

UTZVERLAG

FORSCHUNGSBERICHTE

351

Christian Markus Seidel
Finite-Elemente-Simulation des
Aufbauprozesses beim Laserstrahlschmelzen

Christian Markus Seidel

**Finite-Elemente-Simulation des Aufbauprozesses
beim Laserstrahlschmelzen**

utzverlag · München 2019

Forschungsberichte iwb
Band 351

Ebook (PDF)-Ausgabe:
ISBN 978-3-8316-7520-3 Version: 1 vom
Copyright© utzverlag 2019

Alternative Ausgabe: Softcover
ISBN 978-3-8316-4833-7
Copyright© utzverlag 2019

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für
Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik

Finite-Elemente-Simulation des Aufbauprozesses beim Laserstrahlschmelzen

Christian Markus Seidel

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh
2. Hon.-Prof. Dr.-Ing. Thomas J. Uihlein
(Brandenburgische Technische Universität Cottbus)

Die Dissertation wurde am 12.05.2016 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 05.07.2016 angenommen.

Christian Markus Seidel

**Finite-Elemente-Simulation des
Aufbauprozesses beim Laserstrahlschmelzen**



Forschungsberichte IWB

Band 351

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2016

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

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Sämtliche, auch auszugsweise Verwertungen
bleiben vorbehalten.

Copyright © utzverlag GmbH · 2019

ISBN 978-3-8316-4833-7 (gebundenes Buch)
ISBN 978-3-8316-7520-3 (E-Book)

Printed in Germany
utzverlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Vorwort

Die Simulation des Laserstrahlschmelzens hat in den letzten Jahren deutlich an Bedeutung gewonnen. Zahlreiche große Softwarehäuser bieten zwischenzeitlich kommerziell verfügbare Softwaretools an, mit denen die Vorhersage von Maßhaltigkeitsabweichungen und Eigenspannungen möglich sein soll. Aus diesem Grund habe ich mich entschieden, einige Jahre nach dem Abschluss meiner Promotion, die vorliegende Dissertation über den Utz-Verlag verfügbar zu machen. Die Inhalte dieses Werks entstanden während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München im Zeitraum von 2012 bis 2014.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh und Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, den Leitern des *iwb*, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit. Durch ihre begeisterte Art, im Themenfeld Produktion an der Technischen Universität München zu lehren, haben sie maßgeblich dazu beigetragen, dass ich mich für die Erstellung dieser Arbeit entschieden habe. Ihre konstruktiv kritischen Rückmeldungen haben darüber hinaus im positivsten Sinne meine Arbeitsweise geprägt. Heute sind Michael Zäh und Gunther Reinhart Vorbilder für meine eigenen Lehraktivitäten an der Hochschule München.

Des Weiteren gilt mein herzlicher Dank Herrn Hon.-Prof. Dr.-Ing. Thomas J. Uihlein von der Brandenburgisch Technischen Universität Cottbus für die zahlreichen Diskussionen zur Arbeit und für die Übernahme des Korreferates. Herrn Prof. Dr.-Ing. Marc Lotz und Herrn Prof. Dr.-Ing. Johannes Schilp möchte ich für die kritische und konstruktive Durchsicht dieser Arbeit danken. Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Studierenden, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben, sowie allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des *iwb*. Dazu gehören vor allem Herr Martin Wunderer, Herr Dr.-Ing. Toni Adam Krol und Herr Johannes Weirather. Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der MTU Aero Engines AG, die am Projekt *AeroSim* beteiligt waren, sowie Herrn Clemens Groth von der CADFEM GmbH danke ich für die ausgezeichnete Zusammenarbeit.

