

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil I – Kurzbericht (max. 2 Seiten)

Vorhabenbezeichnung: WIR! – LASER.region.AACHEN – Kombinierte Laserverfahren in der industriellen Fertigung (KoLa)	
Zuwendungsempfänger: Clean-Lasersysteme GmbH	Förderkennzeichen 03WIR4604E
Projektleiter*in Jérôme Schätzle	Laufzeit 01.01.2023 – 31.12.2024

Anstatt einzelne Laserprozesse zu optimieren, sollten im Rahmen des LrA-Projekts KoLa verschiedene Laserverfahren zu einem Gesamtprozess verkettet werden. Dabei sollten technische und unternehmerische Schnittstellenproblematiken erkannt und abgebaut werden, um so den aktuellen und zukünftigen Anforderungen an die Lasertechnik, beispielsweise im elektrifizierten Antriebsstrang oder in der Wasserstoffindustrie, optimal vorbereitet entgegenzutreten zu können. Aktuell werden hauptsächlich konventionell gefertigte Halbzeuge in der Fertigung verwendet und zu größeren Baugruppen zusammengesetzt. Durch die sinnvolle Verkettung verschiedener Laserprozesse in der Fertigung können nicht nur Zeit und Ressourcen eingespart werden, sondern mit der richtigen Grundlage in Form einer detaillierten Übersicht der verfügbaren Verfahren, ihrer Kombinationsmöglichkeiten und Schnittstellenherausforderungen kann ohne große Anlaufschwierigkeiten auf neue Anforderungen reagiert werden.

Das LrA-Projekt KoLa wurde in zwei Handlungsstränge aufgeteilt. Im ersten Handlungsstrang „Prozesslandkarte“ wurden die im Konsortium und in der LASER.region.AACHEN verfügbaren Laserprozesse sowie ihre Anwendungsbereiche erhoben und eine Online-Übersicht (Prozesslandkarte) entwickelt, in der diese Informationen und zugehörige Schnittstellenherausforderungen dargestellt werden können. Dies bietet die Möglichkeit für Unternehmen der Region oder auch anderer Regionen, passende Kooperationspartner für ihre Vorhaben zu finden und mit diesen in Kontakt zu treten. Langfristig kann die Prozesslandkarte nicht nur in der LrA Anwendung finden, sondern als Vorlage für weitere Bündnisse dienen, die eine informative Plattform zur Kommunikation und Kooperation benötigen.

Im zweiten, technischen Handlungsstrang wurde ein Demonstratorbauteil entwickelt, anhand dessen die Verkettung dreier in der LrA verfügbaren Unternehmen bzw. Laserprozesse zur Fertigung gezeigt und erprobt werden sollte. Es wurden die drei Prozesse Laser Powder Bed Fusion (LPBF), Laseroberflächenbearbeitung und Laserschweißen verkettet. Im Projektverlauf wurden verschiedene, auf Kundenbauteilen basierte Demonstratoroptionen erörtert. Am Ende entschied sich das Konsortium für eine Fahrradmuffe – ein abgeändertes Kundenbauteil des Projektpartners Aconity. Das Bauteil wurde mit innenliegenden Lattice-Strukturen zur Materialeinsparung und Stabilitätserhöhung LPBF-gefertigt, im nächsten Prozessschritt sollte die Oberfläche als Schweißvorbereitung mittels Laserbearbeitung geglättet und anschließend mit einem konventionell gefertigten Halbzeug laserverschweißt werden.

Im Rahmen des technischen Handlungsstrangs hat cleanLASER gemeinsam mit dem Fraunhofer ILT die Optimierung der 3D-Bahnplanung mittels Roboter-Handlingsystem untersucht. Dazu wurden zwei Ansätze verfolgt. Das ILT verfolgte eine vollautomatisierte Variante, bei der die 3D-Bahnplanung auf Grundlage der 3D-Bauteildaten automatisch durchgeführt und an den Roboter übermittelt wird. Diese Variante wäre für komplexe Anwendungen nutzbar, die etwa 20 % aller Anwendungen ausmachen. cleanLASER verfolgte parallel eine einfachere, kostengünstigere Lösung, die für die weniger komplexen, restlichen etwa 80 % aller Anwendungen nutzbar ist. Bei dieser Variante wird das Bauteil „on the fly“ bearbeitet. Die Positionsdaten des Roboters werden dabei in Positionssignale für die RTC-Karte umgewandelt. Der Werker muss die Roboterbahn grob vorausplanen, der Ausgleich der Roboterbewegung während der laufenden Scanbewegung erfolgt automatisch. Die zugehörigen Tests wurden anhand einer 2D-Bearbeitung durchgeführt, sind aber auch teilweise auf bestimmte 3D-Oberflächen übertragbar. Im Rahmen des Projekts wurde die 3D-Bearbeitung zwar nicht abschließend durchgeführt, jedoch wurde die Roboterschnittstelle für die On-the-fly-Bearbeitung implementiert und in Betrieb genommen, wodurch die Minimalvoraussetzung für die großflächige 2D-Bearbeitung von Konturen mittels Roboter geschaffen wurde. In Zusammenarbeit mit der Firma ModuleWorks GmbH wurden mögliche Umsetzungsstufen einer 3D-Bahnplanung diskutiert. Des Weiteren wurde ein optisches System mit integrierter Z-Lagenanpassung ausgelegt und konstruiert. Die Kombination aus vorbereitetem Handling-Roboter und optischem System mit automatischer Fokusanpassung legt den Grundstein für die folgende Bearbeitung dreidimensionaler Bauteile. Diese soll im geplanten Folgeprojekt WIR! – LASER.region.AACHEN – Innovative und intuitive Interfaces zur 3D-Bahngestaltung von Laserprozessen (LrA-In³D) weiterentwickelt werden.

Die Integration der Bearbeitungsoptik in ein flexibles, robotergeführtes System führt zu einer starken mechanischen Beanspruchung der Prozessfaser. Dies kann wiederum einen Faserbruch verursachen. Zur Erhöhung der Prozess- und Personensicherheit ist die Einführung einer Faserbruchüberwachung sinnvoll. Im Projekt wurden zwei verschiedene Verfahren zur Faserbruchüberwachung getestet. Eine Faser mit zwei Kupferdrähten zur Bruchüberwachung konnte den Bruch in einem Zerstörversuch nicht anzeigen. Die beiden Kupferdrähte sind beim Bruch verschmolzen und haben durch den Kurzschluss im gebrochenen Zustand den Laser nicht abgeschaltet. Es kam zu einem Faserabbrand, der, wie im unüberwachten Zustand, manuell gestoppt werden musste.

Eine Faser mit einem Kupferdraht und einem silberbeschichteten Nylonfaden zur Bruchüberwachung hat den Faserbruch verlässlich angezeigt. Der verwendete CL 300-Laser hatte vor dem Bruch eine Ausgangsleistung von ca. 240 W. Beim Faserbruch wurden 150 W freigesetzt, die Strahlquelle wurde in unter fünf Sekunden ausgeschaltet und eine Fehlermeldung angezeigt. Ein sich in der Faser ausbreitender Brand wurde vermieden. Diese Variante kann im Folgeprojekt LrA-In³D verwendet und weiter getestet werden.

