

Schlussbericht Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT & Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

zum Teilvorhaben: Grundlegende Untersuchungen mittels zeitlicher und örtlicher Lasermodulation und Erforschung von Multistrahlsystem zur Produktivitäts- und Qualitätssteigerung in additiven und subtraktiven Prozessen.

im Verbundprojekt: Digital Photonic Production Open-Know-how Pool (DPP-Open)

Zuwendungsempfänger: Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., Postfach 20 07 33, 80007 München

Förderkennzeichen: 13N15424

Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2020 – 31.09.2025

Berichtszeitraum: 01.10.2020 – 31.09.2025

Teil II: Eingehende Darstellung

Ein wesentlicher Aspekt der industriellen Produktion der Zukunft sind hochpräzise, flexible und digital vernetzte Werkzeuge zur Herstellung individueller und komplexer Produkte. Das Werkzeug „Licht“ ermöglicht eine präzise Dosierung sowie eine Steuerung in Raum und Zeit, die einzigartig ist. Ein Laserstrahl arbeitet nahezu so schnell wie ein Computer „denkt“. Vor diesem Hintergrund entwickeln Partner aus Wissenschaft und Wirtschaft interdisziplinäre Lösungen für die gesamte Fertigungskette „from bits to photons to atoms“ – das Konzept einer lichtbasierten, digital vernetzten Produktion. Im Forschungscampus „Digital Photonic Production“ DPP wird dieses Konzept insbesondere in Bezug auf die Bereiche Mobilität, Gesundheit, Energie und Nachhaltigkeit erforscht. Zu den beispielhaften Anwendungen gehören die laserbasierte Fertigung von funktionalen und ressourcenschonenden metallischen Bauteilen direkt aus digitalen Daten mithilfe von 3D-Druckern sowie das großflächige Strukturieren feinsten Muster in Funktionsoberflächen mit speziellen Lasern, den sogenannten Hochleistungskurzpulslasern. Im Teilvorhaben „Grundlegende Untersuchungen mittels zeitlicher und örtlicher Lasermodulation und Erforschung von Multistrahlsystem zur Produktivitäts- und Qualitätssteigerung in additiven und subtraktiven Prozessen“ wurden im Forschungscampus mehrere Sprintteams durch das Fraunhofer ILT (Sprintteam 1) und IPT (Sprintteam 10, 14 und 18) gebildet, die sich mit Unterschiedlichen Aspekten des Teilvorhabens beschäftigt haben. Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Sprintteams beschrieben.

Sprintteam 1: Angepasste zeitliche und örtliche Modulation für das PBF/LB/M (Fraunhofer ILT)

1 Einleitung und Motivation

Das Laser Powder Bed Fusion (PBF-LB/M) hat sich in den letzten Jahren als zentrales Verfahren der additiven Fertigung von Metallbauteilen etabliert. Die Technologie ermöglicht die werkzeuglose Herstellung hochkomplexer Geometrien und Funktionsbauteile und wird heute vor allem für Prototypen, Einzelstücke und kleine bis mittlere Serien eingesetzt. Für eine

breite industrielle Nutzung, insbesondere im Serienmaßstab, sind jedoch zwei Anforderungen noch nicht ausreichend erfüllt: eine signifikant höhere Produktivität und eine verlässlich hohe Prozessrobustheit. Zusätzlich limitiert die derzeitige Prozessführung das Werkstoffspektrum, insbesondere bei schwer schweißbaren Legierungen.

Stand der Technik ist der Einsatz einzelner Singlemode-Faserlaser mit gaußförmiger Leistungsdichteverteilung und typischen Fokussdurchmessern von etwa 55–100 μm . Um die Aufbaurrate zu steigern, werden in industriellen Anlagen zunehmend mehrere Laser-Scanner-Systeme in einer Maschine kombiniert. Dieser Ansatz führt jedoch zu steigenden Anlagenkosten und Komplexität bei gleichzeitig unverändertem Prozessprinzip in jedem Einzelsystem. Zusätzlich können häufig nicht alle Laser-Scanner-Systeme ausgelastet werden. Hinzu kommt, dass hohe Laserleistungen bei kleinen Strahldurchmessern große Maximalintensitäten erzeugen, die häufig mit Prozessinstabilitäten, Tiefschweißeffekten, erhöhter Spritzerbildung und Bauteildefekten einhergehen.

Vor diesem Hintergrund adressiert das Sprintteam 1 des Forschungscampus DPP die Frage, wie sich zeitlich und örtlich angepasste Leistungsdichteverteilungen (LDV) nutzen lassen, um Produktivität, Prozessrobustheit und Werkstoffspektrum des PBF-LB/M grundlegend zu erweitern. Hierzu werden bereits verfügbare und neuartige Strahlformen (defokussierte Gaußprofile, ringförmige LDV, Dual-Gauß-Arrays) experimentell und simulativ untersucht, mit Prozessbeobachtung verknüpft und in ihrem Einfluss auf Schmelzbad und Spritzerbildung charakterisiert.

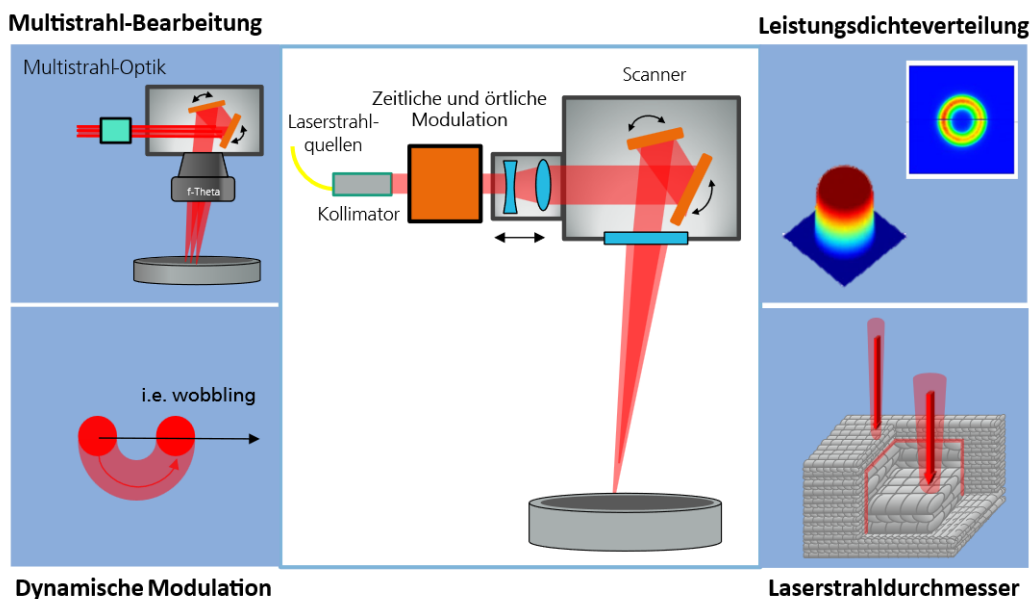


Abbildung 1 Schematische Darstellung der möglichen Lösungsansätze zur angepassten zeitlichen und örtlichen Modulation für das PBF-LB/M.

2 Zielsetzung und Projektkonzept

Das übergeordnete Ziel des Sprintteams lautet, durch angepasste zeitliche und örtliche Modulation des Laserstrahls drei wesentliche Kenngrößen des PBF-LB/M gleichzeitig zu verbessern:

1. **Produktivität:** Steigerung der theoretischen und realen Aufbauraten bei gleicher Bauteilqualität.

2. **Prozessrobustheit:** Vergrößerung des stabilen Prozessfensters, Reduktion von Prozessnebenprodukten und Defekten sowie Verringerung der Streuung relevanter Qualitätskennwerte.
3. **Werkstoffspektrum:** Erschließung oder robustere Verarbeitung schwer schweißbarer Legierungen, insbesondere Nickelbasis-Superlegierungen.

Als Referenzwerkstoff wurde zunächst die Nickelbasislegierung **IN625** gewählt, da sie industriell weit verbreitet ist und sich für systematische Prozessstudien bestens eignet, da hierfür umfangreiches Erfahrungswissen und etablierte Referenzprozesse vorliegen.

Zur Erreichung der Projektziele wurden drei Ansätze gewählt:

- **Optische und prozesstechnische Anpassung:** Entwicklung und Nutzung modifizierter Optiksyste (defokussierte gaußförmige LDV, ringförmige LDV und ein Dual-Gauß-Array) sowie Variation der Prozessparameter (Laserleistung, Scangeschwindigkeit, Spurbstand, Schichtdicke).
- **Prozessbeobachtung und -analyse:** Etablierung kostengünstiger und hochauflösender Methoden zur quantitativen Erfassung von Prozessnebenprodukten (Pulverbettkamera, Hochgeschwindigkeitskamera) und deren Auswertung.
- **Numerische Simulation und Modellbildung:** Thermophysikalische Simulationen des PBF-LB/M-Prozesses mit realen und modellierten Strahlprofilen, Erweiterung des Supergauß-Ansatzes auf ringförmige LDV und Entwicklung eines Modells zur Lösung des inversen Wärmeleitungsproblems.

Zu Beginn des Projekts wurden messbare Zielgrößen und Bewertungskriterien definiert, die den drei übergeordneten Zielen zugeordnet sind. Für die Produktivität wurden u. a. theoretische Aufbaurrate, maximale nutzbare Laserleistung und geometrische Effizienz (Def. 3.7) betrachtet. Die Prozessrobustheit wurde über relative Bauteildichte und deren Streuung, Spritzerbildung und Stabilität des Prozessfensters abgebildet. Für das Werkstoffspektrum dienen insbesondere Rissfreiheit, Porosität und die Übertragbarkeit der Prozessfenster auf schwer schweißbare Legierungen als Kennwerte. Diese Zielgrößen bildeten die Grundlage für alle weiteren experimentellen und simulativen Untersuchungen.

3 Erfolgte Untersuchungen zur Erreichung der Projektziele

3.1 Anpassung von Laserstrahldurchmesser und Intensitätsverteilung

In einem ersten Schritt wurde der Einfluss des Laserstrahldurchmessers und der Leistungsdichteverteilung (LDV) auf die Schmelzbadgeometrie und die theoretische Aufbaurrate anhand zweier einfacher verfügbarer LDV systematisch untersucht:

- **Defokussierte gaußförmige Intensitätsverteilung:** Durch Einsatz eines 3D-Scansystems (Galvanometerscanner plus dynamische Fokussiereinheit) wurde der Fokuspunkt in Strahlpropagationsrichtung gezielt von der Bearbeitungsebene abgesetzt. Dies erlaubt die Einstellung vergrößerter Strahldurchmesser in der Bauebene (typisch 160–200 µm) bei nominal gaußförmiger LDV. Strahldurchmesser von 80-100 µm dienen als Referenz gemäß Stand der Technik.
- **Ringförmige LDV:** Durch den Einsatz der Laserstrahlquelle nLIGHT AFX-1000 konnte eine ringförmige LDV realisiert werden. Die Strahlquelle erlaubt eine flexible Aufteilung der Laserleistung auf eine Singlemode-Faser und eine Hohlkernfaser. Über unterschiedliche Optikkonfigurationen (2D-Scanner mit f-Theta-Objektiv, 3D-Scanner)

wurden Strahldurchmesser im Bereich von etwa 165-200 μm in der Bauebene erzeugt. Im Gegensatz zur defokussierten Gaußverteilung ist die Bearbeitungsebene hier mit der Fokusebene deckungsgleich.

Zur Vergleichbarkeit wurde zunächst ein standardisiertes Testmuster aus Einzelspuren und Einzelschichten auf gesandstrahlten Substraten belichtet. Dabei wurden durch Variation von Laserleistung P_L und Scangeschwindigkeit v_S ein breites Spektrum Prozessen mit unterschiedlichen Streckenenergien $E_L = P_L/v_S$ untersucht. Metallographische Querschliffe ermöglichten die Bestimmung von Schmelzbadbreite und -tiefe sowie des Aspektverhältnisses in Abhängigkeit der Streckenenergie.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei Verwendung kleiner gaußförmiger Strahlen (80-100 μm) bei steigender Streckenenergie das Schmelzbadverhalten in ein kapillardominiertes Prozessregime mit tiefen, schmalen Schmelzbädern übergeht (Aspektverhältnis > 1). Dagegen verbleiben Prozesse mit größeren Strahlen, sowohl defokussierte Gaußprofile als auch ringförmige LDV mit Durchmessern von etwa 160-165 μm , über den betrachteten Streckenenergiebereich in einem wärmeleitungsdominierten Regime mit breiten, flachen Schmelzbädern (Aspektverhältnis < 1). Strahlen mit ringförmiger LDV erzeugen bei vergleichbarer Tiefe tendenziell größere Schmelzbadbreiten als defokussierte Gaußstrahlen. Eine Zusammenfassung der resultierenden Schmelzbadbreiten und -tiefen in Abhängigkeit der Streckenenergie erzeugt mit gaußförmigen LDV mit Strahldurchmessern von $d_s = 80, 100$ und $160 \mu\text{m}$ sowie für eine ringförmige LDV mit $d_s = 165 \mu\text{m}$ sind in Abbildung 2 dargestellt.

Im nächsten Schritt wurden in den identifizierten Prozessfenstern einfache kubische Volumenkörper aus IN625 aufgebaut. Die Schichtdicke D_S wurde zunächst auf 50 μm festgelegt, Laserleistung P_L , Scangeschwindigkeit v_S und Spurbabstand Δy_S wurden variiert, um relative Dichten $\rho_{rel} \geq 99,9\%$ zu erreichen. Aus den Prozessparametern wurde die theoretische Aufbaurrate $\dot{V} = v_S \cdot D_S \cdot \Delta y_S$ berechnet.

Für gaußförmige Referenzprozesse mit 80-100 μm Strahldurchmesser konnten zwar hohe Dichten mit geringer Streuung erzielt werden, jedoch nur bei relativ niedrigen theoretischen Aufbauraten im Bereich von etwa $5 \text{ mm}^3/\text{s}$. Durch defokussierte gaußförmige und ringförmige LDV mit vergrößertem Strahldurchmesser konnten die nutzbare Laserleistung, der Spurbabstand und die Scangeschwindigkeit deutlich erhöht und damit theoretische Aufbauraten von über $10 \text{ mm}^3/\text{s}$ erreicht werden. Mit dem defokussierten gaußschen LDV wurden dabei höhere Bauteildichten erzielt als mit dem mit ringförmige LDV (siehe Abbildung 3).

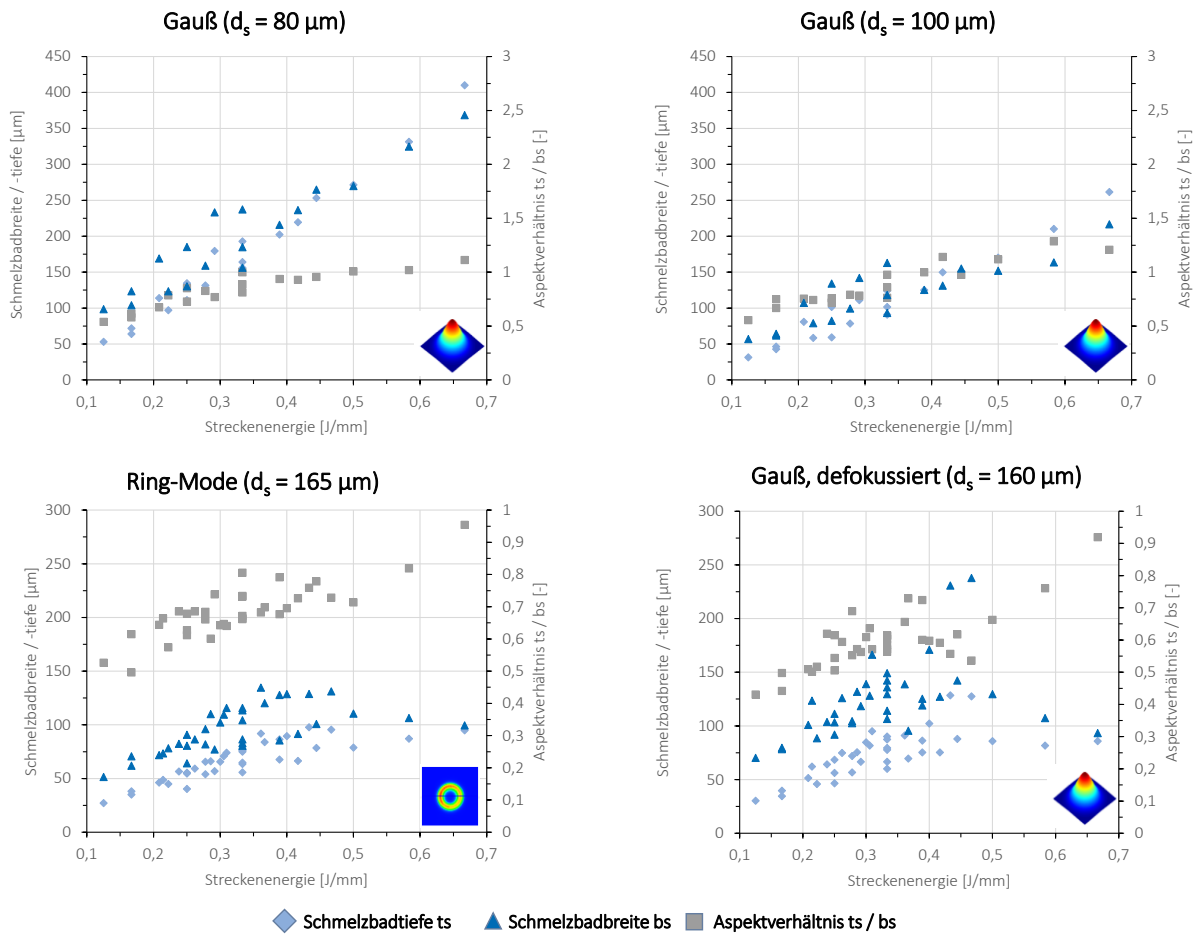


Abbildung 2 Resultierende Schmelzbadbreite und -tiefe in Abhängigkeit der Streckenenergie für gauß- und ringförmige LDV für verschiedene Laserstrahldurchmesser.

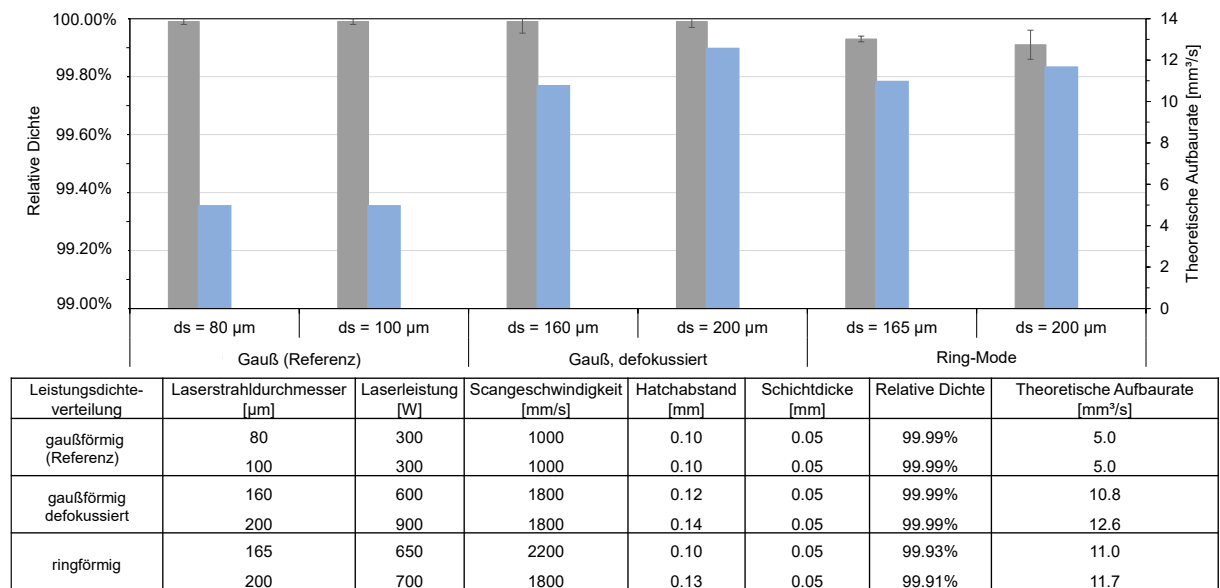


Abbildung 3: Ergebnisse der PBF-LB/M-Prozessentwicklung für aller betrachteten Laserstrahldurchmesser und -LDV.

3.2 Skalierung der Produktivität mit gekoppelten Laserstrahlen

Über die Anpassung des einzelnen Laserstrahls hinaus wurde ein zweiter Weg untersucht: die Skalierung der Produktivität durch gekoppelte Laserstrahlen. Am Fraunhofer ILT wurde hierzu eine flexible Zweistrahloptik entwickelt und in eine PBF-LB/M-Labormaschine integriert. Das System erlaubt es, zwei gaußförmige Laserstrahlen mit definierbarem Abstand entweder nebeneinander (senkrecht zur Scanrichtung) oder hintereinander (in Scanrichtung) anzuordnen und synchron über einen Galvanometerscanner mit f-Theta-Optik zu führen, siehe Abbildung 4.

Diese optische Konfiguration ermöglicht neue Freiheitsgrade in der PBF-LB/M-Prozessführung, etwa eine Nachbehandlung der frisch erzeugten Schmelzspur durch einen nachlaufenden Strahl, oder eine parallele Bearbeitung breiterer Bahnen durch nebeneinanderliegende Strahlen. Ziel ist eine möglichst überproportionale Steigerung der Aufbaurrate gegenüber der reinen Summation der Produktivität mehrerer Einzelstrahlen, ohne Einbußen bei der Bauteilqualität.

Zur Prozessentwicklung mit zwei gekoppelten Strahlen wurden kubische Volumenkörper aus IN625 gefertigt. Die Laserleistung beider Strahlen wurde in Anlehnung an bekannte Einzelstrahlparameter gleich gewählt, die Prozessparameter Scangeschwindigkeit und Spurabstand wurden systematisch variiert. Die Bewertung erfolgte über die relative Bauteildichte und die theoretische Aufbaurrate; zur Vergleichbarkeit wird die Volumenenergie $E_V = \frac{P_L}{\dot{V}} = \frac{P_L}{v_s \cdot D_s \cdot \Delta y_s}$ als Kennwert eingeführt.

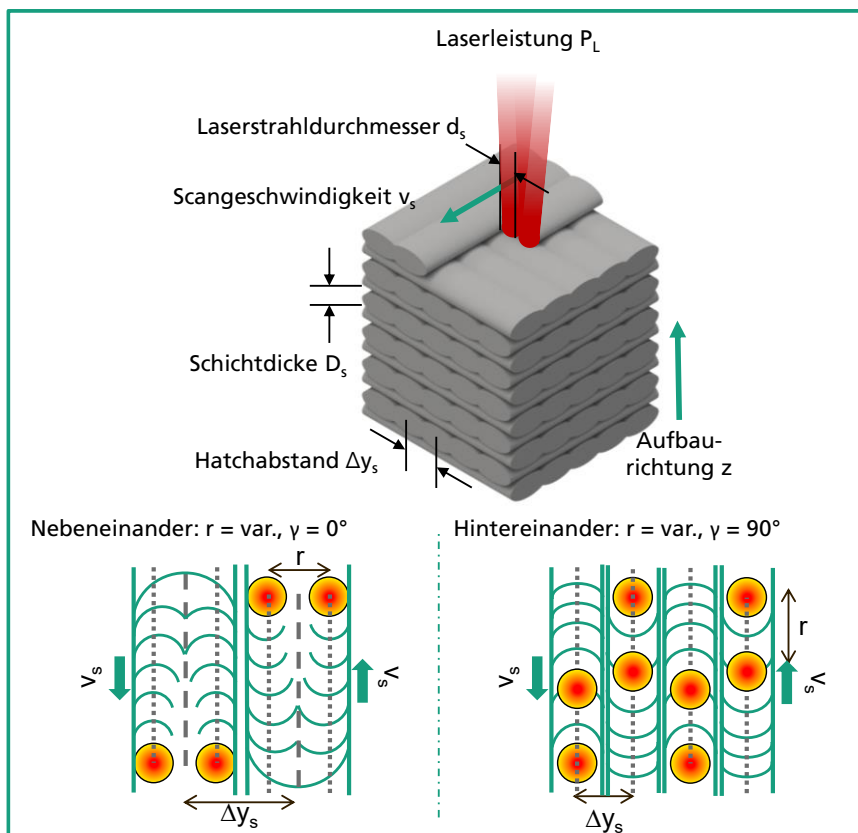


Abbildung 4: Vorgehen bei der Parameterstudie zum PBF-LB/M von IN625 mit zwei gekoppelten Laserstrahlen.

Es zeigt sich, dass insbesondere die hintereinander angeordneten Strahlen (Dual-Gauß-Array in Nachlaufkonfiguration) eine sehr effiziente Nutzung der eingestrahlichten Leistung

ermöglichen: Bei vergleichbarer Dichte konnte die Aufbaurrate gegenüber dem Einzelstrahlprozess um bis zu 180 % gesteigert werden. Für die Konfiguration mit nebeneinander angeordneten Strahlen wurde lediglich eine Verdoppelung der Produktivität erreicht, zudem mit größerer Streuung der relativen Dichten. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die sequentielle Nachbearbeitung der Schmelzspur durch den zweiten Strahl thermophysikalische Vorteile bietet, etwa eine gezieltere Nutzung der bereits vorgewärmten Schmelze und eine Reduktion lokaler Überhitzungsspitzen.

3.3 Quantitative Analyse der Spritzerbildung

Die Spritzerbildung gilt als sensibler Indikator für die Stabilität des PBF-LB/M-Prozesses. Spritzerpartikel können bei Ablagerung im Pulverbett oder auf Bauteiloberflächen zu Anbindungsfehlern, Porosität und Oberflächenfehlern führen. Gleichzeitig spiegeln Anzahl, Größe, Geschwindigkeit und Abwurfwinkel der Spritzer die Schmelzbad- und Kapillardynamik wieder. Das Sprintteam hat hierzu zwei komplementäre Analyseansätze etabliert:

1. Pulverbettkamera zur Analyse von im Pulverbett abgelagerte Spritzerpartikeln:

Hierfür wurde ein kostengünstiges Kamera- und Beleuchtungssystem in eine PBF-LB/M-Labormaschine integriert. Pro Schicht werden Bilder des Pulverbetts nach dem Pulverauftrag und nach jeder einzelnen Belichtung einer Probe aufgenommen, wodurch eine eindeutige Zuordnung von abgelegten Spritzerpartikeln zu den jeweiligen Proben ermöglicht wird. Durch Differenzbildung und Maskierung der Bauteilbereiche werden abgelagerte Spritzerpartikel identifiziert. Mit Bildverarbeitung durch ImageJ können Spritzer ab definierten Mindestgrößen anhand Fläche und Form ausgewertet und Größenverteilungen ermittelt werden. Diese Methodik erlaubt einen quantitativen Vergleich unterschiedlicher Prozessparameter und Strahlkonfigurationen hinsichtlich der abgelegten Spritzer (siehe Abbildung 5).

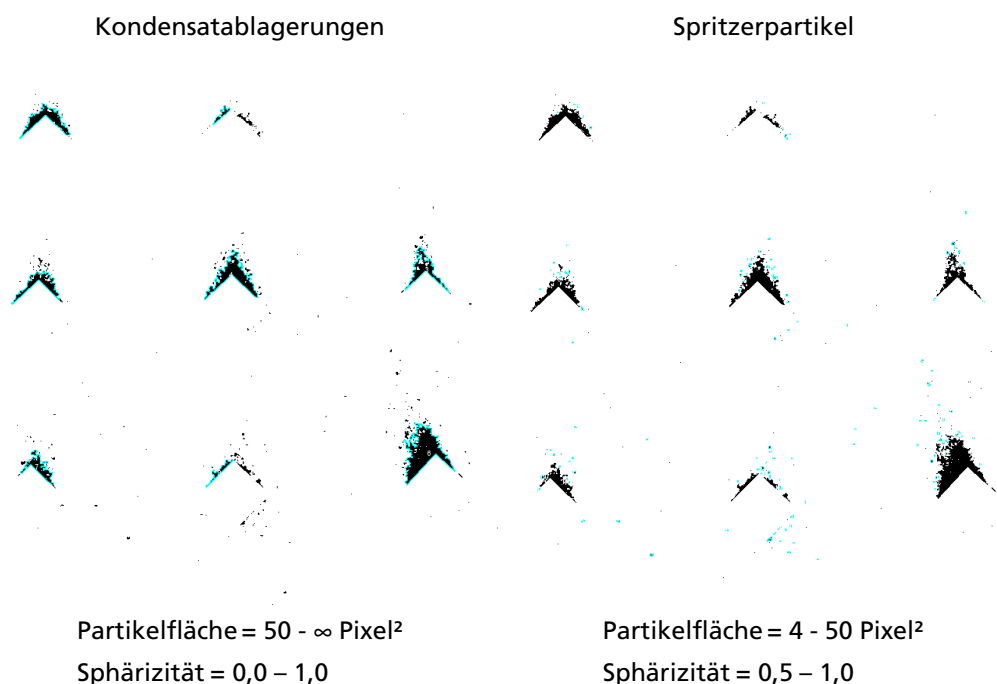


Abbildung 5: Exemplarische Differenzbilder zur Analyse des Metallkondensats (links) sowie der Spritzerpartikel (rechts) inkl. der verwendeten Analyseparameter.

2. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zur Analyse der Dynamik der Spritzbildung:

Um die dynamische Spritzerbildung zu erfassen, wurde eine Hochgeschwindigkeitskamera (Photron FASTCAM NOVA S16) in eine PBF-LB/M-Anlage (AconityMIDI) integriert. Mit Bildraten von bis zu 16 000 Hz und einer Auflösung von etwa 50 μm können selbstleuchtende Spritzerpartikel während der Belichtung mit dem Laser verfolgt werden. Die Belichtungsebene eines Probenkörpers wird so gewählt, dass die Scanvektoren in der Aufnahmeebene der Kamera liegen, siehe Abbildung 6. Zur Auswertung werden die Spritzer mittels Tracking-Algorithmus (TrackMate in Fiji) detektiert und über mehrere Frames hinweg zu Trajektorien verknüpft. Da die Partikel im unmittelbaren Abkopplungsbereich durch die Dampfackel teilweise verdeckt sind, werden die Trajektorien rückwärts bis zur Schmelzbadoberfläche extrapoliert. Ein eigens entwickeltes Python-Tool berechnet daraus Spritzergeschwindigkeit, Auswurfwinkel, Durchmesser und Entstehungszeitpunkte.

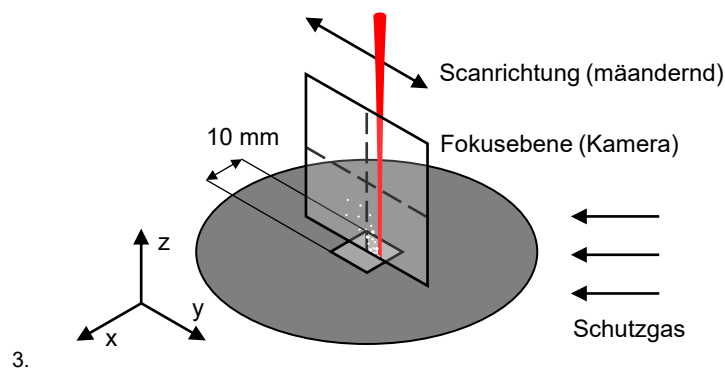


Abbildung 6: Schematische Aufsicht auf den in AconityMIDI realisierten Versuchsaufbau

Mit dieser Methodik wurde zunächst die Spritzerbildung bei Prozessen mit ringförmiger LDV und mit defokussierter gaußförmiger LDV bei identischem Strahldurchmesser und identischen Prozessparametern untersucht. Die Analysen zeigen, dass die Spritzergeschwindigkeit sehr gut durch logarithmische Normalverteilungen beschrieben werden kann (Abbildung 7). Typischerweise treten viele langsame Spritzer mit breiter Winkelverteilung und eine kleinere Anzahl schneller Spritzer mit engerer Winkelstreuung auf. Für Strahlen mit ringförmiger LDV wurden bei hohen Leistungen tendenziell höhere Spritzerraten und -geschwindigkeiten, aber kleinere mittlere Spritzergrößen festgestellt als für defokussierte gaußförmige LDV.

Trotz dieser Unterschiede konnte in den untersuchten Parameterbereichen keine direkte Korrelation zwischen den Spritzerkennwerten und der Bauteilporosität der aufgebauten Probenkörper festgestellt werden. Es zeigten sich jedoch deutliche Zusammenhänge zwischen Spritzerrate und -geschwindigkeit einerseits sowie prozessbezogenen Größen wie der normalisierten Enthalpie andererseits. Damit wird die Spritzeranalyse zu einem wertvollen Werkzeug zur Bewertung und Optimierung der Schmelzbadstabilität, auch wenn die resultierende Porosität von weiteren Faktoren abhängt.

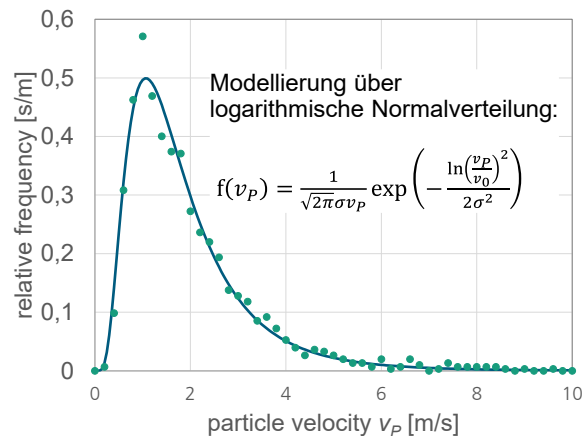


Abbildung 7: Häufigkeitsdichte der Geschwindigkeitsverteilung, modelliert über eine logarithmische Normalverteilung ($P_L = 450 \text{ W}$, $v_s = 1600 \text{ mm/s}$, $d_s = 276 \text{ }\mu\text{m}$, ringförmige LDV)

3.4 Spritzeranalyse im Dual-Gauß-Array

Aufbauend auf den Einzelstrahluntersuchungen wurde die Methodik der Hochgeschwindigkeitsanalyse auf Prozesse mit **Dual-Gauß-Array** angewendet. Ziel war es, die Wirkung des zweiten, nachlaufenden Strahls auf die Prozessdynamik und Spritzerbildung systematisch zu erfassen.

In den Versuchen wurden zwei gaußförmige Strahlen mit jeweils 350 W Leistung, einem Strahldurchmesser von etwa 100 μm und einer Scangeschwindigkeit von 2400 mm/s verwendet. Der Abstand der beiden Strahlen in Scanrichtung wurde variiert. Die Schmelze zwischen den Strahlen erstarrt in allen untersuchten Konfigurationen nicht, sodass der nachlaufende Strahl stets auf eine flüssige Schmelze trifft.

Die Auswertung zeigt, dass mit zunehmendem Strahlabstand die Spritzeranzahl zunimmt, während Mittelwert und Verteilungsbreite der Spritzergeschwindigkeit tendenziell abnehmen. Statistische Tests (Welch's t-Test, Signifikanzniveau 0,01) bestätigen, dass die Unterschiede in den mittleren Spritzergeschwindigkeiten für die meisten untersuchten Abstände signifikant sind. Der Auswurfwinkel der Spritzer nimmt mit zunehmendem Strahlabstand leicht ab, erreicht jedoch oberhalb eines Abstands von etwa 200 μm ein Plateau. Der mittlere Spritzerdurchmesser steigt zunächst an und stabilisiert sich ebenfalls oberhalb von rund 200 μm .

Die Geschwindigkeitsverteilungen lassen sich bei kleinen Strahlabständen gut durch eine einzelne logarithmische Normalverteilung approximieren. Bei größeren Abständen, insbesondere bei 500 μm , verschlechtert sich die Anpassungsgüte, da ein zusätzlicher Anteil schneller Partikel mit mittleren Geschwindigkeiten im Bereich von 5–10 m/s auftritt. Wird die Gesamtverteilung als Summe zweier Log-Normalverteilungen modelliert, zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit einer getrennten Betrachtung des führenden und des nachfolgenden Strahls (Abbildung 8). Die Verteilung des führenden Strahls entspricht dabei weitgehend derjenigen eines Einzelstrahlprozesses mit 350 W. Dies stützt die Interpretation, dass der nachlaufende Strahl in einem vorgewärmten Schmelzbad agiert und einen eigenständigen Spritzererzeugungsprozess mit veränderten Kennwerten hervorruft.

