PROZESSTECHNOLOGIE

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Moritz Wollbrink

Methodik zur Integration pulverbettbasierter additiver Fertigungstechnologien in Fertigungsprozessketten

Edition Wissenschaft Apprimus

Methodik zur Integration pulverbettbasierter additiver Fertigungstechnologien in Fertigungsprozessketten

Methodology for the Integration of Powder Bed-based Additive Manufacturing Technologies in Manufacturing Process Chains

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
D o k t o r s d e r I n g e n i e u r w i s s e n s c h a f t e n
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Moritz Wollbrink

Berichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs
apl. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Boos

Tag der mündlichen Prüfung: 18. März 2022

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Moritz Wollbrink

Methodik zur Integration pulverbettbasierter additiver Fertigungstechnologien in Fertigungsprozessketten

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. T. Bergs
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. G. Schuh
Prof. Dr.-Ing. C. Brecher
Prof. Dr.-Ing. R. H. Schmitt

Band 20/2022

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über https://portal.dnb.de abrufbar.

Moritz Wollbrink:

Methodik zur Integration pulverbettbasierter additiver Fertigungstechnologien in Fertigungsprozessketten

1. Auflage, 2022

Apprimus Verlag, Aachen, 2022
Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien
an der RWTH Aachen
Steinbachstr. 25, 52074 Aachen
Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

ISBN 978-3-98555-077-7

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2022)

Vorwort und Danksagung

Preamble and Acknowledgement

Die Prozesskettengestaltung und die additive Fertigung haben mich von Beginn an durch meine Zeit am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT begleitet. Daraus ist das Thema dieser Dissertation erwachsen, dessen besondere Relevanz ich in Forschungs- und vielen Industrieprojekten gemeinsam mit immer konstruktiven Projektpartnern erfuhr.

Besonders bedanke ich mich bei dem Lehrstuhlinhaber für Technologie der Fertigungsverfahren am Werkzeugmaschinenlabor der RWTH Aachen und Direktoriumsmitglied sowie Leiter des Bereichs Prozesstechnologie am Fraunhofer IPT, Herrn Prof. Thomas Bergs, für die Begleitung und Betreuung hin zu meiner Promotion. Das von ihm geschaffene exzellente Umfeld am Institut mit fortwährendem Praxisbezug hat erheblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Wolfgang Boos für die freundliche Übernahme des Korreferats und damit das Einbringen der Perspektive des Lehrstuhls für Produktionssystematik am Werkzeugmaschinenlabor. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Johannes Henrich Schleifenbaum als Lehrstuhlinhaber für Digital Additive Production für sein Engagement als Prüfungsvorsitzender. Frau Prof. Julia Kowalski danke ich herzlich für die Übernahme des Beisitzes.

Für die Bereitschaft, Fallbeispiele zur Validierung der entwickelten Methodik bereitzustellen, danke ich der Scheuermann + Heilig GmbH, namentlich Herrn Steffen Scheuermann für die Unterstützung von ihm persönlich und durch sein Team. Außerdem danke ich Herrn Raphael Lienau von der LMT Fette Werkzeugtechnik GmbH & Co. KG für die Zurverfügungstellung von hilfreichen Daten und Informationen. Genauso möchte ich mich bei der Aeronamic B.V., vertreten durch Herrn Renko Overmeen und sein Team, für die Unterstützung bedanken.