Ich möchte meinen Freunden Dank aussprechen, die mir durch ihr Interesse an der Arbeit sowie ihre verständnisvolle Art eine wesentliche und kontinuierliche Unterstützung waren. Abschließend gilt der größte Dank meiner Familie und im Speziellen Jill, Hannelore, Markus und Verena, die mich vergleichslos während der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

München, November 2019

Prof. Dr.-Ing. Christian M. Seidel

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Abkürzungsverzeichnis.....	vii
Verzeichnis der Formelzeichen.....	ix
1 Einleitung	1
1.1 Additive Fertigung und Laserstrahlschmelzen.....	1
1.2 Motivation	3
1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise.....	5
2 Grundlagen	9
2.1 Begriffsdefinitionen.....	9
2.1.1 Aufbauprozess, -modell, -simulation.....	9
2.1.2 Einzelspur-, Einzelschicht-, Multischichtsimulation	9
2.1.3 Aufwandsindex im Kontext der Simulation	10
2.1.4 Filigraner Bauteilbereich.....	12
2.2 Laserstrahlschmelzen	13
2.3 Schichtdaten als Informationsquelle	14
2.3.1 Schichterzeugung (Slicen)	14
2.3.2 Schichtdaten im CLI-Format	16
2.4 Finite-Elemente-Simulation des Laserstrahlschmelzens.....	18
2.4.1 Ablauf einer Finite-Elemente-Berechnung	18
2.4.2 Thermomechanische Simulation des Aufbauprozesses	19

3	Stand der Technik zur Aufbauprozesssimulation.....	23
3.1	Vorgehen	23
3.2	Forschergruppe Livermore, USA	23
3.3	Forschergruppe Louisville, USA	25
3.4	Forschergruppe Augsburg, Deutschland	27
3.5	Forschergruppe Bremen, Deutschland	30
3.6	EU-gefördertes Forschungsprojekt Merlin	31
3.7	Weitere relevante Arbeiten.....	32
3.8	Resümee zum Stand der Technik	33
3.9	Angestrebter Erkenntniszugewinn durch diese Arbeit.....	34
4	Anforderungen an die Aufbauprozesssimulation	39
4.1	Vorgehen	39
4.2	Ergebnisse der Anwenderbefragung	39
4.3	Anforderungen durch zukünftige Entwicklungen.....	43
4.4	Anforderungen auf Basis einer Prozessanalyse	44
4.4.1	Vorgehen und Randbedingungen	44
4.4.2	Bauteilmodellierung.....	46
4.4.3	Materialmodellierung.....	49
4.4.4	Modellierung der Wärmeeinbringung	51
4.4.5	Modellierung von Umgebungseinflüssen	52
4.5	Zusammenfassung.....	53
5	Methoden zur Modellierung des Aufbauprozesses	55
5.1	Digitale Prozesskette zur Bauteilmodellierung.....	55
5.1.1	Vorgehen.....	55

5.1.2	Auswahl eines Datenformats	56
5.1.3	Prozesskette unter Verwendung von Anlagendaten	62
5.1.4	Filigranitätsbewertung	65
5.2	Elasto-plastische Materialmodellierung	79
5.2.1	Vorgehen	79
5.2.2	Einflussanalyse der Verformungsarten	80
5.2.3	Planung von Warmzugversuchen	86
5.2.4	Durchführung und Auswertung von Warmzugversuchen	93
5.2.5	Diskussion des Gültigkeitsbereichs	98
5.3	Modellierung der Wärmeeinbringung in Schichtverbunde	103
5.3.1	Vorgehen	103
5.3.2	Modellierung der Belichtungsstrategie	104
5.3.3	Multi-Skalen-Ansatz zur Wahl von Lastparametern	111
5.3.4	Zeitschrittweiten bei einer sequenziellen Kopplung	122
5.4	Modellierung von Umgebungseinflüssen	125
5.4.1	Vorgehen	125
5.4.2	Bauplatte und umliegende Maschinenstruktur	126
5.4.3	Fertigung umliegender Bauteile	128
5.5	Zusammenfassung	131
6	Anwendung der Aufbauprozesssimulation	133
6.1	Vorgehen	133
6.2	Modellbeschreibung	134
6.2.1	Strukturierung nach DIN SPEC 32534-1	134
6.2.2	Physikalisches Modell	135

