

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

**Zuwendungsempfänger Technische Hochschule Aschaffenburg  
Arbeitsgruppe Angewandte Lasertechnik und Photonik (ALP Group)**

**Förderung:**

**Innovations in Laser-Optic Technology for Ultraviolet Ultra-Short Pulsed Lasers  
– Components – Lasers – Applications –**

***LOTU<sup>2</sup>S***

**Teil I**

**Kurzbericht**

Verantwortlicher Autor: Prof. Dr. Ralf Hellmann

Förderkennzeichen: 03INT701BD

„Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03INT701BD gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.“

## **Projekthintergrund:**

Das Projekt „LOTU<sup>2</sup>S“ stellt ein Internationalisierungsprojekt im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme „Internationalisierung von Spitzenclustern, Zukunftsprojekten und vergleichbaren Netzwerken“ dar und wurde von deutschen Partnern unter Beteiligung von der Technischen Hochschule Aschaffenburg (AG alp), TOPAG Lasertechnik, Throl Optics, Optence, Heraeus Quarzglas GmbH & Co. KG (assoziierter Partner) sowie den litauischen Partnern EKSMA Optics (vormals Optolita uab), LIDARIS uab, Ekspla uab, FTMC, Department of Laser Technologies bearbeitet.

## **Zielsetzung:**

Neben der Entwicklung leistungsfähiger und langlebiger optischer Komponenten für die Ultrakurz-puls-laser-Materialbearbeitung im ultravioletten Wellenlängenbereich waren die Anwendungen dieser Komponenten für Hochleistungslaser mit hohen Pulsenergien und mittleren Leistungen Ziele des Projektes LOTU<sup>2</sup>S. Darüber hinaus sollen neue Prozesse und Märkte für die Anwendungen dieser verbesserten Anlagen in der Mikromaterialbearbeitung erschlossen werden. In einem interdisziplinären, internationalen Projektkonsortium wurden die Kompetenzen in den Bereichen Substrat-, Beschichtungs-, Optik- und Laserentwicklung, Zerstörschwellenprüfung, System- und Anlagentechnik sowie Lasermaterialbearbeitung von deutschen und litauischen Partnern gebündelt. Gleichzeitig wurde die Internationalisierung der Forschungslandschaft in Europa gestärkt.

## **Projekttablauf:**

Das LOTU<sup>2</sup>S-Projekt startete am 01.08.2020 und war von Beginn an bis in den Herbst 2022 hinein von den Auswirkungen der Coronapandemie geprägt, sodass sich die Zusammenarbeit um Konsortium auf eine telefonische und digitale Kommunikation beschränken musste, was sich negativ auf den Projektfortschritt auswirkte. Zusätzlich war die Technische Hochschule im Frühjahr 2022 von einem schweren Cyberangriff betroffen, der die zeitweise Stilllegung aller Aktivitäten und somit weitere Verzögerungen forderte. Im Herbst 2022 konnte erstmalig ein physisches Projekttreffen in Vilnius stattfinden. Zudem erfolgte eine Zusammenkunft im Rahmen der Lasermesse München im Jahr 2023. Ein weiteres abschließendes Projekttreffen fand im Herbst 2023 in Vilnius statt. Durch den Umzug des Projektpartners Eksma in ein neues Produktionsgebäude konnten neuartige Optiken und optische Systeme erst stark verzögert bereitgestellt werden. Hierauf reagierte die AG alp mit einem Vorziehen der Studien zur Lasermaterialbearbeitung. Die im Gesamtprojekt entstandenen Verzögerungen waren für alle Partner uneinholbar, sodass eine kostenneutrale Verlängerung bis zum 31.12.2023 beantragt und genehmigt wurde. Hierdurch war es dem Konsortium möglich, die acht Arbeitspakete des Projektes vollständig und mit Erfolg zu bearbeiten. Mit fortschreiten des Projektes wurden erlangte Ergebnisse auf internationalen Konferenzen vorgestellt.

## **Eigene durchgeführte Arbeiten und wichtigste Ergebnisse des Projektes:**

Die Arbeitsgruppe alp übernahm Aufgaben in den Bereichen Simulation, optische Komponentenentwicklung, Messtechnik, Laserprozessentwicklung und Marktanalyse, um im Projektverlauf optische Komponenten und Systeme zu identifizieren, ein neuartiges Anlagensystem zu entwickeln und dieses für innovative Anwendungen einzusetzen. Somit war die AG alp sowohl ausführend als auch beratend maßgeblich in alle acht Arbeitspakete des Projektes verflochten und jederzeit im engen Austausch mit den nationalen sowie internationalen Projektpartnern. Die wichtigsten Teilarbeiten seien folgend zusammengefasst:

- Maßgebliche Beteiligung in der Projektsteuerung (Projektleitung hatte TOPAG inne)
- Erarbeiten einer technologischen Basis hinsichtlich Testungen, Analysen, Messprinzipien gemeinsam mit den Partnern
- Identifikation, Entwicklung und Durchführung von Testungen an Materialien und Beschichtungen für UV-Hochleistungsoptiken, optischen Systemen und Lasers
- Konzeption und Durchführung von Testungen zur Zerstörschwelle der neuartigen Hochleistungsoptiken
- Im Projekt entwickelte Optiken weisen eine vielfach erhöhte Zerstörschwelle auf und liefern eine verbesserte Performanz bei Belastung mit hohen Laserleistungen
- Testung kommerzieller Optiken und optischer Baugruppen zur Validierung des Projekterfolges
- Maßgebliche applikationsorientierte Beratung bei der Entwicklung, Simulation und Auslegung optischer Baugruppen durch die Projektpartner
- Charakterisierung, Integration und Anwendung neuartiger im Projekt entwickelter optischer Systeme und Baugruppen
- Im Projekt wurden ein F-Theta-Objektiv, ein variables Strahlaufweitungssteleskop und eine Beobachtungsoptik-Modul entwickelt, welche Ihre Funktionalitäten erfüllen
- Fundamentale Charakterisierung des im Projekt entwickelten UV-UKP-Hochleistungslasers
- Im Projekt wurde ein entsprechender Laser entwickelt und gefertigt
- Konzeption und Umsetzung einer Maschine zur Lasermaterialbearbeitung mit dem entwickelten UV-UKP-Hochleistungslasers unter Einbeziehung und Integration der entwickelten optischen Bauelemente sowie der Charakterisierung des Systems mit Blick auf potenzielle Anwendungen
- Die im Projekt konzipierte Maschine konnte erfolgreich zur Lasermaterialbearbeitung eingesetzt werden
- Durchführung umfangreicher Studien zur UV-UKP-Lasermaterialbearbeitung
  - Entwicklung einer neuartigen Methodik zur Gegenüberstellung von Prozesseffizienz, -qualität und -durchführbarkeit bei der Lasermaterialbearbeitung mit verschiedenen Wellenlängen
  - Materialien: Quarzglas, Cycloolefin-Copolymer, PMMA, Edelstahl, Aluminiumoxid, Saphir, Siliziumkarbid, Galliumarsenid, ABF-Leiterplatten-Verbundmaterial, Kupfernitrat-Präkursor
  - Prozesse: Abtragen, Laserdrehen, Bohren, Oberflächenfunktionalisierung, Reduktives Lasersintern, Erzeugung mikrofluidischer Systeme
- Die Ergebnisse der Studien zur Lasermaterialbearbeitung mit ultravioletten UltrakurpulsLasern zeigen erhebliche Vorteile hinsichtlich Abtragseffizienzen und -raten, resultierenden Oberflächenrauheiten, Kantenqualitäten sowie Prozessstabilität gegenüber der Verwendung von Infrarotlasern für eine Vielzahl von Materialien und Prozessen in der Mikrobearbeitung
- Beratende Unterstützung bei der durchgeführten Marktanalyse
- Verwertung der Projektergebnisse in Form von 8 Publikationen, Teilnahme an 3 internationalen Konferenzen, Workshops und Messen sowie die Kontaktaufnahme zu Projektexternen Forschungs- und Industriepartnern zur Akquise neuer Partnerschaften, Projektverwertung, Kommerzialisierung erlangter Projektergebnisse und Anstoßen von Folgeprojekten

### **Zusammenfassung und Bewertung:**

Trotz enorm erschwerten Bedingungen (Coronapandemie, Cyberangriff, Verzögerungen bei der Optikfertigung) gelang es dem internationalen Konsortium des Projektes LOTU<sup>2</sup>S erfolgreich, die Zielsetzungen des Projektes zu erfüllen, die internationale Verbindung mit der litauischen Forschungslandschaft zu stärken und das Projekt zu verwerten.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

**Zuwendungsempfänger Technische Hochschule Aschaffenburg  
Arbeitsgruppe Angewandte Lasertechnik und Photonik (ALP Group)**

**Förderung:**

**Innovations in Laser-Optic Technology for Ultraviolet Ultra-Short Pulsed Lasers  
– Components – Lasers – Applications –**

***LOTU<sup>2</sup>S***

**Teil II**

**Eingehende Darstellung**

Verantwortlicher Autor: Prof. Dr. Ralf Hellmann

Förderkennzeichen: 03INT701BD

„Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03INT701BD gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.“

## **Zielsetzung**

Neben der Entwicklung leistungsfähiger und langlebiger optischer Komponenten für die Ultrakurzpuls-Laser-Materialbearbeitung im ultravioletten Wellenlängenbereich waren die Anwendungen dieser Komponenten für Hochleistungslaser mit hohen Pulsenergien und mittleren Leistungen Ziele des Projektes LOTU<sup>2</sup>S. Darüber hinaus sollen neue Prozesse und Märkte für die Anwendungen dieser verbesserten Anlagen in der Mikromaterialbearbeitung erschlossen werden. In einem interdisziplinären, internationalen Projektkonsortium werden die Kompetenzen in den Bereichen Substrat-, Beschichtungs-, Optik- und Laserentwicklung, Zerstörschwellenprüfung, System- und Anlagentechnik sowie Lasermaterialbearbeitung von deutschen und litauischen Partnern gebündelt. Gleichzeitig wird die Internationalisierung der Forschungslandschaft in Europa gestärkt.

Die Arbeitsgruppe alp übernimmt dabei Aufgaben in den Bereichen Simulation, optische Komponentenentwicklung, Messtechnik, Laserprozessentwicklung und Marktanalyse, um im Projektverlauf optische Komponenten und Systeme zu identifizieren, ein neuartiges Anlagensystem zu entwickeln und dieses für innovative Anwendungen einzusetzen.

## **Zusammenfassung der Arbeiten**

Das Projekt LOTU<sup>2</sup>S besteht aus 8 Arbeitspaketen (WP), die wiederum in Teilbereiche untergliedert sind. Im Folgenden werden, die in den einzelnen Arbeitspaketen durchgeführten Arbeiten, im Detail beschrieben.

## **WPO – Projektmanagement:**

Das WPO beinhaltet die Abstimmung der Projektpartner untereinander sowie die Steuerung des Projektfortschritts unter der Projektkoordination der Firma TOPAG durch Herrn Dr. Umhofer. Die AG alp der TH Aschaffenburg wird innerhalb der 8 folgenden Arbeitspakete zumeist direkt ausführend und immer beratend tätig. Über die gesamte Projektlaufzeit trug das LOTU<sup>2</sup>S-Projekt durch den fruchtbaren Austausch zwischen der Arbeitsgruppe und den deutschen sowie litauischen Partnern wesentlich zum Fortschritt des Projektes, aber auch dessen internationalen Charakter bei. Dem Ausbruch der Coronapandemie geschuldet, war dieser Austausch binnen der ersten Projektjahre vor allem auf Telefonate und Online-Meetings beschränkt. Darüber hinaus wirkten sich verschiedene Faktoren wie der Umzug der Fakultäten Eksmas, Reisebeschränkungen, der Cyberangriff auf die TH Aschaffenburg negativ auf den Projektfortschritt aus, sodass eine kostenneutrale Projektverlängerung bis zum 31.12.2023 veranlasst wurde. Im Folgenden sind die wichtigsten Ereignisse des Projektes zusammengefasst:

Es fanden die folgenden projektrelevanten Zusammenkünfte statt:

- 03.09.20 → Kick-Off Meeting deutscher Projektpartner online
- 07.09.20 → Projektmeeting in Obernburg zur Realisierung optischer Systeme
- 04.02.21 → Projektmeeting Online zur Realisierung optischer Systeme
- 15.11.21 → Projektmeeting in Obernburg zur Realisierung der Lasermaterialbearbeitungsanlage und Integration von optischen Systemen
- 22.11.21 → Projekttreffen Online mit dem internationalen Konsortium
- 01.02.22 → Projektmeeting Online zu Projektfortschritt
- 01.02.22 → Projektmeeting Online zu Projektfortschritt
- 26.04.22 → Projektmeeting Online UV-Laser
- 25.05.22 → Projektmeeting Online UV-Laser
- 13.-15.07.22 → Besuch Ekspla in der AG alp + Tausch der THG-Kristalle

- 25.05.22 → Projektmeeting Online UV-Laser
- 21.07.22 → Projektmeeting Online zur Auslegung von Optikttests
- 29./30.09.22 → Gesamt-Projekttreffen in Vilnius (Eksma) mit allen Partnern  
→ Einzelgespräche mit litauischen Partnern sowie Laborbegehungen
- 09.09.22 → Projektmeeting Online zur Besprechung gemeinsamer Versuche
- 22.09.22 → Projektmeeting Online zur Methodenentwicklung von LIDT-Tests
- 12.10.22 → Projektmeeting Online zur Besprechung wissenschaftlichen Austausches durch den Studenten Jonas Helm im Jahr 2023
- 15.11.22 → Projektmeeting Online zur Vorbereitung des Gesamttreffens
- 22.11.22 → Projektmeeting Online zu Projektfortschritt
- 06. + 09.03.23 → Gemeinsame Justage des Zoom-Teleskops mit TOPAG bei der AG alp
- 26.06.23 → Besuch des FTMC in den Laboren der AG alp und Projektaustausch
- 28.06.23 → Meeting zum Austausch bei der Laser Messe München
- 25.06.23 → Gemeinsame Erstjustage und Tests der Beobachtungsoptik mit Throl
- 04.-06.10.23 → Gesamt-Projekttreffen in Vilnius (Eksma) mit allen Partnern  
→ Einzelgespräche jeweils mit litauischen Partnern und Laborbegehungen
- 16.-19.10.23 → Teilnahme an der Konferenz ICALEO mit zwei Beiträgen
- 11.12.23 → Finale Integration und Tests des überarbeiteten Zoom-Teleskops in den Laboren der alp gemeinsam mit TOPAG



Abbildung 1: Besuch des FTMC in den Laboren der AG alp.



Abbildung 2: LOTU<sup>2</sup>S Projekttreffen 2023 in Vilnius (Eksma).

## **WP1 – Technologische Basis:**

Im WP1 waren von den Projektpartnern einheitliche Messmethoden für die Bewertung der gefertigten optischen Substrate, Beschichtungen und Komponenten festzulegen. Insbesondere mit dem Projektpartner LIDARIS fand eine enge gemeinsame Konzeption von LIDT-Tests mit UV-UKP-Hochleistungslasern statt. Im Austausch zwischen den Partnern wurden Vorgehen, Analysen und Aufgaben festgelegt.

So erfolgte zunächst eine Untersuchung der Substrate und Beschichtungen durch TOPAG. Anschließend erfolgten Belastungstests und Analysen durch die AG alp. Hierfür stand zunächst das Lasermaterialbearbeitungssystem OPTEC - Micro Master 200 mit UV-UKP-Laser Pharos zur Verfügung.

Zur Analyse standen folgende Methoden zur Verfügung:

- Optische Mikroskopie (inkl. DIC & Pol.)
- Rasterelektronenmikroskopie
- Rasterkraftmikroskopie
- Laser-Scanning-Mikroskopie
- Raman-Mikroskopie
- Hartmann-Shack-Sensor

Es erfolgte zunächst eine Untersuchung der Substrate durch TOPAG mit einem fs-Lasersystem (LC Pharos UV). Aufgrund der entstandenen Verzögerungen im Projektverlauf konnten 2021 noch keine Substrate an die AG alp geliefert werden. Im Folgejahr sollen Untersuchungen mit dem innerhalb des Projektes durch Ekspla zur Verfügung gestellten Lasersystem in der AG ALP fortgesetzt werden.

Aufbauend auf den Untersuchungen der Glassubstrate durch TOPAG mit einem fs-Lasersystem (LC Pharos UV) wurden im Jahr 2022 neu beschichtete Substrate an die AG alp geliefert. Da nun auch das Lasersystem des Projektpartners Ekspla zur Verfügung stand, konnten die Untersuchungen mit der relevanten Wellenlänge, Leistung und Pulsdauer durchgeführt werden.

## **WP2 – Materialien**

Innerhalb des WP2 wurden die Substrat- und Beschichtungsmaterialien. Hierzu standen die im engen Kontakt mit Heraeus, sodass im Jahr 2020 eine erste Auswahl an Glassubstraten getroffen wurde, welche von den litauischen Projektpartnern zur Weiterverarbeitung überlassen wurde. Die geplanten Belastungstests von durch Eksma polierten Substrattypen wurden im Projektjahr 2021 von TOPAG verschiedenen Belastungstests unterzogen. Daraus folgte die gemeinsame Materialauswahl für die Fertigung der im Projekt zu fertigenden Optiken, zunächst planparalleler Laserschutzgläser für Materialanalysen.

Die bereitgestellten Optiken wurden nach dem im Projekt entwickelten Konzept poliert, im IBS-Verfahren beschichtet und getempert. Aufgrund der beschriebenen Verzögerungen konnten Laserschutzgläser erst am Ende des Jahres 2022 an die AG alp geliefert werden. Zunächst wurden Langzeittests mit dem Rohstrahl des UV-Ultrakurzpuls lasers durchgeführt. Während dieser Versuche wurde zum einen die transmittierte Leistung, zum anderen aber auch die Strahlform und -lage kontinuierlich gemessen, um eine Aussage zu erhalten, zu welchem Zeitpunkt der mehrstündigen Bestrahlung ein möglicher Defekt auftreten würde.

Die im Folgenden beschriebene Vorgehensweise und der weiterentwickelte Aufbau wurden über diese Versuche hinaus auch zur Charakterisierung des Ekspla-Lasers selbst (WP4) sowie zur Erprobung weiterer kommerzieller optischer Elemente (WP3) eingesetzt. Wie in Abbildung 3 schematisch dargestellt, wurde die zu testende Optik in geringem Abstand zur Laserapertur positioniert und vom Laser transmittiert. Im weiteren Verlauf des Strahlenganges wurden ca. 99 % der Leistung an einem UV-

Spiegel zu einem Leistungsmesskopf reflektiert. Der transmittierte Teil des Laserstrahls in seiner Leistung reduziert und durch eine Strahlkamera detektiert. Durch den großen Abstand zwischen der getesteten Optik und der Kamera (1,1 m) kann neben der Rohstrahlgeometrie auch eine durch Beschädigungen verursachte Fokussierung des Laserstrahls hervorragend detektiert werden. Abbildung 4 zeigt die Realisierung des beschriebenen Aufbaus. Im Vorfeld der Optiktests wurde das Verhalten des Lasers entsprechend überprüft und als Referenz verwendet (vgl. WP4).

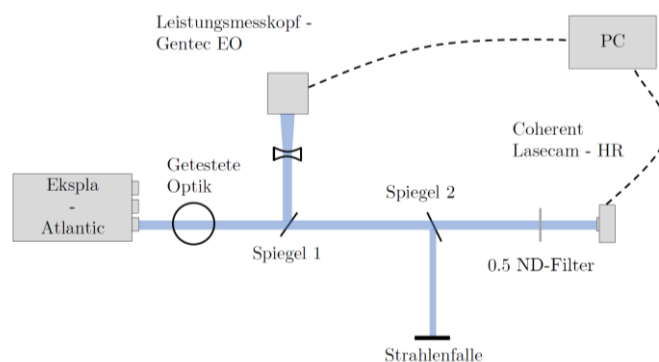


Abbildung 3: Schematischer Aufbau der für Langzeit-Belastungstests von Laseroptiken mit dem Ekspla-Laser

Die Bestrahlung von Laserschutzfenstern erfolgte in mehreren Durchgängen mit einhegenden Zwischenanalysen. Die Versuche wurden bevorzugt bei Laserabstimmungen für maximale Konversionseffizienz, insbesondere bei 400 kHz, durchgeführt. Es zeigte sich, dass selbst bei Bestrahlung mit höchster Leistung und Pulsenergie keine Anzeichen einer Schädigung durch Messung der Leistung beobachtbar waren. Lediglich nach einer Bestrahlungszeit von insgesamt 20 h der drei Durchläufen war eine nur im Farbeindruck erkennbare Veränderung der Beschichtung mit einem Durchmesser von ca. 1,7 mm erkennbar, die sich jedoch nicht in den Eigenschaften des Laserstrahls widerspiegelt. Es wird vermutet, dass die Veränderung durch eine thermische Akkumulation über die lange Belichtungszeit des Schutzfensters hervorgerufen wurde. In realen Prozessen der Lasermikrobearbeitung findet im Gegensatz zur hier durchgeführten Dauerbelastung ein Gating des Lasers statt, so dass die effektiv eingebrachte Energie deutlich unterschritten wird. Es wurde geschlussfolgert, dass die neuartige Substrat-Beschichtungs-Kombination bestens für den Einsatz mit Hochleistungs-UV-Ultrakurzpulslasern geeignet ist und auf die zu fertigenden Optiken für das Zoom-Teleskop und die F-Theta-Optiken für WP3 angewendet wurde.

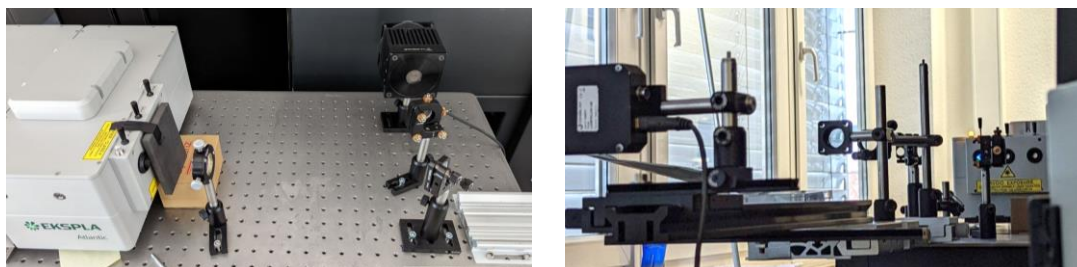


Abbildung 4: Optischer Aufbau für Langzeit-Belastungstests von Laseroptiken mit dem Ekspla-Laser

### **WP3 – optische UV-Komponenten**

Im WP3 wurden auf Grundlage der in WP2 gefundenen Materialien optische Komponenten entwickelt, welche für die UV-UKP-Lasersysteme und –materialbearbeitung Verwendung finden können und gegenüber dem Stand der Technik deutlich höhere Zerstörschwellen, Standzeiten und Belastbarkeiten hinsichtlich Leistungs- und Pulsfluenzen sowie Pulsspitzenleistungen bieten. Die Komponenten umfassen neben Laserschutzfenstern und Linsen auch komplexe Systeme, wie Objektive, Zoom-Teleskope oder Beobachtungsoptiken. Zunächst bedurfte es derer Spezifizierung mit Hinblick auf den Bedarf bei der Mikromaterialbearbeitung, technischer Umsetzbarkeit und Systemintegration. Hier konnte die AG alp zum einen ihr Knowhow in der Lasermikrobearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen und Lasern im ultravioletten Wellenlängenbereich nutzen, als auch ausgehend von wissenschaftlichen Publikationen anderer Forschergruppen Spezifikationen für benötigte Rohstrahldurchmesser, Spotgrößen, Fluenzen, Scangeschwindigkeiten usw. für die Bearbeitung verschiedenster Materialklassen liefern. Anhand dieser Kenndaten mussten im Rahmen des Projektes die optischen Systeme entwickelt werden, um im weiteren Verlauf und speziell im WP5 und 6 erfolgreich ein Lasermaterialbearbeitungssystem aufzubauen und neuartige UV-UKP-Laseranwendungen zu erforschen. Es zeigte sich, dass vor allem transparente Materialien wie Gläser, Keramiken mit großen Bandlücken, Polymere oder Multimaterialsysteme mit hoher Qualität und Effizienz durch UV-UKP-Laser bearbeitet werden können. Beispielhaft seien hier Abtrag- Schneid-, Bohr- oder Schichteröffnungs-Prozesse genannt. Innerhalb dieser Studien herrschte jedoch aufgrund fehlender Verfügbarkeit von Hochleistungslasern eine Limitierung hinsichtlich der genutzten Leistung und Pulsenergien der verwendeten Lasersysteme, sodass nur bei wenigen Prozessen eine Pulsfluenz von  $10 \text{ J/cm}^2$  überschritten werden konnte. Die Arbeiten dieses WP unterteilen sich in die Konzeption und Testungen der verschiedenen Optiken, deren Testung sowie das Prüfen der Belastungsschwellen von einzelnen Optiken oder Systemen.