Während meiner Zeit am Fraunhofer IPT hat mich stets Herr Prof. Kristian Arntz sehr positiv begleitet und mir die Freiheit der selbstbestimmten Leitung vieler sehr spannender Projekte rund um den Globus gegeben. Ihm danke ich dafür und für die fachliche Erstkorrektur dieser Dissertation. Ich richte meinen Dank an Dr. Dominik Heeschen, der mir den Weg in die Gruppe Technologieorganisation ermöglicht hat und Lars Johannsen, mit dem ich die längste gemeinsame Zeit in der Gruppe verbringen durfte. Meinen ehemaligen Kollegen Dr. Marcel Prümmer, der zur kritischen Durchsicht meiner Arbeit bereit war, Tim Dröscher, Marcel Wilms, Rainer Horstkotte, Oliver Henrichs, Sebastian Weber, Grzegorz Stepien und Christian Lürken danke ich für die großartige Zeit am Institut. Außerdem danke ich herzlich meinen Abschlussarbeitern. Besonders sei Tammo Dannen erwähnt, der einen wichtigen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit erbracht hat und nunmehr ebenfalls zu meinen ehemaligen Kollegen zählt. Neben meinen Abschlussarbeitern danke ich meinen studentischen Hilfskräften, die mich mit großem Einsatz während der Institutszeit unterstützt haben. Ergänzend danke ich allen Kolleginnen und Kollegen, mit denen ich als Leiter des Geschäftsfelds Werkzeugbau zusammenarbeiten durfte sowie allen weiteren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Fraunhofer IPT in den Fach- und Dienstleistungsabteilungen.

Abschließend bedanke ich mich sehr herzlich für die bedingungslose Unterstützung meiner Eltern, meines Bruders und der gesamten Familie. Meiner Freundin Corinna danke ich für die großartige Begleitung während des gesamten Promotionsprozesses, die manchmal notwendige Geduld und den immerwährenden positiven Zuspruch!

Aachen, März 2022 Moritz Wollbrink

Inhaltsübersicht

Outline

1 Einleitung ... 1

1.1 Ausgangssituation und Motivation ... 1
1.2 Zielsetzung ... 3
1.3 Aufbau der Arbeit ... 4

2 Grundlagen des Betrachtungsbereichs ... 7

2.1 Definition in dieser Arbeit genutzter Begriffe ... 7
2.2 Kategorisierung additiver Fertigungstechnologien ... 11
2.3 Einsatzzweck additiver Fertigungstechnologien ... 11
2.4 Pulverbettbasierte additive Fertigungstechnologien ... 15
2.5 Fertigungstechnologien zur Weiterbearbeitung ... 23
2.6 Planung von Fertigungsmitteleinsatz und -prozessketten ... 28
2.7 Leistungsfähigkeitsvergleich additiver und subtraktiver Technologien ... 34
2.8 Zwischenfazit und Handlungsbedarf aus der Praxis ... 36

3 Analyse und Bewertung bestehender Ansätze ... 37

3.1 Methodologie zur Bewertung bestehender Forschungsansätze ... 37
3.2 Bewertungssystematik der Anforderungen an die Methodik ... 38
3.3 Vorstellung bestehender Ansätze ... 42
3.4 Zwischenfazit ... 54
3.5 Bewertung bestehender Ansätze ... 54
3.6 Handlungsbedarf aus der Theorie ... 56
3.7 Konkretisierung zu Forschungsfragen ... 57

4 Konzeption der Integrationsmethodik ... 59

4.1 Angewendete Systemtechnik und Modellierung ... 59
4.2 Ordnungsrahmen der Integrationsmethodik ... 60
4.3 Konzeption der Analysephase zur Aufnahme des Status quo ... 62
4.4 Konzeption der Gestaltungsphase integrierter Fertigungsprozessketten ... 69
4.5 Konzeption der Umsetzungsphase zur Prozesskettenauswahl ... 73
4.6 Zwischenfazit ... 74

5 Ausgestaltung der Integrationsmethodik ... 77

5.1 Ausgestaltung der Initiierung zur Anwendung der Integrationsmethodik ... 78
5.2 Ausgestaltung der Situationsanalyse ... 84
5.3 Ausgestaltung der Prozesskettengenerierung ... 98
5.4 Ausgestaltung der Prozesskettensimulation ... 114
5.5 Ausgestaltung der Prozesskettenselektion ... 118
5.6 Zwischenfazit ... 124