6.2.3	Mathematisches Modell und Lösungsmethode	136
6.2.4	Implementierung	136
6.3	Grundlagenstudien an Laborbauteilen	140
6.3.1	Stehender und liegender Quader	140
6.3.2	Brückengeometrien	143
6.4	Simulationsgestützte Prozessauslegung	148
6.4.1	„Boroskopauge“ – Fertigungsvariantenvergleich	148
6.4.2	Triebwerksschaufel – lokale Prozessparameteranpassung ..	151
6.4.3	Triebwerksschaufel – Vordeformation	157
6.5	Bewertung	159
6.5.1	Resümee in Bezug auf die Anwenderanforderungen	159
6.5.2	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	161
7	Zusammenfassung und Ausblick	163
7.1	Zusammenfassung	163
7.2	Ausblick	165
8	Literaturverzeichnis	169
9	Anhang	183
9.1	Fragebogen zur Anwenderbefragung	183
9.2	Algorithmus zum Sortieren von CLI-Daten	185
9.3	Bewertung der Filigranität anhand von Beispielbauteilen	186
9.4	Programm zur Ermittlung von Materialmodellen	189
9.5	Untersuchungen zur Rosenthal-Lösung	190
9.6	Materialmodelle	192

9.6.1	Vorbemerkungen.....	192
9.6.2	Bauplattenwerkstoff 1.1730.....	192
9.6.3	Laserstrahlgeschmolzenes Inconel 718.....	195
9.6.4	Pulverförmiges Inconel 718.....	197
9.7	Verzeichnis betreuter Studienarbeiten.....	198

Abkürzungsverzeichnis

APDL	Skriptsprache innerhalb der Software ANSYS® Mechanical (aus dem Englischen: <i>Ansys Parametric Design Language</i>)
AP	Auswertepunkt
BKIN	Materialmodellierung durch eine stetig stückweise lineare Approximation der Spannungs-Dehnungs-Kurve mit zwei Stützstellen (aus dem Englischen: <i>Bilinear Kinematic Hardening</i>)
CLI	Dateiformat für Schichtinformationen in der additiven Fertigung (aus dem Englischen: <i>Common Layer Interface</i>)
DB	Deckbänder einer Triebwerksschaufel
EBM	Elektronenstrahlschmelzen (aus dem Englischen: <i>Electron Beam Melting</i>)
engl.	englisch
FE	Finite-Elemente
FEA	Finite-Elemente-Analyse
FFB	Freiformbereich einer Triebwerksschaufel
KINH	Materialmodellierung durch eine stetig stückweise lineare Approximation einer Spannungs-Dehnungs-Kurve mit mehreren Stützstellen (aus dem Englischen: <i>Multilinear Kinematic Hardening</i>)
KP	kritischer Punkt
LBM	Laserstrahlschmelzen (aus dem Englischen: <i>Laser Beam Melting</i>)
LBM-Bauteile	laserstrahlgeschmolzene Bauteile
LLNL	<i>Lawrence Livermore National Laboratory</i>
LS	Längenskalen

NPV	Kapitalwert (aus dem Englischen: <i>Net Present Value</i>), synonym: (Netto-)Barwert oder Netto-Kapitalwert
PPP	Modellkonfiguration der Forschergruppe Livermore (aus dem Englischen: <i>Process-Property-Performance-Connection</i>)
RT	Raumtemperatur
STL	Dateiformat für Oberflächenmodelle (aus dem Englischen: <i>Surface Tessellation Language</i>)
SVB	Schichtverbund
ZS	Zeitskalen

Verzeichnis der Formelzeichen

Große lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	mm^2	Fläche
A_{owQ}	$\mu\text{m}^2 \mid \text{mm}^2$	Fläche der Oberflächenwärmequelle
$A_{Schicht,i}$	mm^2	zu belichtende Fläche des Schichtverbunds i
AI	$\text{min}/\%$	Aufwandsindex
$C1$	Pa	Parameter für die BKIN-Materialmodellierung, welcher der Elastizitätsgrenze entspricht
$C2$	Pa	Parameter für die BKIN-Materialmodellierung, welcher dem Tangentenmodul entspricht
C_t	€	Zahlungen, die im Zusammenhang mit einer Investition stehen
E_i	N/mm^2	Elastizitätsmodul, Laufvariable i
E_g	%	Ergebnisgenauigkeit
\tilde{F}	N	Last im elastischen Bereich
F_B	N	Biegekraft während des Beschichtungsvorgangs
I	mm^4	Flächenträgheitsmoment
L_i	mm	Länge i eines Laserverfahrvektors
$L_{\text{Vektoren,gesamt}}$	mm	kumulierte Gesamtlänge der Laserverfahrvektoren pro Scanfläche
$L_{\text{Vektoren,Fläche}}$	mm	aneinandergereihte Gesamtlänge aller Laserverfahrvektoren einer Schicht