#### **Belastungstests einzelner Optiken sowie Konzeption und Durchführung von LIDT-Versuchen:**

Im Folgenden werden die durchgeführten Belastungsuntersuchungen optischer Elemente hinsichtlich ihrer Langzeitstabilität, Einsetzbarkeit und Beschädigungsschwelle (LIDT) beschrieben. Dabei wurden die Versuchsaufbauten und Methoden in enger Abstimmung mit den Projektpartnern, insbesondere Lidaris, Ekspla, FTMC und TOPAG konzipiert, sodass Versuche in den Laboren der AG alp stattfinden konnten. Es wurden nicht nur im Projekt entwickelte Optiken erprobt, sondern auch kommerzielle optische Elemente anderer Hersteller vergleichend herangezogen.

Für die Umsetzung der UV-Laser-Mikromaterialbearbeitung können prozessspezifische Anforderungen hinsichtlich Strahlteilung, -abschwächung, -manipulation oder Polarisationsänderung bestehen, die verschiedene Optiken erfordern, die nicht Bestandteil dieses Projektes, jedoch für die in WP5 zu entwickelnde Maschine und die begleitenden Prozesse in WP6 relevant sind. Dazu gehören Verzögerungsplatten ( $\lambda/4$  oder  $\lambda/2$ ), Strahlteiler (50:50 oder polarisationsabhängig), Dünnschichtpolarisatoren oder Strahlformungselemente. Um einerseits die Methodik für spätere Tests an den im Projekt hergestellten Optiken zu definieren und zu testen, andererseits aber auch um die Einsatzfähigkeit solcher spezifischen Optiken zu erproben, wurden sowohl Dauerbelastungstests als auch LIDT-Tests entwickelt und durchgeführt. Die Ergebnisse der Optiken, die ein signifikantes Verhalten zeigten, werden im Folgenden zusammengefasst:

**Variabler Strahlteiler:** Der geprüfte Strahlteiler zeigte bereits zu Beginn der Beanspruchung eine starke Reduzierung des Rohstrahldurchmessers und eine zeitliche Veränderung seiner Geometrie. Dieser reduzierte Rohstrahl zeigte einen abnehmenden Trend. Es bildete sich eine ringförmige Intensitätsverteilung um den Rohstrahl, dessen Leistung mit der Zeit prozentual zunahm. Eine Abweichung der transmittierten Leistung oder eine Schädigung der Optik konnte nicht festgestellt werden. Ein Einsatz der Optik unter solchen Bedingungen ist jedoch nicht möglich. Ein solches optisches

Element wird hauptsächlich für die variable Leistungsabschwächung in einem Abschwächer verwendet. Für WP5 wurde geschlussfolgert, dass ein solches Element erst nach der Strahlaufweitung eingesetzt werden kann, da dort die Leistungsdichte auf der Optik bei größerem Rohstrahl reduziert wird.

50:50 Strahlteiler: Die hohe mittlere Leistung des Ekspla-Lasers übersteigt die bislang industriell eingesetzten Leistungen um ein Vielfaches. Er eignet sich daher hervorragend für die Strahlervielfachung z.B. durch 50:50 Strahlteiler zur Prozessparallelisierung. Der Rohstrahl war bereits zu Beginn der Messung reduziert und nahm kontinuierlich ab. Zusätzlich erzeugte die Optik einen Strahldrift. Die transmittierte Leistung zeigt keine Auffälligkeiten. Innerhalb des Substratmaterials dieses optischen Elementes konnte eine Modifikation des Materials dargestellt werden, welche als Ursache für die fortlaufende Strahlverkleinerung identifiziert werden konnte. Für dieses Element sollte eine Position im Strahlengang nach einer Aufweitung gewählt werden oder bedarf einer Überarbeitung.

Dünnschichtpolarisator: Zunächst wurden Versuche mit unterschiedlichen Leistungen und Pulsenergien durchgeführt. Auch hier zeigte sich, dass bei hohen Pulsenergien, aber kleinen mittleren Leistungen (durch Einsatz des Pulsepickers) keine negativen Veränderungen des transmittierten Laserstrahls messbar waren. Bei der Erhöhung der mittleren Leistung zeigte sich eine Verkleinerung des Rohstrahls mit steigender Leistung, die sich mit zunehmender Belichtungszeit fortsetzte.

#### Kommerziell erhältliche Eksma-Linsen:

Um die Leistung der im Projekt entwickelten Hochleistungsoptiken zu validieren, wurden vorangehende Versuche an einer kommerziellen UV-UKP-Linse von Eksma durchgeführt. Hierfür wurde die Linse vom UV-Laser durchstrahlt und das Verhalten mittels Strahlbeobachtung im Fokus validiert. Bei der Belastung einer Linse durch einen Rohstrahldurchmesser von 1,7 mm und maximal verfügbarer Leistung 25 W wurde eine Veränderung der Strahlgeometrie beobachtet. Abbildung 5 (a) zeigt die zeitliche Abhängigkeit der Strahlgeometrie der Fokussierungsebene in einem Zeitraum von 3 s. Während direkt zunächst eine ausgezeichnete Strahlgeometrie dargestellt werden konnte, verformte sich der Strahl mit zunehmender Ausgabezeit elliptisch und bildet einen Ring mit einer gesteigerten Intensität, welche sich dann nach 3 s Anlaufzeit stabilisierte. Diese Deformation war reversibel und nahm bei Verringerung der Leistung bis zum ursprünglichen Zustand ab. Eine weitere Untersuchung dieses Phänomens zeigt eine laterale Verschiebung des Fokuspunktes, die sich durch das Ausbilden einer sogenannten thermischen Linse erklären lässt.

Abbildung 5 (b) hingegen zeigt den Einfluss der mittleren Leistung und Repetitionsrate (resultierend aus Pulsteilers (PP) 1 bis 5) auf die entstehende Strahlgeometrie. Wird die mittlere Leistung durch Pulsteilen reduziert, bleibt die Pulsenergie weiterhin maximal und es stellt sich keine Verformung des Laserstrahls ein. Somit ergibt sich die mittlere Leistung als Einflussgröße für eine solche Deformation, die Vermutung des Auftretens einer thermischen Linse wird gestützt, während nichtlineare Effekte ausgeschlossen werden können. Diese Effekte laufen zumeist im Glasvolumen der Optiken ab und sind abhängig von der Qualität des verwendeten Quarzglases. Dieses Verhalten bestätigt weiterhin die Notwendigkeit von hochqualitativen Optiken, welche sich durch eine gesenkte Laserabsorption auszeichnen. Spätere Versuche mit den neuartigen Hochleistungsoptiken zeigen im untersuchten Leistungsregime keinerlei thermische Linsen (siehe Abschnitt Teleskopvalidierung).

#### **Testung der Laser Induced Damage Threshold (LIDT):**

Zusätzlich zu den Dauerversuchen wurden Versuche zur Bestimmung der Zerstörschwelle LIDT (Laser Induced Damage Threshold) konzipiert und durchgeführt. Für die Messung der LIDT steht eine Vielzahl von Verfahren zur Verfügung. Während die Varianten 1-on-1 oder „Laser Damage Certification Test“ schnell und mit geringem Probenbedarf Aussagen zur LIDT generieren, liefern S-on-1 oder „Raster Scan“ statistisch aussagekräftigere Werte, die jedoch mit hohem Zeitaufwand und Probenbedarf erkauft

werden. Vor diesem Hintergrund fand zwischen der AG-alp und Lidaris ein reger Austausch über das Versuchsdesign statt, um gemeinsam einen in der AG-alp durchführbaren Versuch aufzubauen. So wurde ein zweistufiges Versuchskonzept entwickelt, das die Effizienz der 1-on-1-Methode mit der Genauigkeit der S-on-1-Methode verbindet (Abbildung 6).

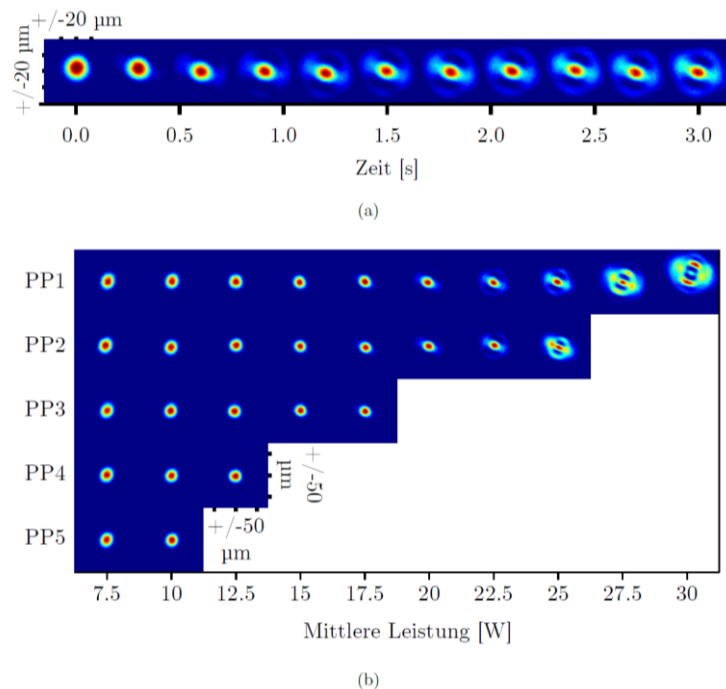


Abbildung 5: Einfluss (a) der Zeit mit einer mittleren Leistung von 25W bei einer effektiven Repetitionsrate von 400 kHz und (b) der verwendeten effektiven Repetitionsrate und mittleren Leistung nach auf die Strahlgeometrie.

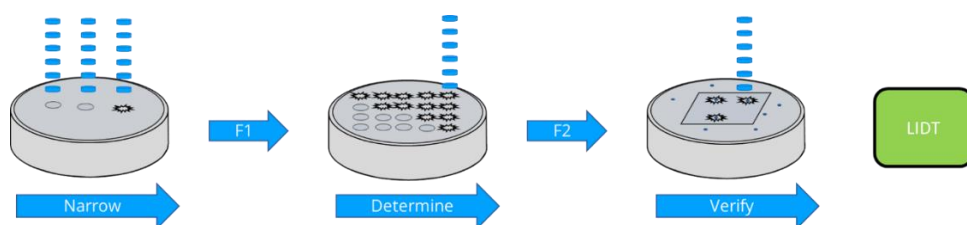


Abbildung 6: Vorgehen zur LIDT-Bestimmung.

Abbildung 7 (a) beschreibt den Fluenzbereich, in dem eine Aussage über das Vorhandensein und die Art eines potenziellen Fehlers getroffen werden kann. Zur Bestimmung des Fluenzregimes wurde zunächst ein 1-auf-1 mit 1000 Pulsen („1.000-on-1“) anstelle eines Pulses durchgeführt. Die im Vorfeld durchgeführten Langzeittests zeigten, dass vor allem die beaufschlagte Leistung zu Schäden an den Optiken bzw. Substraten führt. Demnach war es das Ziel, den Fokusbereich innerhalb der LIDT-Versuche zu maximieren und den Laser bei maximaler Leistung/Pulsenergie zu betreiben. Im Ersten Schritt wurden die zu testenden Proben mit einem defokussierten Strahl mit 1.000 Pulsen beaufschlagt und der Fokusbereich iterativ so lange verkleinert, bis eine erste Schädigung auftrat. Anhand der Kamera-basierten Kaustikmessung der propagierenden Laserstrahls wurde schließlich der für die LIDT-Versuche anzuwendende Fokusbereich validiert und lieferte so die Grundlage für die Folgenden Versuche. Die Fluenz, bei der zuerst ein Schaden sichtbar wurde, definierte die Basisfluenz für den anschließenden Versuch. Die weiterführende S-on-1-Methodik wurde dann in dreifacher Ausführung

mit den Pulszahlen  $10^3$ ,  $10^5$ ,  $10^6$  und  $10^7$  durchgeführt, um die Abhängigkeit der Zerstörschwelle von der Pulszahl gut darstellen zu können. Auf diese Weise werden zusätzlich thermische Effekte berücksichtigt. Zur zeitlichen Optimierung eines Durchlaufs wurde die verwendete Fluenz in Abhängigkeit vom Schädigungsbild der vorherigen Pulszahl sukzessive reduziert. Zwischen den einzelnen Bestrahlungen wurden in Abhängigkeit von der verwendeten Pulszahl Pausenzeiten (30 s) eingefügt, um eine mögliche Erwärmung der Optik und einhergehende Quereinflüsse zu vermeiden. Der LIDT-Wert stellt die maximale Fluenz in Verbindung mit der höchsten getesteten Pulszahl dar, bei der keine Schädigung festgestellt werden konnte, und ist in Abbildung 7 (b) schematisch als  $F_2$  dargestellt. Die optimierte Repetitionsrate von 400 kHz wurde gewählt, um durch die höchste Konversionseffizienz des Lasers eine daraus resultierende maximale Effizienz der später durchgeführten Prozesse zu ermöglichen. Die bestrahlte Optik wurde unterhalb des Fokusbereichs positioniert, da eine weitere Fokussierung innerhalb der getesteten Optik vermieden werden sollte.

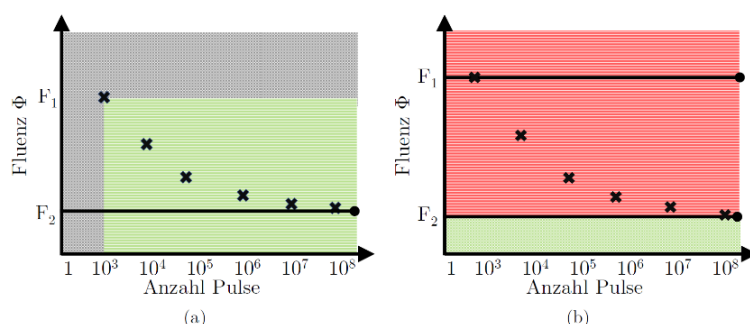


Abbildung 7: LIDT-Versuche: (a) Aussagebereich des Versuchs nach 1000-on-1 (grün: Untersuchungsbereich) und (b) Konzeption der Zerstörschwellen-Versuche der Methode mit  $F_1 = 1000$ -on-1 evaluierte Beschädigung und mit  $F_2$  Zerstörschwelle

Bei der Untersuchung kommerzieller Optiken konnten neben Beschädigungen der Beschichtung auf der Eintrittsseite der Optik auch Veränderungen im Glas sowie auf der Rückseite festgestellt werden. Theoretische Betrachtungen zu einer möglichen Selbstfokussierung zeigten, dass in den Versuchen, die für das verwendete Quarzglas zugrunde gelegten kritischen Leistungsdichten überschritten wurden. Der dabei auftretende „Effekt der bewegten Selbstfokussierung“ erklärt somit die aufgetretenen Rückseitenschäden an den getesteten Optiken. Darüber hinaus wurden bei verschiedenen Optiken Schäden am Glassubstrat selbst beobachtet, obwohl bei niedrigeren Fluenzen keine Beschichtungsschäden auftraten. Dies unterstreicht die Bedeutung der für Laseroptiken verwendeten Glastypeen, da vor allem Optiken auf Basis kostengünstiger Quarzgläser ein solches Schädigungsmuster aufwiesen (vgl. WP2).

Im weiteren Projektverlauf wurden der AG alp neuartige Hochleistungsoptiken von Eksma zur Verfügung gestellt und mittels der entwickelten Testmethodik evaluiert. Der für eine Schädigung notwendige Fokusbereich bei einer Maximalleistung von 25,4 W (gemessen auf Substratniveau) betrug  $106 \mu\text{m}$ , aus dem eine Pulsfluenz für  $F_1$  von  $720 \text{ mJ/cm}^2$  resultierte. Anhand dieses Wertes wurden die LIDT-Versuche wie eingangs beschrieben an drei LOTU<sup>2</sup>S-Laserschutzfenstern in 5-facher Ausführung durchgeführt und anschließend begutachtet. Die Messergebnisse sind in Abbildung 8 dargestellt. Zunächst sind die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten einer Beschädigung für die jeweiligen Pulszahlen für steigende Fluenzen dargestellt. Diese Wahrscheinlichkeit nimmt für die verschiedenen Versuchsbedingungen mit steigender Fluenz zu. Es zeichnete sich wie erwartet ab, dass mit steigender Pulszahl bei geringeren Fluenzen eine Beschädigung auftritt. Im Gegensatz zu bekannten LIDT-Auswertungen von Lasersystemen mit Pulsdauern im Nanosekundenregime, wo eine breite Streuung der Beschädigungsschwelle stattfindet, können in den hier durchgeführten Versuchen mit ultrakurzen Laserpulsen sehr diskrete Beschädigungsschwellen bereits mit einem geringen

Versuchsaufwand evaluiert werden. Als Beschädigungsschwelle kann für die Eksma-Optiken der in Abbildung 8 rechts dargestellte Verlauf angegeben werden, der sich mit steigender Pulsanzahl erniedrigt. Für  $10^7$  Laserpulse wurde die Fluenz von  $450 \text{ mJ/cm}^2$  gefunden werden.

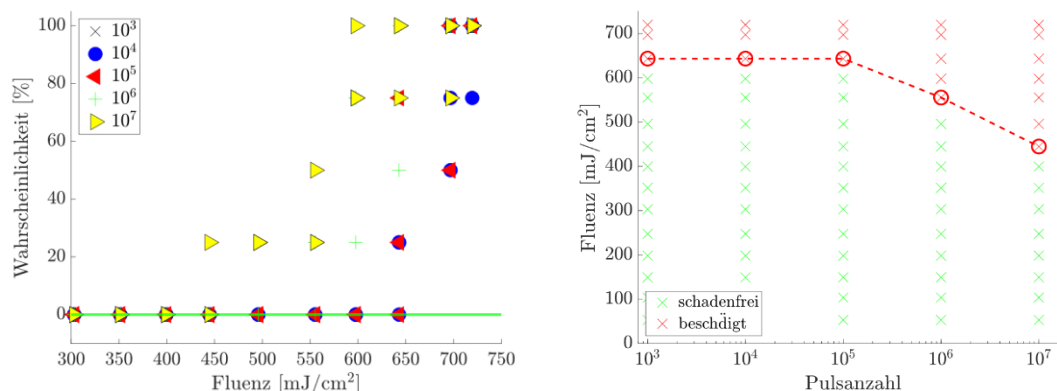


Abbildung 8: Validierung der laserinduzierten Zerstörungsschwelle (LIDT) der im LOTU<sup>2</sup>S-Projekt entwickelten Hochleistungsoptiken. Links: Zerstörungswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Pulszahl und -fluenz. Rechts: LIDT in Abhängigkeit der Pulszahl.

Die genaue Untersuchung der Substrate zeigte, dass auch hier eine Beschädigung vornehmlich an der Rückseite der Optiken stattfand, obwohl der Laserstrahl divergent in das Substrat transmittierte. Als Ursache für diese Schäden wurde, wie erneut eine Selbstfokussierung im Glasvolumen identifiziert jedoch erst bei deutlich erhöhten Fluenzen. Wie in Abbildung 9 dargestellt, erniedrigt sich die vom Laser durchstrahlte Fläche zur Optikrückseite hin, was in einer im Vergleich zur Vorderseite erhöhten Pulsfluenz und schließlich zum Abtrag führt, während die Vorderseite keinerlei Schäden aufweist.

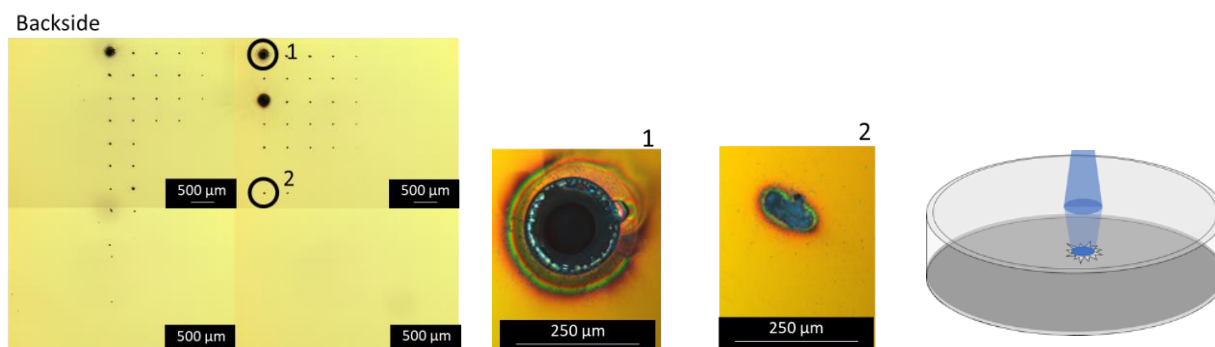


Abbildung 9: Optische Analysen der innerhalb von LIDT-Versuchen auftretenden Schäden auf der Rückseite eines Laserschutzfensters gefertigt mittels der neu entwickelten Fertigungsverfahren.

Im letzten Testschritt wurde zur Validierung des so erhaltenen Fluenz-Schwellwertes eine weitere Testung – der Rasterscan – durchgeführt. Bei dieser Methode wird eine große Fläche der zu testende Optik mit dem Laser unter Verwendung der beim S-on-1 ermittelten Grenzfluenz beaufschlagt, indem der Laserstrahl schraffierend über die Oberfläche geführt wird. Durch Anpassung von Scangeschwindigkeit und Linien- bzw. Hatch-Abstand wurde so eine akkumulierte Fluenz von 1.000 Pulsen bewerkstelligt. Der Vorteil dieser Methodik liegt darin, dass die Wahrscheinlichkeit, eine Produktions-bedingte Inhomogenität in der Beschichtung oder dem Substrat zu bestrahlen um ein Vielfaches ansteigt. Diese Fehlstellen weisen i.d.R. eine höhere Absorption auf und die Beschädigung findet bei niedrigeren Fluenzen statt. Der Test stellt also eine sinnvolle Erweiterung und Validierung des

S-on-1 dar. Bei den hier durchgeführten Raster-Scans mit der beaufschlagten Fluenz von 600 mJ/cm<sup>2</sup> konnten keine Schädigungen nachgewiesen werden, was die Gültigkeit der mittels S-on-1-Testung ermittelten LIDT-Werte validiert.

Die gewonnenen Zerstörungsschwellen heben sich stark von den bis dato kommerziell erhältlichen UV-UKP-Optiken ab, welche vornehmlich LIDT-Werte im Bereich von 100 mJ/cm<sup>2</sup> aufweisen. Im weiteren Projektverlauf nahm Eksma mit den im LOTU<sup>2</sup>S-Projekt entwickelten Optiken an am Wettbewerb „LIDT-Challenge“ von HiLase siegreich teil. Die dort ermittelte LIDT von 0,6 J/cm<sup>2</sup> bestätigte die durch die AG alp gewonnenen Werte. Darüber hinaus führte auch der Projektpartner LIDARIS LIDT-Testungen unter verschiedenen Testkonditionen durch und konnte ähnliche Ergebnisse liefern und so die eigene Testmethodik validieren. Hierbei sei auf die Berichterstattung der Projektpartner Eksma und LIDARIS verwiesen.

### Entwicklung und Testung von optischen Systemen:

Im Rahmen des LOTU<sup>2</sup>S-Projektes wurden verschiedene optische und optomechanische Systeme, wie ein variables Strahlaufweitungssteleskop, ein Beobachtungsmodul und ein F-Theta-Objektiv entwickelt. Die Konzeption und Fertigung erfolgte maßgeblich durch die Projektpartner, während die AG alp wichtige an zukünftige Applikationen angelehnte Kenngrößen und Anforderungen an solche Systeme lieferte und im permanenten Austausch mit dem internationalen Konsortium stand. Im weiteren Verlauf wurden die Systeme in den Systemen der AG alp integriert, charakterisiert und Belastungstests unterzogen. Für die Berechnungen der Spezifikationen von F-Theta-Objektiven und Zoom-Teleskop wurden zunächst die Daten des vom Projektpartner Ekspla kommerziell vertriebenen Lasersystem Atlantik 80-UV30 herangezogen. Die Realisierung eines UV-UKP-Hochleistungslasers eröffnet der Lasermikrobearbeitung verschiedene Aspekte, die es durch Auslegung und Variabilität der zu entwickelnde optische Systeme zu bedienen galt. Die für verschiedene Rohstrahldurchmesser und Brennweiten erreichbaren Fokusbrennweiten und resultierende Pulsfluenzen (berechnet aus den Kenndaten des Ekspla-Lasers) seien in

Tabelle 1 dargestellt.

