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

Schlussbericht zum Vorhaben

Optisches System und neuartige Laserbearbeitungsstrategien

im Rahmen des Eurostars Projekts

E! 113597- AcoustoScan

Akustooptisches Scanner-System für die Mikromaterialbearbeitung mittels ultrakurzer Laserpulse

Jan Perwas

Laser Zentrum Hannover e.V.
Hollerithallee 8
30419 Hannover

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

Förderkennzeichen: 01QE1954C
Projektlaufzeit: 01.10.2019 – 31.03.2023

Inhalt

Teil I: Kurzbericht ... 3
Aufgabenstellung und wissenschaftlich-technischer Stand ... 3
Inhalte des Vorhabens ... 3
Ablauf des Vorhabens: ... 4
Wesentliche Ergebnisse ... 4
Teil II: Eingehende Darstellung ... 5
AP 2: Optical Setup ... 5
Task 2.1 ... 6
Task 2.2 ... 8
AP 3: Controller development ... 10
Task 3.1 ... 10
Task 3.2 ... 12
Task 3.3 ... 15
Task 3.4 ... 16
AP 4: Processing and operation strategies development ... 17
Task 4.1 ... 17
Task 4.2 ... 18
AP 6: Integration and validation ... 20
Integration ... 20
Validierung ... 21
Wissenschaftliche Arbeiten ... 22
Bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen ... 22
Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NABF ... 23
Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises ... 23
Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten ... 23
Der voraussichtliche Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses ... 23
Teil III: Erfolgskontrollbericht ... 25
Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens ... 25
Fortschreibung des Verwertungsplans ... 25
Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte ... 25
Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende ... 25
Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende ... 25
Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit ... 26
Angaben zu Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben ... 26
Angaben über die Einhaltung der Ausgaben- und der Zeitplanung ... 27

Teil I: Kurzbericht

Aufgabenstellung und wissenschaftlich-technischer Stand

Das Vorhaben E! 113597 – AcoustoScan verfolgte das Ziel, die hohen optischen Leistungen moderner Ultrakurpulslaser (UKP-Laser) für Endanwender zugänglich zu machen. UKP-Laser zeichnen sich dadurch aus, dass sie sehr kurze und damit sehr leistungsstarke Pulse im Bereich von Pico- bis Femtosekunden aussenden, mit denen z.B. Materialbearbeitung oder additive Fertigungsprozesse durchgeführt werden können. Gleichzeitig kann aufgrund der zeitlichen Kürze der Pulse das Maß an eingetragener Wärme in den Prozess minimiert werden. Die in den letzten Jahren aufgetretene Steigerung der Leistungsfähigkeit moderner Lasersysteme betrifft dabei weniger den Energiegehalt einzelner Pulse, sondern vielmehr die Anzahl von Laserpulsen, die pro Zeiteinheit realisiert werden können. Moderne Lasersysteme sind in der Lage, weit mehr als eine Millionen Pulse pro Sekunde zu erzeugen (Repetitionsrate).
Etablierte Strahlablenkungssysteme, wie z.B. Galvanometerscanner oder Polygonscanner, sind zu träge oder zu unflexibel, um jeden dieser emittierten Laserpulse individuell in einen frei wählbaren Bearbeitungspunkt abzulenken. Dem geschuldet erfolgt die Ablenkung von Laserpulsen noch immer vornehmlich auf Basis komplexer und zumeist ineffizienter Bahnplanungen, welche selbst bei optimierten Abläufen nur Bruchteile der verfügbaren Laserleistung in einen Prozess einbringen können.
Die Herausforderung, die AcoustoScan adressierte, bestand darin, die Vielzahl von Pulsen für konkrete Prozesse möglichst vollständig und sinnvoll nutzbar zu machen. Hierfür wurden als neuartiger Ansatz innerhalb der Mikromaterialbearbeitung akustooptische Deflektoren (AODs) verwendet, welche die Ablenkung der Pulse auf Basis von Ultraschall ermöglichen. Dadurch wurde es prinzipiell möglich, jeden vom Laser emittierten Puls bis zu einer Repetitionsrate von 1 MHz individuell in einem relativ kleinen Arbeitsbereich zu positionieren. Durch die Kombination mit einem langsameren Galvanometerscannersystem konnte der Arbeitsbereich dann aufgespreizt und so ein schnelles und universelles Ablenkungssystem geschaffen werden. Dieses flexible und schnelle Ablenkungssystem galt es anschließend in eine bestehende Fertigungsanlage zu integrieren, um die hierin ablaufenden Prozesse drastisch zu beschleunigen. Als Fertigungsprozess wurde ein Zwei-Photonen-Polymerisations-Prozess (2PP-Prozess) gewählt, in dem, aufgrund seiner Eigenschaften, enorme Mengen an einzelnen Pulsen idealerweise individuell positioniert werden müssen. Eine hierfür entwickelte Optik und Elektronik bilden die Schnittstellen zwischen AODs und Fertigungsmaschine.

Inhalte des Vorhabens

Zusammen mit unseren Partnern Femtika und TEM-Messtechnik sollten die genannten akustooptischen Deflektoren in Verbindung mit einer angepassten Optik und mit moderner Steuerungselektronik in eine bestehende Maschine (Laser Nanofactory) für einen additiven Fertigungsprozess (2PP-Prozess) integriert werden. Hierzu mussten vier wesentliche Aspekte erarbeitet werden:

1. Ein optisches System, welches die Ablenkung ultrakurzer Pulse ohne Störung des Laser-Strahlprofils ermöglicht
2. Ein elektronisches System, welches Maschinen- und Steuerungsinformationen aufnehmen, verarbeiten und ausgeben kann
3. Durchführung notwendiger Anpassungsarbeiten an der Mechanik, der Optik sowie der Steuerung einer bestehenden Industrieanlage zur Erstellung feinster mechanischer Strukturen durch 2-Photonen-Polymerisation.

4. Entwicklung von neuartigen, mit dem AOD-Strahlablenksystem erstmalig umsetzbaren Prozessstrategien der Lasermaterialbearbeitung

Die Maschine musste darüber hinaus um hinreichende Benutzerschnittstellen zur Bedienung des neuartigen Ablenksystems erweitert werden.

Ablauf des Vorhabens:

Großteile der Projektbearbeitung fielen bedauerlicherweise in den Zeitraum der Corona-Pandemie. Daher bleibt es nicht aus, den Projektverlauf als unstetig zu beschreiben. Die Kommunikation und Absprachen zwischen den Projektteilnehmer fanden jedoch verlässlich und regelmäßig in Form von Videokonferenzen und E-Mail-Kommunikation statt. Darüber hinaus zeigten sich die Folgen der Corona-Pandemie auch in einer tiefgreifenden Störung der internationalen Lieferketten und damit in der Verfügbarkeit von elektronischen Komponenten und Baugruppen, so dass im Verlauf des Projektes mehrfach Anpassungen im Rahmen der Elektronikentwicklung notwendig wurden. Erfreulicherweise konnte das Projekt, unter zweimaliger Verlängerung der Projektlaufzeit, mit einem Projektabschlusstreffen in Vilnius bei unserem Partner Femtika erfolgreich abgeschlossen und die grundlegende Funktionsfähigkeit des entwickelten Systems erfolgreich demonstriert werden.

Wesentliche Ergebnisse

Im Verlauf des Vorhabens wurde ein optisches System entwickelt, welches den Anforderungen des Projektes genügen konnte. Hierfür wurde in unserem Labor eine kombinierte Strahlablenkungseinheit aus akustooptischen Deflektoren und einem Galvanometerscanner mit f-Theta-Linse realisiert, mit dessen Hilfe auch Ansätze zur Kompensation der geometrischen Verzeichnung bei sehr kurzen Laserpulsen untersucht werden konnten. Aus den hieraus erlangten Kenntnissen wurde eine Empfehlung erarbeitet, welche für die Konstruktion eines angepassten optischen Systems in der oben genannten Fertigungsmaschine unseres Partners Femtika Verwendung fand. Im Gegensatz zu unserem Laborsystem wurde hier jedoch, aufgrund technischer Randbedingungen, eine Kombination aus akustooptischen Deflektoren mit einem schnellen Achsensystem gewählt. Die Entwicklungsergebnisse des LZH erwiesen sich, trotz der systemischen Unterschiede, als übertragbar.

Als zweite wesentliche Komponente wurde ein elektronisches System realisiert, mit dem die schnelle und pulssynchrone Ablenkung der Laserstrahlung ermöglicht wurde. Dieses System konnte sowohl in der Laborumgebung im Verbund mit industriellen Standardkomponenten als auch in der Fertigungsmaschine erfolgreich getestet werden. Um die Kompatibilität zwischen den beiden Systemen zu ermöglichen, wurde das akustooptische Gesamtsystem so ausgelegt, dass es als drop-in replacement für konventionelle Galvanometerscannersysteme konfigurierbar ist. Der gezielt modulare Aufbau der Elektronik sowie der Datenverarbeitungsstruktur des Systems ermöglichte es darüber hinaus, dass unterschiedliche Datenquellen für die Erfassung und Auswertung von Positions- und Timinginformationen herangezogen werden konnten und somit eine relativ einfache Adaptierbarkeit an unterschiedliche Maschinenaufbauten bestand.

Aufgrund der sich im Projektverlauf abzeichnenden systemischen Rahmenbedingungen und der Auslegung des Systems auf eine Zentralwellenlänge von 1064 nm wurde das Deflektionssystem unseres Partners Femtika auf eine Ablenkrate von 100 kHz als Zielgröße ausgelegt. Hierdurch konnte auf bereits bestehende und industriell etablierte Hardwarekomponenten sowie hiermit verwendete Protokolle zur Ansteuerung von Ablenkeinheiten zurückgegriffen werden. Diese Rate wird auch durch die physikalischen Eigenschaften der verwendeten akustooptischen Deflektoren aus TeO_2 bedingt. Unter

Verwendung der im Projektverlauf erworbenen Deflektoren aus Quarz für eine Zentralwellenlänge von 532 nm kann diese Rate auf 1 MHz angehoben werden. Aufgrund der angepassten Systemausrichtung konnte der erworbene Deflektor jedoch nicht zielführend in das Fertigungssystem des Partners Femtika integriert werden.

Teil II: Eingehende Darstellung

In diesem Abschnitt sollen alle Arbeiten, an denen das Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH) federführend beteiligt war, eingehender dargestellt werden. Selbstverständlich unterstützte das LZH die hier nicht tiefergehend dargestellten Arbeitspakete oder Aufgaben der Projektpartner entweder beratend oder auch aktiv bearbeitend. Tabelle 1 zeigt eine Aufstellung der ursprünglich vereinbarten Projektinhalte, aufgeteilt nach Arbeitspakten und konkreten Aufgabenstellungen. Die Projektinhalte wurden konsistent über die gesamte Projektlaufzeit sinnhaft verfolgt. Die Aufgabenverteilung sowie die genaue Ausgestaltung der einzelnen Aspekte wurde den sich im Projektverlauf abzeichnenden Rahmenbedingungen leicht angepasst.

Tabelle 1: Darstellung der unter den Projektpartnern vereinbarten Arbeitspakete und Aufgaben.