6 Validierung und kritische Reflexion der Methodik ... 127

6.1 Prototypische Softwareumsetzung ... 127
6.2 Vorgehensweise zur Validierung der Methodik ... 128
6.3 Fallbeispiel 1: Aeronamic B.V. ... 129
6.4 Fallbeispiel 2: Scheuermann + Heilig GmbH ... 132

6.5 Fallbeispiel 3: LMT Fette Werkzeugtechnik GmbH & Co. KG ... 137
6.6 Kritische Reflexion ... 142

7 Schlussbetrachtung ... 145

7.1 Zusammenfassung ... 145
7.2 Ausblick und Verwertung ... 146

Literaturverzeichnis ... 149

Anhang ... 173

A.1 Pulverbettbasierte additive Fertigung mit EB-PBF und BJ ... 173
A.2 Werkstück-Substratplattenverbindung ... 175
A.3 Best-Practice-Umfrage unter AM-Dienstleistungsunternehmen ... 176
A.4 Studie »Weiterbearbeitung von additiv gefertigten Bauteilen« ... 178
A.5 Ausprägungen Bewertungskriterien für bestehende Ansätze ... 180
A.6 Projekt »Benchmarking of post-processing methods« ... 184
A.7 Aufspannoptionen und Spannprinzipe ... 185
A.8 Erweitertes Beispiel zur Bauteilbeschreibung ... 186
A.9 Auswahl einer geeigneten Prozessmodellierungssprache ... 188
A.10 Aspektverhältnisse unterschiedlicher Bearbeitungselemente ... 190
A.11 Eigenschaftstransformationen Fertigungsverfahren ... 191
A.12 Struktur Prozesskettensimulation ... 192
A.13 Fertigungszeitermittlung ... 195
A.14 Berechnungen Prozessketten-Ähnlichkeits-Performance-Matrix ... 196

Inhaltsverzeichnis

Table of Contents

1 Einleitung ... 1

1.1 Ausgangssituation und Motivation ... 1
1.2 Zielsetzung ... 3
1.3 Aufbau der Arbeit ... 4

2 Grundlagen des Betrachtungsbereichs ... 7

2.1 Definition in dieser Arbeit genutzter Begriffe ... 7
2.2 Kategorisierung additiver Fertigungstechnologien ... 11
2.3 Einsatzzweck additiver Fertigungstechnologien ... 11
2.3.1 Werkstoffe zur additiven Fertigung ... 13
2.3.2 Additive Fertigungstechnologien und Verfahrensausprägungen ... 13
2.4 Pulverbettbasierte additive Fertigungstechnologien ... 15
2.4.1 Grundlagen pulverbettbasierter additiver Fertigung ... 15
2.4.2 Alleinstellungsmerkmale pulverbettbasierter additiver Fertigung ... 19
2.4.3 Spezifische Nachbehandlung ... 21
2.5 Fertigungstechnologien zur Weiterbearbeitung ... 23
2.5.1 Kategorisierung subtraktiver Fertigungstechnologien ... 24
2.5.2 Spanende und abtragende Fertigungstechnologien ... 25
2.6 Planung von Fertigungsmitteleinsatz und -prozessketten ... 28
2.6.1 Ansätze zur Planung von Fertigungsmitteleinsatz und Fertigungsprozessketten ... 29
2.6.2 Horizontale Prozesskette bei der additiven Fertigung ... 31
2.7 Leistungsfähigkeitsvergleich additiver und subtraktiver Technologien ... 34
2.8 Zwischenfazit und Handlungsbedarf aus der Praxis ... 36

