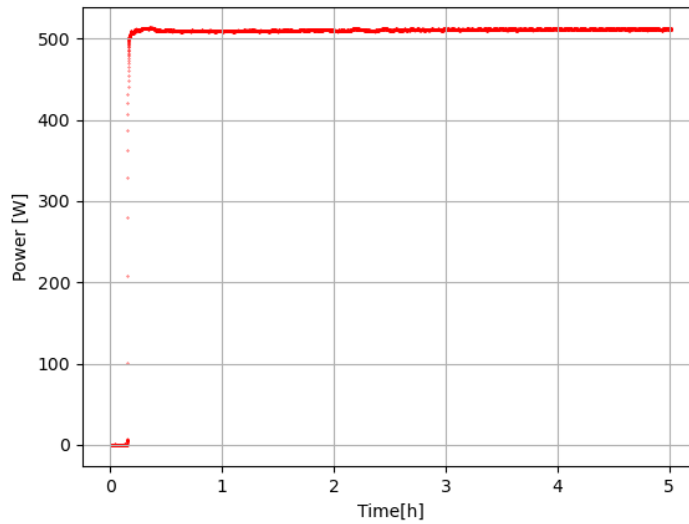
Setup on optical table with ASML measurement tools



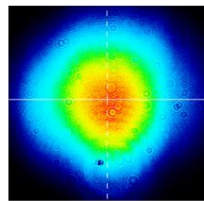
Internal view of Laserhead

Die Ausgangsleistung ist für die weiteren Versuche reduziert worden, eine Leistung von >500W ist als ausreichend erachtet worden für die Applikationstests.

Die Ausgangsleistung ist weiterhin sehr stabil. RMS Wert beträgt deutlich unter 1%



Die Intensitätsverteilung und räumliche Strahlqualität sind gaussförmig und damit nahezu beugungsbegrenzt. Der Strahldurchmesser beträgt ca. 4mm.

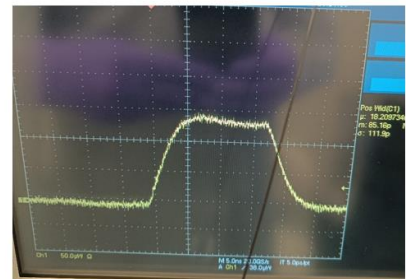
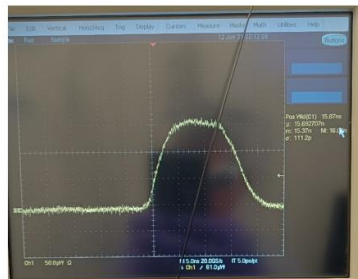
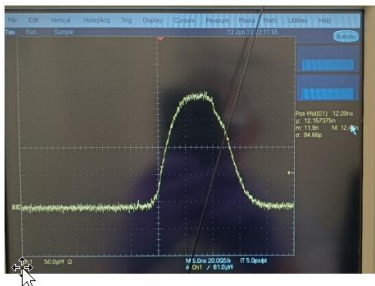


X= 4.056 mm

Y= 4.282 mm

M ² X ISO	1,095	
M ² Y ISO	1,218	
BPP X	0,359	mm mrad
BPP Y	0,399	mm mrad
Divergence X ISO	0,290	mrاد
Divergence Y ISO	0,310	mrاد
Waist Width X ISO	4.948,919	µm
Waist Width Y ISO	5.148,256	µm
Waist Location X ISO	-1.466,283	mm
Waist Location Y ISO	-450,026	mm
Rayleigh Length X ISO	17.049,830	mm
Rayleigh Length Y ISO	16.599,507	mm
Astigmatism	0,060	
Asymmetry	1,040	

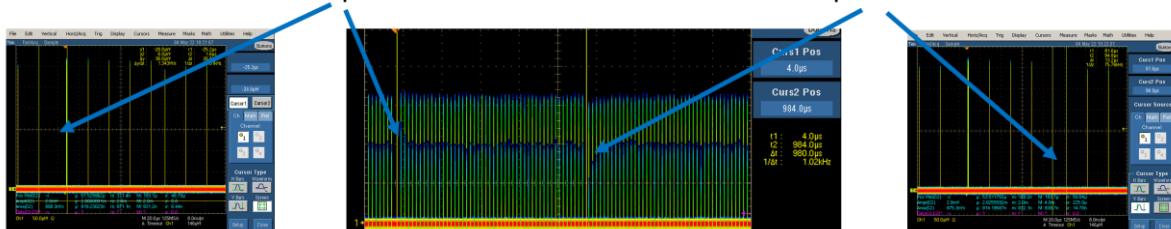
Die Pulsdauer kann per Software eingestellt werden. Werte im Bereich von 5-20ns sind möglich. Durch inverses Lösen der Franz-Nodvik Gleichung konnten Einstellungen für den zeitlichen Verlauf des Seedlasers gefunden werden, die in einer nahezu tophatförmigen Verteilung resultieren. Das folgende Bild zeigt 3 ausgewählte Pulsformen.



