
Light Engineering für die Praxis

Reihe herausgegeben von

C. 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>

Jan-Peer Rudolph

Cloudbasierte Potentialerschließung in der additiven Fertigung

Jan-Peer Rudolph
Fraunhofer IAPT
Hamburg, Deutschland

ISSN 2522-8447 ISSN 2522-8455 (electronic)
Light Engineering für die Praxis
ISBN 978-3-662-58262-6 ISBN 978-3-662-58263-3 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-58263-3>

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

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

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der LZN Laser Zentrum Nord GmbH/Fraunhofer-Einrichtung für additive Produktionstechnologien IAPT und dem Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik der Technischen Universität Hamburg.

Zunächst gilt mein besonderer Dank meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Claus Emmelmann, dem Leiter des Instituts für Laser- und Anlagensystemtechnik sowie der Fraunhofer-Einrichtung für additive Produktionstechnologien IAPT, für die Betreuung der Arbeit. Durch seine wohlwollende Förderung und vielfältige Unterstützung hat er maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr. Dr. h. c. Wolfgang Kersten für die Übernahme des Koreferats und Herrn Prof. Dr. Christian Lüthje für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Für die kollegiale Zusammenarbeit und die sehr gute Arbeitsatmosphäre danke ich allen Mitarbeitern des Instituts. Die Arbeit am Institut hat mir stets viel Freude bereitet und wertvolle Impulse gegeben. Mein besonderer Dank gilt Herrn Felix Güntzer, der als studentische Hilfskraft die Umsetzung des Softwareprototyps unterstützt hat. Des Weiteren danke ich Herrn Dr.-Ing. Dirk Herzog für die kritische Durchsicht der Arbeit. Frau Martina Dorfner danke ich für ihre Hilfe bei der Organisation des Promotionsverfahrens. Darüber hinaus danke ich allen ehemaligen und aktiven Kollegen für den intensiven fachlichen Austausch und die anregenden Diskussionen. Mein Dank gilt hierbei insbesondere den Herren Michael Lippert, Dr.-Ing. Markus Möhrle, Friedrich Proes, Dr.-Ing. Tobias Schmidt, Andreas Solbach und Franz Terborg. Ebenso danke ich allen studentischen Mitarbeitern, die meine Forschungsarbeit durch ihre Tätigkeiten und die Anfertigung von Bachelor- und Masterarbeiten unterstützt haben.

Der Bionic Production AG danke ich für die gemeinsame Kooperation im Rahmen des Forschungsprojekts und die Möglichkeit, die vorgenommenen Entwicklungen in die industrielle Anwendung zu bringen.

Abschließend danke ich meinen Eltern, die mir meinen bisherigen Lebensweg ermöglicht haben, und meinem Bruder. Ihr Rückhalt wirkte stets motivierend. Sie hatten immer ein offenes Ohr für mich und standen mir jederzeit unterstützend und hilfsbereit zur Seite.

Hamburg, im August 2018

Jan-Peer Rudolph

Kurzfassung

Additive Fertigung repräsentiert die vierte industrielle Revolution (Industrie 4.0) wie kaum eine andere Produktionstechnologie. Neben hohen Freiheitsgraden in der Konstruktion ermöglicht sie eine annähernd direkte Herstellung von Bauteilen aus deren CAD-Daten. Trotzdem sind in der Anwendung der Technologie zahlreiche Potentiale noch nicht erschlossen. Insbesondere die Selektion geeigneter Bauteilkandidaten erweist sich dabei häufig als aufwändiger und komplexer Prozess.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Methodik zur Potentialerschließung in der additiven Fertigung über eine cloudbasierte Plattformlösung vorgestellt. Diese hat das Ziel, durch Automatisierung und Bedienung über eine webbasierte Schnittstelle eine möglichst effiziente und zugängliche Anwendung zu schaffen. Die Methodik umfasst vier wesentliche Bestandteile: eine Prüfung auf Fertigungsrestriktionen und Konstruktionsrichtlinien, eine Angebots- und Vorkalkulation, eine Bewertung von Potentialen durch Bauteiloptimierung und einen Kostenvergleich zu den konventionellen Konkurrenzverfahren Zerspanung und Guss. Damit ermöglicht die Methodik eine integrierte Bauteilsichtung und -selektion nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Im Rahmen der Arbeit wird insbesondere das additive Fertigungsverfahren des selektiven Laserstahlschmelzens zur Herstellung metallischer Bauteile betrachtet.

Darüber hinaus wird die Architektur des prototypisch implementierten Gesamtsystems dargestellt. Neben der Analyse von Potentialen unterstützt das System die Auftragsabwicklung und dient als Schnittstelle zwischen Fertigungsdienstleister und Kunde. Die auf Basis des Prototyps vorgenommene Evaluierung zeigt die hohe Leistungsfähigkeit der Methodik, effizient, effektiv und transparent Potentiale in der additiven Fertigung zu erkennen. Somit versetzt sie Unternehmen und private Anwender in die Lage wirtschaftliche Anwendungsfälle schnell und mit hoher Validität zu erschließen.

Schlagwörter: Additive Fertigung, Bauteiloptimierung, Bauteilsichtung und -selektion, Cloudbasierte Plattform, Fertigungsrestriktionen, Industrie 4.0, Kalkulation, Konstruktionsrichtlinien, Potentialbewertung

Abstract

Additive manufacturing represents the fourth industrial revolution (Industry 4.0) more than almost any other production technology. In addition to high degrees of freedom in the design, additive manufacturing allows a nearly direct manufacturing of parts out of their CAD data. Nevertheless, numerous potentials are not yet used in the application of the technology. In particular, the selection of appropriate part candidates often proves to be a time-consuming and complex process.

