

Light Engineering für die Praxis

Mauritz Leander Birger Möller

Prozessmanagement für das Laser-Pulver- Auftragschweißen

Herausgegeben von Claus Emmelmann

 Springer Vieweg

Light Engineering für die Praxis

Reihe herausgegeben von

Claus Emmelmann, Hamburg, Deutschland

Technologie- und Wissenstransfer für die photonische Industrie ist der Inhalt dieser Buchreihe. Der Herausgeber leitet das Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik an der Technischen Universität Hamburg sowie die Fraunhofer-Einrichtung für Additive Produktionstechnologien IAPT. Die Inhalte eröffnen den Lesern in der Forschung und in Unternehmen die Möglichkeit, innovative Produkte und Prozesse zu erkennen und so ihre Wettbewerbsfähigkeit nachhaltig zu stärken. Die Kenntnisse dienen der Weiterbildung von Ingenieuren und Multiplikatoren für die Produktentwicklung sowie die Produktions- und Lasertechnik, sie beinhalten die Entwicklung lasergestützter Produktionstechnologien und der Qualitätssicherung von Laserprozessen und Anlagen sowie Anleitungen für Beratungs- und Ausbildungsdienstleistungen für die Industrie.

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/13397>

Mauritz Leander Birger Möller

Prozessmanagement für das Laser-Pulver- Auftragschweißen

Herausgegeben von Claus Emmelmann

Mauritz Leander Birger Möller
Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik
Technische Universität Hamburg
Hamburg, Deutschland

ISSN 2522-8447 ISSN 2522-8455 (electronic)
Light Engineering für die Praxis
ISBN 978-3-662-62224-7 ISBN 978-3-662-62225-4 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-62225-4>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert durch Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2021

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung der Verlage. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Zusammenfassung

Titanwerkstoffe ermöglichen in Verbindung mit Leichtbaukonstruktionen die Umsetzung gewichtsoptimierter Bauteile in der Luftfahrt und stellen somit einen Grundpfeiler für die Reduktion der CO₂-Emissionen im Luftverkehr dar. Die Vorteile dieses hochfesten Materials für den Leichtbau führen jedoch in konventionell zerspanenden Produktionsverfahren zu einer besonders energie- und kostenintensiven Herstellung. Durch den Fortschritt von der subtraktiven hin zur additiven Fertigungsweise wird bei dem additiven Laser-Pulver-Auftragschweißen (LPA) lediglich die benötigte Materialmenge prozessiert. Allerdings hemmen ein unzureichendes Prozessverständnis, die Unstetigkeit der Ergebnisgrößen und insbesondere das Fehlen einer qualifizierten Prozesskette zur Herstellung von Bauteilen mit definierter geometrischer Maßhaltigkeit bislang die Etablierung des Verfahrens in der Luftfahrtproduktion.

In der vorliegenden Arbeit werden daher die Einflussfaktoren sowie deren Auswirkung auf die Ergebnisgrößen erfasst und in einer Prozessstrategie für die additive LPA-Fertigung zusammengeführt, die eine den industriellen Qualitätsanforderungen genügende Produktion von Luftfahrtbauteilen innerhalb einer definierten geometrischen Maßhaltigkeit erlaubt.

Dazu werden zunächst die anlagensystemtechnischen und prozessualen Einflussfaktoren identifiziert und für die anlagenspezifischen Wirkgrößen Sollwertbereiche festgelegt. Unter Einhaltung dieser Sollwertbereiche werden mit der herkömmlichen Prozessführung die qualitätsrelevanten Ergebnisgrößen untersucht und mit den luftfahrtspezifischen Anforderungen verglichen. Während die Einhaltung der Qualitätsanforderungen für alle betrachteten mechanisch-technologischen Kenngrößen nachgewiesen wird, können die Vorgaben für die geometrische Maßhaltigkeit nicht erfüllt werden. Um diese bei der Fertigung dreidimensionaler Strukturen zu gewährleisten, wird unter Verwendung der Methoden des Fertigungsprozessmanagements eine Prozessstrategie ausgearbeitet.

Hierfür wird eine erfahrungswissensunabhängige Prozessparameteridentifikation entwickelt, die mittels eines genetischen Algorithmus einen geeigneten Prozessparametersatz innerhalb der konkurrierenden Zielsetzungen identifiziert. Anschließend wird ein Drei-Phasen-Modell erarbeitet, das die veränderlichen thermischen Randbedingungen abbildet und in einer lagenadaptiven Laserleistungsregelung umgesetzt wird. Im letzten Schritt werden die Einflüsse von repräsentativen Teilstrukturen und Bearbeitungsstrategien auf die Ergebnisqualität ermittelt und Vorgaben für die Prozessführung zur Gewährleistung der geometrischen Maßhaltigkeit definiert.

Abschließend wird die aus den vorangegangenen Herangehensweisen konsolidierte Prozessstrategie in der industriellen Prozesskette an einem Luftfahrtbauteil demonstriert und die Ressourceneffizienz sowie das Kostenpotenzial der LPA-Prozesskette werden bewertet. Dabei wird belegt, dass der Einsatz der neuartigen Prozessstrategie in einer signifikanten Verbesserung der Ergebnisqualität resultiert und die Erfüllung der geometrischen Maßhaltigkeitsanforderungen sicherstellt. Im Vergleich zu konventionellen Produktionstechnologien ermöglicht das LPA-Verfahren somit einerseits einen Wirtschaftlichkeitsvorteil und andererseits eine besonders ressourcenschonende Herstellung von Titanbauteilen.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik (iLAS) der Technischen Universität Hamburg (TUHH) sowie an der Fraunhofer-Einrichtung für additive Produktionstechnologien IAPT in Hamburg.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. C. Emmelmann danke ich herzlich für die stets engagierte und inspirierende Begleitung dieser Arbeit sowie die vertrauensvolle Zusammenarbeit am Fraunhofer IAPT. Darüber hinaus danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Norbert Huber für die Übernahme des Korreferats sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Hintze für die Übernahme des Vorsitzes des Prüfungsausschusses.