Verzeichnis der Formelzeichen

$MP_{AK,m}$	–	Mittelpunkte von Konturlinien, Laufvariable m
M_{max}	Nmm	maximal auftretendes Biegemoment
$N_{Berech,th}$	–	Berechnungsschritt der thermischen Analyse
$N_{Flächen,Schicht}$	–	Anzahl angestrebter Scanflächen pro Schicht
$N_{Last,th}$	–	Lastschritt der thermischen Analyse
$N_{Last,m}$	–	Lastschritt der mechanischen Analyse
$N_{Zwischen,th}$	–	Zwischenberechnungsschritt der thermischen Analyse
$P_i \mid P_j \mid P_n$	–	Betrachtungspunkte P mit Laufvariable i, j oder n
P_L	W	Laserleistung
Q	W/m ³	volumetrische Wärmeerzeugung
Q_0	J	eingebrachte Wärmeenergie
R	mm	Zylinderradius
$R_{pi,j}$	N/mm ² MPa	Ersatzstreckgrenze bei i % plastischem Rest- anteil und einem Probenaufbauwinkel j zur x- y-Ebene in °
$R_{m,j}$	N/mm ² MPa	Zugfestigkeit bei einem Probenaufbauwinkel j zur x-y-Ebene in °
S	–	Sicherheitsfaktor
\dot{T}	K/s	(zeitlich veränderliche) Temperaturrate
T_0	K	Starttemperatur
T_B	K	Bauplattentemperatur an der Unterseite
$T_{S,i}$	K	Solidustemperatur des Werkstoffes i
W_i	°	Winkel zwischen zwei Laserverfahrvektoren

Kleine lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
a	–	Absorptionsgrad
b	mm	Breite der Streifen bei der Streifenbelichtung
b_{SI}	mm	Breite der von der Schmelzisothermen eingeschlossenen Fläche
b_{SSB}	mm	Breite der Schmelzspur
c_p	J/(kg·K)	spezifische Wärmekapazität
d_a	mm	Distanz zu einem Kontrollvolumen
d_B	mm	Dicke einer Bauplatte
d_F	mm	Laserfokusedurchmesser
d_S	μm	Schichtdicke
e_S	μm	Elementlänge
e_h	μm	Elementhöhe
h_g	mm	Gesamthöhe
h_{SVB}	μm	Höhe des Schichtverbunds
k	–	Kalibrierungsfaktor des Einzelschichtmodells
l_{SI}	μm	Länge der von der Schmelzisothermen eingeschlossenen Fläche
l_x	mm	Längenmaß in x-Richtung
l_y	mm	Längenmaß in y-Richtung
n	–	Schichtnummer
$q_{Einzelschicht}$	W/m ²	Oberflächenwärmequelle des Einzelschichtmodells
r	–	Zinssatz

Verzeichnis der Formelzeichen

$t_{\text{Abkühl},i}$	s	Dauer der Abkühlphase j in Schicht i
t_B	min	Berechnungsdauer
$t_{\text{Belichtung},i}$	s	Belichtungsdauer der Schicht i
$t_{\text{Beschichtung}}$	s	Dauer für einen Beschichtungsvorgang
t_{Last}	s	Lastdauer
t_{SB}	μm	Schmelzbadtiefe
v_c	mm/s	Scangeschwindigkeit
$v_{\text{Schutzgas}}$	m/s	Strömungsgeschwindigkeit des Schutzgases
v_{zieh}	mm/s	Spannbacken-Ziehgeschwindigkeit
x, y, z	–	kartesische Koordinatenrichtungen