*Tabelle 1: Erreichbare Fluenzen für verschiedene Fokusbrennweiten resultierend aus Rohstrahldurchmesser und Brennweiten für 75 µm Pulsenergie*

Brennweite/ Rohstrahldurchmesser	100 mm	163 mm
2 mm	11 J/cm <sup>2</sup> @ 29,4 µm	4,2 J/cm <sup>2</sup> @ 48 µm
4 mm	44 J/cm <sup>2</sup> @ 14,7 µm	16,7 J/cm <sup>2</sup> @ 24 µm
10 mm	277 J/cm <sup>2</sup> @ 5,9 µm	104 J/cm <sup>2</sup> @ 10 µm

Für ein Zoom-Teleskop ließen sich also bei Betrachtung des zur Verfügung stehenden Bauraumes in gängigen Lasermaterialbearbeitungsanlagen und den gewünschten Rohstrahldurchmessern (ausgehend von einem 2 mm Rohstrahl) zu Projektbeginn folgende Parameter in Absprache mit den Projektpartnern TOPAG und Throl hinsichtlich einer möglichen konstruktiven und optischen Auslegung definieren:

- Maximale Baulänge: 250 mm
- Erreichbare Rohstrahldurchmesser: 4 – 10 mm
- Zoomstufen: 2 – 5 x

Des Weiteren ließen sich aus den in

Tabelle 1 errechneten Werten die Spezifikationen der zu entwickelnden Objektiv ableiten. Die Anwendungen der Mikromaterialbearbeitung bedürfen bei Scanner-basierten Konzepten hoher Genauigkeit und Reproduzierbarkeit und darüber hinaus konstante Fokusbereich über ein genügend großes Bearbeitungsfeld, um die Vorteile der schnellen Scanner-Auslenkungen auch voll verwerten zu können. Somit war ein komplexeres F-Theta-Objektiv vonnöten und es ergaben sich gegenüber dem ursprünglichen Antragszielen erhöhte Anforderungen. Hier orientierte man sich an kommerziell verfügbaren F-Theta-Systemen für die UV-Laserbearbeitung.

Nach der ersten Spezifikation der F-Theta-Objektive und des Zoom-Teleskops durch die nationalen Projektpartner ALP, TOPAG und Throl wurde der litauische Projektpartner Eksma, welcher die Verantwortung für die Fertigung der einzelnen Optikkomponenten trug, in den Diskurs einbezogen. Eksma war fähig, Optiken mit Durchmessern bis 100 mm (4“) zu verarbeiten. Aus dieser Spezifikation resultiert für die F-Theta-Objektive ein maximales Bearbeitungsfeld von 55x55 mm<sup>2</sup>. Es ergeben sich unter Absprache mit den Projektpartnern die in Tabelle 2 dargestellten Parameter für zwei F-Theta-Objektive:

Tabelle 2: Anforderungen an zu entwickelnde F-Theta-Objektive mit 100 und 163 mm unter Annahme von  $M^2=1,3$

Eigenschaft	Wert	
Brennweite [mm]	100	163
max. Bearbeitungsfeld [mm <sup>2</sup> ]	35 x 35	55 x 55
Fokusbereich @ 4/10 mm Rohstrahldurchmesser [µm]	5,8 / 15	9,5 / 24
max. Telezentriefehler [°]	1,5	2,5
max. Baulänge der F-Theta-Linse + Arbeitsabstand [mm]	260	
max. Rohstrahldurchmesser [mm]	≥10	

Die hier festgelegten Spezifikationen gingen aufgrund der neu definierten Ansprüche an die Mikromaterialbearbeitung mit UV-UKP-Hochleistungslasern teilweise über die im Projektantrag festgelegten Parameter für die optischen Systeme hinaus. Es wurden weiterhin alle ursprünglichen Ziele verfolgt. Die Anpassung und Festlegung geschah im engen Austausch mit den Projektpartnern. Gegensätzlich zu den im Antrag beschriebenen Verantwortlichkeiten wurde aufgrund von Erfahrungen und Knowhow dem Partner Throl das Design der F-Theta-Objektive übertragen, während TOPAG das Zoom-Teleskop konzipierte.

Abweichend von der zunächst geplanten Umsetzung des Lasermaterialbearbeitungssystems auf Basis des in der AG alp vorhandenen Systems „4-Lambda“ wurde auf ein alternatives Maschinenkonzept, der Anlage OPTEC MM 200 übergegangen, wo ein größerer Raum für Optik und Strahlengang zur Verfügung stand und die Beschränkungen hinsichtlich Baulänge und Arbeitsabstand für das zu entwickelnde 163 mm-Objektiv ein Stück weit aufgehoben werden konnten.

Darüber hinaus wurde auf Basis der Berechnungen und Simulationen TOPAGs zum Einfluss der Scanner-Apertur auf die Abbildungsqualität der Maximale Rohstrahldurchmesser für verschiedene Szenarien diskutiert. Die AG alp brachte hier ihr Knowhow hinsichtlich der Auswirkung von Spotverzerrungen und anderen Abbildungsfehlern auf die Lasermikrobearbeitung ein. Es zeigt sich, dass mit dem ausgewählten Newson-Scanner (Eingangsapertur = 15 mm) die maximale Aufweitung des Rohstrahls auf 10 mm ohne zu starke Einbuße in der Abbildungsqualität umgesetzt werden kann.

Um die zunächst für die zu entwickelnden Objektiv definierten Ansprüche aus Tabelle 2 erweitern zu können, wurde das in der AG alp bereits verwendete UV-F-Theta-Objektiv (100 mm, telezentrisch) mit dem UV-UKP-Laser Pharos (220 fs, 343 nm) vermessen. Eine Verzerrung des Fokusspots entlang eines

20 x 20 mm<sup>2</sup> Scanfeldes sowie der Versatz der Fokusebene an den jeweiligen Messpunkten wurde registriert. An den Ecken zeigt sich eine stark elliptische Deformation und Rotation des Fokusspots. Die so erlangten Ergebnisse wurden mit den Projektpartnern diskutiert und bewertet, sodass die Ziele, für die im Projekt zu entwickelnde F-Theta-Optik noch genauer definiert werden konnten.

Ein weiteres zu entwickelndem optischem System stellte die von Throl zu entwickelnde on-axis-Beobachtungsoptik dar. Zunächst wurde das Ziel definiert, das System für die Inspektion der zu bearbeitenden Probenoberfläche zu entwickeln. Die AG alp nutzte in der Vergangenheit die Möglichkeit, den von der Substratoberfläche durch ein Mikroskopobjektiv rückreflektierten Laserstrahl zu analysieren. Mithilfe dieser Methode kann zum einen eine Kamera-basierte Auswertung der Fokusgröße, -lage oder Strahlkaustik erfolgen, zum anderen stellt sie eine geeignete Hilfe zur Justage des Strahlengangs dar. Darüber hinaus kann so unmittelbar vor der Materialbearbeitung ohne zusätzliche Messaufbauten die Qualität des Laserstrahls und daraus abgeleitet der Zustand der im Strahlengang verbauten Optiken geprüft werden. Gemeinsam mit den Projektpartnern wurde eine Kombination aus beiden Funktionalitäten innerhalb eines Systems diskutiert und für die Verwendung mit einem F-Theta-Objektives umgesetzt. Hinsichtlich der Konzeption, dem optomechanischen Design und Umsetzung sei an dieser Stelle auf die Berichterstattung des Partners Throl verwiesen.

#### Integration und Evaluation des Lotu<sup>2</sup>s Strahlaufweitungsteleskopes:

Das im Rahmen des Projektes durch TOPAG optisch und elektromechanisch entwickelte dreilinsige Strahlaufweitungsteleskop konnte gemeinschaftlich mit dem Partner Eksma gefertigt werden. Hier fand eine mehrstufige Validierung statt. Zunächst wurde die Performanz des Systems in den TOPAG-eigenen Laboren getestet. An dieser Stelle sei auf die Berichterstattung des Partners verwiesen. Im zweiten Schritt erfolgte eine Testung durch die AG alp. Da der Ekspla-Hochleistungslaser zu diesem Zeitpunkt wegen Überarbeitungsmaßnahmen und anschließenden LIDT-Tests seitens LIDARIS nicht zur Verfügung stand wurden diese Versuche z.T. vorübergehend auf einem Laser mit ähnlichen Spezifikationen durchgeführt.

Die hierfür verwendete UV-Strahlenquelle wurde durch ein Galilei-Teleskop auf eine Strahlengröße von 1.7 mm verringert, um die Rohstrahlgröße des Ekspla-Lasers abzubilden. Das LOTU<sup>2</sup>S- Teleskop kann mithilfe der motorisierten Achsen eine Strahlaufweitung von 2 bis 5 realisieren. Die Integration des Teleskopes erfolgte gemeinschaftlich mit dem Projektpartner TOPAG in den Laboren der AG alp. Im nächsten Schritt wurde das Teleskop hinsichtlich seiner Reproduzierbarkeit und Widerstandsfähigkeit beurteilt. Abbildung 10 zeigt schematisch den Aufbau der Versuche. Für die zusätzlich durchgeführten Belastungsversuche werden zur Abbildung des Strahls während der Versuche an der Stelle "1" weitere Keilplatten in den Strahlengang eingesetzt. Die Reproduzierbarkeit wurde untersucht, indem unterschiedliche Vergrößerungen relativ zu der Basisausweitung eingestellt wurden. Die Pointing-Genauigkeit und das Verhalten des entstehenden Fokusdurchmessers beim Linsen-Konfigurationswechsels wurden hierfür als Maß der Genauigkeit gewählt. Zudem wurde der Abstand des Schwerpunktes der kleinsten und der größten Aufweitung gegenübergestellt und diente als zusätzlich Aussage über die Anpassung des Rohstrahls während einer Lasermaterialbearbeitung. Eine spezifische Betrachtung der Kaustik mit und ohne Verwendung des Strahlaufweitungsteleskops gab zudem eine Aussage über eine Verschlechterung bzw. Verbesserung des Astigmatismus der Laserstrahlenquelle. Die Belastbarkeit des Teleskops wurde mithilfe eines zweistufigen Experiments durchgeführt. Es wurde mit mittleren Leistungen von 13 W und 25 W jeweils für 470 min die zeitliche Veränderung des Rohstrahls, des Fokusdurchmessers und der mittleren Leistung betrachtet. Um die Leistung auf das erforderliche Niveau zur Betrachtung zu reduzieren, wurde eine zweistufige Abschwächung durchgeführt. Die erste Stufe der Abschwächung erfolgt durch den Einsatz von Keilplatten, da diese den polarisierten Anteil der Leistung besser als Spiegel reduzieren. Für die

Feinabschwächung werden Neutralfilter verwendet. Die Ergebnisse dieser Studien seien im Folgenden dargestellt.

Im ersten Schritt wurde das Verhalten der Optiken bei Langzeitbelastung mit hoher Laserleistung untersucht. Die hier verwendeten Parameter stellen die optimierte und die maximale Repetitionsrate mit der maximal verfügbaren mittleren Leistung des Atlantics dar. Es wurde insgesamt ein Testzeitraum von 20 h abgedeckt. Nach dem ersten und zweiten Versuchsabschnitt war kein Defekt auf der Optik zu erkennen. Lediglich nach einer Gesamtbelichtungszeit von 20 h war eine leichte Veränderung der Interaktionsfläche mit einem Radius von 1,6 mm sichtbar. In einem weiterführenden Experiment wurde durch zusätzliche Pausenzeiten ein prozessähnlicher Zustand nachgestellt werden, um zu überprüfen, ob sich auch unter diesen Bedingungen Veränderungen auf diesen Oberflächen ausbilden.

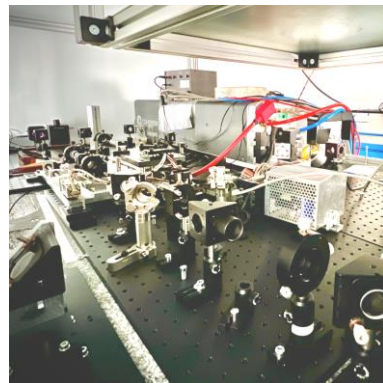
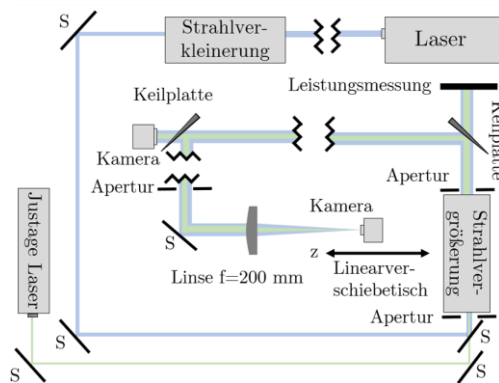


Abbildung 10: Optischer Aufbau und Strahlengang zur Justage und Charakterisierung des entwickelten variablen Strahlvergrößerungsteleskops hinsichtlich elektromechanischer und optischer Performanz. Links: Schema; recht: Fotografie.

Im weiteren Verlauf wurde die optische Leistung des neu konzipierten Strahlauflerungsteleskops ermittelt und die Qualität der Strahlauflerung beurteilt. Hierfür wurde die Linsenkonfiguration, also deren Abstände so eingestellt, sodass die kleinste Vergrößerung realisiert wurde. Um Einflüsse wie einen Strahlenquellen-bedingten Astigmatismus zu identifizieren, wurde die Qualität sowohl mittels grünem Justagelaser als auch der UV-Laserstrahlenquelle durchgeführt. Abbildung 11 zeigt die ermittelten Messwerte der Strahlpropagation des grünen Laserstrahls für die Aufweitungsfaktoren 2x (a) 5x (b) und des UV-Laserstrahls mit 2-facher Aufweitung (c). Bei geringer Aufweitung des grünen Laserstrahls war lediglich ein geringer Astigmatismus erkennbar. Durch eine vergrößerte Aufweitung wurde dieser verstärkt. Beim UV-Versuch war verglichen zum grünen Laser aufgrund des höheren  $M^2$ -Wertes ein gesteigerter Astigmatismus vorhanden.

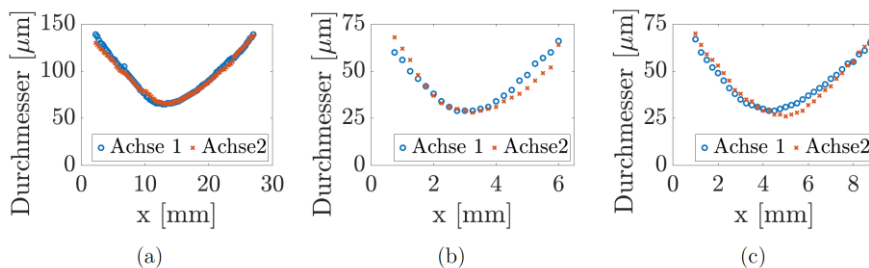


Abbildung 11: Kaustikbetrachtung nach Teleskop-Transmission des grünen Justagelasers mit der Vergrößerung (a) zweifach, (b) fünffach und (c) zweifache Vergrößerung des UV-Laserstrahls.

Im nächsten Schritt wurde die Reproduzierbarkeit des Teleskops hinsichtlich des Strahldrifts (Pointings) und der resultierenden Strahlgröße betrachtet. Um diesen Aspekt zu untersuchen, wurde alternierend

die kleinste und größte Vergrößerung (2x und 5x) eingestellt. Aus Abbildung 12 geht ein Abstand der Positionen der beiden Vergrößerungen hervor, der sich durch einen Wechsel statisch verhält. Die Anpassung der von TOPAG entwickelten Steuerungssoftware ermöglicht so ein Wechseln der Strahlgröße während eines Prozesses. Zudem zeigt Abbildung 12 (b) eine hohe Reproduzierbarkeit der Strahlgröße. Dennoch resultiert durch eine größere Aufweitung eine gesteigerte Abweichung des entstehenden Strahldurchmessers. Dies könnte durch den geringeren Abstand der Linsen zueinander resultieren, wodurch eine größere Positioniergenauigkeit erforderlich ist. In einem letzten Schritt wurde das Verhalten des gesamten Aufweitungssystems evaluiert. Es wurden zwei Versuche durchgeführt, welche sich in der maximal verwendeten mittleren Leistung unterscheiden. Die Gesamtdauer pro Versuch war analog zu den zuvor durchgeführten Langzeitversuchen von Eksma Schutzgläsern mit identischer Substrat-Beschichtungs-Kombination auf 480 min gesetzt. Die Versuche wurden mit dem Linsenabstand für die 2-fache Vergrößerung durchgeführt, da bedingt durch den größeren Abstand zwischen Linse 2 zu Linse 1 die zweite Linse mit maximaler Fluenz beaufschlagt wird.

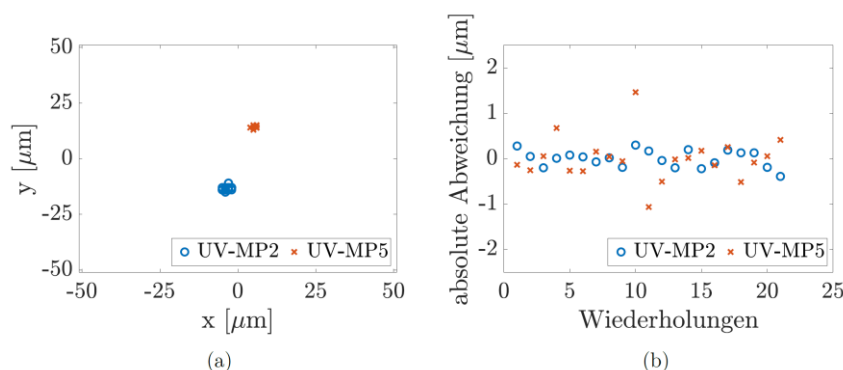


Abbildung 12: Reproduzierbarkeit der Strahlage beim Wechseln der Vergrößerungsstufen (2x und 5x) am neu entwickelten Strahlaufweitungsteleskop

In einem Zeitraum von 960 min wurde in zwei Abschnitten zunächst mit einer effektiven Repetitionsrate von 200 kHz (PP2), anschließend mit einer Repetitionsrate von 400 kHz und der jeweils maximal verfügbaren mittleren Leistung der jeweiligen Konfiguration durchgeführt. Unabhängig von der mittleren Leistung war eine Verkleinerung des Laserstrahls mit zunehmender Testdauer zu verzeichnen. Entgegen den Erwartungen resultiert die Verkleinerung des Rohstrahls nicht in einer Verkleinerung des Fokusbereichs. Abbildung 13 zeigt einen stabilen Fokusbereich über den gesamten Testzeitraum. Die transmittierte mittlere Leistung war unabhängig von der mittleren Leistung stabil.

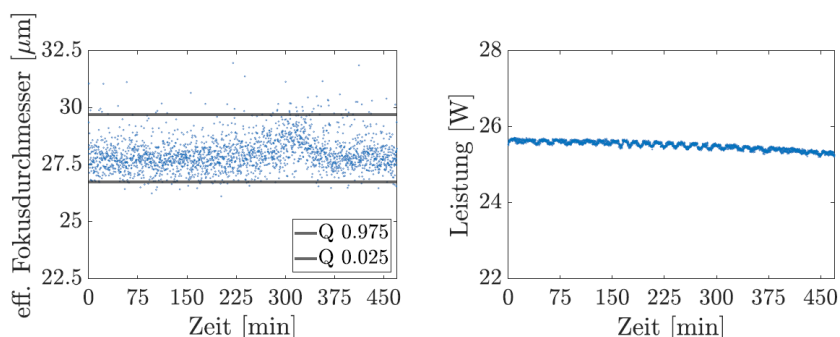


Abbildung 13: Langzeitmessungen des effektiven Fokusbereichs und der transmittierten Leistung des Teleskops.

Um die Vorteile des im LOTU<sup>2</sup>S-Projekt entwickelten Teleskops zu demonstrieren, wurde vergleichend ein kommerzielles Teleskop eines anderen Herstellers herangezogen, welches von einem Industriepartner zur Verfügung gestellt wurde. Eine Langzeitüberwachung der Position des

Fokuspunktes wurde kamerabasiert durchgeführt und zeigt, dass dessen Schwerpunkt beim kommerziellen Teleskop eine deutlich stärkere Drift aufwies, als beim neu konzipierten (vgl. Abbildung 14). Für ein solches Verhalten sprechen zum einen eine erhöhte Absorption der Laserstrahlen an den Linsen des kommerziellen Teleskops als auch eine stabilere Lagerung der Optiken im LOTU<sup>2</sup>S-Teleskop.

Zusammenfassend zeigen die Untersuchungen des LOTU<sup>2</sup>S-Strahlaufweiterteleskops eine überlegene Aufweitungsleistung mit minimalen Einbußen in der Strahlqualität. Zudem ist eine ausgezeichnete Reproduzierbarkeit der Vergrößerungsstufen ersichtlich, wodurch ein beliebiges prozessinternes Wechseln der Vergrößerungsstufe ermöglicht wird, insofern der absolute Abstand des resultierenden Fokusschwerpunktes berücksichtigt wird.

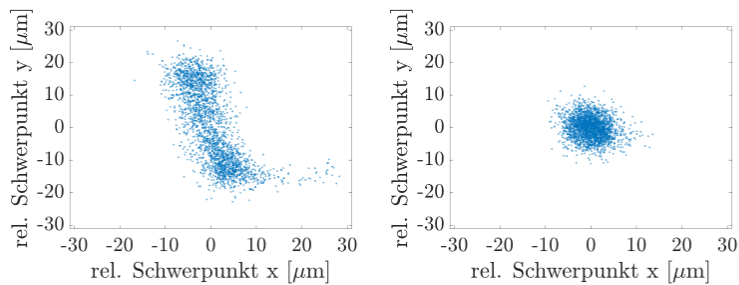


Abbildung 14: Langzeitmessung des Strahldrifts (Pointings) im Fokus bei der Verwendung eines kommerziellen Strahlaufweiterteleskops (links) und des im Projekt entwickelten Strahlaufweiterteleskops (rechts).

#### Integration und Evaluation des Lotu<sup>2</sup>s F-Theta-Objektives:

Im Verlauf des Projektes wurde das fertiggestellte F-Theta-Objektiv zunächst vom Partner THROL selbst charakterisiert und anschließend der AG ALP für eine Charakterisierung mit einem UV-UKP-Laser überlassen. Wie von THROL konzipiert, konnte die Optik passgenau in den vorgesehenen Newson-Scanner sowohl mechanisch als auch optisch integriert werden, wie Abbildung 15 zeigt. Es waren keine Abstandsringe einzubringen und es entstanden keine kritischen Rückreflexe mit Fokusburchgängen auf den vorgelagerten Optiken.

Wie bereits im Vorfeld mittels 100 mm F-Theta-Optik in Kombination mit dem 220 fs UV-Laser durchgeführt, wurde das resultierende Scanfeld der entwickelten 163 mm Optik vermessen und einem kommerziellen Objektiv mit ähnlichen Spezifikationen gegenübergestellt. Die Daten beider Objektive seien in der Tabelle 3 gegenübergestellt. Die durchgeführten Studien konnten nicht mit dem Hochleistungslaser des Projektpartners Ekspla durchgeführt werden, da sich dieser zu diesem Zeitpunkt zur Revision in Vilnius befand. Ein 900 fs Laser mit einer Wellenlänge von 343 nm stellte eine geeignete Alternative dar, mit dem die für diese Wellenlänge beschichtete Optik getestet werden konnte.

Tabelle 3: Eigenschaften der untersuchten F-Theta-Objektive

Eigenschaft	LOTU <sup>2</sup> S	Kommerziell
Brennweite [mm]	163	167
max. Bearbeitungsfeld [mm <sup>2</sup> ]	50 x 50	66 x 66
Designwellenlänge [nm]	343 & 355	355

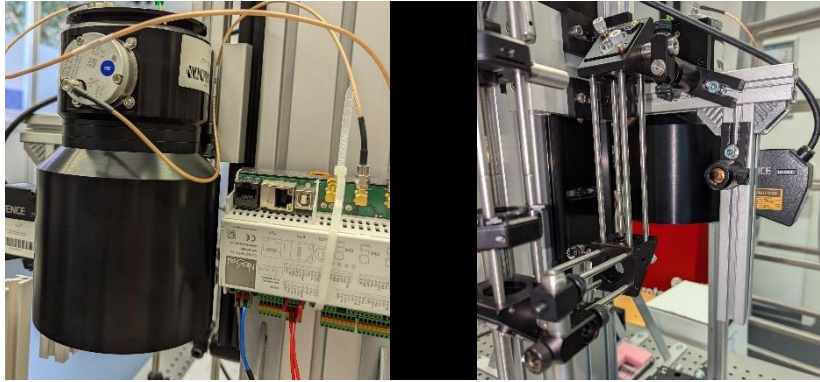


Abbildung 15: Im LOTU<sup>2</sup>S-Projekt entwickeltes F-Theta-Objektiv. Links: Objektiv mit Newson-Scanner und Steuerungselektronik; rechts: mit angekoppeltem LOTU<sup>2</sup>S-Beobachtungsmodul.

Zunächst wurden Scanner und F-Theta hinsichtlich der Strahlage (validiert durch Irisblenden) als auch -winkel (validiert durch Rückreflex) einjustiert. Der Rohstrahl wurde mittels LOTU<sup>2</sup>S-Teleskops auf 7 mm vergrößert. Die Kartierung der Fokuspunkte sind für beide Objektive für Scanfelder von jeweils 50 x 50 mm<sup>2</sup> durchgeführt worden. Beide Objektive liefern eine hohe Performanz im Zentrum der Scanfelder, Abweichungen wie Verzug der Fokuspunkte in den äußeren Bereichen entsprechen den marktüblichen Spezifikationen ähnlicher Optiken und sind zudem z.T. auf den ersatzweise verwendeten Laser zurückzuführen, der kein so ausgezeichnetes Strahlprofil wie der des Projektpartners Ekspla liefert. Für weitere Ausführungen sei auf die Berichtführung des Projektpartners verwiesen.