Arbeitspaket	**Inhalt**	Partner
AP 1	**Project management**	FEMTIKA
AP 2	**Optical setup**	LZH
Task 2.1	Definition of requirements and interfaces	LZH
Task 2.2	Optical part of the combined beam deflection system as laboratory setup and preparation for integration:	LZH
Task 2.3	Tools and techniques for adjustment	TEM
Task 2.4	Optical setup for the integration into the laser machine	FEMTIKA
AP 3	**Controller development**	TEM
Task 3.1	Definition of requirements, interfaces and command set	TEM
Task 3.2	Hardware development	TEM
Task 3.3	Gateware development	TEM
Task 3.4	Final demonstrator controller	TEM
AP 4	**Processing and operation strategies development**	LZH
Task 4.1	Requirements for processing strategies	LZH
Task 4.2	Development of main processing strategies	LZH
Task 4.3	Two-photon 3D laser lithography	FEMTIKA
AP 5	**Machine software development**	FEMTIKA
Task 5.1	General software upgrade and adaption	FEMTIKA
Task 5.2	Implementation of machining recipes into software	FEMTIKA
AP 6	**Integration and validation**	FEMTIKA
Task 6.1	Installation	FEMTIKA
Task 6.2	Validation	FEMTIKA

AP 2: Optical Setup

Dem LZH kam im Arbeitspaket 2 mit den Tasks 2.1 und 2.2 die Aufgabe zu, ein optisches Setup zu entwickeln, in dem ein Pärchen akustooptischer Deflektoren (AODs) zur schnellen

Strahlablenkung Verwendung fand. In Verbindung mit einem Galvanometerscanner sollte so eine kombinierte Strahlablenkung mit gleichzeitig hoher Ablenkrate als auch großem Arbeitsbereich realisiert werden. Abbildung 1 verdeutlicht diese Kombination, bei welcher der von den AODs aufgespannte Ablenkbereich von den nachfolgenden Drehspiegeln auf einen vergrößerten Arbeitsbereich erweitert wird.

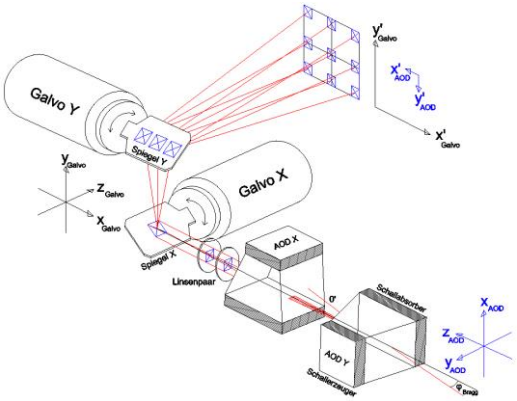

Abbildung 1: Kombination aus AODs und Galvanometerscanner. Quelle: LZH.

Typische Ablenkwinkel von Strahlablenkungskomponenten, die im Projektverlauf verwendet wurden, sind in Tabelle 1Tabelle 2: Eigenschaften ausgewählter Komponenten zur Strahlablenkung. aufgeführt.

Tabelle 2: Eigenschaften ausgewählter Komponenten zur Strahlablenkung.

Art	Komponente	Optisches Element	Zentralwellenlänge [nm]	Ablenkwinkel [mrad]
Galvanometerscanner	hurrySCAN 14	Spiegel (dielektrisch)	1064/532	700
Akustooptischer Deflektor	DTSXY-400-1064	TeO2	1064	49
	D1384-XY-aQ110-7	Quarz	532 (515)	2,7

Task 2.1

Task 2.1 diente der Identifikation von Komponenten und optischen Schnittstellen zur Dimensionierung und Umsetzung eines initialen Aufbaus innerhalb einer Laborumgebung im LZH. Hiervon sollten in einem nächsten Schritt Erkenntnisse für den Entwurf eines optimierten optischen Systems zur Integration in eine Maschine des Partners Femtika zur Fertigung feinster Strukturen nach dem Prinzip der Zwei-Photonen-Polymerisation (2PP-Prozess) abgeleitet werden. Als AODs fanden Elemente vom Typ DTSXY-400-1064 der Firma AA Opto-Electronic Verwendung. Um diese betreiben zu können, wurden zwei Verstärker vom Typ AMPA-B-34-20.425 in Verbindung mit Frequenzgeneratoren (VCO) von Typ DRFA10Y-B-0-50.110 der Firma AA Opto-Electronic in der Planung berücksichtigt. Diese Komponenten sind für eine Zentralwellenlänge von 1064 nm ausgelegt und standen dem LZH bereits vor Projektbeginn zur Verfügung. Es wurde jedoch in der Anfangsphase des Projektes von unserem Partner der Wunsch geäußert, den angestrebten Fertigungsprozess mit Laserpulsen im Wellenlängenbereich von 532 nm durchführen zu wollen. Daher wurden im Projekt Finanzmittel für ein entsprechendes AOD-System beantragt und ein AOD-Pärchen vom Typ D1384-XY-aQ110-7 der Firma Isomet beschafft. Zusätzlich erwarb das LZH einem Verstärker vom Typ RGA0110-4-20 derselben Firma. Das in Abbildung 2 dargestellte System zeichnet sich

im Vergleich zum zuvor genannten System durch eine wesentlich höhere Schallgeschwindigkeit aus, wodurch Laserpulse bei gleichartigem Strahldurchmesser mit höherer Repetitionsrate abgelenkt werden können. Als Nachteil ist ein deutlich verringerter Ablenkwinkelbereich zu nennen.

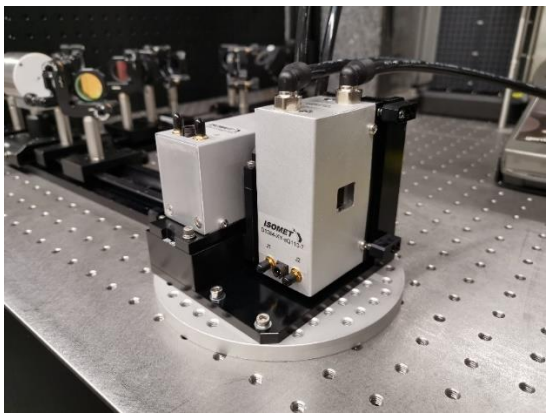

Abbildung 2: Im Projektverlauf erworbenes AOD-Pärchen vom Typ D1384-XY-aQ110-7 der Firma Isomet. Quelle: LZH

Um eine Ablenkung der Laserpulse durch die AODs zu ermöglichen, benötigen die Frequenzgeneratoren Steuersignale für die Einrichtung der Frequenz sowie der Amplitude des zu erzeugenden Hochfrequenzsignals. Zu Beginn der Untersuchungen wurden diese Informationen durch ein Programm in der Programmiersprache Python berechnet und durch eine PC-basierte Wandlerkarte (DAC) vom Typ PCI-1721 der Firma Advantech erzeugt.
Die Frequenz und die Amplitude des so erzeugten Hochfrequenzsignals bedingen innerhalb der AODs die Ausprägung eines optischen Gitters (im Wesentlichen eine Bragg-Reflexion), dessen Gitterkonstante den Winkel bestimmt, unter dem ein eintretender Laserpuls gebeugt wird. Über die Amplitude des Ultraschallsignals kann die Effizienz der Beugung beeinflusst werden, wodurch eine Leistungsstellung möglich wird. Im weiteren Projektverlauf wurden die Frequenzgeneratoren durch den im Arbeitspaket 3 entwickelten Controller substituiert. Abbildung 3 verdeutlicht den Zusammenhang der genannten Komponenten innerhalb des initialen Laboraufbaus.

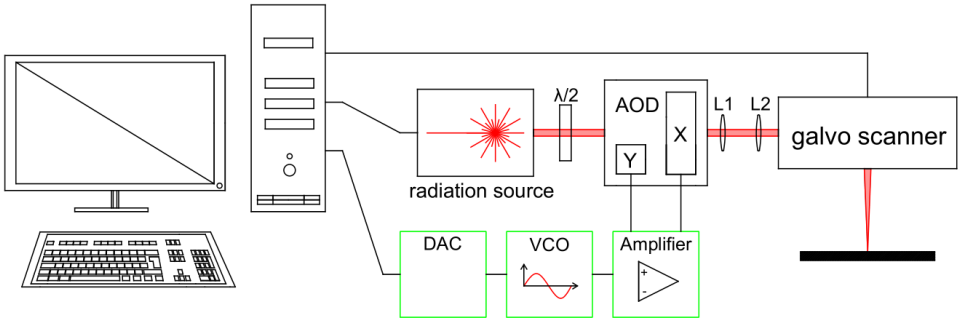

Abbildung 3: Darstellung der wesentlichen Komponenten zum Betrieb des AOD-Systems. Weitere optische Komponenten verdeutlichen den Bereich, in dem die Deflektoren in das Gesamtsystem integriert wurden. Quelle: LZH

Als Galvanometerscannersystem wurden im Projektverlauf unterschiedliche Scanköpfe verwendet, die jedoch alle aus den Produktlinien hurryScan oder intelliScan der Firma Scanlab stammten. Angesteuert wurden diese Köpfe mit Hilfe von Controllerkarten der Serie RTC aus dem gleichen Hause. Im Verlauf des Projektes wurde entschieden, sich auf die Verwendung von Galvanometerscannern der Serie hurryScan zu konzentrieren, da diese nativ mit Hilfe des Protokolls XY2-100 betrieben werden können. Dieses Protokoll ist, im Vergleich zum leistungsfähigeren und ebenfalls etablierten Protokoll SL2-100, öffentlich dokumentiert und somit einer Implementation in neue Hard- und Softwarestrukturen zugänglich. Dadurch wurde eine wesentliche Schnittstelle für die Anbindung des AOD-Systems an die

Fertigungsmaschine des Partners Femtika festgelegt. Dieser Punkt wird im Abschnitt AP 3: ausführlicher zu betrachten sein.
Wie bereits in Abbildung 3Abbildung 3 angedeutet, diente Task 2.1 auch zur Identifikation und Entwicklung der optischen Schnittstellen, unter denen eine Kombination von AODs und Galvanometerscanner ermöglicht werden konnte. Um die in Abbildung 1 dargestellte Kombination zu realisieren, müssen die von den AODs abgelenkten Laserpulse zunächst räumlich beschränkt und anschließend dem Galvanometerscanner wieder in angepasster Form zugefügt werden. Zur Beschreibung sei hier auf Abbildung 4 verwiesen, in welcher der verwendete optische Aufbau in horizontal gestreckter Darstellung aufgezeigt wird. Die von der Laserquelle (von links, nicht in der Skizze enthalten) kommenden Pulse werden von dem AOD-Pärchen (XY AOD) unter einem Winkel θ_y (als Projektion ist hier nur eine Winkelkomponente sichtbar) abgelenkt. Um die Pulse auf das optische System zu beschränken, erfolgt durch eine 4f-Optik aus den Linsen L1 und L2 deren Abbildung zwischen die Spiegel M1 und M2 (Pivot-Punkt) des Galvanometerscanners. Diese Anordnung ermöglicht es, die Winkelinformationen beider Ablenkeinheiten zu überlagern und zu einer Gesamtablenkung zu kombinieren. Nach dem Verlassen des Galvanometerscanners werden die Laserpulse durch eine telezentrische f-Theta-Linse L3 auf das zu bearbeitende Werkstück fokussiert.

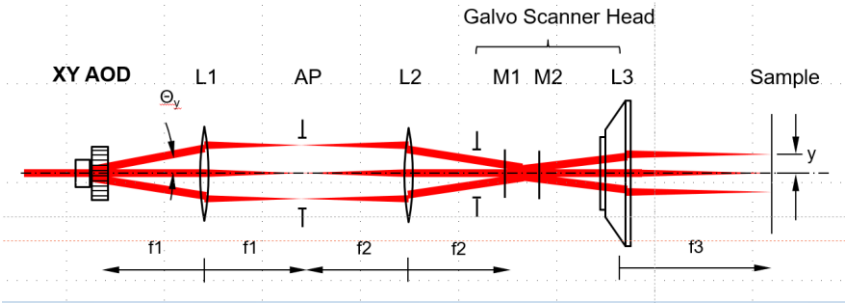

Abbildung 4: Optischer Strahlengang mit AODs, 4f-Optik, Galvanometerscanner und f-Theta-Linse. Quelle: LZH.