3 Analyse und Bewertung bestehender Ansätze ... 37

3.1 Methodologie zur Bewertung bestehender Forschungsansätze ... 37
3.2 Bewertungssystematik der Anforderungen an die Methodik ... 38
3.2.1 Bewertung der Bauteilanforderungsbeschreibung ... 38
3.2.2 Bewertung der Fertigungsmittelaufnahme und Technologieleistungsfähigkeitsbeurteilung ... 39
3.2.3 Bewertung der Prozesskettengenerierung und -planung ... 41
3.3 Vorstellung bestehender Ansätze ... 42
3.3.1 Ansätze zur Bauteilanforderungsbeschreibung ... 43
3.3.2 Ansätze zur Fertigungsmittelaufnahme und Technologieleistungsfähigkeitsbeurteilung ... 44
3.3.3 Ansätze zur Prozesskettengenerierung und -planung ... 46
3.4 Zwischenfazit ... 54
3.5 Bewertung bestehender Ansätze ... 54
3.6 Handlungsbedarf aus der Theorie ... 56
3.7 Konkretisierung zu Forschungsfragen ... 57

4 Konzeption der Integrationsmethodik ... 59

4.1 Angewendete Systemtechnik und Modellierung ... 59
4.2 Ordnungsrahmen der Integrationsmethodik ... 60
4.3 Konzeption der Analysephase zur Aufnahme des Status quo ... 62

4.3.1 Befragung zur Weiterbearbeitung von additiv gefertigten Werkstücken 63
4.3.2 Initiierung zur Anwendung der Integrationsmethodik 64
4.3.3 Situationsanalyse der Integrationsmethodik 65
4.4 Konzeption der Gestaltungsphase integrierter Fertigungsprozessketten 69
4.4.1 Prozesskettengenerierung 70
4.4.2 Prozesskettensimulation 72
4.5 Konzeption der Umsetzungsphase zur Prozesskettenauswahl 73
4.5.1 Prozesskettenselektion 73
4.6 Zwischenfazit 74

5 Ausgestaltung der Integrationsmethodik 77

5.1 Ausgestaltung der Initiierung zur Anwendung der Integrationsmethodik 78
5.1.1 Schaffung des Methodikverständnisses 78
5.1.2 Definition der LB-PBF-Technologie 79
5.2 Ausgestaltung der Situationsanalyse 84
5.2.1 Aufnahme der Fertigungsstruktur 84
5.2.2 Definition der Bauteilbeschreibung 90
5.2.3 Aufnahme der bestehenden Prozesskette(n) 95
5.3 Ausgestaltung der Prozesskettengenerierung 98
5.3.1 Erzeugung der Prozesskettenelemente 100
5.3.2 Gestaltung von Technologieketten 108
5.4 Ausgestaltung der Prozesskettensimulation 114
5.4.1 Erzeugung der Werkstück-Repräsentanz 114
5.4.2 Erstellung von Fertigungsfolgen 115
5.5 Ausgestaltung der Prozesskettenselektion 118
5.5.1 Kennzahlensystem zur Selektion von Fertigungsfolgen 118
5.5.2 Selektion der finalen Fertigungsfolge 121
5.6 Zwischenfazit 124

6 Validierung und kritische Reflexion der Methodik 127

6.1 Prototypische Softwareumsetzung 127
6.2 Vorgehensweise zur Validierung der Methodik 128
6.3 Fallbeispiel 1: Aeronamic B.V. 129
6.3.1 Ausgangssituation und Anwendung der Analysephase 129
6.3.2 Fazit der Methodikanwendung bei der Aeronamic B.V. 132
6.4 Fallbeispiel 2: Scheuermann + Heilig GmbH 132
6.4.1 Ausgangssituation und Anwendung der Analysephase 132
6.4.2 Anwendung der Gestaltungs- und Umsetzungsphase 134
6.4.3 Fazit der Methodikanwendung bei der Scheuermann + Heilig GmbH 137
6.5 Fallbeispiel 3: LMT Fette Werkzeugtechnik GmbH & Co. KG 137
6.5.1 Ausgangssituation und Anwendung der Analysephase 137
6.5.2 Anwendung der Gestaltungs- und Umsetzungsphase 139
6.5.3 Fazit der Methodikanwendung bei der LMT Fette Werkzeugtechnik GmbH & Co. KG 142
6.6 Kritische Reflexion 142