#### Integration und Evaluation des Lotu<sup>2</sup>s Beobachtungsmoduls:

Im Verlauf des Projektes wurde das vom Partner Throl entwickelte Beobachtungsmodul gefertigt und war in die Maschine zur UV-UKP-Lasermaterialbearbeitungsanlage zu integrieren. Als Schnittstelle zwischen dem Modul und der Scannerhalterung des Newson-Scanners wurde mittels 3D-Druck ein zum Cage-System kompatibler Adapter gefertigt, sodass der von der Probenoberfläche ausgehende Rückreflex in abgeschwächter Form durch den Spiegel in das Modul transmittieren kann (vgl. Abbildung 16). Im ersten Schritt wurde das Modul in Zusammenarbeit mit Throl in den Laboren der AG alp justiert. Gemeinsam wurde eine Justageprozedur entwickelt. Hierbei zeigte sich eine Fluoreszenz auf den Linsen des Moduls mit einhergehender Abschwächung des Laserstrahls. Als Ursache wurde die Füge-technik der Dublett-Linsen sowie das verwendete Glas identifiziert, sodass eine Überarbeitung des Systems stattfinden musste.

Aufgrund einer Überarbeitung der IDS-Kamera-Schnittstellen konnte die im System verbaute Kamera nicht wie in der AG alp üblich mit der Software „LaseView“ kombiniert werden, um die Eigenschaften des Laserstrahls in Echtzeit zu analysieren. Eine rudimentäre Software wurde mittels C++ programmiert, um die Schnittstelle der Kamera abzugreifen und den abgebildeten Laserstrahl hinsichtlich seiner Position und Größe ( $1/e^2$ ) während der Verwendung des Beobachtungssystems zu analysieren (vgl. Abbildung 16).



Abbildung 16: Aufbau zur Justage des LOTU<sup>2</sup>S-Beobachtungsmoduls (links), Fluoreszenz der ersten Linsensysteme (Mitte) und C++-basierte Software zur live-Auswertung des LOTU<sup>2</sup>S-Beobachtungsmoduls (rechts).

Auf die Überarbeitung des Systems hin, wurden der AG alp neue Linsen von Throl zur Verfügung gestellt. Daneben wurden die Linsenpositionen innerhalb des Moduls neu konfiguriert und justiert. Die Testung der Beobachtungsoptik fand im Rahmen der Teleskoptestungen statt, sodass dieses wegen fehlendem Ekspla-Laser nicht wie geplant in der Anlage MM200 stattfinden konnte. Stattdessen wurde ein Laboraufbau mit dem zur Verfügung stehenden 900 fs UV-Laser konzipiert, sodass alle im Lotu<sup>2</sup>s-Projekt entwickelten optischen Systeme (Teleskop, F-Theta, Beobachtungsmodul) gemeinsam mit dem Newson-Scanner kombiniert werden konnten. Der Abweichende Strahlengang erforderte das Einfügen eines weiteren Umlenkspiegels. Abbildung 17 zeigt die drei LOTU<sup>2</sup>S-Systeme (links unten das Teleskop, Mitte Beobachtungsmodul, rechts Newson-Scanner mit F-Theta-Objektiv).

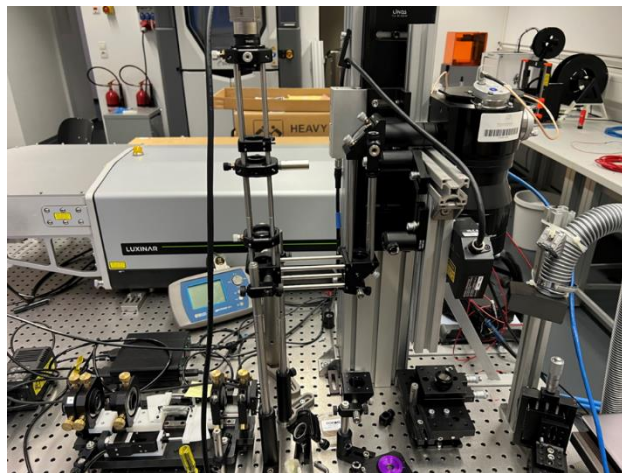


Abbildung 17: LOTU<sup>2</sup>S Beobachtungsoptik gemeinsam mit Strahlaufweiterteleskop, Scanner, F-Theta und Peripherie.

Zur Validierung der Funktionsweise „Laserstrahlbeobachtung“ wurde zunächst der Laserstrahl in der Fokusebene selbst durch eine Strahlkamera aufgenommen. Im nächsten Schritt wurde eine reflektive Probe in der Fokusebene positioniert und das Beobachtungssystem zur Darstellung des Fokuspunktes genutzt. Ein Abstandssensor wurde zur Positionierung und Justage genutzt. Die Gegenüberstellung beider Spot-Aufnahmen ist in Abbildung 18 gezeigt. An dieser Stelle sei vermerkt, dass zum Zeitpunkt der Messung kein idealer Rohstrahl vom Laser ausgegeben wurde und die vorhandenen Deformationen nicht von den Optikmodulen ausgingen. Der Abgleich der Fokusedurchmesser half darüber hinaus, die Linsenabstände des Moduls zu justieren und dessen Abbildungsverhältnis für die C++-Software genau zu bestimmen. Die Messungen belegen die ausgezeichnete Eignung des Moduls für den vorgesehenen Zweck. Hiermit sind abtragende Fokuslagenbestimmungen obsolet und der Strahl kann mit hoher Auflösung abgebildet werden.

Als zweite Funktion des Moduls wurde die Abbildung der Probenoberfläche geprüft. Es wurden zunächst einzelne, feine Linien mit dem UV-Laser abgetragen, welche anschließend abgebildet wurden. Hierbei wurde die Notwendigkeit einer zusätzlichen koaxialen Probenbeleuchtung registriert, sodass eine Lichtquelle in den Strahlengang integriert wurde, welche mittels Transmission durch einen UV-Spiegel eingekoppelte. Abbildung 18 zeigt die stark vergrößerte Abbildung der abgetragenen Linien auf der Substratoberfläche, positioniert in der Fokusebene des F-Theta-Objektivs.

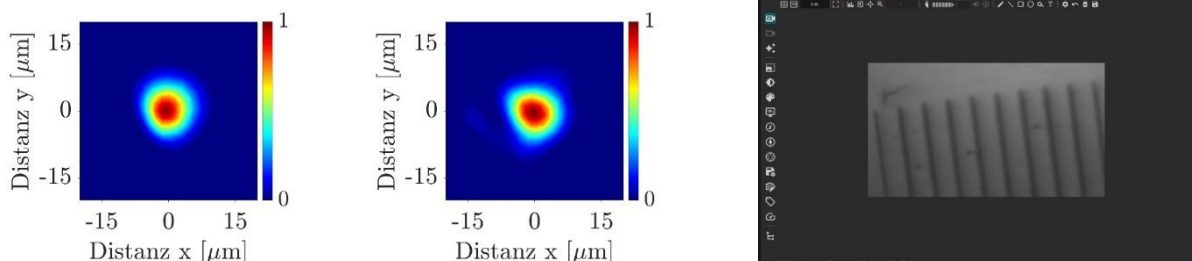


Abbildung 18: Abbildungen des Fokuspunktes vermessen in der Fokusebene (links) und mittels Beobachtungsmodul (Mitte) sowie Abbildung der Substratoberfläche mittels Beobachtungsmodul (rechts).

## **WP4 – UV-Laser-System**

Im Rahmen des WP4 wurde ein UV-UKP-Hochleistungslaser entwickelt, dessen Anforderungen in Absprache mit den Projektpartnern, insbesondere EKSPLA spezifiziert wurden. Die AG alp war hierbei im permanenten Austausch und konnte durch ihr Know-how im Bereich der Lasermaterialbearbeitung aber auch der Konzipierung von Laserbearbeitungsanlagen wertvolle Anforderungen an den Partner.

Das Lasersystem wurde im März 2022 an die AG alp übergeben und in Maschine MM200 integriert. Zur Evaluierung der für die späteren Anwendungen relevanten Parameter wurde der Laser hinsichtlich seiner Strahlgeometrie, -stabilität, Leistungsverhalten bei verschiedenen Repetitionsraten und Pulsteilern, Leistungsverhalten und -stabilität charakterisiert. Dies bildete auch die Grundlage für die in WP2 und WP3 durchgeführten optischen Tests und charakterisierte gleichzeitig die Gesamtanlage (WP5). Darüber hinaus erfolgte ein reger Austausch mit Ekspla zu den relevanten Parametern der Laborumgebung und Lasermaschine MM 200, sodass der Hochleistungslaser darauf angepasst werden konnte.

**Strahlgeometrie- und stabilität:** Für die erste Untersuchung der Laserstrahlquelle wurde die optimierte Wiederholrate von 400 kHz in Versuchen bis zu 300 min angewendet. Abbildung 19 (a) zeigt den Verlauf des Rohstrahls für vier verschiedene Messreihen. Diese Werte dienen im weiteren Verlauf als maximal zu erwartende prozentuale Rohstrahlgrößeninstabilität der Optiken im Langzeitversuch (WP2). Während der ersten Betriebsstunden von ca. 10 h vergrößerte sich der Rohstrahldurchmesser von 1,88 auf 1,97 mm und stabilisierte sich auf diesem Wert. (b) zeigt die relative Winkelabweichung des mittleren Rohstrahlschwerpunktes der jeweiligen Versuche. Die verschiedenen Versuchsreihen zeigen eine maximale Abweichung von  $\pm 17 \mu\text{rad}$ , wobei sich dieses Verhalten ähnlich wie bei der mittleren Rohstrahlgröße mit zunehmender Betriebsdauer auf einen Wert von ca.  $\pm 10 \mu\text{rad}$  stabilisierte.

Die Ekspla-Strahlenquelle ermöglicht eine variable Einstellung der Repetitionsrate. Hinsichtlich des THG-Moduls ist zu beachten, dass die maximale Pulsenergie aufgrund der bestmöglichen Konversionseffizienz nur bei der optimierten Repetitionsrate von 400 kHz zur Verfügung steht. Zudem ist diese Flexibilität nur gegeben, wenn die entstehende Rohstrahlgröße und -geometrie unverändert bleibt, so dass die Strahlaufweitung und der resultierende Fokuspunkt in der Bearbeitungsebene reproduzierbar unverändert bleiben. Abbildung 20 (a) zeigt den effektiven Rohstrahldurchmesser.

Durch Variation der verwendeten Repetitionsrate konnte bei sonst unveränderten Parametern eine Abweichung des resultierenden Strahldurchmessers von bis zu 0,2 mm gegenüber der optimierten Repetitionsrate gezeigt werden. Um eine geringere Repetitionsrate zu erreichen, z.B. bei besonders empfindlichen Materialien, kann der Pulsteiler verwendet werden. Um den Pulsteiler als Dämpfungswerkzeug einsetzen zu können, wurde die Stabilität der verschiedenen Einstellvarianten mit einer diskreten Leistungseinstellung getestet. Abbildung 20 (b) zeigt den Zusammenhang der Pulsteiler 1 - 10 und bestätigt damit die Stabilität der Dämpfungsmethode. Insbesondere bei der Prozessentwicklung und der späteren Übertragung auf höhere Repetitionsraten in Verbindung mit schnelleren Scangeschwindigkeiten bietet diese Stabilität einen großen Vorteil.

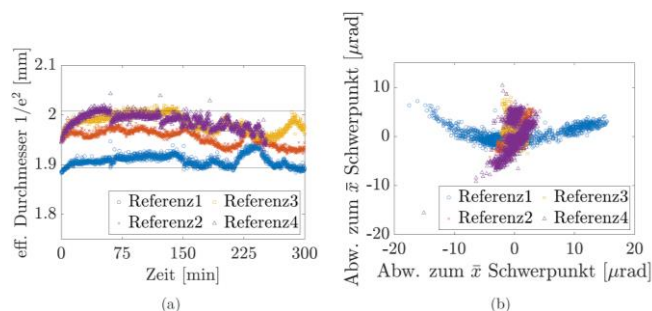


Abbildung 19: Langzeitstabilität des Ekspla-Lasers in Bezug auf (a) den eff. Rohstrahldurchmesser  $1/e^2$  mit eingezeichnet als obere horizontale Linie das 0.975- und der unteren das 0.025-Quantil und (b) die Pointingstabilität bei 100% Leistung

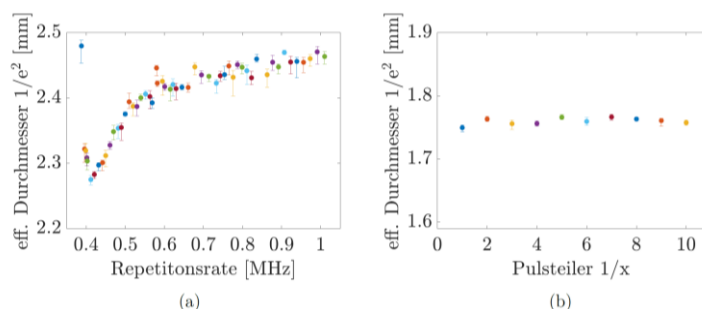


Abbildung 20: Einfluss der (a) Repetitionsrate und (b) des Pulsteilers auf den effektiven Rohstrahldurchmesser.

Im nächsten Schritt wurde der Einfluss der eingestellten prozentualen Pumpleistung (IR) der Strahlungsquelle auf die Stabilität der emittierten UV-Strahlung untersucht. Abbildung 21 zeigt eine Steigerung des effektiven Rohstrahldurchmessers bis hin zu einem Wert von 2,9 mm in der Bearbeitungsebene. Dieses Verhalten konnte an verschiedenen Positionen in der Anlage gezeigt werden, so dass eine zusätzliche negative Beeinflussung der Kollimation z.B. durch den externen Abschwächer als unwahrscheinlich angesehen werden kann. Generell kann mit zunehmendem Abstand zur Laserstrahlquelle und mit steigendem Diodenstrom eine Zunahme des Rohstrahls beobachtet werden. Bei dieser Differenz kann keine Leistungsvariation durch die interne Leistungsdämpfung durchgeführt werden. Unterschiede in der Rohstrahlgröße führen zu einer signifikanten Änderung des Fokusbereichs, weshalb nur diskrete Stufen verwendet werden können, um reproduzierbare Ergebnisse bei der Materialbearbeitung zu erzielen.

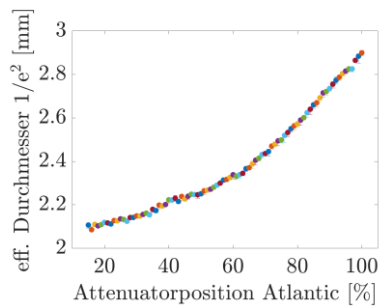


Abbildung 21: Abhängigkeit des eingestellten Diodenstroms auf den effektiven Rohstrahldurchmesser des Ekspla-Lasers

**Leistungsstabilität:** Die mittlere Leistung einer Laseranlage ist ein elementarer Parameter, der prozessabhängig gewählt werden muss. Abbildung 22 zeigt die gemessene Leistungsstabilität über einen Zeitraum von 300 min. In (a) ist ein kurzzeitiger Anstieg bis 42,2 W zu erkennen. Nach diesem Anstieg ist ein abfallendes Verhalten zu erkennen, das sich mit zunehmender Zeit etwas stabilisiert. (b) zeigt die Langzeitstabilität der mittleren Leistung nach 20 Betriebsstunden. Auch hier steigt die mittlere Leistung in den ersten Minuten auf ein höheres Niveau an und fällt vom Maximum aus kontinuierlich über den gesamten Messzeitraum ab. Damit pendelt sich die maximale mittlere Leistung im ersten Betriebsmonat des Lasers jedoch mit einer Abnahme der maximalen mittleren Leistung von  $\approx 42$  W auf  $\approx 40$  W ein und liegt damit etwa 10W über der Spezifikation des damals kommerziell vertriebenen Ekspla Atlantic Lasers. Die Langzeitstabilität liegt sowohl direkt nach der Installation als auch nach einigen Betriebsstunden im spezifizierten Bereich.

Neben der Langzeitstabilität ist auch die Stabilität in kürzeren Ausgabeintervallen notwendig, da die geplanten Prozesse der Lasermikrobearbeitung in der Regel im Bereich von Sekunden bis wenigen Minuten ablaufen. Das bereits in den Langzeitversuchen erkennbare Anlaufverhalten konnte durch kontinuierliche Ausgabe und Simulation eines Hatches (periodisches Gating des Lasers) gemessen werden. Dieses stellt somit eine große Problematik dar, da die gewünschte Performance in Prozessen mit kurzen Prozesszeiten nicht gewährleistet werden kann, so dass diese Thematik weiter untersucht werden musste. Hierzu fand ein reger Austausch mit Ekspla statt.

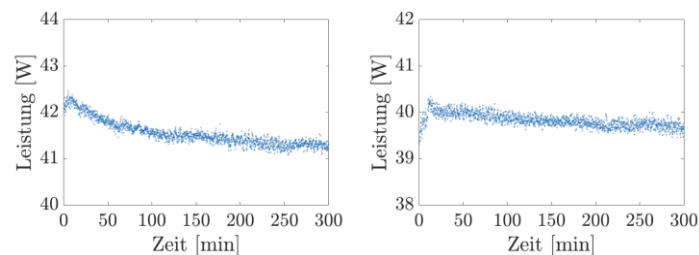


Abbildung 22: Leistungsstabilität des Ekspla-Lasers (a) bei Auslieferung (b) nach 20 Betriebsstunden

Ein Ansatz zur Erklärung dieses Verhaltens ist die temperaturabhängige Konversionseffizienz der THG-Kristalle und damit die abgegebene Leistung. Wird das THG mit hoher Leistung betrieben, führen kleine Temperaturschwankungen der Kristalle zu Leistungsschwankungen. Durch die anteilige Absorption des Lasers und die damit verbundene Erwärmung der Kristalle verändert sich die Konversionseffizienz. Dies erklärt das ansteigende Verhalten bis zur Sättigung. Aufgrund dieses Verhaltens wurden die Starttemperaturen der SHG- und THG-Kristalle in Zusammenarbeit mit dem Hersteller so angepasst werden, dass das Startverhalten bei mittlerer Leistung eliminiert wird. In Zusammenarbeit mit Ekspla konnte via Fernzugriff durch eine Anpassung der Kristalltemperaturen eine Verkürzung der Anlaufzeit von 100 s auf 20 s erreicht werden, allerdings nur mit anschließend abfallendem Verhalten. Ein weiterer

Optimierungsansatz stellte der Austausch der THG-Kristalle dar, um eine geringere Absorption und damit eine geringere Temperaturdrift bei der Übertragung hoher Laserleistungen zu erreichen. Hierzu reiste ein Mitarbeiter von Ekspla zur AG alp nach Deutschland und tauschte vor Ort die Kristalle von SHG und THG aus. Außerdem wurde eine Anpassung ihrer Temperaturen vorgenommen. Abbildung 23 (b) zeigt die daraus resultierende Leistungsstabilität. Die Verwendung der neuen Kristalle zeigte eine Verbesserung des Startverhaltens im Vergleich zur ursprünglichen Konfiguration (vgl. (a)). Der Leistungsanstieg in den ersten 100 s wurde von 10 W auf 6 W reduziert und die maximale mittlere Leistung betrug nach diesem Eingriff ca. 37 W. Obwohl eine Verbesserung erzielt und die Leistungsdrift reduziert werden konnte, stellt dieses Verhalten weiterhin ein Problem dar, insbesondere im Zusammenhang mit der Forschung und der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Aus diesem Grund wurde die Laserquelle Ende 2022 zur Revision an Ekspla übergeben.

Folgend konnte Ekspla die Performanz des Hochleistungslasers verbessern, sodass dieser seitens LIDARIS erfolgreich für LIDT-Versuche eingesetzt werden konnte. Darüber hinaus nutzte Ekspla die im Lotu<sup>2</sup>s-Projekt erlangten Erkenntnisse für die Entwicklung einer weiteren Lasergeneration für die Frequenzverdreifachung von Systemen mit Pulsdauern im Femtosekunden-Regime und konnte so seine Position im Markt festigen. Eine Auslieferung des überarbeiteten UV-Pikosekunden-Lasers an die AG alp war wegen der im Projekt auftretenden Verzögerungen zwar nicht möglich, jedoch konnten für die abschließenden Testungen von Optiken, optischen Baugruppen und Systemen ein alternativer UV-UKP-Laser mit ähnlichen Spezifikationen herangezogen werden.

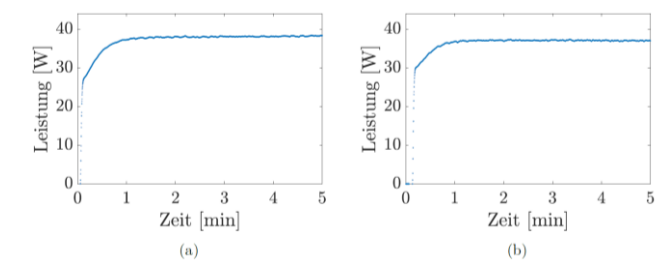


Abbildung 23: Zeitlicher Verlauf der Laserleistung bei Beginn der Ausgabe (a) vor Kristalltausch (b) nach Kristalltausch

## **WP5 – Systemintegration Laser + Optiken**

Im Rahmen des WP5 sollen der in WP4 entwickelte Hochleistungslaser sowie zugehörige Optiken aus WP3 in ein System zur Lasermikromaterialbearbeitung integriert und so den Grundstein für neuartige Prozesse und Materialbearbeitungen legen, welche in WP7 untersucht werden.

### **Konzeption einer Anlage zur UV-UKP-Lasermaterialbearbeitung:**

Ein wesentlicher Aspekt bei der Auslegung einer Laseranlage bestand in der Wahl des galvanometrischen Scanners. Es erfolgte eine genaue Begutachtung der am Markt verfügbaren Scansysteme mit Hinblick auf Präzision, Geschwindigkeit, Möglichkeit eines Optiktasches und Kosten. Hierbei wurde der UV-Scanner der Firma Newson auf Grundlage von Berechnungen hinsichtlich notwendiger Scangeschwindigkeiten für die Umsetzung der Laseranlage ausgewählt (vgl. Tabelle 4: Aus Pulsüberlapp, Fokusdurchmesser und Repetitionsrate resultierende Scangeschwindigkeiten).

Tabelle 4: Aus Pulsüberlapp, Fokusbereich und Repetitionsrate resultierende Scangeschwindigkeiten

Für f=160 mm @ 400 kHz / 1000 kHz			Für f=100 mm @ 400 kHz / 1000 kHz		
Überlapp in %			Überlapp in %		
Fokusbereich [µm] @ Rohstrahldurchmesser [mm]	60	80	Fokusbereich [µm] @ Rohstrahldurchmesser [mm]	60	80
8 µm @ 10 mm	1,6 / 4	0,8 / 2	5 µm @ 10 mm	0,8 / 2	
20 µm @ 4 mm	4,0 / 10	2,0 / 5	12,4 µm @ 4 mm	2,0 / 5,0	
40 µm @ 2 mm	8,0 / 20	4,0 / 10	25 µm @ 2 mm	4,0 / 10,0	2,0 / 5,0

Als Basis für die im Projekt zu entwickelnde Maschine wurde zunächst die in der AG ALP verfügbare „4-Lambda-Anlage“ ausgewählt. Nachdem diese vermessen und so die baulichen Anforderungen an die im Projekt zu entwickelnden optischen Systeme (F-Theta-Objektiv und Teleskop) definiert wurden (vgl. WP 3), musste die Anlage wegen einem über den Bauraum hinausgehenden Footprint der geplanten Systeme verworfen werden. Die Projektpartner einigten sich darauf, zugunsten der Nutzung des zu entwickelnden 163 mm F-Theta-Objektivs auf die in der AG ALP bestehende Anlage OPTEC MM-200 überzugehen. Dort konnte der zu entwickelnde Hochleistungslaser ebenfalls integriert werden und ein größerer Bauraum für die langbrennweitige F-Theta-Linse und deren Arbeitsabstand bestand. Die in Anlage wies die folgenden Spezifikationen auf:

- X-Y-Achssystem zur Probenpositionierung
- Z-Achse zur Scannerhalterung und Einstellen der Fokuslage
- Zum Achssystem synchronisierte Off-axis Kamera
- CAD-basierte Softwareumgebung
- Freier Strahlengang für High Power UV-Laser stand zur Verfügung

Anhand des Footprints des Lasers wurden ein passiv gedämpftes Gestell sowie Breadboard seitlich an die bestehende Anlage MM 200 fixiert. Auf dieser Plattform bestand neben dem Eksma-Laser auch Raum für das von TOPAG zu entwickelnde Zoom-Teleskop und den Attenuator. Der vordere Teil der Plattform wurde unter Beachtung aller Aspekte der Lasersicherheit eingehaust und optisch dicht an die Anlage angebunden. Der Strahlengang wurde, wie in Abbildung 24 dargestellt geplant. Der Laser wurde aufgrund des mit der Gesamtleistung variierenden Rohstrahldurchmessers mit diskreten Einstellungen betrieben werden, so dass extern eine Leistungsabschwächung in Form eines Attenuators realisiert wurde. Mittels Periskops wurde die notwendige Strahlhöhe der Anlage MM200 eingestellt. Da die mit dem 2 mm Rohstrahl des Ekspla-Lasers verbundene hohe Intensität nicht von allen optischen Elementen getragen werden kann, erfolgt die Strahlaufweitung nahe der Laserapertur und das im Projekt entwickelte Teleskop wurde unmittelbar nach dem Periskop platziert. Als Alternative zu dem später gelieferten Zoom-Teleskop aus WP3 wurde der Rohstrahl zum damaligen Projektstand zunächst durch ein zwei-linsiges Galilei-Teleskop aufgeweitet. Auf ein Kepler-Teleskop wurde verzichtet, da eine Fokussierung des Hochleistungslasers in Luft das Strahlprofil negativ beeinflussen könnte. Während Linse 1 (f = -100 mm) fest verbaut wurde, war Linse 2 austauschbar, so dass zwischen zweifacher (f = +200 mm) und dreifacher (f = +300 mm) Aufweitung gewechselt werden konnte. Nach der Aufweitung wurde der Laserstrahl in die MM200-Anlage und gleichzeitig in den UV-Strahlengang des bereits integrierten Pharos-Lasers eingekoppelt, wo über einen schnell schaltbaren Attenuator die Prozessleistung manipuliert werden konnte. Der Strahl wurde durch den im Projekt beschafften Newson UV-Scanner abgelenkt und durch ein telezentrisches F-Theta Objektiv fokussiert. Dieses wurde im späteren Projektverlauf durch das in WP3 gefertigte Objektiv ersetzt. Auch für das von THROL

entwickelte Beobachtungsmodul wurden bereits erste Vorbereitungen getroffen, so dass es über ein Cage-System an der Scannerhalterung befestigt werden konnte.

