

1 Motivation und Zielsetzung

Globale Herausforderungen wie der Klimawandel und die Nachhaltigkeit haben einen weitreichenden Einfluss auf Industrie und Wirtschaft. Insbesondere die Flexibilisierung globaler Lieferketten sowie die Etablierung resilienter Produktionssysteme gewinnen zunehmend an Bedeutung (1). Vor diesem Hintergrund bietet die additive Fertigung die Möglichkeit zur ressourcen-effizienten und ortsflexiblen Herstellung von Funktionsbauteilen.

Das Laser Powder Bed Fusion (LPBF-LB/M, im Folgenden als LPBF bezeichnet) ist das für die Herstellung metallischer Bauteile verbreitetste additive Fertigungsverfahren (2). Durch die werkzeuglose Fertigung geometrisch komplexer metallischer Funktionsbauteile auf Basis von 3D-CAD-Daten werden bisherige Restriktionen sowohl hinsichtlich des Bauteildesigns als auch im Hinblick auf die Produktionslogistik überwunden (3). Allerdings behindert die geringe Produktivität des LPBF eine breitere Nutzung des Verfahrens in der industriellen Produktion. Die Produktivität von LPBF-Maschinen kann durch eine Erhöhung der Aufbaurate gesteigert werden. Die Aufbaurate beim LPBF kann insbesondere durch Steigerung der Laserleistung und Anpassung der Verfahrensparameter, wie der Scangeschwindigkeit v_s oder des Hatchabstandes Δy_s , erhöht werden. Praktisch wird die Steigerung der Aufbaurate durch Anpassung der Verfahrensparameter allerdings durch schmelzbaddynamische Effekte, die die Bauteilqualität negativ beeinflussen, limitiert. Zur Verdeutlichung dieser Zusammenhänge sind in Bild 1 die Spurmorphologie und die resultierende Spurgeometrie beim LPBF mit einem einzelnen Laserstrahl (Single-Laser LPBF) bei Steigerung der Scangeschwindigkeit v_s und des Hatchabstandes Δy_s für die Belichtung einer Pulverschicht der Schichtdicke $D_s = 50 \mu\text{m}$ der Nickelbasis-Legierung Inconel® 625 dargestellt. Zur Vergrößerung der Scangeschwindigkeit gegenüber dem Single-Laser LPBF Referenzparameter (vgl. Bild 1, Mitte) wird eine doppelt so große Scangeschwindigkeit von $v_s = 2000 \text{ mm/s}$ mit einer doppelt so großen Laserleistung von $P_L = 550 \text{ W}$ kombiniert. Der Energieeintrag bleibt gegenüber dem Referenzparameter folglich unverändert. Dennoch resultiert die Vergrößerung der Scangeschwindigkeit in einer deutlich inhomogeneren Spurmorphologie und Spurgeometrie mit schwankender und reduzierter Spurbreite und -tiefe. Insbesondere die schwankende Spurbreite und die daraus resultierende wellige Oberfläche sowie unvollständige laterale Anbindung der Spuren erhöhen aufgrund der sich daraus ergebenden schwankenden Schichtdicke beim Volumenaufbau die Wahrscheinlichkeit von Fehlstellen. Bei der Steigerung des Hatchabstandes (Bild 1, links) werden der Hatchabstand und die Laserleistung mit $\Delta y_s = 200 \mu\text{m}$ und $P_L = 550 \text{ W}$ gegenüber dem Single-Laser LPBF Referenzparameter verdoppelt, sodass ein gleichbleibender Energieeintrag gewährleistet werden kann. Trotz einer

homogenen Spurmorphologie resultiert die Vergrößerung des Hatchabstandes in einer gegenüber dem Single-Laser Referenzparameter veränderten Spur-geometrie sowie einer mangelnden Anbindung der benachbarten Spuren. Ebenso wie für die vergrößerte Scangeschwindigkeit begünstigt die fehlende Anbindung der benachbarten Spuren die Bildung von Fehlstellen beim Volumenaufbau. Die Ursachen für das dargestellte Verhalten bei der Skalierung der LPBF-Verfahrensparameter werden im folgenden Stand der Wissenschaft und Technik (Kapitel 2.2) näher erläutert.