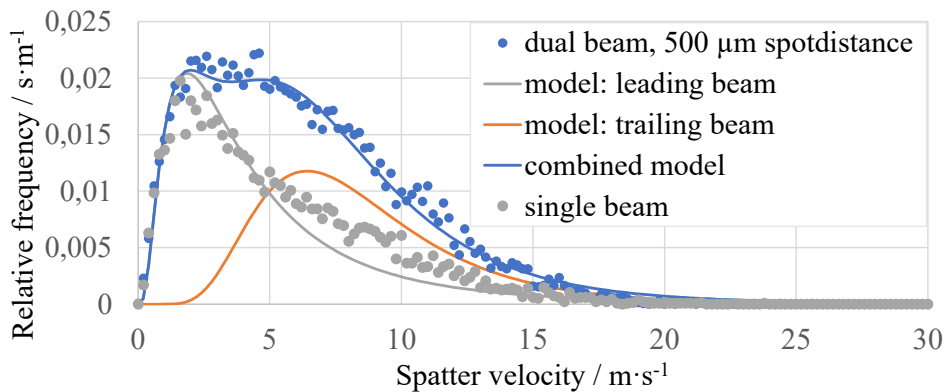


Abbildung 8: Spritzergeschwindigkeitsverteilungen für einen Strahlabstand von 500 µm, modelliert als Summe zweier logarithmischer Normalverteilungen und verglichen mit der Verteilung eines Einzelstrahlprozesses bei ansonsten identischen Parametern. Die relative Häufigkeit für den Einzelstrahl wurde entsprechend der Anzahl der in der Dual-Beam-Konfiguration erzeugten Spritzer gewichtet.

Insgesamt liefern diese Untersuchungen wichtige Hinweise darauf, dass mit einem Dual-Gauß-Array nicht nur die Aufbaurrate gesteigert, sondern auch die Prozessdynamik gezielt durch eine Anpassung der Intensitätsverteilung beeinflusst werden kann.

3.5 Skalierungsstrategien für die ringförmige LDV und das Dual-Gauß-Array

Nachdem prinzipiell gezeigt werden konnte, dass mit alternativen Strahlformen eine Produktivitätssteigerung erreichbar ist, sollen die gewonnenen Erkenntnisse nun in eine weitere Steigerung der Aufbaurrate für das Dual-Gauß-Array sowie den ringförmigen Strahl einfließen, um Skalierungsstrategien für Anwendungen mit erhöhter Laserleistung abzuleiten. Hierzu sind weitere Versuche bei gesteigerter Laserleistung vorgesehen – bis 800 W für das Dual-Gauß-Array und bis 1050 W für die ringförmige LDV, die in einem teilfaktoriellen statistischen Versuchsplan (orthogonales Feld, auch bekannt als Taguchi-Array) strukturiert werden. Auf diese Weise wird die Vielzahl möglicher Parameterkombinationen effizient reduziert, ohne die Aussagekraft der Experimente wesentlich zu beeinträchtigen. Die dabei erzeugten kubischen Proben werden hinsichtlich ihrer Oberflächenqualität (qualitativ und quantitativ) sowie ihrer relativen Bauteildichte untersucht. Der untersuchte Parameterraum ist in Abbildung 9 dargestellt. Die Auswertung erfolgt, indem die Messwerte für jede Variable nach deren Level gruppiert und gemittelt werden. Durch die orthogonale Struktur des Versuchsplans sind die übrigen Prozessparameter in diesen Gruppen statistisch ausgeglichen, sodass ihr Einfluss weitgehend herausgemittelt wird. Dadurch können die Haupteffekte von Spurabstand, Scangeschwindigkeit und Laserleistung auf Aufbaurrate, Dichte und Oberflächenqualität isoliert bewertet und robuste Trends für die Leistungsskalierung abgeleitet werden. Ziel ist die Entwicklung eines Prozesses, der die theoretische Aufbaurrate $\dot{V} = v_s \cdot D_s \cdot \Delta y_s$ durch eine

gezielte Erhöhung des Produkts aus Scangeschwindigkeit, Spurbabstand und Schichthöhe weiter steigert.

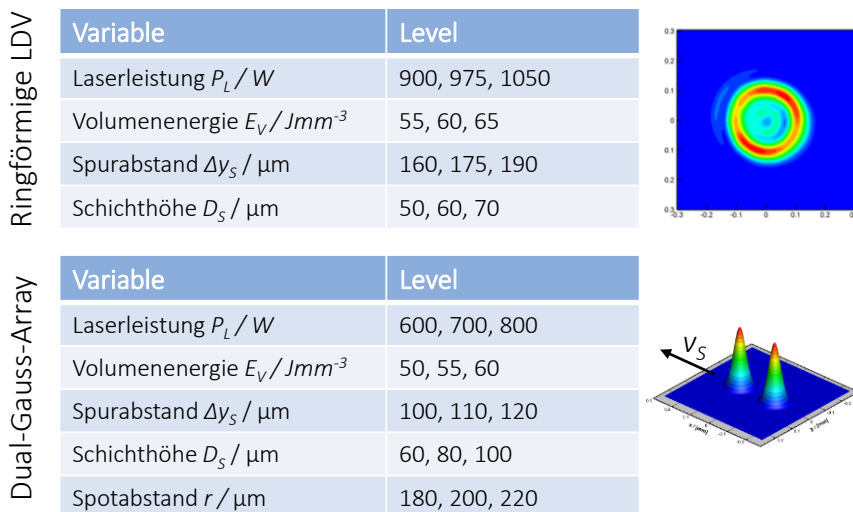


Abbildung 9: Parameterraum des statistischen Versuchsplans

Ringförmige LDV

Für alle Proben im untersuchten Parameterbereich wurden relative Dichten von $> 99,9\%$ gemessen. Damit entfällt die Bauteildichte als unterscheidendes Qualitätskriterium, da sie in allen Fällen auf sehr hohem Niveau liegt. Deutliche Unterschiede zeigen sich hingegen in der Oberflächenqualität, die nachfolgend exemplarisch anhand der gemessenen Oberflächenrauheit der Deckfläche dargestellt wird (Abbildung 10).

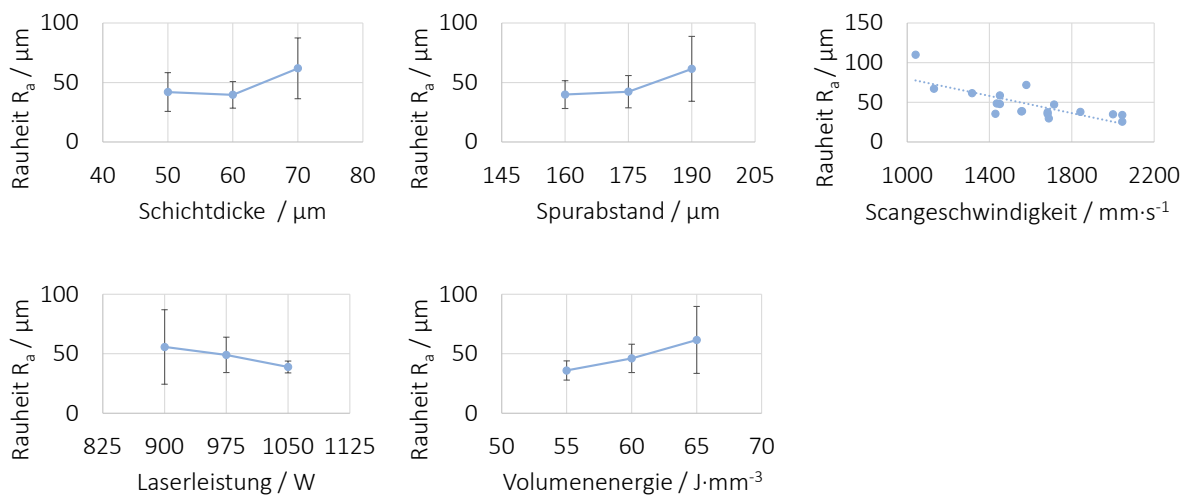


Abbildung 10 Einfluss der einzelnen Prozessparameter auf die Oberflächenqualität für den PBF-LB/M Prozess mit ringförmiger LDV

Aus den Diagrammen lässt sich ablesen, dass eine Erhöhung von Schichtdicke und Spurbabstand zu einer Zunahme der Oberflächenrauheit und damit zu einer Verringerung der Bauteilqualität führt. Durch eine Erhöhung der Scangeschwindigkeit kann die Rauheit hingegen reduziert und zugleich die Aufbaurrate gesteigert werden. Die Volumenenergie kann jedoch nicht beliebig verringert werden, da dem Prozess sonst nicht genügend Energie zur Verfügung steht und Bindungsfehler auftreten. Dies kann durch eine gleichzeitige Erhöhung der Laserleistung kompensiert werden. Insgesamt zeigt sich, dass der Prozess mit

ringförmiger LDV durch eine gekoppelte Steigerung von Scangeschwindigkeit und Laserleistung skaliert werden kann (siehe Skalierungsstrategien Abbildung 12).

Dual-Gauß-Array

Für den Prozess mit Dual-Gauß-Array ergeben sich grundsätzlich ähnliche Trends wie für den mit ringförmiger LDV: Es werden ebenfalls sehr hohe relative Bauteildichten erreicht, liegen mit typischerweise $\geq 99,8\%$ jedoch geringfügig unter denen des Prozess mit ringförmiger LDV. Für die Ausbildung der Rauigkeit bei der Skalierung der Aufbauraten (Abbildung 11). gelten weitgehend ähnliche Randbedingungen wie beim Prozess mit ringförmiger LDV

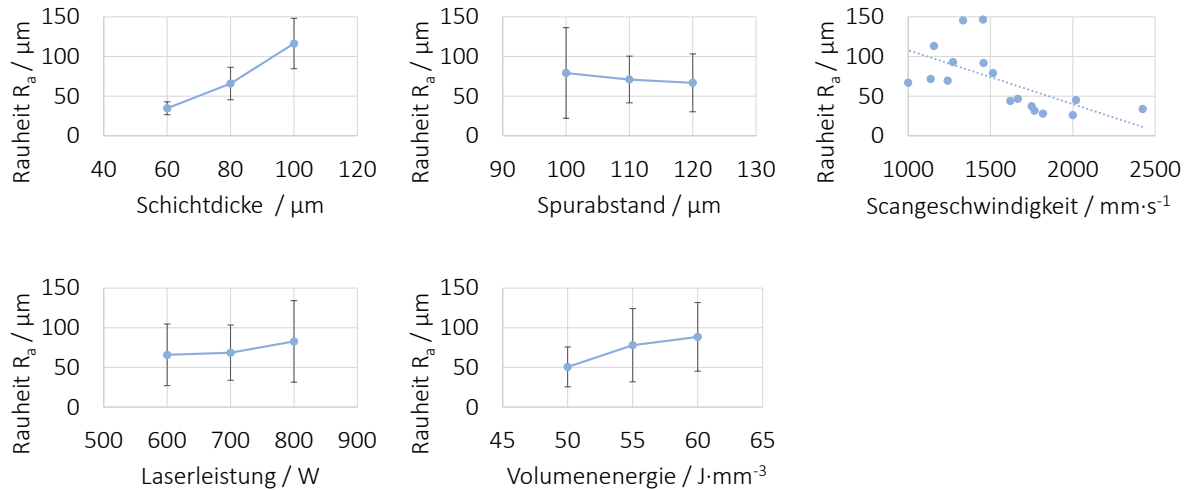


Abbildung 11 Einfluss der einzelnen Prozessparameter auf die Oberflächenqualität für den PBF-LB/M Prozess mit Dual-Gauß-Array

Auch hier führen erhöhte Schichtdicken zu einer Zunahme der Oberflächenrauheit und damit zu einer Verschlechterung der Oberflächenqualität. Im Unterschied zum Prozess mit ringförmiger LDV kann der Spurbstand beim Dual-Gauß-Array begrenzt erhöht werden, jedoch kann davon ausgegangen werden, dass dies nicht weit über den Strahldurchmesser hinaus möglich ist, da sonst die Anbindungsqualität zwischen den Schmelzspuren deutlich abnimmt.

Besonders kritisch zeigt sich die Kombination aus hoher Laserleistung und großer Schichtdicke: Dies führte zu den schlechtesten Oberflächenqualitäten, sodass in die Rauheit bei höherer Leistung im Mittel weit über der Rauheit bei hoher Leistung und niedrigen Schichthöhen liegt. Dies erweckt auf den ersten Blick den Eindruck, dass eine Skalierung des Prozesses durch Erhöhung der Laserleistung nur eingeschränkt möglich ist. Tatsächlich ist eine leistungs-basierte Skalierung des Dual-Gauß-Prozesses jedoch realisierbar, allerdings nur in Kombination mit geringeren Schichtdicken von etwa $60\ \mu\text{m}$ und bei besonders hohen Scangeschwindigkeiten.

Skalierungsstrategie für ringförmige Leistungsdichteverteilung:

$$\dot{V} \uparrow = v_s \uparrow \cdot \Delta y_s \downarrow \cdot D_s \downarrow$$

Beispiel: Schichthöhe $\approx 50\ \mu\text{m}$, Spurbstand $\approx 0,6 \cdot d_s$,
Volumenenergie $55\ \text{J}/\text{mm}^3$

Skalierungsstrategie für Dual-Gauß-Array:

$$\dot{V} \uparrow = v_s \uparrow \cdot \Delta y_s - \cdot D_s \downarrow$$

Beispiel: Schichthöhe $\approx 60\ \mu\text{m}$, Spurbstand $\approx d_s$,
Spotabstand $\approx 2 \cdot d_s$, Volumenenergie $55\ \text{J}/\text{mm}^3$

Abbildung 12 Zusammengefasste Skalierungsstrategien für Prozesse mit ringförmiger LDV und Dual-Gauß-Array

Zusammenfassend wurden mit dem Dual-Gauß-Array Aufbautaten von bis zu $16 \text{ mm}^3/\text{s}$ und mit der ringförmigen LDV von bis zu $19,1 \text{ mm}^3/\text{s}$ erreicht, wobei die ringförmige LDV hinsichtlich Dichte und Oberflächenrauheit die besseren Ergebnisse liefert. Damit wurden die jeweils zur Verfügung stehenden Laserleistungen der eingesetzten Strahlquellen vollständig ausgenutzt.

3.6 Parametrische Beschreibung ringförmiger LDV

Mit der zunehmenden Verbreitung ringförmiger LDV stellt sich die Frage, wie diese Strahlformen einheitlich beschrieben und in Simulation und Experiment reproduzierbar genutzt werden können. Hierzu wurde der etablierte Supergauß-Ansatz auf ringförmige LDV erweitert.

Während der klassische Supergauß-Ansatz gauß- bis Tophat-förmige LDV über eine Exponentenvariation beschreibt, wird er für ringförmige LDV um zusätzliche Parameter ergänzt. Die erweiterte Beschreibung erfasst im Wesentlichen vier Freiheitsgrade:

- den mittleren Ringradius,
- die Ringbreite,
- die Flankensteilheit (Exponent)
- und einen äußeren Limitradius, der die endliche räumliche Ausdehnung realer Strahlen berücksichtigt.

Zusätzliche Konstanten werden so bestimmt, dass ein definierter Anteil der Gesamtleistung innerhalb eines charakteristischen Radius eingeschlossen ist – analog zur üblichen Definition des Gaußstrahls über den $1/e^2$ -Radius. Auf diese Weise können real gemessene ringförmige LDV über eine polare Mittelung erfasst und mit hoher Genauigkeit durch das parametrische Modell approximiert werden.

Zur Validierung wurde eine thermophysikalische Simulation des PBF-LB/M-Prozesses durchgeführt, bei der ein real gemessene ringförmige LDV mit der parametrisch beschriebenen Verteilung verglichen wurde (Abbildung 13). Die resultierenden Temperaturfelder und Schmelzbadgeometrien stimmten sehr gut überein, was die Eignung der Parametrisierung für simulationsgestützte Prozessanalysen bestätigt. Damit steht ein leistungsfähiges Werkzeug zur Verfügung, um ringförmige LDV systematisch zu variieren, zu klassifizieren und gezielt für Prozessoptimierungen einzusetzen.

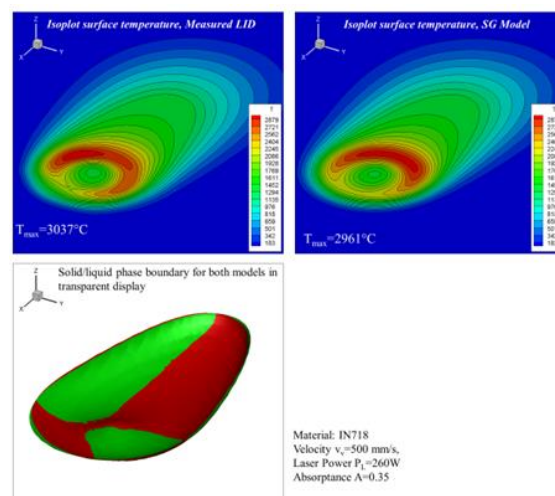


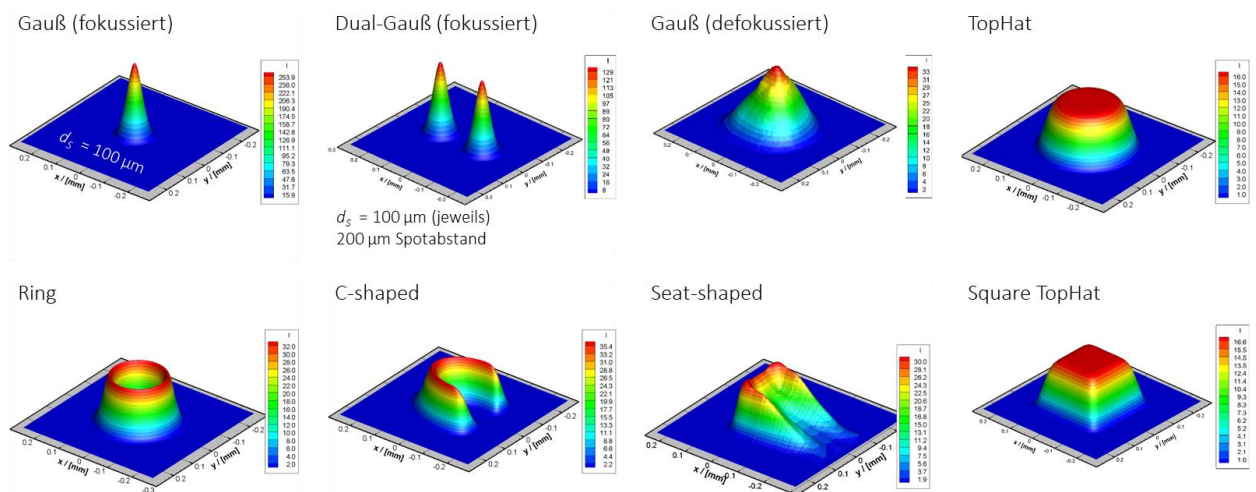
Abbildung 13: Vergleich der in einer thermophysikalischen Simulation ermittelten Temperaturverteilung eines gemessenen Strahls mit ringförmiger LDV mit der Temperaturverteilung, die auf Basis des erweiterten Super-Gauß-Ansatzes berechnet wurde.

3.7 Geometrische Effizienz und Simulation alternativer Strahlformen

Die geometrische Effizienz des PBF-LB/M-Prozesses beschreibt, welcher Anteil der aufgeschmolzenen Querschnittsfläche tatsächlich zum Aufbau von Volumen beiträgt. Sie kann als Verhältnis der tatsächlich umgeschmolzenen Querschnittsfläche zu der Fläche die durch Spurabstand und Schichtdicke aufgespannt wird. Konventionelle Prozesse mit gaußförmigen LDV erreichen typischerweise nur etwa 30–40 % geometrische Effizienz, da tiefe, schmale Schmelzspuren große Überlappungen erfordern, um Bindefehler zu vermeiden.

$$\mu_{geo} = \frac{A_{melt}}{\Delta y_S \cdot D_S}$$

Durch geeignete LDV könnte das der Schmelzspurquerschnitt näherungsweise rechteckig ausgebildet werden, sodass kleinere Überlappungen und höhere Effizienzen (60–70 %) möglich wären. Physikalisch wird dies durch die Wärmeleitung und das komplexe Zusammenspiel von Schmelzbad und Kapillardynamik begrenzt. Um das Potenzial unterschiedlicher Strahlformen abzuschätzen, wurden Wärmeleitungssimulationen mit verschiedenen LDV durchgeführt, darunter gaußförmige, ringförmige, C-förmige und „sesselförmige“ LDV (Abbildung 14).



*Farbskala und Plathöhe sind mit der Maximalintensität normiert

$d_s = 300 \mu\text{m}$ (polares 2. Moment)

Abbildung 14: Untersuchte Strahlformen in der Wärmeleitungssimulation zur Analyse des Einflusses der LDV auf die Schmelzbadgeometrie

In den Simulationen wurden die LDV mit konstanter Gesamtleistung über eine glatte Oberfläche mit konstanter Geschwindigkeit geführt. Temperaturabhängige Materialkennwerte und eine modellierte Deformation der Schmelzbadoberfläche durch Rückstoßdruck wurden berücksichtigt. Aus den berechneten Temperaturfeldern wurde die fest/flüssig-Grenze bestimmt, die die Schmelzspurgeometrie definiert. Durch Variation von angenommenen Spurabstand und Schichthöhe ließ sich die theoretisch maximal nutzbare Querschnittsfläche und damit die geometrische Effizienz bestimmen (siehe Abbildung 12).

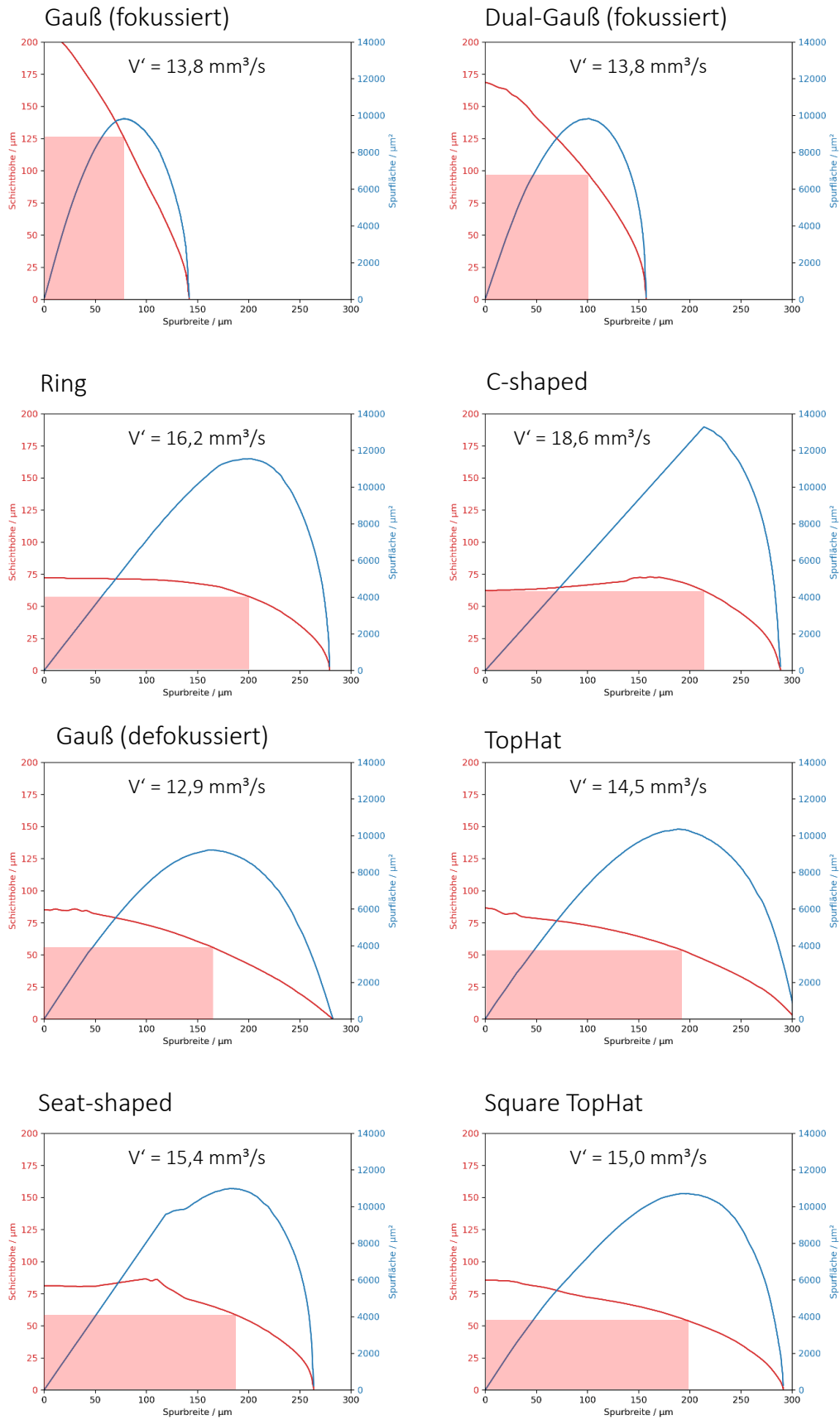


Abbildung 12: (Rot: Mögliche Schichthöhe in Abhängigkeit des Spurbabstandes), (Blau: Mögliche Querschnittsfläche in Abhängigkeit des Spurbabstandes). Das rote Rechteck entspricht maximal möglicher Querschnittsfläche und gibt die mögliche maximale Aufbaurrate V' vor.

Die Ergebnisse zeigen, dass nicht-gaußsche LDV, insbesondere ringförmige und C-förmige LDV, bei gleicher Laserleistung flachere Schmelzbadwurzeln und damit höhere geometrische Effizienzen ermöglichen. Diese Erkenntnisse liefern wertvolle Hinweise für die gezielte Strahlformung mit Blick auf eine optimale Kombination aus Aufbaurrate, Effizienz und Prozessstabilität.

3.8 Inverses Wärmeleitungsproblem zur Strahlformbestimmung

Durch die wachsenden Möglichkeiten bei der Strahlformung ergibt sich ein großer Parameterraum möglicher LDV, der experimentell nicht mehr vollständig untersucht werden kann. Um diese Vielzahl möglicher Strahlformen systematisch zu erschließen, wurde ein Tool zur Lösung des inversen Wärmeleitungsproblems für den Prozess des PBF-LB/M erweitert. Während bei der Lösung des direkten Wärmeleitproblems, das aus einer gegebenen Intensitätsverteilung resultierende Temperaturfeld bestimmt wird, wird bei der Lösung des inversen Wärmeleitproblems die notwendige LDV für ein gewünschtes Temperaturfeld bestimmt.

Um ein solches Tool für den Prozess des PBF-LB/Ms verwenden zu können, müssen wesentliche Eigenschaften des Prozesses im auf der Wärmeleitungsgleichung basierenden Simulationsmodell abgebildet werden. Dies betrifft insbesondere die Wärmeleitung und die optische Propagation im Pulverbett als auch den Phasenwechsel beim Schmelzen des Materials. Um dies im Modell zu berücksichtigen, werden folgende Änderungen vorgenommen:

1. Betrachtung von effektiven, temperaturabhängigen Materialparametern für Dichte und Wärmeleitfähigkeit im Pulver
2. Berücksichtigung einer Volumenabsorption im Pulverbett, die gemäß 2-Fluss-Methode die Streuung an den Pulverpartikeln im Pulverbett modelliert
3. Berücksichtigung der latenten Wärme beim Schmelzen des Materials durch zusätzliche Wärmesenke in der Wärmeleitgleichung

Da die Lösung auf einer modifizierten Wärmeleitgleichung beruht, können über die Wärmeleitung hinausgehende Effekte wie die Dynamik des Pulverbetts oder der Schmelze in dem Modell nicht abgebildet werden.

Zur Verifikation dieses Modells wird zunächst eine direkte Simulation mit gaußförmiger LDV durchgeführt, um eine Referenz-Temperaturverteilung zu generieren. Diese Temperaturverteilung dient anschließend als Zielvorgabe im inversen Modell. Die daraus rekonstruierte LDV entspricht der ursprünglichen gaußförmigen LDV mit nur geringen Abweichungen von weniger als 1%, was die grundsätzliche Funktionsfähigkeit und Konvergenzfähigkeit des angepassten Tools bestätigt (Abbildung 15).

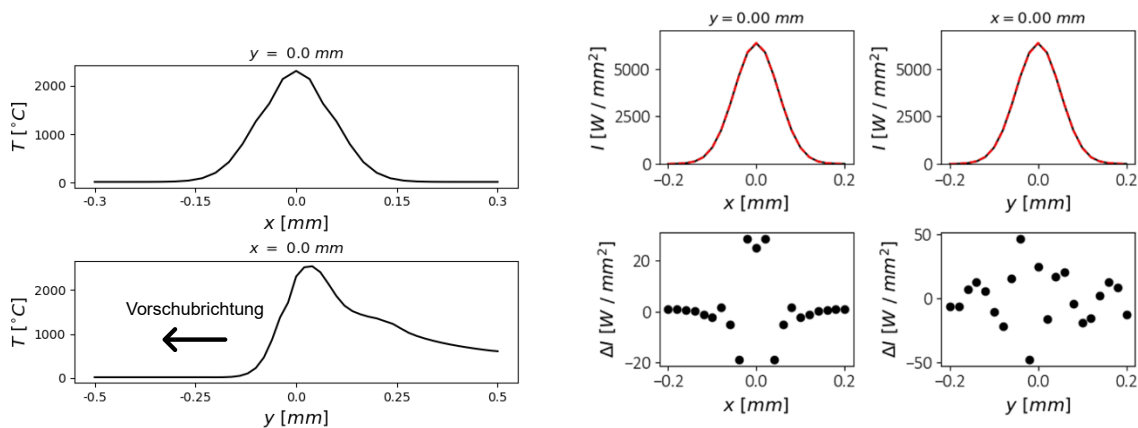


Abbildung 15: Links: Querschnitt über die aus der Lösung des angepassten, direkten Wärmeleitproblems resultierende Temperaturverteilung an der Oberfläche für $z=0 \mu\text{m}$. Rechts: Über das inverse Wärmeleitproblem rekonstruierte LDV, darunter die Residuen zu der LDV, jeweils Querschnitt in x- und y-Richtung.

Mit dem so verifizierten Tool können für verschiedene Zieltemperaturen und Optimierungskriterien die geeignete Intensitätsverteilungen bestimmt werden. So soll beispielsweise für ein Einzelpurexperiment das gleiche Schmelzbad wie bei Verwendung einer gaußförmigen LDV erzeugt werden. Dieser ist im realen Prozess allerdings oft mit einer Überhitzungszone und ausgeprägten Kapillareffekten verbunden. Um diese Effekte verhindern zu können, wird zunächst das direkte Wärmeleitproblem gelöst und die resultierende Temperaturverteilung auf Maximalwerte knapp über der Schmelztemperatur ($T_{max} = 1800^\circ\text{C}$) begrenzt. Die modifizierte Temperaturverteilung wird als Eingabeparameter für die Lösung des inversen Wärmeleitproblems verwendet. Unter Verwendung dieser Randbedingungen ergibt sich die in Abbildung 16 dargestellte LDV.

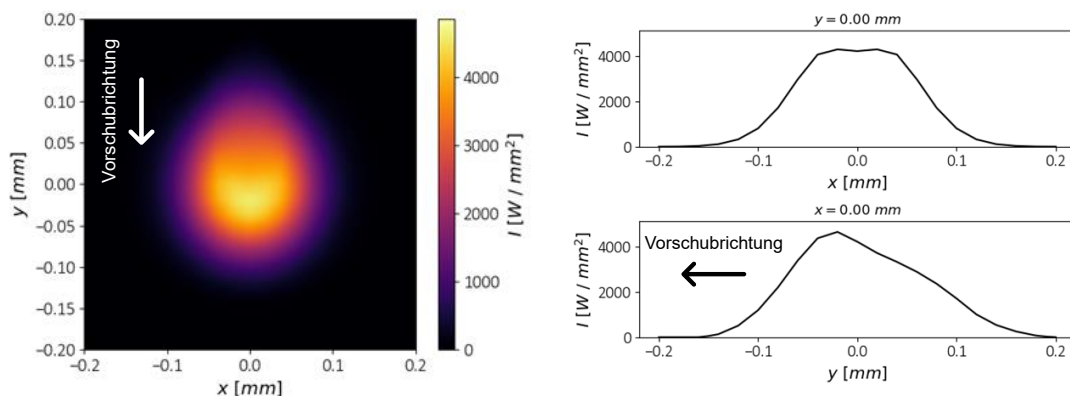


Abbildung 16: Durch das inverse Wärmeleitproblem ermittelte LDV, zur Erzeugung des gleichen Schmelzbad wie bei Verwendung einer gaußförmigen LDV bei zeitgleicher Vermeidung der Temperaturspitzen.

Durch die Reduzierung der Intensitätsspitzen im Vergleich zu einer gaußförmigen LDV und die entgegen der Vorschubrichtung auslaufende LDV wird das Überhitzen des Werkstücks mit der damit einhergehenden Kapillarbildung verhindert.

Durch die Erweiterung des Simulationsmodells können nun auch Mehrpurexperimente betrachtet werden, bei denen das Material auf der bereits bearbeiteten Seite aufgeschmolzen ist, während auf der noch zu bearbeitenden Seite eine Pulverschicht vorliegt. Dies ermöglicht die Untersuchung der aus der prozesseitigen Asymmetrie resultierenden Asymmetrie der LDV und damit den Nutzen der Verwendung von komplizierten Strahlformungselementen, die derartige Asymmetrien umsetzen können. Ein solcher Fall ist in Abbildung 17 links zu sehen.

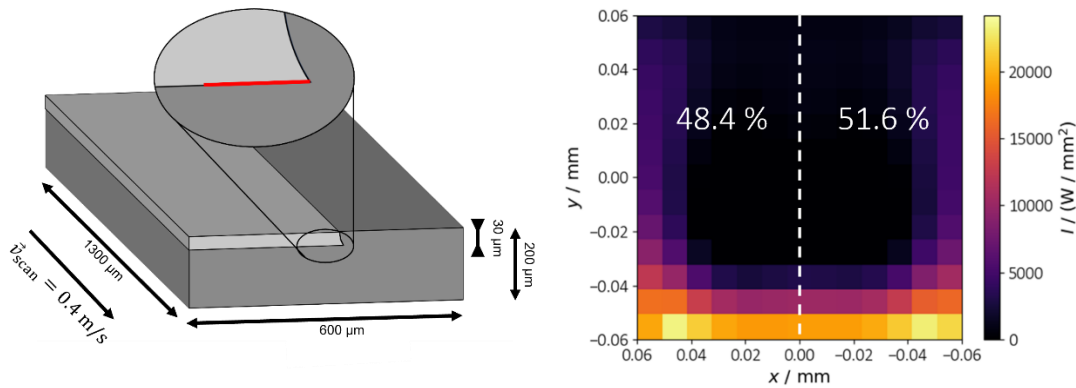


Abbildung 17: Links: Darstellung der Simulationsdomäne. In Dunkelgrau das aufgeschmolzene Vollmaterial, in Hellgrau das noch zu bearbeitende Pulverbett. Als Temperaturvorgabe wird neben den bereits bearbeiteten Spuren am Interface zwischen Vollmaterial und Pulverbett eine homogene Temperatur knapp über der Schmelztemperatur vorgegeben (rote Linie). Rechts: Über das inverse Wärmeleitproblem bestimmte Intensitätsverteilung mit jeweiligem Anteil der beiden Seiten an der Gesamtleistung.

Bei der bestimmten Intensitätsverteilung (Abbildung 17 rechts) ergibt sich eine leichte Asymmetrie in Richtung des bereits aufgeschmolzenen Materials. Dies ist durch die erhöhte Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zum Pulverbett zu erklären. Die auftretende Asymmetrie ist allerdings sehr gering und wird vermutlich durch zusätzliche, gegenläufige Effekte wie der erhöhten Vorerwärmung auf der bereits bearbeiteten Seite im Prozess aufgehoben.