Die sichere Lasermaterialbearbeitung mit Hochleistungslasern, wie sie im Projekt eingesetzt wurden, erfordert verschiedene technische, organisatorische und persönliche Schutzmaßnahmen. Für den Ekspla-Laser konnte die Eignung des Basissystems MM200 nachgewiesen werden. Interlocksysteme, Warneinrichtungen, Laserschutzfenster etc. waren für Leistung, Wellenlänge, Strahldurchmesser etc. ausreichend klassifiziert. Um die Laserschutzklasse 1 auch für die Erweiterung zu erreichen, musste eine optisch dichte Kapselung realisiert werden (Abbildung 24 (b)). In diesem Zusammenhang wurde ein Modul realisiert, das den Zugang zum Strahlengang und eventuelle Justierungen ermöglicht und alle sicherheitsrelevanten Eigenschaften erfüllt. Der Strahl gelangte dann über einen geschlossenen Strahlengang in die Anlage MM200. Abbildung 25 zeigt den Gesamtaufbau.

Aufgrund der Diskussion, der in AP3 generierten Ergebnisse mit den Projektpartnern wurde ein weiteres Konzept zur Darstellung des Rohstrahls und des Fokuspunktes des Lasers auch bei höheren Leistungen erarbeitet. Vor allem Eksma und Lidaris konnten hier ihr vorhandenes Knowhow einbringen. Es wurde ein kompaktes, modulares System aus Keilplatten, mit dem die weiteren Optiktests durchgeführt wurden. Dies schaffte die Möglichkeit, die Strahlakustik des Lasers in der Fokusebene, ohne die Verwendung von ND-Filtern zu analysieren. Auch die Charakterisierung der Teleskopoptiken etc. in Bezug auf die Leistungseinstellungen des Lasers konnten so unter realen Bedingungen erfolgen.

Beispielhaft ist die Strahlakustik-Messung des Ekspla-Lasers bei einer mittleren Leistung von 3 W bei 400 kHz ohne Rohstrahlaufweitung in Abbildung 26 dargestellt. Es zeigte sich ein runder Fokuspunkt mit einem Durchmesser von  $27 \mu\text{m}$  ( $1/e^2$ ) ohne nennenswerte Deformationen oder Astigmatismus, der sich ideal für die reproduzierbare Lasermikrobearbeitung eignete. Im weiteren Projektverlauf konnte der Fokusbereich durch diskrete Aufweitung des Rohstrahls zunächst mittels eines Galilei-Teleskops, später mit variablem Strahlaufweitungsteleskop verkleinert werden.

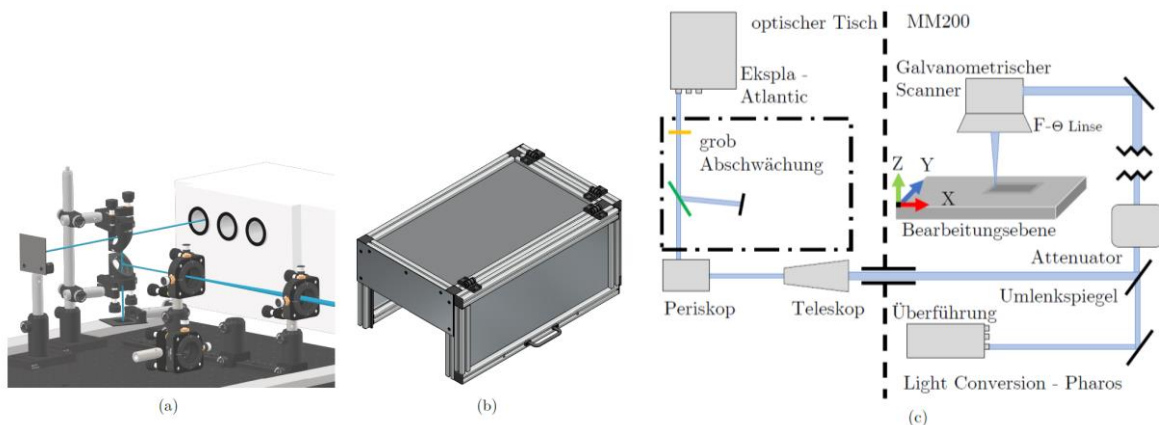


Abbildung 24 (a) Konzeptioneller Aufbau der Erweiterung der MM200 mit der Ekspla UV-Laserstrahlenquelle, dem Periskop zur Angleichung der Bearbeitungshöhe und anschließend dem zweilinsigen Galilei-Teleskop (b) optische Kapselung der Laserstrahlenquelle und des Strahlengangs (c) schematische Darstellung der gesamten Anlage



Abbildung 25: Laseranlage MM200 nach Integration des Ekspla-Lasers mit lasersicherer Kapselung, Galilei-Teleskop, Strahlengang und Bearbeitungsebene mit 3-Achs-System und Strahlablenkung via Galvoscaner.

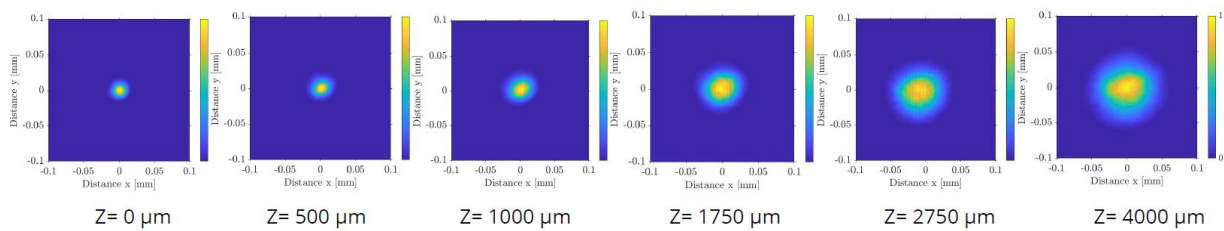


Abbildung 26: Kaustikmessung des Ekspla-Lasers integriert in die Anlage MM200 (2 mm Rohstrahl, 100 mm F-Theta-Objektiv)

### Integration der im Projekt entwickelten optischen Systeme:

Im Rahmen des Projektes sind von den Projektpartnern Throl und Topag verschiedene optische Systeme, wie ein flexibles Zoom-Teleskop zur Strahlaufweitung, Beobachtungsoptik oder F-Theta-Objektiv entwickelt und gemeinsam mit dem Partner Eksma zur Anwendung neuartiger Substrat- und Beschichtungstechnologie gefertigt worden. Die Integration wurde im Rahmen der Validierung durchgeführt und ist daher im Rahmen der Beschreibung von WP3 „optische Komponenten“ dieses Berichtes sowie den Berichten der Projektpartner aufgeführt. Beispielhaft sei an dieser Stelle die Position des Zoom-teleskopes in die Erweiterung der Anlage „MM200“ in Abbildung 27 dargestellt.

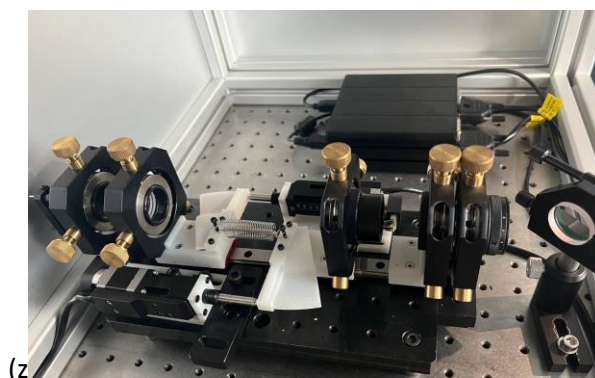


Abbildung 27: LOTU<sup>2</sup>S-Strahlaufweiterteleskop sowie Steuerungsmodul integriert in die Anlage zur Lasermaterialbearbeitung der MM200-Erweiterung.

## WP6 – UV-Laser-Applikationen

Im Rahmen des 6. Arbeitspaketes wurden das innerhalb des Projektes entwickelte Lasermaterialbearbeitungssystem für verschiedene Materialien getestet. Federführend war hier die AG alp, die im permanenten Austausch mit den Projektpartnern stand. Ziel war, die Laser-Material-Wechselwirkung der hochenergetischen Laserpulse grundlegend zu erforschen und applikationsrelevante Prozesse wie Abtragen, Schneiden oder Bohren zu untersuchen. Neben der Entwicklung von Prozessparametern wurden Anforderungen an die optischen Systeme wie Spiegel, Objektiv oder Teleskop gegeben. Wenngleich der AG alp nicht dauerhaft ein ultrakurzgepulster UV-Hochleistungslaser von EKSPLA zur Verfügung stand, war es dennoch möglich Untersuchungen mit dem verfügbaren UV-UKP-Laser Pharos (im späteren Verlauf auch Carbide) durchzuführen, um Materialien für zukünftige Applikationen zu favorisieren und Bearbeitungsansätze für den Hochleistungslaser zu validieren. Die dritte Harmonische des Lasers wurde, in den innerhalb des WP5 etablierten UV-Strahlengang der Maschine MM200 (später auch WSMH), integriert. Der Aufbau der Anlage ist in Abbildung 28 dargestellt.

Aufgrund ihrer Absorptionseigenschaften und Bandlücken, dem Bedarf neuartiger Bearbeitungsmethoden für industrielle Applikationen sowie auf Basis von Vorstudien und Recherchen zum Stand der Technik wurden zur Bearbeitung die folgenden Materialien gewählt: So konnten verschiedene Materialklassen (Gläser, Polymere, Keramiken, Verbundmaterialien und Metalle) abgebildet werden.

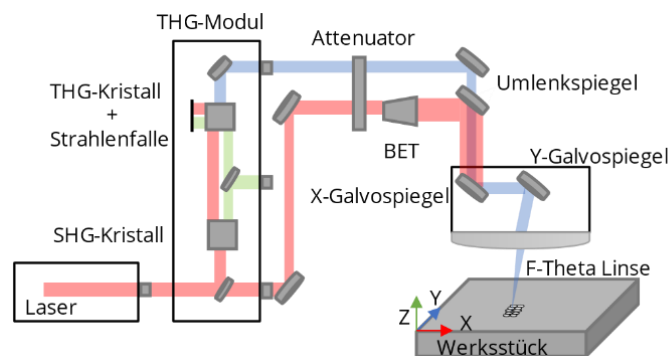


Abbildung 28: Schematischer Aufbau der MM200 mit integrierter dritter Harmonischen des Pharos Lasers

### **Zusammenfassung:**

Aus den durchgeführten Untersuchungen der verschiedenen Materialklassen und Applikationen konnte eine hohe Eignung des zu entwickelnden ultravioletten Hochleistungslasers und eine Vielzahl von Vorteilen für die Verwendung solcher Systeme gegenüber Infrarotlasern gefunden werden. Diese basieren neben den Vorteilen der Strahlpropagation auf der veränderten Laser-Material-Wechselwirkung, welche Qualitäts- und Effizienzsteigerungen für zukünftige industrielle Prozesse versprechen. Die Ergebnisse an dieser Stelle zusammengefasst und anschließend detailliert aufgeführt. Für weitere Ergebnisse sei an dieser Stelle, auf die in WP7 aufgeführten Publikationen verwiesen.

Cyclo Olefin-Copolymer:

- Hohe Abtragseffizienz bei verbesserter Qualität
- Steigerung der Abtragsrate durch Defokussieren

Quarzglas:

- Hohe Abtragseffizienz bei niedrigerer Oberflächenrauheit

- Signifikant verbesserte Kantenqualität
- Steigerung der Abtragsrate durch Defokussieren

#### Aluminiumoxid:

- Hohe Abtragseffizienz bei niedrigerer Oberflächenrauheit
- Verbesserte Kantenqualität

#### Siliziumkarbid:

- Geringere Abtragsraten als bei IR, da UV Abplatzen der Substratoberfläche unterdrückt
- niedrigerer Oberflächenrauheit und signifikant verbesserte Kantenqualität
- Reduzierte Oxidbildung
- Erzeugung von LIPSS

#### Galliumarsenid

- Geringere Abtragsraten als bei IR, da UV Abplatzen der Substratoberfläche unterdrückt
- niedrigerer Oberflächenrauheit und signifikant verbesserte Kantenqualität
- Erzeugung von LIPSS und CLP mit hoher Qualität

#### Saphir (Drehprozess)

- Erniedrigung der Abtragsschwelle durch UV
- Verjüngung von Saphirfasern durch tangenciales Laserdrehen im UV

#### PMMA (Drehprozess)

- Niedrigere Rauheiten der resultierenden Oberflächen
- Höhere Kantensteilheit
- Niedrigere Spitzenqualität
- Vergilbung an Flanken

#### ABF-Leiterplatten (Bohren)

- Effiziente Erzeugung von Durchgangsbohren hoher Qualität
- Prozessverbesserung durch MHz-Burst und Top-Hat-Strahlformung im UV

#### Reduktives Lasersintern von Kupfersalz-Präkursoren

- Homogene Kupferlinien mit dem UV-UKP-Laser erzeugbar
- Vergrößerung des Parameterraums und Prozessbeschleunigung mit UV gegenüber IR und VIS

#### Edelstahl

- Nach Vorversuchen verworfen, da unterlegene Abtragsraten

Die Vorteile in der Verwendung von ultravioletten UKP-Lasern lassen sich neben der Strahlkaustik durch die veränderte Materialwechselwirkung der hochenergetischen Photonen begründen. Die untersuchten Materialien bedürfen aufgrund ihrer Bandlücke bei der Bearbeitung eine Multiphotonenabsorption. Bei der dreifachen Photonenenergie im UV wird die Absorption hin zur linearen oder Zweiphotonenabsorption verschoben. Somit vergrößert sich die Wahrscheinlichkeit für jedes Photon, an einer photochemischen Absorption, die zur Degeneration bzw. Sublimation des Materials führt, teilzunehmen und weniger Photonen nehmen an photothermischen Prozessen teil. Demnach wird Material effizienter abgetragen und es kommt zu weniger Wärmeeintrag in das Material, was sich qualitätssteigernd auswirkt.

Neben der höheren Qualität und Effizienz des Abtrags mit dem UV-Laser muss auch die Prozesssteuerung im Hinblick auf industrielle Prozesse und Bearbeitungssysteme diskutiert werden. Der Prozess mit dem IR-Laser ist aufgrund der höheren Anzahl der notwendigen Fokussachführungen komplexer. Die Ablation mit einem UV-Laser ist flexibler und robuster. Durch die größere Bearbeitungsreichweite kann die Dicke der Substrate über einen größeren Bereich variiert, tiefer abgetragen oder eine größere Positionstoleranz erreicht werden. Außerdem ist die Prozesserstellung einfacher, da die Positionierung des Substrats eine größere Toleranz aufweist. Außerdem steigen die Kosten für eine industrielle Maschine mit zunehmender Positioniergenauigkeit rapide an. Es muss jedoch beachtet werden, dass ein THG-Modul Kosten verursacht und UV-Optiken begrenzte Lebensdauer haben. Dieser Nachteil kann durch die im LOTU<sup>2</sup>S-Projekt entwickelten Herstellungstechnologien minimiert werden.

### Methodik zur Durchführung vergleichender Abtragsstudien:

Um die Vorteile der Verwendung ultravioletter Laser zu demonstrieren, ist ein Vergleich zur fundamentalen, infraroten Wellenlänge eine zielführende Herangehensweise. Um Querbeeinflussungen wie abweichende Fokussachmesser o.ä. zu vermeiden, wurde ein komplexer optischer Aufbau realisiert, indem mittels Strahlaufweitung der Fokussachmesser des infraroten Lasers so genau wie möglich auf den Wert des UV-Strahls eingestellt wurde (vgl. Abbildung 28). Somit ergaben sich für beide Wellenlängen Fokussachmesser von etwa 15 µm ( $1/e^2$ ). Diese Methodik hebt sich in seiner Komplexität und notwendigem experimentellem Aufwand stark vom Stand der Literatur ab, verspricht aber beste Voraussetzungen für einen Vergleich der beiden Wellenlängen.

Für die Untersuchungen wurden unter den verschiedenen Bedingungen Kavitäten erzeugt, indem jeweils eine Fläche von 1 mm<sup>2</sup> mittels 10 schraffierenden Überfahrten (jeweils um 100° in Bezug auf die vorherige Überfahrt gedreht) abgetragen (vgl. Abbildung 29). Eine dynamische Fokussachführung wurde bei Bedarf angewandt. Die Scangeschwindigkeit und der Hatchabstand wurde jeweils aus 65 % Pulsüberlapp berechnet, die Leistungen wurden zwischen 5 und 100 % variiert. Die Analyse von Qualität, Abtragtiefe und Oberflächenrauheiten der so entstandenen Kavitäten wurde mittels optischen Mikroskops, Laser-Scanning- und Rasterelektronen-Mikroskop durchgeführt.

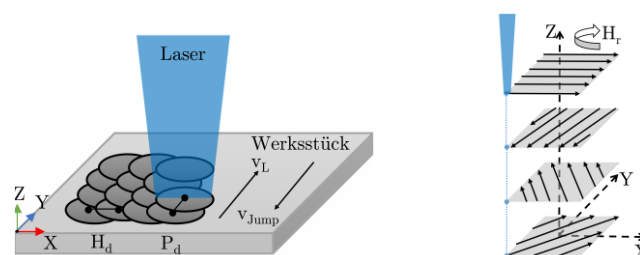


Abbildung 29: Links: Schematische Darstellung des Laserabtrags. Rechts: Darstellung der Hatchrotation und Fokussachführung

### Cyclo-olefin-Copolymer:

Bei der Bearbeitung des technischen Polymers COC zeigen sich große Vorteile in der Bearbeitung mit ultrakurzen Laserpuls ultravioletter Wellenlänge. Wie in Abbildung 30 gezeigt, sind sowohl die Abtragtiefe pro Überfahrt als auch die Abtragungseffizienzen der dritten Harmonischen dem Abtrag in IR überlegen. Niedrige Flächenrauheiten im Bereich von 1 µm können mit dem UV-Laser bei deutlich tieferen und zugleich effizienteren Abträgen erreicht werden als dies bei IR der Fall. Zudem ist bei der

Prozessierung mit IR bei solch tiefen Abträgen eine stetige Nachfokussierung nötig, während mit UV und der somit dreifachen Rayleighlänge auf eine Nachfokussierung verzichtet werden kann.

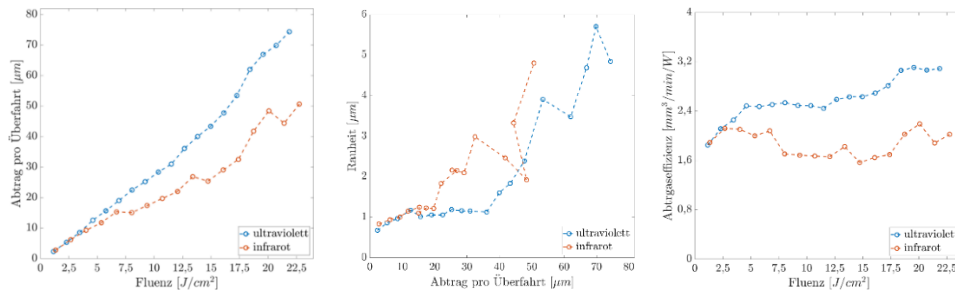


Abbildung 30: Vergleich Abtrag mit UV und IR; links: Abtrag/Überfahrt; Mitte: resultierende Rauheit; rechts: Abtrags-effizienzen.

Auch die Analysen durch das REM zeigen die Vorteile des UV-Lasers anhand der ausgebildeten Topografien. So bilden sich innerhalb der Kavität beim UV-Laser feinere Strukturen bei tieferen Abträgen und guter Kantenqualität sowie wenig Ablagerungen. Neben dem Vergleich der Wellenlängen in Abbildung 31 wird in Abbildung 32 die Veränderung der Oberflächenstruktur mit steigender Fluenz gezeigt. Hiermit kann der Verlauf der Rauheit aus Abbildung 30 gut nachvollzogen werden. Zunächst entsteht bei einer niedrigen Fluenz eine feine, jedoch schroffe Struktur, welche durch steigende Fluenz durch leichte Verschmelzung geglättet wird, sodass die Rauheit leicht sinkt. Erst bei weiterer Steigerung der Fluenz beginnt die Ausbildung von Gräben bis bei maximaler Fluenz großflächige Verschmelzungen stattfinden.

Wird der Fokusbereich von 15 auf 30  $\mu m$  vergrößert, zeigen sich die in Abbildung 33 dargestellten Abtragswerte. Die Abtragtiefe pro Überfahrt ist beim fokussierten Abtrag etwas höher, während die Oberflächenrauheit sich im gleichen Regime bewegt. Beim Vergleich der Abtragsrate zeigt sich die enorme Prozessbeschleunigung durch das Vergrößern des Fokusbereichs um bis zu 60 %.

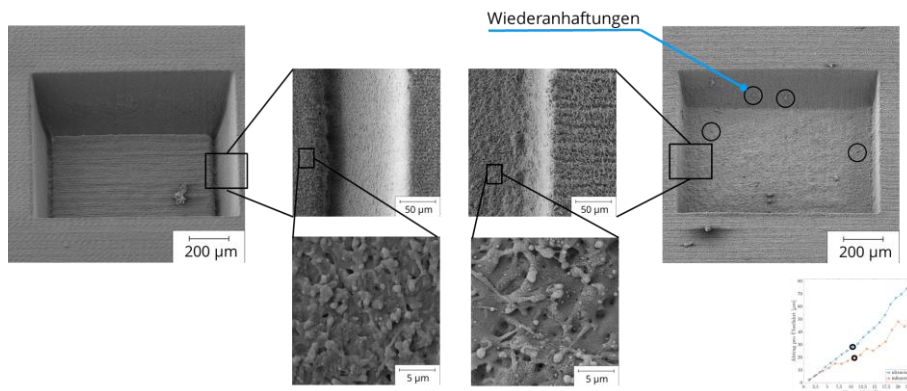


Abbildung 31: REM-Analyse der COC-Abträge mit dritter (links) und erster Harmonischen (rechts)

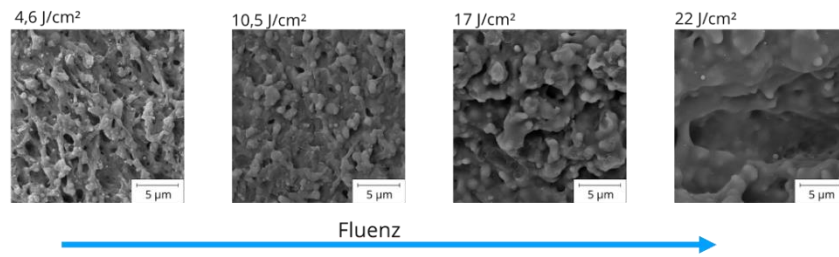


Abbildung 32: REM-Analyse der COC Abträge bei steigender Fluenz

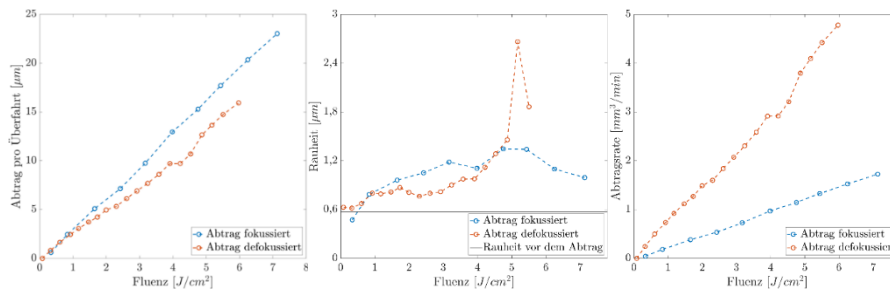


Abbildung 33: Vergleich Abtrag von COC mit UV fokussiert (15 µm Spot) und defokussiert (30 µm Spot); links: Abtrag/Überfahrt; Mitte: resultierende Rauheit; rechts: Abtragsrate.