7 Schlussbetrachtung 145

7.1 Zusammenfassung 145

7.2 Ausblick und Verwertung ... 146

Literaturverzeichnis ... 149

Anhang ... 173

A.1 Pulverbettbasierte additive Fertigung mit EB-PBF und BJ ... 173
A.2 Werkstück-Substratplattenverbindung ... 175
A.3 Best-Practice-Umfrage unter AM-Dienstleistungsunternehmen ... 176
A.4 Studie »Weiterbearbeitung von additiv gefertigten Bauteilen« ... 178
A.5 Ergänzende bestehende Ansätze ... 180
A.6 Projekt »Benchmarking of post-processing methods« ... 184
A.7 Aufspannoptionen und Spannprinzipe ... 185
A.8 Erweitertes Beispiel zur Bauteilbeschreibung ... 186
A.9 Auswahl einer geeigneten Prozessmodellierungssprache ... 188
A.10 Aspektverhältnisse unterschiedlicher Bearbeitungselemente ... 190
A.11 Eigenschaftstransformationen Fertigungsverfahren ... 191
A.12 Struktur Prozesskettensimulation ... 192
A.13 Fertigungszeitermittlung ... 195
A.14 Berechnungen Prozessketten-Ähnlichkeits-Performance-Matrix ... 196

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

Formula Symbols and Abbreviations

Formelzeichen

a_d	mm	Kantenabstand zweier Schichten (Treppenstufeneffekt)
a_e	mm	Arbeitseingriff (Schnittbreite)
a_m	mm	mittlerere Profilhöhe (Treppenstufeneffekt)
a_p	mm	Schnitttiefe
b	mm	Breite
c_G	€	Grundkosten
c_{Pk}	€	Prozesskettenkosten
c_R	€	Rüstkosten
c_S	€	Fertigungssonderkosten
c_T	€	Transportkosten
c_Z		Kosten-Kennwert
d	mm	Durchmesser
DLZ	min	Durchlaufzeit
e		Prozesskettenelement
E_{TB}		max. Anzahl Technologien eines Technologiebündels
G_{PFf}		normierte Gewichtung fertigungsstrategisches Prozesscharakteristikum
$G_{PFf,rel}$		normierte, relative Gewichtung fertigungsstrategisches Prozesscharakteristikum
h	mm	Höhe
h_d	µm	Bahnabstand Belichtung (engl. hatch distance)
h_S	µm	Schichtstärke
j		Bearbeitungselement
J		Anzahl Bearbeitungselemente eines Werkstücks
k		Kompaktprozesskette eines Bearbeitungselements
K		Anzahl Kompaktprozessketten eines Bearbeitungselements
l	mm	Länge
m		Anzahl Kompaktprozessketten für Bearbeitungselement
M		max. Anzahl Kompaktprozessketten für Bearbeitungselement
$\bar{N}$		Kontur-Normalvektor
n		natürliche Zahl (Anzahl, laufende Nummer, auch als Index), Drehzahl
$\bar{P}$		Positionsvektor Zugangspunkt Fertigungsmittel