Die beiden dargestellten Anwendungsfälle stellen beispielhaft dar, welche Möglichkeiten die Verwendung des Tools zur Lösung des inversen Wärmeleitproblems für den Prozess des PBF-LB/MS bietet. Das Tool bildet damit die Grundlage für simulationsgestützte Strahlformungsstrategien, mit deren Hilfe sich der hochdimensionale Parameterraum freier Strahlformen effizient erschließen lässt.

4 Diskussion der Ergebnisse

Über die Projektlaufzeit wurden zentrale Beiträge in drei Bereichen erzielt: Steigerung der Produktivität, Verbesserung der Prozessrobustheit und methodische Vorbereitung zur Erweiterung des Werkstoffspektrums.

Hinsichtlich der Produktivität konnte gezeigt werden, dass sowohl die Vergrößerung des Strahldurchmessers als auch die Anpassung der LDV einen signifikanten Einfluss haben. Defokussierte gaußförmige Strahlen und ringförmige LDV ermöglichen bei vergleichbaren Dichten deutlich höhere Aufbauraten als konventionelle Standardprozesse mit gaußförmiger LDV. Die Nutzung von ringförmigen LDV mit hoher Gesamtleistung und reduzierter Maximalintensität erlaubt eine effizientere Nutzung der Laserleistung, da tiefschweißende Kapillarregime vermieden und höhere Scangeschwindigkeiten realisiert werden können.

Die Kopplung zweier Laserstrahlen in einem Dual-Gauß-Array steigert die Produktivität ebenfalls. Besonders vorteilhaft sind Konfigurationen, bei denen ein zweiter Strahl dem ersten Strahl nachfolgt. Hier konnten überproportionale Produktivitätssteigerungen von 180 % gegenüber der lediglich verdoppelten Laserleistung (+100%) erreicht werden. Die ergänzenden Spritzeranalysen belegen, dass sich die Prozessdynamik in solchen Mehrstrahlkonfigurationen deutlich vom Einzelstrahlprozess unterscheidet und prinzipiell gezielt eingestellt werden kann.

Bezüglich der Prozessrobustheit wurden sowohl klassische Kenngrößen (relative Bauteildichte und deren Streuung) als auch neue prozessnahe Indikatoren (Spritzerrate, -

geschwindigkeit, -größe, -auswurfwinkel, Ablagerungsmuster im Pulverbett) etabliert. Die Analysen zeigen, dass ringförmige und defokussierte gaußförmige LDV einerseits eine höhere Produktivität ermöglichen, andererseits aber häufiger mit einer höheren Streuung der Bauteildichte verbunden sind insbesondere, wenn maschinenspezifische Unterschiede (Schutzgasführung, Pulverauftrag, Einfallswinkel) hinzukommen. Die Spritzeranalysen zeigen eine starke Kopplung von prozessnahen Größen wie normalisierter Enthalpie mit Spritzerkennwerten; damit kann die Spritzerbildung als sensibler Messfühler für die Stabilität der Schmelzbaddynamik genutzt werden.

Direkte Korrelationen zwischen Spritzerkennwerten und Porosität wurden in den betrachteten Parameterbereichen jedoch nicht beobachtet. Dies unterstreicht, dass Porosität ein Resultat mehrerer miteinander verknüpfter Mechanismen ist (z. B. Schutzgasströmung, Pulverqualität, Scanstrategie) und nicht allein durch die Spritzerbildung determiniert wird. Gleichwohl bietet die kombinierte Nutzung von Dichte- und Spritzerkennwerten einen deutlich reichhaltigeren Einblick in das Prozessgeschehen als die rein bauteilbezogene Auswertung.

Für das Werkstoffspektrum wurden im Rahmen des Projekts primär methodische Grundlagen geschaffen. Die Untersuchungen konzentrierten sich auf IN625, da hierfür umfangreiches Erfahrungswissen und etablierte Referenzprozesse vorliegen. Die gewonnenen Erkenntnisse zur Vermeidung hoher Maximalintensitäten, zur Stabilisierung wärmeleitungsdominierter Prozessregime und zur gezielten Anpassung der Schmelzbadgeometrie bilden jedoch eine wesentliche Grundlage, um künftig auch schwer schweißbare Legierungen robuster per PBF-LB/M zu verarbeiten. Insbesondere ringförmige LDV und Mehrstrahlprozesse mit vorgewärmter Schmelze sind vielversprechende Ansätze, um Rissbildung infolge hoher Temperaturgradienten und Spannungsakkumulation zu reduzieren. Der Umfang der bereits durchgeführten Arbeiten war jedoch so groß, dass eine Übertragung auf weitere Werkstoffe im Projektzeitraum nicht mehr systematisch untersucht werden konnte; dieses Ziel wurde daher nicht erreicht.

Sprintteam 10: Zeitliche und örtliche Modulation von Laserstrahlung für Rolle-zu-Rolle-Prozesse mittels VCSEL (Fraunhofer IPT in Zusammenarbeit mit TRUMPF Photonic Components)

Der Stand der Technik zeigt, dass R2R-Prozesse (Roll-to-Roll) in der Produktion weit verbreitet sind, jedoch gelten die Erwärmungs- und Trocknungsprozesse als Engpass, da sie lange dauern, viel Energie verbrauchen und großen Raum benötigen. Beispielsweise entfallen bis zu 46,8 % des Energieverbrauchs bei der Trocknung von LIB-Elektroden (Lithium-Ionen-Batterien) auf diesen Prozess, was ihn zum energieintensivsten in der gesamten Prozesskette macht. Derzeit werden in R2R-Produktionslinien Konvektionsöfen eingesetzt, die bis zu 100 m lang sein können, was den Bedarf an alternativen Technologien zur Reduzierung des Energieverbrauchs und der Prozessdauer unterstreicht.

Die laserbasierte Trocknung hat sich als vielversprechende Alternative erwiesen. Laborversuche zeigen, dass scannende Laserstrahlen die Trocknungszeit verkürzen können, ohne die Elektrodenleistung zu beeinträchtigen. Allerdings bringt die hohe lokale Energiezufuhr des Lasers Schäden an den Elektroden mit sich, und die Wechselwirkung zwischen Laserstrahlung und nassen Elektroden war zu Projektbeginn nicht vollständig verstanden. Scannende Lasertrocknungssysteme wurden bisher nur im Labormaßstab

getestet und nicht in Pilotlinien implementiert. Zudem muss das Lasersystem für die Trocknung von LIBs optimiert werden, wofür eine angepasste Prozesskontrolle erforderlich ist, die bislang nicht entwickelt wurde.

Kommerzialisiert sind hochleistungsfähige VCSEL-Module (Vertically-Coupled Surface Emitting Lasers), die bereits in verschiedenen Erwärmungsprozessen Anwendung finden, wie z. B. bei der Wärmebehandlung von Metallen. Diese Module ermöglichen ein anpassbares Intensitätsfeld für die Energiezufuhr. Sie zeigen Potenzial für die Trocknung von LIBs, da sie eine geringere Laserstrahlintensität über größere Flächen erzeugen als Laserscannen-Lösungen. Allerdings gibt es bisher keine Untersuchungen zur Anwendung von VCSEL-Modulen in der Trocknung von LIB-Elektroden. Trotz der Möglichkeit, die Ausgangsleistung jedes Lasersenders individuell einzustellen, werden sie meist konstant betrieben und als statische Laserquelle verwendet, wodurch das volle Potenzial in der Trocknungstechnik bislang ungenutzt bleibt.

Die aus dem Stand der Technik abgeleiteten Aufgaben und Ziele der Arbeit umfassten mehrere wesentliche Punkte. Zunächst wurde ein Screening der Anforderungen der Anwendungen und Prozesse durchgeführt. Dies beinhaltete die Dimension des Bearbeitungsfeldes, die Produktionsgeschwindigkeit sowie die Ausbringungsrate. Zudem war die Berechnung des Leistungsbedarfs und der Intensitätsverteilung erforderlich, ebenso wie die Berücksichtigung von Homogenitätsanforderungen und der Diskretisierung sowie Regelgüte, insbesondere hinsichtlich der zeitlichen und örtlichen Auflösung.

Ein weiterer wichtiger Aspekt war die Berechnung der Wärmeleitung und die Ableitung von Key Performance Indicators (KPIs) für die Regelung. Hierbei mussten die Wechselwirkungen zwischen Material, Absorptionsverhalten, Produktionsgeschwindigkeit und Intensitätsverteilung berücksichtigt werden, um die gewünschte Prozesstemperatur zu erreichen.

Darüber hinaus wurde der Aufbau einer VCSEL-basierten R2R-Anlage für kontinuierliche und adaptive Erwärmungsprozesse angestrebt. Dies umfasste die Entwicklung eines Prüfstands zur optischen Charakterisierung, die Charakterisierung der VCSEL-Module, die Integration dieser Module in die R2R-Anlage sowie die Entwicklung und Integration eines Thermographiemoduls zur Flächentemperaturmessung.

Zuletzt war die Entwicklung eines modellbasierten Regelungssystems vorgesehen, das die Festlegung eines 4-dimensionalen, anwendungs- und prozessabhängigen Sollwert-Tensors beinhaltete. Zusätzlich sollten die Regelstrecke charakterisiert, ein geeigneter Regler ausgewählt und die Regelung im VCSEL-System implementiert werden.

Aufgrund des Ausscheidens eines Konsortialpartners sowie des Herstellers des VCSEL-Moduls, TRUMPF Photonic Components GmbH, wurden alle genannten Aufgaben vom Fraunhofer IPT durchgeführt.

Screening der Anforderungen der Anwendungen und Prozesse

Für diese Aufgabe wurden die folgenden Anwendungsmöglichkeiten des VCSEL-Moduls in R2R-Prozessen identifiziert:

a. Trocknung von LIB-Elektroden

Die Trocknung der LIB-Elektroden kann durch die Laserbestrahlung beschleunigt werden. Vor der Trocknung wird die nasse Elektrodenschicht zunächst durch Schlitzdüsenbeschichtung auf den Stromkollektor aufgebracht. Die LIB-Anodenelektroden bestehen typischerweise aus

einem Slurry, der den Graphit als Aktivmaterial, Ruß als leitfähigen Zusatzstoff, Carboxymethylcellulose (CMC) als Bindemittel und Wasser als Lösungsmittel enthält. Die Stromkollektoren (Substrat) für Anoden sind aus Kupferfolien hergestellt.

Laut dem Stand der Technik wird die LIB-Trocknung durch Konvektionsöfen in R2R-Produktionslinien realisiert. Während des Prozesses werden die Nassschichten auf 80 – 150 °C erwärmt und unter einem konstanten Luftstrom getrocknet. Die Trocknungsprozesse dauern bis zu 1 Minute. Allerdings haben Studien gezeigt dass die Laserstrahlung die Trocknungsdauer auf einige Sekunde verkürzen kann. In Massenproduktion werden die beschichtete Substratfolien mit der Breite von bis zu 1500 mm getrocknet. Typische Bahngeschwindigkeit für den R2R-Prozessen in der LIB-Produktion beträgt ca. 100 m/min. Das heißt die Länge des Konvektionsovens kann bis zu 100 m erreichen.

b. Selektive Trocknung von gedruckten Leiterbahnen oder flächigen Beschichtungen

Die leitfähigen Tinten, die in gedruckten Leiterbahnen benutzt werden, müssen nach dem Drucken trocknen. Zur Trocknung werden die Leiterbahnen im konventionellen Verfahren durch Konvektionsöfen gefahren und auf ca. 120°C oder höhere Temperaturen erwärmt. Zum Vergleich hat die Lasererwärmung in R2R-Prozessen die folgenden Vorteile wie z. B. kontinuierliche Prozesskette ohne Handlingzeit sowie geringerer Energieverbrauch durch lokalen Energieeintrag. Wenn eine schnelltrocknende Tinte, bspw. DuPont 9169 benutzt wird, ist die erforderliche Trocknungszeit 2 min bei einer Trocknungstemperatur von 150 °C. Diese Technologie kann in der kontinuierlichen Fertigung flexibler Elektronik angewendet werden.

c. Lokale Temperierung metallischer Folien

Die Temperierung der metallischen Folien dient zur Verbesserung der Umformbarkeit von Metallfolien. Während der Temperierung wird die Metallfolie auf eine bestimmte Temperatur (z. B. über 700 °C für Edelstahl, zum Abbau von Kaltverfestigung) erwärmt und nach Haltezeit von wenigen Sekunden durch Konvektion abgekühlt. Gegebenenfalls kann die Metallfolie mittels Laserquelle global oder lokal temperiert werden. Diese Technologie kann in die kontinuierlichen Produktionslinie z. B. für die Herstellung metallischer Bipolarplatten integriert werden.

Nach der Evaluierung wurde Prozess a) als Hauptanwendung und c) als Nebenanwendung ausgewählt. Im Vergleich zum Prozess a hat Prozess b zwar ähnliche Erwärmungstemperaturen, aber deutlich längere erforderliche Haltezeiten. Deshalb ist Prozess a mit kleinem VCSEL-Modul besser zu realisieren. Prozess c braucht wegen der hoher Soll-Erwärmungstemperaturen VCSEL-Module mit hohen Leistungen. Innerhalb dieses Projekts wird nur ein Prototyp-VCSEL-Modul mit der max. Leistung von 1,6 kW integriert. Das ist für die Erwärmung auf Zieltemperatur während der kontinuierlichen Prozesse nicht ausreichend.

Berechnung der Wärmeleitung und Ableiten von KPIs für die Regelung

Für diese Aufgabe wurden zwei Prozessmodelle für laserbasierte Erwärmungs- und Trocknungsprozesse jeweils erstellt. Ziel der Modellierung ist, die Machbarkeit der laserbasierten Erwärmungs- und Trocknungsprozesse zu evaluieren. Eine experimentelle Messung des Laserprofils vom VCSEL-Modul wurde vor der Modellierung durchgeführt, um die Laserprofile von Emittlern zu charakterisieren und modellieren zu können.

a. Experimentelle Charakterisierung des VCSEL-Moduls

Der Prüfstand zur Messung des VCSEL-Laserprofils ist in Abbildung 18 a) gezeigt. Das VCSEL-Modul von Trumpf Photonic Components GmbH wird auf eine Halterung montiert.

Darunter waren das Profilmessgerät PRIMES BM+ 100S Plus sowie eine Strahlenfalle angeordnet. Das Profilmessgerät ist in der Lage, die 2D-Laserintensitätsverteilung auf die Messebene zu messen. Der Abstand zwischen dem VCSEL-Modul und die Messebene war 30 mm. Ein gleicher Arbeitsabstand wird danach in der R2R-Anlage eingesetzt. Die acht VCSEL-Emitter wurden individuell angeschaltet, und dessen Laserprofilen unter variierenden Laserleistungen (10%, 20%, ..., 100%) gemessen. Ein exemplarisches Messergebnis ist in Abbildung 18 b) gezeigt. Nach der Messung wurden die Laserprofile durch eine rechteckigen Supergauß-Funktion gefittet. Die Gleichung zum Fitting lautet:

$$I(x, y) = I_0 \exp\left(-\left(\frac{(x - x_0)^2}{2\omega_x^2}\right)^{P_X} - \left(\frac{(y - y_0)^2}{2\omega_y^2}\right)^{P_Y}\right)$$

$I(x, y)$ ist die lokale Intensität am Punkt (X, Y) ; I_0 ist die Spitzenintensität; x_0 und y_0 sind die 2D-Koordinaten des Strahlmittelpunkt im Messfeld; ω_x und ω_y sind die Strahlradii des Laserprofils in X- und Y-Richtungen; P_X und P_Y sind die Supergauß-Koeffizienten in beiden Richtungen. Die Werte von $\omega_x, \omega_y, P_X, P_Y$ wurden durch das Fitting ermittelt.

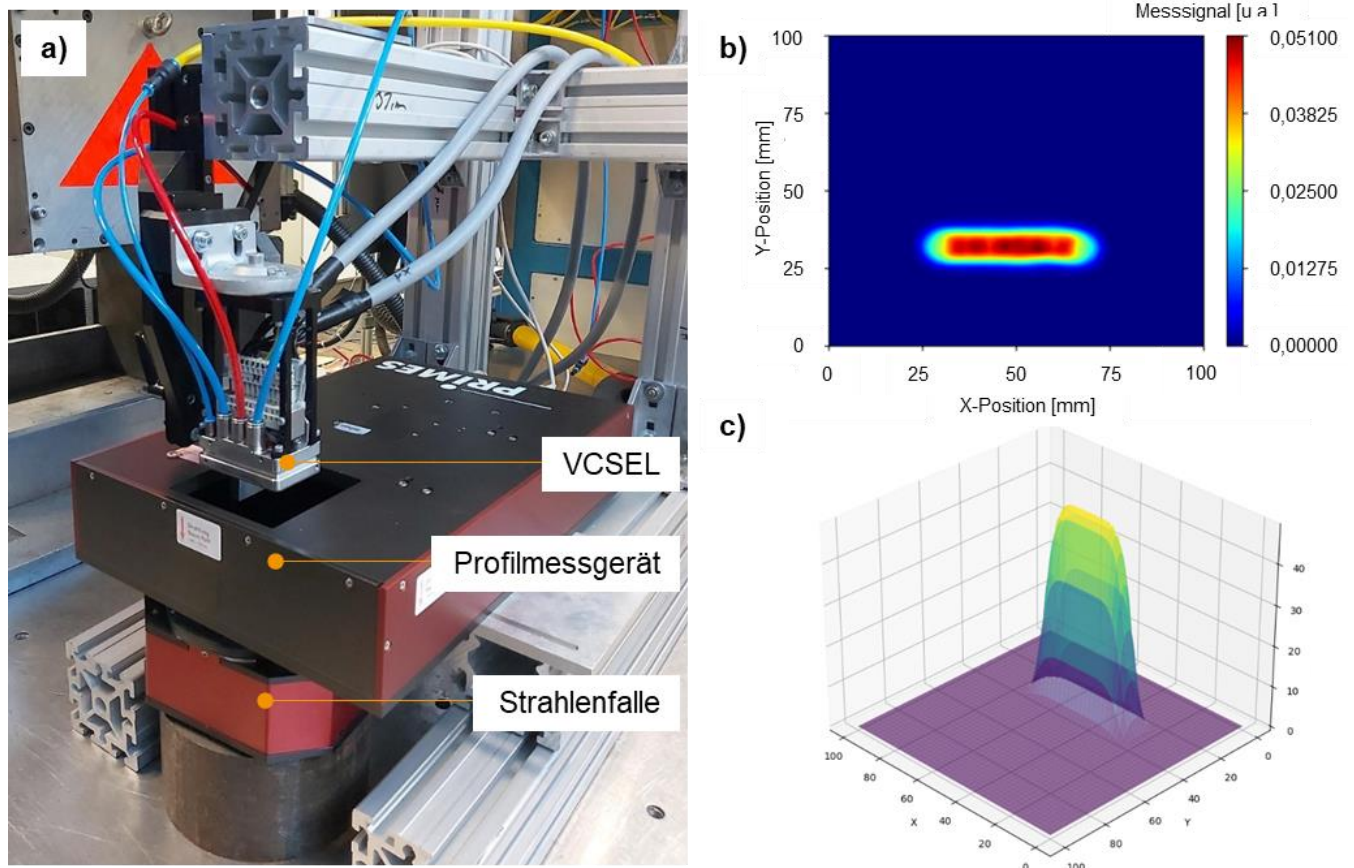


Abbildung 18: a) Prüfstand zur Laserprofilmessung b) Exemplarisches Messergebnis der 2D-Laserintensitätsverteilung aus einem VCSEL-Emitter c) Fitting-Ergebnis für das Laserprofil aus einem VCSEL-Emitter

Der Zusammenhang zwischen die Laserleistung und dem Strahlform wurde analysiert. Zwei Gruppen von Fitting-Koeffizienten bzw. Supergauß-Koeffizienten und Strahlradii in x- und y-Richtungen wurden als die Indikatoren zur Beschreibung der Strahlform ausgewählt. Die Zusammenhänge zwischen der Laserleistungen und die Koeffizienten sind in Abbildung 19 gezeigt. Jeder Datenpunkt stellt den Mittelwert von acht Messungen dar, die jeweils von einem

der acht VCSEL-Emitter unter einer bestimmten Laserleistung stammen. Die Fehlerbalken geben den maximalen und minimalen Messwert jeder dieser acht Messungen an. Die Ergebnisse zeigen gute Konsistenz zwischen acht VCSEL-Emittern und klare Zusammenhänge zwischen der Laserleistung und der Strahlform.

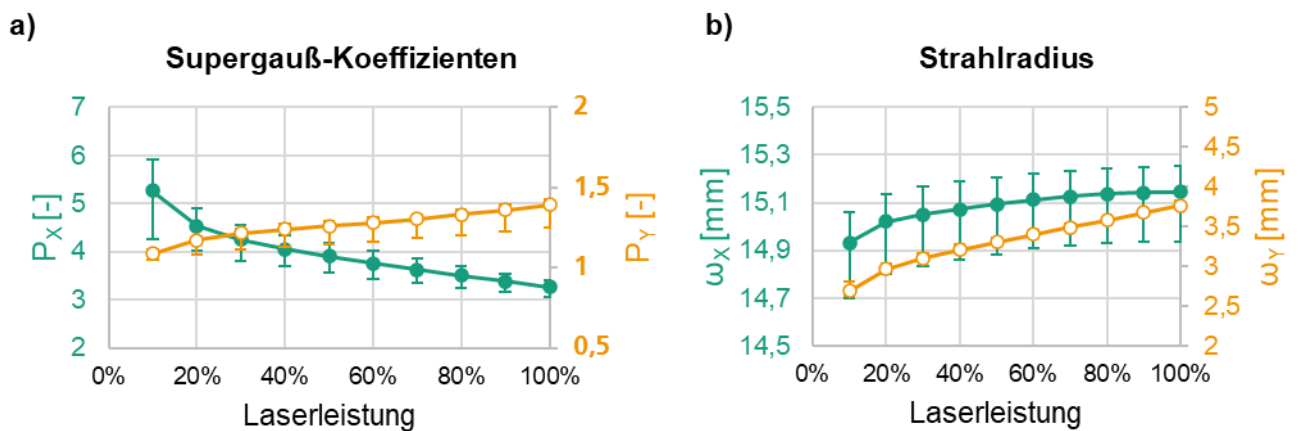


Abbildung 19: Zusammenhänge zwischen Laserleistung und a) gefitteten Supergauß-Koeffizienten; b) Strahlradien

Die Fitting-Ergebnisse werden als Grundlage zur Modellierung der Laserintensitätsverteilung im Prozessmodell eingesetzt.

b. 2D-Modell für R2R-Erwärmungsprozesse

Das erste Modell beschreibt einen Erwärmungsprozess von Edelstahlfolien (1.4301) im R2R-Prozess. Die VCSEL-Laserquelle mit acht Emittern wird entsprechend als acht nebeneinander liegende, rechteckige Heizzonen (HZ) mit entsprechenden Intensitätsprofilen modelliert (siehe Abbildung 20). Jede HZ ist 8 mm lang und 4,29 mm breit, analog zur Größe eines VCSEL-Emitters. Die maximale Ausgangsleistung pro HZ beträgt 200 W. Das Laserprofil, das von einem VCSEL-Emitter bestrahlt wird, kann durch eine rechteckige Supergauß-Funktion mit gefitteten Koeffizienten beschrieben werden. Zur Vereinfachung wurden die Fitting-Werte aus acht Emittern gemittelt.

In Abbildung 20 c) das 1D-Temperaturprofil in Querschnitten in Breitenrichtung (X-Richtung) gezeigt. Folgende Schlüsse können aus der bisherigen Simulation gezogen werden:

1. Ein homogenes Temperaturprofil kann durch eine homogene überlagerte Laserbestrahlung realisiert werden. Innerhalb der vier HZ in der Mitte bzw. HZ 3~6 ist das Temperaturprofil nahezu homogen. Der relative Peak-Valley-Unterschiede vom Temperaturprofil betragen 0,56% innerhalb EZ 3~6. Die hohe Wärmeleitfähigkeit in der Edelstahlfolien sowie der homogene Energieeintrag vom VCSEL-Modul tragen zu der hohen Homogenität bei. Allerdings erfährt das Temperaturprofil eine starke Abnahme in den HZs an den Rändern wegen der Wärmeleitfähigkeit in den nicht bestrahlten Bereichen.
2. Eine maximale Temperatur von 216 °C wurde bei summierter Laserleistung von 1,28 kW (80% der max. Laserleistung) erreicht. Eine Rekristallisationstemperatur von 700 °C kann mit dem aktuellen VCSEL-Modul nicht erreicht werden.

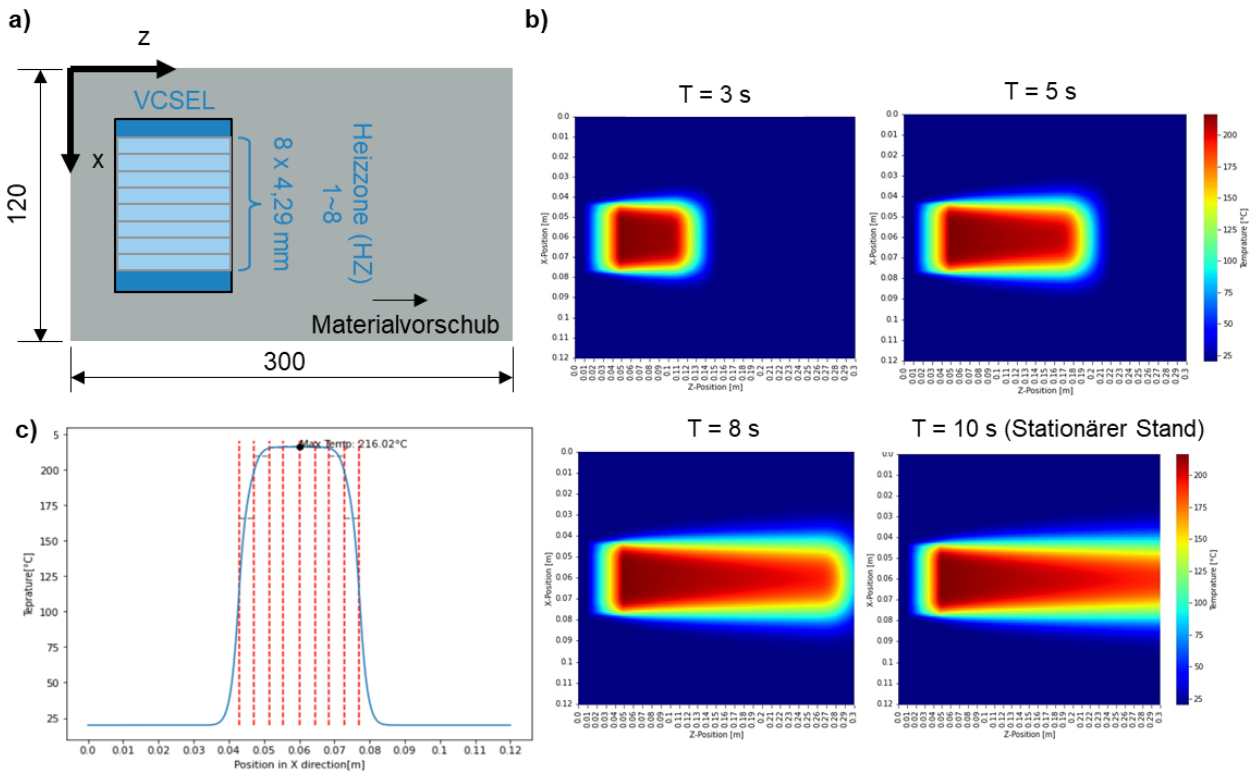


Abbildung 20: a) schematische Darstellung des Erwärmungsmodells b) Simulierte Temperaturfelder für laserbasierte Erwärmungsprozesse c) Temperaturprofil an $z = 0,05 \text{ mm}$ an stationären Stand

Auf Basis der Simulation wird der Schluss gezogen, dass aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit des Materials eine homogene Temperierung von Edelstahlfolie mit einem vordefinierten Laserprozess erreicht werden kann und eine lokal angepasste Prozesssteuerung nicht erforderlich ist.

c. 1D-Modell für R2R-Trocknungsprozesse

Ein eindimensionales FDM-Modell wurde für die laserbasierte Trocknungsprozess für LIB-Elektroden erstellt (siehe Abbildung 21). Der Trocknungsprozess kann als ein eindimensionales Wärme- und Stoffübertragungsproblem betrachtet werden. Das Elektrodenslurry, das hauptsächlich aus Lösungsmittel, aktivem Material und Bindemittel entsteht, wird auf eine Seite des Substrats aufgetragen. Bei dem Trocknungsprozess wird die Laserstrahlung auf das Slurryschicht bestrahlt. Gleichzeitig existiert ein Luftstrom mit konstanter Stromgeschwindigkeit über dem Slurry. Bei der Trocknung wird der Slurry durch den Energieeintrag durch die Laserstrahlung und die Konvektion erwärmt. Gleichzeitig wird das Lösungsmittel verdunstet und durch den Luftstrom aus der Prozesszone weggeblasen.

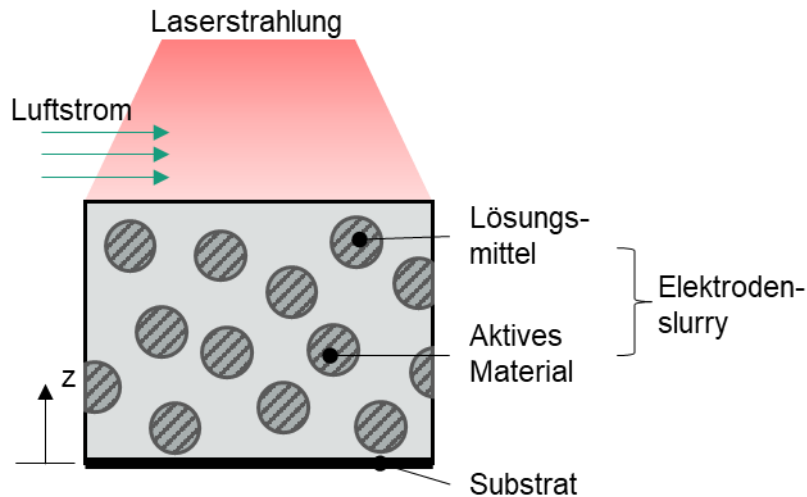


Abbildung 21: Illustration des eindimensionalen laserbasierten Trocknungsprozesses

In dem Modell gelten folgende Annahmen:

- Das Elektroden-schlurry wird als ein Binärsystem betrachtet. Das Bindemittel wird aufgrund des geringen Massengehalts (< 5%) nicht berücksichtigt.
- Das Luft-Dampf-Gemisch verhält sich wie ein ideales Gas.
- Die Verteilung des aktiven Materials innerhalb des Elektroden-schlurry ist homogen.

Das Modell wurde in MATLAB implementiert. Zur Validierung des Modells wurde erste Simulationsergebnis mit den Messdaten aus Wolf et al. [1] qualitativ verglichen (siehe Abbildung 22). Die Prozessparameter wurden von dem Versuch in [1] übernommen, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Der Temperaturverlauf aus der Simulation zeigt einen ähnlichen Trend mit den Messergebnissen aus [1] und kann auf drei Teile aufgeteilt:

1. **Erwärmungsphase:** Energieeintrag führt zu schneller Temperaturerhöhung
2. **Verdunstungsphase:** quasi-stationäre Temperatur wird erreicht; Energieeintrag führt zu quasi-stationäre Verdunstung des Lösungsmittels
3. **Überhitzungsphase:** Lösungsmittel komplett verdunstet; Energieeintrag führt zu nichtlinearer Erhöhung der Temperatur

In der Produktion endet die Trocknung am Ende der Verdunstungsphase, da die Überhitzung zu Qualitätsproblemen wie Delamination führt.

Parameter	Simulation	Messung aus [1]
Lufttemperatur	20 °C	
Laserleistung	16.800 W/m ²	
Lösungsmittel-gehalt	54%	
Bestrahlungsdauer	15,32 s	12,8 s
Schichtdicke	160 µm	

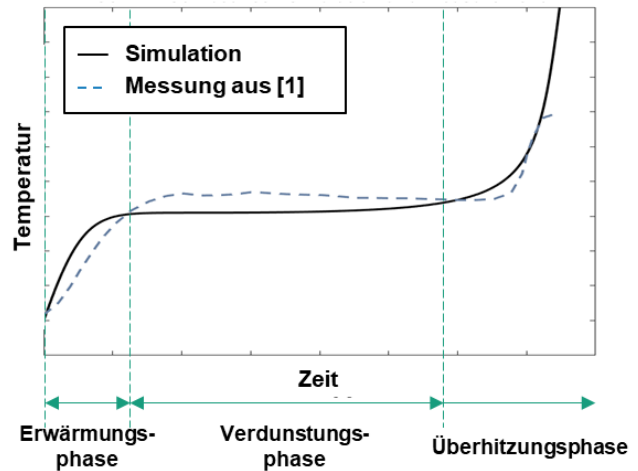


Abbildung 22: Vergleich zwischen den Simulationsergebnissen und den Messergebnissen aus [1]. Links: Prozessparameter von der Simulation und dem Versuch aus [1]; rechts: Drei-Phasen-Temperaturverläufe der Beschichtung während der Lasertrocknung.

Darüber hinaus wurden Konvektion- und Lasertrocknung sowie die hybride Trocknung simuliert. Zum Vergleich der unterschiedlichen Prozesse wurden die Prozessdauer und den Energieverbrauch für den Prozess berechnet (siehe Abbildung 23). Die Ergebnisse zeigen, dass die Lasererwärmungsstrategie das Potenzial hat, die Prozessdauer um 80% zu verkürzen und den Energieverbrauch um 71,43% zu reduzieren.

Parameter	Konvektion	Hybrid	Laser
Luftstrom	10 m/s	10 m/s	10 m/s
Lufttemperatur	140 °C	70 °C	20 °C
Laserleistung	0 W/m ²	8400 W/m ²	16800 W/m ²
Prozessdauer	74,02 s	27,01 s	15,32 s
Energieverbrauch	9.007,2 kJ/m²	6.638,31 kJ/m²	2.573,76 kJ/m²

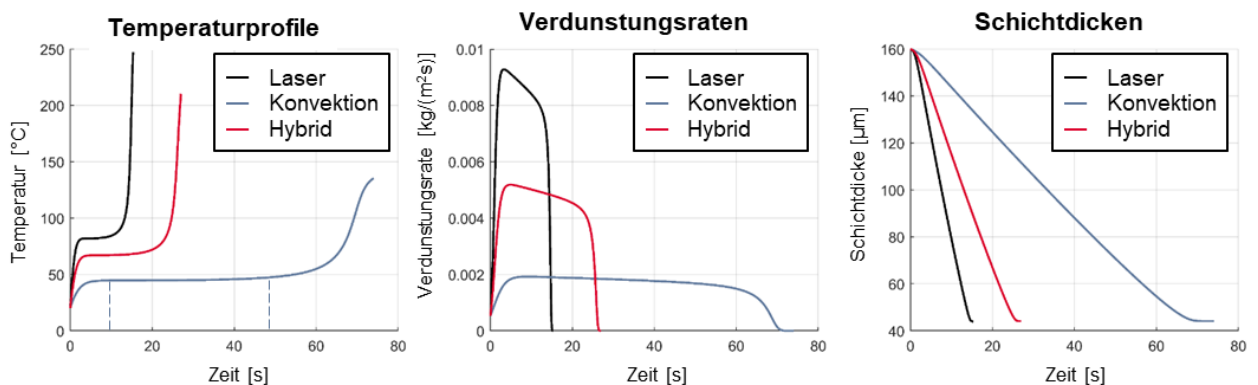


Abbildung 23: Prozessparameter und Simulationsergebnisse von Konvektion-, Hybrid-, und Lasertrocknung

Die typischen Prozessstörungen im Trocknungsprozess kommen aus den vorgelagerten Prozessschritten Mischen und Beschichten. Die Störfaktoren wie z. B. Oszillation in R2R-Prozess, inhomogene Vermischung des Slurrys, sowie imperfekte Ausrichtung des

Beschichters führen zu Inhomogenität der Schichtdicken und des Lösungsmittelgehalt der zu trocknenden Beschichtung.