Insgesamt wurden die Projektziele weitestgehend erreicht. Die Prozesslandkarte wurde erstellt und mit Daten einiger Bündnispartner gefüllt. Der Demonstrator wurde entwickelt und auskonstruiert. Seine Fertigung entlang der Prozessverkettung von LPBF, Laseroberflächenreinigung und -strukturierung sowie Laserschweißen konnte aufgrund von Budget- und Kapazitätsengpässen zum Ende des Projekts nicht vollständig durchgeführt werden. Die Vorversuche zur Demonstratorentwicklung belegen aber die Durchführbarkeit.

Die Erkenntnisse des Projekts dienen außerdem als Grundlage für das geplante Folgeprojekt In³D (WIR! – LASER.region.AACHEN – Innovative und intuitive Interfaces zur 3D-Bahngestaltung von Laserprozessen).

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil II – Eingehende Darstellung (max. 20 Seiten)

Vorhabenbezeichnung: WIR! – LASER.region.AACHEN – Kombinierte Laserverfahren in der industriellen Fertigung (KoLa)	
Zuwendungsempfänger: Clean-Lasersysteme GmbH	Förderkennzeichen 03WIR4604E
Projektleiter*in Jérôme Schätzle	Laufzeit 01.01.2023 – 31.12.2024

1 Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse des Teilvorhabens

Die LASER.region.AACHEN umfasst und vernetzt Unternehmen aus zahlreichen Wissensgebieten, Branchen und Technologien aus dem Bereich der Photonik. Ohne Untersuchung der verschiedenen Schnittstellen und eine Erhebung der Kollaborationsmöglichkeiten sowie deren technischen Herausforderungen sind die Ziele innerhalb dieser komplexen Bündnisstruktur nicht zu erreichen. Für cleanLASER bot sich mit dem Starterprojekt KoLa die Möglichkeit, die Bündniszusammenarbeit zu intensivieren und eigene Kompetenzen in der Laserreinigung und -oberflächenmodifikation sowie dem Sondermaschinen- und Anlagenbau einzubringen.

Gemäß dem Stand der Technik werden aktuell die einzeln entwickelten Laserbearbeitungsverfahren unabhängig voneinander weiterentwickelt und je nach Bedarf in unterschiedlichen Reihenfolgen miteinander kombiniert. Die dabei entstehenden Herausforderungen an den jeweiligen Schnittstellen lassen den Einsatz kombinierter Verfahren aus Anwendersicht unwirtschaftlich erscheinen. Diese Herausforderungen können sowohl bei der Informations- und Datenübertragung zwischen den Prozessen auftreten, als auch technischer Natur sein. Dazu zählen wärmebedingte Verzüge sowie die Einspannung, Referenzierung und Bahnplanung für freigeformte Bauteile, oder metallurgische Fehler in den Verbindungsstellen, die eine reibungslose Verfahrenskombination erschweren. Das Verbundprojekt LrA KoLa hebt sich vom Stand der Technik ab, indem die Kombination der Verfahren neu gedacht wird. Technische Störgrößen und Hindernisse an den Schnittstellen

sollten gezielt erhoben und untersucht werden. Zudem sollen die Verfahren nicht einzeln, sondern als Gesamtprozess betrachtet und weiterentwickelt werden.

Verschiedene Laserverfahren, beispielsweise Laserschweißen, Laser Powder Bed Fusion (LPBF), Laseroberflächenbearbeitung, Laserschneiden, sind im Bündnis zwar vertreten, werden bisher jedoch kaum kombiniert. Das Projekt KoLa umfasste daher die folgenden, in zwei Handlungsstränge unterteilten Ziele. Im ersten Handlungsstrang „Prozesslandkarte“ sollten die in der Region verfügbaren Laserverfahren sowie die zugehörigen Systeme/Anlagen und deren Kombinationsmöglichkeiten erhoben und auf einer digitalen Plattform zugänglich gemacht werden. Darauf aufbauend sollte im technischen Handlungsstrang die Entwicklung eines Demonstratorbauteils erfolgen, zu dessen Herstellung eine Kombination verschiedener Laserverfahren benötigt wird. Parallel zur Demonstratorentwicklung sollten hard- und softwaretechnische Schnittstellenproblematiken zwischen den einzelnen Verfahren ermittelt sowie Möglichkeiten, diese Problematiken zu beheben, erarbeitet werden.

Das Gesamtziel war somit, die gemeinsame Forschungsarbeit unter den Bündnispartnern neu zu definieren. Anstatt einzelne Laserprozesse zu optimieren, sollten technische Schnittstellenproblematiken abgebaut werden, um dadurch den zukünftigen Anforderungen der Lasertechnik, beispielsweise im elektrifizierten Antriebsstrang oder der Wasserstoffindustrie, vorbereitet entgegenzutreten zu können.

1.1 Handlungsstrang „Prozesslandkarte“

Ziel des ersten Handlungsstrangs „Prozesslandkarte“ war die Erstellung einer Online-Plattform, auf der die im Bündnis vertretenen Laserverfahren sowie deren Anwendungsbereiche, Verkettungsmöglichkeiten sowie mögliche Schnittstellenherausforderungen strukturiert und detailliert abgebildet sind.

Zunächst wurde ein Fragebogen erstellt, der die Laserprozesse, Lasersysteme und Optiken sowie mögliche Bauteilparameter abfragte. Dieser wurde unter den Projektpartnern verteilt und ausgefüllt. Auf dieser Grundlage sowie basierend auf Workshops und deren Feedback bzgl. Schnittstellen bzw. Kombinationsmöglichkeiten der verschiedenen Laserprozesse wurde eine Online-Abfrage erstellt und von den Partnern getestet.

Der erste Fragebogen erhob die wichtigsten und für mögliche Kollaborationen relevanten Informationen eines jeden Unternehmens:

- Kontaktdaten
- Kurzbeschreibung des Unternehmens
- Definition des Laserprozesses
- Auflistung der abgedeckten Verfahrensgruppen nach DIN 8580
- Verfügbare System-/Anlagentypen
- Mögliche Folgeprozesse

- Mögliche Schutzgase
- Eingesetzte Optiktypen
- Eingesetzte Lasermodi
- Eingesetzte Lasertypen
- Intensitätsverteilung des Laserstrahls je nach Lasertyp
- Materialzustand nach durchgeführtem Prozess
- Bearbeitbare Materialien
- Bearbeitbare Bauteilabmessungen
- Maximale Bauteilkomplexität

Der daraus von ProCom generierte Online-Fragebogen zur Prozessdatenerfassung wurde zur Testung und zur Sammlung erster Daten an die Partner verschickt und von diesen ausgefüllt. Folgende Daten wurden abgefragt:

- Kontaktdaten
- Prozess-/Maschine-Kombination für jeden Prozess bzw. jede Maschine einzeln
 - o Genutztes Verfahren
 - o Bearbeitbare Materialien
 - o Bearbeitbare Bauteilspezifikationen
 - o Umsetzbare Prozessparameter
 - o Bearbeitbare Bauteilkomplexität und -geometrie
 - o Eingesetzte Optik
 - o Informationen zur Strahlquelle (Modus, Lasertyp, Intensitätsverteilung, Schutzgase)
 - o Mögliche Folgeprozesse
- Daten zur digitalen Prozesskette und Datenschnittstellen
 - o Zur Bauteilfertigung benötigte Daten inkl. Datenformat
 - o Im Prozess erstellte Daten
 - o CAD-Format im Pre-Processing
 - o Zufriedenheit mit aktuellem CAD-Format
 - o Maximale Dateigröße
 - o Tools zum Datentransfer
 - o Nach dem Prozess benötigte Daten

Zum Ende der Projektlaufzeit war die Onlineplattform in einer ersten Version verfügbar. cleanLASER hat nach Projektende begonnen, seine unternehmensspezifischen Daten auf der

Plattform einzutragen. Dabei aufgetretene Softwareprobleme sowie Verbesserungsvorschläge wurden in mit ProCom besprochen, Lösungen und Optimierungen wurden gemeinsam erarbeitet und anschließend von ProCom in die Prozesslandkarte übernommen. Abschließend hat cleanLASER seine unternehmensspezifischen Daten vollständig eingetragen und somit die unternehmensspezifischen Angaben zu verfügbaren Anlagen, Prozessen und möglichen Schnittstellen sowie deren Problematiken aufgeführt.

Aufgrund der späten Fertigstellung der Prozesslandkarte konnten nur die Daten einiger Mitglieder eingetragen werden. Zukünftig soll die Prozesslandkarte von möglichst vielen LrA-Bündnismitgliedern ausgefüllt werden, sodass Interessenten mögliche Lieferanten bzw. Kooperationspartner zur Prozessverkettung finden können. Neben einer allgemeinen Firmenübersicht bietet die Onlineplattform eine nach Unternehmen sortierte detaillierte Prozessübersicht sowie eine Aufstellung der möglichen Prozessketten. Als nächstes, entweder projektunabhängig oder im Rahmen eines Folgeprojektes, sollen möglichst viele Bündnispartner ihre Daten in der Prozesslandkarte ergänzen, um so die gesamte Bandbreite der in der LrA verfügbaren Verfahren und Anlagen abbilden zu können.

1.2 Demonstratorbauteil

Zur Untersuchung und Behebung möglicher Schnittstellenproblematiken wurde ein Demonstratorbauteil entwickelt, zu dessen Fertigung eine Verkettung verschiedener Laserprozesse der Partner notwendig ist – LPBF, Laseroberflächenbearbeitung und Laserschweißen.

Bei der Entwicklung des Demonstratorbauteils mussten verschiedene Herausforderungen berücksichtigt werden, um eine möglichst umfassende Bandbreite möglicher geometrischer Anforderungen an den Laserbearbeitungsprozess abbilden zu können.

1.2.1 Eckige Kontur

Bei eckigen Konturen fächern sich die gescannten Linien im Eckbereich auf, wodurch kein gleichförmiger Linienabstand mehr gegeben ist.

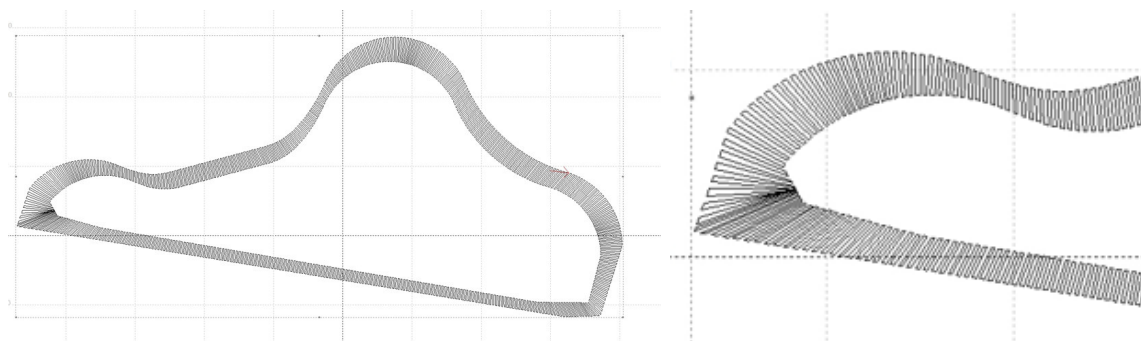


Abbildung 1.1 Aufgefächerte Scannerlinien im Eckbereich einer eckigen Kontur

1.2.2 Stufe in Z-Achse

Weist das Bauteil eine Stufe in Z-Richtung auf, müssen der Vorschub der Optik und die Scannerbewegung präzise aufeinander abgestimmt sein. Die Scanzeit inkl. Delays muss genau vorausgerechnet werden. Dadurch ergeben sich Herausforderungen bei der erreichbaren Genauigkeit und durch eventuelle Defokussierung.

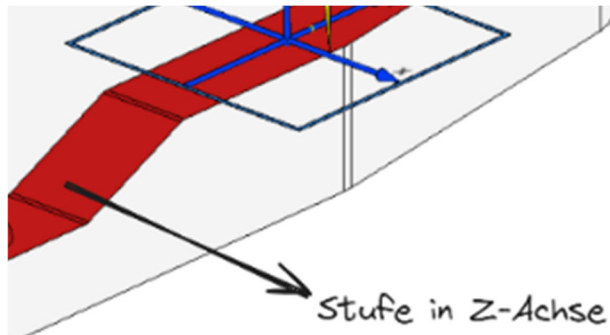


Abbildung 1.2 Stufe in Z-Achse

1.2.3 Variable Konturbreite

Bei einer variablen Konturbreite muss der Vorschub der Optik angepasst werden, damit der Scanner nicht aus dem Scanbereich herausläuft und alle Flächen gleichwertig bearbeitet werden.