Die mit dem UV-Laser erzeugten Kavitäten weisen keinerlei Aufwürfe oder starke Debris-Anhaftungen auf, wie sie bei der COC-Bearbeitung mit einem CO<sub>2</sub>-Laser beobachtet wurden. Ebenso existieren keine blasenartigen Formationen oder Verschmelzungen, wie sie bei der Verwendung von NIR-Nanosekundenlasern beobachtet wurden. Obwohl in den Experimenten von Wang et al. mit einem Ti:Sa-Laser eine deutlich geringere Repetitionsrate verwendet wird, liegt die gemessene Rauheit (1 µm bis 2,5 µm) im unteren Fluenzbereich in einem ähnlichen Bereich wie in den hier dargestellten Ergebnissen. Obwohl die Experimente von Suriano et al. mit kürzeren Laserpulsen (40 fs) und einer niedrigeren Wiederholrate niedrigere resultierende Rauheiten (<0,2 µm) zeigten, übersteigen die von uns gezeigten Abtragsraten die dort gezeigten Werte um ein Vielfaches.

Der Einfluss kürzerer Wellenlängen auf die Ablationsschwelle, die Ablationsrate und die Qualität wurde bereits früher für transparente Polymere gezeigt und diskutiert. Ursachen für den Vorteil des UV-Laser liegen darin, dass die höhere Photonenenergie bei kürzeren Wellenlängen entweder bereits zu einem direkten Aufbrechen der Polymerbindung (photochemische Prozesse) führen kann oder den Absorptionsprozess von der Mehrphotonen- zur Zwei-Photonen-Absorption verschiebt. Die Versuche an COC belegen die zahlreichen Vorteile des UV-Lasers hinsichtlich Qualität, Prozessstabilität, Quantität und Effizienz. Auch der Einsatz eines verstärkten UKP-Lasers mit hoher Repetitionsrate beschleunigt die Materialbearbeitung, die oftmals mit Excimer- oder Ti:Sa-Lasern durchgeführt wird, stark. Zugleich werden höhere Qualitäten erreicht als beispielsweise mit CO<sub>2</sub>- oder UV-Nanosekundenlasern.

Die hervorragenden Ergebnisse bei der Verarbeitung des biokompatiblen Polymers motivierten hier, bereits eine Anwendung in Form einer komplexen mikrofluidischen Struktur - dem Teslamischer - zu demonstrieren. Limitierende Faktoren bei der Herstellung solcher Strukturen sind die hohen Anforderungen an den Fertigungsprozess aufgrund der geringen Strukturgrößen. Die Laserbearbeitung bietet vor allem aufgrund ihrer Flexibilität und der hohen möglichen Strukturgenauigkeit einen vielversprechenden Ansatz. Abbildung 34 zeigt das resultierende Höhenprofil der Struktur, Einlässe der beiden zu mischenden Fluide, die Mischstruktur und eine vergrößerte und geneigte Ansicht.

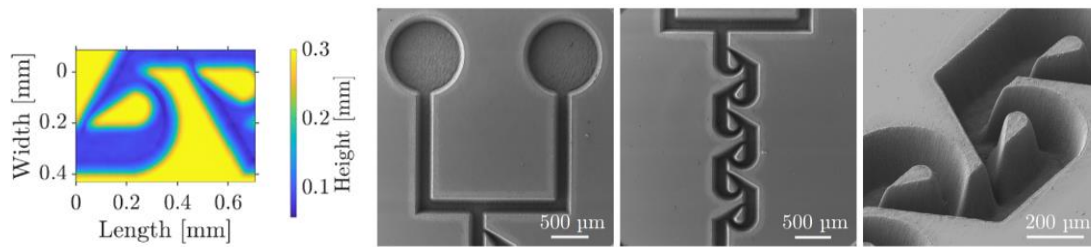


Abbildung 34 REM-Aufnahmen der mit dem UV-UKP-Laser hergestellten Mikrofluidik auf COC mit Teslamischer.

### Quarzglas:

Beim Prozessieren von Quarzglas konnten ebenfalls Vorteile der UV-Laserbearbeitung demonstriert werden. Wie Abbildung 35 zeigt, findet im Bereich höherer Fluenzen ein größerer Abtrag pro Überfahrt statt. Die Flächenrauheit der resultierenden Oberflächen ist geringer als bei der Bearbeitung mit IR. Wird die Abtragseffizienz untersucht, so zeigt sich beim IR zwar im Bereich niedriger Fluenzen ein Maximum, jedoch fällt die Effizienz mit steigender Fluenz immer weiter ab. Beim UV-Laser hingegen überschreitet die Effizienz im Bereich hoher Fluenzen die Ergebnisse des IR-Lasers und steigt weiter an.

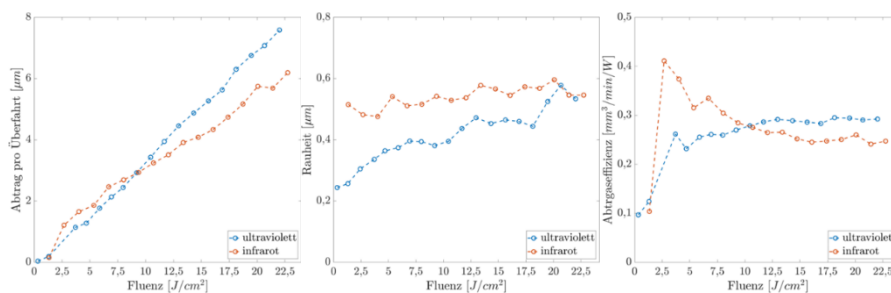


Abbildung 35: Vergleich Abtrag von COC mit UV und IR; links: Abtrag/Überfahrt; Mitte: resultierende Rauheit; rechts: Abtragseffizienzen.

Die Analysen am REM zeigen ebenfalls, dass unter der Bestrahlung mit der dritten Harmonischen qualitativ hochwertigere und feinere Oberflächen entstehen (vgl. Abbildung 36). Es werden steile Flanken, hohe Formtreue und kaum Debris vorgefunden. Das Chipping, welches beim IR in einem weiten Fluenzbereich auftritt, bleibt beim UV-Abtrag gänzlich aus. Das Defokussieren hat beim Quarzglas ähnliche Effekte, wie beim COC (vgl. Abbildung 37). Hier gleichen sich Abtragstiefe und Rauheiten, während die Abtragsrate stark steigt.

Da es sich bei Glas ebenfalls um einen für mikrofluidische Anwendungen prominenten Werkstoff handelt, wurde hier ebenfalls erfolgreich ein Teslamischer mit höchster Präzision produziert werden. REM-Aufnahmen der Strukturen sind in Abbildung 38 dargestellt.

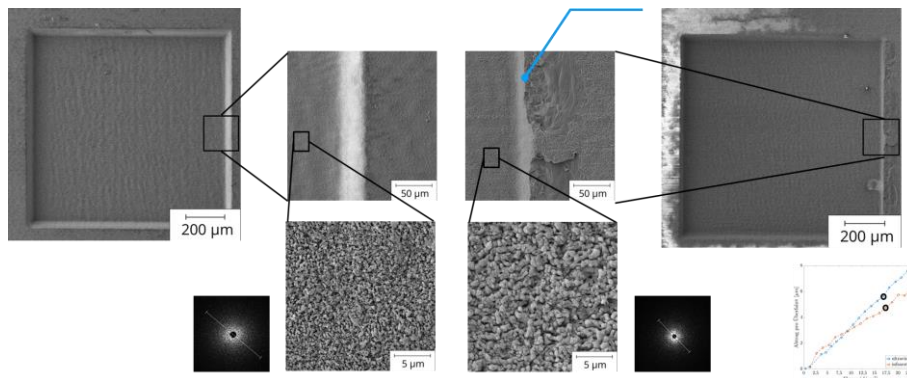


Abbildung 36: REM-Analyse der Quarzglas-Abträge mit dritter (links) und erster Harmonischen (rechts)

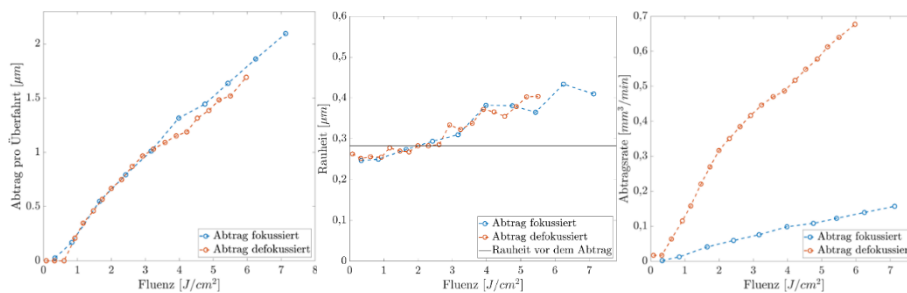


Abbildung 37: Vergleich Abtrag von Quarzglas mit UV fokussiert (15 μm Spot) und defokussiert (30 μm Spot); links: Abtrag/Überfahrt; Mitte: resultierende Rauheit; rechts: Abtragsrate.

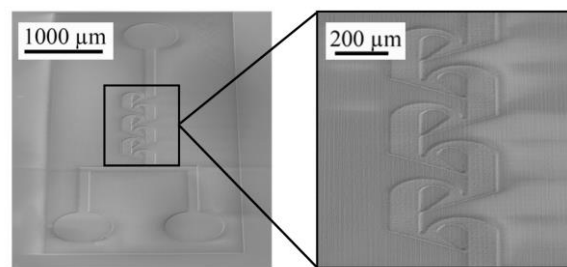


Abbildung 38: Mittels UV-UKP-Laser ablatierter Teslamischer auf Quarzglas.

### Aluminiumoxid:

Als Vertreter einer weiteren Materialklasse wurde die Keramik Aluminiumoxid bearbeitet. Hier zeigt sich sowohl bei der Abtragtiefe pro Überfahrt als auch bei resultierenden Rauheiten und Abtragseffizienzen ein nahezu identisches Bild, wie bei bereits bei Glas (vgl. Abbildung 39). Die REM-Analyse zeigt Vorteile der UV-Bearbeitung hinsichtlich Kanten- und Flankenqualität, allerdings entstanden teilweise Ausplatzungen, welche jedoch auch von der Korngröße des Substrates abhängen (vgl. Abbildung 40). Auch aus der Verwendung eines größeren Fokusspots resultieren keinerlei qualitative Nachteile, während die Abtragsrate erneut stark gesteigert werden kann.

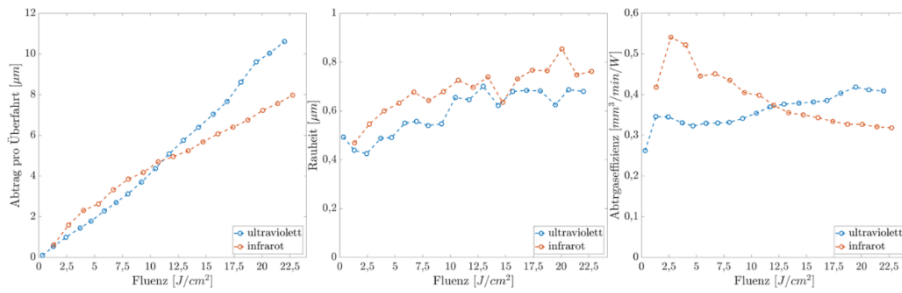


Abbildung 39: Vergleich Abtrag von Aluminiumoxid mit UV und IR; links: Abtrag/Überfahrt; Mitte: resultierende Rauheit; rechts: Abtragseffizienzen

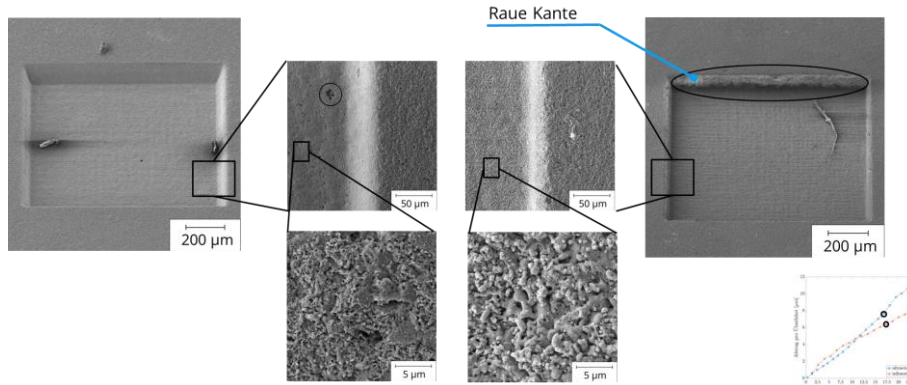


Abbildung 40: REM-Analyse der Aluminiumoxid-Abträge mit dritter (links) und erster Harmonischen (rechts)

### Siliziumkarbid:

Als Vertreter der Halbleiter wurde Siliziumkarbid untersucht, welches aufgrund seiner hohen Härte und Sprödigkeit nur bedingt durch etablierte mechanische Verfahren zu bearbeiten ist. Abbildung 41 zeigt den Abtrag pro Überfahrt, resultierende mittlere Oberflächenrauheiten sowie die kalkultierten Abtragseffizienzen für die beiden Wellenlängen IR und UV (mit 14,5 und 11,5 µm Spotdurchmesser).

Für einen weiten Fluenzbereich sind die Abtragstiefen sowie resultierenden Rauheiten aller drei Versuchsbedingungen nahezu identisch. Die resultierende Rauheit der mittels UV-Laser ablatierten Flächen unterschreitet die bei der Infrarot-Ablation im unteren Fluenzbereich. Ab einer Fluenz von etwa 10 J/cm² verändert sich das Verhalten des IR-Abtrages stark. Während die Abtragstiefen und Rauheiten bei der UV-Bearbeitung dem bisherigen Trend folgen, ist beim IR ein starker Anstieg der Abtragstiefe sowie Rauheit festzustellen, was mit einem Anstieg der Abtragseffizienz einhergeht. Morphologische Untersuchungen mittels REM liefern eine Erklärung für dieses Verhalten. Abbildung 42 zeigt die resultierenden Kavitäten für verschiedene Fluenzen beim Abtrag mit der dritten Harmonischen des Lasers und der IR-Abtrag ist in Abbildung 43 dargestellt.

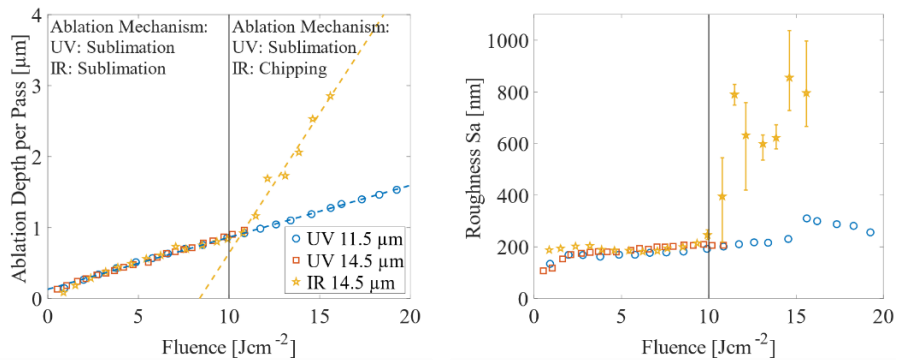


Abbildung 41: Abtrag von Siliziumkarbid mit dem IR- und UV-Laser. Links: Abtragtiefe pro Überfahrt; rechts: resultierende Oberflächenrauheit.

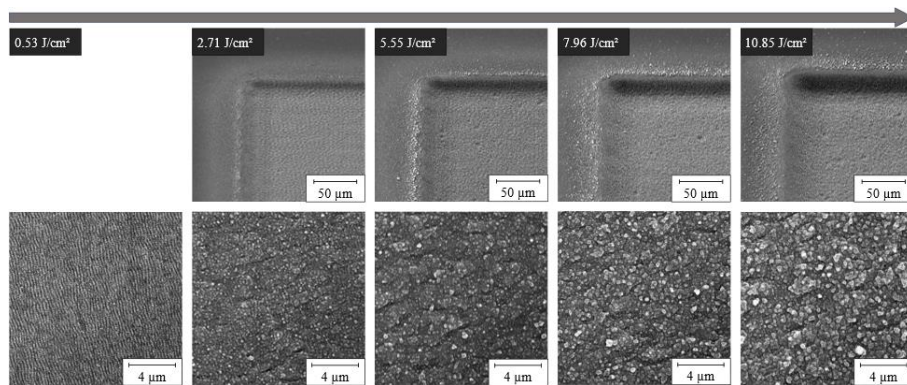


Abbildung 42: Morphologie der abgetragenen Kavitäten bei der Bearbeitung im UV für verschiedene Fluenzen

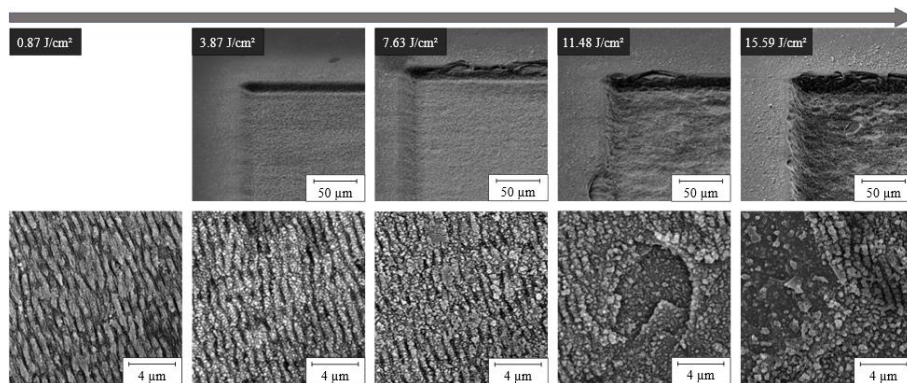


Abbildung 43: Morphologie der abgetragenen Kavitäten bei der Bearbeitung im IR für verschiedene Fluenzen

Im niedrigen Fluenzregime entstehen für beide Wellenlängen Laserinduzierte Periodische Oberflächenstrukturen (LIPSS). Die Periodizität wurde für UV mit 280 nm und für IR mit 760 nm bestimmt. Wird die Fluenz weiter gesteigert, so ist ab einer Fluenz von etwa 7,6 J/cm<sup>2</sup> eine drastische Morphologieveränderung bei den IR-bearbeiteten Kavitäten zu identifizieren. Ein starkes Abplatzen des Materials findet sowohl an den Kanten als auch am Boden der Kavitäten statt. Während der Abtragsmechanismus für Fluenzen unterhalb der kritischen Fluenz auf einer Sublimation beruht, dominiert bei der IR-Bearbeitung nach Überschreiten der Fluenz ein Abplatzen. Durch das Abplatzen dieser Bruchstücke erhöht sich das Abtragsvolumen drastisch, was zu effizienteren Prozessen im IR führt. Zugleich leidet die Qualität der resultierenden Kavitäten stark sowohl hinsichtlich Formtreue als auch Rauheiten. Beim UV hingegen findet ein Abtrag durch Sublimation statt und es werden präzise

Kanten und glatte Oberflächen vorgefunden. EDX-Messungen zeigen, dass der Sauerstoffanteil in der nach dem Abtrag resultierenden Oberfläche bei der Bearbeitung mit IR im Vergleich zum UV erhöht ist. Das Siliziumcarbid oxidiert zu Siliziumdioxid, welches in Form von Schuppen abplatzt. Diese Behauptung wird durch ein EDX-Mapping an einem solchem Bereich untermauert, da dort kaum Sauerstoff detektiert werden kann. Es wird davon ausgegangen, dass durch die im UV niedrigere optische Eindringtiefe eine oberflächennähere und geringere Oxidation stattfindet. IR-Strahlung kann die oberflächliche „Glasschicht“ transmittieren, koppelt erst im darunterliegenden Siliziumkarbid ein und es kommt zum Abplatzen des darüber liegenden Glases.

Motiviert von der ausgezeichneten Abtrags- und Kantenqualitäten, welche sich bei der Materialbearbeitung mit dem UV-Laser ergeben, wurde analog zu den Materialien Glas und COC eine Mikrofluidik in Form eines komplexen Teslamischers ablatiert. Wie Abbildung 44 zeigt, kann eine solche Struktur mit höchster Güte und Präzision und ohne jegliche Abplatzungen hergestellt werden.

In Anbetracht der hier erlangten Ergebnisse muss die Wahl der Laserwellenlänge bei der Bearbeitung von Siliziumkarbid in Abhängigkeit der Applikation erfolgen. Insofern das Abplatzen des Materials und höhere Rauheiten akzeptabel sind, wie etwa beim Schneiden kann der Prozess mit der ersten Harmonischen des Lasers deutlich effizienter durchgeführt werden, sodass auf die Investition in ein THG-Modul und UV-Optiken verzichtet werden kann. Höchsten Ansprüchen an Formtreue, Qualität, geringen Oxidationsgrad und Prozessstabilität genügt jedoch nur der UV-Laser.

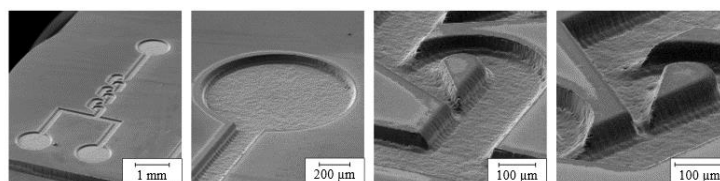


Abbildung 44: Mittels UV-UKP-Laser ablatierter Teslamischer auf Siliziumkarbid.

#### Galliumarsenid:

Galliumarsenid wurde als weiteres Material untersucht, welches wegen seiner exzellenten Elektronenmobilität und Durchschlagfestigkeit immer mehr im Bereich der Halbleiterbauelemente Einzug hält. Analog zu den Versuchen mit Siliziumkarbid werden Abtragstiefen, Rauheiten, Kantenqualität, Effizienz und Morphologie gegenübergestellt. Die Messdaten sind in Abbildung 45 dargestellt, die Morphologie wurde mittels REM untersucht und ist in Abbildung 46 für beide Wellenlängen dargestellt. Es zeigt für beide Wellenlängen ein mit steigender Fluenz linearer Verlauf der resultierenden Abtragstiefen, der jedoch mit dem Infraroten Laser deutlich stärker ansteigt. Hinsichtlich der resultierenden Rauheiten wird ab einer Schwellfluenz von etwa  $2 \text{ J/cm}^2$  eine starke Schwankung bei der IR-Bearbeitung registriert, während bei der Bearbeitung im UV reproduzierbare Abtragsergebnisse über einen weiten Fluenzbereich erhalten werden.

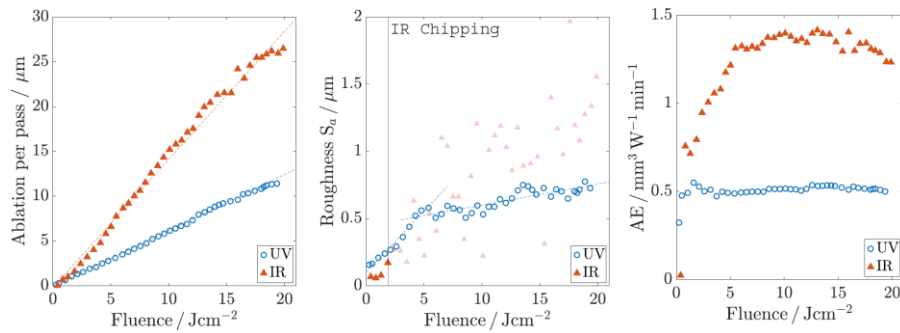


Abbildung 45: Vergleich Abtrag von Galliumarsenid mit UV und IR; links: Abtrag/Überfahrt; Mitte: resultierende Rauheit; rechts: Abtrageffizienzen.