Zur Untersuchung des Einflusses der Inhomogenität auf die Temperaturänderung wurden weitere Simulationen durchgeführt. Die Simulation mit der Schichtdicke von 160 μm wurde als Referenz eingestellt, und eine Variation von bis zu $\pm 15 \mu\text{m}$ ($\pm 9,4\%$ relativ) wurde untersucht. Gleichmaßen wurde der Lösungsmittelgehalt von 55 Gew.-% als Referenz eingestellt und eine $\pm 5,0$ Gew.-% Variation wurde untersucht.

Die Ergebnisse (siehe Abbildung 24) zeigen, dass die Schichtdickenvariation hauptsächlich den Temperaturverlauf in der Erwärmungsphase beeinflusst. Dünnere Schichten weisen eine etwas höhere Temperatur bei schnellerer Erwärmung auf. Die Variation der Schichtdicken beeinflusst primär die Endzeit der Erwärmungsphase und damit die Gesamtprozessdauer.

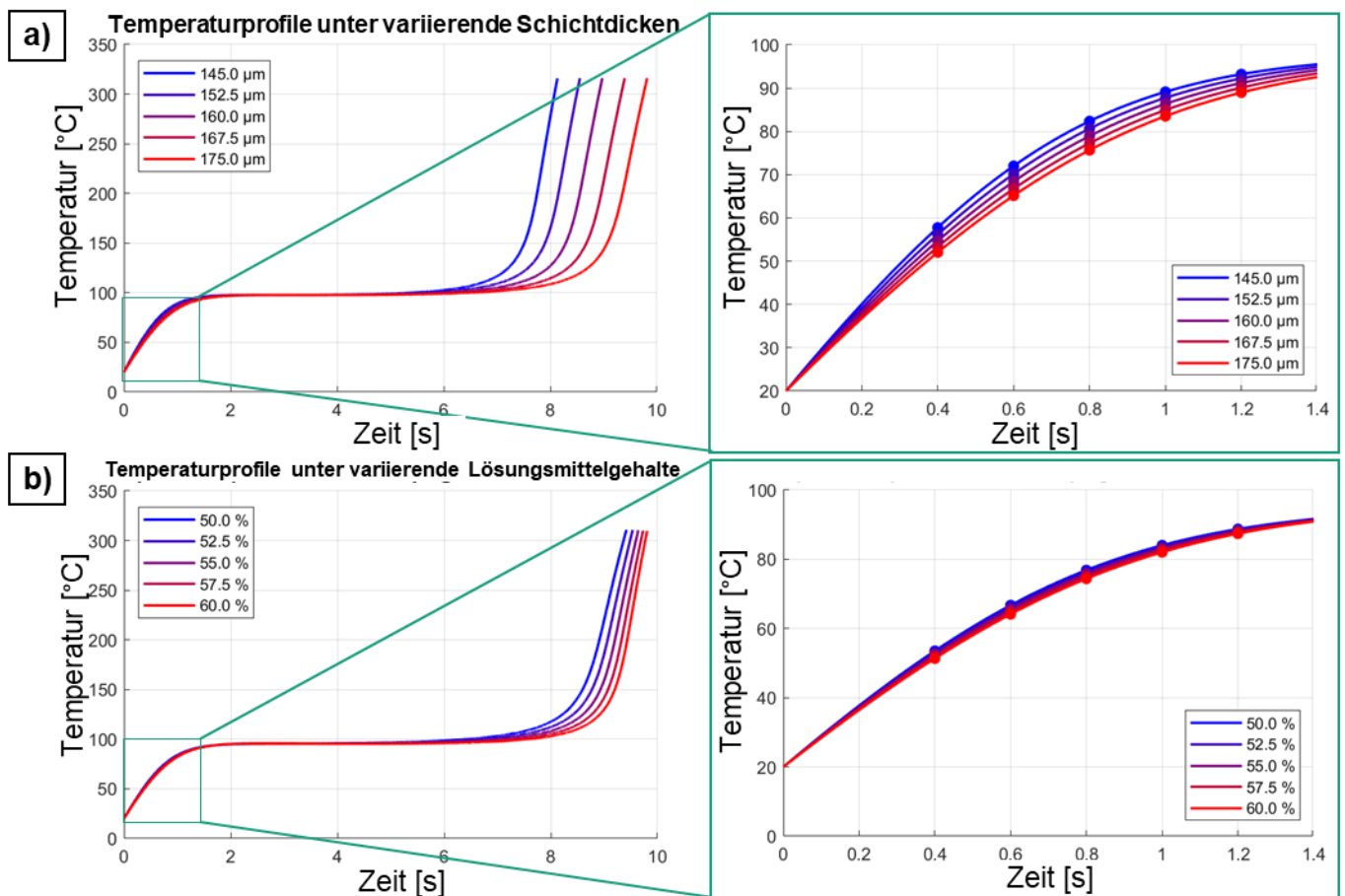


Abbildung 24: Temperaturprofile unter variierende a) Schichtdicken und b) Lösungsmittelgehalte.

Um den Temperaturunterschied in der Erwärmungsphase zu quantifizieren, wurden die Temperaturwerte an fünf diskreten und gleichmäßig verteilten Beobachtungszeitpunkten innerhalb der ersten 1,2 Sekunden ausgewählt. Der Temperaturunterschied über die Zeit nimmt in den ersten 0,8 Sekunden zu und nimmt dann ab, wenn alle Profile zur quasi-stationären Stufentemperatur konvergieren. Zum Zeitpunkt $t = 0,8$ s führt die Abweichung der Schichtdicke um $15 \mu\text{m}$ von der Referenzdicke zu einer Temperaturabweichung von bis zu 3,4 K, und eine Abweichung der Schichtdicke um $7,5 \mu\text{m}$ führt zu einer Temperaturabweichung von bis zu 1,7 K. Diese Temperaturabweichung kann mit einem berührungslosen Temperaturmessgerät, z. B. einer industriellen Thermokamera oder einem Pyrometer, beobachtet werden, deren Messgenauigkeit bei Anwendung spezieller Kalibrierungsmethoden

typischerweise bei 1 K oder darunter liegt. Die Korrelation zwischen der Dicke und der Temperaturabweichung zeigt innerhalb des Beobachtungszeitraums einen linearen Trend.

Im Vergleich dazu führt eine Abweichung des Lösungsmittelgehalts um $\pm 5\%$ von der Referenz zu einer insignifikanten Temperaturschwankung von bis zu 0,5 K, und die Prozessdauer wird weniger beeinflusst als im ersten Fall. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Schwankung der Schichtdicke den Trocknungsprozess stärker beeinflusst und durch Messung des Temperaturprofils während des Trocknungsprozesses oder der Schichtdicke vor dem Trocknungsprozess festgestellt werden kann. Darüber hinaus wird innerhalb des untersuchten Schwankungsbereichs eine lineare Korrelation zwischen der anfänglichen Schichtdicke und der Temperaturabweichung beobachtet. Dies ermöglicht die indirekte Regelung des Trocknungsprozesses über die Messgröße Schichtdicke.

Durch die Modellierung und Parameterstudie wurde festgestellt, dass die zeitliche und örtliche Modulation des Lasermoduls eine homogenere LIB-Trocknung realisieren kann. Eine Schichtdickenvariation kann durch die Temperaturmessung indirekt ermittelt werden. Eine Prozessregelung kann daher durch die Echtzeit-Temperaturmessung und Anpassung der Laserleistungen von VCSEL-Emittern realisieren.

Aufbau VCSEL-basierte R2R-Anlage für kontinuierliche adaptive Erwärmungsprozesse

a. Experimentelle Charakterisierung vom VCSEL-Modul

Eine R2R-Anlage zur Beschichtung und Lasertrocknung wurde in diesem Projekt entwickelt. Die Anlage fasst drei Kernmodulen bzw. die Module zur Beschichtung, Lasertrocknung und Temperaturmessung um. Abbildung 25 zeigt die CAD-Entwurf sowie die aufgebaute R2R-Anlage.

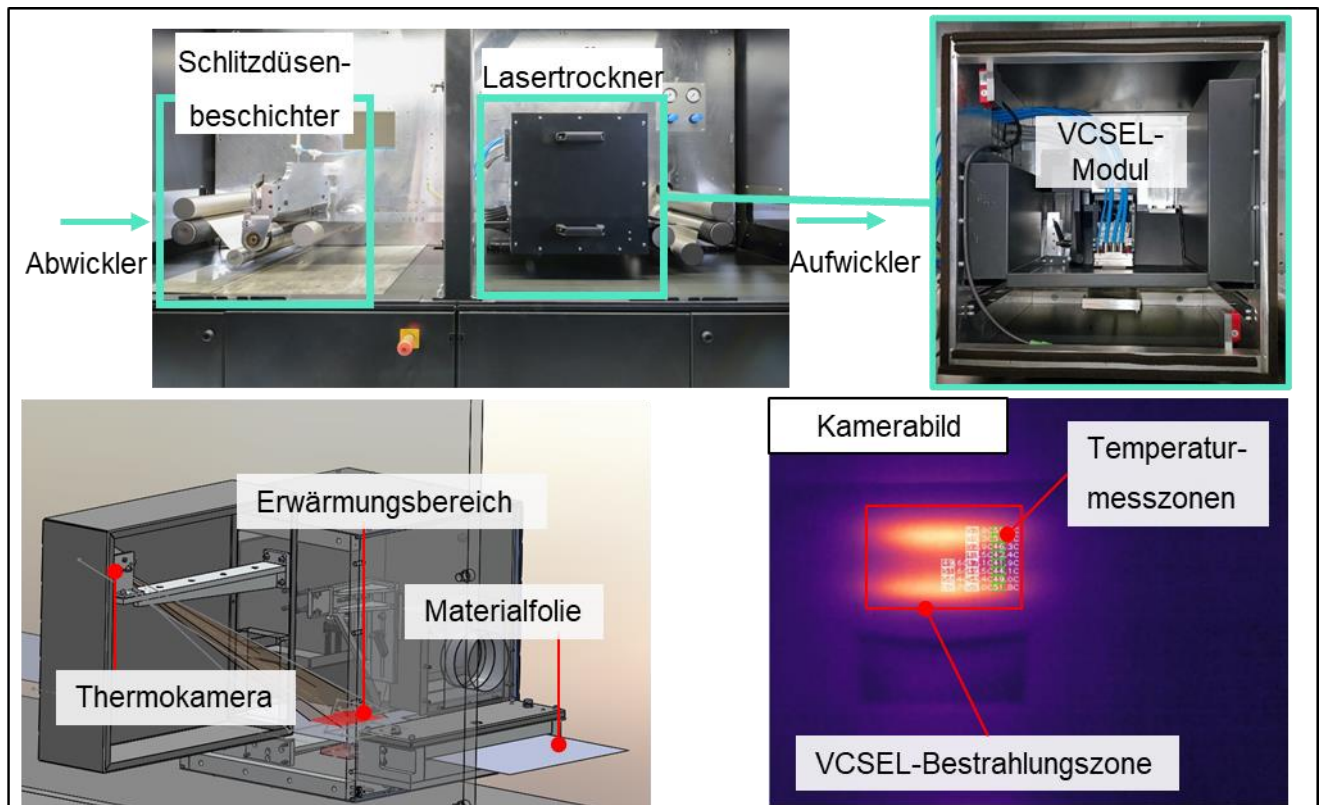


Abbildung 25: Oben: R2R-Anlage mit Beschichtung- und Lasertrocknungsmodulen. Unten links: Integrierte Thermographiemodul. Unten rechts: Kamerabild und zonenbasierte Temperaturmessung.

Die R2R-Anlage wurde mit externe Ab- und Aufwickler verbunden. Die Materialein- und -ausgänge sind von Fraunhofer IPT standardisiert, welche die Verbindung mit anderen R2R-Anlagen für vorherige und nachfolgende Prozesse ermöglichen. Innerhalb dieses Projekts wurde die Anlage nur mit externen Ab- und Aufwickler verbunden, die für den Materialzufuhr zuständig sind.

Eine Thermokamera wurde mechanisch und steuerungstechnisch in die R2R-Anlage integriert. Mittels der Thermokamera wurde die zonenbasierte Echtzeit-Temperaturmessung realisiert, wodurch eine Temperaturregelung ermöglicht wird.

b. Experimentelle Parameterstudie

Eine experimentelle Parameterstudie wurde mit der aufgebauten R2R-Anlage und durchgeführt. Das Slurry stellt eine Mischung aus Graphit als aktivem Material, Carboxymethylcellulose (CMC) als Bindemittel und deionisiertem Wasser als Lösungsmittel dar. Der Massenanteil der drei Komponenten beträgt 42,75 Gew.-%, 2,25 Gew.-% und 55 Gew.-%. Das Slurry wird mit einem magnetischen Rührer gemischt, bis der vollständig homogenisiert ist. Das Slurry wurde anschließend auf ein Edelstrahl-Substrat durch die Schlitzdüse aufgetragen. Die Beschichtungsdicke wurde auf 100 µm kontrolliert.

Die Zwei Prozessparameter Laserintensität und Bestrahlungsdauer wurden während des Versuchs angepasst. Die Mikrostruktur der getrockneten Proben wurde unter dem optischen Mikroskop Alicona InfiniteFocus® untersucht. Die Bilder der Mikrostrukturen sind in der Abbildung 26 gezeigt. Die Oberflächenrauheit der Proben wurde ebenfalls gemessen. Darüber hinaus wurde ein Peel-Off Test an den unbeschädigten Proben durchgeführt, deren Messwerte in der Abbildung 26 aufgeführt sind.

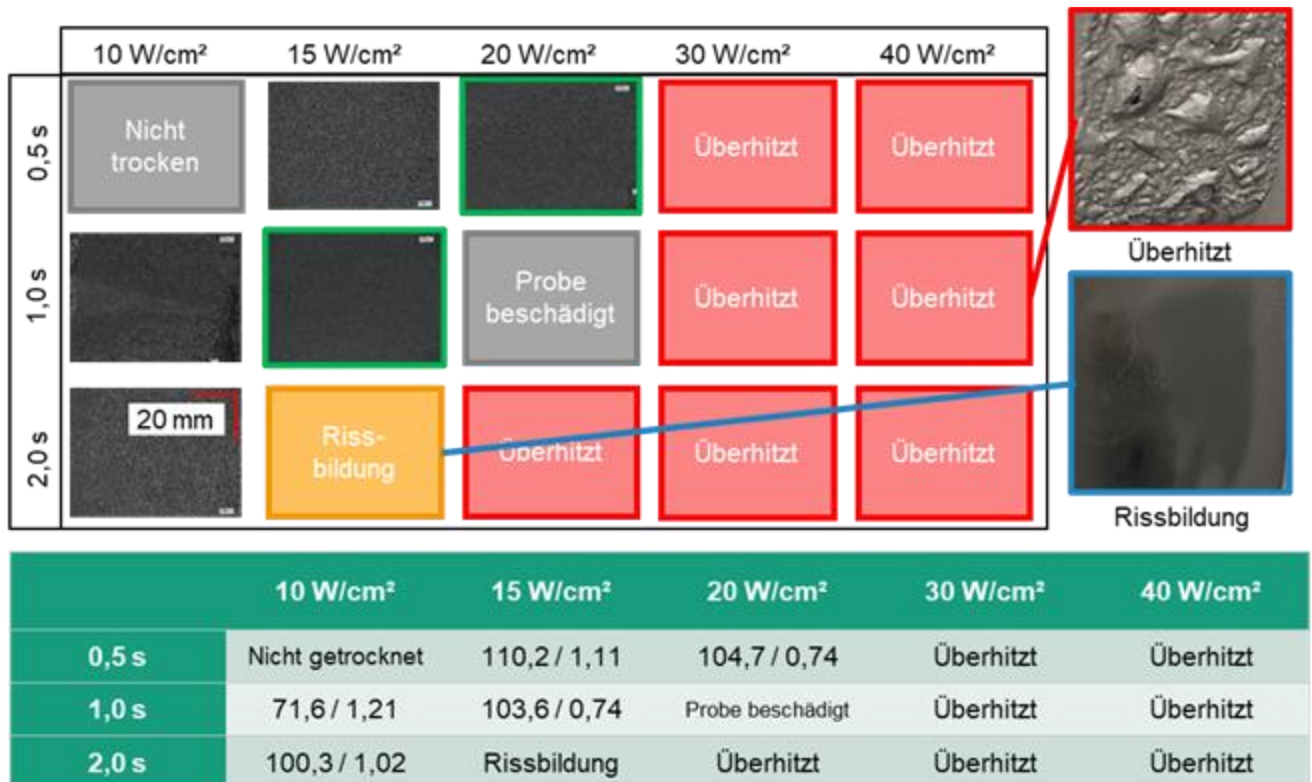


Abbildung 26: Oben: Übersicht von getrockneten Proben. Unten: Messwerte von Adhäsion in N/m / Oberflächenrauheit (Ra) in µm.

Ein Prozessfenster wurde durch die Parameterstudie ermittelt. Die zwei in Abbildung 26 grün hervorgehobenen Parametersätze haben die höchste Adhäsion zwischen der Beschichtung und dem Substrat sowie die geringste Oberflächenrauheit auf der Probenoberfläche gezeigt.

Während die konventionellen konvektiven Methoden Minuten benötigen, um die nassbeschichteten Proben zu trocknen, dauert der Lasertrocknungsprozess nur Sekunden. Der schnelle Lasertrocknungsprozess führt auch zu einer verkürzten Zeit für die Aggregation der aktiven Materialpartikel, wodurch eine feinere Mikrostruktur auf der getrockneten Elektrodenoberfläche entsteht. Dies ist potenziell vorteilhaft für die elektrochemische Leistung der Elektroden. Bei konstanter Gesamtenergiezufuhr wird durch kürzere Bestrahlungszeiten und stärkere Laserintensität eine stärkere Adhäsion der Beschichtung erreicht. Allerdings treten Defekte, wie Risse und Überhitzung auf, wenn die Laserintensität zu hoch oder die Laserbestrahlungszeit zu lang ist.

Basierend auf den Ergebnissen von DPP-Open sind folgende Schritte erforderlich, um das kontinuierliche LIB-Lasertrocknen auf ein höheres TRL zu bringen:

- Implementierung und experimentelle Validierung des temperaturbasierten Prozesskontrollkonzepts
- Untersuchung der elektrochemischen Leistung von lasertrockneten Proben
- Hochskalierung des Lasermoduls und der Prototypmaschine in eine Seriennahe Systemtechnik

Auf der Laser in Manufacturing (LiM) Conference 2025 in München erfolgte eine Veröffentlichung als Paper und Präsentation unter dem Titel „Modeling and analysis of laser drying processes for wet-coated battery electrodes“. (Link: https://www.wlt.de/sites/default/files/LiM2025_Proceedings/137_Chen.pdf)

Quelle

[1]: Wolf, S.; Schwenzer, N.; Tratz, T.; Göken, V.; Börner, M.; Neb, D.; Heimes, H.; Winter, M.; Kampker, A. Optimized LiFePO₄-Based Cathode Production for Lithium-Ion Batteries through Laser- and Convection-Based Hybrid Drying Process. World Electr. Veh. J. 2023, 14, 281. <https://doi.org/10.3390/wevj14100281>

Sprintteam 12: Entwicklung eines Sensorkonzepts für die Prozessüberwachung in der subtraktiven photonischen Produktion (Fraunhofer IPT in Zusammenarbeit mit EXAPT und ModuleWorks)

Sprint 12 behandelt das Thema der zerstörungsfreien optischen Analyse von strukturierten Bauteilen. Hierfür wird die Machbarkeit der OCT getestet zur Qualitätskontrolle derartiger Bauteile. Ihre Ursprünge findet die auf Interferometrie basierte Technologie in der medizinischen Diagnostik, z.B. für die nicht-invasive Diagnose des Augenhintergrunds. Hier und in weiteren biomedizinischen Anwendungen profitiert die Messtechnik vor allem von der tomographischen Bildgebungstechnik und der hohen Auflösung bei relativ hoher Eindringtiefe in (semi-) transparente Proben. Hier soll vor allem gezeigt werden, inwiefern auch opaque Medien für die Qualitätskontrolle mittels OCT geeignet sind. Der Fokus der letzten Sprintphasen liegt vor allem auf der Auflösung der OCT bzw. der Auflösungsoptimierung innerhalb der sogenannten Ultrahochauflösende OCT (UHR-OCT, ultrahigh-resolution OCT) zur Darstellung von strukturierten Bauteilen mit Strukturgrößen ab ca. 1µm. Im Gegensatz zur konventionellen OCT unterscheidet sich der UHR-Demonstrator in seiner technischen Umsetzung vor allem durch folgende Faktoren: Die Verwendung einer sehr breitbandigen

Lichtquelle (Supercontinuum Laser) erlaubt durch die effektive Nutzung von 300 nm spektraler Bandbreite eine axiale Auflösung von ca 1 μm . Um auch in lateraler Richtung 1 μm große Strukturen differenzieren zu können, wurde zudem ein Mikroskopobjektiv mit einer im Gegensatz zur konventionellen OCT hohen NA verwendet. Der Aufbau des UHR-Systems wird in Abbildung 27 gezeigt.

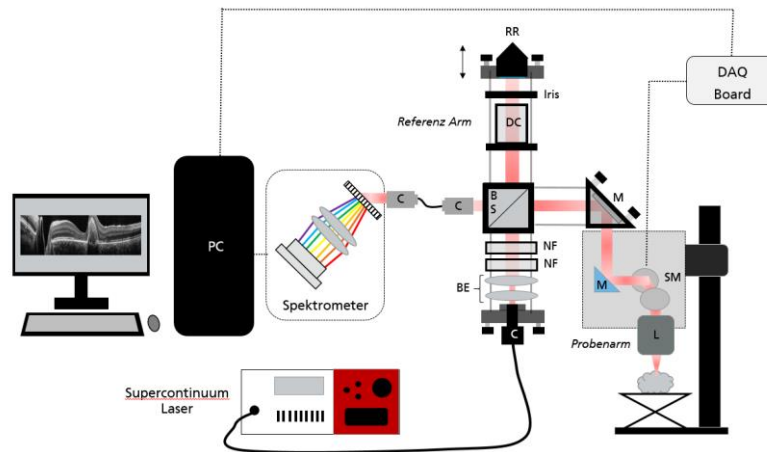


Abbildung 27: Schematischer UHR-OCT Aufbau mit einem Supercontinuum Laser, breitbandigen Spektrometer und den Optiken des Michelson Interferometer Aufbaus.

Innerhalb des Berichtszeitraums beschäftigte sich Sprint 12 vor allem mit der Herausforderung der Bildauswertung bzw. der Bildoptimierung der UHR-Querschnittsbilder. Zur Bildoptimierung sollten nach den gewöhnlichen Schritten der klassischen Bildverarbeitung wie Dispersionskorrektur auch alternative Methoden betrachtet werden, um die durch Artefakte und Aberrationen verursachte Auflösungsver schlechterung zu adressieren. Zur Bildoptimierung, insbesondere zur Rauschunterdrückung und Specklereduktion wurde ein neuronales Netz entwickelt, welches anhand von Trainingsdaten und einer sogenannten „ground truth“ eingehende Bilddaten optimiert. Die Ergebnisse zeigen eine verbesserte Strukturerkennung nach der Bildoptimierung durch den genannten CNN-Algorithmus (Abbildung 28). Untersucht wurde die Optimierung anhand des zuvor entwickelten Subpixel-Algorithmus. Basierend auf Kantendetektion findet dieser anhand lokaler Maxima die Oberfläche der Metalloberfläche und mithilfe der Analyse benachbarter Pixel wird die Kantenposition auf Subpixelbene festgelegt. Bei nicht eindeutig definierbaren Maxima wird die Struktur interpoliert. Die Anzahl an zu interpolierenden Pixel verringert sich mit der Bildoptimierung durch den CNN-Algorithmus, wodurch auf eine verbesserte Auflösung bzw. Differenzierung der strukturierten Oberfläche geschlossen wurde.

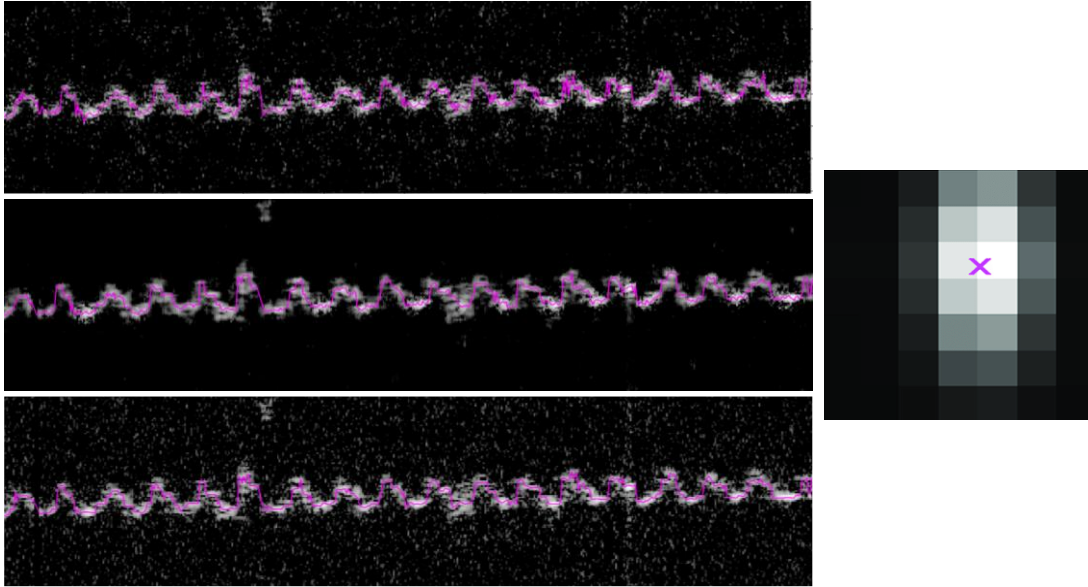


Abbildung 28 Links: UHR-OCT Querschnitte einer strukturierten Oberfläche. Von oben nach unten wird eine Verbesserung der Bildqualität deutlich durch die Umsetzung von Rausch- und Speckleunterdrückung anhand eines Neuronalen Netzen- Algorithmus. Rechts: Erkannte Position der Kante im Subpixelfitting.

Erste Testmessungen von strukturierten Bauteilen zeigen die deutliche Auflösungsverbesserung der UHR-OCT im Vergleich zur konventionellen OCT (Abbildung 29). Als konventionelles OCT wurde hier das von Thorlabs erhältliche „Telesto“ genutzt mit einem Auflösungsvermögen von 7-10µm.

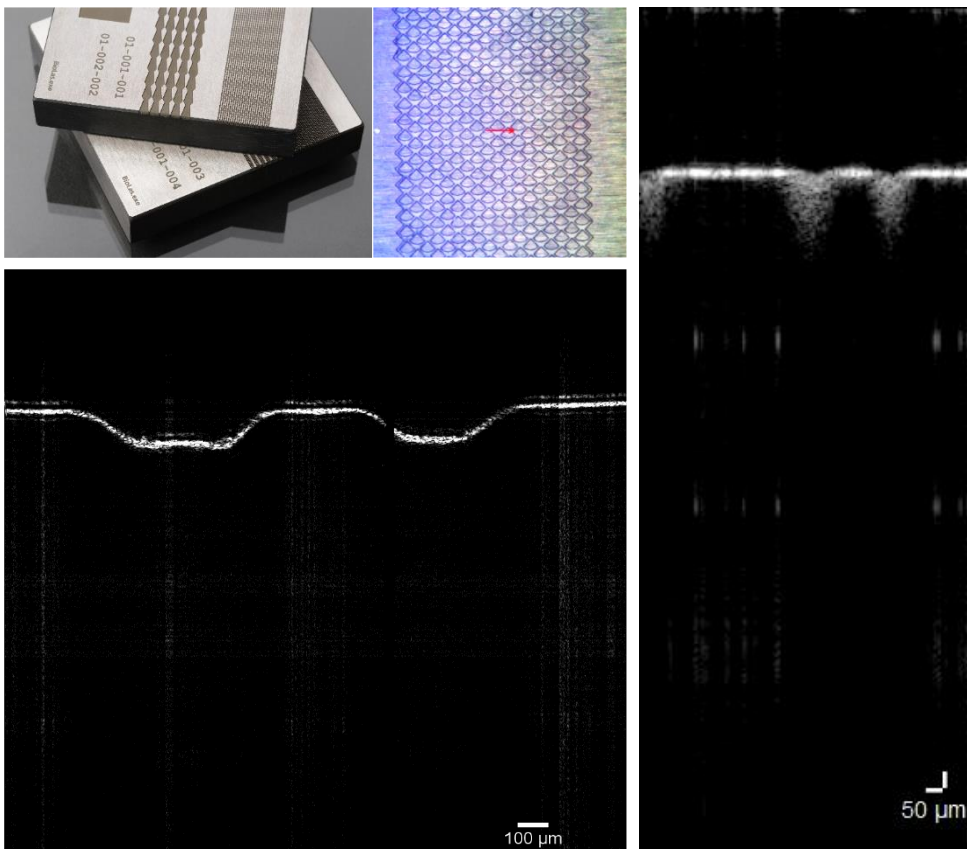


Abbildung 29 Oben links: Strukturiertes Probebauteil, die Nahaufnahme zeigt das Scanfeld des OCT Querschnittbild (rechts). Der UHR-Querschnitt (unten links) zeigt ein deutlich verbessertes Auflösungsvermögen im Vergleich zum hier verwendeten kommerziell erhältlichen System.

Zukünftige Sprintphasen beschäftigen sich vor allem mit der automatisierten Auswertung von Bauteiloberflächen mithilfe der UHR-OCT. Eine motorisierte Linearachse bewegt das Bauteil unterhalb des Messstrahls zum vollständigen Abscannen der Probe. Die Herausforderung zur Beurteilung der Oberfläche (im Gegensatz zu bisher nur analysierten Bildausschnitten von ca. 2 mm Breite) liegt vor allem in der Bilddatenregistrierung sowie in der Verarbeitung der hier entstehenden hohen Datenmengen.

Eine Limitierung in der Nutzung von UHR-OCT zur Charakterisierung von strukturierten Proben liegt in der Beschränkung des maximalen Field of View (FOV). Da in der UHR-OCT Mikroskop Objektive verwendet werden, um eine möglichst hohe laterale Auflösung zu erzielen, beschränken diese Objektive das FOV auf wenige Millimeter. In dem bereits vorgestellten UHR-OCT Demonstrator beträgt das maximale FOV ohne Aberrationen am Bildrand 2 mm. Um größere Flächen zu analysieren, müssen die einzelnen Bilddaten zueinander registriert werden und anschließend aneinander gestitcht werden. Die Bildregistrierung von 3D Volumen stellen aufgrund ihrer vorliegenden Freiheitsgrade eine große Herausforderung dar. Aus diesem Grund werden hier verschiedene Registriermethoden untersucht, um am Ende eine möglichst präzise Registrierung in kurzer Zeit umzusetzen.

Zunächst wurden klassische Bildregistrierung basierend auf SIFT (scale invariant feature transformation) entwickelt und getestet (Abbildung 30).

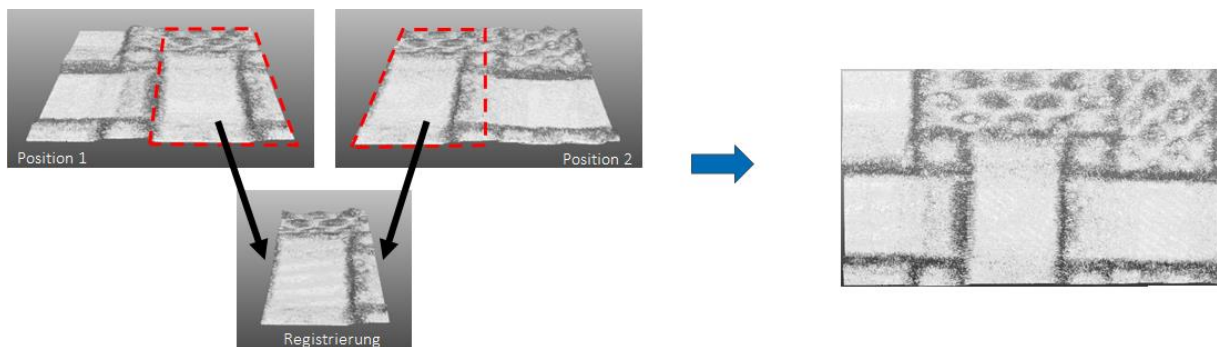


Abbildung 30: Beispiel zweier OCT-Volumendatensätze einer strukturierten Metallprobe, welche mithilfe von SIFT registriert und gestitcht wurden.

Der SIFT-Algorithmus wurde in ersten Versuchen als präzise jedoch zeitaufwändig eingeschätzt. Für jede einzelne Registrierung müssen neue Bildpunkte gefunden werden, was den Aufwand erhöht und den Algorithmus für eine großflächige Untersuchung nicht praktikabel erscheinen lässt. Aufgrund der hohen Verarbeitungszeit bei der Registrierung mehrerer Volumina, wird zusätzlich einer auf Deep Learning basierender Registrieralgorithmus entwickelt. Die untenstehende Abbildung 31 zeigt den Aufbau des Modells. Hier beinhalten die Trainingsdaten sowohl „fixed volumes“ und „moving volumes“ sowie die Transformationsmatrizen dieser Volumina, welche zuvor mittels Fijiyama bestimmt wurden.

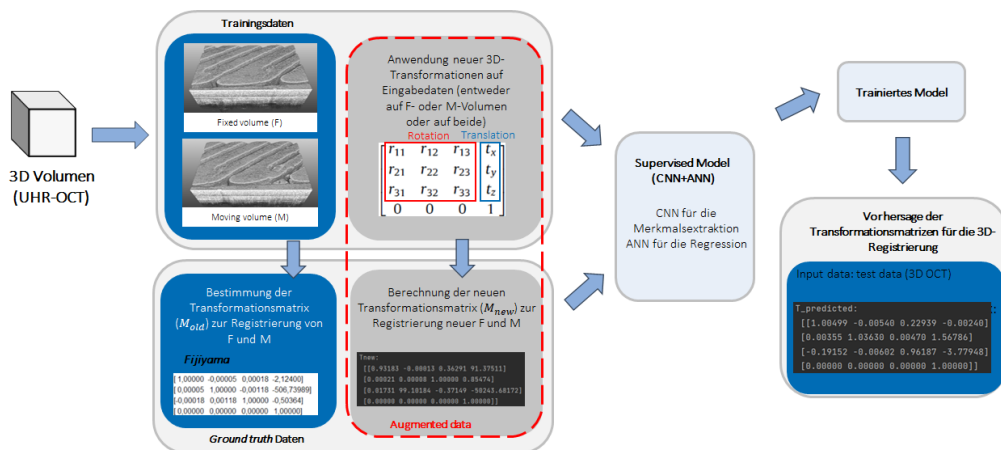
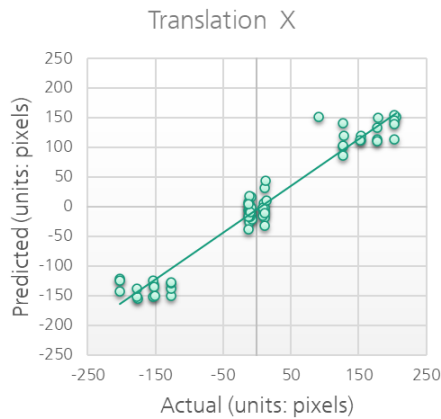


Abbildung 31: Schema des Neuronalen Netzes zur Registrierung von 3D OCT-Bilddaten

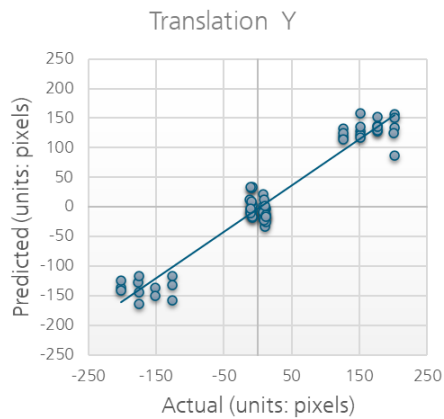
Der oben abgebildete Algorithmus ist in der Lage eine Transformationsmatrix vorherzusagen. Allerdings bedarf der Algorithmus einer Optimierung hinsichtlich des Rechenaufwands bzw. Speicherplatzes. Aufgrund der Größe der OCT-Volumina ist der Berechnungsalgorithmus noch zu langsam. Neben der Reduzierung des Rechenaufwands werden in den nächsten Schritten mehr Daten generiert, um die Genauigkeit des Algorithmus zu erhöhen. Im Anschluss soll dieser ausreichend bezüglich seiner Präzision und Dauer getestet und validiert werden.