Task 2.2

Eine Umsetzung der aus Task 2.1 gewonnenen Erkenntnisse in einem unserer Labore ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Laserquelle befindet sich hinter dem optischen Aufbau. In roten Linien ist der Strahlengang der Laserpulse angedeutet. Zusätzlich zu den in Abbildung 4 aufgezeigten Elementen wird ein optisches System zur Konditionierung der Laserpulse verwendet. Hiermit wird, abhängig von der verwendeten Laserquelle, der Strahldurchmesser (Strahlaufweitung) und die Polarisation ($\lambda/2$) des optischen Feldes an das Ablenkungssystem angepasst. Dieses ist notwendig, da AODs zum einen eine beschränkte Apertur aufweisen und zugleich vor zu hohen Intensitätsspitzen geschützt werden müssen. Zum anderen, da AODs polarisationsempfindlich sind und somit eine nicht angepasste Polarisation des Ausgangsfeldes zu einem Verlust an transmittierter optischer Leistung führt.

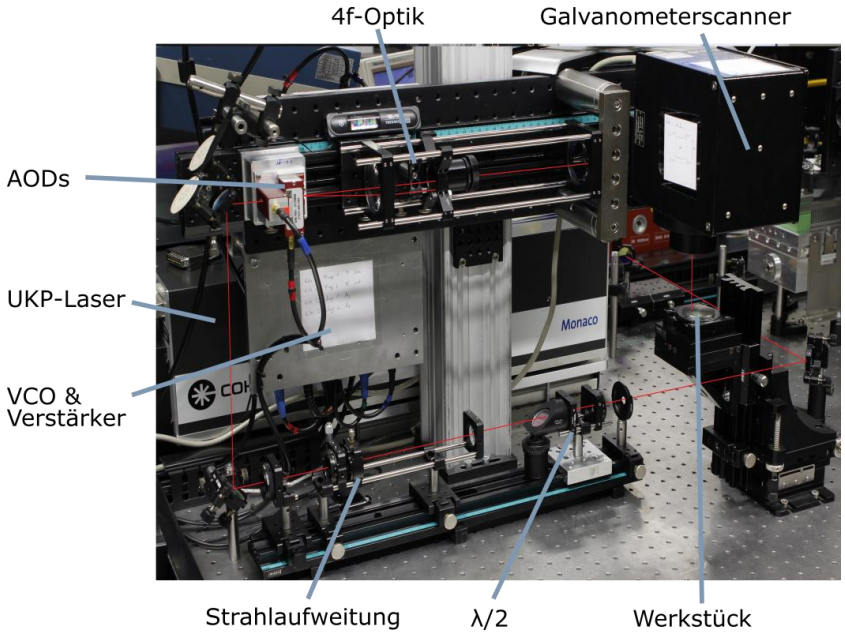

Abbildung 5: Darstellung des optischen Aufbaus, bestehend aus einem Paar AODs und einem Galvanometerscanner. Weitere optische Elemente dienen der Anpassung und Führung der Laserstrahlung. Die Laserquelle befindet sich hinter dem optischen Aufbau. Quelle: LZH.

Wie weiter oben erwähnt, stellen AODs aus optischer Sicht Gitter dar, welche, abhängig von der Wellenlänge des Laserpulses und der Gitterkonstante, zu einer Beugung des Pulses führen. Dieses bedingt die gewünschte und steuerbare Ablenkung der Laserpulse. Ultrakurze Laserpulse weisen jedoch mit abnehmender zeitlicher Dauer ein zunehmend verbreitertes Spektrum auf, so dass es bei Interaktion mit einem AOD zu einer Aufspaltung der Frequenzkomponenten und damit zu einer ungewünschten räumlichen Streckung der Intensitätsverteilung kommt. Abbildung 6 zeigt diesen Effekt an zwei Beispielen auf, bei denen mit Hilfe zweier AODs ein Punktraster aufgespannt wurde. Das Punktraster in der linken Abbildung wurde unter Verwendung eines Lasers mit einer Pulsdauer von etwa 40 ns erstellt (Typ: Coherent Matrix 1064-10-30, Zentralwellenlänge: 1064 nm, Pulsdauer: < 40 ns, Repetitionsrate: bis 100 kHz, Ø-Leistung: 10 W). Für das Raster in der rechten Bildhälfte wurde ein Laser mit einer Pulsdauer von ca. 350 fs und einer damit einhergehenden spektralen Breite von ±5 nm verwendet (Typ: Coherent Monaco 1035-80-60, Zentralwellenlänge: 1035 nm ±5 nm, Pulsdauer: < 350 fs, Repetitionsrate: bis 50 MHz, Ø-Leistung: 60 W, max. Pulsenergie: 80 µJ, M^2: < 1,2).

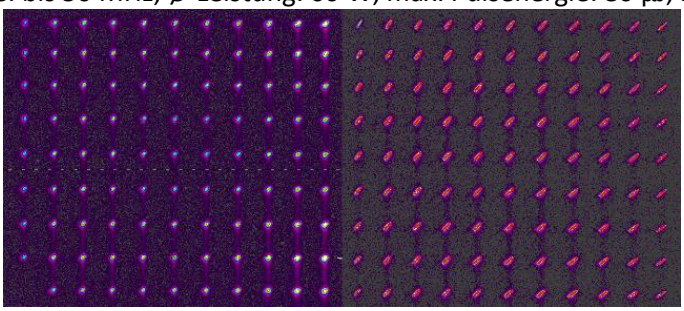

Abbildung 6: Auswirkung von zwei orthogonal orientierten AODs auf die geometrische Intensitätsverteilung in Abhängigkeit von Winkel und Pulsdauer. Links: Wirkung auf Laserpulse mit einer Pulsdauer von ca. 40 ns. Rechts: Wirkung auf Laserpulse mit einer Pulsdauer von ca. 350 fs. Quelle: LZH.

Während sich die sich einstellende Verzerrung der optischen Intensitätsverteilung bei der Verwendung von Nanosekundenlasern nur in Randbereichen des Punktrasters zeigt, tritt diese bei Femtosekundenlasern unerwünscht deutlich hervor. Im Rahmen einer studentischen Abschlussarbeit konnte gezeigt werden, dass für einen einzelnen AOD eine signifikante Reduzierung der Verzeichnung durch das Einbringen eines dispersiven Elementes möglich ist. Der hierfür verwendete optische Aufbau ist in Abbildung 7 schematisch aufgezeigt.

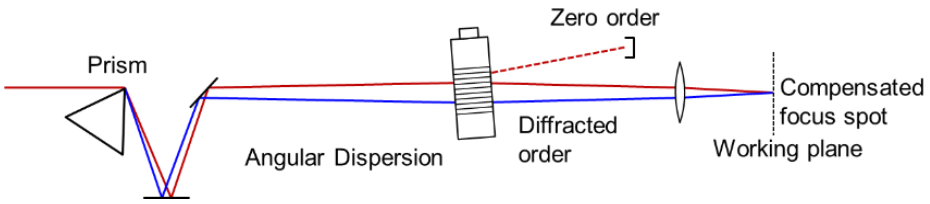

Abbildung 7: Schematische Darstellung eines optischen Aufbaus zur Kompensation der geometrischen Verzeichnung eines ultrakurzen Laserpulses an einem AOD. Quelle: LZH.

Durch das Einbringen eines Prismas in den Strahlengang vor einem AOD kann eine Vorkompensation des ungewünschten Beugungseffektes erreicht werden. Das hinter dem Prisma eingebrachte Spiegelpärchen dient der Justage der Strahllage in Bezug auf den AOD.

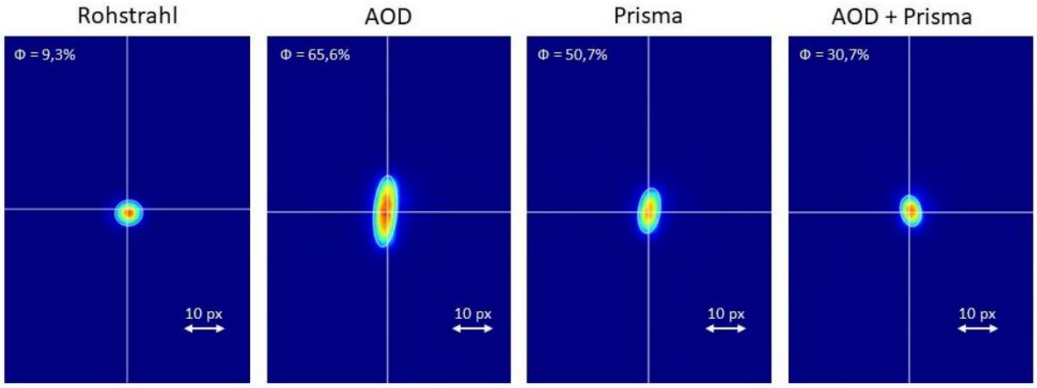

Abbildung 8: Verzeichnung der Intensitätsverteilung von ultrakurzen Laserpulsen beim Durchlaufen durch einen AOD oder ein Prisma sowie deren gegenseitige Kompensation. 1. v. links: Intensitätsverteilung innerhalb des Rohstrahls. 2. v. links: Verzerrte Intensitätsverteilung durch Wechselwirkung mit einem AODs. 3. v. links: Verzerrte Intensitätsverteilung durch Wechselwirkung mit einem Prisma. 4. v. links: Teilkompensierte Intensitätsverteilung durch Kombination der Wirkungen von AOD und Prisma. Quelle: LZH.

Die Auswertungen innerhalb der Studienarbeit weisen darauf hin, dass eine durch den verwendeten AOD gesteigerte Elliptizität des Rohstrahls von 9,3 % auf 65,6 % mit Hilfe eines eingebrachten Prismas wieder auf eine Elliptizität von 30,7 % reduziert werden konnte. Abbildung 8 stellt einen Satz der erhobenen Daten zur Intensitätsverteilung und zur Verdeutlichung grafisch dar. Die erzielbare Kompensationswirkung durch das Prisma ist somit signifikant, kann jedoch auf diese Weise nur für einen angenommenen Ablenkwinkel des AODs und durch gezielte Wahl des Materials und des Apex-Winkels optimiert werden. Eine vollständige Kompensation über den gesamten Bereich der Ablenkwinkel des AODs ist mit diesem Ansatz nicht möglich. Hierfür müssten winkelabhängige oder gar adaptive Komponenten verwendet werden. Für die Kompensation des gesamten Ablenkbereichs eines AOD-Pärchens sind somit entsprechend komplexere Wege zu beschreiten.
Es zeigte sich zum Abschluss des Projektes jedoch auch, dass die Eigenschaften des 2PP-Prozesses hinreichend gutartig sind, um die erwarteten Verzeichnungen unter Verwendung eines Femtosekundenlasers im Prozessergebnis nicht deutlich hervortreten zu lassen. Hierauf soll jedoch erst weiter unten in Abschnitt AP 6: Integration and validation eingegangen werden.

AP 3: Controller development

Zur Unterstützung unserer Partner hat das LZH auch im Arbeitspaket 3 umfangreiche und somit zu benennende Arbeit in engster Absprache mit TEM-Messtechnik geleistet.