P_{Ff}		fertigungsstrategisches Prozesscharakteristikum
Pk_l		Prozesskettenlängenwert
$Pk_{l,eta}$		Prozesskettenlänge, etabliert
$Pk_{l,gen}$		Prozesskettenlänge, generiert
$Pk_{l,rel}$		Prozesskettenlängenvergleichswert
PkP	%	Prozesskettenperformance
PkS		Prozesskettenähnlichkeit
R		Spannweite
Ra	µm	arithmetischer Mittelwert der Oberflächenprofilordinaten (Mittenrauwert)
Rz	µm	größte Höhendifferenz des Oberflächenprofils (Rautiefe)
Sa	µm	mittlere arithmetische Höhe der skalenbegrenzten Oberfläche
S_{PFf}		Wertungssumme fertigungsstrategisches Prozesscharakteristikum
S_Z		Ziel-Strategiewert
t	mm	Tiefe
t_G	min	Grundzeit
t_H	min	Hauptzeit
t_R	min	Rüstzeit
t_T	min	Transportzeit
t_W	min	Wartezeit
t_Z		Zeit-Kennwert
T_{eta}		Anzahl Fertigungstechnologien etablierte Fertigungsfolge
T_{g3}	HRC	Werkstoffhärte nach Rockwell, Skala C
T_{gen}		Anzahl Technologien generierte Fertigungsfolge
$T_{gn,F}$		Technologiekennzahl Fertigungstechnologie, global
$T_{gn,W}$		Technologiekennzahl Werkstück, global
T_{ident}		Anzahl identischer Technologien generierte/etablierte Fertigungsfolge
$T_{ln,W}$		Technologiekennzahl Werkstück, lokal
T_{neu}		Anzahl bisher nicht auftretender Technologien einer Fertigungsfolge
TB_n		Anzahl global vorhandener Bauteiltechnologien
$Tk_{n,WTB,j}$		Anzahl alternativer Technologieketten eines Technologiebündels
T_V		Technologievarianz
v_f	m/min	Vorschubgeschwindigkeit
v_s	mm/s	Scangeschwindigkeit
w		Klassenbreite

WTB		Weiterbearbeitungstechnologiebündel
WTB_n		Anzahl Weiterbearbeitungstechnologiebündel
$\bar{x}$		Mittelwert
Z_c	%	Zieldimension Kosten
Z_S	%	Zieldimension Fertigungsstrategie
Z_t	%	Zieldimension Zeit
α	°	Drehwinkel um die x-Achse
β	°	Drehwinkel um die y-Achse
ζ	°	Neigungswinkel
θ_g		Transformation, global, bezogen auf Werkstück
$\theta_{l,n}$		Transformation, lokal, bezogen auf individuelles Bearbeitungselement
$\theta_{l,N}$		Transformation, lokal, bezogen auf gesamte Bearbeitungselemente
κ, T_{g4}	S/m	spezifische elektrische Leitfähigkeit
$\rho_{StützRel}$	%	Stützstrukturdichte im Vegleich zur erreichbaren Werkstoffdichte
σ		Standardabweichung

Abkürzungen

2,5D	zweieinhalbdimensional
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
#A	Aufspannoption
abs.	absolut
ACAM	ACAM Aachen Center for Additive Manufacturing GmbH
Al	Aluminium
AM	additive Fertigung (engl.: Additive Manufacturing)
AMF	Dateiformat für Additive Fertigung (engl.: Additive Manufacturing Format)
ASTM	American Society for Testing and Materials
aut.	automatisch
AV	Arbeitsvorbereitung
AWFM	Aachener Werkzeug- und Formenbau Management
BJ	Bindemittelauftrag (engl.: Binder Jetting)
BPMN	Geschäftsprozessmodell und -notation (engl.: Business Process Model and Notation)
CAD	Rechnerunterstütztes Konstruieren (engl.: Computer-aided Design)

CAM	Rechnerunterstützte Fertigung (engl.: Computer-aided Manufacturing)
CAx	Rechnerunterstütztes x (engl.: Computer-aided x)
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DLP	Digital Light Processing
DLZ	Durchlaufzeit
dt.	deutsch
EB-PBF	Elektronenstrahlschmelzen (engl.: Electron Beam Powder Bed Fusion)
EDM	Funkenerosion (engl.: Electrical Discharge Machining)
EN	Europäische Norm
engl.	englisch
et al.	und andere (lat.: et alii)
ext.	extern
#F	Formelement
fert.	fertigungs[…]
Ff	Fertigungsfolge
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
g	global (bezogen auf gesamtes Bauteil)
geschl.	geschlossen (bezogen auf Konturen)
h	Stunde[n]
HIP	heißisostatisches Pressen
HRC	Werkstoffhärte nach Rockwell, Skala C
HSC	Hochgeschwindigkeitsfräsen (engl.: High Speed Cutting)
HV	Werkstoffhärte nach Vickers
i. A. a.	in Anlehnung an
i. S. (v.)	im Sinne (von)
i. V. m.	in Verbindung mit
ILT	Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT
IPT	Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT
ISO	International Organization for Standardization
IT	Internationale Toleranz, auch: Grundtoleranz (engl.: International Tolerance)
IWS	Fraunhofer-Institut für Werkstoffe und Strahltechnik IWS
KI	Künstliche Intelligenz
KO	Konstruktion
konst.	konstant