Ich danke allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des iLAS und Fraunhofer IAPT sowie allen studentischen Hilfskräften und Studien-, Diplom-, Bachelor- sowie Masterarbeitsrinnen und -arbeitern für die äußerst angenehme Arbeitsatmosphäre, intensiven fachlichen Diskurse und vor allem die wertvollen gemeinsamen Momente entlang dieses spannenden Weges.

Für den jederzeit bereichernden fachlichen Austausch möchte ich besonders Herrn Dr.-Ing. Dirk Herzog, Herrn Dr.-Ing. Ake Ewald, Herrn M.Sc. Philipp Surrey sowie meinen Studenten und späteren Kollegen Herrn M. Sc. Vishnuu Jothi Prakash, Herrn M. Sc. Markus Heilemann, Herrn M.Sc. Christoph Scholl, Herrn M.Sc. Malte Buhr, Herrn M.Sc. Julian Weber und Herrn M.Sc. Christian Conrad danken. Herrn Franz Terborg möchte ich für die proaktive Unterstützung bei den experimentellen Tätigkeiten im Rahmen dieser Arbeit danken.

Weiterhin danke ich Herrn M.Sc. Philipp Thumann, Herrn Dr.-Ing. Max Oberlander, Herrn Dipl.-Ing. Georg Cerwenka, Herrn Dipl.- Ing. Frank Beckmann sowie Herrn Dipl.-Ing. Dennis Eulner für die anregenden und erfrischenden Diskussionen wissenschaftlicher Fragestellungen.

Ganz besonders danke ich meiner Familie und meinen Freunden, die mich jahrelang stets unterstützt und so die Rahmenbedingungen für die Umsetzung dieser Arbeit geschaffen haben. Von Herzen danke ich meiner Schwester Lone und meiner Freundin Anja - ihr Rückhalt und die entspannte Begleitung ließen die Zeit für die umfangreiche Ausarbeitung wie im Fluge verstreichen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XIII
Abkürzungsverzeichnis	XXV
Formelverzeichnis	XXIX
1 Einleitung und Motivation	1
1.1 Additive Fertigung in der Luftfahrt.....	1
1.2 Zielsetzung.....	3
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2 Stand von Wissenschaft und Technik	7
2.1 Additive Fertigung	7
2.2 Laser-Pulver-Auftragschweißen	9
2.2.1 Laser in Produktionstechnologien.....	9
2.2.2 Verfahrensprinzip	11
2.2.3 Prozesskette für das Laser-Pulver-Auftragschweißen.....	14
2.3 Werkstoff Ti-6Al-4V	19
2.3.1 Physikalische Werkstoffkennwerte und Mikrostruktur.....	20
2.3.2 Zerspanbarkeit und schweißtechnische Verarbeitung	23
2.4 Qualität und Qualitätsmanagement.....	25
2.5 Toleranzmanagement.....	26
2.6 Produktentstehung und Prozessmanagement	30
2.7 Zusammenfassung und Fazit.....	34
3 Forschungsbedarf und Lösungsweg	37
3.1 Forschungsbedarf.....	37
3.2 Methodischer Ansatz und Zielkriterien.....	39
3.3 Lösungsweg	44
4 Prozess- und Anlagentechnologie	47
4.1 Anlagentechnik für das Laser-Pulver-Auftragschweißen	47
4.1.1 Pulverfördersystem	48
4.1.2 Bearbeitungsoptik mit Pulverdüse	49
4.1.3 Strahlquelle	50
4.2 Anlagenprogrammierung	50

4.3	Pulverwerkstoff.....	51
4.4	Messtechnik und Verfahren zur Messfehlerermittlung.....	51
4.5	Zusammenfassung und Fazit.....	53
5	Anlagensystemtechnische und prozessuale Einflussfaktorenbewertung	55
5.1	Identifikation der Einflussfaktoren	55
5.2	Fertigungsprozessmanagement in der additiven Produktion.....	57
5.3	Analyse des Ausgangswerkstoffs.....	58
5.4	Analyse der Systemtechnik	60
5.4.1	Lasertechnik.....	61
5.4.2	Pulverfördersystem	63
5.4.3	Wechselwirkungsverhalten zwischen Laser und Pulvermassenstrom	67
5.4.4	Schutzgaskammer	69
5.5	Zusammenfassung und Fazit.....	73
6	Bewertung der qualitätsrelevanten Ergebnisgrößen	75
6.1	Parameterexploration	75
6.2	Parameterdefinition.....	81
6.3	Evolution der Mikrostruktur	82
6.4	Chemische Komposition	85
6.5	Dichte.....	87
6.6	Mechanische Eigenschaften.....	91
6.6.1	Vickershärte	91
6.6.2	Statische Festigkeiten.....	93
6.7	Eigenspannungen	96
6.7.1	Thermomechanische Korrelation von Eigenspannungen und Deformationen	98
6.7.2	Eigenspannungen und Verzug beim Laser-Pulver- Auftragschweißen	99
6.7.3	Abstraktion der Probekörpergeometrien	101
6.7.4	Simulation des Eigenspannungszustands	102
6.7.5	Experimentelle Untersuchung der Eigenspannungen.....	121
6.7.6	Vergleichende Analyse der Ergebnisse aus Simulation und Experiment	139
6.8	Oberflächenbeschaffenheit.....	143
6.9	Geometrische Maßhaltigkeit.....	146
6.10	Zusammenfassung und Fazit.....	149