Klassische Methoden wie SIFT (scale invariant feature transformation) für die Bildregistrierung der OCT sind geeignet, jedoch bedarf es einen hohen Zeitaufwand für die Registrierung bei mehr als zwei Bilddaten. Dies ist damit begründet, dass in jeder Registrierung neue Bildmerkmale extrahiert werden müssen. Deshalb wurde ein Algorithmus entwickelt, welcher auf neuronalen Netzen basiert. Dieser Algorithmus ist in der Lage eine Transformationsmatrix vorherzusagen. Die Entwicklung umfasst die Datenerfassung und Daten-Vorverarbeitung, gefolgt von der Datenanreicherung und dem Training des Modells. Der Algorithmus wurde schließlich ausreichend validiert, hinsichtlich seiner Präzision und Zuverlässigkeit getestet und mit alternativen Methoden verglichen.

Die Ergebnisse der Bildregistrierung werden durch die Transformationsmatrix des "gleitenden Volumen" (*moving volumn*) ausgegeben. Aus dem Vergleich der Matrizen mit der Ground Truth lässt sich schließen, dass die vorgeschlagene Methode effektiv OCT-Volumina von mikrostrukturierten Metallen erfasst, mit einem absoluten Fehler von $25,97 \pm 21,85$ in der x-Translation, $26,92 \pm 22,54$ in der y-Translation und $0,92 \pm 0,68$ bei den Pixeln für ein Bild von $201 \times 256 \times 256$ Pixeln. Angesichts der Tatsache, dass die Pixel Pixelgröße von $4,97 \mu\text{m}$ in z Richtung und $3,91 \mu\text{m}$ in x- und y-Richtung beträgt, entspricht dieses Ergebnis einer Fehlerquote von $101,45 \pm 85,35$ Mikrometer Unterschied in x Richtung, $105,16 \pm 88,05$ in y-Richtung sowie $4,58 \pm 3,38$ in z-Richtung bei einer Bildgröße von $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$. Diese Ergebnisse zeigen eine Erfolgsquote von etwa 90 % für die x- und y-Richtung und 99,54 % für die z-Richtung (Abbildung 32).



R2 score = 0.86



R2 score = 0.88

Abbildung 32: Ergebnisse der Performance des implementierten auf neuronalen Netzen basierenden Algorithmus. Hier basierend auf den x- und y- Wert der Transformationsmatrix

Im nächsten Schritt wurde die Geschwindigkeit der Datenverarbeitung analysiert und mit einer klassischen Methode (hier Fijiyama von ImageJ) verglichen. Hier konnte gezeigt werden, dass der hier implementierte netzbasierte Algorithmus 34-mal schneller die Transformationsmatrix vorhersagen kann. Außerdem wurden verschiedene Proben mit strukturierten Oberflächen getestet, um die Übertragbarkeit zu testen. Hier konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden beim Vergleich des MAEs (Mean absolute error) (Abbildung 33), ein Wert der einen Vergleich zwischen dem eigentliche Matrixwert und dem vorhergesagten angibt.

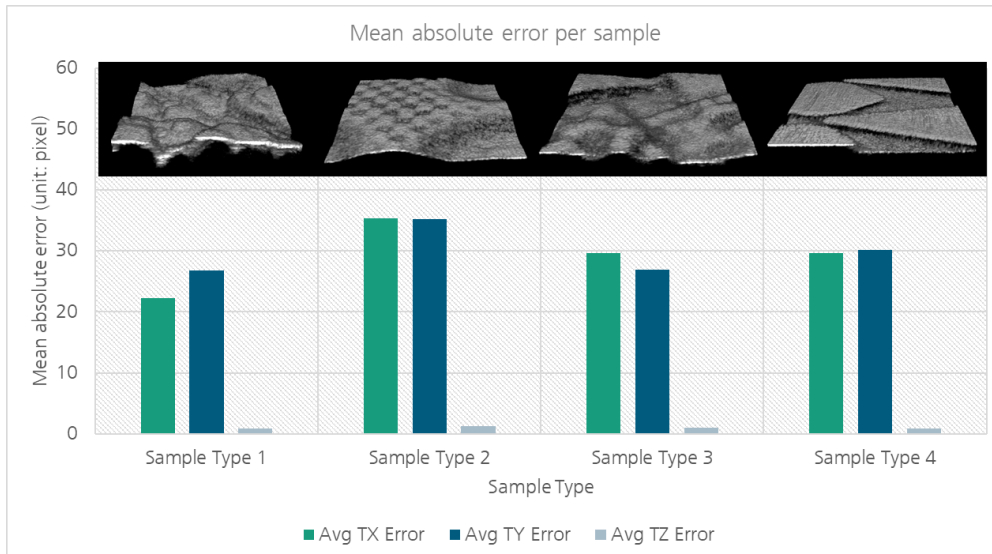


Abbildung 33: Vergleich des MAE (x-,y- und z-) von verschiedenen strukturierten Proben

Die bisherigen Arbeiten zeigten eine wesentliche Grenze des entwickelten Demonstrators: Das aufgrund der verwendeten Mikroskopoptiken auf wenige Millimeter beschränkte Sichtfeld erschwert die hochauflösende Untersuchung größerer Bauteilflächen. Für eine vollständige Charakterisierung sind deshalb weiterhin mehrere Messdatensätze, deren Registrierung sowie das anschließende Stitching erforderlich. Neben der Genauigkeit der Auswertung rückt damit zunehmend auch die Geschwindigkeit der Datenerfassung in den Fokus. Gerade für künftige Anwendungen in der Lasertechnik, bei denen strukturierte oder funktionalisierte Oberflächen möglichst schnell, robust und möglichst prozessnah erfasst werden sollen, reicht

es daher nicht aus, ausschließlich die bestehende UHR-OCT weiter zu optimieren. Vielmehr stellt sich die Frage, welche OCT-Systemarchitekturen zukünftig besonders geeignet sind, um sowohl die Aufnahmedauer als auch den Informationsgehalt der Messdaten zu verbessern.

Vor diesem Hintergrund wurden verschiedene OCT-basierte Ansätze hinsichtlich ihres Potenzials für die schnelle und hochauflösende Charakterisierung strukturierter und laserbearbeiteter Oberflächen bewertet. Ein besonderer Fokus lag dabei auf Line-Field-OCT-Systemen. Im Gegensatz zu klassisch punktwise abtastenden OCT-Verfahren nutzen diese eine linienförmige Beleuchtung mit paralleler Detektion, sodass ein vollständiger B-Scan in einer Aufnahme erfasst werden kann. Daraus ergeben sich Vorteile hinsichtlich einer deutlich erhöhten Messgeschwindigkeit und einer reduzierten Empfindlichkeit gegenüber bewegungsbedingten Artefakten. Insbesondere bei Messaufgaben mit hoher Datenrate oder bei der Untersuchung größerer Flächen erscheint dieser Ansatz vielversprechend, da die Datenerfassung effizienter gestaltet und die zeitliche Belastung bei der Aufnahme mehrerer benachbarter Messfelder reduziert werden kann. Aus Sicht von Sprint 12 ist Line-Field-OCT daher vor allem als Systemarchitektur relevant, um die bisherige Limitierung der Messgeschwindigkeit bei hochauflösenden Untersuchungen zu adressieren. Ergänzend dazu wurde das Potenzial der polarisationsempfindlichen optischen Kohärenztomographie (PS-OCT) bewertet. Während klassische OCT-Verfahren primär struktur- und topographiebasierte Informationen liefern, ermöglicht PS-OCT zusätzlich die Erfassung polarisationstechnischer Materialeigenschaften, beispielsweise von Doppelbrechung, Anisotropien oder spannungsinduzierten Änderungen in geeigneten Materialien und Schichtsystemen. Dadurch kann die Messung um einen zusätzlichen Kontrastmechanismus erweitert werden, der über die reine Oberflächen- und Tiefeninformation hinausgeht. Für zukünftige Anwendungen in der Lasertechnik ist dies insbesondere dort von Interesse, wo laserinduzierte Materialveränderungen nicht ausschließlich geometrisch, sondern auch in ihren optischen oder materialbezogenen Eigenschaften bewertet werden sollen. PS-OCT eröffnet damit die Perspektive, neben der hochauflösenden Geometrieerfassung auch funktionale Informationen über bearbeitete Bereiche, Schichtgrenzen oder materialabhängige Veränderungen zu gewinnen. Damit stellt PS-OCT keinen Ersatz, sondern vielmehr eine komplementäre Erweiterung bestehender OCT-basierter Messkonzepte dar.

Die Untersuchungen des Berichtszeitraums zeigen somit, dass unterschiedliche OCT-Systemarchitekturen jeweils unterschiedliche technologische Potenziale für zukünftige Prüfaufgaben besitzen. Line-Field-OCT adressiert insbesondere die Anforderungen an eine schnellere und robustere Datenerfassung, während PS-OCT den Informationsgehalt der Messung durch zusätzliche material- und polarisationsempfindliche Kontraste erweitern kann. Beide Ansätze sind damit in unterschiedlicher Weise geeignet, die aus den Vorjahren bekannten Limitierungen klassischer UHR-OCT-Systeme weiterzuentwickeln. Gleichzeitig bleibt die in Sprint 12 entwickelte datenbasierte Bildregistrierung weiterhin von zentraler Bedeutung, da auch bei schnelleren oder informationsreicheren OCT-Systemen für großflächige Analysen mehrere benachbarte Messfelder zuverlässig zusammengeführt werden müssen. Die Arbeiten des Berichtszeitraums münden daher in ein erweitertes Designkonzept für zukünftige OCT-Messsysteme in der Lasertechnik. Dieses Konzept umfasst einerseits Systemarchitekturen zur Beschleunigung der Datenerfassung und andererseits Verfahren zur Erschließung zusätzlicher materialbezogener Information. In Kombination mit den bereits entwickelten Methoden zur KI-gestützten Bildregistrierung und automatisierten Datenauswertung wurde damit eine Grundlage geschaffen, um die in den Vorjahren

entwickelten Verfahren perspektivisch auf prozessnahe, großflächige und funktional erweiterte Prüfaufgaben zu übertragen.

Sprintteam 14: Laserstrukturierung Prozeduraler Strukturen durch Nutzung dynamisch verteilter Echtzeitservices (Fraunhofer IPT in Zusammenarbeit mit Aixpath, EXAPT, ModuleWorks und Scanlab)

Das Sprintteam 14 erforscht und entwickelt die Integration von Microservice-Architekturen in die robotergestützte Laserstrukturierung zur Erhöhung der Anlagenmodularität und Orchestrierung von heterogenen Anlagenkomponenten. Die Laserstrukturierung stellt ein effektives Verfahren zur Funktionalisierung und Texturierung von Bauteilen dar. Sie wird unter anderem eingesetzt, um komplexe dreidimensionale Geometrien wiederholt zu markieren oder zu gravieren. Bei dieser Anwendung tastet ein fokussierter, gepulster Laserstrahl eine Zieloberfläche mit Hilfe eines hochpräzisen Galvanoscanners ab. Da das Scanfeld begrenzt ist, müssen große Oberflächen in ausreichend kleine Segmente unterteilt werden. Hierbei ist eine präzise Neupositionierung des Strukturierungssystems von größter Bedeutung, denn Abweichungen von mehr als 5 µm führen zu optisch erkennbaren Nähten zwischen den einzelnen Segmenten. Die Bearbeitung großer Bauteile mit Abmessungen über 500 x 500 Millimeter erfordert Präzisionswerkzeugmaschinen mit Investitionskosten in Millionen Euro Höhe. Diese Anforderung an die Positionsgenauigkeit macht den Einsatz zuverlässiger Hochpräzisions-Systemtechnik erforderlich. Bei der Bearbeitung großer Formen, beispielsweise Stoßfänger, Instrumententafeln oder Mittelkonsolen für die Automobilindustrie, ist komplexe und kostenintensive Anlagentechnik notwendig. Die Investitionskosten für Systeme mit einem Arbeitsvolumen von einem Kubikmeter übersteigen schnell 1,5 Millionen Euro, wobei nur ein kleiner Anteil von etwa 50.000 bis 70.000 Euro auf das Lasersystem entfällt. Diese Umstände führen zu einer eingeschränkten Marktanwendbarkeit. Industrieroboter stellen eine kosteneffiziente Alternative für diese Art von Laserprozessen dar. Solche Systeme werden heute hauptsächlich in der Lasermaterialbearbeitung zum Laserschneiden oder Laserschweißen eingesetzt. Für die Laserabtragung wurden sie industriell bisher nicht genutzt, da die Positionsgenauigkeit von Robotersystemen für diesen Zweck nicht ausreichend ist. Die Pose-Wiederholungsgenauigkeit solcher industriellen Robotersysteme kann derzeit etwa 0,3 mm nicht unterschreiten. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, mit Roboter-Positionsgenauigkeiten umzugehen. Beispielsweise können Bahn- und Positionsabweichungen durch externe Lasertracker oder Stereokameras kompensiert werden. Solche Systeme würden die Gesamtkosten um 100.000 bis 150.000 Euro erhöhen, wobei die resultierende Genauigkeitssteigerung für den Zweck der Laserstrukturierung immer noch unzureichend wäre.

Als Beispielanwendung diente die Strukturierung von Turbinenblättern für Gezeitenkraftwerke (Abbildung 34). Diese Anwendung verkörpert exemplarisch die Komplexität und die Anforderungen an moderne Fertigungstechnologien im Bereich erneuerbarer Energien. Motivierend hierzu sollen die Lebenszeit von Bauteilen erhöht und gleichzeitig die Performanz der Energiegewinnung gesteigert werden. Die funktionalen Anforderungen an die Oberflächenstruktur sind vielschichtig und anspruchsvoll. Die prozedurale Überlagerung von Wellenrippen und Mikropfeilern, inspiriert von der Haifischhaut, zielt auf zwei wesentliche Eigenschaften ab: Erstens die Reduzierung des Strömungswiderstands, die zur Effizienzsteigerung der Turbinen beiträgt und damit die Energieausbeute erhöht. Zweitens die Erzeugung von Antifouling-Eigenschaften, die das Ansetzen von Organismen verhindern und somit die Bauteillebensdauer signifikant verlängern. Beide Eigenschaften sind im marinen Umfeld von entscheidender wirtschaftlicher Bedeutung, da Wartungsarbeiten kostenintensiv

sind. Anhand dieser Beispielanwendung wurden zuerst die Systemdefizite analysiert, für die im weiteren Projektverlauf Lösungsvorschläge, basierend auf einer Microservice-Architektur, erarbeitet wurden.



Abbildung 34: Turbinenblätter eines Gezeitenkraftwerks. Copyright ORPC Dublin.

Systemdefizite

Die umfassende Analyse des bestehenden roboterbasierten Laserstrukturierungssystems (Abbildung 35) offenbarte drei fundamentale Defizite, die eine industrielle Verwertung der Technologie bislang verhinderten.

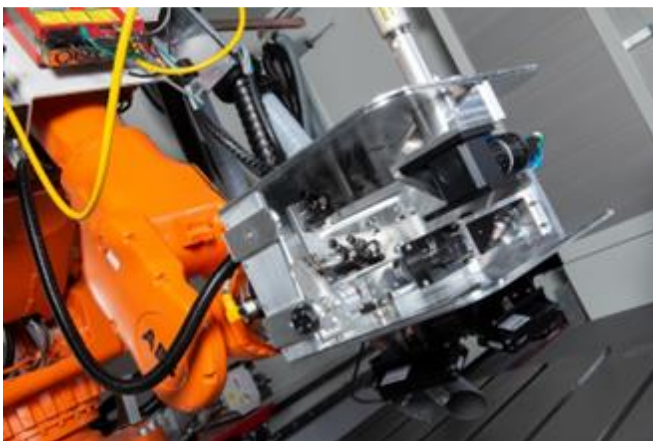


Abbildung 35: Roboter-gestütztes Laserstrukturiersystem am Fraunhofer IPT. Der 6-Achs-Arm führt das Laser-Optik-System über die zu bearbeitende Oberfläche.

Das erste Problem stellte die monolithische Systemarchitektur dar. Die heterogene, stark verknüpfte Hard- und Softwarelandschaft resultierte in einer wartungsintensiven Orchestrierung aller Komponenten. Die Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Systemelementen waren oftmals undurchsichtig, was zu erheblichen Schwierigkeiten bei der Fehleranalyse und Weiterentwicklung führte. Insbesondere die Notwendigkeit, mehrere Windows-Systeme für die getrennte Laser- und Robotersteuerung zu betreiben, erzeugte Synchronisationsprobleme, die eine echtzeitfähige Kommunikation verhinderten. Dieses Defizit würde sich auf die industrielle Praxis übertragen und zu hohen Wartungskosten führen.

Das zweite Defizit betraf die Positionsgenauigkeit des Robotersystems. Während konventionelle Industrieroboter eine absolute Genauigkeit von etwa 0,50 mm aufweisen, erfordert die Laserstrukturierung Genauigkeiten unter 0,001 mm. Diese Diskrepanz von drei Größenordnungen führte zu unwirksamen Oberflächenstrukturen, da die präzise Positionierung der Laserbearbeitung nicht gewährleistet werden konnte.

Das dritte identifizierte Problem lag in den enormen Datenvolumina, die bei der konventionellen Definition von Oberflächenstrukturen entstehen. Traditionell werden solche Strukturen über Dreiecksnetze oder Graustufenbilder definiert, was bei der Bearbeitung großflächiger Bauteile zu einem Datenengpass führt. Für das im Sprint betrachtete Bauteil, Rotorblätter für Gezeitenkraftwerke, die eine Länge von etwa fünf Metern haben, ergaben Schätzungen, dass eine Netzdarstellung zu etwa 8 Terabyte Daten führen würde. Dieses Datenvolumen ist derzeit mit konventionellen Methoden nicht-trivial verarbeitbar.

Systemdefizit 1: Transformation der monolithischen Architektur zu einer Kubernetes-basierten Microservice-Architektur

Die Lösung des ersten Systemdefizits erforderte eine Neukonzeption der bisherigen Systemarchitektur (Abbildung 36). Das Sprintteam 14 entwickelte einen echtzeitfähigen Kubernetes-Cluster, der die monolithische Struktur durch eine modulare Microservice-Architektur ersetzt. Diese Transformation basiert auf mehreren technologischen Säulen, die im Folgenden erläutert werden.

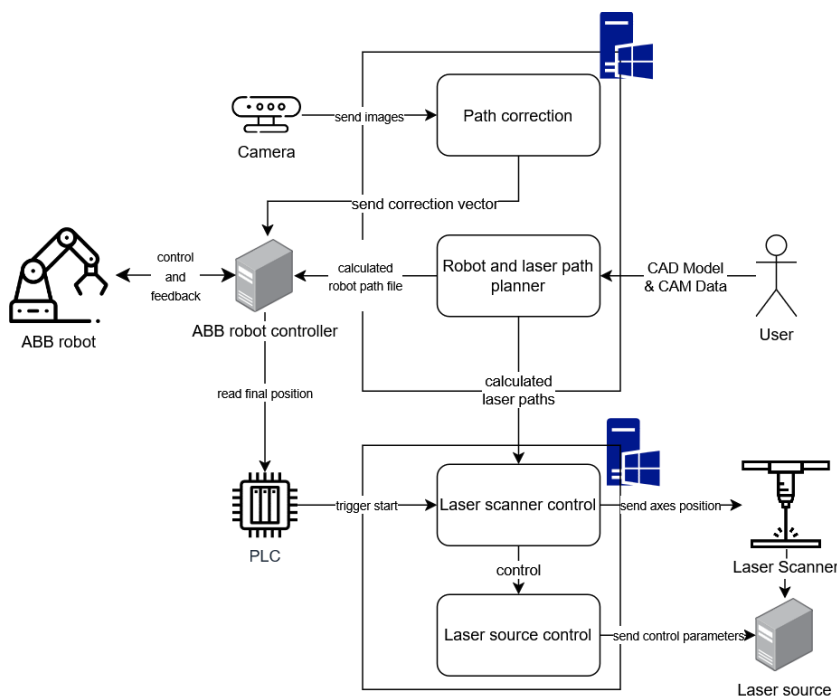


Abbildung 36 Aktuelle monolithische Architektur zur robotergestützten Laserstrukturierung

Das Host-System wurde auf Linux mit dem PREEMPT_RT-Patch migriert, der deterministische Ausführungszeiten ermöglicht. Für das Container-Scheduling kommt die SCHED_DEADLINE-Policy zum Einsatz. Diese Policy ermöglicht Tasks, drei Schlüsselparameter anzugeben: die benötigte CPU-Zeit (Runtime), das Intervall, in dem die Task abgeschlossen werden muss (Periode), und den Zeitpunkt, zu dem die Task beendet sein muss (Deadline). Die Policy ist darauf ausgelegt sicherzustellen, dass kritische Tasks ihre Deadlines einhalten, indem sie Tasks mit niedrigerer Priorität oder geringerer Zeitkritikalität

unterbricht, eine essenzielle Voraussetzung für harte Echtzeitanforderungen in der Fertigungstechnik.

Die Gewährleistung einer deterministischen Laufzeit auf dem Knoten selbst ist entscheidend. Daher muss der zeitkritische Workload vom restlichen Workload auf dem Knoten isoliert werden. Es ist notwendig sicherzustellen, dass Systemunterbrechungen die Echtzeitanwendung nicht unterbrechen können. Zwei komplementäre Ansätze werden hierfür eingesetzt:

- Isolation von Hardwareressourcen: Um jeden Echtzeit-Workload vollständig von den übrigen Anwendungen auf dem Knoten zu isolieren, werden CPU-Kerne gepinnt. CPU-Pinning bindet spezifische Prozesse an bestimmte CPU-Kerne und stellt sicher, dass sie konsistent auf demselben Kern ausgeführt werden. Da der Workload physisch auf verschiedenen Kernen getrennt ist, gewährleistet diese Strategie eine determinierte Ausführungszeit. Allerdings ist die Flexibilität des CPU-Pinnings begrenzt, und Überprovisionierung kann zu einer Unterauslastung der verfügbaren Ressourcen führen.
- Linux-Scheduler: Linux-Scheduler sind für die Bestimmung der Prozesspriorisierung und die Zuweisung von CPU-Zeit verantwortlich. Der SCHED_DEADLINE-Scheduler garantiert die deterministischsten Ergebnisse und ist ideal für Echtzeitanwendungen geeignet.

Ein wesentlicher Vorteil der neuen Architektur liegt in der Möglichkeit des parallelen Betriebs von Echtzeit- und Nicht-Echtzeit-Containern ohne gegenseitige Beeinflussung. Dies wird durch die Kombination von CPU-Pinning und SCHED_DEADLINE für die echtzeitfähigen Kubernetes-Pods erreicht, wodurch Kontextwechsel und Cache-Misses minimiert werden. Das Deployment der gesamten Infrastruktur erfolgt nach dem Infrastructure-as-Code-Prinzip, was eine reproduzierbare und versionskontrollierte Systemkonfiguration ermöglicht und den Wartungsaufwand erheblich reduziert.

Die Netzwerkkonfiguration für Kubernetes-Cluster muss getrennt für Layer-2-Netzwerke und Cluster-Netzwerke betrachtet werden (siehe Abbildung 37). Für Best-Effort-Anwendungen sind Standard-Ethernet-Netzwerke und bestehende Container Network Interface (CNI)-Lösungen wie Calico, Flannel oder Multus ausreichend. Im Falle von echtzeitfähigem Networking müssen Technologien wie Time-Sensitive Networking (TSN) und Erweiterungen für Netzwerk-Plugins eingeführt werden. Die Netzwerkfunktionen basieren auf TSN mit IEEE 802.1Qbv-Scheduling, das im Linux-RT-Kernel implementiert wurde und eine zeitkritische Datenkommunikation ermöglicht. Das Cluster-Networking in Kubernetes ist mit dem CNI und Netzwerk-Plugins konzipiert, die ein Overlay-Netzwerk erstellen und sicherstellen, dass jeder Pod eine eindeutige IP-Adresse erhält. Dies vereinfacht die Pod-zu-Pod-Kommunikation und isoliert das Kubernetes-Netzwerk von der Bare-Metal-Infrastruktur. Die Kommunikation von Pods außerhalb von Kubernetes kann über Services, Ingress-Controller oder Load-Balancer-Tools implementiert werden.

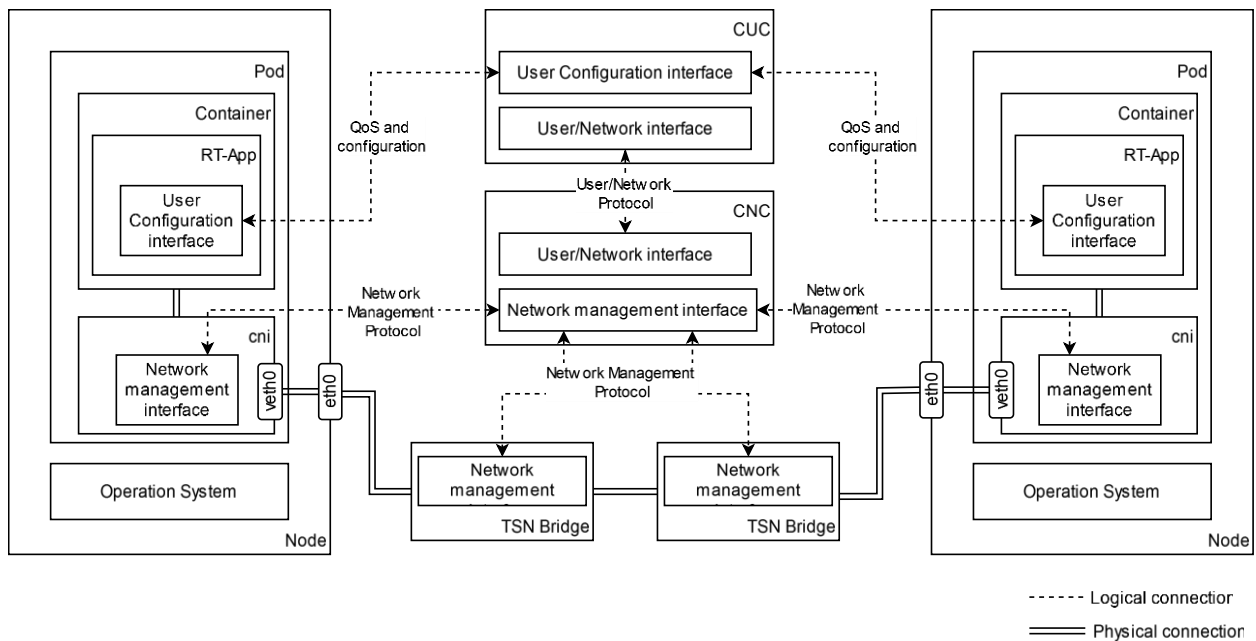


Abbildung 37 Gesamtarchitektur des Kubernetes-Netzwerks. Diese Infrastruktur dient als Basis für die Microservices, die für die Anlagensteuerung und -kontrolle verantwortlich sein werden.

Um Echtzeit-Traffic für Pods zu ermöglichen, müssen die CNI-Plugins, die als virtuelle Bridges fungieren, mit TSN-Fähigkeiten erweitert werden. Die in IEEE 802.1 für physische Switches beschriebenen Mechanismen werden entsprechend implementiert. Zusätzlich muss die in IEEE 802.1Qcc definierte zentralisierte Netzwerkkonfiguration und -verwaltung erweitert werden, um nicht nur die physischen Switches, sondern auch die virtuellen CNI-Bridges einzubeziehen.

Für die Steuerung des Roboterarms wird der Microservice Robot Control eingesetzt. Dieser ist direkt mit der Robotersteuerungseinheit ABB IRC5 verbunden und verwendet die ABB-Zusatzoption „Externally Guided Motion“ (EGM), um den Roboterarm in Echtzeit zu steuern. Die Steuerung des Arms erfolgt über eine Netzwerkkommunikation mittels UDP-Paketen in einem festgelegten Taktzyklus von 4 Millisekunden, entsprechend einer Zyklusfrequenz von 250 Hz.

Für die strukturierte Datenübertragung werden Google Protocol Buffers verwendet, die eine effiziente Serialisierung der Steuerungsbefehle und Positionsdaten ermöglichen. Die Integration des EGM-Moduls in das Laserstrukturiersystem eröffnet die automatisierte Prozesskontrolle und ermöglicht eine präzise Koordination zwischen Roboterbewegung und Laserbearbeitung. Die detaillierte Umsetzung der Kommunikation ist in Abbildung 38 dargestellt.

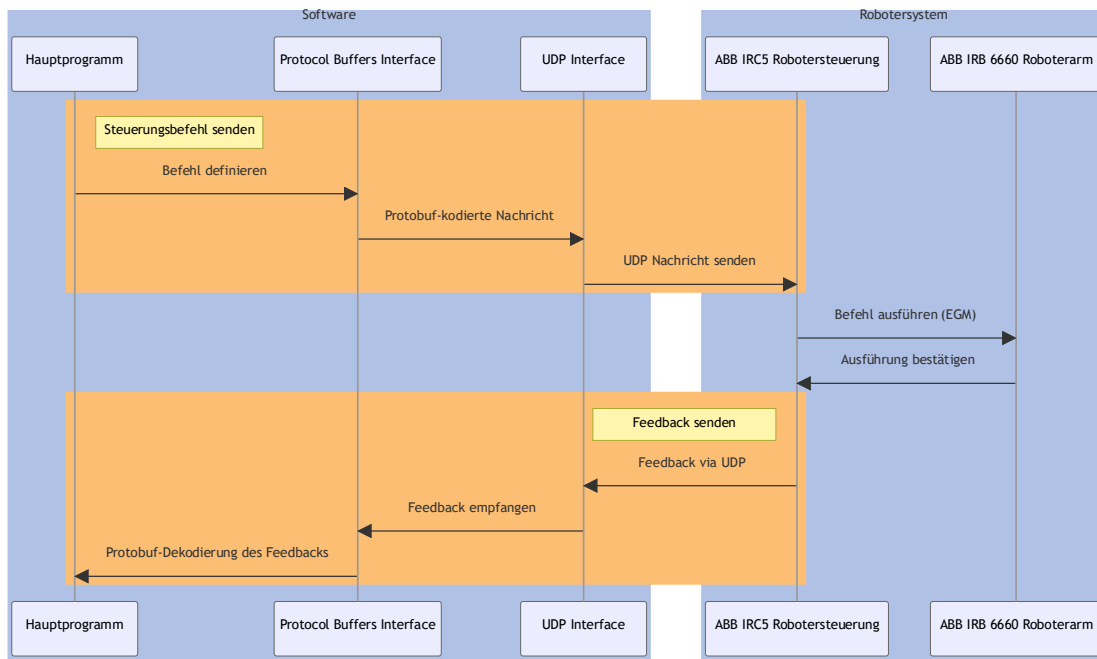


Abbildung 38 UDP-Protokoll basierend auf Protocol Buffers. Das Protokoll dient zur Kommunikation zwischen einem Computersystem mit der ABB IRC5 Robotersteuerung.

Die Überwachung des Systems ist für das ordnungsgemäße Funktionieren von Echtzeit-Anwendungen unerlässlich. Die Überwachungsinstanzen sind in Abbildung 39 dargestellt und müssen auf verschiedenen Ebenen operieren und an eine zentrale Überwachungsinstanz (Central Monitoring Instance, CMI) berichten. Im Falle eines Leistungsverlustes ist die CMI dafür verantwortlich, Gegenmaßnahmen auf den jeweiligen Ebenen einzuleiten, um das Problem zu beheben und zu mindern.

- **Knotenebene:** Die Überwachung auf Knotenebene ist erforderlich, um die korrekte Ausführung der Prozesse und Aufgaben auf Betriebssystemebene sicherzustellen. Die Metriken auf Knotenebene basieren auf der Definition von Betriebssystem-Metriken (OS-Level Metrics, OSLM) und Container-Metriken (Container-Level Metrics, CLM). Die Überwachung umfasst bestehende Werkzeuge zur Erfassung von OSLM sowie die Überwachung von CLM-Metriken wie Anzahl verpasster Deadlines, maximale Verspätung und maximale Antwortzeit.
- **Anwendungsebene:** Auf Anwendungsebene wird die korrekte Ausführung der Anwendung selbst überwacht. Die Überwachungsmetriken hängen von der implementierten Anwendung ab und werden mit integrierten Überwachungssystemen wie Watchdog-Diensten erfasst.
- **Netzwerkebene:** Eine Überwachungsinstanz auf Netzwerkebene ist erforderlich, um den Status des Kommunikationsnetzwerks zu kennen. Die Verwendung des zentralisierten Netzwerkkonfigurations-Managements ermöglicht die Nutzung des Centralized Network Configurator (CNC) zur Überwachung physischer Netzwerkgeräte. Zusätzlich werden die virtuellen Bridges des Cluster-Netzwerks in die Überwachung des CNC einbezogen.

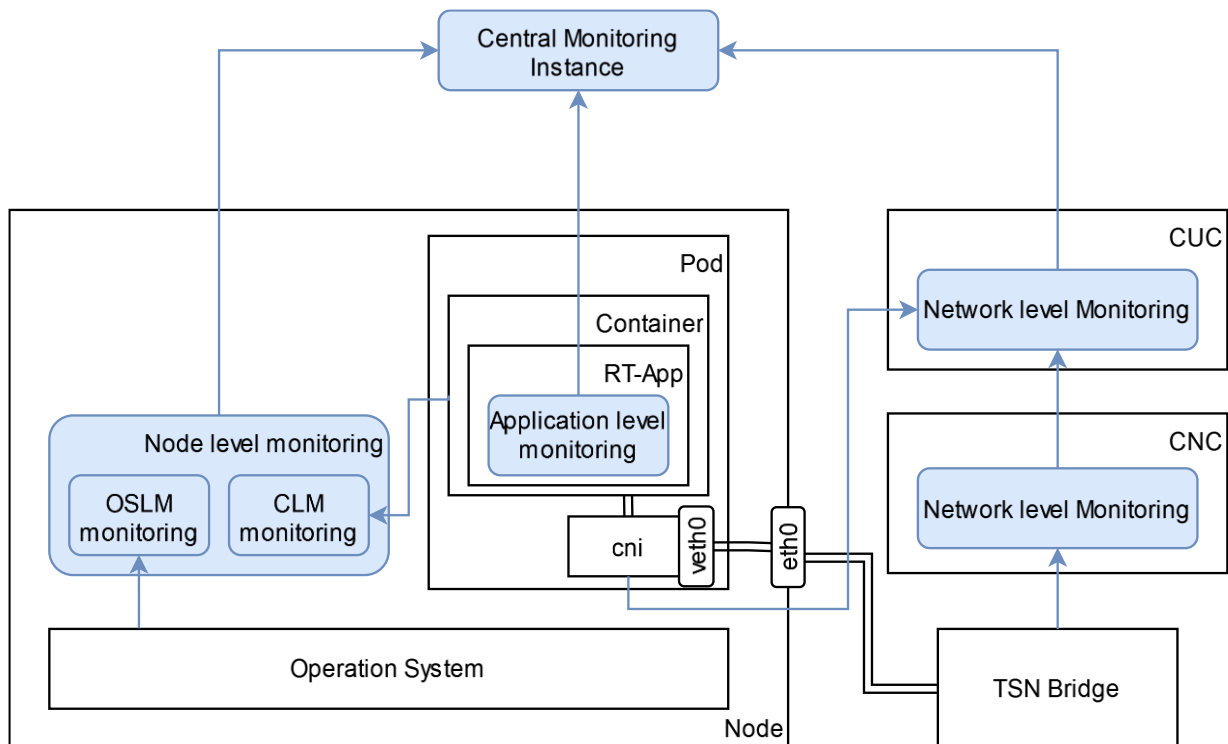


Abbildung 39 Monitoring Architektur

Ein weiterer wesentlicher Vorteil der neuen Architektur liegt in der Möglichkeit des parallelen Betriebs von Echtzeit- und Nicht-Echtzeit-Containern ohne gegenseitige Beeinflussung. Dies wird durch CPU-Pinning für die echtzeitfähigen Kubernetes-Pods erreicht, das Kontextwechsel und Cache-Misses minimiert. Das Deployment der gesamten Infrastruktur erfolgt nach dem Infrastructure-as-Code-Prinzip, was eine reproduzierbare und versionskontrollierte Systemkonfiguration ermöglicht und den Wartungsaufwand erheblich reduziert und vereinfacht.