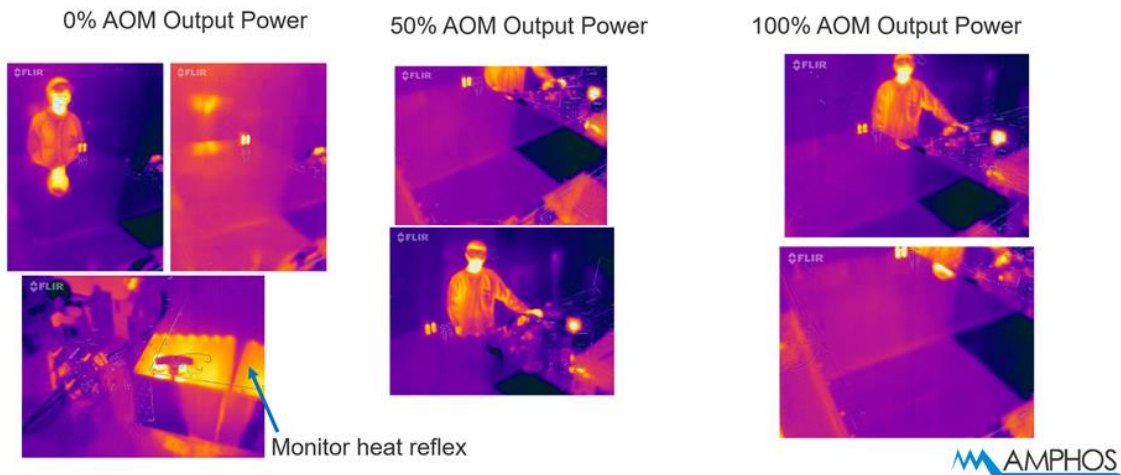
Weiterhin ist untersucht worden, inwiefern die Ausgangspulsenergie auf Schwankungen der Wiederholrate reagiert. Hierzu ist ein Testmuster programmiert worden, daß einen Puls leicht verzögert bzw. vorzieht. Wie zu erwarten ändert sich die Pulsenergie des darauffolgenden Pulses instantan. Das folgende Bild zeigt das Ergebnis. Deutlich ist ein Dip bzw. eine Überhöhung zu erkennen, die nach einem verzögerten bzw. verfrühten Pulse entstehen.

Timing using trigger generator pattern:

50 shots at 50kHz → 26.8µs break → 50 shots at 50kHz → 13.2µs break → ...



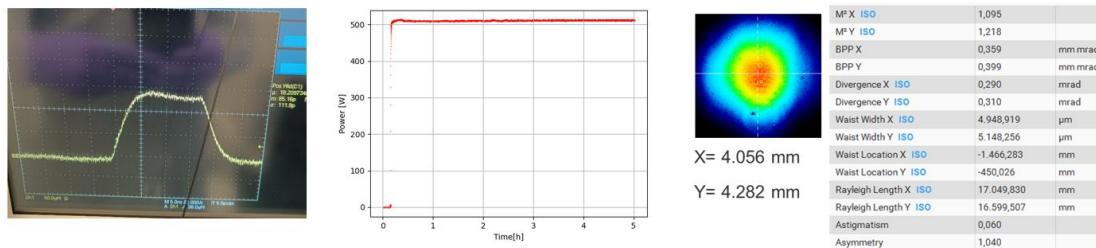
Um die Auswirkung auf die Umgebung zu untersuchen, ist der Laserkopf im Betrieb mit einer Wärmebildkamera untersucht worden. Die Aufnahmen sind im folgenden zu sehen. Bei keiner lesion gibt es eine Erhöhung der Lasergehäuse temperatur. Dies ist insbesondere für die Verwendung der Laser in einer späteren Industrieumgebung relevant.



4 Wesentliche Ergebnisse

Im Projekt konnte eine Kurzpuls laserstrahlquelle mit ausserordentlichen Eigenschaften realisiert werden. Die mittlere Ausgangsleistung beträgt im Langzeitbetrieb 500W, es sind auch 800W erreicht worden. Die Strahlqualität ist beugungsbegrenzt, die Pulsdauer einstellbar und die zeitliche Pulsabfolge kann exakt auf eine externe Quelle synchronisiert werden.

Im folgend Bild sind die wesentlichen Messergebnisse dargestellt. Bei Pulsform, Leistung, Strahlqualität, Ansteuerbarkeit und Stabilität sind die Werte erreicht worden, die eine Verwendung im Bereich der EUV Technologie möglich machen. Im unteren Teil ist der Laserkopf zu sehen.



Timing using trigger generator pattern:

50 shots at 50kHz → 26.8µs break → 50 shots at 50kHz → 13.2µs break → ...