Task 3.1

Task 3.1 diente der Identifikation von notwendigen Anforderungen an eine potenzielle Steuerungshardware sowie der Festlegung von Schnittstellen und Grundfunktionen. Bedingt

durch die im Projektverlauf anzunehmende Weiterentwicklung der Rahmenbedingungen wurde ein modularer Ansatz gewählt, mit dem sowohl die sich im Laboraufbau als auch in der Fertigungsmaschine sukzessiv weiter herauskristallisierenden Anforderungen berücksichtigt werden konnten.
Kern der zu entwerfenden Hardware sollte ein modernes Field Programmable Gate Array (FPGA) darstellen. Dieser Halbleiterbausteil kann über eine Entwicklungssoftware in seiner Funktion überaus flexibel konfiguriert werden. Durch die freie Konfigurierbarkeit bestand somit die Möglichkeit, eine an die jeweilige Aufgabenstellung und im Rahmen des modularen Designansatzes angepasste und echtzeitfähige Steuerung zu realisieren. Um Aspekte der Systemanbindung und der Ablaufsteuerung darüber hinaus besser bedienen zu können wurde sich darauf verständigt, einen System-on-a-Chip-Baustein (SoC) zu verwenden, welcher neben der Funktionalität eines FPGAs über direkt angebundene Prozessorstrukturen verfügt.
Die Anbindung des Controllers an das Gesamtsystem sollte direkt an den beteiligten Maschinenkomponenten erfolgten. Nur die Systemkonfiguration sollte über eine indirekte Schnittstelle und über eine Bedienersoftware erfolgen. Der ursprüngliche Ansatz des Projektes bestand darin, eine schnelle Strahlablenkung durch die Kombination von AODs und Galvanometerscannersystem zu realisieren. Die wesentliche Datenquelle hierfür stellte der Controller für den Galvanometerscanner dar, da durch ihn die Positionsdaten für die Laserablenkung sowie die Schaltzeiten für die Laserquelle in zeitlich geordneter Struktur bereitgestellt wurden.
Für die Anbindung von Galvanometerscannern haben sich im Markt die Protokolle XY2-100 und SL2-100 sowie davon abgeleitete Protokolle etabliert. Das modernere SL2-100 Protokoll hat sich inzwischen durchgesetzt, ist aber, im Gegensatz zum XY2-100 Protokoll, nicht öffentlich dokumentiert. Da der Erfolg des Vorhabens auf einer möglichst umfassenden und zuverlässigen Erfassung aller benötigten Maschineninformationen basierte, wurde sich darauf verständigt, das XY2-100 Protokoll als wesentliche Datenschnittstelle zu berücksichtigen. Denn nur dieses Protokoll war einer Implementation zugänglich. Damit gingen jedoch Einschränkungen einher, die weiter unten zu besprechen sein werden.
Darüber hinaus wurden gemäß den Anforderungen des Laborsetups und der Fertigungsmaschine weitere Informationseingänge für Linearachsen, externe Zeitsteuerungssignale, die Lasersteuerung und die Anbindung externer Computer via USB festgelegt, mit deren Hilfe die Funktionalität der Hardware während der Laufzeit beeinflusst werden kann. Gleichzeitig musste der Controller auch selbst als Datenquelle auftreten können, weswegen ebenso Steuerausgänge für Triggersignale, die Laseransteuerung und die Steuerung des Galvanometersystems vorgesehen wurden. Für die Ansteuerung der AODs wurde sich darauf verständigt, ein digital angebundenes Synthesizersystem zu entwerfen, mit dem die zum Betrieb der AODs benötigten Ultraschallsignale erzeugt werden können und die als Substitut für die weiter oben erwähnten VCOs dienen sollten. Als Ziel wurde festgehalten, dass das System in der Lage sein soll, Ablenkraten von bis zu 1 MHz realisieren zu können.

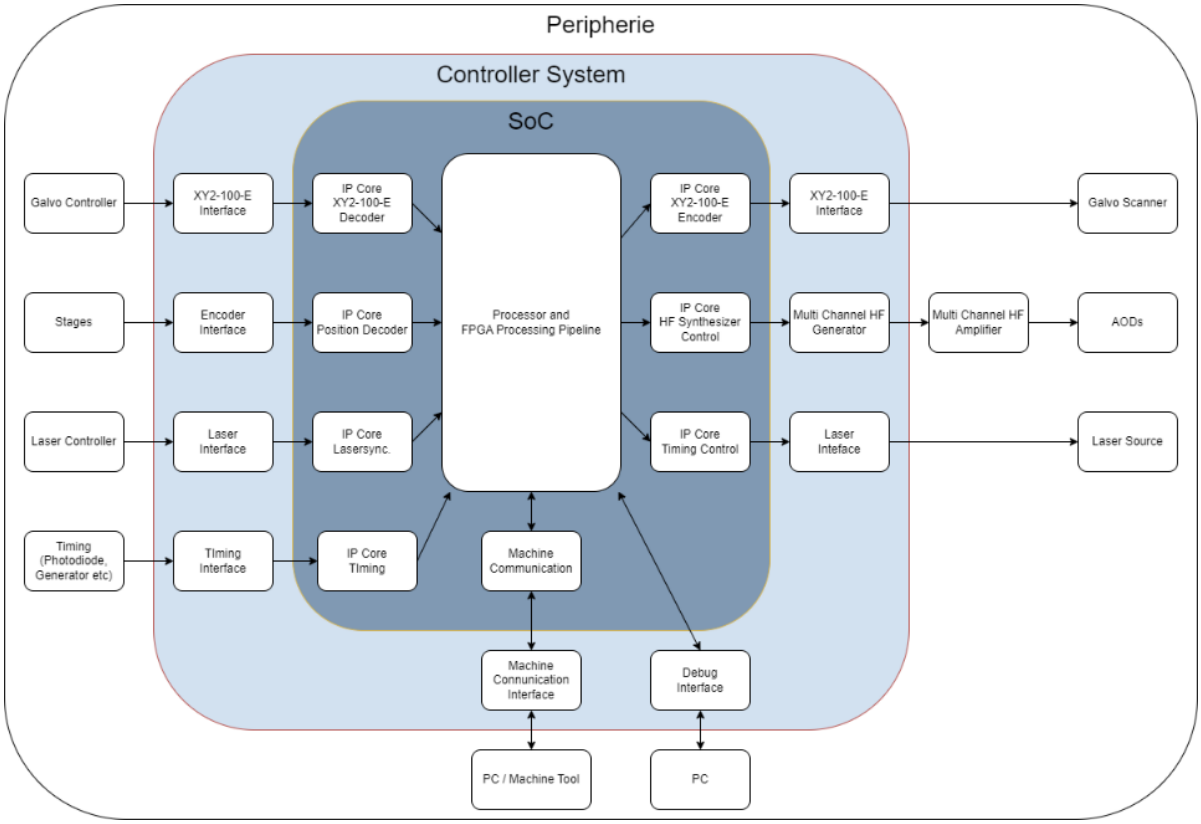

Abbildung 9: Schematische Darstellung des modularen Gesamtkonzepts für die Controllerhardware. Hinterlegt sind die unterschiedlichen Integrationsebenen nach Peripherie, Hardwareinterfaces und Softwareinterfaces (Gateware).

Die Struktur des so definierten und abschließend umgesetzten Gesamtsystems ist Abbildung 9 schematisch dargestellt, wobei der Informationsfluss von links nach rechts erfolgt. Die weiß hinterlegten Bereiche stellen externe Komponenten des Systems in den Laboren des LZH dar. Die hellblau hinterlegten Funktionsgruppen stellen Hardwaremodule dar, welche entweder zur Anpassung elektrischer Größen in das oder aus dem Verarbeitungssystem notwendig sind oder welche selbständige Funktionsgruppen darstellen, die auf Grundlage von Verarbeitungsdaten eigenständig Signale erzeugen. Diese Module sind als elektronische Schaltungen auf eigenständigen Platinen entwickelt worden. Dunkelblau hinterlegt sind Konfigurationen oder Programmteile innerhalb des SoC, welche z.B. für die Kodierung oder Dekodierung von Signalen in Echtzeit notwendig sind oder Programmstrukturen für die Ablaufsteuerung beinhalten.

Task 3.2

Wie in Abbildung 9 aufgezeigt, lässt sich die Controllerentwicklung in drei Ebenen unterteilen:

- Hardwareinterfaces und interne Schnittstellen (Hardware)
- Interfaces und Datenstrukturen innerhalb des FPGAs (Gateware)
- Programmablaufsteuerung und Benutzerschnittstellen (Firmware).

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Entwicklung der Hardwarekomponenten. Im Verlauf des Projektes wurde die Hardware über zwei Iterationen entwickelt. Der erste Aufbau verfolgte den Ansatz der anfänglichen Funktionserstellung und Funktionsüberprüfung, der zweite Schritt den Ansatz der Systemvereinfachung und Integration in ein geschlossenes und eigenständiges System, welches an unseren Partner Femtika zur Implementation und Validierung übergeben werden konnte.

Für die erste Entwicklungsphase wurde zum Schutz der beteiligten Komponenten eine Basisplatine mit abgesicherter Spannungsversorgung und Elementen zum Schutz der

beteiligten Datenleitungen entworfen, mit deren Hilfe die modularen Einzelplatinen mit dem SoC verbunden werden konnten. Abbildung 10 zeigt diese Platine, welche in der 2. Iteration in deutlich vereinfachter Struktur erneut zum Einsatz kam. Dem Schutz der einzelnen Komponenten und insbesondere dem SoC-Modul kam in der Anfangszeit aufgrund der schwierigen Marktverfügbarkeit große Bedeutung zu. Zu sehen sind an der oberen Seite der Platine 18 standardisierte Schnittstellen für die Versorgung und digitale Anbindung der Funktionsmodule über einen 8Bit-Bus. Als systemweite Versorgung stellt die Backplane-Platine 5 V zur Verfügung, welche auf den Untermodulen auf die jeweils benötigte Versorgungsspannung geregelt wird. Die Signalspannungen der in den Schnittstellen enthaltenen Datenleitungen orientieren sich am LVTTL-Standard des SoC-Moduls. An der unteren Kante der Platine befinden sich sechs Schnittstellen, mit denen die Trägerplatine des SoC-Moduls angebunden werden kann. Die Versorgung des Gesamtsystems erfolgte auf dieser Entwicklungsstufe mit Hilfe eines Labornetzgerätes.

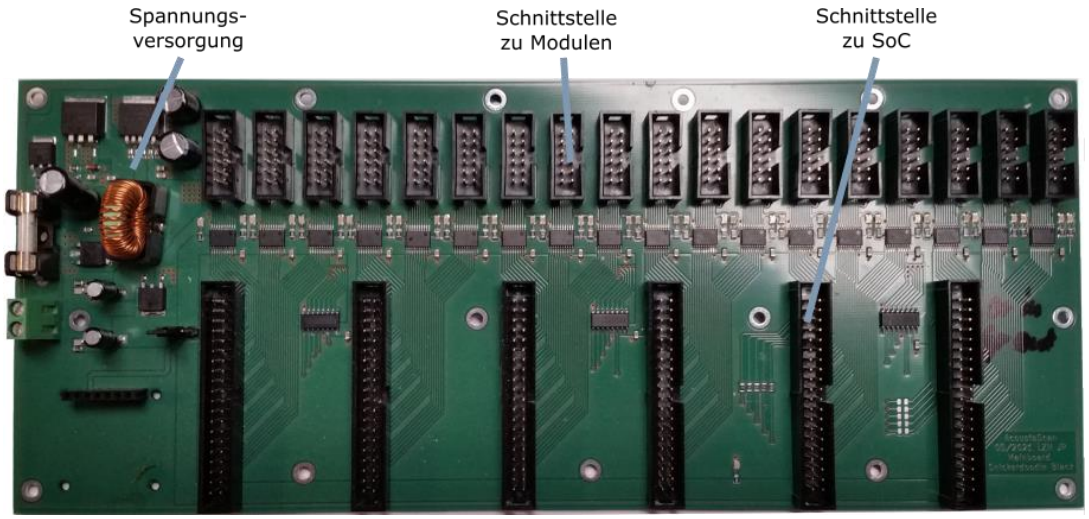

Abbildung 10: Backplane-Platine zur Verbindung und zum Schutz der modularen Komponenten und des SoC. Quelle: LZH.