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
α	1/K	thermischer Längenausdehnungskoeffizient
$\alpha_{\text{Oberseite}}$	W/(m ² ·K)	Wärmeübergangskoeffizient an der Oberseite einer Pulverschicht
β_i	°	Steigungswinkel einer Geraden i
γ	°	Inkrementwinkel bei der Streifenbelichtung
δ	°	Winkel zur x-y-Ebene
Δ	° J K s	Differenz, z. B. Temperaturdifferenz in K
ε	–	Dehnung
$\varepsilon_{\text{long}}$	–	Längsdehnung
$\dot{\varepsilon}_{\text{long},i}$	1/s	Längsdehnrates für $i^\circ\text{C}$
$\varepsilon_{\text{Prozess}}$	–	im Prozess auftretende Dehnung
$\dot{\varepsilon}_{\text{Prozess},i}$	1/s	im Prozess auftretende Dehnrates für $i^\circ\text{C}$
$\varepsilon_{\text{trans}}$	–	Querdehnung

$\dot{\epsilon}_{trans,i}$	1/s	Querdehnrate für $i^\circ\text{C}$
λ	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit
ν_{el}	–	Querkontraktionszahl im elastischen Bereich
$\nu_{i,j}$	–	Querkontraktionszahl bei einer Temperatur i in $^\circ\text{C}$ und einer Orientierung j zur x-y-Ebene in $^\circ$
ν_{pla}	–	Querkontraktionszahl im plastischen Bereich
ρ	kg/m ³	Dichte
σ	N/mm ² MPa	Spannung
σ_B	W/(m ² ·K ⁴)	Stefan-Boltzmann-Konstante
σ_{max}	N/mm ²	maximal auftretende Biegespannung
$\sigma_{s,i}$	N/mm ²	Spannungsschwelle, Laufvariable i

Matrizen [.] und Vektoren {.}

Symbol	Einheit	Bedeutung
$[C_T]$	–	Wärmekapazitätsmatrix
$\{F_i\}$	–	beispielhafter Kraftvektor, Laufvariable i
$[K_T]$	–	Wärmeleitmatrix
$[K_{ij}]$	–	Steifigkeitsmatrix i, j
$\{\dot{Q}\}$	–	Vektor der Knotenpunktswärmeleistungen
$\{T\}$	–	Vektor der Knotenpunktstemperatur
$\{\dot{T}\}$	–	Vektor der Ableitung der Knotenpunktstemperatur nach der Zeit
$\{u\}$	–	Vektor der Knotenpunktverschiebungen
$\{\dot{u}\}$	–	Vektor der Knotenpunktgeschwindigkeiten
$\{\ddot{u}\}$	–	Vektor der Knotenpunktsbeschleunigungen
$\{X_i\}$	–	Freiheitsgrad einer FEA, Laufvariable i

1 Einleitung

1.1 Additive Fertigung und Laserstrahlschmelzen

Die additive Fertigung ist für zukünftige Produktionssysteme eine potenzialbehaftete Technologie, um individualisierte und komplexe Produkte wirtschaftlich zu fertigen (WOHLERS 2015, ROLAND BERGER STRATEGY CONSULTANTS GMBH 2013, MANYIKA ET AL. 2013, GEBHARDT 2012). Die häufig auch als dreidimensionales Drucken (3-D-Drucken) bezeichneten additiven Fertigungsverfahren (VDI-RICHTLINIE 3405) sind durch einen charakteristischen schichtweisen Aufbau von Bauteilen gekennzeichnet. Dadurch lassen sich geometrisch komplexe Merkmale herstellen (z. B. Hinterschnitte, Hohlräume, gekrümmte Bohrungen, Kugel in Kugel). Es existiert heute bereits eine Vielzahl an Verfahrensvarianten der additiven Fertigung am Markt, sodass Ausgangsmaterialien aus Kunststoff, Metall oder Keramik in verschiedenen Ausgangsformen verarbeitet werden können (WOHLERS 2014). In den 1990er-Jahren kam die erste metallverarbeitende additive Fertigungsanlage auf den Markt (ZÄH 2006), welche es ermöglicht, schichtweise Bauteile aus metallischem Pulverwerkstoff zu generieren. Der zugrunde liegende Prozess ist heute als Laserstrahlschmelzen (LBM, aus dem Englischen *Laser Beam Melting*) definiert (VDI-RICHTLINIE 3405) und am Markt unter verschiedenen unternehmensspezifischen Bezeichnungen verfügbar. Diese sind bei Anwendern stellenweise bekannter als der genormte Begriff, weswegen nachfolgend einige Beispiele nach WOHLERS (2014) zur besseren Einordnung dieser Arbeit aufgeführt werden: Direct Metal Laser Sintering (DMLS, EOS GmbH), LaserCUSING (Concept Laser GmbH), Selective Laser Melting (Realizer GmbH, SLM Solutions AG).

