

# **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 I: Kurzbericht**

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 zusammenfassend beschrieben.

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

Das Sprintteam 1 befasst sich mit der Frage, wie sich das Additive Fertigungsverfahren Laser Powder Bed Fusion (PBF-LB/M) durch gezielte zeitliche und örtliche Modulation der Laserstrahlintensität produktiver und prozessrobuster gestalten lässt. Ausgangspunkt ist die Beobachtung, dass heutige PBF-LB/M-Anlagen meist mit kleinen, gaußförmigen Singlemode-Laserstrahlen betrieben werden und Produktivitätssteigerungen überwiegend durch das einfache Hinzufügen weiterer Laser-Scanner-Systeme erzielt werden. Dies erhöht die Anlagenkosten und -komplexität. Ziel des Projekts ist deshalb, durch angepasste Strahlformen

und Mehrstrahlkonzepte die Aufbaurrate zu erhöhen, das Prozessfenster zu vergrößern und die Basis für ein erweitertes Werkstoffspektrum zu legen.

Zunächst wurde der Einfluss von Laserstrahldurchmesser und Leistungsdichteverteilung (LDV) auf Schmelzbadform und Produktivität systematisch untersucht. Es zeigt sich, dass kleine gaußförmige Strahlen (80–100  $\mu\text{m}$ ) bei steigender Streckenenergie von einem wärmeleitungsdominierten in ein kapillardominiertes Prozessregime übergehen. Dies führt zu tiefen, schmalen Schmelzbädern, limitiert die nutzbare Laserleistung und begünstigt Prozessinstabilitäten. Prozesse mit vergrößerten Strahlen (160–200  $\mu\text{m}$ ), realisiert entweder durch Defokussierung oder durch ringförmige LDV, verbleiben dagegen über weite Parameterbereiche in einem stabileren, wärmeleitungsdominierten Regime mit breiten, flachen Schmelzbädern. Mit diesen Konfigurationen konnten bei der Nickelbasislegierung IN625 im Vergleich zu konventionellen Parametern sowohl der Hatchabstand als auch die Scangeschwindigkeit erhöht und die theoretische Aufbaurrate typischerweise von rund 5  $\text{mm}^3/\text{s}$  auf über 10  $\text{mm}^3/\text{s}$  gesteigert werden, bei weiterhin hohen relativen Dichten  $\geq 99,9\%$ .

Ein spezieller Faserlaser (nLIGHT AFX-1000) mit ringförmiger LDV ermöglichte dabei die Nutzung hoher Laserleistungen (bis 1kW) bei gleichzeitig reduzierter Maximalintensität. Durch geeignete Leistungsverteilung zwischen Singlemode- und Hohlkernfaser sowie größere Strahldurchmesser konnten bei IN625 theoretische Aufbauraten realisiert werden, die um bis zu etwa 150 % über konventionellen Referenzprozessen mit gaußförmiger LDV liegen. Damit wurde gezeigt, dass Strahlformung eine echte Alternative zur rein anlagenseitigen Multiplikation von Strahlquellen darstellt.

Parallel dazu wurde ein am Fraunhofer ILT entwickeltes Zweistrahlssystem (Dual-Gauß-Array) untersucht, mit dem zwei gekoppelte gaußförmige Strahlen mittels eines einzigen Scanners wahlweise nebeneinander oder hintereinander geführt werden können. Beim Aufbau von Volumenkörpern aus IN625 zeigte sich, dass die hintereinander angeordnete Konfiguration besonders effizient ist: Hier wurde bei vergleichbarer Dichte eine Produktivitätssteigerung von bis zu 180 % gegenüber dem Einzelstrahlprozess erreicht, also eine überproportionale Steigerung bezogen auf die verdoppelte Laserleistung. Die Anordnung der Strahlen nebeneinander verdoppelte zwar die Aufbaurrate, zeigte aber eine deutlich größere Streuung der Dichte.

Zur Bewertung der Prozessrobustheit wurden zwei komplementäre Methoden zur Spritzeranalyse etabliert. Eine kostengünstige Pulverbettkamera erlaubt anhand von Differenzbildern die quantitative Erfassung abgelagerter Spritzer (Anzahl, Größe, Verteilung). Ergänzend wurde mittels Hochgeschwindigkeitskamera die dynamische Spritzerbildung untersucht. Hierbei werden Trajektorien einzelner Partikel rekonstruiert und daraus Geschwindigkeit, Auswurfwinkel, Durchmesser und Entstehungszeit bestimmt. Ein zentrales Ergebnis ist, dass sich die Spritzergeschwindigkeiten für verschiedene Strahlformen und Parameterbereiche durch logarithmische Normalverteilungen beschreiben lassen. Für Strahlen mit ringförmiger LDV wurde bei hohen Leistungen eine intensivere Spritzerbildung mit tendenziell kleineren Partikeln beobachtet, ohne dass sich in den untersuchten Parameterräumen eine direkte Korrelation zur Porosität der gefertigten Würfelproben ergibt. Dagegen zeigten sich starke Zusammenhänge zwischen thermischen Prozessgrößen (z. B. normalisierte Enthalpie) und Spritzerrate bzw. -geschwindigkeit, sodass die Spritzeranalyse als sensibler Indikator für die Schmelzbadstabilität genutzt werden kann.