Die Überwachung des Systems (siehe Abbildung 39) ist für das ordnungsgemäße Funktionieren von Echtzeit-Anwendungen (RT) unerlässlich. Die beschriebenen Instanzen müssen auf verschiedenen Ebenen laufen und an eine zentrale Überwachungsinstanz (CMI) berichten. Im Falle eines Leistungsverlustes ist die CMI dafür verantwortlich, Gegenmaßnahmen auf den jeweiligen Ebenen einzuleiten, um das Problem zu beheben oder zu mindern. Im Detail wurden folgende Aspekte der Systemüberwachung herangezogen:

1. Knotenebene
Die Überwachung auf Knotenebene ist erforderlich, um die korrekte Ausführung der Prozesse und Aufgaben auf Betriebssystemebene sicherzustellen. Die Metriken auf Knotenebene basieren auf der Definition von Betriebssystem-Metriken (OSLM) und Container-Metriken (CLM). Die Überwachung auf Knotenebene ist eine Zusammenführung bestehender Werkzeuge zur Überwachung von OSLM und der Überwachung von CLM-Metriken wie Anzahl verpasster Deadlines, maximale Verspätung und maximale Antwortzeit.
2. Anwendungsebene
Auf Anwendungsebene wird die korrekte Ausführung der Anwendung selbst überwacht. Die Überwachungsmetriken hängen von der implementierten Anwendung ab und werden mit integrierten Überwachungssystemen wie Watchdog-Diensten erfasst.
3. Netzwerkebene
Eine Überwachungsinstanz auf Netzwerkebene ist erforderlich, um den Status des

Kommunikationsnetzwerks zu kennen. Die Verwendung des zentralisierten Netzwerkkonfigurations-Managements ermöglicht die Nutzung des CNC zur Überwachung physischer Netzwerkgeräte. Zusätzlich müssen die virtuellen Bridges des Cluster-Netzwerks in die Überwachung des CNC einbezogen werden.

Die überarbeitete Microservice-Architektur, die Microservices innerhalb eines Kubernetes-Netzwerks nutzt, bietet einen Workflow für Systemanpassungen. Diese modulare Konfiguration reduziert die Kosten für Modifikationen an Hard- und Softwarekomponenten erheblich, indem Maschinenstillstandszeiten minimiert werden. Darüber hinaus ermöglicht die Architektur nahtlose Systemaktualisierungen und unterstützt Echtzeit-Datenmanagement sowie Systemreaktionsfähigkeit. Jeder Microservice erlaubt eine präzise Kontrolle über jede Phase des Laserstrukturierungsprozesses. Die Kompatibilität dieser Architektur mit datengetriebenen Anwendungen, die zunehmend für eine verbesserte Prozesssteuerung und -optimierung in der Fertigung eingesetzt werden, gewährleistet die Anpassungsfähigkeit des Systems für zukünftige Erweiterungen. Dies verbessert nicht nur die Präzision und Effizienz des Laserstrukturierungsprozesses, sondern erhöht auch die Robustheit und Fähigkeit des Systems, den sich entwickelnden Anforderungen der industriellen Praxis gerecht zu werden. Die Performance-Messungen bestätigen die Erfüllung der Echtzeitanforderungen des entwickelten Systems. Die Robotersteuerung operiert mit einer Zykluszeit von 4 ms bei einer Frequenz von 250 Hz, wobei 99,9 % aller Datenpakete innerhalb der definierten Deadline übertragen werden. Die Lasersteuerung erreicht eine noch höhere Performance mit einer Zykluszeit von unter einer Millisekunde und einer Paketübertragungsrate von 99,99 %. Diese Messergebnisse demonstrieren, dass das entwickelte System die strengen Anforderungen industrieller Echtzeitanwendungen zuverlässig erfüllt und damit die Grundlage für einen stabilen und präzisen Fertigungsprozess bildet.

Systemdefizit 2: Positionsungenauigkeit des Roboters wird mittels Kamerabilder kompensiert. Softwareintegration in die Microservice-Architektur

Um die Positionsungenauigkeiten des Robotersystems zu kompensieren, greift die Anlagentechnik auf die Bildverarbeitung zurück. Hierfür wird die im Strahlengang integrierte Kamera genutzt. Die Prozesskette gliedert sich in folgende Schritte: Zunächst werden durch das Lasersystem Markierungen an definierten Positionen auf der Bauteiloberfläche aufgebracht. Diese dienen als Ankerpunkte für die Textur und zur Positionsbestimmung des Robotersystems. An jeder Markerposition nimmt das integrierte Kamerasystem ein Referenzbild auf. Die Marker bestehen aus einer Kreuzstruktur mit rechteckigen Elementen in vier Quadranten. Dieses Design wurde gewählt, da der verwendete ORB-Algorithmus auf der Erkennung von Ecken und 90-Grad-Winkeln basiert. Der ORB-Algorithmus kombiniert den FAST-Algorithmus zur Eckenerkennung mit einer Laplace-Bildpyramide, wodurch die Merkmalerkennung robust gegenüber Bildrauschen und Reflexionen auf metallischen Oberflächen ist. Das Kreuz bietet zusätzlich eine Orientierung für die Messung der Texturverschiebung. Vor jedem Strukturvorgang wird die tatsächliche Position des Lasermoduls ermittelt. Jedes Segment enthält drei Marker, die eine Triangulation ermöglichen. Die aufgenommenen Ist-Bilder werden mittels einer OpenCV-basierten Bibliothek mit den Referenzbildern verglichen. Der Algorithmus identifiziert identische Merkmale in beiden Bildern und berechnet daraus Verschiebungsvektoren. Diese Vektoren werden anschließend genutzt, um die Werkzeugbahn in Echtzeit anzupassen. Der Prozess wiederholt sich für jedes Segment in jeder Schicht. Diese Softwarelösung wurde innerhalb des Sprints so adaptiert, dass eine Kompatibilität mit Linux-Betriebssystemen hergestellt wurde. Die Bildübertragung erforderte eine Datenrate von ca. 450 Mbit/s, die vom Kubernetes-System bewältigt werden konnte.

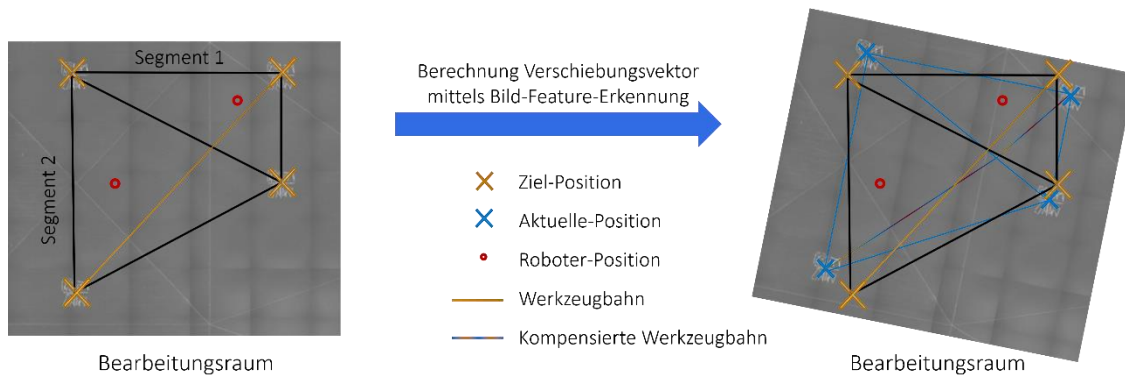


Abbildung 40 Kompensationsalgorithmus anhand von Markierungen auf dem Bauteil. Mittels Bild-Feature-Erkennung werden die Marker und deren Position erkannt, um Verschiebungsvektoren zu berechnen

Die Ergebnisse zeigen, dass selbst Positionsungenauigkeiten von bis zu einem Millimeter kompensiert werden können. Bei der statistischen Auswertung der Verschiebungsvektoren wurde eine Standardabweichung von $13 \mu\text{m}$ bei 5000 Messungen ermittelt. Das System konnte erfolgreich 300 Schichten einer Ledertextur mit einer Tiefe von $0,15 \text{ mm}$ strukturieren (Abbildung 41), wobei die Werkzeugbahn für jede Schicht angepasst wurde und keine sichtbaren Nähte zwischen den Segmenten entstanden.

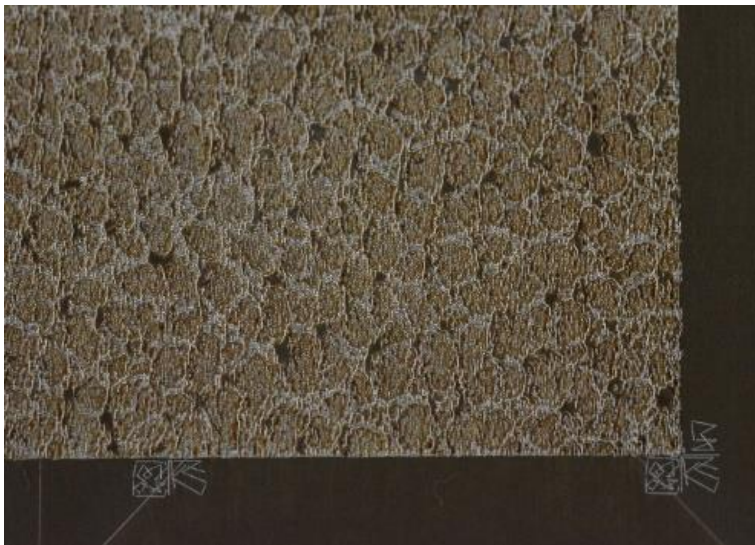


Abbildung 41 Ledertextur als Beispiel. Die Marker sind in den Ecken der Textur zu erkennen und dienen zur Positionserkennung während des Strukturierprozesses.

Systemdefizit 3: Online-Generation von Werkzeugbahnen anhand prozeduraler Strukturen zur daten-effizienten Ausführung.

Die konventionelle Prozesskette für die Laserstrukturierung basiert auf der Offline-Berechnung von Werkzeugbahnen, wobei Oberflächenstrukturen typischerweise über Dreiecksnetze im STL-Format oder über Graustufenbilder definiert werden. Diese Darstellungsformen stoßen bei der Bearbeitung großflächiger Bauteile an fundamentale Grenzen, die eine wirtschaftliche Umsetzung der Technologie bislang verhinderten. Für das im Sprint betrachtete Demonstratorbauteil, konkret Rotorblätter für Gezeitenkraftwerke mit einer Länge von etwa fünf Metern, ergaben Berechnungen, dass eine vollständige Netzdarstellung der

Oberflächenstruktur im STL-Format zu einem Datenvolumen von etwa 8 Terabyte führen würde. Dieses Datenvolumen ist mit konventionellen Methoden nicht handhabbar und führt zu langen Rechenzeiten bei der Offline-Berechnung, mangelnder Echtzeitfähigkeit, rasterbasierten Artefakten durch Diskretisierung sowie Speicher- und Übertragungsgrenzen.

Prozedurale Strukturen stellen eine Alternative in der Oberflächenrepräsentation dar. Anstatt diskrete Geometriedaten zu speichern, werden Oberflächenstrukturen durch mathematische Funktionen beschrieben, die zur Laufzeit ausgewertet werden können. Eine prozedurale Oberflächenstruktur wird definiert als eine Funktion, die von den parametrischen Koordinaten auf der Oberfläche abhängt und die lokale Strukturhöhe beziehungsweise Ablationstiefe zurückgibt. Die im Projekt untersuchten Strukturen basieren auf der Überlagerung von Wellenrippen, auch als Riblets bezeichnet, und Mikrofeilern. Die Generierung der Scannerbewegungen aus der prozeduralen Strukturbeschreibung erfolgt durch einen Evaluationsalgorithmus, der die mathematische Beschreibung auf diskrete Scannerpositionen abbildet. Der Algorithmus iteriert über ein definiertes Scanraster und wertet für jeden Punkt die prozedurale Funktion aus. Aus der berechneten Strukturhöhe wird die erforderliche Anzahl von Laserüberfahrten bestimmt, wobei die Ablationstiefe pro Überfahrt als bekannter Prozessparameter angenommen wird. Für jeden Rasterpunkt und jede erforderliche Überfahrt wird ein entsprechender Scannerbefehl generiert. Der entscheidende Vorteil dieses Ansatzes liegt in der Auflösungsunabhängigkeit. Die mathematische Repräsentation kann auf beliebig feine Raster ausgewertet werden, ohne dass die Quelldaten verändert werden müssen. Zudem entstehen keine Aliasing-Artefakte oder Treppeneffekte, wie sie bei rasterbasierten Verfahren unvermeidlich auftreten. Die Echtzeitfähigkeit des Verfahrens ermöglicht erstmals die Online-Generierung von Werkzeugbahnen während des Bearbeitungsprozesses, was adaptive Anpassungen an Prozessschwankungen oder Geometrieabweichungen erlaubt.

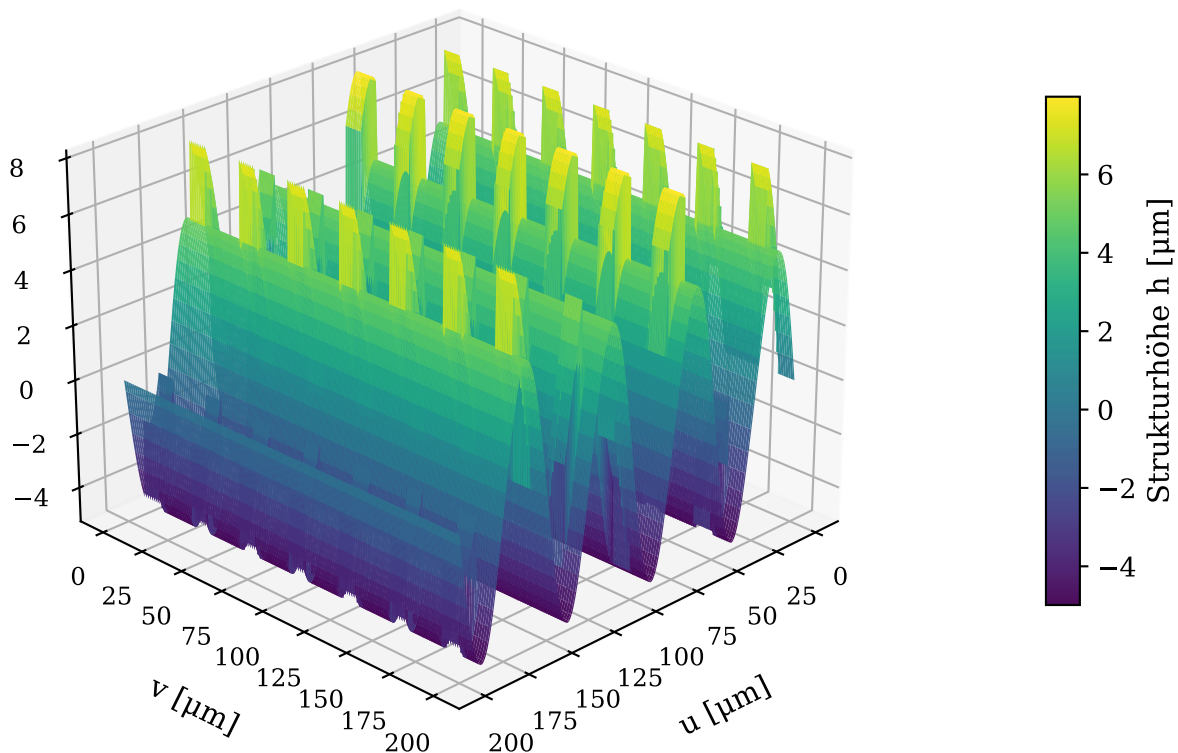


Abbildung 42 Beispiel einer generierten Oberflächenstruktur im Mikrometerbereich durch prozedurale Strukturdefinitionen.

Die Umsetzung der prozeduralen Strukturgenerierung erfordert eine systematische Prozesskette, die die Bauteilgeometrie, Roboterkinematik und Laserparameter integriert. Das entwickelte System gliedert sich in drei aufeinander aufbauende Stufen. Die CAD-Segmentierung unterteilt die komplexe Bauteiloberfläche in bearbeitbare Einheiten. Die Roboterpfadplanung berechnet die Bewegungstrajektorien für den Roboterarm. Die Laserpfadplanung generiert schließlich die Scannerbefehle für jedes einzelne Segment. Das Scanfeld des Galvanoscanners ist auf einen Bereich von etwa 70 x 70 mm² begrenzt, wobei die genauen Abmessungen von der verwendeten Brennweite und Optik abhängen. Großflächige Bauteile müssen daher in einzelne, überlappende Segmente unterteilt werden, die sequenziell bearbeitet werden können. Die Segmentierung erfüllt dabei zwei Hauptfunktionen. Erstens die geometrische Partitionierung der Oberfläche in bearbeitbare Einheiten und zweitens die Extraktion der lokalen Oberflächenorientierung für die korrekte Ausrichtung des Roboterarms.

Segmentierung der Oberfläche

Für die Segmentierung (Abbildung 43) wurde der K-Means-Algorithmus eingesetzt, der die Oberflächenpunkte basierend auf Position und Normalenvektoren in Cluster einteilt. Jeder Punkt auf der Oberfläche wird durch einen 6-D-Feature-Vektor repräsentiert, der die drei Raumkoordinaten sowie die drei Komponenten des Normalenvektors enthält. Der Algorithmus minimiert die Summe der quadratischen Abstände aller Punkte zu ihren jeweiligen Clusterzentren und erzeugt dadurch räumlich zusammenhängende Segmente mit ähnlicher Oberflächenorientierung. Die minimale Anzahl der Cluster ergibt sich aus dem Verhältnis der Gesamtoberfläche zur Scannerfläche. Diese Zahl kann erhöht werden, um in Bereichen höherer Krümmung eine bessere Approximation der lokalen Oberflächennormalen zu erreichen. Die Implementierung erfolgte in Python unter Verwendung der Bibliothek PyVista für Netzoperationen und Visualisierung sowie scikit-learn für das Clustering. Die Bearbeitungsreihenfolge der Segmente wurde mittels eines Traveling-Salesman-Problem-Solvers optimiert, um die Roboterfahrwege heuristisch zu minimieren. Der eingesetzte Simulated-Annealing-Algorithmus bietet einen guten Kompromiss zwischen Lösungsqualität und Rechenzeit. Das Ergebnis der Segmentierungsstufe ist eine strukturierte Datei im CSV-Format, die für jedes Segment den projizierten Zentroid auf der Bauteiloberfläche sowie den zugehörigen Normalenvektor enthält. Diese Daten bilden die Eingabe für die nachfolgende Roboterpfadplanung.

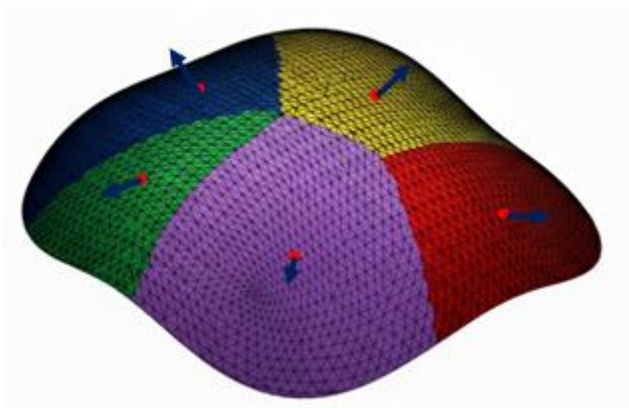


Abbildung 43: Beispielsegmentierung einer gekrümmten Oberfläche. Die roten Punkte stellen die Segmentmittelpunkte dar, mit den blauen Normalenvektoren.

Roboterpfadplanung

Die Roboterpfadplanung transformiert die geometrischen Segmentdaten in ausführbare Gelenkwinkeltrajektorien. Der Roboterarm muss das Laser-Optik-System so positionieren, dass der Laserstrahl senkrecht zur lokalen Oberfläche ausgerichtet ist. Gleichzeitig muss ein definierter Arbeitsabstand eingehalten und Kollisionen mit dem Bauteil vermieden werden. Für jeden Segmentmittelpunkt mit zugehörigem Normalenvektor wird eine Zielpose für den Industrieroboter berechnet. Die Orientierung wird so berechnet, dass der Laserstrahl senkrecht auf die Oberfläche trifft. Die Bewegungsplanung wurde mittels des ROS 2 Jazzy-Frameworks und der MoveIt 2-Bibliothek realisiert. Die Python-Schnittstelle *moveit_py* ermöglicht die skriptbasierte Planung ohne die Notwendigkeit, separate C++-Knoten zu entwickeln. Für den eingesetzten ABB Industrieroboterarm wurde ein URDF-Modell erstellt, das alle relevanten Gelenkgrenzen und Kollisionsgeometrien enthält. Der KDL-Solver berechnet die inverse Kinematik und führt automatisch Kollisionsprüfungen durch. Das Ergebnis der Roboterpfadplanung ist eine Trajektorie im Gelenkraum, die als CSV-Datei gespeichert wird. Diese Trajektorie definiert die zeitliche Abfolge der Gelenkwinkel für alle Achsen des Roboters und kann direkt zur Validierung oder Ausführung verwendet werden.

Laserpfadplanung

Die Laserpfadplanung generiert die Scannerbefehle, die definieren, wie der Laserstrahl innerhalb jedes Segments über die Oberfläche geführt wird. Diese Stufe integriert die prozedurale Strukturbeschreibung und erzeugt maschinenlesbaren G-Code, der zur Ausführung benötigt wird. Für die Oberflächenstrukturierung wurden verschiedene Scanmuster evaluiert. Das Zigzag-Muster mit bidirektionalen Linien eignet sich besonders für die Flächenablation und wurde als Standardmuster gewählt, da es eine effiziente Flächenabdeckung bei minimaler Totzeit bietet. Alternative Muster wie unidirektionale Parallellinien, Spiralen oder Konturbahnen stehen für spezielle Anwendungsfälle zur Verfügung. Die generierten G-Code-Dateien wurden auf dem realen Lasersystem am Fraunhofer IPT ausgeführt, wobei sichtbare Laserablation erzielt wurde. Die prozedurale Auswertung ermöglicht erstmals die Online-Generierung von Werkzeugbahnen während der Bearbeitung. Diese schnelle Berechnung eröffnet neue Möglichkeiten für adaptive Prozessführung, bei der die Strukturparameter basierend auf Sensorik-Feedback während des Prozesses angepasst werden können.

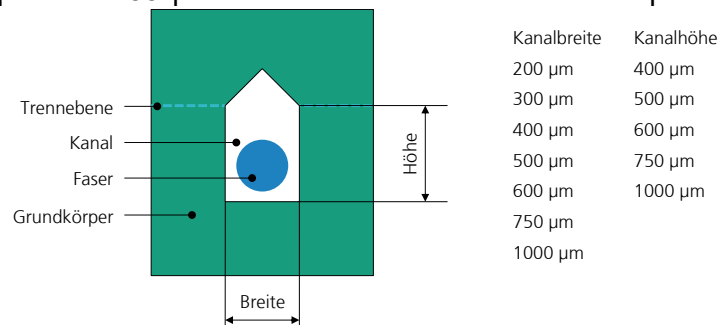
Zusammenfassung

Das Sprintteam 14 hat innerhalb des DPP-Open ein modulares, robotergestütztes System zur großflächigen Laserstrukturierung von Bauteilen entwickelt. Als Beispielanwendung dienten Turbinenblätter für Gezeitenkraftwerke, deren Oberflächen mit haifischinspirierten Strukturen zur Reibungsminimierung und Antifouling versehen werden sollen. Drei zentrale Systemdefizite wurden identifiziert und durch informationstechnische Methoden gelöst. Die bisherige monolithische und wartungsintensive Architektur wurde durch einen echtzeitfähigen Kubernetes-Cluster mit Microservices ersetzt, der eine Taktrate von 250 Hz erreicht und 99,9 Prozent aller Pakete innerhalb der Deadline überträgt. Die Positionsungenauigkeit des Roboters wurde mittels kamerabasierter Kompensation durch Markierungserkennung reduziert. Das Problem der großen Datenvolumina von über einem Terabyte für großflächige Strukturen wurde durch eine prozedurale Strukturbeschreibung mit Online-Generierung gelöst, die eine auflösungsunabhängige und echtzeitfähige Werkzeugbahnplanung ermöglicht. Aktuell steht noch die Veröffentlichung der Ergebnisse in wissenschaftlichen Konferenzen/Zeitschriften aus. Zukünftige Arbeiten umfassen den Einsatz der echtzeitfähigen

lokalen Cloud-Lösung „FCTRY CLD“ für weitere Produktionsprozesse und Anlagenarchitekturen sowie die Verwertung und Weiterentwicklung der Softwarekomponenten für weitere Anwendungsfälle. Darüber hinaus sollen die Bahnplanung durch prozedurale Strukturen, die kamerabasierte Roboterkompensation und die Echtzeitsteuerung des Roboters für additive Fertigungsprozesse weitergeführt werden.

Sprintteam 18: Integration von faseroptischen Sensoren zur Struktur- und Prozessüberwachung im LPBF-Prozess (Fraunhofer IPT)

Das Sprintteam 18 hat sich im Jahr 2022 neu gegründet zur Erforschung der Integration von faseroptischen Sensoren zur Struktur- und Prozessüberwachung in LPBF-Bauteilen. Als erster Schritt wurden Bauteile mit einer Höhe und Breite von 10 mm sowie einer Länge von 20 mm gedruckt. In die Bauteile wurden Kanäle für die optischen Fasern mit den Durchmessern 125 μm und 155 μm konstruiert. Während des Druckprozesses wurde eine



Trennebene nach 6 mm eingefügt, bei der der Prozess unterbrochen wurde, um die optische Faser einzulegen. Ein schematischer Querschnitt der Konstruktion ist in Abbildung 44 dargestellt.

Abbildung 44: Schematischer Querschnitt der LPBF-Probengeometrie mit innerer Kanalgeometrie und Faser

Während des ersten Druckprozesses wurden die Fasern durch den Recoater aus dem Kanal geschoben. Hilfsgeometrielemente wurden zu den Bauteilen positioniert, um die Fasern zu führen und zu fixieren. Beim späteren Abtrennen der Bauteile von der Bauplatte durch sägen wurden die Fasern durch diese Hilfsgeometrielemente zusätzlich beschädigt. Daher wurden die LPBF-Bauteile dahingehend modifiziert, dass der Kanal geschwungen ausgebildet wurde, um die optischen Fasern zu fixieren. Ein Teil des geschwungenen Kanals ist bereits geschlossen beim Einlegen der Fasern und stabilisiert diese. Auf die Hilfsgeometrielemente kann somit verzichtet werden. Die Hilfsgeometrielemente sowie ein Schnitt des Bauteils mit geschwungenem Kanal ist in Abbildung 45 dargestellt.

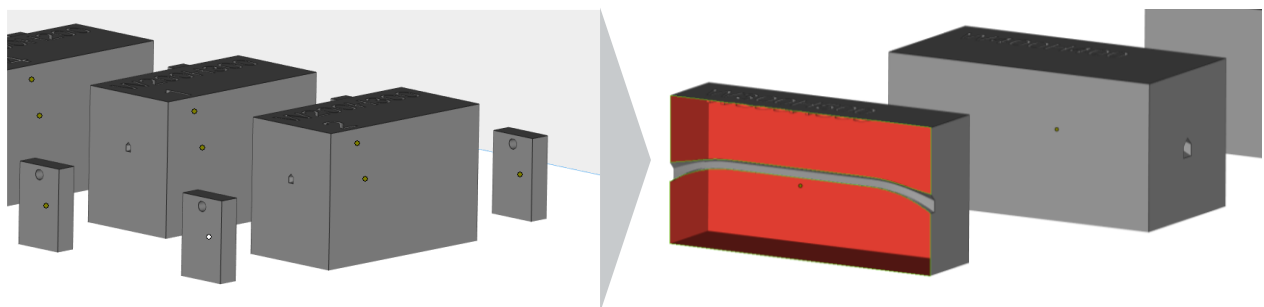


Abbildung 45: CAD-Modell der LPBF-Bauteile mit Hilfsgeometrie (links) und mit geschwungenem Kanal (rechts)

Bei den Untersuchungen wurden zunächst Fasern mit Acrylat und Polyimidcoating mit den Durchmessern von 0,25 mm und 0,155 mm eingesetzt. Beide Fasern wiesen trotz der angepassten Kanalgeometrie starke Schäden nach dem Druckprozess auf. Bis zu einer Kanalgröße von 500 µm x 500 µm wurden die Fasern zerstört. Bei Kanalgrößen größer 500 µm x 500 µm erfolgte keine Anbindung der Fasern. Sie konnten nach dem Druck einfach aus dem Bauteil gezogen werden. Die zunächst untersuchten Fasern sind für die Integration in LPBF-Bauteile ungeeignet. Eine Abbildung der Bauteile mit Fasern und eines Querschliffs ist in Abbildung 46 dargestellt.

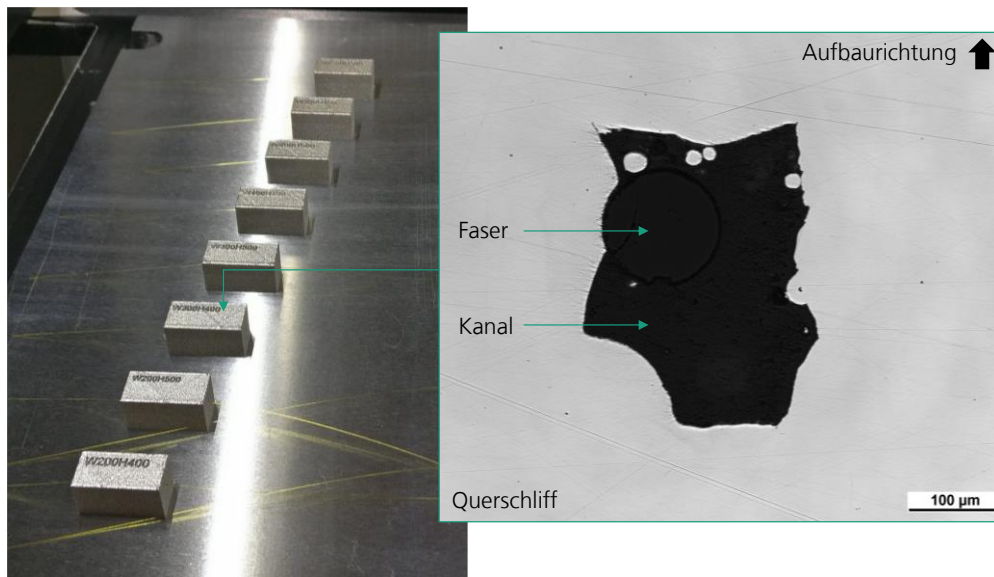


Abbildung 46: Bauteile mit eingedruckten Fasern und Querschliff

Im nächsten Schritt wurden Fasern mit größerem Durchmesser von 1,0 mm und einer zusätzlichen Stahlummantelung aus dem Werkstoff 1.4404 untersucht. Für diese größeren Fasern wurde eine neue Stützstruktur entworfen. Das Handling der Fasern konnte dadurch erleichtert werden und durch die halboffene Struktur die Faser nach dem Druck entnommen werden. Dadurch kann eine Beschädigung beim Abtrennen von der Bauplatte vermieden werden. Als Kanalgrößen eignen sich zunächst 1,2 mm und 1,4 mm große Kanäle. Die Fasern werden dabei überdruckt, ohne beschädigt zu werden und sind fest mit dem Bauteil verbunden. Die ersten Bauteile mit integrierter Faser und Besteckerung nach dem Druck sowie eine Messung der Faser sind in Abbildung 47 dargestellt. Der zwei Graphen in Abbildung 18 zeigen die Dehnungsmessung der Faser bei unterschiedlichen Temperaturen. Der blaue Graph stellt eine höhere Temperatur gegenüber dem grünen Graph dar. Nach einer kalibrieren der Messstrecke können konkrete Werte gemessen werden.

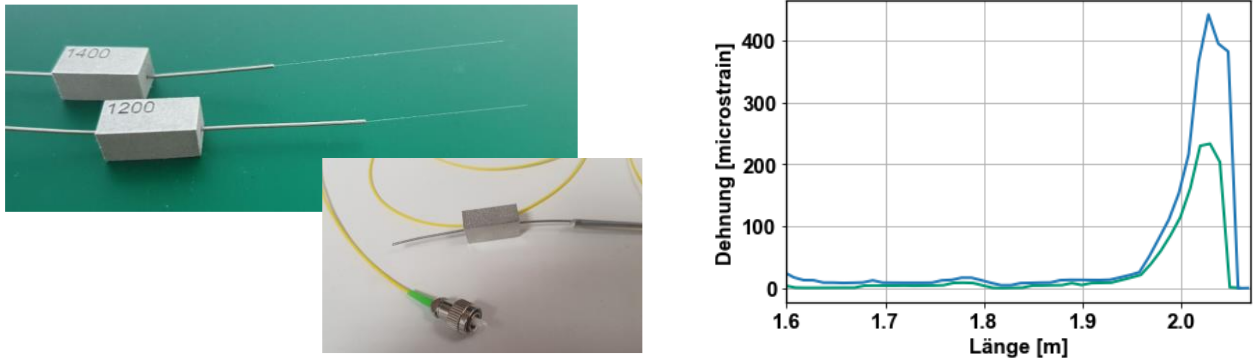


Abbildung 47: Stahlummantelte Fasern in LPBF-Bauteile eingedruckt (links), Besteckerung der Fasern nach dem Druck (mitte), Messung der Dehnung der Fasern durch unterschiedliche Temperaturen (rechts)

Im nächsten Schritt wurden Zugproben (angelehnt an DIN 50125-E3x8x30) mit integrierten optischen Fasern gedruckt. Durch die Länge des Kanals in den Zugproben ist eine zusätzliche Fixierung der Fasern im Bauteil notwendig. Diese ist in Abbildung 48 Abbildung 19 sichtbar, die den pausierten Druckjob unmittelbar vor dem Einlegen der Fasern zeigt (links). Rechts der beendete Druckjob mit den Fasern dargestellt.

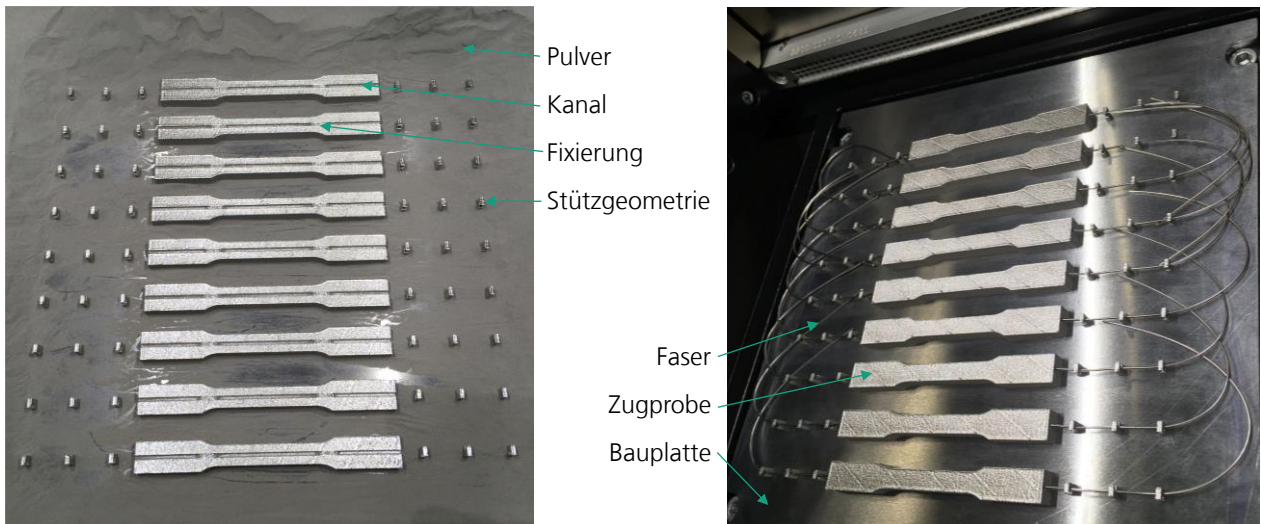


Abbildung 48: Druckjob unmittelbar vor dem Einlegen der Fasern (links), fertiger Druckjob der Zugproben mit integrierten Fasern (rechts)

An die gedruckten Zugproben wurden Stecker angebracht, sodass thermische und mechanische Belastungsuntersuchungen durchgeführt werden konnten. Die Besteckerung erfolgte durch ein Fujikura Splicegerät und den passenden 1 mm Klemmen, um die Stahlummantelung direkt in die Halterung einzuspannen und weitere Brüche der freien Faser zu umgehen. Die Proben wurden auf eine Heizplatte gelegt und das Rückstreuprofil zu unterschiedlichen Zeitpunkten gemessen. Zur Überwachung der Temperatur wurde zusätzlich ein Pt1000 auf der Probe befestigt und parallel ausgelesen. Abbildung 49 zeigt die Zugprobe auf der Heizplatte und die thermisch induzierte Dehnung.