7	Qualitätszielorientierte Prozessstrategieentwicklung	151
7.1	Einzelspuren.....	152
7.1.1	Genetische Algorithmen	153
7.1.2	Evolutionäre Prozessparameteridentifikation.....	163
7.1.3	Ergebnis der Optimierung.....	166
7.1.4	Fazit und Einbindung in die qualitätszielorientierte Prozessstrategie.....	171
7.2	Dünnwandige, zweidimensionale Strukturen.....	172
7.2.1	Drei-Phasen Modell	172
7.2.2	Ansätze und Anwendung des Drei-Phasen-Prozessmodells	175
7.2.3	Ermittlung geeigneter Prozessmodellparameter.....	178
7.2.4	Fazit und Einbindung in die qualitätszielorientierte Prozessstrategie.....	180
7.3	Komplexitätsvariable Fertigungsstrategien.....	180
7.3.1	Bahnplanungsstrategien	181
7.3.2	Analyse der Schichtebeneinteilung	184
7.3.3	Analyse der Überhangstrukturfertigung.....	186
7.3.4	Bearbeitungsstrategien für Freiformgeometrien	190
7.3.5	Auswirkung auf die qualitätszielorientierte Prozesskette.....	195
7.4	Demonstration.....	195
7.4.1	Abstrahierte Applikation.....	195
7.4.2	Demonstratorfertigung ohne Optimierung.....	196
7.4.3	Demonstration der Prozessstrategie	197
7.5	Fazit und Bewertung.....	199
8	Validierung in der industriellen Prozesskette	201
8.1	Industrielles Anwendungsbeispiel	201
8.2	Arbeits- und Prozessplanung	204
8.3	Referenzfertigung ohne Optimierung	209
8.4	Prozessmanagement in der industriellen Prozesskette	211
8.5	Fazit und Bewertung.....	212
9	Ressourceneffizienz und Kostenpotenziale in der additiven Fertigung	215
9.1	Nachhaltigkeitsbegrifflichkeit für Produktionstechnologien	215
9.2	Ansätze zur Analyse der Nachhaltigkeit in der additiven Fertigung.....	218
9.3	Modell des <i>Carbon Footprint</i>	220
9.4	Methodologie der Nachhaltigkeitsbewertung im ökonomisch-ökologischen Kontext.....	221

9.5	Ressourcenströme	222
9.5.1	Rohmaterialherstellung	225
9.5.2	Fertigung	226
9.5.3	Recycling	229
9.6	Bewertung der Energieverbräuche und Kohlenstoffdioxidemissionen	229
9.7	Kostenbewertung der additiven Fertigung	234
9.7.1	Kostenmodell	235
9.7.2	Kostenpotenziale additiver Produktionstechnologien	239
10	Zusammenfassung und Ausblick	243
10.1	Zusammenfassung	243
10.2	Ausblick	246
	Literaturverzeichnis	249
A	Anhang	295
A.1	Ressourcen- und Kostenpotenzial für Titanbauteile in der Luftfahrt	295
A.2	Spezifikation des Pulverwerkstoffs der Firma Tekna	296
A.3	Laserstrahldurchmesser und motorisierte Fokussierung	297
A.4	Technische Spezifikation der verwendeten DMS	297
A.5	Probendefinition zur Fertigung von Überhangstrukturen	298
A.6	Laserleistungswerte für das Drei-Phasen-Prozessmodell	299

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Entwicklung der Materialanteile im zivilen Flugzeugbau nach [HO13, Jea15, Neu18]	1
Abbildung 1.2:	Vision ressourceneffizienter und kostengünstiger, hochproduktiver additiver Fertigung in der Luftfahrt	4
Abbildung 1.3:	Aufbau der vorliegenden Arbeit.....	5
Abbildung 2.1:	Charakterisierung additiver Fertigungstechnologien anhand der Aufbaurate sowie des Auflösungsvermögen und der Investitionskosten nach [Emm18]	9
Abbildung 2.2:	Strahlkaustik eines Laserstrahls und den charakteristischen Kenngrößen nach [EE06]	10
Abbildung 2.3:	Schematische Darstellung des Laser-Pulver-Auftragschweißens	12
Abbildung 2.4:	Koordinatensystemdefinitionen für die Bewegungsprogrammierung	13
Abbildung 2.5:	Aktuelle Prozesskette für das Laser-Pulver-Auftragschweißen	15
Abbildung 2.6:	Wesentliche Herausforderungen entlang der Prozesskette für das Laser-Pulver-Auftragschweißen.....	16
Abbildung 2.7:	(a) Ausformung der martensitischen α' -Phase und der α -Phase an den ehemaligen β -Korngrenzen bei einer Abkühlungsgeschwindigkeit von $31,5 \times 10^3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$; (b) Martensitische α' -Phase und beginnende Vergrößerung der α -Phase für $24,6 \times 10^3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ nach [AR98]	22
Abbildung 2.8:	Schematisches ZTU-Diagramm für die Titanlegierung Ti-6Al-4V ausgehend von einem lösungsgeglühten Zustand bei $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ nach [AR98, MZ73]	22
Abbildung 2.9:	Ishikawa-Diagramm zur Visualisierung der Einflussgrößen auf Fertigungsprozesse (nach RM99).....	26
Abbildung 2.10:	Toleranzinformationsfluss zur Funktionserfüllung für das LPA-Verfahren abgeleitet aus [Boh13, Hol94]	27