Die Übertragung der Hochgeschwindigkeitsanalyse auf das Dual-Gauß-Array ergab, dass mit wachsendem Strahlabstand die Spritzeranzahl zunimmt, während die mittlere

Spritzergeschwindigkeit abnimmt und sich die Verteilungen verändern. Die Gesamtverteilung lässt sich als Überlagerung zweier Log-Normalverteilungen interpretieren, die den Spritzern des führenden und des nachlaufenden Strahls entsprechen. Dies bestätigt, dass der nachlaufende Strahl in einem thermisch vorgeprägten Schmelzbad einen eigenständigen Spritzerprozess erzeugt und die Prozessdynamik gezielt beeinflusst.

Zur simulationsgestützten Auslegung solcher Strahlformen wurde der Supergauß-Ansatz auf ringförmige LDV erweitert und in thermophysikalischen PBF-LB/M-Simulationen validiert. Ringförmige und andere nicht-gaußsche LDV erzeugen bei gleicher Leistung flachere Schmelzbadunterseite und ermöglichen höhere geometrische Effizienzen als klassische gaußförmige LDV. Schließlich wurde ein Modell zur Lösung des inversen Wärmeleitungsproblems erfolgreich demonstriert, mit dem sich aus einer gewünschten Temperaturverteilung bzw. Schmelzbadform passende LDV ableiten lassen. Damit stehen Werkzeuge bereit, um Strahlformen künftig systematisch zu entwerfen, mit denen Produktivität und Robustheit des PBF-LB/M-Prozesses gezielt gesteigert werden können.

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

Die Zielsetzung des Sprintteam 10 war die Realisierung einer adaptiven Prozesstemperierung im Rolle-zu-Rolle (R2R) Prozess durch Integration eines Mehrstrahlensystems inklusive geeigneter Temperatursensorik sowie durch die Realisierung von adaptiven Produktionsprozessen mithilfe von modellbasierten Regelungen. Dafür wurde die Lasertrocknung von Lithium-Ionen-Batterien (LIB) als Anwendungsfall erforscht. Im Rahmen des Teilvorhabens wurde die Trocknungsprozess modelliert und experimentell untersucht, und eine R2R-Prototypanlage mit einem High-Power VCSEL-Modul (von englisch vertical-cavity surface-emitting laser) sowie Sensorik zur Prozessüberwachung wurden entwickelt und experimentell validiert. Dazu wurde eine temperaturbasierte Prozessregelung entwickelt. Die Realisierung von adaptiven Trocknungsprozessen führt zu einer reduzierten Prozessdauer und erhöhten Robustheit gegen Prozessstörung aus dem vorgelagerten Beschichtungsprozess wie z. B. Variation in der Schichtdicke.

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

Sprint 12 beschäftigt sich mit der „Photonischen Prozessüberwachung im Bauteil“. Die Bauteile, welche hier betrachtet werden, sind strukturierte Bauteile. Strukturierte Oberflächen beeinflussen die technische Funktion, die optischen Eigenschaft und die Haptik der Bauteile. Um die gewünschten Eigenschaften zu gewährleisten, bedarf es einer zerstörungsfreien und schnellen Prüfmethodik, welche die Strukturen in hoher Auflösung abbilden kann. Die ultrahochauflösende OCT (UHR-OCT), eine auf kurzkohärenter Interferometrie basierende Messmethode, bietet hier die Möglichkeit Strukturiefen und –breiten bis zu 1 µm aufzulösen. Mit Hilfe intelligenter Algorithmen zur Messdatenauswertung soll in diesem Sprint eine vollständige hochauflösende Charakterisierung von strukturierten Bauteilen umgesetzt und validiert werden.

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

Das Sprintteam 14 entwickelte ein modulares, robotergestütztes System zur großflächigen Laserstrukturierung von Bauteilen. Drei zentrale Systemdefizite wurden identifiziert, die die Anlagentechnik sowie die effiziente Datenübertragung und Datenverarbeitung betreffen. Die bisherige monolithische Architektur wurde durch einen echtzeitfähigen Kubernetes-Cluster mit Microservices ersetzt. Dieser dient als Basisinfrastruktur für die Orchestrierung von heterogenen Software- und Hardwareentitäten, wie der Positionskompensation durch Bilderkennung oder der Generierung von Werkzeugbahnen anhand von prozeduralen Strukturen, die insbesondere für große Datenmengen eingesetzt werden kann.

### **Sprint 18: Integration von faseroptischen Sensoren zur Struktur- und Prozessüberwachung im LPBF-Prozess**

Das Sprintteam 18 erforscht die Integration smarterer Sensorik in Laser Powder Bed Fusion (LPBF) Bauteile. Dabei ist der LPBF-Prozess als additiver Fertigungsprozess ein Verfahren, bei dem schichtweise ein Bauteil durch das selektive Verschmelzen von Metallpulver aufgebaut wird. Diese schichtförmige Vorgehensweise ermöglicht die Konstruktion und Fertigung von Bauteilen mit einem besonders hohen Freiheitsgrad. Faseroptische Sensoren bieten dabei die Möglichkeit zur besonders flexiblen und günstigen Strukturüberwachung und damit der intelligenten Überwachung und vorausschauenden Wartung von Bauteilen und Strukturen. Das LPBF-Verfahren eröffnet die Möglichkeit, die optischen Fasern in Bauteile zu integrieren. Dazu wird im Rahmen des Sprint 18 untersucht, welche optischen Fasern, Integrationsmethoden, Prozessstrategien und geometrische Gestaltungen im Bauteil sich eignen.