Als SoC wurde mit dem Zynq XC7Z020 ein Baustein der Firma AMD (ehemals Xilinx) der Serie Zynq 7000 ausgewählt. Diese Komponente stellte einen guten Kompromiss aus Kosten, Leistung, Flexibilität und Softwareunterstützung dar. Um den hardwareseitigen Implementierungsaufwand möglichst gering zu halten, wurde diese Komponente als eigenständiges Modul beschafft, welches die zum Betrieb des Bausteins benötigte Peripherie und spezifische Spannungsversorgung bereitstellt. Aufgrund der gesetzten Rahmenbedingen und der während der Corona-Pandemie schwierigen Marktlage für Halbleiterbausteine wurde ein Modul vom Typ snickerdoodle black des Herstellers krtkl als verfügbare Komponente ausgewählt. Im Verlauf des Projektes unterlag jedoch auch dieses Modul Lieferschwierigkeiten aufgrund gestörter Lieferketten, weswegen auf das etwas leistungsschwächere aber elektrisch kompatible Modul snickerdoodle prime zurückgegriffen wurde.

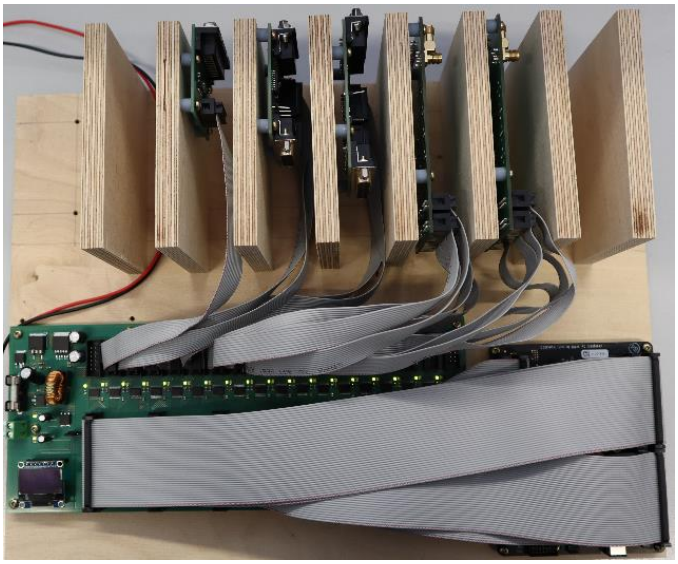

Abbildung 11: Foto der elektronischen Hardware im Holzrahmen. Zu sehen ist die Backplane-Platine mit zahlreichen Datenkabeln. Rechts unten befindet sich das angebundene SoC-Modul auf einer eigenen Trägerplatine. Oben sichtbar sind die Interfaces und Hochfrequenzgeneratoren. Quelle: LZH.

Abbildung 11 zeigt das elektronische Gesamtsystem am Ende der ersten Entwicklungsphase. Am unteren Bildrand ist die Backplane-Platine zu sehen. Unterhalb der breiten Flachbandkabel befindet sich am rechten unteren Rand das SoC-System auf einer eigenen Trägerplatine. Am oberen Bildrand befinden sich Schnittstellenmodule für die Aufnahme und Wiedergabe von elektrischen Signalen für Encoder, Galvanometerscannersystem und Lasersteuerung. Darüber hinaus sind auf der rechten Seite zwei Platinen für die Erzeugung der für die AODs benötigten Hochfrequenzsignale zu sehen.
Wie im Abschnitt AP 2: Optical SetupAP 2: Optical Setup dargestellt, wurde im Projektverlauf ein weiteres AOD-System erworben. Dieses wies gegenüber dem Ausgangssystem nicht nur optisch, sondern auch elektrisch abweichende Eigenschaften auf. Genauer bedeutete dieses, dass jeder der beiden neu erworbenen AODs mit je zwei zueinander synchronisierten Hochfrequenzsignalen angesteuert werden musste, während die ursprünglichen AODs mit jeweils einem Signal betrieben werden konnten. Das zuerst entwickelte Synthesizersystem ermöglichte sehr hohe Systemgeschwindigkeiten und damit einhergehend hohe Ablenkraten. Doch die nun notwendige Synchronisation war hiermit nur mit größerem Aufwand umsetzbar. Daher wurde entschieden ein zweites System zu entwerfen, bei dem die Synchronisierbarkeit mehrerer Signale priorisiert wurde und das darüber hinaus für beide AOD-Systeme in gleichem Maße nutzbar war. Die Synthesizer sind nach dem Prinzip der direkten digitalen Synthese (DDS) realisiert.

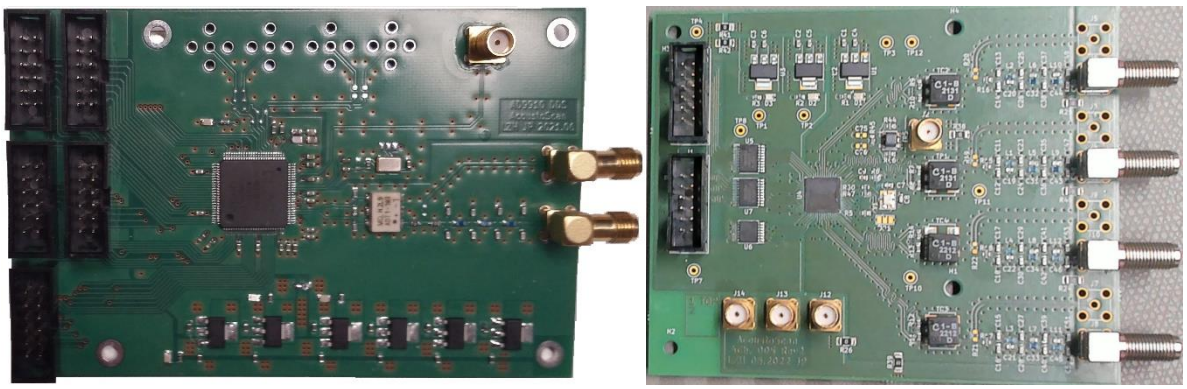

Abbildung 12: Abbildung der im Projektverlauf entwickelten Synthesizer. Links: Einkanaliger Synthesizer. Recht: Vierkanaliger Synthesizer. Quelle: LZH.

Im Zuge der zweiten Iterationsphase wurden die Backplane-Platine deutlich verkleinert und so gestaltet, dass das SoC-Modul direkt auf diese aufgesetzt werden konnte. Ebenfalls wurde der Umfang an Schutzmechanismen verringert, da auf bereits erprobten elektronischen Komponenten aufgebaut werden konnte. Die bisherige Spannungsversorgung durch ein Labornetzgerät wurde durch ein handelsübliches Steckernetzteil ausgetauscht. Hierdurch wurde es möglich, die gesamte Elektronik des Controllersystems in ein 19“-Rackgehäuse mit zwei Höheneinheiten zu integrieren. Die betriebsfertige Hardware innerhalb des Gehäuses, so wie sie an unseren Partner Femtika ausgeliefert wurde, ist in Abbildung 13 dargestellt.

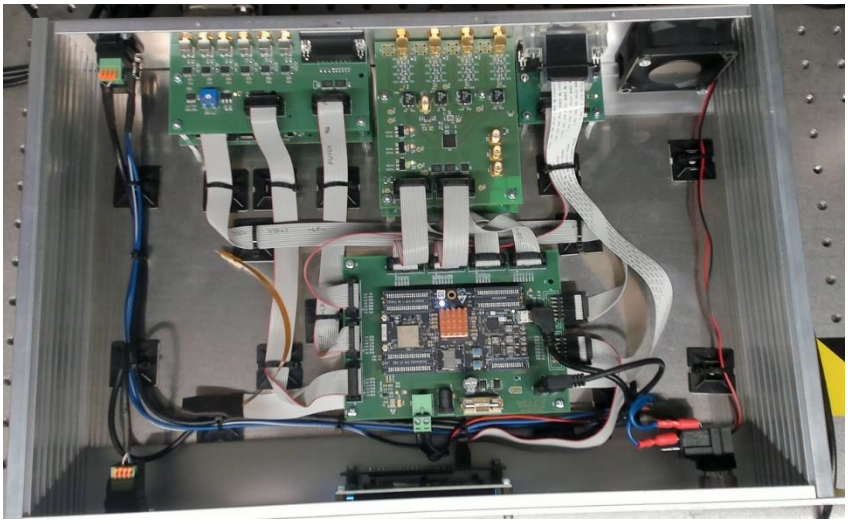

Abbildung 13: Einblick in das geöffnete Controllergehäuse mit eingebrachter Elektronik am Ende der 2. Revisionsphase. Quelle: LZH.

Task 3.3

Im Rahmen der Gatewareentwicklung wurden zwei wesentliche Positionen bearbeitet. Zum einen mussten die von den Interfaces bereitgestellten oder umzusetzenden Signale innerhalb des FPGAs aufbereitet oder ausgewertet werden. Hierfür wurden in der Sprache Verilog Module entworfen, welche die eingehenden elektrischen Signale in Datenstrukturen umsetzen und dann über entsprechende Bussysteme einer weiteren Verarbeitung zuführen konnten. Ebenso mussten Ausgabedaten für die Kommunikation mit Peripheriekomponenten erneut in Steuersequenzen umgesetzt werden. Die Module mussten daher über standardisierte Ein- und Ausgabeschnittstellen verfügen und eine ihnen zugewiesene Funktionalität autonom und effektiv bereitstellen können.
Hierfür treten z.B. Daten über die Hardwareschnittstelle für den Galvanometerscanner in das Verarbeitungssystem ein und werden hierüber elektrisch an das Spannungsniveau des SoC-Moduls angepasst (vgl. Abbildung 9).

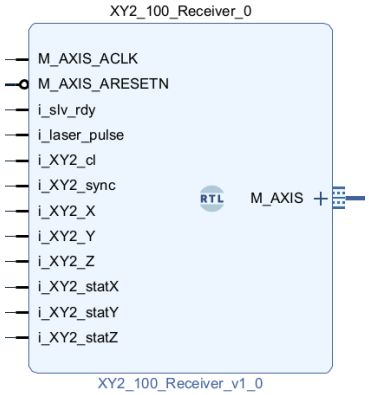

Abbildung 14: Im FPGA angelegtes Modul zur Dekodierung des XY2-100 Protokolls.