This thesis addresses this issue by presenting a methodology for opening up potentials in additive manufacturing through a cloud-based platform solution. It has the intension of achieving an efficient and easy-to-use application through automation and operation via a web-based interface. The methodology includes four major elements: a checking of manufacturing restrictions and design guidelines, a quotation costing and preliminary calculation, an assessment of potentials through part optimization, and a cost comparison with the competing manufacturing processes machining and casting. Thus, the methodology enables an integrated part screening and selection according to technical and economic aspects. The considered additive manufacturing technology within this thesis is in particular the process of selective laser melting for the production of metallic components.

Furthermore, the thesis introduces the architecture of the implemented prototype system. Beside of the analysis of potentials, the system supports the order processing and serves as an interface between manufacturing service provider and customer. The evaluation, which is conducted on basis of the developed prototype, shows the great performance of the methodology for an efficient, effective, and transparent identification of potentials in additive manufacturing. This enables companies and private users to quickly tap relevant business cases with high validity.

Keywords: additive manufacturing, assessment of potentials, calculation, cloud-based platform, design guidelines, Industry 4.0, manufacturing restrictions, part optimization, part screening and selection

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|--------------|
| Vorwort | V |
| Kurzfassung | VII |
| Abstract | IX |
| Formelzeichen und Abkürzungen | XV |
| Abbildungsverzeichnis | XXIII |
| Tabellenverzeichnis | XXVII |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Cloudbasierte Systeme und Industrie 4.0 | 1 |
| 1.2 Bionic Smart Factory 4.0 | 2 |
| 1.3 Forschungsbeitrag der Arbeit | 3 |
| 1.4 Struktur der Arbeit | 5 |
| 2 Stand der Wissenschaft und Technik | 7 |
| 2.1 Additive Fertigungsverfahren | 7 |
| 2.1.1 Grundlagen und Begriffe | 7 |
| 2.1.2 Verfahrensübersicht | 8 |
| 2.1.3 Selektives Laserstrahlschmelzen | 10 |
| 2.1.4 Selektives Lasersintern | 12 |
| 2.1.5 Nachbearbeitung | 13 |
| 2.2 Datenvorbereitung und digitale Prozesskette | 13 |
| 2.2.1 Geometriedatenformate | 13 |
| 2.2.2 Digitale Prozesskette | 16 |
| 2.2.3 Datenvorbereitung | 17 |
| 2.2.4 Cloudbasierte Softwaredienste | 19 |
| 2.3 Angebots- und Vorkalkulation | 20 |
| 2.3.1 Grundlagen der Angebotskalkulation | 20 |
| 2.3.2 Kostenmodelle der additiven Fertigung | 28 |
| 2.3.3 Kostenmodelle der Zerspanung | 32 |
| 2.3.4 Kostenmodelle für Gussteile | 33 |
| 2.4 Bauteil- und Produktoptimierung | 34 |
| 2.4.1 Bauteiloptimierung im Kontext additiver Fertigung | 34 |
| 2.4.2 Topologieoptimierung | 35 |
| 2.4.3 Cloudbasiertes Computer-Aided Engineering | 37 |
| 2.4.4 Konstruktionsrichtlinien | 38 |
| 2.4.5 Leichtbaupotential | 39 |
| 2.5 Potentialbewertung, Bauteilauswahl und Entscheidungsunterstützung | 40 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3 | Aufgabenstellung | 45 |
| 3.1 | Forschungsbedarf | 45 |
| 3.1.1 | Anforderungen | 45 |
| 3.1.2 | Wissenschaftliche Arbeiten | 46 |
| 3.1.3 | Kommerzielle Systeme | 47 |
| 3.2 | Zielsetzung und Vorgehensweise | 47 |
| 3.3 | Einordnung in die Prozesskette der additiven Fertigung | 49 |
| 4 | Prüfung auf Fertigungsrestriktionen und Konstruktionsrichtlinien | 53 |
| 4.1 | Fertigungsrestriktionen und Konstruktionsrichtlinien | 54 |
| 4.2 | Größenüberprüfung | 57 |
| 4.2.1 | Komplette Punktwolke | 58 |
| 4.2.2 | Bounding Box | 59 |
| 4.2.3 | Umgebende Kugel | 59 |
| 4.2.4 | Mehrstufige Verfahren | 61 |
| 4.3 | Überprüfung auf Konstruktionsrichtlinien | 61 |
| 4.3.1 | Erkennung kritischer Strukturen | 62 |
| 4.3.2 | Vollständige Überprüfung | 65 |
| 4.3.3 | Teilweise Überprüfung | 66 |
| 4.4 | Evaluierung | 68 |
| 4.4.1 | Größenüberprüfung | 68 |
| 4.4.2 | Überprüfung auf Konstruktionsrichtlinien | 75 |
| 5 | Angebots- und Vorkalkulation | 81 |
| 5.1 | Herausforderungen einer webbasierten Kalkulation | 81 |
| 5.2 | Kalkulationsmethodik | 83 |
| 5.2.1 | Struktur der Kostenkalkulation | 84 |
| 5.2.2 | Grundlagen der Kalkulation | 86 |
| 5.2.3 | Auswertung der Geometriedaten | 90 |
| 5.3 | Materialkosten | 94 |
| 5.4 | Kosten der Arbeits- und Datenvorbereitung | 95 |
| 5.4.1 | Arbeitsplanung und -steuerung | 95 |
| 5.4.2 | Datenvorbereitung | 96 |
| 5.4.3 | Vorbereitung der Nachbearbeitung | 96 |
| 5.5 | Fertigungskosten | 97 |
| 5.5.1 | Rüsten | 97 |
| 5.5.2 | Generierung | 98 |
| 5.5.3 | Kapazitätsauslastung | 101 |
| 5.5.4 | Nachbearbeitung | 106 |
| 5.5.5 | Restfertigungsgemeinkosten | 109 |
| 5.6 | Vertriebs- und Verwaltungskosten | 109 |
| 5.7 | Preisbildung | 110 |
| 5.8 | Evaluierung | 110 |
| 5.8.1 | Effizienz | 111 |
| 5.8.2 | Effektivität | 113 |
| 5.8.3 | Transparenz | 116 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.9 | Selbstlernende Kalkulation | 117 |
| 5.10 | Übertragung auf selektives Lasersintern | 118 |
| 6 | Potentialbewertung von Bauteiloptimierungen | 121 |
| 6.1 | Webbasierte Finite-Elemente-Methode | 122 |
| 6.2 | Potentialbewertung | 126 |
| 6.3 | Kostenermittlung | 128 |
| 6.4 | Evaluierung | 129 |
| 6.4.1 | Effizienz | 131 |
| 6.4.2 | Effektivität | 132 |
| 6.4.3 | Transparenz | 133 |
| 6.4.4 | Vernetzung | 134 |
| 6.5 | Einsatz in der Produktneuentwicklung | 135 |
| 7 | Bauteilsichtung und -selektion | 137 |
| 7.1 | Vorgehensmodell | 137 |
| 7.2 | Vergleichskalkulation | 139 |
| 7.2.1 | Additive Fertigung | 141 |
| 7.2.2 | Zerspanung | 146 |
| 7.2.3 | Guss | 148 |
| 7.3 | Evaluierung | 150 |
| 7.3.1 | Effizienz | 150 |
| 7.3.2 | Effektivität | 150 |
| 7.3.3 | Transparenz | 151 |
| 7.4 | Anwendungsbeispiele | 152 |
| 8 | Systemarchitektur und prototypische Implementierung | 155 |
| 8.1 | Verteilte Systeme und Cloud-Computing | 155 |
| 8.2 | Methodik der cloudbasierten Potentialerschließung | 156 |
| 8.3 | Architekturmodell einer Plattform zur cloudbasierten Potentialerschließung | 157 |
| 8.4 | Benutzeroberfläche | 158 |
| 8.5 | Applikationslogik | 160 |
| 8.6 | Datenschicht | 166 |
| 9 | Zusammenfassung und Ausblick | 169 |
| 9.1 | Zusammenfassung | 169 |
| 9.2 | Ausblick | 170 |
| | Literaturverzeichnis | 173 |