l	lokal (bezogen auf einzelnes Bearbeitungselement)
lat.	lateinisch
LB-PBF	Laserstrahlschmelzen (engl.: Laser Beam Powder Bed Fusion)
LMD	Laserauftragschweißen (engl.: Laser Metal Deposition)
m	Meter
man.	manuell
max.	maximal/Maximum
min	Minute
min.	minimal/Minimum
ML	Maschinelles Lernen
NC	Numerische Steuerung (engl.: Numerical Control)
org.	organisatorisch
Pk	Prozesskette
PkP	Prozesskettenperformance
QFD	Qualitätsfunktionendarstellung (engl.: Quality Function Deployment)
QS	Qualitätssicherung
rd	rund
rel.	relativ
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
#S	Stützelement
S	Siemens
s.	siehe
S.	Seite
sic	wirklich, genau so (lat.)
SLA	Stereolithografie
SLS	Selektives Lasersintern (engl.: Selective Laser Sintering)
sog.	sogenannt
STL	Standard Triangulation Language
STP	Standard for Exchange of Product Model Data
TB	Technologiebündel
Ti	Titan
Tk	Technologiekette
UML	vereinheitlichte Modellierungssprache (engl.: Unified Modeling Language)
UV	Ultraviolett

V	Vanadium
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.
vgl.	vergleiche
vs.	versus
WB	Wärmebehandlung
WBA	WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH
WGP	Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e. V.
Ws	Werkstück
WTB	Weiterbearbeitungstechnologiebündel
WZL	Werkzeugmaschinenlabor
XML	Erweiterbare Auszeichnungssprache (engl.: Extensible Markup Language)

Kurzfassung

Abstract

Seit den frühen Entwicklungen in den achtziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts und mit zunehmender Bedeutung in den letzten Jahren avanciert die additive Fertigung zu einer Gruppe hochrelevanter Fertigungsverfahren. Die stetig wachsende Verfahrensgruppe wurde in den letzten Jahren über die Prototypenfertigung hinaus zu einem Direktfertigungsverfahren für das industrielle Umfeld weiterentwickelt. Neben den etablierten subtraktivformgebenden Fertigungsverfahren ergänzen die additiven Verfahren das Möglichkeitsportfolio der produzierenden Industrie. Die direkte Verknüpfung zwischen 3D-CAD-Modell – also virtuellem Design – und Werkstückaufbau – also der »Materialisierung« von Ideen – führt zu einer digitalen Fertigungstechnologie. Parallel existiert großes Potenzial hinsichtlich industrieller Anwendung der additiven Fertigung, unterstützt durch Mechanisierung, Automatisierung und Prozesskettenintegration. Der langfristig ökonomisch wie technologisch effektive Einsatz der additiven Fertigung kann nur gelingen, wenn diese Potenziale adressiert werden. Dem Schwerpunkt der Prozesskettenintegration widmet sich die vorliegende Arbeit, mit Fokus auf metallischen Bauteilen.