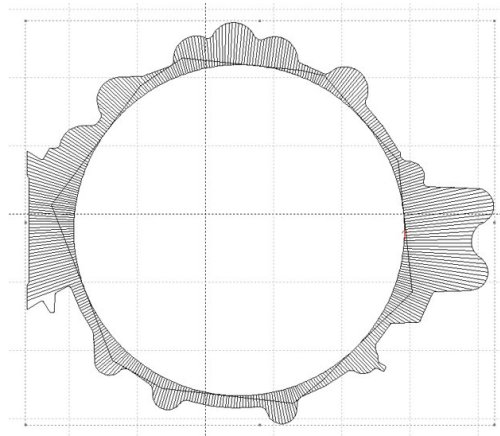


Abbildung 1.3 Variable Konturbreite

1.2.4 Einzelflächen

Beim On-the-fly-Ansatz (s. Kapitel 1.3.1), der aufeinander abgestimmten Bewegung von Optikscannern und Handlingsystem (Portal oder Roboter), kann es bei schnellen Wechseln zu neuen Objekten zu Problemen in der zeitlichen Abstimmung zwischen Scannern und

Handlingsystem kommen. Normalerweise wartet die RTC-Karte (Echtzeitsteuerkarte), bis ein neues Objekt im Scanfeld ist, dies jedoch macht die Bahnplanung des Roboters komplexer als das einfache Entlangfahren einer Kontur. Der Roboter muss die korrekte Reihenfolge der zu bearbeitenden Objekte einhalten, um den Prozess nicht RTC-bedingt zu verzögern. In solchen Fällen ist die Auftrennung in mehrere Objekte (Kacheln) sinnvoll. In einem hybriden Konzept kann beispielsweise eine äußere Kontur mittels On-the-fly bearbeitet werden, während einzelne Flächen (Kacheln) separat abgearbeitet werden, wobei die Optik erst zu einer Kachel bewegt wird, bevor die eigentliche Bearbeitung startet.

Mittels einer vollständigen Vorausplanung (s. ILT-Ansatz mit Technology Processor in Kap. 1.3.1) sind eventuell Taktzeitoptimierungen möglich. Das wird im Rahmen dieses Projekts nicht untersucht.

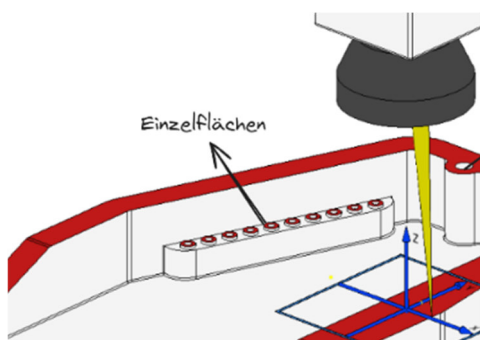


Abbildung 1.4 Einzelflächen

1.2.5 Aussparungen in Kontur

Weist eine Kontur Aussparungen, beispielsweise Bohrlöcher, auf, funktionieren einfache Mäander-Füllstrategien nicht mehr. Die Nutzung komplexerer CAM-Algorithmen ist erforderlich.

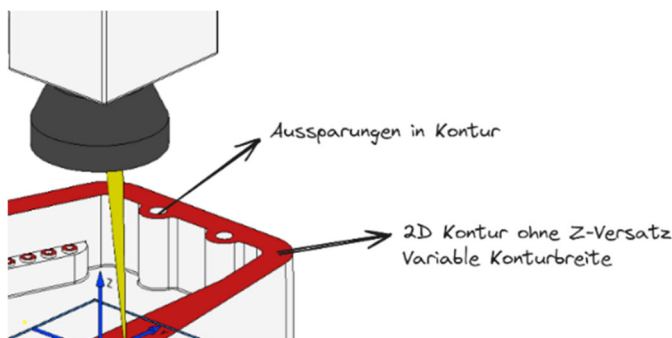


Abbildung 1.5 Aussparungen in Kontur

1.2.6 Freiform

Bei einer Freiform reichen 2D-Füllalgorithmen nicht aus. Die Einschränkung der Roboterbewegung auf kartesische Bewegungen limitiert die Bandbreite an bearbeitbaren Geometrien stark. Eine vollständige Vorausplanung der Scan- und Verfahrbewegungen des Handlingsystems ist erforderlich, um alle Oberflächen erreichen zu können. Gleichzeitig ist eine Beeinflussung weiterer Prozessparameter möglich, beispielsweise der Abschattung, des Einfallswinkels und der Energieverteilung über die Zeit.

Bei der Laserreinigung großer Bauteile gibt es jedoch einige Herausforderungen. Die CAM-Bahnplanung ist nicht auf die Kombination schneller Scanachsen und langsamerer Verfahrachsen ausgelegt, wodurch die Bewegungspfade nicht zuverlässig darauf optimiert sind, während der Bearbeitung innerhalb des Scanfelds zu bleiben. Zusätzliche laserspezifische Einflussgrößen wirken sich stärker aus als beispielsweise die spanende Bearbeitung. Zu diesen zählen unter anderem die Wärmeentwicklung bei unterschiedlichen Scanstrategien, mehrfache Überfahrten sowie wechselnde Überlappungen.

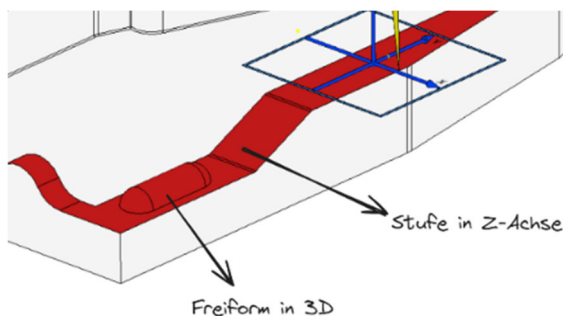


Abbildung 1.6 Freiform

1.2.7 Entwicklung Demonstratorbauteil

Unter Berücksichtigung der oben aufgeführten Herausforderungen wurde zunächst ein Kundenbauteil von cleanLASER in abgewandelter Form diskutiert, das zudem um eine 3D-Freiform ergänzt wurde. Dieses war jedoch zu groß für die LPBF-Druckkammer und benötigte zusätzliche Anpassungen, um das Laserschweißen sinnvoll einbringen zu können. Dennoch wurde es vom ILT und cleanLASER für die Definition der Prozessherausforderungen der 3D-Bahnplanung genutzt.