Abbildung 2.11:	Beschreibung der Messunsicherheit für eine zweidimensionale Messgröße nach [DS09, ISO3534, WS15].....	28
Abbildung 2.12:	Toleranzdefinition für das Toleranzmanagement in der LPA-Prozesskette nach [Boh13, Hol94, Kle12].....	30
Abbildung 2.13:	Rückkopplungen im Produktentstehungsprozess nach [EM13, ES13].....	31
Abbildung 2.14:	Ablaufplan des Fertigungsprozessmanagements nach [Aal11, Grö15].....	34
Abbildung 3.1:	Eigenschaftsanforderungen für additiv gefertigte Bauteile nach [ISO17296a].....	41
Abbildung 3.2:	Lösungsweg zur Erfüllung der definierten Zielsetzung sowie für die Beantwortung der Forschungsfragen.....	45
Abbildung 4.1:	Bearbeitungszelle TruLaser Robot 5020 mit LPA-Bearbeitungskopf	47
Abbildung 4.2:	Pulverfördertechnologie (a) Tellerpulverförderer mit zwei Pulverreservoirs (Fa. GTV Typ PF2/2); (b) schematische Funktionsweise des Tellerförderprinzips in der Tellerfördereinheit	48
Abbildung 4.3:	Bearbeitungsoptik BEO D70 mit motorischer Fokussierung, CCD-Kameramodul und Dreistrahlpulverdüse	49
Abbildung 4.4:	Aufnahme- und Messpunkte der Bauplattform für die Untersuchung des Messfehlers.....	52
Abbildung 4.5:	Relative Häufigkeitsverteilung der Messabweichung infolge der Einlege- und Ausrichtungsabweichungen (für $n_{Anz} = 100$).....	53
Abbildung 5.1:	Einflussfaktoren auf die Bauteilqualität für das LPA-Verfahren nach [BLB07, Gra18, Kel06, Ohn08, Pop05, Reh10, TKC04, Wit15].....	56
Abbildung 5.2:	Partikelgrößenverteilungen für den untersuchten Ti-6Al-4V-Pulverwerkstoff.....	59

Abbildung 5.3:	Intensitätsverteilung in der Schnittebene für $P_L = 1500$ W, $s_{\text{Fokus}} = + 17$ mm im Arbeitsabstand von 16 mm und einem resultierenden Laserstahldurchmesser von $d_{\text{Laser}} = 2,086$ mm.....	62
Abbildung 5.4:	(a) Ermittelte Laserstrahlkaustik ohne montierte Pulverdüse; (b) Intensitätsprofile über und unter dem Bearbeitungsabstand von 16 mm bei $P_L = 1500$ W und $s_{\text{Fokus}} = + 17$ mm	62
Abbildung 5.5:	Messwerte des Pulvermassenstroms für den untersuchten Pulverwerkstoff.....	64
Abbildung 5.6:	Einfluss des Füllstandes im Reservoir auf den Pulvermassenstrom	65
Abbildung 5.7:	Pulverstrahlausformung am Bearbeitungskopf mit einem Pulverfokus $r_{\text{Pfo}} = 3,65$ mm im Bearbeitungsabstand $s_{\text{LPA}} = 16$ mm.....	66
Abbildung 5.8:	(a) Versuchsaufbau zur Transmissionsmessung; (b) Prüfung der Verwirbelungsfreiheit am Freistrahlg; (c) Power Monitor der Fa. Primes mit Einhausung und Schutzglas	68
Abbildung 5.9:	Zusammenhang zwischen dem gemessenen Transmissionsgrad und dem Pulvermassenstrom; für $P_{\text{Laser}} = 1500$ W und $d_{\text{Laser}} = 2,086$ mm im Arbeitsabstand von 16 mm	69
Abbildung 5.10:	Schutzgaskammer im Einsatz mit flexibler Schweißfolie	70
Abbildung 5.11:	Schlierenfotografische Darstellung der Strömungseigenschaften am verwendeten Gasauslass für einen Argonvolumenstrom von 10 l/min; (a) Vorder- und (b) Seitenansicht.....	71
Abbildung 5.12:	Aufbau der verwendeten Schutzgaskammer	71
Abbildung 5.13:	Untersuchung des Spülprozesses der Schutzgaskammer	72
Abbildung 6.1:	Untersuchung der qualitätsrelevanten Ergebnisgrößen (a) luftfahrtrelevante Eigenschaften; (b) definierte Probekörpergeometrie der Wandstrukturen	75
Abbildung 6.2:	Energieströme des LPA und geometrische Kenngrößen der aufgeschweißten Lage.....	76

Abbildung 6.3:	Modellierte Abhängigkeit zwischen Nahtbreite, Vorschub und Pulvermassenstrom für die initiale Parameteridentifikation	79
Abbildung 6.4:	Positionen und Orientierung der Querschliffe für die Untersuchung der Mikrostruktur	82
Abbildung 6.5:	Lichtmikroskopische Übersichtsaufnahme des Querschliffes mit Einteilung in vier Mikrostrukturbereiche	83
Abbildung 6.6:	REM-Aufnahmen im Materialkontrastbild bei 3000-facher Vergrößerung (a) Mikrostruktur der ersten Lage weist martensitische α' -Phase auf; (b) Mikrostruktur der fünften Lage mit sehr feinen $\alpha+\beta$ -Lamellen in der Korbgeflecht-Struktur	84
Abbildung 6.7:	REM-Aufnahmen im Materialkontrastbild bei 3000-facher Vergrößerung (a) Mikrostruktur in dem dritten Bereich III mit vergrößerten $\alpha+\beta$ -Lamellen in der Korbgeflecht-Struktur; (b) Mikrostruktur in dem vierten Bereich IV mit gleichgerichteten $\alpha+\beta$ -Lamellenbereichen	85
Abbildung 6.8:	Wandgeometrie und Position der Proben zur Ermittlung der chemischen Komposition entlang der Aufbauhöhe.....	86
Abbildung 6.9:	Positionen der Querschliffe und Dichtemessungen an den Probekörpern.....	88
Abbildung 6.10:	Lichtmikroskopische Analyse der Probendichte an Querschliffen.....	89
Abbildung 6.11:	Verlauf der Probendichte über der Bauhöhe für die untersuchten Probekörper.....	90
Abbildung 6.12:	Vickershärteverlauf in der y-z-Ebene.....	92
Abbildung 6.13:	(a) Abmaße der Probekörper; (b) Anordnung der Zugproben in den aufgebauten Wandstrukturen nach [DIN50125] Form E.....	93
Abbildung 6.14:	Eingespannte Zugprobe mit befestigten Extensometern in der Zwick Z100 Materialprüfmaschine.....	94
Abbildung 6.15:	Spannungs-Dehnungsdiagramme für die variierenden Probekörperpositionen	94