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

| Bezeichnung | Beschreibung | Einheit |
|-----------------------------|--|-----------------|
| α | Winkelschrittweite | $^\circ$ |
| α_0 | Regressionskonstante zur Abschätzung der Auslastung des Beschichtungsraums | - |
| α_1 | Regressionskoeffizient zur Abschätzung der Auslastung des Beschichtungsraums | $1/mm$ |
| α_{ggb} | Grenzwert zur Bestimmung gegenüberliegender Dreiecksfacetten | $^\circ$ |
| β_1, β_2 | Regressionskoeffizienten zur Abschätzung der Aufbauhöhe | - |
| γ_1 | Regressionskoeffizient zur Abschätzung der Fertigungseinzelkosten eines Gussvorgangs | €/mm^3 |
| γ_2, γ_3 | Regressionskoeffizienten zur Abschätzung der Fertigungseinzelkosten eines Gussvorgangs | €/mm |
| ρ_{AMat} | Dichte des Ausgangsmaterials | g/cm^3 |
| ρ_{Mat} | Dichte des verwendeten Werkstoffs | g/cm^3 |
| ρ_{ZMat} | Dichte des Zielmaterials | g/cm^3 |
| $\bar{\sigma}$ | mittlere Spannung in einem Bauteil | Pa |
| σ_i | vorhandene Spannung im Element i | Pa |
| σ_{Max} | maximal zulässige Spannung des Materials | Pa |
| θ_i | realer Wert des i -ten Datenpunkts | - |
| $\hat{\theta}_i$ | abgeschätzter Wert des i -ten Datenpunkts | - |
| a, b, c | Seitenlängen | mm |
| $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ | Ortsvektoren | - |
| $a_{BP,A}$ | durchschnittlicher Anteil der durch ein Bauteil auf der Bauplattform belegten Fläche zur Bauteiloberfläche | - |
| a_{BSR} | volumenmäßiger Anteil des Bauteils am Beschichtungsraum | - |
| A_{BT} | Oberfläche des Bauteils | mm^2 |
| $A_{BT,BP}$ | Anbindungsfläche des Bauteils an der Bauplattform | mm^2 |
| A_{Δ} | Fläche einer Dreiecksfacette | mm^2 |
| $A_{\Delta,i}$ | Fläche der i -ten Dreiecksfacette | mm^2 |
| AF | Auslastungsfaktor | - |
| AF_{BT} | Auslastungsfaktor der Bauteilgeometrie bei Verwendung des Zielmaterials | - |
| a_{Fkt} | Anteil an zu bearbeitenden Funktionsflächen an der Gesamtoberfläche des Bauteils | - |