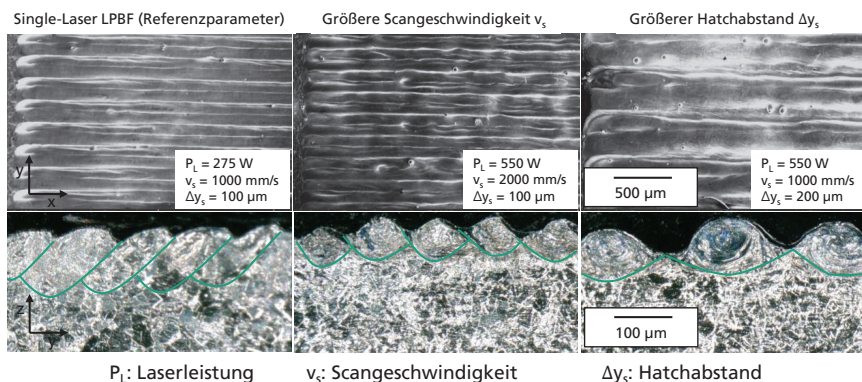
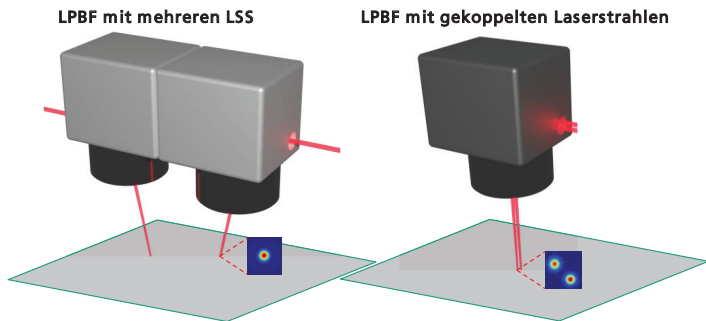


Bild 1 Resultierende Spurmorphologie (oben) und Spurgeometrie (unten) bei der Steigerung der Scangeschwindigkeit v_s bzw. des Hatchabstandes Δy_s beim LPBF.

Aktuelle Ansätze zur Aufbauratensteigerung in LPBF-Maschinen fokussieren aufgrund der oben dargestellten Effekte vornehmlich die parallele Bearbeitung mit mehreren Laser-Scanner-Systemen (LSS) und Laserleistungen von bis zu 1000 W pro LSS. D.h. die Erhöhung der Aufbaurate wird durch die größere LSS-Anzahl ermöglicht, wobei die Verfahrensparameter und somit die Aufbaurate für jedes einzelne LSS unverändert bleiben. Die Implementierung von bis zu 25 unabhängigen LSS (4) führt dabei zu einer Zunahme der Maschinenkosten sowie einer deutlichen Komplexitätssteigerung bei der Prozessführung (5, 6). Einen alternativen Lösungsansatz stellt das LPBF mit mehreren gekoppelten Laserstrahlen dar. D.h. die Bearbeitung erfolgt mit mehreren Laserstrahlen, die über ein einziges Positioniersystem (z.B. LSS) bewegt werden. Durch das LPBF mit gekoppelten Laserstrahlen sollen schmelzbaddynamische Effekte kontrolliert und die Aufbaurate pro Positioniersystem erhöht werden. Entsprechende Konzepte werden bislang lediglich forschungsseitig untersucht und sind auf statische Laserstrahlanordnungen beschränkt. Weiterhin werden fundamental unterschiedliche Maschinenarchitekturen verwendet, sodass bisherige Prozessführungsstrategien nicht übertragen werden können. Ein Vergleich des LPBF mit

mehreren LSS sowie des LPBF mit gekoppelten Laserstrahlen ist schematisch in Bild 2 dargestellt

Bild 2 Schematischer Vergleich des LPBF mit mehreren LSS (links) sowie des LPBF mit gekoppelten Laserstrahlen (rechts).



Ansatz zur Erhöhung der Aufbaurrate

- | | |
|----------------------------------|-----------------------------------|
| ▪ Multiplikation der LSS | ▪ Erhöhung der Aufbaurrate je LSS |
| ▪ Aufbaurrate je LSS unverändert | ▪ Anzahl der LSS unverändert |

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird untersucht, inwieweit die Aufbaurrate beim LPBF durch die Bearbeitung mit zwei gekoppelten Laserstrahlen gegenüber dem LPBF mit einem einzigen Laserstrahl erhöht werden kann. Aus den beschriebenen Herausforderungen resultiert weiterhin der Bedarf zur Entwicklung von Systemtechnik und flexiblen Prozessführungsstrategien, die einerseits eine Skalierung der Aufbaurrate des LPBF ermöglichen und andererseits die Kompatibilität und Übertragbarkeit zu bestehenden LPBF-Maschinen gewährleisten. Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit zunächst ein flexibles optisches System für das LPBF mit zwei gekoppelten Laserstrahlen entwickelt. Anschließend wird eine LPBF-Prozessführung exemplarisch für der Verarbeitung der Nickelbasis-Legierung Inconel ® 625 validiert und mit bestehenden LPBF-Maschinen verglichen.

Im Folgenden wird zunächst ein Überblick über den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik gegeben und basierend darauf die Problemstellung, Forschungsfragen und das Vorgehen im Rahmen der Arbeit abgeleitet.