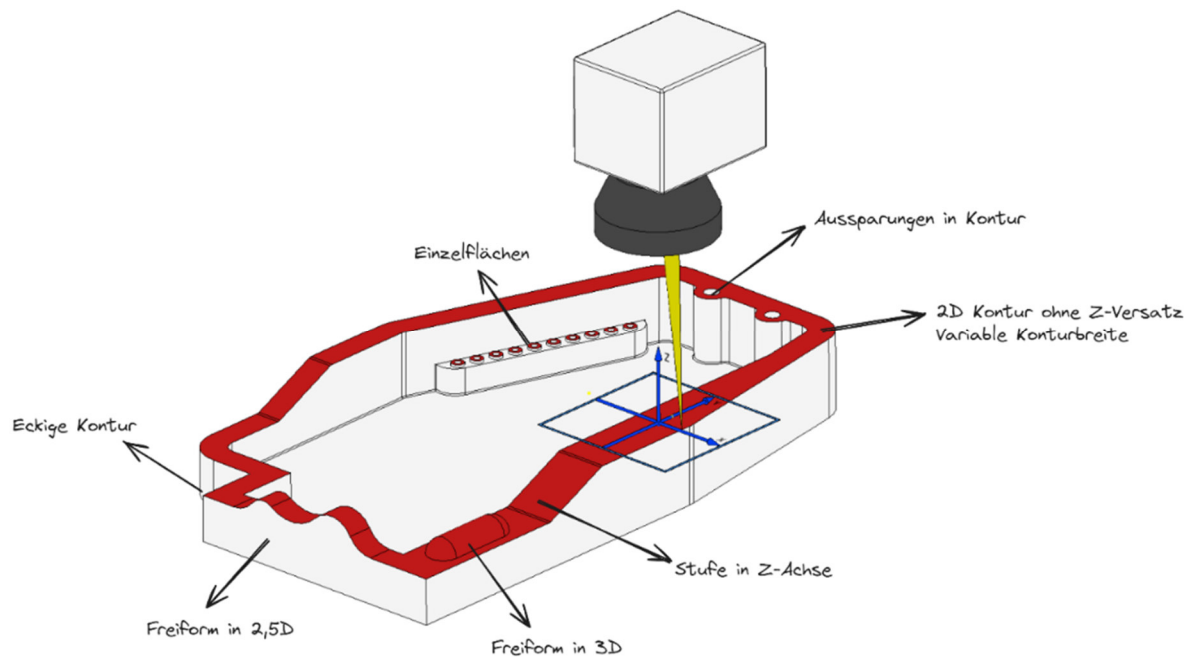


Abbildung 1.7 cleanLASER-Demonstrator mit zusätzlicher 3D-Freiform

Als nächstes wurde ein Kundenbauteil von Aconity diskutiert, eine Tretlagermuffe eines Fahrrads. Dieser Vorschlag scheiterte jedoch an der Freigabe durch den Kunden.

Zuletzt legte man sich auf ein weiteres von Aconity vorgeschlagenes Bauteil fest – eine kundenunabhängige Fahrradhinterradschwinge mit generischer Geometrie, die typische Herausforderungen der jeweiligen Laserprozesse abbildet. Diese sollte mittels LPBF mit kraftoptimierter Leichtbaustruktur hergestellt werden. Anschließend sollten die Rohrkontaktflächen des Druckteils mittels cleanLASER-Oberflächenbearbeitung auf den folgenden Schweißprozess vorbereitet. Zuletzt sollte das Bauteil von LaVa-X an ein konventionell gefertigtes Halbzeug angeschweißt werden – die beiden Bolzen unten links dienen dabei als Aufnahmehilfe für den Schweißprozess.

Kurz vor Ende der Projektlaufzeit wurden erste Druckteile von Aconity gefertigt. Aus Kapazitäts- und Zeitmangel aller beteiligter Partner konnte die geplante Laserbearbeitung sowie das Laserschweißen an das konventionell gefertigte Halbzeug nicht mehr erfolgen.

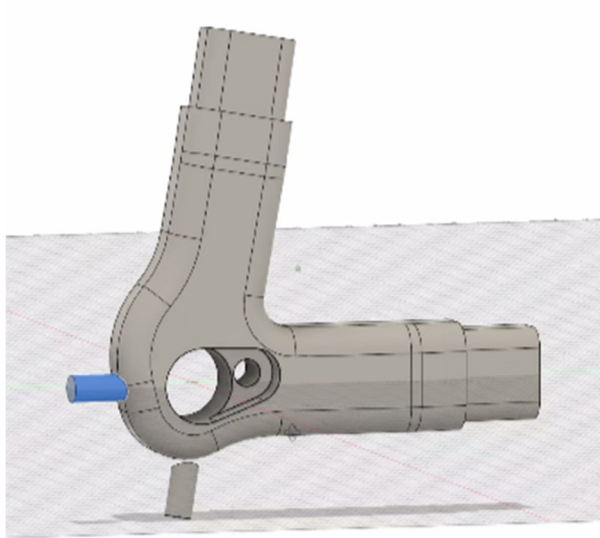


Abbildung 1.8 Demonstrator - Hinterradschwinge

Im Rahmen des technischen Handlungsstrangs sollten zudem messbare Zielgrößen definiert werden, um quantifizierte Aussagen über die erzielten Ergebnisse treffen zu können. Da sich das Konsortium später als geplant auf einen Demonstrator geeinigt hat und die Kriterien individuell für die jeweiligen Prozesse hätten festgelegt werden müssen, konnten diese Zielgrößen nicht mehr definiert werden.

1.3 Schnittstelle Laserreinigen

Die Laserbearbeitung kann eine Prozesskette abschließen, z. B. mit einem Finishing aus optischen Gründen. Meist jedoch ist sie ein auf weitere Prozessschritte vorbereitendes Verfahren, z. B. als Fügevorbehandlung. Daher ist eine Unterteilung der Schnittstellenproblematik in eine Eingangsschnittstelle (Post-Treatment) und eine Ausgangsschnittstelle (Pre-Treatment) sinnvoll.

1.3.1 Eingangsschnittstelle Post-Treatment

Gemeinsam mit dem Fraunhofer ILT wurde die Optimierung der 3D-Bahnplanung basierend auf Laserpolieren mittels Roboter-Handlingsystem untersucht. Dazu wurden zwei Ansätze verfolgt. Das ILT verfolgte eine vollautomatisierte Variante, bei der die 3D-Bahnplanung auf Grundlage der Bauteilgeometrie mittels Technology Processor TP4 automatisch durchgeführt und an den Roboter übermittelt wird. Diese Variante wäre für komplexe Anwendungen nutzbar, die etwa 20 % der Reinigungs-/Strukturierungsanwendungen ausmachen. cleanLASER verfolgte eine einfachere, kostengünstigere Lösung, die für die weniger komplexen, etwa 80 % der Anwendungen nutzbar ist. Bei dieser Variante wird das Bauteil „on the fly“ bearbeitet. Die Positionsdaten des Roboters werden dabei über einen Mikrocontroller in Positionssignale für die

RTC-Karte umgewandelt. Dafür wurde der bereits vorhandene Sechssachsroboter KUKA KR 22 R1610 (mit Steuerung KR C4) mit einem KUKA.FastSendDriver ausgestattet, der die Übertragung der aktuellen Roboterpositionsdaten jede Millisekunde auf einen externen Mikrocontroller ermöglicht. Dieser erzeugt aus den Roboterpositionsdaten x- und y-Quadratur-Encodersignale, die an die RTC-Karte weitergeleitet werden.