Die bereitgestellten Signale werden anschließend parallel vom SoC aufgenommen und durch das in Abbildung 14 dargestellte Modul in der FPGA-Partition dekodiert. Die so extrahierten Nutzdaten werden anschließend über einen Datenbus an nachfolgende Verarbeitungseinheiten weitergeleitet. Auf die gleiche Weise werden bearbeitete Informationen an die im FPGA angelegten Module zur Ansteuerung der Hochfrequenzgeneratoren herangeführt. Die Module realisieren dann selbständig die Kommunikation mit den Generatoren, in dem sie die vom Generator benötigten Registerinformationen bestimmen, das Transportprotokoll formulieren und abschließend die Kommunikation auslösen und überwachen.
Abbildung 15 zeigt eine mögliche Konfiguration des SoC auf, welche für den Betrieb des Controllers in der Laborumgebung des LZH verwendet wurde. Die abschließende Entwicklung der Konfiguration erfolgte mit Hilfe der Entwicklungsumgebung Vivado der Firma AMD (ehemals Xilinx) in der Version 2022.2. Analog zu Abbildung 9 treten auch hier die Systeminformationen von links in das Blockdiagramm ein. In diesem Fall werden die Steuerungsinformationen für den Galvanometerscanners und die Emissionszeitpunkte des Lasersystems aufgenommen. Diese durchlaufen von links nach rechts mehrere Funktionsmodule und werden hierbei konditioniert. Auf der rechten Seite des Diagramms finden sich dann jene Module, die mit den beiden Hochfrequenzgeneratoren verbunden sind und die Datenkommunikation mit diesen steuern. Aufgrund der internen Struktur des Systems kann die für den Durchlauf der Informationen benötigte Zeit als konstant angenommen werden, da die Anzahl der Zyklen für die Datenverarbeitung durch die Struktur der Konfiguration vorgegeben ist.

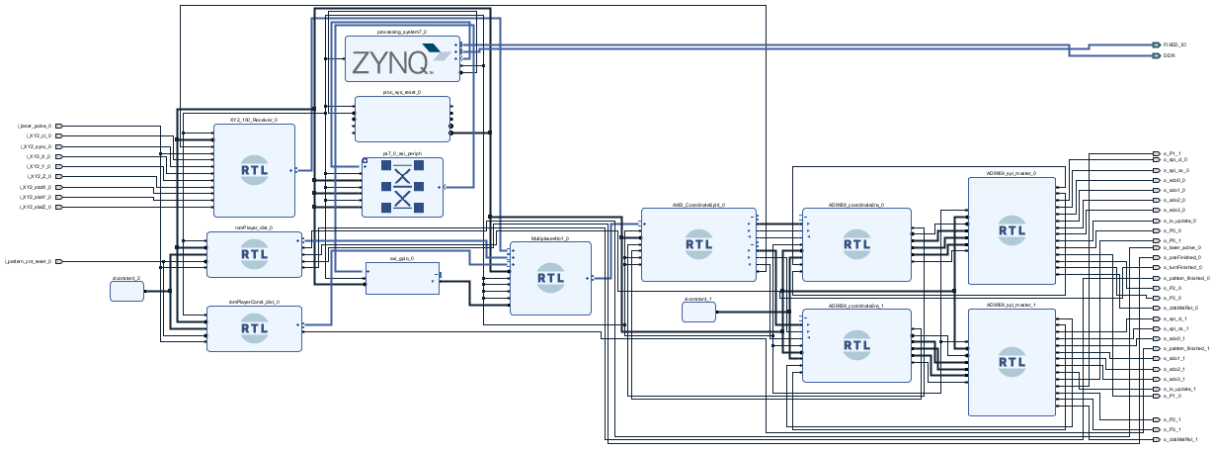

Abbildung 15: Darstellung der Gatewarestruktur innerhalb des FPGAs als Screenshot der Darstellung im Block Design Editor. Zu erkennen ist auch die Einbindung des im SoC enthaltenen Prozessors.

Während die im FPGA angelegten Module untereinander über Datenbusse miteinander verbunden sind und autonom und parallel funktionieren, kann deren Konfiguration sowie der Fluss der Datenströme mit Hilfe des angebundenen Prozessors zur Laufzeit konfiguriert werden. Dabei wurden im Projektverlauf generell zwei Ansätze untersucht, in denen das System entweder nur auf äußere Informationen reagiert oder das System eigene Daten als Prozessgrundlage heranzieht und diese mit dem System synchronisiert austauscht. Hierauf wird weiter untern im Abschnitt AP 4: einzugehen sein.

Task 3.4

Obwohl der Projektverlauf, wie in den eingereichten Zwischenberichten angeführt, deutlichen Verzögerungen unterlag, war es den Projektpartnern dennoch möglich, eine Demonstrationsversion des Controllers zu realisieren und dessen generelle Funktionsfähigkeit nachzuweisen. Als Ergebnis der zweiten Revisionsphase konnte ein kompakter und modularer

Controller erstellt werden, der, eingehaust in ein 19“-Rackgehäuse und ausgestattet mit zahlreichen elektrischen Schnittstellen, sowohl in der Laborumgebung des LZH als auch in der Fertigungsmaschine des Partners Femtika eingebunden werden konnte und zu positiven Prozessergebnissen führte.

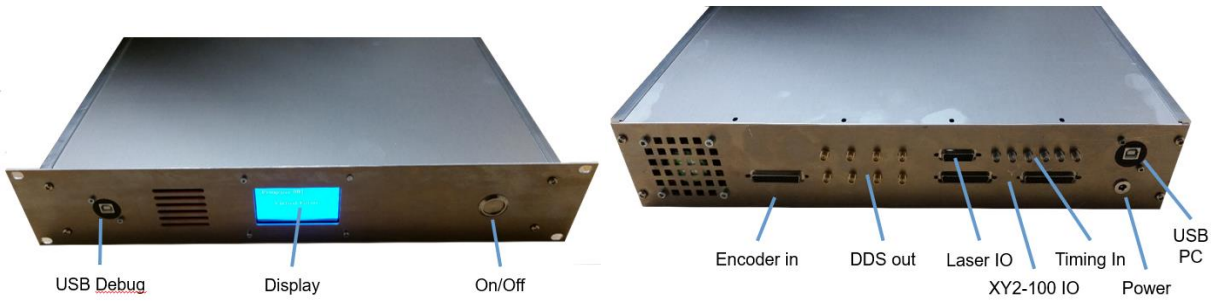

Abbildung 16: Darstellung des Controllers in Front- und Rückansicht. Verdeutlicht sind die am Controller enthaltenen Funktionselemente und Schnittstellen. Quelle: LZH.

Der fertiggestellte Controller ist in Abbildung 16 in Front- und Rückansicht abgebildet

AP 4: Processing and operation strategies development

In Arbeitspaket 4 wurden Strategien und Ansätze identifiziert, welche zur Implementierung von Prozessstrategien in die Controllerhardware führen sollten. Dabei wurden zwei Pfade verfolgt. Zum einen wurden die Prozessanforderungen des Partners Femtika untersucht sowie die dafür benötigten Hardwarekomponenten und Datenschnittstellen betrachtet. Zum anderen wurden in den Laboren des LZH Ansätze und Strategien für eine drastisch beschleunigte Lasermaterialbearbeitung oder für ganz neuartige Strukturierungsabläufe betrachtet.

Aufgrund des weiter oben beschriebenen unstetigen Projektverlaufes und des stark verzögerten Abschlusses des 3. Arbeitspaketes konnten zwar bereits recht früh theoretische Prozessstrategien entworfen und Zielsetzungen formuliert werden. Zur Abschätzung erster Prozessansätze stand, wie im Abschnitt AP 2: Optical Setup angeführt, auch ein PC-basiertes Steuerungssystem zur Verfügung. Die konkrete Umsetzung und Implementierung dieser Strategien musste jedoch unter Einbeziehung der neu entwickelten Hardware und unter Berücksichtigung der sich im Projektverlauf herauskristallisierenden technischen und zeitlichen Randbedingungen betrachtet werden.

Task 4.1

Die für unseren Partner Femtika zu entwerfenden Prozessstrategien konzentrierten sich in erster Linie auf die Beschleunigung von Prozessen im Bereich der Zwei-Photonen-Polymerisation (2PP-Prozess). Die daraus ableitbaren Strategien sind dabei untrennbar mit den Möglichkeiten zur Datenakquise verbunden und damit an die verfügbare Hardware und die bereitgestellten Datenschnittstellen gekoppelt. Auch hier ergaben sich im Verlauf des Projekts evolutionär bedingte Anpassungen der Zielperspektiven, weswegen die Strategieentwicklung in mehrere Richtungen verfolgt wurde.

Als eine dieser Anpassungen muss der Umstand betrachtet werden, dass Femtika abschließend einen optischen Systementwurf ohne Galvanometerspiegel realisiert hat, der aber auf den Prinzipien des vom LZH entworfenen und weiter oben beschriebenen optischen Setup basiert. Vorteilhafter für die Zwecke des Partners war die Kombination eines AOD-Systems mit einem linearen Achsensystem der Firma Aerotech, aus dem heraus sich, aufgrund der geschlossenen Systemstruktur, nur sehr bedingt Informationen für eine Prozessoptimierung ableiten ließen. Auch daher wurde sich auf die Verwendung des XY2-100 Protokolls als wesentliche Informationsquelle verständigt, da sich das vom Femtika

verwendete Steuerungssystem mit Hilfe eines entsprechenden Schnittstellenmoduls zu einer Datenquelle für Galvanometerscanner erweitern ließ. Hierauf aufbauend wurde somit u.a. das Ziel verfolgt, die Steuersignale des Galvanometerscannersystems auf das AOD-System zu übertragen, um so als quasi massefreies drop-in replacement zu fungieren. Beschränkt durch das Datenprotokoll sollte somit eine gesteigerte Ablenkrate von bis zu 100 kspots/s erreicht werden. Um darüber hinaus eine effiziente Verteilung der Laserpulse in größeren Flächen mit höheren Ablenkraten erzielen zu können, sollte ebenfalls eine Strategie erarbeitet werden, bei welcher der Controller eigenständig Ablenkmuster zur Flächenfüllung bereitstellen kann.
Die Ursprüngliche Idee des Projektes, eine Steuerung für die Kombination von Galvanometer und AODs zu realisieren, wurde in einem zweiten Pfad primär von der Seite des LZH verfolgt. Hierbei lag das Augenmerk insbesondere auf der schnellen Lasermaterialbearbeitung mit AODs als eigenständiges Element und in Kombination mit Galvanometerscannern.Eine Darstellung der Strategien mit Blick auf unseren Partner Femtika wird in Abschnitt AP 6: Integration and validation durchgeführt. Im folgenden Abschnitt Task 4.2 sollen zunächst Prozessstrategien aufgezeigt werden, die in erster Linie der Lasermaterialbearbeitung dienen.

Task 4.2

Die zu entwickelnden Prozessstrategien mussten auf Datenquellen aufbauen, die den Partnern gemeinschaftlich zur Verfügung standen. Daher wurden über die Konfiguration der FPGA-Partition Strukturen geschaffen, welche die Auswertung des XY2-100 Protokolls (Galvanometerscannersystem) und die Erfassung des Laserzustandes ermöglichten. Darüber hinaus wurde ein Musterspeicher implementiert, welcher flexibel Koordinateninformationen an das AOD-System emittieren kann. In Verbindung mit externen Timinginformationen konnten somit zwei grundlegende Prozessfunktionen implementiert werden, die in unterschiedlichen Strategien entweder eigenständig oder in Kombination angewendet werden können.
Durch die Auswertung der Positionsinformationen aus dem XY2-100 Protokoll und der Erfassung der Emissionszeitpunkte des Lasersystems wurde es möglich, das AOD-System als schnellen und pulssynchronen Galvanometerscanner zu verwenden, welcher, bedingt durch die Datenrate des Protokolls, bis zu 100 k Positionen pro Sekunde einrichten kann. Beispielhaft sei hier gezeigt, wie in einer Laborumgebung das Firmenlogo des LZH zunächst vektorisiert und anschließend in dieser Form dem Steuerungssystem des verwendeten hurryScan 14 zugefügt wurde. Die Verarbeitung der grafischen Informationen erfolgte mit Hilfe des Programms SAMlight der Firma SCAPS. Die Ausgabe der generierten Steuerdaten wurde durch eine RTC4-Karte des Herstellers Scanlab realisiert. Die von der Karte emittierten Daten wurden anschließend vom Controller aufgenommen und in Hochfrequenzsignale umgesetzt, welche über die angeschlossenen AODs zur Ablenkung der Laserstrahlung führten. Sobald der Controller eine neue Positionsinformation durch die RTC4-Karte in Verbindung mit einer Pulsemission identifizierte, wurde ein entsprechendes Schalfeld aufgebaut.