Abbildung 6.16:	(a) Zugfestigkeiten und (b) Bruchdehnungen der untersuchten Probekörper in Abhängigkeit der Probenorientierung zur Aufbaurichtung.....	95
Abbildung 6.17:	Vorgehensweise zur Untersuchung der Eigenspannungssituation von LPA-gefertigten Strukturen	97
Abbildung 6.18:	Korrelation zwischen Verzug und Eigenspannungen nach [FTW13].....	98
Abbildung 6.19:	(a) Verzüge resultieren in Bauteil – und Stützstrukturversagen im LBM-Prozess; (b) Rissbildung und Prozessabbruch im LPA-Prozess.....	100
Abbildung 6.20:	(a) Demonstratorbauteil mit abstrahierten Probengeometrien; (b) Definition der Geometrien für die Herstellung der Proben RS1 bis RS4.....	101
Abbildung 6.21:	Schematischer Ablauf einer Finite-Elemente-Analyse nach [BZ02]	103
Abbildung 6.22:	Teilbereiche der Schweißsimulation sowie deren Korrelationsgrößen nach [Rad02]	104
Abbildung 6.23:	Gauß-Normalverteilung der Oberflächenquelldichte q_{fl} (links) und Volumenquelldichte q_{vol} (mitte); doppelt ellipsoide Ersatzwärmequelle nach Goldak (rechts) [GA06, Rad02, Sch07].....	107
Abbildung 6.24:	Parametrisierung der verwendeten hybriden Wärmequelle	108
Abbildung 6.25:	Versuchsaufbau zur experimentellen Validierung des simulierten Wärmeeintrags.....	111
Abbildung 6.26:	Thermoelement- und Querschleifpositionen für die Ermittlung des Wärmeenergieeintrags	112
Abbildung 6.27:	(a) Infrarotkameraaufnahme nach 12s; (b) Zeit-Temperatur-Kurven der Thermoelemente innerhalb der Kalibrationsexperimente bis 60 s nach Prozessstart.....	114
Abbildung 6.28:	(a) Elementgröße aus h-Konvergenzstudie; (b) Verwendete Hexaederelemente mit acht Integrationspunkten und elementspezifischem Koordinatensystem nach [Dho04].....	115

Abbildung 6.29:	Kalibration der Simulationsergebnisse an den Schliffbildern der aufgebrauchten Lagen	116
Abbildung 6.30:	Abstrahiertes FE-Modell für die Schweißstuktur- simulation des LPA-Prozesses	117
Abbildung 6.31:	(a) Wärmekapazität Ti-6Al-4V nach [BWC94, DMS86, Mül04]; (b) Dichte Ti-6Al-4V nach [DMS86, MB08, Mül04].....	118
Abbildung 6.32:	(a) Wärmeleitfähigkeit Ti-6Al-4V nach [DHM15, DMS86, MB08, Mül04]; (b) Elastizitätsmodul Ti-6Al-4V nach [BWC94, DMS86, Mun13, PL02].....	119
Abbildung 6.33:	(a) Fließspannung Ti-6Al-4V nach [BWC94, DMS86, Mun13]; (b) Warmzugkurven Ti-6Al-4V nach [DMS86].....	119
Abbildung 6.34:	Visualisierung der Temperaturverteilung während des simulierten Aufbauprozesses (KOS-Ursprung analog zu Abbildung 6.30)	120
Abbildung 6.35:	Simulierter Eigenspannungsverlauf σ_{yy} entlang der Schnittkontur in x-Achsenrichtung (vgl. Abbildung 6.30) für die vier Probekörpergeometrien	121
Abbildung 6.36:	Vergleichender Überblick über die Auflösung sowie Tiefeninformation für Verfahren zur Bestimmung von Eigenspannungen nach [Pri99, RDB12, WTE08].....	122
Abbildung 6.37:	(a) Unendliche Platte mit scharfem Riss der Länge $2a$ unter externer Last σ^∞ ; (b) Spannungsverlauf an der Risspitze; (c) Polarkoordinaten zur Beschreibung der Nahfeldgleichungen mit $ra \ll 1$; nach [ABF13, Ing13, Jud17].....	123
Abbildung 6.38:	Superpositionsprinzip zur Ermittlung der Dehnungen durch eine inkrementelle Relaxation der Eigenspannungen nach [CF85, Pri99].....	125
Abbildung 6.39:	Angepasste Probengeometrie für die CCM mit der Schnittlänge a und der Messbereichslänge l nach [FC02, LH07]	126
Abbildung 6.40:	Vorgehensweise zur Berechnung der Eigenspannungs- verläufe mit der CCM	134

Abbildung 6.41:	Positionierung von Probekörpern auf einer Bauplattform (Auszug).....	135
Abbildung 6.42:	<i>Wheatstone</i> -Halbbrückenschaltung zur Temperaturkompensation nach [Par16]	135
Abbildung 6.43:	(a) Drahterosionsprozess zur Schnitteinbringung für die <i>Crack Compliance Methode</i> ; (b) Präparierte Probengeometrie	137
Abbildung 6.44:	Gemessene Dehnungen an den zwölf Probekörpern in Abhängigkeit der Schnitttiefe in x-Achsenrichtung (vgl. Abbildung 6.39)	138
Abbildung 6.45:	Eigenspannungsverlauf σ_{yy} entlang der Schnittkontur in x-Achsenrichtung (vgl. Abbildung 6.39) für die vier Dehnungsmittelwerte der Probekörpergeometrien.....	139
Abbildung 6.46:	Experimentelle und simulative Ermittlung der Eigenspannungen für LPA-gefertigte Strukturen in Abhängigkeit der Schnitttiefe in x-Achsenrichtung (vgl. Abbildung 6.30 und Abbildung 6.39).....	140
Abbildung 6.47:	(a) Probengeometrie für die Messung der Oberflächenrauheit; (b) Oberflächenprofil für eine Messstelle	144
Abbildung 6.48:	Rauheitskennwerte gemittelte Rautiefe und arithmetischer Mittenrauwert R_z und R_a für die untersuchten Parametervariationen.....	145
Abbildung 6.49:	Querschliff mit charakteristischen Wandstärkenirregularitäten der Probengeometrie	147
Abbildung 6.50:	Eingemessene Probekörpergeometrien und Aufmaßreferenz der geplanten Wandgeometrie.....	148
Abbildung 6.51:	Abstrahierte Darstellung der Relation zwischen hergestellter Geometrie, dem minimalen Aufmaß und der finalen Bauteilgeometrie	150
Abbildung 7.1:	Vorgehensweise zur Erarbeitung der Prozessstrategie für die Implementierung in der additive Fertigung von Luftfahrtstrukturen mit dem LPA-Verfahren	151
Abbildung 7.2:	Anordnung von Einzelspuren auf der Bauplattform (grau: Bauplattform; türkis: Einzellagen).....	152