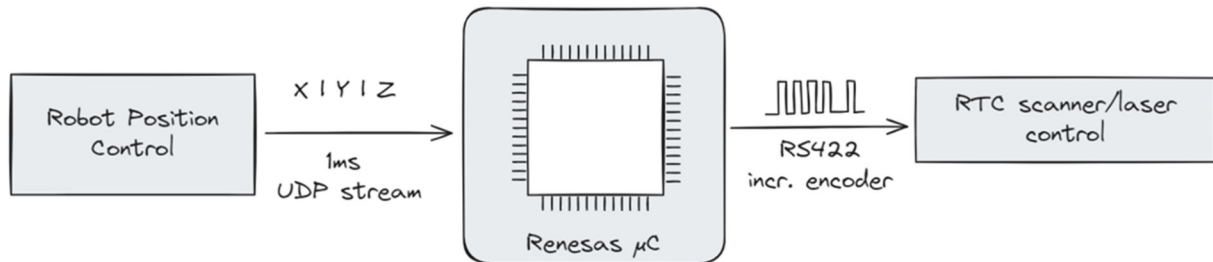


Abbildung 1.9 Darstellung der Datenübertragung vom Roboter an die RTC-Karte bzw. die Lasersteuerung

Das Ziel ist, dass der Werker die Roboterbahn grob vorausplant, die Feineinstellung jedoch automatisch erfolgt. Diese Bearbeitungsstrategie ermöglicht die Einrichtung der Laserkontur in einem Gesamtjob, ohne beispielsweise bis zu 100 Einzeljobs einzurichten und mittels Kachelstrategie mit der Roboterbewegung abzustimmen. Dadurch kann nicht nur viel Einrichtzeit eingespart werden, sondern der Laserbearbeitungsjob an sich läuft auch deutlich schneller ab, da der Roboter nicht ständig anhalten muss. Zusätzlich verringert sich das Fehlerpotential deutlich. Erste Tests wurden anhand einer 2D-Bearbeitung durchgeführt, sind aber auch auf einfache 3D-Oberflächen übertragbar. Im Rahmen des Projekts wurde die 3D-Bearbeitung zwar nicht abschließend durchgeführt, jedoch wurde die Roboterschnittstelle für die On-the-fly-Bearbeitung implementiert und in Betrieb genommen, wodurch die Minimalvoraussetzung für die großflächige 2D-Bearbeitung von Konturen mittels Roboter geschaffen wurde. In Zusammenarbeit mit der Firma ModuleWorks GmbH wurden mögliche Umsetzungsstufen einer 3D-Bahnplanung diskutiert.

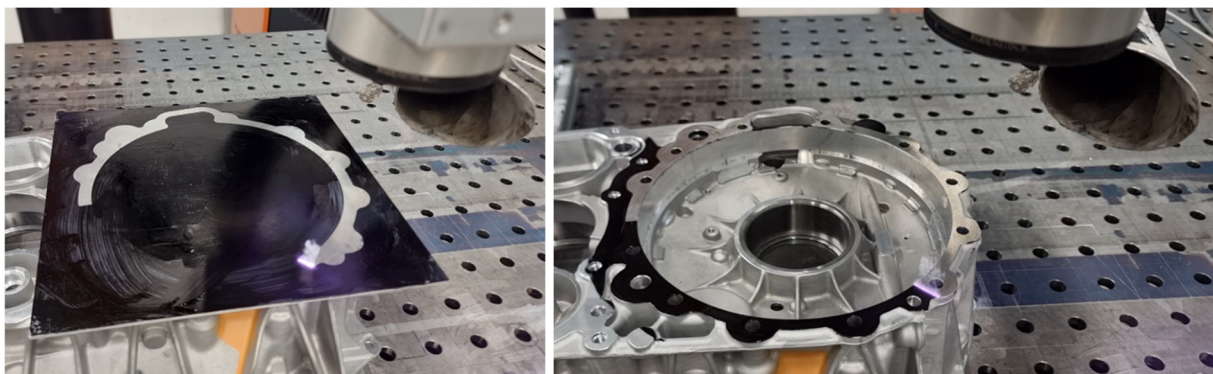


Abbildung 1.10 Roboterbearbeitung mit On-the-fly

Des Weiteren wurde ein Optiksystm mit integrierter Z-Lagenanpassung ausgelegt und in Betrieb genommen. Die Verwendung des Z-Lagenmoduls wurde in einem Aufbau ohne Handlingsystem getestet. Optik und Bauteil sind starr montiert, der Scanner übernimmt die X/Y-Variation, das Z-Lagenmodul führt die Fokusanpassung je nach Bauteilhöhe aus.

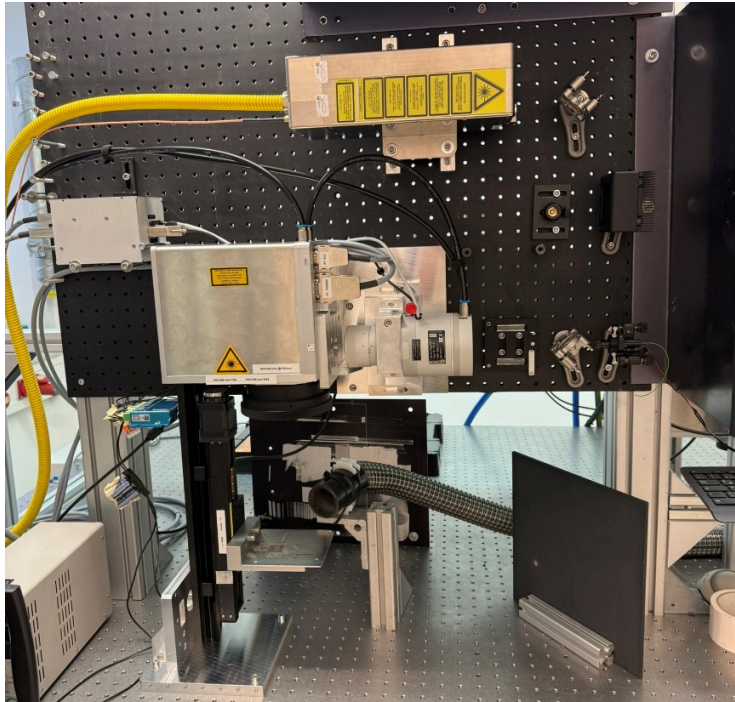


Abbildung 1.11 Aufbau mit Z-Lagenmodul

Die Verwendung des Z-Lagenmoduls ist in der Software cleanSTUDIO nur teilweise umgesetzt und bedarf weiterer Anpassungen. Um erste Versuche durchführen zu können, wurde ein Korrekturfile des Modulherstellers angefordert. Bei den Versuchen wurde unter anderem eine Computermaus mit dem cleanLASER-Logo versehen. Dazu wurde die zugehörige 3D-STEP-Datei der Maus in Inventor geöffnet und der Schriftzug wurde über den Befehl „Prägen“ aufgebracht. Die modifizierte STEP-Datei wurde anschließend in Inventor Fusion geöffnet. Mittels des fusioneigenen CAM-Tools wurde der Laserprozess mit einem Kugelfräsprozess nachmodelliert und die Fräsparmeter wurden angepasst. Im Post Processing wurde eine 3D-DXF-Datei erzeugt und die Rückzugswege des nicht zur Verwendung kommenden Fräasers wurden manuell gelöscht. Im Endeffekt wurden die vom Laser zu scannenden Bahnen zur Gravur des cleanLASER-Schriftzugs als 3D-DXF-Datei an cleanSTUDIO übertragen. Die 3D-Koordinaten der Vektorzüge werden in Form von Sprung- und Markierbefehlen an die Echtzeitsteuerkarte für den Scanner bzw. den Laser übertragen.