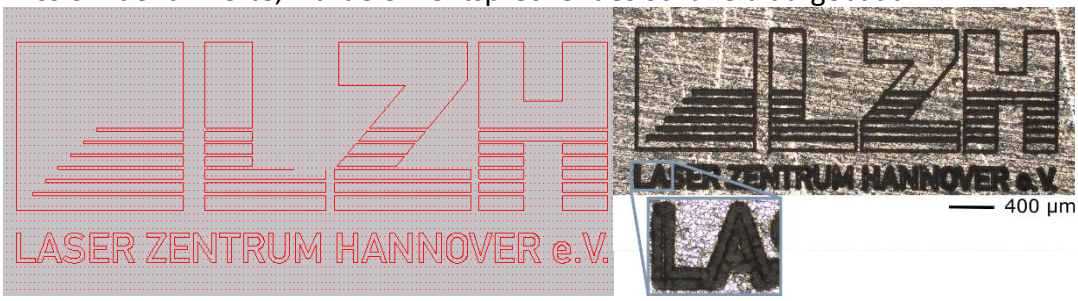

Abbildung 17: Logo des Laser Zentrums Hannover e.V.. Links: Vektorisierte Darstellung des Logos im Programm SAMlight. Rechts: Mit Hilfe von AODs gelasertes Logo auf einem Edelstahlblech.

Abbildung 17 zeigt auf der linken Seite das vektorisierte Logo des LZH und auf der rechten Seite das Ergebnis des Laserprozesses auf einen Stück Edelstahlblech. Der Prozess wurde mit der maximal am Steuerungssystem einrichtbaren Ablenkgeschwindigkeit durchgeführt. Deutlich tritt hervor, dass selbst bei hohen Ablenkraten keine typischen Trägheitsartefakte auftreten und selbst in Phasen großer Ortsbeschleunigung die Pulsabstände im Wesentlichen konstant bleiben. Leider ist aufgrund der in Hard- und Software ablaufenden Berechnungen von Scanlab nicht eindeutig ersichtlich, welche effektiven Beschleunigungs- oder Geschwindigkeitswerte vorliegen. Zudem fügt die Software eine Vielzahl von Waitstates (Delayzeiten) in die Bahnplanung ein, die bei der normalen Verwendung von mechanischen Galvanometerscannern notwendig sind. Diese Zeiten konnten während der Versuche nicht eliminiert werden und verfälschen somit das Ergebnis. Daher kann die gezeigte Abbildung nur als phänomenologisches Beispiel für mögliche Verwendungsszenarien dienen.
Die Erzeugung der weiter oben erwähnten Füllmuster zur Bearbeitung größerer Flächenareale ist prinzipiell ebenfalls unter Verwendung des XY2-100 Protokolls möglich. Hier stellt jedoch die Beschränkung der Bandbreite dieser Datenquelle ein Hindernis dar. Vielmehr bietet es sich an, wiederkehrende Muster und deren Transformationen aus einem Musterspeicher des Controllers abzuleiten, der synchron zur Laserquelle ausgelesen werden kann. Hierdurch konnten in der aktuellen Systemkonfiguration des Controllers Frequenzsprungraten von über 1 MHz gemessen werden.
In Kombination mit AOD-Systemen muss jedoch ebenfalls deren Festkörperschallgeschwindigkeit sowie deren maximal zulässige optische Energiedichte betrachtet werden. Denn die Ausdehnung des Bereiches, in dem ein Laserpuls mit einem gegebenen Strahldurchmesser innerhalb des AOD gleichartig gebeugt wird, ist abhängig von dessen Schallgeschwindigkeit und der Rate, mit der die Schallfrequenz geändert wird. Für die vom Projektpartner Femtika verwendete Systemkonfiguration liegt diese Rate bereits in der Größenordnung von etwa 100 kHz. Daher wurden die auf Musterspeicher basierenden Prozesse zunächst ebenfalls auf diese Größenordnung bezogen.
Beispielhaft sei diese Prozessstrategie in Abbildung 18 aufgezeigt. Ein Pikosekundenlaser vom Typ Hylase 25 der Firma neoLASE (Zentralwellenlänge: 1064 nm, Pulsdauer: < 20 ps, Repetitionsrate: bis zu 40 MHz, Pulsenergie: > 125 µJ, Ø-Leistung: > 25 W, M^2 < 1.3) emittiert Laserpulse mit einer Repetitionsrate von ca. 100 kHz. Beginnend bei einem Ausgangszustand des Controllers bedingt jede Emission des Lasers einen Sprung innerhalb des Musterspeichers und damit eine Folge von Ablenkungen, die ein vordefiniertes Muster konstituieren. Links in der Abbildung ist das entstandene Punktraster aus 20 mal 20 Einzelpunkten auf einer Edelstahlfolie gezeigt. Die Kantenlänge des Musters beträgt gerundet 2,56 mm. Rechts in der Abbildung ist das Oszillogramm der Laserpulse dargestellt, welches eine Prozessdauer von rund 3,9 ms für 400 Einzelpulse ausweist.

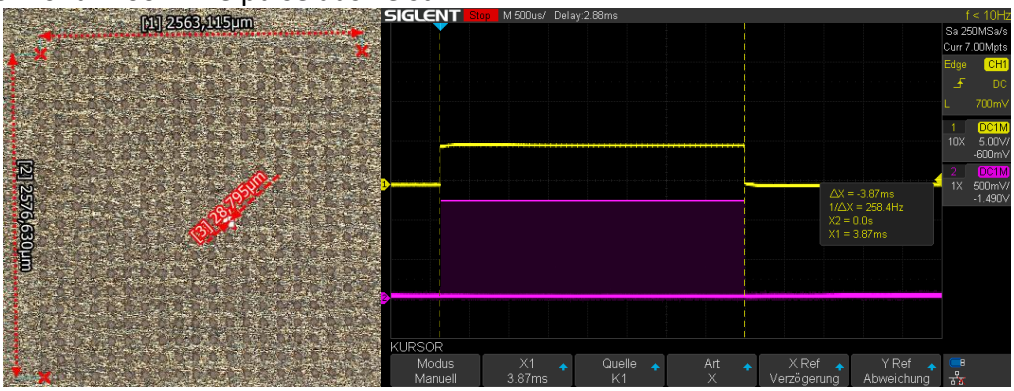

Abbildung 18: Ergebnis eines Musterspeicher basierten Prozesses. Links: Mit einem Pikosekundenlaser vom Typ Hylase 25 der Firma neoLASE erzeugtes Punktmuster aus 20 mal 20 Einzelpulsen auf Edelstahlblech. Rechts: Oszillogramm der Laserpulse. Prozessdauer: ca. 3,9 Millisekunden. Quelle: LZH.

Als Kombinationsstrategie sei als Drittes die Überlagerung einer 1D Bewegung (ausgeführt vom Galvanometerscannersystem) mit einem 1D Muster (aus dem Musterspeicher des Controllers) aufgezeigt. Das gewählte Muster repräsentiert eine Häufigkeitsverteilung von Laserpulsen entlang der AOD-Achse und wurde in einem Vorprozess berechnet. Hierdurch wurde es in diesem Beispiel möglich, bei kontinuierlicher Nutzung jedes verfügbaren Laserpulses ein Tiefenprofil zu generieren, während der Laserfokus vom Galvanometerscanner dazu senkrecht und gleichförmig über das Werkstück verfahren wurde.

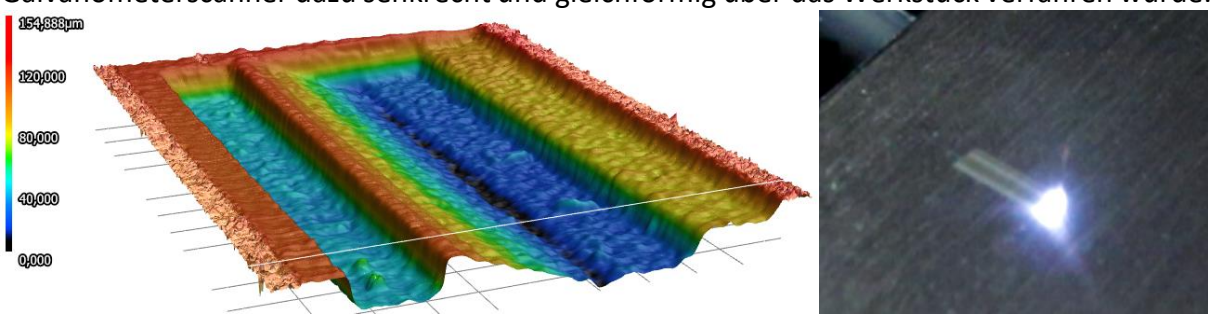

Abbildung 19: Links: Durch UKP-Laserbearbeitung erzeugtes Tiefenprofil in einem Edelstahlblech. Während eine Galvanometerscannerachse die Laserstrahlung von links oben nach rechts unten ablenkt, erzeugt senkrecht dazu ein AOD die gewünschte Pulsdichtenverteilung. Rechts: Standbild des aktiven Ablationsprozesses. Quelle: LZH.

Der Prozess und das Ergebnis der Überlagerungsstrategie als Foto und als Profildarstellung sind in Abbildung 19 dargestellt. Deutlich tritt in der Profildarstellung die diskrete Tiefenstruktur hervor, die sich als Resultat ganzzahliger Vielfacher von Einzelpulsen ausbildet.

Als Resultat aus dem 4. Arbeitspaket kann geschlussfolgert werden, dass die neuartige Strahlablenkung für die Lasermaterialbearbeitung mehrere Vorteile bietet. Wie bereits weiter oben beschrieben wird es hiermit bei idealer Prozessstrategie möglich, jeden verfügbaren Laserpuls für einem Materialabtrag zu verwenden. Mit Blick auf Abbildung 18 bietet sich ebenfalls die Möglichkeit, die Folgen des Energieeintrags mit hoher Repetitionsrate, die lokale Erwärmung des Werkstückes, zu reduzieren. Durch die Fähigkeit des Systems jeden einzelnen Laserpuls innerhalb des Bildbereiches der AODs platzieren zu können, kann ein vorgegebenes Abtragsmuster thermisch optimiert angewendet und somit ungewollte lokale Erwärmungen verringert werden. Eine derartige Beeinflussung der eingetragenen Wärmeverteilung ist bislang mit keinem am Markt verfügbaren Ablenksystem möglich.

AP 6: Integration and validation

Während eines mehrtägigen Besuches des LZH bei unserem Partner Femtika in Vilnius zum Ende der Projektlaufzeit konnte die Integration und die Validierung des Controllers innerhalb der Fertigungsmaschine durchgeführt werden.