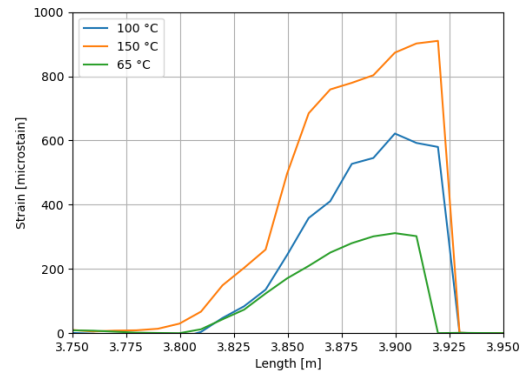


Abbildung 49: Zugprobe mit integrierter Faser auf einer Heizplatte (links), Messung der thermisch induzierten Dehnung der Zugprobe (rechts)

Die Zugprobe wurde in einer Universalzugmaschine ZwickRoell Z250 geprüft. Die optische Faser mit dem OBR-System verbunden. Die Dehnung wurde während des Zugversuchs mit der Zugmaschine zeitgleich mit der Standardkraft ermittelt (Abbildung 50 rechts). Parallel dazu wurden optische Messungen mit dem OBR mit einer Frequenz von 0,5 Hz durchgeführt (Abbildung 50 links). Die Daten weisen eine kontinuierliche Steigerung der Dehnung auf. Aufgrund hoher Verluste am Spleiß tritt mit steigender Belastung ein vermehrtes Rauschen auf, sodass kein genauer Abgleich der Zugmaschinendaten mit den OBR-Daten möglich war. Dies wird in weiterführenden Versuchen im nächsten Berichtszeitraum untersucht werden. Des Weiteren wird die Anbindung der Fasern an das Bauteil untersucht und die Ergebnisse auf komplexere Geometrien übertragen. Des Weiteren werden die Bauteile mit den Fasern Temperaturen entsprechend einer Wärmenachbehandlung von LPBF-Bauteilen ausgesetzt, um zu untersuchen, ob Beschädigungen oder Messabweichungen auftreten.

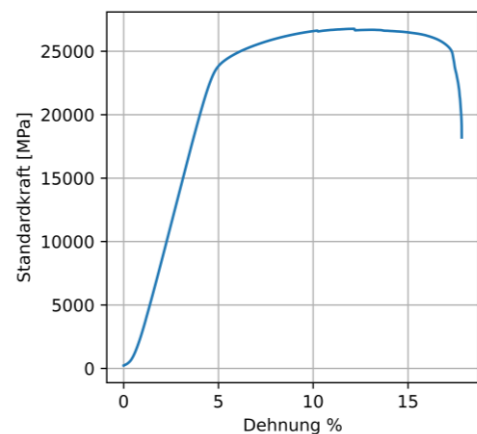
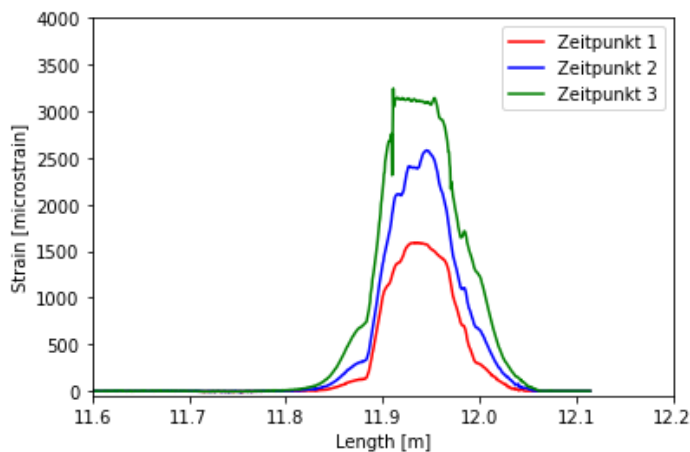


Abbildung 50: Optische Messung der Dehnung mit dem OBR System mit einer Frequenz von 0,5 Hz (links) und Standardkraft in Abhängigkeit der Dehnung der Zugprobe (rechts)

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden ausschließlich metallisch ummantelte Fasern für die nachfolgenden Untersuchungen eingesetzt. Zunächst wurden Zugproben mit einer einfachen Kanalgeometrie mit einer Kanalhöhe und -breite von 1,4 mm erstellt. Druckwerkstoff war der nichtrostende, hochwarmfeste Stahl SS316L (Werkstoffnummer 1.4404). Gedruckt wurde in einer EOS M290 mit den Standardparametern für den Werkstoff. Dieser erzeugt eine Volumenenergie von $57,7 \text{ J/mm}^3$ im InFill. Die Zugproben wurden anschließend durch Sägen von der Bauplatte getrennt, plan abgefräst und in einer ZwickRoell Z250

Universalprüfmaschine geprüft. Die Zugproben wurden mit einem Dehnungsmessstreifen beklebt, um die Messergebnisse zu validieren. Durch die Zugmaschine und den Dehnungsmessstreifen konnte eine Spannungs-Dehnungskurve erstellt werden, die vom Verlauf vergleichbar zu einer konventionell gefertigten Zugprobe ohne integrierte Faser ist. Die faseroptische Messung zeigt ebenfalls die örtlich aufgelöste Dehnung bis zum Riss der Probe (Abbildung 51).

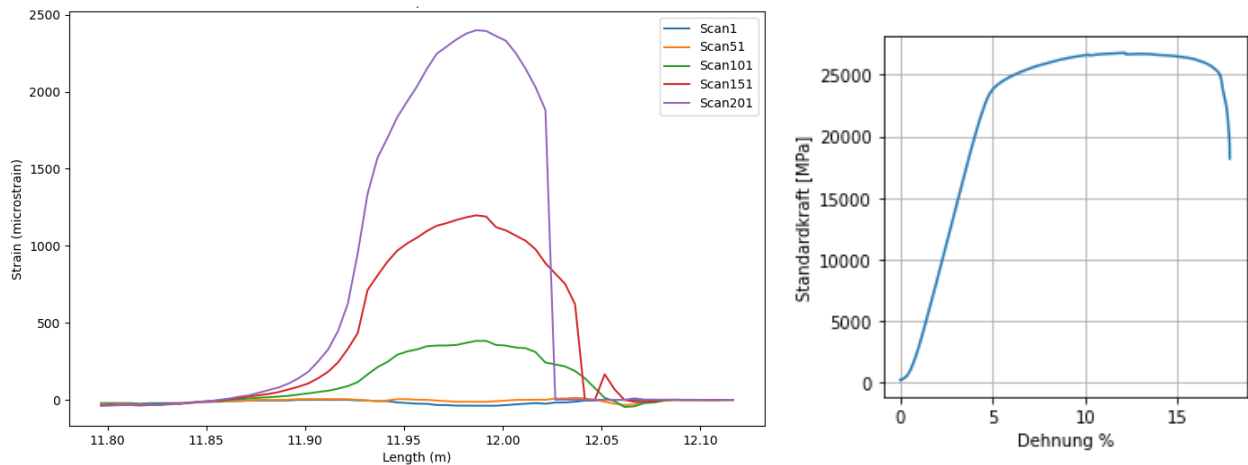


Abbildung 51: Messdaten der optischen Faser (links) und Spannungs-Dehnungsdiagramm (rechts)

Die Anbindung der faseroptischen Sensoren an die umgebende Bauteilgeometrie wurde durch eine metallographische Analyse untersucht. Eine lokale Anbindung der Faser mit der Decklage ist möglich, wie in Abbildung 52 dargestellt. Dabei wird der Rand der Ummantelung in geringem Ausmaß aufgeschmolzen. Sehr häufig findet keine Anbindung der Ummantelung der Faser statt (Abbildung 53). Dann häuft sich das Material in Richtung der Faser an. Unabhängig von der Anbindung konnte in der Anbindungszone Widmanstätten-Gefüge beobachtet werden. Dies ist für den vorliegenden Werkstoff ungewöhnlich. Die Bildung des Widmanstätten-Gefüges kann vermutlich durch ein geändertes Abkühlverhalten durch die Faser und das umgebende lose Pulver erfolgen.

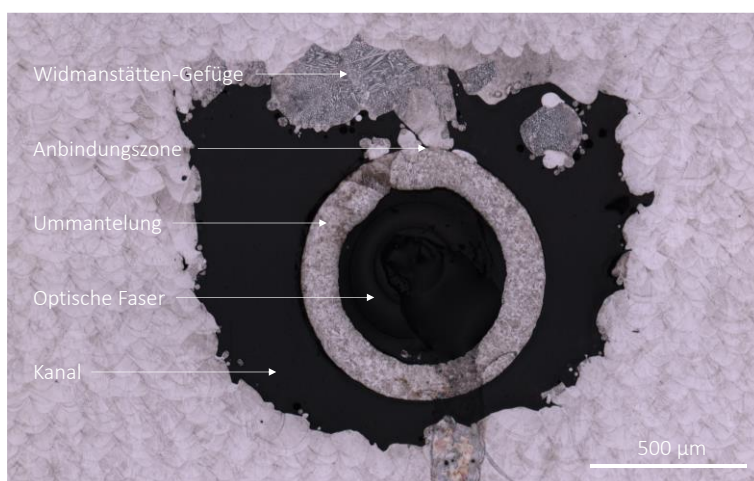


Abbildung 52: Schlichtbild der eingedruckten optischen Faser mit Anbindung der Decklage

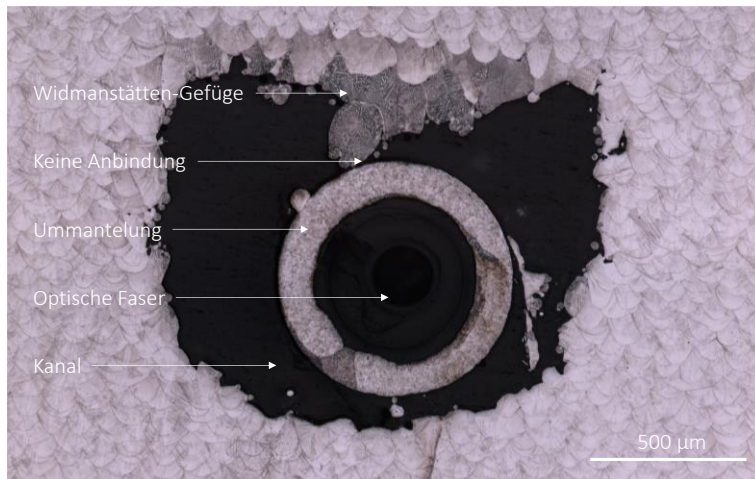
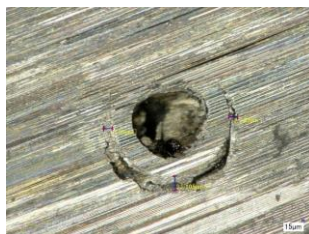
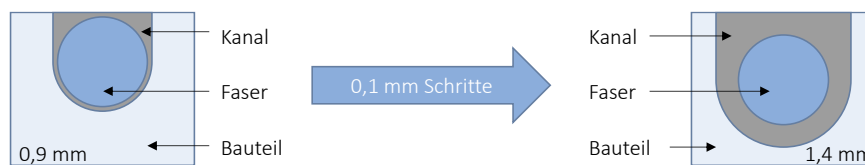


Abbildung 53: Schlibbild der eingedruckten optischen Faser ohne Anbindung an die Decklage

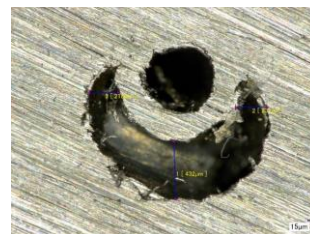
Auf den Schlibbildern kann keine Abweichung im Gefüge durch die Prozessunterbrechung zum Einlegen der faseroptischen Sensoren erkannt werden. Des Weiteren zeigt sich, dass die Kanalgeometrie geändert werden muss, um eine bessere Anbindung zu erreichen. Die Faser liegt in den Fällen, in denen keine Anbindung stattgefunden hat, zu tief im Kanal. Die Kanalbreite und -tiefe wurde daher zwischen 0,9 mm und 1,4 mm in 0,1 mm Schritten variiert (Abbildung 54). Bei einer Kanalgröße von 0,9 mm wurde die Faser beschädigt, da diese nicht mit Pulver überdeckt wurde und der Laser direkt auf die Metallummantelung der Faser strahlt. Bei einer Kanalgröße von 1,0 mm und 1,1 mm findet eine gute Anbindung des Drahtes an die Decklage statt. Der Abstand der Drahtfixierungen muss sehr eng gewählt werden, um ein Aufbäumen der Faser zu verhindern. Durch das Aufbäumen liegt der Draht frei und wird durch die direkte Bestrahlung des Lasers zerstört. Ein Kompromiss zwischen einer guten Anbindung und einem geringen Aufwand der Drahtfixierung ist die Kanalgröße 1,2 mm, die für die weiteren Untersuchungen der Kanalgeometrien genutzt wurde.



Kanalgröße 1,0 mm



Kanalgröße 1,2 mm



Kanalgröße 1,4 mm

Abbildung 54: Untersuchung der Kanalgrößen zur Verbesserung der Faseranbindung

Der Einfluss der Kanalgröße auf die Bauteilfestigkeit wurde durch Zugversuche untersucht. In Abbildung 55 ist die Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Kanalgröße dargestellt. Die Zugfestigkeit der additiv gefertigten Zugproben ohne Kanal für die optische Messfaser liegt mit 688 MPa im Bereich der konventionell hergestellten Proben aus dem Werkstoff SS316L (Werkstoffnummer 1.4404) von 500 – 700 MPa [1]. Mit steigender Kanalgröße sinkt die

Zugfestigkeit erwartungsgemäß. Für die ausgewählte Kanalgröße von 1,2 mm wird eine Zugfestigkeit von 650 MPa. Dies entspricht einer um ca. 5,5% geringeren Zugfestigkeit.

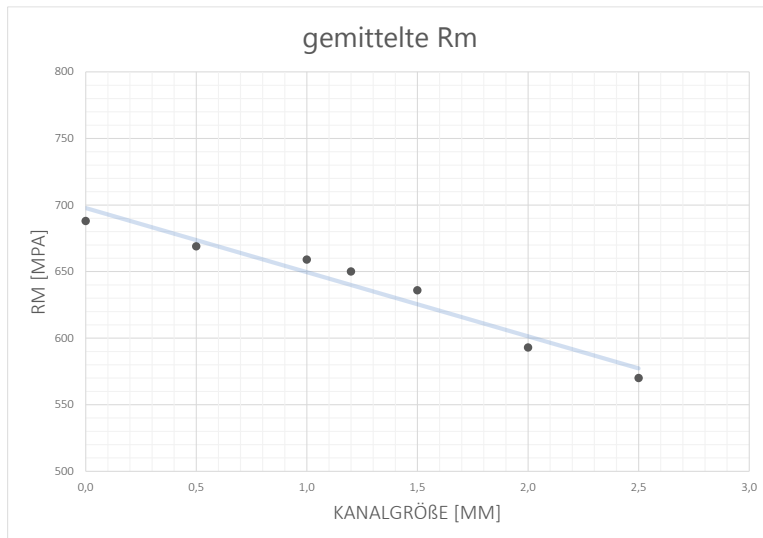


Abbildung 55: Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Kanalgröße

Unterschiedliche Konzepte der Kanalgeometrie bzw. Drahtfixierung für die Kanalgröße 1,2 mm sind in Abbildung 56 dargestellt. In Variante 1 „Feder“ wird ein elastischer Federklemm-Mechanismus gedrückt, in die optische Faser hineingedrückt wird. Dabei wird zunächst der Federarm zur Seite gebogen und springt dann wieder vor. Bei dieser Variante kommt keine Klemmwirkung und damit keine Fixierung in Faserrichtung zustande. Die Fixierung in Aufbaurichtung erfolgt durch den Überhang der Klemmvorrichtung. Die Konstruktion dieser Variante ist sehr aufwändig und der Federklemm-Mechanismus kann einfach abbrechen.

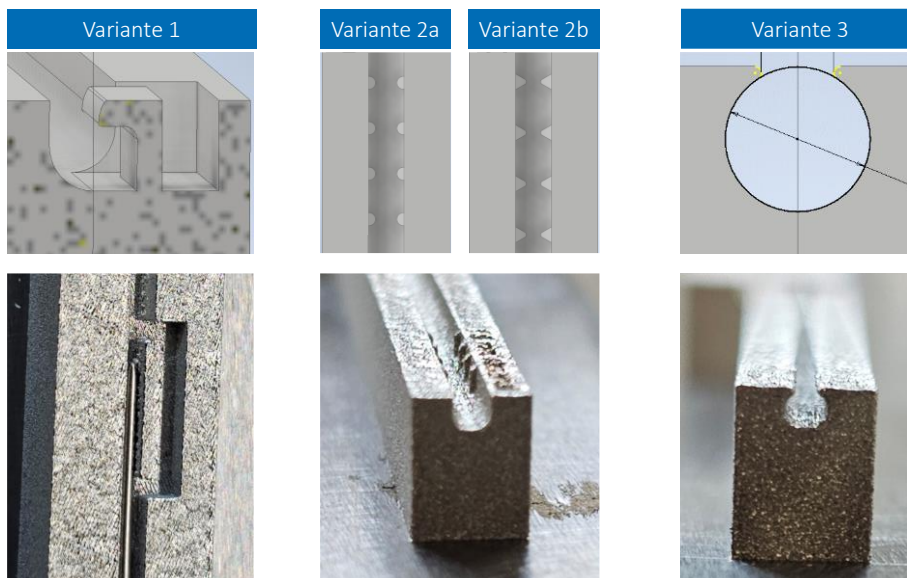


Abbildung 56: Konzepte zur Kanalgeometrie bzw. Drahtfixierung

Variante 2 „Zahn“ nutzt Zähne seitlich im Kanal, in die die optische Faser eingedrückt wird. Dadurch wird ein Formschluss erzeugt, der den Draht fixiert. In Variante 2a sind die Zähne rund geformt, in Variante 2b spitz. Durch die Zähne wird eine sehr gute Fixierung des Drahts in Faser- und Aufbaurichtung erreicht. Der Aufwand zum Einlegen der optischen Faser ist groß, da die Faser mit Kraft in die Zähne gedrückt werden muss.

Variante 3 „Tunnel“ überbaut den oberen Bereich des Kanals, ohne ihn vollständig zu schließen. Die optische Faser kann in den „Tunnel“ geschoben werden. Dadurch ist ein einfaches Einlegen der optischen Faser möglich, solange der „Tunnel“ grade ist. Für Radien ist der „Tunnel“ nur bedingt geeignet. Variante 3 bietet eine gute Fixierung der optischen Faser in Aufbaurichtung und keine Fixierung in Faserrichtung.

Eine Kombination der Drahtfixierung aus den Varianten 2 und 3 bietet sich bei komplexeren Kanalführungen für die optische Faser an. In einem Demonstrationsbauteil für ein Temperierungsmodul in der Laborautomation für Mikrotiterplatten wurde dies gezeigt. Bei diesem Bauteil soll eine Messung der Temperatur möglichst oberflächennah und orts aufgelöst durchgeführt werden. In Abbildung 57 ist der Querschnitt des Bauteils mit dem Kanal für die optische Faser sowie das Realbauteil dargestellt. Variante 2 wird in der Krümmung eingesetzt, Variante 3 in den Graden. Der Abstand zwischen der Verzahnung von Variante 2 zu Variante 3 muss mindestens 20 mm betragen, um ein Einschieben bzw. Einlegen der optischen Faser zu ermöglichen.

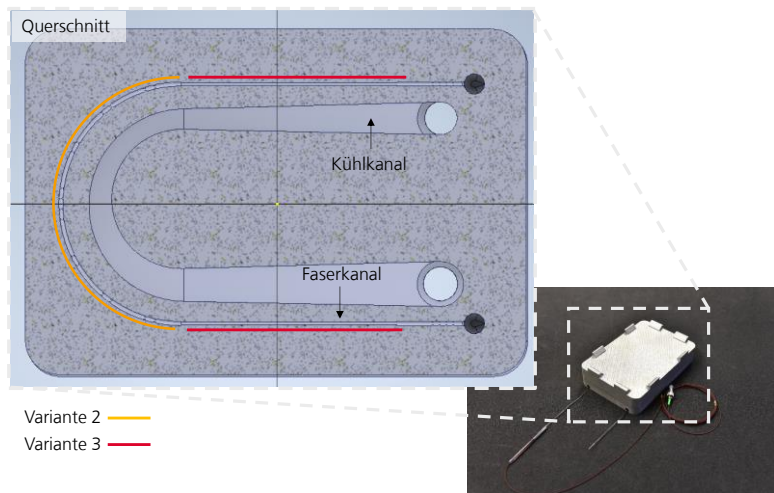


Abbildung 57: Demonstrationsbauteil mit Kanälelementen Variante 2 und 3

Aufbauend auf den Ergebnissen wurde ein Demonstratorbauteil mit komplexerer Faserführung und neuer Einfädelgeometrie entwickelt, um einen Defekt an der Faser zu vermeiden. Im Bauteil wurden drei Schlaufen mit der optischen Faser designed, um einen Großteil der Oberfläche mit der thermischen Messung abzudecken. Dabei wurden die Einfädelgeometrie der optischen Faser mit geringen Biegeradien designed, um ein Brechen der Fasern zu verhindern und eine optimale Signalintensität zu ermöglichen (vgl. Abbildung 58).



Demonstrationsbauteil in der LPBF-Anlage beim Einlegen der optischen Messfaser

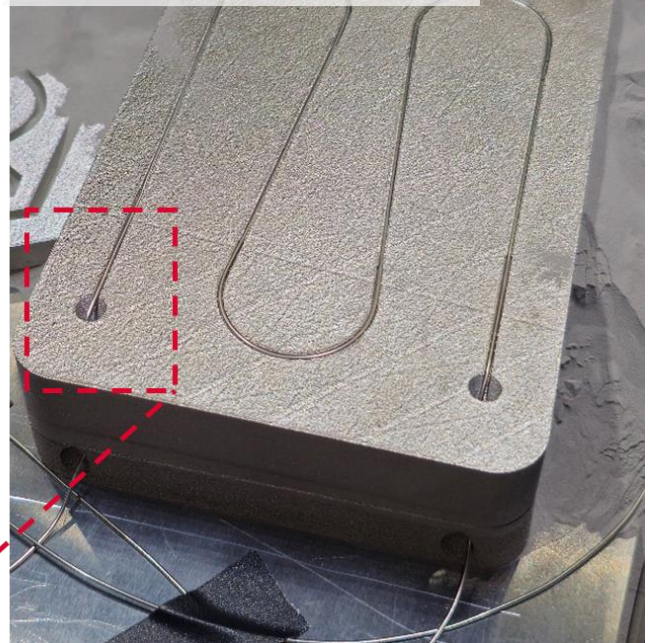


Abbildung 58: Fertigung des Demonstratorbauteils mit komplexer Faserführung. Alte und neue Einfädelgeometrie (links) und verteilung der Faser über die Bauteiloberfläche (rechts).

Im Rahmen der Untersuchung zur Validierung der Verbindung zwischen der optischen Faser und dem Bauteil wurden Zugversuche durchgeführt. Die Zugproben wurden in der Prüfmaschine eingespannt, und die Faser wurde mit einem optischen Messsystem verbunden. Nach einer Referenzmessung, die den ungedehnten Ausgangszustand der Faser festlegte, wurde während des Zugversuchs nach DIN EN ISO 8921 parallel die Dehnung mit der optischen Faser gemessen. Gleichzeitig zeichnete die Zugprüfmaschine die Spannung und Dehnung der Probe auf.

Die erfassten optischen Messdaten wurden anschließend mit den mechanischen Messdaten verglichen. Aufgrund der fehlenden orts aufgelösten Information der Messung der Zugmaschine wurde jeweils die maximale Dehnung der beiden Messsysteme miteinander verglichen.

Die Einzelmessungen repräsentieren die Dehnung über die gesamte Faser in Mikrostrain. Das Maximum der Einzelmessung tritt immer in der Mitte der Zugprobe auf. Um Verzerrungen im Gesamtdatenbild zu vermeiden, werden die Einzelmessungen gefiltert. Die Maxima der gefilterten Messungen werden gespeichert, sodass die Dehnung im Zentrum der Zugprobe für den gesamten Zugtest verfügbar ist. Die Werte der optischen Messung werden dann von Mikrodehnung in prozentuale Dehnung umgewandelt, um sie mit den mechanisch gemessenen Werten zu vergleichen. Abbildung 59 zeigt den Vergleich der optischen mit den Messdaten aus der Zugmaschine für die maximale Dehnung der Probe. Die Auswertung aller Zugproben zeigte, dass insgesamt nur sehr geringe Abweichungen zwischen den maximalen Dehnungen der optischen und mechanischen Messdaten gab. Die Abweichungen lagen zwischen 0,09 % und 1,35 %, was auf eine korrekte Messung mit der optischen Faser hinweist. Daher sind die Fasern in allen Proben gut mit dem Kanal verbunden, und die Kanalgeometrie wird als geeignet und validiert betrachtet.

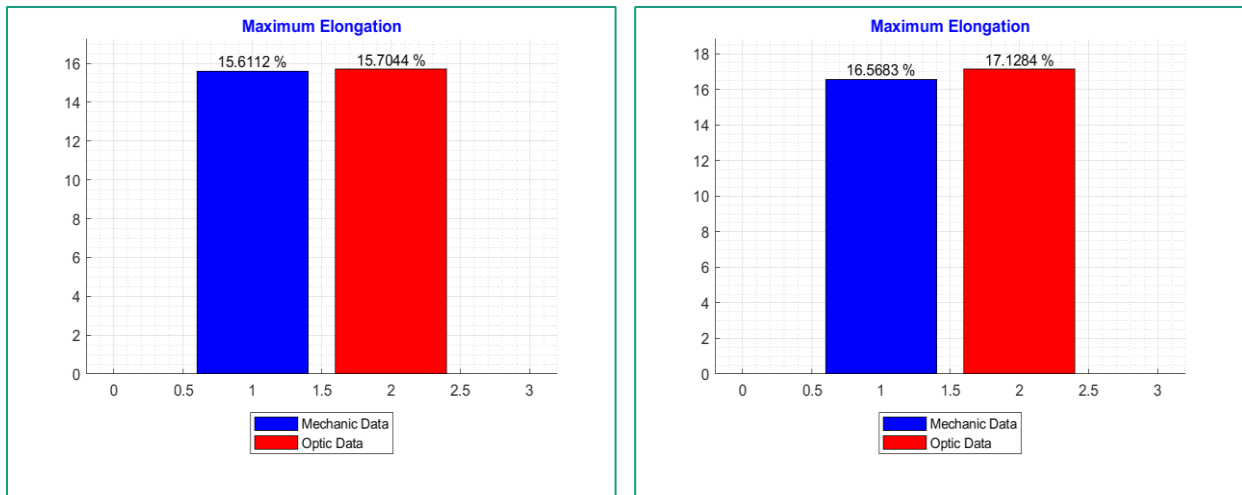


Abbildung 59: Beispielhafte Darstellung der gemessenen maximalen Dehnung mit der Zugmaschine und der optischen Sensorfaser für zwei unterschiedliche Kanalgeometrien.

Neben der Dehnungsübertragung von der Probe auf die Faser wurde außerdem der Einfluss der Kanalbreite auf die Zugfestigkeit in MPa untersucht. Dabei wurden sieben Varianten von Zugproben mithilfe des LPBF-Verfahrens hergestellt: eine Variante ohne Kanal und sechs Varianten mit unterschiedlichen Kanaldurchmessern. Aus jeder Variante wurden drei Proben gefertigt. Nach der Trennung von der Bauplattform und dem Fräsen auf die erforderliche Probenstärke wurden die Proben in der Zugprüfmaschine getestet. Die aufgezeichneten Zugfestigkeiten sind in Abbildung 60 dargestellt.

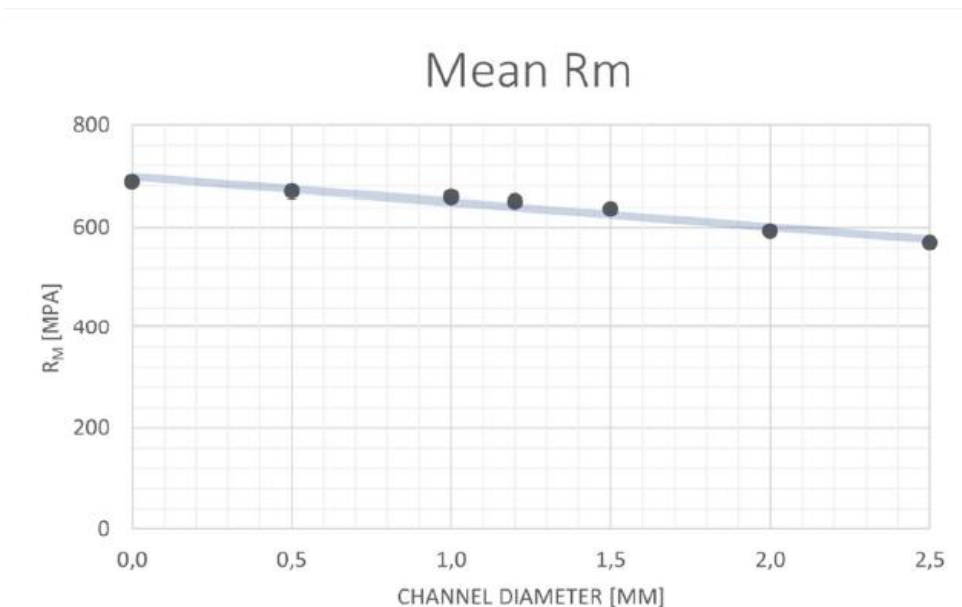


Abbildung 60: Zugfestigkeit für unterschiedliche Kanaldurchmesser.

Basierend auf den Ergebnissen des Vorgänger Berichtzeitraums zeigen die Untersuchungen, dass handelsübliche, hochtemperaturbeständige, polymerbasierte Kleber für Anwendungstemperaturen von 150-300°C ausgelegt sind. Die erforderliche Wärmebehandlung von LPBF-gefertigten Komponenten bei 700-1000 °C führt jedoch zur thermischen Zersetzung der verwendeten Kleber zwischen der Glasfaser und der

Stahlmantelung. Diese Zersetzung wurde im vorliegenden Berichtszeitraum gravimetrisch in zwei Testserien quantifiziert.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurden Anforderungen an einen Kleber abgeleitet, der im LPBF-Prozess eingesetzt werden kann:

- Temperaturbeständigkeit: mindestens 1000 °C
- Materialverträglichkeit: Stahl und Keramiken (Glas)

Es wurde eine Marktanalyse für temperaturbeständige Klebesysteme durchgeführt. Keramische Kleber mit Anwendungstemperaturen über 1000 °C haben sich als potenzielle Lösung erwiesen. Die Kleber "KAGER-Ceramabond 835" und "COTRONICS Resbond 903 HP" wurden in Testserien hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit im Bereich der Faserintegration im LPBF-Druck untersucht. Die Eigenschaften der beiden keramischen Kleber sind:

- Ceramabond 835: Basierend auf Zirkoniumoxid, hitzebeständig bis 1650 °C. Trocknung bei Raumtemperatur innerhalb einer Stunde und Aushärtung bei 100 °C für zwei Stunden.
- Resbond 903 HP: Verwendet Aluminiumoxid, hitzebeständig bis 1790 °C. Trocknung bei 120 °C innerhalb von zwei Stunden und Aushärtung bei 370 °C für vier Stunden.

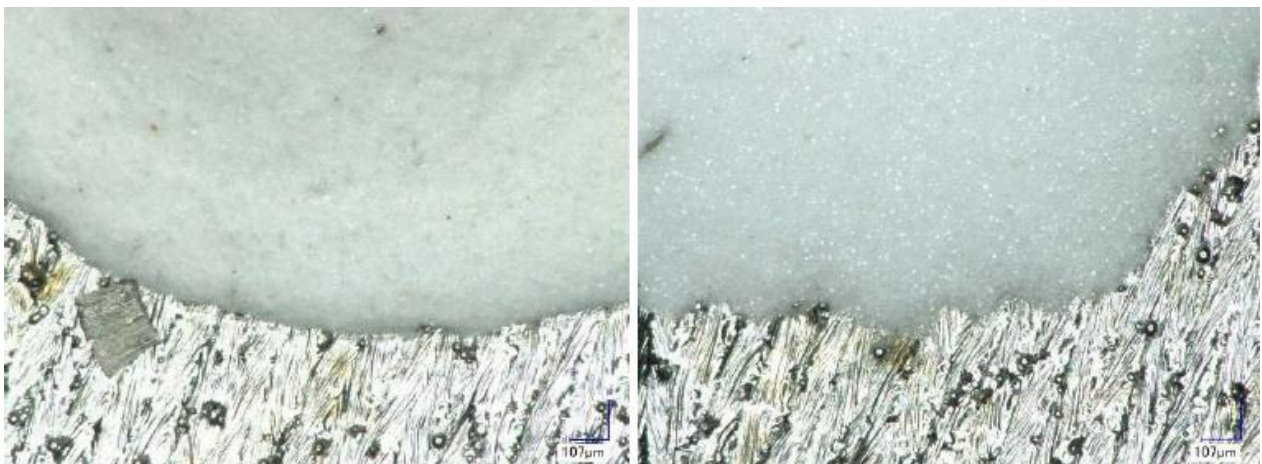


Abbildung 61: Mikroskopische Aufnahme der Klebstoffe bei 200-facher Vergrößerung; Ceramabond 835 (links); Resbond 903 HP rechts).

Abbildung 61 zeigt Mikroskopaufnahmen der beiden Klebstoffe auf dem Metallsubstrat aufgebracht. Erste Untersuchungen der beiden keramischen Kleber Ceramabond und Resbond ergab signifikante Unterschiede in ihrer Leistung. Ceramabond zeigte eine gute Anbindung an die Substrate, wobei keine Lunker in der Klebeschicht erkennbar waren und die Porosität gering blieb. Zudem waren keine Unterschiede in der Klebeschicht zwischen den Proben festzustellen, die fest verbunden waren, und jenen, die bei mittlerer Belastung gelöst werden konnten. Im Gegensatz dazu wies Resbond eine schlechte Anbindung auf, was zu einem Abplatzen von der Oberfläche führte. Darüber hinaus waren große Lunker in der Klebeschicht erkennbar, was auf eine unzureichende Qualität des Klebers hindeutet. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass Ceramabond eine zuverlässige Klebeverbindung bietet, während Resbond in der Haftung und der Qualität der Klebeschicht erhebliche Mängel aufweist.

Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen für die unterschiedlichen Vorbehandlungsschritte der beiden Klebstoffe. Der Ceramabond-Klebstoff zeigt insgesamt gute Ergebnisse, insbesondere bei geschliffenen und unbehandelten Proben. Allerdings versagen 75 % der sandgestrahlten Proben, was auf eine unzureichende Haftung in diesem Fall hinweist. Bei einem Test, der bei 1000 °C durchgeführt wurde, konnten jedoch 75 % der Ceramabond-Proben erfolgreich bestehen, was die hohe Temperaturbeständigkeit des Klebers unter Beweis stellt. Resbond-Klebstoff versagt in allen Tests und wird daher von der 1000 °C-Behandlung ausgeschlossen.