| Bezeichnung | Beschreibung | Einheit |
|-----------------------|---|----------------|
| \overline{AF}_{Opt} | mittlerer Auslastungsfaktor für additiv gefertigte, strukturoptimierte Bauteile | - |
| AK_J | jährliche kalkulatorische Abschreibungen | € |
| a_{Schw} | Anteil für Pulverschwind | - |
| A_{Sup} | Bauteiloberfläche, die durch Supportstrukturen belegt ist | mm^2 |
| $a_{Sup,A}$ | durchschnittlicher Anteil der Supportfläche an der Bauteiloberfläche | - |
| $a_{Sup,V}$ | durchschnittlicher Anteil des Supportvolumens am Bauteilvolumen | - |
| b_{BR} | Breite des Bauraums | mm |
| $b_{GF,BT}$ | Breite der Grundfläche des Bauteils | mm |
| b_{RB} | Breite des Rohblocks | mm |
| BSK_J | jährliche Kosten für Betriebsstoffe | € |
| BVP | Barverkaufspreis | € |
| d_{BJ} | durchschnittliche Auslastung eines Baujobs | - |
| d_{BSR} | durchschnittliche Auslastung des Beschichtungsraums | - |
| dim_{BT} | Abmessungen eines Bauteils | mm |
| d_{maxEck} | Abstand des Dreiecksmittelpunktes zum am weitesten entfernten Eckpunkt | mm |
| d_{min} | Mindestabstand zwischen den Bauteilen und zu den Plattformrändern | mm |
| d_{Rest} | Auslastung des verbleibenden Raums der Baujobs | - |
| d_{SP} | Auslastung der Baujobs in der Serienfertigung | - |
| EK_J | jährliche Energiekosten | € |
| EK_{KS} | Einzelkosten eines Auftrags in einer Kostenstelle | € |
| FEK | Fertigungseinzelkosten | € |
| FEK_{AVO} | Fertigungseinzelkosten für einen Arbeitsvorgang | € |
| FEK_{DE} | Fertigungseinzelkosten für das Drahterodieren | € |
| FEK_{DV} | Fertigungseinzelkosten für die Datenvorbereitung | € |
| FEK_{Fr} | Fertigungseinzelkosten für das Fräsen | € |
| FEK_{Gen} | Fertigungseinzelkosten für das Generieren | € |
| $FEK_{Gen,BP}$ | Fertigungseinzelkosten für das Vorbereiten der Bauplattform | € |
| $FEK_{Gen,Nach}$ | Fertigungseinzelkosten für das Nachbereiten bzw. Abrüsten der Generierung | € |
| $FEK_{Gen,R}$ | Fertigungseinzelkosten für das Rüsten der Generieranlage | € |
| $FEK_{Gen,Vor}$ | Fertigungseinzelkosten für das Vorbereiten bzw. Aufrüsten der Generierung | € |

| Bezeichnung | Beschreibung | Einheit |
|--------------------|---|-------------------|
| FEK_{Gu} | Fertigungseinzelkosten für den Gussvorgang im Feinguss | € |
| FEK_{SE} | Fertigungseinzelkosten für das Supportentfernen | € |
| FEK_{Str} | Fertigungseinzelkosten für die Oberflächenbehandlung durch Sandstrahlen | € |
| FEK_{WB} | Fertigungseinzelkosten für die Wärmebehandlung | € |
| FK | Fertigungskosten | € |
| GF_{BR} | Grundfläche des Bauraums bzw. Fläche der Bauplattform | mm^2 |
| GF_{BT} | Grundfläche eines Bauteils einschließlich Mindestabstand | mm^2 |
| GK_{KS} | Gemeinkosten eines Auftrags in einer Kostenstelle | € |
| $GK_{KS,Per}$ | Gemeinkosten einer Kostenstelle im Laufe einer Periode | € |
| g_{max} | Maximum der durch Richtlinien festgelegten Grenzwerte | mm |
| h_{BR} | Höhe des Bauraums | mm |
| h_{Gen} | Aufbauhöhe eines Bauteils | mm |
| HK | Herstellkosten | € |
| h_{Max} | maximale Aufbauhöhe im Bauraum | mm |
| $h_{Max,i}$ | maximale Aufbauhöhe im Baujob i | mm |
| h_{RB} | Höhe des Rohblocks | mm |
| h_S | Schichtdicke | μm |
| IK_J | jährliche Instandhaltungs- und Reparaturkosten | € |
| K_{BJ} | Kosten des gesamten Baujobs | € |
| K_{BT} | Kosten eines Bauteils | € |
| K_{KS} | Kosten eines Auftrags in einer Kostenstelle | € |
| k_{Mh} | Maschinenstundensatz | €/h |
| $k_{Mh,DE}$ | Maschinenstundensatz der Drahterodiermaschine | €/h |
| $k_{Mh,Fr}$ | Maschinenstundensatz der Fräsmaschine | €/h |
| $k_{Mh,Gen}$ | Maschinenstundensatz der Generieranlage | €/h |
| $k_{Mh,Str}$ | Maschinenstundensatz der Strahlmaschine | €/h |
| k_{Ph} | Personenstundensatz | €/h |
| $k_{Ph,Fr}$ | Personenstundensatz beim Fräsen | €/h |
| $k_{Ph,SE}$ | Personenstundensatz beim Supportentfernen | €/h |
| $k_{Ph,Str}$ | Personenstundensatz beim Sandstrahlen | €/h |
| k_{Plv} | Pulverpreis | €/kg |
| k_{RB} | Rohblockpreis | €/kg |
| k_{WB} | volumenbezogener Kostensatz für die Wärmebehandlung | €/mm ³ |