Integration

Aufgrund der im Vorfeld definierten Schnittstellen gestaltete sich die physische Einbindung des Controllers in die bestehende Fertigungsmaschine problemfrei. Die Ansteuerbarkeit des AOD-Systems konnte umgehend gezeigt werden. Es zeigte sich jedoch auch, dass das zur Erzeugung des XY2-100 Protokolls verwendete Schnittstellenmodul der Firma Aerotech nicht mit dem im Rahmen des Vorhabens konstruierten Controller kompatibel war. Diese Inkompatibilität zeigte sich jedoch ebenfalls gegenüber anderen Komponenten mit dieser Eingangsschnittstelle und konnte nicht auf ein Fehlverhalten des entwickelten Controllers zurückgeführt werden. Es war keinem der Projektpartner möglich, die Ursache für die nicht einrichtbare Kommunikation zu identifizieren. Daher wurde sich darauf verständigt, dieses Problem zu einem späteren Zeitpunkt erneut zu adressieren. Die generelle Funktionstüchtigkeit des Controllers konnte in der Folge des Besuchs in den Laboren des LZH

erneut bestätigt werden, weswegen die Ursache in einer Fehlfunktion des Schnittstellenwandlers der Firma Aerotech angenommen wird.

Validierung

Die Validierung der Funktionstüchtigkeit des Controllersystems wurde ebenfalls im Rahmen des Projekttreffens in Vilnius durchgeführt. Als Beispiele seien hier drei demonstrierte Prozesse auf Basis der Zwei-Photonen-Polymerisation aufgezeigt.
Unter Verwendung des Musterspeichers konnte in einem ersten Prozess ein 3D-Volumenkörper des Firmenlogos des Partners Femtika erzeugt werden. Hierfür wurde das Firmenlogo zunächst in Koordinateninformationen transformiert und anschließend in den Musterspeicher des Controllers übertragen. Über zusätzliche Statusleitungen wurden die Fertigungsmaschine und der Controller miteinander synchronisiert und anschließend der Probenkörper schichtweise und pulssynchron in mehrere Schichten belichtet. Abbildung 20 zeigt den Probenkörper, wie er während des Erstellungsprozesses durch das Kamerasystem der Fertigungsmaschine zur Prozessbeobachtung gesehen werden konnte.

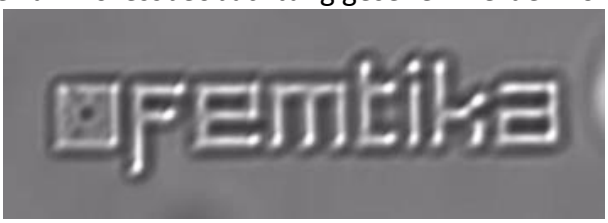

Abbildung 20: Durch einen 2PP-Prozess erstellter Volumenkörper des Firmenlogos des Projektpartners Femtika. Die Ansicht erfolgte über ein systeminternes Mikroskop zur Prozessüberwachung. Quelle: Femtika.

Zur Demonstration von Möglichkeiten zur schnellen Flächenprozessierung wurden in einem zweiten Prozess Kachelmuster in den Musterspeicher übertragen, die zur Belichtung eines kleinen Flächenareals verwendet wurden. Das Achsensystem der Fertigungsmaschine verfuhr nach jeder Flächenbelichtung das zu polymerisierende Material an eine neue, angrenzende Stelle, an der eine neue Kachel belichtet werden konnte. Durch die Aneinanderreihung dieser Muster konnten sehr schnell größere Flächen belichtet werden. Dieses Verfahren kann als verbreiterter Fokus bezeichnet werden, durch den die verfügbare Laserleistung möglichst vollständig auf eine große Fläche verteilt werden soll. Eine alternative Realisation bestünde in der kontinuierlichen Bewegung des Achssystems bei gleichzeitiger Musterdarstellung durch die AODs. In dem präsentierten Beispiel wird die Laseremission während des Verfahrens des Linearachsensystems jedoch unterbrochen. Abbildung 21 zeigt einen Ausschnitt von 3x4 Kacheln aus einer größeren Fläche. Der geringfügige Versatz der Kacheln gegeneinander kann auf die sehr hohe Beschleunigung und auf eine nicht optimale Einrichtung des Achssystems zurückgeführt werden. Hier ist ein deutliches Optimierungspotential erkennbar. Gleichzeitig wird deutlich, dass der Gesamtprozess eine deutliche Beschleunigung der Belichtungsrate sowie hohe Positionierungsgenauigkeit bietet. Denn jeder Belichtungspunkt einer Kachel kann mit der eingerichteten Repetitionsrate des Lasers (hier 100 kspots/s) erstellt werden. Die Position jedes Belichtungspunktes wird weitergehend über eine Kalibration an die verwendete Abbildungsoptik angepasst. Die Prozessdauern und die Positionsgenauigkeit werden auf diese Weise primär durch die Beschleunigungsphasen und die Positionsgenauigkeit des linearen Achsensystems bedingt.

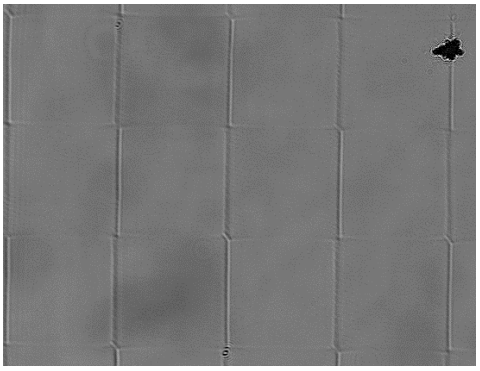

Abbildung 21: In einem 2PP-Prozess erzeugte geschlossene Fläche durch Aneinanderreihung von einzelnen Kacheln. Quelle: Femtika.

Als drittes Beispiel wurde eine Multispotanwendung demonstriert. Hierbei sollte die Laserleistung möglichst simultan auf mehrere einzelne Bearbeitungsfokusse abgelenkt werden, welche jeweils einem eigenständigen Fertigungsvolumen zugeordnet sind. Hierfür wurden mit Hilfe der AODs die einzelnen Laserpulse in schneller Folge auf ein 7 mal 7 Punktraster abgebildet. Während diese 49 Einzelfokusse statisch dargestellt wurden, bewegte das Linearachsensystem das durch die Laserstrahlung zu polymerisierende Harz mäanderförmig durch den Prozessbereich und veränderte schichtweise den Abstand zum abbildenden System. Hierdurch wurden die sich verjüngenden Grundflächen on 49 Pyramiden parallel belichtet. Aufgrund der beschränkten Tiefenschärfe und des geringen Blickfeldes der verwendeten Optik sind in Abbildung 22 jedoch nur 25 der 49 Pyramiden gleichzeitig in Aufsicht zu erkennen.

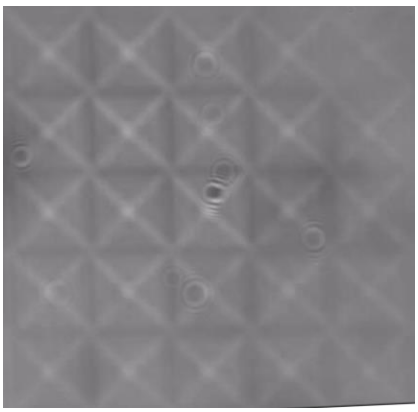

Abbildung 22: Darstellung eines Bildausschnittes mit 25 Pyramiden, welche zeitgleich mit Hilfe eines 7x7 Multispots polymerisiert wurden.

Auf diese Weise konnte die Funktionsweise des Controllers sowie die Anwendbarkeit einer Auswahl an Prozessstrategien in Verbindung mit einem 2PP-Prozess aufgezeigt und validiert werden.

Wissenschaftliche Arbeiten

Im Rahmen des Teilprojektes wurde eine studentische Abschlussarbeit erfolgreich durchgeführt:

- „Kompensation der spektralen Strahlaufspaltung in akustooptischen Deflektoren“. Bachelorarbeit (08.2020 – 02.2021)

Bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Nach bestem Wissen und Gewissen sind dem Zuwendungsempfänger während des Vorhabens keine Forschungs- und Entwicklungsergebnisse bei anderen Stellen bekannt geworden, die für die Durchführung und Zielsetzung des Vorhabens relevant gewesen wären.

Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NABF

Aufbauend auf den Ergebnissen des Vorhabens ist geplant, weitere Veröffentlichungen zu realisieren. Während der Laufzeit des Teilprojektes wurden zwei Veröffentlichungen durchgeführt:

- Patrick A. Taschner et al. "Divide-and-conquer laser beam deflection system: Fast, wide-ranging, and flexible", Proc. SPIE 11268, Laser-based Micro- and Nanoprocessing XIV, 112681G (2 March 2020); https://doi.org/10.1117/12.2546162
- Jan Perwas et al. "Acousto-optic pulse-selective laser beam deflection for micromachining with ultrashort pulsed lasers", Proc. Lasers in Manufacturing Conference 2023; https://www.wlt.de/sites/default/files/2023-09/Contribution_1302.pdf. Letzter Aufruf 09.10.2023.
- Auf den erlangten Ergebnissen aufbauend sind zukünftig weiterführende Veröffentlichungen geplant. Insbesondere im Anwendungsbereich des entwickelten Strahlablenkungssystems ergeben sich zahlreiche Möglichkeiten für die Nutzung neuartiger Prozessstrategien, die als veröffentlichungsrelevant eingestuft werden.

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind das erworbene AOD-System mit einer Zentralwellenlänge von 532 nm sowie elektronische und mechanische Komponenten (SoC-Module, DDS-Halbleiter, Gehäuse etc.) zur Entwicklung und Realisierung des Hardwarecontrollers für die Systemsteuerung. Ebenso wurden Positionen für die Fertigung elektronischer Schaltungen beschafft.

Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Für die Erreichung der geplanten Projektziele wurden die Arbeiten in angemessener und notwendigerweise durch das LZH verrichtet. Nur durch die enge Absprache und Zusammenarbeit aller Projektpartner konnten die aufgezeigten Ergebnisse erzielt werden. Ohne die Zuwendungen des Förderträgers hätte das LZH als eingetragener Verein die oben aufgeführten Ergebnisse nicht erbringen können. Die im Projekt entwickelten optischen Strukturen, elektronischen Komponenten und Prozesse ermöglichen eine deutliche Effizienzsteigerung moderner UKP-Laserprozesse.

Der voraussichtliche Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses

Das LZH, in seiner Funktion als Forschungszentrum, verwertet die aus dem Projekt gewonnene Expertise in erster Linie in Form von Wissenstransfer oder die Ausgestaltung von industriellen oder wissenschaftlichen Forschungsvorhaben. Hierauf wird in den Abschnitten Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende und Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende genauer eingegangen.

Die im Projektverlauf gewonnene Expertise dient als Grundlage für eine weitergehende Unterstützung der beteiligten Projektpartner und kann somit wesentlich zu deren wirtschaftlichem Erfolg beitragen. Aus Sicht des LZH bilden die erlangten Forschungsergebnisse und Kenntnisse darüber hinaus eine solide Basis zur Initiierung weiterführender industrieller oder wissenschaftlicher Forschungsvorhaben und Kooperationsprojekte. Teile der erworbenen Kenntnisse gingen in die Projektskizze neoPEM ein, in der zur Realisation einer effektiven Wasserstoffelektrolyse Membranfolien mit bis zu 2 Millionen Löchern pro Sekunde gebohrt werden sollten. Das Thema wurde aufgrund einer stark überzeichneten Fördermaßnahme leider abgelehnt. Dennoch wird dieses zukunftsweisende Thema vom LZH weitergehend verfolgt. Ebenso fließt die erworbene Expertise in die Ausgestaltung und Durchführung von Industrieaufträgen im Bereich zwischen Machbarkeitsuntersuchungen bis Kleinserien ein.

Ebenso besteht für das LZH die Möglichkeit, die erlangten Kenntnisse vermittels der LZH Laser Akademie GmbH für den kommerziellen Wissenstransfer heranzuziehen sowie im Rahmen der wissenschaftlichen Lehre und Ausbildung gewinnbringend einzubringen.