Abbildung 7.3:	Ausprägungen der Ausgestaltung von Evolutionären Algorithmen und Einordnung der Genetischen Algorithmen nach [Ada07, VDI6224].....	155
Abbildung 7.4:	Exemplarischer Verlauf einer Pareto-Front im Zielfunktionsraum (f_1, f_2) nach [CLv07, Poh13, Wei15]	156
Abbildung 7.5:	Formatierung der Parameterdatensätze für den GA	159
Abbildung 7.6:	Ablauf der Populationsentwicklung des Genetischen Algorithmus für $t = 1$ und $t > 1$ (Bewertung: gute Anpassung (1: grün); schlechte Anpassung (10: rot)).....	160
Abbildung 7.7:	Vorgehensweise zur evolutionären Parameteridentifikation im Rahmen dieser Arbeit	163
Abbildung 7.8:	Dritte Generation der hergestellten Einzelspuren auf der Bauplattform	166
Abbildung 7.9:	Lokalisation der Parametersätze aus der initialen Population im Suchraum	167
Abbildung 7.10:	Aggregierte Bewertung der Individuen für die vier Generationen im Suchraum.....	167
Abbildung 7.11:	Auswertung der Zielkriterien für die erzeugten vier Generationen (Bewertung: gute Anpassung (1: grün); schlechte Anpassung (10: rot)).....	169
Abbildung 7.12:	Auswertung der Nahtgüte und der Aufbauhöhe nach vier Generationen.....	170
Abbildung 7.13:	Individuen nach vier Generationen in Abhängigkeit der Zielfunktionen sowie der aggregierten Bewertung	170
Abbildung 7.14:	Modellierte Ausprägung der unregelmäßigen Wandstärke und Randbedingungen	173
Abbildung 7.15:	Wärmefluss in einem diskreten Element mit der Lagenhöhe t_{aL}	174
Abbildung 7.16:	Lagenadaptiver Laserleistungsverlauf für die verwendete Parametrisierung: $A = 16$; $B = 2$; $C = 5$; $D = 60$	176
Abbildung 7.17:	Lagenadaptive Laserleistungsverläufe für die Untersuchung der geometrischen Maßhaltigkeit.....	177

Abbildung 7.18:	Hergestellte Probekörper unter Verwendung der lagenadaptiven Laserleistungsfunktionen	178
Abbildung 7.19:	Ermittelte Maßhaltigkeiten der Wandstrukturen in Relation zu der Sollgeometrie	180
Abbildung 7.20:	Probekörpergeometrien zur Untersuchung der Bahnplanungsstrategien	181
Abbildung 7.21:	Probekörper auf der Bauplattform.....	182
Abbildung 7.22:	Mittlere Aufbauhöhenabweichung in Abhängigkeit des variierten Stoßabstandes O_s	183
Abbildung 7.23:	Mittlere Aufbauhöhenabweichung in Abhängigkeit der Rampenzeit t_R	184
Abbildung 7.24:	Probekörpergeometrie zur Ermittlung der aktuellen Lagenhöhe t_{aL} und der Aufbauhöhenabweichung ΔH	185
Abbildung 7.25:	Hergestellte Probekörper unter Verwendung variiertes Schichtebeneinteilungen.....	185
Abbildung 7.26:	Aufbauhöhenabweichungen für variierte Schichtebeneinteilungen sowie unterschiedliche Aufbauhöhen.....	186
Abbildung 7.27:	Strategien zur Fertigung von Überhangstrukturen (a) Herstellung von Überhängen mittels Bahnversatz; (b) Herstellung von Überhängen mittels Überlagerung von Bahnversatz und Bauplattformanstellung	187
Abbildung 7.28:	Hergestellte Überhangstrukturen für unterschiedliche Überhangwinkel	188
Abbildung 7.29:	(a) Einmessen der Wandstrukturen mit der KMM Wenzel LH87 und dem ShapeTracer; (b) Untersuchung der geometrischen Maßhaltigkeit in Abhängigkeit des Überhangwinkels $\varphi_{\text{Überhang}}$	188
Abbildung 7.30:	Geometrische Maßhaltigkeit in Abhängigkeit der Überhangwinkel	189
Abbildung 7.31:	(a) Bezeichnung der Segmente für die Probekörpergeometrie; (b) Positionierung der Aufbaustrategien auf der Bauplattform.....	190