Abbildung 1.12 Laserbearbeitung mit Z-Lagenmodul zur Fokusanpassung

Die Kombination aus vorbereitetem Handling-Roboter und Optiksystem mit automatischer Fokusanpassung legt den Grundstein für die folgende Bearbeitung dreidimensionaler Bauteile. Diese soll im geplanten Folgeprojekt WIR! – LASER.region.AACHEN – Innovative und intuitive Interfaces zur 3D-Bahngestaltung von Laserprozessen (LrA-In³D) weiterentwickelt werden.

Die Integration der Bearbeitungsoptik in ein flexibles, robotergeführtes System führt zu einer starken mechanischen Beanspruchung der Prozessfaser. Dies kann wiederum einen Faserbruch verursachen. Zur Erhöhung der Prozess- und Personensicherheit ist die Einführung einer Faserbruchüberwachung sinnvoll. Im Projekt wurden zwei verschiedene Verfahren zur Faserbruchüberwachung getestet. Eine Faser mit zwei parallel zum Lichtleitkabel integrierten Kupferdrähten zur Bruchüberwachung konnte den Bruch nicht anzeigen. Es kam zum Kurzschluss, sodass kein Bruch detektiert werden konnte. Ziel war, dass die Kupferdrähte, die eine Stromschleife bilden, zerstört werden, bevor die Leistung aus dem Schutzschlauch austreten kann. Es kam zu einem Brand in der Faser, der sich weiter ausbreitete.



Abbildung 1.13 Nichtfunktionale Faserbruchüberwachung

Eine Faser mit einem Kupferdraht und einem silberbeschichteten Nylonfaden zur Bruchüberwachung hat den Faserbruch verlässlich angezeigt. Der verwendete CL 300-Laser hatte vor dem Bruch eine Ausgangsleistung von ca. 240 W. Beim Faserbruch wurden 150 W freigesetzt, die Strahlquelle wurde in unter fünf Sekunden ausgeschaltet und eine Fehlermeldung angezeigt. Ein sich in der Faser ausbreitender Brand wurde vermieden. Diese Variante kann im Folgeprojekt LrA-In³D verwendet und weiter getestet werden.

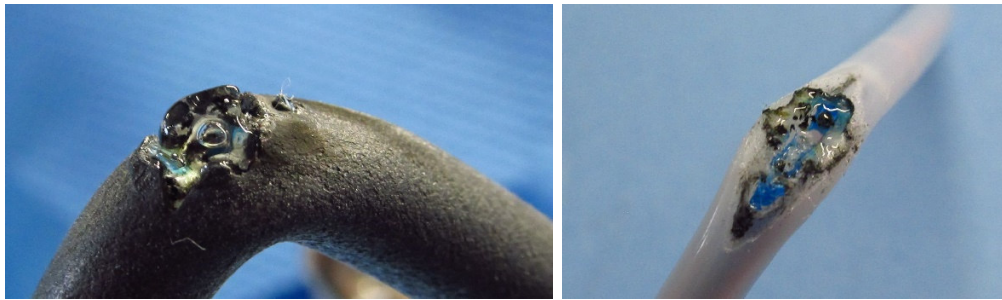


Abbildung 1.14 Funktionale Faserbruchüberwachung

1.3.2 Ausgangsschnittstelle Pre-Treatment

LPBF-gefertigte Teile müssen auf den folgenden Schweißprozess vorbereitet werden. Die raue Oberfläche sorgt für einen ungleichmäßigen Fügespalt zwischen den zu schweißenden Oberflächen und führt zu unerwünschten Lufteinschlüssen, die die Festigkeit der Verbindung herabsetzen. Zur Vorbereitung auf den Schweißprozess muss daher die raue Oberfläche geglättet werden. Konventionell wird diese Problematik derzeit meist durch einen Schlichtprozess gelöst, der jedoch die Nachteile des Fräsens mit sich bringt. Im Rahmen des Projekts wurde die Oberfläche mittels Laserbearbeitung geglättet.

Die LPBF-gefertigten Probeteile verfügten über eine sehr raue Oberfläche, deren seitliche Kanten, vermutlich durch die Umkehrpunkte des LPBF-Lasers, erhöht waren. Einige der Probepplatten waren zusätzlich gebogen.

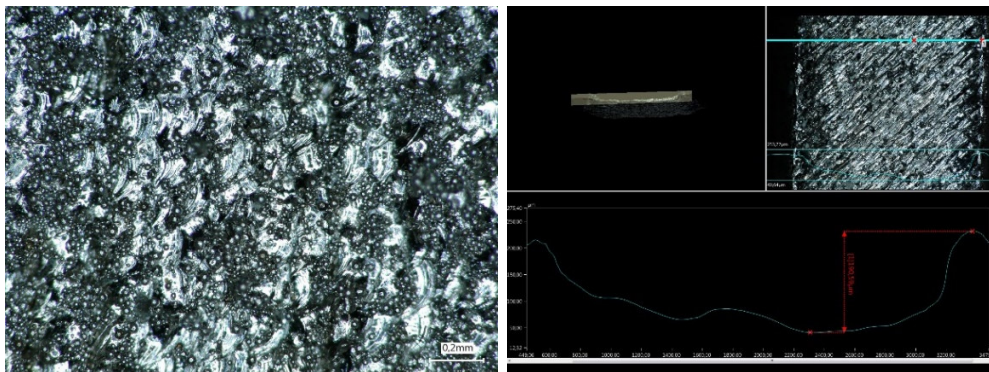


Abbildung 1.15 Unbearbeitete Oberfläche eines LPBF-gefertigten Bauteils

Durch die nachträgliche Laseroberflächenbearbeitung könnten die Rauigkeiten eingeebnet werden. Makroskopische Druckrückstände von mehr als 100 µm Höhe konnten nicht verlässlich verteilt bzw. geglättet werden.

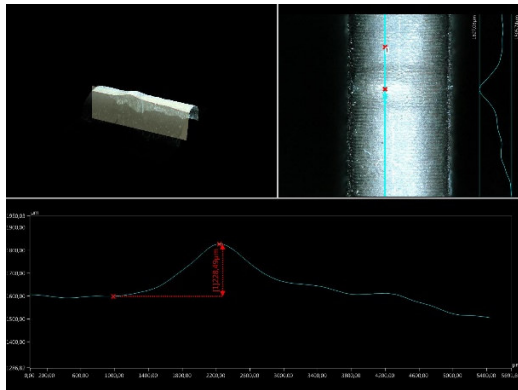


Abbildung 1.16 Durch Laserbearbeitung eingeebnete Oberfläche mit makroskopischem Druckrückstand

Erhöhte Kanten konnten zuverlässig abgerundet werden. Eine zum Bauteil diagonale Scanrichtung hat die besten Ergebnisse geliefert. Unebenheiten wurden eingeebnet und die Abrundung der Kanten war fein einstellbar. Es kam zwar zu leichten Materialanhäufungen am Bauteilende, insgesamt wurde mit dieser Technik aber ein reproduzierbar gutes Ergebnis erreicht.