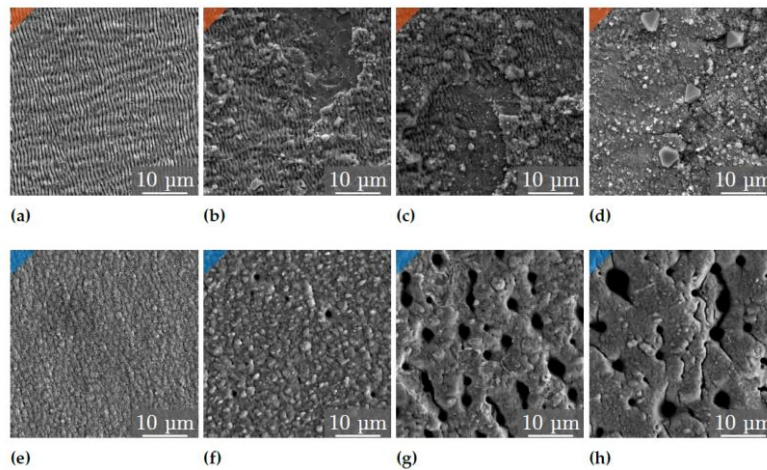


Abbildung 46: Resultierende Oberflächen nach Laserabtrag mit infrarotem (a-d) und ultraviolettem (e-h) Laser bei steigender Fluenz v.l.n.r.

Die REM-Aufnahmen zeigen bei der Bearbeitung mit IR das Abplatzungen, wie sie beim Siliziumkarbid vorkommen, während beim UV Ansätze von CLP-Strukturen erscheinen. Maßgebliche Qualitätsunterschiede zeigen sich beim Vergleich der Kantenqualitäten. In Abbildung 47 werden die Kavitäten des UV-Abtrages (a) mit den IR-Kavitäten verglichen, welche entweder die gleiche Abtragstiefe aufweisen (b) oder mit gleicher Fluenz (c) erzeugt wurden. Während die Kanten der UV-Kavität hohe Qualität aufweisen, zeigen die mit dem IR-Laser ablatierten Strukturen starke Qualitätsverluste wie auch im Zusammenhang mit Siliziumcarbid beobachtet und erklärbar.

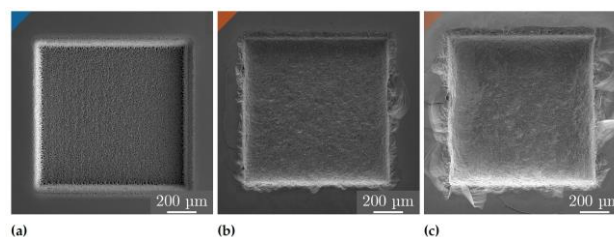


Abbildung 47: Vergleich der Kantenqualitäten von abgetragenen Kavitäten: (a) UV-Ablation mit  $19,3 \text{ Jcm}^{-2}$ , (b) IR mit gleicher Ablationstiefe, (c) IR mit gleicher Fluenz.

Um die Präzision der Strukturierung von Galliumarsenid mittels UV-UKP-Laser zu demonstrieren, wurde das Logo der Arbeitsgruppe ALP im stark miniaturisiertem Maßstab abgetragen und wie in Abbildung 48 dargestellt mittels REM und LSM inspiziert. Durch Wahl einer geringen Fluenz konnte das Auftreten von Mikro-Löchern auf ein Minimum reduziert werden.

Die beim UV-Abtrag beobachteten Löcher werden als Vorstufe von kegelförmigen CLPs gewertet, einer Struktur, die mittels „light trapping“ die Absorptionseigenschaften einer Oberfläche erhöht und im Kontext von Silizium-basierten Solarzellen eine Effizienzsteigerung erwirken kann. Da diese Strukturen sich vor allem bei einem erhöhten Pulsüberlapp (größerer Anzahl Pulsen pro Stelle) ausbilden, wurden mit dem UV-Laser Versuche mit geringen Scangeschwindigkeiten durchgeführt. Bei einer niedrigen Fluenz von  $0,8 \text{ J/cm}^2$  konnten je nach Anzahl der akkumulierten Pulse homogen verteilte Kegelstrukturen unterschiedlicher Strukturgrößen erzeugt werden, wie Abbildung 49 zeigt. Die bearbeiteten Galliumarsenidflächen zeigen ein tiefschwarzes Erscheinungsbild, was die Wirkung der periodischen Mikrostrukturen beweist.

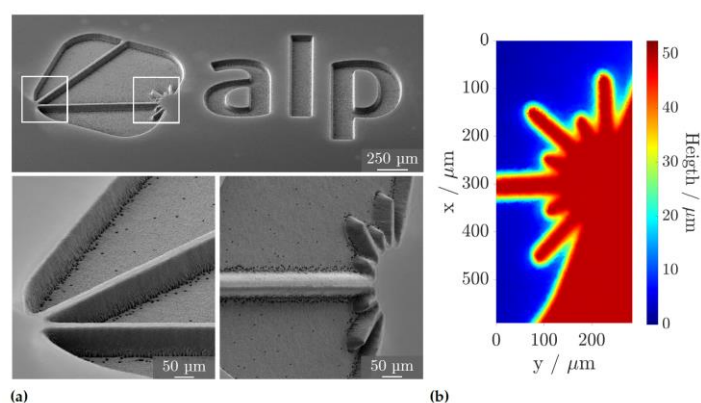


Abbildung 48: (a): REM-Aufnahmen des UV-abgetragenen Alp-Logos. (b) Visualisierung der Struktur als 3D-Plot.

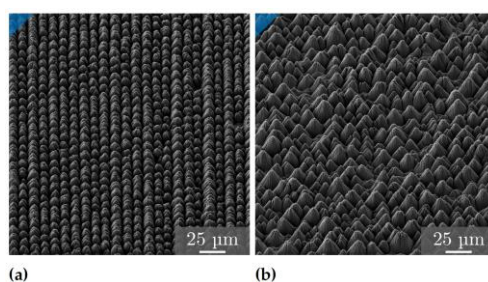


Abbildung 49: REM-Aufnahme erzeugter CLP durch UV-Bestrahlung von GaAs mit: (a) 825, (b) 350 Pulsen.

### Saphir (Laserdrehen):

Als weiteres transparentes Material wurde Saphir für die Bearbeitung mit dem UV-UKP-Laser eingeführt. Die bis dato im Rahmen des Projektes durchgeführten Untersuchungen beschränkten sich auf planare Substrate. Die AG alp konnte binnen der letzten Jahre ein beträchtliches Knowhow in der Bearbeitung rotationssymmetrischer Bauteile mittels tangentialen Laserdrehens mit UKP-Lasern aufbauen und prägte damit den weltweiten Forschungsstand. Im Rahmen des Lotu<sup>2</sup>s-Projektes wurde in einer weiteren Laserbearbeitungsanlage „WSMH“ ein Strahlengang für die dritte Harmonische des integrierten Carbide-Lasers implementiert, sodass die verbaute Drehachse in Verbindung des ultravioletten Lasers genutzt werden konnte. Ziel der Untersuchungen war es, rotationssymmetrische

Saphirfasern für sensorische Anwendungen im Hochtemperaturbereich zu fertigen. Zunächst wurde die Abtragungsschwelle für die erste (IR), zweite (VIS) und dritte (UV) Harmonische Welle des Lasers experimentell mittels Liu-Verfahren ermittelt. Wie Abbildung 51 zeigt, skaliert diese Fluenz vor allem bei niedrigen Pulszahlen mit der Wellenlänge und erreicht im UV mit  $1,25 \text{ J/cm}^2$  (bei  $n=1$ ) ihr Minimum. Analog zu den bisher beschriebenen Ergebnissen anderer Materialien, wird hier davon ausgegangen, dass die Verschiebung der Photonenenergie der Laserstrahlung in Richtung der Bandlücke des Materials einen Vorteil in der Laser-Material-Wechselwirkung eröffnet und damit die Abtragungsschwelle so herabsetzt.

Die Bearbeitung der rotationssymmetrischen Werkstücke erfolgte, wie in Abbildung 51 dargestellt, mit Hilfe einer Drehachse sowie einer Keilförmigen Aufnahme, in der der Saphirstab gleitend gelagert werden konnte. Als Prozessstrategie wurde der dargestellte sequenzielle Hatch gewählt, um auch bei größeren Probenabmessungen einen einheitlichen Abtrag zu generieren.

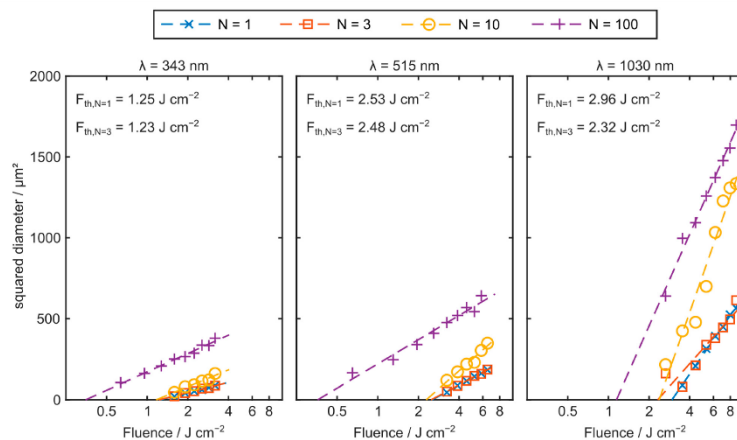


Abbildung 50: Abtragungsschwellen von IR, VIS und UV auf Saphir (bestimmt nach der nach Liu-Methode)

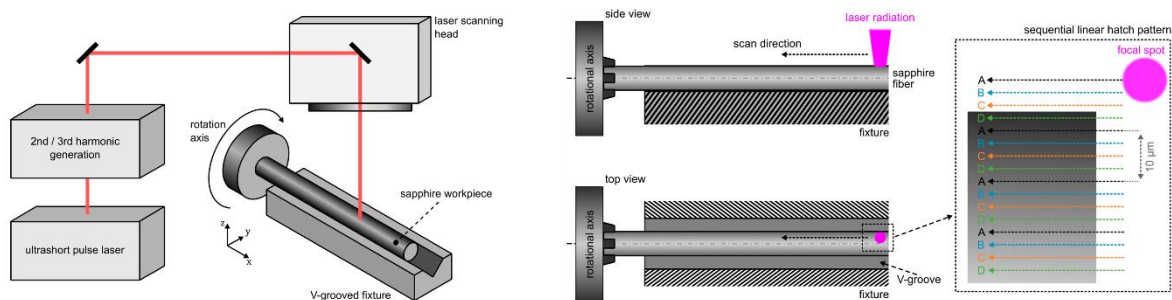


Abbildung 51: Laserbearbeitung rotationssymmetrischer Saphirfasern. Links: experimenteller Aufbau. Recht: Scanstrategie.

Mittels UV-Laserdrehen kann der Durchmesser einer kommerziellen Saphirfaser drastisch ausgehend von  $250 \mu\text{m}$  auf ca.  $50 \mu\text{m}$  bei einer Faserlänge von bis zu  $5 \text{ mm}$  und auf  $25 \mu\text{m}$  bei einer Länge von  $2 \text{ mm}$  reduziert werden. Die Oberflächengüte der resultierenden Fasern zeichnet sich einerseits durch eine geringe Oberflächenrauheit ( $S_a$ ) im Bereich von  $250 \text{ nm}$  aus und ist frei von Rissen, Spalten oder Materialbrüchen. In Abbildung 52 sind die hergestellten Fasern mittels Lichtmikroskopie und Rauheitsmessungen mittels Weißlichtinterferometrie dargestellt. Die Ergebnisse ebnen den Weg für eine neuartige, UV-Laser-basierte Erzeugung feinsten Saphirfasern und übertreffen etablierte Prozesse, wie das Hochtemperatur-Nassätzverfahren hinsichtlich Prozessgeschwindigkeit um das Zehnfache. Neben der vorteilhaften Laser-Material-Wechselwirkung des UV-Lasers herrscht durch die gegenüber dem Infrarotlaser dreifache Rayleighlänge eine robustere Prozessführung.

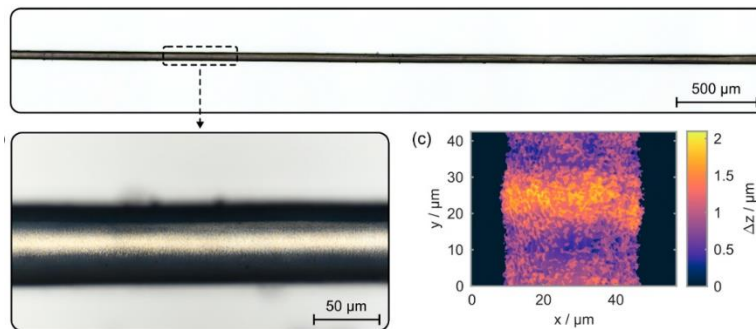


Abbildung 52: Resultierende verjüngte Saphirfaser nach der UV-Laserbearbeitung sowie resultierende Oberflächenrauheit.

### PMMA (Laserdrehen):

Motiviert durch die im Zusammenhang mit der UV-UKP-Laserbearbeitung von planaren COC-Substraten sowie rotationssymmetrischen Saphirfasern, sollte der Laserdrehprozess auch auf Polymersubstrate übertragen werden. Hierfür wurden Stäbe aus Polymethylmethacrylat (PMMA) sowohl mit der ersten als auch dritten harmonischen des UKP-Lasers bearbeitet und hinsichtlich der resultierenden Kanten- und Oberflächenqualitäten, Abtragseffizienzen, Prozessrobustheit und Formtreue unter identischen Prozessbedingungen gegenübergestellt.

Zunächst wurde der Einfluss der Pulsenergie auf die Abtragsrate und -effizienz des Laserdrehprozesses für die beiden Wellenlängen (IR und UV) untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 53 dargestellt. Die Diagramme zeigen, dass in einem höheren Bereich der Pulsenergie (15 bis 20 µJ) in Bezug auf die Abtragsrate und Effizienz ähnlich abschneiden. Im unteren Energiebereich zeigt die UV-Wellenlänge jedoch eindeutig einen Verarbeitungsvorteil. Während bei der IR-Wellenlänge erst bei einer Pulsenergie von 8 µJ ein Materialabtrag stattfindet, zeigt die UV-Wellenlänge ihre höchste Effizienz bei einer Pulsenergie von 3 µJ. Dieser Unterschied wird durch die höhere Photonenenergie bei der UV-Wellenlänge verursacht, die wiederum die chemischen Bindungen im Material leichter aufbricht. Im oberen Energiebereich stellen sich nahezu identische Werte ein.

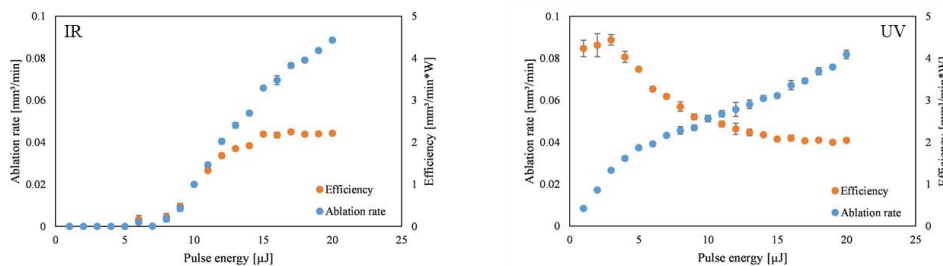


Abbildung 53: Abtragsrate und Effizienz bei steigender Pulsenergie für IR- und UV-Wellenlängen.

Abbildung 54 zeigt eine zur Evaluation entworfene Geometrie mit verschiedenen dimensionierten Einkerbungen sowie einer feinen Spitze, welche mit beiden Wellenlängen (UV und IR) abgedreht und mittels optischer Mikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie abgebildet wurde. Während das mit der IR-Wellenlänge erstellte Werkstück eine gut geformte Spitze ohne offensichtliche Fehler aufweist, zeigt das mit der UV-Wellenlänge bearbeitete Teil deutliche Hitzeschäden. Dieses Problem lässt sich auf die höhere Absorption der UV-Wellenlänge im Material zurückführen. Der Grenzbereich des fokussierten UV-Strahls enthält nicht genug Energie, um die Ablation auszulösen, aber die hohe Absorption begünstigt die Erwärmung des Materials, was zu Schmelzeffekten führen kann. Die IR-Wellenlänge hingegen muss die Bedingung für die Multiphotonenabsorption erfüllen, um die Ablation

auszulösen. Wenn diese Bedingung nicht erfüllt ist, findet keine Absorption und damit keine Erwärmung des Materials statt. Ein weiterer erheblicher Unterschied zeigt sich dort, wo die konische Form der Spitze in der Mitte des Werkstücks in eine Kugelform übergeht. An diesem Punkt kommt die Bewegung des Lasers für kurze Zeit zum Stillstand, bevor sie ihre Richtung umkehrt. Die REM-Nahaufnahmen dieses Bereichs zeigen einen größeren Materialabtrag für die IR-Wellenlänge als für die UV-Wellenlänge. Der Materialdurchmesser beträgt an dieser Stelle 300  $\mu\text{m}$ , was bedeutet, dass ein Defokus von 150  $\mu\text{m}$  anwendbar ist. Der Strahldurchmesser bei diesem Defokuswert beträgt etwa 21  $\mu\text{m}$  für IR und 15  $\mu\text{m}$  für UV, was den Unterschied im Materialabstand erklärt. Bei Vergleich der unteren Ebene der Kegelform, verdeutlicht, dass der mit IR bearbeitete Stab eine starke Abweichung von der 90°-Zielkontur aufweist. Durch die UV-Bearbeitung wird diese Problematik aufgrund der für niedrigere Wellenlängen typischerweise schmalere Strahltaile umgangen und es entsteht eine Kontur, die an diesem besonderen Merkmal der Geometrie nahe an der Sollkontur liegt.

Die realisierten Nuten unterschiedlicher Tiefe zeigen ebenfalls deutliche Unterschiede für jede Wellenlänge. Während die mit IR bearbeiteten Rillen an den oberen Kanten keine Anzeichen von hitzebedingten Schäden aufweisen, zeigen die mit UV bearbeiteten Rillen mit zunehmender Rillentiefe deutliche Verfärbungen. Obwohl der schmalere UV-Strahl weniger durch die 90°-Kontur der Geometrie abgeschattet wird, führt die hohe Absorption von PMMA bei der UV-Wellenlänge zu offensichtlichen Hitzeschäden. Dies führt zu einer Abweichung von den 90°-Winkeln an den Rillenrändern, die mit der realisierten Tiefe zunimmt, wie im linken Schema in Abbildung 54 dargestellt. Die mit der IR-Wellenlänge realisierten Rillenkanten unterscheiden sich nicht in der Winkelabweichung bei zunehmender Rillentiefe. Die Kantenabweichung der mit UV-Wellenlängen bearbeiteten Nuten nimmt jedoch stark zu. Im Gegensatz dazu erzeugt die UV-Wellenlänge eine Rillengeometrie, die der Zielkontur näherkommt. Obwohl beide Wellenlängen eine Zunahme der Breitenabweichung aufweisen, bleibt die UV-Wellenlänge mit zunehmender Rillentiefe näher an der Zielbreite.

Wird die resultierende Oberfläche abseits von Nuten und Kanten betrachtet, so zeigt sich beim UV-Abtrag eine deutlich glattere Oberfläche, während sich mit IR-Wellenlänge eine starke Mattierung darstellt. In diesen Bereichen dominiert der Abtrag, der sich im Fokus einstellt. Die bereits im Zusammenhang mit der Bearbeitung von planarem COC gesammelten Ergebnisse spiegeln sich hier wider und untermauern die Beobachtungen.

Anhand der durchgeführten Versuche zeigt sich, dass vor allem hinsichtlich Formtreue und Oberflächenqualität die UV-Wellenlänge vorzuziehen ist, jedoch werden diese Vorteile durch einen erhöhten Wärmeeintrag und einhergehenden thermischen Schädigungen begleitet. Diese Nachteile können zwar durch die Wahl niedrigerer Fluenzen oder verringerter Repititionsrate ausgeglichen werden – jedoch auf Kosten der Prozessgeschwindigkeit. Die Wahl der Laserwellenlänge muss also auf die individuellen, applikationsspezifischen Anwendungen hin erfolgen.

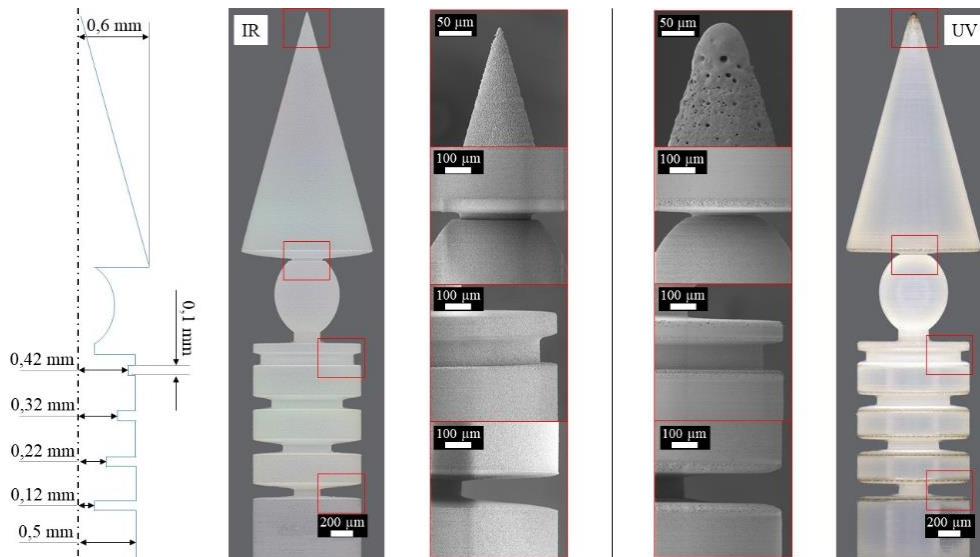


Abbildung 54: Evaluation einer zu Testzwecken entworfene Geometrie mit verschiedenen dimensionierten Einkerbungen sowie einer feinen Spitze, welche mit beiden Wellenlängen (IR links, UV rechts) abgedreht wurde.

### ABF-Leiterplatten

Um zuverlässige elektrische Verbindungen mit hoher Ausbeute in mehrlagigen Leiterplatten zu gewährleisten, zielt das UKP-Laser-Mikrovia-Bohren auf kleine Taper, minimale Schäden in den leitenden Innenlagen und geringe Durchmesserabweichungen ab. Zur Optimierung der Verjüngung und Gewährleistung einer minimalen Beschädigung der Kupferinnenlagen werden häufig Strahlformungselemente eingesetzt, um eine Gaußsche Strahlform in eine Top-Hat-Intensitätsverteilung umzuwandeln. Die Verwendung von MHz Bursts bei grünen Lasern hat gezeigt, dass diese den Taper verbessern. UV-Laser bergen das Potential, die Prozessführung wegen einer besseren Fokussierbarkeit des Laserstrahls mit einhergehender Vergrößerung der Rayleighlänge sowie erhöhter Absorption von Dielektrikum und Kupfer zu verbessern. Der Schichtaufbau des verwendeten ABF-Leiterplattenmaterials sowie die Vorteile einer Strahlformung sind in Abbildung 55 dargestellt.

Unter Variation der Pulsenergie, Burst-Modi, Anzahl der Laserpulse und Fokuslage wurden Löcher in das Leiterplattenmaterial perkussiert und hinsichtlich Qualität, Prozessgeschwindigkeit und Taper ausgewertet. Es zeigte sich, dass sich bei der Verwendung des Top-Hat-Strahlprofils ein um ca. 27 % verbesserter Taper einstellt und auftretende Schädigungen der Innenlagen ausbleiben. Wird der Burst in Verbindung mit dem Gauß-Profil verwendet, so wurde der Taper um etwa 12 % verbessert, während eine Prozessbeschleunigung von 31 % pro Bohrung auftrat. Die Kombination aus Burst und Strahlformung zeigt vor allem bei der Verwendung von 2 intra-burst-Pulsen einen Vorteil mit einhergehender Verringerung der Fertigungszeit um 18 %. Die optischen Analysen der Bohrlochquerschnitte mittels Laser-Scanning-Mikroskop sind in Abbildung 56 dargestellt.

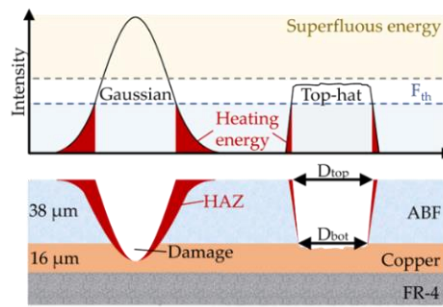


Abbildung 55: Schema zum ABF-Leiterplattenbohren mit Top-hat-Strahlformung.

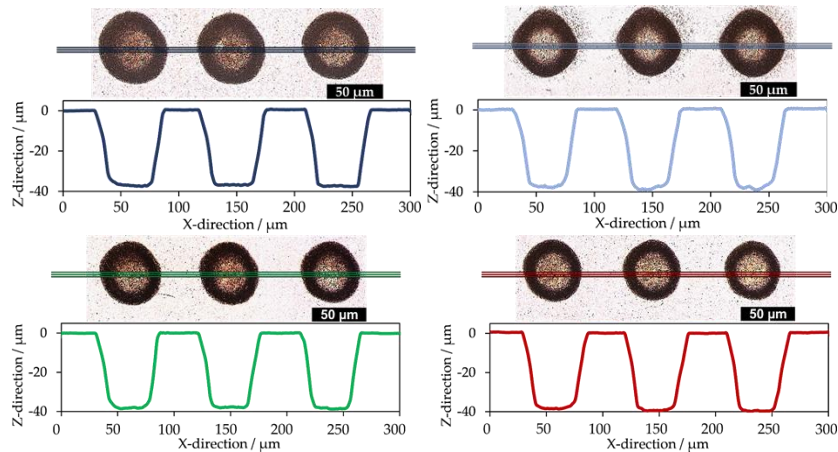


Abbildung 56: Bohrlochquerschnitte und -profile der verschiedenen Konfigurationen. Obere Reihe ohne Burst mit Top-Hat-Profil (links) und Gaußprofil (rechts). Untere Reihe mit MHz-Burst mit Top-Hat-Profil (links) und Gaußprofil (rechts).