| Bezeichnung | Beschreibung | Einheit |
|--------------------|---|----------------|
| l_{BR} | Länge des Bauraums | mm |
| $l_{GF,BT}$ | Länge der Grundfläche des Bauteils | mm |
| l_{RB} | Länge des Rohblocks | mm |
| m | Masse | kg |
| M | Auslastung einer Maschine für einen Baujob | - |
| m_{BT} | Masse der Ausgangsgeometrie bei Verwendung des Ausgangsmaterials | kg |
| $m_{BT,ZMat}$ | Masse der Ausgangsgeometrie bei Verwendung des Zielmaterials | kg |
| MEK | Materialeinzelkosten | € |
| MEK_{Fr} | Materialeinzelkosten eines Bauteils bei spanender Fertigung | € |
| MEK_{Gen} | Materialeinzelkosten eines Bauteils bei generativer Herstellung | € |
| MG | Minimalgewicht | kg |
| MGK | Materialgemeinkosten | € |
| MK | Materialkosten | € |
| m_{Opt} | voraussichtliche Masse der optimierten Geometrie bei Verwendung des Zielmaterials | kg |
| n_{BJ} | Anzahl an Baujobs | - |
| n_{BT} | Stückzahl eines Bauteils | - |
| $n_{BT,BJ}$ | Anzahl an Bauteilen pro Baujob | - |
| p_{BT} | Anteil der für die Produktion eines Bauteils eingenommenen Fläche an der Gesamtfläche | - |
| PK_J | jährliche Personalkosten | € |
| P_{Opt} | Potential einer Bauteiloptimierung | - |
| Q_{End} | Geschwindigkeit der Endbearbeitung von Funktionsflächen | mm^2/min |
| Q_{Stl} | Geschwindigkeit der Oberflächenbearbeitung beim Schlichten | mm^2/min |
| Q_{Spp} | Volumenabtragrate beim Schruppen | mm^3/min |
| $RF GK$ | Restfertigungsgemeinkosten | € |
| RK_J | jährliche Raumkosten | € |
| r_{Prfg} | Radius zur Ermittlung der zu prüfenden Teilräume | mm |
| SEF | Sondereinzelkosten der Fertigung | € |
| SK | Selbstkosten | € |
| t_a | Ausführungszeit | min |
| t_{BL} | Belichtungszeit | h |
| t_{BS} | Beschichtungszeit | h |
| t_{DE} | Zeit für das Drahterodieren | h |
| t_{End} | Zeit für die Endbearbeitung | h |
| t_{er} | Erholungszeit | min |
| t_{Fr} | Zeit für die Fräsbearbeitung | h |

| Bezeichnung | Beschreibung | Einheit |
|--------------------|---|-------------------------------------|
| t_g | Grundzeit | <i>min</i> |
| t_{Gen} | Generierzeit | <i>h</i> |
| t_h | Hauptzeit | <i>min</i> |
| T_{MJ} | jährliche Nutzungszeit | <i>h</i> |
| t_n | Nebenzeit | <i>min</i> |
| T_{PJ} | jährliche Netto-Arbeitszeit | <i>h</i> |
| t_r | Rüstzeit | <i>min</i> |
| t_{rer} | Rüsterholungszeit | <i>min</i> |
| t_{rg} | Rüstgrundzeit | <i>min</i> |
| t_{rv} | Rüstverteizeit | <i>min</i> |
| t_s | Zeit für einen Pulverauftrag | <i>s</i> |
| t_{SE} | Zeit für das Entfernen der Supportstrukturen | <i>min</i> |
| t_{Slr} | Zeit für das Schlichten | <i>h</i> |
| t_{Spp} | Zeit für das Schruppen | <i>h</i> |
| t_{Str} | Zeit für das Sandstrahlen | <i>min</i> |
| t_v | Verteilzeit | <i>min</i> |
| $V_{AL,BJ}$ | Gesamtvolumen der im Baujob enthaltenen Teile, auch als Auslastungsvolumen bezeichnet | <i>mm</i> ³ |
| $V_{AL,BJ,i}$ | genutztes Volumen des Baujobs <i>i</i> | <i>mm</i> ³ |
| $V_{AL,BJ,Per}$ | Summe des genutzten Volumens in Baujobs im Laufe einer Periode | <i>mm</i> ³ |
| $V_{AL,BSR}$ | durchschnittlich genutztes Volumen des Beschichtungsraums | <i>mm</i> ³ |
| v_{AR} | durchschnittliche Gesamtaufbaurrate mit Belichtung und Beschichtung | <i>cm</i> ³ / <i>h</i> |
| $v_{AR,BL}$ | durchschnittliche Aufbaurrate der Belichtung ohne Beschichtung | <i>cm</i> ³ / <i>h</i> |
| $V_{BJ,Per}$ | Summe der Bauräume von Baujobs im Laufe einer Periode | <i>mm</i> ³ |
| V_{BT} | Volumen eines Bauteils | <i>mm</i> ³ |
| $V_{BT,i}$ | Volumen des Bauteils <i>i</i> | <i>mm</i> ³ |
| v_{DE} | Trenngeschwindigkeit beim Drahterodieren | <i>mm</i> ² / <i>min</i> |
| V_i | Volumen des Elementes <i>i</i> | <i>mm</i> ³ |
| V_{Opt} | abgeschätztes Volumen des optimierten Bauteils | <i>mm</i> ³ |
| V_{RB} | Volumen des Rohblocks | <i>mm</i> ³ |
| v_{SE} | durchschnittliche Bearbeitungsgeschwindigkeit für manuelle Supportentfernung | <i>mm</i> ² / <i>min</i> |
| V_{Spat} | Volumen eines Spats | <i>mm</i> ³ |
| v_{Str} | durchschnittliche Bearbeitungsgeschwindigkeit für das Sandstrahlen | <i>mm</i> ² / <i>min</i> |
| V_{Sup} | Volumen der benötigten Supportstrukturen | <i>mm</i> ³ |
| V_{Tetr} | Volumen eines Tetraeders | <i>mm</i> ³ |
| $V_{Tetr,i}$ | Volumen des aufgespannten Tetraeders der <i>i</i> -ten Dreiecksfacette | <i>mm</i> ³ |