Im Gegensatz zu subtraktiven Fertigungsverfahren zur Bearbeitung von maschinenbaulichen Werkstücken sind additive Fertigungsverfahren bisher nicht hinreichend in Fertigungsprozessketten integriert. Dies ist notwendig, um typische Qualitätsanforderungen an Produkte durch sequenzielle Bearbeitung zu erreichen. Dabei ist zu beachten, dass die besonderen Eigenschaften additiv gefertigter Bauteile zu einer neuartigen Betrachtung bei der Prozesskettengestaltung führen. Gleichzeitig bietet die additive Fertigung als digitale Fertigungstechnologie Vorteile bei der Unikat- und Kleinserienfertigung und ermöglich so Individualisierung und Anpassbarkeit von Produkten. Die Prozesskettenintegration von additiver Fertigung – und damit deren Verknüpfung mit subtraktiver Fertigung – muss also auf individuelle Bauteilanforderungen reagieren können und unterschiedlichste Fertigungsmittel mit ihren technologischen Leistungsfähigkeiten berücksichtigen.

In dieser Dissertation wird eine Methode zur Beschreibung von Bauteilen und deren Anforderungen entwickelt, die den Eigenschaften additiv gefertigter Werkstücke gerecht wird und ebenso für die Weiterbearbeitung geeignet ist. Weiterhin werden bestehende Methoden zur Generierung und Gestaltung von Fertigungsprozessketten derart adaptiert und erweitert, dass additiv-subtraktive Prozessketten entwickelt werden können. Schließlich werden diese Elemente in eine gemeinsame Methodik integriert. Damit wird Fertigungsexpert·innen unabhängig von ihrer Expertise im Bereich Fertigungsplanung oder additive Fertigung ein Tool zur Verfügung gestellt, mit dem kennzahlenbasiert neue Prozessketten umgesetzt und strategische Entscheidungen zur zukünftigen Ausrichtung einer Fertigungsumgebung erleichtert werden können. Die Umsetzung in eine prototypische Software und die Validierung anhand von drei Praxisbeispielen stellt die praxisgerechte Anwendbarkeit der Methodik sicher.

Abstract

Kurzfassung

Since the early developments in the eighties of the twentieth century and increasing importance in recent years, additive manufacturing has advanced to a group of highly relevant manufacturing processes. In recent years, this steadily growing group of processes has been developed beyond prototype production into a direct manufacturing process for industrial application. In addition to the established subtractive manufacturing processes, the additive processes complement the portfolio of possibilities in industry. The direct link between 3D CAD model – i.e. virtual design – and workpiece structure – i.e. the »materialization« of ideas – leads to a digital manufacturing technology. In parallel, there is great potential for the industrial application of additive manufacturing, supported by mechanization, automation and process chain integration. The long-term economically and technologically effective use of additive manufacturing can only succeed if these potentials are addressed. The present work is dedicated to the focus of process chain integration, and in particular, concentrates on metallic components.

In contrast to subtractive manufacturing processes for the machining of mechanical components, additive manufacturing processes have not yet been sufficiently integrated into manufacturing process chains. This is necessary in order to achieve typical product quality requirements through sequential processing. The special properties of additively manufactured components lead to a novel type of consideration in the process chain design. At the same time, additive manufacturing as a digital manufacturing technology offers advantages in one-of-a-kind and small batch production and thus enables individualization and customizability of products. The process chain integration of additive manufacturing – and thus its linkage with subtractive manufacturing – has to be able to respond to individual component requirements and take into account a wide variety of manufacturing resources with their technological performance.

In this dissertation a method for the description of components and their requirements is developed, which meets the characteristics of additively manufactured workpieces and which is also suitable for further processing. Furthermore, existing methods for the generation and design of manufacturing process chains are adapted and extended in such a way that additive-subtractive process chains can be developed. Finally, these elements are integrated into a combined methodology. This provides manufacturing experts, regardless of their expertise in the field of production planning or additive manufacturing, with a tool that can be used to implement new process chains based on key figures and facilitate strategic decisions on the future orientation of a manufacturing environment. The implementation in a prototypical software and the validation on the basis of three practical examples ensures the practical applicability of the methodology.