Die mittels LBM hergestellten Bauteile besitzen typischerweise eine relative Dichte von nahezu 100 % in Relation zum konventionell hergestellten Grundmaterial und können heute aufgrund ihrer Eigenschaften auch für Hochtechnologieanwendungen eingesetzt werden (VDI-RICHTLINIE 3405). Aus diesem Grund wird LBM von Unternehmensvertretern (ROLAND BERGER STRATEGY CONSULTANTS GMBH 2013, MANYIKA ET AL. 2013) als eines der potenzialbehaftetsten additiven Fertigungsverfahren angesehen und hat in einigen Branchen den Paradigmenwechsel vom Prototyping-Verfahren zum Produktionsverfahren vollzogen (WOHLERS 2015). Das Verfahrensprinzip des LBM beruht darauf, dass ein pulverförmiges Ausgangsmaterial durch Absorption von Laserstrahlung entsprechend den digital vorliegenden Schichtinformationen lokal aufgeschmolzen wird.

1 Einleitung

Eine Verfestigung durch den Laser erfolgt demnach lediglich in Bereichen, in denen nach Prozessende verfestigtes Material vorliegen soll. Ist eine Schicht vollständig belichtet, wird die Bauplattform um eine Schichtdicke abgesenkt und eine neue Pulverschicht aufgetragen. Dieser Zyklus aus *Pulverauftrag*, *Belichtung* und *Absenkung der Bauplattform* wird solange durchlaufen, bis das zu fertigende Bauteil vollständig generiert ist. Abbildung 1-1 zeigt einige Beispielbauteile, die mittels Laserstrahlschmelzen hergestellt wurden.



Abbildung 1-1: Beispielbauteile, hergestellt mittels Laserstrahlschmelzen

Aufgrund der erreichbaren Bauteileigenschaften hinsichtlich z. B. der Oberflächenrauheit, des Eigenspannungszustandes oder der Maßhaltigkeit stellt der additive Aufbauprozess meist lediglich einen Teil der Prozesskette zur Komplettbearbeitung eines Bauteils dar. Abbildung 1-2 zeigt daher das Laserstrahlschmelzen als Teil einer exemplarischen Kette mit typischen Pre- und Post-Prozessen. Die als CAD-Modell vorliegende Bauteilbeschreibung ist zunächst einer Datenvorbereitung zu unterziehen. Diese beinhaltet unter anderem das Zerlegen (sog. *Slicen*) der aufzubauenden Geometrie in Schichten und darauf aufbauend das Ableiten von Anlagensteuerungsdaten. Im Anschluss an den Aufbauprozess erfolgt beispielsweise eine Wärmebehandlung zur Reduzierung prozessbedingter Eigenspannungen oder eine spanende Nachbearbeitung.

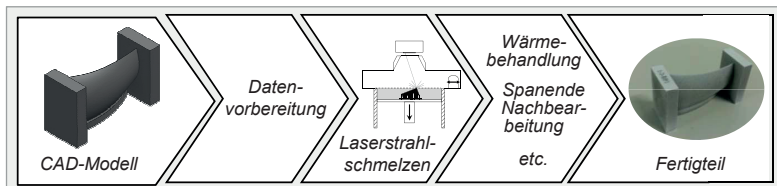


Abbildung 1-2: Laserstrahlschmelzen als Teil einer typischen Prozesskette