| Bezeichnung | Beschreibung | Einheit |
|--------------------|---|----------------|
| VVK | Vertriebs- und Verwaltungskosten | € |
| WK_j | jährliche Werkzeugkosten | € |
| x_1, \dots, x_n | X-Koordinaten einer Punktmenge | - |
| $X_{Min,Max}$ | Menge mit Minimum und Maximum der X-Koordinaten | - |
| z_{DV} | Zuschlagssatz für die Datenvorbereitung | - |
| z_{er} | Zuschlagssatz für Erholungszeit | - |
| z_G | Gewinnzuschlagssatz | - |
| $z_{Gen,R}$ | Zuschlagssatz für Rüstkosten bei der Generierung | - |
| ZK_j | jährliche kalkulatorische Zinsen | € |
| z_{KS} | Zuschlagssatz für die Gemeinkosten einer Kostenstelle | - |
| $Z_{KS,Per}$ | Zuschlagsbasis, z. B. kumulierte Einzelkosten einer Kostenstelle im Laufe einer Periode | € |
| z_{MGK} | Zuschlagssatz der Materialgemeinkosten | - |
| z_{RFGK} | Zuschlagssatz für Restfertigungsgemeinkosten | - |
| z_v | Zuschlagssatz für Verteilzeit | - |
| z_{VVK} | Zuschlagssatz für Vertriebs- und Verwaltungskosten | - |

Abkürzungen

| Bezeichnung | Beschreibung |
|--------------------|--|
| 3DP | 3D Printing (3D-Drucken) |
| 3MF | 3D Manufacturing Format |
| AABB | Axis-Aligned Bounding Box |
| AM | Additive Manufacturing |
| AMF | Additive Manufacturing File Format |
| API | Application Programming Interface (Programmierschnittstelle) |
| ASCII | American Standard Code for Information Interchange |
| BB | Bounding Box |
| B-Rep | Boundary Representation |
| BSF | Bionic Smart Factory |
| BT | Bauteil |
| CAD | Computer-Aided Design |
| CAE | Computer-Aided Engineering |
| CAM | Computer-Aided Manufacturing |
| CCRC | Cabin Crew Rest Compartment |
| CLI | Common Layer Interface |
| CNC | Computerized Numerical Control (Rechnergestützte numerische Steuerung) |
| CRM | Customer-Relationship-Management |
| CSG | Constructive Solid Geometry |
| DIN | Deutsches Institut für Normung |
| EBM | Electron Beam Melting (Elektronenstrahlschmelzen) |
| ERP | Enterprise-Resource-Planning |
| FCRC | Flight Crew Rest Compartment |
| FDM | Fused Deposition Modeling |
| FEM | Finite-Elemente-Methode |
| FMC | Fundamental Modeling Concepts |
| HIP | Heißisostatisches Pressen |
| HTML | Hypertext Markup Language |
| HTTPS | Hypertext Transfer Protocol Secure |
| IaaS | Infrastructure as a Service |
| ISO | International Organization for Standardization (Internationale Organisation für Normung) |
| IT | Informationstechnologie |
| JSF | Java Server Faces |
| LBM | Laser Beam Melting |
| LLM | Layer Laminate Manufacturing |
| LMD | Laser Metal Deposition (Laserauftragschweißen) |
| LZN | LZN Laser Zentrum Nord GmbH |
| MaaS | Manufacturing as a Service |
| MAPE | Mean Absolute Percentage Error (mittlerer absoluter relativer Fehler) |