Abbildung 7.32:	Vorgehensweisen innerhalb der Aufbaustrategien (a) Schnittdarstellung der Segmente; (b) segmentweise Aufbaustrategie; (c) blockweise Aufbaustrategie; (d) lagenweise Aufbaustrategie	191
Abbildung 7.33:	Alternierende Start- und Endpunktwahl für aufeinanderfolgende Lagen am Beispiel der dritten Aufbaustrategie	192
Abbildung 7.34:	Probekörper zur Untersuchung des Einflusses der Bearbeitungsstrategieauswahl	192
Abbildung 7.35:	Ermittlung der geometrischen Maßhaltigkeit mit der KMM Wenzel LH87 (a) aufgebaute Probekörper Geometrien; (b) Abgleich zwischen Soll- und Ist-Geometrie; (c) Auswertung der geometrischen Maßhaltigkeit	193
Abbildung 7.36:	(a) Repräsentatives Testbauteil für Titan-Flugzeugstrukturen nach [Nor19]; (b) Adaptierte Geometrie zur Demonstration und Optimierung der Prozessstrategie	196
Abbildung 7.37:	Referenzfertigung des Demonstrators ohne Anwendung der erarbeiteten Prozessstrategie (Herstellung in Folge der Geometrieabweichung abgebrochen)	197
Abbildung 7.38:	Hergestelltes Demonstratorbauteil präpariert für die Vermessung	198
Abbildung 7.39:	(a) Demonstratorfertigung mit optimierter Prozessstrategie; (b) Abgleich mit der Referenzgeometrie; (c) Bewertung der geometrischen Maßhaltigkeit der hergestellten Struktur	199
Abbildung 8.1:	Erarbeitete Prozesskette für das Laser-Pulver-Auftragschweißen	201
Abbildung 8.2:	(a) Einbausituation der DHA-Brackets im Flugzeug (rot); (b) vernetzte Designräume der DHA-Brackets (türkis und grün); (c) Topologieoptimierungsergebnisse mit maximaler relativer Zieldichte von 30 % (rot: Anschlussplatte); Abbildungen nach [Sas11]	202

Abbildung 8.3:	Interpretation der Optimierungsergebnisse für die LBM-Fertigung nach [Sas11]	202
Abbildung 8.4:	(a) Konstruktion für den LBM Prozess nach [Sas11]; (b) konstruktive Adaption für den LPA Prozess; (c) inkl. Segmentierung; (d) Aufbastrategie für die segmentierte Konstruktion.....	203
Abbildung 8.5:	Entwickelte virtuelle Prozesskette zur Arbeitsplanung und Ableitung der Bearbeitungsstrategie	204
Abbildung 8.6:	Datenbank zur Organisation der parametrisierten Bearbeitungsdatensätze	205
Abbildung 8.7:	(a) Aufbastrategie für das erste Segment (rot: Werkstück-KOS; schwarz: Werkzeug-KOS (Ursprung im TCP)) ; (b) reorientierte Aufbastrategie mit angepasstem Lagenaufbau	206
Abbildung 8.8:	Evolution der Parametersätze innerhalb von vier Generationen im Suchraum (die sich entwickelnden Generationen werden durch die zunehmende Markierungsgröße repräsentiert)	207
Abbildung 8.9:	Aggregierte Bewertung der vier Generationen für den erweiterten Suchraum.....	208
Abbildung 8.10:	Demonstratorfertigung ohne Optimierung; (a) Kumulation der Prozesswärme für kurze Elementlängen führt zu Sollkonturabweichungen; (b) Bearbeitungsstrategiebedingte Prozessstarts resultieren in variierender Wandstärke; (c) Ansatzbereich nach initialem Prozessabbruch.....	210
Abbildung 8.11:	Bewertung der Demonstratorfertigung ohne Optimierung (a) Überlagerung der Messpunktewolke mit der CAD-Geometrie; (b) Geometrische Maßhaltigkeit der gefertigten Geometrie.....	210
Abbildung 8.12:	(a) Demonstratorfertigung mit optimierter Prozessierung; (b) Abgleich der Messpunktewolke mit der Referenzgeometrie; (c) Geometrische Maßhaltigkeit des Demonstrators	212
Abbildung 8.13:	Endkonturnaher Demonstrator nach dem LPA-Prozess.....	214

Abbildung 9.1:	Betrachtete Bauteile zur Bewertung der Nachhaltigkeit (a) DHA-Bracket; (b) Doorstop; (c) CCRC-Bracket.....	219
Abbildung 9.2:	Fünf Phasen des <i>Carbon Footprint</i> (in Anlehnung an [EOS13, MQK07, Wit15]).....	221
Abbildung 9.3:	Prozessschritte in der additiven und konventionellen Fertigung für die vorgestellten Bauteile.....	223
Abbildung 9.4:	Relative Energieverbräuche der Verfahren in Relation zur Fräsbearbeitung.....	230
Abbildung 9.5:	Gegenüberstellung der bauteilspezifischen CO ₂ - Emissionen für verschiedene Fertigungsverfahren.....	232
Abbildung 9.6:	Tagesschlusswerte für EUA Zertifikate an der EEX (Werte aus [EEX19]).....	233
Abbildung 9.7:	Prozesskette für das LPA-Verfahren zur Fertigung von Titanstrukturen für die Luftfahrt	234
Abbildung 9.8:	Anordnung des DHA-Brackets auf der Bauplattform für die Fertigung mit $n_{BP} = 4$	235
Abbildung 9.9:	Kostenpotenziale konventioneller und additiver Produktionstechnologien.....	239
Abbildung A.1:	Materialdatenblatt des eingesetzten Pulverwerkstoffes.....	296
Abbildung A.2:	Fokusbereich im Bearbeitungsabstand von 16 mm in Abhängigkeit der Einstellung der Fokusverstellung für die Optik BEO70D	297

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
3D	dreidimensional
AfA	Absetzung für Abnutzung
AM	Additive Manufacturing
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CAD	Computer-Aided Design
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CCD	Charge Coupled Device
CCM	Crack Compliance Method
CCRC	Cabin Crew Rest Compartment
CDS	Crowd-Distance Sorting
CE	Cumulative Energy Demand
CF	Carbon Footprint
CM	CNC Machining
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
d. h.	das heißt
DHA	Door Hinge Arm Bracket
DMS	Dehnungsmesstreifen
DXF	Drawing Interchange File
EA	Evolutionärer Algorithmus
EBM	Electron Beam Melting
EC	Environmental Costs
EEX	European Energy Exchange
EIGA	Electrode Induction Melting Inert Gas Atomization

