

# 1 Einleitung und Motivation

## *Introduction and Central Issue*

Die Wichtigkeit einer resilienten, anpassungsfähigen Produktionstechnik wurde der Gesellschaft in der letzten Zeit angesichts der COVID-19-Pandemie und militärischer Konflikte selbst in Europa vor Augen geführt. Gewohnte Lieferketten sind plötzlich unterbrochen und Rohstoffe für verschiedenste Produkte trotz der zuvor erreichten Globalisierung der Märkte nicht mehr verfügbar [DIHK21]. Additiven Fertigungsverfahren kommt in diesem Kontext eine besondere Bedeutung zu. Sie revolutionieren seit einigen Jahren den Markt industriell verfügbarer Produktionstechniken [RICH17], [ZEYN17], [WOHL20]. Aufgrund ihrer hohen Flexibilität hinsichtlich verarbeitbarer Werkstoffe und herstellbarer Geometrien sowie ihrer guten Automatisier- und Digitalisierbarkeit eröffnen sie in vielen Bereichen Möglichkeiten, die mit konventionellen Fertigungsverfahren kaum denkbar wären [GEBH17]. Vor allem in der Kleinserienfertigung, im Prototypenbau oder bei kleinen Designänderungen herkömmlicher Produkte bieten additive Prozesse große Vorteile. Verfahren wie das Auftragschweißen, bei dem ein Zusatzwerkstoff unter Zufuhr von thermischer Energie gezielt auf ein Substrat bzw. eine bereits vorhandene Struktur aufgetragen wird, eignen sich zudem als höchst ressourceneffiziente Reparaturverfahren.

Unter den verschiedenen Auftragschweißverfahren zeichnet sich das Laserauftragschweißen durch einen sehr kleinen und kontrollierbaren Wärmeeintrag in das Werkstück aus [NGO18]. Dieses wird dadurch nur in geringem Maße thermisch beeinträchtigt. Die Verwendung von Draht als Zusatzwerkstoff ermöglicht eine Materialeffizienz von nahezu 100 %, was zusammen mit weiteren Vorteilen wie einer hohen Sicherheit und einfachen Handhabung zu einer grundsätzlich hohen Industrieattraktivität führt [KAIE12], [BRUE17], [DEMI18]. Allerdings sind drahtbasierte Laserauftragschweißprozesse vergleichsweise instabil, insbesondere wenn der Draht lateral zugeführt wird. Schon kleine Schwankungen im Prozessablauf oder der äußeren Bedingungen können einen Prozessabbruch verursachen. Im schlimmsten Fall muss das bereits aufgetragene Material subtraktiv entfernt und der Auftragprozess von Neuem begonnen werden. Aus diesem Grund wird in der industriellen Fertigung heutzutage meist auf das pulverbasierte Laserauftragschweißen zurückgegriffen [ZEYN17], [RICH17], [WOHL20]. Die Nachteile, die beispielsweise in den höheren Rohmaterialkosten, der Gesundheitsgefahr für die Mitarbeitenden sowie der Verunreinigung von Maschinen und Produktionsstätten durch Pulverpartikel bestehen, werden aufgrund der höheren Zuverlässigkeit in Kauf genommen [HEIG16], [SYED05], [BAMB18].

Um das drahtbasierte Laserauftragschweißen im Vergleich zu Pulverprozessen konkurrenzfähiger zu machen, müssen Konzepte erforscht werden, die eine Steigerung der Prozessstabilität erlauben. Ein solches Konzept ist das ursprünglich für das Laserstrahlhartlöten entwickelte Zweistrahlverfahren, bei dem ein kontinuierlicher Prozesslaser mit einem zweiten, modulierten Laserstrahl überlagert wird. Dieser zweite Laserstrahl bringt zwar nur eine vernachlässigbar kleine zusätzliche Prozessleistung ein, ändert den Prozess aber grundlegend [DONS12]. Durch den modulierten Laserstrahl werden die Schmelzbaddynamik und -form und die Energieeinkopplung im Laserstrahlhartlöten beeinflusst. Durch Nutzung der Effekte beim Laserauftragschweißen ist einerseits denk-

bar, den Querschnitt und die Oberflächenrauheit der Schweißraupen zu verändern und anwendungsspezifisch zu verbessern. Andererseits besteht die Annahme, dass der Absorptionskoeffizient für die eingebrachte Laserstrahlung im Zweistrahlprozess im Vergleich zum konventionellen Auftragschweißen erhöht wird. Erste Ergebnisse weisen darauf hin, dass durch die verstärkte Absorption die benötigte Gesamtprozesslaserleistung geringer ist. Daraus folgt Potenzial für eine ökologisch nachhaltigere Produktion. Kombiniert eröffnen die Veränderungen der Schmelzbadform und der Absorptionseigenschaften durch den modulierten Laserstrahl gänzlich neue Möglichkeiten hinsichtlich der Prozesseinstellbarkeit und -flexibilität. Insgesamt wird vermutet, dass das von den verschiedenen Prozesseinflussgrößen aufgespannte stabile Prozessfenster im Zweistrahlprozess vergrößert wird. Der Prozess ist somit äußeren Einflüssen gegenüber weniger stör anfällig und kann zuverlässiger eingesetzt werden. Zusammenfassend sind im Vergleich zum konventionellen Laserauftragschweißen mit lateraler Drahtzuführung große Vorteile identifizierbar.

Um diese Vorteile mittel- bis langfristig für die industrielle Anwendung nutzbar zu machen, ist das Ziel dieser Arbeit zunächst eine Analyse der auftretenden physikalischen Effekte mit ihren Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen. Aufgrund der hohen prozessdynamischen Komplexität der Wechselwirkungen müssen experimentelle Methoden entwickelt werden, die eine gesonderte Betrachtung der einzelnen Effekte erlauben. Davon ausgehend wird untersucht, wie diese Effekte zu einer Prozessstabilisierung beim Auftrag von Einzelschweißraupen und beim additiven Aufbau dreidimensionaler Bauteile mittels drahtbasiertem Laserauftragschweißen beitragen. Es wird ein empirisches Prozessklärungsmodell erarbeitet, das die verschiedenen Einflussgrößen und ihre Auswirkungen auf den Prozess beschreibt. Durch das Modell wird es zukünftig möglich sein, Prozessergebnisse zuverlässiger vorherzusagen und physikalische Zusammenhänge übersichtlicher darzustellen.

Zusammengefasst wird in dieser Arbeit mit dem Zweistrahlprozess ein Ansatz untersucht, der das Potenzial besitzt, die industrielle Nutzbarkeit und die Zuverlässigkeit des drahtbasierten Laserauftragschweißens zu erhöhen. Dabei wird die gesamte Bandbreite von physikalischen Grundlagenversuchen bis hin zu anwendungsbezogenen Auftragschweißversuchen betrachtet. Eingebettet in einen globalen produktionstechnischen Kontext zielen die Untersuchungen darauf ab, zu einer Steigerung von Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit in der Produktion und der Prozessauslegung von additiven Prozessen beizutragen.