| Bezeichnung | Beschreibung |
|--------------------|---|
| ME | Mean Error (mittlerer vorzeichenbehafteter Fehler) |
| MES | Manufacturing Execution System |
| MSE | Mean Squared Error (mittlerer quadratischer Fehler) |
| MVC | Model-View-Controller |
| ORM | Object-Relational Mapping (Objektrelationale Abbildung) |
| PaaS | Platform as a Service |
| REFA | Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung |
| RM | Rapid Manufacturing |
| RP | Rapid Prototyping |
| RT | Rapid Tooling |
| SaaS | Software as a Service |
| SIMP | Solid Isotropic Material with Penalization |
| SLA | Stereolithografie |
| SLI | Slice Layer Interface |
| SLM | Selective Laser Melting (Selektives Laserstrahlschmelzen) |
| SLS | Selective Laser Sintering (Selektives Lasersintern) |
| SMTP | Simple Mail Transfer Protocol |
| SQL | Structured Query Language |
| SSL | Secure Sockets Layer |
| STEP | Standard for the Exchange of Product Model Data |
| STL | Standard Tessellation Language |
| UML | Unified Modeling Language |
| VDI | Verein Deutscher Ingenieure |
| XML | Extensible Markup Language |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Einordnung der Arbeit in das Konzept der BSF 4.0, in Anlehnung an [57] | 3 |
| 2.1 | Grundprinzip der additiven Fertigung mittels SLM, in Anlehnung an [150] | 10 |
| 2.2 | Anordnung von Bauteilen im Bauraum bei SLS und SLM, schematische Darstellung | 12 |
| 2.3 | Beispielhafter Inhalt einer STL-Datei im ASCII-Format | 14 |
| 2.4 | Digitale Prozesskette in der additiven Fertigung einschließlich beispielhaft genutzter Softwareprodukte | 16 |
| 2.5 | Kalkulationsformen in Abhängigkeit vom Kalkulationszeitpunkt in der Wertschöpfungskette, in Anlehnung an [202] | 21 |
| 2.6 | Spannungsfeld der Preisbildung, in Anlehnung an [227] | 27 |
| 2.7 | Konventionelle und optimierte Konstruktion eines Sekundärstrukturelements aus dem Flugzeugbau, CAD-Dateien entstammen [137] | 35 |
| 2.8 | Ablauf des Optimierungsprozesses nach SIMP-Verfahren, in Anlehnung an [23,114] | 36 |
| 3.1 | Einordnung und Übersicht der Aufgabenstellung | 49 |
| 3.2 | Prozesskette zur Teilefertigung mittels SLM entlang der Unternehmensfunktionen und deren Untergliederung in Subprozesse | 52 |
| 4.1 | Formular zum Hochladen eines Bauteils im Rahmen der Auftragsannahme über die Cloud-Plattform | 54 |
| 4.2 | Fehlerhaft aufgebaute Versuchskörper aus TiAl6V4, ausschnittsweise Darstellung | 55 |
| 4.3 | Routine zur Größenüberprüfung | 58 |
| 4.4 | Kugel zur Beschreibung des minimal aufbaubaren Raums | 60 |
| 4.5 | Veranschaulichung der Definition zweier gegenüberliegender Dreiecksfacetten | 63 |
| 4.6 | Erkennung von Wandungen und Spalten | 63 |
| 4.7 | Unterscheidung zwischen geraden und gekrümmten Strukturen | 64 |
| 4.8 | Erkennung von Zylindern und Bohrlöchern | 65 |
| 4.9 | Rekursive Unterteilung des Überprüfungsraums exemplarisch für einen Teilraum | 66 |
| 4.10 | Unterteilung des Überprüfungsraums und Auswahl der zu überprüfenden Teilräume für eine Facette, zweidimensionale Darstellung | 67 |
| 4.11 | Szenarien zur Evaluierung der Größenüberprüfung | 69 |
| 4.12 | Laufzeiten der Größenüberprüfung für die vier Szenarien mit variierender Facettenanzahl | 71 |

| | | |
|------|--|-----|
| 4.13 | Durchschnittliche Anzahl an geprüften Punkten pro Rotation für die vier Szenarien mit variierender Facettenanzahl | 72 |
| 4.14 | Anteil des Pre-Processings an der Gesamtlaufzeit für die vier Szenarien mit variierender Facettenanzahl | 73 |
| 4.15 | Anzahl der im Worst Case zu prüfenden Punkte pro Rotation für die vier Szenarien mit variierender Facettenanzahl | 74 |
| 4.16 | Testkörper zur Evaluierung der Überprüfung von Bauteilen auf Wanddicken, Spaltmaße, Zylinder- und Bohrlochdurchmesser, CAD-Dateien entstammen [136] | 76 |
| 4.17 | Laufzeiten der Überprüfung auf Konstruktionsrichtlinien für die ausgewählten Testkörper mit variierender Facettenanzahl | 77 |
| 4.18 | Erkannte kritische Bereiche in der Prüfung von TiAl6V4 auf Wanddicken, Spaltmaße, Bohrloch- und Zylinderdurchmesser | 79 |
| 4.19 | Erkannte kritische Bereiche bei restriktiver und weniger restriktiver Konfiguration der Überprüfungsroutine | 79 |
| 4.20 | Ergebnisse der Überprüfung eines Strukturbauteils aus dem Flugzeugbau auf Wandstärken | 79 |
| 5.1 | Bestell- und Bauteildetailansicht der Cloud-Plattform | 82 |
| 5.2 | Abhängigkeit der Stückkosten je Bauteil von der Baujobauslastung, Durchschnittswerte aus [79] | 83 |
| 5.3 | Struktur zur Berechnung der Herstellkosten für die additive Fertigung | 86 |
| 5.4 | Bounding Box eines Bauteils | 91 |
| 5.5 | Berechnung des Volumens eines Geometrieobjekts im STL-Format, in Anlehnung an [240] | 92 |
| 5.6 | Beschichtungsraum eines Bauteils | 100 |
| 5.7 | Analyse der Aufbauhöhe von Bauteilen in 25 abgeschlossenen Baujobs | 103 |
| 5.8 | Analyse der niedrigsten und höchsten Aufbauhöhe in 25 abgeschlossenen Baujobs | 103 |
| 5.9 | Analyse der Auslastung von Bauräumen in Abhängigkeit von der Aufbauhöhe in 25 abgeschlossenen Baujobs | 104 |
| 5.10 | Analyse der Bearbeitungsgeschwindigkeit für manuelle Supportentfernung | 108 |
| 5.11 | Umstellung der manuellen Angebotskalkulation auf ein webbasiertes Verfahren | 112 |
| 5.12 | Vergleich der Nachkalkulation mit den Ergebnissen der Vorkalkulation unter Nutzung des durchschnittlichen Gesamtauslastungsfaktors als 1. Kalkulationsvariante | 115 |
| 5.13 | Vergleich der Nachkalkulation mit den Ergebnissen der Vorkalkulation unter Nutzung des Vorhersagemodells für die differenzierte, bauteilabhängige Kapazitätsauslastung als 2. Kalkulationsvariante | 115 |