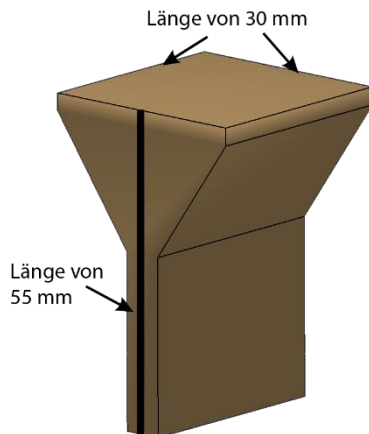


Abbildung 63: Designte Zugproben für die Untersuchung der Adhäsionsfestigkeit.

Nach den erfolgreichen Tests kleinerer Proben wurden größere Proben zur Messung der Adhäsionsfestigkeit entworfen, die die zuvor entworfenen verschiedenen Geometrien aufwiesen: Abstandshalter und Becken. Das Probendesign ist dabei für die Untersuchung in Zugversuchen entworfen worden (vgl. Abbildung 63: Designte Zugproben für die Untersuchung der Adhäsionsfestigkeit.). Bei einer Temperaturbelastung von 1000 °C versagten die Adhäsionsschichten, und die Proben trennten sich. Trotz der Anwendung des reproduzierten Verfahrens der kleinen Proben kam es erneut zu einem Versagen. Mögliche Ursachen hierfür könnten eine Alterung des Klebstoffs, unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten der Materialien sowie potenzielle Fehler im Ofen sein. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass weitere Untersuchungen erforderlich sind, um die Ursachen für das Versagen der Adhäsionsschichten zu identifizieren und zu beheben.

Neben den Untersuchungen zur Temperaturbeständigkeit des Klebers wurden außerdem die Glasfaserbeschichtungen thermischen Versuchen unterzogen, um eine geeignete Faser für weitere Versuche auszusuchen. Dabei wurden Gold-, Aluminium- und Carbonfaserummantelungen einer Temperaturbelastung von 1000°C ausgesetzt. Während Gold bei 1064 °C schmolz, wies Aluminium nur geringe Veränderungen auf. Die Carbonummantelung hielt teilweise der Hitze stand. Die Glasfaser selbst bleibt in der Hitze unbeschädigt (vgl. Abbildung 64).

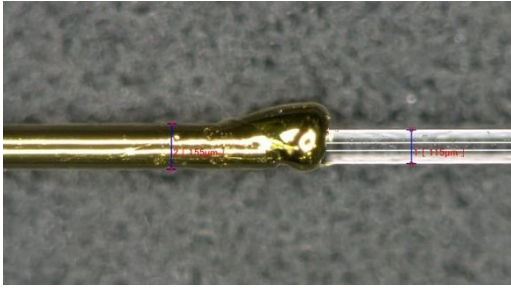


Abbildung 64: Verhalten der Goldummantelung nach 1000 °C.

Dennoch ergab die Gesamtbewertung, dass keine der untersuchten Ummantelungen für eine Belastung bei 1000 °C geeignet ist. Diese Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit, alternative Beschichtungen oder Strategien zu finden, die höheren Temperaturen standhalten können. Eine Möglichkeit ist die Verwendung von ungeschützten Glasfasern, die direkt mit dem keramischen Klebstoff am Bauteil verklebt werden und somit kein zusätzliches Material der Temperatur ausgesetzt ist.



Abbildung 65: Test-Geometrien zur Glasfaseranalyse; Radien-Test (links) Kanal-Durchmesser-Test (rechts).

Zur Untersuchung des Verhaltens ungeschützter Glasfasern ohne Ummantelung wurden zwei Testkörper entwickelt. Ziel war dabei die Untersuchung von möglichen minimalen Biegeradien der blanken Faser und die Handhabung unterschiedlicher Kanaldurchmesser (vgl. Abbildung 65). Die Ergebnisse zeigten, dass Glasfasern Radien ab 15 mm ohne Bruch überwinden können, jedoch bei kleineren Radien Schwierigkeiten auftreten. Zudem stellte sich heraus, dass die Applikation von Klebstoff in kleinere Kanäle problematisch ist. Diese Erkenntnisse weisen darauf hin, dass bei der Gestaltung von Kanälen für die Integration von Glasfasern besondere Vorsicht geboten ist, um Brüche und Schwierigkeiten bei der Klebstoffanwendung zu vermeiden.

Die Zusammenfassung der Ergebnisse umfasst sowohl die Untersuchung der optischen Messfaser als auch die Analyse des Klebstoffs. Bei der optischen Messfaser wurde ein Demonstrator mit komplexerer Geometrie aufgebaut, jedoch kam es trotz eines vergrößerten

Einfädelsbereich zu Beschädigungen der Faser in diesem Bereich. Bei den durchgeführten Zugversuchen zeigten sich nur geringe Abweichungen der Messwerte für die Dehnung.

Im Rahmen der Untersuchung des Klebstoffs wurden zwei Hochtemperaturklebstoffe analysiert. Ceramabond 835 hielt der Belastung bis 1000 °C während der ersten Untersuchung stand. Bei weiteren Tests versagte die Klebeverbindung. Es wurde festgestellt, dass der Einsatz des Klebstoffs ohne Vorbehandlung der Bauteiloberfläche möglich ist. Allerdings hielt keine der getesteten Beschichtungen der optischen Messfaser einer thermischen Belastung von 1000 °C stand. Das Einkleben der optischen Faser in Radien von bis zu 15 mm war möglich. Diese Ergebnisse verdeutlichen sowohl die Herausforderungen als auch die Möglichkeiten bei der Integration von optischen Messfasern und Hochtemperaturklebstoffen in komplexe, 3D-gedruckte Geometrien.

Bei den weiteren Arbeiten lag der Schwerpunkt auf der Untersuchung von Hochtemperaturklebstoffen für die Integration faseroptischer Sensorik in LPBF-Bauteile sowie auf ersten Versuchen zum Überdrucken verklebter Sensoren in der LPBF-Anlage. Die Arbeiten umfassten insbesondere die Wiederholung der Untersuchungen zu Ceramabond 835 mit neuem Klebstoff und variiertem Klebespalt, das Überdrucken des Klebstoffs im LPBF-Prozess sowie vorbereitende Schritte zur späteren Integration der optischen Messfaser in einen Demonstrator.

Zu Beginn der Untersuchungen wurden drei potenziell geeignete Hochtemperaturklebstoffe für Anwendungen oberhalb von 1000 °C ausgewählt (Ultra-Temp 516, Ceramabond 835 und Ceramabond 835 M) und hinsichtlich ihrer prozessrelevanten Randbedingungen (Trocknung und Aushärtung) gegenübergestellt. Die folgende Tabelle 2 fasst die wichtigsten Parameter der Klebstoffe zusammen.

Tabelle 2: Untersuchte Klebstoffe

Klebstoffe	Ultra-Temp 516	Ceramabond 835		Ceramabond 835 M
Basis	Zirkonoxid	Zirkonoxid		Aluminiumoxid
Maximal Temperatur	1760°C	1650°C		1650°C
Genereller Gebrauch	Thermoelement	Halogenlampe		Quarz-Halogenlampe
Trocknungstemperatur	Raumtemperatur	Raumtemperatur		Raumtemperatur
Trocknungszeit	1-4h	1h	24h	2h (1-4h)
Aushärtungstemperatur	100°C, 260°C, 370°C (200°F, 500°F, 700°F)	100°C (200°F)	-	100°C (200°F)
Aushärtungszeit	Jeweils 2h	2h	-	2h

Angaben ohne Klammern vom Lieferanten Kager, in Klammern Lieferant Aremco

Nach der Trocknung der Klebstoffe erfolgte die Prozessierung des Klebstoffs nach Herstellerangaben sowie die Verklebung von LPBF-Bauteilen aus 316L mit und ohne definierten Klebespalt (0,2 mm). Nach dem Aushärten hielten alle getesteten Klebungen der

LPBF-Bauteile. Nach einer anschließenden Erwärmung auf 1000 °C versagte jedoch in allen betrachteten Fällen die Verbindung. Ein signifikanter Einfluss des Klebspalts auf das Ergebnis konnte in dieser Testreihe nicht festgestellt werden. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Ergebnisse der Testreihe B

Testreihe	B1	B2	B3	B4
Abstand	ja	ja	nein	ja
Im Ofen beim aufheizen	nein	nein	nein	ja
Trocknen / Härten	trocknen	Trocknen härten	und Trocknen härten	und Trocknen härten
Hält nach Aushärtung	5/5	5/5	5/5	5/5
Hält nach 1000 °C	Kurzzeitiges anheben	Kurzzeitiges anheben	Kurzzeitiges anheben	Kurzzeitiges anheben
Bild				
Zustand nach	1000 °C	1000 °C	1000 °C	1000 °C

Zur weiteren Einordnung der Versagensmechanismen wurde die Klebstoffschicht (am Beispiel Ceramabond 835) auf Stahlblechen untersucht. Nach dem Auftragen und Trocknen entsprechend den Herstellerangaben sowie nach Erwärmung auf 1000 °C zeigte sich eine Zerstörung bzw. Ablösung der Klebstoffschicht. Abbildung 66 zeigt den Ceramabond 835 Klebstoff bei Raumtemperatur, 95°C und 1000°C.

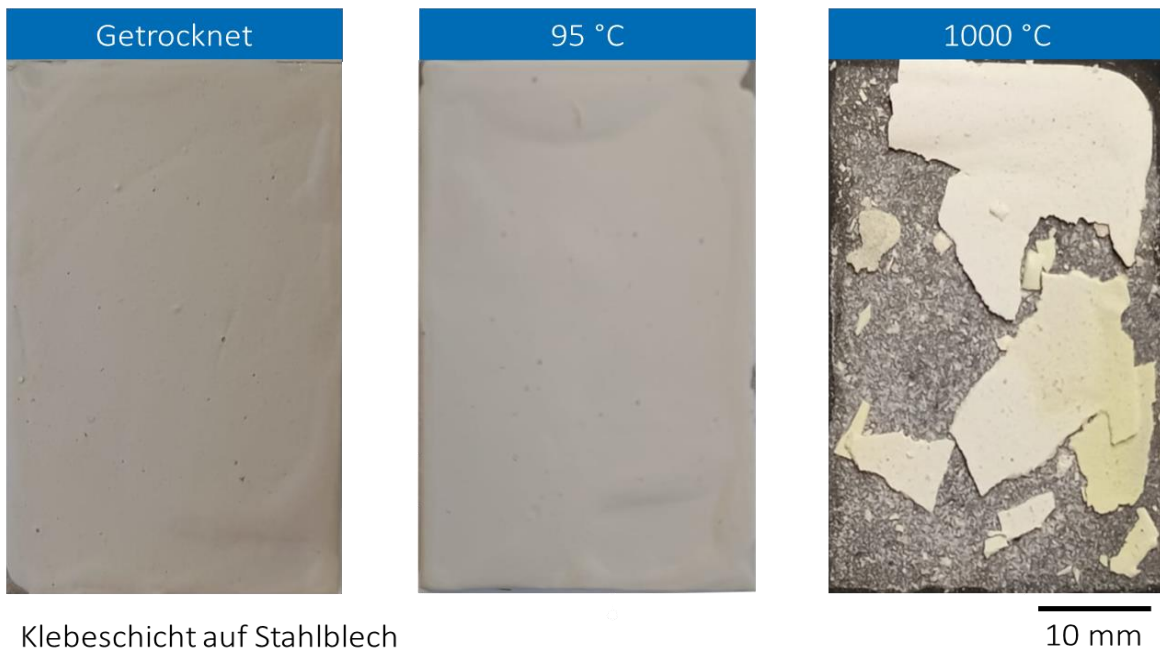


Abbildung 66: Darstellung des aufgetragenen Ceramabond 835 auf Stahlblechen für unterschiedliche thermische Belastungsszenarien.

In ergänzenden Untersuchungen der Anbindungszone zwischen Klebstoff und Substrat bei 300 °C, 350 °C und 400 °C wurde eine deutliche Ablösung des Klebstoffs in der Grenzfläche ab etwa 350 °C beobachtet. Gleichzeitig wurden im Klebstoff selbst keine ausgeprägten Schädigungen (z. B. Rissbildung) beschrieben. Diese Beobachtungen deuten darauf hin, dass das Versagen primär in der Anbindungszone zum Substrat auftritt und weniger in einer inneren Schädigung des Klebstoffvolumens begründet ist. Abbildung 67 zeigt Mikroskopbilder der Anbindungszone für unterschiedliche Temperaturen.

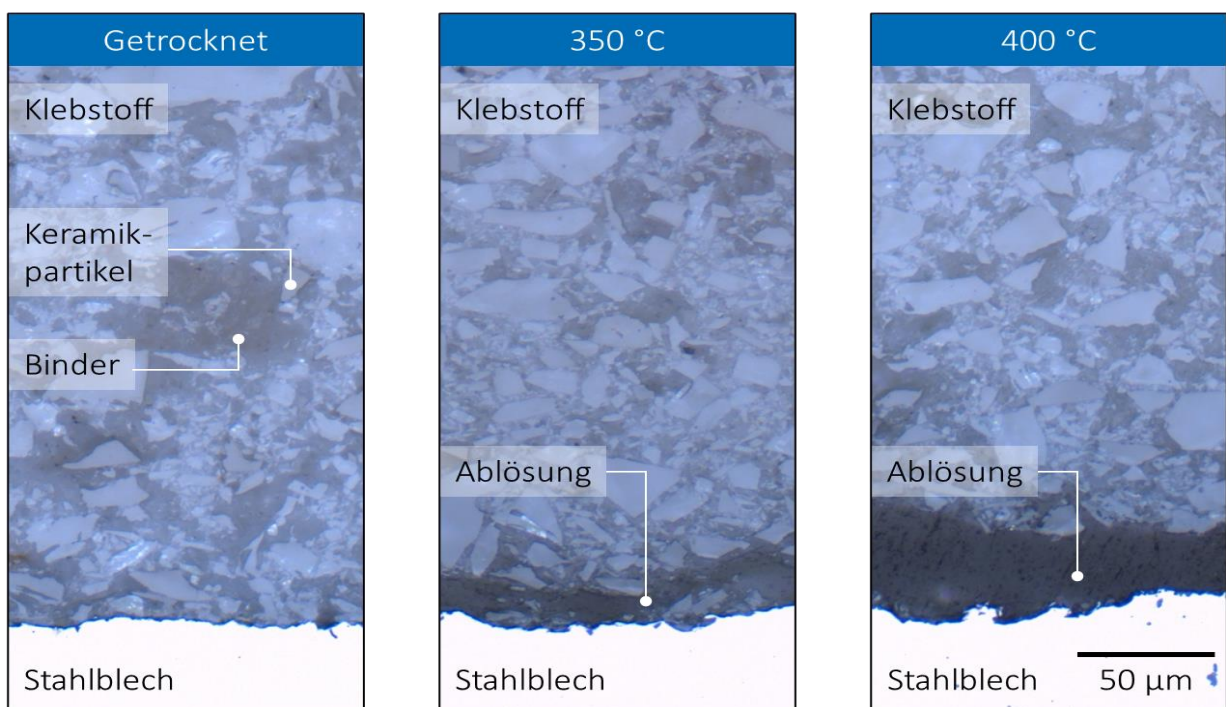


Abbildung 67: Mikroskopbilder der Anbindungszone zwischen Klebstoff und Substrat für unterschiedliche thermische Belastungsszenarien.

Als mögliche Ursache für die beobachtete Ablösung wurde die Differenz der Wärmeausdehnungskoeffizienten zwischen Klebstoff und 316L-Substrat untersucht. Für die betrachteten betrachteten Klebstoffe liegt der Wärmeausdehnungskoeffizient bei $7,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ und für gedrucktes 316L bei $15,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Aufbauend darauf wurden alternative Grundwerkstoffe mit näherliegenden Wärmeausdehnungskoeffizienten eingesetzt (Glas, Titan und Siliziumnitrid). Für diese Proben waren Erwärmungen auf 700 °C (Glas) bzw. bis 1000 °C (Titan und Siliziumnitrid) ohne Zerstörung der Klebeverbindung möglich. Die Ergebnisse sprechen dafür, dass die Anpassung des Wärmeausdehnungsverhaltens zwischen Klebstoff und Grundwerkstoff einen wesentlichen Einfluss auf die Stabilität der Verbindung hat.

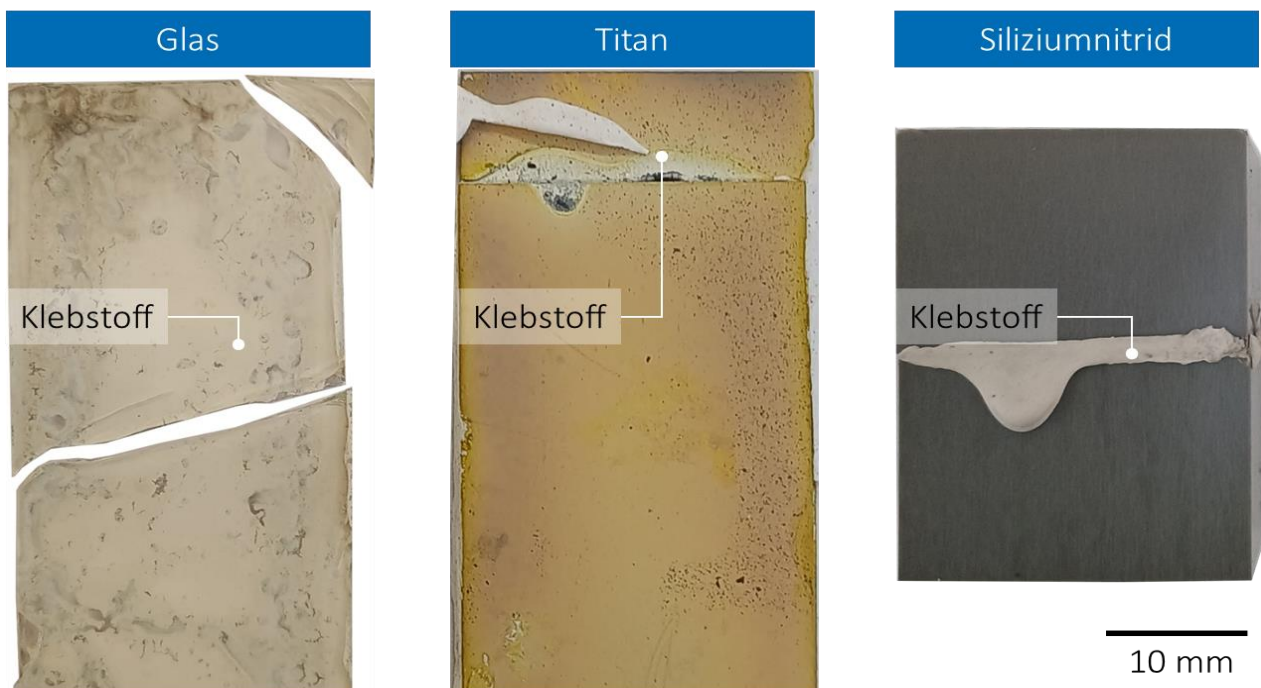


Abbildung 68: Abbildung unterschiedlicher Grundwerkstoffe mit aufgetragenem Klebstoff.

Im Rahmen der Prozessintegration wurde außerdem das Überdrucken verklebter faseroptischer Sensoren in der LPBF-Anlage erprobt. Hierzu wurde der LPBF-Druck vor dem Schließen der Kanäle unterbrochen, die Sensoren eingelegt und mithilfe einer Spritze verklebt; anschließend wurde der Bereich überdruckt. Nach den gezeigten Ergebnissen führte dieser Ablauf zu keiner erkennbaren Beeinträchtigung des LPBF-Drucks und zu keinen auffälligen Spuren am Bauteil. Gleichzeitig wurde eine teilweise Beschädigung der faseroptischen Sensoren beobachtet. Einzelne Sensoren blieben funktionsfähig. Damit konnte die prinzipielle prozesseitige Umsetzbarkeit des Überdruckens gezeigt werden, während die sensorische Robustheit unter den gewählten Bedingungen noch eingeschränkt erscheint. Die eingeklebten Fasern sind in Abbildung 69 dargestellt.

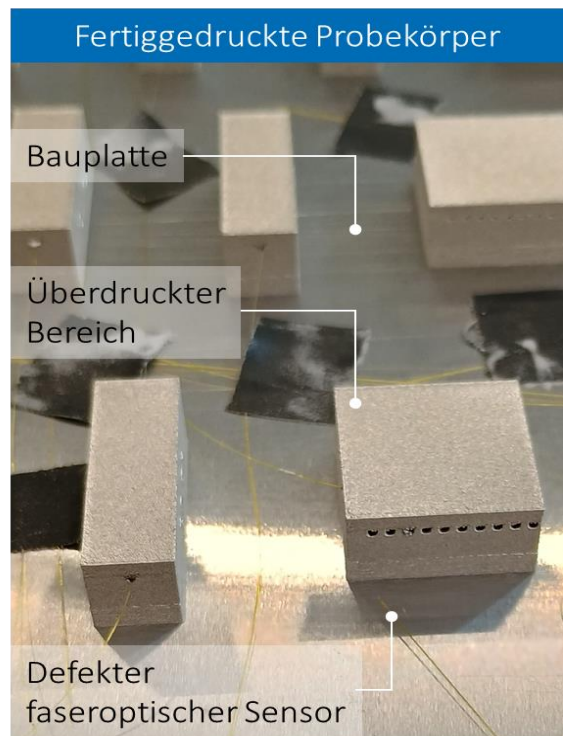
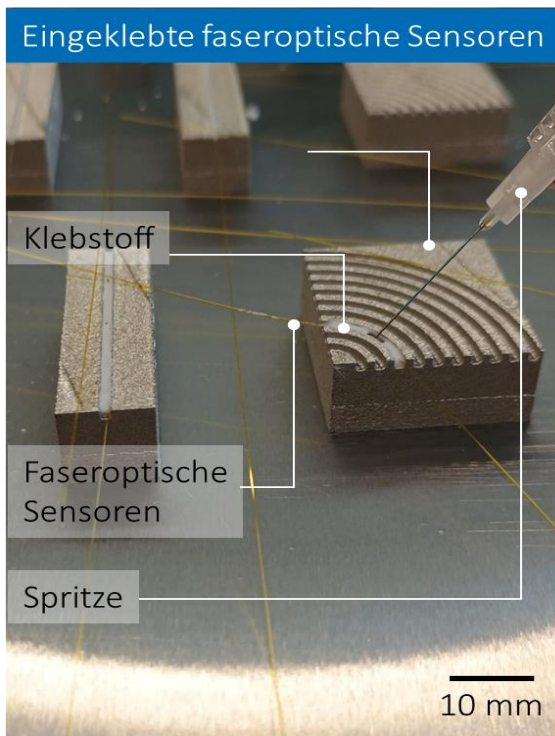


Abbildung 69: Aufnahme der eingeklebten Glasfasern während und nach dem Prozess.

5 Ergänzende Informationen

Die im Berichtszeitraum angefallenen Ausgaben für das Teilvorhaben beliefen sich von 2020 bis einschließlich 2025 unter der Kostenstelle 0837 (Personalkosten) auf insgesamt 1.265.870,16 €. Damit wurde der wesentliche Kostenblock entsprechend dem bewilligten Finanzierungsplan für wissenschaftliches und technisches Personal eingesetzt. Eine Überschreitung der bewilligten Mittel fand nicht statt. Die Mittelverwendung ist im zahlenmäßigen Nachweis detailliert dokumentiert und belegt die wirtschaftliche und sparsame Durchführung des Vorhabens.

Sprintteam 1

Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten ergibt sich aus der aktuellen Lücke zwischen industriellen Anforderungen an hochproduktive, robuste PBF-LB/M-Prozesse und dem Stand der Technik in Forschung und Entwicklung. Während in der Industrie überwiegend mit gaußförmigen Standardstrahlprofilen und vergleichsweise konservativen Prozessparametern gearbeitet wird, besteht ein hoher Bedarf an skalierbaren Strategien zur Produktivitätssteigerung bei gleichzeitig hoher Bauteilqualität. Die im Projekt verfolgten Arbeiten zur systematischen Bewertung alternativer Strahlformen (Ringförmige LDV, Dual-Gauß-Array), zur Entwicklung und Validierung eines inversen Wärmeleitungsmodells sowie zur quantitativen Spritzerdiagnostik schließen diese Lücke gezielt. Sie stellen eine notwendige vorwettbewerbliche Vorarbeit dar, um künftige industriennahe Anwendungen überhaupt realisierbar zu machen. Angesichts der hohen Komplexität der Prozessphysik und des großen Parameterraums sind der Umfang der experimentellen Untersuchungen, der Aufbau der Simulations- und Auswertetools sowie die eingesetzten Personalressourcen als angemessen zu bewerten.

Die im Projekt erzielten Ergebnisse werden sowohl wirtschaftlich als auch wissenschaftlich verwertet. Im Mittelpunkt steht der Transfer der gewonnenen Erkenntnisse in industriennahe

Kundenprojekte sowie die Nutzung der entwickelten Methoden als Grundlage für weiterführende Forschungs- und Infrastrukturvorhaben.

Aufbauend auf den Projektergebnissen wurde am Fraunhofer ILT gemeinsam mit Industriepartnern weitere Forschungsarbeiten initiiert, in der der Einfluss kommerziell verfügbarer nicht-gaußförmiger LDV auf Produktivität und Prozessrobustheit untersucht wird; sie dient als zentraler Transferbaustein zur Überführung der Ergebnisse auf marktgängige Laserstrahlquellen und Anlagenplattformen. Die entwickelten Methoden (parametrisierte Strahlmodelle, thermophysikalische Simulationen, inverses Wärmeleitungsmodell, quantitative Spritzerdiagnostik) bilden eine Grundlage für weiterführende Verbundprojekte und den Ausbau von Prozessdatenbasen. Als nächster Schritt ist ein flexibler Strahlformungsdemonstrator mit adaptiven Optiken geplant, um simulativ entworfene Strahlformen experimentell zu validieren und anwendungsspezifische Profile (z. B. für rissanfällige Superlegierungen oder hochproduktive Prozesse) zu entwickeln. Damit erfolgt der Übergang zu einer systematischen, simulationsgestützten Strahlformung und zur Vorbereitung neuer optischer Module und Engineering-Dienstleistungen mit höherem Reifegrad.

Während der Projektdurchführung wurden am Fraunhofer ILT kontinuierlich Aktivitäten anderer Akteure im Themenfeld beobachtet. Im gleichen Zeitraum wurden insbesondere an der Technischen Universität München Untersuchungen zur komplexen Strahlformung im PBF-LB/M durchgeführt, die sich u. a. mit der gezielten Beeinflussung der Schmelzbadgeometrie beschäftigt. Dabei lag ein Schwerpunkt auf der Analyse und Anwendung alternativer LDV um die Energieeinbringung gezielt zu steuern. Die Arbeiten zeigen, dass durch angepasste LDV homogenere Temperaturfelder erzielt, die Spritzerbildung reduziert und die Prozessstabilität erhöht werden können.

Diese Arbeiten bestätigen die hohe Relevanz von Strahlformung für die Weiterentwicklung von PBF-LB/M und unterstreichen die Aktualität der im vorliegenden Vorhaben verfolgten Ansätze.

Während der Projektlaufzeit wurden vom Sprintteam 1 zu den bearbeiteten Themen folgende Veröffentlichungen erarbeitet. Die Ergebnisse wurden jeweils im Rahmen von Konferenzbeiträgen vorgestellt.

Die Ergebnisse zur Steigerung der Aufbauraten durch die Anwendung defokussierter gaußförmiger und ringförmiger LDV wurden 2022 auf der Photonics West präsentiert: Evaluation of productivity scaling approaches for laser powder bed fusion of nickel-base alloy 625

<https://doi.org/10.1117/12.2611151>

Die Analyse der Spritzerdynamik und ihres Zusammenhangs mit der Bauteilqualität wurde 2024 auf der 13th CIRP Conference on Photonic Technologies in Fürth vorgestellt: Quantitative analysis of spatter formation in Laser Powder Bed Fusion: unraveling the impact of beam shaping and multi-beam processing

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.08.136>

Die Charakterisierung realer ringförmiger LDV wurde 2025 auf der Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference in Berlin vorgestellt: Characterization of ring beam profiles for high-power lasers used in laser additive manufacturing

<https://publica.fraunhofer.de/bitstreams/d0350060-1935-4f03-ba1c-70d82bbe137b/download>

Der Verwertungsplan der Sprints (10, 12, 14, 18) wird fortgeschrieben. Schutzrechtsanmeldungen wurden im Berichtszeitraum in keinem Sprint vorgenommen; die erzielten Ergebnisse fließen jedoch in das institutsinterne Know-how sowie in Folgeprojekte ein. Wirtschaftlich bestehen nach Projektende von Sprint 10 gute Erfolgsaussichten im Bereich der energieeffizienten Batteriefertigung und anderen Schichttrocknungsprozesse, wie z. B. die Tintentrocknung in der Druckindustrie. Die funktionalen Vorteile gegenüber konventionellen Ofenlösungen liegen insbesondere in der kompakten Bauweise, der Reduktion des Energiebedarfs sowie der verbesserten Prozessdynamik. Ein Zeithorizont für eine industrielle Demonstration im Pilotmaßstab wird auf 2–3 Jahre geschätzt, abhängig von der Hochskalierung der Laserleistung und der Integration in bestehende Produktionslinien. Eine Weiterführung der Arbeit ist im Rahmen öffentlich geförderter Folgeprojekte vorgesehen. Die Anschlussfähigkeit ist gegeben, insbesondere hinsichtlich Hochskalierung des VCSEL-Moduls, Validierung der elektrochemischen Performance lasertrockener Elektroden und Implementierung geschlossener Regelkreise.

Die Arbeiten in Sprint 12 haben eine belastbare wissenschaftlich-technische Grundlage für die weitere Entwicklung hochauflösender optischer Sensorsysteme zur Prozessüberwachung und Bauteilcharakterisierung in der photonischen Produktion geschaffen. Nach Abschluss des Forschungscampus DPP werden besonders die neuartigen OCT-Verfahren weiterverfolgt. Dafür sollen bilaterale Industrieprojekte eingeworben werden und sich auf öffentlich geförderte Ausschreibungen beworben werden.

Für Sprint 14 basieren die entwickelten Softwarekomponenten auf Open-Source-Technologien wie Kubernetes, Robot Operating System 2 und OpenCV. Das generierte Know-how bezüglich der Systemarchitektur, der Integrationskonzepte und der Prozessparameter wurde intern dokumentiert und steht für die weitere Verwertung zur Verfügung. Hinsichtlich der Verwertungsmöglichkeiten besteht Potenzial für eine Integration der Ergebnisse in bestehende Produkte und Dienstleistungen des Fraunhofer IPT. Die entwickelte modulare Microservice-Architektur ermöglicht eine hohe Flexibilität bei der Anpassung an unterschiedliche Anwendungsfälle, wie es dieser Sprint für die Fertigungsdomäne demonstriert hat. Gerade Fertigungsanlagen, die viele heterogene Soft- und Hardwarekomponenten beinhalten, können von solchen Architekturen profitieren. Daneben sichert die im Projekt entwickelte prozedurale Strukturbeschreibung die Skalierbarkeit auf verschiedene Oberflächengrößen ohne die bei konventionellen Verfahren auftretenden Datenengpässe. Daher setzt die Umsetzungs- und Transferstrategie zum einen die Weiterentwicklung der Ergebnisse in weiteren Forschungsprojekten vor, um die Methoden robuster und industrie-orientierter bis hin zur marktfähigen Lösung weiterzuentwickeln. Ein am Fraunhofer IPT entwickeltes System namens »FCTRY CLD« wird für Demonstrationen, cloud-orientierte Steuerungen sowie zur Projektgewinnung genutzt und demonstriert unter anderem den effektiven Einsatz von Microservice-Architekturen innerhalb der Fertigungstechnik. In einem zweiten Schritt sollen weitere Projekte durchgeführt werden, um die Praxistauglichkeit unter realen Produktionsbedingungen zu validieren. Langfristig ist eine Integration der Technologien in das bestehende Angebotsportfolio des Fraunhofer IPT vorgesehen.

Für Sprint 18 liegt der Fokus auf der Akquise neuer Forschungsprojekte und der direkten Vermarktung in bilateralen Projekten mit Industriepartnern. Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten nach Projektende sind positiv, da innovative Lösungen für verschiedene Anwendergruppen in Deutschland entwickelt werden können, insbesondere im Bereich der Prozessüberwachung und -optimierung. Die wissenschaftlichen und technischen Erfolgsaussichten sind ebenfalls vielversprechend. Die geplanten Ergebnisse könnten in

öffentlichen Aufgaben, Datenbanken und Netzwerken genutzt werden. Eine mögliche Zusammenarbeit mit anderen Forschungsstellen und Unternehmen wird angestrebt, um das Potenzial der Ergebnisse weiter zu erhöhen.

Im Rahmen des Forschungscampus DPP ist eine wissenschaftliche Veröffentlichung auf der „*Laser in Manufacturing (LiM) Conference 2025*“ in München erfolgt als Paper und Präsentation unter dem Titel „Modeling and analysis of laser drying processes for wet-coated battery electrodes“. (Link: https://www.wlt.de/sites/default/files/LiM2025_Proceedings/137_Chen.pdf). Eine weitere wissenschaftliche Veröffentlichung ist nach Projektende geplant, um die entwickelten Methoden und Ergebnisse der Fachleserschaft zugänglich zu machen.

Die Ergebnisse des Projekts wurden auf der AM-Forum 2023 in Berlin, auf der FormNext 2023 in Frankfurt am Main und auf der Hannovermesse 2024 mit potenziellen Industriepartnern diskutiert.

Innerhalb des Projekts wurden sieben studentische Abschlussarbeiten und eine Projektarbeit betreut, wodurch ein Beitrag zur akademischen Ausbildung im Bereich der Fertigungstechnik, Robotik und Informatik geleistet wurde. Einige Resultate des Projekts sind in eine laufende Dissertation eingeflossen und werden dort im wissenschaftlichen Kontext weiter vertieft. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in Lehrveranstaltungen der RWTH Aachen mit ein und dienen der Ausbildung des ingenieurwissenschaftlichen Nachwuchses.

Die Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung wurde überwacht, und es gab keine signifikanten Abweichungen. Anpassungen ergaben sich durch das Ausscheiden eines Industriepartners; die Aufgaben wurden durch das Fraunhofer IPT übernommen und erfolgreich abgeschlossen. Insgesamt sind die Projektziele erreicht worden und bilden eine belastbare Grundlage für die weitere industrielle und wissenschaftliche Verwertung.

Die Ausgaben im Projekt waren sowohl angemessen als auch notwendig, um die definierten Ziele zu erreichen und die geplanten Arbeitspakete erfolgreich umzusetzen. Durch die zielgerichtete Investition in Ressourcen, Technologien und Personal konnte eine solide Grundlage für die Entwicklung innovativer Lösungen geschaffen werden. Zudem wurden alle finanziellen Mittel effizient eingesetzt, um die Qualität der Ergebnisse sicherzustellen und die Einhaltung des Zeitrahmens zu gewährleisten. Diese angemessene Budgetierung trägt entscheidend zur Realisierung der wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Potenziale des Projekts bei.

Das Forschungsvorhaben DPP konnte nur durch eine öffentliche Finanzierung realisiert werden, da die erforderlichen Investitionen in innovative Technologien und Forschungsinfrastrukturen über die finanziellen Möglichkeiten einzelner Unternehmen hinausgingen. Öffentliche Mittel ermöglichen es im Rahmen vom Forschungscampus „Digital Photonics Production“ DPP, hochriskante Forschungsvorhaben zu unterstützen, die langfristig nachhaltige und transformative Lösungen für die Industrie entwickeln können. Darüber hinaus fördert die öffentliche Finanzierung die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Wirtschaft, was für die erfolgreiche Umsetzung komplexer Projekte wie DPP unerlässlich ist. Diese Unterstützung schafft einen Rahmen, in dem innovative Ansätze wie dargestellt entwickelt werden können, die sowohl wirtschaftliche als auch gesellschaftliche Vorteile bieten und langfristig den Wirtschaftsstandort Deutschland stärken.