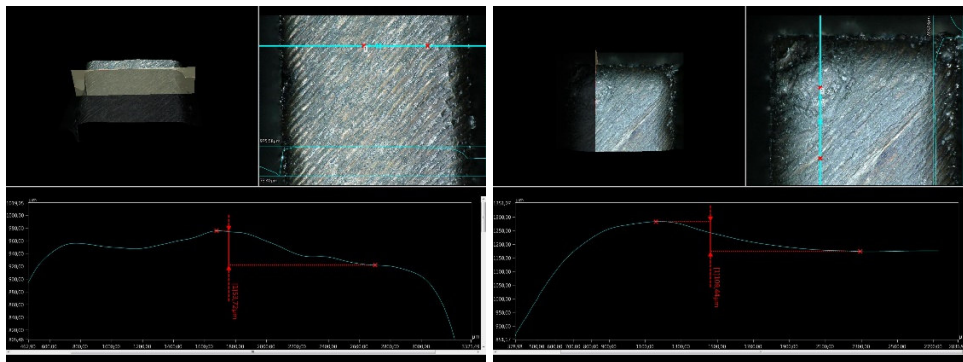


Abbildung 1.17 Oberflächenstruktur nach diagonaler Laserbearbeitung

Beim Scannen quer zum Bauteil wurden die Kanten sehr schnell abgerundet, was bei schmalen Bauteilen die schweißbare Fläche zu sehr reduziert. Beim Scannen längs zur Bauteilrichtung kam es zu Anhäufungen von ca. 200 μm an den Umkehrpunkten. Zudem blieb die zuletzt gescannte Linie als einzelne Erhebung von ca. 50 μm bestehen.

Insgesamt wurden die besten Ergebnisse bei Verwendung von geringer Laserleistung und gleichzeitig langsamer Überfahrt bzw. geringer Markspeed erreicht. Dadurch verringert sich jedoch auch die Flächenrate. Zudem sollte der Reihenabstand möglichst gering gewählt werden – gute Ergebnisse wurden bei etwa 95 % Reihenüberlapp erreicht. Generell sind Korrekturen mit ausreichendem Ergebnis nur erreichbar, wenn das zu überarbeitende 3D-Druckteil nicht zu stark gebogen und nicht zu rau ist.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Kosten des Vorhabens haben das Projektbudget überschritten. Die veranschlagten Personal- und Reisekosten wurden unterschritten. Die Materialkosten wurden geringfügig überschritten, die Kosten für externe Arbeiten/Fremdleistungen wurden deutlich überschritten. Aufgrund von Kapazitätsengpässen und um den Gesamtprojektfortschritt nicht zu gefährden, wurden mehr Arbeiten extern vergeben als ursprünglich geplant, Durch die bereits langjährige Zusammenarbeit mit der Betewis GmbH war sichergestellt, dass die generellen cleanLASER-Prozesse sowie ihre Anforderungen und Herausforderungen bekannt sind und keine zusätzliche Einarbeitung in allgemeine Problematiken nötig ist.

Insgesamt wurde der Projektzeitplan weitestgehend eingehalten. Einige Arbeiten erforderten deutlich mehr Aufwand als ursprünglich angenommen worden war, wodurch nicht alle Projektziele innerhalb der Projektlaufzeit abgeschlossen werden konnten. Dies lag hauptsächlich an durch den nötigen Mehraufwand aufgetretenen Budget- und Kapazitätsengpässen. Die Prozesslandkarte wurde beendet und nach Projektende weiter optimiert, der Demonstrator wurde auskonstruiert, jedoch nur zum Teil entlang der gesamten Prozessverkettung gefertigt.

3 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die im Projekt entwickelte und zum Teil bereits ausgefüllte Prozesslandkarte kann zunächst im Bündnis der LASER.region.AACHEN zur besseren Vernetzung der Unternehmen und insbesondere zur Verkettung von Prozessen genutzt werden. Langfristig ist eine Anwendung über die Bündnisgrenzen hinaus denkbar und sinnvoll. Nicht nur im Bereich der Lasertechnik, sondern in vielen Bereichen, in denen eine Verkettung der Kompetenzen verschiedener Unternehmen einen Kosten- und Zeitnutzen bringt, ist die Verwendung einer solchen Prozesslandkarte von Nutzen. Die aus diesem Projekt hervorgegangene Online-Plattform kann dabei als Vorlage für weitere Bündnisse bzw. Regionen dienen.

Der gelegte Grundstein in der 3D-Bahngestaltung mittels Sechssachsroboter und/oder Optiksyste mit integrierter Z-Lagenvariation bietet zukünftig die Möglichkeit, mannigfaltige, dreidimensionale Werkstücke zeit- und kostensparend bearbeiten zu können. Die weitere Entwicklung der 3D-Bahnplanung ist bereits als neues Projekt In³D (Innovative und intuitive Interfaces zur 3D-Bahngestaltung von Laserprozessen) mit dem Fraunhofer ILT und ModuleWorks in der Beantragung.

Zudem können die Ergebnisse des KoLa-Projektes in weiteren geplanten LrA-Projekten (z. B. elektrifizierter Antriebsstrang, Wasserstoffwirtschaft, Leichtbau, Nachhaltigkeit) verwertet werden. Durch gezielte Kombination der verfügbaren Verfahren werden neue technologische Synergien geschaffen, durch die die Forschungszusammenarbeit innerhalb des Bündnisses weiter gefördert wird und langfristige Wirtschaftliche Anschlussmöglichkeiten sichergestellt werden.

Langfristiges Ziel ist die Erschließung neuer Märkte in der Automobil-, Glas- und Optikindustrie sowie in den Bereichen Energie- und Medizintechnik. Über die nächsten zehn Jahre wird für

cleanLASER ein jährlicher Umsatz von 5-10 Millionen Euro durch den Verkauf von Produkten und Anlagen mit der neu entwickelten Technologie zur 3D-Bahnplanung erwartet. Damit wird nicht nur die technologische Expertise weiter ausgebaut, sondern auch die Marktposition signifikant gestärkt.

4 Während der Laufzeit bekannt gewordene, relevante Ergebnisse Dritter

Es sind keine relevanten Ergebnisse bekannt, die ähnliche Arbeiten verfolgen und die Ergebnissenutzung beeinflussen.

5 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Die Prozesslandkarte wurde im November 2024 in erster Version beim Bündnistreffen der LASER.region.AACHEN vorgestellt. Nach ihrer endgültigen Veröffentlichung wird sie auf der cleanLASER-Webseite und sozialen Plattformen (z. B. LinkedIn, Instagram) vorgestellt.

Die 3D-Bahnplanungstechnologie wird im Rahmen des geplanten Folgeprojekts In³D auf zugehörigen Veranstaltungen, wie beispielsweise Messen und weiteren Bündnistreffen, vorgestellt.