Abkürzung	Beschreibung
EUA	Emission Unit Allowance
EU-EHS	Europäisches Emissionshandelssystem
Fa.	Firma
FDM	Fused Deposition Modeling
FEM	Finite-Elemente-Methode
GA	Genetischer Algorithmus
Gen.	Generation
hdP	hexagonal-dichteste Packung
HIP	heißisostatisches Pressen
HMI	Human Machine Interface
HV	Vickershärte
IC	Investment Casting
ICPA	Inductively Coupled Plasma Atomization
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry
ICP-OES	Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectrometry
krz	kubisch-raumzentriert
KMM	Koordinatenmessmaschine
KOS	Koordinatensystem
KRL	Kuka Robot Language
LBM	Laser Beam Melting
LPA	Laser-Pulver-Auftragschweißen
MD	Manhattan-Distanz
MES	Manufacturing Execution Systems
MOGA	Multi Objective Genetic Algorithm
MPGA	Multi Population Genetic Algorithm
NDS	nicht-dominierte Sortierung

Abkürzung	Beschreibung
N-Pulver	Neupulver
NPGA	Niched Pareto Genetic Algorithm
NSGA-II	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
p. a.	per annum
Par.	Parametersatz
PF	Pareto-Front
QS	Qualitätssicherung
RB	Randbedingungen
REM	Rasterelektronenmikroskop
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SD	Standard Deviation
SPEA2	Strength Pareto Evolutionary Algorithm
ST	ShapeTracer
STL	Standard Triangulation Language
TCP	Tool Center Point
TE	Thermoelement
u. a.	unter anderem
UN	United Nations
UNCED	United Nations Conference on Environment and Development
VEGA	Vector Evaluated Genetic Algorithm
vgl.	vergleiche
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing
WEDM	Wire Electrical Discharge Machining
YAG	Yttrium-Aluminium-Granat
z. B.	zum Beispiel
ZF	Zielfunktion

Abkürzung

Beschreibung

ZFE

Zielfunktionsstörungseinfluss

ZTU

Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Diagramm

Formelverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
α_{fe}	Wärmeübergangskoeffizient (Konduktion)	W/m ² K
α_k	Wärmeübergangszahl (Konvektion)	W/m ² K
α_{Ti64}	linearer Expansionskoeffizient der Legierung Ti-6Al-4V	10 ⁻⁶ /K
δ_{Abw}	systematische Abweichungen	mm
ε_{Abw}	zufällige Messwertstreuungen	mm
ε_{App}	approximierte Dehnungen	μ m
$\{\varepsilon_{MC}\}$	randomisierter Dehnungsvektor Monte-Carlo-Simulation	μ m
ε_{Mess}	gemessene Dehnungen	μ m
ε_s	spezifischer Emissionskoeffizient	-
$\eta_{Pul,approx.}$	approximierter Pulverwirkungsgrad	-
η_{Pulver}	Pulverwirkungsgrad	-
$\eta_{Pulver,Recycle}$	Pulverrecyclinganteil	-
η_{Raum}	Suchraumabdeckung	%
$\Theta_{Porosität}$	Porosität	%
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(m K)
λ_{Ti64}	Wärmeleitfähigkeit der Legierung Ti-6Al-4V	W/(m K)
μ_{MC}	Erwartungswert Normalverteilung Monte-Carlo-Simulation	μ m
μ_x	Erwartungswert der Streuwertbetrachtung	mm
ν_{Ti64}	Poissonzahl der Legierung Ti-6Al-4V	-
ν_V	Verteilungsschiefe	-
$\zeta_{V,Re}$	reflektierter Leistungsanteil im Pulverstrom	-
$\bar{\varepsilon}_T$	Transmissionsgrad	-
ρ_{Ti64}	Dichte der Legierung Ti-6Al-4V	g/cm ³
σ	Spannungsverlauf	N/mm ²

Symbol	Beschreibung	Einheit
σ^∞	orthogonale Last am Riss in unendlicher Entfernung	N/mm ²
$\{\sigma_{ES}\}$	Spannungsvektor des Eigenspannungsverlaufs	N/mm ²
σ_{MW}	Streuung der Messwerte	-
$\{\sigma_{MC}\}$	Spannungsvektor der Monte-Carlo-Simulation	N/mm ²
σ_s	Stefan-Boltzmann-Konstante($\sigma_s = 5,6704 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$)	W/(m ² K ⁴)
σ_{yy}	Normalspannungsverlauf entlang der x -Achse in y -Richtung	N/mm ²
φ	Polarkoordinate	-
$\varphi_{\text{Überhang}}$	Überhangwinkel	°
$\Phi_{\text{Anstellung}}$	Anstellwinkel	°
Φ_{Asp}	Aspektverhältnis	-
$\Phi_{\text{Asp},i}$	gemessenes Aspektverhältnis	-
$\Phi_{\text{Asp,optimal}}$	optimales Aspektverhältnis	-
Φ_{Probe}	Probendichte	%
Ψ_{Auf}	Aufmischungsverhältnis	-
Ω_{Strecke}	Streckenmasse	g/m
a	Schnittlänge	mm
a_{Ero}	Raumbedarf des Erodieranlage	m ²
a_{F}	Raumbedarf des CNC-Bearbeitungszentrums	m ²
a_i	Schnittinkrement	µm
a_1	Kalibrationsparameter	-
a_{LPA}	Raumbedarf der LPA-Bearbeitungszelle	m ²
a_{S}	Raumbedarf der Laserschweißanlage	m ²
a_{W}	Raumbedarf des Wärmebehandlungsofens	m ²
$\{A\}$	Amplitudenvektor	-