| | | |
|------|---|-----|
| 5.14 | Vergleich der Nachkalkulation mit den Ergebnissen der Vorkalkulation unter Nutzung des Vorhersagemodells für die Aufbauhöhe als 3. Kalkulationsvariante | 116 |
| 5.15 | Ergebnisansicht der implementierten Angebotsberechnung | 117 |
| 5.16 | Konzept einer selbstlernenden Kalkulation für die additive Fertigung | 118 |
| 6.1 | Benutzerschnittstelle der webbasierten FEM | 121 |
| 6.2 | Ablauf und Architektur der webbasierten FEM | 122 |
| 6.3 | Bauteil nach der Vernetzung | 123 |
| 6.4 | Bauteil mit eingebrachten Lasten (rot) und Lagerbedingungen (blau) | 124 |
| 6.5 | Ergebnisansicht der FEM-Berechnung | 125 |
| 6.6 | Lauf- und Bearbeitungszeit der webbasierten FEM zur Potentialbewertung | 131 |
| 6.7 | Vergleich der realen und vorhergesagten Gewichtsreduktion auf Basis der konventionellen Bauteilgeometrie | 132 |
| 6.8 | Spannungsverlauf beim FCRC-Bracket als Ergebnis der FEM-Berechnung ohne (a) und mit einer Filterspannung von 20 MPa (b) und 60 MPa (c) | 133 |
| 6.9 | Verhalten von Auslastungsfaktor und Bearbeitungszeit in Abhängigkeit von der Anzahl an Elementen | 134 |
| 6.10 | Ergebnisse der FEM-Berechnung für den Bauraum des FCRC-Brackets | 136 |
| 6.11 | Vergleich des realen und vorhergesagten Bauteilgewichts auf Basis des Bauraums | 136 |
| 7.1 | Vorgehensmodell zur Bauteilsichtung und -selektion | 138 |
| 7.2 | Benutzereingabe der Vergleichskalkulation | 140 |
| 7.3 | Ausrichtung der Bounding Box von Bauteilen entlang der Ausrichtung oder Z-Achse bei 54 gefertigten Bauteilen | 142 |
| 7.4 | Struktur zur Berechnung der Herstellkosten für die Zerspanung | 146 |
| 7.5 | Struktur zur Berechnung der Herstellkosten für den Guss | 149 |
| 7.6 | Vergleich der Nachkalkulation mit den Ergebnissen der Vorkalkulation für die Fräszeit | 151 |
| 7.7 | Vergleich der Nachkalkulation mit den Ergebnissen der Vorkalkulation für die Kosten des Gussvorgangs | 152 |
| 7.8 | Ergebnisansicht der Vergleichskalkulation am Beispiel der Zerspannung | 153 |
| 7.9 | Graphische Darstellung des Kostenvergleichs der Fertigungsverfahren für verschiedene Stückzahlen | 153 |
| 8.1 | Konzept und Ablauf einer cloudbasierten Potentialerschließung | 156 |
| 8.2 | Kommunikation zwischen Plattform, Kunde und Fertigungsdienstleister, schematische Darstellung | 158 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 8.3 | Architektur des entwickelten Gesamtsystems einschließlich verwendeter Technologien, Darstellung als FMC-Blockdiagramm . . . | 159 |
| 8.4 | Aufbau des Front-Ends, Darstellung als UML-Paketdiagramm . . . | 161 |
| 8.5 | Ablauf und Methodenaufrufe beim Hochladen eines Bauteils, Darstellung als UML-Sequenzdiagramm | 163 |
| 8.6 | Zusammenhang der Datenstrukturen in der Kalkulation, Darstellung als UML-Klassendiagramm | 164 |
| 8.7 | Verknüpfung der Klassen Kunde, Nutzer und Rolle, Darstellung als UML-Klassendiagramm | 165 |
| 8.8 | Zusammenhang der Datenstrukturen in der Datenschicht, Darstellung als UML-Klassendiagramm | 166 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|---|-----|
| 2.1 | Schema einer differenzierenden Zuschlagskalkulation, in Anlehnung an [172,202] | 25 |
| 4.1 | Übersicht der ausgewählten Fertigungsrestriktionen und Konstruktionsrichtlinien zur automatisierten Überprüfung, schematische Darstellungen aus [112] | 56 |
| 4.2 | Grenzwerte der Fertigungsrestriktionen und Konstruktionsrichtlinien für PA12 und TiAl6V4, Werte entnommen aus [112,225] . . . | 57 |
| 5.1 | Übersicht der Kalkulationsparameter | 85 |
| 6.1 | BauteilAuswahl zur Evaluierung der Potentialbewertung, CAD-Dateien entstammen [137,197] | 130 |