Die Untersuchungen zeigen, dass durch die Verwendung der Burst-Pulse den Prozess beschleunigt und die Top-Hat-Strahlformung den Durchsatz der Elektronikfertigung verbessert. Der Einsatz eines UV-UKP-Laser ermöglicht eine verbesserte Laser-Material-Wechselwirkung, da die Absorption des Multi-Material-Systems solcher Leiterplatten durch lineare Prozesse stattfinden kann.

### Reduktives Lasersintern zur Elektrifizierung polymerer Substrate

Das Reduktive Lasersintern stellt ein flexibles, masken- und vakuumfreies Verfahren dar, welches in der Lage ist, Polymere für neuartige Lab-on-Chip-Anwendungen zu elektrifizieren. Hierfür werden Kupferverbindungen in Lackform auf die Substratoberfläche beschichtet und der Laser wird genutzt, um eine chemische Reduktion zu metallischem Kupfer hin auszulösen, sodass leitfähige, metallische Kupferschichten entstehen können, wie Abbildung 57 darstellt. Die bisherigen Untersuchungen unserer und anderer Arbeitsgruppen beschränkte sich bislang zumeist auf die Verwendung von nahinfraroten Lasern. Ultrakurz gepulste Laser lassen eine genaue Steuerung der eingebrachten Energie zu und verbessern die Qualität des erzeugten Kupfers.

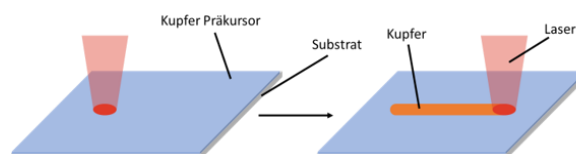


Abbildung 57: Schema des Reduktiven Lasersinterns zur Erzeugung leitfähiger Kupferschichten

Da der Kupfernitrat-Präkursorlack im sichtbaren Wellenlängenbereich eine hohe Transparenz aufweist und teilweise polymere Bestandteile (PVP) beinhaltet, kann davon ausgegangen werden, dass ein ultravioletter Laserstrahl stärker von einer solchen Lackschicht absorbiert wird und eine Prozessbeschleunigung oder Qualitätssteigerung bei der Verwendung eines solchen Lasers ermöglicht. In einer umfassenden Studie wurden identische Versuchsbedingungen für die erste (IR), zweite (grün) und dritte (UV) Harmonische des UKP-Lasers hinsichtlich Fokusgröße und Prozess geschaffen. Unter Variation der Scangeschwindigkeit und Laserleistung konnten homogene Kupferlinien erzeugt werden, welche hinsichtlich ihres Auftretens sowie einhergehender Linienbreite charakterisiert und als „Heat-Maps“ dargestellt wurden.

Abbildung 58 zeigt die Charakterisierung der Linienbildung für die drei untersuchten Wellenlängen 1030 nm (IR), 515 nm (VIS) und 343 nm (UV). Während für IR für ein kleines Parameterfenster homogene Linien erzeugt werden können, wird eine erzeugte Kupferlinie durch das veränderte Absorptionsverhalten sofort abgetragen. Die Verwendung des UV-Lasers zeigt mehrere Vorteile. Zum einen herrscht ein deutlich größeres Prozessfenster hinsichtlich der verwendbaren Laserleistung, zum anderen können homogene Kupferlinien selbst mit einer Scangeschwindigkeit von 7 mm/s erzeugt werden, während beim IR lediglich eine Geschwindigkeit von 4,5 mm/s genutzt werden konnte. Als Ursache wird eine verbesserte Absorption des Lackes bei der UV-Wellenlänge gewertet, während das gebildete Kupfer noch keine Zerstörung erleidet. Die Versuche bilden die Grundlage für zukünftige Studien an der AG alp.

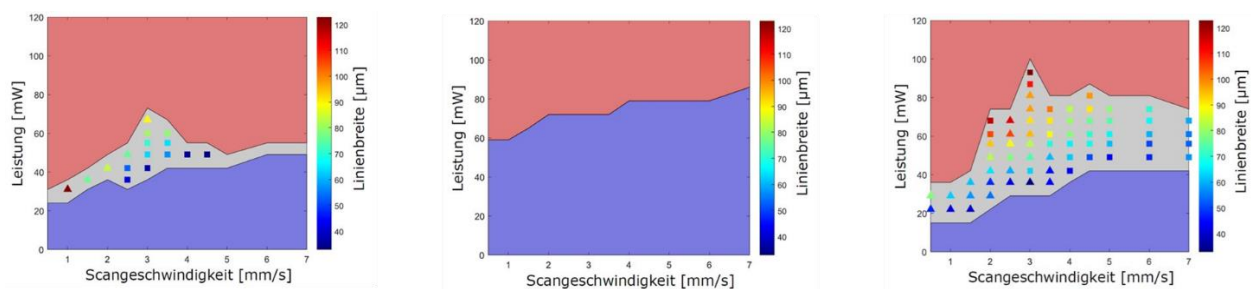


Abbildung 58: Erzeugung von Kupferlinien unter Variation der Scangeschwindigkeit und Leistung für die Wellenlängen IR, VIS und UV.

## **WP7 – Verwertung der Ergebnisse**

Innerhalb des WP7 wurden die im Projekt erhaltenen Ergebnisse hinsichtlich der entwickelten Optikkomponenten, des Hochleistungslasers sowie Lasermikrobearbeitungs-Prozesse verwertet. Erste aussagekräftige Ergebnisse, die im weiteren Projektverlauf in eine Zielmarktanalyse eingehen und den Aufbau eines Wissenstransfernetzwerkes führen sollen, wurden bereits mit industriellen Partnern diskutiert. Neben wissenschaftlichen Publikationen trat die AG alp dabei auf verschiedenen internationalen Veranstaltungen, Konferenzen, Messen oder Netzwerktreffen auf, um Kontakte zu forschenden Institutionen sowie industriellen Anwendern zu knüpfen, um die breit gefächerten Ergebnisse des LOTU<sup>2</sup>S-Projektes zu bewerben und zukünftige Partnerschaften sowie die Verwertung der erlangten Ergebnisse voranzutreiben. Im Folgenden sind die essenziellen Maßnahmen aufgeführt.

### Publikationen:

Im Rahmen der Untersuchungen zur Lasermaterialbearbeitung mit ultrakurz-gepulsten ultravioletten Laserstrahlquellen im Projekt LOTU<sup>2</sup>S sind 3 Peer-Review-Journalartikel, 5 internationale Konferenzbeiträge veröffentlicht worden, zwei weitere Peer-Review-Artikel sind in der Schreibphase:

- Peer-Review Journalartikel in „*Polymers*“ (IF 5,0) : „UV-Femtosecond-Laser Structuring of Cyclic Olefin Copolymer“ (DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/polym14142962>)
- Peer-Review Journalartikel in „*Materials*“ „Femtosecond Laser-Based Micromachining of Rotational-Symmetric Sapphire Workpieces“ (DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/ma15186233>).
- Beitrag und Poster auf internationaler Konferenz „*Photonics West 2023*“ (San Francisco, USA): „High-precision micromachining of sapphire towards optical waveguiding structures using femtosecond lasers“ (DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2648758>).
- Poster auf internationaler Leitkonferenz „International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics 2023“ (*ICALEO*, Chicago, USA): „UV-ultrashort pulsed laser ablation of fused silica“
- Peer-Review-Journalartikel in „*Journal of Laser Applications*“: „UV-ultrashort pulsed laser ablation of fused silica“ (DOI: <http://dx.doi.org/10.2351/7.0001197>)
- Beitrag und Poster auf internationaler Leitkonferenz „International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics 2023“ (*ICALEO*, Chicago, USA): „Uv-Femtosecond-Laser Structuring of Silicon Carbide“
- Beitrag und Poster auf internationaler Leitkonferenz „International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics 2023“ (*ICALEO*, Chicago, USA): „UV picosecond laser drilling of ABF material for printed circuit boards using laser burst mode and beam shaping“
- Beitrag und Poster auf internationaler Konferenz „*Photonics West 2024*“ (San Francisco, USA): „Laser turning of PMMA with ultrashort laser pulses using UV and IR“ (DIO: <http://dx.doi.org/10.1117/12.3001013>)
- Manuskript zum tangentialen Laserdrehen mit dem UV-UKP-Laser zur Einreichung in einem Peer-Review-Journal befindet sich im Nachgang des Lotu<sup>2</sup>s-Projektes in der Schreibphase
- Manuskript zur UV-UKP-Lasermikrobearbeitung und Funktionalisierung von Galliumarsenid zur Einreichung in das Peer-Review Journal „*Materials*“ befindet sich in der Schreibphase
- Weiterführung der Durchführung des Reduktiven Lasersinterns mit UV-UKP-Lasern und Bestrebung einer Publikation

### Abschlussarbeiten:

- Dominik Mücke: „Evaluation des Anwendungspotentials von Hochleistungs-UV-Ultrakurz-pulslaser“, Bachelorarbeit 2021
- Dominik Mücke: „UV-Ultrakurzpulslaser in der Produktionstechnik“, Masterarbeit (als dreise-mestriges Projekt), 2022/23
- André Arnold: „Reduktives Lasersintern mit Präkursoren auf Kupfersalzbasis zur Elektrifizierung von polymeren Lab-on-Chip-Systemen“, Bachelorarbeit, 2023

### Marktstudie:

- Enger Austausch mit dem gesamten Konsortium, insbesondere OPTENCE sowie TRBOLA engineering zur Erstellung einer umfassenden Marktstudie zur UV-UKP-Lasertechnologie und -materialbearbeitung

Weitere Maßnahmen:

- Netzwerken auf Laser Messe München
- Netzwerken auf Konferenzen ICALEO 2023, Photonics West 2023 und 2024, SLPC 2024
- Teilnahme an UPLAMP 2024 “Summer School on Ultra-short Pulse Lasers Applications in Material Processing” in Vilnius
- Studentischer Austausch von Student Jonas Helm mit dem FTMC
- Teilnahme an OPTENCE Seminar
- Mehrfache Teilnahme und Vortrag auf internationalem UKPL-Netzwerktreffen
- Herantreten an industriellen Partner Schmoll → Strahlaufweitungsteleskop und Optiken

Obernburg, 07.07.2024

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

**Zuwendungsempfänger Technische Hochschule Aschaffenburg  
Arbeitsgruppe Angewandte Lasertechnik und Photonik (ALP Group)**

**Förderung:**

**Innovations in Laser-Optic Technology for Ultraviolet Ultra-Short Pulsed Lasers**

**– Components – Lasers – Applications –**

***LOTU<sup>2</sup>S***

**Teil III**

**Erfolgskontrollbericht**

Verantwortlicher Autor: Prof. Dr. Ralf Hellmann

Förderkennzeichen: 03INT701BD

„Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03INT701BD gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.“

### **Projekthintergrund:**

Das Projekt „LOTU<sup>2</sup>S“ stellt ein Internationalisierungsprojekt im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme „Internationalisierung von Spitzenclustern, Zukunftsprojekten und vergleichbaren Netzwerken“ dar und wurde von deutschen Partnern unter Beteiligung von der Technischen Hochschule Aschaffenburg (AG alp), TOPAG Lasertechnik, Throl Optics, Optence, Heraeus Quarzglas GmbH & Co. KG (assoziiierter Partner) sowie den litauischen Partnern EKSMA Optics (vormals Optolita uab), LIDARIS uab, Ekspla uab, FTMC, Department of Laser Technologies bearbeitet.

### **Zielsetzung:**

Neben der Entwicklung leistungsfähiger und langlebiger optischer Komponenten für die Ultrakurzpuls-Laser-Materialbearbeitung im ultravioletten Wellenlängenbereich waren die Anwendungen dieser Komponenten für Hochleistungslaser mit hohen Pulsenergien und mittleren Leistungen Ziele des Projektes LOTU<sup>2</sup>S. Darüber hinaus sollen neue Prozesse und Märkte für die Anwendungen dieser verbesserten Anlagen in der Mikromaterialbearbeitung erschlossen werden. In einem interdisziplinären, internationalen Projektkonsortium wurden die Kompetenzen in den Bereichen Substrat-, Beschichtungs-, Optik- und Laserentwicklung, Zerstörschwellenprüfung, System- und Anlagentechnik sowie Lasermaterialbearbeitung von deutschen und litauischen Partnern gebündelt. Gleichzeitig wurde die Internationalisierung der Forschungslandschaft in Europa gestärkt. Das Projekt war in 8 Arbeitspakete unterteilt, deren einzelne Ziele im Teil II des Berichtes dargestellt.

### **Hinsichtlich Projektablauf und durchgeführter Arbeiten sei auf die Teile I und II verwiesen:**

Das LOTU<sup>2</sup>S-Projekt startete am 01.08.2020 und war von Hürden, wie der Corona-Pandemie, einem schweren Cyberangriff auf die TH Aschaffenburg und verzögerter Optikfertigung geprägt. Die im Gesamtprojekt entstandenen Verzögerungen waren für alle Partner uneinholbar, sodass eine kostenneutrale Verlängerung bis zum 31.12.2023 beantragt und genehmigt wurde.

### **Wichtigste wissenschaftlich-technische Ergebnisse der eigenen Arbeiten:**

Die Arbeitsgruppe alp übernahm Aufgaben in den Bereichen Simulation, optische Komponentenentwicklung, Messtechnik, Laserprozessentwicklung und Marktanalyse, um im Projektverlauf optische Komponenten und Systeme zu identifizieren, ein neuartiges Anlagensystem zu entwickeln und dieses für innovative Anwendungen einzusetzen. Somit war die AG alp sowohl ausführend als auch beratend maßgeblich in alle acht Arbeitspakete des Projektes verflochten und jederzeit im engen Austausch mit den nationalen sowie internationalen Projektpartnern. Die wichtigsten Teilarbeiten und Ergebnisse sind detailliert in den Teilen I und II beschrieben und seien folgend zusammengefasst:

- Maßgebliche Beteiligung in der Projektsteuerung (Projektleitung hatte TOPAG inne)
- Erarbeiten einer technologischen Basis hinsichtlich Testungen, Analysen, Messprinzipien gemeinsam mit den Partnern
- Identifikation, Entwicklung und Durchführung von Testungen an Materialien und Beschichtungen für UV-Hochleistungsoptiken, optische Systeme und Laser

- Konzeption und Durchführung von Testungen zur Zerstörschwelle der neuartigen Hochleistungsoptiken
- Im so gemeinsam im Projekt entwickelte Optiken weisen eine vielfach erhöhte Zerstörschwelle auf und liefern eine verbesserte Performanz bei Belastung mit hohen Laserleistungen
- Testung kommerzieller Optiken und optischer Baugruppen zur Validierung des Projekterfolges
- Maßgebliche applikationsorientierte Beratung bei der Entwicklung, Simulation und Auslegung optischer Baugruppen durch die Projektpartner
- Charakterisierung, Integration und Anwendung neuartiger im Projekt entwickelter optischer Systeme und Baugruppen
- Im Projekt wurden ein F-Theta-Objektiv, ein variables Strahlaufweitungssteleskop und eine Beobachtungsoptik-Modul gemeinsam mit den Partnern entwickelt, welche Ihre Funktionalitäten erfüllen
- Fundamentale Charakterisierung des im Projekt entwickelten UV-UKP-Hochleistungslasers
- Konzeption und Umsetzung einer Maschine zur Lasermaterialbearbeitung mit dem entwickelten UV-UKP-Hochleistungslasers unter Einbeziehung und Integration der entwickelten optischen Bauelemente sowie der Charakterisierung des Systems mit Blick auf potenzielle Anwendungen
- Die im Projekt konzipierte Maschine konnte erfolgreich zur Lasermaterialbearbeitung eingesetzt werden
- Durchführung umfangreicher Studien zur UV-UKP-Lasermaterialbearbeitung
  - Entwicklung einer neuartigen Methodik zur Gegenüberstellung von Prozesseffizienz, -qualität und -durchführbarkeit bei der Lasermaterialbearbeitung mit verschiedenen Wellenlängen
  - Materialien: Quarzglas, Cycloolefin-Copolymer, PMMA, Edelstahl, Aluminiumoxid, Saphir, Siliziumkarbid, Galliumarsenid, ABF-Leiterplatten-Verbundmaterial, Kupfernitrat-Präkursor
  - Prozesse: Abtragen, Laserdrehen, Bohren, Oberflächenfunktionalisierung, Reduktives Lasersintern, Erzeugung mikrofluidischer Systeme
- Die Ergebnisse der Studien zur Lasermaterialbearbeitung mit ultravioletten UltrakurpulsLasern zeigen erhebliche Vorteile hinsichtlich Abtragseffizienzen und -raten, resultierenden Oberflächenrauheiten, Kantenqualitäten sowie Prozessstabilität gegenüber der Verwendung von Infrarotlasern für eine Vielzahl von Materialien und Prozessen in der Mikrobearbeitung
- Beratende Unterstützung bei der durchgeführten Marktanalyse
- Verwertung der Projektergebnisse in Form von 8 Publikationen, Teilnahme an 3 internationalen Konferenzen, Netzwerktreffen, Workshops und Messen sowie die Kontaktaufnahme zu Projektexternen Forschungs- und Industriepartnern zur Akquise neuer Partnerschaften, Projektverwertung, Kommerzialisierung erlangter Projektergebnisse und Anstoßen von Folgeprojekten

Die hier und im Teil II dargestellten Ergebnisse demonstrieren die Vielseitigkeit der durch die AG alp durchgeführten Untersuchungen und Entwicklungen, welche nicht nur zum Erfüllen der im LOTU<sup>2</sup>S-Projekt verankerten Zielsetzung führte. Darüber hinaus konnte ein beträchtlicher Zuwachs des eigenen Knowhows im Bereich der UV-UKP-Materialbearbeitung, der Entwicklung und Validierung optischer Systeme, Laser und Laseranlagen oder dem Testen von Zerstörschwellen von Optiken (LIDT) verzeichnet werden. Hiermit ist die Grundlage für bereits begonnene sowie zukünftige Forschungsaktivitäten, Industriepartnerschaften und andere Verwertungsmaßnahmen geschaffen. Darüber hinaus wurde die deutsch-litauische Partnerschaft maßgeblich gestärkt, was sich im durchgeführten studentischen Austausch, der Teilnahme an litauischen Netzwerkveranstaltungen und zukünftigen Kooperationen widerspiegelt. Die TH Aschaffenburg profitiert daneben auch dadurch, dass das erlangte Wissen in Form

von Lehrveranstaltungen weitergegeben werden kann, um zukünftige Fachkräfte für die Industrie und Forschung auszubilden.

## **Fortschreibung des Verwertungsplans**

### Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende:

Als Folge des enormen Knowhow-Gewinns der AG alp hinsichtlich der Lasermikrobearbeitung mit ultravioletten Ultrakurzpulslasern konnte die AG alp Machbarkeitsstudien im Bereich des Lasermikrobohrens von Glas und Leiterplatten-Verbundmaterialien sowie der Oberflächenfunktionalisierung verschiedener Materialien durch deutsche Industriepartner akquirieren (Schmoll, Schott). Als Folge können Prozesse und Produkte der nationalen Industrielandschaft verbessert werden und technologische sowie wirtschaftliche Stellung des Standortes Deutschland sichern. Die AG alp konnte so industrielle Drittmittel akquirieren.

Mit der im Rahmen des Projektes konzipierten Anlage zur UV-UKP-Lasermaterialbearbeitung können (verglichen zur bisherigen, größtenteils auf Infrarotlasern basierten Prozessen) kleinere Strukturgrößen mit hoher Effizienz, übertreffender Qualität und robusten Prozessbedingungen auf einer Vielzahl von Materialklassen (vgl. Teil II) umgesetzt werden. Es wird davon ausgegangen, dass zukünftige Forschungs- und Industrieprojekte sowie -aufträge von diesen Neuerungen profitieren können.

### Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten nach Projektende:

Wie Teil II des Berichtes ausführlich darlegt, wurden verschiedenste Materialklassen, wie Polymere, Glas, Halbleiter, Verbundmaterialien oder Keramiken erfolgreich mit dem UV-UKP-Laser bearbeitet. Die Ergebnisse zeigen hierbei enorme Vorteile gegenüber der Bearbeitung mit dem Infrarotlaser, vor allem hinsichtlich der aus einer Bearbeitung resultierenden Qualität. Diese, in bisher 8 wissenschaftlichen, internationalen Publikationen veröffentlichten Ergebnisse bilden den Grundstein für zukünftige Untersuchungen sowohl innerhalb der AG alp, aber auch internationaler Forschungseinrichtungen, indem diese Vorteile für spezifische Applikationen genutzt werden können. Auch die AG alp selbst wird über die Projektlaufzeit hinaus die Erforschung solcher Prozesse, insbesondere der Oberflächenfunktionalisierung, dem tangentialen Laserdrehen sowie reduktiven Lasersintern fortsetzen.

Darüber hinaus wurde der enge Kontakt zu den litauischen Projektpartnern ausgebaut und verstetigt, welcher in der Teilnahme an litauischen Wissenstransferveranstaltungen, dem Anschub gemeinsamer Forschung und studentischem Austausch mündete. Zukünftig werden gemeinsame Publikationen angestrebt und dieser Kontakt weiter ausgebaut.

Neben der Materialbearbeitung baute die AG alp Knowhow in der Durchführung von Belastungstests von Optiken hinsichtlich Langzeitbelastbarkeit sowie Validierung der Zerstörschwellen (LIDT) auf. Für kommerziell verfügbare UV-Optiken liegen oftmals nur Testzertifikate vor, welche LIDT-Werte für bestimmte Laserparameter (z.B. Pulsdauern im Nanosekundenbereich) liefern. Ergänzend hierzu verlangen vor allem Hersteller von Lasermaschinen für die Ultrakurzpulslaserbearbeitung eine Aussage zur Belastbarkeit unter den maschinenspezifischen Bedingungen (z.B. hohe mittlere Leistung, ultrakurze Laserpulse usw.), sodass über die Spezifikationen der Optikhersteller hinaus Testungen durchgeführt werden müssen. Hierzu konnte die AG alp bereits in der Vergangenheit Industriepartnerschaften bilden und Aufträge akquirieren (Fa. Schmoll).

### **Angaben zu Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben**

Keine.

### **Angaben über die Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung**

Der zeitliche Verlauf wird ausführlich im Teil II des Berichtes dargestellt und sei folgend zusammengefasst: Das LOTU<sup>2</sup>S-Projekt startete am 01.08.2020 und war von Beginn an bis in den Herbst 2022 hinein von den Auswirkungen der Coronapandemie geprägt, sodass sich die Zusammenarbeit um Konsortium auf eine telefonische und digitale Kommunikation beschränken musste, was sich negativ auf den Projektfortschritt auswirkte. Zusätzlich war die Technische Hochschule im Frühjahr 2022 von einem schweren Cyberangriff betroffen, der die zeitweise Stilllegung aller Aktivitäten und somit weitere Verzögerungen forderte. Im Herbst 2022 konnte erstmalig ein physisches Projekttreffen in Vilnius stattfinden. Zudem erfolgte eine Zusammenkunft im Rahmen der Lasermesse München im Jahr 2023. Ein weiteres abschließendes Projekttreffen fand im Herbst 2023 in Vilnius statt. Durch den Umzug des Projektpartners Eksma in ein neues Produktionsgebäude konnten neuartige Optiken und optische Systeme erst stark verzögert bereitgestellt werden. Hierauf reagierte die AG alp mit einem Vorziehen der Studien zur Lasermaterialbearbeitung. Die im Gesamtprojekt entstandenen Verzögerungen waren für alle Partner uneinholbar, sodass eine kostenneutrale Verlängerung bis zum 31.12.2023 beantragt und genehmigt wurde. Hierdurch war es dem Konsortium möglich, die acht Arbeitspakete des Projektes vollständig und mit Erfolg zu bearbeiten. Mit fortschreiten des Projektes wurden erlangte Ergebnisse auf internationalen Konferenzen vorgestellt.

### **Zusammenfassung und Bewertung:**

Trotz enorm erschwelter Bedingungen (Coronapandemie, Cyberangriff, Verzögerungen bei der Optikfertigung) gelang es dem internationalen Konsortium des Projektes LOTU<sup>2</sup>S erfolgreich, die Zielsetzungen des Projektes zu erfüllen, die internationale Verbindung mit der litauischen Forschungslandschaft zu stärken und das Projekt zu verwerten.